



GÜNEŞ PİLLERİ

Hazırlayan: Hazal ARIK
Danışman: Prof. Dr. Figen KURTULUŞ

GÜNEŞ PİLLERİNİN ÖNEMİ

Günümüzde artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar nedeniyle sürdürülebilir enerji kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır. Bu noktada güneş enerjisi, tükenmeyen ve temiz bir kaynak olarak öne çıkar. Güneş pilleri (fotovoltaik hücreler), güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürerek enerji üretiminde çevre dostu bir çözüm sunar. Karbon salımını azaltması, enerji bağımsızlığını desteklemesi ve uzun vadede ekonomik avantajlar sağlaması sayesinde güneş pilleri, geleceğin enerji sistemlerinde kritik bir role sahiptir. Bu nedenle sürdürülebilir bir dünya için güneş enerjisinin kullanımı ve güneş pillerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.



GÜNEŞ PİLLERİNİN KULLANIM ALANLARI

Elektrik Üretimi: Konut çatılarında ve güneş enerjisi santrallerinde kullanılarak elektrik ihtiyacının karşılanmasını sağlar.

Isı Üretimi: Güneş kolektörleri ile sıcak su, mekan ısıtması ve endüstriyel ısı ihtiyacı karşılanabilir.

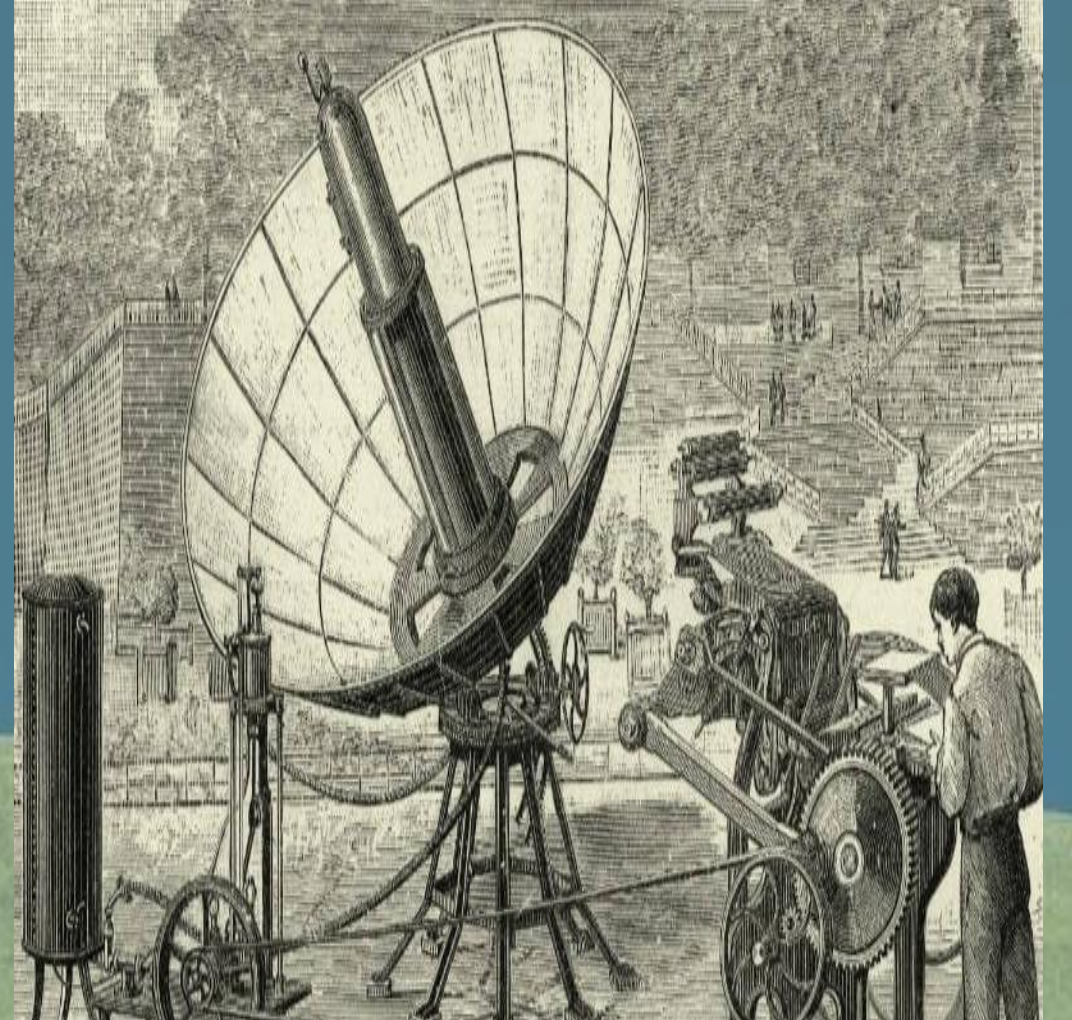
Küçük elektronik cihazlar: Hesap makineleri, saatler, bahçe aydınlatmaları ve taşınabilir şarj cihazlarında kullanılır.

Ulaşım ve uzay teknolojileri: Uyduların enerji ihtiyacının karşılanması ve güneş enerjili araç sistemlerinde kullanılabilir.

