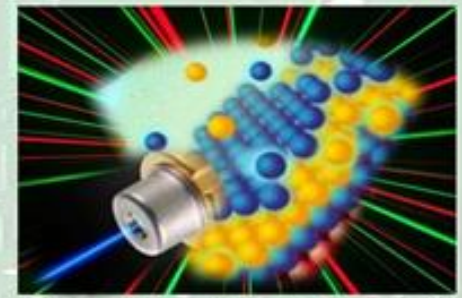




GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FOTONİK UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ



[www.fotonik.gazi.edu.tr](http://www.fotonik.gazi.edu.tr)

# FOTOVOLTAİK (PV) TEKNOLOJİLERİ

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

[sozcelik@gazi.edu.tr](mailto:sozcelik@gazi.edu.tr)



## Sunum İçeriği

1. Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi
2. PV hücrelerin çalışma ilkesi
3. PV hücrelerin kullanım alanları
4. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar
5. Kaynaklar

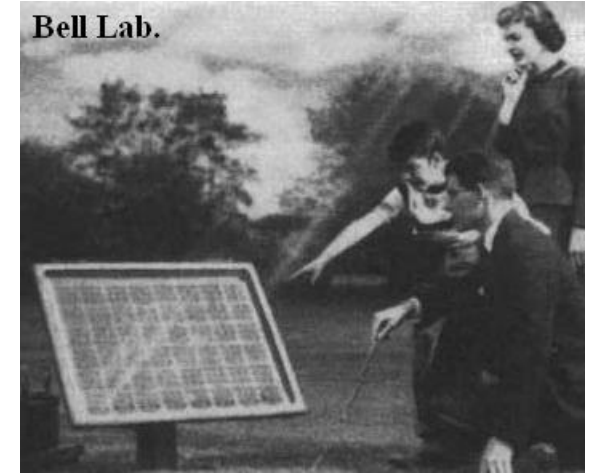
## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

- ✓ **1839'da Alexander Edmond Becquerel**, platin tabakalar üzerinde yaptığı bilimsel çalışmalar sırasında ilk fotovoltaik etkiyi saptadı.
- ✓ **1873'te Willoughby Smith**, selenyumun içindeki fotoiletkenliği keşfetti. İlk basit fotovoltaik düzeneği oluşturdu. Yanda kendi çizimini görmekteyiz.
- ✓ **1877'de W.G. Adams ve R.E. Day**, yaptıkları çalışmalarla katı maddelerin de fotovoltaik etki oluşturabildiğini kanıtladılar.
- ✓ **1883'te Charles Fritts**, selenyum kullanarak ilk fonksiyonel %1 verimli PV hücreyi geliştirdi.



## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

- ✓ **1946'da Russell Ohl**, modern PV hücresi patentini aldı.
- ✓ **1954'de Bell Laboratuvarlarında**, %6 verimli silisyum PV hücreler oluşturuldu.
- ✓ **1957'de Hoffman Elektronik**, % 8 verimli silisyum PV hücreler geliştirdi.



- ✓ **1958'de Hoffman Elektronik**, % 9 verimli silisyum PV hücreler geliştirdi. Aynı yılda Vanguard I isimli uzay aracında ilk defa PV hücreler kullanıldı. Bu hücreler, 100 cm<sup>2</sup> ye 0.1W güç üretenlerdi.
- ✓ **1960'da Hoffman Elektronik**, % 14 verimli silisyum PV hücreler geliştirdi.



## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

- ✓ **1970'de Zhores Alferov**, GaAs hetero-eklem PV hücrelerini oluşturdu.

