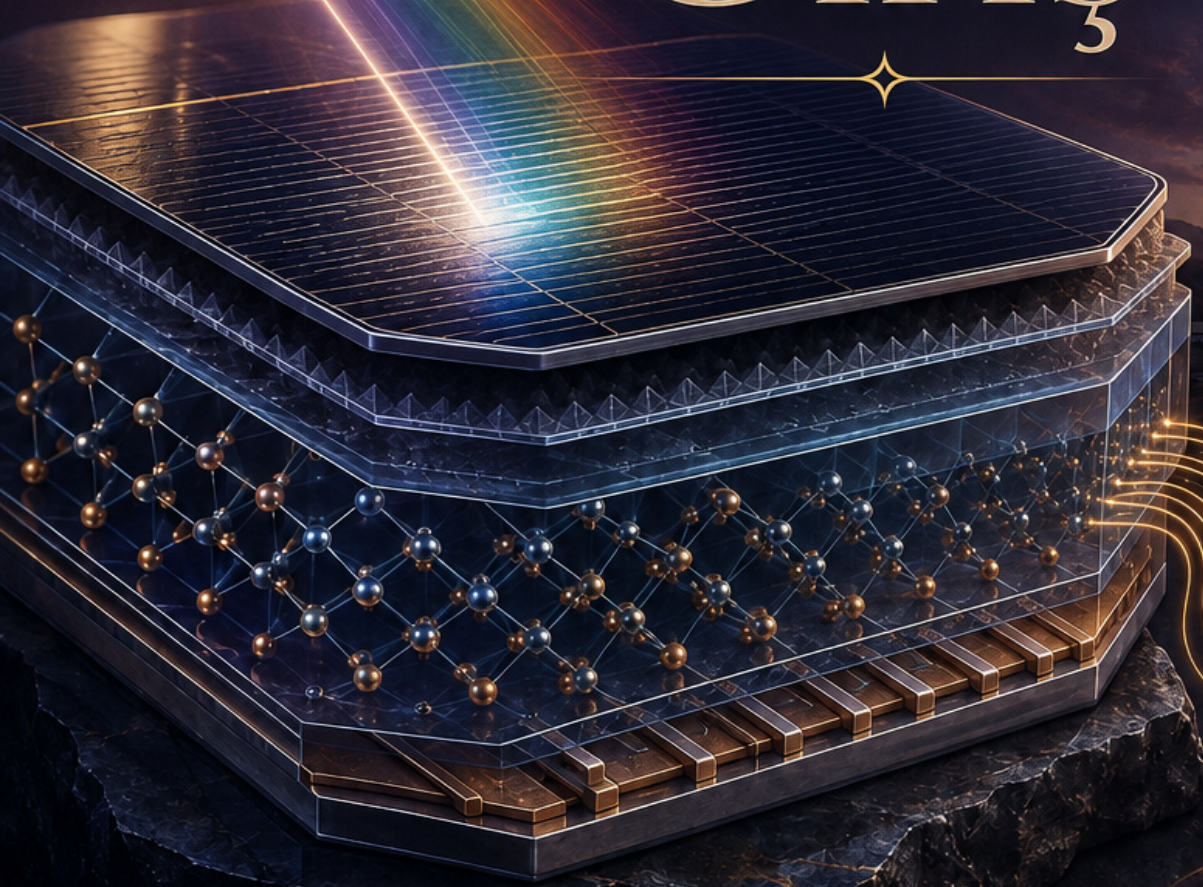


PV Geliştirmeye Giriş



Tarih • Fizik • Malzemeler • Ölçüm • Araştırma

Yayın künyesi ve okura not

Alper Ferudun • Mercury Software GmbH

Türkçe öğretim baskısı • 9 Eylül 2026

Bu kitap, fotovoltaik konusunda ön bilgisi olmayan okuru temel kavramlardan araştırma sorularına taşımak için hazırlanmıştır. Tarihsel deneylerde düzenek ve gözlem; teknik konularda mekanizma, birim, örnek ve model sınırı birlikte açıklanır. Başlangıç anlatımlarından sonra ileri ayrıntılara geçilir.

CC BY 4.0 • Lisans ve atıf

Yayıncının lisanslama yetkisi bulunan telif ve benzeri haklar, aksi belirtilmedikçe Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası lisansı ile sunulur. Ticari kullanım, paylaşım, çeviri ve uyarlama serbesttir. Alper Ferudun ve Mercury Software GmbH atfını, kaynak ve lisans bağlantısını, telif ve garanti bildirimlerini koruyun; değişiklikleri belirtin. Yayıncının kullanımınızı desteklediğini ima etmeyin; izin verilen kullanımları kısıtlayan ek koşul veya dijital kilit uygulamayın.

Creative Commons BY 4.0 lisans metni • EulerSolve kitaplığı

Kaynakçadaki üçüncü taraf eserler, marka ve patent hakları ile yazı tipi yazılımları bu bildirimle yeniden lisanslanmaz. Kamu malı unsurların özgürlükleri korunur. Yapay zekâ unsurlarında telif doğmadığı ölçüde bu bildirim yeni hak yaratmaz. Eser, hukukun izin verdiği ölçüde olduğu gibi sunulur; doğruluk veya belirli sonuç garantisi verilmez.

Editöryal yönlendirme ve yayın: Alper Ferudun. Metin ve görsel hazırlığında OpenAI araçları kullanılmıştır. Kavramsal illüstrasyonlar gerçek numune fotoğrafı değildir; sayısal örnekler ayrıca belirtilmedikçe sentetiktir. Eser hakemli yayın veya deneysel doğrulama iddiası taşımaz. Bütün literatürün tarandığı iddia edilmez; kaynakların erişim sınırları kayıtlarında açıklanır.

Atıf önerisi: Ferudun, A. (haz.). (2026). PV Geliştirmeye Giriş. Türkçe öğretim revizyonu, 9 Eylül 2026. Mercury Software GmbH kurum bağlantısıyla. Kullanılan bölüm ve basılı sayfayı belirtiniz.



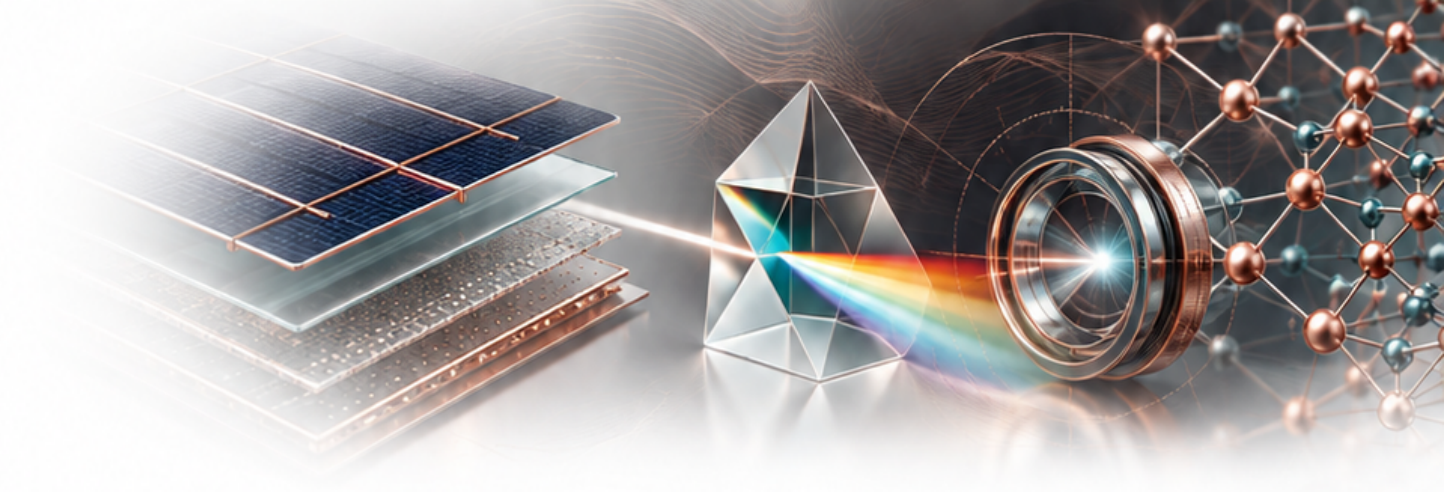
İçindekiler

Bölüm adları ve sayfa numaraları tıklanabilir. Bu cilt, iki kitaplık dizinin bağımsız bir kitabıdır.

KİTAP I • PV Geliştirmeye Giriş	1
I.01 Okura: ışığı anlamaktan araştırma tasarlamaya	7
I.02 Işıktan elektrige: fotovoltaiğin doğuşu ve araştırma kültürü	13
I.03 Güneş kaynağı, spektrum ve foton muhasebesi	23
I.04 Yarıiletkenin iç dünyası: bantlar, istatistik ve optik geçişler	29
I.05 Eklem ve seçici kontak: ışıkla oluşan yük nasıl işe dönüştürülür?	36
I.06 Yeniden birleşme: akımın ve gerilimin nerede kaybolduğu	44
I.07 Akım-gerilim eğrisi: bir hücrenin performansını okumak	51
I.08 Ayrıntılı denge ve gerilim kayıpları: teorik sınır neyi sınırlar?	57
I.09 Çok eklemli hücreler: spektrumu paylaşmanın fiziği	64
I.10 Kristal silisyum: iyi bir yarıiletkeni iyi bir ürüne dönüştürmek	71
I.11 İnce filmler: az malzeme, yoğun arayüz fiziği	78
I.12 III-V ve çok eklemli hücreler: spektrumu paylaşmanın bedeli	83
I.13 Halojenür perovskitler: güçlü optoelektronik, hareketli kimya	88
I.14 Perovskit tandemi: iki iyi hücreyi birleştirmek neden yetmez?	96
I.15 Organik, boyalı, kuantum noktalı ve gelişen soğurucular	101
I.16 Optik, kontak ve arayüz mühendisliği: bütün teknolojilerin ortak dili	106
I.17 Laboratuvardan modüle: alan, kapsülleme ve sürdürülebilir üretim	111



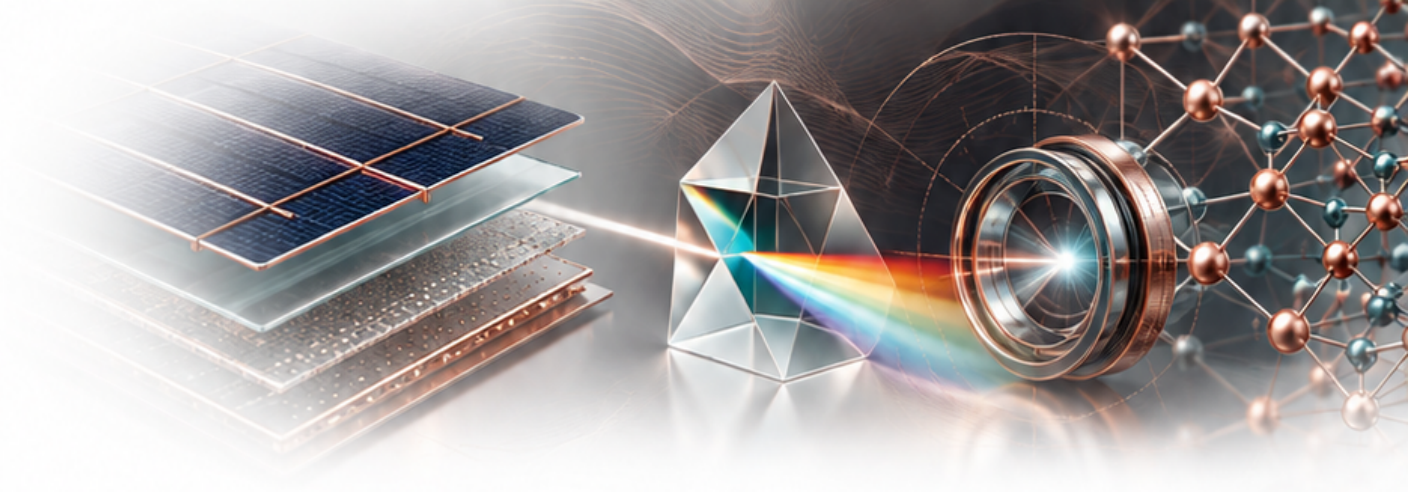
I.18 Fotovoltaik ölçüm: doğru sayının nasıl üretildiği	118
I.19 Karakterizasyon: her araç hangi soruyu cevaplar?	126
I.20 Dayanıklılık: bir saat eğrisinden hizmet ömrüne	133
I.21 İlk ilkelerden malzeme araştırması: DFT'nin gücü ve sınırı	139
I.22 Malzemeden hücreye: optik ve elektriksel modelleme	147
I.23 Makine öğrenmesiyle malzeme aramak: tahminden kanıta	154
I.24 Deney tasarımı ve istatistik: etkili bir değişikliği nasıl ayırırsın?	159
I.25 Hücreden modüle, sahaya ve yaşam döngüsüne	164
I.26 Literatürden araştırma sorusuna	170
I.27 Bir araştırma programı nasıl kurulur?	174
I.28 On iki haftalık araştırmacı çalışma rotası	179
I.29 Araştırmanın açık sınırları ve geleceğe bakış	182
I.30 Bir aygıtı baştan sona çözümlemek	185
I.31 Çözümlü araştırma problemleri	189
I.32 Simgeler, birimler ve Türkçe-İngilizce sözlük	193
I.33 Kaynakça ve erişim notları	198



Şekiller dizini

Metin içindeki şekiller ve hesaplanan grafikler. Her şeklin altında kavramsal anlatım, model veya veri kaynağı belirtilir.

01 Fotonlardan ömür boyu enerjiye uzanan dört ölçek	9
02 Becquerel'in 1839 metnindeki iki bölmeli düzenin öğretici gösterimi	14
03 Üst devre, harici besleme altında iletkenlik değişimini; alt devre, harici pil olmadan aydınlatmaya bağlı akımı araştırır ¹⁶	
04 Fotovoltaik düşüncesinin ve aygıtlarının tarihsel gelişimi	18
05 Üç farklı deneyin mantığı	21
06 Referans spektrumdan foton sayımına	24
07 Foton enerjisi ile soğurma uzunluğu farklı ölçeklerdir	25
08 Bant yapısı ile doluluk ayrı bilgidir	30
09 Yük, alan ve potansiyel aynı çözümün üç görünümüdür	38
10 Dengede tek Fermi düzeyi; ideal aydınlatılmış açık-devre sınırında ayrılmış quasi-Fermi düzeyleri	40
11 Üretim ve toplama aynı profil değildir	42
12 Üç yeniden birleşme mekanizması ve enerjinin gittiği yer	45
13 Aynı malzeme parametreleriyle farklı enjeksiyon rejimleri	49
14 Fiziksel güneş hücresinden tek-diyot eşdeğer devresine	52
15 Seri ve paralel kaybın eğri üzerindeki farklı izleri	55
16 İdeal tek eklem sınırının yeniden hesabı	58
17 Gerilim kayıplarını ayırmak	62
18 Tandemde optik paylaşım ve elektriksel bağlantı	65
19 Dört yaygın silisyum tasarım fikrinin kesitleri	72
20 CdTe, CIGS ve amorf silisyum ailelerinin tipik katman sıraları	79



21 Üç eklemli III-V aygıtta spektrumun ve elektrik bağlantısının paylaşımı	84
22 Perovskit yapı ailesi ve iki aygıt yönelimi	89
23 Islak öncülden çok kristalli filme geçiş	93
24 Öngerilim altında yavaş iyonik yeniden dağılımın örnek resmi	94
25 Monolitik perovskit-silisyum tandem için temsili katman kesiti	97
26 Organik hacim heteroekleminde arayüz ve bağlantılı taşıma yolları	102
27 Girişimle yansıma azaltma	109
28 Pasivasyon ve iletkenlik iki ayrı tasarım hedefidir	110
29 Monolitik ince film modülünde hücre şeritleri ve bağlantı izleri	112
30 İki tamamlayıcı ölçüm düzeni	119
31 Spektral uyumsuzluğun kökeni	124
32 Bir sinyali okumak, fiziksel ileri model gerektirir	127
33 Kararlılığı süre ve mekanizma üzerinden okumak	134
34 DFT sonuçlarını iki ayrı ölçekte sınamak	140
35 Kusur oluşum enerjisi ile kinetik bariyerin farklı görevleri	145
36 Sürekli aygıttan korunumlu sonlu hacim hesabına	148
37 Kalınlık optimumunun açık geometrili örneği	152
38 Veri ayrımı araştırma sorusuna uymalıdır	155
39 Bloklama ve etkileşimin öğretici örnekleri	160
40 Başlangıç gücünden ömür boyu enerjiye	165
41 Mekanizmayı sınavan araştırma döngüsü	175
42 Aynı verim, farklı fizik	186

Okura: ışığı anlamaktan araştırma tasarlamaya

Başlamak için: hücre, devre ve enerji

Bir çatıda gördüğümüz büyük camlı levha genellikle bir **modüldür**. Modülün içinde birbirine bağlanmış çok sayıda güneş **hücresi** vardır. Hücre, ışığı elektrik enerjisine dönüştüren en küçük işlevsel aygıttır. Birçok modül, kablolar, taşıyıcı yapı ve elektriği kullanıma uygun biçime çeviren cihazlarla birlikte bir **sistem** oluşturur. İnverter, hücrelerin ürettiği doğru akımı şebekedeki alternatif akıma dönüştüren güç elektroniği cihazıdır. Akü ise enerjiyi depolar; hücrenin çalışması için her sistemde akü bulunması gerekmez. [B16]

Önce elektriğin üç kelimesini ayıralım. **Yük**, parçacıkların elektriksel etkileşim özelliğidir; elektron negatif yüklüdür. Bir tel kesitinden bir saniyede geçen net yük miktarı **akımı** verir. **Gerilim**, iki nokta arasında birim yük başına aktarılabilecek enerji farkıdır. Suyu biriktiren bir deponun seviyesi ile borudan geçen su miktarı nasıl farklıysa gerilim ve akım da farklıdır. Bu benzetme yalnız ilişkiyi sezdirir; elektrik devresinde elektronlar su gibi tüketilmez ve enerjinin taşınması elektromanyetik alanla birlikte açıklanır.

Akımın birimi amper, yükün birimi coulomb, gerilimin birimi voltur. 1 amper, saniyede 1 coulomb; 1 volt, coulomb başına 1 joule anlamına gelir. **Güç**, enerjinin aktarılma hızıdır. Birimi watt, yani saniyede joule'dür. Sabit doğru akımda iki temel ilişki şöyledir:

$$P = VI, \quad E = Pt. \quad (I.1.1)$$

Burada P güç, V gerilim, I akım, E enerji ve t süredir. Öğretim örneğinde 0,5 V gerilim altında 2 A veren hücre 1 W güç sağlar. Aynı koşul iki saat sürerse 2 Wh enerji verir. Bu 7200 J'dür; çünkü bir saat 3600 saniyedir. Güç zamanla değişiyorsa her küçük zaman aralığındaki enerjiler toplanır. İntegral işareti ileride bu toplamının kısa yazımı olarak kullanılacaktır.

Işık içeride neyi değiştirir?

Işığın, enerji taşıyan **fotonlar** üzerinden inceleyebiliriz. Bir **yarıiletken**, elektronlarının hangi enerjilerde bulunabildiği ve ne kadar kolay hareket edebildiği yapısıyla belirlenen bir malzemedir. Uygun enerjili foton soğurulduğunda elektron daha yüksek enerjili bir duruma geçebilir. Arkada kalan eksik elektron durumu **delik** diye adlandırılır. Delik, kristalin içine açılmış fiziksel bir oyuk değildir; hareketini pozitif yük taşıyıcısı gibi izlediğimiz elektronik bir eksikliklerdir.

Işığın bu hareketli yükleri oluşturması başlangıçtır. Hücrenin iki tarafındaki **kontaklar**, dış kablolarla elektriksel bağlantı kurar. İyi bir hücrede bir kontak elektronları, öteki delikleri tercihli olarak toplar. Bu tercih **seçicilik** adını alır. Yükler işe katılmadan düşük enerjili duruma dönerse buna **yeniden birleşme** denir. Bu kavramları sırayla açacağız; şimdilik ışığın soğurulması, yüklerin oluşması, uygun uca ulaşması ve dış devrede iş yapması dört ayrı adım olarak akılda kalmalıdır. [B16]

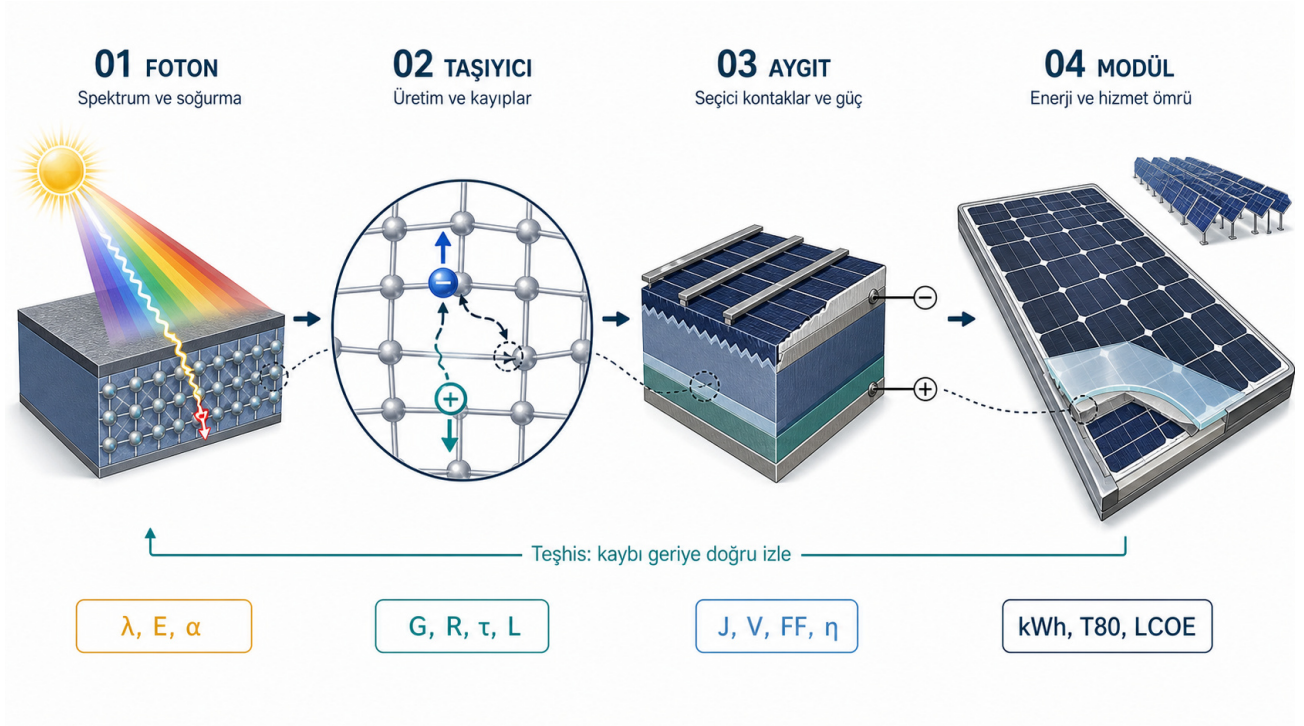
Yüzde, alan ve ilk verim hesabı

Verim, elektrik çıkış gücünün gelen ışık gücüne oranıdır. Öğretim örneğinde $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ hücrenin alanı 100 cm^2 , yani $0,01\text{ m}^2$ 'dir. Birim alana 1000 W/m^2 ışık geliyorsa hücreye 10 W düşer. Hücre 2 W elektrik verirse verim $2/10 = 0,20$, yani %20'dir. Kalan enerji yok olmaz; bir kısmı yansır, geçer veya ısıya dönüşür. “%20'den %22'ye” çıkış 2 yüzde puan, başlangıca göre %10 bağıl artıştır. Araştırma makalelerindeki bu iki ifade aynı sayı değildir.

Bu kitap PV ön bilgisi varsaymaz. Oran kurma, bilimsel gösterim, grafik eğimi ve eğri altında alan gibi araçları kullanıldıkları yerde kurar. İleri türetmeler ilk okumada yavaş ilerlemeyi gerektirebilir. Önce büyüklüğün neyi anlattığını, sonra birimini, ardından denklemin varsayımını okuyacağız. Hedef formülü ezberlemek değil, kendi seçtiğin sayılarla ne söylediğini sınavabilmektir.

Anlama kontrolü: elektrik ürettik mi?

Bir hücrenin boşa $0,6\text{ V}$ göstermesi onun o anda güç verdiğini kanıtlar mı? **Hayır**. Dış devrede akım sıfırsa gerilim olsa da dışarı aktarılan güç sıfırdır. Bir yük bağlandığında gerilim ve akımı birlikte ölçmek gerekir. $0,5\text{ V}$ ve $0,1\text{ A}$ için güç $0,05\text{ W}$ olur. Bu ayırım, sonraki tarih deneylerini okumanın ilk anahtarıdır.



Şekil 01. Fotonlardan ömür boyu enerjiye uzanan dört ölçek. Işığın soğurulması taşıyıcı üretimini; üretim ve yeniden birleşme toplanabilecek akımı; seçici kontaklar aygıt gücünü; kapsülleme ve dayanıklılık hizmet ömrünü belirler. Alt sıradaki geri dönüş yolu, bir modül kaybını daha küçük ölçeklerdeki mekanizmalara kadar izlemeyi anlatır. Yapı, yük ve katman boyutları temsildir. Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Bir güneş hücresine bakarken iki farklı nesne görürüz. Birincisi, ışık altında elektrik üreten birkaç mikrometre ya da birkaç yüz mikrometre kalınlığında bir yapıdır. İkincisi, yaklaşık iki yüzyıllık deneylerin, kuantum fizikinin, kimyanın, hassas ölçümün ve üretim mühendisliğinin birikimidir. Bu kitap ikinci nesneyi görünür kılmak için yazıldı. Amaç yalnızca hangi teknolojinin adının ne olduğunu öğretmek değil; bir hücre neden çalışır, neden beklenenden kötü çalışır ve onu iyileştirdiğimizi nasıl anlayabiliriz sorularına kendi başına cevap verebileceğin bir düşünme biçimi kurmaktır.

Fotovoltaik, kısaca PV, ışığın elektrik enerjisine doğrudan dönüştürülmesidir. Güneş termal sistemleri önce ısı üretir; PV hücreleri ise fotonlarla elektronik durumların etkileşiminden yararlanır. Bir sistemin güneşle çalışması onu otomatik olarak fotovoltaik yapmaz. Bir malzemenin ışık soğurması da onun iyi bir güneş hücresi olduğu anlamına gelmez. Soğurulan enerjinin bir bölümünü, taşıyıcıları kaybetmeden, seçici kontaklarla dış devreye aktarabilmek gerekir. Kitabın tüm bölümleri bu zincirin farklı halkalarını açar.

Bu kitap neyi kapsar?

Tarih ve temel fizik, güneş spektrumu, yarıiletkenler, taşıyıcı taşınımı, yeniden birleşme, akım-gerilim eğrileri, termodinamik sınırlar, başlıca malzeme aileleri, tandemler, optik ve arayüz mühendisliği, üretim, karakterizasyon, ölçüm belirsizliği, güvenilirlik, hesaplamalı malzeme keşfi, makine öğrenmesi ve saha performansı birlikte ele alınır. Son kısımda literatürü okuma yöntemi, araştırma tasarlama örnekleri, çalışma programı ve Türkçe-İngilizce terim sözlüğü bulunur.

Bu genişlik bir uzmanlık alanındaki bütün ayrıntıların yerine geçmez. Bir araştırmacı çoğu zaman bütün PV alanının uzmanı değildir; örneğin kusur hesaplamasında derinleşirken modül yaşlanmasını ekip arkadaşlarıyla çalışır. Buradaki hedef, alanlar arasındaki dili anlayabilmek, kendi uzmanlığını nereye yerleştireceğini görmek ve başkasının sonucunu değerlendirirken kritik varsayımları sorabilmektir.

Üç okuma rotası

Başlangıç rotasında tarih, spektrum, temel yarıiletken fiziği ve J-V bölümlerini sırayla oku. Ardından silisyum ve perovskit bölümlerini karşılaştır. Son olarak ölçüm bölümüne geç. Bu rota sana bir makaledeki J_{sc} , V_{oc} , FF ve PCE değerlerinin ne ifade ettiğini, nasıl elde edildiğini ve ne zaman kuşkulu olduğunu öğretir.

Araştırmacı rotasında tüm fizik ve ölçüm bölümlerini bitirdikten sonra tek bir malzeme ailesi seç. O ailedeki bir özgün makalenin ek bilgilerini, karakterizasyon verilerini ve yöntem bölümünü kitaptaki sorularla çözümü. Sonra hesaplamalı ya da deneysel bir yeniden üretim çalışması yap. Makaleyi anlamanın en sağlam testi, yazarın kararlarının yerine hangi alternatifleri koyabileceğini açıklayabilmektir.

Hesaplamalı araştırma rotasında hesaplamalı keşif, arayüz, aygıt modelleme, belirsizlik ve araştırma tasarımı bölümlerine özellikle yoğunlaş. Bir kimyasal formülün doğrulanması ile bir hücrenin doğrulanmasının farklı işleri olduğunu sürekli akılda tut. Hesaplanan bant aralığı, tüm sistemin performansı değildir. Hesap, malzeme, arayüz, aygıt ve ürün doğrulamasının birbirinden farklı kanıt gerektirdiği son araştırma bölümlerinde örneklenir.

Bilgi türlerini ayırmak

Kitapta dört bilgi türü vardır. Yerleşik fizik; yük korunumu, enerji korunumu ve iyi tanımlanmış modellerin denklemleridir. Modele bağlı çıkarım; belirli bir spektrum, sıcaklık ve kayıp varsayımı altında bulunan sonuçtur. Deneysel bulgu; belirli bir numune ve ölçüm düzenine aittir. Araştırma önerisi ise henüz sınanmamış bir fikirdir. Bir paragrafta bu türler arasında geçiş yapılırken geçiş açıkça belirtilir.

Şekillerin çoğu özgün eğitim şemaları ve açık denklemlerle üretilen grafiklerdir. Referans güneş spektrumu ise kaynağı belirtilen sayısal veriden yeniden çizilmiştir. Örnek hesaplarda kullanılan sayılar, aksi belirtilmedikçe öğretim için seçilmiş sentetik değerlerdir; gerçek numune ölçümleri veya yeni bir malzeme için doğrulanmış tahminler değildir. Kaynaklarda görülen tarihli başarılar, bugünkü dünya rekoru olarak sunulmaz. Bağımsız verim tabloları, güncel bir rekor karşılaştırmasının başlangıç noktasıdır; numune alanı ve ölçüm koşulları yine kontrol edilmelidir. [B03]

Literatür taramasının sınırı ve yöntemi

Temel literatür derlemesinin kesim tarihi 7 Eylül 2026'dır. Bu Türkçe öğretim revizyonunda yeni tarihsel kaynak kontrolleri 8 Eylül 2026'da yapılmıştır. Çalışma sistematik meta-analiz ya da bütün yayınları tüketen bir tarama değildir; araştırmacı eğitime yönelik geniş kapsamlı bir literatür sentezidir. Kaynaklar tarihsel dönüm noktaları, mekanizmaları ortaya koyan özgün çalışmalar, ölçüm ve güvenilirlik protokolleri, kurumsal veri kaynakları ve ileri okumalar üzerinden seçildi. Yayıncı sayfaları, DOI kayıtları, üniversite ve kamu araştırma kurumları önceliklendirildi. Erişilemeyen tam metinlerden ayrıntılı sonuç ya da standart maddesi çıkarılmadı.

Arama kümeleri şunları kapsadı: photovoltaic history ve solar battery; semiconductor recombination ve selective contacts; detailed balance ve tandem current matching; silicon PERC TOPCon heterojunction; CdTe CIGS III-V; halide perovskite ion migration; organic DSSC quantum dot; JV EQE stabilized efficiency; ISOS IEC reliability; DFT defects convex hull phonons; machine learning materials leakage; photovoltaic energy yield LCA recycling. Temel kaynakların geri ve ileri atıfları, bu kümelerin birbirine bağlanmasında kullanıldı. Bu yöntem alanın ana omurgasını kapsar; tüm dil ve patent veri tabanlarını eksiksiz taradığı iddiasını taşımaz.

Kaynakçadaki H, T, R ve B harfleri sırasıyla temel fizik/tarih, teknoloji, araştırma/ölçüm ve editoryal başvuru kaynaklarını gösterir. Aynı kaynak farklı bölümlerde yeniden kullanılabilir. DOI ya da kurum bağlantıları tıklanabilir biçimde verilmiştir. Kitapların bazılarının yalnız yayınevi kapsam ve bibliyografya bilgileri doğrulanmıştır; bunlar tam metni okunmuş eser diye gösterilmez.

Alanın büyüklüğünü doğru okumak

IEA PVPS'nin 2026 Snapshot raporu, 2025 sonunda küresel PV kurulu gücünün yaklaşık 3 TW'a ulaştığını bildirir. Ana raporun özet grafiğinde 2025 ilaveleri 607-698 GW aralığında verilir; özet sayfası yaklaşık 698 GW üst tahminini öne çıkarır. Burada 2026 yayın yılı, 2025 ise verinin yılıdır; değerler raporun tahmin ve revizyon bağlamıyla okunmalıdır. Kurulu güç bir enerji miktarı değildir: 1 GW tesisin yıllık üretimi ışıma, sıcaklığa, kayıplara ve kullanılabilirliğe bağlıdır. [B02]

Fraunhofer ISE'nin 14 Temmuz 2026 güncellemeli raporu hücre, modül, üretim, maliyet ve sürdürülebilirlik göstergelerini birlikte sunar. Bu tür raporlar teknolojinin genel fotoğrafı için kullanışlıdır; araştırma rekorunun ayrıntısı için özgün sertifika ya da birincil tabloya gidilmelidir. Aynı rapordaki bütün sayılar aynı tarihe ya da aynı payda tanımına sahip olmayabilir. [B01]

Araştırmacı refleksi

Bir sonuç okurken önce şu cümleyi tamamla: “Şu malzeme veya yapı, şu koşullarda, şu kontrolle karşılaştırıldığında, şu gözlenebilir büyüklükte, şu belirsizlikle bir fark gösterdi.” Cümleyi tamamlayamıyorsan sonuç henüz tam anlaşılmış değildir. Bu refleks, kitabın denklemlerinden bile daha uzun ömürlü bir araçtır.

Işıktan elektriğe: fotovoltanın doğuşu ve araştırma kültürü

Önce deney masasını tanıyalım

Tarih çizelgesindeki “1839: Becquerel” ifadesinin arkasında şu soru vardır: Işık bir maddeye düştüğünde yalnız onu ısıtır mı, yoksa elektriksel bir değişim de oluşturabilir mi? Buradaki araştırmacı **Edmond Becquerel**'dir. 1839 çalışmasını bugünkü paneli bildiğini varsayarak okumayacağız. Önce kullandığı parçaların işlevini, sonra değiştirdiği koşulu ve gözlediği sonucu anlamamız gerekir.

Bir **elektrot**, elektrik devresi ile incelenen ortam arasında temas kuran iletkenidir. Metal bir levhanın sıvıya daldırılması buna örnektir. **Elektrolit**, iyon denen yüklü atom veya molekül gruplarının hareketiyle akım taşıyabilen ortamdır. Metal teldeki akım ağırlıkla elektronlarla taşınırken çözeltide iyon hareketi önemlidir. Metal ile sıvının bulunduğu **arayüzde** elektron alışverişi içeren kimyasal tepkimeler gerçekleşebilir. Elektrik ile kimyanın birlikte incelenmesi **elektrokimya**dır.

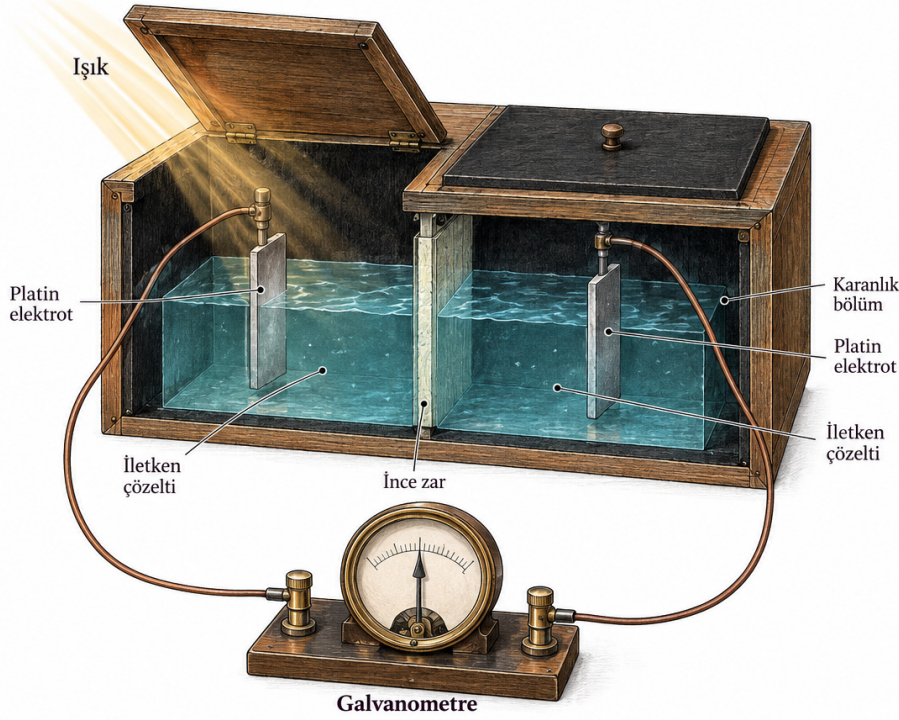
Galvanometre, çok küçük akımların manyetik etkisini ibre sapmasıyla görünür kılan ölçü aletidir. Eski metinlerde “multiplicateur” adıyla da karşılaşılır. İbrenin 10 derece sapması 10 amper veya %10 verim demek değildir. Dereceyi akıma dönüştürmek için aletin kalibrasyonu, devrenin direnci ve okuma usulü bilinmelidir. **Kalibrasyon**, ölçü aleti göstergesiyle bilinen referans büyüklük arasındaki ilişkiyi kurmaktır. Böylece eski gözlemin neyi ölçtüğünü ve hangi sonucu tek başına veremediğini ayırabiliriz.

1839: Becquerel tam olarak ne yaptı?

Becquerel'in Kasım 1839 metni, temmuzdaki iki sıvının temasına ilişkin araştırmasını anarak başlar; elektrotların da ışığa tepki verdiğini ayırmak ister. Tarif ettiği düzende içi karartılmış bir kutu, ince zarla iki bölmeye ayrılır. Her bölmede denenen çözelti ve bir platin levha bulunur. Levhalar hassas galvanometreye bağlanır. Bölmeler ayrı kapaklarla karanlıkta tutulur; kapaklar sırayla açılarak hangi tarafın aydınlatıldığı değiştirilir. Renkli süzgeçlerle ışık etkisini ısı etkiden ayırmaya çalışır. Çok temiz platin yüzeylerinde etkinin zayıflaması, yüzey durumunun önemini gösterir. [H31]

Bu düzeni okurken dört adımı sırayla düşün. **Önce** iki tarafın karanlıktaki davranışını bir başlangıç kaydı olarak belirle. **Sonra** yalnız bir tarafın ışığını değiştir; devrenin diğer parçalarını aynı tut. **Ardından** öbür tarafı aydınlatmanın ve ışığı kesmenin göstergeyle ilişkisini izle. **Son olarak** görülen değişimin başka bir nedenini sınavacak kontrol seç. Bu dört cümle, tarihsel tarihin bugünkü deney tasarımı diliyle okunmasıdır; eksik tarihsel ölçümleri sonradan uyduran bir veri tablosu değildir.

Becquerel: ışığı kontrollü değiştirmek



Deney mantığının şeması; tarihsel aygıtın bire bir kopyası değildir.



Şekil 02. Becquerel'in 1839 metnindeki iki bölmeli düzenin öğretici gösterimi. Levhalar dışarıda galvanometreyle, sıvılar içeride zar üzerinden iyonik yolla ilişkilidir. Kapakların görevi hangi tarafın ışık aldığını değiştirmektir; kaynak, tarihsel aygıtın kesin boyutlarını bu çizimle vermemektedir. [H31] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Gümüş klorürlü deney neden ayrıca anlatılmalı?

Aynı metnin sonraki kısmında taze hazırlanmış ince gümüş klorür tabakası platin üzerine yerleştirilir; levha asit eklenerek iletken yapılmış suya daldırılır. Aydınlatmada tabaka kararır ve galvanometre ibresi sapar. Böylece gözle görülür kimyasal değişim ile elektriksel tepki birlikte izlenir. [H31] Bu anlatım bir uygulama reçetesi değil, özgün çalışmanın deney mantığıdır; tarihsel kimyasalların modern bir ders deneyinde aynen kullanılması gerekmez.

Gümüş klorürün formülü **AgCl**'dir: Ag gümüşü, Cl kloru gösterir. Kimyasal formül elementleri ve ideal bileşim oranını belirtir. Bir **fotokimyasal tepkime**, ışık enerjisiyle başlayan veya değişen kimyasal süreçtir. Fotoğraf malzemelerinin ışıpta değişmesi bu kavrama tanıdık bir kapı açar. Burada metal levha yalnız "elektrik yapan malzeme" diye görülmemeli; ışığa duyarlı tabakaya elektriksel temas ve mekanik destek de sağlar. Sıvı ise elektrokimyasal yolun bir parçasıdır.

Bu deneyden çıkabilecek dikkatli sonuç, ışığın belirli bir elektrot-çözelti düzeninin elektriksel davranışını değiştirebildiğidir. Buradan doğrudan günümüzdeki silisyum p-n eklemi, uzun süre kararlı güç veya belli bir enerji dönüşüm verimi çıkmaz.

Fotogerilim, ışığa bağlı gerilim farkı; **fotoakım**, ışığa bağlı akım bileşeni demektir. Bir

kimyasal tepkimenin de bulunduğı düzende sürekli enerji bilançosu kurarken ışık, kimyasal değışim ve elektrik çıkışı ayrı ayrı hesaba katılmalıdır. Bir ibre sapmasını “sonsuz ömürlü güneş pili” diye yorumlamak bu ayrımı kaybettirir.

1873: bir telgraf sorunu selenyuma nasıl bağlandı?

Willoughby Smith, denizaltı kablolarının döşenmesi sırasında kullanılan test ve sinyal düzeni için yüksek direnç arıyordu. 20 Şubat 1873'te yayımlanan kısa notu, 5-10 cm uzunlukta ve yaklaşık 1-1,5 mm çapta selenyum çubuklarını anlatır. Çubuklar cam tüplerde kapalıdır; uçlarından elektriksel bağlantı için platin teller çıkar. Selenyumun ışığa bağlı elektriksel direnci araştırmanın beklenmedik önemli konusu olur. [H02]

Selenyum, Se simgeli bir kimyasal elementtir. Camımsı ve kristal gibi farklı yapısal biçimleri bulunabilir; dolayısıyla yalnız element adını bilmek numunenin tüm elektriksel özelliklerini vermez. **Direnç**, seçilen koşullarda gerilime karşı ne kadar akım geçtiğinin ölçüsüdür. Birimi ohm'dur. Basit ohmik elemanda ilişki şöyledir:

$$I = \frac{V}{R}. \quad (I.2.1)$$

I akım, V elemanın uçlarındaki gerilim, R dirençtir. “Işıhta direnci düştü” cümlesi, aynı gerilim altında daha fazla akım geçirebildi demektir. Bu artış **fotoiletkenlik** diye adlandırılır. Buradaki “foto” ışığı, “iletkenlik” elektrik yüklerinin taşınabilmesini anlatır. Bir malzemenin iletkenliği ışıkla değıştiğinde ışık algılayıcısı yapılabilir; fakat tek başına bu gözlem, malzemenin dış devreye enerji sağlayan güneş hücresi olduğunu kanıtlamaz.

Aynı olayı rakamlarla görelim

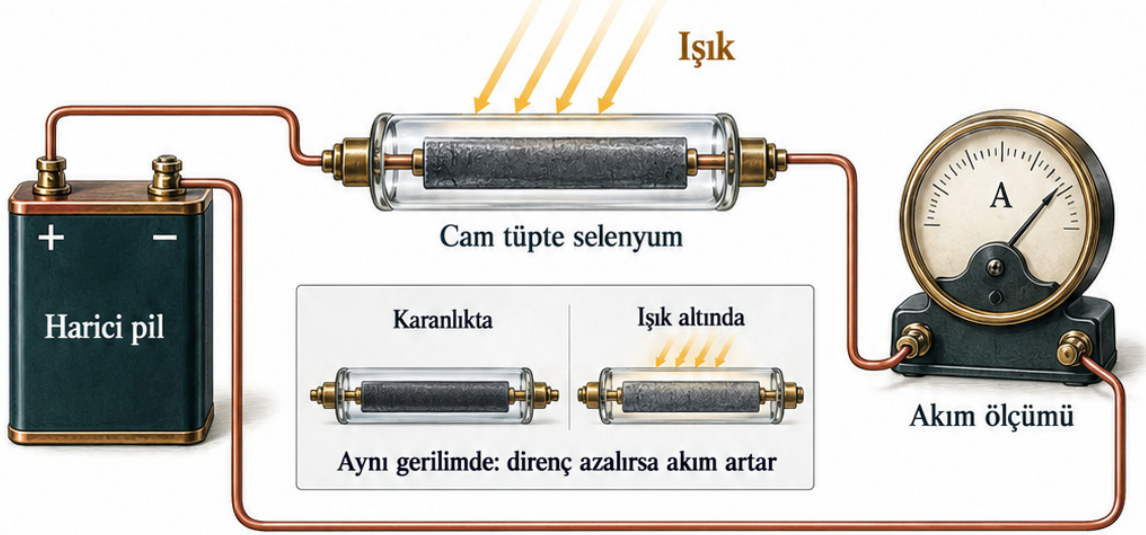
Smith'in ölçümü olmayan sentetik örnek: bir selenyum elemanın karanlıkta 10 megaohm, ışıhta 2 megaohm olduğunu varsayalım. “Mega” bir milyon demektir. Uçlara harici pille sabit 10 V uygularsak karanlık akımı 1 mikroamper, ışık akımı 5 mikroamper olur. “Mikro”, bir milyonda birdir. Aletin fark ettiğı artış 4 mikroamperdir. Elektriksel güç pil tarafından sağlanır; ışık malzemenin bu gücü geçirme koşullarını değıştirmiştir. Pil çıkarıldığında aynı akımın süreceğini bu hesap söylemez.

Bugünkü yarıiletken diliyle açıklarsak ışık, hareketli taşıyıcıların sayısını artırabilir. Taşıyıcıların ne kadar süre yaşadığı, kusurlarda tutulup tutulmadığı ve ne kadar kolay hareket ettiğı iletkenliği etkiler. Basit bir kristal modelinde iletkenlik, elektron ve delik yoğunluklarının hareketlilikleriyle ağırlıklandırılmış toplamına bağlıdır. Bu, Smith'in 1873'te bugünkü bant kuramını kullandığı iddiası değildir; tarihsel gözleme daha sonra geliştirilen fizik diliyle anlam vermektir.

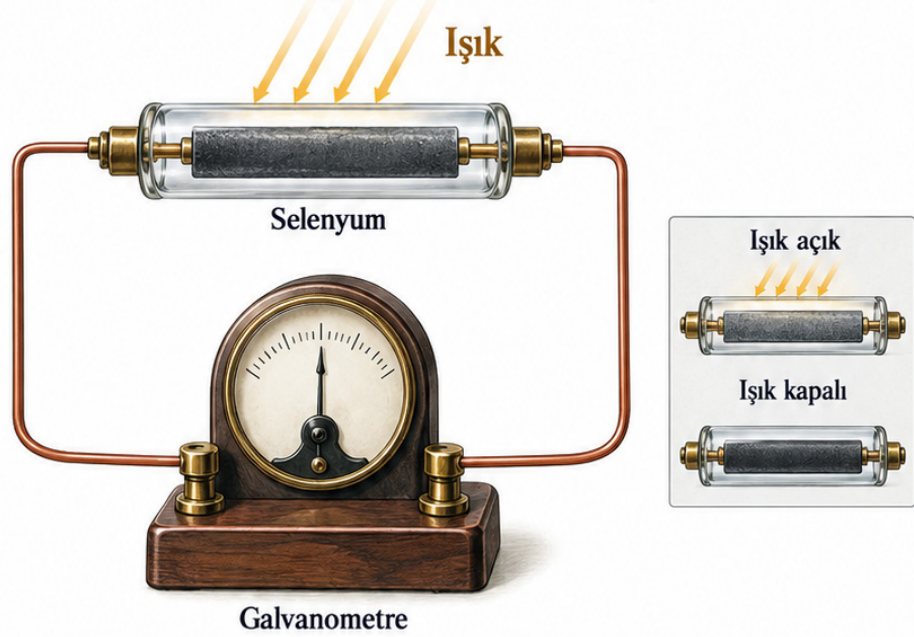
Ayrıca her selenyum düzeneğı ideal, gerilimden bağımsız bir direnç değildir. Kontaklar ve önceki elektriksel işlem geçmişı sonucu değıştirebilir. Yukarıdaki Ohm yasası örneğı,

ışıkta direnç azalmasının anlamını öğretmek için seçilmiştir; bütün selenyum numunelerinin her gerilimde doğrusal davrandığını varsaymaz.

Selenyumun direnci ışıkla değişir



Pilsiz devrede ışık akım oluşturur



Üst: fotoiletkenlik. Alt: fotovoltaiik tepki.

Öğretici şema; tarihsel numune ölçümü değildir.

Şekil 03. Üst devre, harici besleme altında iletkenlik değişimini; alt devre, harici pil olmadan aydınlatmaya bağlı akımı araştırır. Çizimler deneylerin mantığını gösterir. Gerçek eski numunelerin geometrisi, kontak durumu ve alet kalibrasyonu bu şemadan çıkarılamaz. [H02] [H32] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

1876-1877: Adams ve Day hangi ek soruyu sordular?

William Grylls Adams ve Richard Evans Day, selenyumun karanlıktaki davranışını ve ışığın akım oluşturup oluşturamayacağını ayrı sorular olarak ele aldı. Platin kontaklı, tavlanmış numuneler kullandılar. Bildirdikleri kritik sınamada selenyum doğrudan galvanometreye bağlıydı: karanlıkta sapma yokken mum ışığında sapma oluşuyor, ışık kesilince geri dönüyordu. Önceden pil akımı geçirilmemiş üç benzer numuneyi de denediler; ikisi ışığa duyarlı çıktı, biri çıkmadı. Kısa bildirim 1876'da alınmış, geniş çalışma 1877'de yayımlanmıştır. [H32] [H03]

Tavlama, malzemeyi belirli bir ısı geçmişinden geçirerek yapısını değiştirme işlemidir. **Kontak**, burada platin telin selenyumla temas ettiği bölgedir. İki terim neden önemlidir? Çünkü ölçülen şey yalnız elementin adı değildir; elementin yapısı, yüzeyi, kontakları ve işlem geçmişinden oluşan bir aygıttır. Numunelerin farklı tepki vermesi, araştırmacının “aynı reçete” ile “aynı sonuç” arasındaki farkı baştan sorgulamasını gerektirir.

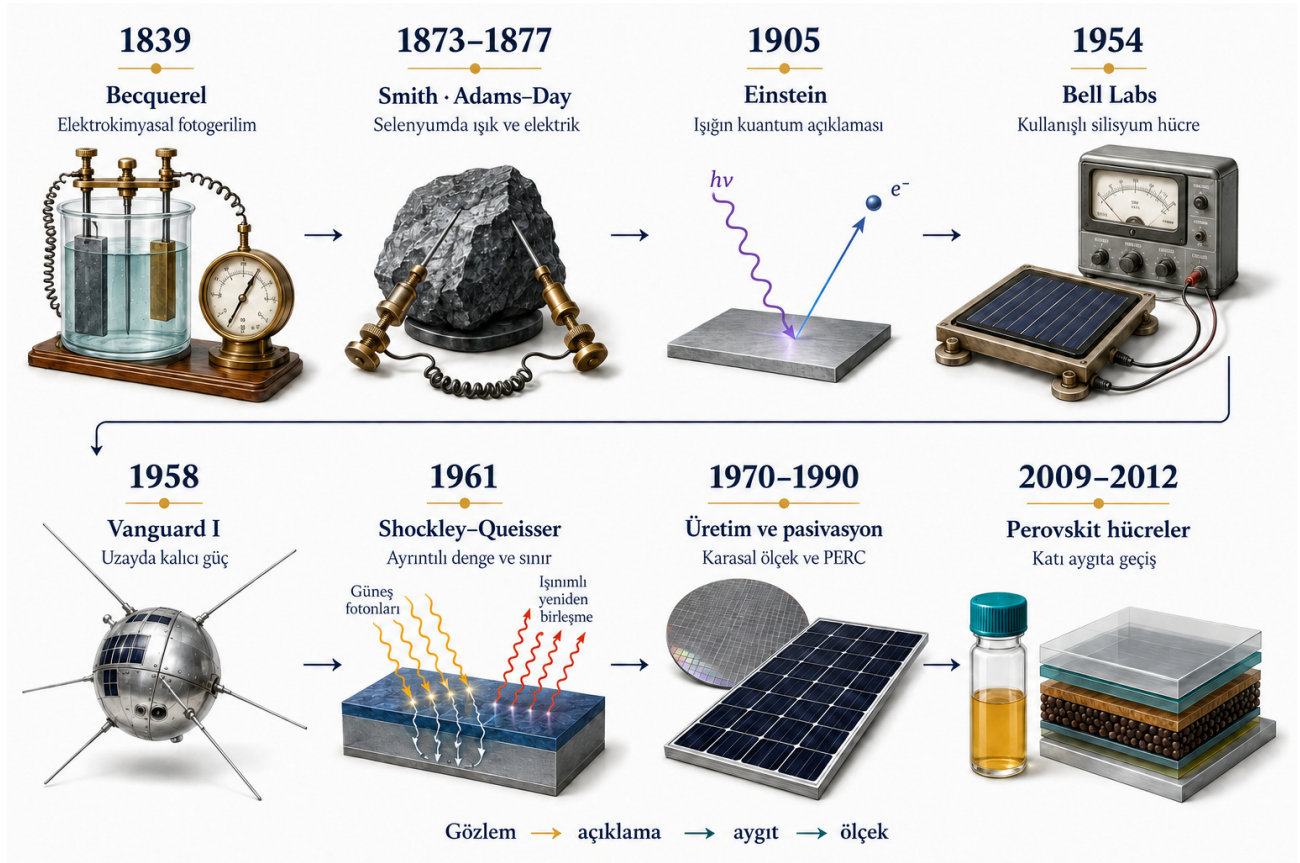
Pilsiz deney, dış pilin sağladığı akımın yalnız iletilmesinden farklı bir kanıt getirir. Yine de bir elektriksel tepkiyi kullanışlı güç kaynağına dönüştürmek için yük altında gerilim ve akım, aydınlatma şiddeti, alan ve zamanla kararlılık ölçülmelidir. Bu yüzden tarih, önce fotoiletkenlikten başlayıp daha sonra fotovoltaiik aygıta geçen farklı kanıt adımlarını içerir. Tek bir “ışık elektrik yaptı” cümlesi bu ilerlemeyi görünmez kılar.

1883 ve 1905: yüzey tasarımı ile kuantum fikri

Charles Fritts'in selenyum ve çok ince altın katmanlı erken hücresi, etkiden aygıt tasarımına geçişi örnekler. Işığın içeri girebilmesi ve elektriksel temasın kurulabilmesi aynı yüzeyde çözülmelidir. Kalın metal ışığı engelleyebilir; çok yetersiz temas ise yükün çıkışını zorlaştırır. Günümüzdeki şeffaf kontak ve metal ızgara tasarımlarının problemi de bu iki ihtiyacı birlikte karşılamaktır. [H01]

Einstein'ın 1905 yaklaşımında ışığın enerji alışverişi kuantumlarla açıklanır. **Dış fotoelektrik etkide** yeterli enerjili ışık bir yüzeyden elektron çıkarabilir. Metalden elektronu çıkarmak için gereken enerji eşiği **iş fonksiyonudur**. Eşiğin altındaki tek foton, sırf ışık şiddetini artırdığımız için daha enerjili olmaz; şiddet artışı çoğunlukla foton sayısını artırır. Güneş hücresinde ise elektronun vakuma çıkması gerekmez. Yarıiletken içinde oluşturulan yüklerin seçici kontaklarla kullanılması başka bir aygıt işleyişidir. [H06]

Tarih artık üç ayrı gözlem olarak okunabilir: ışık bir devrenin **iletkenliğini değiştirebilir**, bir düzende **fotogerilim ve fotoakım oluşturabilir**, bir yüzeyden **elektron çıkarabilir**. Bunların enerji kaynağını, ölçüm devresini ve sonucunu ayrı kurduğumuzda 1954'teki silisyum hücresinin neden yeni bir mühendislik aşaması olduğunu anlamaya hazırız.



Şekil 04. Fotovoltaik düşüncesinin ve aygıtlarının tarihsel gelişimi. Üst sıra soldan sağa okunur, bağlantı oku alt sıranın soluna döner. Dönüm noktaları gözlem, kuantum açıklaması, yarıiletken mühendisliği ve uygulama ihtiyacını birlikte gösterir. Aralıklar zamana orantılı değildir; düzenekler tarihsel nesnelerin bire bir rekonstrüksiyonu olarak kullanılmamalıdır. [H01] [H02] [H03] [H04] [H07] [H25] [T10] [T11] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Anlama kontrolü: deneyini birine anlat

Becquerel'i anlatırken “ışığı tuttu” demek yerine elektrotu, çözeltiyi, galvanometreyi ve sırayla açılan kapakları tarif et. Smith'i anlatırken sabit gerilim altında ışığın akımı niçin artırdığını 10 V örneğiyle göster. Adams-Day için harici pilin kaldırılmasının neden ayrı bir kanıt olduğunu açıkla. Üçünü birbirinden ayırabiliyorsan tarihsel olayları yalnız adlarıyla değil deney mantığıyla öğrenmişsindir.

1954: malzeme saflığının aygıt fiziğiyle buluşması

Yirminci yüzyılın yarıiletken araştırmaları, kristale kontrollü atom ekleyerek taşıyıcı sayısını ayarlamayı (katkılama), aynı atom düzenini büyük hacme yaymayı (tek kristal büyütme) ve akımın yönlere göre farklı geçtiği bölgeler kurmayı (doğrultucu eklem) geliştirdi. Bu birikim olmadan, yalnızca “iyi ışık soğuran madde” aramak yeterli değildi. Chapin, Fuller ve Pearson'ın 1954 makalesi silisyum p-n eklemlili bir fotoseli elektrik üretimi için sundu. Makalenin bibliyografik kimliği, bir aygıt sınıfının başlangıcını izlemek için sağlam birincil kaynaktır. [H04]

Smithsonian koleksiyonundaki deneysel hücre kaydı, Bell Labs'ta Chapin'in güneşten elektrik üretimine yönelmesini ve Russell Ohl'un önceki silisyum çalışmalarının bu gelişimdeki yerini gösterir. Kurumun kayıtlarına göre pratik hücre Chapin, Fuller ve Pearson'ın ortak çalışmasıyla ortaya çıktı. [H05] Bell Labs'ın yaklaşık %6 verimli hücresi, tarihsel önemini yalnızca sayısından almaz: artık belirli bir yükü çalıştırabilen, mühendislik amacıyla geliştirilebilecek bir dönüştürücü vardı. Dönemin verimini bugünkü sertifika ve alan kuralları uygulanmış bir rekor gibi okumamak gerekir. [H08] Bu geçişten çıkarılacak araştırma dersi açıktır. Bant aralığı yararlı görünen bir malzeme, elektriksel olarak temiz üretilmiyorsa hücre olmayabilir. Mükemmel bir kristal de uygun kontak olmadan işe yaramayabilir. Başarılı aygıt, yararlı özelliklerin aynı numunede ve aynı işlem dizisinden sonra birlikte bulunmasını gerektirir.

Saflık, eklem ve sınır düşüncesi neden dönüm noktasıydı?

Saflık, kristalde istenmeyen atomların az olmasıdır; katkılama ise belirli atomların bilerek eklenmesidir. Bunlar çelişmez: rastgele kirlenmeyi azaltırken yararlı bir katkıyı denetleyebiliriz. **n-tipi** bölgede hareketli elektronlar, **p-tipi** bölgede elektron eksikliğini temsil eden delikler çoğunluktadır. Bu iki bölgenin sınırına **p-n eklemi** denir. Yükler sınırda yeniden dağıldığında oluşan iç yapı, aydınlatmada elektron ve deliklerin farklı kontaklardan toplanmasına yardım eder. “n” ve “p”, bütün levhanın net negatif veya pozitif yüklü olduğu anlamına gelmez. Elektriksel olarak nötr bölgelerde hareketli taşıyıcıların yükü, kristaldeki diğer yüklerle dengelenir.

Bu kısa mekanizma, 1954 aygıtının neden yalnız ışıpta direnci değişen bir çubuktan farklı olduğunu açıklar. Fotonların oluşturduğu yükleri kullanabilmek için hem iç yapıyı hem dış elektriksel temasları düzenlemek gerekir. Sonraki dönemlerde **pasivasyon**, yüzeylerde taşıyıcıları kaybettiren etkin kusurları veya bu kusurlara erişimi azaltarak aynı hücreden daha fazla gerilim ve güç alınmasını sağladı. Burada amaç ışığı artırmak değil, oluşan uyarılmanın erken kaybolmasını azaltmaktır. [H04] [T01]

1961'de Shockley ve Queisser başka bir soru sordular: Üretim kusurlarını ideal olarak gidersek bile tek bir eklem neden bütün güneş enerjisini elektrige çeviremez? Düşük enerjili fotonların kullanılamaması, yüksek enerjili fotonların fazla enerjisinin ısıya gitmesi ve hücrenin kendisinin de ışık yayması birlikte hesaba katılır. **Ayrıntılı denge**, soğurma ile ters yöndeki yayımı tutarlı biçimde ele alan bu hesabın temelidir. Sonuç belirli varsayımlara bağlı bir üst sınırdır; bütün teknolojiler için değişmez bir verim yüzdesi değildir. Tarih çizelgesindeki 1961 işareti böylece yeni bir hücre satışını değil, aygıtın kaçınılmaz kayıplarını hesaplama biçimini gösterir. [H25]

Uzaydan yeryüzüne

17 Mart 1958'de fırlatılan Vanguard 1, güneş enerjisi kullanan ilk uydu oldu. Uzay uygulamalarında hafiflik ve uzun süre çalışabilme, birim elektrik maliyetinden farklı bir değer taşıyordu. NASA'nın tarih kaydı bu erken uygulamayı doğrular. [H07] Bir teknoloji ilk pazarında pahalı olabilir; başka hiçbir çözüm aynı görevi benzer kütle ve bakım koşullarında yapamıyorsa yine de anlamlıdır.

Yeryüzündeki kullanımda ihtiyaç değişti. Uzak haberleşme noktaları, bağımsız güç kaynakları ve daha sonra şebekeye bağlı üretim, dayanıklılık ve maliyet konusunda yeni baskılar oluşturdu. ABD Enerji Bakanlığı, 1970'lerde federal araştırma ve geliştirme girişimlerinin güneş teknolojilerinin gelişimindeki rolünü tarihsel olarak inceler. [H08] Araştırma artık yalnızca verim artışını değil; wafer başına malzeme tüketimini, üretim hızını, kayıplı hücrelerin elenmesini, kapsüllemeyi ve sahada yıllarca çalışmayı birlikte düşünmek zorundaydı.

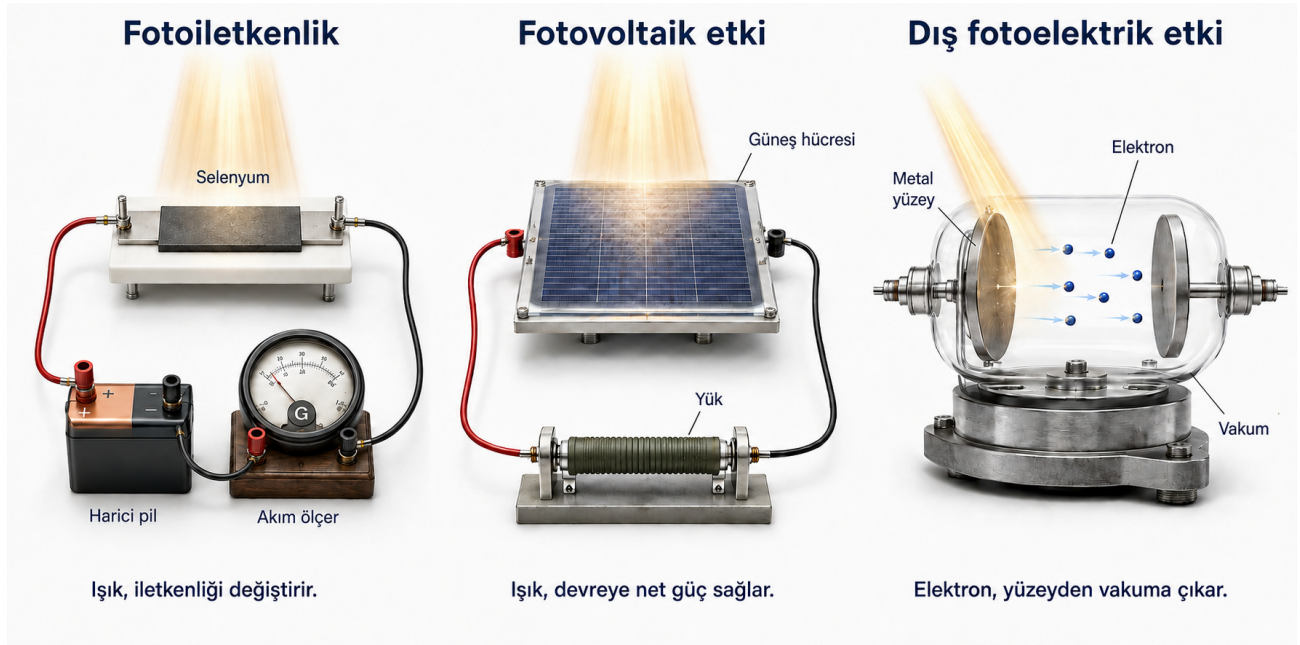
Bu tarih, tek bir malzemenin sonsuza dek kazanacağını söylemez. Bir malzeme ailesinin avantajı farklı dönemlerde farklı olabilir. İnce film, doğrudan bant aralığı sayesinde az malzemeyle güçlü soğurma sunabilir. Silisyum, geliştirilmiş üretim altyapısı ve yüksek elektronik kalite sunabilir. Çok eklemli aygıt, daha yüksek verim karşılığında daha karmaşık optik ve elektriksel eşleşme gerektirebilir. Araştırmacının işi, her yaklaşımın hangi sorunu çözdüğünü ve hangi yeni sorunu açtığını belirlemektir.

Tarihsel bir hesap: aynı elektrik için gereken alan

Öğretici örnek; tarihsel numune ölçümü değildir. Işınımı 1000 W/m^2 , hedef elektrik gücünü 100 W kabul edelim. Gerekli alan $A = P/(\eta G)$ olur. %6 verimde $A = 100/(0,06 \times 1000) = 1,67 \text{ m}^2$; %20 verimde $0,50 \text{ m}^2$ gerekir. Verim 14 yüzde puan artmıştır; gerekli alan yaklaşık %70 azalmıştır. Fakat hücre maliyeti, taşıyıcı yapı ve bakım gideri bilinmeden elektrik maliyetinin de %70 azaldığı söylenemez. Aynı denklem, bir tarihsel gelişmenin hangi ekonomik değişkene doğrudan etki ettiğini ayırmayı öğretir.

Tarihi bir neden-sonuç zinciri olarak okumak

Bir alanın tarihini yalnız isim ve tarih ezberleyerek öğrenmek, sonraki teknik seçimleri anlamaya yetmez. PV tarihinde birbirinden farklı dört engel art arda görünür hale gelir. İlk engel, ışığın bir elektriksel değişim yarattığını güvenilir biçimde göstermektir. İkinci engel, bu değişimin harici beslemeye bağlı bir iletkenlik etkisi mi, yoksa yükü besleyebilen bir enerji dönüşümü mü olduğunu ayırmaktır. Üçüncü engel, aygıtın içerisindeki enerji ve yük akışını nicel olarak açıklamaktır. Dördüncü engel ise bu aygıtı tekrar tekrar, geniş alanda ve uzun ömürlü üretmektir. Aynı bilimsel fikir her engeli tek başına aşamaz.



Şekil 05. Üç farklı deneyin mantığı. Solda akımın enerjisini harici pil sağlar; ışık numunenin iletkenliğini değiştirir. Ortada yükte tüketilen enerji aydınlatmadan gelir. Sağda elektron yüzeyden vakuma çıkar. Bu ayırım, selenyum deneyleri ile modern güneş hücresini aynı kelime altında karıştırmamayı sağlar. Özgün eğitim çizimi. [H01] [H02] [H03] [H06] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Selenyumun tarihsel önemi bu ayırmada yatar. Bir malzemeyi ışığa tuttuğunda akımın değişmesi, ışığın elektronlarla etkileştiğini gösterir; fakat değişen akımın enerji kaynağını ayrıca sorgulamak gerekir. Modern araştırmada bunun benzeri, fotoiletken kazançla dış kuantum veriminin birin üstüne çıkabildiği bir dedektörü, aynı kazancı ücretsiz güç olarak sunan bir güneş hücresi gibi yorumlamaktır. Dedektörün kazancında harici kutuplamanın yaptığı iş de vardır. Enerji bilançosu yapılmadan foton başına elektron sayısı, enerji dönüşüm veriminin yerine konamaz.

1954 silisyum hücresinin öğretici yanı, daha önce bilinmeyen tek bir doğa yasası ortaya çıkarması değildir. Yeterli kristal kalitesi, kontrollü katkılama, eklem oluşturma ve elektriksel temasın aynı aygıtta buluşmasıdır. Yarıiletken teknolojisinin üretim araçları, fiziksel etkinin kullanılabilir ürüne dönüşmesini mümkün kılmıştır. 1958 Vanguard uygulaması ise araştırma önceliğini gösterir: sınırlı pil ömrünün sorun olduğu bir ortamda, yüzeye düşen ışığın yeniden kullanılabilmesi yüksek değer taşır. Bir teknolojinin ilk müşterisi, her zaman en ucuz elektriği arayan müşteri değildir. [H04] [H05] [H07]

Karasal yaygınlaşma bu öncelikleri değiştirdi. Uzaydaki bir aygıt için kütle başına güç ve radyasyon dayanımı belirleyici olabilirken, yeryüzünde üretim maliyeti, alan, montaj, malzeme erişimi ve uzun süreli enerji üretimi birlikte önem kazanır. Araştırma tarihindeki “daha yüksek verim” çizgisi bu yüzden tek başına yeterli değildir. Aynı dönemde hücre verimi, modül verimi, üretim verimi ve saha ömrü farklı hızlarda gelişebilir. Kitabın ilerleyen bölümlerinde pasivasyonun gerilim kazancını, tandemlerin

spektral kazancını ve modül tasarımının alan kaybını aynı enerji muhasebesiyle okuyacağız.

Tarih okuma deneyi: Bir dönüm noktasını seç ve üç cümle yaz: Hangi engel vardı? Hangi araç veya fiziksel anlayış bu engeli kaldırdı? Hangi engel çözülmeden kaldı? Bu çalışma, tarih bilgisini araştırma tasarımına çevirir.

Sık yanlışlar ve çalışma soruları

“Fotovoltaiik, fotokondüktivite ve fotoelektrik aynı şeydir” ifadesi yanlıştır. Birinde harici besleme altında iletkenlik değişir, diğerinde kullanılabilir foto-gerilim ve güç oluşur, dış fotoelektrik etkide ise elektron yüzeyden dışarı çıkar. “İcat tarihi her şeyi açıklar” da yanlıştır; bilimsel gözlem, çalışır prototip ve ölçeklenebilir ürün ayrı basamaklardır.

1. Işık altında direnci yarıya düşen bir selenyum örneği, harici pil olmadan güç üretmiş sayılır mı? **Yanıt:** Hayır; ayrı bir foto-gerilim ve yük altında net güç ölçümü gerekir.
2. %10'dan %15'e çıkan verim kaç yüzde puan ve kaç bağıl yüzde artıştır? **Yanıt:** 5 yüzde puan; bağıl artış %50.
3. Uzay için başarılı bir hücre neden otomatik olarak uygun çatı modülü olmaz? **Yanıt:** Spektrum, radyasyon, alan ve kütle öncelikleri, maliyet, kapsülleme ve kullanım koşulları farklıdır.

Okuma yolu: Önce kısa tarih çizelgesini [H01], sonra 1954 makalesinin kimliğini ve kapsamını [H04], ardından nesne ve uygulama tarihini [H05] [H07] okuyun. Tarihsel verim sayılarını modern sertifika tablosuna doğrudan eklemeyin.

Güneş kaynağı, spektrum ve foton muhasebesi

Bir ışık demetini nasıl sayarız?

Güneş ışığını beyaz görmemiz, içindeki tüm fotonların aynı olduğu anlamına gelmez. Bir prizmanın oluşturduğu renk şeridi bunu görünür kılar. **Dalga boyu**, dalganın art arda iki eşdeğer noktası arasındaki uzaklıktır; λ ile gösterilir. **Frekans**, bir saniyedeki salınım sayısıdır; ν ile gösterilir. Boşlukta ışığın hızı c olduğundan $c = \lambda \nu$ bağıntısı geçerlidir. Kısa dalga boyu daha yüksek frekans ve foton başına daha yüksek enerji demektir. Mor ile kırmızı arasındaki fark yalnız gözümüzün renk algısı değildir.

Spektrum, ışık gücünün dalga boylarına nasıl dağıldığını gösterir. Grafikte yatay eksen nm, dikey eksen $W/(m^2 \cdot nm)$ ise dikey değer tek başına o dalga boyundaki toplam güç değildir. Her bir nanometrelik aralığa düşen güç yoğunluğunu anlatır. Dikey değeri aralık genişliğiyle çarparak W/m^2 elde ederiz. Genişliği farklı kutuları toplarken yalnız yükseklikleri toplamak bu yüzden yanlıştır.

Öğretim örneği: 500-510 nm aralığında spektral ışıınının sabit $1 W/(m^2 \cdot nm)$ olduğunu varsayalım. Aralık 10 nm olduğundan gelen güç $10 W/m^2$ 'dir. Foton enerjisi bu dar aralığın ortası olan 505 nm ile yaklaşık hesaplanabilir. $1 nm = 10^{-9} m$ olduğundan foton başına enerji yaklaşık $3,93 \times 10^{-19} J$ çıkar. $10 J/s$ değerini bu enerjiye bölersek saniyede ve metrekarede yaklaşık $2,54 \times 10^{19}$ foton buluruz. Bir güç ölçüsünü foton sayısına çevirdik; henüz elektrik üretimi hesaplamadık.

Gelen fotondan toplanan elektrona

Her fotonun dış devrede bir elektronun geçişine katkı yaptığını varsayarsak, foton akısını elektron yükünün büyüklüğüyle çarparız. Yukarıdaki örnek yaklaşık $4,07 A/m^2$, yani $0,407 mA/cm^2$ verir. Gerçekte foton yansıyabilir, yararlı katmanda soğurulmayabilir veya oluşturduğu yük kaybolabilir. **Dış kuantum verimi**, gelen foton başına dış devrede toplanan yük taşıyıcısı sayısının uygun ölçüm koşullarındaki oranıdır; EQE kısaltmasıyla kullanılır. EQE %80 ise örneğin akımı yaklaşık $0,326 mA/cm^2$ olur. Bu bir enerji verimi değildir: akımdan güce geçmek için çalışma gerilimi de gereklidir.

Güneş atmosferden geçerken bazı dalga boyları gazlarca soğurulur, ışığın bir bölümü saçılır. **Doğrudan ışık** Güneş doğrultusundan, **yayılı ışık** gökyüzünün farklı yönlerinden gelir. AM, ışığın atmosferde geçtiği yolun bir referans yola oranını anlatan hava kütesidir. AM1.5G bir laboratuvar karşılaştırma spektrumudur; “her gün saat 1.5”

veya “Güneş gücünün 1,5 katı” değildir. Spektrum, toplam ışınlam ve numune sıcaklığı ayrı ayrı belirtilir.

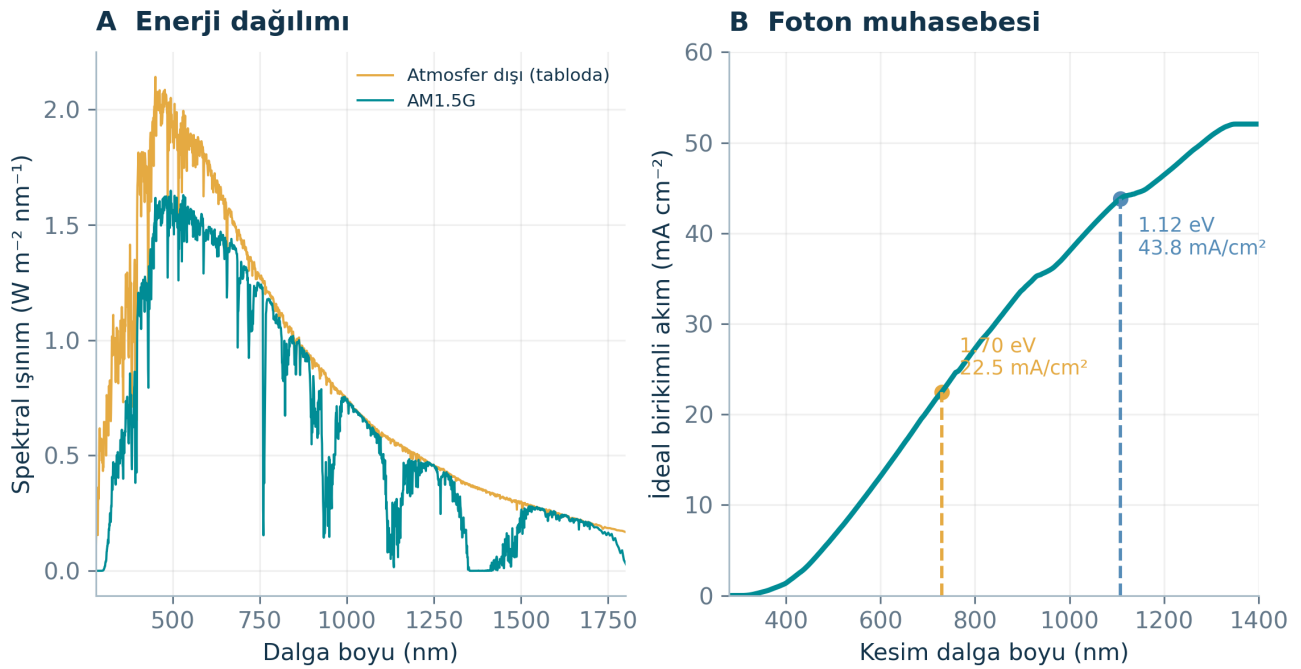
Büyük sayılar ve integral işareti

10^{-3} , 1000; 10^{-3} , 0,001 demektir. Bu **bilimsel gösterim**, atomik ölçekteki küçük enerjilerle çok büyük foton sayılarını aynı hesapta yönetir. Örneğin 2×10^{-3} ile 3×10^{-2} çarpılırken önce $2 \times 3 = 6$ bulunur, onluk kuvvetler toplanır: sonuç $6 \times 10^{-1} = 60$ 'tır. Formüllerde bu üsleri gerçek üst indislerle göreceğiz.

Σ , ayırık terimlerin toplamıdır. $\int$, aralıklar çok küçültülerek yapılan sürekli toplamın integral işaretidir. Spektrum altında alan hesaplamak, dar şeritlerin genişliğiyle yüksekliğini çarpıp toplamaktır. $d\lambda$, sürekli ifadede çok küçük dalga boyu aralığını; $\Delta\lambda$, tabloda iki dalga boyu arasındaki sonlu farkı gösterir. Eğri doğrusal yaklaşıldığında komşu yüksekliklerin ortalamasını aralık genişliğiyle çarpmak **trapez kuralıdır**. Aşağıdaki integral formülleri bu sayma işleminin kısa yazımıdır.

Anlama kontrolü: grafiğin hangi alanı?

Bir bantta $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$ ışınlam 20 nm boyunca sabitse bu bant $40 \text{ W}/\text{m}^2$ taşır. Aynı güç daha uzun dalga boyuna kaydırılırsa foton sayısı artar; çünkü her foton daha az enerji taşır. Ancak hücrenin soğurma eşiğinin altına geçilmişse bu daha çok foton daha çok akım sağlamaz. Spektrumu yorumlarken hem sayıyı hem foton enerjisini hem EQE'yi birlikte kullanmalıyız.

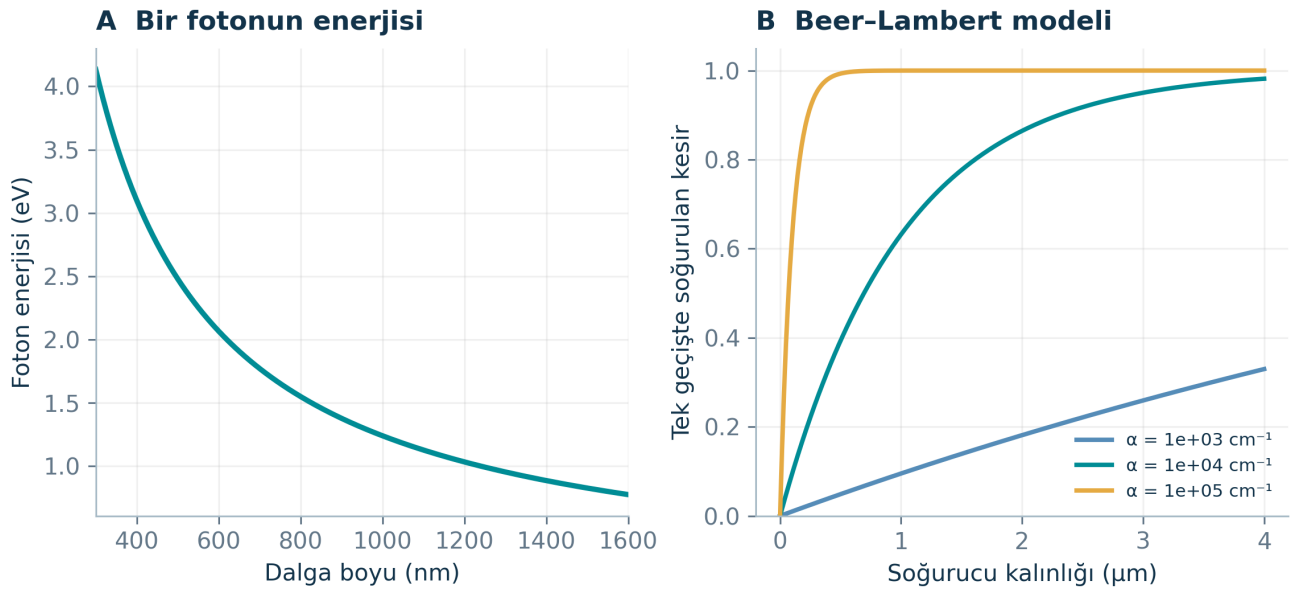


Şekil 06. Referans spektrumdan foton sayımına. A paneli ASTM G173 tablosundaki atmosfer dışı ve global spektrumları, B paneli global spektrumun ideal akım integralini gösterir. Eşik çizgileri 1,12 ve 1,70 eV için çizildi. Veriler pvlb deposundan; eğriler ve integraller bu kitap için yeniden üretildi. [H09] [B10]

Güç yoğunluğu ile enerji birbirinden ayrılmalı

Hücre araştırmasının ilk girdisi “güneş var” değildir; yüzeye gelen ışığın zamana, dalga boyuna, geliş açısına ve kutuplanmaya göre dağılımıdır. Işınım şiddeti G , yüzeye birim zamanda birim alan başına gelen güçtür ve W/m^2 ile verilir. Işınım enerjisi $H = \int G(t) dt$ ise J/m^2 veya kWh/m^2 birimindedir. $1 kWh = 3,6 MJ$ 'dür. Bir modülün anlık gücü watt, bir günde ürettiği elektrik kilowattsaat ile ifade edilir. İkisini karıştırmak, hücre ölçümünden santral hesabına taşınan en yaygın hatalardandır.

Spektral ışınım E_λ , bu gücün dalga boylarına dağılımını verir. Örneğin $W m^{-2} nm^{-1}$ birimindeki bir tabloyu dalga boyu üzerinden topladığınızda W/m^2 elde edersiniz. Tablodaki bir noktanın yüksek olması, o dalga boyunun tek başına büyük güç taşıdığı anlamına gelmez; bant genişliği de hesaba katılır. İntegraldeki ölçü, fiziksel büyüklüğün bir parçasıdır.



Şekil 07. Foton enerjisi ile soğurma uzunluğu farklı ölçeklerdir. Solda hc/λ , sağda sabit α için $1 - \exp(-\alpha d)$ hesaplanır. Bir malzemenin bütün dalga boylarında aynı α değerini taşıdığı varsayılmaz; sağ panel kalınlık etkisini tek dalga boyunda öğrenmek içindir. [H10] [H13]

Bir fotonun enerjisi ve taşıyıcı sayısı

Foton enerjisi $E = h\nu = hc/\lambda$ 'dır. SI tanımında $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J s}$, $c = 299792458 \text{ m/s}$, $q = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ve $k_B = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ kesin değerlerdir. [H10] Pratik dönüşüm $E[\text{eV}] \approx 1239,842/\lambda[\text{nm}]$ biçimindedir. Dolayısıyla 500 nm foton yaklaşık 2,480 eV, 1000 nm foton yaklaşık 1,240 eV taşır.

Foton sayısı ile enerji aynı şey değildir. Aynı optik güce sahip iki dar bant kaynaktan, daha uzun dalga boylu olanı daha fazla foton sağlar; çünkü her fotonun enerjisi daha düşüktür. Gelen foton akısı $\phi_\lambda = E_\lambda/(hc/\lambda)$ olur. Burada λ , hc ile tutarlı olarak metreye dönüştürülmelidir; E_λ 'nin “nanometre başına” oluşu yalnızca spektral bant genişliğine aittir. Elde edilen ϕ_λ 'nin birimi foton $m^{-2} s^{-1} nm^{-1}$ 'dir.

Bir fotonun en fazla bir toplanmış elektron verdiği geleneksel aygıt için kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc} = q \int \phi \lambda EQE(\lambda) d\lambda$ ile hesaplanır. EQE, dış kuantum verimidir: aygıtta gelen foton başına dış devrede toplanan elektron sayısı. Bu tanım, gelen fotonun yansıma veya parazitik soğurma nedeniyle kaybolmasını da içerir. İç kuantum verimi ise paydasında uygun biçimde tanımlanmış soğurulan fotonları kullanır. [H24]

AM0, AM1.5G ve AM1.5D neyi anlatır?

AM, air mass yani hava kütesidir; ışığın atmosferde katettiği optik yolun yaklaşık ölçüsüdür. Düz atmosfer yaklaşımında ve ufka çok yakın olmayan Güneş için $AM \approx 1/\cos\theta_z$ yazılır; θ_z başucu açısıdır. Atmosfer dışındaki AM0 spektrumu, yeryüzündeki standart spektrumla aynı değildir. AM1.5G doğrudan ve yayılı bileşenleri içeren global referansı; AM1.5D ise doğrudan ışıınım referansını ifade eder.

ASTM G173 referansı, belirli atmosfer ve yüzey yönelimi varsayımlarıyla hesaplanan bir ortak karşılaştırma zeminidir. NLR'nin, eski NREL adresinden erişilen referans sayfası 37° eğimli yüzeyi, belirlenmiş su buharı ve ozon miktarlarını, hava kütesini ve spektrumun SMARTS modeliyle üretilmesini açıklar. Bu spektrum her yerde ve her saatte görülen gerçek ışığın aynısı değildir. [H09]

1000 W/m² toplam güç, spektrumun doğru olduğu anlamına gelmez. İki lamba aynı toplam ışıınımı verebilir, fakat biri üst tandem hücrelerini, diğeri alt hücreyi daha fazla besleyebilir. Silisyum referans hücresiyle bir lambayı ayarlamak, farklı spektral tepkiye sahip yeni malzemenin hatasız ölçüldüğünü garanti etmez. Gerekli düzeltme, lambanın spektrumu ile test ve referans aygıtlarının spektral yanıtları birlikte bilinerek yapılır.

Geometri ve gerçek dış ortam

Yatay yüzeyde toplam ışıınım, ideal geometrik ifadeyle $GHI = DNI \cos\theta_z + DHI$ 'dir. DNI Güneş'e dik yüzeydeki doğrudan ışıınımı, DHI yataya gelen yayılı ışıınımı belirtir. Eğimli bir modüle geçerken doğrudan bileşenin yüzeye izdüşümü, gökyüzü dağılımı ve yerden yansıma ayrı değerlendirilir. Bulutlu bir günde toplam güç düşerken yayılı bileşenin oranı büyüyebilir. Yoğunlaştırıcı optik, yayılı ışığı düz levha modül kadar kolay kullanamaz; bu yüzden aynı hava verisi iki teknolojiye aynı üretim avantajını vermez.

Güneş uzaklığı değiştikçe serbest uzayda güç yaklaşık uzaklığın karesiyle ters orantılı azalır. Bu basit yasayı sahaya aynen taşımak doğru olmaz: atmosfer, bulut, aerosol ve yüzey geometrisi eklenir. Spektral modelin amacı bu etkileri tek bir “güneş sabiti” arkasına saklamamaktır.