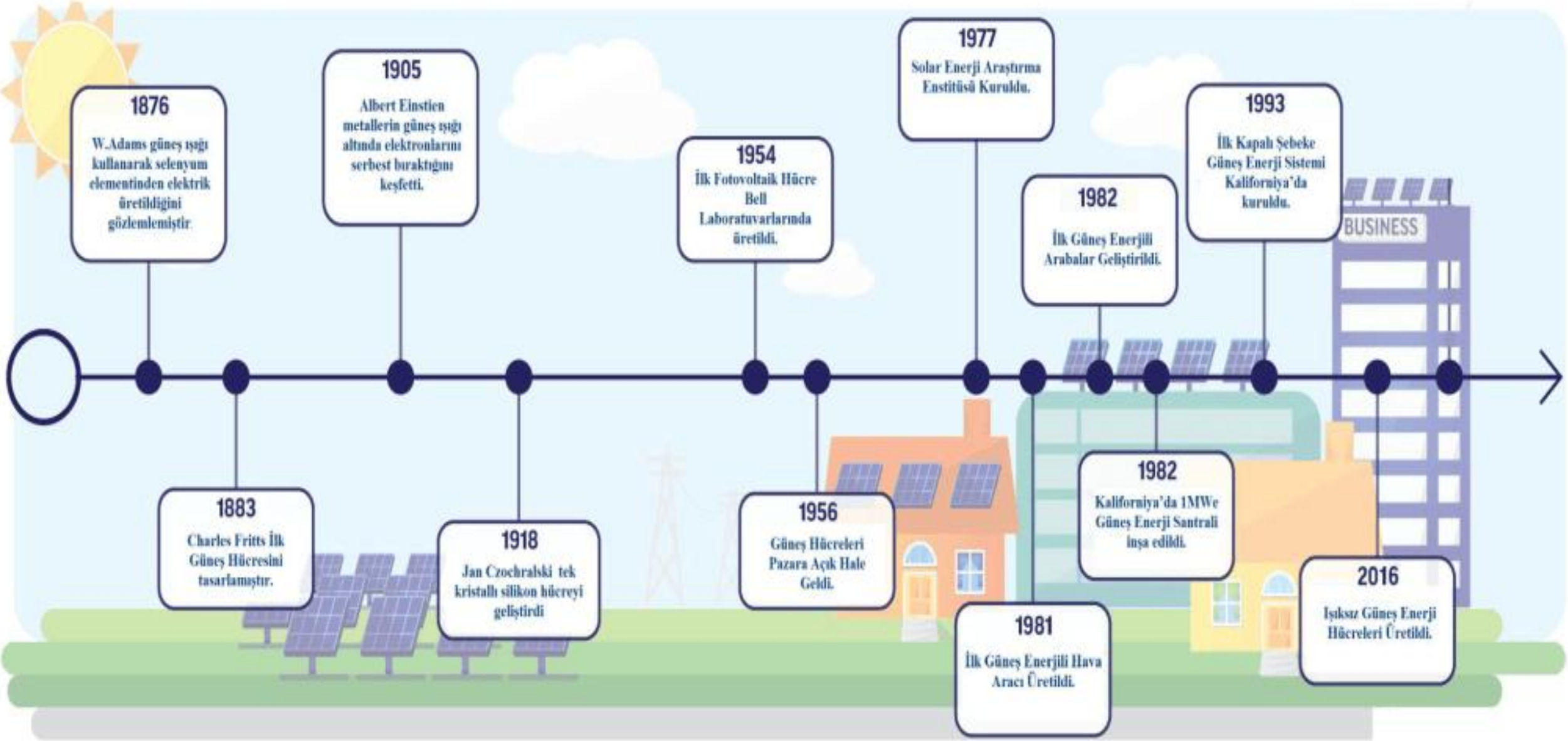
Tarım ve kamusal alanlar: Sulama sistemleri, su pompaları, sokak lambaları ve trafik uyarı sistemlerinde kullanılabilir.

GÜNEŞ PİLLERİNİN TARİHÇESİ

İlk kez 1839 yılında Fransız bilim insanı Alexandre Edmond Becquerel, fotovoltaiik etkiyi keşfederek güneş enerjisinin elektrik üretiminde kullanılabileceğini gösterdi. 1954'te Bell Laboratuvarları'nda geliştirilen ilk pratik silikon güneş pili ise modern fotovoltaiik teknolojinin başlangıcı olarak kabul edilir. Başlangıçta uzay uygulamaları için kullanılan bu hücreler, zamanla maliyetlerin düşmesi ve üretim teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte yeryüzünde elektrik üretiminde de yaygınlaşmıştır.



GÜNEŞ ENERJİSİ TARİHİ



GÜNEŞ PİLİNİN TEMEL YAPISI

Bir güneş pili, iki farklı katkılanmış yarı iletken malzemenin (genellikle silisyum) bir araya gelmesiyle oluşan bir p-n eklemidir. (diyot)

n-tipi (Negatif) Katman: Elektron fazlalığı olan yarı iletken

p-tipi (Pozitif) Katman: Delik (elektron boşluğu) fazlalığı olan yarı iletken

p-n Eklem Bölgesi: İki katmanın birleştiği yerde, elektronların ve deliklerin difüzyonu sonucu oluşan, çoğunluk taşıyıcılarının tükendiği ve kuvvetli bir iç elektrik alanına sahip bölgedir.

Bu iç elektrik alan, ışıkla oluşan elektron ve delik çiftlerini zıt yönlerde ayırarak akım oluşmasını sağlar. Ancak bu süreç sırasında rekombinasyon (yeniden birleşme) olur.

Rekombinasyon elektron ve boşluğun tekrar bir araya gelerek birbirini yok etmesidir.