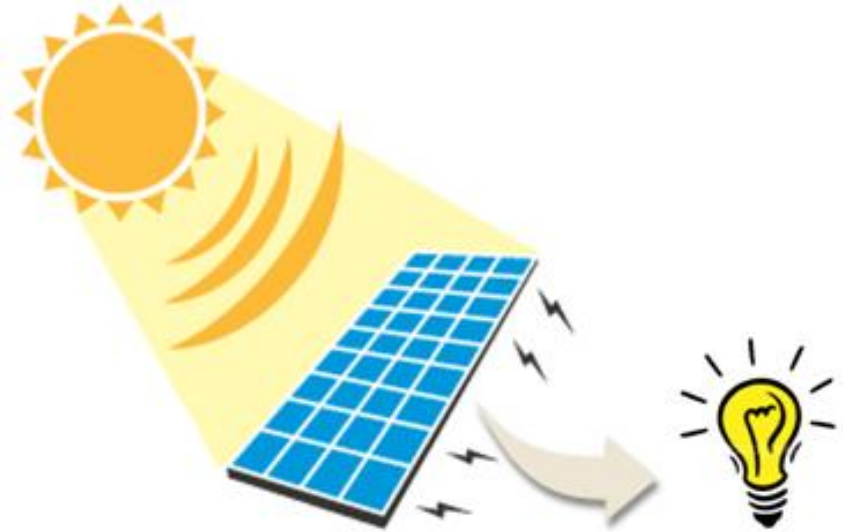


- ✓ **1970'lerin sonunda Petrol krizi ile**,  
Alternatif enerji kaynakları arayışı başladı.  
PV hücrelere ilgi arttı.  
PV hücrelerin AR-GE ve üretimi hızlandı.
- ✓ **1985'de New South Wales Üniversitesinde**,  
% 20 verimli silisyum PV hücreler geliştirildi.

- ✓ **1988'de Applied Solar Energy Corp.**, %17 verimli iki-eklemlı PV hücrelerin seri üretimine geçti.
- ✓ **1989'da Applied Solar Energy Corp.**, %19 verimli iki-eklemlı PV hücreler geliştirdi.

## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

- ✓ **1993'de Applied Solar Energy Corp.,**  
%20 verimli iki-eklemli PV hücrelerin üretimine geçti.



- ✓ **2000'de %20 verimli üç-eklemli**  
PV hücreler geliştirildi.
- ✓ **2002'de %26 verimli üç-eklemli**  
PV hücreler geliştirildi.
- ✓ **2005'te %28 verimli üç-eklemli**  
PV hücreler geliştirildi.

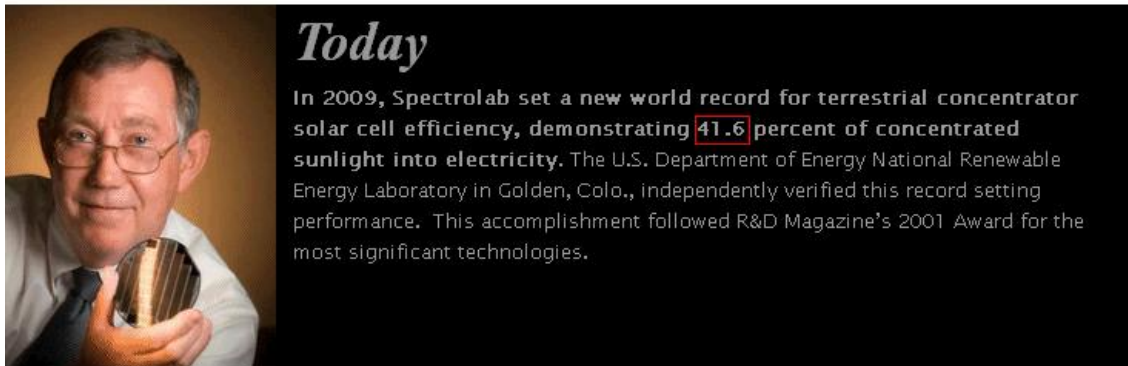
## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

✓ 2006'da Spectrolab, %40 verimli üç-eklemlı PV hücreler geliştirdi.



The screenshot shows the NREL Newsroom website. The header includes the NREL logo and navigation links. The main content area features a news release titled "NREL Solar Cell Sets World Efficiency Record at 40.8 Percent" dated August 13, 2008. The text describes a world record in solar cell efficiency achieved by a photovoltaic device at NREL.

✓ 2008'de NREL, %40.8 verimli üç-eklemlı PV hücre geliştirerek, dünya rekoruna imza attı.