Çalışılmış örnek: spektral banttı akıma

Öğretici örnek. 600 nm çevresinde 20 nm genişlikte, $E_{\lambda} = 1,50 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ sabit kabul edilen bir bant olsun. Bant gücü 30 W/m^2 'dir. Merkez dalga boyu yaklaşımlıyla foton enerjisi $3,31 \times 10^{-19} \text{ J}$ ve foton akısı yaklaşık $9,06 \times 10^{19} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ olur. $\text{EQE} = 0,90$ ise akım yoğunluğu yaklaşık $13,07 \text{ A/m}^2$, yani $1,307 \text{ mA/cm}^2$ 'dir. Bu son dönüşümde $1 \text{ mA/cm}^2 = 10 \text{ A/m}^2$ eşitliği kullanılır.

Aynı 30 W/m^2 'yi 1200 nm'ye taşırsak foton sayısı iki katına çıkar. Fakat bant aralığı 1,12 eV olan ideal tek fotonlu bir soğurucu, 1200 nm'deki yaklaşık 1,033 eV fotonları bantlar arası geçişle kullanamaz. Daha fazla foton, kendiliğinden daha fazla elektrik demek değildir. Foton enerjisi eşiğı ve kuantum verimi birlikte gerekir.

Bir spektrumu dalga boyundan enerji eksenine çevirirken yalnızca yatay eksenı yeniden adlandırmak da yanlışır. $E = hc/\lambda$ olduğundan spektral yoğunluk dönüşümünde Jacobian gerekir: $\phi E = \phi \lambda |d\lambda/dE|$. Enerji ekseninde yüksek enerjiden düşüğe giden bir listeyi artan enerjiye sıralamak, integrasyon işaretini ve veri düzenini doğru tutmaya yardım eder. Farklı spektral birimlerle yazılmış iki sayısal kodun aynı akımı vermesi, iyi bir bağımsız tutarlılık sınamasıdır.

Spektral integrali gerçekten hesaplamak

Bir spektrum grafiğinin altında kalan alanı toplamak için eksenin birimi ile örnekleme aralığı birlikte kullanılmalıdır. Dalga boyları eşit aralıklı değilse, satırlardaki ışınlm değerlerini doğrudan toplamak yanlışır. Ayrık tablodan trapez kuralıyla toplam güç ve ideal kısa devre akımı şu biçimde kurulur:

$$G \simeq \sum_i \frac{E_{\lambda,i} + E_{\lambda,i+1}}{2} (\lambda_{i+1} - \lambda_i). \quad (I.3.1)$$

$$J_{sc} \simeq q \sum_i \frac{\phi_i Q_i + \phi_{i+1} Q_{i+1}}{2} (\lambda_{i+1} - \lambda_i), \quad \phi_i = \frac{E_{\lambda,i} \lambda_i}{hc}. \quad (I.3.2)$$

Burada Q , ilgili noktadaki EQE'dir. İkinci eşitlikte foton enerjisini hesaplarken dalga boyu metreye çevrilir; integralin adımıında ise spektral tablonun “nm başına” birimiyle uyumlu nanometre kullanılır. Sonuç A/m^2 ise mA/cm^2 'ye geçmek için 10'a bölünür. Bu iki dönüşümü açık yazmak, bin ya da on bin kat hataları önler.

Bu baskının spektrum grafiğı, ASTM G173'ün pvlb deposunda dağıtılan 2002 satırlı sayısal temsilinden yeniden çizildi. Global spektrumun trapez integrali $1000,371 \text{ W/m}^2$ çıktı. 1000 ile arasındaki küçük farkı gizlemek için tablo yeniden ölçeklenmedi; ayrıntılı denge hesabında paydada aynı integral kullanıldı. Bu tercih, sonuçların yeniden

üretilebilir olmasını sağlar. Tablodaki atmosfer dışı sütunun 280-4000 nm integrali ise yaklaşık 1347,93 W/m²'dir; sonlu dalga boyu aralığının integralini Güneş'in tüm dalga boylarındaki ışınımıyla özdeşleştirmemek gerekir. Veri kaynağı ve dosya özeti kitabın ek paketinde tutulur. [H09] [B10]

Grafiğin birikimli akım paneli özellikle değerlidir. $E_g = 1,12$ eV eşiğine kadar bütün fotonları toplayabilen ideal bir aygıt yaklaşık 43,8 mA/cm²; $E_g = 1,70$ eV için yaklaşık 22,5 mA/cm² verir. Bunlar malzeme rekoru değildir. Tam soğurma, tam toplama ve bir fotondan bir elektron varsayımının foton sayımı sonuçlarıdır. Gerçek hücrenin EQE eğrisi bu basamak fonksiyonundan daha düşük ve yumuşaktır.

Bir kaybı neden mA/cm² cinsinden yazıyoruz? Yansımanın %3 azalması bütün dalga boylarında eşit değilse, akım kazancını %3 kabul edemeyiz. Kazanç, değişimin olduğu dalga boyundaki foton akısıyla ağırlıklandırılmalıdır:

$$\Delta J_{sc} = q \int \phi_\lambda \Delta EQE(\lambda) d\lambda. \quad (I.3.3)$$

Bu formül bir optik tasarım kararını ölçülebilir elektriksel sonuca bağlar. İki kaplamayı karşılaştırırken yalnız ortalama yansıtma yerine bu ağırlıklı integrali kullanmak, insan gözünün parlak gördüğü bölgenin sayısal değerlendirmeyi gereğinden fazla etkilemesini engeller.

Sık yanlışlar ve çalışma soruları

“Bir güneş 1000 W/m² olduğuna göre spektrum önemsizdir” yanlıştır. “Lux değerinden her lambda için aynı katsayıyla W/m² bulunur” da yanlıştır; lux insan gözünün dalga boyuna bağlı duyarlılığıyla ağırlıklandırılır. Fotovoltaik ölçümde gereken radyometrik ve fotonik büyüklüklerdir.

1. 800 W/m² ortalama ışınım 5 saat sürerse gelen enerji nedir? **Yanıt:** 4 kWh/m²; elektrik üretimi için verim ve diğer kayıplar ayrıca gerekir.
2. 1,55 eV bant aralığının ideal uzun dalga boyu kesimi nedir? **Yanıt:** Yaklaşık 800 nm.
3. $E\lambda$ tablosu W m⁻² nm⁻¹ yerine W m⁻² µm⁻¹ yazılırsa sayılar nasıl değişir? **Yanıt:** 1000 ile çarpılır; doğru integral aynı toplam gücü verir.

Okuma yolu: Spektral tabloyu [H09] açıp önce toplam gücü, sonra foton akısını hesaplayın. Kuantum veriminin tanımını [H24] okuyun. MIT ders planı, güneş kaynağından optiğe ve taşıyıcı uyarılmasına ilerleyen bir öğrenme sırası sunar. [H11]

Yarıiletkenin iç dünyası: bantlar, istatistik ve optik geçişler

Enerji bandı, kristalin içinde bir şerit değildir

Tek bir atomun elektronları yalnız belirli enerji durumlarında bulunabilir. Çok sayıda atom bir araya gelip düzenli bir **kristal** oluşturduğunda bu durumlar etkileşir; çok sık aralıklı izinli enerji kümeleri ortaya çıkar. Bu kümelere **bant** deriz. Bant diyagramının düşey eksenini bir malzemenin yüksekliğini değil elektron enerjisini gösterir. **Değerlik bandı**, kimyasal bağlanmada rol alan dolu durumları; **iletim bandı**, uyarılan elektronların hareketine elverişli üst enerji durumlarını içerir. Bu iki grubun kenarları arasındaki enerji farkı **bant aralığıdır**.

Bant aralığı “iki katman arasındaki boşluk” değildir. İdeal kristalin belirli enerji aralığında izinli elektron durumunun bulunmaması anlamına gelir. Gerçek malzemede kusurlar bu aralığa yerel durumlar ekleyebilir. Elektronun değerlik bandından iletim bandına çıkarılması, elektron ve delik oluşturur. Toplam elektrik yükü korunur: eksi yüklü bir elektron ve artı yüklü gibi davranan bir delik birlikte doğduğu için ışık nötr kristali sınırsız negatif yükü doldurmaz.

Elektronvolt, tek elektronun 1 V gerilim farkı boyunca kazandığı enerjiye karşılık gelen birimdir. **Öğretim örneği:** bant aralığı 1,1 eV olan ideal bir soğurucuda 1,0 eV foton bantlar arası geçişe yetmez. 2,0 eV foton geçiş yapabilir; fakat fazladan 0,9 eV'nin tamamı uçlarda elektrik olarak alınmaz. Geleneksel hücrede sıcak taşıyıcıların fazla enerjisi çoğunlukla kristal titreşimlerine aktarılır. Bu gevşemeye **ısı gevşeme** denir.

Delik ve katkılama neden kullanışlı kavramlardır?

Neredeyse dolu bir sırada tek boş koltuk olduğunu düşün. İnsanlar boş koltuğa sırayla geçtikçe boşluk ters yönde ilerler. Delik de böyle bir kayıt kolaylığı sağlar; gerçek hareket birçok elektronun durum değiştirmesidir. Benzetme enerji bantlarını açıklamaz, yalnız eksikliği bir taşıyıcı olarak izlemenin mantığını gösterir.

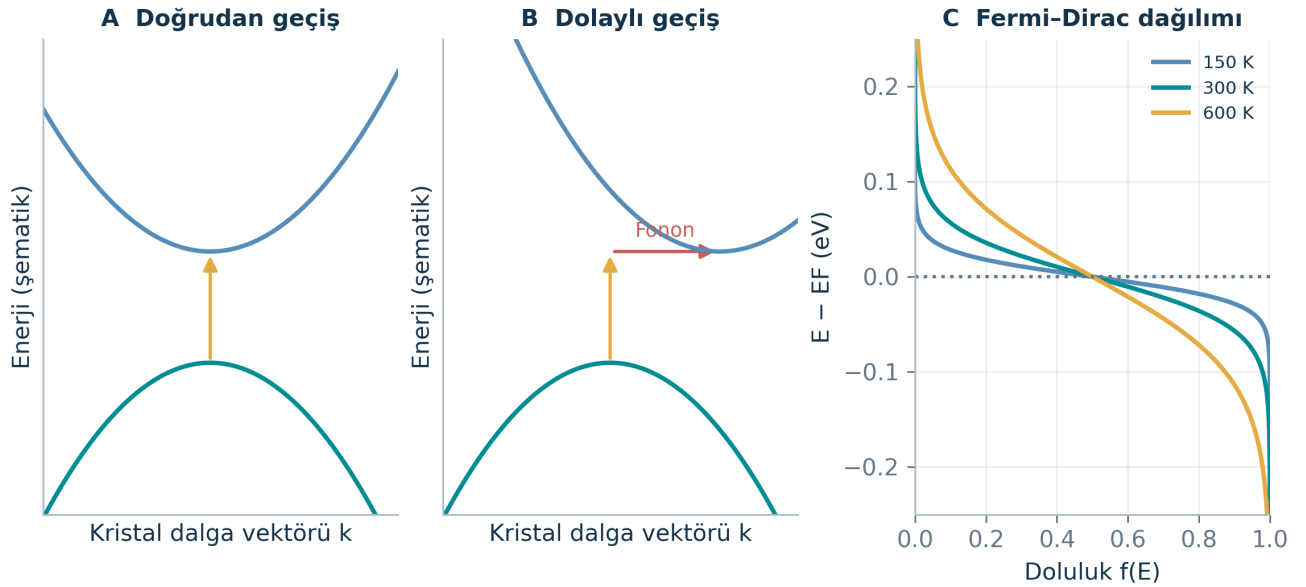
Katkılama, kristale çok küçük ve kontrollü miktarda başka atom ekleyerek taşıyıcı sayısını değiştirmektir. Silisyumda uygun verici katkı, kolayca iletim bandına geçebilen elektron sağlar: malzeme **n tipi** olur. Uygun alıcı katkı, değerlik bandında delik oluşmasını kolaylaştırır: **p tipi** olur. Bu adlar malzemenin bütünüyle negatif veya pozitif yüklendiğini söylemez; sabit katkı iyonlarıyla hareketli yükler büyük hacimde yaklaşık dengelenir. Çoğunluk taşıyıcıları n tipinde elektron, p tipinde deliktir.

Fermi düzeyi de bir yüzey değildir; elektron durumlarının dolma olasılığını belirleyen enerji parametresidir. **Hareketlilik**, elektrik alanın taşıyıcıya ne kadar ortalama sürüklenme hızı verdiğini anlatır. **Yaşam süresi** ise fazla taşıyıcının kaybolmadan önceki dinamiğiyle ilgilidir. Hızlı hareket eden ama çabuk kaybolan yük, kontağa ulaşamayabilir. Sonraki denklemlerde bu iki farklı malzeme özelliğini birlikte izleyeceğiz.

İstatistik formüllerinde **exp(x)**, e sayısının x'inci kuvvetidir; e yaklaşık 2,718'dir. $\exp(0) = 1$ ve $\exp(-1)$ yaklaşık 0,368 olur. Bu fonksiyon, enerji farkı büyürken yüksek enerjili durumların dolma olasılığının nasıl hızlı azaldığını anlatmakta kullanılır. **kT**, Boltzmann sabiti k ile mutlak sıcaklık T'nin çarpımıdır ve enerji birimine sahiptir. Kelvin ölçeğinde oda sıcaklığı yaklaşık 300 K, kT yaklaşık 0,026 eV'dir. Bir enerji farkını kT'ye bölmek boyutsuz sayı verir; bu oranı üstel fonksiyona koyabiliriz.

Anlama kontrolü: aynı bant aralığı, aynı hücre mi?

İki malzemenin bant aralığı 1,4 eV olabilir; bu, aynı ışığı aynı kalınlıkta soğurdukları anlamına gelmez. Geçişin olasılığı, gerekli momentum değişimi, kusurlar ve taşıma özellikleri farklıdır. Bant aralığı ilk eşiktir. İyi hücre kararı için soğurma katsayısını, taşıyıcı yaşam süresini, seçici kontakları ve kararlılığı ayrıca bilmeliyiz.



Şekil 08. Bant yapısı ile doluluk ayrı bilgidir. A ve B panelleri doğrudan ve fonon katkılı dolaylı geçişin kavramsal çizimleridir; gerçek malzeme bant hesabı değildir. C paneli Fermi-Dirac dağılımını hesaplar: sıcaklık, Fermi düzeyi çevresindeki doluluk geçişini genişletir. [H12] [H14]

Atomdan kristale, kristalden banda

Yalıtılmış atomun elektronları belirli enerji düzeylerine yerleşir. Çok sayıda atom düzenli bir katıda birleştiğinde, atomik orbitallerin etkileşmesi çok sayıda yakın enerji durumunu oluşturur. Bunları enerji bantları olarak ele alırız. Elektron sayısı, durumların simetrisi ve kristal içindeki etkileşimler, bantların doluluğunu belirler. Bu resim, her katının serbest elektron gazı gibi davrandığını söylemez; güçlü korelasyon, düzensizlik ve elektron-örgü bağlaşımı basit bant yaklaşımını sınırlayabilir.

Valans bandının üst sınırı E_v ile iletim bandının alt sınırı E_c arasındaki fark $E_g = E_c - E_v$ bant aralığıdır. Elektronun bantlar arasında uyarılması, iletim bandında bir elektron ve valans bandında bir boşluk oluşturur. Boşluk, “madde içinde gerçek bir pozitif temel parçacık” değildir; doluya yakın banttaki eksik elektronun yük ve hareketini izleyen etkili bir betimlemedir. Bant aralığı, ışığın hangi bölümünün kullanılabileceği için ilk kılavuzdur. [H12]

Ama yalnızca E_g 'yi bilmek yetmez. Bantların kristal momentumu k ile nasıl değiştiği, geçişlerin güçlü olup olmadığı, taşıyıcıların ne kadar kolay hareket ettiği ve kusurlarla etkileşimleri ayrı sorulardır. İki malzeme aynı bant aralığına sahip olduğu halde çok farklı soğurma derinliği ve taşıyıcı ömrü gösterebilir.

Doğrudan, dolaylı ve optik olarak zayıf geçişler

Bir optik geçişte enerji ve kristal momentumu korunmalıdır. Fotonun katıdaki elektronlara göre küçük momentumu nedeniyle, basit doğrudan geçiş aynı k yakınındaki durumları bağlar. İletim bandı minimumu ve valans bandı maksimumu farklı k noktalarında ise, dolaylı geçiş için örgü titreşimi olan bir fononun da sürece katılması gerekebilir. Bu, özellikle soğurma kenarı yakınında olasılığı azaltabilir.

Doğrudan bant aralığı, geçişin mutlaka çok güçlü olacağı anlamına gelmez. Başlangıç ve son durumların simetrisi, dipol matris elemanını küçük veya yasak hale getirebilir. Buna karşılık daha yüksek enerjide güçlü geçişler bulunabilir. Bu nedenle hesaplamalı taramada “doğrudan $E_g = 1,4$ eV” sonucu, $\alpha(E)$ soğurma katsayısı olmadan tamamlanmış optik değerlendirme değildir.

Basit tek geçişli, yansız ortamda $I(x) = I_0 \exp(-\alpha x)$ yazılır. α 'nın birimi m^{-1} veya cm^{-1} 'dir; soğurma uzunluğu $1/\alpha$ 'dır. Çok katmanlı gerçek hücrede girişim, dokulama, yansıma ve arka ayna nedeniyle bu ifade tüm optik problemi çözmez; fakat kalınlık ölçeğini anlamak için yararlıdır. PVEducation'ın soğurma katsayısı bölümü, dalga boyuna ve malzeme türüne bağlılığın önemini gösterir. [H13]

Taşıyıcı yoğunluğu bir doluluk problemidir

Denge durumunda bir elektronik durumun doluluk olasılığı Fermi-Dirac dağılımıyla verilir: $f(E) = 1/[1 + \exp((E - E_F)/(kBT))]$. E_F , Fermi düzeyi yani elektronik kimyasal potansiyeldir. E_F 'yi, elektronların hepsinin bulunduğu tek enerji gibi düşünmeyin; dağılımın doluluk ölçeğidir. İletim bandındaki yoğunluk, durum yoğunluğu ile $f(E)$ 'nin integralidir.

Seyreltik, dejenere olmayan sınırdaki $n = N_c \exp[-(E_c - E_F)/(kBT)]$ ve $p = N_v \exp[-(E_F - E_v)/(kBT)]$ kullanılabilir. N_c ve N_v , iletim ve valans bantlarının etkin durum yoğunluklarıdır; taşıyıcı yoğunluklarıyla aynı birimdedir. Bu yaklaşım bant kenarlarına çok yakın Fermi düzeylerinde veya çok yüksek katkılamada dikkat gerektirir. Denge bağıntısı $np = n_i^2$, öz taşıyıcı yoğunluğu n_i üzerinden elektron ve boşluk popülasyonlarını ilişkilendirir. [H14]

Donör katkılar uygun koşullarda elektron, akseptör katkılar boşluk yoğunluğunu artırır. n-tipi yarıiletkenin bütünü negatif yüklü değildir; serbest elektronların yükü iyonlaşmış donörlerin pozitif yüküyle dengelenir. Katkı yoğunluğu ile serbest taşıyıcı yoğunluğu da her zaman eşit değildir. Eksik iyonlaşma, karşıt katkılarının birbirini telafi etmesi ve kusurların Fermi düzeyini sabitlemesi bu eşitliği bozabilir.

Etkin kütle, hareketlilik ve eksiton

Bant kenarında yaklaşık parabolik dağılım $E(k) \approx E_c + \hbar^2 k^2 / (2m)$ ile etkin kütle tanımlanabilir. Eğrilik büyüdükçe m küçülür. Anizotropik kristalde tek bir sayı yerine tensör gerekebilir. Etkin kütle, taşıyıcı hareketliliğini tek başına belirlemez: basit modelde $\mu = q\tau m / m^*$ olur; τm momentum gevşeme zamanıdır. Hafif taşıyıcı çok kuvvetli saçılıyorsa yine düşük hareketlilik gösterebilir. Yaşam süresi τ ile momentum gevşeme zamanı τm aynı büyüklük değildir.

Elektron ve boşluk Coulomb çekimiyle bağlı bir eksiton oluşturabilir. Bağlanma enerjisi, optik uyarının serbest taşıyıcıya dönüşme koşullarını etkiler. Yüksek dielektrik perdeleme ve küçük indirgenmiş etkin kütle, basit hidrojenik modelde daha zayıf bağlanma eğilimindedir. Moleküler katılarda veya düşük boyutlu sistemlerde bu resim değişebilir. Optik soğurma başlangıcını, quasiparticle bant aralığını ve DFT özdeğer farkını aynı sayı gibi kullanmamak gerekir.

Çalışılmış örnek: iki ayrı malzeme süzgeci

Öğretici örnek. Yansıma ihmal edilsin ve hedef tek geçişte %90 soğurma olsun. $A = 1 - \exp(-\alpha d) = 0,90$ koşulundan $d = \ln(10)/\alpha$ çıkar. $\alpha = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ için $d \approx 0,230 \text{ }\mu\text{m}$; $\alpha = 10^3 \text{ cm}^{-1}$ için $d \approx 23,0 \text{ }\mu\text{m}$ gerekir. Yalnızca yüz kat farklı soğurma katsayısı, yüz kat farklı kalınlık gerektirir. Bu sonuç ince film imalatı, malzeme tüketimi ve taşıyıcı toplama uzaklığı açısından önemlidir.

İkinci bir düşünce deneyi olarak $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ve tam iyonlaşmış net akseptör yoğunluğu 10^{16} cm^{-3} alınsın. Düşük enjeksiyon ve dejenere olmayan denge yaklaşımında $p \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n \approx n_i^2/p = 10^4 \text{ cm}^{-3}$ olur. Çok azınlıkta bulunan elektronların yoğunluğu küçük olsa da, aydınlatma altındaki toplanabilir akım ve yeniden birleşme için belirleyici olabilir. Bu sayılar belirli sıcaklıkta belirli silisyum tablosunun hassas değerleri olarak değil, açık varsayımli hesap örneği olarak kullanılmaktadır.

Durum yoğunluğundan taşıyıcı yoğunluğuna

Enerji bandı çizimindeki her çizgi tek bir elektron değildir. Büyük bir kristalde çok sayıda izinli durum bulunur; durum yoğunluğu $g(E)$, birim hacim ve birim enerji aralığındaki durum sayısını verir. Üç boyutlu parabolik bir bantta $g(E)$, bant kenarından uzaklığın kareköküyle artar. Taşıyıcı sayısı, mevcut durum sayısı ile bu durumların doluluk olasılığının çarpımını toplamaktır:

$$n = \int_{E_c}^{\infty} g_c(E) f(E) dE. \quad (I.4.1)$$

Fermi düzeyi ile iletim bandı arasındaki fark birkaç $k_B T$ 'den büyükse $f(E)$, Boltzmann üstel biçimine indirgenir. Parabolik bant integrali etkin durum yoğunluğu N_c içinde toplanır ve aşağıdaki sonuç elde edilir. Basit izotropik tek vadi için spin iki katlılığı içerilmiştir; birden çok vadi veya anizotropi etkin kütle tanımını değiştirir.

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2}, \quad n = N_c \exp \left[-\frac{E_c - E_F}{k_B T} \right]. \quad (I.4.2)$$

Valans bandında boşluklar için benzer işlem N_v ve p 'yi verir. İki ifadeyi çarptığında Fermi düzeyi kaybolur:

$$np = N_c N_v \exp \left(-\frac{E_g}{k_B T} \right) = n_i^2. \quad (I.4.3)$$

Bu türetme kütle etkisi yasasının nereden geldiğini gösterir. Ayrıca sıcaklığın neden güçlü olduğunu açıklar: N_c ve N_v yaklaşık T üzeri $3/2$ ile değişirken bant aralığı üstel terime girer. Dejenere katkılama, bant aralığı daralması veya kuvvetli düzensizlik varsa bu sade ifadelerin kapsamı yeniden değerlendirilir. “Katkı miktarı iki katlandı, serbest taşıyıcı da tam iki katlanır” cümlesi bütün koşullarda doğru değildir.

İki zaman ölçeği: hareketlilik ve yaşam süresi

Hareketlilik, taşıyıcının alan altında ne kadar hız kazanabildiğiyle ilgilidir. Yaşam süresi, fazla taşıyıcı popülasyonunun yeniden birleşme nedeniyle ne kadar kaldığıyla ilgilidir. Momentumunu kaybeden bir elektron mutlaka yeniden birleşmiş olmaz; yalnız yönü veya hızı değişmiş olabilir. Bu nedenle yüksek hareketlilik ile uzun yaşam süresi farklı deneylerle araştırılır.

Einstein bağıntısını difüzyon uzunluğuna yerleştirirsek:

$$L = \sqrt{D\tau} = \sqrt{\mu \frac{k_B T}{q} \tau}. \quad (1.4.4)$$

298,15 K'de $\mu = 10 \text{ cm}^2/(\text{V s})$ ve $\tau = 1 \text{ } \mu\text{s}$ seçersek $D = 0,257 \text{ cm}^2/\text{s}$, $L = 5,07 \text{ } \mu\text{m}$ bulunur. Hareketliliği dört kat artırmak L 'yi yalnız iki kat artırır; ömrü dört kat artırmak da aynı sonucu verir. Fakat bu iki müdahalenin kontak, malzeme ve sıcaklık bağımlılıkları farklıdır. Bir araştırma programı için önemli olan yalnız L 'nin büyümesi değil, bunu hangi kaybı azaltarak başardığıdır.

Türetmenin öğretisi: Bant aralığı foton eşliğini, hareketlilik taşınmayı, yaşam süresi kaybı, dielektrik yanıt ise elektrostatik etkileşimi etkiler. Tek bir “iyi malzeme” sayısı bu dört işlevi birden temsil etmez.

Saçılma, ömür ve geometriyi birlikte düşünmek

Saçılma, hareket eden taşıyıcının kristal titreşimleri, kusurlar veya başka etkileşimler nedeniyle hareket yönü ve momentumunun değişmesidir. Elektronun her saçılmada yeniden birleşmesi gerekmez. Bu yüzden hareketliliği sınırlayan momentum gevşeme süresi ile bir fazla taşıyıcının yeniden birleşmeden önceki yaşam süresi ayrıdır. Birincisi hareketin ne kadar kolay olduğunu, ikincisi toplama için ne kadar zaman kaldığını belirler.

Geometri, filmin kalınlığını, yanal boyutlarını ve kontaklara olan uzaklığı kapsar. Aynı malzemeden yapılan iki aygıtta toplama mesafeleri farklı olabilir. Örneğin 10 mikrometre difüzyon uzunluğu, 1 mikrometre uzaktaki bir kontağa erişmek açısından elverişliyken 100 mikrometre uzaklık için aynı güveni vermez. Ömür tek başına aygıt kalitesini söylemez; hareketlilik, difüzyon ve gereken yol birlikte okunur.

Sık yanlışlar ve çalışma soruları

“Bant aralığı doğruysa PV malzemesi bulunmuştur” yanlış bir çıkarımdır. “Yüksek dielektrik sabiti tüm kusurları zararsızlaştırır” da söylenemez; kusur enerjisi, yakalama kesiti, örgü gevşemesi ve yoğunluğu ayrıca gerekir. Hesaplanan bant kenarları, üretim sonrasındaki gerçek kimyasal bileşimi ve arayüzleri kendiliğinden temsil etmez.

1. $\alpha = 2 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ için 1/e soğurma uzunluğu nedir? **Yanıt:** 0,50 μm .
2. Eg aynı olan iki malzemenin Jsc değerleri neden farklı olabilir? **Yanıt:** Soğurma katsayısı, kalınlık, optik kayıp ve taşıyıcı toplama olasılığı farklı olabilir.
3. n-tipi bir kristal neden makroskopik olarak nötr olabilir? **Yanıt:** Serbest elektronlar, iyonlaşmış donörlerin pozitif yükünü dengeler.

Okuma yolu: Bant aralığı [H12], soğurma [H13] ve denge yoğunluğu [H14] bölümlerini, her formülün birimini yazarak okuyun. Daha sonra malzeme taramasında bant yapısının hangi bilgileri verdiğini ve hangi deneylerin hâlâ gerektiğini ayrı sütunlarda listeleyin.

Eklem ve seçici kontak: ışıkla oluşan yük nasıl işe dönüştürülür?

Bir eklem nasıl oluşur?

Elektronların yoğun olduğu n tipi bölge ile deliklerin yoğun olduğu p tipi bölgeyi aynı kristalde komşu hale getirelim. **Yoğunluk farkı**, taşıyıcıların rastgele hareketinin net sonucunu belirler: elektronlar başlangıçta n tarafından p tarafına, delikler ters yöne yayılır. Bu yayılmaya **difüzyon** denir. Bir odada parfümün yoğun yerden seyrek yere yayılması benzer bir istatistik fikridir; elektronlar için elektrik alan da ayrıca devrededir.

Hareketli taşıyıcılar eklem çevresinden uzaklaşınca geride yer değiştiremeyen iyonlaşmış katkılar kalır. n tarafındaki verici iyonlar artı, p tarafındaki alıcı iyonlar eksi yüklüdür. Böylece n tarafından p tarafına yönelen bir **elektrik alan** oluşur. Alan elektronlara ters yönde kuvvet uygular. Taşıyıcı yoğunluğu farkının yayma eğilimi ile alanın sürüklenme eğilimi dengelendiğinde karanlıkta net akım sıfır olur. Hareket hiç durmaz; karşı yönlü ortalama akışlar birbirini dengeler.

Bu bölgede çoğunluk taşıyıcısı azaldığı için **tükenim bölgesi** adı kullanılır. Bölge atomlardan arınmış değildir. Atom örgüsü ve sabit yükler oradadır. **Yerleşik potansiyel**, eklem içindeki elektrostatik potansiyel farkıdır; potansiyel, birim yük başına enerjiyle ilişkilidir. Bunu karanlıkta iki uca voltmetre bağlayıp sürekli enerji alabileceğimiz bir pil gerilimi sanmamalıyız. Dengedeki tüm kontaklar ve enerji farkları birlikte hesaba katıldığında bedelsiz güç çıkmaz.

Aydınlatma dengesini nasıl değiştirir?

Işık fazla elektron ve delik üretir. Eklem çevresindeki alan ve diğer bölgelerdeki difüzyon, bu taşıyıcıların ilgili seçici kontaklara ulaşmasına yardımcı olur. Elektron kontağı deliklerin, delik kontağı elektronların kolayca kaybolabileceği bir yüzey olursa enerji dönüşümü bozulur. Bu nedenle bir metalin çok iyi iletken olması tek başına iyi güneş hücresi kontağı yapmaz. Yükü az dirençle geçirmek ve yanlış taşıyıcıyı engellemek birlikte gerekir.

Açık devrede dış yol kesiktir; yük birikimi uçlarda gerilim oluşturur, fakat kararlı durumda üretilen fazla taşıyıcılar aygıt içinde yeniden birleşir. **Yük bağlıken** taşıyıcıların bir bölümü dış devrede enerji aktarır. Hücre elektron stokunu tüketmez. Dış devreden dönüş yolu, yük korunumu ve ışıkla sürekli enerji girişi birlikte çevrimi sürdürür.

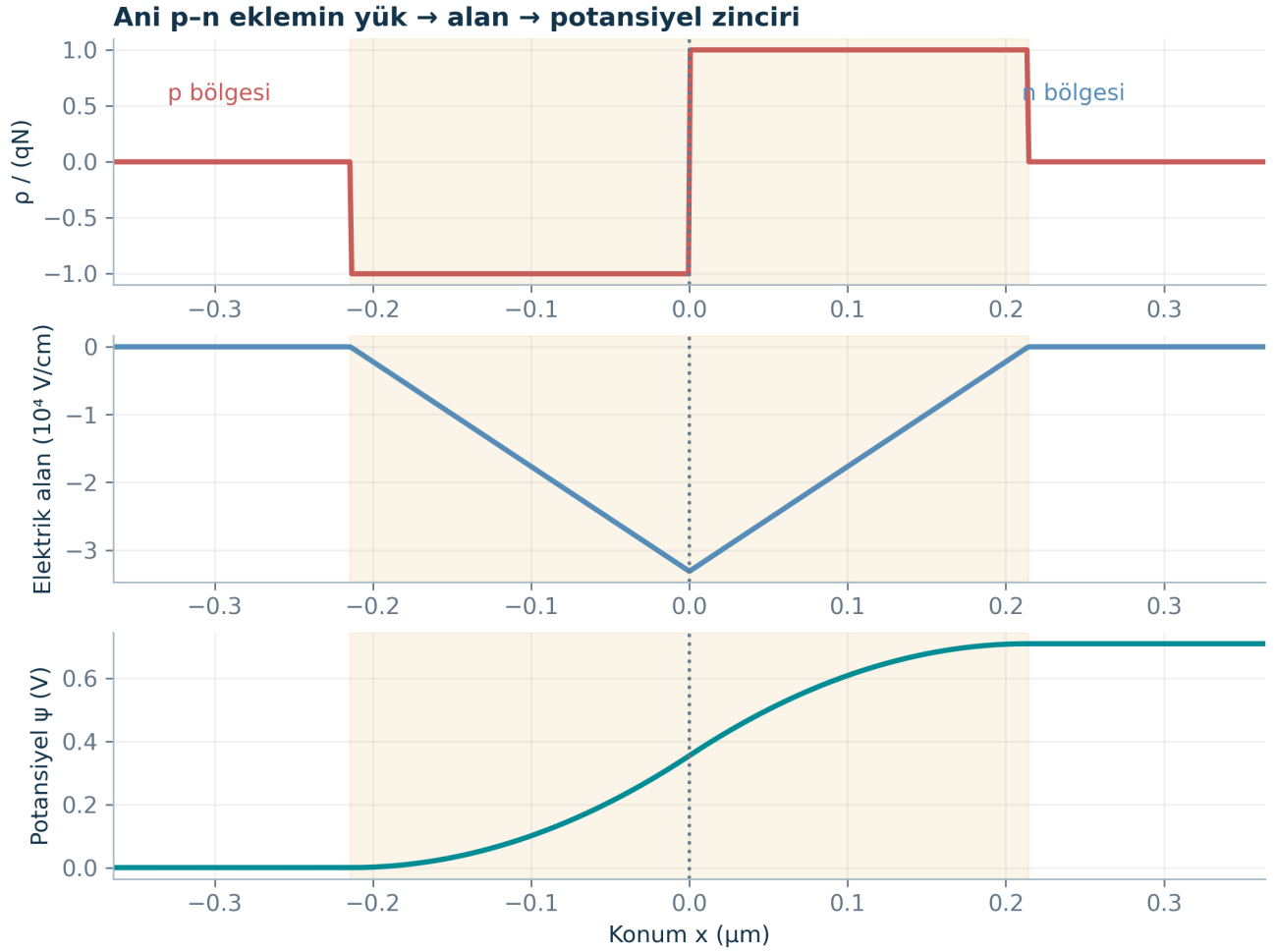
Işık altında elektron ve delik toplulukları tek bir denge parametresiyle tarif edilemeyebilir. Her biri için ayrı **yarı-Fermi düzeyi** kullanırız. Bunların ayrılması, taşıyıcılarda elektriksel işe çevrilebilecek serbest enerji bulunduğunu ifade eder. Uçlarda ölçülen gerilim ideal seçici kontaklarla bu ayrılmayı izleyebilir; kötü arayüzler ve taşıma kayıpları araya ek farklar sokar. Aşağıdaki ileri denklemleri bu fiziksel hikâyenin miktarını hesaplamak için kullanacağız.

Alan ve türev işaretini okumak

Bir grafikte yatay eksen x konumu, düşey eksen potansiyel ise eğim iki yakın noktanın potansiyel farkının uzaklığa bölümüdür. **Türev**, bu eğimin çok küçük aralıktaki limitini anlatır. Elektrik alan potansiyelin konuma göre negatif türeviyle ilişkilidir; eksi işareti alanın azalan potansiyel yönüne baktığını belirtir. **Temsili örnek:** potansiyel $1\ \mu\text{m}$ boyunca $0,1\ \text{V}$ artıyorsa ortalama alan $-0,1\ \text{V}/\mu\text{m}$, yani $-100\ 000\ \text{V/m}$ olur. Poisson denklemi ise bu alanın konuma göre nasıl değiştiğini yerel yük yoğunluğuna bağlar. ∂ işareti, birden çok değişken varken diğerlerini sabit tutup yalnız belirtilene göre değişimi aldığımız **kısmi türevi** gösterir.

Anlama kontrolü: daha güçlü alan her zaman daha iyi mi?

Işıkla üretilen taşıyıcı eklemin uzağında oluşursa önce difüzyonla uygun bölgeye ulaşması gerekebilir. Yalnız eklemdeki elektrik alanını artırmak, kısa yaşam süresinin veya kötü yüzeyin zararını otomatik gidermez. “Taşıyıcı nerede doğdu, ne kadar yol aldı, ne kadar sürede kayboldu?” sorularını birlikte sormak gerekir.



Şekil 09. Yük, alan ve potansiyel aynı çözümün üç görünümüdür. Eşit katkılı ani eklem için $N_a = N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $\epsilon_r = 11,7$ ve $T = 298,15 \text{ K}$ kullanıldı. Sarı bölge tükenim bölgesidir. Potansiyel, elektrik alanın negatif integralidir. Türetme bu bölümün ilerleyen kısmındadır. [H15]

Aydınlatılmış bir kristal neden her zaman pil değildir?

Homojen yarıiletkeni ışığa koyduğumuzda elektron ve boşluk oluşturabiliriz. Fakat iki ucuna gelişigüzel metal bağlamak, otomatik olarak yararlı foto-gerilim üretmez. Elektronların ve boşlukların iki uçtan aynı kolaylıkla kaybolabildiği bir yapı, oluşan serbest enerjiyi kontaklarda yeniden birleşmeyle tüketebilir. Bir uç elektronları, diğeri boşlukları tercihlili biçimde toplamalıdır. Bu seçicilik, farklı taşıyıcı iletkenlikleri ve uygun arayüz özellikleriyle gerçekleşir.

Würfel, Cuevas ve Würfel'in seçici taşıma analizi, güneş hücresini yalnızca “iç elektrik alan elektron ile boşluğu ayırır” resmiyle açıklamanın eksik kaldığını vurgular. Taşınımı quasi-Fermi enerji gradyanları, seçiciliği ise iki taşıyıcının farklı iletim yolları üzerinden ele almak daha geneldir. [H21] Bu çerçeve p-n, p-i-n, heteroeklem ve pasifleştiren kontak mimarilerini ortak bir dilde düşünmeyi sağlar.

p-n eklem dengede nasıl kurulur?

p ve n bölgeleri temas ettiğinde, yoğunluk farkları elektron ve boşluk difüzyonuna yol açar. Hareketli taşıyıcıların bir kısmının ayrılmasıyla, geride uzay yükü bölgesinde iyonlaşmış katkılar kalır. Oluşan elektrik alan difüzyona karşı sürüklenme akımı oluşturur. Termal dengede toplam akım sıfırdır; fakat mikroskobik hareket sona ermez. Sürüklenme ve difüzyon akımları dengelenir.

Basit, ani, dejenere olmayan bir homoelekman için iç potansiyel $V_{bi} = (kBT/q) \ln(NaNd/n_i^2)$ olur. Bu potansiyel bir voltmetreye bağlandığında dışarıdan bedelsiz güç sağlayan gizli pil değildir. Denge temas potansiyelleri ve tek Fermi düzeyi, kapalı devrede net iş üretimine izin vermez. Shockley'nin 1949 eklem kuramı, potansiyel dağılımı ile azınlık taşıyıcı difüzyonunun doğrultucu davranıştaki yerini sistemleştirdi. [H15]

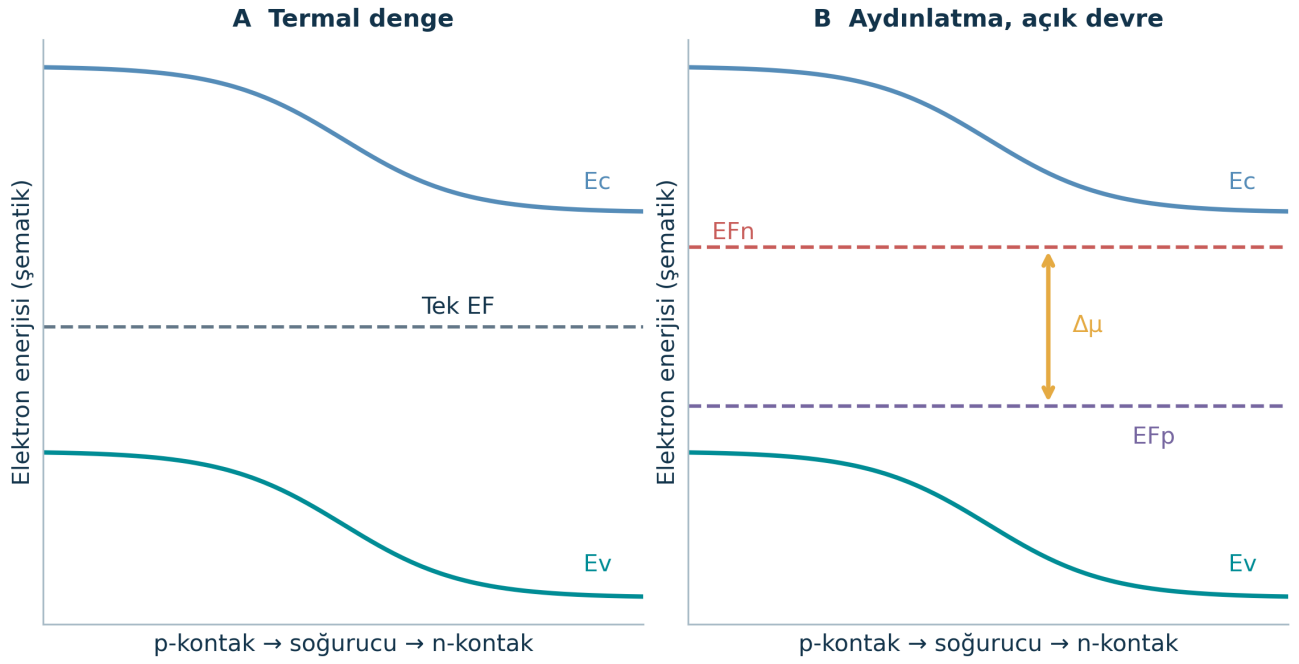
Tükenim yaklaşımında hareketli yük ihmal edilerek Poisson denklemi çözülür. Toplam genişlik $W \approx \sqrt{[(2\epsilon_s/q)(1/Na + 1/Nd)(V_{bi} - V)]}$ olur; V ileri yöndeki eklem gerilimidir. ϵ_s yarıiletkenin mutlak dielektrik geçirgenliğidir. Na ve Nd m^{-3} ise ϵ_s F/m alınmalıdır. Net uzay yükü dengesi $Na x_p = Nd x_n$, tükenim bölgesinin daha hafif katkılanmış tarafta daha geniş olacağını gösterir.

Elektrik alan, difüzyon ve korunum denklemleri

Bir boyutta konvansiyonel akım yoğunlukları $J_n = q\mu_n nE + qD_n dn/dx$ ve $J_p = q\mu_p pE - qD_p dp/dx$ biçimindedir. Burada E elektrik alanı V/m, hareketlilik μ $m^2/(Vs)$, difüzyon katsayısı D m^2/s birimindedir. Elektron parçacık akısı ile elektronların konvansiyonel akımının yönü farklıdır; işaret karışıklıklarının önemli bir kısmı buradan doğar. Dejenere olmayan dengede Einstein bağıntısı $D/\mu = kBT/q$ 'dur. Difüzyonun yoğunluk gradyanıyla bağlantısı, PVEducation'ın ilgili bölümünde adım adım işlenir. [H16]

Süreklilik denklemleri yerel üretim G ve yeniden birleşme R ile taşıyıcı korunmasını birleştirir. $\partial n/\partial t = (1/q)\partial J_n/\partial x + G - R$; $\partial p/\partial t = -(1/q)\partial J_p/\partial x + G - R$ yazılır. Poisson denklemi ise $dE/dx = \rho/\epsilon_s$ ile yükü alana bağlar. Sabit durumda zamansal türevler sıfırdır. Yine de her konumda $G = R$ olması gerekmez; aradaki fark taşıma akımının değişimiyle dengelenir. Hücrenin bütünü üzerinde üretim, yeniden birleşme ve dışarı alınan akımın muhasebesi kapanmalıdır.

Bu üç denklem tek başına tam model değildir. Kontaklardaki sınır koşulları, mobil iyonlar, arayüz yükleri, tuzak dolulukları, optik üretim profili ve sıcaklık da belirtilmelidir. Sayısal çözücünün yakınsaması, fiziksel parametrelerin doğru seçildiğini kanıtlamaz. Önce analitik sınırların, yük korunmasının ve karanlık dengenin sağlandığı kontrol edilmelidir.



Şekil 10. Dengede tek Fermi düzeyi; ideal aydınlatılmış açık-devre sınırında ayrılmış quasi-Fermi düzeyleri. B paneli düz quasi-Fermi düzeyli kavramsal sınırdır; kendi içinde çözülmüş Poisson profili değildir. $\Delta\mu$ taşıyıcı çiftinin kullanılabilir kimyasal potansiyelini anlatır. [H21] [H27]

Quasi-Fermi ayrışması ve uç gerilimi

Aydınlatma altında elektron ve boşluk popülasyonları ayrı quasi-Fermi düzeyleriyle, E_{Fn} ve E_{Fp} ile tanımlanabilir. Yerel ayrışma $\Delta\mu = E_{Fn} - E_{Fp}$, taşıyıcı çiftinin kullanılabilir kimyasal potansiyelini ifade eder. Dejenere olmayan yerel dengede $n_p = n_i^2 \exp(\Delta\mu/kBT)$ olur. İdeal seçici ve kayıpsız kontaklar uygun koşullarda bu ayrışmayı dış devrede qV olarak yansıtır. Gerçek arayüzlerdeki yeniden birleşme veya taşıma kaybı nedeniyle malzeme içindeki yüksek ayrışma, aynı büyüklükte uç V_{oc} elde edildiği anlamına gelmez.

İyi bir kontak iki işi birlikte yapar: istenen taşıyıcının geçiş direncini küçük tutmak ve karşı taşıyıcının kaybını sınırlamak. Bir yalıtkan tabaka yüzeyi mükemmel pasifleştirip aynı zamanda taşıma yolunu tıkayabilir. Çok iletken bir metal de elektron ve boşluğu hızlıca yeniden birleştirebilir. Bu nedenle kontak araştırmasında düşük temas direnci ile düşük yeniden birleşme aynı örnek üzerinde değerlendirilmelidir.

Çalışılmış örnek: tükenim genişliği ve toplama mesafesi

Öğretici örnek. 298,15 K için $kBT/q \approx 25,693$ mV alınsın. $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ve $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ kullanılırsa $V_{bi} \approx 0,828$ V bulunur. $\epsilon_r = 11,7$ ve $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$ ile, sıfır uygulanan gerilimde $W \approx 0,329 \mu\text{m}$ 'dir. $x_p/x_n = N_d/N_a = 100$ olduğundan genişliğin hemen tamamı p tarafındadır. Bu örneğin sayıları yalnızca belirtilen modelin sonuçlarıdır.

Şimdi kalınlığı 150 μm olan bir hücre düşünün. Tükenim bölgesinin 0,329 μm olması, kalan kalınlıkta oluşan tüm taşıyıcıların kaybolduğu anlamına gelmez. Yeterince uzun ömürlü azınlık taşıyıcıları difüzyonla eklemeye ulaşabilir. Örneğin $D = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ ve $\tau = 100 \mu\text{s}$ için $L = \sqrt{D\tau} \approx 316 \mu\text{m}$ olur. Hücre fiziğini yalnızca güçlü alan bölgesine indirgemek, bu önemli toplama mekanizmasını gözden geçirir.

Poisson denklemini bir eklem üzerinde çözmek

Ani homoecklemde p tarafını $x < 0$, n tarafını $x > 0$ seçelim. Tam iyonlaşma ve tükenim yaklaşımında hareketli yükler ihmal edilir. p tarafında geride kalan akseptör yükü $-qN_a$, n tarafında donör yükü $+qN_d$ 'dir. Uzak nötr bölgelerde alanı sıfır alarak $dE/dx = \rho/\epsilon$ denklemini iki tarafta ayrı ayrı integre ederiz:

$$E_p(x) = -\frac{qN_a}{\epsilon_s}(x + x_p), \quad -x_p \leq x \leq 0. \quad (1.5.1)$$

$$E_n(x) = \frac{qN_d}{\epsilon_s}(x - x_n), \quad 0 \leq x \leq x_n. \quad (1.5.2)$$

Eklemde alanın sürekliliği $N_a x_p = N_d x_n$ sonucunu verir. Bu yalnız ezberlenecek bir eşitlik değildir: negatif ve pozitif sabit yük alanlarının eşit olması gerektiğini ifade eder. Elektrik alan grafiğindeki iki üçgenin toplam alanı potansiyel düşümdür; ψ için $E = -d\psi/dx$ olduğundan işaret korunmalıdır.

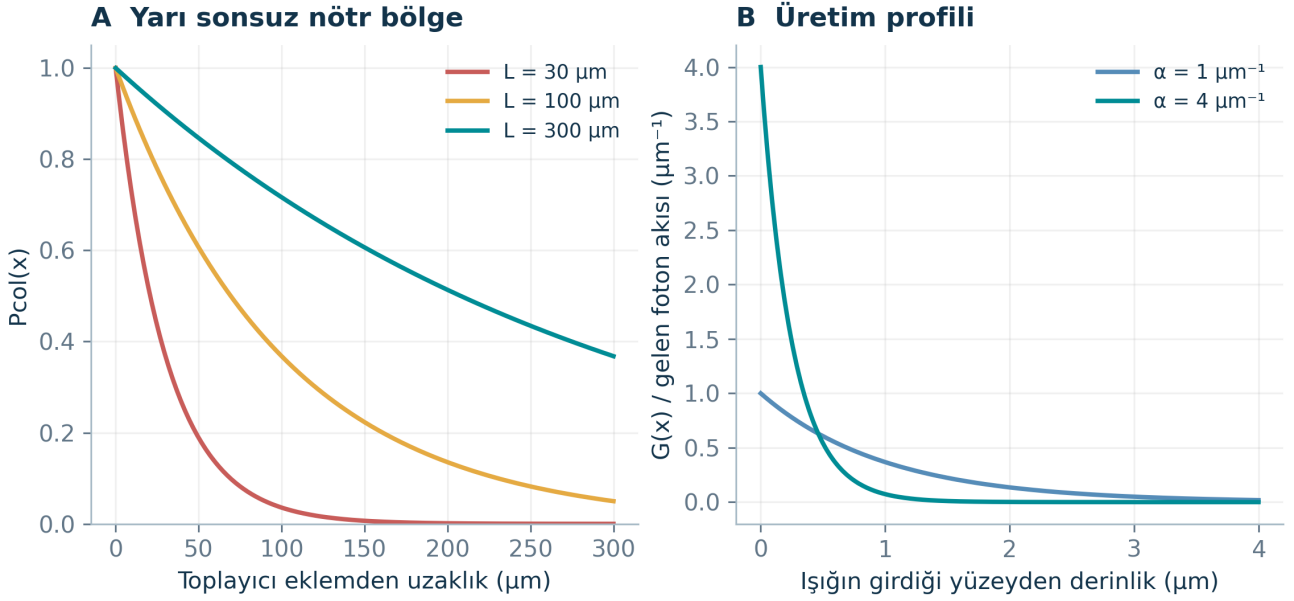
$$V_{bi} - V = \frac{q}{2\epsilon_s} (N_a x_p^2 + N_d x_n^2). \quad (1.5.3)$$

Yük dengesi ve $W = x_p + x_n$ kullanıldığında daha önce verilen tükenim genişliği formülü çıkar. Eşit katkılı örnekte $N_a = N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ve $\epsilon_r = 11,7$ için $V_{bi} = 0,710 \text{ V}$, $W = 0,428 \mu\text{m}$ olur. Alan ortada yaklaşık $-3,3 \times 10^{-4} \text{ V/cm}$ 'ye iner. Şeklin üç panelini sırayla okursan dikdörtgen yükün üçgen alanı, onun da eğrisel potansiyeli nasıl ürettiğini görürsün. Şekildeki eşit katkılama örneği, önceki asimetrik sayısal örnekten özellikle farklı seçilmiştir.

Toplama olasılığının türetilmesi

Eklemde uzakta oluşan bir azınlık taşıyıcısının eklemeye ulaşma şansını $P_{col}(x)$ ile gösterelim. Sabit difüzyon katsayısı ve sabit ömürlü, alanı ihmal edilen yarı sonsuz nötr bölgede bu olasılık denklemi $D P_{col}'' - P_{col}/\tau = 0$ olur. $P_{col}(0) = 1$, sonsuzda $P_{col} = 0$ sınırlarıyla:

$$P_{col}(x) = \exp(-x/L), \quad L = \sqrt{D\tau}. \quad (1.5.4)$$



Şekil 11. Üretim ve toplama aynı profil değildir. A panelinde taşıyıcının eklemiden uzaklaştıkça ulaşma olasılığı düşer; L büyüdüğünde daha derindeki üretim kullanılabilir. B panelinde optik üretim, ışığın girişinden itibaren söner. Gerçek akım, aynı koordinat sistemindeki $G(x)$ ile $P_{col}(x)$ çarpımının integralidir. Açık varsayımlı analitik çizimler. [H16]

Bu kez birim hacimdeki üretim hızını $G(x)$ olarak yazalım. Her ince dx dilimi $qG(x)dx$ kadar potansiyel akım üretir; bunun $P_{col}(x)$ kadarı toplanır. Böylece:

$$J_{ph} = q \int_0^d G(x) P_{col}(x) dx. \quad (I.5.5)$$

Bu ifade optik mühendis ile aygıt fizikçisini aynı hesabın içine getirir. Ön yüz yansıtmasını azaltmak G 'yi artırır; arka yüz pasivasyonu P_{col} 'yi değiştirebilir. İkisi de J_{sc} 'yi yükseltebilir, fakat malzemede aynı değişikliği yapmış değildir. Ön ve arka aydınlatma, farklı dalga boylarında EQE ve kalınlık serisi ölçümleri bu iki açıklamayı ayırmak için kullanılabilir. Sonlu kalınlıkta ve sonlu arka yüz yeniden birleşmesinde çözüm yalnız tek üstel değildir; iki sınır koşulu birlikte çözülür.

Kontrol hacmi ve sınırdaki akı

Yük korunmasını, aygıtın içinden küçük bir **kontrol hacmi** seçerek okuyabiliriz. Bu hacmin içindeki taşıyıcı sayısı; içeride üretilenler, yeniden birleşenler ve sınırından girip çıkanlarla değişir. Dışarı yönelen **yüzey normali**, sınırın her noktasında hangi yönü pozitif çıkış saydığımızı gösterir. Bu gösterimde V hacmi, S onun yüzeyini, n üzerine konan şapka ise birim normal yönünü temsil eder. Bu geometrik n , elektron yoğunluğu n ile aynı büyüklük değildir.

Bir boru parçasına giren su ile çıkan suyu karşılaştırmak bu muhasebeye benzer. Fakat yük hesabında üretim ve yeniden birleşme de vardır. **Sınır koşulu**, komşu bölgenin

veya kontağın bu akışa nasıl izin verdiğini söyler. İdeal kapalı sınır, sabit kontak gerilimi ve yeniden birleşen yüzey aynı fiziksel koşul değildir.

Sık yanlışlar ve çalışma soruları

“Eklem ne kadar yüksek katkılıysa o kadar iyidir” denemez; yüksek katkı bazı elektriksel avantajlarla birlikte Auger kaybı, bant aralığı daralması ve hareketlilik azalması getirebilir. “Kalın soğurucu her zaman daha çok akım verir” de yanlıştır; daha fazla üretim, daha fazla yeniden birleşmeyle dengelenebilir.

1. Dengede p-n eklem iç alanı varken net akım neden sıfırdır? **Yanıt:** Sürüklenme ve difüzyon akımları birbirini dengeler.

2. $D = 2 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\tau = 5 \text{ } \mu\text{s}$ için difüzyon uzunluğu nedir? **Yanıt:** Yaklaşık $31,6 \text{ } \mu\text{m}$.

3. Tükenim bölgesi hangi tarafta daha geniştir? **Yanıt:** Daha düşük katkı yoğunluğuna sahip tarafta.

Okuma yolu: Eklem tarihinin temelini [H15], difüzyon kavramını [H16], ardından seçici kontaktların daha genel açıklamasını [H21] okuyun. Bir aygıt şeması çizerken yalnızca bant kenarlarını değil, elektron ve boşluğun hangi uçtan geçebileceğini de işaretleyin.

Yeniden birleşme: akımın ve gerilimin nerede kaybolduğu

Yeniden birleşmede ne yok olur?

Bir elektronun uyarılmış durumdan daha düşük enerjili boş bir duruma geçmesi, elektron-delik çiftini ortadan kaldırabilir. Ortadan kalkan şey madde veya toplam elektrik yükü değildir; enerji taşımaya elverişli **uyarılmış çifttir**. Enerji bir fotona, kristal titreşimlerine veya başka bir taşıyıcıya aktarılır. Hücrenin yeniden birleşme kaybını anlamak için önce bu enerji yolunu izlemeliyiz.

Işınımlı yeniden birleşmede enerji fotonla taşınır. Bir LED'in ışık yayması bu sürecin tanınmış örneğidir. Yayılan foton hücre içinde tekrar soğurulabilir; buna foton geri dönüşümü denir. Ancak her yayılan foton geri dönmez ve her geri dönüş kayıpsız değildir. Işık yaymanın gözlenmesi tek başına yüksek güç verimini kanıtlamaz.

Kusur destekli yeniden birleşmede atom eksikliği, yabancı atom veya bozuk bağın oluşturduğu enerji durumu ara durak olur. Kusur önce bir taşıyıcıyı yakalayıp sonra zıt taşıyıcıyla çevrimi tamamlayabilir. Böylece enerji örgü titreşimlerine aktarılabilir. Shockley-Read-Hall, kısaca **SRH**, bu yakalama ve salım dengesinin önemli modelidir. “Tuzak var” demek yetmez: enerji konumu, sayısı ve taşıyıcı yakalama olasılığı etkiyi belirler.

Auger yeniden birleşmesinde çiftin enerjisi üçüncü bir taşıyıcıya gider. O taşıyıcı daha sonra fazla enerjisini çoğunlukla ısı olarak bırakır. Üç taşıyıcının rol aldığı bir süreç olduğundan yüksek yoğunlukta önem kazanabilir. Yüzeylerde ise kırılmış veya tamamlanmamış bağlar yeniden birleşmeyi artırabilir. **Pasivasyon**, bu etkin kusurları veya yanlış taşıyıcının yüzeye erişimini azaltan işlemlerin genel adıdır; yüzeyi yalnız mekanik olarak örtmekle aynı şey değildir.

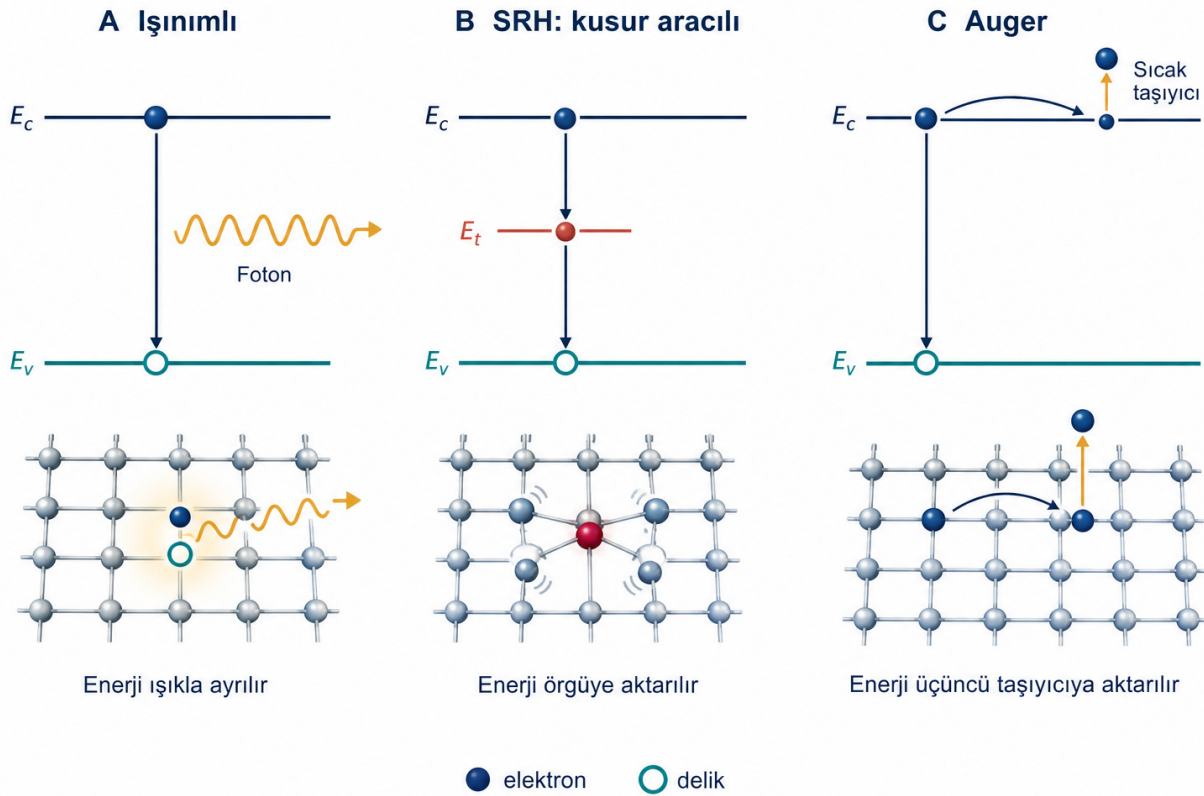
Yaşam süresini bir dolum-boşalma hesabıyla okumak

Işık üretimini bir havuza giren su, yeniden birleşmeyi çıkış olarak düşünelim. Bu benzetmede su yüksekliği fazla taşıyıcı yoğunluğunu temsil eder. Basit, tek zaman sabitli ve homojen durumda fazla yoğunluk Δn , birim hacimde üretim hızı G ve yaşam süresi τ arasında kararlı durumda $\Delta n = G\tau$ bulunur. Üretim birimi $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, zaman saniye, sonuç cm^{-3} 'tür. Gerçek hücrede temasla çekilen akım ve konuma bağlı taşıma da denkleme girer.

Sentetik örnek: $G = 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ve $\tau = 1 \text{ } \mu\text{s}$ için $\Delta n = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ çıkar. Yaşam süresi $10 \text{ } \mu\text{s}$ olursa aynı basit modelde yoğunluk on kat artar. Fakat verim on kat artmaz: yoğunluğun gerilimle ilişkisi logaritmiktir ve akım, optik ve kontak kayıpları da vardır. Aşağıdaki hız denklemlerini, farklı boşalma yollarının hangi koşulda baskınlaştığını bulmak için okuyacağız.

Anlama kontrolü: kısa ışık sönümü ne anlatır?

Bir filmin ışık yayması daha hızlı sönüyorsa iki olasılık düşün: yükler kusurlarda daha hızlı kayboluyor olabilir veya iyi bir kontak yükleri daha hızlı çekiyor olabilir. Kontaksız ve kontaklı kontrol numuneleri, elektriksel ölçümler ve uyarma koşulları olmadan yalnız sönüm süresinden hücreye “iyi” veya “kötü” etiketi verilemez.



Şekil 12. Üç yeniden birleşme mekanizması ve enerjinin gittiği yer. Üstteki enerji şemalarında E_c iletim, E_v değerlik bandı kenarıdır. Işınımlı olayda foton çıkar; SRH yolunda kusur aracılığıyla örgüye enerji aktarılır; Auger olayında enerji başka bir taşıyıcıyı uyarır. Altta örgüler kavramsal temsildir. Oklar olay sırasını anlatır, hız veya olasılık ölçüsü değildir. [H17] [H18] [H19] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Ömür, iyi malzemenin neden merkezindedir?

Soğurulan foton bir elektron-boşluk çifti oluşturduktan sonra iki olasılık yarışır: çiftin serbest enerjisi dış devrede işe dönüşebilir veya yeniden birleşmeyle kaybolabilir. Elektronun valans bandındaki boşluğu doldurması sırasında enerji bir fotona, örgü titreşimlerine ya da başka taşıyıcılara aktarılır. Elektron ve boşluk yoktan yok olmaz; elektronik sistem daha düşük serbest enerjili bir duruma geçer. “Taşıyıcı kaybı” bu kullanılabilir uyarılmanın kaybıdır.

Ömür τ , çoğu durumda fazla taşıyıcı yoğunluğunun yeniden birleşme hızına oranı olarak tanımlanır: $\tau_{eff} = \Delta n/R$. Ancak bu bir evrensel malzeme sabiti değildir. Enjeksiyon düzeyi, katkılama, sıcaklık, yüzey durumu ve ölçüm yöntemi değiştiğinde görünen ömür değişebilir. Küçük bir lazer darbesinden sonraki diferansiyel sönüm zamanı ile sürekli bir güneş altında elde edilen etkin ömür, doğrusal olmayan yeniden birleşmede aynı olmak zorunda değildir.

Taşıyıcı toplama açısından $\mu\tau$ veya $D\tau$ çarpımı önemlidir. Bir taşıyıcının hızlı hareket edebilmesi yararlıdır; fakat çok kısa ömür, hızlı taşıyıcıyı da kaybettirebilir. Bu nedenle yalnızca hareketlilik veya yalnızca fotolüminesans sönümü raporlayan malzeme çalışması, cihaz toplama kalitesini bütünüyle belirlemez.

Işımalı yeniden birleşme ve yeniden kullanılabilen fotonlar

Işımalı yeniden birleşmede elektron-boşluk çiftinin enerjisi foton olarak çıkar. Basit hacimsel model $R_{rad} = B(np - n_i^2)$ biçimindedir. n ve p cm^{-3} ise B , cm^3/s birimindedir. Sıfır aydınlatma ve termal dengede $np = n_i^2$ olduğu için net R_{rad} sıfır olur; buna rağmen mikroskobik soğurma ve ışıma olayları sürer.

Oluşan foton aygıt içinde yeniden soğurulup başka bir taşıyıcı çifti üretebilir. Foton geri dönüşümü denen bu süreç, optik geometri ve yüksek iç ışımalı verim koşullarında önem kazanabilir. Hücreden dışarı kaçan foton ise dış devrede akıma dönüşmemiştir; ancak güçlü dış ışıma kapasitesi, düşük ışımasız kaybın bir işareti de olabilir. “İyi hücre neden ışık yayar?” sorusunun yanıtı, soğurma ile ışımanın aynı optik geçişlerin ileri ve ters süreçleri olmasıdır.

İç ışımalı verim ile dış ışımalı verim aynı değildir. Fotonun kaçış konisi, yeniden soğurma, metal kontakta parazitik soğurma ve arka optik sınır, iç olayların ne kadarının dışarıdan görüleceğini değiştirir. Yüksek malzeme fotolüminesansı, kötü kontaklı tamamlanmış bir aygıtın yüksek Voc vereceğini tek başına kanıtlamaz.

Tuzak destekli Shockley-Read-Hall süreci

Bant aralığındaki yerel bir kusur durumu, elektron ve boşluğun art arda yakalanmasına aracılık edebilir. Elektron önce tuzığa düşer, ardından bir boşlukla birleşir; ters sıra da mümkündür. Shockley ve Read'in 1952 istatistiksel yaklaşımı ile Hall'un aynı yılki çalışması, bu mekanizmanın klasik temelini oluşturur. [H17] [H18]

Tek tuzak düzeyi ve kararlı durum için $RSRH = (np - n_i^2)/[\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)]$ kullanılır. $n_1 = N_c \exp[-(E_c - E_t)/(kBT)]$ ve $p_1 = N_v \exp[-(E_t - E_v)/(kBT)]$ tuzak enerjisi E_t ile ilişkilidir. $\tau_n \approx 1/(\sigma_n v_{th} N_t)$, $\tau_p \approx 1/(\sigma_p v_{th} N_t)$ ifadelerinde yakalama kesitleri σ_n ve σ_p alan, termal hız v_{th} uzunluk/zaman, tuzak yoğunluğu N_t hacim başına sayı birimindedir. Payda sonunda yoğunluk $\times$ zaman, oran ise yoğunluk/zaman verir.

Bu denklemden “bant ortasındaki her kusur aynı derecede kötüdür” sonucu çıkmaz. Yakalama kesitlerinin asimetrisi, taşıyıcı yoğunlukları ve tuzak doluluğu da etkilidir. Bir kusur bol bulunduğu halde çok zayıf yakalayıcı olabilir; başka bir kusur az yoğunlukta bile baskın kayıp sağlayabilir. Hesaplamalı kusur araştırması bu nedenle yalnızca oluşum enerjisine veya geçiş düzeyine indirgenemez. Yakalama kinetiği ve deneysel yoğunluk sınırları da gerekir.

Auger yeniden birleşmesi ve yüzeyler

Auger sürecinde çiftin enerjisi üçüncü bir taşıyıcıya aktarılır; bu taşıyıcı daha sonra enerjisini örgüye bırakabilir. Basit model $RAuger = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2)$ biçimindedir. C katsayılarının birimi, yoğunluk cm^{-3} alındığında cm^6/s olur. Yüksek enjeksiyonda $n \approx p \approx \Delta n$ kabul edilirse hız yaklaşık Δn^3 ile büyür. Işımalı hızın yaklaşık Δn^2 ile büyümesiyle karşılaştırıldığında, yüksek yoğunlukta baskın mekanizmanın neden değişebileceği görülür.

Gerçek silisyumda basit sabit katsayılı modelin ötesine geçmek gerekebilir. Richter ve çalışma arkadaşlarının 2012 çalışması, pasifleştirilmiş yüksek saflıkta silisyumda katkı ve enjeksiyon bağımlılığını inceleyerek 300 K için geliştirilmiş içsel yeniden birleşme parametreleştirmesi sunar. Bu kaynağın 300 K koşulu, 298,15 K'de kusursuz eşleşen parametre setiyle özdeş sayılmamalıdır. [H19]

Yüzey, kristalin periyodik düzeninin kesildiği ve kimyasal bağların değiştiği yerdir. Bir yüzey yeniden birleşme hızı S , m/s veya cm/s birimiyle sınır kaybını ifade etmekte kullanılır. Bu “hız”, tek bir elektronun yüzeye koşma hızı değildir; fazla taşıyıcı yoğunluğunun yüzey akısına dönüştürülmesindeki katsayıdır. Kimyasal pasifleştirme etkin kusur durumlarını azaltabilir; alan etkili pasifleştirme ise elektron ve boşluktan birini yüzeyden uzaklaştırarak karşılaşmayı sınırlar. Yüzeylerin toplam ömür üzerindeki etkisi [H20] kaynağında tanımlanır.

Çalışılmış örnek: yüzey iyileştirmesi ne kazandırır?

Öğretici örnek. Kalınlığı $d = 150 \mu\text{m} = 0,015 \text{ cm}$, hacim ömrü $\tau_{\text{bulk}} = 1 \text{ ms}$ olan bir levhada fazla taşıyıcı yoğunluğu yaklaşık düzgün olsun. İki yüzey aynı S 'ye sahipse $1/\tau_{\text{eff}} \approx 1/\tau_{\text{bulk}} + 2S/d$ yazılır. $S = 1000 \text{ cm/s}$ için $\tau_{\text{eff}} \approx 7,44 \mu\text{s}$ olur. Çok iyi hacim kalitesi, kötü yüzeyler yüzünden ölçümde görünmez hale gelmiştir.

$S = 10 \text{ cm/s}$ 'ye düşürüldüğünde $\tau_{\text{eff}} \approx 429 \mu\text{s}$ olur. Etkin ömür yaklaşık 58 kat artarken, hacim malzemesinin kendisi değiştirilmemiştir. Bu yüzden büyütme yöntemini değiştirmeden önce yüzey ve kontak denetimi yapmak çoğu deneyde daha ucuz ve daha ayırt edici olabilir. Fakat düzgün yoğunluk yaklaşımı geçersizse, bu basit bağıntı yerine uzaysal difüzyon ve yüzey sınır koşulları birlikte çözülmelidir.

İkinci küçük hesap: $D = 2 \text{ cm}^2/\text{s}$ ve $\tau = 10 \text{ ns}$ için $L = \sqrt{D\tau} \approx 1,41 \mu\text{m}$ 'dir. Aynı malzemede $\tau = 1 \mu\text{s}$ olursa $L \approx 14,1 \mu\text{m}$ olur. Ömür yüz kat büyürken difüzyon uzunluğu on kat büyür. Doğrusal sezgi burada yanıltır; karekök ilişkisi cihaz kalınlığı tasarımını doğrudan etkiler.

SRH ifadesini yakalama ve salım dengesinden anlamak

Bir kusuru, bir elektronla dolu veya boş olabilen bir ara durum olarak düşünelim. Boş tuzak elektron yakalayabilir; dolu tuzak elektron salabilir veya bir boşluk yakalayarak elektron-boşluk çiftini yok edebilir. Kararlı durumda tuzak doluluk olasılığı değişmiyorsa bu geçişlerin muhasebesi kapanır. Elektron ve boşluk yakalama katsayıları ile tuzak yoğunluğu, τ_n ve τ_p zaman ölçekleri içinde toplanır. Bu denge, tek seviyeli model için şu net yeniden birleşme hızını verir:

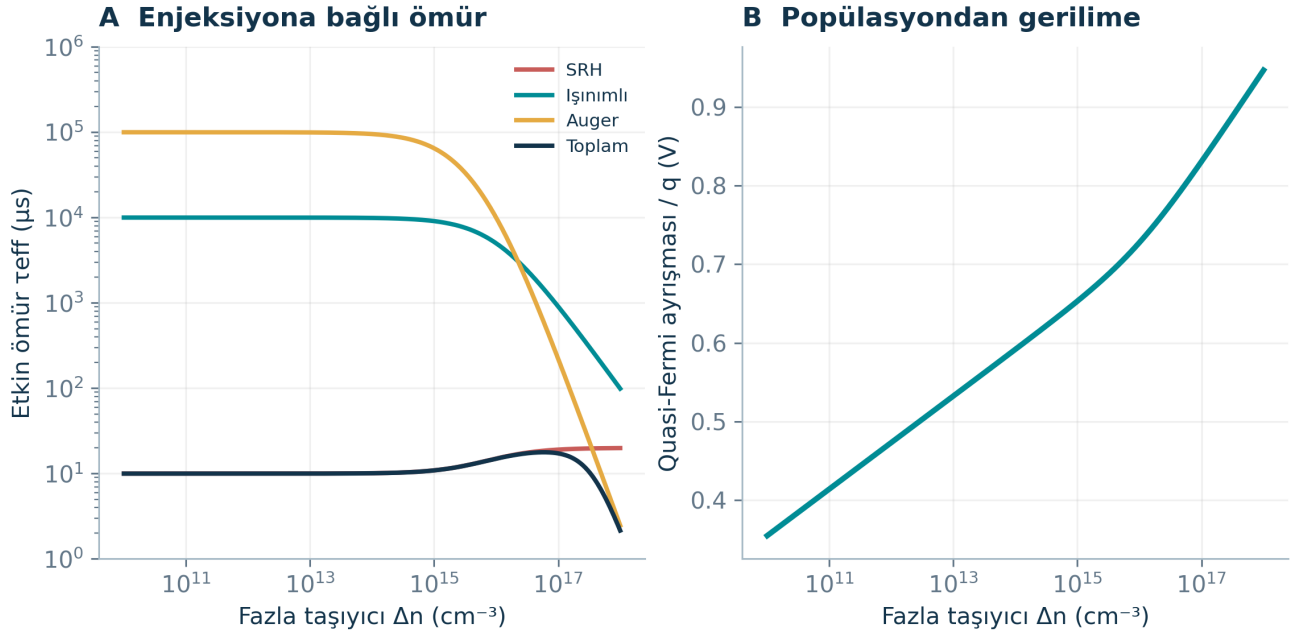
$$R_{\text{SRH}} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)}. \quad (1.6.1)$$

$$n_1 = n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{k_B T}\right), \quad p_1 = n_i \exp\left(-\frac{E_t - E_i}{k_B T}\right). \quad (1.6.2)$$

Paydaki $np - n_i^2$ dengede net kaybın neden sıfır olduğunu açıklar. Yakalama olayları dengede sürer; fakat üretimle yeniden birleşme eşittir. Payda, yalnız tuzağın varlığını değil, iki taşıyıcı türüne erişimini de içerir. Bu yüzden “bant aralığının ortasında kusur var” ifadesi tek başına bir yaşam süresi hesabı değildir. Kusur yoğunluğu, yakalama kesitleri ve çalışma noktasındaki doluluk ayrıca gerekir. [H17] [H18]

Simetrik orta aralık tuzağında $\tau_n = \tau_p = \tau_0$ olsun. p-tipi düşük enjeksiyonda p yaklaşık p_0 ve n yaklaşık Δn olduğunda R yaklaşık $\Delta n/\tau_0$ olur. Yüksek enjeksiyonda n yaklaşık p yaklaşık Δn olduğunda R yaklaşık $\Delta n/(2\tau_0)$ olur. Dolayısıyla aynı tuzak sistemi,

enjeksiyon değiştiğinde farklı görünen etkin ömür verebilir. Ömür eğrisinin düz olmaması, otomatik olarak yeni bir kusur türünün ortaya çıktığı anlamına gelmez.



Şekil 13. Aynı malzeme parametreleriyle farklı enjeksiyon rejimleri. SRH ömrü düşük enjeksiyonda yaklaşık 10 μs iken yüksek enjeksiyona geçişte değişir; güçlü enjeksiyonda Auger katkısı büyür. B paneli aynı popülasyonlardan hesaplanan quasi-Fermi ayrışmasını gösterir. Parametreler öğretim amaçlıdır: $p_0 = 10^{-16} cm^{-3}$, $n_i = 10^{-10} cm^{-3}$, $\tau_n = \tau_p = 10 \mu s$, $B = 10^{-14} cm^3/s$, $C_n = 3 \times 10^{-31}$ ve $C_p = 10^{-31} cm^6/s$. [H17] [H18] [H19]

İdeallik faktörü neden bir parmak izi değildir?

Yüksek ileri gerilimde bir baskın kanal J_{rec} yaklaşık $J_0 \exp[qV/(n_i d kBT)]$ biçiminde davranıyorsa, $n_i d = (q/kBT) dV/d \ln J_{rec}$ tanımlanabilir. Düşük enjeksiyondaki nötr bölge difüzyonu için bir, simetrik tükenim bölgesi SRH modeli için yaklaşık iki gibi tanınmış sonuçlar belirli varsayımlar altında çıkar. Gerçek bir heteroyapıda gerilime bağlı toplama, kontak engeli, iyonik yeniden dağılım ve birden çok yeniden birleşme kanalı da eğimi değiştirir.

Bir grafikte $n_i d = 1,7$ bulunduğunda araştırmacı düzeyindeki ifade “SRH kanıtlandı” değildir. Önce hangi gerilim ve ışık aralığında eğimin hesaplandığı, seri dirençten etkilenip etkilenmediği ve birden çok sıcaklıkta aynı fiziksel modelin çalışıp çalışmadığı sorulur. Daha güçlü bir yorum, aynı mekanizmanın PL, taşıyıcı yoğunluğu bağımlılığı ve kontak serisiyle de uyumlu olmasıdır. İdeallik faktörü, başka kanıtlarla birleştğinde kullanışlıdır.

Ölçüm koşulunu değiştirmek neyi sınırlar?

Öngerilim, bir ölçümden önce ağıta uygulanan gerilimdir; ölçüm sırasındaki gerilim de taşıyıcıların yoğunluğunu ve dağılımını değiştirir. Aynı malzemede düşük ve yüksek taşıyıcı yoğunluğunda farklı yeniden birleşme yolları baskın olabilir. Bu nedenle ömür ölçümünü ışık şiddeti, sıcaklık ve elektriksel koşuluyla birlikte vermek gerekir. Tek bir ömür sayısı, bütün çalışma koşullarındaki baskın mekanizmanın adı değildir.

İyileştirmede iki ayrı müdahaleyi ayıralım. Kusur azaltma, etkin yakalama merkezlerini azaltmayı amaçlar. **Kontak seçiciliği** ise elektron kontağında deliklerin, delik kontağında elektronların kayba uğramasını sınırlarken istenen taşıyıcının geçmesini sağlamaktır. Çok yalıtkan bir kaplama yeniden birleşmeyi azaltıp yararlı akımı da engelleyebilir. Başarıyı yalnız ısıldama veya ömür artışıyla değil, tamamlanmış ağıtın gerilim ve gücüyle birlikte değerlendirmek bu nedenle gerekir.

Sık yanlışlar ve çalışma soruları

“Kusursuz hücrede yeniden birleşme sıfırdır” yanlıştır. Işımalı yeniden birleşme, karşılıklı optik sistemlerde soğurmanın zorunlu eşidir. “En uzun darbe ömrüne sahip numune en iyi hücreyi verir” de güvenilir değildir; enjeksiyon koşulları ve kontaklar eşleşmelidir. Bir deneyde yükselen fotoluminesans, aynı anda düşen çıkarma verimini de gösterebilir; ölçüm geometrisi ve çalışma noktası açıklanmalıdır.

1. N_t on kat artar, diğer yakalama parametreleri sabit kalırsa basit SRH ömür parametresi nasıl değişir? **Yanıt:** On kat azalır.
2. Yüksek enjeksiyonda taşıyıcı yoğunluğu iki katına çıkarsa basit ışımaya ve Auger'e ait hızlar nasıl değişir? **Yanıt:** Yaklaşık dört ve sekiz katına çıkar.
3. Yüzey hızı S neden cm/s birimine sahipken parçacık sürüklenme hızı değildir? **Yanıt:** S , yüzeydeki kayıp akısını taşıyıcı yoğunluğuna bağlayan etkin sınır katsayısıdır.

Okuma yolu: Önce SRH'nin özgün kökenlerini [H17] [H18], ardından belirli bir malzemede parametrelerin nasıl ölçüldüğünü [H19] inceleyin. Her ömür sayısının yanına enjeksiyon düzeyi, sıcaklık, yüzey işlemi ve yöntem yazılmadan karşılaştırma yapmayın.

Akım-gerilim eğrisi: bir hücrenin performansını okumak

Akım-gerilim eğrisi gerçekte nasıl oluşur?

Bir hücreye farklı elektrik yükleri bağladığımızı düşünelim. Çok küçük dirençte uç gerilimi düşük, akım yüksek olabilir. Çok büyük dirençte akım düşerken gerilim yükselir. Ölçü aleti bu çalışma noktalarını kontrollü biçimde tarar. Yatay eksene gerilimi, dikey eksene akımı yerleştirip noktaları birleştirdiğimizde **I-V eğrisi** oluşur. Akımı ölçülen alana bölersek akım yoğunluğu J 'yi elde eder, **J-V eğrisi** çizeriz. Böylece farklı alanlı hücreleri uygun alan tanımıyla karşılaştırabiliriz.

Kısa devre akımı, gerilim sıfırken akımdır. **Açık devre gerilimi**, dışarı verilen akım sıfırken gerilimdir. İki uç noktada da güç sıfırdır, çünkü güç gerilimle akımın çarpımıdır. Yararlı çalışma noktası aradadır. Her ölçüm noktasında bu çarpımı hesaplayıp en büyüğünü seçeriz; buna **maksimum güç noktası**, İngilizce MPP denir. Hücreyi bu noktaya yakın tutan elektronik kontrol de maksimum güç takibidir.

Dört sayıyı ölçüm tablosundan çıkarmak

Sentetik ölçüm: 1 cm^2 hücrede kısa devre akım yoğunluğu 40 mA/cm^2 , açık devre gerilimi $0,70 \text{ V}$ olsun. Ölçülen en iyi çalışma noktasında $0,58 \text{ V}$ ve 36 mA/cm^2 bulalım. Güç yoğunluğu $0,58 \times 36 = 20,88 \text{ mW/cm}^2$ 'dir. 1000 W/m^2 ışınlam 100 mW/cm^2 demektir; dolayısıyla verim %20,88 olur. Bu örnekte elektrik ve ışık gücünü aynı alana göre karşılaştırdık.

Dolum faktörü, gerçek maksimum güç dikdörtgeninin, kısa devre akımı ile açık devre geriliminin oluşturduğu büyük dikdörtgene oranıdır. Örnekte $20,88 / (40 \times 0,70) = 0,746$, yaklaşık %74,6 çıkar. Şeklin ne kadar “kareye yakın” olduğuna ilişkin geometrik sezgi buradan gelir. FF bir gerilim veya akım değildir; boyutsuz bir orandır. Yüksek FF tek başına yüksek verim de değildir: akım ve gerilim küçükse güç yine küçük kalabilir.

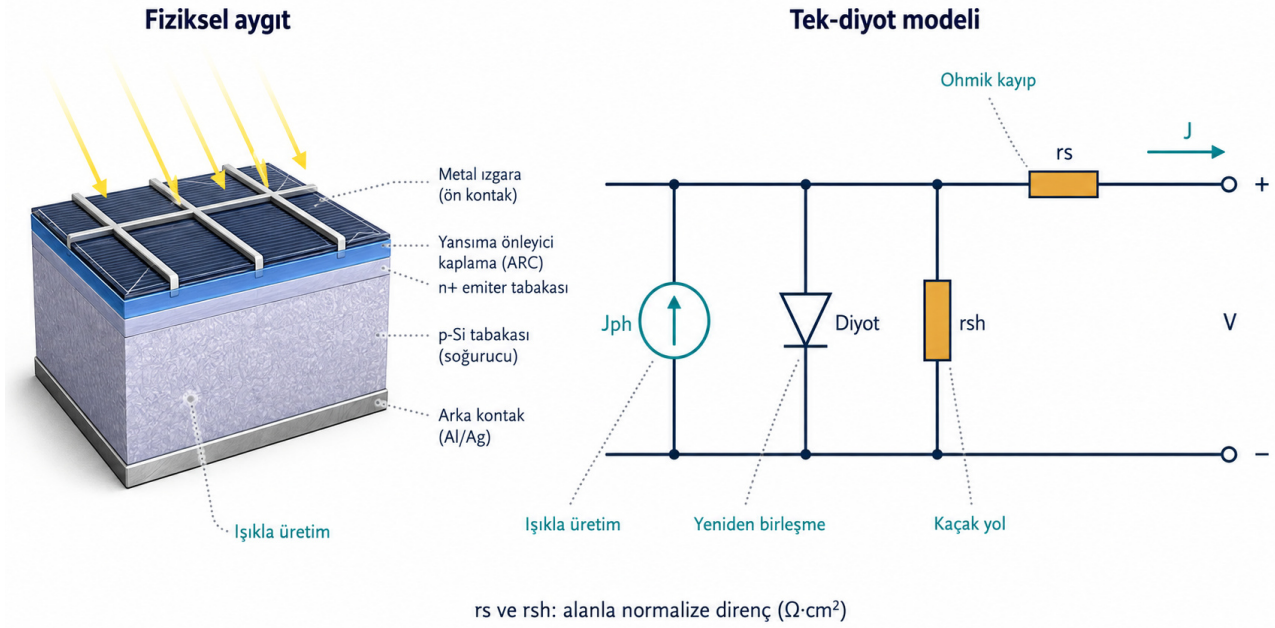
Eşdeğer devredeki parçalar neyi temsil eder?

Akım kaynağı, ışıkla üretimi; **diyot**, gerilimle hızla artan iç akımı ve modelin yeniden birleşme davranışını temsil eder. **Seri direnç**, dışarı ulaşan yükün iletim ve temas yolunda karşılaştığı kayıptır. **Şönt direnç**, iki uç arasında istenmeyen kaçak yolun eşdeğeridir. Seri direnç küçüldükçe taşıma kaybı azalır; şönt direnç büyüdükçe kaçak azalır. Diyagram hücrenin içinde gerçekten böyle ayrı bir pil ve direnç bulunduğunu söylemez; fiziksel süreçlerin elektriksel karşılığıdır.

Ölçüm yazılımları akım işareti için farklı kurallar kullanır. Bu kitap dış devreye verilen akımı pozitif alır. Aynı hücrenin eğrisini başka bir yayında aşağı dönük görmek, cihazın bozuk olduğu anlamına gelmeyebilir; önce işaret tanımını kontrol et.

Anlama kontrolü: iki ucu çarpmak neden yetmez?

Yukarıdaki hücre için $0,70 \times 40 = 28 \text{ mW/cm}^2$ yazmak gerçek gücü vermez. 40 mA/cm^2 kısa devrede, $0,70 \text{ V}$ açık devrede ölçülmüştür; aynı anda gerçekleşmezler. Gerçek $20,88 \text{ mW/cm}^2$ için aynı ölçüm satırındaki $0,58 \text{ V}$ ve 36 mA/cm^2 kullanılmalıdır. FF tam olarak bu farkı görünür kılar.



Şekil 14. Fiziksel güneş hücresinden tek-diyot eşdeğer devresine. Fotoakım kaynağı, diyot ve kaçak direnci aynı iki iç düğümle bağlıdır; seri direnç iç düğümle pozitif dış uç arasındadır. Noktalı açıklama çizgileri elektrik bağlantısı değildir. J , dış devreye verilen akım yoğunluğudur; r_s ve r_{sh} alanla normalize edilmiştir. Hücre kesitinin kalınlıkları ölçekli değildir. [B06] [B11] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Dört sayı ve bir eğri

Bir güneş hücresinin elektriksel davranışı, belirli aydınlatma ve sıcaklık altında ölçülen akım-gerilim eğrisinde görülür. Akım I amper, akım yoğunluğu $J = I/A$ amper/metrekare veya miliamper/santimetrekare ile yazılır. Alanın aktif, açıklık veya toplam alan olması J 'yi ve verimi değiştirir; payda sözel ayrıntı değildir, ölçümün parçasıdır.