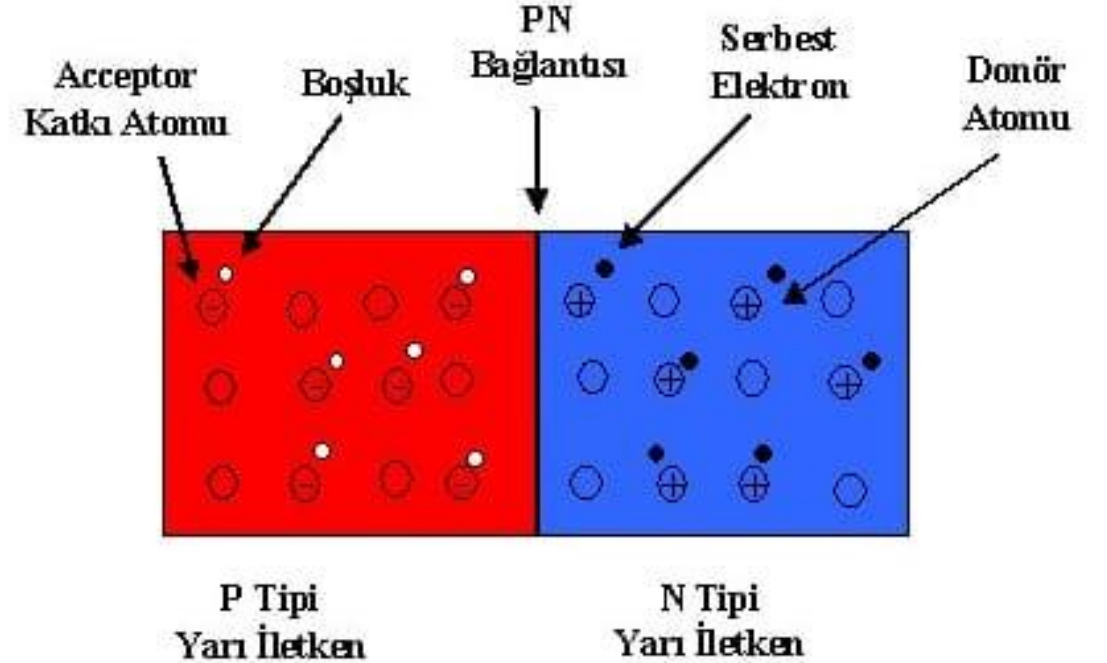
Taşıyıcılar p-n eklemdeki elektrik alan tarafından yeterince hızlı ayrılmazsa, devreye ulaşmadan birleşirler. Bu durumda akım azalır ve güneş pilinin verimi düşer.

$$I = I_{\text{üretim}} - I_{\text{kombinasyon}}$$

GÜNEŞ PİLLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Güneş pillerinin çalışma prensibi fotovoltaik etkiye dayanır. Bir PV (fotovoltaik) hücresi, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren güneş enerjisi üretim sisteminin temel birimidir. Güneş hücresi bir p-n eklemi yapısıdır. n-tipi, katkılayıcı (donör) atomlar tarafından sağlanan negatif yüklü elektronları; p-tipi ise kabul edici (akseptör) atomlar tarafından oluşturulan pozitif yüklü boşlukları ifade eder.

Fotovoltaik etki üç temel süreçte açıklanabilir:



1. Fotonların Soğurulması ve Elektron-Boşluk Çifti Oluşumu

Güneşten gelen fotonların enerjisi yarı iletkenin bant aralığı (E_g) değerinden büyük olduğunda, valens bandındaki bir elektron iletim bandına geçer ve bir elektron-boşluk çifti oluşur.

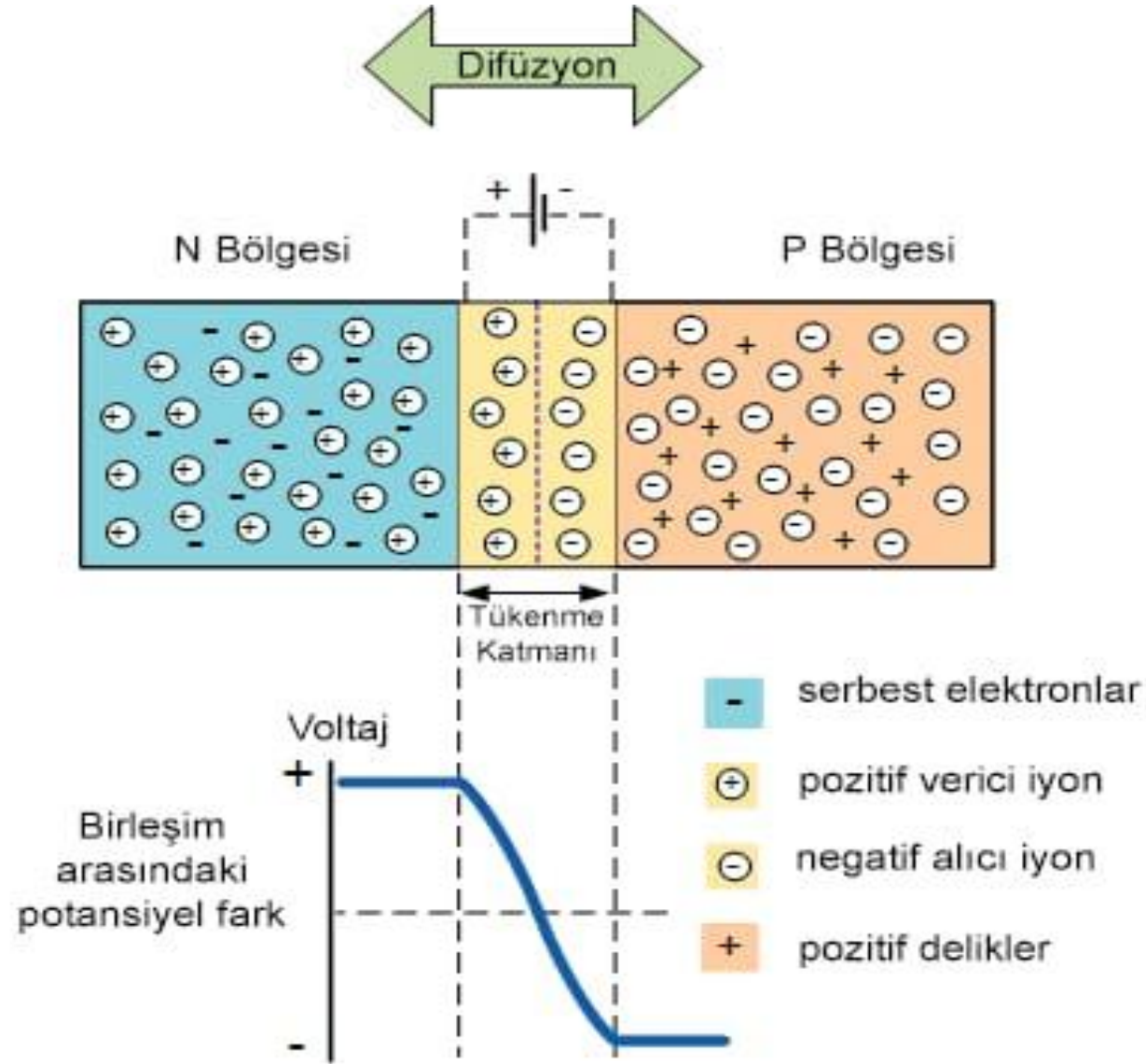
Foton enerjisinin bant aralığından fazla kalan bölümü elektron veya boşluğa kinetik enerji olarak aktarılır ve çoğunlukla ısı şeklinde kaybolur.