**Today**

In 2009, Spectrolab set a new world record for terrestrial concentrator solar cell efficiency, demonstrating 41.6 percent of concentrated sunlight into electricity. The U.S. Department of Energy National Renewable Energy Laboratory in Golden, Colo., independently verified this record setting performance. This accomplishment followed R&D Magazine's 2001 Award for the most significant technologies.

✓ 2009'da Spectrolab, %41.6 verimli üç-eklemlı PV hücre geliştirerek, rekorun yeniden sahibi oldu.

## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

✓ **Günümüzde, PV hücreler için araştırmaları 3 grupta inceleyebiliriz.**

### **1. Kristal silikon PV hücreler**

- 1. Tek-kristal (monokristal) PV hücreler (c-Si)**
- 2. Çoklu-kristal (polikristal) PV hücreler (mc-Si)**

### **2. İnce film PV hücreler**

- 1. Amorf Silikon PV hücreler (a-Si)**
- 2. Kadmiyum Tellür (CdTe) PV hücreler**
- 3. Bakır İndiyum Galyum (di)Selenyum (CIGS) PV hücreler**

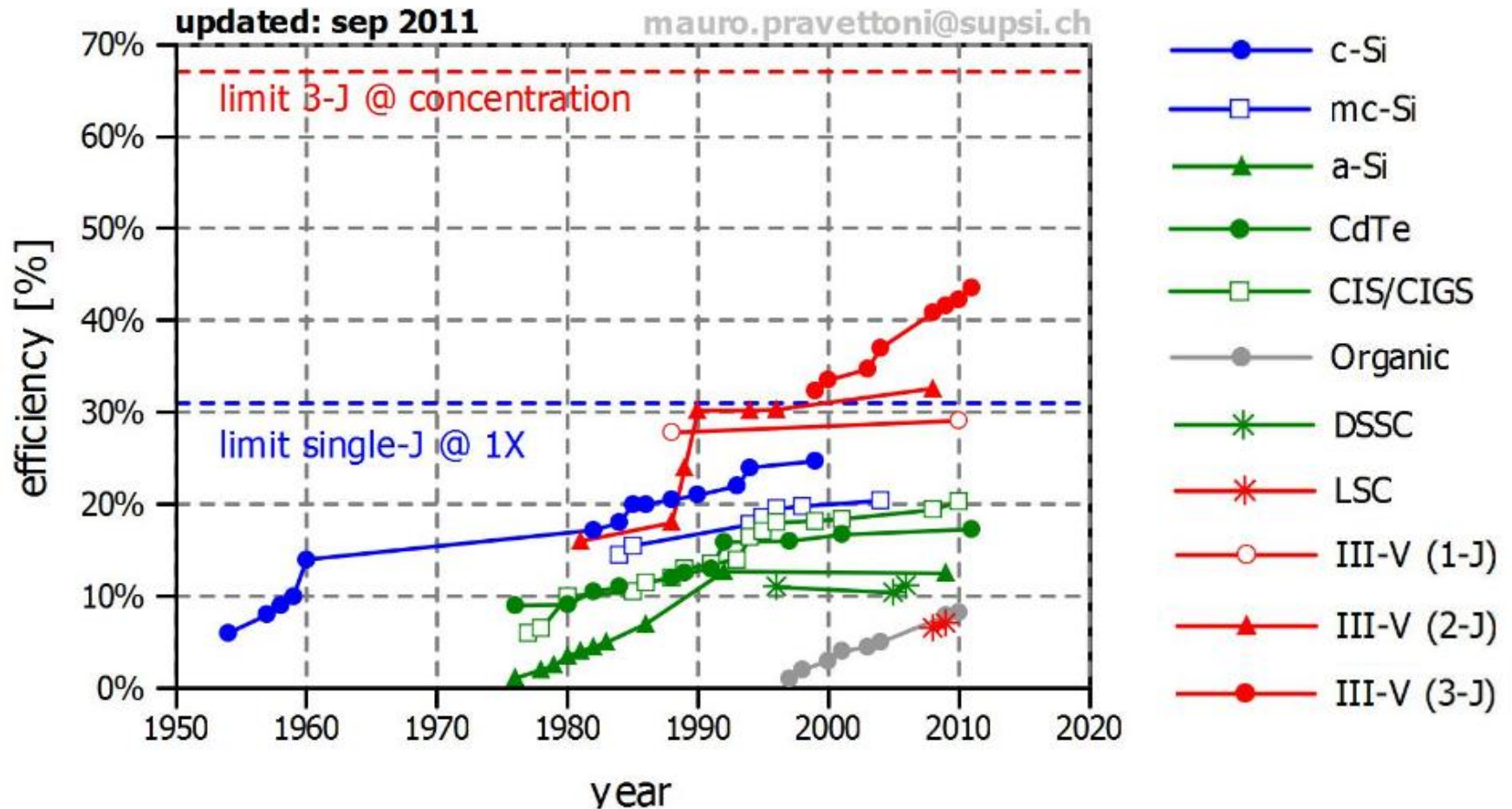
### **3. III-V grubu PV hücreler**

- 1. Kuantum Kuyulu hücreler**
- 2. Çok eklemli Hücreler**

### **4. Ar-Ge aşamasında olan diğer PV hücreler**



## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi



## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### Solar Cell Manufacturing Costs

Technology	Silicon Wafer		Thin-Film		
	Single Crystal	Polycrystalline	a-Si	CdTe	CIS/CIGS
Manufacturing Cost (\$)	2.96	2.77	1.85	1.35	1.75

(Source: Credit Suisse, Thin film Technology 2008.03)

- ✓ AR-GE aşamasında olan diğer PV hücreler için öngörülen maliyet ise yaklaşık 0.4 \$/W civarındadır.

## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### Kristal silikon PV hücreler