Kısa devrede $V = 0$ ve akım I_{sc} veya J_{sc} 'dir. Açık devrede $I = 0$ ve gerilim V_{oc} 'dir. İki uçta da elektrik gücü $P = VI$ sıfırdır. En büyük güç, eğrinin aradaki bir noktasında oluşur: $P_{mpp} = V_{mpp} I_{mpp}$. Dolum faktörü $FF = P_{mpp}/(V_{oc} I_{sc})$, eğrinin ideal dikdörtgene ne kadar yaklaştığını ölçer. Verim $\eta = P_{mpp}/(GA) = V_{oc} J_{sc} FF/G$ 'dir. Bu

temel tanımlar, ölçüm işaretinin hangi yönde seçildiğinden bağımsız olarak tutarlı uygulanmalıdır. [H23]

Jsc fotonlardan gelen toplama kapasitesini; Voc yeniden birleşmeye karşı oluşturulabilen kimyasal potansiyeli; FF ise çalışma geriliminde akımın korunmasını özetler. Hiçbiri tek başına tek bir kusura eşlenmez. Örneğin kötü arayüz hem Voc'yi hem FF'yi düşürebilir; optik kayıp Jsc'yi düşürürken Voc'de daha küçük logaritmik bir değişim oluşturabilir.

Tek diyot modeli ve birimlerin disiplini

Üretilen akımı pozitif seçersek yaygın eşdeğer devre modeli $J = J_{ph} - J_0 \{ \exp[(V + J R_s)/(n_i d V_T)] - 1 \} - (V + J R_s)/R_{sh}$ şeklindedir. $V_T = k_B T/q$ termal gerilimdir; $n_i d$ idealite faktörü, R_s alanla normalize seri direnç ve R_{sh} alanla normalize paralel kaçak direncidir. J A/cm² ise R_s ve R_{sh} Ω cm² olmalıdır. Akımla yazılan modeldeyse dirençler Ω olur. İki gösterimi karıştırmak, alan değiştiğinde modeli bozan sistematik hata üretir.

J_{ph} ışıqla oluşturulan ve modelde toplanabilir kabul edilen akım kaynağıdır. J_0 karanlık doyma akım yoğunluğu, $n_i d$ ise üstel davranışın etkin ölçeğidir. $n_i d \approx 1$ veya 2 gibi değerler belirli ideal mekanizmalarla ilişkilendirilebilir; fakat yalnızca uygun eğriye oturan sayıya bakıp baskın mikroskobik kusur türünü kesin belirlemek doğru değildir. Tek diyot modeli, uzaysal aygıt fiziğinin indirgenmiş bir temsidir.

R_s , metal ve şeffaf iletken tabakaların direncini, kontak kaybını ve taşıma etkilerinin bir kısmını topluca temsil edebilir. R_{sh} ise kenar kaçakları, lokal kısa devreler veya benzer paralel yolları yansıtabilir. Bir eğri üzerinde birden fazla parametre birbirini telafi ederek benzer uyum verebilir. Bu tanımlanabilirlik problemi, daha çok parametre eklemenin otomatik olarak daha fazla fizik öğrenmek olmadığını gösterir.

Açık devre ve en büyük güç noktası

$R_s = 0$, R_{sh} sonsuz ve J_{ph} gerilimden bağımsızsa $V_{oc} = n_i d V_T \ln(J_{ph}/J_0 + 1)$ olur. Fotoakım iki katına çıktığında, J_{ph} çok büyük J_0 koşulunda V_{oc} artışı $n_i d V_T \ln 2$ 'dir. Bu yüzden akım ışıqla yaklaşık doğrusal büyürken gerilim logaritmik büyür. Isınma sırasında V_T artsa da J_0 genellikle güçlü biçimde artar; bu nedenle “ V_T arttı, V_{oc} mutlaka artar” çıkarımı yanlıştır.

İdeal diyot için normalize değişkenler $v = V/(n_i d V_T)$ ve $v_{oc} = V_{oc}/(n_i d V_T)$ kullanılır. Güç yoğunluğu $p = VJ$ ifadesinin türevi sıfıra eşitlenince maksimum güç koşulu $v_{mp} + \ln(1 + v_{mp}) = v_{oc}$ elde edilir. Bu denklemi tek değişkenli bir kök aramasıyla çözmek kolaydır. Yaklaşık dolum faktörü ifadesi $FF_0 \approx [v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)]/(v_{oc} + 1)$, ideal diyot için yararlı bir el hesabıdır; Green'in 1981 çalışması genel dolum faktörü grafiği ve ampirik ifadeleri ele alır. [H22]

Bu yaklaşık formül gerçek cihazın seri direncini, çoklu diyot davranışını ve gerilime bağlı toplamayı kendiliğinden içermez. Formülün birkaç ondalıkla sonuç vermesi, model varsayımlarının da o doğrulukta olduğunu göstermez. Güç eğrisinin doğrudan sayısal maksimumunu bulmak, ölçüm verisi varsa genellikle daha doğrudur; gürültü ve tarama geçmişi yine hesaba katılmalıdır.

Çalışılmış örnek: tam bir ideal diyot hesabı

Öğretici örnek; ölçülmüş hücre değildir. $T = 298,15 \text{ K}$, $n_{id} = 1$, $J_{ph} = 0,040 \text{ A/cm}^2$, $J_0 = 10^{-13} \text{ A/cm}^2$, $R_s = 0$ ve R_{sh} sonsuz alınsın. $V_T = 0,0256926 \text{ V}$, $V_{oc} = 0,68637 \text{ V}$ bulunur. Yukarıdaki maksimum güç denklemi çözüldüğünde $V_{mpp} = 0,60417 \text{ V}$ ve $J_{mpp} = 0,038368 \text{ A/cm}^2$ elde edilir. Dolum faktörü $0,84434$ 'tür. $G = 0,100 \text{ W/cm}^2$ için verim $\%23,181$ olur.

Bu hesap iki yararlı kontrol içerir. Önce maksimum güç yoğunluğu yaklaşık $0,023181 \text{ W/cm}^2$ 'dir; payda $0,100 \text{ W/cm}^2$ olduğundan verim boyutsuz çıkar. Sonra FF'nin birden küçük olduğu, V_{mpp} 'nin V_{oc} 'den ve J_{mpp} 'nin J_{sc} 'den küçük olduğu doğrulanır. Bunlar kapsamlı doğrulama değildir, fakat birim veya işaret hatalarını hızla yakalayabilir.

Ayrı bir örnekte $V_{oc} = 0,720 \text{ V}$, $J_{sc} = 40,0 \text{ mA/cm}^2$ ve $FF = 0,800$ verilsin. Verim $\%23,04$ 'tür. FF $0,820$ 'ye çıkar, diğerleri sabit kalırsa verim $\%23,616$ olur: kazanç $0,576$ yüzde puandır. FF'nin $0,02$ artmasını doğrudan “verim iki puan arttı” diye raporlamak yanlıştır.

Eğriden teşhise geçerken

Kısa devre yakınındaki eğim kaçaklara, açık devre yakınındaki eğim seri direnç ve diyot davranışına duyarlı olabilir; ancak bu gözlemler tek başına mekanizma kanıtı değildir. S biçimindeki bir eğri, taşıma engeli veya uygunsuz kontak için ipucu sunabilir. Işık şiddetine bağlı V_{oc} , sıcaklığa bağlı akım, EQE, karanlık eğri ve kararlı güç takibiyle birlikte yorumlanmalıdır.

Özellikle zaman bağımlı aygıtlarda hızlı tarama bir enerji depolama veya iyon yeniden düzenlenmesi etkisini performans gibi gösterebilir. Tarama yönü, hız, ön koşullandırma ve bekleme süresi açıklanmalıdır. Belirli bir anda yüksek görünen nokta ile kararlı güç üretimi farklı gözlemlerdir. Bu bölümdeki statik model, bu dinamik etkilerin bulunmadığı varsayımıyla çalışır.

Maksimum güç noktasını türevle bulmak

İdeal tek-diyot modelinde $J = J_{ph} - J_0[\exp(V/V_T) - 1]$ olsun. Boyutsuz gerilim $v = V/V_T$ tanımlayalım. Açık devrede $\exp(v_{oc}) = 1 + J_{ph}/J_0$ olur. Güç yoğunluğu $p = VJ$ 'nin maksimumunda $dp/dV = J + V dJ/dV$ sıfırdır. Diyot türevini yerine koyduğumuzda:

$$\exp(v_m)(1 + v_m) = \exp(v_{oc}), \quad v_m + \ln(1 + v_m) = v_{oc}. \quad (I.7.1)$$

Soldaki ifade v için tekdüze arttığından kök güvenle bulunur. Lambert W fonksiyonuyla kapalı biçim de yazılabilir; ancak fiziksel anlamı görmek için bu skaler kök yeterlidir.

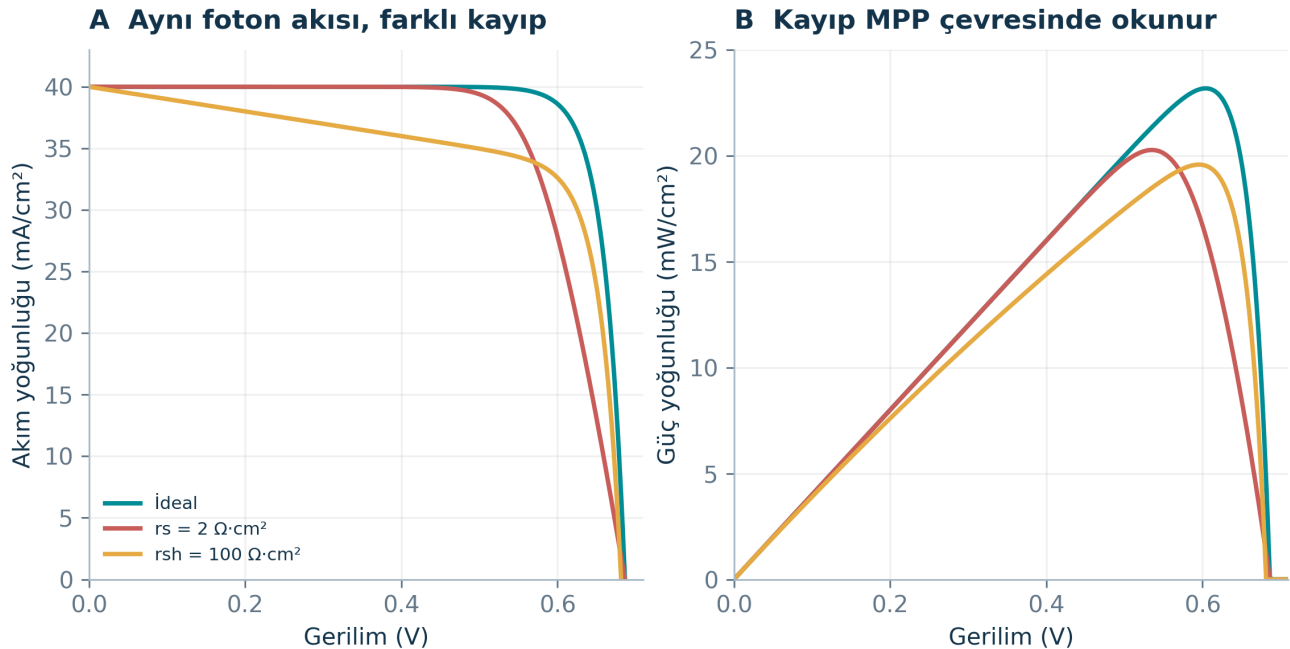
$J_{ph} = 40 \text{ mA/cm}^2$, $J_0 = 10^{-13} \text{ A/cm}^2$ ve $298,15 \text{ K}$ için $V_{oc} = 0,68637 \text{ V}$, $V_{mpp} = 0,60417 \text{ V}$, $J_{mpp} = 38,368 \text{ mA/cm}^2$ çıkar. Doluluk çarpanı %84,43, 100 mW/cm^2 girişte verim %23,18 olur. Açık devrede gerilim daha büyük olduğu halde güç sıfırdır; çünkü akım sıfırdır.

Seri ve paralel dirençleri aynı denklemde tutmak

Alanla normalize seri direnç r_s ve paralel direnç r_{sh} eklendiğinde diyot iç gerilimi $V + Jr_s$ olur. Dış devreye verilen akım pozitif seçilirse:

$$J = J_{ph} - J_0 \left[\exp\left(\frac{V + Jr_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + Jr_s}{r_{sh}}. \quad (I.7.2)$$

J hem eşitliğin solunda hem sağında olduğundan bu örtük bir denklemdir. Dış gerilim noktasında J 'yi sayısal kökle çözebiliriz. Akım I kullanılsaydı direnç Ω cinsinden olurdu; burada $J \text{ A/cm}^2$ olduğundan r_s ve $r_{sh} \Omega \cdot \text{cm}^2$ cinsindedir. Aynı sayısal direnci iki denklem arasında birim dönüşümü yapmadan taşımak, numune alanına bağlı büyük hata üretir. [B06] [B11]



Şekil 15. Seri ve paralel kaybın eğri üzerindeki farklı izleri. Tüm eğriler aynı J_{ph} , J_0 , sıcaklık ve ideallik faktörüyle hesaplandı. Seri direnç özellikle yüksek akımda iç gerilim kaybı yaratır; paralel yol gerilime bağlı kaçak taşır. B paneli kaybın güç maksimumuna etkisini doğrudan gösterir. Eğriler ölçüm değil, örtük denklemin çözümleridir. [B11]

Şekli “sağ eğim seri dirençtir, sol eğim paralel dirençtir” ezberiyle sınırlama. Bu yaklaşımlar uygun çalışma bölgelerinde yaklaşık tanı verir. Karanlık ve aydınlık eğrilerin birlikte uyumu, değişen ışınım ve sıcaklıkta parametre kararlılığı, eşdeğer devrenin yeterliliğini daha güçlü sınar. Çok geniş parametre belirsizliğiyle aynı eğriye uyan iki model, tek bir fiziksel mekanizmanın ölçüldüğü anlamına gelmez.

Hızlı tasarım hesabı: $J_{mpp} = 20 \text{ mA/cm}^2$ iken $r_s = 1 \text{ } \Omega\text{-cm}^2$, yaklaşık $0,4 \text{ mW/cm}^2$ ohmik kayıp ölçeği verir. J iki katına çıkarsa bu kayıp dört katına çıkar. Bu nedenle yoğunlaştırmalı hücre ve tandem kontakları aynı akım koşullarında değerlendirilmelidir.

Eğriyi hücrenin kesitiyle ilişkilendirmek

Hücrenin ön kaplaması, yüzeyden geri dönen ışığı azaltır; böylece aynı aydınlatmada daha çok foton soğurucuya ulaşabilir. n ve p bölgeleri farklı çoğunluk taşıyıcılarına sahiptir. Aralarındaki **tükenim bölgesinde** hareketli taşıyıcılar azalır ve sabit iyonlaşmış katkıların alanı önem kazanır. Ön ve arka metal temaslar ise akımı dış devreye taşır. Bunların her biri eğriyi etkileyebilir; aynı eğri değişimi bazen birden çok nedenden doğar.

Çapraz kontrol, aynı fiziksel sonucu farklı bir ölçüm yoluyla sınamaktır. Örneğin spektral toplama ölçümünden hesaplanan kısa devre akımı ile akım-gerilim eğrisinin kısa devre noktası karşılaştırılır. Anlaşma yorumu destekler; anlaşmazlık alan, ışık spektrumu, kalibrasyon veya ölçüm geçmişi gibi etkenleri yeniden incelemeyi gerektirir.

Sık yanlışlar ve çalışma soruları

“ $V_{oc} \times I_{sc}$ hücrenin gücüdür” ifadesi eksiktir; bu iki büyüklük farklı çalışma noktalarına aittir ve çarpım FF ile düzeltilir. “En iyi eğri uyumu doğru fizik demektir” de yanlıştır. Daha fazla bağımsız ölçüm, bazen daha karmaşık eşdeğer devreden daha fazla bilgi sağlar.

1. 1 cm^2 hücrede 40 mA , 4 cm^2 hücrede 160 mA ölçülürse akım yoğunlukları nedir?

Yanıt: İkisi de 40 mA/cm^2 .

2. $298,15 \text{ K}$ 'de $n_{id} = 1$ ve J_{ph}/J_0 büyükken ışık iki kat artarsa ideal V_{oc} kazancı nedir?

Yanıt: Yaklaşık $17,81 \text{ mV}$.

3. $V_{oc} = 0,70 \text{ V}$, $J_{sc} = 35 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 0,80$ ve $G = 100 \text{ mW/cm}^2$ için verim nedir? **Yanıt:** %19,6.

Okuma yolu: Önce eğrinin geometrisini [H23], ardından dolum faktörünün matematiksel yaklaşımını [H22] inceleyin. Her yeni modelde güç korunmasını, birim tutarlılığını ve ideal sınırın geri elde edilmesini kontrol edin.

Ayrıntılı denge ve gerilim kayıpları: teorik sınır neyi sınırlar?

Bir teorik sınır nasıl sorulur?

“En iyi güneş hücresi yüzde kaç olabilir?” eksik bir sorudur. Tek soğurucu mu, birkaç soğurucu mu; bir güneş mi, yoğunlaştırılmış ışık mı; hangi sıcaklık ve spektrum; hangi kayıplar kaçınılmaz kabul ediliyor? **Teorik sınır**, açıkça tarif edilmiş bir model ailesindeki en yüksek sonuçtur. Bir malzemenin fabrikada ulaşacağı değer veya doğanın her aygıtı koyduğu tek evrensel yüzde değildir.

Geleneksel tek eklem modelinde bant aralığından düşük enerjili fotonlar yararlı bantlar arası üretim yapmaz. Çok yüksek enerjili fotonlar ise bir çift oluşturduktan sonra fazla enerjilerini çoğunlukla ısıya bırakır. Bant aralığını küçültmek daha fazla fotonu kullanır ama çift başına alınabilecek enerjiye ilişkin gerilim ölçeğini düşürür. Büyütmek ters yönde çalışır. **Shockley-Queisser hesabı** bu uzlaşmayı, aygıtın zorunlu ışık yaymasını da dahil ederek nicel kurar. [H25]

“Ayrıntılı denge”de dengelenen nedir?

Karanlıkta ve çevresiyle aynı sıcaklıktaki bir nesne yalnız ışık soğurup hiçbir zaman ışık yaymasaydı, çevresinden tek yönlü enerji çekerek dengeyi bozardı. Aynı optik kanalların soğurma ve yayma ilişkisi, güneş hücresinin de bir ışık yayıcı olduğunu hesaba katmayı gerektirir. Denge halinde süreçler eşleşir. Güneşten ek ışık geldiğinde aygıt denge dışına çıkar; elektrik üretimi, artan taşıyıcı yoğunluğu ve yayım birlikte çözülür. “Işıma kaybını sıfır yaparsak sınırı aşarız” demek, aynı soğurma koşulları altında modelin kendi tutarlılığını bozabilir.

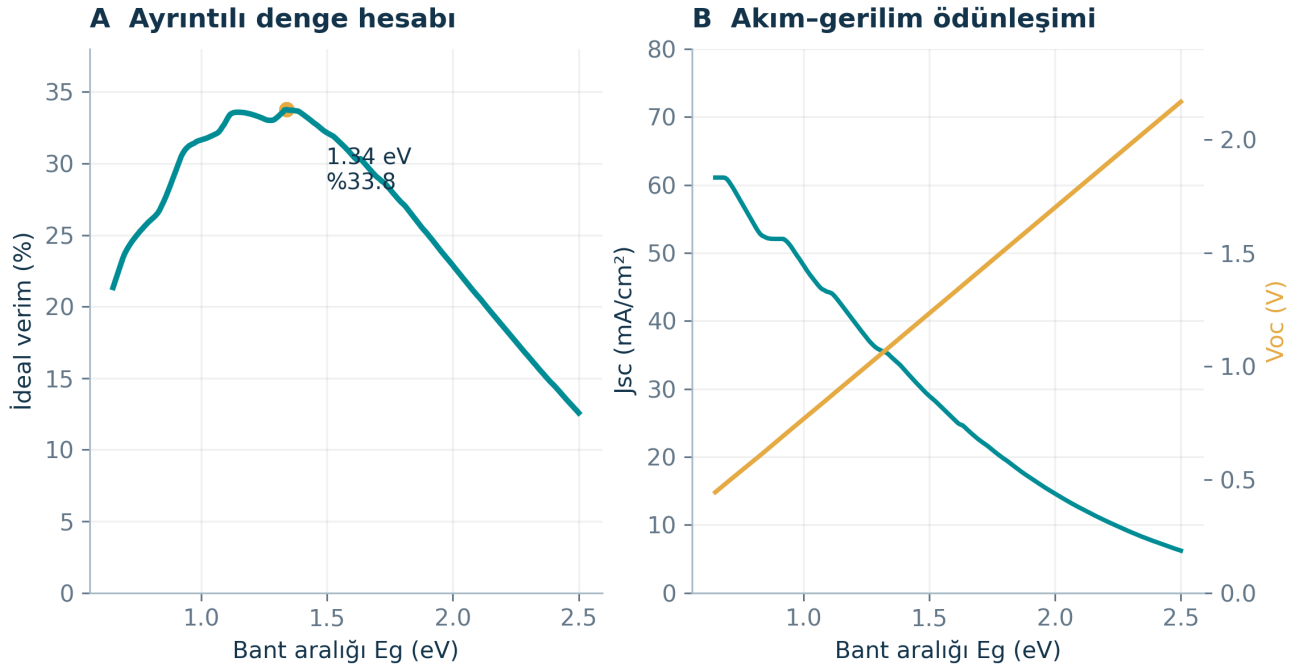
Temsili enerji hesabı: 2 eV bir foton 1,1 eV bant aralıklı malzemede bir çift oluşturduğunda bant kenarlarına gevşemede yaklaşık 0,9 eV fark açığa çıkar. Uç gerilimi 0,70 V ise dış devrede elektron başına aktarılan enerji 0,70 eV'dir. 1,1 eV ile 0,70 eV arasındaki farkı da düşünmek gerekir; bant aralığı doğrudan uç gerilimi değildir. Bu tek foton örneği tam verim hesabı yerine geçmez, hangi enerji farklarının ayrı olduğunu öğretir.

Gerilim kaybının logaritmik olması da sezgi gerektirir. **Doğal logaritma**, bir sayıyı e tabanının hangi kuvvetiyle elde ettiğimizi söyler; e yaklaşık 2,718'dir. Örneğin $\ln(10)$ yaklaşık 2,303'tür. Bazı idealize ilişkilerde bir kayıp kanalını on kat azaltmak, oda sıcaklığında gerilimde onlarca milivolt iyileşme verir. Bu, gücün on kat artması

anlamına gelmez. Aşağıda logaritmaya giren oranların boyutsuz olmasına ve kullanılan karşılıklık varsayımlarına özellikle dikkat edeceğiz.

Anlama kontrolü: sınırı aşan grafik

Bir sonuç bir sınır eğrisinin üstündeyse önce aynı model sınıfında olup olmadığını sor. Tandem, yoğunlaştırma, farklı spektrum veya alan tanımı karşılaştırmayı değiştirebilir. Ölçüm yanlışlığı da mümkündür. Hangi varsayımın değiştiğini göstermeden “temel fizik aşıldı” veya “sonuç kesin yanlıştır” hükümleri kurulamaz.



Şekil 16. İdeal tek eklem sınırının yeniden hesabı. Girdi ASTM G173 global spektrumu; sıcaklık 298,15 K; soğurma basamak; arka ayna ideal; dış ışına tek yarımküredir. A paneli verim maksimumunu, B paneli büyüyen bant aralığının akım kaybı ve gerilim kazancını gösterir. Eğri ölçülen dünya rekorları tablosu değildir. [H09] [H25] [H26] [B10]

Bir üst sınırın değeri varsayımlarından gelir

Verim sınırı, doğanın bir aygıtı koşulsuz verdiği tek sayı değildir. Hangi fotonların soğurulduğu, kaç taşıyıcı oluştuğu, taşıyıcıların ne kadar hızlı soğuduğu, kaç bağımsız kimyasal potansiyel bulunduğu ve ışığın hangi açılardan girip çıktığı tanımlandığında bir sınır hesaplanabilir. Bu tanım değiştirilirse hesaplanan sınır da değişebilir. Dolayısıyla bir sonucu “sınırı aştık” diye sunmadan önce iki hesabın aynı sınıfa ait olup olmadığı sorulmalıdır.

Shockley ve Queisser'in 1961 makalesi, p-n eklemli güneş dönüştürücüsü için yalnızca ışımalı yeniden birleşmenin bulunduğu ideal durumdan ayrıntılı denge sınırını kurdu. Özgün çalışma Güneş'i 6000 K, hücreyi 300 K kara cisim yaklaşımlarıyla ele aldı; tarihsel yaklaşık %30 sonucu bu koşullara bağlıdır. [H25] Güncel AM1.5G ile hesaplanan tek eklem sınırlarının yaklaşık üçte bir mertebesinde olması, başka bir

spektral problemidir. Rühle'nin 2016 çalışması bant aralığına bağlı akım, gerilim ve maksimum güç değerlerini tablo halinde sunar. [H26]

Gelen fotonlar ve zorunlu ışıma

İdeal basamak soğurucuda $a(E) = 0$, $E < E_g$ için; $a(E) = 1$, $E \geq E_g$ için alınır. Fotoakım $J_{ph} = q \int a(E) \phi_{sun}(E) dE$ 'dir. Enerjisi bant aralığının altında olan fotonlar bu tek fotonlu modelde çift oluşturmaz. Üstündeki fotonlar birer çift üretir; E_g üzerindeki fazla enerji hızlı termalleşmeyle kaybolur. Henüz gerilimi hesaplamadık: bir çiftin enerjisi E_g diye, dışarı $qV = E_g$ elektrik işi alınamaz.

İzotropik dış ortamda tek yarımküreye çıkan kara cisim foton akısı, enerji joule alınırsa $\phi_{bb}(E,T) = [2\pi E^2 / (h^3 c^2)] / [\exp(E/(kBT)) - 1]$ olur. Doyma akımı $J_{0,rad} = q \int a(E) \phi_{bb}(E,T) dE$ ile hesaplanır. Bu yazım dış ortamın kırılma indisini bir alır; arka taraftan kaçış ayrıca yok kabul edilir. İki yüzey aynı şekilde ışıma yapıyorsa ilgili geometrik katkı eklenmelidir.

Gerilim uygulandığında taşıyıcıların kimyasal potansiyeli ışımayı artırır. Boltzmann kuyruğu yaklaşımında $J_{rad}(V) \approx J_{0,rad} [\exp(qV/(kBT)) - 1]$ elde edilir. Böylece ayrıntılı denge, tanıdık ideal diyot eğrisine ulaşır: $J(V) = J_{ph} - J_{rad}(V)$. Maksimum VI bulunur ve gelen optik güce bölünür. Bu türetim, sınırın neden hem bir foton sayma hem de bir serbest enerji hesabı olduğunu gösterir.

Genelleştirilmiş Planck yaklaşımında ışımanın üstel paydasına $E - \mu_y$ girer; μ_y uygun koşullarda elektron ve boşluk quasi-Fermi ayrışmasıyla ilişkilidir. Würfel'in 1982 çalışması ısı ve lüminesan ışımayı, yayıcının sıcaklığına ek olarak foton kimyasal potansiyeli kullanarak ele alır. [H27] Böylece ışık yayan bir hücreyi, gerçekte olduğundan binlerce derece sıcak varsaymak gerekmez.

Gerilim kaybını bileşenlerine ayırmak

Toplam gerilim açığı $W_{oc} = E_g/q - V_{oc}$ olarak tanımlanabilir. Bu büyüklük ışımalı ve ışımasız tüm nedenlerin toplam etkisini içerir; yalnızca kusur kaybı değildir. Optik soğurma kenarı, açıl ışıma, spektrum, sıcaklık ve foton akısı ışımalı referansı değiştirir. Bu nedenle iki malzemenin W_{oc} değerlerini karşılaştırırken E_g 'nin nasıl çıkarıldığını da bilmek gerekir.

Sabit bir ışımalı referans altında dış ışımalı verim ERE ile ışımasız gerilim kaybı $\Delta V_{nonrad} = -(kBT/q) \ln(ERE)$ biçiminde ilişkilendirilebilir. ERE burada yüzde değil, 0 ile 1 arasında kesirdir; çalışma noktası ve dış optik kaçış tanımı belirtilmelidir. Rau'nun 2007 karşılıklılık çalışması, fotovoltaiik kuantum verimi ile elektrolüminesan yayım arasındaki bağı ve açık devre gerilimiyle ışıma verimi ilişkisini türetir. [H28]

Bu ilişkiyi herhangi bir fotolüminesans parlaklığına körlemesine uygulamayın. Mutlak kalibrasyon, uyarma koşulları, aygıt alanı, emisyon açısı ve ilgili enjeksiyon noktası gerekir. Malzeme içindeki quasi-Fermi ayrışması, tamamlanmış cihazın uç Voc değeri ve elektrolüminesans verimi farklı gözlemlerdir. Taşıyıcı toplaması gerilime güçlü bağlıysa basit karşılıklılık kullanımının varsayımları ayrıca sınanmalıdır.

Çalışılmış örnek: yüzde ve logaritma tuzağı

Öğretici örnek. 298,15 K'de $V_T = 25,6926$ mV'dir. $ERE = \%1 = 0,01$ için $\Delta V_{nonrad} = 118,32$ mV olur. $ERE = \%0,01 = 0,0001$ için kayıp 236,64 mV'dir. ERE'nin yüz kat kötüleşmesi kaybı yüz kat artırmaz; yaklaşık 118,32 mV ekler. Logaritmanın fiziksel anlamı, taşıyıcı yoğunluğu ile kimyasal potansiyel arasındaki üstel ilişkidir.

Ters hesapta $\Delta V_{nonrad} = 200$ mV verilirse $ERE = \exp(-0,200/0,0256926) \approx 0,0004162$, yani $\%0,04162$ bulunur. 0,0004162'yi doğrudan yüzde diye yazmak yüz kat hataya yol açar. Bu büyüklük toplam Voc ise aynı ters dönüşüm yapılamaz; önce ışımalı bileşenin ayrılması gerekir.

Bir başka geometri örneği: diğer her şey sabitken dış ışıma kanalları iki katına çıkıp J_0,rad iki kat artarsa, ideal Voc yaklaşık $V_T \ln 2 = 17,81$ mV azalır. Bu hesap, arka aynanın yalnızca ışık yolunu uzatmadığını, uygun koşullarda dış ışıma geometrisini de etkileyebileceğini gösterir. Ancak gerçek aynanın parazitik soğurması ve yeniden soğurma etkileri ayrıca modellenmelidir.

Bir sınır kodunu araştırma aracına dönüştürmek

Bir ayrıntılı denge hesabında spektrum dosyası, birimleri ve integrasyon aralığı kayıtlı olmalıdır. Önce toplam gelen güç bağımsız olarak doğrulanır. Sonra bant aralığı taraması yapılır; fotoakımın bant aralığı arttıkça azaldığı, gerilim ölçeğinin mantıklı olduğu ve maksimum gücün sınırlar içinde kaldığı kontrol edilir. Enerji izgarası sıklaştırıldığında sonuç kararlı kalmalıdır. Joule ve elektronvolt gösterimleriyle yazılmış iki hesap aynı sonucu vermelidir; değişken dönüşümündeki q çarpanı iki kez uygulanmamalıdır.

Sonuç tablosunda $T = 298,15$ K ile $T = 300$ K ayrı koşullar olarak yazılır. Optik yoğunlaştırma, tek veya iki ışıma yarımküresi, basamak veya ölçülmüş soğurma, geri dönüşüm ve terminal sayısı açıklanır. Böyle bir hesap, yeni malzemenin laboratuvar verimini tahmin etmez; belirtilen mimaride kayıplar ortadan kaldırılrsa nereye kadar gidilebileceğini söyler. Malzemenin gerçekten üretilmesi ve aygıt olarak çalışması ayrı kanıt gerektirir.

Sınırı sayısal olarak yeniden kurmak

Bir teorik sınırı kullanabilmek için girişleri ve optik geometrisini tanımlamak gerekir. Burada tek eklem, basamak soğurma $a(E) = 1$ ($E \geq E_g$), bir fotondan bir elektron-boşluk çifti, 298,15 K hücre, yoğunlaştırmaz ASTM G173 global spektrumu ve ideal arka ayna seçiliyor. Hücre bir dış yarımküreye ışıyor. Arka yüzün de ışıyabildiği geometri, aynı sonuç değildir.

Gelen spektrumdan önce J_{sc} hesaplanır. Ardından hücre karanlıkta çevresiyle termal dengedeyken dışarı yayılan foton akısının eşdeğer akımı bulunur. Enerji E joule cinsindeyken bir yarımküreye siyah cisim foton akısı kullanılır:

$$J_{0,rad} = q \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2}{\exp(E/k_B T) - 1} dE. \quad (I.8.1)$$

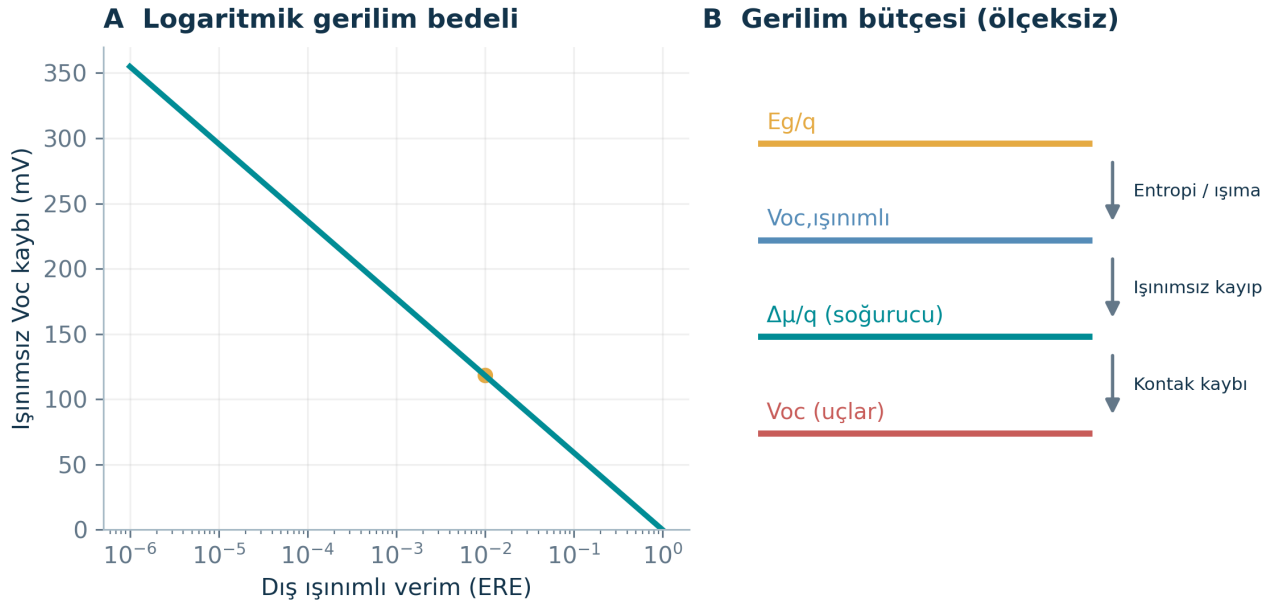
Bu eşitlikte E_g de joule'a çevrilir. İntegralin $x = E/(k_B T)$ değişkeniyle alınması sayısal olarak daha kullanışlıdır. Gerilim verildiğinde yayılan foton sayısı, Boltzmann sınırında $\exp(qV/k_B T)$ çarpanıyla artar. Akımın gerilime bağlı azalması burada “kusurlu üretim” değildir; ideal hücrenin zorunlu ışınlı yeniden birleşmesidir. Gelen ve giden foton muhasebesi $J(V)$ 'yi, onun maksimumu ideal verimi üretir. [H25] [H26] [H27]

$E_g = 1,34$ eV için bu kitabın hesabı $J_{sc} = 35,032$ mA/cm², $V_{oc} = 1,08350$ V ve $V_{mpp} = 0,98905$ V verir. $J_{mpp} = 34,145$ mA/cm² ile güç yoğunluğu yaklaşık 33,77 mW/cm², kullanılan 1000,371 W/m² girişe göre verim yaklaşık %33,76'dır. Bant aralığı taramasının maksimumu yaklaşık 1,34 eV çevresindedir. İki ondalıktan sonraki rakamlar evrensel sabit değil, belirtilen sayısal modelin yeniden üretim kontrolüdür.

Enerji bütçesini dört ayrı soruya ayırmak

E_g altındaki fotonlar bu modelde soğurulmaz. E_g üstündeki bir fotonun E_g 'yi aşan enerjisi, taşıyıcılar bant kenarlarına soğurken büyük ölçüde örgüye aktarılır. Kalan taşıyıcı çiftlerinin tamamı dış devreye çıkmaz; çalışma geriliminde bir bölümü ışınlı yeniden birleşir. Dışarı çıkan her çiftin yaptığı elektriksel iş ise E_g değil, qV 'dir. Bu dört adımı ayırınca neden “bütün ışığı soğurdum” ile “bütün ışığı elektriğe çevirdim” farklı sonuçlar olduğu anlaşılır.

Bir tanı aracı olarak J_{sc} ile bant aralığı arasındaki eğriye bak. E_g küçülürken akım artar, fakat V_{oc} düşer. Maksimum bu ödünleşmenin ortasındadır. Tandem, bir soğurucunun bu tek eşik zorunluluğunu değiştirir; buna karşılık katmanlar arasında optik ve elektriksel eşleşme getirir. SQ sınırını aşmak diye konuşurken hangi varsayımın değiştiği açıkça belirtilmelidir. İki eklemli bir aygıtın tek eklem sınırını aşması, enerji korunumu ihlali değildir.



Şekil 17. Gerilim kayıplarını ayırmak. A panelinde dış ışınlı verimin her on kat düşüşü 298,15 K'de yaklaşık 59,16 mV bedel yaratır. B paneli E_g/q 'dan uç gerilimine giden düşünsel bütçedir; çizgiler arasındaki aralıklar ölçeksizdir. Soğurucuda yüksek quasi-Fermi ayrışması varken uç Voc düşükse kontakları ve arayüzleri ayrıca araştırmak gerekir. [H28] [T26]

Karşılıklılığı nasıl kullanmalı?

Uygun lineer taşıma ve karşılıklılık koşullarında, EQE ile belirlenen dış optik kanalların elektrolüminesansla ilişkisi, kayıpları aynı çerçevede hesaplamayı sağlar. Dış ışınlı verim ERE üzerinden $\Delta Voc_{nr} = -VT \ln(ERE)$ bağıntısı güçlü bir yorum aracıdır. Fakat dış ışınlı yalnız iç yeniden birleşme olasılığını yansıtmaz: foton kaçıışı ve optik geometri de önemlidir. Bu nedenle farklı optik yığınların PLQY veya ERE değerleri, aynı deney tanımı olmadan doğrudan bir kusur yoğunluğu oranına çevrilmez. [H28]

Kimyasal potansiyel burada ne demektir?

Kimyasal potansiyel, uygun denge koşullarında sisteme bir parçacık eklemenin serbest enerji maliyetini anlatır; adında “kimyasal” geçmesi mutlaka bir kimyasal tepkime gerçekleştiği anlamına gelmez. Aydınlatılmış yarıiletkende elektron ve delik toplulukları için ayrı doluluk ölçekleri kullanılabilir. Quasi-Fermi düzeyleri bu ölçekleri ifade eder. Ayrışmaları arttığında aygıtın elektriksel iş yapabilme olanağı artar; gerçek uç gerilimi ise kontak kayıplarıyla da sınırlanır.

Termalleşme, burada yüksek enerjili taşıyıcıların fazla enerjilerini kristal titreşimlerine aktararak bant kenarlarına yaklaşmasıdır. Bu süreçle yeniden birleşme aynı şey değildir: taşıyıcı soğuduktan sonra hâlâ toplanabilir. **Işılmalı referans** ise aynı optik ve elektriksel varsayımlar içinde yalnız ışık yayımıyla yeniden birleşen ideal aygıttır. Gerçek aygıtta bu referansa göre eklenen ışınlı kanallar ayrıca değerlendirilir. Böylece “enerji”, “gerilim” ve “ek kayıp” kavramları birbirinin yerine kullanılmaz. [H25] [H27] [H28]

Sık yanlışlar ve çalışma soruları

“Yüksek verimli bir üst sınır hesapladık, dolayısıyla aday yüksek verimlidir” çıkarımı geçersizdir. “SQ sınırı her türlü enerji dönüştürücüyü sınırlar” da yanlıştır; tek eklemlî modelin dışına çıkan bir mimari yeni varsayımlarla değerlendirilir. Bu, enerji korunumunu aşmak değildir.

1. ERE %10'dan %1'e düşerse 298,15 K'de ek gerilim kaybı nedir? **Yanıt:** $V_T \ln 10 \approx 59,16 \text{ mV}$.

2. $E_g/q - V_{oc}$ neden doğrudan ışımasız kayıp değildir? **Yanıt:** Kaçınılmaz ısımalı ve entropik katkıları da içerir.

3. Yalnızca J_{sc} hesaplamak neden verim sınırını vermez? **Yanıt:** Çalışma gerilimi ve yeniden birleşmenin belirlediği maksimum güç noktası da gerekir.

Okuma yolu: Önce özgün modelin varsayımlarını [H25], sonra aynı problemin spektral tablolaştırmasını [H26], ardından kimyasal potansiyel ve karşılıklık bağlantısını [H27] [H28] okuyun. Sayısal bir sınırdan önce koşullarını tek paragrafta yazabilmek, sonucu ezberlemekten daha değerlidir.

Çok eklemlı hücreler: spektrumu paylaşmanın fiziğı

İki soğurucu ışığı nasıl paylaşır?

Tandem, iki hücrenin aynı ışık yolunda birlikte kullanıldığı bir çok eklemlı aygıttır. Üst hücre çoğunlukla daha geniş bant aralıklıdır; yeterince enerjili fotonları kullanırken daha düşük enerjili bazı fotonları alt hücreye geçirir. Alt hücre daha dar bant aralığıyla bu kalan ışığın bir kısmını kullanır. Katmanlar eşit kalınlıkta olmak veya her renk tam bir hücreye ait olmak zorunda değildir. Gerçek paylaşımı dalga boyuna bağılı soğurma, yansıma ve katman kalınlığı belirler.

Bu yaklaşımın amacı tek eklemdaki “çok foton, düşük gerilim” ile “az foton, yüksek gerilim” uzlaşmasını yumuşatmaktır. Üstte yüksek enerjili fotonların daha yüksek gerilimle değerlendirilmesi, fazla enerjinin ısıya gitmesini azaltabilir. Alt hücre de üstten geçen ışığa bir kullanım yolu sağlar. Fakat ek katmanlar optik ve elektriksel kayıp getirir. İki hücrenin ayrı ayrı iyi olması, birleştirildiklerinde güçlerinin aynen toplanacağını garanti etmez.

Terminal sayısı elektriksel bağlantıyı söyler

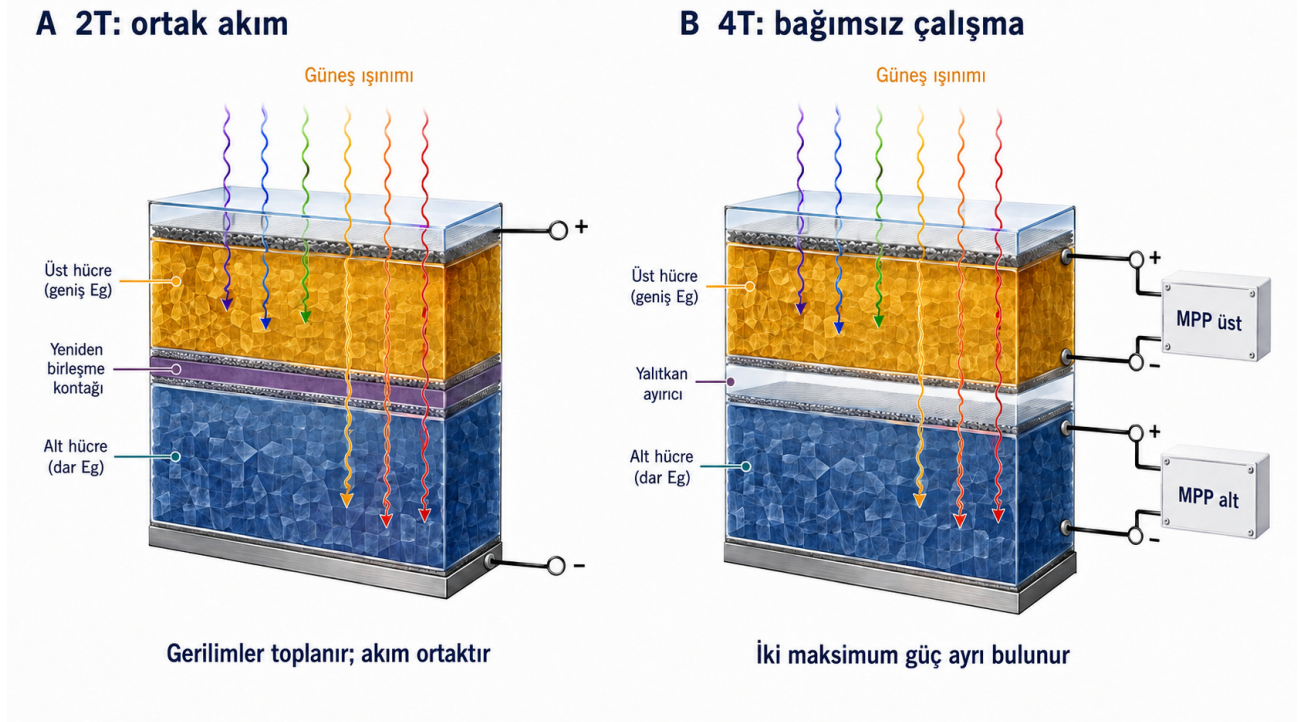
Terminal, dış devreye bağlanan uçtur. İki terminalli, yani **2T**, tandemde alt hücreler seri bağlanır. Kararlı durumda aynı akım seri yoldaki ikisinden de geçer; gerilimleri bu ortak akımda toplanır. Dört terminalli, yani **4T**, optik yığın ise her hücrenin iki ucunu ayrı dışarı çıkarır. İki hücrenin gücü bağımsız izlenebilir. Bunun karşılığında ilave şeffaf kontaklar, kablolama ve güç elektroniğı gerekebilir.

Sentetik örnek: aynı alanlı iki alt hücre, seçilmiş 15 mA/cm^2 ortak akımda $1,00 \text{ V}$ ve $0,60 \text{ V}$ veriyorsa **2T** güç yoğunluğu $15 \times (1,00 + 0,60) = 24 \text{ mW/cm}^2$ 'dir. Bu yalnız bir çalışma noktasıdır; maksimum olup olmadığını görmek için ortak akımın çevresini de taramalıyız. Üst hücrenin tek başına maksimumu 18 mA/cm^2 'de, alt hücreninki 16 mA/cm^2 'deyse bu iki farklı akımı seri bağlantıda aynı anda kullanamayız.

4T durumda güçler ayrı maksimumlarda toplanabilir; ancak alt hücrenin gücü **üst hücreden süzölmüş ışık altında** ölçölmelidir. Alt hücrenin doğrudan güneşteki güç değerini üst hücrenin gücüne eklemek, bazı fotonların enerjisini iki kere sayar. **Akım eşleşmesi**, seri çalışan alt hücrelerin kullanılabilir akımlarını birbirine uygun hale getirme işidir. Bulut, geliş açısı ve spektrum değişince eşleşme de değişebilir. Bu nedenle standart koşulda tek verim sayısı ile yıllık enerji üretimi aynı soru değildir.

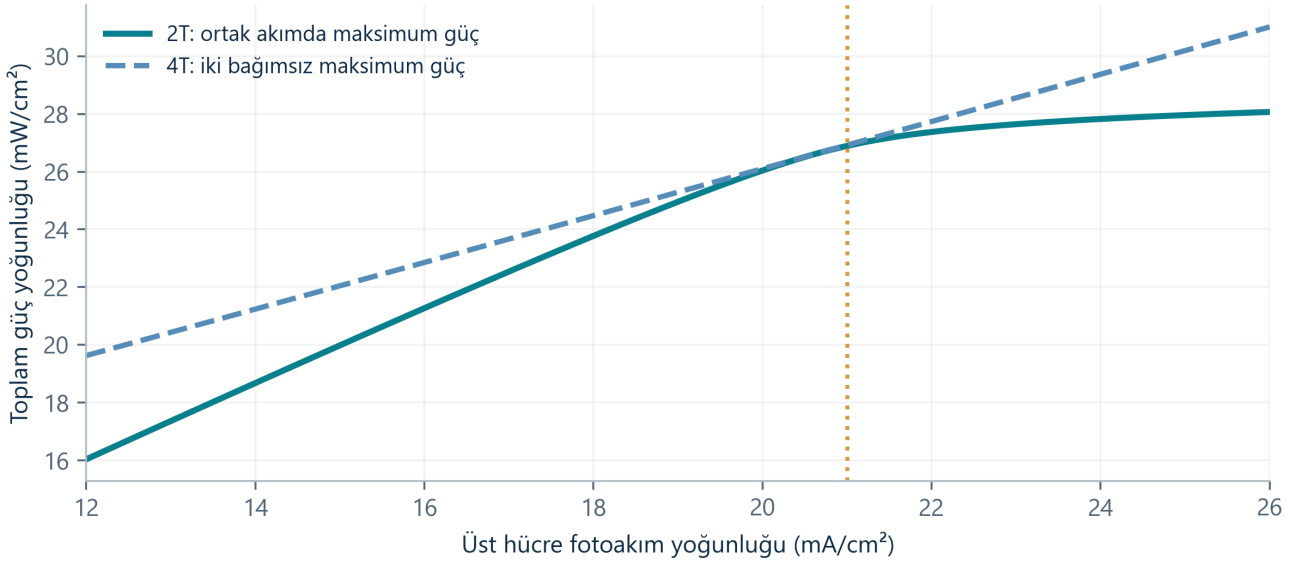
Anlama kontrolü: alttaki hücre neden zayıfladı?

Üst hücre eklendikten sonra alttaki akımın azalması otomatik bir üretim hatası değildir; üst hücre bazı fotonları kullanmıştır. Hatanın olup olmadığını ayırmak için süzölen spektrumu, alt hücrenin bu spektrumdaki beklenen akımını ve gerçek ölçümünü karşılaştırır. Enerjiyi paylaşmanın doğal etkisiyle yeni bir kayıp mekanizmasını ayırmış olursun.



Şekil 18. Tandemde optik paylaşım ve elektriksel bağlantı. Soldaki 2T yapıda iki dış uç, ortak akım ve gerilim toplamı vardır. Sağdaki 4T yapıda optik olarak üst üste duran iki alt hücre ayrı uç çiftlerinden, ayrı maksimum güç noktalarında çalışır. Renkli ışınlar nitel soğurma yollarıdır; çizim bir spektral ölçüm değildir. Hesaplanan güç karşılaştırması izleyen paneldedir. [H29] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Akım uyumsuzluğunun güç bedeli



Şekil 18 - hesaplanan tamamlayıcı panel. Aynı optik girdi ve iki ideal diyot için hesaplanan karşılaştırma. Alt hücre fotoakımı 21 mA/cm² sabittir; alt hücrelerin doyma akımları üstte 10^{-13} , altta 2×10^{-8} A/m², sıcaklık 298,15 K alınmıştır. 2T maksimum gücü, yalnız en küçük kısa devre akımıyla değil iki V(J) eğrisi birlikte kullanılarak bulunur. [H29]

Tek bant aralığının uzlaşmasını bölmek

Tek eklemdede düşük bant aralığı daha fazla foton yakalar, fakat daha düşük gerilim verir ve yüksek enerjili fotonların fazlasını ısıya dönüştürür. Yüksek bant aralığı yüksek gerilim sağlayabilir, fakat kırmızı ve yakın kızılötesi fotonların çoğunu kullanamaz. Çok eklemlı aygıtın amacı, tek bir soğurucunun bu uzlaşmasını farklı enerji aralıklarını kullanan birden fazla soğurucu arasında paylaşmaktır.

Önden gelen ışık önce yüksek bant aralıklı üst hücreye, sonra alt hücreye ulaşır. İdeal durumda üst hücre $E \geq E_{g,üst}$ üst fotonlarını, alt hücre $E_{g,alt} \leq E < E_{g,üst}$ üst fotonlarını kullanır. Gerçekte üst hücrenin saydam iletkeni, taşıma tabakaları, kontakları ve soğurucusu alt hücreye giden ışığı da etkiler. Bir üst hücrenin tek başına iyi olması, tandem için optik olarak iyi olmasıyla aynı değildir.

De Vos'un 1980 çalışması, tandem ayrıntılı dengesinde alt hücrelerin yalnızca Güneş'ten değil, birbirlerinin elektrolüminesansından da aydınlanabileceğini ele alan klasik başlangıç noktasıdır. [H29] Bu ışımsal bağlaşım, bağımsız tek eklem hesaplarının sonuçlarını üst üste toplamanın neden her durumda yeterli olmadığını gösterir.

İki terminal: aynı akım, toplam gerilim

İki terminalde seri bağlı alt hücrelerden aynı akım geçer. Toplam gerilim $V_{\text{toplam}}(J) = V_{\text{üst}}(J) + V_{\text{alt}}(J) - V_{\text{bağlantı}}(J)$ olur. Tandem güç yoğunluğu, ortak akım yoğunluğu üzerinden $p(J) = J V_{\text{toplam}}(J)$ ifadesinin maksimumudur. J , A/cm^2 ise p , W/cm^2 olur; toplam güç ortak ölçüm alanıyla çarpılarak bulunur. Bağlantı elemanının kaybı ihmal edilse bile, iki hücrenin kendi ayrı maksimum güç noktalarına aynı anda ulaşması genellikle mümkün değildir.

“Tandem akımı küçük J_{sc} 'ye eşittir” yararlı bir ilk sezgidir; fakat tam çalışma noktası modeli değildir. Sonlu şönt, ışımsal bağlaşım, gerilime bağlı toplama ve ters kutuplama davranışı gibi etkiler varsa sınır farklılaşabilir. Doğru yöntem, iki alt hücrenin ortak akımdaki gerilimlerini kullanmaktır. Akım eşleme yalnızca bant aralıklarını seçmekle sağlanmaz; kalınlık ve optik yansımalar da aynı hedefe katkıda bulunur.

Seri bağlantı için bir alt hücrenin elektron akışı ile diğerinin boşluk akışının uygun bir ara bağlantıda süreklilik sağlaması gerekir. Tünel eklemi veya yeniden birleşme bağlantısı, bu elektriksel işlevi görürken ışığı mümkün olduğunca az kaybetmelidir. Yeni bir bağlantı malzemesi seçildiğinde optik saydamlık, temas direnci, kimyasal kararlılık ve işlem sıcaklığı beraber değerlendirilir.

Dört terminal: bağımsız güç takibi

Dört terminalde iki alt hücre elektriksel olarak bağımsızdır. İdeal güç yoğunluğu toplamı $p_{\text{toplam}} = \max(V_{\text{üst}}J_{\text{üst}}) + \max(V_{\text{alt}}J_{\text{alt}})$ olur; toplam güç için ortak alanla çarpılır. Ancak alt hücrenin eğrisi, üst hücreden süzölmüş ışık altında ölçülmelidir. İki hücrenin ayrı ayrı tam AM1.5G altında ölçülen verimlerini toplamak, aynı fotonları iki kez kullanmış gibi hesaplamaktır.

Bağımsız güç takibi akım uyumsuzluğuna esneklik sağlar; karşılığında ek kontak, saydam elektrot, kablolama ve güç elektroniği gerektirebilir. Bunlar bazı aygıtlarda küçük, bazılarında belirleyici kayıplardır. Hangi topolojinin daha iyi olduğu yalnızca bir hücre verim sayısı ile değil, toplam alan, optik istif ve elektriksel toplama protokolüyle karşılaştırılır.

Üç terminalli mimariler de mümkündür. Ortak kontak veya farklı bağlantı düzenleri, akım ve gerilim kısıtlarını değiştirir. “Üç terminal” ifadesi tek başına ölçüm protokolünü tanımlamaz; hangi uçların ortak olduğu ve iki güç çıkışının nasıl kullanıldığı açıklanmalıdır. Bu alan, standart tek diyot sezgisinin dikkatle genişletilmesi gereken bir araştırma konusudur.

Bant aralığı seçimi ve işlem uyumluluğu

İdeal spektral eşleme, verimli bir üst hücre için bir bant aralığı aralığı önerebilir. Fakat gerçek optimum; üst hücrenin gerilim açığı, soğurma gücü, alt hücrenin optik tepkisi, spektral değişkenlik ve üretim kayıplarıyla kayar. Bir malzemeyi yalnızca ideal tandem bant aralığına yakın diye seçmek, yeniden birleşme ve üretilebilirlik maliyetlerini görmezden gelir.

Monolitik istifte alt hücre önce üretilmişse, üst hücre işlemi onu bozmamalıdır. Yüksek sıcaklık katkı profillerini değiştirebilir; çözücü alttaki organik veya inorganik tabakaya zarar verebilir; plazma veya püskürtme arayüz kusurları oluşturabilir. Mekanik birleştirme bu kısıtların bir kısmını hafifletebilir, fakat yeni optik aralıklar, yapışma ve termal genleşme sorunları getirir. Malzeme seçimiyle işlem dizisini ayrı dünyalar gibi ele almak yanlış olur.

Bu nedenle tandem tasarımı iki bağlantılı optimizasyondur: spektrumu paylaşan optik sistem ve aynı üretim zincirinde çalışan elektriksel sistem. Birindeki kazancın diğerindeki kayba değip değmediği sayısal olarak gösterilmelidir. Geniş bir parametre taramasından önce en duyarlı birkaç parametreyi belirlemek, gereksiz simülasyonları azaltır.

Çalışılmış örnek: ortak akımın bedeli

Öğretici örnek. Süzülmüş gerçek istif koşullarında üst hücrenin bağımsız maksimum güç noktası 1,00 V ve 18 mA/cm², alt hücreninki 0,60 V ve 20 mA/cm² olsun. Dört terminalde ideal toplam 18 + 12 = 30 mW/cm², yani 100 mW/cm² girişte %30'dur. Bu hesapta iki eğri de aynı optik istif altında tanımlanmıştır.

İki terminal için basit bir düşünce örneğinde ortak 18 mA/cm² akımda üst hücre geriliminin 1,00 V, alt hücre geriliminin 0,61 V olduğunu varsayalım. Güç 18 × 1,61 = 28,98 mW/cm² olur. Bu sayı gerçek optimumun tam çözümü değildir; gerçek J-V eğrileriyle ortak akım taranmalıdır. Fakat yalnızca uyumsuzluğun nasıl güç kaybı oluşturabildiğini gösterir. Seri ara bağlantıda 20 mV ek düşüm varsa aynı noktadaki kayıp 0,018 A/cm² × 0,020 V = 0,36 mW/cm², yani 0,36 mutlak verim puanıdır.

Aynı örnekte üst optik yapı alt hücrenin akımını 20'den 17 mA/cm²'ye düşürürse, ilk problem tersine döner: artık alt hücre daha sınırlayıcıdır. Bu yüzden bir tabakanın saydamlığına “%95 geçiriyor” demek yeterli değildir; hangi dalga boylarında %5 kaybettiği belirleyicidir. Alt hücreye yararlı dar bir banttaki kayıp, toplam optik gücün küçük kısmı olsa bile akım eşlemeyi bozabilir.

Değışen spektrum ve gerçek enerji üretimi

Laboratuvarda mükemmel eşlenen iki terminalli hücre, sabah veya nemli havada aynı eşlemeyi korumayabilir. Su buharı, aerosol ve geliş açısı spektrumu değıştirir. Yıllık enerji üretimi için tek bir AM1.5G noktası yerine zamana bağı spektral ışınlm, sıcaklık ve güç takibi hesabı gerekir. Yüksek standart test verimi hâlâ değıerlidir; fakat yıllık kilowattsaat üretiminin bütün açıklaması değıildir.

Işınımsal bağlaşım bazı uyumsuzlukları yumuşatabilir: üst hücrede yeniden birleşmeyle yayılan fotonların bir kısmı alt hücrede soğurulabilir. Bu, bedelsiz enerji üretimi değıildir; üst hücrenin taşıyıcı ve foton muhasebesinden alt hücreye aktarımıdır. Hangi yönde, hangi açıda ve hangi verimle gerçekteştiğı belirtilmeden, bir bağlaşım katsayısını her tandeme taşımak güvenilir olmaz.

Tandem gücü neden minimum akım çarpı toplam Voc değıildir?

İki ideal alt hücrenin her biri için akımı ters çevirerek $V(J)$ yazabiliriz:

$$V_i(J) = n_i V_T \ln \left[1 + \frac{J_{ph,i} - J}{J_{0,i}} \right]. \quad (I.9.1)$$

Burada n_i simgesi bu eşitlikte alt hücrenin diyot ideallik faktörüdür; öz taşıyıcı yoğunluğu ile karıştırılmamalıdır. $2T$ aygıtta aynı J iki hücreden geçer, toplam gerilim $V_1(J) + V_2(J)$ 'dir. Güç optimumu bu toplamın akımla çarpımının maksimumudur:

$$p_{2T} = \max_J \{ J[V_1(J) + V_2(J)] \}. \quad (I.9.2)$$

Minimum J_{sc} ile toplam Voc'yi çarpmak bir üst dikdörtgen kurar; gerçekte maksimumda her alt hücrenin gerilimi Voc'den küçüktür. Akım uyumsuzluğu büyüdüğünde zayıf hücre güç eğrisini sınırlar; fakat akım fazlası bulunan hücrenin çalışma gerilimi de değıir. Dolayısıyla kaybı yalnız “iki akımın farkı” olarak hesaplamak yetersizdir.

4T karşılaştırması, aynı optik düzen altında üst ve alt hücrenin güçlerini ayrı ayrı eniyiler. Yalnız elektriksel serbestlik değıişıyorsa bağımsız maksimumların toplamı ortak akım zorlamasından düşük olmaz. Ancak gerçekte 4T yığına eklenen saydam kontaklar parazitik soğurma getirebilir. Farklı optik yapılar kullanıldığında 4T'nin otomatik üstünlüğü matematiksel olarak garanti edilmez. Bu ayrım, mimari karşılaştırmasının en önemli kontrolüdür.

Spektrum değıiştiğinde yalnız toplam ışınlm değıil, üst/alt foton paylaşımı değıir. Bir laboratuvar spektrumunda eşleşen iki hücre, bulut, hava kütlesi ve mevsim değıişimiyle uyumsuzlaşabilir. Bu yüzden tandem tasarımında tek bir STC noktası ile yıllık enerji optimumu ayrı problemlerdir. Araştırma açısından sağlam yaklaşım, önce standart

noktayı doğrulamak, sonra yer ve zaman tanımlı spektrumlarla enerji üretimini modellemektir.

Sık yanlışlar ve çalışma soruları

“İki tek eklem verimini toplarsam tandem verimini bulurum” yanlıştır. “Daha çok eklem her koşulda daha iyi modül yapar” da söylenemez; ideal termalleşme kazancı, ek optik ve elektriksel kayıplarla yarışır. Çok eklem, tek eklemli ayrıntılı denge varsayımını değiştirir; termodinamiği ihlal etmez.

1. Seri bağlı alt hücrelerde hangi büyüklük eşit, hangisi toplanır? **Yanıt:** Akım aynıdır, gerilimler uygun işaretlerle toplanır.
2. Dört terminal verim toplamı hangi aydınlatma koşulunda anlamlıdır? **Yanıt:** Üst ve alt hücre güçleri aynı optik istifte, alt hücre süzölmüş ışık altındayken ve ortak gelen alan/güç paydasıyla belirlenmelidir.
3. 20 mA/cm^2 ortak akımda 50 mV bağlantı kaybı ne kadar güç kaybettirir? **Yanıt:** 1 mW/cm^2 ; 100 mW/cm^2 girişte bir mutlak verim puanı.

Okuma yolu: Tandem ayrıntılı dengesinin tarihsel başlangıcını [H29], ardından ileri kavramların fiziksel sınıflandırmasını [H30] inceleyin. Her tandem önerisi için optik istifi, terminal devresini, ortak alanı ve maksimum güç toplama yöntemini dört ayrı çizim veya denklemle açık hale getirin.

Kristal silisyum: iyi bir yarıiletkeni iyi bir ürüne dönüştürmek

Silisyum hücrelerini katman katman okumak

Silisyum, Si simgeli elementtir; kumdaki silisyum dioksit ile elektronik kalitedeki silisyum aynı ürün değildir. Hücre yapabilmek için istenmeyen safsızlıklar azaltılır, kristal oluşturulur ve kristal çok ince dilimlere ayrılır. Bu dilime **wafer** denir. **Tek kristal**, atom dizilişinin büyük hacimde aynı düzeni izlemesidir. **Çok kristalli** malzemede farklı yönlendirilmiş bölgeler, yani taneler vardır. Tanelerin bulunduğu sınırların elektriksel etkisi yapısına ve safsızlıklarına bağlıdır.

Bir hücre kesitini ışığın geldiği taraftan okumaya başlayalım. Üstte yansımayı azaltan ince kaplama olabilir. Silisyumun yüzeyi küçük piramitlerle dokulandırılarak yansıyan ışığın tekrar yüzeye çarpması sağlanabilir. İçeride katkılama ve kontak katmanları yüklerin seçici toplanmasını kurar. Metal parmaklar toplanan akımı daha kalın iletim hatlarına taşır. Arkada pasivasyon ve elektriksel bağlantı bulunur. Bunlar yalnız üst üste konmuş maddeler değil; her biri ayrı bir kaybı yöneten işlevlerdir.

Kısaltmaların arkasındaki farklı sorular

PERC, arka yüzün büyük bölümünü pasive edip elektriksel teması yerel açıklıklardan kuran hücre ailesini anlatır. **TOPCon**, çok ince oksit ve katkılı silisyum katmanlarıyla pasivasyonu taşıyıcı geçişiyle birleştiren kontak yaklaşımıdır. **SHJ** veya **HJT**, kristal silisyumla farklı yapıda ince silisyum katmanlarının oluşturduğu heteroeklem yaklaşımıdır. **IBC**, elektron ve delik kontaklarının birbirine geçen şeritler halinde arka yüze yerleştirilmesidir. İlk üç ad daha çok kontak ve yüzey fizikini, sonuncusu kontakların yerleşimini söyler. Bir mimaride bu fikirlerden birkaçı birlikte kullanılabilir.

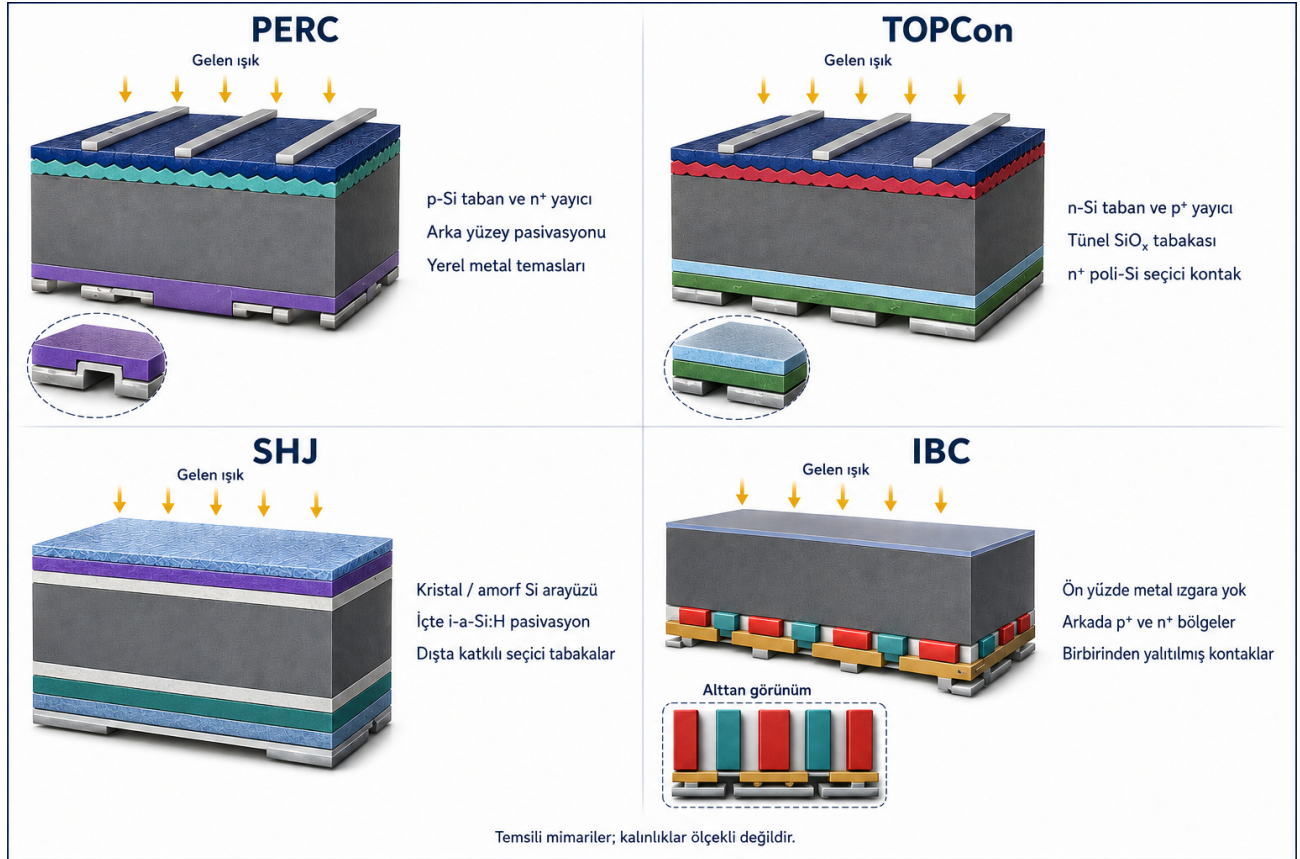
Sentetik düşünce deneyi: ön metal desenin gölgelediği alanı %4'ten %2'ye düşürdüğümüzde daha fazla ışık girebilir. Ancak aynı metal daha inceyse direnci artabilir. Açılan optik kazanç elektriksel kayıpla silinebilir. Bu nedenle işlemin iyi olup olmadığını yalnız yüzey fotoğrafından veya kısa devre akımından anlayamayız; gerilim, dolum faktörü ve tam güç gerekir. Aşağıda üretim adımlarını bu kayıp yarışına bağlayacağız.

Bir **referans hücre**, iyileştirmeyi karşılaştırmak için aynı temel süreçten üretilmiş kontrol örneğidir. Bir **lot**, ortak üretim geçmişini paylaşan numune grubudur. Yalnız en

iyi hücreyi seçmek yerine lot dağılımını izlemek, başarılı fikrin tekrar edilebilir süreç olup olmadığını gösterir.

Anlama kontrolü: yeni isim neyi değiştirdi?

Bir hücreye “arka kontak” denmesi, hangi yarıiletken veya pasivasyon katmanlarının kullanıldığını tek başına açıklamaz. Kesiti çizip üç soruyu cevapla: ışık nereden giriyor, her taşıyıcı hangi kontağa gidiyor, metal yanlış taşıyıcıyla nerede buluşabilir? Mimari adını çalışma mekanizmasına çevirmiş olursun.



Şekil 19. Dört yaygın silisyum tasarım fikrinin kesitleri. Kalınlıklar ölçekli değildir. PERC arka pasivasyonu, TOPCon tünel oksitli kontağı, SHJ amorf/kristal heteroyapıyı öne çıkarır. IBC, kontaktların arkada iç içe yerleşimini tanımlar ve diğer kontak fiziğiyle birleştirilebilir. Çizimler temsili mimarilerdir. [T01] [T02] [T03] [T04] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Silisyumun asıl üstünlüğü nedir?

Bir fotovoltaik teknoloji, yalnızca iyi ışık soğuran bir bileşikten oluşmaz. Saflaştırma, kristal büyütme, yüzey temizliği, katkılama, pasivasyon, metalizasyon, bağlantı ve yıllarca süren çalışma birlikte çözümlmelidir. Silisyumun araştırmacıya öğrettiği büyük ders budur: malzemenin elektronik özellikleri ile üretim ekosistemi birbirini güçlendirir. Dolaylı bant aralığı nedeniyle ışığı kimi doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerden daha zayıf soğurur; buna rağmen yüksek kaliteli büyük alanlı levhalar, işlenebilir yüzey kimyası ve çok gelişmiş süreç denetimi güçlü bir bütün oluşturur.

Silisyum hücrede yaklaşık 1,12 eV olan oda sıcaklığı bant aralığı, görünür fotonların enerjisinin önemli bölümünün ısıya dönüşmesi anlamına gelir. Bant aralığının altındaki fotonlar ise ideal bantlar arası soğurmaya katkı yapmaz. Bu temel kayıplar, yüzeyi daha iyi pasive ederek ortadan kaldırılamaz. Buna karşılık kusurlar, yüzeyler ve kontaklar nedeniyle oluşan ek kayıplar mühendislikle azaltılabilir. Araştırmacı önce hangi kaybın termodinamik, hangisinin malzeme ve hangi kısmının üretim kaynaklı olduğunu ayırmalıdır.

Üretim zincirini fiziksel amacıyla okumak yararlıdır. Saflaştırma, taşıyıcıları yakalayan metal safsızlıklarını azaltır. Kristal büyütme, tane sınırlarını ve dislokasyonları denetler. Levha kesme, kullanılabilir alan üretirken kesim kaybı ve mikroçatlak yaratabilir. Yüzey tekstürü ışığın hücreye girişini kolaylaştırır. Katkılama, çoğunluk taşıyıcısını ve eklemi belirler. Pasivasyon, yüzeydeki elektronik durumları azaltır. Metalizasyon ise elektrik akımını az kayıpla dışarı taşır. Her işlem sonraki işlem için bir başlangıç durumu bırakır; süreçleri bağımsız kutular gibi optimize etmek bu nedenle sıkça başarısız olur.

PERC, TOPCon, SHJ ve IBC aynı şeyi adlandırmaz

PERC, pasive edilmiş yayıcı ve arka yüzey yaklaşımını anlatır. Arka yüzeyin büyük kısmını dielektrikle koruyup yalnızca belirli yerlerde elektriksel kontak açmak, doğrudan metal temasının neden olduğu yeniden birleşmeyi sınırlar. Blakers ve çalışma arkadaşlarının 1989 tarihli hücresi bu tarihsel çizginin önemli özgün örneklerindendir. Burada kavramsal sıçrama, iyi bir eklem kurulduktan sonra arka yüzeyin de etkin bir kayıp kaynağı olduğunun tasarımı alınmasıdır. [T01]

TOPCon, çok ince bir oksit ile katkılı silisyum tabakasının birlikte çalıştığı pasive edici kontak ailesidir. Oksit yüzeyi elektronik olarak iyileştirir; uygun katkılama ve bant bükülmesi bir taşıyıcı türünün geçişini kolaylaştırırken diğerini bastırır. Feldmann ve arkadaşlarının 2014 çalışmalarında, düşük kontak yeniden birleşmesi ile iyi akım taşınmasının aynı aygıtta birleştirilmesi gösterildi. Gerçek oksidin kalınlığı, sürekliliği,

yerel kusurları ve ısı geçmişi önemlidir; tüm TOPCon kontaklarda taşınımı tek başına ideal, düzgün bir bariyerden tünelleme diye açıklamak aşırıdır. [T02]

SHJ, kristal silisyum ile ince hidrojenlenmiş amorf veya uygun nanokristal silisyum katmanlarını birleştiren heteroeklemdir. İnce içsel tabaka pasivasyon sağlar; katkı tabakalar taşıyıcı seçiciliğini destekler. Düşük sıcaklıklı süreçlerin avantajı, iyi bir silisyum levhanın ömrünü koruyabilmektir. Öte yandan ışık kaybı, saydam iletken oksit direnci, kontak direnci ve sıcaklık bütçesi birlikte sınır koyar. 2023 tarihli bir çalışmada nanokristal silisyum delik kontağının elektriksel özelliklerini geliştirmek, yalnızca soğurucuyu değiştirmeden performans artışı sağladı. Bu, kontak katmanının pasif bir bağlantı parçası olmadığını gösterir. [T04]

IBC ise elektrotların yerleşimidir: elektron ve delik kontakları arka yüzde iç içe geçmiş parmaklar halinde bulunur. Ön metal gölgelenmesi kalkar; buna karşılık arkada iki kutbun yalıtılması, desenlenmesi ve taşıyıcıların yatay uzaklıklar boyunca toplanması gerekir. IBC, bir soğurucu kimyası veya tek bir pasivasyon yöntemi değildir; SHJ veya başka seçici kontaklarla birleştirilebilir. Yoshikawa ve arkadaşlarının 2017 tarihli çalışması SHJ ile arka kontak topolojisinin bir araya getirilmesinin özgün bir örneğidir. Yayındaki büyük alan, ömür, optik ve direnç çözümlemeleri teknoloji karşılaştırmasının neden tek bir verim sayısına indirgenmemesi gerektiğini gösterir. [T03]

Tasarım	Hedef aldığı başlıca kayıp	Birlikte yönetilecek bedel
PERC	Arka yüzey yeniden birleşmesi	Yerel kontak direnci ve desenleme
TOPCon	Metal temasındaki seçicilik kaybı	Oksit bütünlüğü, katkı tabaka soğurması, ısı bütçe
SHJ	Yüzey ve kontak yeniden birleşmesi	İnce katman optiği, TCO ve düşük sıcaklık metalizasyonu
IBC	Ön metal gölgelenmesi	Arka desenleme, yanal toplama ve yalıtım

Bir ömür hesabı neden mimariyi değiştirir?

Yaklaşık düzgün fazla taşıyıcı yoğunluğu bulunan, iki yüzeyi eşdeğer ince bir levhada öğretici bir model şöyledir:

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} \approx \frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{2S}{W}. \quad (I.10.1)$$

Burada τ_{eff} etkin taşıyıcı ömrü, τ_{bulk} hacim ömrü, S yüzey yeniden birleşme hızı ve W levha kalınlığıdır. Bu ifade her katkılama ve enjeksiyon düzeyinde kesin değildir;

yüzey sınırlamasının büyüklüğünü görmeye yarar. Birimler tutarlı seçilmelidir: $\bar{v}$ cm/s ise V cm olmalıdır.

Çözümlü örnek. Kalınlığı 150 μm , hacim ömrü 2 ms olan levhada $W = 0,015$ cm alınır. İki yüzeyde $\bar{v}$ cm/s için toplam hız $500 + 667 = 1167 \text{ s}^{-1}$, etkin ömür yaklaşık 0,857 ms olur. $\bar{v}$ cm/s olduğunda hız $500 + 6667 = 7167 \text{ s}^{-1}$ ve ömür 0,140 ms olur. Aynı kaliteli kristal, yalnızca yüzey nedeniyle altı katın üzerinde farklı etkin ömür verebilir. Daha saf kristal satın almak, yüzey sorunu çözülmediyse beklenen getiriye sağlamaz.

Levha inceltmek hammadde kullanımını azaltır; fakat aynı $\bar{v}$ değerinde yüzey terimini büyütür ve uzun dalga boylu ışığın soğurulmasını zorlaştırır. Bu yüzden inceltme, daha iyi pasivasyon ve ışık hapsedmeyle birlikte ele alınmalıdır. İnce levhada mekanik kırılma oranı da artarsa kilogram başına silisyum tasarrufu, satılabilir watt başına tasarrufa dönüşmeyebilir.

Bir hücre geliştirme deneyini nasıl okursun?

Yeni bir yüzey işlemi V_{oc} değerini artırırken doluluk faktörünü düşürüyorsa, yeniden birleşme azalmış fakat taşıma bariyeri veya seri direnç artmış olabilir. Kısa dalga boyu EQE kaybı ön katmanlarda parazitik soğurmaya; uzun dalga boyu kaybı yetersiz optik yol, arka yüzey veya hacim toplama sorununa işaret edebilir. Bunlar tanı hipotezleridir; tek başına neden kanıtı değildir. Yansıma, ömür, karanlık ve aydınlık elektriksel ölçümler birlikte yorumlanmalıdır.

Silisyum araştırmasında başarı çoğu zaman yeni bir element eklemekten değil, mevcut kaybın yerini doğru saptamaktan gelir. Birim alan kontak direnci, doyumluk akım yoğunluğu, levha direnci ve optik soğurma ayrı ölçülürse hangi değişikliğin gerçekten faydalı olduğu görülebilir. En iyi hücre kadar, aynı süreçle üretilmiş hücrelerin dağılımı da raporlanmalıdır.

Üretim adımlarını fiziksel işlevlerine bağlamak

Kristal silisyum hücrenin üretimi, yalnız bir p-n eklem yapmaktan ibaret değildir. Başlangıç kristalinin saflığı ve kristal kusurları hacim ömrünü belirler. Dilimleme kalınlığı malzeme tüketimini ve mekanik dayanımı etkiler. Yüzey hazırlama ve dokulama, yansımayı ve ışığın izlediği yolu değiştirir; aynı zamanda yüzey alanını büyütür. Katkılama ve eklem oluşturma, taşıyıcı seçiciliği ile yanal direnci ayarlar. Pasivasyon tabakaları yüzeydeki kaybı azaltır. Metalizasyon ise küçük optik gölgeyle düşük direnç sağlamalıdır. Her adımın bir önceki adımın sağladığı kazanımı bozabilmesi, süreç entegrasyonunu ayrı bir araştırma alanı yapar.

PERC yapısında arka pasivasyonun amacı, metalin tüm arka yüzeyi yeniden birleşme yolu haline getirmesini azaltmaktır. Yerel açıklıklar elektrik temasını korur. TOPCon'da çok ince oksit ile katkılı polikristal silisyum, iyi pasivasyonla taşıma olanağını birleştirmeye çalışır. SHJ'de kristal yüzeydeki ince öz amorf silisyum ve katkılı seçici tabakalar, yüksek elektronik kaliteyi düşük sıcaklıklı kontak yapısıyla birleştirir. IBC'de ön metalin arkaya taşınması gölgeyi azaltabilir; fakat arka p ve n kontaklarının yalıtımı ve taşıyıcıların yanal hareketi önem kazanır. Bunlar birbirini dışlayan bütüncül teknoloji adları değildir. [T01] [T02] [T03] [T04]

Metal ızgara neden bir optimizasyon problemidir?

Ön ızgara parmakları arasındaki uzaklığı s , yüzey tabakasının kare direncini R_{sheet} alalım. Üniform düşey akım yoğunluğu J 'nin iki yandaki parmağa yanal aktığı bir boyutlu modelde, parmaklar arasındaki ortalama ohmik güç kaybı alan başına yaklaşık $J^2 R_{sheet} s^2 / 12$ olur. Parmak genişliği w ise gölgelenen kesir yaklaşık w/s 'dir. Biri s büyüdükçe artar, diğeri azalır:

$$p_{yanal} \simeq \frac{J^2 R_{sheet} s^2}{12}, \quad f_{golge} \simeq \frac{w}{s}. \quad (I.10.2)$$

Bu basitleştirilmiş türetmede akım yığılması, parmak metalinin boyuna direnci ve temas direnci ihmal edilmiştir. Yine de temel tasarım mantığını gösterir: sıfır gölge isteyen çok seyrek ızgara, yanal taşınma kaybını büyütür. Çok sık ızgara ise ışığı keser ve metal tüketir. $J = 0,04 \text{ A/cm}^2$, $R_{sheet} = 80 \text{ } \Omega/\text{kare}$ ve $s = 0,15 \text{ cm}$ için yanal kayıp yaklaşık $0,24 \text{ mW/cm}^2$ 'dir. s iki katına çıkarsa aynı modelde $0,96 \text{ mW/cm}^2$ olur. Bu hesap, geometrinin elektriksel etkisini üretimden önce kestirir.

Kimyasal pasivasyon ve alan etkisi aynı müdahale değildir

Yüzeyde kristalin içindekinden farklı bağlanmış atomlar bulunur. Bu atomların oluşturduğu elektronik durumlar, elektron ve delikleri yakalayarak yeniden birleşmeyi kolaylaştırabilir. **Kimyasal pasivasyon**, örneğin uygun bağların tamamlanmasıyla bu etkin durumları azaltır. **Alan etkili pasivasyon** ise yüzey yakınındaki yük dağılımını değiştirerek iki taşıyıcının aynı kayıp bölgesinde birlikte bulunmasını azaltır. Bir kaplama iki etkiyi birden gösterebilir; yalnız kalınlığını bilmek hangisinin baskın olduğunu söylemez.

Şekildeki Al_2O_3 , alüminyum oksit; $\text{SiN}_x\text{:H}$, hidrojen içeren silisyum nitrür; a-Si:H , hidrojen içeren amorf silisyum gösterimleridir. “Amorf”, uzun menzilli düzenli kristal yapının bulunmadığını anlatır. “i” yaklaşık katkısız tabakayı, “n” ve “p” ilgili katkı türlerini gösterir. Bu adlar her hücrede birebir aynı reçetenin bulunduğu anlamına

gelmez; pasivasyon, seçicilik ve optik işlev için kullanılan katman ailelerini tanımayı sağlar. [T01] [T02] [T03]

Metal parmakların arasını daraltmak, akımın yüzey boyunca gideceği yolu kısaltabilir; fakat metalin kapattığı ışık alanını artırır. Yüzeyin **levha direnci**, bu yanal akıştaki gerilim düşüşünü belirleyen büyüklüktür. Kontrol hücresiyle aynı alan, ışık ve sıcaklıkta yapılan karşılaştırma, pasivasyon kazancının metal gölgesi veya iletim kaybıyla silinip silinmediğini gösterir.

Kendini sına

1. Levha kalınlığı yarıya iner, yüzey hızı değişmezse yüzey kaynaklı yeniden birleşme terimi nasıl değişir? **Yanıt:** İki katına çıkar; ince levha otomatik olarak daha iyi hücre demek değildir.
2. Bir IBC hücre SHJ olabilir mi? **Yanıt:** Evet. IBC kontak yerleşimini, SHJ heteroeklem ve pasivasyon yaklaşımını tanımlar; birbirini dışlamazlar.
3. Bir işlem J_{sc} değerini %1 artırırken V_{oc} ve FF sabit kalıyorsa verim kaç artar? **Yanıt:** Göreli %1 artar. Başlangıç %24 ise yeni değer %24,24; mutlak artış 0,24 yüzde puandır.

İnce filmler: az malzeme, yoğun arayüz fiziği

İnce film ne demek, ne demek değil?

İnce film hücrede ışığı soğuran malzeme, cam, metal veya polimer gibi bir desteğin üzerinde ince tabaka olarak oluşturulur. Destek **alttaş** adını alır. Alttaş kalın olduğu halde etkin soğurucu çok ince olabilir; “ince film” her zaman bükülebilir veya toplamda ince modül demek değildir. Malzemenin ışığı birim kalınlıkta ne kadar güçlü soğurduğu, gereken etkin kalınlığı belirler.

Soğurma katsayısı α , ışık şiddetinin malzeme boyunca ne kadar hızlı azaldığını ifade eder. Yansımaz, homojen ve tek geçişli modelde soğurulan pay $1 - \exp(-\alpha d)$ 'dir; d kalınlıktır ve αd boyutsuz olmalıdır. **Sentetik örnek:** $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$, $d = 1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm}$ için $\alpha d = 1$, soğurma yaklaşık %63'tür. Aynı modelde $3 \mu\text{m}$ yaklaşık %95 verir. Ancak soğurmanın artması, üretilen yükün tümünün kontağa ulaşacağı anlamına gelmez. Taşıma mesafesi ve yeniden birleşme hâlâ sınır koyar.

Malzeme adını kimyaya ve arayüze çevirmek

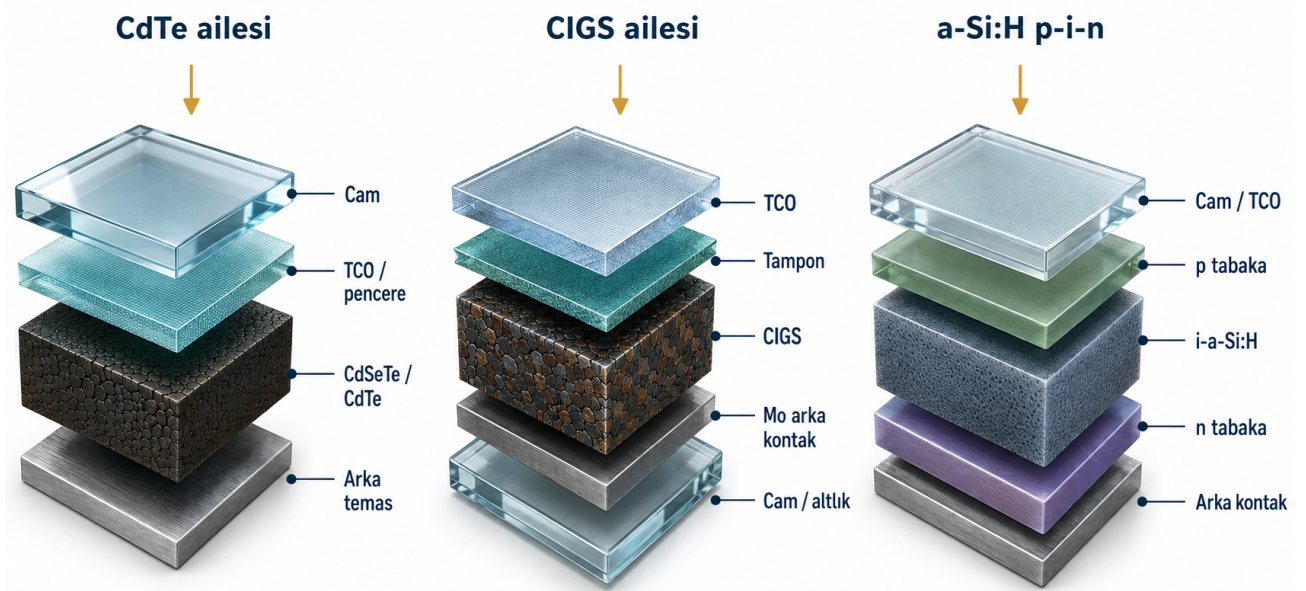
CdTe, kadmiyum tellürdür; ideal formülde kadmiyum ve tellür atomları bire bir oranlıdır. **CIGS**, bakır, indiyum, galyum ve selenyum içeren bileşik ailesinin kısaltmasıdır; Cu(In,Ga)Se_2 yazımı indiyum ve galyumun aynı tür kristal konumlarını paylaşabildiğini anlatır. Hangi oranların seçildiği bant aralığını ve süreç davranışını etkiler. **Amorf silisyumda** ise atomlar uzun mesafede kristaldeki kadar düzenli değildir; hidrojenle bazı bağ kusurlarının etkisi azaltılabilir. Bu üç örnek aynı “ince film” üretim grubunda bulunabilir ama aynı kusur kimyasına sahip değildir.