2. Taşıyıcıların p-n Eklemi Elektrik Alanı ile Ayrılması

p-n ekleminin geçiş bölgesinde boşalma bölgesi (depletion region) olarak adlandırılan doğal bir elektrik alan bulunur.

Bu alan: elektronları n-tipi bölgeye, boşlukları p-tipi bölgeye doğru iter. Böylece ışıkla oluşan yük taşıyıcıları zıt yönlerde ayrılır ve yarı iletkende bir potansiyel farkı oluşur.

Bu potansiyel farkı, hücre devreye bağlı değilken ölçülen **açık devre gerilimi (VOC)** olarak görülür.



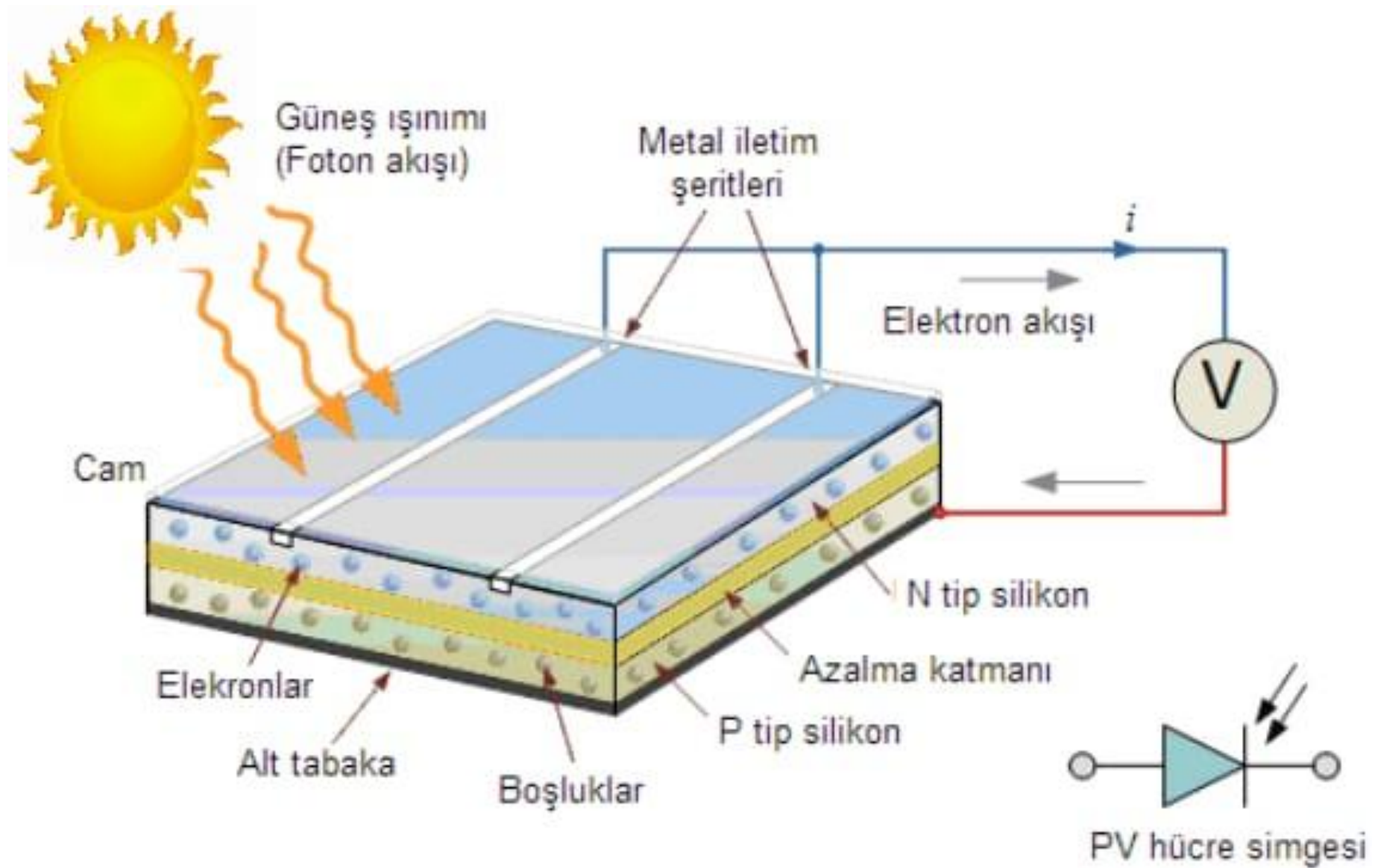
3. Elektronların Dış Devrede Akması ve Akım Üretimi

Hücrenin iki ucu kısa devre edildiğinde elektronlar n-tipi taraftan dış devreye geçer, devreyi dolaşır ve p-tipi bölgeye ulaşarak boşluklarla yeniden birleşir.

Bu elektron akışı dış devrede elektrik akımı oluşturur. Bu akıma **kısa devre akımı (ISC)** denir.

Elektronların devre boyunca taşınabilmesi için n-tipi tabaka genellikle daha ince tasarlanır. Ayrıca ışığın daha iyi soğurulması için hücrenin ön yüzüne yansıtma önleyici kaplama uygulanır.





GÜNEŞ PİLLERİNİN TÜRLERİ

Güneş pilleri, üretimlerinde kullanılan malzemelere ve teknolojilere göre sınıflandırılır.