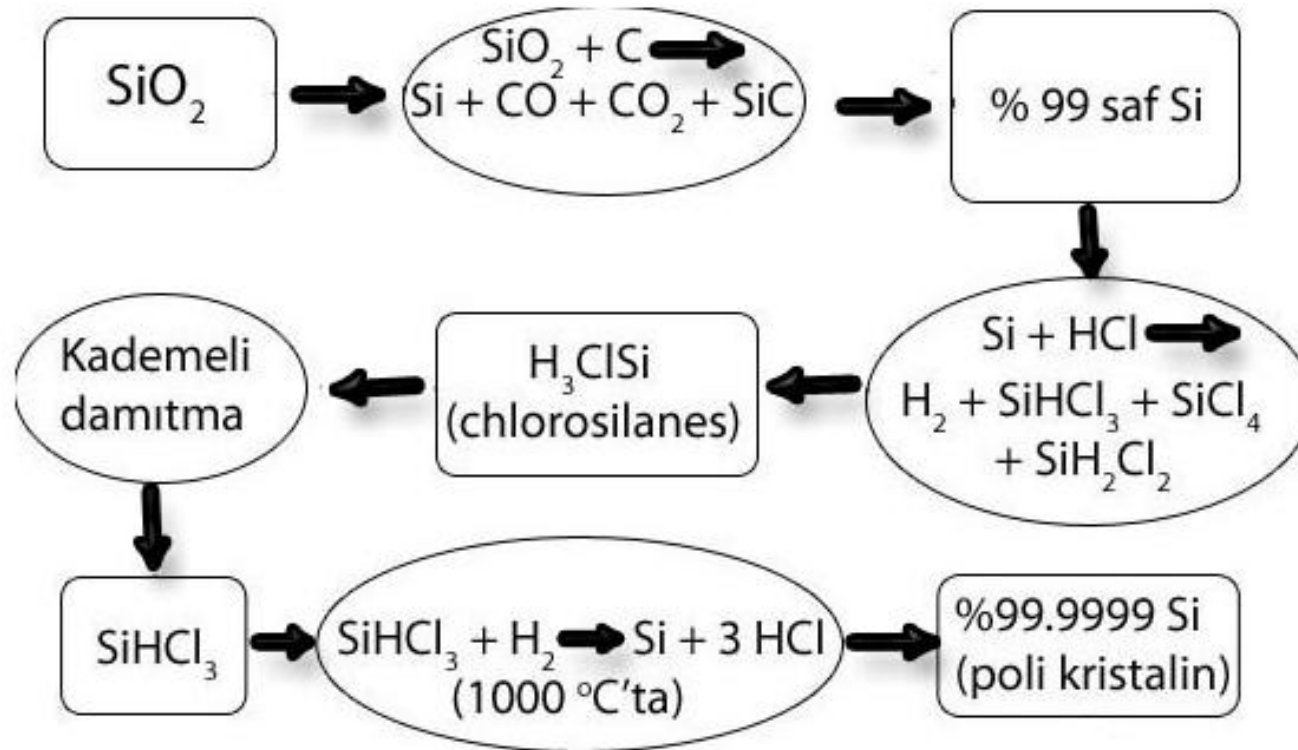


- ✓ Silisyum yarıiletken özellik gösteren ve PV hücre yapımında en çok tercih edilen materyallerin başında gelir.
- ✓ Oksijenden sonra yeryüzünde en çok bulunan element olan silisyumun, doğada en yaygın biçimi kuartz ve kumdur ( $\text{SiO}_2$ ).
- ✓  $\text{SiO}_2$  işlenerek %99 silika elde edilir. Daha sonra silikadan elektronik teknolojisinde kullanılabilen (%99.9999) silisyum sağlanabilmektedir.



## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### Kristal silikon PV hücreler



## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

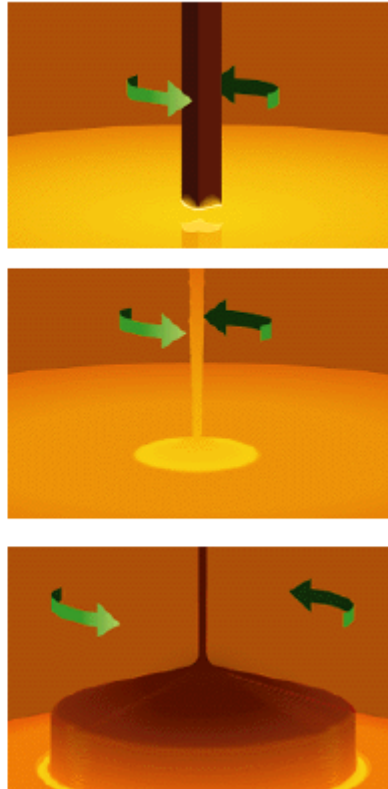