Film ile komşu katmanın bant kenarları farklı olabilir. Bu fark **bant hizalamasıdır**. Elektron için küçük bir engel bazen yanlış yöndeki kaybı azaltırken büyük engel yararlı geçişi durdurur. Merdiven benzetmesinde basamağın yalnız yüksekliği değil, kimin hangi yönde geçeceği önemlidir. Diyagramın enerji eksenine fiziksel konum eksenini ayırmadan “üstteki bant daha iyidir” denemez.

Pencere katmanı, ışığın önemli kısmını soğurucuya iletmesi beklenen katmandır; yine de tamamen optik olarak kayıpsız değildir. **Tampon katman**, arayüzün kimyasal ve elektriksel uyumuna yardım eder. Adlar işlev belirtir; gerçek katkıları kalınlık, bileşim ve işlem geçmişine bağlı olarak ölçülür.

Anlama kontrolü: daha az malzeme neden her zaman daha ucuz değil?

Soğurucu incelidikçe malzeme tüketimi azalabilir, fakat homojen kaplama, çok katmanlı kontaklar, düşük üretim verimi veya zor kapsülleme maliyeti artırabilir. “Az gram”dan “ucuz elektrik” sonucuna geçmek için kabul edilmiş watt, süreç gideri ve hizmet ömrü birlikte hesaplanmalıdır.



Temsilî katman sıraları; kalınlıklar ölçekli değildir.

Şekil 20. CdTe, CIGS ve amorf silisyum ailelerinin tipik katman sıraları. Ok ışığın giriş yönünü gösterir. Pencere, tampon, soğurucu ve arka temasın farklı görevleri vardır. Kalınlıklar ölçekli değildir; alternatif tampon ve kontaklar mümkündür. [T05] [T06] [T07] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

İnce olmak tek başına avantaj değildir

İnce film yaklaşımı, ışığı birkaç mikrometrede veya daha kısa mesafede soğurabilen bir yarıiletkeni geniş bir taşıyıcı yüzey üzerinde üretir. Malzeme kullanımı düşebilir ve hücreler lazerle birbirine bağlanabilir. Ancak hacim azaldıkça arayüzlerin, tane sınırlarının ve yerel kalınlık değişimlerinin önemi büyür. Aynı ortalama kimyasal bileşim, farklı büyüme geçmişlerinde farklı aygıtlar verebilir.

Soğurma fiziği bölümündeki Beer-Lambert bağıntısı ilk kalınlık ölçeğini verir. Girişim, yansıma, saçılma ve elektrot kayıpları için ölçülmüş optik sabitler ve tam katman yığını gerekir.

Çözümlü örnek. Bir dalga boyunda $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ve $d = 2 \text{ } \mu\text{m}$ ise $\alpha d = 2$ ve soğurma yaklaşık %86,5 olur. Aynı kalınlıkta 10^3 cm^{-1} olduğunda yalnızca %18,1 soğurulur. “İki mikrometre yeterlidir” ifadesi bir spektrum belirtmeden anlamlı

değildir. Kalınlığı artırmak soğurmayı iyileştirebilir; taşıyıcı toplama uzunluğu kısa ise üretilen ek taşıyıcılar yeniden birleşir.

CdTe: bant aralığı ayarı ile kusur kimyasının buluşması

CdTe güçlü soğuran, doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkendir. Birçok aygıtta cam, saydam iletken, pencere veya tampon katmanı, soğurucu ve arka kontak dizisi kullanılır. Ön katman yalnızca ışığı geçiren bir örtü değildir: bant hizalanmasını, eklem yeniden birleşmesini ve istenmeyen akım yollarını belirler. Arka metalin uygun iş fonksiyonuna sahip olması da tek başına yeterli değildir; yüzey stokiyometrisi, ara fazlar ve zamanla element hareketi kontak davranışını değiştirebilir.

Selenyum alaşımlaması, CdTe çizgisinin öğretici bir örneğidir. Fiducia ve arkadaşları, 2019 çalışmasında selenyum içeren bölgelerde daha güçlü ışıltama ve daha uzun taşıyıcı difüzyon uzunluğu gözledi. Sonuç yalnızca bant aralığının düşmesiyle daha çok foton soğurulmasına bağlanmadı; kusur pasivasyonunun da katkısı bulundu. Buradan çıkarılacak araştırma yöntemi, bileşim değişiminin optik ve elektronik etkilerini ayrı ölçmektir. [T05]

Kimyasal aktivasyon işlemleri tane sınırlarını ve kusur popülasyonlarını değiştirebilir. “Daha büyük tane daha iyidir” kuralı ise koşulsuz değildir. Tane sınırının yeniden birleşme etkinliği, yalnızca geometrik boyutundan değil, kimyasından ve elektrostatik yapısından kaynaklanır. Düşük kusurlu fakat kötü kontaklı bir büyük tane, iyi pasive edilmiş küçük taneler ağından daha kötü çalışabilir. Benzer şekilde, katkılama delik yoğunluğunu artırırken yeni derin kusurlar oluşturuyorsa gerilim kazanımı sınırlanır.

CIGS: bileşim, konum ve geçmiş birlikte önemlidir

Cu(In,Ga)Se₂ kısaltması CIGS olan kalkopirit ailesinde indiyum/galyum oranı bant aralığını ayarlar. Aynı ortalama oran, derinlik boyunca farklı profillerle üretilebilir. Arka tarafa doğru yükselen iletim bandı, azınlık elektronların arka kontağa gidip kaybolmasını azaltabilir; yanlış yerdeki bir yükselme ise toplama bariyerine dönüşebilir. Bir bant diyagramı çizmek için yalnızca bant aralığı profilini bilmek yetmez: değişimin iletim ve değerlik bantlarına nasıl bölündüğü gerekir.

Alaşım aralığı için yaygın bir yaklaşık gösterim

$$E_g(x) = (1 - x)E_{g,A} + xE_{g,B} - bx(1 - x) \quad (I.11.1)$$

şeklinde. x alaşım oranı, $E_{g,A}$ ve $E_{g,B}$ uç bileşiklerin bant aralıkları, b eğilme parametresidir. **Öğretici örnek:** $E_{g,A} = 1,01$ eV, $E_{g,B} = 1,68$ eV, $b = 0,15$ eV ve $x = 0,30$ varsayılırsa $E_g = 1,1795$ eV bulunur. Bunlar alıştırma parametreleridir; gerçek örnekte bileşim, sıcaklık ve düzen durumu ölçülmelidir.

Alkali elementlerin küçük miktarları CIGS performansını güçlü biçimde etkiler; ama etkileri evrensel bir “dopant iyidir” cümlesiyle açıklanamaz. Colombara ve arkadaşlarının 2018 çalışması sodyumun indiyum/galyum karşılıklı difüzyonunu değiştirebildiğini ortaya koydu. Alkali etkisini yorumlarken son taşıyıcı yoğunluğu kadar büyüme sırasında bileşim profilinin nasıl değiştiğini de izlemek gerekir. [T06]

CIGS araştırmacısı ayrıca yüzeydeki bakır fakirliğini, olası ikincil fazları, tampon tabaka uyumunu ve arka kontak arayüzünü düşünür. Bütün elementlerin tek bir ortalama EDS sayısına sığdırılması önemli bilgiyi kaybettirir. Derinlik profili, tane içi/tane sınırı ayrımı ve farklı alanlarda ölçüm gerekir. İndiyum ve galyum kullanımı da “ince film az madde kullanır” önermesinden ayrı bir tedarik sorusudur.

Amorf silisyum: başlangıç performansından kararlı performansa

Hidrojenlenmiş amorf silisyumda uzun menzilli kristal düzen yoktur. Elektronik durumların bant kenarlarında yayılması ve yerleşmiş kusurlar, kristal silisyumdan farklı taşınım doğurur. Hidrojen kopuk bağların bir kısmını pasive eder. Çoğu öğretici aygıt, yüksek kusurlu katkılı bölgeleri ince tutup ışığı ağırlıkla içsel bölgede soğuracak p-i-n tasarımıyla açıklanır; elektrik alan taşıyıcıların toplanmasına yardım eder.

Staebler ve Wronski'nin 1977 tarihli özgün çalışması, ışık altında iletkenlikte geri döndürülebilir değişimler olduğunu gösterdi. Bu tarihsel sonuç, yalnızca ilk gün alınmış bir ölçümün çalışma performansını temsil etmeyebileceğini çok erken ortaya koydu. Kaynağın yayıncı tam metnine bu taramada erişilemedi; tarihsel bulgu özgün yazarın daha sonraki açıklaması ve özgün makalenin bibliyografik kaydıyla sınırlandırıldı. [T07] [T33]

Bu sınıfta film kalınlaştırmak daha çok soğurma sağlarken toplama ve kararlılık bedeli yaratabilir. Mikrokristal veya çok eklemli kombinasyonlar bu dengeleri değiştirebilir; fakat “silisyum” adı aynı diye a-Si:H, ince film mikrokristal silisyum ve levha tabanlı c-Si sonuçları tek kategoriye konmamalıdır. Başlangıç verimi, ışıkla koşullandırılmış kararlı verim, hücre alanı ve modül alanı ayrıca yazılmalıdır.

Bant hizalamasını işaretleriyle okumak

Heteroeklemde iki malzemenin iletim ve valans bantları kesintisiz olmak zorunda değildir. Elektronun soğurucudan elektron seçici tabakaya geçiş yönünde, iletim bandının yükselmesi bir enerji engeli oluşturabilir. Çok büyük engel düşük sıcaklıkta veya yüksek akımda taşımayı sınırlar; J-V eğrisinde şekil bozulması görülebilir. Ters yönde büyük bir düşüş ise bazı arayüzlerde taşıyıcı yoğunluklarını ve yeniden birleşme olasılığını artırabilir. Uygun hizalama, yalnız serbest yüzeylerin iş fonksiyonlarını çıkararak güvenilir biçimde bulunamaz.

Bir arayüz oluştuğunda dipoller, kimyasal bağlar, tuzak yükü ve Fermi düzeyi eşitlenmesi bantları değiştirebilir. Bu nedenle bir enerji düzeyi tablosu başlangıç hipotezidir. UPS/XPS gibi yüzeye duyarlı ölçümler, kontrollü kalınlık serileri ve sıcaklığa bağlı aygıt verisi birlikte yorumlanır. Fotoelektron ölçümünde yüzey hazırlama ile enerji referansını açık yazmak özellikle önemlidir. [R07]

CIGS'de bileşim gradyanı, bant aralığının derinlikle değişmesini sağlar. Ancak bant aralığı artışının ne kadarının iletim bandında, ne kadarının valans bandında olduğu taşıyıcı hareketini belirler. Yalnız $E_g(x)$ çizerek elektrik alan yönünü çıkarmak eksiktir. CdTe ailesinde ise alaşımlama, arka temas ve kusur kimyası birlikte değişebilir. Bir işlem hem soğurma eşiğini hem katkı yoğunluğunu hem de kontak direncini değiştirdiğinde, iyileşmeyi tek bir mekanizmaya bağlamak için ayrıştırıcı deney gerekir. [T05] [T06]

Tane sınırı her zaman aynı rolü oynamaz

Polikristal filmde tane sınırı yalnız “kötü bölge” değildir. Sınırdaki bileşim, yerel yük ve potansiyel, taşıyıcıların oraya ulaşmasını değiştirebilir. Yüzeyde görülen iri taneler, tüm film kalınlığı boyunca aynı kristal yapının veya düşük tuzak yoğunluğunun garantisi değildir. Daha yararlı soru, sınırların hangi koşulda taşıyıcı kaybına yol açtığıdır. Mekânsal PL, EBIC gibi toplama haritaları ve kimyasal haritalama, topografyadaki sınır ile elektriksel etkinin aynı yerde olup olmadığını sınıyabilir.

Kendini sına

1. Soğurma %90 olduğunda EQE neden %90 olmak zorunda değildir? **Yanıt:** Soğurmanın bir kısmı işlevsiz katmanlarda olabilir; soğurucuda üretilen taşıyıcıların bir kısmı toplanmadan yeniden birleşebilir.
2. Aynı ortalama Ga oranına sahip iki CIGS film neden farklı gerilim verebilir? **Yanıt:** Derinlik profili, kusurlar, ikincil fazlar, arayüz bant hizalanması ve alkali geçmişi farklı olabilir.
3. Işıklı azalan performans karanlıkta kısmen geri geliyorsa ölçüm nasıl raporlanmalıdır? **Yanıt:** Işık/karanlık çevrimi, sıcaklık, elektriksel yük ve ölçüm zamanları belirtilmeli; geri dönüş kalıcı ömür kazanımı gibi sunulmamalıdır.

III-V ve çok eklemlı hücreler: spektrumu paylaşmanın bedeli

III-V adı nereden geliyor?

III-V ifadesi, periyodik tablonun geleneksel III ve V gruplarındaki elementlerin oluşturduğu yarıiletkenleri anlatır; güncel grup numaraları 13 ve 15'tir. **GaAs**, galyum arsenür; **InP**, indiyum fosfürdür. Bunlar belirli kristal ve optik özelliklere sahip bileşiklerdir. Birden çok elementin aynı kristal konumunu paylaşmasıyla **alaşım** oluşturulabilir; bileşim oranı bant aralığını ayarlama da kullanılır.

Bu malzemeler birçok tasarımda çok güçlü ışık soğurma ve yüksek kaliteli ışınlı süreçler sağlar. Fakat uygun elektronik özellik tek üretim şartı değildir. **Epitaksi**, büyüyen kristal tabakanın alttaki kristalin düzenini izlemesidir. Altteki örgüyle üstteki örgünün atom aralıkları farklıysa **örgü uyumsuzluğu** doğar. Çok ince tabaka bu farkı elastik gerinimle taşıyabilir; kalınlık ve koşullara bağlı olarak dislokasyon denen çizgisel kristal kusurları oluşabilir.

Işık paylaşımı ile kristal uyumu iki ayrı tasarımdır

Üç eklemlı bir hücrede üst, orta ve alt soğurucular farklı enerji aralıklarını kullanır.

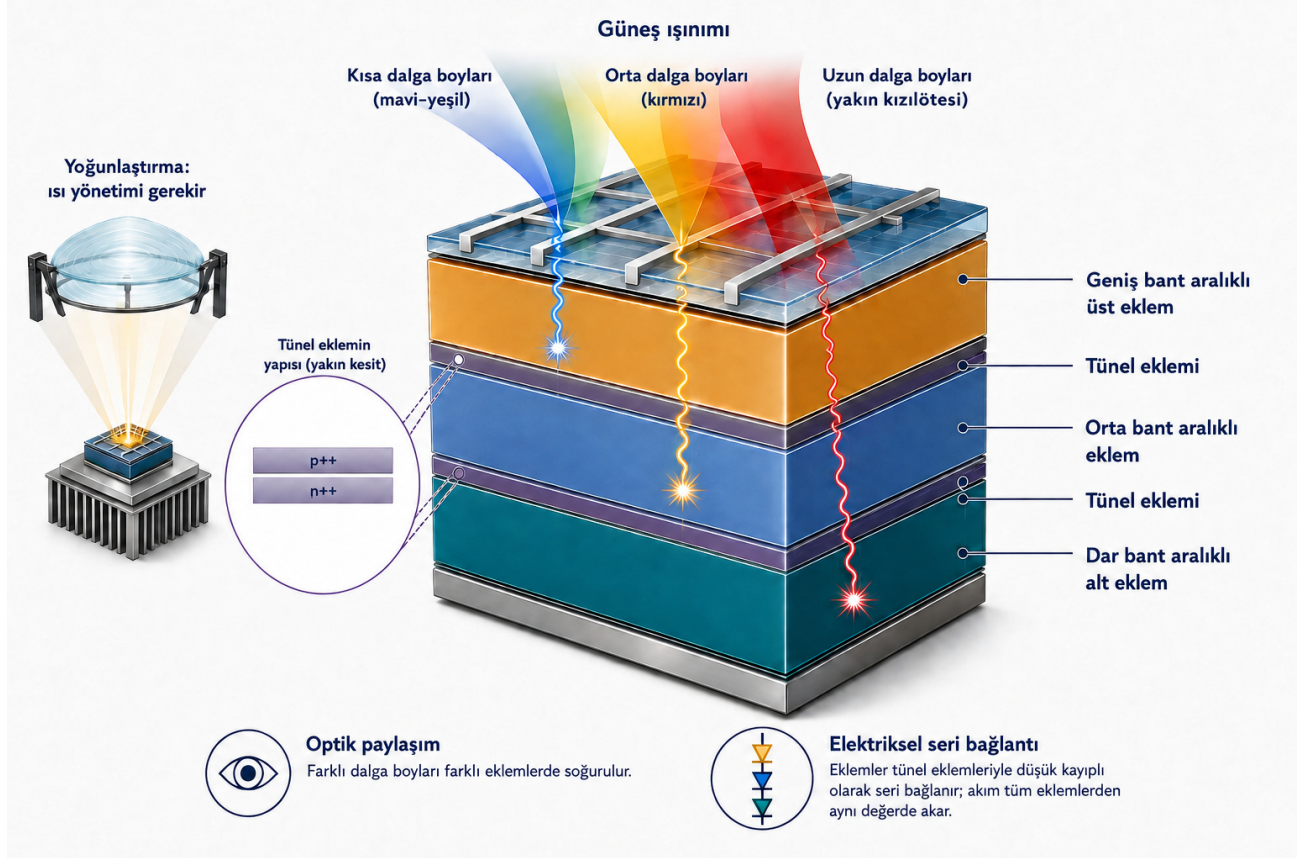
Tünel eklemi, seri bağlı alt hücrelerin arasında elektriksel bağlantı kuran, çok yoğun katkılı bir yarıiletken bölgedir. Kuantum tünelleme, parçacığın klasik enerji bariyerini aşmaya yetmeyen enerjide de bariyerin öte yanında bulunabilmesidir. Bu bağlantının akımı engellememesi ve gereksiz ışık soğurmaması beklenir. Dolayısıyla ara katman yalnız çizimdeki bir bağlantı çizgisi değildir.

Sentetik örnek: iki malzemenin örgü parametreleri 5,65 ve 5,70 angström olsun. Bir angström 10^{-10} m'dir. Bağlı fark $(5,70 - 5,65)/5,65 \approx \%0,885$ 'tir. Küçük görünen bu sayı, bir epitaksiyel yapıda önemli olabilir. Bu oran tek başına “üretilebilir” veya “üretilemez” hükmü vermez; tabaka kalınlığı, esneklik ve kusur oluşumu da gerekir. Daha uygun bant aralığı seçmek kristal uyumunu kötüleştirir.

Yoğunlaştırıcı, aynayla veya merceklerle daha geniş alandaki ışığı küçük hücreye toplar. Hücreye gelen güç artar, fakat optik hizalama ve ısı yönetimi gereksinimi de büyür. “143 güneş altında” alınmış bir hücre verimi, yoğunlaştırmaz bir modül verimiyle doğrudan yarışmaz. III-V literatürünü okurken ışık yoğunluğu, hücre alanı, terminal sayısı ve uygulama koşulu baştan ayrılmalıdır. [T08]

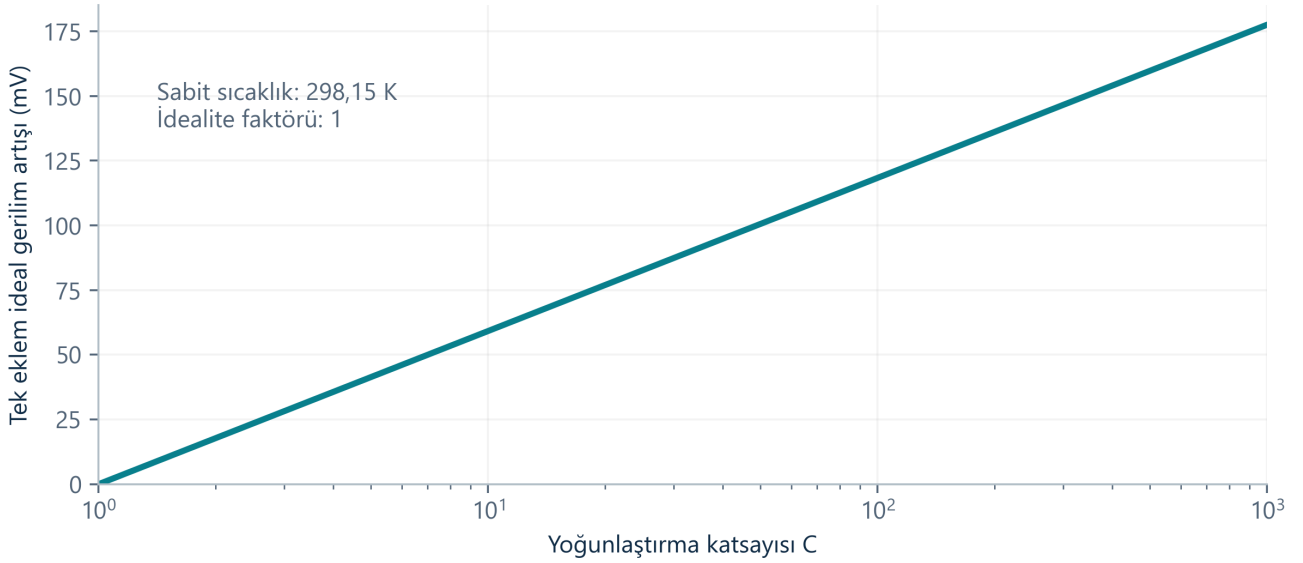
Anlama kontrolü: iyi bant aralığı neden reddedilebilir?

Seçtiğin üst hücre daha çok gerilim vaat ederken alt kristalle uyumsuzluk kusurları oluşturuyorsa yeniden birleşme artabilir. Tasarımın kazanması için optik ve elektriksel kazanç, büyütme kaynaklı kayıptan büyük olmalıdır. Bant aralığı grafiğı ve örgü uyumu grafiğı farklı sorulara cevap verir.



Şekil 21. Üç eklemlı III-V aygıtta spektrumun ve elektrik bağlantısının paylaşımı. Bant aralığı üstten alta azalır; çok ince ve ağır katkılanmış p++/n++ tünel eklemleri komşu alt hücreleri seri bağlar. Optik yollar ve katman kalınlıkları ölçekli değildir. Soldaki yoğunlaştırıcı örneğı, artan akımla birlikte ısı yönetimi ihtiyacını hatırlatır; ideal gerilim kazancı izleyen hesap panelinde verilir. [T08] [T09] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Yoğunlaştırmanın ideal gerilim kazancı



Şekil 21 - hesaplanan tamamlayıcı panel. Grafik, tek bir ideal eklem için aynı sıcaklıkta $\Delta V_{oc} = V_T \ln C$ bağıntısından hesaplanmıştır. Akımın yoğunlaştırmayla artması, temas ve seri direnç kayıplarını da büyütür. Isınma burada hesaba katılmadığı için eğri bir yoğunlaştırıcı modülün ölçülmüş performansı değildir. [T08] [T09]

Neden tek bir bant aralığıyla yetinmeyelim?

Bir tek eklem, yüksek enerjili fotonun enerjisinin tamamını elektrik işine çeviremez. Taşıyıcılar bant kenarlarına gevşerken enerji kaybeder; düşük enerjili fotonlar ise geçer. Üste geniş aralıklı, alta daha dar aralıklı soğurucular yerleştirmek spektrumu bölüştürür. Her alt hücre kendi gerilimini oluşturur. Bu fiziksel fikir, malzemeler mükemmel olmadığında bile güçlüdür; fakat eklenen her eklem yeni bir optik, elektriksel ve üretim sorunu getirir.

III-V adı periyodik tablonun grup III ve V elementlerinden oluşan yarıiletkenleri anlatır. GaAs, InGaP ve InGaAs bu tasarım dilinin örnekleridir. Alışımmlarla bant aralığı ve örgü sabiti değiştirilebilir; bu iki özellik genellikle bağımsız ayarlanmaz. Bir üst hücre için daha uygun bant aralığına gitmek, altlığa örgü uyumsuzluğu ve dislokasyon bedeli getirebilir.

Epitaksi, yeni kristalin alttaki kristalin düzenini izleyerek büyümesidir. Örgü uyumsuzluğu kabaca $f = (a_f - a_s)/a_s$ ile yazılır; a_f film, a_s altlık örgü sabitidir. Çok ince bir film gerinimi elastik olarak taşıyabilir. Kalınlık ve uyumsuzluk arttıkça gerinim dislokasyonla gevşeyebilir; bu kusurlar taşıyıcı ömrünü azaltabilir. Kademeli tampon, ters metamorfik büyütme, tabaka aktarımı ve wafer bağlama farklı çözüm yollarıdır. Her yolun ek malzeme, yüzey hazırlama ve üretim verimi maliyeti vardır.

Seri eklemın elektriksel mantığı

İki terminalli seri aygıtta aynı akım bütün alt hücrelerden geçer. İdealize durumda

$$V_{\text{tandem}}(J) = \sum_i V_i(J) - JR_{s,A} \quad (I.12.1)$$

olarak yazılabilir. J akım yoğunluğu, V_i her alt hücrenin o akımdaki gerilimi, $R_{s,A}$ alanla normalize seri dirençtir. Güç yoğunluğu $P(J) = JV_{\text{tandem}}(J)$ üzerinden en büyük yapılır. Kısa devre akımını yalnızca alt hücre akımlarının en küçüğü almak kaba bir kestirimdir; gerçek maksimum güç için bütün akım-gerilim eğrileri ve olası ışıldamalı bağlaşım gerekir.

Alt hücreler arasında akımın devreyi kapatması gerekir. Tünel eklemi, yoğun katkılı iki bölge arasında taşıyıcıların uygun şekilde yeniden birleşmesini sağlayabilir. Bu yeniden birleşme istenen elektriksel bağlantı işlevini görür; soğurucu içindeki ışıınımsız yeniden birleşmeyle aynı kayıp sınıfı değildir. Bağlantı yüksek akım yoğunluğunu taşıyamazsa veya ışık soğurursa tandem kazancı küçülür.

Bir alt hücrenin akımını yükseltmek için diğer alt hücreye gidecek fotonları daha fazla soğurmak, toplam gücü azaltabilir. Optimum kalınlıklar ve bant aralıkları bu nedenle bağımsız tek eklem optimumları değildir. Ayrıca sabah, öğlen, atmosferik su buharı ve aerosol spektrumu alt hücrelerin akım oranını değiştirir. Standart spektrumda eşleşen hücreler yıl boyunca aynı oranda eşleşmez.

Yoğunlaştırıcı verimi ile bir güneş verimi ayrı kategorilerdir

Geisz ve arkadaşlarının 2020 özgün çalışması altı eklemlı III-V aygıtta 143 güneş yoğunlaştırma altında %47,1 dönüşüm bildirdi. Bu tarihli deney, çok eklem ve optik yoğunlaştırmanın birlikte ulaşabildiği düzeyi gösterir; düz panelin bir güneş altında aynı verime sahip olduğunu göstermez. Kaynakta yoğunlaştırma, seri direnç ve malzeme kalitesi birlikte ele alınır. [T08]

Yoğunlaştırma akımı artırdığı gibi ideal açık devre gerilimini de artırabilir. İdeal diyot yaklaşımında, sıcaklık sabit tutulursa her eklem için yaklaşık

$$\Delta V_{oc} \approx n \frac{kT}{q} \ln C \quad (I.12.2)$$

elde edilir. n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık, q temel yük, C yoğunlaştırma oranıdır. **Öğretici örnek:** $n = 1$, $T = 298,15$ K, 00 alınır, artış yaklaşık 0,118 V'tur. Fakat seri direnç kaybı akımın karesiyle güç kaybı üretir; hücre ısınır, gerilim kazancının bir bölümü kaybolur. Bu formül yoğunlaştırılmış hücre performansının tahmini değildir.

Isıl ölçek de gözden kaçmamalıdır. Varsayımsal 100 güneş altında 1 cm² hücreye yaklaşık 10 W optik güç gelir. %45 elektrik dönüşümü varsayılsa yaklaşık 5,5 W geri kalan güç ortaya çıkar; yansıma ve ışıldama ihmal edildiğinde bunun çoğu ısıl yüküdür.

Küçük alanda bu yükü atmak, optik hizalama kadar ciddi mühendislik ister. Odaklayıcı optikler, izleyici, soğutma ve gökyüzünün doğrudan ışınlım payı sistemin parçasıdır.

Uzay hücreleri için AM0, yerde kullanılan AM1.5G veya doğrudan ışınlım spektrumuyla aynı değildir. Kütle başına güç, radyasyon dayanımı ve güvenilirlik uzayda çok yüksek ağırlık taşır. Yerde ise birim alan güç kadar enerji maliyeti, bakım ve yaygın ışığın kullanılması önemlidir. France ve arkadaşlarının 2022 çalışmasının yer ve uzay spektrumlarını ayrı sonuçlar olarak raporlaması, karşılaştırma disiplininin iyi bir örneğidir. [T09]

Kristal uyumu ile spektral uyum aynı kısıt değildir

Çok eklemlı tasarımda bant aralıklarını yalnız güneş spektrumuna göre seçseydik, istenen her aralığı veren malzemeleri üst üste koyabilirdik. Epitaksiyel büyütmede ise kafes uyumsuzluğu gerinim ve dislokasyon oluşturabilir. Dislokasyonlar yeniden birleşmeyi artırır, ideal foton paylaşımının kazancı gerilim kaybında kaybolur. Metamorfik tamponlar, ters büyütme veya aygıt birleştirme gibi yaklaşımlar bu malzeme kısıtını farklı biçimlerde ele alır. [T08] [T09]

Aradaki tünel eklemi de sıradan bir iletken tel değildir. Üst hücreden gelen elektronlarla alt hücreden gelen boşlukların düşük kayıpla yeniden birleşebildiği elektriksel bağlantıyı sağlar; aynı zamanda alt hücreye gidecek fotonları mümkün olduğunca az soğurmalıdır. Akım taşıma kapasitesi yetersiz bağlantı, çalışma akımında gerilim kaybı veya kararsız eğri oluşturabilir. Bu nedenle alt hücrelerin tek başına iyi olması, monolitik dizinin iyi çalışması için yeterli değildir.

Yoğunlaştırmada foton akısı C kat arttığında, ideal sabit sıcaklıkta tek eklem Voc artışı yaklaşık $VT \ln C$ olur. Buna karşılık akım yaklaşık C ile, aynı alan özgül dirençteki ohmik kayıp C^2 ile büyür. Optik kazanç ısı yönetimiyle de ilişkilidir: hücre ısınır, sabit sıcaklık varsayımı bozulur. Rekor tablosundaki yoğunlaştırılmış hücreyi bir güneş altında çalışan modülle karşılaştırmadan önce bu fiziksel koşulları eşlemek gerekir.

Kendini sına

1. Bir yoğunlaştırıcı hücre kaydı düz panel kaydından büyükse malzemenin kesin olarak üstün olduğu söylenebilir mi? **Yanıt:** Hayır. Spektrum, yoğunlaştırma, sıcaklık, alan, eklem ve terminal sayısı eşlenmelidir.
2. İki alt hücrenin bağımsız maksimum güç akımları 18 ve 21 mA/cm^2 ise seri bağlandıktan sonra iki bağımsız maksimum güç toplanabilir mi? **Yanıt:** Hayır. Ortak akım kısıtı altında toplam güç yeniden en büyük yapılır.
3. Örgü sabiti aynı olan iki yarıiletkenin arayüzü otomatik olarak iyi midir? **Yanıt:** Hayır. Kimyasal tepkime, bant hizalanması, polarite, yüzey sonlanması ve arayüz kusurları ayrıca sınanır.

Halojenür perovskitler: güçlü optoelektronik, hareketli kimya

Perovskit bir yapı ailesidir

“Perovskit” tek bir kimyasal maddenin adı gibi kullanılabilse de PV bağlamında çoğunlukla belirli kristal düzenini paylaşan bir aileyi anlatır. İdeal **ABX₃** yazımında A ve B farklı büyüklükte pozitif iyon konumları, X ise negatif iyon konumudur. Halojenür perovskitlerde X genellikle iyot, brom veya klorla ilişkilidir. Yaygın kurşunlu örneklerde B konumunda Pb²⁺, A konumunda toplam +1 yüklü iyon bulunur. Bir A, bir B ve üç X için yük hesabı $+1 +2 -3 = 0$ 'dır. Bu basit nötrlük hesabı, yazılan her formülün kararlı bir kristal olacağını kanıtlamaz.

FA formamidinyum, **MA** metilamonyum iyonlarını; **Cs** sezyumu gösteren yaygın kısaltmalardır. Bileşimde A veya X konumlarını farklı türler paylaşabilir. Bunlar hacim, optik eşik, kristallenme ve hareketli iyon davranışını değiştirir. “Biraz brom ekledik” cümlesi bu nedenle yalnız renk değişimi değildir; birden fazla fiziksel ve kimyasal değişkeni etkileyebilir.

Çözeltiden film çıkması neden başlı başına bilimdir?

Öncül, hedef malzemeyi oluşturmak için kullanılan başlangıç bileşiğidir. Öncüllerin bir **çözücüde** dağıldığı karışım yüzeye sürüldüğünde önce ıslak filmidir. Çözücü uzaklaşırken iyonların yoğunluğu artar, küçük düzenli bölgeler **çekirdeklenir**, ardından kristaller büyür. **Tane**, ortak kristal yönelimli bölgedir. Filmde boşluk kalması, bazı bileşenlerin ayrılması veya arayüzün bozulması, güzel görünen büyük tanelerin yararını ortadan kaldırabilir.

n-i-p ve **p-i-n** ifadeleri taşıyıcı seçici katmanların sırasını gösterir. Buradaki i, soğurucu orta katmanı işaret eder; gerçek filmin her koşulda kusursuz öz yarıiletken olduğunu garanti etmez. **Elektron taşıma katmanı** elektronun, **delik taşıma katmanı** deliğin uygun kontağa ulaşmasına yardım eder. Her katman aynı zamanda ışık, kimyasal uyum ve işlem sıcaklığı açısından da değerlendirilir.

Hareketli iyonlar ölçümü nasıl değişir?

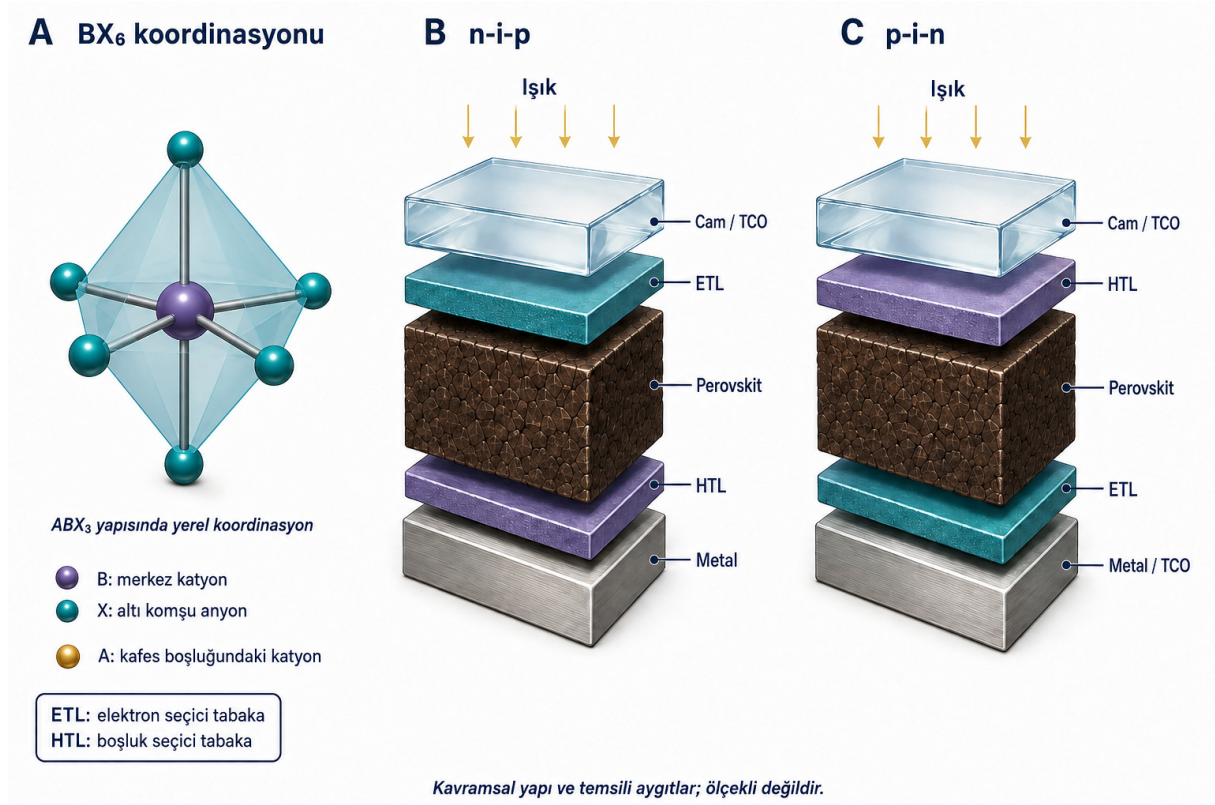
Kristaldeki bir **boşluk**, bulunması beklenen iyonun eksik olduğu konumdur. Komşu iyon bu yere geçtikçe boşluğun kendisi de ters yönde ilerliyor gibi izlenebilir. **İyon göçü**, böyle atomik hareketlerle yük ve bileşimin yeniden dağılmasıdır. Elektron akımıyla aynı zaman ölçeğinde gerçekleşmek zorunda değildir.

Gerilimi hızlı tararken iyon dağılımı önceki koşulu kısmen hatırlayabilir. Böylece ileri ve geri taramalar farklı eğriler verir; bu **histerezistir**. **Sentetik örnek:** hızlı taramada

%22, beklenmiş güç takibinde %19 görüldüyse ikisini aynı performans etiketiyle kullanamayız. Bu fark tek başına belirli bir iyon türünü kanıtlamaz; kararlı ölçüm ve ayırıcı kontroller gerekir. [T12] [T14]

Anlama kontrolü: düzgün film iyi hücre midir?

Mikroskopta deliksiz ve büyük taneli film, elektriksel kusurların az olduğunu veya kontakların seçici olduğunu tek başına göstermez. Yapı görüntüsünü ışıldama, gerilim, kararlı güç ve bileşim ölçümüyle ilişkilendirir. “Görüntü iyileşti” ile “güç kaybının nedeni giderildi” ayrı sonuçlardır.



Şekil 22. Perovskit yapı ailesi ve iki aygıt yönelimi. A paneli ideal ABX₃ komşuluğunun izdüşümüdür; gerçekte faz dönmeleri gösterilmez. B ve C panelleri ışığın girişinden başlayarak n-i-p ve p-i-n katman sırasını verir. ETL elektron, HTL boşluk seçici tabakadır. Katman kalınlıkları ölçekli değildir. [T10] [T11] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Perovskit bir madde adı değil, yapı ailesidir

“Perovskit” sözcüğü, tek bir kimyasal formülü belirtmez. Fotovoltaikte yaygın halojenür perovskitler yaklaşık ABX₃ yapısındadır: A çoğunlukla tek değerli bir katyon; B kurşun veya kalay gibi iki değerli metal; X iyodür, bromür veya bunların karışımı olabilir. B-X oktahedral ağı, bant kenarlarının oluşumunda belirleyicidir. A katyonu da ağın geometrisini, faz kararlılığını ve dinamiğini etkiler. Bu nedenle “A bant kenarına az katkı yapıyor, önemsizdir” çıkarımı yanlıştır.

MA metilamonyumu, FA formamidinyumu gösterir; Cs ise sezyumdur. İyodürün bromürle kısmen değiştirilmesi çoğunlukla bant aralığını büyütür. Kurşun-kalay

karışımları daha dar aralıklı soğurucular sağlayabilir; ancak alaşım aralığı doğrusal olmak zorunda değildir. Bileşim yazılırken katsayıların toplamı, halojen oranı, katkının kafes içinde mi yoksa yüzeyde mi bulunduğu ve filmin gerçekten hangi fazları içerdiği açık olmalıdır.

Geometrik tolerans faktörü

$$t = \frac{r_A + r_X}{\sqrt{2}(r_B + r_X)} \quad (I.13.1)$$

bazen kaba yapı taraması için kullanılır. r_A , r_B ve r_X etkin iyon yarıçaplarıdır. Bu gösterge bağlanma, sıcaklık, moleküler yönelim, oksidasyon veya kinetik ayrışmayı içermez. Uygun bir t değeri, güneş altında kararlı bir film ya da sentezlenebilir bir bileşik kanıtı değildir. Araştırmacı bu tür basit göstergeleri eleme aracı olarak kullanmalı, deneysel faz diyagramının yerine koymamalıdır.

Gelişimin öğretici dönüm noktaları

Kojima ve arkadaşlarının 2009 makalesi, organokurşun halojenür kristallerin ışıkla duyarlılaştırılmış fotoelektrokimyasal aygıtlarda kullanılabileceğini gösterdi. Tarihsel önemi, bugünkü katı hal perovskit hücrelerinin başlangıç noktalarından biri olmasıdır. O aygıtın mimarisi, güncel katı hal aygıtıyla aynı değildir; başlangıç performansını bugünkü modül performansı ile doğrudan karşılaştırmak uygun olmaz. [T10]

Lee ve arkadaşlarının 2012 çalışması, perovskitin yalnızca duyarlılaştırıcı olmak zorunda olmadığını, katı hal aygıtta ışık soğurma ve taşıma işlevlerini üstlenebildiğini gösteren dönüm noktalarındandır. Bu makalenin özgün özetinde verilen deneysel sonuç, alanın çok hızlı geliştiği dönemin kanıtıdır; herhangi bir perovskit formülünün otomatik olarak iyi hücre olacağı anlamına gelmez. [T11]

Bu hızlı gelişimin bilimsel çekiciliği, kuvvetli soğurma, uygun bant aralıkları ve iyi hazırlanmış filmlerde uzun taşıyıcı toplama mesafelerinin bir araya gelebilmesidir. Fakat ucuz bir çözelti hazırlayabilmek, düşük maliyetli ve uzun ömürlü bir modülü üretmekle aynı başarı değildir. Kontaklar, solvent yönetimi, kontrollü kristallenme, kapsülleme, toksik elementlerin tutulması ve üretim tekrarlanabilirliği ürünün gerçek maliyetini belirler.

Aygıt düzeni: n-i-p ve p-i-n

Işığın giriş yönünden bakıldığında n-i-p düzeninde önce elektron seçici kontak, sonra soğurucu, ardından delik seçici kontak bulunur. p-i-n düzeninde sıra tersidir. Buradaki “i”, soğurucunun etkin olarak düşük katkılı bölge rolünü anlatır; kusursuz, mutlak içsel bir yarıiletken olduğunu garanti etmez. Yığın cam/TCO/seçici katman/perovskit/karşı seçici katman/elektrot biçiminde düşünülür. Her katmanın elektriksel görevi kadar optik ve kimyasal görevi vardır.

Elektron taşıma katmanları için SnO_2 , TiO_2 veya uygun fullerene türevleri; delik kontakları için organik moleküller, NiO_x veya kendiliğinden düzenlenen moleküler tek tabakalar farklı tasarım yollarıdır. Bu liste bir satın alma önerisi değildir. Bir malzemenin uygunluğu iş fonksiyonu, bant hizalanması, kaplama uyumu, yüzey kimyası, ısı ve ışık altındaki tepkimelerle belirlenir. İnce bir organik tabaka yeniden birleşmeyi azaltırken fazla kalın veya düzensiz olduğunda taşıma bariyeri oluşturabilir. Gömülü arayüz, sonradan doğrudan işlenemediği için özellikle zordur. Perovskit filmi alttaki yüzeye büyürken ıslanma, çekirdeklenme ve kimyasal bağlanma aynı anda oluşur. 2021 tarihli atomik uyumlu SnO_2 /perovskit arakatman çalışması, gömülü arayüzün düzenlenmesinin aygıt kazancı sağlayabildiğine özgün bir örnektir. Bu tür sonuçlar “yeni bir pasivasyon molekülü” başlığının ötesinde, arayüzün oluşma biçiminin denetlenmesini öğretir. [T32]

Kristallenme: en büyük tane her zaman en iyi film değildir

Film oluşumunda çözücü kaybı, aşırı doygunluk, çekirdeklenme, büyüme ve faz dönüşümü birbirini izler. Çok hızlı çekirdeklenme çok sayıda küçük tane doğurabilir; çok az çekirdeklenme ise filmde boşluk ve kaplanmamış alan bırakabilir. Yalnızca SEM görüntüsündeki iri taneleri başarı göstergesi saymak, gizli arayüz kusurlarını ve yerel stokiometri değişimlerini kaçırır. Kesintisiz örtücülük, faz saflığı, yönelim, gerinim ve elektronik kalite birlikte ölçülmelidir.

Bir katkı maddesi aynı anda kuruma hızını, kusur bağlanmasını ve kontak iş fonksiyonunu değiştirebilir. Verim arttığında etkiyi tek bir mekanizmaya bağlamak için kontrol deneyleri gerekir: aynı ıslanmayı sağlayan fakat bağlanmayan benzer molekül; yalnızca alt kontakta uygulanan işlem; eşdeğer film kalınlığı; farklı ışık yoğunluğu ve zaman çözünürlüklü ölçümler. Mekanizma iddiası, en iyi aygıt grafiğinden daha çok deney gerektirir.

İyon göçü ve histerezis

Halojenür perovskitler elektronik taşıyıcılarla birlikte hareketli iyonik kusurlar da barındırabilir. Eames ve arkadaşlarının 2015 çalışması, MAPbI_3 için iyodür boşluklarıyla ilişkili taşınımı hesaplama ve deneyle ilişkilendirdi. Bu sonuç belirli bir bileşim ve mekanizma içindir; tek bir aktivasyon enerjisini bütün perovskit aygıtlara taşımak doğru değildir. Arayüzler, tane sınırları ve ışık koşulları etkin süreçleri değiştirebilir. [T12]

Basit bir termal etkinleşme modeli $D = D_0 \exp[-E_a/(kT)]$ biçimindedir.

difüzyon katsayısı, D_0 ön çarpan, E_a göç etkinleşme enerjisidir. **Çözümlü örnek:**

Ön çarpan aynı kalırken bariyerin 0,10 eV yükseldiğini varsayalım. 298,15 K'de yeni/eski hız oranı yaklaşık $\exp(-0,10/0,02569) = 0,020$ olur; kabaca 49 kat

yavaşlama beklenir. Fakat işlem hareketli kusur sayısını 100 kat artırırsa toplam iyonik iletkenlik yine artabilir. Bariyer tek başına yeterli tasarım hedefi değildir. İyonlar kontağa yakın birikince iç elektrik alanı ve arayüz yeniden birleşmesi değişebilir. Ölçüm tarama yönüne, hızına ve önceki gerilim durumuna bağlı hale gelir. Ancak düşük histerezis, iyon göçünün bulunmadığını kanıtlamaz. Calado ve arkadaşlarının 2016 deneyi bu ayrımı doğrudan ele aldı. Histerezis oluşması, iyon hareketi ile kontak ve yeniden birleşme koşullarının birlikte etkisine bağlıdır. [T14]

Işık altında kimya ve gerçek kararlılık

Karışık iyodür/bromür filmlerde ışık altında yerel halojen ayrışması görülebilir. Hoke ve arkadaşlarının 2015 çalışması, ışıkla ortaya çıkıp geri dönebilen yapısal ve optik değişimlere dair özgün kanıttır. İyotça zengin dar aralıklı bölgeler az hacim kaplasa bile taşıyıcıları toplayıp ışıltama spektrumunu ve gerilimi etkileyebilir. Bu nedenle baskın PL tepesini filmin tamamının homojen bant aralığı olarak okumamak gerekir. [T13]

Nem ve oksijen dış etkilerken, ışık, sıcaklık ve elektriksel gerilim kapsül içindeki malzemeyi de etkiler. İnorganik A katyonu kullanmak organik uçuculuğu azaltabilir; fakat halojen hareketini, faz dönüşümünü veya metal elektrot tepkimesini kendiliğinden ortadan kaldırmaz. “Tamamen inorganik” ile “sahada dayanıklı” eş anlamlı değildir.

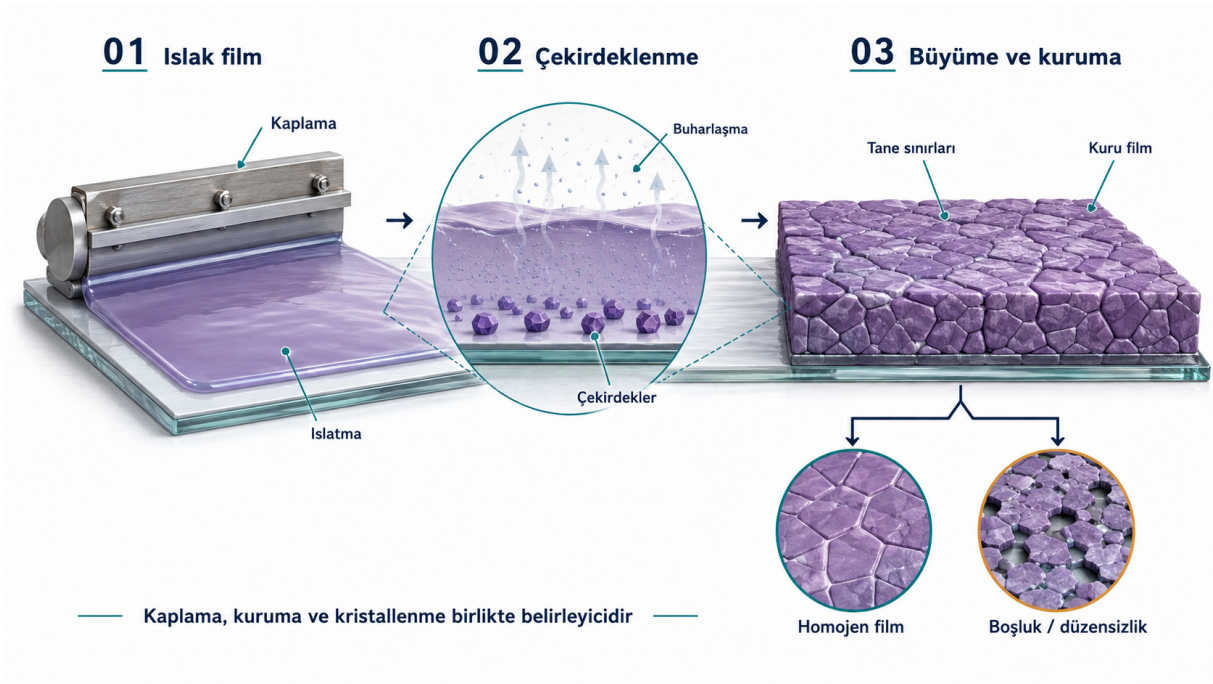
Kararlılıkta sorulacak soru, hangi gerilimde hangi özelliğin ne kadar süre korunduğudur. Khenkin ve arkadaşlarının 2020 uzlaşısı metni; ışık, sıcaklık, nem, elektriksel yük, kapsülleme ve geri döndürülebilir değişimlerin açık raporlanmasını ister. MPP izlemesi çalışma koşuluna yakın elektriksel durum sağlar. Karanlık rafta bekleyen aygıtın sonucu, ışık altında güç üreten aygıtın ömrü değildir. [T15]

Kristallenmeyi enerji bariyeri ve zaman ölçeğiyle düşünmek

Basit homojen çekirdeklenmede yarıçapı r olan küresel bir yeni faz çekirdeğinin serbest enerji değişimi, yüzey maliyeti ile hacim kazancının toplamıdır. Arayüz enerjisi γ pozitif, yeni fazın hacim serbest enerji farkı Δg_v negatif olduğunda:

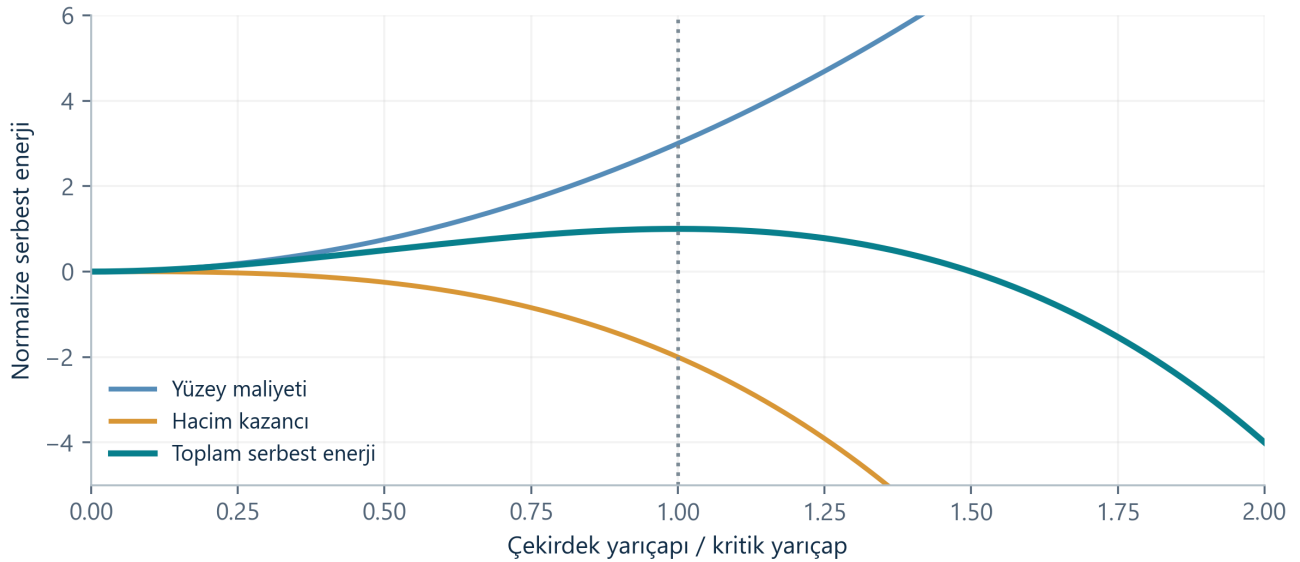
$$\Delta G(r) = 4\pi r^2 \gamma + \frac{4\pi}{3} r^3 \Delta g_v. \quad (I.13.2)$$

Türevi sıfıra eşitleyerek kritik yarıçap $r = -2\gamma/\Delta g_v$ ve bariyer $\Delta G = 16\pi\gamma^3/(3\Delta g_v^2)$ elde edilir. Kritik boyutun altındaki küçük çekirdeklerde yüzey maliyeti baskındır; üstünde büyüme daha avantajlı hale gelir. Çözelti içindeki aşırı doygunluk, ara fazlar ve yüzey üzerinde heterojen çekirdeklenme gerçek filmde bu resmi değiştirir. Bu model bir üretim reçetesi değil, işlem değişkenlerinin neden sonuç yarattığını açıklayan başlangıçtır.



Şekil 23. Islak öncülden çok kristalli filme geçiş. Kaplama, çözücü kaybı, çekirdeklenme ve büyüme birbirine bağlıdır. Yakın görünüm, film sürekliliği ile boşluk ve düzensizlik arasındaki farkı anlatır; gerçek mikroskopi veya tane boyutu ölçümü değildir. Ardındaki hesap paneli, homojen küresel çekirdeğin klasik enerji bariyerini ayrıca gösterir. [T11] [T32] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Kritik çekirdeğin enerji bariyeri



Şekil 23 - hesaplanan tamamlayıcı panel. Küresel ve homojen çekirdeklenme modelinde yüzey terimi yarıçapın karesiyle, hacim kazancı küpüyle değişir. Normalize toplam $3x^2 - 2x^3$ için bariyer $x = 1$ noktasındadır. Gerçek kaplı filmlerde altlık üzerindeki heterojen çekirdeklenme ve işlem kinetiği ayrıca önem taşır. [T11] [T32]

Hızlı çekirdeklenme çok sayıda başlangıç merkezi oluşturabilir; yavaş büyüme ile hızlı çözücü uzaklaşması farklı mikroyapılar üretir. Ama “az çekirdek, büyük tane, yüksek verim” doğrusal bir kural değildir. Kaplanmayan bölgeler, ara faz kalıntıları, yüzey kompozisyonu ve taşıma tabakasıyla bağlanma da önemlidir. Aynı optik soğurma

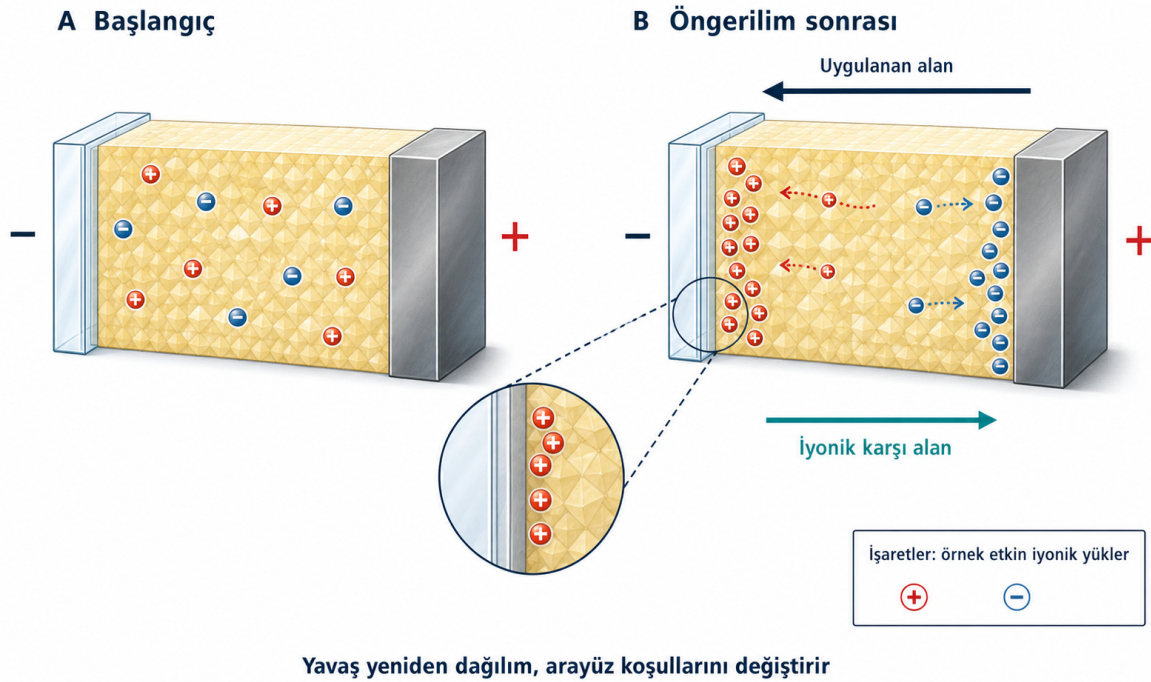
gösteren iki film, farklı arayüz kaybı nedeniyle çok farklı Voc verebilir. Film değerlendirmesi en azından yüzey kaplama bütünlüğü, faz/bileşim, optik yanıt ve elektronik kaliteyi birlikte kapsamalıdır.

İyon göçünü taşınım denklemine eklemek

Tek tür hareketli iyon için parçacık akısı, seyreltik ve izotermal Nernst-Planck yaklaşımında difüzyon ile elektriksel sürüklenmenin toplamıdır. İyonun işaretli yük sayısı z , yoğunluğu c_i , difüzyon katsayısı D_i olsun:

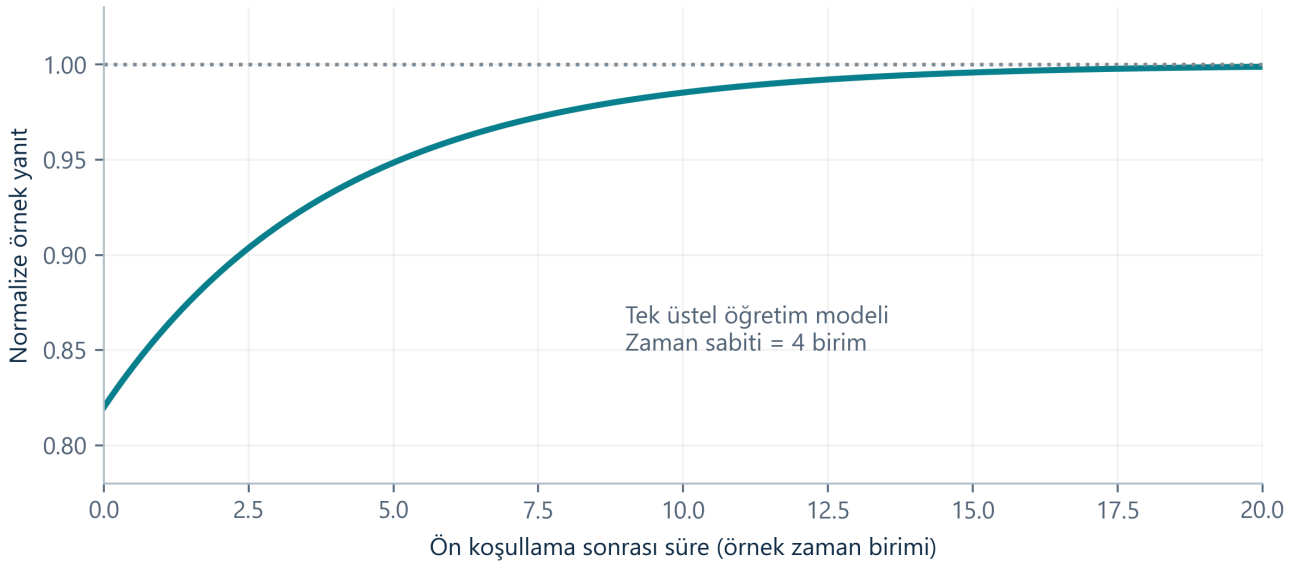
$$F_i = -D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} + \frac{zqD_i}{k_B T} c_i E, \quad \frac{\partial c_i}{\partial t} = -\frac{\partial F_i}{\partial x}. \quad (I.13.3)$$

İyonik yük $zqci$, Poisson denklemindeki toplam yüke katılır. Böylece iyonlar yalnız yavaş bir akım üretmez; elektron ve boşluğun gördüğü potansiyeli de değiştirir. İyon geçirmeyen kontakta normal iyon akısı sıfır seçilebilir; fakat arayüzde reaksiyon varsa bu sınır koşulu yeterli değildir. Gerçek mobil tür, yük durumu ve reaksiyon yolu bağımsız kimyasal kanıtla belirlenmelidir. [T12] [T14]



Şekil 24. Öngerilim altında yavaş iyonik yeniden dağılımın örnek resmi. Sola yönelen uygulanan alan pozitif etkin iyonik yükleri sol, negatifleri sağ arayüze sürükler; birikimin oluşturduğu karşı alan ters yöndedir. Simgeler belirli bir iyon türünü veya parçacık sayısını ölçmez. Gerçek aygıtta hareketli türler, sınır koşulları ve elektronik yanıt ayrıca belirlenmelidir. [T12] [T14] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

İç gevşeme ile ölçümün zaman ölçeği



Şekil 24 - hesaplanan tamamlayıcı panel. Sentetik yanıt $y(t) = 1 - 0,18 \exp(-t/4)$ ile verilmiştir; zaman sabiti dört örnek zaman birimidir. Bir ölçümün süresi iç gevşemeye yakınsa, ön koşullama ve tarama geçmişi sonucu etkileyebilir. Bu eğri belirli bir iyonu veya gerçek numunenin kinetiğini teşhis etmez. [T12] [T14]

Film kalınlığını d alırsak difüzyon zaman ölçeği yaklaşık d^2/D_i 'dir; alan altında sürüklenme süresi farklı olabilir. Bu ölçek, voltaj taramasından çok uzun veya çok kısa olduğunda histerezis küçük görünebilir. Dolayısıyla histerezisin küçük olması tek başına iyonların hareketsiz olduğunu kanıtlamaz. Ön koşullama, bekleme süresi, tarama yönü ve kararlı MPP ölçümü aynı fiziksel hikâyenin parçalarıdır.

Kendini sına

1. Histerezis kaybolduysa iyon göçü sona ermiş midir? **Yanıt:** Hayır; iyonların elektriksel etkisi kontak tasarımıyla bastırılmış olabilir.
2. Bir aygıt karanlıkta 1000 saat, diğeri MPP altında 300 saat kararlıysa hangisi daha dayanıklıdır? **Yanıt:** Verilen bilgilerle sıralanamaz; gerilme koşulları eşleşmiyor.
3. PL kırmızıya kayarken soğurma kenarı neredeyse sabitse tek açıklama homojen bant aralığı düşmesi midir? **Yanıt:** Hayır; küçük hacimli düşük bant aralıklı bölgeler taşıyıcıları toplayıp PL'yi baskınlıştırabilir.

Perovskit tandemi: iki iyi hücreyi birleştirmek neden yetmez?

Perovskit-silisyum tandemde işlem sırası önemlidir

Silisyum alt hücre hazırlandıktan sonra üzerine perovskit üst hücre oluşturmak, bitmiş bir aygıtı yeni kimyasal ve fiziksel işlemlere sokmaktır. Üst hücrenin çözücüsü alttaki katmanı çözebilir; ısıtması önceki pasivasyonu bozabilir; yüzey dokusu ıslak filmin sürekli kaplanmasını zorlaştırabilir. **Entegrasyon**, parçaları üst üste koymanın ötesinde bu işlemleri ve işlevleri birlikte çalıştırmaktır.

Üst hücrenin **geniş bant aralığı**, yüksek enerjili fotonları daha yüksek gerilimle değerlendirmeyi hedefler. Ancak “daha geniş” her zaman “daha iyi” değildir. Üstte çok az foton soğurulursa seri devrenin akımı sınırlanır. Çok fazla soğurulursa alt hücreye yeterli ışık kalmayabilir. Katman kalınlığı ve bileşim, akım paylaşımını beraber belirler. Karışık halojenli bileşimlerde ışık altında bileşim ayrışması da ayrıca incelenir.

Ara bağlantıda hangi yükler buluşur?

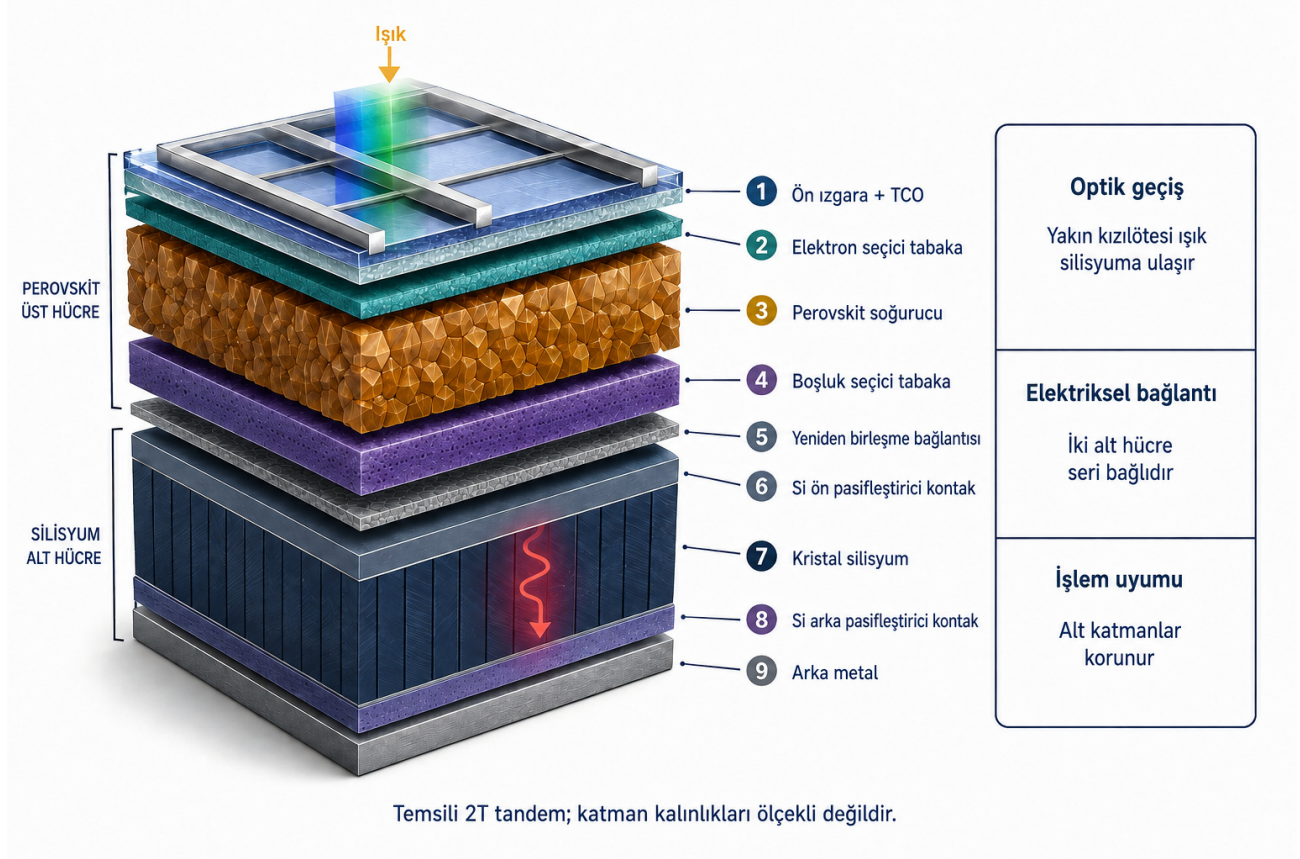
2T tandemde bir alt hücrenin bir tür taşıyıcısı, komşu hücrenin zıt taşıyıcısıyla ara bağlantı bölgesinde elektriksel çevrimi tamamlar. **Yeniden birleşme kontağı** burada gerekli ve tasarlanmış bağlantı işidir. Soğurucunun içinde kontağa ulaşmadan yaşanan istenmeyen yeniden birleşmeyle aynı tasarım rolünde değildir. Bir süreç adı, yerini ve işlevini bilmeden “her zaman kötü” diye sınıflandırılmaz.

Temsili optik bilanço: belirli dalga boyu bandına giren 100 fotonun 45'i üst soğurucuda, 5'i işe yaramayan kontak katmanında soğurulsun, 10'u yansısın, 40'ı alta geçsin. Alt hücre bu 40'ın %75'ini yararlı biçimde toplarsa o banttan 30 elektronluk katkı sağlar. Burada 5 fotonluk **parazitik soğurma**, üst veya alt hücreye yararlı üretim sağlamayan kayıptır. Bu basit sayım gerilimi içermediği için tandem verimi vermez; hangi katmanın fotonları kaybettiğini gösterir.

Şeffaf iletken oksit, elektrik taşıırken ışığın önemli kısmını geçirmesi amaçlanan oksit katmandır; TCO diye kısaltılır. Gerçekte soğurma, yansıma ve tabaka direnci birlikte bulunur. Daha ince TCO ışığı artırırken yanal direnci artırabilir. Arayüzün başarısı bu yüzden yalnız geçirgenlik yüzdesiyle değerlendirilemez.

Anlama kontrolü: kazanç hangi işlemin ardından kayboldu?

Alt hücre iyi, üst hücre de ayrı numunede iyi; tandem kötü ise işlemleri basamaklandır. Alt hücreyi üst katmanların çözücü, sıcaklık ve biriktirme koşullarına soğurucu eklemekten maruz bırakıp tekrar ölç. Bu kontroller işlem hasarını optik paylaşım ve ara bağlantı kaybından ayırmaya yardım eder.



Şekil 25. Monolitik perovskit-silisyum tandem için temsili katman kesiti. Aynı ara bölge optik geçişi, elektriksel bağlantıyı ve işlem uyumunu sağlamalıdır. Çizilen p-i-n üst hücre yalnız bir mimari örneğidir; kalınlıklar ve renkler fiziksel ölçüm değildir. [T16] [T17] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Silisyum alt hücreyi yeniden düşünmek

Perovskit/silisyum tandeminde üst hücre yüksek enerjili fotonları, silisyum ise üstten geçen düşük enerjili fotonları kullanır. Üst hücrenin saydamlığı, kendi verimi kadar önemlidir. Üst elektrot, taşıyıcı katmanı veya metal ağ yakın kızılötesi fotonları soğursa silisyumun akımı düşer. Bu kayıp, üst hücrenin tek başına aydınlatılan ölçümünde görünmeyebilir.

Alt hücre de standart tek eklem silisyum hücreyle aynı optimuma sahip değildir. Tandemde spektrumu filtrelenir, akımı genellikle azalır, ön yüzey başka bir yığına bağlanır ve üretim sırasında ek işlemlere maruz kalır. Tek eklemde ideal olan bir tekstür, ince üst filmi kesintisiz kaplamak için zorlayıcı olabilir. Düz yüzey üst filmi

kolaylaştırırken optik kayıp yaratabilir; tekstür ışık girişini geliştirirken tepe noktalarında incelme veya kısa devre riski doğurabilir.

Sahli ve arkadaşlarının 2018 çalışması, tamamen tekstürlü monolitik perovskit/silisyum aygıtta üst katmanın mevcut silisyum yüzey geometrisiyle birleştirilebildiğini gösterdi. Buradaki öğretici sonuç, tandem ilerlemesinin yalnızca bant aralığı seçimiyle değil, gerçek yüzey topografisi ve yeniden birleşme bağlantısıyla gerçekleşmesidir. [T16]

İki ve dört terminalin dürüst karşılaştırması

İki terminalli, kısaca 2T tandem tek seri devredir. Üst ve alt hücre aynı akımı taşır; iki gerilim toplanır. Dört terminalli, kısaca 4T düzen iki bağımsız hücre devresidir. Üst hücre yarı saydamdır; alttaki hücreye ulaşan spektrum altında her hücrenin maksimum gücü ayrı bulunur. Alan ve ışık girişi doğru tanımlandığında güçler toplanabilir:

$$\eta_{4T} = \frac{P_{\text{mpp,üst}} + P_{\text{mpp,alt,filtreli}}}{P_{\text{in}}} \quad (1.14.1)$$

Paydada tek ortak ışık girişi vardır. Alt hücrenin filtresiz tek başına gücünü kullanmak fotonları iki kez sayar. Ayrıca iki hücre farklı alanlardaysa yalnızca verimleri toplayamazsın; watt, ortak açıklık alanı ve optik örtüşme üzerinden hesap yapmak gerekir. İki bağımsız MPP devresi, ek bağlantı ve güç elektroniği bedeli ayrıca açıklanmalıdır.

Soru	2T	4T
Ortak akım zorunlu mu?	Evet	Hayır
Üst/alt güçler bağımsız en büyüklenebilir mi?	Hayır	Evet, filtreli alt spektrumla
Ara optik katmanlar önemli mi?	Evet	Evet; ek saydam elektrotlar olabilir
Üretim eşleşmesi	Ortak yığında daha güçlü kısıtlar	Ayrı üretim ve optik istifleme mümkün
Yıllık kazanç değerlendirmesi	Spektral akım eşleşmesi kritik	Spektral değişime daha esnek; sistem kayıpları sürer

Bailie ve arkadaşlarının 2015 çalışması, yarı saydam üst perovskit hücreyi silisyum ve CIGS alt hücrelerle mekanik olarak istifleyerek tandem kazancını araştırdı. Bu çalışma 4T kavramının pratik öğretici örneğidir. Temel soru “üst hücre ne kadar iyi?” değil, “üst hücre eklendiğinde ortak ışık girişinden ne kadar fazla güç çıkıyor?” sorusudur. [T18]

Sayısal bir foton bütçesi

Çözümlü örnek. Ortak açıklığa 100 mW/cm^2 geldiğini varsayalım. Üst hücre kendi MPP'sinde $20 \text{ mA/cm}^2 \times 1,05 \text{ V} = 21,0 \text{ mW/cm}^2$ üretir. Filtreli alt hücre $18 \text{ mA/cm}^2 \times 0,65 \text{ V} = 11,7 \text{ mW/cm}^2$ üretirse idealize 4T toplamı $32,7 \text{ mW/cm}^2$, verim %32,7 olur. Bu değer ölçülmüş bir rekor değil, birim ve topoloji alıştırmasıdır.

Aynı aygıtlar seri bağlanırsa 20 ve 18 mA/cm^2 değerleri aynı anda kullanılamaz. Örneğin ortak 18 mA/cm^2 noktasında üst gerilimin $1,08 \text{ V}$ ve alt gerilimin $0,65 \text{ V}$ olduğu varsayılırsa güç $18 \times 1,73 = 31,14 \text{ mW/cm}^2$ olur. Bu noktanın gerçek maksimum olduğu henüz gösterilmemiştir; bütün toplam eğri taranmalıdır. Örnek, bağımsız maksimum güçleri seri devrede toplamının neden yanlış olduğunu gösterir.

Tandem tasarımında küçük bir üst hücre gerilim kazanımı değerlidir; ama akım bedeli gizlenmemelidir. Diyelim ki yeni pasivasyon 30 mV kazandırırken ortak akımı 19 'dan 18 mA/cm^2 'ye düşürdü. Yaklaşık $1,8 \text{ V}$ tandem geriliminde akım kaybının güç etkisi, 30 mV kazancından daha büyük olabilir. İyileştirme kararını tek başına V_{oc} üzerinden vermemek gerekir.

Arayüzler ve düşük bant aralıklı perovskitler

Al-Ashouri ve arkadaşlarının 2020 özgün çalışması, delik seçici moleküler tek tabakayla hızlı delik çıkarımı ve düşük ışınsız yeniden birleşmenin birlikte sağlanmasını gösterdi. Geniş bant aralıklı perovskit/silisyum tandeminde bu arayüz düzenlemesi tarihsel bir performans artışı getirdi. Sonuç, perovskit hacmi aynı ailede kalırken seçici kontağın sınır koyabileceğini öğretir. [T17]

Tam perovskit tandeminde alt hücre çoğunlukla daha dar aralıklı kurşun-kalay karışımıdır. Kalay(II)'nin oksidasyona yatkınlığı, kusur ve katkılama kontrolünü zorlaştırır. Üst ve alt tabakaların kristallenme hızları da farklı olabilir. Kalın bir alt film daha çok yakın kızılötesi ışık soğururken kısa taşıyıcı ömrünün yarattığı toplama kaybını büyütür. Bu yüzden “iyi bant aralığı çifti” yalnızca ilk tasarım koşuludur.

Zhou ve arkadaşlarının 2024 çalışması, karışık kalay-kurşun filmlerde kristallenme ve oksidasyonun birlikte yönetilmesini araştırdı. Güncel çizginin devamı olarak 2026 tarihli hedefli yüzey dönüşümü çalışması, birleşik ılık-ısı gerilmesinde reaktif kalay-kurşun yüzeyinin korunmasına odaklandı. İki kaynak da sorunun yalnızca başlangıç kusur yoğunluğu olmadığını, çalışma sırasında kimyanın sürmesini denetlemek gerektiğini gösterir. Bu kısa aktarım, iki makalenin tam deneysel yöntemlerini yeniden üretme iddiası taşımaz. [T19] [T31]

Ara katmanı tek bir kayıp sayısına indirmemek

Tandemin orta bölgesi aynı anda üç arayüzdür: optik bir geçiş, elektriksel bir yeniden birleşme bağlantısı ve iki üretim sürecinin buluştuğu kimyasal yüzey. Üst hücrenin altında kalan tabaka yakın kızılötesi fotonları soğursa alt hücrenin akımı düşer. Aynı tabaka yüksek dirençle sahipse seri bağlı yapının FF'si düşer. Yüzey işlemi silisyum pasivasyonunu bozarsa alt hücrenin Voc'si de değişebilir. Bu etkiler tek bir “ara katman başarılı” hükmüyle ölçülmez.

İyi bir deney dizisi, ara katman eklenmeden önce ve sonra silisyum alt hücrenin elektronik kalitesini kontrol eder. Ardından optik yığının geçirgenliğini ve her alt hücrenin spektral yanıtını ölçer. Son aygıtta kararlı güç, alt hücre akım eşleşmesi ve sıcaklık bağımlılığı değerlendirilir. İşlem sıcaklığı ya da plazma koşulları değiştiriliyorsa, aynı toplam ısı geçmişi sahip kontrol örneği gerekir; aksi halde kimyasal tabaka etkisi ile işlem hasarı birbirine karışabilir.

Işınımlı bağlaşım ve ölçüm sınırları

Üst hücrenin yeniden birleşmeyle yaydığı bir foton, alt hücrede soğurularak akıma katkıda bulunabilir. Buna ışınımlı bağlaşım denir. Çok iyi ışınımlı hücrelerde, alt hücreyi üstten geçen güneş fotonlarıyla beslenen bağımsız bir filtrelenmiş aygıt gibi ele almak bu katkıyı kaçırabilir. Buna karşılık zayıf dış ışımali bir yapı için çok büyük bağlaşım kazancı varsaymak da yanlış olur. Optik kaçış, emisyon spektrumu ve alt hücre soğurması birlikte modellenir.

Alt hücre EQE ölçümlerinde diğer hücrenin uygun önyargı ışığı ve elektriksel koşullarla akımı sınırlamaması sağlanmalıdır. Hangi alt hücrenin hangi dalga boyu aralığında seçildiği, kullanılan ışık koşulları ve akım düzeltmeleri raporlanır. Toplam aygıtın tek J-V eğrisi, bu katman bazlı tanının yerini tutmaz. [T28]

Kendini sına

1. %23 tek eklem üst hücre ve %25 tek eklem silisyum hücre için 4T toplamı %48 midir? **Yanıt:** Hayır; silisyum üst hücreden filtrelenmiş spektrumla yeniden ölçülmelidir.
2. 2T akım eşleşmesini yalnızca standart spektrumda göstermek yıllık enerji üstünlüğünü kanıtlar mı? **Yanıt:** Hayır; sıcaklık ve spektrum zamanla değişir, ayrıca sistem kayıpları vardır.
3. Tam perovskit tandem daha az silisyum kullandığı için kesin daha sürdürülebilir midir? **Yanıt:** Hayır; ömür, üretim verimi, kontaklar, çözücüler, kapsülleme ve geri kazanım dahil yaşam döngüsü gerekir.

Organik, boyalı, kuantum noktalı ve gelişen soğurucular

Işığı soğurmak ile serbest yük oluşturmak ayrılabilir

Silisyumla öğrendiğimiz anlatımı her malzemeye aynen taşımamalıyız. Bazı malzemelerde ışık önce elektron ve deliğin birbirine bağlı kaldığı bir uyarım oluşturur. Bu bağlı çiftte **eksiton** denir. **Bağlanma enerjisi**, çifti birbirinden ayırmak için gereken ek enerjidir. Dielektrik ekranlama, yüklerin birbirini ne kadar güçlü hissettiğini etkiler. Eksitonun kantağa gitmesi ile serbest elektronun gitmesi aynı taşıma olayı değildir.

Organik yarıiletkenler, elektronik özellikleri düzenlenmiş karbon temelli molekül veya polimerlerden yapılabilir. **Verici** ve **alıcı** bileşenlerin arayüzünde yük ayrılması kolaylaştırılabilir. Işıkla oluşan eksiton, kaybolmadan bu arayüze ulaşmalıdır; oluşan ayrı taşıyıcılar da kendi kesintisiz yollarından kontaklara gitmelidir. Karışımın mikroskobik düzenine **morfoloji** denir. Sadece iki malzemeyi aynı kaba karıştırmak bu taşıma ağlarını garanti etmez.

Sentetik uzunluk örneği: eksitonun tipik yayılma uzunluğu 10 nm iken verici bölgenin bir noktasından en yakın arayüze uzaklık 100 nm ise birçok uyarım arayüze ulaşmadan kaybolabilir. Çok ince karışım bunu azaltabilir, fakat ayrı yüklerin taşınma yollarını bozabilir. Tasarım iki mesafeyi aynı anda çözmelidir; “en küçük bölge en iyi” kuralı yoktur.

Boya ve kuantum noktası farklı görev dağılımları kurar

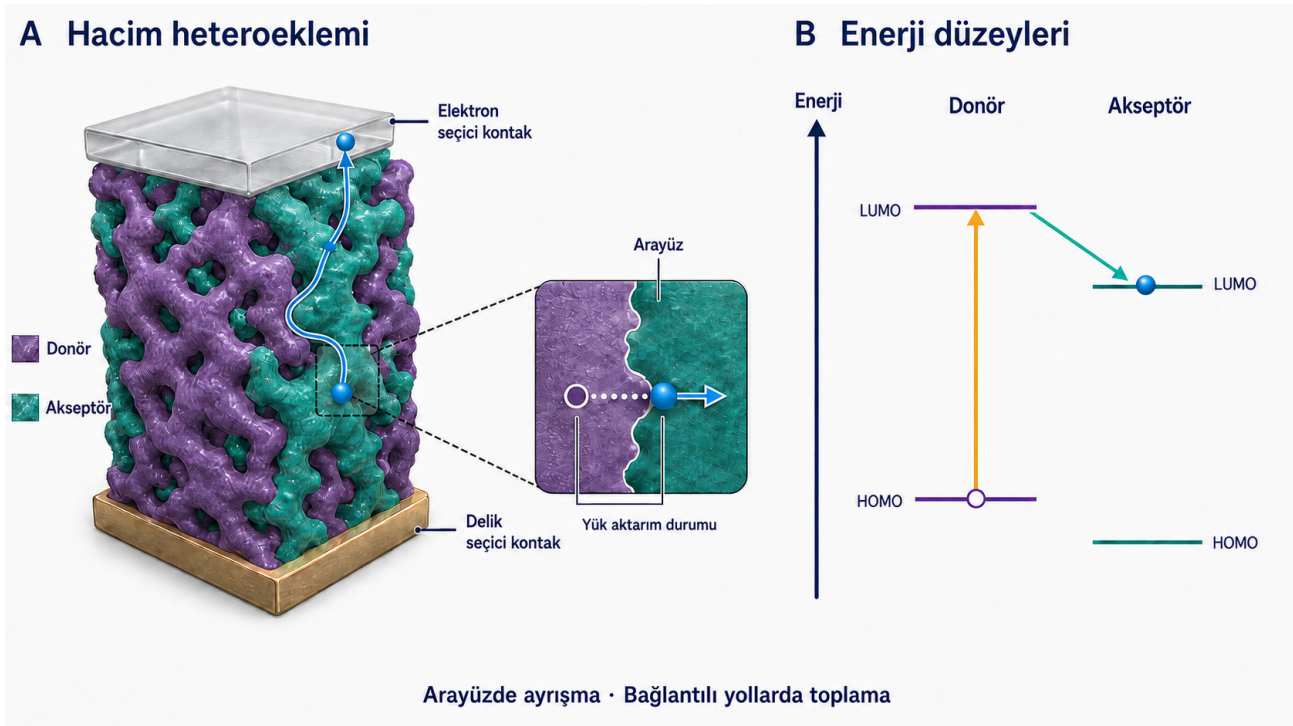
Boya duyarlı hücrede moleküler boya ışığı soğurur. Uyarılan elektron uygun enerji koşullarında gözenekli yarıiletkenle aktarılır; gerideki boyanın elektriksel durumu başka bir taşıma ortamıyla yenilenir. **Redoks çifti**, elektron alıp verebilen iki kimyasal durumun çevrimidir. Boya, elektron taşıyan iskelet ve yük yenileyen ortam farklı görevleri üstlenir. Her arayüzün enerji ve hız uyumu gerekir. [T20]

Kuantum noktası, boyutu elektronik dalga davranışını sınırlandıracak kadar küçük yarıiletken parçacığdır. Bu **kuantum sınırlanması**, aynı malzemenin farklı boyutlarında optik geçiş enerjilerini değiştirebilir. Yüzeydeki **ligand**, parçacığa bağlanıp çözeltide kararlı kalmasına yardım eden moleküldür. Ancak uzun organik ligandlar komşu noktalar arasında elektriksel geçişi zorlaştırabilir. Sentezde iyi dağılan parçacık, filmde iyi akım taşıyan parçacıkla aynı koşulları gerektirmeyebilir.

Kesterit veya antimon selenür gibi başka soğurucular da ayrı kristal ve kusur sorunları getirir. Malzemenin bol bulunması değerli bir ölçüttür; fakat istenen bant aralığı, düşük kusur kaybı ve uygun kontakla birlikte sağlanmalıdır. Bu aileleri aşağıda ortak güneş hücresi işlevleri üzerinden karşılaştıracaktır.