En yaygın kategoriler:

- **1. Nesil (Kristal Silikon – wafer tabanlı hücreler)**
- **2. Nesil (İnce film güneş hücreleri)**
- **3. Nesil (Yeni Teknolojiler)**
 - a. Perovskit Güneş Hücreleri
 - b. Boya Duyarlı Güneş Hücreleri (DSSC)
 - c. Organik / Polimer Güneş Hücreleri (OPV)
 - d. Kuantum nokta tabanlı güneş hücreleri
 - e. Çok eklemlili (multijunction) güneş hücreleri

KRİSTAL SİLİKON GÜNEŞ PANELLERİ



Kullanılan Malzemeler:

Monokristal silikon (c-Si) – yüksek verim

Polikristal silikon (mc-Si) – daha ucuz üretim

Doping elementleri:

- Fosfor (n-tip katman)
- Boron (p-tip katman)

Anti-reflektif kaplama:

- Silisyum nitrür (SiN_x)

Arka yüzey metalizasyonu:

- Alüminyum (Al)

Ön yüzey metal kontaktları:

- Gümüş (Ag)

Temel özellik:

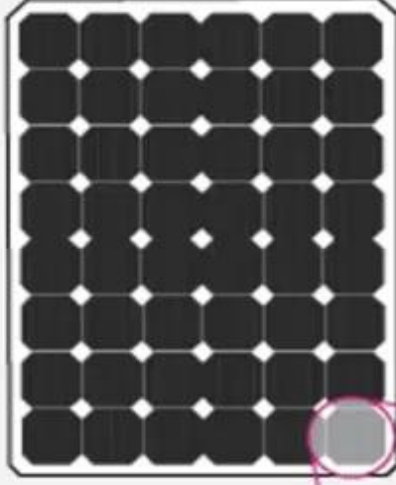
Kristal silikon plakalardan üretilir, en yaygın teknolojidir.

Avantajları:

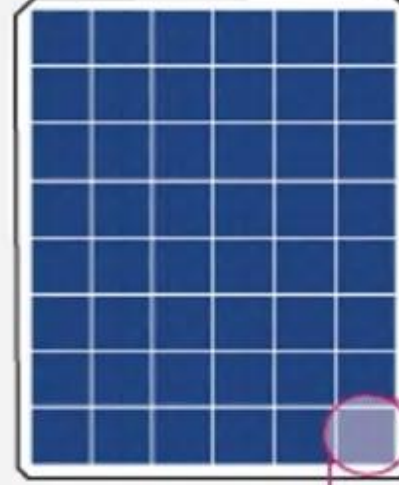
- Yüksek verimlidir. (özellikle monokristal silikon)
- Uzun ömürlü ve kararlıdır, çevresel etkilere dayanıklıdır.
- Teknolojisi olgunlaşmıştır, ticari kullanımı yaygındır.
- Performansı yıllar içinde yavaş düşer.

Dezavantajları:

- Üretim maliyetleri yüksektir.
- Silikon wafer kesimi nedeniyle malzeme kaybı oluşur.
- Ağır ve rijit yapıdadır, esnek uygulamalara uygun değildir.
- Üretim sürecinde yüksek sıcaklık ve saflaştırma gerektiren işlemler kullanıldığından süreç enerji yoğunudur.



Hücresi tek bir kristalden oluştuğu için, elektrik akışını oluşturan elektronların hareket etmek için daha fazla alanı vardır. Bunun için, monokristal panelleri, daha verimlidir.



Her hücrede çok sayıda kristal olduğu için elektronların hareket etme özgürlüğü daha azdır. polikristal güneş panelleri, monokristal panellerden daha düşük verimlilik oranlarına sahiptir.



İNCE FİLM GÜNEŞ PİLLERİ



İnce film güneş pilleri, fotovoltaiik malzemenin bir alt tabaka üzerine çok ince tabakalar hâlinde kaplanmasıyla üretilir.

Kullanılan Malzemeler

Amorf silikon (α -Si)

Kadmiyum Tellür (CdTe)

CIGS (Cu–In–Ga–Se)

Şeffaf iletken oksitler (TCO):

ITO (İndiyum kalay oksit)

ZnO (Çinko oksit)

SnO₂ (Kalay oksit)

Arka elektrotlar:

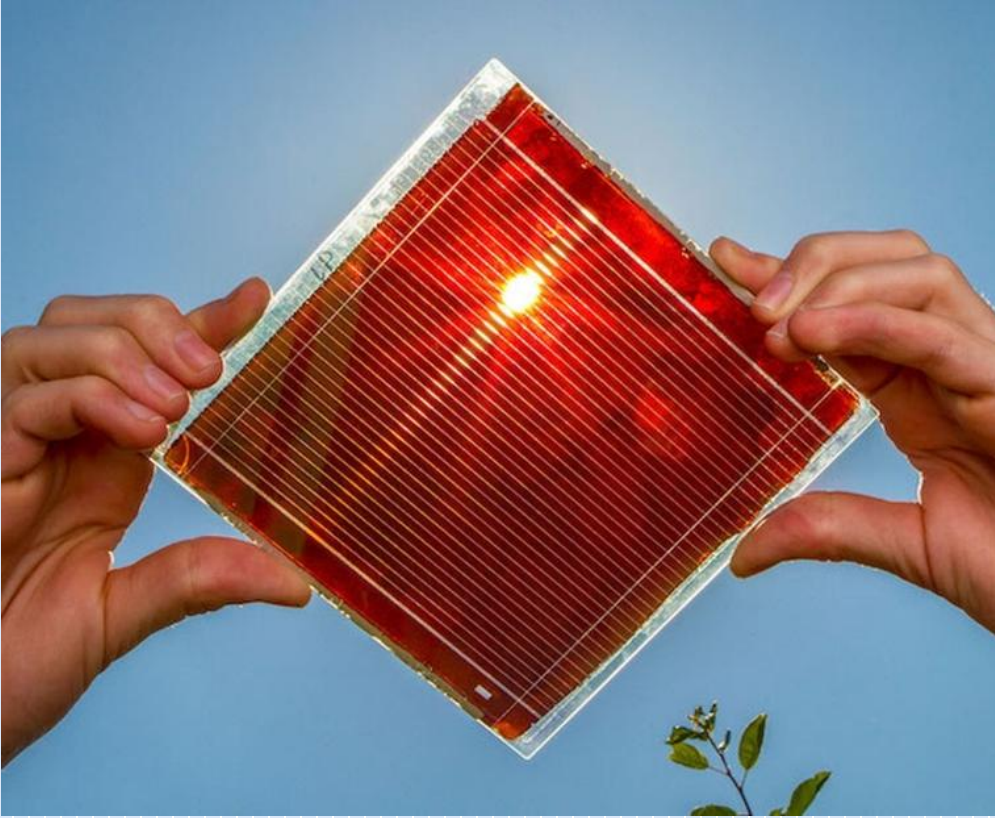
Molibden (Mo)