Anlama kontrolü: aynı kelime farklı adımı saklayabilir

“Yük üretimi arttı” denildiğinde ışık soğurması mı, eksiton oluşması mı, eksitonun ayrılması mı, dış devrede toplanma mı kastediliyor? Organik ve boyalı sistemlerde bu basamaklar özellikle ayrılmalıdır. Yalnız daha güçlü soğurma ölçmek, arayüzde daha fazla serbest yük toplandığını kanıtlamaz.



Şekil 26. Organik hacim heteroekleminde arayüz ve bağlantılı taşıma yolları. Donör ve akseptör fazları, ayrılan yüklerin kendi seçici kontaklarına ulaşabileceği yollar oluşturmaktadır. Yakın görünümdeki karşı fazlarda bulunan elektron-delik çifti bir yük aktarım durumudur. Sağdaki HOMO/LUMO sıralaması ve geçiş okları nitel bir enerji resmidir; gerçek enerji farkları ve morfoloji malzemeye bağlıdır. [T20] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Organik fotovoltaik: uyarımı oluşturmak ile yükü ayırmak

Organik yarıiletkenlerde ışık çoğu zaman bağlı elektron-delik uyarımı, yani eksiton oluşturur. Dielektrik ekranlamanın ve moleküller arası bağlaşımın karakteri, bu uyarımın kendiliğinden serbest yüke dönüşmesini etkiler. Donör ve akseptör bileşenler arasındaki arayüz, yük ayrışmasına yardım eder. Organik aygıtı yalnızca klasik bir inorganik p-n eklemin ince hali gibi düşünmek birçok önemli kaybı görünmez kılar.

Hacim heteroekleminde donör ve akseptör nanometre ölçeğinde karıştırılır. Amaç eksitonların ayrışma arayüzüne ulaşmasını, ardından elektron ve deliklerin kendi sürekli ağlarından elektroda taşınmasını sağlamaktır. Fazlar çok iri ayrışırsa eksitonlar

arayüze ulaşmadan kaybolabilir; aşırı karışırsa yük taşınım yolları ve düzenli molekül paketlenmesi bozulabilir. Ortalama bileşim kadar morfoloji, yönelim ve kararlılık önemlidir.

Fulleren dışı akseptörler soğurmayı ve enerji düzeylerini moleküler tasarımla geliştirmeye olanak verdi. Yuan ve arkadaşlarının 2019 Y6 makalesi bu çizginin önemli özgün örneğidir. Kaynaktaki sonuç, molekülün kendi soğurmasının, tamamlayıcı donörle karışımın ve film morfolojisinin birlikte aygıt performansını belirlediğini gösterir. Aynı molekülü farklı çözücü veya kontakla kullanınca aynı sonuç beklenemez. [T21]

Organik hücrenin çekiciliği esneklik, düşük kütle, renk ve yarı saydamlık gibi tasarım olanaklarıdır. Buna karşılık oksijen, ısı, sıcaklık, moleküler difüzyon ve elektrot tepkimeleri uzun süreli performansı sınırlayabilir. İç mekânda yüksek verim, dar spektrum ve düşük ışık düzeyiyle ilişkili ayrı bir kategoridir; lux ışık gücü birimi değildir ve lux değerinden spektrum bilinmeden W/m^2 'ye tek katsayıyla dönülmez.

Boya duyarlı hücre: ışık soğurma ile taşımayı ayırmak

Boya duyarlı güneş hücresinde moleküler boya ışığı soğurur; uyarılmış elektron uygun yarıiletken ağına aktarılır. Boya daha sonra redoks ortamı veya katı delik taşıyıcısıyla yenilenir. Mezogözenekli TiO_2 yüksek iç yüzey alanı sağlayarak çok sayıda boya molekülünü taşır. O'Regan ve Grätzel'in 1991 çalışması bu mimarinin tarihsel dönüm noktasıdır. O makalenin maliyet ve enerji piyasası bağlamı 1991'e aittir; bugün için aynı ekonomik cümleler tekrar edilmemelidir. [T20]

Bir boyanın görünür ışığı güçlü soğurması tek başına yeterli değildir. Elektron enjeksiyonu, boya yenilenmesi ve toplama hızlı; geri elektron aktarımı yavaş olmalıdır. Klasik enerji şeması, uyarılmış boyadan yarıiletkenin iletim bandına elektron aktarımını mümkün kılmalıdır. Fakat gereğinden fazla itici enerji, alınabilecek gerilimden vazgeçmek anlamına gelebilir. Kimyasal hız ile enerji kaybı arasındaki denge merkezi sorudur.

Öğretici bir çarpan ayrıştırması $EQE \approx \eta_{soğurma} \eta_{enjeksiyon} \eta_{toplama}$ şeklindedir. Her terim tanımlı bir olasılıktır; süreçler güçlü biçimde bağlanmışsa bu basit ayırım yeterli olmayabilir. **Çözümlü örnek:** %90 soğurma, %95 enjeksiyon ve %85 toplama için EQE yaklaşık $0,90 \times 0,95 \times 0,85 = 0,727$, yani %72,7 olur. Yalnızca boyayı koyulaştırarak toplamı %95'e çıkarmak bu diğer kayıplar giderilmeden mümkün değildir.

Kuantum noktaları: boyut bir tasarım değişkenidir

Kuantum noktalarında küçük kristalin boyutu elektronik enerji düzeylerini değiştirebilir. Aynı kimyanın farklı boyutları farklı spektral soğurma sağlayabilir. Ancak yüzey/hacim oranı büyüktür; ligandlar ve yüzey kusurları belirleyicidir. Kristali çözeltide kararlı tutan uzun ligand, katı filmde komşu noktalar arasında elektronik taşımayı zorlaştırabilir. Ligand değişimi, yüzey pasivasyonu ve iletkenlik aynı anda yönetilmelidir.

Yüksek enerjili bir fotondan birden fazla elektron-delik çifti üretimi araştırılan yollardandır. Semonin ve arkadaşlarının 2011 PbSe kuantum nokta aygıtında belirli spektral bölgede %100'ü aşan dış kuantum verimi ölçülmesi bu fizik için önemli deneysel kanıttır. Bu sonuç %100'ü aşan enerji dönüşüm verimi değildir: EQE foton başına toplanan taşıyıcı sayısını, güç verimi ise çıkış enerjisinin giriş enerjisine oranını ölçer. [T22]

Bu ayırım yeni malzeme haberlerini okurken sıkça gerekir. Bir fotonun enerjisi iki bant aralığından çok büyük olabilir; iki çift üretilmesi enerji korunumu ihlali değildir. Öte yandan çoğalma, güneş spektrumunun yeterli kısmında gerçekleşmeli ve üretilen ek yükler hızla çıkarılmalıdır. Dar bir dalga boyunda etkileyici kuantum verimi, geniş spektrumda yüksek modül veriminin yerine geçmez.

Kesterit ve antimon kalkojenürleri: bolluk ile elektronik kalite

$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ gibi kesteritler, indiyum/galyum gereksinimini azaltan kimyalarıyla araştırılır. Fakat çok bileşenli yapı, atomların yanlış kafes yerlerine geçmesi ve ikincil fazlar için çok sayıda yol açar. Han ve arkadaşlarının 2013 hibrit işlevsel çalışması CZTS içindeki belirli derin tuzak adaylarını ve katkılama kaynaklarını hesaplamalı olarak tartıştı. Bu bir kusur mekanizması öngörüsüdür; tek başına her gerçek filmin kusur dağılımının ölçümü değildir. [T23]

Sb_2Se_3 gibi şerit yapıları kristallerde yön bağımlı taşınım ve kristal yönelimi önemlidir. Zhou ve arkadaşlarının 2015 çalışması, yönlenmiş büyüme ile aygıt davranışı arasındaki bağı ve belirli tane sınırlarının daha az zararlı olabileceğini gösterdi. Makaledeki olumlu malzeme nitelermelerini her kullanım ve maruziyet koşulu için güvenlik hükmüne dönüştürmemek gerekir. Element bolluğu, toksisite, proses tehlikesi ve cihazdan salım ayrı sorulardır. [T24]

Gelişen soğurucuyu seçerken üç soruyu sırayla sormak verimlidir: Gerçek ve tanımlı fazı üretiliyor mu? Yeterli ışık soğururken taşıyıcıları yeterince uzun yaşıyor mu? Bu özellikler kontak, geniş alan ve çalışma gerilmesi altında korunuyor mu? Yalnızca hesaplanmış uygun bant aralığı bu zincirin küçük bir kısmını yanıtlar. İlerleme, başarısızlığın hangi halkada bulunduğunu görünür kılmaktır.

Eksiton difüzyonu ile yük taşınması arasındaki geometri

Organik bir soğurucuda ışıkla oluşan uyarım, serbest elektron ve boşluktan önce bağlı bir eksiton olabilir. Eksitonun yaşam süresi içinde uygun donör-akseptör arayüzüne ulaşması gerekir. Bunun için karakteristik uzaklık $L_{ex} = \sqrt{D_{ex} \tau_{ex}}$ ile düşünülür. Alanlar çok büyükse bazı uyarımlar arayüze varamadan söner. Alanlar çok küçük ve düzensizse serbest yüklerin elektrotlara uzanan bağlantılı taşıma yolları bozulabilir.

Dolayısıyla optimum morfoloji “maksimum arayüz alanı” değildir. Eksiton ayrışması için yeterli yakınlık, elektron ve boşluk için sürekliliği olan farklı yollar ve düşük yeniden birleşme birlikte gerekir. Enerji düzeyi farkını büyütürken yük aktarımını kolaylaştırmak da ücretsiz değildir; kullanılabilir gerilim azalabilir. Güncel organik aygıtların değerlendirmesinde enerji kaybı, morfoloji, ışınsız geçişler ve kararlılık bu nedenle birlikte tartışılır. [T20]

Boya duyarlı hücrede temel ayrım başka türlü yapılır: boyanın ışığı soğurması, elektronu oksit taşıma ağına enjekte etmesi ve boyanın yeniden indirgenmesi birbirini izler. Yenilenme ile istenmeyen geri aktarım yarışır. Kuantum noktalı filmde ise nanokristal boyutuyla ayarlanan enerji düzeyleri, komşu noktalar arası elektronik bağlaşım ve yüzey ligantlarıyla birlikte değerlendirilir. Bir çözeltide yüksek ışınlım verimi gösteren nokta, katı aygıtta otomatik olarak iyi taşıma sağlamaz. [T21] [T22]

Kendini sına

1. Organik filmde donör/akseptör arayüz alanını sürekli artırmak neden sınırsız kazanç sağlamaz? **Yanıt:** Taşıma ağırları, moleküler düzen ve yeniden birleşme de değişir; arayüze ulaşma ile elektroda ulaşma birlikte çözülür.
2. EQE %110 ise hücrenin enerji verimi %110 mudur? **Yanıt:** Hayır. İlki foton sayısına göre yük üretimi, ikincisi enerji oranıdır.
3. Bir soğurucu bol elementlerden oluşuyorsa neden düşük maliyetli olmayabilir? **Yanıt:** Saflaştırma, zor faz denetimi, düşük üretim verimi, pahalı kontak, kısa ömür veya karmaşık proses maliyeti baskın olabilir.

Optik, kontak ve arayüz mühendisliği: bütün teknolojilerin ortak dili

Bir foton için üç temel yol

Işık bir katmana geldiğinde **yansiyabilir**, **içinden geçebilir** veya **soğurulabilir**. Sabit bir dalga boyunda enerji korunumu, bu payların toplamının bire eşit olmasını gerektirir. Katman yığınının her katmanın soğurması ayrı toplanır. Soğurucuda üretilen yük yararlı olabilir; metal veya kontakta ısıya dönüşen soğurma çoğunlukla parazitiktir. Bu nedenle hücrenin koyu görünmesi yüksek verim için yeterli kanıt değildir.

Kırılma indisi, ışığın malzemedeki faz hızını ve sınırdaki davranışını belirleyen optik büyüklüktür. İnce tabakalarda farklı yüzeylerden yansıyan dalgalar birbirini güçlendirebilir veya zayıflatır. Bu olaya **girişim** denir. Yansıma azaltıcı kaplama, uygun dalga boyu ve geliş açısında yansımaların birbirini azaltmasını hedefleyebilir. Bütün güneş spektrumu, tüm açılar ve gerçek soğurma bir araya geldiğinde tek bir ideal kalınlık her koşulu çözmez.

Pasivasyon ile taşıma nasıl birlikte kurulur?

Kimyasal pasivasyon, etkin bağ kusurlarını azaltır. **Alan etkili pasivasyon**, bir taşıyıcı türünün kusurlu yüzeye erişimini azaltan elektriksel ortam kurar. İki yol beraber bulunabilir. **Kontak özdirenci**, malzeme içindeki hacimsel dirençten farklı olarak arayüzü geçmenin elektriksel bedelini anlatır. Küçük alanlı temas çok iyi pasive edilmiş yüzey bırakabilir; fakat kalan açıklıklarda akım yığılması ve direnç kaybı artabilir.

Sentetik örnek: bir kaplama değişikliği kısa devre akımını %2 artırırken maksimum güçteki gerilim-akım çarpanlarının diğer etkileri toplamda %3 azaltıyorsa güç yaklaşık $1,02 \times 0,97 = 0,9894$ katına iner. Sonuç yaklaşık %1,06 kayıptır. “Optik kazanç elde ettik” doğru olabilir; “hücreyi iyileştirdik” aynı sonuç değildir. Kazancın hangi ölçütte olduğunu her seferinde belirtmeliyiz.

Bu bölümdeki modellerin girişleri, gerçek ve sanal kısmıyla optik indis, kalınlık, yüzey dokusu ve kontak özellikleridir. Optik indisin **sanal kısmı**, ışığın sönümünü temsil eden matematiksel bileşendir; ölçümün hayal ürünü olduğunu söylemez. Hesaplanan elektrik alan profili soğurmanın nerede olduğunu, soğurma da taşıyıcı üretiminin konumunu verir. Bundan sonraki elektriksel model, bu taşıyıcıların ne kadarının toplanabildiğini hesaplar.

Anlama kontrolü: toplam soğurma yükseldi

Toplam soğurma %90'dan %94'e çıktıysa yeni dört puanın hangi katmanda olduğunu sor. Metal veya taşıma katmanında soğurulduysa akım artmayabilir. Spektral EQE, yansıma ve katman bazında optik hesap birlikte incelendiğinde yararlı soğurma ile parazitik ısıyı ayırmak mümkün olur.

Fotonun nereye gittiğini bilanço haline getir

Bir hücreye gelen her dalga boyundaki optik güç, yansıma, geçiş ve katmanlarda soğurma arasında paylaşılır. Yaklaşık enerji bilançosu $R + T + \sum_j A_j = 1$ biçimindedir. R yansıma, T geçiş, A_j j'inci katmanda soğurulan kesirdir. Kullanışlı olan, soğurucu içinde elektrik üretimine dönüşebilen paydır; metal veya TCO içindeki soğurma çoğunlukla parazitik kayıptır.

Bir ön kaplamanın yansımayı azaltması hücre akımını aynı oranda artırmak zorunda değildir. Yeni kaplama kısa dalga boyunda soğurabilir veya daha fazla fotonu toplama verimi düşük bölgelere yönlendirebilir. İlk deneysel kapanış şu üç ölçümün tutarlı olmasıdır: spektral yansıma/geçiş, EQE ve ışık altındaki kısa devre akımı. EQE'nin güneş foton akısıyla integralinden hesaplanan akım ile elektriksel ölçümün farkı, kalibrasyon ve alan sorunları dahil araştırılmalıdır.

Bir katmanın karmaşık kırılma indisi $\tilde{n} = n + i\kappa$ ile yazılır. κ faz ilerlemesini, soğurmayı belirler; $\alpha = 4\pi\kappa/\lambda$ bağıntısında dalga boyu ve uzunluk birimleri tutarlı olmalıdır. İnce ve düzgün yığınlarda transfer matrisi; karmaşık tekstürlerde elektromanyetik veya ışın izleme yaklaşımları uygundur. Optik sabitlerin yalnızca katalogdan alınması, gerçek filmin yoğunluk, bileşim ve pürüzlülük farklarını saklayabilir.

Işık hapsedme ile yüzey alanının bedeli

Yablonovitch ve Cody'nin 1982 analizi, uygun ışın optiği ve rastgeleleştirme varsayımları altında ince soğurucudaki optik yolun artırılmasını açıklayan temel çerçevelerdendir. Yaygın $4n^2$ ifadesi belirli ideal ışık hapsedme koşullarının sonucudur. Her nanodesen için koşulsuz bir kazanç katsayısı, her kalınlık için evrensel bir sınır veya doğrudan verim çarpanı değildir. [T25]

Tekstür ışığın içeride daha uzun yol almasını sağlayabilir; aynı zamanda gerçek yüzey alanını artırıp pasivasyonu zorlaştırabilir. Nanoyapı kısa dalga boyu yansımayı çok iyi azaltırken yüzey yeniden birleşmesini artırırse elektriksel kazanç sıfırlanabilir. Optik optimizasyona yalnızca soğurulan foton sayısı hedefi vermek bu nedenle yanıltıcıdır. Hedef, taşınım ve yeniden birleşme modeline bağlanan maksimum güç olmalıdır.

Çözümlü örnek. Bir yüzey değişimi J_{sc} değerini 40'tan 41 mA/cm²'ye çıkarırken V_{oc} değerini 0,72'den 0,70 V'a düşürsün; FF=0,82 ve giriş 100 mW/cm² sabit olsun. İlk güç $40 \times 0,72 \times 0,82 = 23,616$ mW/cm²; ikinci güç $41 \times 0,70 \times 0,82 = 23,534$ mW/cm²'dir. Daha iyi optik, bu örnekte daha iyi hücre değildir. Verim yaklaşık 0,082 yüzde puan düşer.

Kontak seçiciliği: iki taşıyıcıya farklı kapı açmak

İyi elektron kontağı, elektronların az dirençle çıkmasını ve deliklerin orada yeniden birleşmemesini sağlar. İyi delik kontağı tersini yapar. Bir metalin iş fonksiyonunun uygun görünmesi başlangıç ipucudur; gerçek arayüzde kimyasal bağlar, dipoller, kusurlar ve Fermi düzeyi sabitlenmesi basit vakum hizalanmasını değiştirebilir. Ayrıca çalışma altında iyon göçü veya difüzyonla arayüz zamanla başka bir arayüze dönüşebilir.

Bant ofseti tek başına iyi veya kötü değildir. Azınlık taşıyıcı için bariyer yararlı, çoğunluk taşıyıcı için aşırı bariyer zararlı olabilir. İnce bir tünelleme katmanı ile kalın bir termal bariyer de aynı akımı taşımaz. Elektriksel temasın değerlendirilmesi, kontak özgül direnci ile yeniden birleşme etkinliğini birlikte gerektirir. Yalnızca düşük direnç ölçmek, kontakın seçici olduğunu kanıtlamaz.

Gerilim kaybını ısıldamayla ilişkilendirmek, malzeme ile aygıt arasında güçlü bir köprü kurar. Rau'nun 2007 karşılıklılık çalışması, uygun varsayımlar altında fotovoltaiik kuantum verimi ve elektrolüminesans arasındaki bağlantıyı kurdu. Sabit ışımsal referansta ışımsız kayıp yaklaşık $\Delta V_{nr} = -(kT/q) \ln \eta_{ext}$ ile ifade edilir; η_{ext} ilgili dış ısıldama verimidir. Kullanılan optik referans ve çalışma koşulu belirtilmelidir. [T26]

298,15 K'de dış ısıldama veriminin 10⁻⁴'ten 10⁻³'e çıkması, diğer koşullar sabitse yaklaşık 59 mV daha az ışımsız gerilim kaybına karşılık gelir. Bu kendi başına hücre açık devre geriliminin kesin 59 mV artacağını söylemez; kontak kayıpları, enjeksiyon düzeyi ve optik referans da değişmiş olabilir. Filmden ölçülen yarı-Fermi düzeyi ayrışması ile bitmiş aygıtın qV_{oc} değerini ayırmak gerekir. Aradaki fark, taşıyıcı çıkarma ve kontak sorunları için araştırma ipucu verebilir.

Tanıda tek grafiğe teslim olmamak

S biçimli akım-gerilim eğrisi bir çıkarma bariyerini düşündürebilir; yüksek seri direnç, fotoaktif olmayan alanlar veya karmaşık arayüz davranışıyla birlikte değerlendirilmelidir. Düşük şönt direnç kısa devre benzeri bir yol düşündürür; nerede oluştuğunu uzaysal görüntüleme gösterebilir. PL artışı bazen kusur azalmasını, bazen taşıyıcı çıkarımının engellenmesini yansıtır. Aynı numuneyi açık devreye yakın ve yük altında incelemek bu ayrımı destekler.

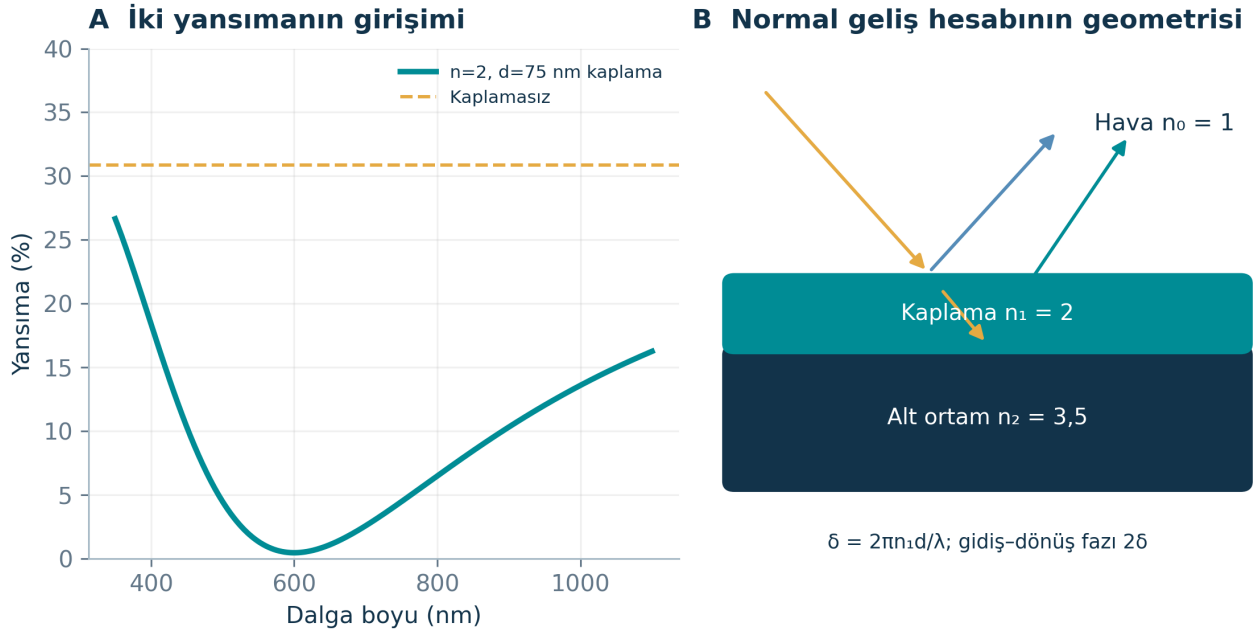
En güçlü teşhis, bir değişkenin farklı gözlemlerde tutarlı iz bırakmasıdır. Örneğin pasivasyon savı, uygun enjeksiyonda ömür artışı, ısıldama kazancı ve gerilim artışıyla desteklenebilir. Buna karşılık yalnızca tek bir yüzey kimyası ölçümü aygıt mekanizmasını tamamlamaz. İstatistiksel tekrar ve bağımsız kalibrasyon, özellikle birkaç on milivolt veya birkaç onda yüzde puan büyüklüğündeki iddialarda önemlidir.

Yansımaya azaltıcı tabakanın hesabı

Normal gelişte, kayıpsız üç ortam düşünelim: hava n_0 , kalınlığı d olan kaplama n_1 ve yarı sonsuz alt ortam n_2 . Tek arayüzde elektrik alan yansımaya genliği $r_{ij} = (n_i - n_j)/(n_i + n_j)$ 'dir. Tabakadaki tek geçiş fazı $\delta = 2\pi n_1 d/\lambda$ olur. Tekrarlayan yansımaları geometrik seri olarak topladığımızda toplam genlik ve güç yansıması bulunur:

$$r = \frac{r_{01} + r_{12} \exp(2i\delta)}{1 + r_{01}r_{12} \exp(2i\delta)}, \quad R = |r|^2. \quad (I.16.1)$$

Çeyrek dalga koşulu $d = \lambda_0/(4n_1)$ olduğunda iki yansımanın faz farkı π 'dir. Genlikleri de eşitlemek için ideal n_1 yaklaşık karekök($n_0 n_2$) seçilir. Örnekte $n_0 = 1$, $n_1 = 2$, $n_2 = 3,5$ ve $d = 75$ nm kullanıldı. 600 nm'de kaplamasız yansımaya yaklaşık %30,86 iken kaplamalı yansımaya yaklaşık %0,444 olur. Bu, yalnız tek dalga boyu ve belirtilen sabit indislerin sonucudur; gerçek indisler dalga boyuyla değişir.



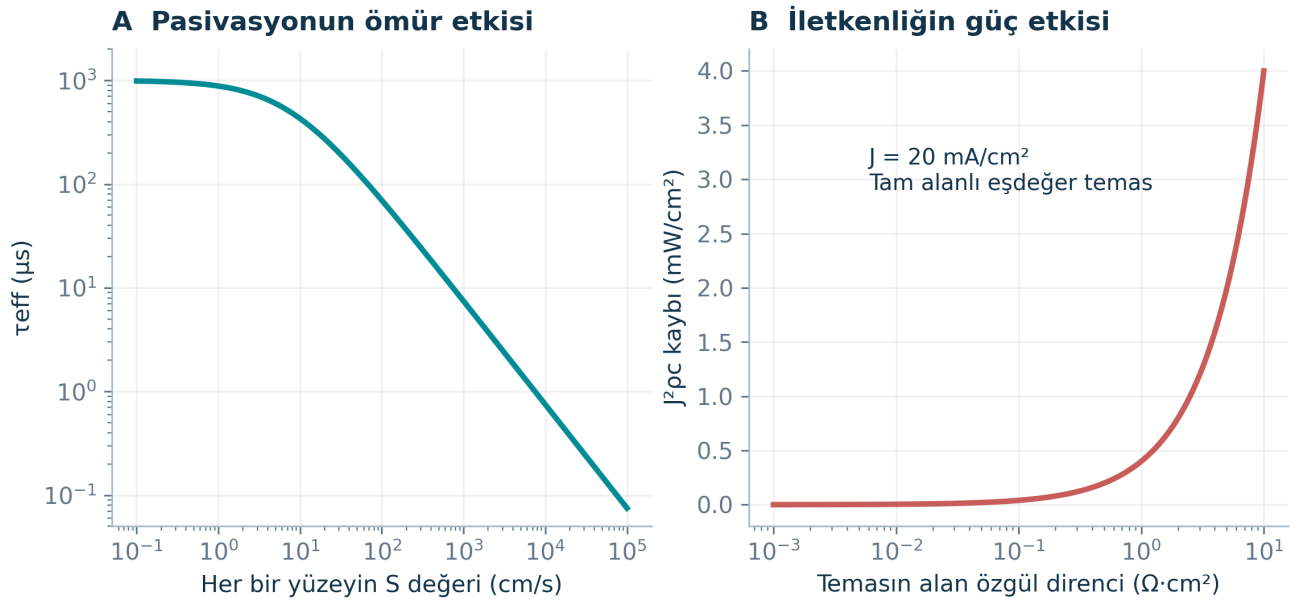
Şekil 27. Girişimle yansımaya azaltma. Eğri, yazılan genlik formülünden yeniden hesaplandı. Yansımanın bir dalga boyunda çok küçük olması, bütün güneş spektrumunda aynı kazanımı sağlamaz. B paneli katman geometrisini anlatır; eğik oklar okunabilirlik içindir, hesap normal geliş içindir. [B09]

Çok katmanda her tabakadaki ileri ve geri dalga genlikleri, sınır koşulları ve yayılma fazlarıyla birbirine bağlanır. Bu yaklaşım transfer matrisi yönteminin temelidir. Optik olarak kalın veya fazı rastgeleleşen tabakalarda koherent girişimi aynen sürdürmek

yerine uygun inkoherent işlem gerekir. Emici ortamlarda güç geçişini yalnız alan genliğinin karesi sanmak da doğru değildir; ortamın optik akısı hesaba katılır. [B09]

Optik modelin aygıt modeline verdiği çıktı

Bir filmde yerel soğurulan güç yoğunluğu biliniyorsa, onu ilgili foton enerjisine bölerek hacimsel üretim bulunabilir. Bu işlem bütün dalga boyları üzerinden integre edilir. Sonuç $G(x)$, drift-diffusion modelinin girdisidir. Ancak taşıma tabakasında soğurulan fotonları aktif soğurucu üretimine eklemek yanlış olur. Optik enerji bütçesi $R + T +$ toplam $A_j = 1$ olmalıdır; elektrik üretimine hangi A_j 'nin katıldığı ayrıca belirtilir.



Şekil 28. Pasivasyon ve iletkenlik iki ayrı tasarım hedefidir. Solda iki eşdeğer yüzeyi bulunan 150 μm kalınlıklı bir levhada S azalınca etkin ömür hacim sınırına yaklaşır. Sağda sabit akımda temas direncinin güç bedeli gösterilir. İyi bir kontak her iki ekseninde de uygun olmalıdır. Analitik öğretim modelleri. [H20] [H21]

Kendini sına

1. Yeni kaplama toplam soğurmayı artırdı; akım artmadı. İlk kontrol nedir? **Yanıt:** Ek soğurmanın hangi katmanda gerçekleştiğini ve o bölgede taşıyıcıların toplanıp toplanmadığını kontrol etmek.
2. Kontak direnci çok düşük, gerilim de düşük. Kontak iyi midir? **Yanıt:** Kesin değil; çoğunluk taşıyıcılarını geçirirken azınlık taşıyıcıları güçlü biçimde yeniden birleştiriyor olabilir.
3. Aynı radyatif referansta dış ışıldama verimi 100 kat artarsa 25 °C'de ışınlımsız gerilim kaybı ne kadar azalır? **Yanıt:** Yaklaşık $25,69 \ln 100 = 118,3 \text{ mV}$.

Laboratuvarıdan modüle: alan, kapsülleme ve sürdürülebilir üretim

Hücreden modüle geçerken yeni ne eklenir?

Çıplak hücre, dış koşullara yıllarca dayanacak bitmiş ürün değildir. **Modül**, elektriksel olarak bağlanmış hücreleri, cam veya başka ön yüzeyi, ara polimerleri, arka korumayı ve bağlantı kutusunu bir araya getirir. **Kapsülleme**, etkin aygıtı bu paket içinde koruma işlemidir. **Laminasyon**, katmanların sıcaklık, basınç ve zamana bağlı bir süreçle bütünleşmesidir. Optik geçirgenlik kadar elektriksel yalıtım, mekanik tutunma ve nem geçişi de önemlidir.

Seri bağlantıda aynı akım hücrelerden sırayla geçer; gerilimler toplanır. **Paralel bağlantıda** uç gerilimi ortak, dal akımları toplamdır. Eşit olmayan hücreler bağlandığında zayıf veya gölgeli bölüm diğerlerini sınırlandırabilir. **Bypass diyodu**, uygun tasarımda belirli bir hücre grubunun akım yolunu gerektiğinde dolaştırır. Hücrenin verimini artıran bir malzeme değildir; gölgelenme ve ters kutuplama etkilerini yönetmeye yardımcı bir devre elemanıdır.

Hangi alanın verimi?

Aktif alan, ışığı elektriksel üretim için kullanan tanımlı bölgedir. **Açıklık alanı**, bir maskenin ışığı geçirdiği ve ölçümün paydasını belirleyen açıklıktır. **Toplam alan**, kenarlar ve işlevsiz aralıklar dahil ürünün tanımlanan dış alanıdır. Alanlar makaleden makaleye örtüşmeyebilir. Payda küçülünce aynı güç için yazılan yüzde büyür; fiziksel güç artmış olmaz.

Sentetik örnek: 0,04 m² hücre alanında 8 W ölçülsün. Işınım 1000 W/m² ise hücre alanına göre verim %20'dir. Bağlantı aralıkları ve çerçeveye ürünün toplam alanı 0,05 m² olursa aynı güç toplam alana göre %16 verir. Ek elektriksel veya optik kayıp henüz eklemedik; fark yalnız geometriden doğdu.

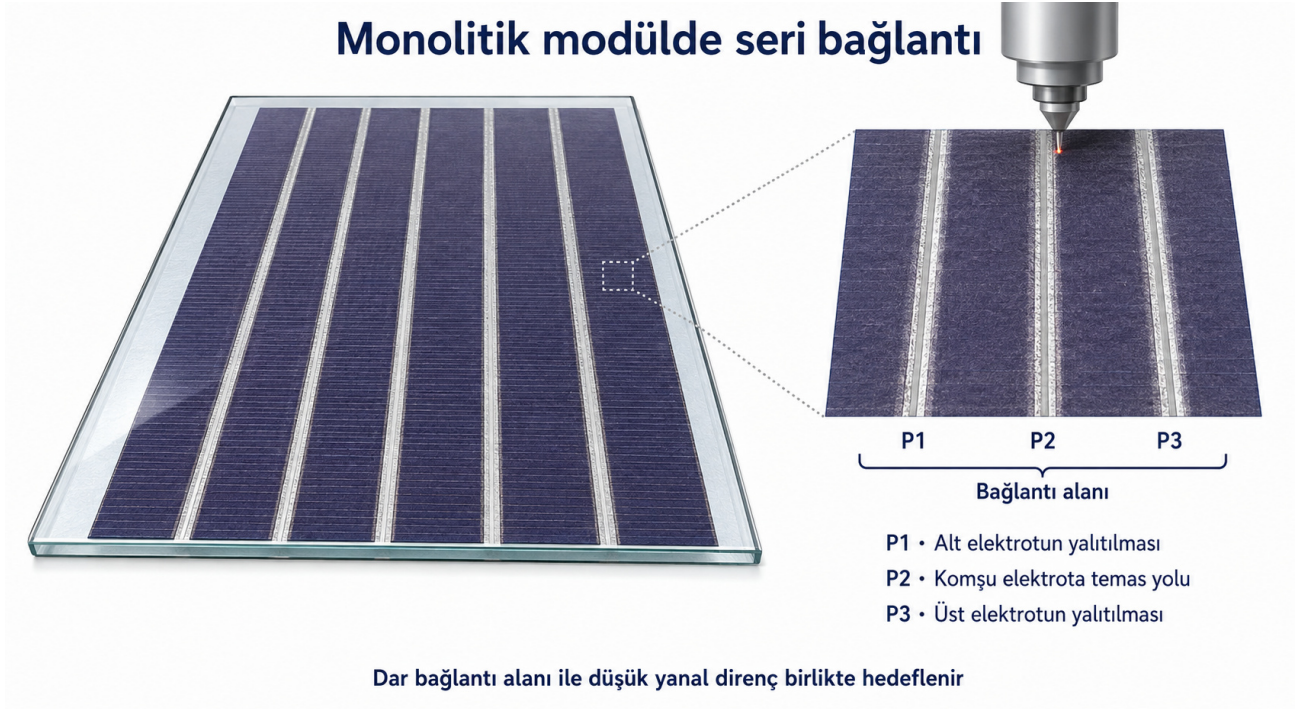
Su buharı geçirgenliği, suyun paket malzemesinden hangi hızla geçebildiğine ilişkin bir özelliktir; “su geçirmez” gibi mutlak bir etiket değildir. Kenar sızdırmazlığı, sıcaklık ve nem farkı da girişi etkiler. Farklı katmanların ısı genleşmesi farklıysa günlük ısınma-soğuma gerilim oluşturabilir. Paket bu nedenle yalnız kapak değil, aygıtın ömrünü değiştiren bir mekanik ve kimyasal sistemdir.

Sürdürülebilirliği değerlendirirken hücrenin içerdiği element, üretimde kullanılan enerji ve çözücü, arıza halinde salım, söküm ve geri kazanım ayrı basamaklardır. Bir

malzemenin az gram kullanılması, bütün çevresel etkisinin küçük olduğu sonucunu tek başına vermez.

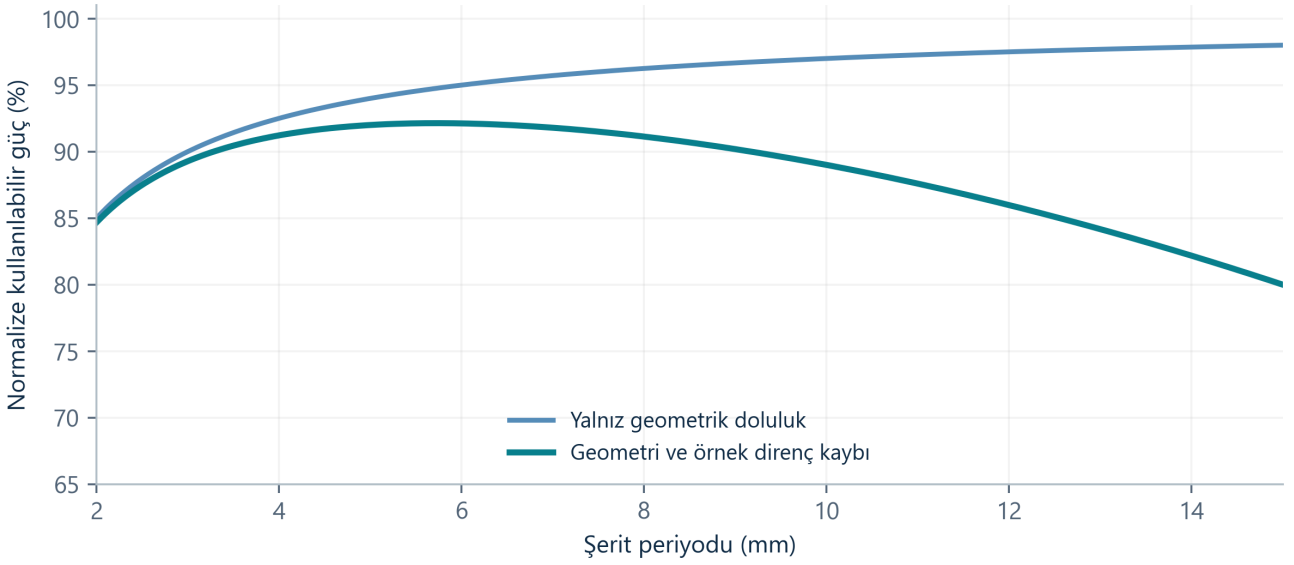
Anlama kontrolü: küçük hücre başarılı, modül başarısız

Açıklık alanı, hücreler arası aralık, bağlantı direnci, hücre eşleşmesi ve paket içindeki optik değişimi ayrı ayrı say. Bunlar kötüleşirken tek başına ölçülen hücrenin verimi aynı kalabilir. Modül geliştirmeyi yalnız soğurucu kimyasını değiştirerek çözmeye çalışmak, kaybın gerçekleştiği ölçeği kaçırabilir.



Şekil 29. Monolitik ince film modülünde hücre şeritleri ve bağlantı izleri. Üstten görünüm, P1, P2 ve P3 adımlarının farklı işlevlerini ve etkin olmayan bağlantı alanını hatırlatır; katmanlara ait çizik derinliklerini gösteren bir üretim kesiti değildir. Çizgiler ve şerit genişlikleri temsildir. Geometrik doluluk ile yanal direnç arasındaki sayısal ödünleşim izleyen panelde hesaplanır. [T29] [R34] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Şerit genişliği ile alan ve direnç kaybı



Şekil 29 - hesaplanan tamamlayıcı panel. Etkin olmayan genişlik 0,3 mm, örnek direnç kaybı ise periyodun karesiyle orantılı alınmıştır. Daha geniş şerit geometrik doluluğu artırırken yanal toplama kaybını büyütür. Sayısal optimum bir ürünün üretim reçetesi veya evrensel tasarım boyutu değildir. [T29] [R34]

Ölçek büyütmek yalnızca daha büyük bir film kaplamak değildir

Küçük hücrede tek bir temiz bölge seçilebilir; büyük alanda kalınlık dalgalanması, toz, çizik, kaplanmamış nokta, kenar ve bağlantı çizgileriyle karşılaşma olasılığı artar. Hücre alanı büyüdüğünde yatay akım yolu uzar; saydam elektrottaki direnç kaybı büyüyebilir. Bu yüzden ince film modüller, daha dar alt hücreleri seri bağlayan desenlerle yapılır. Desen, elektriksel kaybı azaltırken aktif alanı tüketir.

Spin kaplama, küçük numune araştırmasında güçlü bir araçtır; fakat malzeme kullanım oranı ve alan geometrisi açısından seri üretimin doğal eşdeğeri değildir. Bıçak kaplama, slot-die ve buhar fazı süreçleri farklı kontrol değişkenleri getirir. Sıvı kaplamada ıslanma, akış, kuruma ve kristallenme birlikte yönetilir. Vakum süreçlerinde kaynak akısı, bileşim kontrolü, taban sıcaklığı ve alan homojenliği kritik hale gelir. Bir yöntem diğerinden her koşulda üstün değildir.

Deng ve arkadaşlarının 2018 çalışması, çok az miktarda yüzey etkin bileşenin kuruma akışını ve kaplama davranışını değiştirebildiğini gösterdi. Aynı çalışmada küçük hücre ile daha büyük modül sonuçları ayrı alanlarla raporlandı. Bu örnek, laboratuvar reçetesinin doğrudan büyütülmesi yerine akış ve film oluşum fiziğinin yeniden çözülmesi gerektiğini öğretir. [T27]

Aktif alan ile açıklık alanı

Monolitik bağlantıda idealize geometrik doluluk $GFF = w/(w + s)$ ile yazılabilir. etkin hücre şeridi genişliği, bağlantı ve yalıtım için kaybedilen toplam şerit genişliğidir. Daha dar hücre şeridi yatay direnç kaybını azaltabilir; ama aynı bağlantı genişliğinde geometrik kaybı artırır. Optimum, ikisinin birlikte hesabından çıkar.

Çözümlü örnek. $w = 5$ mm ve $s = 0,5$ mm için $GFF = 0,909$ olur. Aktif bölgelerde %25 hücre verimi varsayılırsa, yalnızca bu geometrik etkiyle açıklık verimi en çok yaklaşık %22,73'tür. Ek optik ve elektriksel modül kayıpları henüz eklenmemiştir. Bu nedenle küçük aktif alan verimini ürünün dış boyutuna uygulamak gücü olduğundan büyük gösterir.

Kusur istatistiği de alanla değişir. Bağımsız ve eşit dağılan ölümcül kusurların basit Poisson modelinde kusursuz aygıt olasılığı $Y = \exp(-DA)$ olur. birim alandaki ölümcül kusur yoğunluğu, aygıt alanıdır. $D = 0,001 \text{ cm}^{-2}$ varsayılırsa 100 cm^2 için $Y \approx 0,905$, 1000 cm^2 için $Y \approx 0,368$ bulunur. Gerçek kusurlar kümelenebilir ve bazıları onarılabilir; bu model üretim tahmini değil, ölçek etkisini gösteren bir başlangıçtır.

Kapsülleme dışarıyı kapatır, içerideki fiziki değiştirmez sanma

Cam, polimer, kenar sızdırmazlığı ve bariyer tabakaları nem/oksijen girişini azaltır. Fakat kapsülleme sırasında sıcaklık, basınç ve termal genleşme uyumsuzluğu da aygıtı uygulanır. Soğurucu ve elektrot arasındaki zayıf arayüz ayrılabilir; optik özellikler değişebilir; içeride oluşan uçucu ürünler kapalı hacimde kalabilir. Dışarıya karşı daha iyi bariyer, bütün iç bozunma mekanizmalarının çözümü değildir.

Mariani ve arkadaşlarının 2024 özgün çalışması, düşük sıcaklıklı ve düşük gerinimli kapsüllemenin hücre ve modül güvenilirliği için önemini farklı hızlandırılmış yaşlandırmalarla araştırdı. Bu tür bir sonuç belirli yığın, kapsülleme ve test koşulları için delildir. Bir hızlandırılmış testi geçmek, başka bir iklimde onlarca yıllık ömrü tek başına kanıtlamaz. [T30]

Isıl genleşme için serbest boy değişimi $\Delta L = \alpha_T L \Delta T$ biçimindedir. α_T termal genleşme katsayısıdır. İki katman yapıştırılmışsa farklı serbest genleşmeleri arayüz gerilmesi yaratır. Dolayısıyla malzeme seçerken yalnızca su buharı geçirgenliği değil, elastik özellikler, yapışma enerjisi, sıcaklık bağımlılığı ve UV altında değişim de önemlidir. Tekrarlı bükme testi de esnek üründe çatlamayla kimyasal bozunmanın birlikte etkisini gösterebilir.

Toksik element, salım ve geri kazanım

Bir tehlikeli elementin aygıttaki toplam kütlesi, maruziyetin kendisi değildir; fakat göz ardı edilebilecek bir bilgi de değildir. Normal çalışma, kırılma, yangın, suyla temas ve kullanım sonu senaryolarında salımın nereden ve hangi hızla olacağı araştırılır. Malzeme “çevre dostu” diye etiketlenmeden önce üretim işçisi, kullanıcı ve atık zincirindeki farklı yollar ayrılmalıdır.

Li ve arkadaşlarının 2020 çalışması perovskit aygıtı kurşun tutucu işlev eklenebileceğini deneysel olarak araştırdı. Bu, yalnızca toplam kurşun miktarını azaltmak dışındaki bir mühendislik yaklaşımını gösterir. Belirli bir hasar testinde tutma başarısı, bütün hasar ve atık senaryolarının çözümü değildir; kaçan kütle, tutma kapasitesi, zaman ve test ortamı raporlanmalıdır. [T28]

Geri dönüşümde kütlece büyük camı kazanmak ile ekonomik veya çevresel açıdan önemli az miktardaki metalleri kazanmak farklı hedeflerdir. Güçlü yapışma uzun ömrü desteklerken tabakaların kullanım sonunda ayrılmasını zorlaştırabilir. Tasarımda sökülebilir bağlantı, malzeme izlenebilirliği ve değerli tabakaların ayrılabilirliği baştan düşünülürse ömür sonu seçenekleri genişler. Buna karşılık geri dönüşüm kolaylığı uğruna saha ömrü kısalırsa toplam sonuç kötüleşebilir.

Watt başına maliyet yerine ömür boyu enerji düşün

Basit madde yoğunluğu hesabı ölçek iddialarını sınar. Varsayımsal gümüş tüketimi 10 mg/W ise yılda 1 TW hücre üretimi 10.000 ton gümüş gerektirir. Bu bir güncel endüstri tüketimi ölçümü değildir; yalnızca birim dönüşümdür. Bir adayın birkaç gramlık deneyde ucuz olması, terawatt ölçeğinde aynı tedarik mantığına sahip olduğu anlamına gelmez. Gümüş azaltımı veya bakır kullanımı temas kalitesi, difüzyon, korozyon ve proses maliyetiyle birlikte değerlendirilir.

Yaşam döngüsü analizinin işlevsel birimi çoğu durumda teslim edilen kWh'tır. Üretim elektriği, malzeme girdileri, nakliye, kurulum, bakım, bozulma, ömür ve kullanım sonu sınırları açıklanmalıdır. IEA PVPS'nin 2020 yöntem kılavuzu, farklı PV teknolojilerini tutarlı varsayımlarla değerlendirmek için bu tür ortak tanımları vurgular. İyi bir çevresel karşılaştırma, yalnızca hücrenin üretim sıcaklığına bakmaz. [T29]

Öğretici karar örneği. A modülü aynı alanda ilk yıl %10 daha çok enerji versin; fakat üretim yükü ve ömür belirsizliği yüksek olsun. B daha düşük başlangıç performanslı fakat daha uzun doğrulanmış çalışma geçmişine sahip olsun. Seçim, tek başına ilk verimle yapılamaz: yıllık enerji azalması, değişim gereksinimi ve ortak kullanım süresi üzerinden duyarlılık hesabı gerekir. Yeni teknolojinin araştırma değeri yüksek olabilir; ticari üstünlüğü henüz kanıtlanmamış olabilir.

Şerit genişliği ile seri kaybın yarışması

Monolitik ince film modülünde hücreler seri bağlanan şeritlere ayrılır. P1, alt elektrodu elektriksel olarak böler; P2, katmanlar arasında temasın kurulacağı yolu açar; P3, üst elektrot ile aktif yığını komşu şeritten ayırır. Gerçek çizim sırası ve lazer işlemi malzeme sistemine bağlıdır. Esas amaç bir şeridin arka elektrodunu komşusunun ön elektroduna bağlamak ve istenmeyen kısa devreyi önlemektir.

Ölü bölge genişliği b , şerit periyodu s ise geometrik doluluk yaklaşık $1 - b/s$ 'dir. s büyüdüğünde ölü alan oranı azalır; fakat yük saydam elektrot içinde daha uzun yol alır. Yanal direnç kaybı basit modellerde s^2 ile büyür. Şeklin maksimumu bu iki etkinin rekabetinden doğar. Her iki katsayı gerçek optik/elektriksel yığın için yeniden ölçülmeden grafikten üretim boyutu seçilmez.

Kapsülleme bir mekanik ve kimyasal sistemdir

Su ve oksijen geçişinin azaltılması önemli olsa da kapsülleme yalnız “hava geçirmez kapak” değildir. Cam, yapıştırıcı, hücre ve arka tabakanın ısıl genleşmesi farklıdır. Sıcaklık çevrimleri kayma gerilmesi ve bağlantı yorulması yaratabilir. Kenar sızdırmazlığının geometrisi, suyun izlediği yolu etkiler. Bazı bozunma ürünleri veya iyonlar elektriksel kutuplama altında hareket edebilir. Bu nedenle kararlılık deneyinde ambalaj, kenar tasarımı ve elektriksel çalışma noktası aygıtın parçasıdır. [T30] [R15]

Bir laboratuvar sonucu modüle aktarılırken işlem tekrarlanabilirliği ve kusur istatistiği de değişir. Bir cm^2 örnekte nadir olan kısa devre kusuru, yüzlerce cm^2 alanda daha olası hale gelir. Ortalama kaplama kalınlığı doğru olsa bile dağılımın kuyruğu verimi veya güvenilirliği belirleyebilir. Ölçek büyütme araştırması bu nedenle yalnız ortalama performansı değil, konumsal haritaları, başarısız numune oranını ve üretim partileri arasındaki değişimi de izler.

Bir ince film modülde P1, P2 ve P3 ne yapar?

P1, P2 ve P3, yaygın monolitik ince film modül üretiminde üç desenleme işleminin adıdır. Tipik bir cam üzeri yapıda P1 alt iletken tabakayı komşu hücre şeritleri arasında ayırır. Soğurucu katmanlar kaplandıktan sonra P2, sonraki metalin alttaki iletkene ulaşabileceği bağlantı bölgesini açar. Üst iletken kaplandıktan sonra P3, komşu şeritlerin üst temaslarını ayırır. Böylece bir şeridin üst kontağı komşu şeridin alt kontağına bağlanır ve gerilimler seri olarak toplanır. Yığın yönüne göre ayrıntı değişebilir; bu tarif bütün teknolojiler için tek reçete değildir.

Kesim çizgileri ve hizalama payları ışık alanının bir kısmını elektrik üretemeyen **ölü alana** dönüştürür. Daha dar desen daha fazla aktif alan bırakabilir; ancak hizalama hatası, istenmeyen kısa devre veya eksik ayırma riski de düşünülür. Bu nedenle

modülün yalnız fotoğrafını değil, desen genişliği ve elektriksel bağlantı işlevini de okumak gerekir. [T34]

Paketleme görselindeki **EVA**, etilen-vinil asetat adlı bir polimer kapsülleyicidir; kullanılan tek kapsülleyici değildir. Cam ile hücre arasında mekanik bağ ve optik geçiş sağlar. Nem, ısı ve kimyasal tepkimeler bu bağın ve geçirgenliğin zamanla değişmesine yol açabilir. **Kenar sızdırmazlığı**, ortamın özellikle kenarlardan içeri ilerlemesini azaltan yapıdır. “Homojenlik” ise kalınlık ve özelliklerin alan boyunca ne kadar benzer kaldığını söyler; yüksek ortalama kalite, tek bir zayıf bölgenin oluşturduğu arızayı dışlamaz.

Kendini sına

1. Aktif hücre verimi %24, geometrik doluluk %95 ise yalnızca geometriden sonra açıklık verimi nedir? **Yanıt:** %22,8; başka kayıplar henüz düşülmemiştir.
2. Kapsüllü hücre nem testini geçtiyse iyon göçü çözülmüş müdür? **Yanıt:** Hayır. İyonik süreçler kapsülün içinde ı ışık, sıcaklık ve gerilimle sürebilir.
3. 5 mg/W malzeme tüketimi 2 TW üretimde kaç ton eder? **Yanıt:** 10.000 ton. mg/W ile watt çarpılır; 1 ton= 10^9 mg.

Bu teknoloji bölümlerinin kaynak sınırı

Bu bölümler, özgün deney ve kuram makaleleri ile kurumsal yöntem belgelerinden seçilmiş bir öğretim sentezidir; bütün PV literatürünün eksiksiz taraması değildir. Kaynak erişim tarihi 7 Eylül 2026'dır. Yayıncı özetleri, açık tam metinler ve kurumsal yazar kopyaları birlikte kullanıldı; yalnızca özetine erişilen makalelerin erişilmemiş yöntem veya ek verileri incelenmiş gibi sunulmadı. Tarihli makale sonuçları güncel dünya rekoru olarak etiketlenmedi. Sayısal alıştırmalar açıkça verilen varsayımlardan türetilmiş öğretim örnekleridir; aday malzeme veya gerçek ürün performans tahmini değildir.

Fotovoltaik ölçüm: doğru sayının nasıl üretildiği

Bir ölçüm, sayıdan önce bir karşılaştırmadır

Bir hücreye ışık tutup bilgisayarda %24 görmek, tek başına tamamlanmış ölçüm değildir. Ekrandaki oran, akım ve gerilim sensörlerine, ışık ayarına, sıcaklığa ve girilen alana bağlıdır. **Kalibrasyon**, aletin göstergesini bilinen referansla ilişkilendirir.

İzlenebilirlik, bu referansın daha üst referanslara belgelenmiş bağlantısıdır.

Belirsizlik, ölçülen büyüklüğe ilişkin makul değer aralığını nicel anlatır. “Cihaz pahalı olduğu için doğrudur” varsayımı, bu üç kavramın gerektirdiği doğrulamanın yerini tutmaz.

Güneş benzetici, laboratuvarında belirli bir spektruma ve ışınlıma yaklaşmayı amaçlayan ışık kaynağıdır. **Referans hücre**, duyarlılığı belirlenmiş aygıtla ışığı ayarlamaya yardım eder. Fakat referansla test hücresi farklı dalga boylarına farklı yanıt verirse aynı ışınlım göstergesi aynı fotoakımı garanti etmez. Bu fark **spektral uyumsuzluk** hesabını gerektirir. Lambanın zaman kararlılığı ve numune alanındaki ışık dağılımı da ayrı kontrol edilir.

Gerilim ve akım aynı bağlantıyla mı ölçülür?

Kaynak-ölçüm birimi, seçilen gerilimi veya akımı uygular ve karşılığı ölçer; SMU kısaltması kullanılır. Gerilim taraması sırasında hücre her noktada hemen kararlı hale gelmeyebilir. **Bekleme süresi**, tarama yönü ve önceki ışık koşulu sonucu etkileyebilir. Dört telli ölçümde akımı taşıyan kablolar ile gerilimi algılayan kablolar ayrılır; böylece kablo ve temas yolundaki bazı gerilim düşümleri ölçülen aygıt gerilimine daha az karışır.

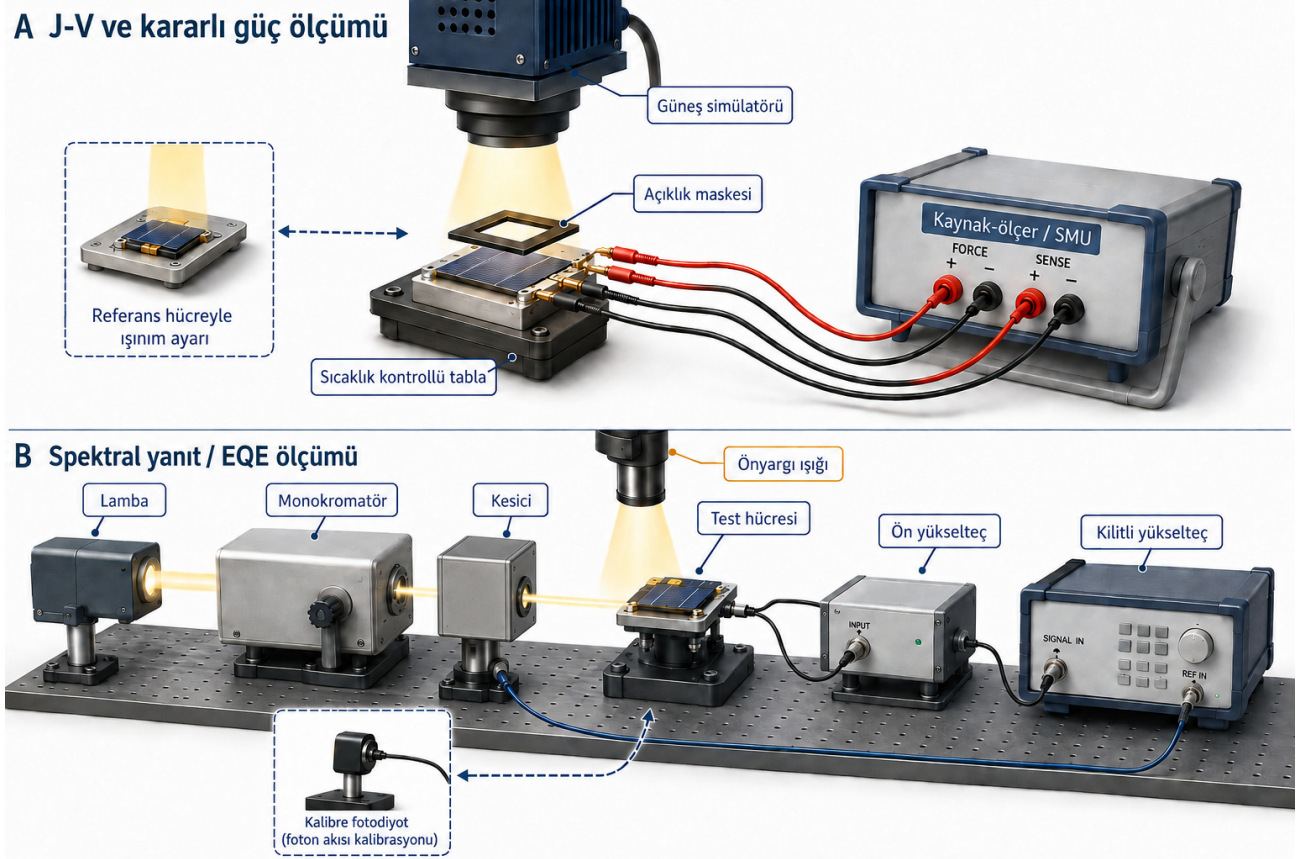
Sentetik örnek: hücre 0,60 V ve 1 A verirken akım yolundaki istenmeyen toplam 0,02 ohm direnç 0,02 V düşüm oluşturur. Yanlış noktadan gerilim okursak hücrenin gücünü birkaç yüzde farklı hesaplayabiliriz. Bu küçük volt farkı, yeni malzemenin iddia edilen kazancından daha büyük olabilir. Ölçüm geometrisini anlamadan sonuçları sıralamak bu nedenle risklidir.

Tekrarlanabilirlik, aynı koşullarda ölçümlerin birbirine yakınlığıdır. Bir alet her seferinde aynı yanlış değeri gösterebilir; yakın sonuçlar tek başına doğruluk kanıtı değildir. **Yanlılık**, ölçümü sistematik olarak bir yöne kaydıran etkidir. Aynı hücreyi beş kez ölçmek ölçüm tekrarını, beş bağımsız hücreyi üretip ölçmek süreç değişkenliğini

sorgular. Aşağıdaki belirsizlik bütçesi bu farklı kaynakların hangi sayıya nasıl girdiğini açıklayacaktır.

Anlama kontrolü: verim artışı mı, payda değişimi mi?

Akım-gerilim verisi aynıyken yazılıma daha küçük alan girildiğinde verim yükselir. Fiziksel güç değişmemiştir. Eski ve yeni sonuçları karşılaştırırken ham güç, alan maskesi, ışınlam ve numune sıcaklığını birlikte denetle. Ölçümün paydası da payı kadar deneyin parçasıdır.



Şekil 30. İki tamamlayıcı ölçüm düzeni. J-V ve MPP ölçümü bütün aygıtın gücünü verir; EQE ölçümü foton akısını dalga boylarına ayırarak akımın nereden geldiğini sınırlar. Referans kalibrasyonu, sıcaklık, alan ve önyargı koşulları düzenin parçasıdır. Özgün işlev şemaları. [R01] [R02] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Bir güneş hücresinin verimi yalnızca cihazın özelliği değildir; açıkça tanımlanmış aydınlatma, alan, sıcaklık, elektriksel geçmiş ve ölçüm yönteminin birlikte ürettiği sonuçtur. Bu yüzden araştırmacının ilk sorusu “Kaç yüzde?” olmamalıdır. “Hangi cihaz, hangi koşullarda, hangi alan tanımıyla, ne kadar süre boyunca ve hangi belirsizlikle?” soruları önce gelir. Bir malzemenin optik soğurması, bir filmin fotoluminesansı ve tamamlanmış aygıtın elektrik verimi farklı gözlenebilirlerdir. Aynı grafik içinde gösterilmeleri onları birbirinin yerine geçirmez.

Akım-gerilim eğrisini fiziksel bir ölçüm olarak okumak

Akım-gerilim eğrisi I-V, akım yoğunluğu-gerilim eğrisi J-V olarak yazılır. Kısa devrede gerilim sıfırdır ve ölçülen büyüklük I_{sc} veya J_{sc} olur. Açık devrede dış devre akımı sıfırdır ve V_{oc} ölçülür. Maksimum güç noktası, üretim bölgesindeki $V \times I$ çarpımını en büyük yapan çalışma noktasıdır. Üretim akımının bazı cihazlarda negatif kaydedildiği unutulmamalıdır; aşağıdaki eşitlikler üretilen gücün pozitif büyüklüğünü kullanır.

$$P_{\max} = V_{\text{mpp}} I_{\text{mpp}} \quad [\text{W}] \quad (1.18.1)$$

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (\text{boyutsuz}) \quad (1.18.2)$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{GA} \quad (\text{boyutsuz}) \quad (1.18.3)$$

Burada G ışınım şiddeti [W/m^2], A belirtilen ölçüm alanı [m^2] ve η güç dönüşüm verimidir. J_{sc} kullanılıyorsa alan tanımı bütün hesap boyunca aynı kalmalıdır. IEC 60904-1, doğal veya benzetilmiş güneş altında PV cihazlarının I-V ölçüm kapsamını tanımlar; bu kaynakta hücre, hücre alt grubu ve modül birlikte ele alınır. Standart kataloğunun açık açıklaması alan ölçümü, kapasitif cihazlar, karanlık I-V ve uzaysal aydınlatma düzensizliğinin de ele alındığını belirtir. Buradaki öğretici açıklama, standardın lisanslı tam metni yerine geçmez. [R01]

Örneğin $V_{oc} = 1,10 \text{ V}$, $J_{sc} = 24,0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ve $FF = 0,80$ olsun. Gelen güç yoğunluğu $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ olduğunda çıkış $1,10 \times 24,0 \times 0,80 = 21,12 \text{ mW}/\text{cm}^2$, dolayısıyla verim %21,12 olur. Bu çarpım, ölçülebilir bir tutarlılık kontrolüdür: makaledeki dört sayı birbirini sağlamıyorsa yuvarlama, alan dönüşümü veya tablo aktarımı araştırılmalıdır. Eğrideki birkaç iyi noktanın arasından seçilen maksimumun gürültüyle yukarı kayabileceği de hatırlanmalıdır; uygun çözünürlük, tekrar ve kararlı çalışma ölçümü gerekir.

Alan, spektrum ve sıcaklık neden eşit derecede önemlidir?

Aktif alan, elektrotların tanımladığı bölge, maskenin açıklığı ve cihazın toplam alanı aynı şey değildir. Maskesiz kenarlardan gelen ışığın toplanması, maskenin eğimi, kalınlığı ve örnekle aralığı küçük cihazlarda önemli hata oluşturabilir. Üretici tarafından çizilmiş nominal elektrot boyutu, ölçülmüş açıklık alanının yerine kullanılmamalıdır. Ölçüm kaydına maskenin görüntüsü, boyutları, ölçüm yöntemi ve hangi alanın paydaya girdiği eklenir. Toplam alan, açıklık alanı ve tanımlanmış aydınlatma alanı arasındaki ayrım, doğrulanmış verim tablolarının karşılaştırma kurallarında da merkezîdir. [R37]

Özgün hesap örneği: gerçek açıklık $0,100 \text{ cm}^2$, yanlış kullanılan alan $0,095 \text{ cm}^2$ ve ölçülen maksimum güç $2,00 \text{ mW}$ olsun. Doğru verim %20,0 iken yanlış alanla %21,05 bulunur. Yalnızca %5 alan küçültmesi yaklaşık 1,05 mutlak yüzde puan “iyileşme” üretmiştir. Daha yüksek akım yoğunluğu tek başına daha iyi bir yariletken anlamına gelmez.

AM1.5G bir spektral referanstır; “1 güneş” ifadesi tek başına spektral biçimi söylemez. Lamba toplamda 1000 W/m^2 verebilir fakat cihazın soğurduğu bölgede fazla, başka bölgede eksik ışık üretebilir. Kalibrasyon hücresi ve test cihazı farklı spektral yanıtlara sahipse aynı toplam ışınım doğru karşılaştırmayı garanti etmez. Spektral uyumsuzluk düzeltilmesi, referans spektrumunu, simülatör spektrumunu, referans hücrenin ve test cihazının yanıtlarını birlikte kullanır. Düzeltme katsayısının çarpan mı bölen mi tanımlandığı yazılmalı; başka yazılımdan alınan bir katsayı körlemesine uygulanmamalıdır. NREL'in spektral hata raporu bu sorunu GaInAs tabanlı yoğunlaştırıcı hücreler bağlamında inceler; burada kullanılan ders genel spektral uyumsuzluk ilkesidir. [R03]

Örneğin cihaz düzlemindeki sıcaklık ile tutucu sıcaklığı farklı olabilir. Lambanın örneği ısıtması, termal temasın zayıflığı ve sıcaklık sensörünün yeri ölçümü değiştirir. Referans 25°C ise 300 K ölçümü aynı koşul değildir: 25°C tam olarak $298,15 \text{ K}$ 'dir. Sıcaklık düzeltilmesi kullanılacaksa katsayı aynı teknoloji ve ilgili sıcaklık aralığında doğrulanmalıdır. Özellikle çok eklemli yapılarda spektral dağılım, her alt hücrenin akımını ayrı etkiler; tek bir referans hücre yeterli kalibrasyon bilgisi sağlamayabilir.

EQE ve maksimum güç takibiyle çapraz kontrol

Dış kuantum verimi $\text{EQE}(\lambda)$, belirli dalga boyunda cihaza ulaşan foton başına dış devreden toplanan elektron sayısının oranıdır. Spektral yanıt $\text{SR} [\text{A/W}]$ ile ilişkisi $\text{EQE} = \text{SR} \times h \times c / (q \times \lambda)$ biçimindedir; λ metre cinsinden kullanılır. Referans foton akısıyla bütünleştirilmiş akım şu şekilde hesaplanır:

$$J_{sc,EQE} = q \int EQE(\lambda) \Phi_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad [A/m^2] \quad (I.18.4)$$

Φ_{λ} birim dalga boyu, zaman ve alan başına foton akısıdır. Nanometre ve metre tabanlı spektral veri karıştırılırsa milyarlarca kat birim hatası doğabilir. EQE ölçümünde ışık yanlılığı, elektriksel yanlılık, demet boyutu ve doğrusal yanıt koşulu kaydedilir. Seri tandemlerde alt hücreleri ölçmek için diğer eklemleri uygun ışıkla yanlılamak gerekir. IEC 60904-8'in açık kapsamı doğrusal ve doğrusal olmayan PV cihazlarının spektral yanıtını içerir. [R02]

$J_{sc,EQE}$ ile J-V akımı uyuşmuyorsa ilk açıklama “yeni fizik” değildir. Önce alan, spektrum, kalibrasyon, dalga boyu aralığı, örnek geçmişi ve ışık altında değişim kontrol edilir. EQE akımının daha düşük çıkması ölçümde eksik taranan yakın kızılötesi bölgeden, farklı çalışma noktasından veya cihazın zaman içinde değişmesinden kaynaklanabilir. EQE ayrıca kaybın hangi spektral bölgede olduğunu gösterir; tek başına kaybın soğurma mı toplama mı olduğunu kesinleştirmez.

Yavaş iyonik ve kapasitif süreçleri olan cihazlarda tarama yönü, adım büyüklüğü, her adımda bekleme, başlangıç gerilimi ve ön koşullandırma J-V eğrisini etkiler. İleri ve geri taramaların eşit görünmesi iyon hareketinin yokluğunu kanıtlamaz; düşük histerezisli perovskitlerde iyon göçü deneysel olarak gösterilmiştir. [R14] Bu nedenle güç, uygun bir maksimum güç noktası takibi altında zamanla izlenir. Sabit gerilimde kararlı akım yararlı bir destek olsa da gerçek maksimum güç noktası kayıyorsa tek sabit gerilim yeterli değildir. Takip algoritmasının gecikmesi ile cihazın gevşemesi birbirinden ayrılmalıdır.

Belirsizliği sonuçla birlikte hesaplamak

Tekrarlanabilirlik, cihazın tekrar ölçüm saçılımıdır; kalibrasyon hatası bunun içinde görünmeyebilir. Ölçüm belirsizliği bütçesine güç ölçümü, alan, ısıtım, spektral düzeltme, sıcaklık ve ilgili korelasyonlar girer. Bağımsız küçük bağıl belirsizlikler için yaklaşık olarak $u_r(\eta)^2 = u_r(P)^2 + u_r(G)^2 + u_r(A)^2$ yazılır. Bağımsızlık yoksa kovaryans terimleri eklenir. NIST'in belirsizlik birleştirme açıklaması bu birinci mertebe yaklaşımı ve duyarlılık katsayılarını tanımlar. [R04]

Özgün örnekte standart bağıl belirsizlikler güçte %0,5, ısıtım %1,0 ve alanda %0,7 olsun. Karekök içinde karelerinin toplamı %1,319 verir. %20,0 verim için standart mutlak belirsizlik yaklaşık 0,264 yüzde puandır. $U = 2u$ yaklaşımı uygunsa genişletilmiş belirsizlik yaklaşık 0,53 yüzde puan olur; kapsama katsayısı ve gerekçesi de raporlanır. Bu durumda %20,2 ile %20,0 arasındaki fark, yalnızca nokta değerlerine bakılarak iyileşme ilan edilemez. İki cihaz aynı kalibrasyonu paylaşıyorsa farkın belirsizliği ayrıca hesaplanır; her sistematik katkıyı iki bağımsız hata gibi toplamak da yanlış olabilir.

Bir ölçümü baştan sona planlamak

Bir J-V ölçümünde veri dosyasından önce fiziksel nesneyi tanımla: numune kimliği, aktif bölge, açıklık maskesi, elektrot geometrisi ve ışığın giriş yönü. Maskenin gölgesi, saçılan ışık ve açıklık dışından toplanan taşıyıcılar küçük numunelerde önemli olabilir. Alanı yalnız nominal maske tasarımıyla almak yerine, kullanılan açıklığın ölçüsünü ve belirsizliğini kaydetmek gerekir. Sıcaklık için ortam havasını değil, hücrenin sıcaklığına ilişkin uygun ölçümü kullan.

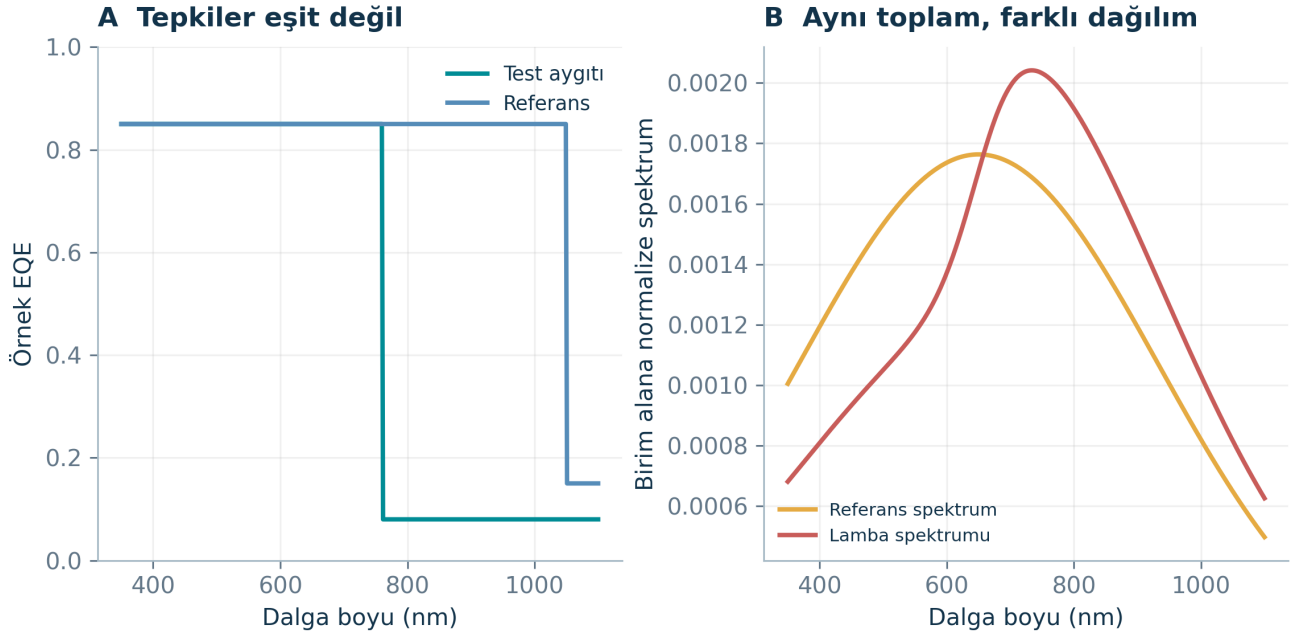
Referans hücreyle ışınım ayarı yapıldıktan sonra aygıtın spektral yanıtının referanstan farklı olup olmadığı değerlendirilir. Dört uçlu bağlantı, akım kablolarındaki gerilim düşümünün gerilim okumasını etkilemesini azaltır; ancak hücrenin kendi kontak direncini ortadan kaldırmaz. Gerilim aralığı, tarama yönü, nokta bekleme süresi ve ön koşullama seçimi veri dosyasının parçasıdır. Zamanla değişen aygıtta tek taramanın en yüksek noktası yerine MPP çevresinde kararlı izleme gerekir. [R01] [R02]

Spektral uyumsuzluk düzeltmesinin yönünü türetmek

Test aygıtı t ve referans r için spektral akım duyarlılığını $S(\lambda)$ ile gösterelim. Referans spektrum E_{ref} , lambanın ölçeklenmemiş spektrumu E_{lamp} olsun. Lambayı, referans hücrede standart spektrumla aynı akımı verecek k çarpanıyla ayarladığımızda $k = \text{integral}(E_{ref} S_r) / \text{integral}(E_{lamp} S_r)$ olur. Test aygıtının lambadaki akımının, referans spektrumundaki akımına oranı böylece:

$$M = \frac{\int E_{lamp} S_t d\lambda}{\int E_{ref} S_t d\lambda} \frac{\int E_{ref} S_r d\lambda}{\int E_{lamp} S_r d\lambda}. \quad (I.18.5)$$

Bu tanımla $M > 1$ ise lamba test aygıtını referans koşula göre fazla besler; referans spektruma karşılık gelen akım, uygun lineer koşullarda ölçülen akımın M 'ye bölünmesiyle bulunur. Bazı kaynaklar düzeltme faktörünü bunun tersi olarak tanımlar. Sembolü kopyalamak yerine oranı kelimelerle tarif etmek işaret ve yön hatasını önler. S duyarlılığını EQE'den üretirken $S = q\lambda \text{EQE}/(hc)$ kullanılır; EQE'yi doğrudan enerji spektrumuyla çarpmak foton enerjisini atlar.



Şekil 31. Spektral uyumsuzluğun kökeni. Test aygıtı kırmızıya doğru referanstan önce yanıtını kaybeder. Lamba spektrumunun kırmızıya kayması, toplam ışınım aynı kalsa da test ve referans akımlarını farklı oranlarda değiştirir. Eğriler öğretim için oluşturuldu; gerçek referans spektrum bir önceki fizik bölümündedir.

Belirsizlikte korelasyonu gözden kaçırmamak

Verim $\eta = P_{\max}/(GA)$ olduğundan logaritmik küçük değişim $d\eta/\eta = dP/P - dG/G - dA/A$ olur. Bağımsızlıkta varyanslar toplanır; ortak kalibrasyon veya ortak geometrik yöntem varsa kovaryans terimleri de bulunur. Genel ifade, çıktı $y = f(x)$ ve kovaryans matrisi U_x için $u_y^2 = \text{gradyan}(f) \text{ transpozesi} \times U_x \times \text{gradyan}(f)$ 'dir. [R04]

İki işlemi aynı lambayla aynı gün karşılaştırmak, bazı ortak hataların fark hesabında kısmen iptal olmasını sağlayabilir; mutlak verim belirsizliğinde ise aynı hata kalır. Bu yüzden “iki hücre arasındaki fark çok iyi biliniyor” ile “ikisi de uluslararası ölçekte aynı kesinlikle derecelendirildi” farklı iddialardır. Tekrarların standart sapması, cihaz kalibrasyonunun tüm belirsizliğini temsil etmez.

Kendini sına

- 1. Aynı hücreyi daha küçük alanla normalize etmek fiziksel gücü artırır mı?** Hayır. Güç değişmez; J ve hesaplanan verim yapay olarak büyür. Ölçümün alan tanımı düzeltilmelidir.
- 2. Geri taramada %24, MPP takibinde %21 çıkan cihaz için temel performans hangisidir?** Koşulları ve süreyi belirterek kararlı MPP sonucu temel alınır; tarama sonucu dinamik davranış olarak ayrıca gösterilir.
- 3. EQE akımı J-V akımından %8 düşükse hemen toplama kaybı denir mi?** Hayır. Önce spektral kalibrasyon, alan, dalga boyu kapsamı, yanlılık ve cihaz geçmişi eşleştirilir; sonra optik ve elektriksel kayıp ayrıştırılır.

Öngerilim ve kablolama neden kayda girer?

Bir aygıtı ölçmeden önce belirli bir gerilimde bekletmek **öngerilim uygulamaktır**. Özellikle yavaş yüklenme veya iyon hareketi gösteren yapılarda bu hazırlık, tarama başladığındaki iç durumu değiştirebilir. Işıқта bekleme süresi de benzer biçimde kaydedilmelidir. Aynı tarama hızını kullanmak, farklı başlangıç durumlarını kendiliğinden eşitlemez.

Kablolama, aletin gösterdiği gerilimin gerçekten hücrenin uçlarındaki gerilim olup olmadığını etkiler. Akım taşıyan kablodaki direnç düşüşünü ayrı gerilim algılama uçlarıyla ayırmak, dört telli bağlantının amacıdır. Bir referans hücreyle ışığı kalibre ettikten sonra numunenin sıcaklığını, alanını ve bağlantısını değiştirmek ise ölçüm zincirinin başka halkalarını değiştirebilir. Bu nedenle kalibrasyon tek bir sertifika sayfasından ibaret değildir; doğru kullanım koşullarıyla tamamlanır.

Karakterizasyon: her araç hangi soruyu cevaplar?

Karakterizasyon bir görünmeyi dolaylı ölçmektir

Karakterizasyon, numunenin yapısını, bileşimini ve işleyişini ölçülebilir sinyaller üzerinden tanımlamaktır. Aletler çoğu zaman “kusur yoğunluğu” veya “iyi arayüz” yazan doğrudan cevap vermez. Işık şiddeti, elektron enerjisi, kırınım açısı veya elektriksel tepki ölçer. Biz bir model yardımıyla bu sinyali fiziksel özelliğe bağlarız. Aynı sinyali birkaç farklı mekanizma üretebildiğinde buna **ters problem** denir.

XRD, X-ışını kırınımıdır. Kristal atomlarının düzeni, belirli açılarda saçılan dalgaları güçlendirir; piklerin konumları ve biçimleri yapıya ilişkin bilgi verir. **SEM**, taramalı elektron mikroskopudur; yüzeyden çıkan sinyallerle morfolojiyi görüntüler. **AFM**, yüzeyi bir uçla tarayan atomik kuvvet mikroskopudur. Mikroskop görüntüsündeki parlak bölgeyi otomatik olarak farklı kimyasal madde sayamayız; sinyal türü, yüklenme ve topografya da görüntüyü etkileyebilir.

Enerji, ısıldama ve elektriksel tepki

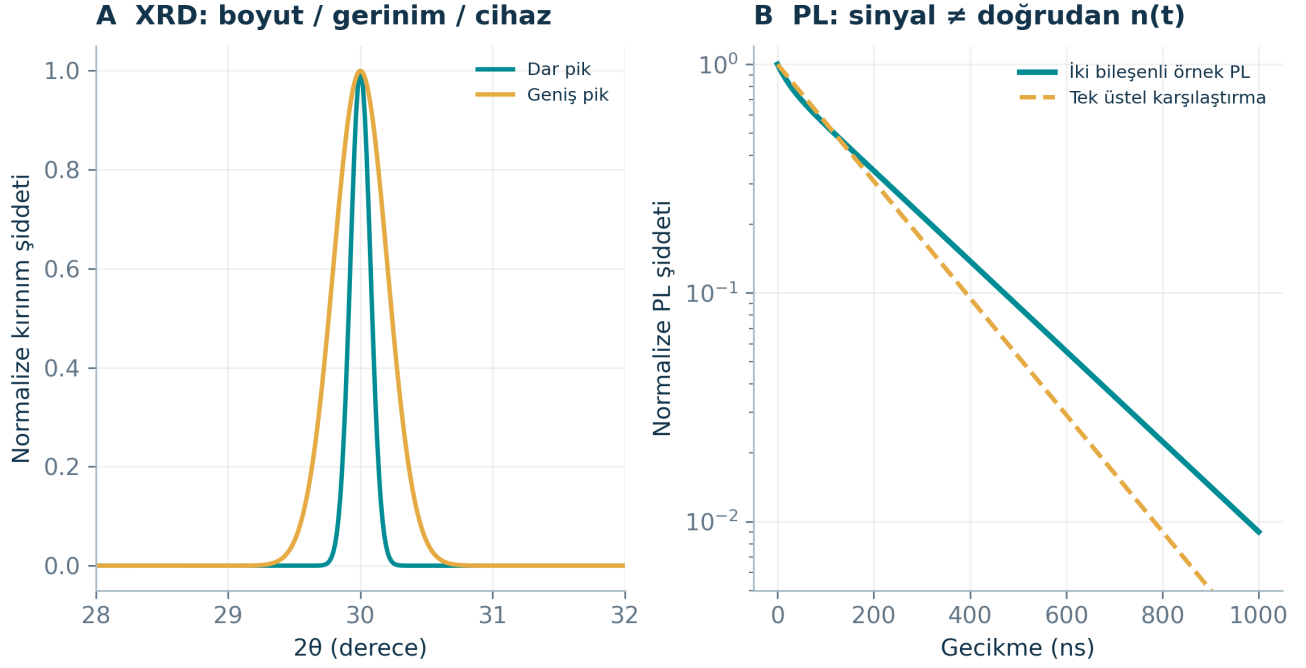
XPS, X-ışını fotoelektron spektroskopisidir: dışarı çıkan elektronların enerjilerinden özellikle yüzeyin element ve kimyasal durum bilgisi elde edilir. **UPS**, ultraviyole ışıyla benzer biçimde değerlik durumları ve iş fonksiyonu gibi özelliklere odaklanır. Bu yöntemlerin baktığı derinlik ve yüzeyin hazırlanışı önemlidir; yüzey bileşimi bütün filmin ortalaması olmayabilir.

PL, ışıyla uyarılan numunenin ışık yayması, yani fotoluminesanstır. **EL**, elektrik akımıyla uyarıldığında ışık yaymasıdır. **Zaman çözünürlüklü PL**, kısa bir uyarımdan sonra sinyalin nasıl değiştiğini izler. **Empedans spektroskopisi**, küçük değişken elektriksel uyarıma frekansa bağlı yanıtı ölçer; direnç, yük birikimi ve yavaş süreçleri ayırmak için modeller kullanılır. Frekans, saniyedeki çevrim sayısıdır. Bir eşdeğer devrenin veriye uyması, içindeki her elemanın tek bir gerçek mekanizma olduğunu kanıtlamaz.

Sentetik teşhis: bir yüzey işleminden sonra PL iki kat artmış olsun. Daha az ışınlımsız yeniden birleşme bir açıklamadır. Ancak daha fazla uyarma ışığı soğurulması veya daha fazla yayılan ışığın dedektöre çıkması da sinyali artırabilir. Soğurulan uyarma gücünü ve optik geometriyi kontrol eder, uygun elektriksel ölçümle ilişkilendirirsek yorum güçlenir. Aleti seçmeden önce ayırmak istediğimiz iki açıklamayı yazmak, ölçüm listesini bilimsel soruya dönüştürür.

Anlama kontrolü: tek pik, tek sonuç?

Bir XRD pikinin büyümesi her zaman daha fazla hedef madde demek değildir; kristal yönelmesi de etki edebilir. Bir SEM görüntüsünün düzgünleşmesi de tek başına kusur yakalama hızını vermez. Her iddianın yanına “alet hangi sinyali ölçtü, hangi modelle hangi özelliği çıkardım?” cümlesini ekle.



Şekil 32. Bir sinyali okumak, fiziksel ileri model gerektirir. A panelindeki sentetik XRD pikleri farklı genişliktedir; tek başına tane boyunu belirlemez. B panelindeki sentetik PL eğrileri tek ve iki üstel biçimleri karşılaştırır. PL şiddeti ile fazla taşıyıcı yoğunluğunun aynı zaman sabitine sahip olması zorunlu değildir. [R08]

Bir araştırma programının gücü kullandığı cihazların sayısı ile ölçülmez. Güç, aynı hipotezi farklı fiziksel kanallardan sınayan ölçümlerin birbirini tamamlamasından gelir. “Daha büyük tane”, “daha uzun ömür”, “daha yüksek bağlanma enerjisi” gibi ifadeler ancak neyin ölçüldüğü, neyin modelden çıkarıldığı ve hangi alternatif açıklamaların açık kaldığı belirtilirse bilimsel bilgiye dönüşür. Malzeme, yarım aygıt, tamamlanmış aygıt ve yaşlandırılmış aygıt farklı örnek sınıflarıdır; bunlar arasında sessizce karşılaştırma yapılmaz.

Kristal yapı ve morfoloji

X-ışını kırınımı XRD, periyodik atom düzeninin saçılma izini ölçer. Bragg bağıntısı $n\lambda = 2d \sin\theta$, kırınım açısıyla düzlemler arası uzaklığı bağlar. Pik konumu kafes aralıklarına, şiddet dağılımı atom yerleşimleri ve tekstüre, genişlik ise cihaz çözünürlüğü, koherent bölge boyutu ve mikrogerinim gibi etkenlere duyarlıdır. Bir pikin daralması tek başına “kusurlar azaldı” demek değildir. Scherrer yaklaşımındaki boyut koherent kırınım bölgesidir; SEM’de görülen geometrik tane boyutuna otomatik eşitlenmez.

İnce filmde tercihli yönelim, beklenen bazı pikleri zayıflatır. “Ek pik yok” sonucu, algılama sınırının altında ikincil faz bulunmadığını veya amorf bileşen olmadığını kanıtlamaz. İyi bir analiz substrat, elektrot ve boş taşıyıcı ölçümlerini içerir; gerekirse tüm desen uyumu, standart örnek ve bağımsız kimyasal bileşim ölçümüyle desteklenir. Yapısal model seçiminde çok sayıda serbest parametreyle desen uydurmak mümkün olduğundan kimyasal makullük ve parametrik belirsizlik de kontrol edilir.

GIWAXS, yüzeye küçük geliş açısıyla geniş açılı saçılmayı ölçerek ince filmin yönelim dağılımı ve oluşum sürecine erişir. Halka ile yay arasındaki fark yönelim hakkında bilgi taşır; tek bir doğrultuya indirgenmiş eğri iki boyutlu örüntünün tamamı değildir. Yerinde ölçüm, çözücü uzaklaşması, ara faz oluşumu ve tavlama sırasında kristalleşmenin ne zaman gerçekleştiğini gösterebilir. Fazla PbI_2 içeren öncüllerin incelendiği çalışma, performans değişimini anlamak için GIWAXS'ı mikroskopi ve taşıyıcı toplama bilgisiyle birleştiren somut bir örnektir. Buradaki yöntemsel ders, bir katkının etkisini yalnızca son filmin tek XRD deseninden okumamaktır. [R11]

SEM yüzey biçimini ve kesitte katmanları görüntüler. Numune hazırlama, kesit hasarı, elektron demetiyle bozunma ve görüntü eşiği sonuçları etkileyebilir. AFM yükseklik topografisini ölçer; tarama alanı, uç biçimi ve düzleştirme yöntemi RMS pürüzlülüğü değiştirebilir. Tek bir “güzel” SEM alanı örneğin bütünü temsil etmez. Araştırmacı rastgele veya önceden tanımlanmış konumlardan çoklu görüntüler alır, boyut dağılımını verir ve aynı analiz ayarlarını kontrol grubuna uygular. Kesitte 500 nm görünen bir filmde yerel incelme ve iğne deliği istatistiği, ortalama kalınlıktan daha belirleyici olabilir.