Alüminyum (Al)

İnce Film Güneş Pillerinin Ayırt Edici Özellikleri

- Wafer kullanılmaması, üretim sürecini basitleştirir.
- İnce tabaka sayesinde esneklik ve hafiflik sağlanır.
- Yüksek soğurma katsayısına sahip malzemeler tercih edilir.
- Düşük sıcaklıkta üretim, enerji tüketimini azaltır.
- Buna karşılık, aktif tabakanın ince olması verim sınırlamasına yol açabilir.
- Bu hücreler genellikle orta verim-düşük maliyet dengesi sunar.

PEROVSKİT GÜNEŞ PİLLERİ



Perovskit güneş hücrelerinde ışık soğuran perovskit tabaka, yüksek soğurma katsayısı ve ayarlanabilir bant aralığı sayesinde çok ince kalınlıklarda dahi yüksek verim sağlar.

Perovskit güneş hücreleri, organik ve inorganik bileşenleri birlikte içermeleri nedeniyle hibrit güneş hücrelerine örnektir.

Kullanılan Malzemeler

Organik-inorganik perovskitler: ABX_3 kristal yapılı $CH_3NH_3PbI_3$, $FAPbBr_3$ gibi

Elektron taşıyıcı katman: TiO_2 , SnO_2

Delik taşıyıcı katman: Spiro-OMeTAD, PTAA

Metal elektrot: Altın (Au), Gümüş (Ag)

Avantajları:

- Yüksek verim ($>25\%$)
- Düşük maliyet ve kolay üretim
- İnce, hafif ve esnek yapılar
- Ayarlanabilir bant aralığı

Dezavantajları:

- Nem ve ısıya karşı düşük kararlılık
- Kurşun içeriği nedeniyle çevresel riskler
- Uzun ömür sorunları

BOYA DUYARLI GÜNEŞ HÜCRELERİ (DSSC)

Boya duyarlı güneş hücreleri, ışık soğuran organik boyaların kullanıldığı 3. nesil güneş hücreleridir.

Malzemeler:

TiO₂ nanopartikül filmi (n-tip)

Organik boya / Rutenyum boyaları

Elektrolit: İyot/triiyodür (I⁻/I₃⁻)

Karbon veya platin arka elektrot

Avantajları: Düşük ışıktaki çalışabilirler ve maliyetleri düşüktür.

Dezavantajları: Verimleri ve kararlılıkları sınırlıdır.

ORGANİK FOTOVOLTAİKLER (OPV)

Organik fotovoltaikler, polimerler veya küçük organik moleküller gibi organik malzemelerden üretilir.

Kullanılan Malzemeler:

Polimerler: P3HT, PTB7

Elektron alıcılar: PCBM, fulleren türevleri

Şeffaf elektrot: ITO (indiyum tin oksit)

Metal arka elektrot: Al, Ca/Al

Avantajları:

- Hafif ve esnek olmaları
- Düşük maliyetli üretim (roll-to-roll baskı gibi)
- Bina yüzeylerine entegre edilebilirlik

Dezavantajları:

- Düşük verim (laboratuvar koşullarında %10-15)
- Kısa ömür

KUANTUM NOKTA TABANLI GÜNEŞ HÜCRELERİ

Kuantum nokta tabanlı güneş hücrelerinde, aktif tabaka olarak nanometre boyutunda yarı iletken parçacıklar (kuantum noktalar) kullanılır.

Kullanılan Malzemeler:

CdSe (Kadmiyum Selenür)

CdS (Kadmiyum Sülfür)

PbS (Kurşun Sülfür)

PbSe (Kurşun Selenür)

InP (İndiyum Fosfür) – daha az toksik alternatif

Avantajları:

- Bant aralığı kuantum nokta boyutuyla ayarlanabilir.
- Geniş ışık spektrumunu soğurabilir.

Dezavantajları:

- Kararlılık ve toksisite sorunları bulunabilir.
- Teknoloji henüz araştırma aşamasındadır.

ÇOK EKLEMLİ (MULTIJUNCTION) GÜNEŞ HÜCRELERİ

Çok eklemli güneş hücreleri, farklı bant aralıklarına sahip birden fazla yarı iletken katmanın üst üste kullanılmasıyla oluşturulur. Her katman güneş spektrumunun farklı bir bölümünü soğurur.

Kullanılan Malzemeler:

GaAs (galyum arsenit)

InGaP (indiyum galyum fosfit)

Ge (germanyum)

Verim: %30–40+ (uzay uygulamaları)

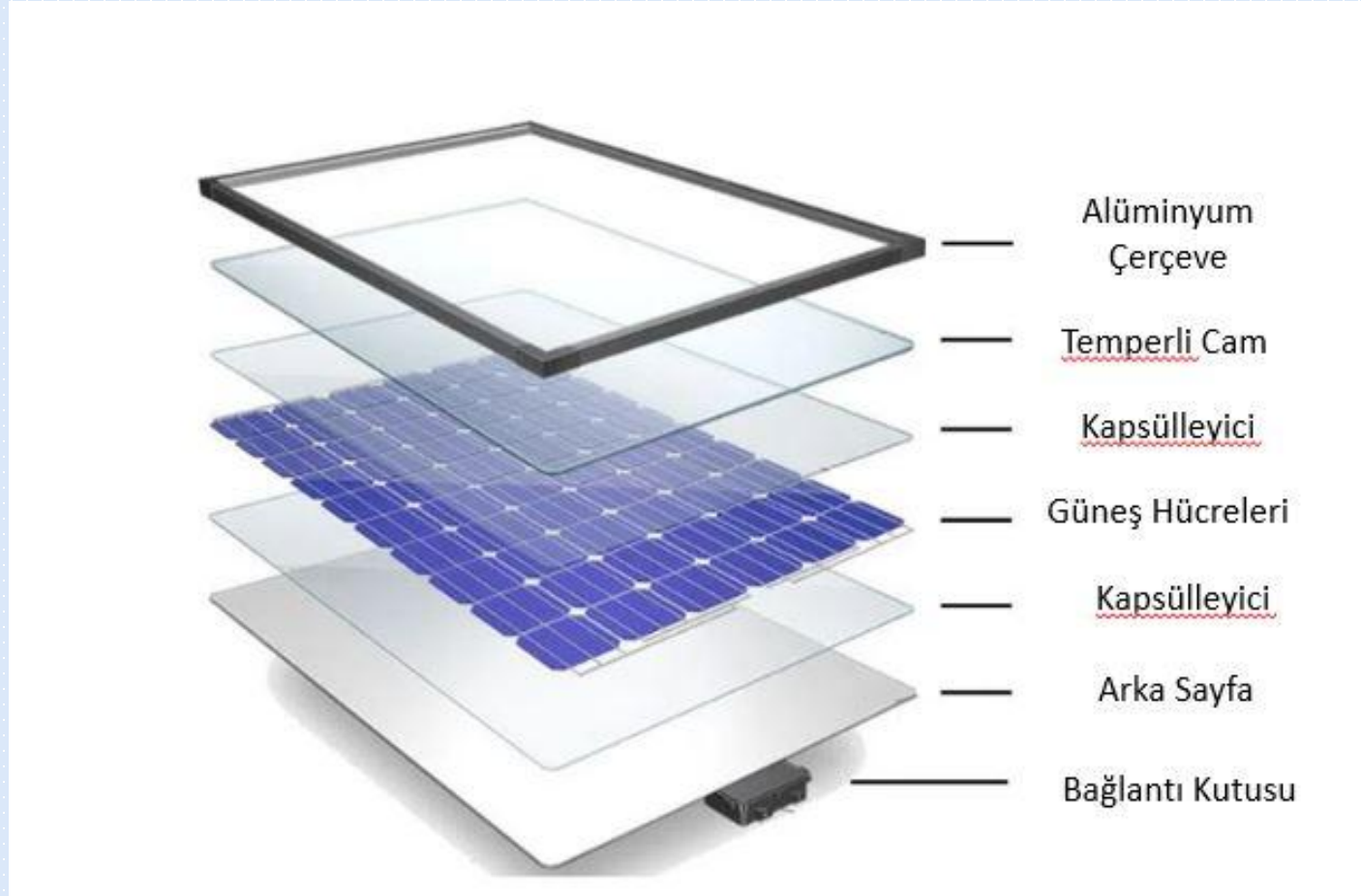
Avantajları:

- Güneş spektrumunun farklı bölgelerini soğurabildiği için çok yüksek verimlidir.
- Enerji kayıpları azalır, güç çıkışı artar.
- Uzay ve yüksek performans gerektiren uygulamalar için uygundur.

Dezavantajları:

- Üretim maliyeti çok yüksektir.
- Teknolojisi karmaşıktır ve üretimi zordur.

GÜNEŞ PANELİ KATMANLARI



GÜNEŞ PANELİ KATMANLARI (ÜSTTEN ALTA DOĞRU)

1) Ön Cam (Front Glass)

Temperli, düşük demir içerikli yüksek geçirgenlikli cam

Işığın büyük kısmını içeri geçirir ve hücreleri dış ortamdan korur.

2) Ön Kapsülleme Katmanı

Kapsülleme katmanlarında EVA, POE, TPU ve PVB gibi polimerler ile Al_2O_3 ve SiO_2 gibi inorganik bariyer malzemeleri kullanılabilir.

En yaygın kullanılan malzemeler EVA (*etilen vinil asetat*) ve daha iyi nem ve oksijen bariyerine sahip POE'dir. (*poliolefin elastomer*)

Hücrelerin cama yapışmasını sağlar.

Nemden ve mekanik zorlamadan korur.

Elektriksel yalıtım sağlar.

3) Güneş Hücreleri (Solar Cells)

Bu panelin asıl çalışan yarı iletken cihazlarıdır.

Kristal silikon hücreler (monokristal/polikristal) veya ince film hücrelerinden (CIGS, CdTe, perovskit vs.) oluşurlar. İçlerinde ayrıca:

- ön kontak
- p-n eklemi
- aktif absorpsiyon tabakası
- arka kontak

gibi katmanlar vardır.

4) Arka Kapsülleme Katmanı

Hücreleri arkadan da saran ikinci kapsüllerdir.

Ön taraftaki katman ile birlikte hücreyi iki taraftan kaplarlar.

Kullanılan malzeme çoğunlukla ön tarafta kullanılan ile aynı seçilir fakat bazı tasarımlarda farklı malzemelerin birlikte kullanılması da mümkündür.

Nem, oksijen ve darbelere karşı koruma sağlar.

5) Arka Tabaka (Backsheet) veya Arka Cam

a) Backsheet (genelde beyaz veya siyah)

Çok katmanlı polimer (PET + PVDF vb.)

Elektriksel yalıtım ve hava koşullarına dayanım sağlar.

b) Çift Camlı Panellerde Arka Cam

Dayanıklılığı artırır.

Genelde bifacial (çift yüzlü) panellerde kullanılır,

6) Çerçeve (Alüminyum Profil)

Panelleri korur ve montaj kolaylığı sağlar.