Yüzey kimyası ve enerji düzeyleri

XPS fotoelektronların kinetik enerjisinden element ve kimyasal ortam bilgisi çıkarır. Sinyal yüzeye duyarlıdır; bu özellik arayüz araştırmasında avantaj, hacim bileşimi iddiasında sınırlamadır. Yüzeyde oksitlenmiş bir katman bulunması bütün filmin oksitlendiğini göstermez. Yüklenme düzeltmesi, enerji referansı, arka plan, pik şekli ve spin-yörünge çiftlerinin kısıtları açıkça yazılmalıdır. İyonla aşındırma sırasında indirgenme veya tercihli sökölme gerçekleşebileceği için derinlik profili de bütünüyle pasif bir gözlem değildir. NIST'in pratik XPS kılavuzu, ölçüm planından raporlamaya kadar bu tür yorum disiplini kurmak için hazırlanmıştır. [R07]

UPS ve Kelvin probu gibi yöntemler iş fonksiyonu ve yüzey enerji düzeyleri hakkında bilgi sağlar. Enerji diyagramı çizerken kullanılan bütün değerlerin aynı referansa bağlanması gerekir. Hava görmüş tekil filmin iş fonksiyonunu vakumda hazırlanmış gömülü arayüze doğrudan taşımak güvenilir değildir. Temas oluştuğunda dipol, kimyasal reaksiyon, bant bükülmesi ve Fermi düzeyi hizalanması oluşabilir. Bu nedenle “elektron ilgileri uygun, arayüz kayıpsızdır” çıkarımı geçersizdir. Mümkün olduğunda

artan örtü kalınlığıyla arayüz oluşumu izlenir; temas öncesi ve sonrası ölçüm, aygıt davranışıyla birlikte yorumlanır.

Işımadan taşıyıcı dinamiğine

PL, optik uyarımdan sonraki ışımalı yeniden birleşmedir. PL kuantum verimi, çıkan foton sayısının soğurulan uyarıcı foton sayısına oranıdır; gelen foton sayısına bölmek farklı bir büyüklük verir. Spektral dedektör yanıtı, soğurulan güç, yeniden soğurma ve foton kaçış geometrisi ölçümün parçasıdır. Ham PL şiddetinin yükselmesi daha güçlü soğurmadan da kaynaklanabilir. Kalınlığı veya optik yığını değişen iki örnekte normalize edilmemiş PL karşılaştırması yeterli değildir.

TRPL, ışımayı zaman çözünürlüklü izler. Basit bir homojen yüksek enjeksiyon örneğinde elektron ve delik yoğunlukları yaklaşık eşitse ışımalı hız Bn^2 ile, tuzak aracılı kayıp yaklaşık n/τ ile, Auger kaybı Cn^3 ile ölçeklenebilir. Bu yüzden aynı malzemeye daha güçlü lazer darbesi uygulamak gözlenen bozunmayı değiştirebilir. Tek üstel uyumdan çıkan süreyi koşulsuz “malzemenin taşıyıcı ömrü” diye adlandırmak hatalıdır. Uyarım yoğunluğu, darbe tekrarı, cihazın zaman çözünürlüğü, difüzyon ve yüzey yeniden birleşmesi birlikte değerlendirilir. PL temelli perovskit karakterizasyonu üzerine yöntemsel çalışma bu ölçümlerin koşula bağımlılığını ayrıntılandırır. [R08]

Özgün teşhis örneği: çıplak filmde uzun TRPL, elektron taşıma tabakası eklendiğinde kısa TRPL gözleniyor. Bir açıklama hızlı ve yararlı elektron aktarımıdır; diğer açıklama arayüzde artan ışımasız kayıptır. Kısa süre tek başına hangisini seçmez. Açık devre koşullarında mutlak PL/QFLS, tamamlanmış hücrede V_{oc} , kısa devrede yük çıkarımı ve yüzey pasivasyonu kontrolü birlikte kullanılır. Kontak eklenince PL düşerken aygıt V_{oc} da düşüyorsa, “başarılı çıkarım” açıklaması özellikle dikkatle sorgulanmalıdır.

Elektrolüminesans EL, elektriksel enjeksiyon altında ışımadır. Uygun karşılıklılık varsayımlarında optik toplama ve ışıyım arasında bağlantı kurulabilir; dış ışıma verimiyle ışımasız gerilim kaybı da ilişkilidir. Rau'nun karşılıklılık çalışması bu bağı matematiksel olarak kurar. [R09] Sabit radyatif referansla $\Delta V_{nonrad} = -(kT/q) \ln(\eta_{ext})$ yazılır. 298,15 K'de kT/q yaklaşık 25,69 mV'dir: $\eta_{ext} = \%1$ için kayıp yaklaşık 118 mV, $\%0,1$ için yaklaşık 177 mV olur. Buradaki η_{ext} , bağlamı belirtilmiş dış ışıyım verimidir; çıplak filmin PL verimi otomatik olarak bu değerin yerine geçmez. QFLS malzeme içindeki elektron ve delik yarı-Fermi düzey ayrımıdır; dış kontaklarda ölçülen qV_{oc} ile aynı olmak zorunda değildir.

Elektriksel spektroskopisi ve yanlış kesinlik

DLTS, dolum darbesinden sonra tuzakların termal boşalma davranışını izler. Sıcaklıkla değişen zaman sabitlerinden aktivasyon enerjileri ve uygun model altında tuzak bilgisi çıkarılır. Lang'ın özgün çalışması bu yaklaşımı yüksek frekanslı kapasitans geçişleri üzerinden kurmuştur. [R10] Ancak aktivasyon enerjisi, mutlaka doğrudan bir atomik kusurun kimliği değildir. Birden fazla kusur, dağılım, arayüz etkisi ve iyon hareketi benzer zaman ölçekleri verebilir. Kimlik ataması için sıcaklık, yanlışlık, örnek hazırlığı ve bağımsız hesaplama/kimyasal müdahale kanıtları gerekir.

Empedans spektroskopisi $Z(\omega) = \delta V(\omega)/\delta I(\omega)$ ölçer. Frekans bağımlı karmaşık yanıtı eşdeğer devreyle uydurmak kullanışlıdır fakat tek bir yarım daire tek bir fiziksel mekanizmaya zorunlu olarak karşılık gelmez. Uyarım küçük olmalı, cihaz ölçüm boyunca durağan kalmalı ve gerilim/ışık geçmişi korunmalıdır. Perovskitlerde görünür büyük veya negatif kapasitans, yavaş iyonik değişimlerin elektronik enjeksiyonu modüle etmesinden doğabilir; bu nedenle devre parametresini doğrudan devasa dielektrik sabiti diye yorumlamak yanlış olabilir. Ebadı ve çalışma arkadaşları bu ayrımı geçici akım ölçümleriyle ortaya koymuştur. [R12]

Sinyalden mekanizmaya geçerken ters problemi görmek

Bir karakterizasyon aracı doğrudan “iyi malzeme” ölçmez. XRD fotonların kristal düzenle saçılmasını, XPS yüzey yakınından çıkan elektron enerjilerini, PL ışımalı yeniden birleşmeyi, elektriksel ölçüm ise bütün aygıtın taşınma ve kayıp bileşimini gözler. Aynı mikro fizik birden çok sinyali değiştirebilir; aynı sinyal birden çok mikro fizik tarafından üretilebilir.

XRD pik genişliğinden Scherrer türü bir koherens uzunluğu çıkarılırken β 'nin radyan cinsinden olması, cihaz genişlemesinin ayrılması, biçim katsayısının seçimi ve mikroyerinin olasılığı önemlidir. Bu uzunluk, mikroskopta görülen bütün tanelerin boyutuyla aynı olmak zorunda değildir. Pik şiddeti de yalnız faz miktarı değildir; tercihli yönelim ve ölçüm geometrisi değişebilir. Bu nedenle tek pikin büyümesini otomatik “kristallenme arttı” cümlesine çevirmek yetersizdir.

PL sönümünden yaşam süresi neden doğrudan okunmaz?

Üniform bir hacimde, tek enjeksiyon seviyesinde anlık PL sinyalinin ışınlı yeniden birleşmeyle orantılı olduğunu varsayalım: IPL yaklaşık Bnp . Katkılı düşük enjeksiyonda p yaklaşık p_0 olduğu için sinyal yaklaşık Δn ile orantılıdır. Eğer $\Delta n = \Delta n_0 \exp(-t/\tau)$ ise PL de aynı zaman sabitiyle söner. Yüksek enjeksiyonda n yaklaşık p yaklaşık Δn olduğunda IPL yaklaşık Δn^2 'dir; aynı taşıyıcı sönümü bu kez PL'de $\exp(-2t/\tau)$ verir. Ölçülen üstel süre taşıyıcı ömrünün yarısı olabilir.

Gerçekte taşınım, yüzey kaybı, foton geri dönüşümü ve enjeksiyona bağlı yeniden birleşme bu sade modeli de değiştirir. Bu türetmenin amacı her PL eğrisini ikiyle çarpmak değildir; sinyal ile aranan fiziksel büyüklük arasındaki ileri modeli açık kurmaktır. Farklı uyarma şiddeti, ön/arka aydınlatma ve pasivasyon kontrolü bu modelin sınanmasını sağlar. [R08]

Bir mekanizma için ayırıcı ölçüm seçimi

Gözlem	En az iki olası açıklama	Ayırıcı kontrol
Voc arttı	Hacim kaybı azaldı; kontak kaybı azaldı	Çıplak film ve kontaklı yığın PL/QFLS karşılaştırması
FF arttı	Seri direnç azaldı; yeniden birleşme değişti	Suns-Voc/pseudo-JV ve kararlı J-V birlikte
Jsc arttı	Optik üretim arttı; toplama iyileşti	EQE, yansıtma ve dalga boyuna bağlı toplama
PL söndü	Yük daha hızlı çıkarıldı; yeni kayıp yolu açıldı	Seçici ve engelleyici kontak kontrolü; aygıt Voc'si
XRD piki daraldı	Koherent bölge büyüdü; gerinim azaldı	Cihaz düzeltmesi ve birden çok pik analizi

Tablodaki ölçümler birbirinin yerine geçmez. Örneğin yük çıkarılması açık devrede dış akım üretmez; kontaklı filmin PL söndürmesini doğrudan yüksek güç kanıtı olarak okumamak gerekir. Araştırmacı önce ölçümün sınır koşulunu, sonra sinyalin yorumunu kurar.

Kendini sınama

- 1. XRD piki daralınca taşıyıcı ömrünün arttığı söylenebilir mi?** Hayır. Pik genişliği yapısal ve cihazsal katkılar içerir; taşıyıcı dinamiği ayrıca ölçülür.
- 2. Kontak eklenince PL sönmesi iyi haber midir?** Tek başına belirlenemez. Yararlı yük aktarımı ve zararlı arayüz yeniden birleşmesi ayrıştırılmalıdır.
- 3. Empedans uyumu çok iyi ise mekanizma kanıtlanmış olur mu?** Hayır. Alternatif devreler ve fiziksel modeller sınanmalı, bağımsız zaman alanı ve çalışma koşulu verileriyle ayırt edilmelidir.

Görüntüleme, yük çıkarma ve kontrollü müdahale

Heterojenlik, bir numunenin her yerinin aynı özellikte olmamasıdır. Kalınlık, kimyasal bileşim veya elektriksel yanıt değişebilir; mikroskopinin yerel bilgisi bu yüzden bütün alanın ölçümüyle tamamlanır. **Yük çıkarma**, oluşan taşıyıcının soğurucudan komşu tabakaya veya dış devreye aktarılmasıdır. Çıkarma hızlanınca ısıldama azalabilir; aynı azalma daha çok yeniden birleşmeden de doğabilir. Bu iki açıklamayı tek PL eğrisi ayıramaz.

Müdahale ile kastedilen, bu açıklamalardan birini özellikle sınavan kontrollü değişikliktir. Örneğin aynı filmin bir örneğine pasivasyon uygulanır, diğerinin optik koşulları eşleştirilerek kontrol olarak tutulur. Ardından ısıldama, gerilim ve çıkarılan yük birlikte karşılaştırılır. **İleri model**, varsayılan mekanizmadan beklenen sinyali hesaplar; **ters problem**, ölçülen sinyalden hangi mekanizmaların mümkün olduğunu araştırır. Kavramsal bir örnek eğri, gerçek bir numunenin ölçüm verisinin yerini tutmaz.

Dayanıklılık: bir saat eğrisinden hizmet ömrüne

Ömür bir tarihten çok bir ölçüt tanımımızdır

Bir modülün “dayanıklı” olması hangi işlevi ne kadar koruduğuna bağlıdır. Başlangıçtaki maksimum güç, geçen süre boyunca azalabilir; yalıtım bozulabilir; katmanlar ayrılabilir. Bu sonuçların eşikleri farklıdır. **Bozunma**, özelliklerin zamanla değişmesidir; **arıza**, tanımlı bir işlev veya güvenlik ölçütünün artık karşılanmamasıdır. Yavaş güç kaybı ile ani elektriksel arıza aynı ömür dağılımını vermeyebilir.

T80, seçilen başlangıç gücünün %80'ine ulaşma süresidir. Başlangıcın ilk ölçüm mü, bir alışma döneminin sonu mu olduğu belirtilmelidir. **Sentetik örnek:** başlangıç 10 W ise eşik 8 W'tır. 200 saatte 8,5 W, 300 saatte 7,5 W ölçüldüğünde iki nokta arasında doğrusal değişim varsayarsak T80 yaklaşık 250 saattir. Gerçek değişim doğrusal değilse bu yalnız bir kestirimdir; daha sık veri veya uygun model gerekir.

Test bitince arıza oluşmamışsa ne yazarız?

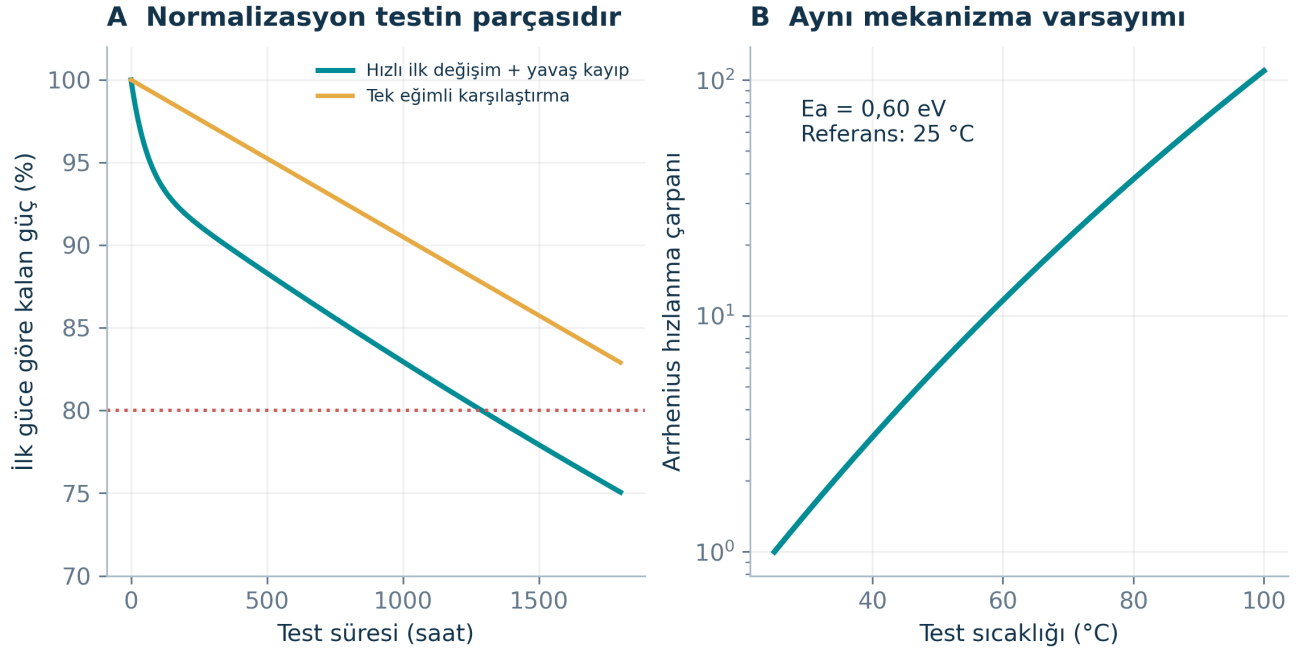
Numune 1000 saatlik test sonunda hâlâ %90 güç veriyorsa “T80 = 1000 saat” yazılmaz. Eşik bu süre içinde görülmedi; “bu test koşulunda T80 1000 saatten uzun” denebilir. Sonucu tam ömür yerine sınır olarak gözlediğimiz böyle kayıtlara **sansürlenmiş veri** denir. Testten erken çıkarılan numuneyi sessizce veri setinden silmek dayanıklılığı olduğundan iyi gösterebilir.

Hızlandırılmış yaşlandırma, yüksek sıcaklık, nem, ışık veya elektriksel zorlanmayla bir bozunma sürecini daha kısa sürede incelemektir. **Aktivasyon enerjisi**, seçilen süreç hızının sıcaklığa duyarlılığına ilişkin model parametresidir. Aynı mekanizma geçerliyse farklı sıcaklıklardaki hızlar ilişkilendirilebilir. Fakat yüksek sıcaklıkta yeni bir tepkime başlamışsa artık aynı saati hızlandırmıyor, farklı bir arızayı çalıştırıyor olabiliriz. Bir test saatini evrensel katsayıyla saha yılına çevirmek doğru değildir.

ISOS, özellikle gelişen hücrelerin kararlılık değerlendirmesinde kullanılan tanımlı araştırma protokolleri ailesidir. **IEC yeterlilik deneyleri**, ilgili standartların koşullarına göre tasarımın belirli testleri geçip geçmediğini değerlendirir. Bunlar farklı sorular sorar. Bir yeterlilik testini geçmek tek başına belirli saha koşullarında kesin hizmet ömrü garantisi değildir. Aşağıda test amacı, stres koşulu ve raporlanan eşik ayrı tutulacaktır. [R05] [R06]

Anlama kontrolü: bir iyileşme arızayı gizleyebilir mi?

Karanlıkta dinlendirildiğinde güç kısmen geri geliyorsa geri dönüşlü değişim ile kalıcı kaybı ayır. Yalnız dinlendirilmiş ölçümleri raporlamak, gerçek çalışma sırasındaki performansı saklayabilir. Çalışma, duraklama ve ölçüm geçmişini aynı zaman çizelgesinde tutmak gerekir.



Şekil 33. Kararlılığı süre ve mekanizma üzerinden okumak. A paneli başlangıç değişimi olan ve olmayan iki sentetik güç eğrisini; B paneli 0,60 eV etkinleşme enerjili Arrhenius çarpanını gösterir. 25 °C referanslı hızlanma eğrisi, yalnız aynı mekanizmanın sürdüğü varsayımına aittir. [R05] [R16]

Verim cihazın belirli anda ne yaptığını; dayanıklılık aynı hizmeti zaman boyunca ne ölçüde sürdürebildiğini anlatır. Hücre geliştirmede yüksek başlangıç verimi ile yavaş bozunma aynı hedef fonksiyonda buluşur: toplam üretilen enerji. Başlangıçta daha verimli olup hızla bozunan bir cihaz, daha mütevazı fakat kararlı bir aygıttan daha az elektrik üretebilir. Bu nedenle dayanıklılık çalışması sona bırakılan bir “ek test” olmamalı; malzeme, arayüz, metal kontak, kapsülleme ve çalışma koşulu tasarımının içinde yer almalıdır.

Bozunmanın tek bir nedeni yoktur

Nem ve oksijen aktif tabakaya ulaşabilir, ara yüzey kimyasını değiştirebilir veya metal korozyonunu hızlandırabilir. Isı difüzyonu, iyon hareketini, reaksiyon hızlarını ve mekanik gerilimi etkiler. Işık yeni taşıyıcılar oluşturarak karanlıkta görülmeyen fotokimyasal yollar açabilir. Elektriksel yanlılık yüklü kusurların dağılımını ve arayüz reaksiyonlarını değiştirebilir. Bir bileşenin tek başına güvenli olduğu koşul, diğer stresle birleştiğinde güvenli olmayabilir: “karanlıkta sıcaklığa dayanıklı” sonucu “ışık altında çalışmada dayanıklı” demek değildir.

Silisyum modüllerde hücre çatlakları, bağlantı sorunları, kapsülleyici ve arka tabaka bozunması, korozyon ve potansiyel kaynaklı etkiler; ince film ve gelişmekte olan teknolojilerde bunlara ek olarak farklı göç ve arayüz mekanizmaları araştırılır. Bunların görülme sıklığı teknoloji, üretim kuşağı ve ortamla değişir. IEA PVPS'nin modül arızaları çalışması, arızaların yalnızca elektrik eğrisiyle değil görsel inceleme ve görüntüleme gibi yöntemlerle birlikte ele alınmasını gösteren geniş bir kurumsal çerçevedir. Buradan evrensel tek bir bozunma oranı çıkarılmaz. [R15]

Perovskitlerde iyonik hareketin varlığı ile cihazın başarısız olması arasına ayrıca mekanizma konmalıdır. Mobil türler yerel alanı değiştirebilir, arayüzlerde birikebilir veya kimyasal reaksiyonlarla birleşebilir. Eames ve çalışma arkadaşlarının iyon taşınımını hesaplama ve deneysel kinetikle birlikte incelemesi, atomik bariyer ile aygıt zaman ölçeğini ilişkilendirmenin erken örneklerindendir. Bununla birlikte tek bir göç bariyeri bütün cihazın ömrünü belirlemez: mobil kusur yoğunluğu, yolun bağlantılılığı ve gerçek sınır koşulları da gerekir. [R13]

ISOS ile IEC aynı amaca hizmet etmez

ISOS yaklaşımı araştırma örneklerinin saklama, ışık, sıcaklık ve dış ortam gibi farklı stresler altında daha karşılaştırılabilir biçimde değerlendirilmesini amaçlar. Testin ismini vermek yetmez; atmosfer, bağıl nem, örnek sıcaklığı, ışık spektrumu, elektriksel yük, kapsülleme, ölçüm aralığı ve numune sayısı belirtilir. Perovskitlere uyarlanmış uzlaşma metni, dinamik davranış ve geri kazanım gibi bu malzemelerin özgül sorunlarını özellikle ele alır. Çalışan cihaz için MPP altında yaşlandırma, açık devrede bekletmeden farklı bir deneydir. [R05]

IEC 61215 ise karasal PV modüllerinin tasarım yeterliliği ve tip onayına ilişkin standart ailesidir. Açık IEC kataloğu, bu testlerin nicel modül ömrü tahmini olarak yorumlanmadığını açıkça belirtir. Dolayısıyla bir test dizisinden geçmek, “bu teknoloji şu kadar yıl çalışacaktır” sonucuna eşit değildir. Belirli modül tasarımı, malzeme listesi ve üretim değişiklikleri yeterlilik bağlamında önemlidir. Bu kitapta standardın açık kapsamı doğrulanmıştır; tam metni görülmemiş madde numaraları, zorunlu test eşikleri veya sertifikasyon uygunluğu icat edilmemektedir. [R06]

İyi bir araştırma programı önce hücre düzeyinde mekanizmayı öğrenir, sonra paketlenmiş mini modülde ve tam modülde sınar. Açık kenarlı küçük hücre ile iyi kapsüllenmiş modül farklı nem giriş yollarına sahiptir. Küçük bir örnekte iyi çalışan kapsülleme, geniş panelde kenar uzunluğu/alan oranı, termal genleşme ve mekanik yük açısından başka davranabilir. Cam, yapıştırıcı ve sızdırmazlık malzemesi optik kayıp, kimyasal etkileşim ve geri dönüşüm bakımından da tasarımın parçasıdır.

T80, geri kazanım ve sansürlenmiş veri

T80, performansın seçilen başlangıç referansının %80'ine düştüğü zamanı belirtir. “Başlangıç” ilk ölçüm mü, ilk kararlı plato mu, ilk hızlı düşüş sonrası değer mi açıkça yazılmalıdır. Farklı başlangıç tanımları aynı cihaz için farklı T80 üretebilir. Gerçek başlangıç verimini gizleyip yalnızca normalize edilmiş eğri göstermek enerji değerlendirmesini zayıflatır. Hem mutlak güç/verim hem normalize edilmiş güç sunulmalı; duraklamalar, ölçüm dışı kalmalar ve karanlıkta geri kazanım görünür tutulmalıdır.

Bir cihaz 1000 saat sonunda %92 korunum gösteriyor ve izlenen süre boyunca seçilen T80 tanımındaki eşiğe hiç ulaşmıyorsa “T80 > 1000 saat, bu test koşullarında” denebilir; T80'nin kesin değeri ölçülmüş olmaz. Yalnız son noktayı bilmek yeterli değildir: cihaz daha önce eşik altına düşüp geri kazanmış olabilir. Eşik gözlenmeden deney sona erdiğinde süre gözlemi sağdan sansürlüdür. En kötü örneklerin ölçümünden çıkarılması ve yalnızca kalanların ortalamasının çizilmesi yapay dayanıklılık yaratır. Arıza veren cihazların ne zaman ve hangi nedenle veri setinden çıktığı korunmalıdır. Cihaz tamamen elektriksel olarak kopmuşsa bunu sıradan bir verim ölçümü eksikliği gibi göstermek doğru değildir.

Özgün enerji örneği: A hücresi 1000 saat boyunca doğrusal biçimde %24'ten %18'e, B hücresi %22'den %21'e insin. Sabit 1000 W/m^2 aydınlatmada ortalama verimler sırasıyla %21 ve %21,5 olur. Bir metrekaare için enerji yaklaşık 210 ve 215 kWh'dir. Başlangıç şampiyonu A, bu sınırlı senaryoda daha az enerji üretmiştir. Gerçek eğri doğrusal değilse zaman integralinin sayısal hesabı gerekir; karanlık araları ve ısınım değişimi de dahil edilir.

Hızlandırılmış testin geçerli aktarımı

Basit bir termal süreç için hız $k(T) = k_0 \exp[-E_a/(k_B T)]$ ile modellenenebilir. Aynı mekanizma baskın kalıyorsa yüksek sıcaklık süreci hızlandırır. Fakat bir faz geçişini aşmak, kapsülleyiciyi farklı rejime sokmak veya yeni reaksiyon açmak laboratuvar testini saha mekanizmasından koparabilir. Aktivasyon enerjisini tek sıcaklık noktasından çıkarmak mümkün değildir. Birden çok sıcaklıkta, yeterli örnekle ve benzer arıza imzasıyla model sınanmalıdır; nem, ışık ve gerilim etkileri ayrıca değerlendirilir.

Özgün hesapta $E_a = 0,60 \text{ eV}$, saha sıcaklığı 298,15 K ve test sıcaklığı 358,15 K alınsın. $AF = \exp[(E_a/k_B) \times (1/298,15 - 1/358,15)]$ yaklaşık 50'dir. Bu, ancak varsayılan tek mekanizma geçerliyse hız oranıdır. 1000 saati otomatik olarak 50.000 saat hizmet ömrüne çevirmek, bilinmeyen saha görev çevrimini ve diğer arızaları yok sayar. E_a 'nın

kendisi belirsizse AF üstel biçimde değişir; ömür tahmini tek sayı yerine model ve belirsizlikle raporlanmalıdır.

Saha çalışması laboratuvar modelini sınamak için gereklidir. Gece-gündüz çevrimi, mevsimsel sıcaklık, kirlenme, yağış, ışık spektrumu ve gerçek elektriksel yük birlikte etki eder. IEA PVPS hizmet ömrü raporu, “ömür sonu” tanımının teknik, ekonomik ve kullanıcıya bağlı yönlerini; fiziksel modeller ile sistem enerji hesabı arasındaki ilişkiyi ele alır. [R16] Öğretici uygulama olarak önce arıza tanımı dondurulur, sonra laboratuvar ve saha numunelerinde aynı kimyasal/elektriksel imzanın ortaya çıkıp çıkmadığı karşılaştırılır. Eşleşme gösterilmeden hızlandırma katsayısı aktarılmaz.

T80 hesabında başlangıç ve eşik seçimi

Gücün zaman serisi $P(t)$ olsun. Başlangıca göre normalize $p(t) = P(t)/P(0)$ tanımlandığında T80, $p(t)$ 'nin ilk kez 0,8'e ulaştığı süre olarak raporlanabilir. Hızlı başlangıç değişiminden sonra başka bir referansa normalize etmek farklı bir ölçüt üretir; buna aynı isim verilip başlangıç gizlenmemelidir. Numune test sonunda hâlâ eşik üstündeyse, son değer bir ömür tahmini değildir. Eşik hiç aşılmadıysa yalnız T80'in gözlem süresinden büyük olduğu söylenebilir.

Bir numune karanlıkta kısmen toparlanıyorsa, sürekli aydınlatma ile gündüz-gece çevrimi aynı veri üretmez. Sıcaklık, nem ve elektriksel yük de testin bağımsız parçaları değildir; biri diğerinin etkisini değiştirebilir. ISOS koşulları karşılaştırılabilir araştırma raporlaması için yararlıdır; IEC modül yeterlilik testlerinin amacı ve kapsamı farklıdır. Katalogdaki standart başlığı, okunmamış normatif maddelerin yerine geçmez. [R05] [R06]

Arrhenius grafiğini yanlış bir güven duygusuna çevirmemek

Tek bir etkin mekanizma için hız $k_{deg} = k_0 \exp[-E_a/(k_B T)]$ olsun. İki sıcaklık arasındaki hızlanma çarpanı, logaritmaları çıkarılarak elde edilir:

$$AF = \frac{k_{test}}{k_{use}} = \exp \left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right]. \quad (I.20.1)$$

$E_a = 0,60$ eV, kullanım sıcaklığı 25°C ve test sıcaklığı 85°C için yaklaşık 50 kat bulunur. Ama bu oranı zamanla çarparak hizmet ömrü vermeden önce iki sıcaklıkta aynı bozunma mekanizmasının baskın olduğu sınanmalıdır. Yüksek sıcaklıkta yeni bir faz, farklı elektrot reaksiyonu veya başka nem yolu ortaya çıkıyorsa tek E_a aktarımı geçersizleşebilir. En az üç sıcaklıkta tutarlı eğim görmek bile bütün saha koşullarını temsil etmez; mekanizma analizi ve gerçek saha verisiyle bağlantı gerekir. [R16]

Ömür verisinde yalnız ortalama değil dağılım da önemlidir. Az sayıda erken arıza, ortalama güç eğrisinde gizlenebilir. Numune başına seri tutulması, testten çıkarılan veya ölçümü kesilen numunelerin açık kaydı ve başarısızlık biçimlerinin sınıflandırılması araştırmanın tekrar üretilebilirliğini belirler.

Kendini sınaama

1. **1000 saat sonunda %95 korunum, 25 yıl ömür kanıtı mıdır?** Hayır. Yalnızca belirtilen test koşullarındaki gözlemdir; saha aktarımı için mekanizma ve hızlandırma modeli doğrulanmalıdır.
2. **T80 neden başlangıç tanımıyla verilmelidir?** İlk düşüş sonrası yeniden normalize etmek süreyi ve gerçek enerji kaybını değiştirebilir.
3. **Karanlıkta ısı testi iyi, MPP ışık testi kötü çıkarsa çelişki var mıdır?** Gerekmez. Işık ve elektriksel çalışma farklı ya da birleşik bozunma mekanizmalarını etkinleştirebilir.

İlk düşüş ile kalıcı bozunmayı ayırmak

Literatürde **burn-in**, ilk çalışma veya ön koşullandırma sırasında görülen başlangıç değişimini anlatır. Başlangıçta güç hızla düşüp sonra daha yavaş değişebilir; bazı etkiler karanlıkta bekleme veya yeniden koşullandırmayla kısmen geri dönebilir. Bu, her başlangıç düşüşünün zararsız veya geri dönüşlü olduğu anlamına gelmez. Ölçümde ilk güç, seçilen referans güç ve varsa geri kazanım ayrı kaydedilir.

Eşik, ömür ölçütü için seçilen sınırdır. T80'de kullanılan %80'in hangi başlangıca göre hesaplandığı bu yüzden sonucu değiştirir. Deney sonunda eşiğe henüz ulaşmamış numune için yalnız gözlem süresini aşan bir ömür bilgisi vardır. Bu numuneyi sanki o gün arızalanmış gibi ortalamaya katmak da sonsuz ömürlü saymak da yanlıştır.

İlk ilkelere malzeme araştırması: DFT'nin gücü ve sınırı

DFT neyi hesaplamaya çalışır?

Bir kristalin özellikleri atom çekirdekleriyle elektronların kuantum etkileşimlerinden doğar. Bütün elektronların tüm hareketini doğrudan izlemek çoğu gerçek katı için çok pahalıdır. **Yoğunluk fonksiyonel teorisi**, İngilizce adıyla DFT, temel durum enerjisini elektron yoğunluğuyla ilişkilendirerek problemi yeniden kurar. **Elektron yoğunluğu**, uzayın her küçük bölgesinde ne kadar elektron bulunduğunu anlatır. Bu kitapta DFT, “kimyasal formülü yaz, verimi öğren” makinesi olarak kullanılmaz.

Fonksiyonel, bir sayı yerine bütün bir fonksiyonu girdi alan matematiksel kuraldır. Elektronların değiş-tokuş ve korelasyon etkileri için pratik hesaplarda yaklaşık fonksiyoneller seçilir. **PBE**, böyle yaygın bir yaklaşımın adıdır. **Özuyum**, hesaplanan yoğunluğun ürettiği potansiyelin yeniden aynı yoğunluğu vermesine doğru yapılan tekrar sürecidir. **Geometri optimizasyonu**, atom konumlarını ve gerekirse hücre boyutunu kuvvetleri azaltacak biçimde değiştirmektir. Bu işlem en yakın yerel minimumda durabilir; doğadaki bütün olası yapılar arasında en iyi sonucu bulunduğunu garanti etmez.

Sayısal ayarlar neden fiziksel sonuç gibi görünür?

Kristali bilgisayarda sonlu sayıda dalga veya uzay noktasıyla temsil ederiz. **Kesme enerjisi**, düzlem dalga temsilinde ne kadar ayrıntı tutulacağını belirler. **k-noktası ağı**, kristalin periyodik elektronik durumlarının farklı dalga vektörlerinde örneklenmesidir. **Sözdepotansiyel**, çekirdeğe yakın bazı etkileri daha ekonomik bir temsil içinde toplar. Bu ayarlar yetersizse malzemeler arasındaki küçük enerji farkı sayısal hatadan doğabilir.

Sentetik yakınsama örneği: aynı iki yapı arasındaki enerji farkı daha ayrıntılı ayarlarda 40, 28, 25 ve 24 meV/atom çıksın. Son iki değer yakınlaştığı için bu gözlenebilirin o aralıkta sayısal duyarlılığı küçülmektedir. “Gerçek enerji farkı kesin 24” sonucu çıkmaz; seçilen fonksiyonelin hatası ve eksik rakip fazlar hâlâ vardır.

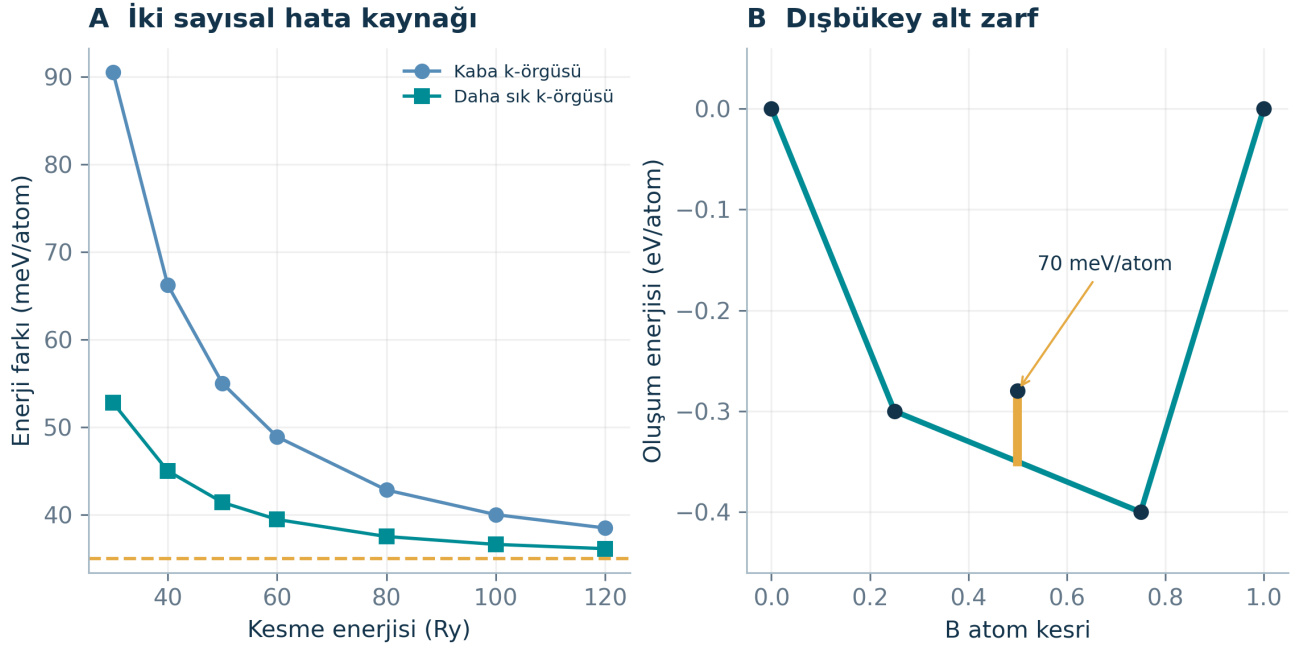
Yakınsama, modelin sayısal olarak tutarlı çözümüdür; modelin doğayı doğru temsil etmesi başka sınamadır.

Oluşum enerjisi, bileşiği seçilmiş element referanslarıyla karşılaştırır. **Dışbükey zarf**, aynı toplam bileşimi verebilen rakip faz karışımlarının en düşük enerji sınırıdır. Zarfın üzerinde olmak, belirli havuz ve modelde ayrışma için enerji kazancı olduğunu gösterir. **Fonon**, kristal titreşimlerinin kuantumlaştırılmış modudur; titreşim hesabı yapının

küçük yer değiştirmelere tepkisini sorgular. Bu üç kontrol farklı sorular sorar ve hiçbiri tek başına deneysel sentez başarısı değildir.

Anlama kontrolü: hesap “başarılı” bitti

Programın hata vermeden durması, fiziksel sonucun doğrulandığı anlamına gelmez. Yapının kimyasal tanımı, kuvvetler, enerji farkının yakınsaması, rakip fazlar ve kullanılan yaklaşımın sınırları ayrıca incelenmelidir. Dosyanın oluşmasıyla bilimsel kanıtın oluşmasını ayır.



Şekil 34. DFT sonuçlarını iki ayrı ölçekte sınamak. A panelinde kesme enerjisi ve k-örgüsü etkisi, B panelinde enerji-alt zarf ilişkisi gösterilir. Bütün sayılar sentetiktir. B panelindeki adayın zarf üstü farkı 70 meV/atomdur; ayrışma süresi değildir. [R18] [R19] [R20]

Hesaplamalı keşif, çok sayıda formül yazıp bant aralığı hesaplamaktan daha zorlu bir iştir. Bir formül atomların nerede bulunduğunu, hangi sıralanışın oluştuğunu, hangi fazlarla yarıştığını veya hangi kusurların taşıyıcıları öldüreceğini söylemez. DFT bu soruların önemli bir bölümüne fiziksel bir model sağlar; yine de her sonucun yöntem, yapı, yakınsama ve sıcaklık sınırı vardır. Elektronik yapı hesabının kusursuz çalışması, hesaplanan yapının laboratuvarda üretilebildiği anlamına gelmez.

Önce yapıyı tanımla, sonra enerjiye bak

Başlangıç yapısında kimyasal formül, atom sayısı, hücre vektörleri, koordinatlar, doluluklar, yük ve manyetik durum açık olmalıdır. Kısmi doluluk gösteren kristalografik bir dosya, standart bir periyodik DFT hesabında kendiliğinden fiziksel düzensiz alaşıma dönüşmez. Düzenli süperhücreler, örneklenmiş yerleşimler veya uygun düzensizlik yaklaşımları gerekir. SQS, küçük bir hücrede rastgele alaşımın seçilmiş korelasyonlarını temsil etmeyi amaçlar; tek SQS bütün konfigürasyon uzayının garantili temsili değildir. Hücre boyutu ve örnek seçimi sınıranır. [R24]

Geometri gevşetmesi bir yerel minimum arar. Bir başlangıçtan yakınsama, küresel en düşük enerjili yapıyı bulduğunu kanıtlamaz. Farklı başlangıç hacimleri, simetriler, atom sıralamaları ve fiziksel olarak makul manyetik düzenler denenebilir. Yakınsamayan hesap için “kararsız malzeme” denmez: elektronik çözüm, geometri algoritması veya seçilen yöntem başarısız olmuş olabilir. Kuvvet ve stres yakınsaması tek başına yalnızca incelenen serbestliklerde bir durağan noktaya yaklaşıldığını gösterir; yerel minimum değerlendirmesi için ilgili yapısal bozunmalara karşı enerji eğriliği ve uygun fonon denetimi gerekir. Sentez yolu ve rekabetçi fazlar yine ayrı sorulardır.

PBE gibi yarı-yerel değişim-korelasyon fonksiyonelleri, hesaplama maliyeti ve kapsamı nedeniyle yaygın bir başlangıçtır. PBE'nin özgün formülasyonu genel gradyan yaklaşımına dayanır. [R17] Ancak Kohn-Sham özdeğer farkı otomatik olarak ölçülen optik veya kuaziparçacık bant aralığı değildir. Hibrit fonksiyoneller, GW veya uygun başka yöntemler farklı hata kaynaklarını azaltabilir; hiçbir yöntem etiketi bütün kimyalarda doğru sonucu garanti etmez. Ağır elementlerde spin-yörünge etkileşimi, geçiş metallerinde manyetik düzen ve korelasyon, zayıf bağlı sistemlerde dispersiyon dikkat gerektirir.

Yakınsama ve karşılaştırılabilir enerji

Düzlem dalga kesimi, k-noktası ağı, elektronik eşik, kuvvet toleransı, smearing, pseudopotansiyel ve hücre boyutu hedef büyüklüğe göre yakınsanır. Toplam enerjinin değişimi küçükken stres veya fononlar hâlâ değişebilir. SSSP çalışması, pseudopotansiyelleri yalnızca tek bir enerji testiyle değerlendirmek yerine fononlar, basınç, bantlar ve başka ölçütleri birlikte kullanmanın önemini gösterir. [R19] Yakınsama bütçesi hesaplanan en küçük anlamlı farktan daha sıkı olmalıdır; 5 meV/atamluk sıralama için 20 meV/atamluk yöntem belirsizliğiyle kesin karar verilemez.

Lejaeghere ve çalışma arkadaşlarının kodlar arası karşılaştırması, tanımlı bir problemde farklı DFT uygulamalarının sayısal uyumunun sistematik olarak sınırlanabileceğini göstermiştir. Bu tür doğrulama, aynı fonksiyonelin deneysel gerçekliği tam temsil ettiğinin kanıtı değildir. [R18] İki kodun aynı yanlış fiziksel varsayım altında

anlaşması mümkündür. Bilimsel dosya bu nedenle sayısal yeniden üretim ile fiziksel doğruluk değerlendirmesini ayırır; bağımsız kontrol yalnızca aynı girdiyi farklı bilgisayarda çalıştırmakla sınırlanmaz.

Oluşum enerjisi, faz diyagramı ve serbest enerji

Oluşum enerjisi element referanslarına göre kazancı ölçer. Negatif oluşum enerjisi, bileşiğin başka bileşiklere ayrılmayacağını göstermez. Konveks zarf, aynı toplam bileşimi sağlayan faz karışımları içindeki en düşük enerjiyi temsil eder. $E_{\text{hull}} = E_{\text{aday}} - E_{\text{en iyi karışım}}$, atom başına aynı birimde hesaplanır. Eksik rakip faz havuzu zarfı yanlış yükseltebilir ve aday olduğundan iyi gösterebilir. Bu yüzden olası ikili, üçlü ve daha yüksek bileşikler, alternatif polimorflar ve referansların hesap yöntemleri incelenir.

Özgün örnek: AB_2 adayının enerji değeri $-0,80 \text{ eV/atom}$, aynı bileşimi sağlayan en iyi A-B faz karışımı $-0,86 \text{ eV/atom}$ olsun. Adayın zarf üstü enerjisi $0,06 \text{ eV/atom} = 60 \text{ meV/atom}$ dur. Bir formül biriminde üç atom olduğundan ayrışma lehine fark $0,18 \text{ eV/formül birimidir}$. Negatif oluşum enerjisine rağmen aday termodinamik temel duruma ait değildir. Bu sonuç sentezin imkânsızlığını tek başına kanıtlamaz; kinetik olarak tutulabilen metastabil fazlar vardır. Sun ve çalışma arkadaşlarının metastabilite araştırması, gözlenen metastabilite ölçeğinin kimyaya bağlılığını gösterir; evrensel bir “şu meV altında kesin sentezlenir” kuralı çıkarılmaz. [R20]

Sıfır kelvin toplam enerjisi, çalışma sıcaklığındaki serbest enerji değildir. Titreşim, konfigürasyon, manyetik ve gerektiğinde elektronik entropi katkıları önem kazanabilir. G yaklaşık $E + F_{\text{vib}} - T S_{\text{config}} + pV$ gibi bileşenlerle düşünülür; aynı katkı iki kez sayılmamalıdır. Açık bir gaz rezervuarıyla dengede sentezde kimyasal potansiyel, sıcaklık ve kısmi basınç belirleyicidir. Faz ayrışmasına karşı denge ile proses sırasında oluşabilirlik farklı problemler olduğundan, sentez penceresi yalnızca oda sıcaklığı bant yapısından çıkarılmaz.

Fononlar ve sonlu sıcaklık

Fonon hesabı atomların küçük yer değiştirmelerine verilen kuvvet yanıtını inceler. Hayalî frekanslar, seçilen yapının harmonik yaklaşımda ilgili bozulmaya karşı kararsız olabileceğini gösterir. Önce süperhücre, k/q ağı, kuvvet doğruluğu ve akustik toplam kuralı gibi sayısal konular incelenir. Yalnızca Γ noktasında kararlılık, Brillouin bölgesinin tamamını kapsamaz. Yumuşak mod gerçekse atomlar o mod boyunca hareket ettirilip daha düşük simetrik yapı aranabilir. Togo ve Tanaka'nın fonon hesabı çalışması, bu tür hesapların yapı ve termodinamik araştırmasındaki temel araçlarını açıklar. [R21]

Harmonik kararsız bir yüksek sıcaklık fazı anharmonik etkilerle tutulabilir; tersine, harmonik olarak kararlı yapı ışık altında kimyasal olarak bozunabilir. Moleküler

dinamikte 10 veya 20 pikosaniye boyunca parçalanmamak uzun dönem dayanıklılık kanıtı değildir. Nadir olayların görülmesi için zaman ölçeği, örnek hacmi ve bariyerler düşünülmelidir. Simülasyon termostadı, zaman adımı ve başlangıç konfigürasyonu da kaydedilir. “AIMD kararlı” yerine süreyi, sıcaklığı, hücreyi ve gözlenen yapısal ölçütleri yazmak daha bilgilendiricidir.

Kusurlar, iyon göçü ve gerçek arayüz

Kusur oluşum enerjisinin tipik yazımı şöyledir:

$$\Delta H_f(D^q) = E_{\text{kusurlu}} - E_{\text{kusursuz}} - \sum_i n_i \mu_i + q(E_F + E_{\text{VBM}}) + E_{\text{düzeltme}} \quad [\text{eV}] \quad (1.21.1)$$

Bu denklemde q , temel yük biriminde boyutsuz tamsayı kusur yüküdür; diğer bölümlerde temel yük sabiti için kullanılan q simgesinden farklıdır. E_F , değerlik bandı tepesine göre ölçülen Fermi enerjisi, E_{VBM} ise ortak enerji referansındaki değerlik bandı tepesidir. n_i burada süperhücreye eklenen atom sayısı için pozitif seçilmiştir; başka işaret tanımları da mümkündür fakat açıklanmalıdır. Kusurun yükü, kimyasal potansiyeller ve Fermi düzeyi sonucu değiştirir. Yüklü süperhücrelerde sonlu boyut ve potansiyel hizalama düzeltmeleri gerekir. Geçiş seviyesi, yakalama katsayısı ve kusur yoğunluğu farklı büyüklüklerdir; derin seviye bulunması tek başına yeniden birleşme hızını vermez. Freysoldt ve çalışma arkadaşları noktasal kusur hesaplarının kuramsal ve sayısal temelini derler. [R22]

Göç için yalnızca başlangıç ve bitiş enerjileri yeterli değildir; aradaki yolun en yüksek noktası belirlenir. Climbing-image NEB gibi yöntemler seçilen yolun eyer noktalarını arar. Alternatif yollar, yük durumları ve kusur derişimi yine araştırılmalıdır. [R23] Özgün ölçek hesabında geçiş denemesi 10^{13} s^{-1} , bariyer 0,50 eV ve sıcaklık 300 K seçilirse tek denemenin Arrhenius hız ölçeği yaklaşık $4 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ olur. Bu atomik atlama ölçeğidir; bir iyonun film boyunca geçiş süresi veya cihaz ömrü değildir. Uzun menzilli hareket için yol geometrisi, rastgele yürüyüş ve mobil türlerin sayısı gerekir.

Arayüz modelinde yüzey sonlanması, kafes uyumsuzluğu, yapay gerinim, yük aktarımı, dipol ve kimyasal reaksiyonlar tanımlanır. Tekil malzemelerin vakuma göre bant kenarlarını yan yana koymak ancak ön taramadır. Arayüz kusurları ve seçici kontak davranışı değerlendirilmeden aygıt parametrelerine iyimser sınır değerler koymak kanıt zincirini koparır. Bütün girdiler, yazılım sürümü, pseudopotansiyel kimliği, ham çıktı ve analiz betiği saklanır; sonuç tablosu tek başına yeniden üretilebilirlik değildir.

Sayısal yakınsama ile model doğruluğunu ayırmak

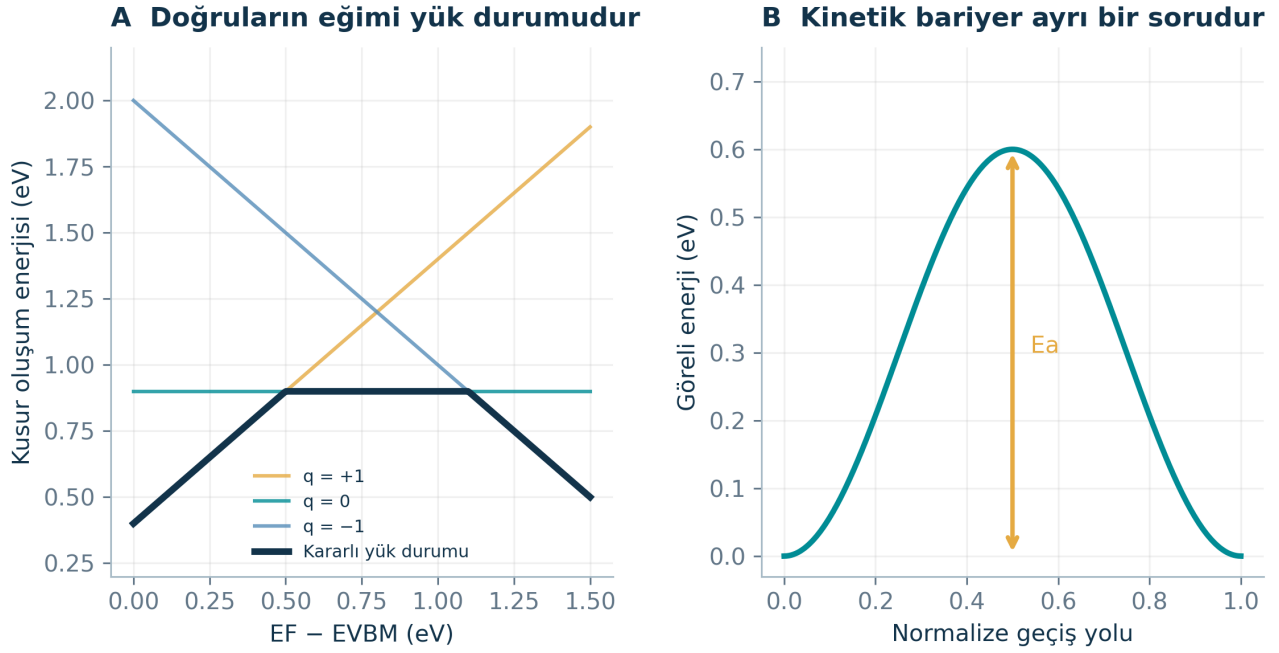
DFT hesabında kesme enerjisini veya k-örgüsünü artırınca sonucun değişmemesi, seçilen yaklaşımın sayısal olarak çözüldüğünü gösterir. Aynı sonucun gerçek malzemenin özelliği olduğunu tek başına göstermez. Değiş tokuş-korelasyon yaklaşımı, spin-yörünge bağlaşımı, sıcaklık, düzensizlik ve kusur yapısı ayrı fiziksel seçimlerdir. Özellikle ağır elementli soğurucularda bant yapısı karşılaştırması yapılırken bu seçimler tutarlı tutulmalıdır. [R17] [R18] [R19]

Karşılaştırılacak büyüklük toplam enerji farkıysa, yakınsama testi doğrudan o fark üzerinde yapılmalıdır. Her fazın toplam enerjisinde büyük ortak bir hata varken fark küçük kalabilir; tersine tek tek enerjiler sakın görünürken birkaç meV/atom düzeyindeki sıralama değişebilir. Referans fazların farklı sayısal ayarlarla hesaplanması, faz diyagramına fiziksel olmayan bir kayma sokar. Aynı atom türü için uyumlu potansiyeller ve yeterli yakınsama, faz havuzunun ortak zemini olmalıdır.

Alt zarfın geometrisinden ayrışma tepkimesine

İkili A-B sisteminde $x_B = 0,50$ bileşiminde bir adayın enerjisi $-0,28$ eV/atom olsun. $x_B = 0,25$ 'te $-0,30$ ve $x_B = 0,75$ 'te $-0,40$ eV/atom fazları varsa, eşit atomik oranlı karışım aynı toplam bileşimi $-0,35$ eV/atomda sağlar. Adayın zarf üstü farkı $0,07$ eV/atomdur. Bu fark, aynı bileşimde daha düşük enerjili bir ayrışma kombinasyonunun varlığını gösterir; adayın ne hızda ayrışacağını söylemez.

Çok bileşenli durumda aynı fikir doğrusal programlama olur: referans fazlarının negatif olmayan miktarlarını seç, element miktarlarını koru ve toplam enerjiyi küçült. Eksik bir rakip faz eklendiğinde alt zarf düşebilir; bu yüzden dar faz havuzunda bulunan sıfır fark, tam kimyasal sistemde kararlılık garantisi değildir. Entropi ve çevrenin kimyasal potansiyelleri dahil edilince ilgili termodinamik potansiyel de değişir. [R20]



Şekil 35. Kusur oluşum enerjisi ile kinetik bariyerin farklı görevleri. A panelinde oluşum enerjisinin Fermi düzeyine göre eğimi kusurun yük sayıdır; alt zarf kararlı yük durumunu verir. Bu sentetik örnekte geçişler 0,50 ve 1,10 eV'dedir. B paneli 0,60 eV bariyerli örnek bir yol gösterir; gerçek bir NEB hesabının çıktısı değildir. [R22] [R23]

Fonon kararlılığı ve kusur yük durumları

Yapı gevşetmede kuvvetlerin küçülmesi, enerjinin bir durağan noktasına ulaşıldığını gösterir. Küçük yer değiştirmelere karşı eğrilik matrisinin özdeğerleri titreşim frekanslarının karesiyle ilişkilidir. Negatif eğrilik, harmonik modelde sanal frekans olarak görünür. Böyle bir mod, seçilen yapının o yönde gevşeyebileceğini düşündürür; fakat sayısal gürültü, yetersiz süperhücre ve sonlu sıcaklıkta anharmonik kararlılık ayrıca incelenir. Harmonik sıfır sıcaklık analizi, tek başına çalışma sıcaklığındaki faz ömrü değildir. [R21]

Kusur oluşum enerjisi ise kusurlu ve kusursuz hücre enerji farkına atom rezervuarlarını ve elektron rezervuarını ekler. Elektron rezervuarına bağlı doğrusal EF terimi nedeniyle yük durumları farklı eğimlere sahiptir. Termodinamik geçiş seviyesi iki yük durumunun eşit oluşum enerjisidir; optik geçiş veya taşıyıcı yakalama bariyeriyle aynı büyüklük değildir. Düşük oluşum enerjili bir kusurun sık oluşması mümkündür, fakat yeniden birleşmeye etkisini belirlemek için yakalama fiziği de gerekir. [R22]

Kendini sına

- 1. Negatif oluşum enerjisi faz kararlılığını kanıtlar mı?** Hayır. Aynı bileşimi sağlayan bütün ilgili faz karışımlarıyla karşılaştırma gerekir.
- 2. İki DFT kodu aynı bant aralığını verdiğinde deneysel bant aralığı doğrulanır mı?** Hayır. Sayısal uyum gösterilmiş olur; ortak model hatası kalabilir.

3. Fononlar temiz, kısa AIMD koşusu sorunsuz ise laboratuvara hazır mıyız? Tek başına değil. Rekabetçi fazlar, kusurlar, sentez penceresi, arayüz ve pratik kısıtlar ayrıca değerlendirilmelidir.

Manyetik durum ve anharmoniklik kavramlarını açmak

Elektronun **spin** denen kuantum özelliği manyetik davranışa katkı verir. Bir yapıda yerel manyetik momentlerin aynı yönde, zıt yönde veya başka bir düzende yerleşmesi toplam enerjiyi değiştirebilir. “Manyetik durumu tanımla” uyarısı, özellikle böyle seçeneklerin fiziksel olarak mümkün olduğu malzemede tek başlangıç düzenini bütün olasılıkların yerine koymamayı söyler. Her PV malzemesinde güçlü manyetizma bulunduğu iddiası değildir.

Harmonik yaklaşım, atomların küçük yer değiştirmelerinde enerjinin yaklaşık bir parabol gibi arttığını varsayar. Bu durumda atomların birlikte titreştiği normal kipler ve onların frekansları hesaplanabilir; bu titreşimlerin kuantumlarına **fonon** denir.

Anharmoniklik, daha büyük hareketlerde veya bazı yumuşak yapılarda bu basit parabolün yeterli olmamasıdır. Titreşimler birbirini etkileyebilir ve sıcaklıkla etkili kuvvetler değişebilir. Bu nedenle sıfır sıcaklıktaki harmonik bir işaret ile yüksek sıcaklıktaki yapısal davranış aynı sorunun yanıtı değildir. [R21]

Sayısal **yakınsama**, ağ, kesme enerjisi veya tolerans daha sıkı seçildiğinde ilgilendiğimiz sonucun yeterince az değişmesidir. Bu, modelin doğayı doğru anlattığı anlamına gelmez. Yanlış bir fiziksel yaklaşım çok hassas bir sayıya yakınsayabilir. Model hatası, sentez davranışı ve deneysel doğrulama, sayısal yakınsamanın ötesinde ayrıca incelenmelidir.

Malzemedan hücreye: optik ve elektriksel modelleme

Bir aygıt modeli hangi parçaları birleştirir?

Optik model önce ışığın katmanlara nasıl girdiğini ve hangi konumda soğurulduğunu hesaplar. Bu sonuç, birim hacimde birim zamanda oluşan elektron-delik çiftleri için **üretim profili** olur. Elektriksel model sonra yük yoğunluklarını, elektrik alanı, taşıyıcı akışını ve yeniden birleşmeyi birlikte çözer. **Sürüklenme**, elektrik alanının; **difüzyon**, taşıyıcı yoğunluğu farkının oluşturduğu net taşınımıdır. Her noktaya giren, çıkan, üretilen ve kaybolan yüklerin hesabı **süreklilik denklemi**yle tutulur.

Poisson denklemi, yük dağılımıyla elektostatik potansiyeli bağlar. **Sınır koşulu**, modelin uçlarda ne olacağını söyler: kontak gerilimi, taşıyıcı geçişi veya yüzeyde kaybolma hızı gibi. Aynı iç malzeme parametreleri farklı kontak koşullarında farklı güç verebilir. Bu yüzden bant aralığı ve yaşam süresini girmek, hücreyi tam tanımlamak değildir.

Bilgisayar sürekli filmi nasıl çözer?

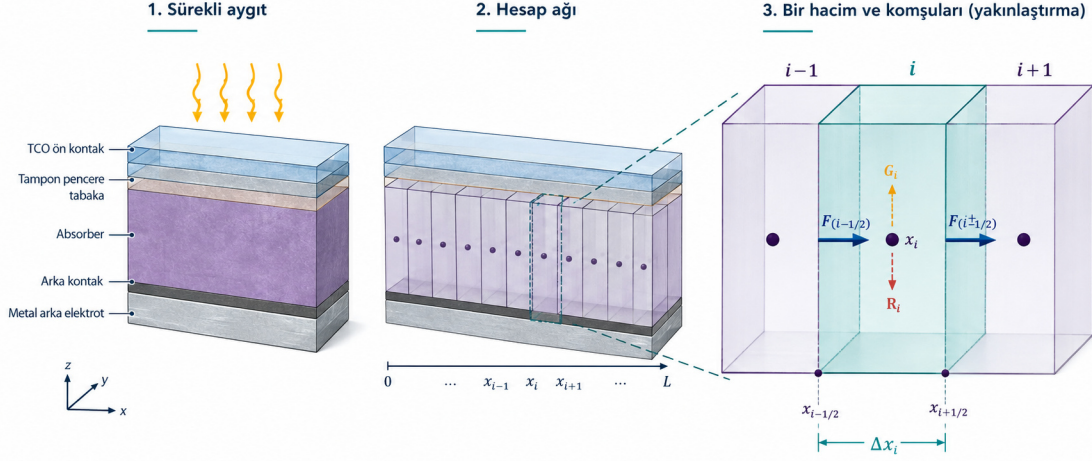
Ağ, kalınlık boyunca veya yüzeyde yerleştirilen hesap noktalarıdır. **Ayrıklaştırma**, sürekli denklemleri bu sonlu noktaların ilişkilerine dönüştürmektir. **Sentetik örnek**: 1 μm filmi başlangıçta 10 eşit bölmeye ayırırsak her bölme 100 nm'dir. Kontak yakınındaki önemli değişim 5 nm içinde gerçekleşiyorsa bu ağ onu çözemez. Ağ sıklaştırıp akım, gerilim ve yük korunumu sonuçlarının değişmediğini kontrol ederiz. Grafik pürüzsüz görüldüğü için çözümün yeterli olduğu varsayılmaz.

Parametre, modele girilen malzeme veya arayüz özelliğidir. **Duyarlılık**, bir parametrenin küçük değişmesinin çıktıyı ne kadar değiştirdiğidir. **Tanımlanabilirlik**, farklı parametrelerin ölçümünden ayrı ayrı çıkarılıp çıkarılamadığıdır. Örneğin daha kötü hacim yaşam süresiyle daha iyi kontak, tek bir J-V eğrisini benzer biçimde açıklayabilir. Bu durumda çok iyi eğri uyumu, hangi mekanizmanın doğru olduğunu seçmeye yetmez. Bir modelin “kalibrasyonu”, parametrelerini belirli veriye göre ayarlamaktır.

Doğrulama, başka koşullardaki, ayarda kullanılmamış veriyi de açıklayıp açıklamadığını sınamaktır. Bir sıcaklığa uydurulmuş modeli farklı ışık şiddeti ve sıcaklıkta denemek güçlü bir kontroldür. Modelin güç kazanımı önerisini, parametre belirsizlikleri içindeki bir aralık olarak okumalıyız.

Anlama kontrolü: tek doğru parametre takımı mı?

İki farklı parametre takımı aynı eğriyi açıklıyorsa daha fazla ondalık basamakla en iyi uyumu seçmek sorunu çözmez. İki modelin ayrıldığı bir ölçüm koşulu bul: farklı ışınım, sıcaklık veya zaman cevabı. Yeni ölçümü bu ayrımı yapmak için seçmek modellemeyi deneye bağlar.



Bir hacmin çıkış akısı, komşusunun giriş akısıdır

Şekil 36. Sürekli aygıttan korunumlu sonlu hacim hesabına. Ortadaki ağı, sağda i hacmi ve komşularına büyütülür. F , yüzlerden geçen parçacık akısını; G_i ve R_i hacim içindeki üretim ve yeniden birleşmeyi temsil eder. Sol yüzün içeri akısı ile sağ yüzün dışarı akısı birlikte dengelenir; bu panel akım işaretleri kuralı yerine parçacık korunumu üzerinden okunur. [R25] [R26] [R27] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

Şekilde F parçacık akısıdır; elektrik akımının işaretiyle karıştırılmamalıdır. Bir boyutlu ağda i hacmindeki ortalama elektron yoğunluğu, iki yüzün akı farkıyla ve hacim içi üretim-kayıpla değişir:

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{F_{i-1/2} - F_{i+1/2}}{\Delta x_i} + G_i - R_i, \quad J_n = -qF_n. \quad (I.22.1)$$

Komşu hacimler aynı yüz akısını kullandığında, bütün hacimlerin denklemleri toplandığında iç yüzlerin katkıları birbirini götürür. Böylece yalnız sınırdan giriş-çıkış ve toplam üretim-kayıp kalır. Sayısal korunumun dayanağı, her düğümde ayrı ayrı düzgün görünen bir eğri elde etmekten daha güçlü olan bu ortak yüz hesabıdır. [R25] [R27]

İyi soğuran bir yarıiletkenin iyi güneş hücresi olması zorunlu değildir. Fotonlar aktif tabakada soğurulmalı, yükler ayrışmalı, yeniden birleşmeden seçici kontaklara ulaşmalı ve dış devreye iş verebilmelidir. Bu zincirde bir bağlantının ideal kabul edilmesi ötekilerin başarısını gizleyebilir. Aygıt modellemenin amacı arzu edilen bir verimi üretmek değil, ölçülmüş veya gerekçelendirilmiş parametrelerle hangi kaybın baskın olduğunu ve hangi deneyin onu ayırabileceğini göstermektir.

Önce optik enerji bütçesi

Pasif bir optik yığında her dalga boyunda yansıma R, geçiş T ve bütün katmanlardaki soğurmaların toplamı enerjiyi korumalıdır: $R + T + \sum A_i = 1$. Aktif tabakada soğurulan ışık yararlı üretime adaydır; metalde veya taşıma tabakasında soğurulan ışık genellikle parasitik kayıptır. “Toplam soğurma %95” ifadesi hangi katmanda gerçekleştiği belirtilmeden aygıt akımı hakkında yeterli bilgi vermez. Dağınık saçılma varsa ölçüm geometrisi ve kullanılan küresel integratör gibi araçlar ayrıca önemlidir.

Tek geçişli, yansız ve homojen bir tabakada $A \approx 1 - \exp(-\alpha d)$ yazılabilir. Özgün örnekte $\alpha = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ve $d = 300 \text{ nm} = 3 \times 10^{-5} \text{ cm}$ için $\alpha d = 3$, A yaklaşık %95,0 bulunur. Aynı kalınlıkta $\alpha = 10^3 \text{ cm}^{-1}$ olduğunda A yaklaşık %2,96'dır. Bu karşılaştırma, bant kenarına yakın zayıf soğurmanın neden kalınlık ve ışık hapsi tasarımı belirlediğini açıklar. Gerçek cihazda çoklu yansıma ve girişim varsa bu basit ifade yeterli değildir.

Düzlemsel katmanlarda transfer matrisi, dokulu veya nanoyapılı sistemlerde uygun dalga optiği ya da ışın izleme yaklaşımı kullanılabilir. Refraktif indis $n(\lambda)$, sönüm katsayısı $\kappa(\lambda)$, kalınlık ve yüzey geometrisi ölçümden veya açıkça belirtilmiş hesaplardan gelir. Kalın ve düzensiz tabakalarda koherans varsayımı gözden geçirilir. Solcore, malzeme ve güneş hücresi modellerini farklı ölçeklerde birleştirmek amacıyla geliştirilmiş açık bir araç örneğidir; kullanıldığı durumda hangi alt modelin seçildiği ve hangi sınırların geçerli olduğu raporlanır. [R26]

Üretim, taşıma ve yeniden birleşme

Optik modelin yerel soğurmasından $G(x)$ [$\text{cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ veya $\text{m}^{-3} \text{ s}^{-1}$] üretim profili çıkarılır. Elektrik modeli aynı birim sistemini kullanmalıdır. Bir boyutlu sürüklenme-difüzyon modelinde elektrostatik potansiyel Poisson eşitliğiyle, elektron ve delik akımları taşıma eşitlikleriyle belirlenir:

$$\frac{d}{dx} \left(\varepsilon \frac{d\psi}{dx} \right) = -\rho. \quad (1.22.2)$$

$$J_n = q\mu_n n E + q D_n \frac{dn}{dx}. \quad (1.22.3)$$

$$J_p = q\mu_p p E - q D_p \frac{dp}{dx}. \quad (1.22.4)$$

$E = -d\psi/dx$; μ hareketlilik, D difüzyon katsayısıdır. Süreklilik eşitlikleri G ve yeniden birleşme R üzerinden akımın konumsal değişimini bağlar. İşaret konvansiyonu baştan sabitlenmelidir. Kararlı durumda toplam akımın cihaz boyunca korunması, ağ ve çözücü doğrulamasının güçlü bir kontrolüdür. Kontaklarda sınır koşulları fiziksel olarak seçilmezse iç bölgede çok doğru bir çözüm elde etmek aygıtı doğru modellemeye yetmez.

Işımalı yeniden birleşme $R_{\text{rad}} = B(n_p - n_i^2)$ biçiminde yazılabilir. SRH modeli, tuzak aracılı yakalama ve boşalmanın etkisini taşır; Auger yeniden birleşmesi yüksek taşıyıcı yoğunluklarında önem kazanabilir. Arayüz yeniden birleşmesi hacimsel kusur yoğunluğuna keyfi olarak katılmamalıdır. Taşıma katmanlarının seçiciliği, enerji bariyerleri, temas direnci ve şönt yolları ayrı fiziksel katkılardır. SCAPS'ın özgün çalışması polikristal yarıiletken hücrelerinin modellenmesini; SIMSALABIM ise açık kaynak sürüklenme-difüzyon çözümlerini temsil eden araç örnekleridir. Araç adı model doğrulamasının yerine geçmez. [R27] [R25]

Kalınlığı artırmak her zaman işe yaramaz

Taşıyıcı toplamada difüzyon uzunluğu $L = \sqrt{D\tau}$ kaba bir ölçek verir. Klasik, dejenere olmayan koşullarda Einstein ilişkisi $D = \mu kT/q$ 'dur. Özgün örnekte $\mu = 10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $T = 298,15 \text{ K}$ ve $\tau = 100 \text{ ns}$ ise D yaklaşık $0,257 \text{ cm}^2/\text{s}$, L yaklaşık $1,60 \text{ }\mu\text{m}$ çıkar. Ömür 1 ns 'ye düşerse L yaklaşık $0,160 \text{ }\mu\text{m}$ olur. Diğer koşullar aynıyken 500 nm film ilk durumda toplama açısından umut verici, ikinci durumda daha zor olabilir. Ancak elektrik alanı ve temas sınırları gerçek toplama uzunluğunu değiştirdiği için bu hesap bir boyutlandırma sezgisidir, aygıt simülasyonunun yerine geçmez.

Kalınlık artışı ışık soğurmasını artırırken hacimsel yeniden birleşmeyi, taşıma mesafesini ve üretim zorluklarını büyütebilir. Çok ince filmde iğne deliği, şönt ve optik kaçış belirleyici olabilir. Bu nedenle optimum kalınlık, yalnızca α 'dan seçilmez. Bir tasarım çalışması kalınlığı tararken hareketlilik ve kusur yoğunluğunu gerçek dışı sabit tutuyorsa sonuç “bu parametreler altında optimum” diye yazılır. Deneyde kalınlık değişimi morfolojiyi ve arayüzü de değiştiriyorsa etkiler ayrıştırılır.

Ters problem: aynı eğriyi açıklayan farklı dünyalar

İleri problemde parametreler verilir ve J-V hesaplanır. Ters problemde ölçülen eğriden parametreler çıkarılmaya çalışılır. Bu işlem çoğu zaman tekil değildir: daha yüksek hareketlilik ile daha kısa ömür, belirli koşullarda benzer toplama davranışı verebilir; arayüz kaybı ile hacimsel tuzaklar aynı V_{oc} düşüşünü açıklayabilir. Beş serbest parametreyle dört özet sayı uydurmak görünürde kusursuz fakat bilimsel olarak zayıf olabilir. Parametre sayısından daha önemli olan, ölçümün her parametreye bağımsız duyarlılığıdır.

Özgün tanımlanabilirlik örneği: deney yalnızca $L^2 = D\tau$ ürününü kısıtlıyor olsun. $D = 0,10 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\tau = 100 \text{ ns}$ ve $D = 1,0 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\tau = 10 \text{ ns}$ aynı L^2 değerini verir. Tek ölçümden ikisini ayırmak mümkün değildir. Bağımsız hareketlilik veya zaman çözünürlüklü ölçüm bu eşdeğerliği bozabilir. Bir modelin hata fonksiyonunda uzun, düz bir vadi varsa en iyi noktanın çok basamaklı yazılması ek bilgi yaratmaz. Güven bölgesi, parametre korelasyonları ve alternatif uyumlar gösterilmelidir.

Pratik çözüm, karanlık ve aydınlık J-V, farklı ışık şiddetleri, sıcaklık, EQE, mutlak PL ve geçici yanıtı ortak fiziksel parametrelerle açıklamaktır. Her yeni veri türünde bütün parametreleri yeniden serbest bırakmak sınama gücünü azaltır. Önce bir veri alt kümesiyle kalibrasyon yapılır; başka koşuldaki eğri önceden tahmin edilip sonra ölçülür. Doğrulama, modele daha önce gösterilmemiş davranışta başarılı olmayı gerektirir.

Tandem ve modül bağlantısı

İki terminalli seri tandem için akım uyumu temel bir kısıttır; alt hücrelerin ayrı ayrı maksimum güçlerini toplamak seri cihazın gücünü vermez. Yaklaşık düşünmede ortak akımda alt hücre gerilimleri toplanır ve toplam güç bu ortak akım boyunca en büyüklenir. Dört terminalli yapıda ayrı elektriksel çalışma mümkündür fakat optik filtreleme, bağlantı ve güç elektroniği kayıpları yine hesaba girer. Karşılaştırma terminal sayısı ve bağımsız MPP devre sayısını açıkça belirtmelidir.

Belirsizlik yayılımında tek “ideal” parametre takımı yerine fiziksel olarak mümkün ortak dağılımlar kullanılır. Bant aralığı, soğurma ve hareketlilik aynı kimyasal değişimle korelasyonluysa bağımsız rastgele seçilmemelidir. Sonuç, verim dağılımı yanında hangi parametrenin kararı etkilediğini gösterir. Böylece pahalı bir yeni hesap veya ölçüm, belirsizliği en çok azaltacağı yere yönlendirilir. Öncelik, en güzel simülasyon eğrisine değil sonucu değiştirebilecek bilgiye verilir.

Sayısal aygıt modelini kurulabilir bir problem haline getirmek

Bir boyutlu aygıtı yalnız kalınlık, bant aralığı ve hareketlilik listesi olarak tanımlamak yeterli değildir. Önce koordinat, kontaklar, bant kenarları, dielektrik geçirgenlik, katkı ve sabit yük belirlenir. Sonra optik modelden $G(x)$, seçilen mekanizmalardan $R(n,p,x)$ kurulur. Elektron ve boşluk akımları ile Poisson ve süreklilik denklemleri birlikte çözülür. Kontakların taşıyıcı yoğunluğu veya akı sınırları, modelin fiziki anlamını belirler.

Sonlu hacim ayırıklaştırmasında her küçük hücrenin iki yüzündeki akım farkı, hacimdeki net üretime eşittir. Elektron için kararlı durumda $J_{n,i+1/2} - J_{n,i-1/2}$ yaklaşık $q(R_i - G_i)\Delta x_i$ olur. Komşu hücreler aynı ara yüz akısını paylaşır. Bütün hücreler toplanınca iç yüz akıları birbirini götürür; yalnız dış kontaklar ve toplam üretim/kayıp kalır. Korunum kontrolünün kaynağı budur. [R25] [R26] [R27]

Modelin en az şu sınırları sağlaması gerekir: karanlık termal dengede sıfır net akım; optik güç bilançosu; ağ inceltildiğinde kararlı çıktı; toplam elektriksel akımın konumdan bağımsız olması; sıfır kayıp veya düşük alan gibi basit sınırlarda beklenen analitik davranış. Sayısal yakınsama mesajı bu kontrollerin yerine geçmez.

Kalınlık optimumunu analitik bir örnekle görmek

Işık $x = 0$ 'dan girsin, elektron toplama yüzeyi $x = d$ 'de olsun. Yansımaz $G(x) = \alpha \phi \exp(-\alpha x)$, örnek bir toplama modeli $P_{col}(x) = \exp[-(d - x)/L]$ seçelim. Gelen foton başına toplanan kesir bu iki fonksiyonun integralidir:

$$F(d) = \frac{\alpha \exp(-d/L)}{\alpha - 1/L} [1 - \exp(-[\alpha - 1/L]d)] . \quad (I.22.5)$$

Bu ifade $\alpha = 1/L$ dışında yazılmıştır; o noktada limit $\alpha d \exp(-d/L)$ 'dir. $\alpha = 2 \mu\text{m}^{-1}$ ve $L = 1 \mu\text{m}$ için $F(d) = 2[\exp(-d) - \exp(-2d)]$ olur. Türevi sıfırladığımızda $d = \ln 2 \mu\text{m} = 0,693 \mu\text{m}$, maksimum $F = 0,5$ bulunur. Optik soğurma ise kalınlıkla sürekli artar. Aynı aygıtta daha fazla soğurma ile daha fazla toplanan akımın neden ayrılabilceği böylece açık görülür.



Şekil 37. Kalınlık optimumunun açık geometri örneği. Solda soğurma monoton artarken karşı yüz toplayıcıya ulaşan kesir bir maksimumdan geçer. Sağdaki geometri ve formülde $\alpha = 2 \mu\text{m}^{-1}$, $L = 1 \mu\text{m}$ kullanılır. Üstel toplama olasılığı öğretim modelidir; gerçek bir heteroyapının Poisson-taşıma çözümünün yerine geçmez.

Ön tarafta toplayıcı bulunan yarı sonsuz modelde $P_{col} = \exp(-x/L)$ seçseydik farklı kalınlık bağımlılığı elde ederdik. Bu karşılaştırma önemli bir araştırmacı alışkanlığı öğretir: bir optimuma inanmadan önce hangi geometri, sınır ve kayıp mekanizmasının o optimumu ürettiğini çiz.

Kendini sına

- 1. Toplam soğurma %95 ise EQE de %95 midir?** Hayır. Soğurmanın hangi katmanda olduğu ve oluşan yüklerin ne kadarının toplandığı gerekir.
- 2. Tek J-V eğrisine çok iyi uyum fiziksel parametreleri tekil belirler mi?** Genellikle hayır. Bağımsız duyarlılığa sahip ek ölçümler gerekir.
- 3. Seri tandemde bağımsız alt hücre maksimum güçleri toplanır mı?** Hayır. Ortak akım koşulu altında toplam gerilim ve güç hesaplanmalıdır.

Optik sabit, ağ ve doğrulama neyi temsil eder?

Bir tabakanın **optik sabitleri**, ışığın malzeme içinde yayılmasını ve zayıflamasını tarif eder. Kırılma indisi ışığın faz ilerlemesiyle, sönüm katsayısı soğurmayla ilişkilidir; ikisi de dalga boyuna bağlı olabilir. Aynı kalınlıkta fakat farklı optik özellikte iki film, aynı sayıda taşıyıcı üretmeyebilir. Üretim profilinin elektriksel modele girdi olması bu nedenle gereklidir.

Sayısal ağ, sürekli uzayı hesaplanabilir küçük bölgelere ayırır. Komşu iki hacmin ortak yüzeyinden çıkan akım, diğerine giren akımla tutarlı olmalıdır; aksi halde hesap sanki yük yaratıyor veya yok ediyormuş gibi davranır. Ağ inceltme, birim ve korunum kontrolleri sayısal tutarlılığı sınar. **Bağımsız doğrulama** ise aynı uyumda kullanılmayan bir ölçümle modelin öngörüsünü sınamaktır. Tek eğriyi çok iyi açıklayan parametre takımı başka sıcaklıkta başarısız olabilir; uyum kalitesi tek başına mekanizma kanıtı değildir.

Sınırdaki sembolleri de açalım. **Dirichlet koşulu**, örneğin kontak potansiyelinin belirli bir değerde tutulmasıdır. **Neumann koşulu**, sınırdaki normal türev veya ona bağlı akıyı belirtir; uygun modelde sıfır akı yalıtkan bir sınırı temsil edebilir. **Robin koşulu**, değer ile normal türevi ilişkilendirir; yüzeydeki taşıyıcı fazlasıyla orantılı yeniden birleşme akısı bunun fiziksel örneklerinden biridir. Γ_D , Γ_N ve Γ_R , bu farklı koşulların uygulandığı sınır parçalarının adıdır. Bunlar yeni malzeme tabakaları değildir; hesap alanının dışarıyla nasıl etkileştiğini tarif eder.

Makine öğrenmesiyle malzeme aramak: tahminden kanıta

Makine öğrenmesi ne öğrenir?

Makine öğrenmesi, örneklerdeki giriş-çıkış ilişkilerini kullanarak yeni girişler için tahmin üreten yöntemlerdir. Girişe **özellik**, tahmin edilmeye çalışılan değere **hedef** denir. Örneğin bileşim ve bazı yapı bilgileri giriş; hesaplanmış bant aralığı hedef olabilir. Model bu hedefi öğrenir. Hedef yalnız hesaplanmış bant aralığıysa modelin çıktısı doğrudan sentezlenebilirlik, gerçek kusur davranışı veya hücre verimi değildir. **Eğitim kümesi**, parametreleri öğrenmekte kullanılan veridir. **Doğrulama kümesi**, model ve ayar seçiminde yardımcı olur. **Test kümesi**, son performansı ölçmek için seçim sürecinden ayrı tutulur. **Aşırı uyum**, eğitim örneklerinin ayrıntılarını öğrenip yeni örneklerde başarısız olmaktır. Başarılı öğrenmenin ölçüsü yalnız bilinen veriyi açıklamak değil, uygun biçimde ayrılmış yeni durumda işe yaramaktır.

Veri sızıntısı neden iyi sonuç gibi görünür?

Veri sızıntısı, tahmin sırasında bilinmeyecek bilginin model seçimine veya girişlere dolaylı biçimde karışmasıdır. **Sentetik örnek**: aynı filmin on ayrı bölgesinden ölçüm alıp satırları rastgele eğitim ve teste bölelim. Model testteki filme çok benzeyen eğitim bölgelerini zaten görmüştür. Sonuç, yeni bir üretim lotunu tahmin etme başarısını olduğundan iyi gösterebilir. Bölme birimi satır değil, gerçek bağımsız numune veya lot olmalıdır.

Hesaplanan malzemelerde aynı ailenin çok yakın bileşimleri veya aynı yapının farklı hesap kayıtları benzer sorun yaratabilir. Hangi “yeni” duruma genelleme istediğimizi önceden yazmalıyız: yeni ölçüm noktası mı, yeni lot mu, yeni bileşim mi, bütünüyle yeni yapı ailesi mi? Bunlar farklı testlerdir. [R29]

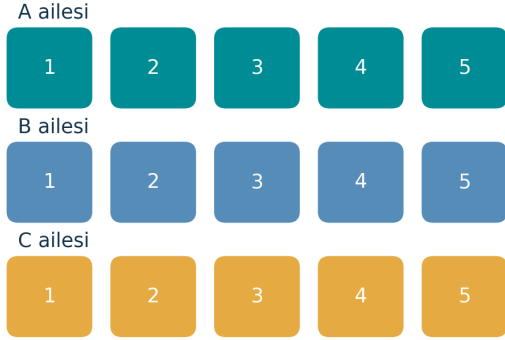
Belirsizlik tahmini, modelin güvenini bir aralıkla ifade etmeye çalışır; bu güvenin gerçek hata sıklığıyla uyumu ayrıca sınanmalıdır. **Dağılım dışı örnek**, eğitim verisinden önemli biçimde farklı koşuldur. Modelin emin görünmesi böyle bir örnekte güvenilir olduğu anlamına gelmeyebilir.

Aktif öğrenme, sonraki hesabı veya deneyi sonuçların sağlayacağı bilgiye göre seçer. En yüksek tahminli adayla en çok belirsizliği azaltacak aday aynı olmayabilir. Bir kısmını bilinen iyi bölgeyi geliştirmeye, bir kısmını belirsiz alanı sınamaya ayırmak araştırma bütçesinin tasarım sorusudur. Tahmin adayları sıralar; deneysel kanıtın yerini almaz.

Anlama kontrolü: hangi başarı raporlandı?

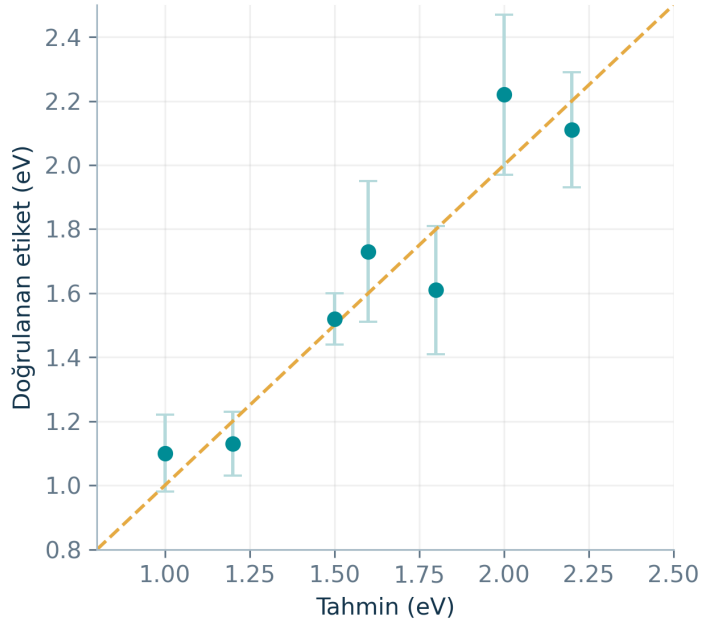
Bir model bant aralığını iyi tahmin ediyorsa “iyi güneş hücresi buldu” diyebilir miyiz? Hayır. Bant aralığı, soğurma ve enerji paylaşımı için girdilerden biridir. Faz, kusur, arayüz, üretim ve kararlılık hedefleri yoksa o basamaklara ilişkin başarı ölçülmemiştir.

A Kimyasal aileye göre ayırım



A ve B: eğitim • C: tutulan test

B Nokta tahmini + belirsizlik



Şekil 38. Veri ayrımı araştırma sorusuna uymalıdır. A paneli bir kimyasal ailenin bütünüyle teste ayrılmasını anlatır. B paneli tahmin ve belirsizlik gösterimidir; sayılar sentetiktir. Bir aralığın güvenilirliği, tutulmuş veride kapsama testiyle sınanır. [R28] [R29]

Makine öğrenmesi, pahalı hesapların ve deneylerin hangi sırayla yapılacağını iyileştirebilir. Bu rol önemlidir çünkü aday uzayı çok büyüktür. Fakat modelin görevi ile araştırmanın nihai iddiası aynı değildir. Bir model oluşum enerjisini tahmin ediyor olabilir; araştırmacı sentezlenebilir, kararlı, düşük kusurlu, uygun arayüzlü bir güneş hücresi istemektedir. Arada çok sayıda kapı vardır. Modelin iyi çözdüğü tek görevi bütün zincire yaymak, hesaplamalı araştırmada en sık görülen anlam kaymalarından biridir.

Veri kümesi gerçekte neyi temsil ediyor?

Bir veri satırının kimyasal formülü kadar kaynağı da önemlidir. Enerji deneysel mi hesaplanmış mı; hangi fonksiyonel, pseudopotansiyel, spin durumu ve geometri kullanılmış; yakınsama başarısızları nasıl ele alınmış? Aynı bileşiğin farklı yapıları ayrı fiziksel örneklerdir; aynı yapının yinelenen kopyaları bağımsız örnek değildir. “Bant aralığı” sütunu optik ölçüm, PBE özdeğer farkı ve hibrit hesap karışımıysa modelin hedefi belirsizleşir. Etiket gürültüsünü daha büyük ağıla ortadan kaldırmak mümkün değildir.

Negatif sonuçlar veri kümesinde görünmelidir. Başarısız sentezler, kararsız gevşetmeler, ölçüm dışına çıkan örnekler ve süreç koşulları korunmadığında model

yalnızca başarılı yayımların dünyasını öğrenir. “Bu yöntemle üretilmedi” ile “malzeme imkânsız” aynı etiket değildir. Laboratuvar kaydındaki başarısızlık çözücü, atmosfer, ekipman veya proses penceresinden kaynaklanabilir. Kullanılabilir öğrenme hedefi, sonucu ve koşullarını birlikte ifade etmelidir.

Veri sızıntısı ve sahte genelleme

Veri sızıntısı, testte elde edilmemesi gereken bilginin eğitim veya model seçimine karışmasıdır. Aynı yapının hafifçe bozulmuş kopyalarını rastgele bölmek, aynı deney partisinin örneklerini eğitim ve teste dağıtmak veya normalizasyonu bütün veri üzerinde öğrenmek iyimser skor yaratabilir. Test sonucuna tekrar tekrar bakarak özellik ve model seçmek de testin bağımsızlığını tüketir. Kapoor ve Narayanan, makine öğrenmesine dayalı bilimde bu sorunun yaygın ve çok biçimli olduğunu sistematik olarak incelemiştir. [R29]

PV araştırmasında bölme, kullanıma uygun olmalıdır. Yeni bir laboratuvar partisine genelleme için parti bazlı; yeni kimyaya genelleme için kimyasal aile bazlı; gelecekteki adaylara genelleme için zaman bazlı değerlendirme anlamlı olabilir. Bütün yeni elementleri eğitimden çıkarmak çok sert ama bazı görevlerde gerekli bir sınamadır. Rastgele bölmenin sonucu yine yararlıdır fakat yalnızca benzer dağılımdaki yeni örnekler hakkında bilgi verir. “Genel amaçlı” sözü dağılım dışı doğruluk garantisi değildir.

Özgün örnek: 100 ana yapının her biri için 20 küçük pertürbasyon üretildiğinde 2000 satır oluşsun. Rastgele %80/%20 bölme yapıldığında çoğu test yapısının kardeşleri eğitimde bulunur. Model yeni ana yapıyı öğrenmeden yüksek başarı elde edebilir. Ana yapıları bütün gruplarıyla ayırmak, gerçek genelleme sorusunu daha iyi sınar. Aynı mantık aynı substrattan kesilmiş çok sayıda güneş hücresi ve aynı makaleden türetilmiş yinelenen veriler için geçerlidir.

İyi regresyon skoru keşif başarısı değildir

Ortalama mutlak hata, hedefin ortalama ne kadar yanlış tahmin edildiğini anlatır. Ancak keşif kararı bir eşikte veriliyorsa yanlış pozitifler daha önemli olabilir. Matbench Discovery çalışması oluşum enerjisi tahminiyle termodinamik kararlılık sınıflamasını ve geriye dönük testle ileriye dönük aramayı ayırır; düşük regresyon hatasının eşik yakınında yüksek yanlış pozitifleri engellemeyebileceğini gösterir. [R28] Bu nedenle precision, recall, yanlış pozitif oranı, başarı başına hesap maliyeti ve top-k zenginleşmesi görevle birlikte seçilir.

Özgün Bayes örneği: 10.000 adayın yalnızca %1'i gerçekten hedefi karşılıyor olsun. Duyarlılık %90 ise 100 gerçek pozitiften 90'ı bulunur. Özgüllük %95 ise 9900 negatifin %5'i, yani 495'i yanlış pozitif olur. Seçilen 585 adayın yalnızca 90'ı doğrudur: pozitif öngörü değeri %15,4. “Doğruluk çok yüksek” görünmesine rağmen deney bütçesinin

çoğu başarısız adaylara gidebilir. Özgüllük %99'a çıkarsa 99 yanlış pozitif kalır ve oran %47,6'ya yükselir. Nadir hedeflerde taban oranı ihmal edilemez.

Belirsizlik, epistemik yani bilgi/model eksikliği ile aleatorik yani veri veya süreçteki doğal değişkenlik olarak kavramsal biçimde ayrılabilir. Ensemble saçılımı veya modelin verdiği standart sapma otomatik olarak kalibre edilmiş güven aralığı değildir. Tahmin aralıklarının belirtilen kapsama oranına gerçekten ulaşp ulaşmadığı bağımsız veride ölçülür. Birden fazla model aynı eğitim kümesini ve benzer mimariyi kullanıyorsa birlikte aynı yönde yanılabilir. Konformal yöntemler gibi yaklaşımlar da kendi değiştirilebilirlik ve dağılım varsayımlarına sahiptir; dağılım kayması altında garantileri sınırsız değildir.

Evrensel atomlararası potansiyellerin doğru konumu

Atomlararası potansiyel enerji, kuvvet ve bazen stres tahmin eder. Bunlar yapı gevşetmesi veya moleküler dinamik maliyetini azaltabilir. Model standart biçimiyle bant aralığı, optik geçiş gücü, kusur yakalama katsayısı veya PV verimi üretmez. Bir enerji modelinin çıktılarını bu elektronik büyüklükler gibi yorumlamak kategorik hatadır. Eğitim kapsamı dışındaki koordinasyon, oksidasyon durumu, yük, yüzey ve arayüzler ayrıca sınanmalıdır. Üç boyutlu kristallerde başarı, seyrek yüzey kimyasında aynı başarıyı garanti etmez.

Pratik sıra şöyledir: önce formül ve yapı kimyasal olarak denetlenir; ardından modelin eğitim benzerliği ve belirsizliği değerlendirilir; düşük maliyetli sıralama yapılır; seçilmiş adaylar bağımsız ve yakınsanmış hesaplara kontrol edilir. Model çıktısını “kararlı malzeme” yerine “bu model altında şu skorlu öncelik adayı” diye yazmak kanıt düzeyini korur. DFT kontrolü de sentez kanıtı değildir. Etiket zinciri her adımda korunursa negatif sonuçlar sonraki model için değerli veri olur.

Aktif öğrenme ve yeniden üretilebilirlik

Aktif öğrenmede model, bir sonraki hesap veya deneyden en çok yararlanacağı adayı seçer. Yalnızca en yüksek tahmini verimi seçmek, aynı kimyasal bölgeyi tekrar tekrar sömürebilir. Belirsizlik, çeşitlilik, maliyet ve pratik yapılabilirlik birlikte düşünülür. Öğrenme hedefi karar odaklı kurulabilir: “hangi ucuz test bu aileyi eleyecek?” sorusu bazen “hangi aday en yüksek puanlı?” sorusundan daha değerlidir. DeneySEL geri besleme için örneklerin kimliği, hazırlanma koşulları ve başarısızlık nedenleri makinece okunabilir tutulur.

FAIR ilkeleri verinin bulunabilir, erişilebilir, birlikte çalışabilir ve yeniden kullanılabilir olmasını hedefler. Açık erişimle bire bir aynı şey değildir; kısıtlı verinin dahi açıklanmış erişim koşulları ve yeterli metadata'sı olabilir. [R30] Araştırma paketi veri sürümünü, bölme listesini, ön işleme adımlarını, rastgele tohumları, yazılım sürümlerini, model ağırlıklarını, donanım hassasiyetini ve son değerlendirme tarihini saklar. Bir dosyanın

SHA-256 özeti, o dosyanın değişmediğini denetlemeye yarar; içindeki bilginin doğru olduğunu kanıtlamaz. Aynı girdinin aynı sonucu üretmesi yeniden üretimdir; bağımsız laboratuvar başarısı daha yüksek kanıt düzeyidir.

Genelleme sorusunu veri ayırımından önce yazmak

“Model bilinmeyen malzemeyi buluyor mu?” sorusunun birkaç farklı anlamı olabilir. Aynı kimyasal ailede yeni bileşim kestirmek, yeni kristal prototipe geçmek ve tümüyle yeni element kombinasyonunu kestirmek aynı görev değildir. Rasgele satır ayırımı, aynı malzemenin yakın varyantlarını eğitim ve teste dağıtırsa birinci görevde iyi sonuç verirken üçüncüsü hakkında az bilgi taşıyabilir. Test ayırımı, araştırmanın kullanacağı genelleme türüne göre seçilmelidir. [R28] [R29]

Ölçekleme, özellik seçimi ve hiperparametre ayarı test grubuna bakmadan yapılır. Yapı gevşetilmişse gevşetme sırasında test etiketinden bilgi kullanılıp kullanılmadığı da araştırılır. Aynı kaynaktan gelen birden çok hesap, bağımsız numune gibi sayılmamalıdır. Kompozisyon, yapı ve kaynak kimliği üzerinden tekrarların saptanması veri temizliğinin bilimsel parçasıdır.

Tahmin belirsizliğini seçime bağlamak

Bir model $1,40 \pm 0,05$ eV ve $1,45 \pm 0,40$ eV gibi iki kestirim üretiyorsa, yalnız ortalama yakınlığına göre seçim yapmak belirsizliği yok sayar. Hedef aralığa girme olasılığı, hesap maliyeti ve bilinmeyen kimyaya uzaklık birlikte değerlendirilebilir. Bunun için hata çubuklarının kapsamı tutulmuş veride sınanmalıdır: örneğin %90 aralığı denilen aralıklar gerçekte sonuçların yaklaşık %90'ını kapsıyor mu? Kalibre olmayan dar aralık, yüksek güven görüntüsüdür.

Aktif öğrenmede modelin en sevdiği adayları tekrar tekrar hesaplamak, bilinen bölgeyi daraltabilir. Bir seçim partisine yüksek beklenen başarı, yüksek belirsizlik ve kimyasal çeşitlilik taşıyan örnekler birlikte konabilir. Amaç yalnız tahmin skorunu iyileştirmek değil, araştırma kararını değiştirecek bilgi toplamaktır. Her yeni hesap sonrası veri sürümü, seçim kuralı ve doğrulanan sonuç saklanır; böylece geriye dönük başarılı aday seçimi ile ileriye dönük öngörü ayrılır. [R30]

Kendini sına

1. Ortalama enerji hatası düşük model bütün kararlı adayları doğru seçer mi?

Hayır. Eşik yakınındaki hatalar ve adayların taban oranı yanlış pozitifleri belirler.

2. Aynı yapının farklı pertürbasyonları eğitim ve testte bulunabilir mi? Amaç yeni yapıya genelleme ise birlikte gruplanıp ayrılmalıdır; aksi durumda sızıntı oluşabilir.

3. Evrensel potansiyel iyi gevşetme yaptıysa PV malzemesi bulundu mu? Hayır.

Elektronik, kusur, arayüz, sentez ve aygıt kanıtları hâlâ eksiktir.

Deney tasarımı ve istatistik: etkili bir değişikliği nasıl ayırırsın?

Bir farkı neden hemen etki sayamayız?

İki hücrenin verimi farklı olduğunda değiştirilen işlem, başlangıç malzemesi, günün koşulu veya ölçüm farkı neden olabilir. **Deney birimi**, işlemin bağımsız uygulandığı en küçük birimdir. Aynı wafer üzerindeki çok sayıda ölçüm noktası, çok sayıda bağımsız wafer anlamına gelmez. **Kontrol grubu**, karşılaştırma için işlem dışındaki koşulları mümkün olduğunca eşleşmiş referanstır. **Faktör**, değiştirdiğimiz koşul; **yanıt**, ölçtüğümüz sonuçtur.

Rastgeleleme, grupların işlem veya ölçüm sırasını rastgele belirleyerek sıraya bağlı etkilerin tek gruba yığılmasını azaltır. **Bloklama**, gün, lot veya cihaz gibi bilinen değişkenlik kaynağı içinde karşılaştırma yapmaktır. İki yöntemin amacı numuneleri gelişigüzel üretmek değil, ilgilendiğimiz etkiyi karıştıran kaynakları yönetmektir. [R31]

Ortalama, saçılma ve bağımsız tekrar

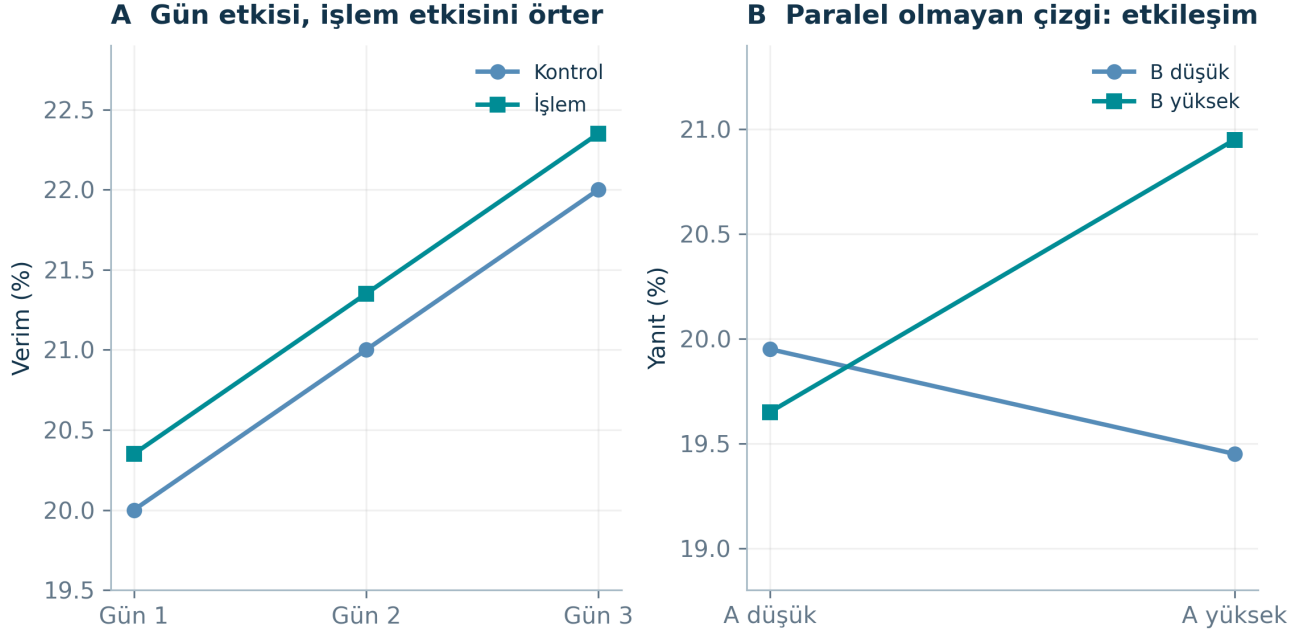
Ortalama, değerlerin toplamının sayısına bölümüdür. **Standart sapma**, ölçümlerin ortalama çevresindeki tipik saçılmasını anlatır. **Sentetik örnek**: üç bağımsız hücre %20, %21 ve %22 verim versin. Ortalama %21, örnek standart sapması 1 yüzde puandır. Bu sapma verilerin %1 yanlış olduğu anlamına gelmez; üç hücrenin birbirinden ne kadar farklı olduğunu özetler. Ortalama tahmininin belirsizliği ise örnek sayısı ve bağımsızlıkla da değişir.

Güven aralığı, seçilen istatistiksel yöntemin tekrarlı örneklemelerdeki kapsama özelliğine dayanan aralıktır. Yalnız bir ortalamayı daha çok ondalıkla yazmak güveni artırmaz. **p değeri**, belirli sıfır hipotezi ve varsayımlar altında gözlenen veya daha uç verinin olasılığıyla ilgilidir; hipotezin doğru olma olasılığı değildir. **Etki büyüklüğü**, farkın miktarını anlatır. Çok küçük ama istatistiksel olarak ayırt edilebilen fark üretimde önemsiz olabilir; büyük görünen ama belirsiz fark ise yeni veri gerektirebilir.

Etkileşim, bir faktörün etkisinin diğer faktörün düzeyine göre değişmesidir. Örneğin katkı düşük tavlama sıcaklığında yarar, yüksek sıcaklıkta zarar verebilir. Yalnız tek bir sıcaklıkta katkıyı denemek genel sonucu göstermez. **Faktöriyel tasarım**, faktör düzeylerinin kombinasyonlarını planlı biçimde dener. Aşağıda sayıları, kararı önceden belirlenmiş bir deney düzenine yerleştireceğiz.

Anlama kontrolü: yirmi ölçüm mü, iki deney mi?

Bir kontrol wafer ve bir işlem wafer üzerinde onar nokta ölçüldüyse yirmi bağımsız işlem tekrarı yoktur. Noktalar wafer içi değişkenliği gösterir. İşlemin farklı waferlarda tekrarını değerlendirmek için bağımsız wafer üretimleri gerekir. İstatistikte doğru sayılması gereken birim, tabloda kaç satır olduğu değildir.



Şekil 39. Bloklaşma ve etkileşimin öğretici örnekleri. A panelinde gün etkisi büyük, aynı gün içindeki işlem farkı +0,35 yüzde puandır. B panelinde bir faktörün etkisi diğer faktörün düzeyine göre işaret değişir. Bütün yanıtlar açık formüllerle oluşturulmuştur. [R31]

Laboratuvar araştırmasının pahalı kısmı yalnızca cihaz kullanımı değildir; yanlış nedensel sonuca bağlanan haftalardır. Yeni bir katkıyla daha yüksek verim elde edildiğinde katkı gerçekten işe yaramış olabilir. Fakat aynı gün nem düşmüş, çözelti yaşı değişmiş, tavlama plakası farklı davranmış veya operatör daha iyi film kaplamış da olabilir. İstatistik, sonradan güzel p-değeri üreten bir ek araç olarak değil, bu alternatifleri deney kurulurken ayıran düşünce biçimi olarak kullanılmalıdır.

Deney birimi ile ölçüm tekrarını ayır

Bir substrat üzerindeki sekiz piksel çoğu zaman sekiz tamamen bağımsız üretim deneyi değildir. Aynı çözeltiyi, kaplama adımını ve tavlamayı paylaşırlar. Aynı hücreden 50 J-V eğrisi almak ise üretim değişkenliğini ölçmez; cihazın ölçüm ve zaman davranışını ölçer. Örneklem büyüklüğü raporlanırken kaç bağımsız çözelti, substrat, üretim partisi ve cihaz bulunduğu ayrı ayrı belirtilir. Aksi durumda teknik tekrarlar bağımsız örnekmiş gibi sayılır ve belirsizlik küçültülür.

Özgün örnek: katkılı örneklerin tek bir substratındaki 12 piksel %23,0, kontrolün başka gün üretilmiş 12 pikseli %22,0 ortalama versin. Toplam “n = 24” görünse de

katkı etkisi gün ve substrat etkisiyle iç içedir. Aynı gün, aynı kontrollü koşullarda birden çok bağımsız substrata rastgele dağıtılmış katkı ve kontrol gerekir. Birden çok gün tekrarı, sonuçların üretim değişkenliğinde korunup korunmadığını gösterir. Piksel düzeyinde analiz yapılacaksa hiyerarşik yapı hesaba katılır.

Rastgeleleştirme, bloklama ve kör analiz

Rastgeleleştirme, bilinmeyen etkenlerin sistematik biçimde bir gruba yığılmasını azaltır. Bloklama, bilinen rahatsız edici etkenleri düzenler: gün, çözelti partisi veya fırın konumu blok olabilir. Her blok içinde hem kontrol hem müdahale üretmek, günler arası değişimi grup farkından ayırmaya yardımcı olur. NIST'in deney tasarımı kaynakları, rastgele blok ve faktöriyel tasarımları bu amaçla ele alır. [R31] Rastgeleleştirme, tüm koşulları rastgele ve kayıtsız bırakmak değildir; tanımlı düzen içinde atanma sırasını tarafsızlaştırmaktır.

Kör analiz mümkün olduğunda örnek etiketleri, görüntü segmentasyonu veya eğri dışlama kararını veren kişiden gizlenebilir. Kabul/dışlama ölçütleri veriye bakmadan yazılır: örneğin ölçüm kantağının kopması, açık fiziksel kısa devre veya kalibrasyon arızası. “Verimi düşük” olması kendi başına dışlama gerekçesi değildir. Dışlanan veri ve gerekçe ek dosyada kalır. Numune üretilmeden belirlenen ölçütler, sonradan sonuca uyarlanan kurallardan daha güçlüdür.

Tek tek değişken değiştirmek etkileşimi kaçırabilir

İki faktörlü deneyde düşük/yüksek A ve B düzeylerinin dört birleşimi birlikte ölçülür. Bir faktörün etkisi diğerine bağlıysa etkileşim vardır. Bölümün sonundaki kodlanmış model ve çizgi grafiği bu hesabı adım adım kurar.

Üç veya dört faktör olduğunda tam faktöriyel deney maliyetli olabilir. Kesirli tasarımlar hangi etkilerin birbirine karıştığı bilinerek kullanılabilir; karışan etkiler sonradan ayırıcı deneyle sınanır. Tarama aşamasından sonra yanıt yüzeyi ile optimum çevresi araştırılabilir. Ancak ilk küçük veri kümesinde optimum görünen nokta, gürültüden seçilmiş olabilir. Seçilen koşul yeni ve bağımsız üretim partilerinde doğrulanır. Optimizasyonda kullanılan örneklerle doğrulama örnekleri ayrı görev görür.

Etki büyüklüğü, belirsizlik ve seçim yanlılığı

Bir grup için yalnızca en iyi hücreyi raporlamak dağılımı gizler. Ortalama/medyan, yayılım, tüm noktalar, verim, V_{oc} , J_{sc} , FF ve üretim başarısı birlikte yararlıdır. Şampiyon hücre bir olasılıksal uç değerdir; daha fazla hücre üretilen grup sırf örnek sayısı yüzünden daha yüksek şampiyon bulabilir. “Kontrolde 8, müdahalede 80 hücreden en iyiler” adil bir proses karşılaştırması değildir. Bağımsız sertifikalı rekor başka bir soru, tekrarlanabilir proses avantajı başka bir sorudur.

Özgün bağımsız-grup hesabında iki grubun her birinde 10 bağımsız örnek, standart sapmalar 0,5 yüzde puan ve ortalamalar arasındaki fark 0,6 puan olsun. Farkın standart hatası $\sqrt{(0,5^2/10 + 0,5^2/10)} \approx 0,224$ puandır. Uygun yaklaşık t aralığında %95 güven aralığı kabaca $0,6 \pm 0,47$ puan olur. Bu, örneklerin bağımsız ve model varsayımlarının makul olduğu öğretici senaryodur; tek substratın pikselleri için doğrudan kullanılamaz. Eşleştirilmiş tasarımda ise blok içi farkların değişkenliği kullanılmalıdır.

p-değeri, sıfır hipotezi ve model altında verinin ne ölçüde beklenmedik olduğunu değerlendirir; etkinin pratik büyüklüğü veya hipotezin doğru olma olasılığı değildir. Çok sayıda katkı, tavlama, çözücü ve ölçüt denenip yalnızca en düşük p-değeri seçilirse yanlış keşif riski artar. Ana sonlanım önceden seçilir, çoklu karşılaştırmalar ve keşifsel analizler açıkça belirtilir. Bir etki istatistiksel olarak belirgin fakat üretim maliyeti ve ömür kaybı nedeniyle önemsiz olabilir; karar ölçütü bilimsel ve pratik amacı birlikte taşınmalıdır.

Nedensel mekanizma için müdahale zinciri

“Katkı → büyük tane → yüksek verim” zinciri üç ayrı iddia içerir. Katkının tane boyutunu değiştirdiği, tane boyutunun ilgili elektriksel kaybı etkilediği ve bu değişimin verime neden olduğu ayrı ayrı sınanmalıdır. Katkı aynı zamanda yüzey kimyasını, enerjileri ve kristalleşme hızını değiştiriyorsa tane boyutu yalnızca eşlik eden işaret olabilir. Mekanizma için kontrol katkısı, aynı morfoloji fakat farklı kimya, doz serisi, tersine çevirme veya farklı hazırlama yolu gibi ayırıcı müdahaleler değerlidir.

Araştırmacı her hipotezin karşısına bir rakip açıklama ve ikisini ayıran gözlenebilir yazabilir. Örneğin V_{oc} iyileşmesi hacim pasivasyonundan mı, kontak seçiciliğinden mi? Çıplak film, tek kontaklı yığın ve tam aygıtta mutlak PL/QFLS karşılaştırması, ardından kontak değişimi bir yol sunar. Aynı model bütün sonuçları açıklayamıyorsa öykü zorlanmaz; belirsizlik ve başarısız açıklama kaydedilir. Negatif sonuç iyi tasarlanmışsa hangi yolun terk edilmesi gerektiğini öğretir.

Ucuz ve belirleyici deney seçimi

Her sorunun cevabı daha büyük veri kümesi değildir. Temel iddia bir fazın varlığıysa önce güvenilir faz tanımlaması; iddia daha az arayüz kaybıysa önce o kayba duyarlı ölçüm; iddia ömürse önce ilgili stres altında çalışma gerekir. Bir deneyin değeri beklenen bilgi kazancı, maliyet ve kararı değiştirme gücüyle değerlendirilir. Önceden yazılmış durdurma kuralı, sonuç olumsuz olduğunda sonu gelmez ayar değişikliklerini önler. Gerçek bir onarım hipotezi varsa yeni deney ayrı hipotez olarak açılır; eski başarısız sonuç silinmez.

Blok içinde fark: basit ama güçlü bir hesap

Üç üretim gününde kontrol verimleri sırasıyla %20,00, %21,00 ve %22,00; aynı günün işlemli örnekleri %20,35, %21,35 ve %22,35 olsun. Gün etkisi 2 yüzde puan değişirken işlem etkisi her blokta +0,35 yüzde puandır. Yalnız ilk günün kontrolünü son günün işlemli örneğiyle karşılaştırsak +2,35 puan görürüz; farkın çoğu işlemle ilgili değildir. Blok içindeki eşleşmiş fark, ortak gün koşulunu kısmen çıkarır.

Gerçek deneyde her gün bağımsız üretim tekrarları gerekir. $y_{ij} = \mu + \beta_{\text{işlem}} + b_{\text{gün}} + \epsilon_{ij}$ modelindeki gün terimi, aynı günün numuneleri arasındaki bağımlılığı temsil eder. Aynı hücrenin on taraması on bağımsız üretim tekrarı sayılmaz.

İki faktörlü deneyin etkileşim hesabı

Faktörleri düşük düzeyde -1, yüksek düzeyde +1 olarak kodlayalım. $y = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_{AB} AB$ modeli, bir değişkenin etkisinin diğerine bağlı olmasını içerir. Şekilde $\beta_0 = 20$, $\beta_A = 0,2$, $\beta_B = 0,3$ ve $\beta_{AB} = 0,45$ seçildi. B düşükken A'yı yükseltmek y'yi 0,5 puan azaltır; B yüksekken aynı müdahale 1,3 puan artırır. Tek tek değişken değiştirme bu çelişkiyi mekanizma değişimi sanabilir; faktöriyel tasarım etkileşimi görünür kılar. [R31]

Bu örnekte dört köşe yanıtı sırasıyla 19,95; 19,45; 19,65 ve 20,95'tir. Yalnız en iyi köşeyi yayımlamak süreç penceresini öğretmez. Merkez noktaları eğrisellik hakkında bilgi verir, tekrarlar gürültüyü kestirir, rastgele sıra ise zamanla sürüklenmenin faktörlerle karışmasını azaltır. Araştırma sorusu “hangi reçete en yüksek değeri verdi?”den “hangi etki hangi koşulda tekrar ediyor?”a dönüşür.

Kendini sına

1. Bir substrattaki 20 piksel 20 bağımsız üretim tekrarı mıdır? Çoğunlukla hayır. Ortak üretim geçmişi nedeniyle grup/hiyerarşi dikkate alınır.
2. Katkı etkisi sıcaklıkla kayboluyorsa ne raporlanır? Etkileşim ve hangi koşullarda avantaj bulunduğu; koşulsuz genel iyileşme değil.

Hücreden modüle, sahaya ve yaşam döngüsüne

Hücre verimi ile günlük enerji arasında bir yol vardır

Bir hücrenin standart koşuldaki gücü, dışarıda her an aynı güçte çalışacağı anlamına gelmez. Güneşin konumu, bulut, kirlenme, sıcaklık, gölge ve cihazın çalışabilirliği sonucu değiştirir. **Anma gücü**, belirli referans koşullardaki güç etiketidir. **Enerji üretimi**, gerçek güç eğrisinin zaman boyunca toplamıdır. Birimi kWh, güç birimi kW'tan farklıdır.

Sentetik gün: bir sistem iki saat ortalama 1 kW, sonraki üç saat 2 kW, son bir saat 0,5 kW versin. Günlük enerji $2 \times 1 + 3 \times 2 + 1 \times 0,5 = 8,5$ kWh olur. Birkaç saatlik ortalama kullanmak yaklaşık integraldir. Bu toplama negatif gece ölçümü, duruş veya eksik veriyi nasıl ele aldığını da açıkça belirtmek gerekir.

Performans oranının paydası neyi temsil eder?

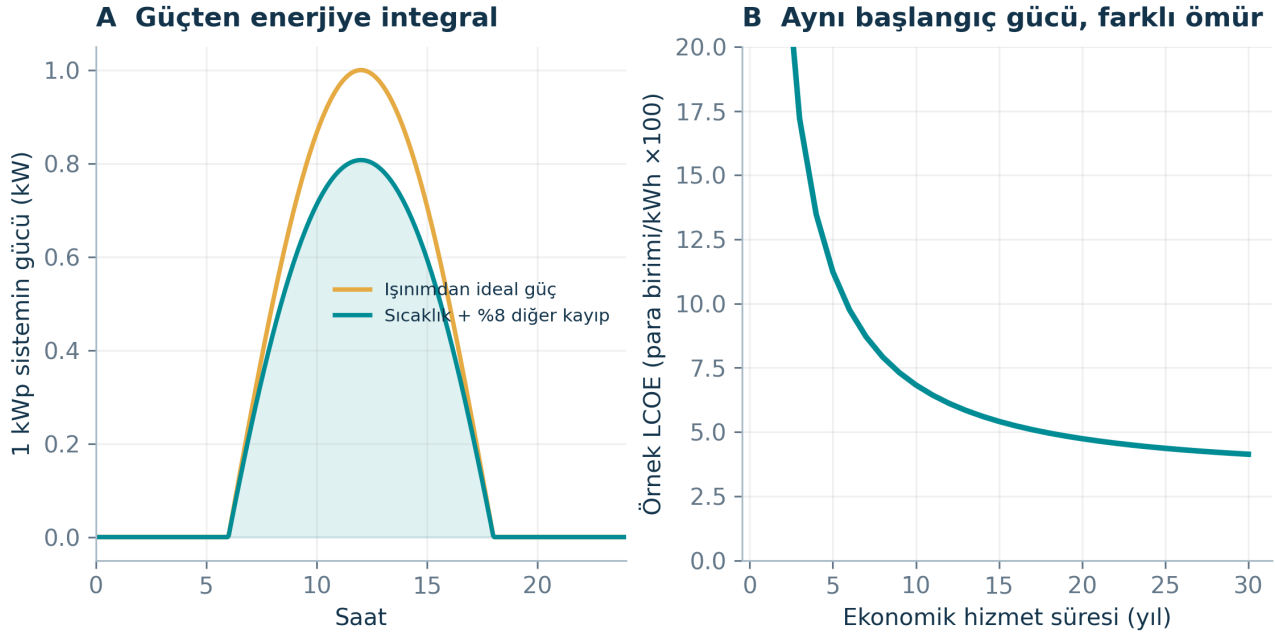
Referans üretim, modül düzlemine gelen toplam ışıyı seçilen referans ışıma bölerek elde edilen eşdeğer saat sayısıdır. **Özgül enerji üretimi**, enerjinin kurulu anma gücüne oranıdır; kWh/kWp gibi verilir. **Performans oranı**, gerçek özgül üretimi ışıma temelli referansla karşılaştırır. Birçok sistem kaybını birlikte özetler; hangi mekanizmanın sorumlu olduğunu tek başına ayırmaz. Kullanılan sıcaklık düzeltmesi ve ölçüm yöntemi ayrıca belirtilmelidir.

İki yüzü modül, arka yüzden gelen ışığı da kullanabilir. Yerden geri yansıyan ışığın payı, yüzeyin yansıtıcılığına, montaj yüksekliğine ve aralıklarına bağlıdır. Yüzeyin yansıtma oranına **albedo** denir. Aynı modülün farklı arazilerde farklı enerji üretmesi bu nedenle malzemenin değiştiği anlamına gelmez.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi, hammaddeden üretime, kullanımdan geri dönüşüme seçilen çevresel etkileri tanımlı sınırlar içinde toplar. **İşlevsel birim**, karşılaştırmanın paydasıdır; örneğin teslim edilen 1 kWh elektrik. **Enerji geri ödeme süresi**, üretimde harcanan enerjinin kullanımda belirli hesap koşullarıyla ne kadar sürede karşılandığıdır; maddi yatırım geri ödeme süresiyle aynı şey değildir. **LCOE**, ömür boyunca maliyetlerle enerji üretimini tanımlı bir ekonomik modelde ilişkilendirir. Farklı hizmet ömrü, finansman ve ışıma varsayımları aynı teknoloji için farklı sonuç verir.

Anlama kontrolü: daha yüksek verim, daha düşük etki mi?

Verim artışı aynı güç için gereken alanı azaltabilir. Fakat üretim enerjisi veya ömür önemli ölçüde kötüleşirse kWh başına çevresel etki artabilir. Verimi, üretim yükünü ve ömür boyu enerjiyi aynı sistem sınırı içinde karşılaştırmadan “daha sürdürülebilir” hükmü kurulamaz.



Şekil 40. Başlangıç gücünden ömür boyu enerjiye. A paneli 1 kWp için sentetik bir günün sıcaklık ve kayıp hesabıdır. B paneli seçilmiş maliyet/üretim varsayımlarında ömrün LCOE etkisidir; piyasa tahmini değildir. Hesap girdileri bölümde açıkça verilir. [R32] [R34]

Bir santimetrekairelik hücre fiziksel ilkenin sınırlanmış güçlü bir araçtır; elektrik santrali veya satılabilir panel değildir. Ölçeği büyütmek, aynı hücreyi geometrik olarak genişletmekten ibaret olmaz. Akım toplama mesafesi, şeffaf elektrot kaybı, metal gölgelemesi, kaplama homojenliği, kenar alanları, bağlantılar ve üretim kusurları ölçekle değişir. Bu yüzden malzeme verimi, hücre verimi, modül verimi, enerji verimi ve ekonomik sonuç ayrı basamaklar olarak incelenmelidir.

Hücre-modül kayıpları

Seri bağlı hücreler aynı akımı taşır; zayıf veya gölgelenmiş hücre diziyi sınırlandırabilir. Baypas diyotları belirli gölgelenme durumlarında koruma sağlar fakat enerji kaybını sınırlamaz. İnce film modüllerde monolitik bağlantı için kullanılan çizgiler ve ölü alanlar geometrik doluluk faktörünü düşürür. Kristal silisyum modüllerde hücre araları, bağlantı şeritleri ve kapsülleme optiği değerlendirilir. Hücreden modüle geçişte bazı optik kazanımlar da olabilir; bütün etkiyi tek sabit kayıp yüzdesiyle temsil etmek yalnızca kaba senaryodur.

Özgün alan hesabında aktif hücre bölgesi verimi %25, etkin geometrik doluluk %92 ve diğer elektriksel/optik çarpan 0,97 olsun. Basit ayrılabilir yaklaşım modül için $0,25 \times 0,92 \times 0,97 = 0,2231$, yani %22,31 verir. Bu gerçek bir ürüne ait tahmin değil, kayıpların neden zincirleme çarpıldığını gösteren hesaplama değildir. Alan tanımı değişirken hücre verimini modül toplam alanıyla karşılaştırmak gerekir. Daha yüksek aktif-alan veriminin daha büyük ölü alan pahasına gelmesi, panel düzeyinde avantajı yok edebilir.

Üretim ölçeğinde süreç penceresi önem kazanır. Tek cihazın en iyi kalınlığı yerine büyük alan boyunca kalınlık dağılımı, kaplama çizgileri, çözücü kuruma dinamiği, parçacıklar ve kusur yoğunluğu kontrol edilir. Üretim verimi, kabul edilen ürün sayısının toplam üretime oranıdır; elektriksel dönüşüm verimiyle karıştırılmamalıdır. Küçük bir performans artışı çok yüksek fire oluşturuyorsa maliyet avantajı sağlamayabilir. Proses çevrim süresi, enerji tüketimi, metrekare başına malzeme kullanımı ve geri kazanılan fire birlikte kaydedilir.

STC gücü ile yıllık elektrik farkıdır

Standart test koşulları cihazları karşılaştırmak için gereklidir. Sahada ise ışınım, spektrum, geliş açısı, sıcaklık, rüzgâr, kirlenme ve gölgelenme sürekli değişir. İnverter verimi ve güç kırpması, kablo kayıpları ve bakım kesintileri de teslim edilen elektriği etkiler. Çift yüzlü modüllerde arka yüz ışınımı yerden yansımaya, yüksekliğe ve dizi geometrisine bağlıdır. Tandemlerde değişen spektrum akım uyumunu etkileyebilir. Bu nedenle yalnızca STC verimine göre iki teknolojinin yıllık enerji üretim sıralaması kesinleştirilemez.

IEC 61724-1'in açık kapsamı, PV sistemlerinin performans izleme ve analizinde kullanılan terimleri, ekipmanı ve yöntemleri içerir. [R32] Araştırmacı veri kaydını düzenli zaman damgaları, cihaz düzlemi ışınımı, uygun sıcaklık ölçümleri ve sistem çalışma durumu ile kurmalıdır. Eksik veri sıfır üretimle aynı değildir. Sensör kayması, bakım, inverter kapanması ve veri iletişim sorunu ayrı işaretlenir. Sahadaki başarısızlığın doğru nedenini bulmak için elektrik üretimiyle meteorolojik ölçüm aynı zaman tabanında olmalıdır.

Özgül üretim ve performans oranı

Son üretim $Y_f = E_{AC} / P_{STC}$ [kWh/kWp], referans üretim $Y_r = H_{POA} / G_{STC}$ [h] ve performans oranı $PR = Y_f / Y_r$ [boyutsuz] olarak tanımlanabilir. H_{POA} , modül düzlemindeki ışınımın zaman integralidir [kWh/m²]; $G_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$ alınır. Kullanılan güç etiketinin DC, enerji tesliminin AC olduğu ve sistem sınırının nerede bulunduğu açıkça yazılır. PR bir hücre verimi değildir; referans ışınım altında beklenen enerjiye göre sistemin toplam kayıp davranışını özetler.

Özgün örnek: 10 kWp sistem yılda 14.000 kWh AC üretsın, düzlem ışıını 1700 kWh/m² olsun. Y_f = 1400 kWh/kWp, Y_r = 1700 h ve PR = 1400/1700 ≈ %82,35 bulunur. İki farklı iklimin PR değerleri doğrudan kalite sıralamasına dönüştürülmemelidir; sıcaklık gibi hava koşulları oranı etkiler. NREL'in hava koşullarına göre düzeltilmiş PR raporu, bu yanlışlığı azaltmaya yönelik bir yöntem tanımlar. [R33] Kullanılan düzeltme ve referans hava dosyası belirtilmeden yalnızca “düzeltilmiş PR” yazılmaz.

Bozunma oranı çıkarmak için mevsimsel değişim, kirlenme, kesintiler, sensör kalibrasyonu ve başlangıç geçişleri ayrıştırılır. Bir yılın düşük üretimini malzeme bozunmasına bağlamadan önce ışıını ve çalışma erişilebilirliği kontrol edilir. Birkaç aylık eğimin onlarca yıla doğrusal uzatılması güvenilir olmayabilir. Yıllık enerji tahminleri iklim dosyasının seçimi, model hatası ve uzun dönem değişkenliği nedeniyle belirsizlik taşır. P50 veya P90 gibi terimler kullanılıyorsa olasılık tanımı ve kapsanan belirsizlikler açık olmalıdır.

LCOE: verimden maliyete köprü

Basitleştirilmiş seviyelendirilmiş elektrik maliyeti şöyle yazılır:

$$LCOE = \frac{C_0 + \sum_t C_t / (1 + r)^t}{\sum_t E_t / (1 + r)^t}. \quad (I.25.1)$$

C₀ başlangıç yatırımı, C_t bakım/değişim/işletme maliyeti, E_t teslim edilen elektrik ve r iskonto oranıdır. Birimler maliyet para birimi, enerji kWh ise sonuç para/kWh olur. Nominal fiyatlar nominal oranla, reel fiyatlar reel oranla eşlenmelidir. Modülün fiyatı sistem maliyetinin yalnızca bir bölümüdür; daha yüksek alan verimi arazi ve kurulum maliyetlerini azaltabilir, ama bu etki uygulamaya bağlıdır. Ömür ve enerji üretimi belirsizken tek kesin LCOE sayısı sunmak yanlıtır.

Özgün öğretici örnekte 10 kWp sistemin ilk maliyeti 10.000 birim para, yıllık bakımı 150, ilk yıl enerjisi 14.000 kWh, süre 20 yıl ve iskonto %5 olsun. Bozunma ve değişim olmadığı varsayımıyla anüite çarpanı yaklaşık 12,462 olur. Bugünkü maliyet 10.000 + 150 × 12,462 ≈ 11.869; bugünkü enerji 14.000 × 12,462 ≈ 174.468 kWh; LCOE yaklaşık 0,0680 para/kWh bulunur. Bu fiyat araştırması değildir. Bozunma, inverter değişimi ve ömür belirsizliği eklendiğinde sonuç değişir; varsayımlar tablo halinde saklanır.

Yaşam döngüsü ve geri dönüşüm

Yaşam döngüsü değerlendirmesi LCA, hammaddeden üretime, taşımaya, kurulum ve kullanım dönemine, ömür sonuna kadar çevresel yükleri sistem sınırı içinde değerlendirir. İşlevsel birim bir modül veya bir watt olabilir; elektrik hizmetini karşılaştırmak için çoğu durumda teslim edilen kWh daha açıklayıcıdır. Üretimdeki elektrik karışımı, verim, saha ışınlı, ömür ve geri dönüşüm varsayımları sonucu değiştirir. IEA PVPS'nin 2024 bilgi notu bu değerlendirme çerçevesini güncel teknoloji envanterleri bağlamında sunar. Buradan her ülke ve teknoloji için tek bir karbon yoğunluğu çıkarılmaz. [R34]

Özgün ölçek hesabında üretim ve yaşam döngüsü yükü 1000 kg CO₂-eşdeğeri/kWp, ömür boyu üretim 30.000 kWh/kWp seçilsin. Bölüm 0,0333 kg/kWh = 33,3 g CO₂-eşdeğeri/kWh verir. Gerçek ömür yarıya iner ve diğer koşullar aynı kalırsa birim enerji başına yük yaklaşık ikiye katlanır. Bu basit sonuç dayanıklılığın çevresel önemini gösterir. Enerji geri ödeme süresi hesaplanırken de enerji girdisinin birincil mi son enerji mi olduğu ve karşılaştırılan elektrik dönüşümü tutarlı olmalıdır.

Geri dönüşümde yüksek kütleli geri kazanım oranı, bütün değerli veya riskli bileşenlerin geri kazanıldığı anlamına gelmez. Cam ve çerçeve kütleli çoğunu oluşturabilirken gümüş, yarıiletken veya iz elementlerin kaybı ekonomik ve çevresel açıdan önemlidir. Geri kazanımın saflığı, yeniden kullanım seviyesi, enerji ve kimyasal tüketimi değerlendirilir. IEA PVPS'nin modül geri dönüşümü LCA raporu bu süreçlerin ayrı bir çevresel değerlendirme konusu olduğunu gösterir. [R36] İyi tasarım, cihazı hem uzun ömürlü hem onarılabilir ve ayrıştırılabilir yapmanın gerilimlerini baştan ele alır; “geri dönüştürülebilir” ifadesi işleyen toplama ve proses zinciri olmadan tamamlanmış sonuç değildir.

Sıcaklık ve ışınlı aynı enerji hesabına koymak

Basit bir ilk yaklaşımda anlık güç $P(t)$ yaklaşık PSTC $[G(t)/G_{STC}][1 + \gamma P(T_c(t) - 25^\circ C)]$ çarpı diğer kayıp katsayılarıyla yazılır. Burada γP bağıl sıcaklık katsayısıdır. Örneğin -%0,35/K, Kelvin başına -0,0035 demektir; -0,35 sayısını doğrudan kullanmak yüz kat hata yaratır. Hücre sıcaklığı T_c , ortam sıcaklığı değildir. Rüzgâr ve montaj koşulları ikisi arasındaki farkı değiştirir.

Şekildeki 1 kWp sistem için gündüz ışınlı 06-18 saatleri arasında sinüs biçiminde seçildi. Yalnız ışınlı bulunan günlük enerji yaklaşık 7,64 kWh'tir. Hücre sıcaklığı $25 + 35G/G_{STC}$ ve diğer kayıplar %8 alındığında yaklaşık 6,35 kWh elde edilir. Bu fark, yalnız öğlen gücünü karşılaştırarak görülemez; gün boyunca integral gerekir. Bu bir yerel hava tahmini değil, hesap yöntemini öğreten sentetik gündür.

LCOE'de pay ve paydayı birlikte iskonto etmek

Bir elektrik maliyeti hesabında yatırım ilk anda, işletme gideri ve üretim yıllar içinde gerçekleşir. Aynı iskonto kuralıyla:

$$LCOE = \frac{C_0 + \sum_{t=1}^N C_t / (1+r)^t}{\sum_{t=1}^N E_t / (1+r)^t}. \quad (I.25.2)$$

Şeklin öğretim senaryosu, 1 kWp için 700 para birimi başlangıç yatırımı, yılda 12 birim gider, ilk yıl 1600 kWh üretim, yıllık %0,5 üretim kaybı ve %6 iskonto kullanır. 25 yıl için yaklaşık 0,04364 para birimi/kWh çıkar. Bu sayı bir ülke veya tarihe ait yatırım teklifi değildir. Örneğin ders değeri, ömrü kısaltmanın aynı başlangıç verimiyle bile enerji maliyetini nasıl artırdığını göstermesidir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde de payda önemlidir. kg CO₂-eşdeğeri/modül ile g CO₂-eşdeğeri/kWh farklı sorulara cevap verir. İkinci büyüklük için üretim bölgesi, elektrik karması, taşıma, saha enerjisi, hizmet ömrü ve son kullanım senaryosu gerekir. Yalnız hücre üretiminde az malzeme kullanan bir teknoloji, ömrü veya saha üretimi düşükse kWh başına aynı avantajı korumayabilir. [R34] [R36]

Kendini sına

1. **%25 hücre verimi, %25 modül verimi midir?** Hayır. Alan doluluğu, bağlantı, optik ve elektriksel etkiler dahil edilmelidir.
2. **PR = %82, hücrenin %82 verimli olduğu anlamına gelir mi?** Hayır. PR, sistem enerjisinin ışınlam ve kurulu referans güce göre normalize edilmiş performans oranıdır.
3. **Geri dönüşümde %90 kütle geri kazanımı bütün değerli malzemelerin kurtarıldığını gösterir mi?** Hayır. Bileşen bazında geri kazanım, saflık ve çevresel/maliyet yükü ayrıca değerlendirilir.

Kullanılabilirlik ve günlük integral

Kullanılabilirlik, sistemin üretim yapması beklenen zamanın ne kadarında çalışabilir olduğunu anlatır. Güneş varken bir bağlantı arızası veya bakım nedeniyle üretim durabilir. Bu süreyi yalnız bulutlanma kaybı gibi modellemek yanlış nedeni gösterir. Işınlam, sıcaklık, gölgelenme ve işletme kesintileri ayrı girdilerdir.

Günlük integral, gün boyunca değişen gücün zaman üzerinden toplanmasıdır. Güç kilowatt, süre saat alınırsa enerji kilowattsaat çıkar. Bir saat 2 kW, sonraki saat 3 kW üreten sistem bu iki saatte 5 kWh verir; en yüksek 3 kW değerini 24 saatle çarpmak günlük üretim değildir. Yıllık enerji hesabı aynı mantığı mevsimler, kesintiler ve zamanla bozunma boyunca sürdürür. Bu örnek hesap toplama fikrini açıklar; yer ve yıl belirtilmiş bir üretim tahmini değildir.

Literatürden araştırma sorusuna

Makale hangi tür bilgiyi verir?

Özgün araştırma makalesi, belirli bir soruya yeni deney, hesap veya analizle cevap verir. **Derleme**, birçok çalışmayı bir araya getirir; konu haritası için değerlidir, fakat bir sayının ilk kaynağı olmayabilir. **Ön baskı**, hakem süreci tamamlanmadan paylaşılan metindir. **Ek bilgi**, ana makaleye sığmayan yöntem, ek ölçüm ve ayrıntıları içerir. **Patent**, hukuki hak talebi içeren teknik belgedir; bağımsız performans doğrulaması değildir. **Veri sayfası**, ürünün belirtilen koşullardaki özelliklerini sunar. Bu türleri tek bir “kaynak” başlığı altında eşdeğer saymamalıyız.

Bir yayının başlığına veya özetine bakarak deneyin tekrar edilebilirliğini değerlendiremeyiz. **DOI**, yayını tanımlayan kalıcı sayısal nesne kimliğidir. Metnin doğru sürümünü bulmaya yardım eder. **Atıf**, bir iddia veya yöntemin hangi kaynağa dayandığını belirtir; kaynağın sonucu otomatik doğru yaptığı anlamına gelmez. Yazarın iddiası, gösterilen veri ve bizim çıkardığımız sonuç ayrı tutulmalıdır.

Bir makaleyi üç geçişte okumak

İlk geçişte soru, aygıt türü ve temel sonucu belirle. İkinci geçişte şekilleri eksenleriyle oku: hangi büyüklük ölçülmüş, hangi koşul sabit, hata çubukları neyi anlatıyor, kaç bağımsız numune var? Üçüncü geçişte yöntemle dön: katman sırası, işlem geçmişi, alan, ışık, sıcaklık ve analiz tanımları sonucu yeniden kurmaya yeterli mi? Eksik bilgi varsa bunu not etmek okuma başarısızlığı değil, çıkarım sınırını belirlemektir.

Temsili iddia: “Yeni katkı verimi artırdı.” Bunu araştırılabilir biçime çevirelim: hangi katkı, hangi soğurucuda, hangi miktarda, katkısız ama aynı çözücü geçmişine sahip kontrolle mi karşılaştırıldı? Kazanç bütün dağılımda mı, yalnız en iyi hücrede mi? Kararlı güç mü, tarama değeri mi? Bu sorularla iddia, ölçülebilir ve yanlışlanabilir bir önerme haline gelir.

Araştırma boşluğu, daha önce hiç kullanılmamış kelime veya formül değildir. Mevcut kanıtların açıklayamadığı veya ayıramadığı belirli bir sorun olabilir. Örneğin katkının etkisi kusur azalmasından mı, kristallenme hızının değişmesinden mi geliyor? İki açıklamayı ayıracak kontrol numunesi, “yeni katkı denemekten” daha değerli araştırma sorusu oluşturabilir.

Anlama kontrolü: alıntı zincirini takip et

Bir derlemede gördüğün verim sayısını kullanmadan önce özgün makaleye, gerekiyorsa sertifikaya git. Derlemenin yuvarladığı sayı farklı alan veya ışık kategorisine ait olabilir. Kaynağın yalnız özetini okuyabildiysen yöntem ayrıntısının doğrulandığını söyleme.

Araştırmaya başlarken sorun çoğu zaman makale bulamamak değildir. Sorun, çok sayıdaki makalenin hangisinin hangi soruyu gerçekten cevapladığını ayırt edememektir. Bir derleme sana alanın haritasını verir; özgün makale belirli bir iddianın kanıtını verir; ek bilgi yöntem ayrıntılarını verir; açık veri ise bazı iddiaları yeniden hesaplama fırsatı sağlar. Bunları tek bir kaynak türü gibi okumak verimsizdir.

Bir makaleyi üç turda oku

İlk turda başlığı, özeti, ana şekilleri ve sonuç bölümünü oku. Tek cümlelik iddiayı yaz: örneğin “arayüz işlemi belirli hücrelerde ışınımsız kaybı azaltıyor.” Aynı anda iddianın ölçeğini yaz: film, yarım yapı, tam hücre ya da modül. İlk turda mekanizmanın doğru olduğuna karar verme; yalnızca yazarın neyi göstermek istediğini belirle.

İkinci turda yöntem ve ek bilgiye geç. Numune sayısını, bağımsız üretim partilerini, ölçüm sırasını, alan maskesini, ışık spektrumunu, sıcaklığı ve istatistiği bul. “En iyi hücre” ile “ortalama hücre” arasındaki farkı kaydet. Aygıt sayısı $n=30$ olsa bile bu aygıtlar tek bir kaplama partisinden geldiyse üretim tekrarlanabilirliği için otuz bağımsız deney sayılmaz.

Üçüncü turda mekanizmayı sınavan şekilleri oku. Kontak iyileştirmesi iddiası yalnızca daha yüksek fotolüminesansa mı dayanıyor, yoksa seçicilik ve taşıma kayıpları ayrıca incelenmiş mi? Kristal büyümesi iddiası yalnızca yüzey fotoğrafına mı dayanıyor, yoksa faz, tekstür ve bileşim de ölçülmüş mü? Yazarın önerdiği mekanizmanın aynı veriyi açıklayan bir alternatifi olup olmadığını düşün.

Bir makaleden ayrılırken üç şey kalmalı: ne öğrendiğin, neyin belirsiz kaldığı ve bir sonraki deneyin neyi ayıracağı. Makaleyi özetlemekle onu değerlendirmek aynı beceri değildir. Özet yazarın yolunu yeniden anlatır; değerlendirme, yolun sonuca ulaşmak için yeterli olup olmadığını sorar.

Kaynak soy ağacı

Bir derlemedeki tabloya ulaştığında, kritik değer için tablonun referansına git. Orijinal makalede değer başka bir çalışmadan alındıysa zinciri sürdür. Sayı hangi numunede, hangi yöntemle ortaya çıkmış? Bir derlemenin iki farklı sütununu birleştirerek gerçekte hiç üretilmemiş bir “süper malzeme” oluşturmak kolaydır: en iyi hareketlilik bir tek kristalden, en iyi ömür başka bir filminden, en iyi bant aralığı başka bileşimden alınabilir. Bunlar tek aygıtın uyumlu parametre takımı değildir.

İkincil kaynakların önemli rolü vardır; ancak sayısal bir sonuç üzerinde karar veriliyorsa kaynak zincirinin sonu belirlenmelidir. Tersine, her temel denklemi yeniden keşfetmek de gerekmez. Yerleşik fizik için güvenilir bir ders kitabı, belirli bir yeni aygıt sonucu için özgün makale daha doğru başlangıçtır. Luque ve Hegedus'un el kitabı teknoloji ve mühendislik kapsamı için; Würfel ve Würfel'in kitabı ise fiziksel ilkelerden ileri kavramlara uzanan çalışma için iki tamamlayıcı okuma rotasıdır. Burada yalnız yayınevi kapsam bilgileriyle önerilmektedirler. [B04] [B05]

Kayıt verimi nasıl okunur?

Bir “rekor” grafiği keşif hızı hakkında fikir verir, fakat tek başına yatırım, ölçeklenebilirlik veya saha ömrü sıralaması değildir. Küçük alanlı bir araştırma hücresi ile satıftaki modülün rekabeti aynı değildir. Bir hücre kategorisi yıllar içinde daha fazla araştırmacı ve yatırım çekmiş olabilir. Grafiğin eğimini, malzemenin doğuştan üstünlüğü diye okumadan önce araştırma çabasını ve ölçüm kategorilerini düşün.

Bağımsız verim tabloları ve laboratuvar çizelgeleri kaynak seçimi için değerlidir. Version 68'in JRC kaydı, çalışmanın bağımsız doğrulanan hücre ve modül verimlerini bir araya getirdiğini ve Ocak 2026 sonrasındaki yeni girdileri gözden geçirdiğini belirtir. Bu cümle belirli bir tablodaki tüm sonuçların aynı alan, topoloji ya da ışık yoğunluğunda olduğunu söylemez. Tablo dipnotları araştırmanın parçasıdır. [B03]

Yenilik ile yararlılık

Yeni bir formül, yararlı bir PV malzemesi demek değildir. Bilinen bir bileşimin yeni düzeni bilimsel açıdan ilginç olabilir; bunun gerçekten farklı bir fiziksel durum olduğunu göstermek gerekir. Aynı kimyasal oran için polimorf, site düzeni, düzensizlik, gerilme, yüzey sonlanması ve heteroyapı farklı nesneler oluşturabilir. Yenilik araştırması bu nesnenin hangisi olduğunu açıkça tanımlamadan yapılamaz.

Aramada eşanlamlı isimler, indirgenmiş ve genişletilmiş formüller, prototipler, katı çözelti aileleri, eşdeğer element sıraları ve olası ayrışma ürünleri kullanılmalıdır. Sonuç bulunmaması yalnızca kaydedilen aramalar altında sonuç bulunmadığını gösterir. Veri tabanı kapsamı, dil, indeksleme gecikmesi ve erişim kısıtları belirsizlik bırakır.

Patentlenebilirlik ve kullanım serbestisi ayrıca uzman değerlendirmesi gerektiren farklı sorulardır; bir literatür taramasının doğal sonucu değildir.

Uygulama: tek sayfalık makale fişi

Bir makale için şu alanları doldur: tam künye; DOI; erişim tarihi; ana iddia; numune tanımı; en yakın kontrol; cihaz alanı; ışık ve sıcaklık; ölçüm yöntemi; bağımsız parti sayısı; dağılım; en güçlü şekil; en zayıf varsayım; açık veri; yeniden üretim için eksik bilgi; ayırıcı sonraki test. Fişin uzunluğu bir sayfayı geçmesin. Amaç metni sıkıştırmak değil, karar veren bilgiyi seçmektir.

Alıştırma: İki makalenin verimleri yüzde 24,0 ve yüzde 24,4. İkinci makale daha mı iyi? Cevap: yalnız bu sayılardan karar verilemez. Alan, ölçüm, stabilizasyon, belirsizlik, dağılım ve kontrol koşulları gerekir. Birinci sonuç büyük alanda bağımsız sertifikalı, ikinci sonuç küçük alanda tek tarama ise sıralama bilimsel soruya göre değişir.

Bir araştırma programı nasıl kurulur?

Araştırma programını bir karar dizisi olarak kurmak

Bir araştırma programı, yapılabilecek bütün ölçümlerin listesi değildir. **Amaç**, çözmek istediğimiz somut sorundur. **Hipotez**, bu soruna ilişkin sınanabilir açıklamadır. **Ölçüt**, açıklamanın hangi gözlenebilir sonuçla değerlendirileceğidir. **Karar kapısı**, bir sonraki pahalı adıma geçmeden önce gereken kanıttır. Bu dört kavramı ayırmak, sonuç çıkmayınca amacın sessizce değiştirilmesini önler.

Sentetik örnek: bir hücrede gerilim düşük. İlk hipotez yüzeydeki yeniden birleşmenin baskın olması olsun. Aynı taban malzemede yüzey işlemini değiştirip yaşam süresi ve gerilimi birlikte ölçebiliriz. Kontak direnci de değişiyorsa gücü ayrıca kontrol ederiz. Gerilim kazanımı yoksa “ama yüzey daha parlak” diyerek başlangıç ölçütünü değiştirmeyiz. Başlangıç hipotezi desteklenmemiş olabilir; bu da sonraki deneyi yöneten sonuçtur.

Kontrol numunesi bazen yeni numuneden değerlidir

Referans süreç, düzenli olarak benzer çıktı üretebildiğimiz başlangıç yoludur.

Referansın kendi değişkenliği bilinmiyorsa yeni işlemin etkisini ayırmak zorlaşır.

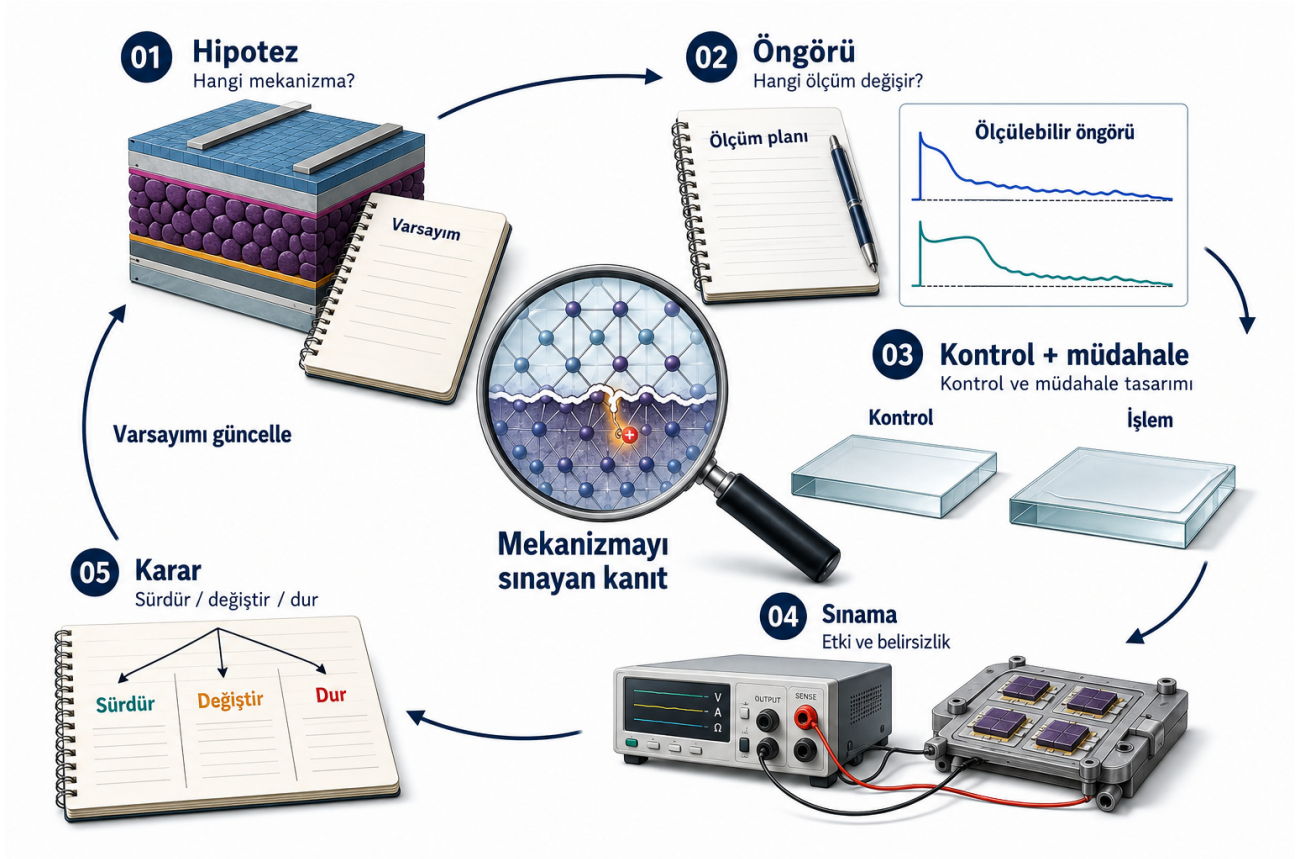
Ayırıcı deney, rakip açıklamaların farklı sonuç öngördüğü koşulu seçer. **Durdurma ölçütü**, ek çalışmanın artık amacı haklı çıkaracak kanıt üretemeyeceği durumu önceden belirtir. Durdurmak veriyi silmek değildir; negatif bulguyu, kullanılan yöntem ve kapsamıyla saklamaktır.

Yeni soğurucu için önce kimyasal tanım, sonra faz ve yapı, optik ve elektriksel özellik, arayüz ve aygıt, ardından ölçek ve ömür soruları gelir. Bu sıra tamamen katı değildir; ucuz ve belirleyici bir arayüz uyumsuzluğu erken kontrol edilebilir. Ama bir basamakta hesaplanan sonuç başka basamakta deney yapılmış gibi sunulamaz. **Kanıt düzeyi**, iddianın hangi hesap, gözlem veya bağımsız doğrulamayla desteklendiğini açıklar.

Tekrarlanabilir çalışma paketi, yalnız son grafiği değil ham veriyi, numune kimliğini, işlem sırasını, analiz tanımını ve yazılım sürümünü de içerir. Bir başkası aynı girdilerden aynı sonucu elde edebiliyor mu? Farklı cihaz ve numuneyle benzer fiziksel etkiyi gözlüyor mu? Bu iki soru aynı doğrulama değildir; ikisi de araştırmanın farklı risklerini sınar.

Anlama kontrolü: ne olursa fikrinden vazgeçersin?

Hipotezini yazdıktan sonra onu desteklemeyecek gözlemi de yaz. Hiçbir sonuç hipotezi değiştiremiyorsa henüz deneysel soru yeterince keskin değildir. Önceden belirlenmiş kontrol ve durdurma ölçütü, yalnız olumlu sonuçları seçme eğilimini azaltır.



Şekil 41. Mekanizmayı sınavan araştırma döngüsü. Hipotez ölçülebilir bir öngörüye çevrilir; kontrol ve müdahale örnekleri tekrarlı ölçümlerle karşılaştırılır; etki, belirsizliğiyle değerlendirilir. Sonuç sürdürme, değiştirme veya durdurma kararına dönüşür. Şematik sinyaller ve cihazlar bir deneyin gerçek verileri değildir. [R30] [R31] Görsel üretim aracıyla hazırlanmış kavramsal illüstrasyon; ölçüm görüntüsü değildir.

İyi bir araştırma sorusu “verimi artırabilir miyiz?” kadar geniş bırakılmaz. Örneğin “üst taşıma katmanındaki şu değişiklik, aynı soğurucu ve üretim partisinde, taşıma direncini artırmadan ışınlımsız arayüz kaybını azaltıyor mu?” sorusu sınavanabilir. Değişken, kontrol, mekanizma ve başarı ölçütü aynı cümlede yer alır. Ölçemediğin mekanizmayı doğrudan optimize etmeye çalışmak, ölçebildiğin bir vekil göstergenin peşinde kaybolmana neden olabilir.

Darboğazı ölç, sonra yöntemi seç

Bir hücrenin kısa devre akımı beklenenden düşükse yeni bir DFT kampanyası başlatmak en ucuz ilk adım olmayabilir. EQE ile yansıma ve parazitik soğurma ölçümleri, optik ve toplama kayıplarını daha doğrudan ayırabilir. Voc düşükse ışık şiddetine bağlı gerilim, luminesans ve kontak kontrollü yapılar daha bilgilendirici olabilir. FF düşükse seri direnç, şönt, bariyer ve zaman bağımlılığı ayrıştırılır. Araç seçimi araştırmacının favori yazılımına değil, belirsizliğe bağlıdır.

Bir çalışmanın başarısını hesaplama saatine ya da ölçüm sayısına eşitleme. Başarı, kararını değiştirecek bilginin güvenilir biçimde elde edilmesidir. Yirmi benzer tarama aynı sistematik hatayı tekrar edebilir; tek iyi tasarlanmış kontrol o hatayı görünür kılabilir. Daha fazla veri ancak yeni bir bağımsız değişkeni, farklı bir koşulu veya belirsizliğin başka bir bileşenini sınıadığında aynı oranda yararlıdır.

Örnek tasarım: bir pasivasyon katkısı

Varsayımsal bir katkının Voc'yi artırdığını düşün. Hipotez, katkının arayüzdeki yeniden birleşmeyi azalttığıdır. Alternatifler; katkının soğurucu bileşimini değiştirmesi, optiği değiştirmesi, iyon dağılımını geçici olarak etkilemesi ya da ölçüm önkoşullandırmasını değiştirmesidir. Bu alternatifleri baştan yazmak, olumlu sonuç görüldüğünde mekanizmayı aceleyle seçmeni engeller.

Kontrol grubunda aynı çözücü, süre, sıcaklık ve işlem sırası bulunmalıdır. Numuneler birden fazla bağımsız partide üretilir ve her partide hem kontrol hem müdahale yer alır. Ölçüm sırası rastgeleleştirilir. Birincil çıktı önceden belirlenir; örneğin belirli bir protokol sonrası kararlı MPP verimi. Voc, FF, EQE ve luminesans ikincil çıktılar olabilir. Başarısız ya da kısa devreli aygıtlar sessizce atılmaz; üretim verimi de sonuçtur.

Mekanizma iddiası için yalnızca birincil çıktının yükselmesi yetmez. EQE'nin büyük ölçüde aynı kalması optik alternatifini zayıflatabilir; fakat tek başına ortadan kaldırmaz. Tam aygıttaki gerilim artışı ile yarım yapıdaki kuazi-Fermi seviyesi ayrışması birlikte değerlendirilir. Stabilizasyon sonrası kazanımın kalması geçici koşullandırma açıklamasını sınar. Farklı katkı miktarları mekanizma hakkında ipucu verir, ama çok sayıda deneme sonrası en iyi noktayı seçmek ayrı bir doğrulama seti gerektirir.

Durdurma ölçütü de baştan yazılır. Katkı yalnızca tek partide işe yarıyorsa, kararlı ölçümde kayboluyorsa ya da nem/ısı altında ciddi bozulma getiriyorsa daha yüksek tarama verimi programı sürdürmek için yeterli değildir. Başka bir hipotez kurulabilir; bu, eski hipotezin doğrulandığı anlamına gelmez.

Örnek tasarım: yeni bir soğurucu

Yeni bir bileşimin ilk kararı elektron bantlarını hesaplamak olmayabilir. Önce atom ve yük dengesi, bilinen ana fazlar, koordinasyon, rakip bileşikler ve kimyasal erişilebilirlik değerlendirilir. Formül doğru olsa bile kristal yapısı belirsizse tek bir rastgele yapı için bant aralığı hesaplamak hedef nesneyi tanımlamaz. Bir makineden çıkan çok basamaklı sayı, giriş nesnesindeki belirsizliği azaltmaz.

En ucuz ayırıcı test bazen dengeli bir ayrışma kanalıdır. Bu kanal altında büyük bir enerji dezavantajı bulunması, o yapının önceliğini düşürebilir. Ancak sınırlı kanal testi tüm faz diyagramı değildir. Tersine, kanalda sorun bulunmaması da sentezlenebilirliği doğrulamaz. Ardından sistematik rakip faz kümesi, yapı yakınsaması, dinamik davranış, elektronik kalite ve kusurlar gelir. Her basamakta bir sonraki pahalı işin hangi gerekçeyle açıldığı yazılmalıdır.

Laboratuvarla çalışırken teslim edilecek numune, beklenen faz, karakterizasyon paketi, kabul ölçütü, ham veriler ve tekrar koşulları önceden tanımlanır. “Bu malzemeyi sentezleyin ve verimini ölçün” ifadesi kapsamı belirsiz bırakır. Malzeme sentezi, ince film oluşumu, kontak geliştirme ve güneş hücresi optimizasyonu farklı aşamalardır. Başarı ölçütü bu ayrımı yansıtmalıdır. Kitap bir kimyasal operasyon reçetesi yerine bu bilimsel kapsamı öğretir.

Fikirden ürüne kanıt basamakları

Bir araştırma fikri önce açık bir hipotezdir. Hesaplamalı tarama, seçilmiş model ve girdiler altında incelenen özelliklere ilişkin kanıt sağlar. Malzeme düzeyindeki çalışma yapı, faz, optik ve taşıma davranışını; arayüz çalışması komşu katmanların etkileşimini; aygıt çalışması tamamlanmış hücrenin akım, gerilim ve kararlı gücünü sınar. Bağımsız deneysel tekrar, bir sonucun başka numune ve ölçüm düzeninde de görülebildiğini araştırır. Ürün doğrulaması ise büyük alan, üretim tekrarı, çevresel koşullar ve dayanıklılığı ayrıca içerir. Bunlar bu kitapta kullanılan genel bir düşünme sırasıdır; yeni bir standart veya resmi sertifika sınıflandırması değildir.

Bu ayrımı somutlaştıralım. Uygun bant aralığı hesaplanmış bir bileşik için henüz sentez başarısı bilinmeyebilir. Sentezlenen filmin iyi ışıldaması, kontaklı hücrenin verimini vermez. Bir hücrenin bağımsız ölçülmüş yüksek verimi, seri üretim modülünün aynı verim veya ömre sahip olduğunu göstermez. Her aşamada iddia, eldeki gözlemin kapsamıyla sınırlanır. [R18] [R30]

Başarı hedefini evrensel bir yüzde seçerek değil, uygulamanın koşullarıyla yaz. Karşılaştırmada ışık spektrumu ve şiddeti, numune sıcaklığı, hücre veya modül oluşu, alan tanımı, yoğunlaştırma, terminal sayısı, güç toplama yöntemi ve kararlı ölçüm durumu belirtilmelidir. Eşleşmeyen kategorilerdeki iki sayıdan doğrudan üstünlük

sonucu çıkarılmaz. Standart koşullardaki başarıya üretim kabulü ve hizmet ömrü eklendiğinde hedefin gerçekten ürün ihtiyacını karşılayıp karşılamadığı görülür. [R01] [R06]

Sonuç raporunun asgari iskeleti

Araştırma sorusunu, deney ya da hesap protokolünü, giriş verilerinin kökenini, karşılaştırmayı, birim ve koşulları, belirsizliği, ham veri bağlantılarını ve başarısızlıkları birlikte raporla. Bir sonucun yeniden üretilebilir olması için yalnız kod yeterli değildir; hangi dosyanın hangi sürümle ve hangi varsayımla üretildiği de gerekir. Negatif sonuçları saklamak, aynı başarısız hipotezin başka bir ad altında tekrar pahalı hale gelmesini önler.

Alıştırma: Bir model, 1.000 adaydan 10'unu çok yüksek verimli gösterdi. İlk işlem hangisi olmalı? Cevap: hedefin gerçekten ölçülmüş hücre verimi olup olmadığını, eğitim alanını, benzer adayların veri sızıntısını ve girdilerin fiziksel uyumunu kontrol etmek. Ardından en ucuz bağımsız ayırıcı test. Doğrudan on adayın pahalı hesaplarını başlatmak modelin hatasını büyütebilir.

On iki haftalık araştırmacı çalışma rotası

Takvimden önce öğrenme çıktısını seçmek

Bu bölümdeki on iki hafta, sıfırdan uzmanlık garantisi değildir. Çalışma düzeni kurmak için bir örnektir. İlk kez elektrik ve yarıiletken okuyan biri aynı basamakta daha uzun kalabilir; laboratuvar erişimi veya önceki matematik bilgisi süreyi değiştirir. Bir haftayı bitirmenin ölçüsü sayfa sayısı değil, kendi başına yapabildiğin işler.

Öğrenme çıktısı, gözlenebilir bir beceri cümlesidir: “J-V grafiğinden gücü hesaplayabilirim” veya “bir makaledeki alan tanımını hatasını fark edebilirim” gibi. “Perovskiti anladım” çok geniştir. Çıktıyı küçük görevlere bölersek eksik ön bilgiyi görebiliriz. Örneğin verim hesabında hata varsa sorun hücre fiziği değil, cm^2 ile m^2 dönüşümü olabilir.

Üç çalışma defteri

Bir **kavram defterinde** terimi kendi cümlele açıkla ve karşı örnek yaz. “Yüksek akım yüksek güçtür” ifadesine karşı kısa devrede gücün sıfır olmasını kullan. Bir **hesap defterinde** bilinenler, aranan, birimler, varsayım, işlem ve sonuç yorumunu ayrı tut. Bir **kanıt defterinde** okuduğun iddianın kaynağını, numunesini ve hangi koşullara genellenebildiğini kaydet. Aynı konuyu bu üç biçimde tekrar etmek ezberi uygulamaya dönüştürür.

Örnek çalışma oturumu: önce bir sayfalık temel açıklamayı oku; sonra şekli kapatıp kendi çizimini yap; ardından kitaptaki sayıları biraz değiştirerek hesabı tekrarla; son olarak farklı bir yayındaki benzer şekli yorumla. Yanlış sonuç çıkarsa hemen çözümü kopyalamak yerine birim ve varsayımı geri izle. Çözümün hangi adımında bilmediğin kavram çıktığını görmek, yeni öğrenme hedefini belirler.

Sonraki tablodaki haftalar bu becerilerin önerilen sırasını verir. İleri modelleme aşamasına geçmeden önce basit enerji ve yük bilançosunun kurulabilmesi gerekir. Hesaplamalı rota laboratuvar olmadan başlayabilir; deneysel beceriler ise uygun eğitim, ekipman ve gözetimli uygulamayla edinilir. Kitap açıklama sağlar, bir cihazı fiilen kullanma eğitimi tamamlamış saymaz.

Anlama kontrolü: takıldığında nereye dönmelisin?

Bir denklem anlaşılmıyorsa önce her sembolün birimini, sonra değişkenin ölçülebilir anlamını yaz. Bunlar kuruluyorsa matematik adımına dön; kurulmamışsa kavram bölümüne dön. Daha fazla sayfa okumak yerine eksik halkayı düzeltmek sonraki bölümlerin hızını artırır.

Bu program bir yeterlilik garantisi değil, kitabı aktif öğrenmeye dönüştüren bir çalışma düzenidir. Haftada yaklaşık sekiz-on iki saat ayıran bir okur için başlangıç önerisidir. Denklemleri yeniden hesaplamadan ve gerçek bir makaleyi yöntem düzeyinde incelemekten yalnız okumak yeterli değildir. İlerlemeyi bitirilen sayfa sayısı ile değil, üretilen küçük araştırma çıktılarıyla ölç.

Hafta	Odak	Somut çıktı
1	Tarih, enerji-güç ayrımı, spektrum	Açıklamalı zaman çizgisi; eV-nm dönüşüm tablosu
2	Bantlar, Fermi seviyesi, pn ve kontaklar	Denge ve aydınlık bant diyagramını kendi çiziminle anlat
3	Taşıma, yeniden birleşme, J-V	Sentetik diyot eğrisinden Voc, Jsc, FF ve verim çıkar
4	Ayrıntılı denge ve gerilim kaybı	Bir ideal üst sınırın varsayımlarını bir sayfada açıkla
5	Silisyum ve ince filmler	İki hücre mimarisinin kayıp ve üretim karşılaştırması
6	Perovskit ve tandem	2T ve 4T için optik ve elektrik devre haritası
7	Ölçüm ve karakterizasyon	Bir makale için tam ölçüm koşulları ve belirsizlik fişi
8	Dayanıklılık ve modül	Bir yaşlanma deneyinin hangi ömür iddiasını desteklemediğini yaz
9	DFT, kusurlar, faz kararlılığı	Bir aday için rakip açıklamalar ve yakınsama planı
10	Aygıt modelleme ve ML	Parametre duyarlılığı ve veri sızıntısı incelemesi
11	Deney tasarımı ve saha	Kontrollü, durdurma ölçütlü bir araştırma önerisi
12	Bağımsız yeniden üretim	Açık bir makalenin sınırlı bir sonucunu yeniden hesapla; farkları raporla

Üç bitirme çalışması

Birinci seçenek aygıt fiziğidir: açık bir J-V ve EQE veri setinde akım tutarlılığını değerlendir. Spektral veri yoksa akımı kesin doğruladığını söyleme; hangi veri gerektiğini belirt. Aynı J-V eğrisine farklı parametre takımlarının ne ölçüde uyduğunu incele ve tanımlanabilirlik sınırını raporla.

İkinci seçenek malzeme araştırmasıdır: bilinen bir PV soğurucusu için yapı, rakip faz, bant aralığı ve kusur literatürünü bir kanıt haritasında topla. Çelişkili değerleri ortalamaya zorlamak yerine yöntem, sıcaklık, numune ve bileşim farklarıyla açıkla. Yeni bir yapı önermek zorunda değilsin; bilinen bir belirsizliği doğru sınırlamak başlı başına araştırma becerisidir.

Üçüncü seçenek güvenilirliktir: açık bir yaşlanma çalışmasını yeniden incele. Başlangıç verimi, koşullandırma, ışık/ısı/nem/yük, kesinti, numune sayısı ve T80 tanımını çıkar. Aynı veri için farklı başlangıç noktalarının T80'i nasıl değiştirdiğini göster. Sonucun saha ömrüne aktarılması için eksik değişkenleri yaz.

Okuma sırası ve araçların rolü

Fizik için ders kitabını; bir teknoloji için yakın tarihli bir derlemeyi; karar verdiğin mekanizma için özgün makaleyi; sayısal sonuç için ek veriyi birlikte kullan. PV Lighthouse gibi hesaplayıcılar temel eğilimleri denemek için yararlıdır; varsayımları öğrenmeden alınan çıktı bağımsız doğrulama değildir. Hesaplayıcıyı önce bildiğin bir sınır durumunda kontrol et. [B06]

Bir uzmanla konuşurken “hangi yazılımı öğreneyim?” sorusundan önce “hangi gözlenebilir büyüklüğün belirsizliği kararımızı engelliyor?” sorusunu sor. Yazılım değişebilir; soruyu doğru kurma becerisi kalır. İleri aşamada literatür taramasını düzenli aralıklarla yenile; bu kitabın kesim tarihinden sonraki çalışmalar burada yer almaz.

Araştırmanın açık sınırları ve geleceğe bakış

“Yeni” olanın hangi sorunu çözdüğünü sormak

PV araştırmasının açık sınırları birkaç farklı ölçekte bulunur. Bir malzeme daha az gerilim kaybedebilir; bir kontak daha az metal kullanabilir; bir kaplama daha hızlı üretilebilir; bir modül daha uzun ömürlü olabilir. Bunların her biri ilerleme olabilir. Ancak birindeki başarı diğerlerini otomatik sağlamaz. Geleceğe ilişkin iddiayı önce hangi kayıp veya maliyetin azalacağına çevirmeliyiz.

Sıcak taşıyıcı hücresi, ışıkla uyarılan taşıyıcının fazla enerjisini örgüye vermeden önce kullanmayı hedefler. **Taşıyıcı çoğalması**, yeterince enerjili tek fotondan birden fazla elektron-delik çifti oluşmasına ilişkin mekanizmadır. **Ara bant**, normal bant aralığı içinde uygun elektronik durumlarla düşük enerjili fotonları çok adımlı kullanma fikridir. Bu başlıklar tek başına çalışan teknoloji değildir; hızlar, seçicilik, kayıplar ve net güç bilançosu sınanmalıdır.

Bir kuantum verimi neden enerji verimi değildir?

Öğretim örneği: 3 eV fotonun iki çift oluşturduğunu varsayalım. Her çift dış devrede 0,5 eV enerji aktarabiliyorsa toplam elektrik enerjisi 1 eV'dir; bu foton için enerji oranı yaklaşık %33'tür. İki çift, foton başına iki taşıyıcı çevrimi demektir; “%200 enerji verimi” değildir. Ayrıca fazladan çiftin oluşmasıyla kontağa toplanması ayrı verim basamaklarıdır. Bu ayrım alışılmadık dönüştürme mekanizmalarında özellikle önemlidir.

Teknoloji olgunluğu, fikrin hangi ölçekte ve hangi koşullarda gösterildiğini anlatır. Hesap, tek numune, bağımsız ölçülmüş hücre, pilot üretim ve sürekli ticari çıktı farklı basamaklardır. **Ödünleşim**, bir ölçütü iyileştirirken başka ölçütün kötüleşmesidir. Daha yüksek verimin daha dar süreç penceresi veya daha pahalı ekipman istemesi örnektir.

Gelecek araştırma sorusunu “en yüksek yüzde” ile sınırlamak yerine koşullu kurabiliriz: belirli alanda, belirli üretim süresi ve malzeme bütçesiyle, şu kadar kararlı güç ve şu dayanıklılık ölçütü. Bu cümle daha az gösterişli görünse de deneyin nasıl tasarlanacağını ve bir sonucun gerçekten ilerleme olup olmadığını belirler.

Anlama kontrolü: hangi model sınıfı değişti?

Yeni mekanizma tek eklem sınırından farklı bir varsayım kullanıyorsa bunu açıkça yaz. Ardından yeni mekanizmanın ek kayıplarını ve gerçek net gücünü hesapla. Bir teorik sınıra ilişkin varsayımı değiştirmek, fabrikada o avantajı gerçekleştirmiş olmak değildir.

Fotovoltaikte tek bir son problem yoktur. Bir teknoloji verimde güçlenirken ölçek, üretim toleransı, malzeme yoğunluğu, ömür veya geri dönüşümde yeni sorunlar açabilir. Araştırmanın geleceğini yalnız en yüksek hücre verimine indirgemek bu karşılıklı bağımlılıkları gizler. Aşağıdaki sorular tahmin ya da başarı vaadi değil, araştırma problemi kurmak için bir haritadır.

Silisyumun ötesi, silisyumla birlikte

Silisyum tabanlı endüstrinin birikimi, yeni bir malzemenin yalnız fiziksel olarak değil üretim açısından da rekabet etmesini gerektirir. Tandem fikri, mevcut alt hücreyi kullanarak yüksek enerjili fotonların kaybını azaltma fırsatı sunar. Ancak üst hücrenin daha yüksek gerilim üretmesi, ek optik katmanların ve bağlantıların kayıplarını aşmalıdır. Akım eşleme, mevsimsel spektrum, sıcaklık katsayıları, üretim verimi ve tandem modülün yaşlanması birlikte çözülmelidir.

Üç ya da daha fazla birleşim teorik olarak spektrumu daha iyi kullanabilir; bunun karşılığında malzeme uyumu, bağlantı ve üretim zorluğu artar. Bir mimarinin bilimsel değeri, kaç birleşimi olduğundan değil net kayıplarla ne kazandırdığından gelir. Her yeni katman için “hangi kaybı azaltıyor, hangi kaybı ekliyor?” sorusunu yazmak tasarımı berraklaştırır.

Yeni soğurucular için gerçek boşluk

Yeni bir malzemenin araştırılmaya değer olması için her ölçütte en iyi olması gerekmez. Düşük sıcaklıkta üretim, belirli spektruma uyum, düşük toksisite, esneklik veya özel bir entegrasyon avantajı farklı hedefler oluşturabilir. Ancak hedef baştan tanımlanmalıdır. Bir iç mekân sensörünün güç kaynağı için uygun bant aralığı ve optik ortam, açık hava enerji santralinden farklıdır. Lux cinsinden verilmiş bir aydınlatmayı spektrum bilinmeden AM1.5G ile doğrudan karşılaştırmak yanlıştır.

Toksisiteyi yalnız element adından çıkarmak da yeterli değildir; bileşiğin biçimi, kullanım miktarı, sızıntı yolu ve yaşam döngüsü önemlidir. Bunun tersi de geçerlidir: yüksek verim çevresel soruları ortadan kaldırmaz. Terawatt ölçeğindeki metal ve taşıma katmanı talebini inceleyen çalışmalar, malzeme seçimi ve geri dönüşümün tasarımın başlangıcında ele alınması gerektiğini gösterir. Bu kaynak burada yalnız kaynak talebi sorusunun önemini çerçevelemek için kullanılmıştır. [B07]

Alternatif dönüşüm mekanizmaları

Ara bant, sıcak taşıyıcı, çoklu eksiton üretimi, singlet fisyonu ve bulk fotovoltaiik etki gibi kavramlar temel fizik açısından değerlidir. Her birinde enerji veya taşıyıcı dağılımının standart tek birleşimli aygıttan farklı kullanılması hedeflenir. Bir mikroskobik mekanizmanın gözlenmesi, tam aygıtta net enerji kazancı gösterildiği anlamına gelmez. Soğurma, seçici çıkarım, kayıp kanalları, güneş ışığı yoğunluğu ve cihazın bütün güç bilançosu birlikte değerlendirilir.

Bu kitap bu uzmanlıkların ayrıntılı monografisi değildir. İleri okuma için fizik sınırları bölümü başlangıç sağlar. Yeni bir mekanizmayı okurken, hangi ayrıntılı denge varsayımının değiştiğini, o değişikliğin hangi ek cihaz koşulunu gerektirdiğini ve deneyin gerçek çalışma yoğunluğunda yapılıp yapılmadığını belirle. “SQ sınırını aşar” cümlesi tek başına bir araştırma açıklaması değildir.

Sistemle birlikte düşünmek

Tarım arazisiyle birlikte kullanım, bina yüzeyleri, yüzer sistemler ve düşük ışıklı uygulamalar farklı tasarım ölçütleri getirir. Alan başına güç kadar geçirgenlik, renk, yük, bakım, erişim ve ekosistem koşulları da önem kazanabilir. Hücre araştırmacısının bütün sistem mühendisliğini yapması gerekmez; fakat hedef uygulamanın hangi kısıtları getirdiğini bilmesi gerekir.

Güç elektroniği, şebeke esnekliği ve depolama, yüksek PV penetrasyonunda enerji değerini etkiler. Bu kitap güç elektroniği tasarımı ya da şebeke bağlantı mevzuatı el kitabı değildir. Malzeme araştırması açısından ders şudur: daha yüksek test verimi her saatte daha değerli enerji demek değildir. Enerjinin üretildiği zaman, kullanılabilirlik ve sistem kayıpları nihai yararı belirler.

Son çalışma: kendi araştırma cümleleri

Kitabı bitirdiğinde şu beş cümleyi yaz. Hangi fiziksel nesneyi inceliyorum? Hangi gözlenebilir büyüklüğü iyileştirmek istiyorum? En güçlü alternatif açıklama ne? En ucuz ayırıcı test hangisi? Hangi sonuçta duracağım? Bu cümleler sayısal koşullar ve kontrolle tamamlanabiliyorsa, artık yalnız bir konu başlığı değil, uygulanabilir bir araştırma sorusu kurmuş olursun.

Bir aygıtı baştan sona çözümlemek

Bir aygıt dosyasını açarken ilk on dakika

Bu bölümde tek bir örneği baştan sona inceleyeceğiz. Önce **numune kimliği** gerekir: hangi film veya hücre, hangi üretim günü, hangi katman sırası? Sonra **ölçüm kimliği** gelir: hangi ışık, sıcaklık, alan, tarama ve cihaz? Numuneyle ölçümü ayırmazsak aynı hücrenin farklı koşullardaki kayıtlarını farklı numunelermiş gibi sayabiliriz.