Mekanik dayanımı artırır.

7) J-Box (Bağlantı Kutusu)

Panelin arka tarafındadır.

Diyotlar ve kablolar bulunur.

Akımın dış devreye güvenli şekilde çıkmasını sağlar.

GÜNEŞ HÜCRELERİNDE VERİMLİLİĞİ ETKİLEYEN KİMYASAL FAKTÖRLER

1. Yarı İletkenin Bant Aralığı (Band Gap)

Yarı iletken malzemenin kimyasal yapısı bant aralığını belirler.

- Çok küçük bant aralığı → enerji ısıya kaçar.
- Çok büyük bant aralığı → düşük enerjili fotonlar soğurulmaz.

Optimal band aralığı, hücre verimini maksimuma çıkarır.

2. Saflık Derecesi (Kimyasal Saflık)

Kristal yapıdaki kimyasal safsızlıklar, rekombinasyon merkezleri oluşturur. Bu merkezler elektron–delik çiftlerinin kaybolmasına neden olur ve verimi düşürür. Bu yüzden saf malzeme daha yüksek verim sağlar.

3. Katkılama (Doping Elementleri)

Yarı iletkenlere eklenen kimyasallar:

- Bor (B) $\rightarrow$ p-tipi malzeme
- Fosfor (P) $\rightarrow$ n-tipi malzeme

Yanlış doping oranı taşıyıcı hareketliliğini düşürür ve rekombinasyonu artırır. Verim düşer.

4. Kristal Kusurları ve Kimyasal Bağ Bozuklukları

Kristal ağıdaki kırılmalar, boşluklar ve bağ kusurları elektron tuzakları oluşturur.

Bu da: taşıyıcı ömrünü düşürür ve verimi azaltır.

5. Yüzey Kimyası ve Pasivasyon Katmanları

Yüzeydeki kimyasal aktif bağlar, rekombinasyona yol açar.

Bunu azaltmak için: SiN_x (silikon nitrür), Al_2O_3 ve TiO_2 gibi pasivasyon katmanları kullanılır.

Pasivasyon, yüzey kusurlarını kimyasal olarak etkisizleştirerek yük taşıyıcı kayıplarını azaltma işlemidir.

6. Ara Yüzey Uyumluluğu (Interface Chemistry)

Farklı katmanların kimyasal uyumsuzluğu tuzak seviyeleri oluşturur. Bu durum yük taşıyıcı transferini zorlaştırır ve verim düşer.

7. Oksidasyon ve Kimyasal Bozunma

Bazı malzemeler oksijen, nem ve UV ışık ile kimyasal reaksiyona girer. Bu da malzeme yapısının bozulması ve uzun vadede verim kaybına yol açar.

8. Elektron ve Delik Taşıma

ETL (elektron taşıyıcı tabaka) ve HTL (delik taşıyıcı tabaka) katmanları, yük taşıyıcı iletimini optimize ederek güneş hücresinin verimini yükseltir. (ETL: TiO_2 , SnO_2 ; HTL: Spiro-OMeTAD, NiO_x)

Termal bozunma, yüksek sıcaklık nedeniyle kristal yapı bozulması, dopant difüzyonu ve rekombinasyon artışı ile hücre performansının düşmesidir.

Fotokimyasal bozunma ise UV ışınları sonucu kimyasal bağların kırılması, oksidasyon ve yeni kusur seviyelerinin oluşmasıyla hücrenin zamanla verim kaybetmesidir.

GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE GELECEĞİN KİMYASI

Kurşunsuz Perovskitler

Kurşun (Pb) içermeyen kalay (Sn) bazlı perovskitler ve yeni hibrit yapılar geliştirilerek çevre dostu ve daha kararlı güneş hücreleri hedeflenmektedir.

Karbon Tabanlı Elektrotlar

Altın yerine grafen ve karbon nanotüp gibi malzemeler kullanılarak daha ucuz, hafif ve esnek elektrotlar geliştirilmektedir.

Nanoyapılı Fotovoltaikler

Kuantum noktaları ve nanotel yapılar kullanılarak ışık soğurma artırılmakta ve teorik verim sınırlarının aşılması hedeflenmektedir.

AVANTAJLAR, DEZAVANTAJLAR VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Avantajlar

- Yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağıdır
- Fosil yakıtlara bağımlılığı azaltır
- Ölçeklenebilir ve sürdürülebilir sistemler sunar

Sınırlamalar (Dezavantajlar)

- Üretim maliyetleri hâlâ yüksek olabilir
- Verimlilik fiziksel sınırlarla kısıtlıdır
- Enerji üretimi çevresel koşullara bağlıdır

Genel Değerlendirme

Güneş hücreleri, özellikle yeni nesil malzemeler (perovskit, tandem ve nanoyapılı yapılar) sayesinde hızla gelişmektedir. Devam eden araştırmalar ile daha yüksek verim, daha düşük maliyet ve daha uzun ömürlü sistemlerin mümkün olması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Lameirinhas, R. A. M., Torres, J. P. N., & Cunha, J. P. de M. *A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications.* Energies, 2022.
- Razykov, T. M., et al. *Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects.* Solar Energy, 2011.
- Polman, A., Knight, M., Garnett, E. C., Ehrler, B., & Sinke, W. C. *Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges.* Science, 2016.
- Soonmin, H., Hardani, ., Nandi, P., Mwankemwa, B. S., Malevu, T. D., & Malik, M. I. (2023) *Overview on Different Types of Solar Cells: An Update.*
- Solarian, *Güneş Modülleri için 7 Ana Malzeme*

A large solar panel array is installed on a metal roof. The panels are arranged in long, parallel rows that recede into the distance. The sun is positioned directly in the center of the horizon, creating a strong lens flare and illuminating the entire scene. The sky is filled with soft, wispy clouds in shades of orange, yellow, and blue, suggesting a sunrise or sunset. The overall atmosphere is bright and hopeful.

DİNLEDİĞİNİZ İÇİN TEŞEKKÜR EDERİM.