Ham veri, cihazın kaydettiği sayılardır. **İşlenmiş veri**, düzeltme, normalizasyon veya model uygulanmış kayıttır. Bir eğrinin alana bölünmüş olması, alanın doğru girildiğini kanıtlamaz. **Türetilmiş büyüklük**, ham ölçümlerden hesaplanan verim, FF veya ömür gibi sonuçtur. Sonucun hangi girdilerden geldiğini geriye doğru izleyebilmek gerekir.

Sayıların birbirini tutması ilk filtredir

Sentetik ön kontrol: $0,25 \text{ cm}^2$ açıklıkta 6 mW maksimum güç ölçülmüş olsun. Güç yoğunluğu 24 mW/cm^2 'dir. Işınım 100 mW/cm^2 ise verim %24'tür. Metinde %26 yazıyorsa bu farkı açıklayacak başka bir alan, ışınım veya ölçüm var mı? Önce tanım ve aritmetik kontrol edilir. Yeni fizik aramak daha sonraki iştir.

Ardından **çapraz kontrol** yaparız: spektrum ve EQE'den beklenen kısa devre akımı, J-V ölçümüyle tutarlı mı? Kararlı güç, hızlı taramanın maksimumunu destekliyor mu? Bir ölçümün başka bir fiziksel yoldan elde edilen büyüklükle uyuşması, tek grafiğe göre daha güçlü güven sağlar. Ancak aynı yanlış alanı iki hesapta da kullanmak bağımsız doğrulama olmaz.

Son aşamada açıklamaları sıralarız. Düşük FF için seri direnç, şönt veya taşıma engeli olabilir. Hangi ek ölçüm bu olasılıkları en az masrafla ayırır? Bu seçim, **bilgi değeri** düşüncesidir: en ayrıntılı cihazı değil, kararı değiştirecek ölçümü önce seçmek. Aşağıdaki vaka, bu ön kontrollerden araştırma planına nasıl geçildiğini gösterecektir.

Anlama kontrolü: bir sayıyı geriye doğru izle

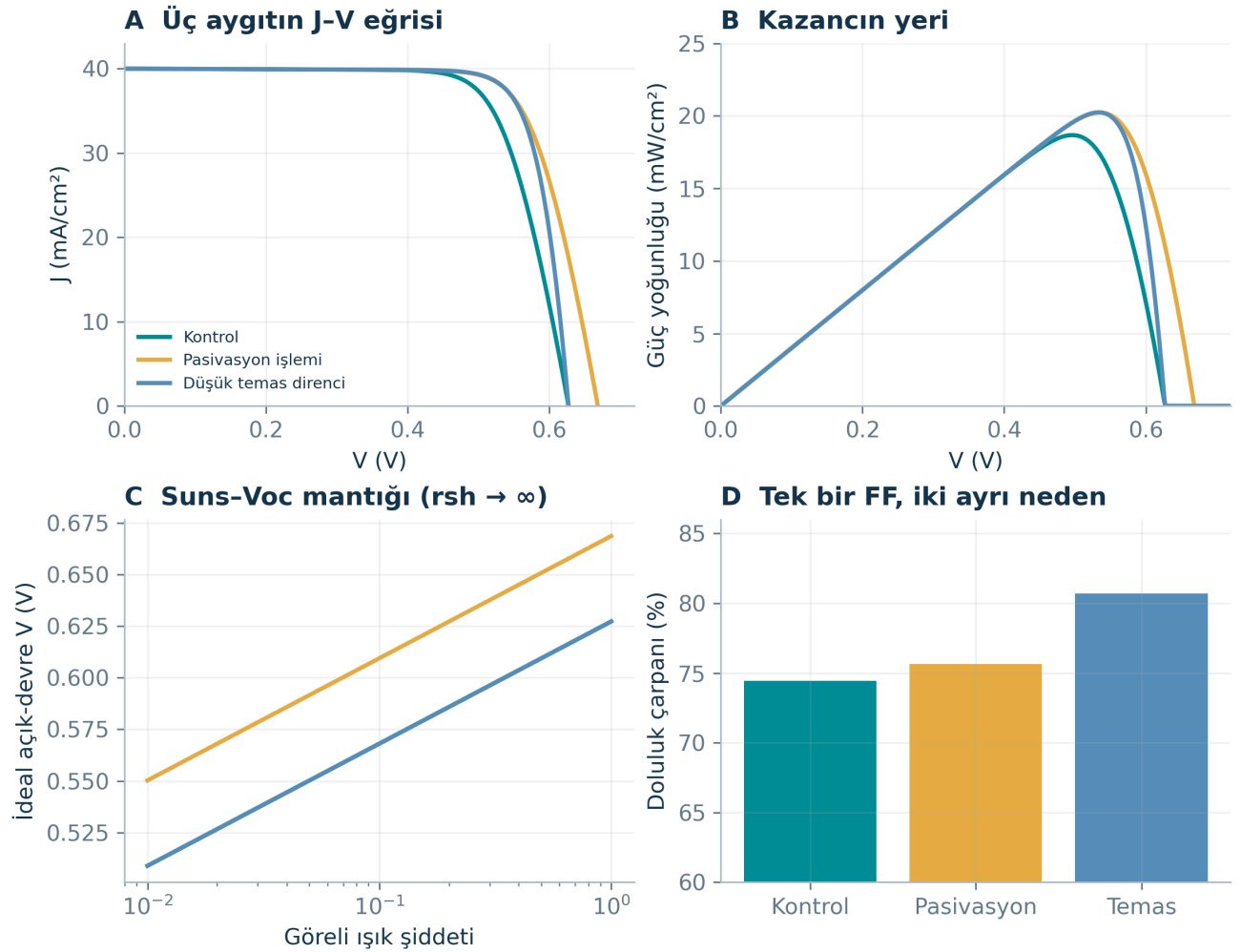
Vakadaki verimden maksimum güce, güçten aynı çalışma noktasındaki akım ve gerilime, akım yoğunluğundan alan ve akıma geri dön. Her adım aynı numuneye ve koşula bağlanabiliyorsa hesap zinciri izlenebilir. Bir bağlantı eksikse sonuçtan önce o eksik tamamlanmalıdır.

Bir hücrenin veriminin arttığını görmek başlangıçtır. Araştırma, artışın hangi mekanizmadan geldiğini ve başka numunelerde tekrar edip etmeyeceğini bulur. Bu bölümde üç sentetik aygıtı aynı hesap içinde karşılaştıracakız. Birinde yeniden

birleşme eşdeğeri azalıyor, diğerinde temas direnci düşüyor. İkisi neredeyse aynı verime ulaşıyor; buna rağmen araştırmacının sonraki deneyi farklı olmalı.

Veriyi ve varsayımları tanımlamak

Üç aygıtta sıcaklık 298,15 K, $J_{ph} = 40 \text{ mA/cm}^2$, diyot ideallik faktörü 1, $r_{sh} = 3000 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ve ışınlam 100 mW/cm^2 olsun. Kontrolde $J_0 = 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ ve $r_s = 1,5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ seçiliyor. Pasivasyon senaryosunda yalnız J_0 beş kat azalıyor. Temas senaryosunda yalnız r_s , $0,4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 'ye düşüyor. Bu parametre değişiklikleri gerçek bir işlemin yalnız bu değişkeni etkilediği iddiası değildir; mekanizmaları ayrı öğrenmek için tasarlanmıştır.



Şekil 42. Aynı verim, farklı fizik. A ve B panelleri üç aygıtın tam tek-diyot çözümleridir. C paneli paralel kaçak ihmal edilerek hesaplanan Suns-Voc düşünce deneyidir; pasivasyon gerilimi yükseltirken saf seri direnç değişimi açık-devre gerilimini değiştirmez. D paneli FF'nin her iki mekanizmadan da etkilenebildiğini gösterir. Bütün eğriler sentetiktir. [B11]

Aygıt	Voc (V)	FF (%)	Verim (%)
Kontrol	0,62708	74,46	18,668
Pasivasyon senaryosu	0,66842	75,67	20,220

Aygıt	Voc (V)	FF (%)	Verim (%)
Temas senaryosu	0,62708	80,70	20,239

Tablodaki çok basamaklı sayılar ölçüm kesinliği değildir; sayısal modelin kontrol değerleridir. Her üçünde Jsc yaklaşık 40 mA/cm² kalır. Pasivasyon senaryosunda Voc yaklaşık 41,34 mV artar. Basit logaritmik beklenti $V_T \ln 5 = 41,35$ mV'dir; sonlu paralel kaçak nedeniyle tam çözümde küçük fark vardır. Temas senaryosunda açık devrede dış J sıfır olduğu için Jrs düşümü sıfırdır; Voc değişmez. Akım çekildiğinde iç gerilim kaybı azaldığı için MPP ve FF iyileşir.

Makalenin ilk iddiasını nasıl sınardık?

Bir yazar “arayüz pasivasyonu verimi iki puana yakın artırdı” diyorsa, yalnız son verimin yükselmesi mekanizmayı kanıtlamaz. Bu örnekte saf temas iyileştirmesi de benzer verimi üretir. İlk ayırım için Voc ve FF'ye birlikte bakarız. Voc yükselişi yeniden birleşme azalmasıyla uyumlu olabilir; fakat optik üretim artışı veya sıcaklık farkı da gerilimi değiştirebilir. Dolayısıyla aynı Jsc ve aynı sıcaklık koşulları kontrol edilir.

İkinci adımda kontak içermeyen film, yarım yığın ve tam aygıt karşılaştırılır. Film PL/QFLS iyileşiyor ama uç Voc iyileşmiyorsa, malzeme kazanımının kontakta kaybolması olasıdır. Uç Voc değişmeden FF artıyorsa, temas veya taşınma açıklaması daha çok ağırlık kazanır. Ancak bu çıkarım yeni bir ölçüm önerisidir; tek başına nihai teşhis değildir. Karşılıklı tutarlı birkaç ölçümle açıklama daraltılır.

Üçüncü adımda Suns-Voc veya uygun pseudo-JV yaklaşımıyla direnç etkisi azaltılmış performans araştırılır. Tam J-V ile pseudo-JV arasında büyük fark bulunması taşıma kaybına işaret edebilir. Burada da ışık altında toplamanın gerilime bağımlı olması, iyonik etkiler ve paralel kaçak gibi model koşulları kontrol edilir. Bütün ölçüm teknikleri aynı varsayımlara sahip değildir; farklı tekniklerin aynı sayıyı vermemesi yalnız cihaz hatası olmayabilir.

Sınırlı bütçede hangi deney önce gelir?

Önce ucuz ve açıklamaları ayıran ölçümü seçeriz. Yeni bir malzeme sentezlemekten önce, aynı aygıtta sıcaklık kontrollü kararlı J-V, EQE integrali ve tekrar edilebilir Voc ölçümü yapılabilir. Ardından seçilen mekanizmaya uygun film/kontak kontrolü kurulur. İki açıklama aynı veriyi açıklıyorsa, ikisinin farklı sonuç öngördüğü koşulu ararız: ışık şiddeti, sıcaklık, katman kalınlığı veya kontak değişimi gibi.

Hipotez	Bu örnekte beklenen değişim	Çürütmeye yarayan gözlem
Yalnız J_0 azaldı	Voc artar; J_{sc} yaklaşık sabit	Kalibre sıcaklıkta Voc değişmemesi
Yalnız r_s azaldı	FF artar; Voc aynı kalır	Büyük ve tekrar eden Voc artışı
Yalnız optik üretim arttı	EQE integrali ve J_{sc} artar	Aynı EQE/ J_{sc} altında yalnız FF kazanımı
Ölçüm alanı yanlış	J değerleri ve verim ölçeği kayar	Bağımsız maske/alan ölçümüyle farkın kaybolması

Bu tablo, gerçek aygıtta etkilerin bir arada bulunabileceğini dışlamaz. Tam tersine tek etkili açıklamanın ne zaman bırakılması gerektiğini gösterir. Araştırma ilerledikçe modelin karmaşıklığı, onu gerekli kılan veriye göre artmalıdır.

Tekrarlanabilir bir çalışma paketinin içeriği

Ham J-V ve zaman serileri, kullanılan açıklık alanı, ışınlam ve sıcaklık kayıtları, numune kimlikleri ve işlem partileri birlikte saklanır. Analiz, ham veriyi değiştirmeden ayrı dosyada yürütülür. Bir grafik için hangi numunelerin dışlandığı ve nedenleri kaydedilir. Ana sonuç yalnız en iyi hücreye değil bağımsız üretim tekrarlarının dağılımına dayanır. Başarısız numuneler, mekanizmayı anlamak için en az başarılı numuneler kadar değerlidir.

Bu kitabın sayısal örneğinde de aynı ilke izlendi: veri spektrumu, şekil üretim kodu, kullanılan parametreler ve hesap sonuçları ayrı tutuldu. Grafikler sonradan elle sayı düzeltmek için kullanılmadı; tablolar aynı denklemin çözümlerinden üretildi. Bir eğriyi yeniden üretmek ile gerçek bir malzeme mekanizmasını kanıtlamak farklı aşamalardır; ikisinin arasında kontrollü deney bulunur.

Çözümü araştırma problemleri

Denklemi çözmeden önce problemi kurmak

Çözümü problemler yalnız doğru sayıyı bulma alıştırmaları değildir. Her problemde önce **bilinenleri** ve **arananı** yaz. Sonra kullandığın denklemin hangi koşulu gerektirdiğini belirt. Aynı birim sistemine çevir, hesabı yap ve sonucun hangi aralıkta makul olması gerektiğini düşün. En son anlamlı basamakla raporla. **Anlamlı basamak**, girdilerin desteklemediği yapay kesinliği yazmama disiplindir.

Örnek birim zinciri: 500 nm, 0,5 μm ve 5×10^{-5} cm aynı uzunluktur. Soğurma katsayısı cm^{-1} verilmişse kalınlığın santimetreye çevrilmesi gerekir. Üstel ifadede α birimsiz olmalıdır. μm değerini doğrudan koymak on bin katlık birim hatası üretebilir; sonuç 0 ile 1 arasında kalsa bile hesap fiziksel olarak yanlış olabilir.

Matematik araçlarının anlamı

Türev, bir büyüklüğün diğerine göre yerel değişme hızıdır. Gerilim 0,50'den 0,51 V'a çıkarken akım 30'dan 29 mA'a düşüyorsa bu küçük aralıkta eğim yaklaşık -100 mA/V'tur. Bu sonlu fark, aralık küçültüldükçe yerel türeve yaklaşmayı amaçlar.

İntegral, küçük katkıların toplamıdır. Gücün zamana göre integrali enerji, akımın zamana göre integrali yüküktür. **Karekök**, hangi sayının kendisiyle çarpılınca verilen değeri oluşturduğunu sorar. Difüzyon uzunluğunda karekök görülmesi, zaman iki kat artınca yayılma mesafesinin genellikle iki kat değil kök iki kat artmasıyla ilişkilidir.

Logaritma, çarpanları toplamaya dönüştürür. $\ln(ab) = \ln(a) + \ln(b)$ eşitliği bu özelliği anlatır. Bir logaritmanın içindeki fiziksel oran birimsiz olmalıdır; " $\ln(5 \text{ volt})$ " tek başına uygun ifade değildir. Doğru ifadede gerilim bir referans gerilime bölünmüş olabilir. Bu kontrol denklemi kopyalarken kaybolmuş ölçekleri fark etmeyi sağlar.

Bir problemin sonunda yalnız "24" yazmak yerine "seçilen tek geçiş ve yansımasız modelde şu akım" diye belirt. Modelin sınırı, çözümün parçasıdır. Sonraki çözümler bu alışkanlığı farklı malzeme, ölçüm ve araştırma kararlarında tekrar edecektir.

Anlama kontrolü: sınır durumunu dene

Soğurma modelinde kalınlık sıfıra giderken soğurulan pay sıfıra, çok büyürken en fazla bire yaklaşmalıdır. Bir formül veya hesap bu basit sınırları sağlamıyorsa işaret, birim veya model kurulumu yanlıştır. Sınır durumları, hesap makinesinden bağımsız kontrol aracıdır.

Bu bölümde amaç bir sayıyı bulmanın ötesine geçmektir. Her çözümde önce model seçilir, birimler kapatılır ve sonuç fiziksel olarak yorumlanır. Sayılar öğretim amaçlıdır.

Bir probleme başka model seçersen farklı sonuç elde edebilirsin; farkı varsayımların üzerinden açıklamalısın.

Problem 1 - Soğurma kalınlığı ile toplama uzunluğu uyumlu mu?

Bir soğurucunun ilgili dalga boyundaki α değeri $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ olsun. Tek geçişte %95 soğurmayı sağlayan kalınlığı bul. $D = 0,5 \text{ cm}^2/\text{s}$ ve $\tau = 20 \text{ ns}$ ise difüzyon uzunluğunu hesapla. Bu sayılardan iyi hücre sonucu çıkarılabilir mi?

Çözüm: $1 - \exp(-\alpha d) = 0,95$ eşitliğinden $d = \ln 20/\alpha = 1,498 \text{ } \mu\text{m}$. $L = \text{karekök}(D\tau) = \text{karekök}(0,5 \times 20 \times 10^{-9}) \text{ cm} = 1 \text{ } \mu\text{m}$. Optik olarak gerekli kalınlık, bu modeldeki difüzyon uzunluğundan büyüktür. Bu durum nötr bölgede toplama kaybı olabileceğini düşündürür. Fakat iç alan, kontak yönü, üretim profili ve yüzey kaybı verilmeden aygıt verimi hesaplanamaz. En ucuz sonraki adım, kalınlık serisinde EQE ve gerilim bağımlı toplama karşılaştırmasıdır.

Problem 2 - Açıklık alanı hatası verimi ne kadar değiştirir?

$P_{\text{max}} = 20 \text{ mW}$ ve $G = 100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ölçülsün. Alan yanlılıkla $0,90 \text{ cm}^2$, gerçekte $1,00 \text{ cm}^2$ alınmış olsun. Bildirilen ve doğru verim nedir?

Çözüm: Yanlış verim $20/(100 \times 0,90) = \%22,22$; doğru verim $\%20,00$ 'dir. Hata $+2,22$ yüzde puan ve bağıl yaklaşık $\%11,11$ 'dir. Alan $\%10$ küçük yazıldığı için verim hatasının da tam $\%10$ olacağını sanmak yanlıştır; alan paydada bulunur. Bu örnek aktif alan, açıklık alanı ve toplam aygıt alanının neden ayrı tanımlandığını gösterir.

Problem 3 - Işınımsız gerilim kaybından ERE'ye dönmek

$298,15 \text{ K}$ 'de ışınımsız gerilim kaybı 150 mV ise ERE nedir? Bu kayıp 100 mV 'a inerse ERE kaç kat artar?

Çözüm: $\text{ERE} = \exp(-\Delta V/VT)$. 150 mV için $\exp(-0,150/0,0256926)$ yaklaşık $0,002914$, yani $\%0,2914$ bulunur. 50 mV iyileşme $\exp(0,050/VT)$ yaklaşık $7,00$ kat ERE artışına karşılık gelir. Bu logaritmik ilişki, ışıınımda büyük bir bağıl iyileşmenin gerilimde neden yalnız onlarca mV olabileceğini açıklar. Karşılaştırmada optik kaçış koşulları değişmişse iç yeniden birleşme hakkında doğrudan aynı oran çıkarılmaz.

Problem 4 - Ön ızgara uzaklığının kayıp bedeli

$J = 35 \text{ mA}/\text{cm}^2$, $R_{\text{sheet}} = 100 \text{ } \Omega/\text{kare}$ ve $s = 1,2 \text{ mm}$ olsun. Parmaklar arası tek boyutlu modelde yanal kayıp nedir? $s = 1,8 \text{ mm}$ olursa oran nasıl değişir?

Çözüm: Santimetreyle $s = 0,12$. $J^2 R_{\text{sheet}} s^2/12 = 0,000147 \text{ W}/\text{cm}^2$, yani $0,147 \text{ mW}/\text{cm}^2$. Uzaklık $1,5$ katına çıktığında kayıp $2,25$ kat olur; $0,331 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 'ye çıkar. Buna karşılık aynı parmak genişliğinde gölge kesri üçte bir azalır. Toplam optimum için iki kayıp aynı güç biriminde karşılaştırılmalıdır.

Problem 5 - Kusur oluşum enerjisinin işaretli eğimi

İki yük durumunun oluşum enerjileri $H^+(EF) = 0,4 + EF$ ve $H^0(EF) = 0,9$ eV olsun. EF, valans bandı tepesinden eV cinsinden ölçülüyor. Termodinamik geçiş seviyesi ve $EF = 0,2$ eV'de kararlı yük durumu nedir?

Çözüm: Eşitlik $0,4 + EF = 0,9$ olduğundan geçiş $0,5$ eV'dedir. $EF = 0,2$ için $H^+ = 0,6$, $H^0 = 0,9$ eV; +1 yük durumu daha düşük enerjilidir. Pozitif eğim, elektron rezervuarı değiştikçe pozitif yük durumunun oluşum maliyetinin arttığını gösterir. Bu seviye doğrudan bir PL pik enerjisi veya taşıyıcı yakalama bariyeri değildir.

Problem 6 - Zarf üstü enerji ve kinetik kararlılık

$x_B = 0,25$ ve $0,75$ fazlarının oluşum enerjileri $-0,30$ ve $-0,40$ eV/atom olsun. $x_B = 0,50$ adayı $-0,28$ eV/atomdadır. Alt zarf farkını hesapla; bu farktan oda sıcaklığında ayrışma süresi bulunabilir mi?

Çözüm: Bileşim dengesini eşit ağırlıklı karışım sağlar. Karışım enerjisi $-0,35$ eV/atom, adayın farkı 70 meV/atomdur. Bu, seçilen faz havuzunda termodinamik itici güçtür. Ayrışma süresi için difüzyon, çekirdeklenme ve reaksiyon bariyerleri gerekir; farkı kBT ile karşılaştırmak tek başına bir saat veya yıl ölçeği üretmez.

Problem 7 - Belirsizlik ve anlamlı basamak

Akım, gerilim, alan ve ışıının bağımsız bağıl standart belirsizlikleri sırasıyla %0,5; %0,2; %0,7; %1,0 olsun. Verim %25 ise birleşik standart ve $k = 2$ genişletilmiş belirsizlik nedir?

Çözüm: $\text{Karekök}(0,5^2 + 0,2^2 + 0,7^2 + 1,0^2) = \%1,334$ bağıl standart belirsizlik. Verim biriminde bu $25 \times 0,01334 = 0,334$ yüzde puandır. $k = 2$ ile yaklaşık $0,667$ yüzde puan olur. Yaklaşık rapor $\%25,0 \pm 0,7$ biçiminde, kapsama yaklaşımı ve k değeriyle birlikte verilebilir. Ortak hata veya korelasyon varsa bağımsız kareler toplamı değiştirilmelidir.

Problem 8 - Bir günlük enerji ve performans oranı

Nominal gücü 5 kWp olan sistemde günlük düzlem ışıını 6 kWh/m², AC üretimi 24 kWh olsun. Referans ışıını $G_{STC} = 1$ kW/m² alınarak performans oranını hesapla.

Çözüm: Son üretim $Y_f = 24/5 = 4,8$ kWh/kWp. Referans üretim $Y_r = 6/1 = 6$ saat. $PR = 4,8/6 = 0,80$, yani %80. Bu sayı aynı anda optik, sıcaklık, elektriksel ve kullanılabilirlik etkilerini içerir. Farklı mevsimlerin PR değerlerini sıcaklık ve veri seçimini dikkate almadan doğrudan ekipman bozunması diye yorumlama.

Problem 9 - İki faktör arasındaki etkileşim

$y = 20 + 0,2A + 0,3B + 0,45AB$ modelinde A ve B, -1 veya +1 değerlerini alıyor. A'yı düşükten yükseğe çıkarmanın etkisi B'ye bağılı mı?

Çözüm: A değişiminin farkı $\Delta y = 2(0,2 + 0,45B)$. $B = -1$ için $-0,5$ puan, $B = +1$ için $+1,3$ puandır. Bu yüzden “A’yı artırmak zararlıdır” veya “yararlıdır” cümlesi tek başına eksiktir. Sonuç, B'nin seçildiği düzeye bağlıdır. Fiziksel karşılığı, örneğin işlem sıcaklığının farklı yüzey kimyalarında farklı tepki üretmesi olabilir; bu yorum deneyle sınanmalıdır.

Problem 10 - Ölçümden araştırma kararına

Yeni kontak sonrası FF üç puan yükseldi; Voc ve EQE integrali değişmedi. Birinci hipotez temas direncinin azaldığı, ikinci hipotez ışık soğurmanın arttığı olsun. Hangi gözlem ilk ayrımı yapar?

Çözüm: EQE integrali değişmediği için “yalnız soğurma arttı” açıklaması zayıflar. Değişmeyen Voc ve yükselen FF, temas/taşınma iyileşmesiyle daha uyumludur. Sonraki deney, kontak direnci veya uygun pseudo-JV karşılaştırması olabilir. Aynı ışınlam ve sıcaklık, numuneler arası tekrar ve kararlı MPP doğrulanmadan mekanizma kesinleştirilmez. İyi yanıt yalnız bir hipotezi seçmez; onu hangi deneyin yanlışlayacağını da söyler.

Bir makaleyi çalışarak okuma şablonu

Makaleyi bitirdiğinde bir sayfalık araştırma notu çıkar: ana fiziksel iddia; incelenen aygıt kesiti; numune ve kontrol tanımı; birincil performans ölçütü; en önemli ham grafik; yazarın kullandığı ileri model; alternatif açıklama; ayrıştırıcı deney; tekrar üretmek için eksik bilgi. Daha sonra aynı notu makalenin ek bilgileriyle güncelle. Başlık ve özet, bu çalışmanın yalnız girişidir.

Literatürde yeni bir yöntemi kendi çalışmana taşıırken başlangıç kontrolünü önce yeniden üret. Kontrol çalışmıyorsa, yeni işlemin başarısızlığını veya başarısını yorumlamak zordur. Parametreleri değiştirirken tek tek kayıt tut; negatif sonuçların neden negatif olduğunu öğrenmek, koşulları rastgele değiştirerek en iyi hücreyi aramaktan daha taşınabilir bilgi üretir.

Simgeler, birimler ve Türkçe-İngilizce sözlük

Sözlüğü kelime listesinden çalışma aracına çevirmek

Bir simgenin tek ve evrensel anlamı yoktur. **G**, bir bölümde yüzeye gelen ışınlamayı W/m^2 birimiyle, başka yerde hacimsel taşıyıcı üretim hızını $cm^{-3} s^{-1}$ birimiyle gösterebilir. **R**, direnç, yansıma oranı veya yeniden birleşme hızı olabilir. Harfi tek başına ezberlemek yerine tanımını ve birimiyle birlikte kaydet. Aynı denklemde benzer harfler kullanılıyorsa alt indisler ve bağlam ayrımı sağlar.

Alt indis, büyüklüğün türünü belirtir: kısa devre için sc , açık devre için oc , maksimum güç noktası için mpp . **Üst indis**, bazen kuvvet, bazen yük durumu veya açıklayıcı etiket olabilir. cm^2 'de 2 alan birimini, Pb^{2+} 'da 2 iyonun yük durumunu gösterir. Bunları aynı işlem gibi okumamalıyız. Yunan harfleri de yalnız simgedir: η verim, τ yaşam süresi, λ dalga boyu olarak bu kitapta sık kullanılır.

Birimleri satır satır çevirmek

$1 m = 100 cm$ olduğundan $1 m^2 = 10\,000 cm^2$ 'dir. Bu yüzden $1 A/m^2 = 0,1 mA/cm^2$ olur: amperi miliampere çevirirken 1000 ile çarpar, paydadaki metrekaresi santimetrekareye çevirirken 10 000'e böleriz. $1000 W/m^2 = 100 mW/cm^2$ dönüşümü aynı mantıktadır. Alan biriminde uzunluk çarpanını yalnız bir kez uygulamak en yaygın hatalardan biridir.

Yoğunluk kelimesi de payda ister. Akım yoğunluğu alan başına akım, taşıyıcı yoğunluğu hacim başına sayıdır. Kütle yoğunluğu ise hacim başına kütledir. “Yoğunluk arttı” ifadesi hangi büyüklük ve payda verilmeden tamamlanmış değildir.

İngilizce karşılığı öğrenirken sözcük değil kavram eşleştirelir. “Yield”, üretimde kabul oranı veya enerjide belirli dönemde üretim anlamına gelebilir. “Lifetime”, fazla taşıyıcının mikroskobik yaşam süresi veya ürünün yıllarca hizmet süresi olabilir. Sözlükteki karşılığı metindeki ölçek ve birimle birlikte kullanmak, çeviri ve literatür okumasındaki bu karışıklığı önler.

Anlama kontrolü: yanlış eşitliği bul

$40 mA/cm^2$, $40 A/m^2$ değildir; $400 A/m^2$ 'dir. $1 cm^2$ de $0,01 m^2$ değil $0,0001 m^2$ 'dir. Birim dönüşümünü her adımda açık yazmak, verimde katlar mertebesindeki hataları daha grafik çizmeden yakalar.

Birim defteri

$1 \text{ eV} = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ J}$; $q = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$; $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J s}$; $c = 299792458 \text{ m/s}$. Bu SI tanım değerleriyle hc yaklaşık $1239,841984 \text{ eV nm}$ olur. Boltzmann sabiti $k = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; k/q yaklaşık $8,617333262 \times 10^{-5} \text{ V/K}$. $25^\circ\text{C} = 298,15 \text{ K}$ ve kT/q yaklaşık $25,693 \text{ mV}$. [B08]

$1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$; $1 \text{ mA/cm}^2 = 10 \text{ A/m}^2$. $1000 \text{ W/m}^2 = 100 \text{ mW/cm}^2$. $J_{sc} = 40 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 0,70 \text{ V}$ ve $FF = 0,80$ için maksimum güç yoğunluğu $22,4 \text{ mW/cm}^2$; bu ışınım altında verim yüzde 22,4'tür. Sayısal olarak bu kolaylık, ışınımın 100 mW/cm^2 olmasına bağlıdır. Başka bir ışınımında aynı kısa yol geçmez.

Yüzde ile yüzde puanı ayır: verimin yüzde 20'den yüzde 22'ye çıkışı 2 yüzde puan, başlangıca göre yüzde 10 bağıl artıştır. “Yüzde 2 iyileştirme” ifadesi bu iki anlamdan hangisinin kastedildiği belirtilmeden belirsizdir. Enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, kütle başına güç ve alan başına güç de farklı performans ölçütleridir.

Temel simgeler

Simge	Anlam	Sık kullanılan birim
E, E_g	Foton enerjisi, bant aralığı	eV veya J
λ , ν	Dalga boyu, frekans	nm; Hz
G	Bağlama göre ışınım veya hacimsel üretim hızı	W/m^2 veya $\text{cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$; mutlaka tanımla
Φ	Foton akısı ya da spektral foton akısı	$\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; enerji/dalga boyu başına ayrıca belirtilir
J, I	Akım yoğunluğu, akım	mA/cm^2 ; A
V, V_{oc}	Gerilim, açık devre gerilimi	V
P, η	Güç, güç dönüşüm verimi	W; boyutsuz veya yüzde
n, p	Elektron ve delik yoğunluğu	cm^{-3}
μ , D, τ , L	Hareketlilik, difüzyon katsayısı, ömür, difüzyon uzunluğu	cm^2/Vs ; cm^2/s ; s; cm
α , d	Soğurma katsayısı, kalınlık	cm^{-1} ; cm
R_s , R_{sh}	Seri ve şönt direnci	Ω ; alan normalize ise $\Omega \text{ cm}^2$
ϵ , ψ	Dielektrik geçirgenlik, elektrostatik potansiyel	F/cm; V
u, U	Standart, genişletilmiş belirsizlik	Sonuçla aynı birim

İki dilli kavram sözlüğü

Türkçe / kısaltma	İngilizce	Araştırmada anlamı
Fotovoltaik	Photovoltaic	Işıktan doğrudan elektrik dönüşümü
Soğurucu	Absorber	Yararlı fotonları soğurması hedeflenen katman
Bant aralığı	Band gap	Elektronik bant kenarları arasındaki enerji farkı
Doğrudan / dolaylı aralık	Direct / indirect gap	Geçişin momentum koşulunu ayırır
Eksiton	Exciton	Bağlı elektron-delik çifti
Taşıyıcı	Charge carrier	Akıma katılan elektron veya delik
Katkılama	Doping	Taşıyıcı yoğunluğu ve türünü ayarlayan safsızlık
Fermi seviyesi	Fermi level	Dengedeki elektronik kimyasal potansiyel
Kuazi-Fermi ayrışması	Quasi-Fermi level splitting	Denge dışı elektron ve delik potansiyelleri farkı
Yeniden birleşme	Recombination	Elektron-delik popülasyonunun kaybı
Işınımsal yeniden birleşme	Radiative recombination	Foton yayımıyla gerçekleşen kanal
Işınımsız yeniden birleşme	Non-radiative recombination	Enerjinin foton dışı kanallara gitmesi
SRH	Shockley-Read-Hall	Kusur aracılı yeniden birleşme modeli
Auger	Auger recombination	Enerjinin başka bir taşıyıcıya aktarıldığı kanal
Pasivasyon	Passivation	Elektriksel olarak zararlı durumların etkisini azaltma
Seçici kontak	Selective contact	Bir taşıyıcıyı iletip diğerini engelleme
Bant hizalanması	Band alignment	Katmanlar arası elektronik enerji ilişkisi
Arayüz	Interface	İki malzemenin birleştiği bölge
Tane sınırı	Grain boundary	Farklı kristal yönelimlerini ayıran bölge
Boşluk kusuru	Vacancy	Kristal sitesinde atom eksikliği
Antisite	Antisite defect	Atomun başka tür için olan siteyi işgal etmesi
İyon göçü	Ion migration	İyonların veya iyonik kusurların hareketi
Kısa devre akımı	Short-circuit current	Uç gerilimi sıfırken akım
Açık devre gerilimi	Open-circuit voltage	Net uç akımı sıfırken gerilim
Dolum faktörü, FF	Fill factor	$P_{max}/(V_{oc} I_{sc})$; güç yoğunluğuyla yazılırsa $p_{max}/(V_{oc} J_{sc})$
MPP / MPPT	Maximum power point / tracking	En yüksek güç noktası ve takibi
PCE	Power conversion efficiency	Çıktı elektrik gücünün giriş ışık gücüne oranı

Türkçe / kısaltma	İngilizce	Araştırmada anlamı
EQE	External quantum efficiency	Gelen foton başına toplanan elektron oranı
IQE	Internal quantum efficiency	Tanımlanan soğurulmuş fotonlara göre kuantum verimi
PL / TRPL	Photoluminescence / time-resolved PL	Işıkla uyarılmış yayım ve zaman tepkisi
EL	Electroluminescence	Elektriksel uyarımla ışık yayımı
PLQY	Photoluminescence quantum yield	Soğurulan uyarıcı foton başına yayılan foton oranı
ERE	External radiative efficiency	Dış ışımsal yeniden birleşme payı; PLQY ile özdeş değil
Histerezis	Hysteresis	Sonucun ölçüm geçmişine bağlı olması
Spektral uyumsuzluk	Spectral mismatch	Kaynak ve aygıt yanıtının referansla uyumsuzluğu
Aperture alanı	Aperture area	Optik açıklıkla tanımlanan ölçüm alanı
Aktif alan	Active area	Belirli aktif bölge tanımı; tüm aygıt alanı olmayabilir
STC	Standard test conditions	Tanımlı referans spektrum, ışınlam ve sıcaklık
AM1.5G	Air mass 1.5 global	Referans yersel global spektral dağılım
AM1.5D	Air mass 1.5 direct	Referans doğrudan spektral dağılım
Tandem	Tandem	Farklı spektral bölgelerden yararlanan üst üste alt hücreler
2T / 4T	Two / four terminal	Elektriksel uç ve devre topolojisi ayrımı
Akım eşleme	Current matching	Seri alt hücrelerin ortak akım kısıtı
Şönt	Shunt	İstenmeyen paralel kaçak yolu
TCO	Transparent conducting oxide	Saydam iletken oksit
ETL / HTL	Electron / hole transport layer	Elektron / delik taşıma katmanı
PERC	Passivated emitter and rear cell	Arka pasivasyon içeren silisyum mimarisi
TOPCon	Tunnel oxide passivated contact	İnce oksitli pasifleştirilmiş kontak
SHJ	Silicon heterojunction	Silisyum heteroeklem mimarisi
IBC	Interdigitated back contact	Birbirine geçen arka kontak geometrisi
DSSC	Dye-sensitized solar cell	Boya duyarlı güneş hücresi
BHJ	Bulk heterojunction	Organik verici-alıcı karışım ağı
DFT	Density functional theory	Elektronik temel durum hesaplama çerçevesi
SOC	Spin-orbit coupling	Spin ile orbital hareket etkileşimi
Konveks zarf	Convex hull	Fazlar arasında en düşük enerji karışım zarfı

Türkçe / kısaltma	İngilizce	Araştırmada anlamı
Fonon	Phonon	Kristal titreşim modu
Metastabilite	Metastability	Küresel denge dışındaki sınırlı kararlı durum
SQS	Special quasirandom structure	Düzensizliğin seçilmiş korelasyonlarla temsili
NEB	Nudged elastic band	Geçiş yolu ve enerji bariyeri yöntemi
Sürüklenme-difüzyon	Drift-diffusion	Alan ve yoğunluk farkıyla taşıma modeli
TMM	Transfer matrix method	Tabakalı optik yapıların çözüm yöntemi
UQ	Uncertainty quantification	Belirsizliğin nicel hesabı
OOD	Out of distribution	Eğitim dağılımının dışı
Veri sızıntısı	Data leakage	Test bilgisinin eğitime uygunsuz taşınması
Tanımlanabilirlik	Identifiability	Verinin parametreleri ayırabilme gücü
Tasarım yeterliliği	Design qualification	Belirli testler altında tasarımın yeterliliği
T80	Time to 80 percent	Tanımlı başlangıç performansının yüzde 80'ine düşme süresi
PR	Performance ratio	Referans ışınlıma göre normalize sistem performansı
LCOE	Levelized cost of electricity	İskontolu maliyetlerin iskonto edilmiş enerjiye oranı
LCA	Life cycle assessment	Yaşam döngüsü boyunca çevresel etki hesabı
EPBT	Energy payback time	Enerji girdisinin üretimle geri kazanım süresi

Kaynakça ve erişim notları

Kaynakça nasıl kullanılır?

Bu bölümdeki kayıtlar bir isim dizisi değil, metindeki iddiaların izidir. Köşeli parantezdeki kod seni kayda, kayıt da DOI veya kurum bağlantısına götürür. **Yayın yılı**, çalışmanın ne zaman yayımlandığını; **erişim tarihi**, bağlantının bu derleme hazırlanırken ne zaman kontrol edildiğini anlatır. Güncel web sayfaları değişebileceğinden ikisini aynı tarih gibi okumamalıyız.

Bir kaydın açıklama notu erişim sınırını belirtir. “Özet incelendi” denilmişse tam yöntem bölümünün okunduğu varsayılmaz. “Standart katalog kaydı” standardın kapsam ve sürümünü doğrulamaya yarar; bütün zorunlu maddelerinin burada aktarıldığı anlamına gelmez. Bir ileri okuma kitabının listelenmesi de bütün bölümlerinin bu eserde yeniden sunulduğunu söylemez.

Atıf yaparken bu kitabın açıklamasıyla özgün deneysel sonucu ayır. Kavramı anlatma biçiminden yararlanıyorsan kitaba; belirli bir hücrenin verimi veya mekanizmaya ilişkin özgün kanıttan yararlanıyorsan asıl makaleye git. İkisi birlikte kullanılabilir. Böylece eğitim sentezi ile ilk ölçümün sahibi görünür kalır.

Bu revizyonda tarih deneyleri için Becquerel'in 1839 metninin erişilen sayfaları ve Adams-Day'in kısa özgün bildirimi ayrıca incelenmiştir. Kaynak notlarında bu kapsam açıkça yazılıdır. Kimyasal işlem ayrıntılarını yalnız popüler tarih çizelgesine dayandırmak yerine, metnin hangi deneyden söz ettiğini ayırmak amaçlanmıştır. Bütün PV literatürünün veya bütün tarih arşivinin eksiksiz tarandığı iddiası yoktur.

Anlama kontrolü: referansın taşıdığı yük

Bir atıf, yanındaki bütün cümleleri otomatik doğrulamaz. Belirli bir sayıyı kullanırken kaynağın o sayıyı aynı koşul, tanım ve numuneyle gerçekten verdiğini kontrol et. Kaynak bulunamadıysa bunu belirsiz bırakmak, başka bir bağlantıyı görünüşte destek gibi eklemekten daha doğru araştırma pratiğidir.

Tarihsel kaynaklar, özgün çalışmalar ve kurumsal başvuru kayıtları. Temel derleme erişimi 7 Eylül; ek tarih kontrolleri 8 Eylül 2026. Bir kaynağın listelenmesi, erişilemeyen tam metninin incelendiği anlamına gelmez; kullanım sınırları aşağıdaki notlarda belirtilir.

[B01] Photovoltaics Report, updated 14 July 2026

Fraunhofer ISE; PSE Projects GmbH (2026). Kurumsal rapor

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

PDF ve güncelleme tarihi doğrulandı; kısa piyasa ve kaynak kullanımı çerçevesi. Tek başına eşleştirilmiş rekor sertifikası değildir.

[B02] Snapshot of Global PV Markets 2026

IEA PVPS (2026). Kurumsal piyasa raporu

<https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2026/>

Resmi özet sayfası ve ana PDF kontrol edildi. Özet grafiği 607-698 GW, ana metin alt değer için yaklaşık 608 GW bildirir; 698 GW üst tahmindir. PDF: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2026/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets-2026.pdf>

[B03] Solar cell efficiency tables: Version 68

M. A. Green; E. D. Dunlop; M. Yoshita; N. Kopidakis; K. Bothe; G. Siefer; J. Y. Jiang (2026). Bağımsız doğrulanan sonuçlar tablosu

<https://doi.org/10.1016/j.joule.2026.102494>

JRC146451 resmi bibliyografya ve kapsam kaydı doğrulandı:

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC146451> . Buradan ayrıntılı rekor alan/uncertainty değerleri aktarılmadı.

[B04] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition

A. Luque; S. Hegedus (editörler) (2011). İleri okuma kitabı

<https://doi.org/10.1002/9780470974704>

Yayınevi bibliyografyası ve kapsamı doğrulandı; tam metin tarandığı iddia edilmez.

[B05] Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts, Third Edition

P. Würfel; U. Würfel (2016). İleri okuma kitabı

https://www.wiley-vch.de/en?isbn=9783527413126&option=com_eshop&view=product

Yayınevi bibliyografyası ve kapsamı doğrulandı; tam metin tarandığı iddia edilmez.

[B06] PV Lighthouse: Equivalent circuit and research calculators

PV Lighthouse (Yaşayan kaynak). Araştırma aracı resmi sayfası

<https://www.pvlighthouse.com.au/equivalent-circuit>

Araç kapsamı kontrol edildi; çıktıları bağımsız doğrulama yerine geçmez.

[B07] The Resource Demand of Terawatt-Scale Perovskite Tandem Photovoltaics

L. Wagner; J. Suo; B. Yang; D. Bogachuk; E. Gervais; R. Pietzcker; A. Gassmann; J. C. Goldschmidt (2023). Özgün çalışma ön baskı kaydı

<https://arxiv.org/abs/2306.13375>

Ön baskı başlığı ve kaynak talebi kapsamı doğrulandı; sayısal kaynak talebi aktarılmadı.

[B08] The International System of Units (SI), 9th edition

BIPM (2019; güncellenen çevrimiçi baskı). Resmi SI başvuru kaynağı

<https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure>

SI tanım sabitleri için kaynak.

[B09] Multilayer optical calculations

Steven J. Byrnes (2016; v5 (2020)). Açık teknik türetme

<https://arxiv.org/abs/1603.02720>

v5 HTML metninde normal geliş, Fresnel genlikleri, faz ve koherent/inkoherent kapsam doğrulandı. Kitaptaki kayıpsız tek-tabaka örneği özgün sayısal yeniden hesaptır.

[B10] ASTM G173 reference spectra: pvlib data representation and get_reference_spectra

pvlib python contributors; ASTM G173 reference data (Erişim 2026). Açık referans veri

https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/generated/pvlib.spectrum.get_reference_spectra.html

2002 satırlı CSV kullanıldı: <https://raw.githubusercontent.com/pvlib/pvlib-python/main/pvlib/data/ASTMG173.csv> . Yerel dosya SHA-256: 91964ac23c0ec82dbbda4a7f160a5f5faf551dfe18ffae7e2446d74b57ee7859. Kurumsal spektrum tanımı H09 ile karşılaştırıldı.

[B11] pvlib.pvsystem.singlediode - single diode equation

pvlib python contributors (Erişim 2026). Resmi araç dokümantasyonu

<https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/generated/pvlib.pvsystem.singlediode.html>

Tek-diyot eşdeğer devre parametreleri ve denklem kapsamı kontrol edildi. Kitaptaki akım yoğunluğu biçimi ve eğriler bağımsız kök çözümüyle üretildi.

[B16] Solar Photovoltaic Cell Basics

U.S. Department of Energy (2026 erişimi). Kurumsal temel eğitim

<https://www.energy.gov/cmei/systems/solar-photovoltaic-cell-basics>

Temel hücre işleyişi ve teknoloji türleri için erişildi. Güncellenen sayfadaki bütün rekor/pazar ifadeleri bu revizyona aktarılmadı. Erişim: 8 Eylül 2026.

[B17] Solar Photovoltaic Performance and Efficiency Basics

U.S. Department of Energy (2026 erişimi). Kurumsal temel eğitim

<https://www.energy.gov/cmei/systems/solar-photovoltaic-performance-and-efficiency-basics>

Verim tanımı ve akım-gerilim-güç ilişkisini kontrol etmek için kullanıldı. Nicel örnekler bu kitap için üretilmiş öğretim örnekleridir. Erişim: 8 Eylül 2026.

[H01] The History of Solar

U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy (Yıl belirtilmemiş). Kurum tarih çizelgesi

https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf

12 sayfalık kamuya açık PDF doğrulandı. 1839 ve 1883 tarihsel dönüm noktaları için kullanıldı; kesin yayım yılı belgede doğrulanamadı. Belgedeki eski gelecek öngörülleri ve rekor tabloları güncel bilgi olarak kullanılmadı.

[H02] Effect of Light on Selenium During the Passage of an Electric Current

Willoughby Smith (1873). Birincil tarihsel yayın

<https://doi.org/10.1038/007303e0>

Nature 7, 303; 20 Şubat 1873. Başlık, tarih ve DOI yayıncı sayı dizini ve bibliyografik kayıt üzerinden doğrulandı.

Fotokondüktivite ile enerji üreten aygıt ayrımı için kısa tarihsel bağlam; tam makale incelemesi iddia edilmedi.

[H03] Referee's report on The action of light on selenium by William Grylls Adams and R. E. Day

Henry Enfield Roscoe; The Royal Society Archives (1876). Birincil arşiv kaydı

https://makingsscience.royalsociety.org/items/rr_7_429/referees-report-by-henry-enfield-roscoe-on-a-paper-the-action-of-light-on-selenium-by-william-grylls-adams-and-r-e-day

7 Ağustos 1876 hakem raporu kaydı, ilgili çalışmanın 1877 Philosophical Transactions yayımı ve DOI

10.1098/rstl.1877.0009 ile bağlantısını doğrular. Deney/sunum ve basım tarihi ayrımı için kullanıldı.

[H04] A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power

D. M. Chapin; C. S. Fuller; G. L. Pearson (1954). Birincil aygıt makalesi

<https://doi.org/10.1063/1.1721711>

Journal of Applied Physics 25(5), 676-677; Mayıs 1954. Yazarlar, kurum, başlık, sayfalar ve DOI bibliyografik kayıtları doğrulandı. Yayıncı tam metnine otomatik erişim sağlanamadı; %6 tarihsel bağlamı H08'den desteklendi.

[H05] Experimental silicon solar cell

Smithsonian Institution, National Museum of American History (Yıl belirtilmemiş). Müze nesnesi ve tarih kaydı

https://www.si.edu/object/nmah_713146

Smithsonian koleksiyon kaydının indekslenen açıklaması doğrulandı. Chapin, Fuller, Pearson ve Ohl bağlamı için kullanıldı; sayfanın doğrudan otomatik açılması geçici hata verdi.

[H06] The 1905 Papers - Annus Mirabilis of Albert Einstein

Library of Congress (Yıl belirtilmemiş). Kurum arşiv ve okuma rehberi

<https://guides.loc.gov/einstein-annus-mirabilis/1905-papers>

Einstein'ın 1905 ışık kuantumu/fotoelektrik makalesini ve Princeton çevirisini tanımlayan kurum kaydı doğrulandı. Kısa tarihsel bağlam için kullanıldı; PV aygıtıyla dış fotoelektrik etkinin ayrımı özgün öğretici açıklamadır.

[H07] Vanguard Satellite, 1958

NASA (2015). Kurum tarih kaydı

<https://www.nasa.gov/image-article/vanguard-satellite-1958/>

17 Mart 1958 fırlatma tarihi ve ilk güneş enerjili uydu bilgisi NASA sayfasında doğrulandı. Güncel yörünge durumu hakkında ek iddia kullanılmadı.

[H08] Deployment of Solar Photovoltaic Generation Capacity in the United States

David Hart; Kurt Birson (2016). DOE için hazırlanmış akademik kurum raporu

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/01/f34/Deployment%20of%20Solar%20Photovoltaic%20Generation%20Capacity%20in%20the%20United%20States.pdf>

George Mason University, Haziran 2016; 48 sayfalık PDF açıldı. Uzaydan yeryüzüne erken uygulama geçişi, Bell Labs yaklaşık %6 tarihi ve federal Ar-Ge bağlamı için kısa kullanım. Güncel maliyet veya piyasa verisi kaynağı değildir.

[H09] Reference Air Mass 1.5 Spectra

National Laboratory of the Rockies, formerly NREL (Yıl belirtilmemiş). Kurum referans spektrumu ve veri açıklaması

<https://www.nlr.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5>

Canlı sayfada ASTM G173, 37 derece yüzey, belirtilmiş atmosfer koşulları, spektral birimler ve SMARTS modeli doğrulandı. Kaynak sayfa NLR adıyla ve eski NREL bağlantılarının yönlendiği adreste sunuldu. Standart spektrumun evrensel hava durumu olmadığı açıklaması için kullanıldı.

[H10] The International System of Units - SP 330, Section 2

National Institute of Standards and Technology (2019). Resmî SI tanımları

<https://www.nist.gov/pml/special-publication-330/sp-330-section-2>

Işık hızı, Planck sabiti, temel yük ve Boltzmann sabitinin kesin SI değerleri doğrulandı. Öğretici sayısal örneklerde kullanılan termal gerilim bu sabitlerden bağımsız hesaplandı.

[H11] Fundamentals of Photovoltaics - Calendar and Readings

MIT OpenCourseWare (2013). Üniversite ders planı

<https://ocw.mit.edu/courses/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013/pages/calendar-readings/>

Kaynak, optik yönetim, uyarılma, yük ayrılması ve ileri konular için ders sırası doğrulandı. Okuma yönlendirmesi; güncel teknoloji rekorları için kullanılmadı.

[H12] Band Gap

PVEducation (Yıl belirtilmemiş). Özgün öğretim kaynağı

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/band-gap>

Bant aralığı, valans/iletim bandı ve elektron/boşluk tanımlarının sayfa içeriği okundu. Daha ileri kuram ve sayısal örnekler özgün öğretici sentezdir.

[H13] Absorption Coefficient

PVEducation (Yıl belirtilmemiş). Özgün öğretim kaynağı

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-coefficient>

Soğurma katsayısının dalga boyu ve malzemeye bağlı tanımı doğrulandı. %90 soğurma kalınlığı örneği bu kitap için seçilmiş varsayımsal sayılarla hesaplandı.

[H14] Equilibrium Carrier Concentration

PVEducation (Yıl belirtilmemiş). Özgün öğretim kaynağı

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/equilibrium-carrier-concentration>

Denge taşıyıcı yoğunluğu ve kütle etkisi bağıntısı için temel sayfa okundu. Kitabın ni ve katkı yoğunluğu sayıları açıkça öğretici varsayımdır.

[H15] The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors

William Shockley (1949). Birincil kuramsal makale

<https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x>

Bell System Technical Journal 28(3), 435-489; yayıncı sayfasındaki özet ve künye doğrulandı. Eklem potansiyeli, azınlık taşıyıcı difüzyonu ve doğrultma ilişkisinin tarihsel temeli için kullanıldı.

[H16] Diffusion

PVEducation (Yıl belirtilmemiş). Özgün öğretim kaynağı

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/diffusion>

Yoğunluk gradyanı ve difüzyon tanımı için okundu. Kitaptaki süreklilik, sınır koşulu tartışmaları ve hesaplar genişletilmiş özgün pedagojidir.

[H17] Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons

William Shockley; W. T. Read Jr. (1952). Birincil kuramsal makale

<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.87.835>

Physical Review 87, 835-842. Yayıncı kayıt ve özet sayfası açıldı. SRH mekanizmasının özgün kökeni için kullanıldı; kitap bir makale çevirisi değildir.

[H18] Electron-Hole Recombination in Germanium

R. N. Hall (1952). Birincil kuramsal yayın

<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.87.387>

Physical Review 87, 387; 15 Temmuz 1952. Künye ve DOI yayıncıdan doğrulandı; tam metin erişim kısıtlıydı. SRH adlandırmasının tarihsel kökeni için kullanıldı.

[H19] Improved quantitative description of Auger recombination in crystalline silicon

Armin Richter; Stefan W. Glunz; Florian Werner; Jan Schmidt; Andrés Cuevas (2012). Birincil araştırma makalesinin kurum kaydı

<https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/80c799ad-9546-4dc3-8a7c-b24c4c1ccfe7>

Physical Review B 86, 165202; DOI 10.1103/PhysRevB.86.165202. Fraunhofer kaydındaki özet ve yazarlar doğrulandı. 300 K koşullu enjeksiyon/katkı bağımlı parametreleştirme için kullanıldı; katsayılar başka sıcaklığa aktarılmadı.

[H20] Surface Recombination

PVEducation (Yıl belirtilmemiş). Özgün öğretim kaynağı

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/surface-recombination>

Yüzey yeniden birleşmesi tanımı ve ömürle ilişkisi okundu. İki yüzeyli levha hesabı düzgün taşıyıcı yoğunluğu varsayımıyla bu kitap için oluşturuldu.

[H21] Charge Carrier Separation in Solar Cells

Uli Würfel; Andres Cuevas; Peter Würfel (2015). Birincil kuramsal makalenin kurum kaydı

<https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000058630>

IEEE Journal of Photovoltaics 5(1), 461-469; DOI 10.1109/JPHOTOV.2014.2363550. KIT kaydı doğrulandı; yazar makalesinin açık kopyasındaki seçici iletkenlik ve quasi-Fermi gradyanı açıklaması okundu. Kaynağa özgü özet kısa tutuldu.

[H22] Solar cell fill factors: General graph and empirical expressions

Martin A. Green (1981). Birincil kuramsal makale

[https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90062-9](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90062-9)

Solid-State Electronics 24(8), 788-789. Künye ve özgün makalenin akademik kurumda bulunan PDF kopyası doğrulandı. İdeal FF yaklaşımının kökeni için kullanıldı; tam MPP örneği bağımsız kök çözümüne hesaplandı.

[H23] IV Curve

PVEducation (Yıl belirtilmemiş). Özgün öğretim kaynağı

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>

Kısa devre, açık devre ve maksimum güç noktası tanımları okundu. Kitaptaki sayısal hücre verileri öğretici modeldir, deney kaydı değildir.

[H24] Quantum Efficiency

PVEducation (Yıl belirtilmemiş). Özgün öğretim kaynağı

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/quantum-efficiency>

Dış ve iç kuantum verimi tanımları için sayfa okundu. Spektral banttan akım hesabı bağımsız öğretici örnektir.

[H25] Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells

William Shockley; Hans J. Queisser (1961). Birincil kuramsal makale

<https://doi.org/10.1063/1.1736034>

Journal of Applied Physics 32(3), 510-519. Özgün makalenin USPTO kamu arşivindeki kopyasının başlığı, özeti ve 6000 K/300 K varsayımları doğrulandı. Kitapta özgün tarihsel sonuca kısa atıf yapıldı; uzun açıklamalar genel denge fiziğinin özgün öğretici üretimidir.

[H26] Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells

Sven Rühle (2016). Birincil hesaplama makalesi

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.015>

Solar Energy 130, 139-147. Başlık, DOI ve yayınevi kaynaklı özet doğrulandı. AM1.5G bant aralığına bağlı tablo kapsamı için kullanıldı; tam tablolar bu oturumda yeniden hesaplanmış veya doğrulanmış rekorlar olarak sunulmadı.

[H27] The chemical potential of radiation

Peter Würfel (1982). Birincil kuramsal makalenin üniversite kopyası

<https://www.unife.it/scienze/astro-fisica/insegnamenti/ottica-applicata/materiale-didattico/sorgenti-assolute/Wurfel.pdf>

Journal of Physics C: Solid State Physics 15, 3967-3985; DOI 10.1088/0022-3719/15/18/012. Üniversite kopyası ve yayıncı kaynaklı özet doğrulandı. Genelleştirilmiş Planck yaklaşımının kısa açıklaması için kullanıldı.

[H28] Reciprocity relation between photovoltaic quantum efficiency and electroluminescent emission of solar cells

Uwe Rau (2007). Birincil kuramsal makale

<https://harvest.aps.org/v2/journals/articles/10.1103/PhysRevB.76.085303/fulltext>

Physical Review B 76, 085303; yayıncı tam metin uç noktası doğrulandı. Karşılıklık ve Voc/elektrolüminesans ilişkisi için kısa atıf; ERE örnek sayıları 298,15 K'de bağımsız hesaplandı.

[H29] Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells

Alexis De Vos (1980). Birincil kuramsal makalenin kurum kaydı

<https://biblio.ugent.be/publication/207802>

Journal of Physics D: Applied Physics 13(5), 839-846; DOI 10.1088/0022-3727/13/5/018. Yazarın UGent kaydı tarih ve künyeyi doğruladı; yayıncı kaynaklı özet, alt hücreler arası elektrolüminesans bağlaşım kapsamını doğruladı. Eski teorik verim sayıları modern AM1.5G rekoru gibi aktarılmadı.

[H30] Advanced Concepts, Part 1 - Lecture 15, MIT Fundamentals of Photovoltaics

Joseph T. Sullivan; MIT OpenCourseWare (2011). Üniversite ders notu

https://ocw.mit.edu/courses/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013/54a21db9c8e8a6a5b181807080da4f20_MIT2_627F13_lec15.pdf

44 sayfalık PDF'nin kapak tarihi 3 Kasım 2011; 2013 ders sayfasında sunuluyor. İleri kavramlara okuma yönlendirmesi için kullanıldı. Notlardaki eski verim ve maliyet tabloları güncel bilgi olarak alınmadı.

[H31] Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires

Edmond Becquerel (1839). Özgün tarihsel metnin tıpkıbasım/transkripsiyon paketi

https://www.becquerel-prize.org/pdf/2020_02_10_History_PV_BECQUEREL_prize.pdf

C. R. Acad. Sci. Paris 9, 561 ve devamı. Erişilen pakette özgün 561-565 sayfaları görsel olarak incelendi: iki bölmeli düzen, kapak ve ışık kontrolü, yüzey temizliği, AgCl kaplı platin deneyi. Paketteki bu erişim tüm 1839 arşivinin incelendiği anlamına gelmez. Erişim: 8 Eylül 2026.

[H32] The action of light on selenium (Abstract)

W. G. Adams; R. E. Day (1876-1877). Özgün kısa araştırma bildirimi

https://ese.nju.edu.cn/_upload/article/files/1a/d6/bd70f7454528b852ea0fd22758b6/e30147ef-ddc7-45a1-ae41-29fdb6b6cfd6.pdf

Proceedings of the Royal Society of London 25, 113-117. Metinde Received May 18, 1876; arşiv cilt kaydı 1876-1877.

Erişilen kısa bildirimin tam metni kontrol edildi; 37 sayfalık Philosophical Transactions makalesinin tamamı okunmuş diye sunulmaz. Pilsiz galvanometre deneyi ve önceden akım uygulanmamış üç numune kontrolü s.115-116. Erişim: 8 Eylül 2026.

[T01] 22.8% efficient silicon solar cell

Andrew W. Blakers; Aihua Wang; Adele M. Milne; Jianhua Zhao; Martin A. Green (1989). Özgün deneysel makale; yazar kurumu bibliyografik kaydı

<https://researchportalplus.anu.edu.au/en/publications/228-efficient-silicon-solar-cell/>

PERC tarihsel gelişimi. ANU kaydı canlı doğrulandı; tam deneysel yöntemler okunmuş olarak ileri sürülmedi. Başlıktaki verim tarihli çalışmaya aittir, güncel rekor değildir.

[T02] Carrier-selective contacts for Si solar cells

F. Feldmann; M. Simon; M. Bivour; C. Reichel; M. Hermle; S. W. Glunz (2014). Özgün deneysel makale

<https://doi.org/10.1063/1.4875904>

Applied Physics Letters 104, 181105. Yayıncı özeti ve bibliyografik veriler doğrulandı; TOPCon kontaklarda pasivasyon ve taşıma dengesinin tarihsel kanıtı.

[T03] Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%

Kunta Yoshikawa ve arkadaşları (2017). Özgün deneysel makale

<https://www.nature.com/articles/nenergy201732>

Nature Energy 2, 17032. Yayıncı özeti ve şekil açıklamaları erişildi; SHJ ile IBC topolojisinin birleştirilmesi ve alanın raporlanması. Abonelikli tam metnin tamamı okunmuş iddiası yok.

[T04] Silicon heterojunction solar cells with up to 26.81% efficiency achieved by electrically optimized nanocrystalline-silicon hole contact layers

Hao Lin; Miao Yang; Xiaoning Ru ve arkadaşları (2023). Özgün deneysel makale

<https://www.nature.com/articles/s41560-023-01255-2>

Nature Energy 8, 789-799. Yayıncıdaki sonuç, yöntem ve ilgili elektriksel çözümleme bölümleri erişildi. Metinde yalnızca nanokristal delik kontağı mekanizması kısa biçimde kullanıldı; başlıktaki sayı güncel rekor değildir.

[T05] Understanding the role of selenium in defect passivation for highly efficient selenium-alloyed cadmium telluride solar cells

Thomas A. M. Fiducia; Budhika G. Mendis; Kexue Li ve arkadaşları (2019). Özgün deneysel makale

<https://www.nature.com/articles/s41560-019-0389-z>

Nature Energy 4, 504-511. Yayıncı özeti ve şekil açıklamaları; selenyumun optik aralık dışında kusur pasivasyonu etkisi. Sayfada 28 Mayıs 2019 yazar düzeltmesi bağlantısı bulundu; metin yalnızca güncel sayfanın özet bulgusunu aktarır.

[T06] Sodium enhances indium-gallium interdiffusion in copper indium gallium diselenide photovoltaic absorbers

Diego Colombari; Florian Werner; Torsten Schwarz ve arkadaşları (2018). Özgün deneysel makale; açık erişim

<https://www.nature.com/articles/s41467-018-03115-0>

Sodyum etkisinin bileşim difüzyonu ve işlem geçmişiyle ilişkisi. Açık yayıncı metni erişildi; genel bir bütün-alkaliler mekanizması iddia edilmedi.

[T07] Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si

David L. Staebler; Christopher R. Wronski (1977). Özgün deneysel makale; tam metin erişim kısıtlı

<https://doi.org/10.1063/1.89674>

Applied Physics Letters 31, 292-294. DOI açılışı araçta hata verdi; başlık, yazar, yıl ve DOI bibliyografik kayıtlarla doğrulandı. Tarihsel olgu ayrıca özgün yazarın T33 açıklamasıyla desteklenir; erişilmeyen tam metin okunmuş sayılmadı.

[T08] Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration

John F. Geisz; Ryan M. France; Kevin L. Schulte ve arkadaşları (2020). Özgün deneysel makale

<https://www.nature.com/articles/s41560-020-0598-5>

Nature Energy 5, 326-335. Yayıncı sayfası doğrulandı. Yalnızca 2020 tarihli, yoğunlaştırılmış altı eklem sonucunu ve kategori ayırımı öğretmek için kullanıldı; bir güneş panel verimi veya güncel rekor iddiası değil.

[T09] Triple-junction solar cells with 39.5% terrestrial and 34.2% space efficiency enabled by thick quantum well superlattices

Ryan M. France; John F. Geisz; Tao Song; Waldo Olavarria; Michelle Young; Alan Kibbler; Myles A. Steiner (2022). Özgün deneysel makale

<https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.04.024>

Joule yayıncı özeti ve yazar ön baskısı arxiv.org/abs/2203.15593 erişildi. AM1.5G ve AM0 sonuçlarının ayrı raporlanmasını ve kuantum kuyulu aralık ayarını destekler. Başlıktaki sayılar tarihli sonuçlardır.

[T10] Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells

Akihiro Kojima; Kenjiro Teshima; Yasuo Shirai; Tsutomu Miyasaka (2009). Özgün deneysel makale

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja809598r>

Journal of the American Chemical Society 131, 6050-6051. Yayıncı özeti, yazarlar ve yayın tarihi erişildi; tarihsel fotoelektrokimyasal duyarlılaştırıcı mimariyle sınırlı kullanım.

[T11] Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites

Michael M. Lee; Joël Teuscher; Tsutomu Miyasaka; Takurou N. Murakami; Henry J. Snaith (2012). Özgün deneysel makale; özgün özet PubMed üzerinden

<https://doi.org/10.1126/science.1228604>

Science 338, 643-647. Özgün yazar özeti ve bibliyografik kayıt pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23042296/ üzerinden doğrulandı; tam yöntem erişimi iddiası yok.

[T12 / R13] Ionic transport in hybrid lead iodide perovskite solar cells

Christopher Eames; Jarvist M. Frost; Piers R. F. Barnes; Brian C. O'Regan; Aron Walsh; M. Saiful Islam (2015). Özgün hesaplamalı ve deneysel makale; açık erişim

<https://www.nature.com/articles/ncomms8497>

Nature Communications 6, 7497. Belirli MAPbI₃ sistemi için boşluk destekli iyon taşınımı; hesaplama ile kinetik deney bağı. Bütün perovskitler için tek evrensel bariyer olarak kullanılmadı. Nature Communications 6, 7497; iyon göçü için ilk ilkeler ve deneysel kinetiğin birlikte kullanıldığı özgün çalışma.

[T13] Reversible photo-induced trap formation in mixed-halide hybrid perovskites for photovoltaics

Eric T. Hoke; Daniel J. Slotcavage; Emma R. Dohner; Andrea R. Bowring; Hemamala I. Karunadasa; Michael D. McGehee (2015). Özgün deneysel makale; açık erişim

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/sc/c4sc03141e>

Chemical Science. Yayıncı özeti ve makale PDF arama metni erişildi; karışık halojenürlerde ışıkla geri döndürülebilir ayrışma ve optik değişim örneği.

[T14 / R14] Evidence for ion migration in hybrid perovskite solar cells with minimal hysteresis

Philip Calado; Andrew M. Telford; Daniel Bryant; Xiaoe Li; Jenny Nelson; Brian C. O'Regan; Piers R. F. Barnes (2016). Özgün deneysel ve aygıt modelleme makalesi; açık erişim

<https://www.nature.com/articles/ncomms13831>

Nature Communications 7, 13831. Yayıncı ve PMC açık metin doğrulandı; düşük histerezisin iyon göçü yokluğu anlamına gelmediğini destekler. Nature Communications 7, 13831; düşük histerezisin iyon göçünü dışlamadığını gösteren özgün deney.

[T15 / R05] Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures

Mark V. Khenkin ve arkadaşları (2020). Araştırmacı uzlaşısı ve yöntem belgesi

<https://www.nature.com/articles/s41560-019-0529-5>

Nature Energy 5, 35-49. Açık erişilen yayıncı bölümleri; ışık, ısı, nem, yük, MPP ve geri döndürülebilir değişim raporlaması. Bir mevzuat veya kesin saha ömrü modeli olarak sunulmadı. Nature Energy 5, 35-49; ISOS bağlamı, çalışma yükü, MPP ve dış ortam aktarımı için yöntem kaynağı. Bütün bölüm tek bu kaynaktan türetilmedi.

[T16] Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency

Florent Sahli ve arkadaşları (2018). Özgün deneysel makale

<https://www.nature.com/articles/s41563-018-0115-4>

Nature Materials 17, 820-826. Yayıncı özeti ve sayfası doğrulandı; tekstürlü monolitik yığın ile yeniden birleşme bağlantısının tarihsel örneği. Güncel rekor iddiası yok.

[T17] Monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with >29% efficiency by enhanced hole extraction

Amran Al-Ashouri ve arkadaşları (2020). Özgün deneysel makale; özgün özet ve kurumsal yazar kopyası

<https://doi.org/10.1126/science.abd4016>

Science 370, 1300-1309. Özgün özet pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33303611/ ve kurumsal yazar kopyası kaydı doğrulandı. Moleküler tek tabaka ile delik çıkarımı/kontak kaybı ilişkisi; tarihli rekor sayısı metinde güncel diye kullanılmadı.

[T18] Semi-transparent perovskite solar cells for tandems with silicon and CIGS

Colin D. Bailie ve arkadaşları (2015). Özgün deneysel makale

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/ee/c4ee03322a>

Energy & Environmental Science 8, 956-963. Yayıncı metni erişildi; yarı saydam üst hücre ve mekanik istifleme üzerinden 4T öğretimi.

[T19] Mixed tin-lead perovskites with balanced crystallization and oxidation barrier for all-perovskite tandem solar cells

Jin Zhou; Shiqiang Fu; Shun Zhou ve arkadaşları (2024). Özgün deneysel makale; açık erişim

<https://www.nature.com/articles/s41467-024-46679-w>

Nature Communications 15, 2324. Yayıncı özeti ve açık metin erişimi; karışık kalay-kurşun kristallenmesi ve Sn(II) oksidasyonu. Kimyasal sentez tarifi yeniden verilmedi.

[T20] A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO2 films

Brian O'Regan; Michael Grätzel (1991). Özgün deneysel makale

<https://www.nature.com/articles/353737a0>

Nature 353, 737-740. Yayıncı özeti ve bibliyografik tarih doğrulandı; boya duyarlı gözenekli TiO2 mimarisinin tarihsel kanıtı. 1991 ekonomik bağlamı güncelle taşınamadı.

[T21] Single-Junction Organic Solar Cell with over 15% Efficiency Using Fused-Ring Acceptor with Electron-Deficient Core

Jun Yuan; Yunqiang Zhang; Liuyang Zhou ve arkadaşları (2019). Özgün deneysel makale

<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.01.004>

Joule 3, 1140-1151. Yayıncı makale metni ve özeti erişildi; Y6 non-fulleren akseptör ve morfoloji/soğurma ilişkisi. Kaynağa özgü sentez yöntemi veya uzun sonuç aktarımı yapılmadı.

[T22] Peak external photocurrent quantum efficiency exceeding 100% via MEG in a quantum dot solar cell

Octavi E. Semonin; Joseph M. Luther; Sukgeun Choi; Hsiang-Yu Chen; Jianbo Gao; Arthur J. Nozik; Matthew C. Beard (2011). Özgün deneysel makale; özgün özet PubMed üzerinden

<https://doi.org/10.1126/science.1209845>

Science 334, 1530-1533. Özgün yazar özeti pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22174246/ üzerinden doğrulandı. EQE ile enerji veriminin ayrımı; dar spektral bulgudan modül rekoru çıkarılmadı.

[T23] Deep electron traps and origin of p-type conductivity in the earth-abundant solar-cell material Cu₂ZnSnS₄

Dong Han; Y. Y. Sun; Junhyeok Bang; Y. Y. Zhang; Hong-Bo Sun; Xian-Bin Li; S. B. Zhang (2013). Özgün hesaplamalı makale <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.87.155206>

Physical Review B 87, 155206. Yayıncı özeti doğrulandı. Hibrit işlevsel kusur öngörüsü olarak açıkça sınıflandırıldı; gerçek filmin doğrudan kusur ölçümü diye sunulmadı.

[T24] Thin-film Sb₂Se₃ photovoltaics with oriented one-dimensional ribbons and benign grain boundaries

Ying Zhou; Liang Wang; Shiyu Chen ve arkadaşları (2015). Özgün deneysel ve hesaplamalı makale

<https://www.nature.com/articles/nphoton.2015.78>

Nature Photonics 9, 409-415. Yayıncı özeti ve şekil açıklamaları erişildi; şerit yönelimi ve tane sınırı fiziği. Kaynaktaki toksisite nitelemesi evrensel güvenlik hükmü olarak benimsenmedi.

[T25] Intensity Enhancement in Textured Optical Sheets for Solar Cells

Eli Yablonovitch; George D. Cody (1982). Özgün kuramsal makale; yazarın üniversite arşivi

<https://optoelectronics.eecs.berkeley.edu/ey1982ieeed292.pdf>

IEEE Transactions on Electron Devices 29, 300-305. Kurumsal PDF'nin dizinlenmiş içeriği doğrulandı; 4n² yaklaşımının varsayımlı optik sınır olduğu vurgulandı. Genel nanofotonik için koşulsuz sınır iddiası yok.

[T26 / R09] Reciprocity relation between photovoltaic quantum efficiency and electroluminescent emission of solar cells

Uwe Rau (2007). Özgün kuramsal makale

<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.76.085303>

Physical Review B 76, 085303. Yayıncı özeti ve APS yazar metni erişildi. Karşılıklılık, dış ışıltama ve gerilim kaybı; formül sabit optik referans ve geçerlilik varsayımlarıyla kullanıldı. Physical Review B 76, 085303; yayın ve açık özgün metin kaydı doğrulandı. Karşılıklılık bağıntısı varsayımlarıyla kullanıldı.

[T27] Surfactant-controlled ink drying enables high-speed deposition of perovskite films for efficient photovoltaic modules

Yehao Deng; Xiaopeng Zheng; Yang Bai; Qi Wang; Jingjing Zhao; Jinsong Huang (2018). Özgün deneysel makale

<https://www.nature.com/articles/s41560-018-0153-9>

Nature Energy 3, 560-566. Yayıncı özeti, sonuç ve yazar bilgisi canlı aramayla doğrulandı; bir doğrudan açılış hata verdi. Küçük hücre/büyük modül ayrımı ve akış-kuruma denetimi için kullanıldı.

[T28] On-device lead sequestration for perovskite solar cells

Xun Li; Fei Zhang; Haiying He; Joseph J. Berry; Kai Zhu; Tao Xu (2020). Özgün deneysel makale

<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2001-x>

Nature 578, 555-558. Yayıncı özeti ve makale bilgisi erişildi; aygıt düzeyinde kurşun tutma yaklaşımı. Bütün hasar senaryolarında sıfır salım veya tam güvenlik iddiası yok.

[T29] Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2020

IEA PVPS Task 12 uzman grubu (2020). Kurumsal yöntem kılavuzu

<https://iea-pvps.org/key-topics/methodology-guidelines-on-life-cycle-assessment-of-photovoltaic-2020/>

Resmî sayfa erişildi. İşlevsel birim, sistem sınırları, üretim konumu, ömür, bozulma ve enerji üretimi varsayımlarının açık raporlanması. Güncel fiyat veya piyasa payı kaynağı olarak kullanılmadı.

[T30] Low-temperature strain-free encapsulation for perovskite solar cells and modules passing multifaceted accelerated ageing tests

Paolo Mariani; Miguel Ángel Molina-García; Jessica Barichello ve arkadaşları (2024). Özgün deneysel makale; açık erişim

<https://www.nature.com/articles/s41467-024-48877-y>

Nature Communications 15, 4552. Yayıncı açık metni erişildi; düşük sıcaklık kapsülleme, termomekanik uyum ve çoklu testler. Hızlandırılmış testi onlarca yıllık saha ömrüyle eşitlemedi.

[T31] Highly stable all-perovskite tandem solar cells with targeted conversion of tin-lead surfaces

Nannan Sun; Sheng Fu; Yunfei Li ve arkadaşları (2026). Özgün deneysel makale

<https://www.nature.com/articles/s41566-025-01815-w>

Nature Photonics 20, 273-279; 5 Şubat 2026 yayımlandı. Yayıncı özeti ve kurumsal yazar kaydı doğrulandı. Yalnızca ışık-ısı altında reaktif kalay-kurşun yüzeyinin korunması için kısa kanıt örneği; güncel rekor veya kimyasal uygulama tarifi değil.

[T32] Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO₂ electrodes

Hanul Min; Do Yoon Lee; Junu Kim ve arkadaşları (2021). Özgün deneysel makale

<https://www.nature.com/articles/s41586-021-03964-8>

Nature 598, 444-450. Yayıncı özeti ve makale künyesi doğrulandı; gömülü arayüz mühendisliği örneği. Tam yöntem ve ek verilerin tamamının incelendiği iddia edilmedi.

[T33] Optically Induced Conductivity Changes in Amorphous Silicon: A Historical Perspective

David L. Staebler (1997). Özgün araştırmacının tarihsel anlatısı

<https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-online-proceedings-library-archive/article/abs/optically-induced-conductivity-changes-in-amorphous-silicon-a-historical-perspective/834195C6D952A5863FDDD22BE4F63D58>

MRS Online Proceedings Library 467, 3; 1997 konferans yayını, Cambridge çevrimiçi tarihi 15 Şubat 2011. Yazarın kendi keşif öyküsü ve geri döndürülebilirlik açıklaması T07 erişim sınırlamasını tamamlar. Yayıncı özeti erişildi.

[T34] Inverted perovskite solar modules with 99.3% geometrical fill factor via nanosecond single laser patterning

Andrés E. R. Soto; Vera C. M. Duarte; Adélio Mendes; Luísa Andrade (2025). Özgün araştırma

<https://www.nature.com/articles/s44172-025-00512-4.pdf>

Communications Engineering 4, 198. doi:10.1038/s44172-025-00512-4. İlk iki sayfadaki P1, P2 ve P3 işlevleri ile aktif/ölü alan açıklaması kontrol edildi; sayısal performans sonuçları bu ek anlatıma aktarılmadı. Erişim: 8 Eylül 2026.

[R01] IEC 60904-1:2020 - Photovoltaic devices - Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics

International Electrotechnical Commission (2020). Standart katalog kaydı

<https://webstore.iec.ch/en/publication/32004>

Açık IEC katalog kapsamı doğrulandı; lisanslı tam metin ve madde bazında uygunluk denetlenmedi.

[R02] IEC 60904-8:2014 - Photovoltaic devices - Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic device

International Electrotechnical Commission (2014). Standart katalog kaydı

<https://webstore.iec.ch/en/publication/3879>

Açık katalogta doğrusal ve doğrusal olmayan cihazların spektral yanıt kapsamı doğrulandı; tam standart metni incelenmedi.

[R03] Effects of Spectral Error in Efficiency Measurements of GaInAs-Based Concentrator Solar Cells

C. R. Osterwald, M. W. Wanlass, T. Moriarty, M. A. Steiner, K. A. Emery (2014). Kurumsal rapor

<https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60748.pdf>

NREL/TP-5200-60748; raporun indekslenmiş başlık, yazar ve spektral hata metni doğrulandı. Doğrudan PDF açılışı bu taramada hata verdi; özgül konsantratör verileri aktarılmadı.

[R04] Combining uncertainty components

National Institute of Standards and Technology (Yıl belirtilmemiş). Kurumsal yöntem kaynağı

<https://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/combo.html>

Belirsizlik yayılımı, duyarlılık katsayıları ve kovaryansın açık kurumsal açıklaması; tarihsiz erişilebilir sayfa.

[R06] IEC 61215-1:2021 - Terrestrial photovoltaic modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements

International Electrotechnical Commission (2021). Standart katalog kaydı

<https://webstore.iec.ch/en/publication/61345>

Açık katalog doğrulandı; katalog testlerin nicel modül ömrü tahmini olmadığını belirtir. Tam standart veya test eşikleri için uygunluk iddiası yok.

[R07] Practical Guides for X-Ray Photoelectron Spectroscopy: First Steps in Planning, Conducting, and Reporting XPS Measurements

D. R. Baer et al. (2019). Yöntem makalesi

<https://www.nist.gov/publications/practical-guides-x-ray-photoelectron-spectroscopy-first-steps-planning-conducting-and>

NIST yayın kaydı; DOI 10.1116/1.5065501. XPS planlama ve raporlama çerçevesi doğrulandı.

[R08] Photoluminescence-Based Characterization of Halide Perovskites for Photovoltaics

T. Kirchartz, J. A. Márquez, M. Stolterfoht, T. Unold (2020). Yöntem derlemesi

<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aenm.201904134>

Advanced Energy Materials, 1904134; yayınevi kayıt ve indekslenmiş ölçüm açıklaması doğrulandı. PL/TRPL koşula bağımlılığı için seçilmiş yöntem kaynağı.

[R10] Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors

D. V. Lang (1974). Özgün makalenin bibliyografik kaydı

<https://doi.org/10.1063/1.1663719>

Journal of Applied Physics 45, 3023-3032. DOI ve özgün öz bibliyografik kayıt üzerinden doğrulandı; doğrudan yayınevi tam metnine erişim başarısız oldu.

[R11] Understanding how excess lead iodide precursor improves halide perovskite solar cell performance

B.-W. Park et al. (2018). Özgün makale

<https://www.nature.com/articles/s41467-018-05583-w>

Nature Communications 9, 3301. GIWAXS, elektron mikroskopisi ve yük toplamanın birlikte kullanıldığı yöntem örneği.

[R12] Origin of apparent light-enhanced and negative capacitance in perovskite solar cells

F. Ebadi, N. Taghavinia, R. Mohammadpour, A. Hagfeldt, W. Tress (2019). Özgün makale

<https://www.nature.com/articles/s41467-019-09079-z>

Nature Communications 10, 1574; yavaş iyonik/elektronik yanıt ile görünür kapasitans ayrımı, yazarlar ve açık metin doğrulandı.

[R15] Review of Failures of Photovoltaic Modules

M. Köntges et al.; IEA PVPS Task 13 (2014). Kurumsal rapor

https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf

IEA-PVPS T13-01:2014; modül arıza mekanizmaları için kurumsal rapor, bir teknolojiye tek evrensel bozunma oranı atanmadı.

[R16] Service Life Estimation for Photovoltaic Modules

IEA PVPS Task 13 (2021). Kurumsal rapor

<https://iea-pvps.org/key-topics/service-life-estimation-for-photovoltaic-modules/>

IEA-PVPS T13-16:2021; ömür sonu tanımları, bozunma modelleri ve hizmet ömrünün enerjiyle ilişkisi.

[R17] Generalized Gradient Approximation Made Simple

J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof (1996). Özgün makale

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.77.3865>

Physical Review Letters 77, 3865; PBE fonksiyonelinin özgün yayını.

[R18] Reproducibility in density functional theory calculations of solids

K. Lejaeghere et al. (2016). Özgün makalenin kurum kaydı

<https://www.nist.gov/publications/reproducibility-density-functional-theory-calculations-solids>

Science, DOI 10.1126/science.aad3000; NIST kurumsal kayıt ve öz doğrulandı. Sayısal yeniden üretim fiziksel doğruluktan ayrıldı.

[R19] Precision and efficiency in solid-state pseudopotential calculations

G. Prandini, A. Marrazzo, I. E. Castelli, N. Mounet, N. Marzari (2018). Özgün makale

<https://www.nature.com/articles/s41524-018-0127-2>

npj Computational Materials 4, 72; SSSP çoklu yakınsama ölçütleri.

[R20] The thermodynamic scale of inorganic crystalline metastability

W. Sun et al. (2016). Özgün makale, yazar kopyası

<https://perssongroup.lbl.gov/papers/sun-2016-metastability.pdf>

Science Advances 2, e1600225; yazarın LBL kurumsal kopyası, kimyaya bağlı metastabilite ölçeği.

[R21] First principles phonon calculations in materials science

A. Togo, I. Tanaka (2015). Yöntem makalesi, yazar sürümü

<https://arxiv.org/abs/1506.08498>

Scripta Materialia, DOI 10.1016/j.scriptamat.2015.07.021; yazar sürümünün bibliyografisi ve içeriği doğrulandı.

[R22] First-principles calculations for point defects in solids

C. Freysoldt, B. Grabowski, T. Hickel, J. Neugebauer, G. Kresse, A. Janotti, C. G. Van de Walle (2014). Yöntem derlemesi

<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.86.253>

Reviews of Modern Physics 86, 253; kusur oluşum enerjisi ve sonlu boyut/kimyasal potansiyel çerçevesi.

[R23] A climbing image nudged elastic band method for finding saddle points and minimum energy paths

G. Henkelman, B. P. Uberuaga, H. Jónsson (2000). Özgün makalenin bibliyografik kaydı

<https://doi.org/10.1063/1.1329672>

Journal of Chemical Physics 113, 9901-9904; bibliyografik kayıt ve özgün yöntem başlığı doğrulandı, yayınevi doğrudan açılışı başarısız oldu.

[R24] Special quasirandom structures

A. Zunger, S.-H. Wei, L. G. Ferreira, J. E. Bernard (1990). Özgün makale

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.65.353>

Physical Review Letters 65, 353; rastgele alaşım korelasyonlarını küçük yapıyla temsil eden özgün SQS yöntemi.

[R25] SIMsalabim: An open-source drift-diffusion simulator for semiconductor devices

M. Koopmans, V. M. Le Corre, L. J. A. Koster (2022). Araştırma yazılımı makalesi

<https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.03727>

Journal of Open Source Software 7(70), 3727; açık bir boyutlu sürüklenme-difüzyon yazılımı ve yayın kaydı.

[R26] Solcore: A multi-scale, python-based library for modelling solar cells and semiconductor materials

D. Alonso-Álvarez et al. (2017). Araştırma yazılımı ön baskısı

<https://arxiv.org/abs/1709.06741>

Yazar ön baskısı 2017; dergi yayını 2018. Çok ölçekli optik/elektriksel araç örneği, belirli bir sürümün doğruluğu garantisi değil.

[R27] Modelling polycrystalline semiconductor solar cells

M. Burgelman, P. Nollet, S. Degraeve (2000). Özgün makale, yazar kopyası

<https://users.elis.ugent.be/ELISgroups/solar/projects/scaps/Burgelman%20TSF%202000a.pdf>

Thin Solid Films 361-362, 527-532; Gent Üniversitesi SCAPS sayfasındaki özgün yazar kopyası.

[R28] A framework to evaluate machine learning crystal stability predictions

J. Riebesell et al. (2025). Özgün makale

<https://www.nature.com/articles/s42256-025-01055-1>

Nature Machine Intelligence 7, 836-847; Matbench Discovery. Oluşum enerjisi/kararlılık, regresyon/sınıflama ve ileriye dönük değerlendirme ayrımı; düzeltme bağlantısı görüldü.

[R29] Leakage and the reproducibility crisis in machine-learning-based science

S. Kapoor, A. Narayanan (2023). Araştırma derlemesi

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10499856/>

Patterns 4, 100804; DOI 10.1016/j.patter.2023.100804. Veri sızıntısı tipolojisi ve bilimsel yeniden üretim sorunları.

[R30] The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship

M. D. Wilkinson et al. (2016). Temel ilkeler makalesi

<https://www.nature.com/articles/sdata201618>

Scientific Data 3, 160018; FAIR veri yönetimi ilkeleri, açık erişimle koşulsuz özdeşleştirilmedi.

[R31] NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods - Choosing an experimental design

NIST/SEMATECH (Yıl belirtilmemiş). Kurumsal el kitabı

<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3.htm>

Rastgele blok, faktöriyel ve yanıt yüzeyi tasarımları için açık kurumsal yöntem kaynağı. Bölümdeki sayısal örnekler özgün öğretici hesaplamalardır.

[R32] IEC 61724-1:2021 - Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring

International Electrotechnical Commission (2021). Standart katalog kaydı

<https://webstore.iec.ch/en/publication/70170>

Açık katalog kapsamı doğrulandı; izleme terminolojisi, ekipman ve analiz yöntemleri. RLV katalog kaydı; tam metin madde uygunluğu iddiası yok.

[R33] Weather-Corrected Performance Ratio

T. Dierauf, A. Growitz, S. Kurtz, J. L. Becerra Cruz, E. Riley, C. Hansen (2013). Kurumsal rapor

<https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57991.pdf>

NREL/TP-5200-57991, Nisan 2013; hava koşullarının PR karşılaştırmasına etkisini azaltan kurumsal yöntem raporu.

[R34] Fact Sheet: Environmental Life Cycle Assessment of Electricity from PV Systems

IEA PVPS Task 12 (2024). Kurumsal bilgi notu

<https://iea-pvps.org/fact-sheets/fact-sheet-environmental-life-cycle-assessment-of-electricity-from-pv-systems/>

Mayıs 2024 bilgi notu; LCA sınırları ve teknoloji envanteri bağlamı. Güncel piyasa fiyatı veya evrensel karbon yoğunluğu iddiası kullanılmadı.

[R36] Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling

IEA PVPS Task 12 (2018). Kurumsal rapor

https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Life_Cycle_Assesment_of_Current_Photovoltaic_Module_Recycling_by_Task_12.pdf

IEA-PVPS T12-13:2018; geri dönüşümün çevresel değerlendirmesi. Kütle geri kazanımı ile bileşen değeri kavramsal olarak ayrıldı.

[R37] Solar cell efficiency tables (Version 60)

M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, D. Hinken, M. Rauer, X. Hao (2022).

Karşılaştırma ve ölçüm yöntemleri çalışması

<https://doi.org/10.1002/pip.3595>

Alan tanımları ve ölçüm/karşılaştırma yöntemleri için kullanıldı; güncel rekor tablosu olarak sunulmadı. Yayın ve JRC kurumsal kayıt doğrulandı.