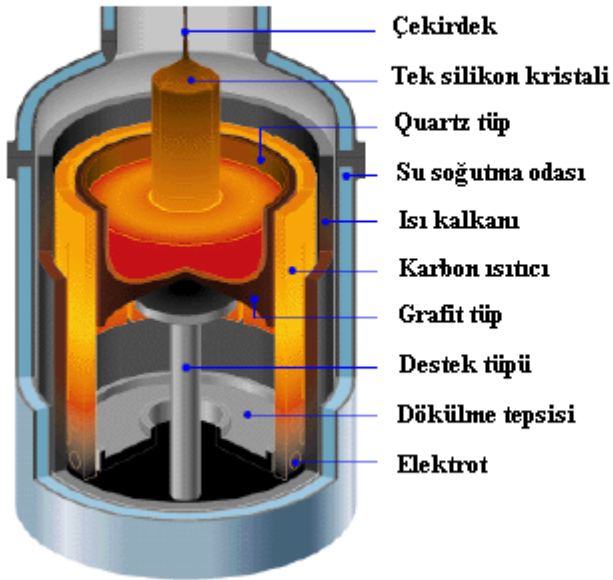
### Kristal silikon PV hücreler: Tek-kristal (monokristal) PV hücreler (c-Si)

- ✓ Yarıiletken endüstrisinin çoğu tek-kristal silisyuma dayandırılmış olduğundan, üretim sürecine ilişkin büyük bir teknoloji tabanı bulunmaktadır.
- ✓ Ancak saf tek-kristal silisyum üretimi oldukça zor ve pahalı bir teknolojiyi gerektirmektedir.
- ✓ İlk ticari PV hücrelerinde, **Czochralski kristal çekme tekniği** ile büyütülen tek-kristal silisyum kullanılmıştır.



## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### Kristal silikon PV hücreler: Tek-kristal (monokristal) PV hücreler (c-Si)



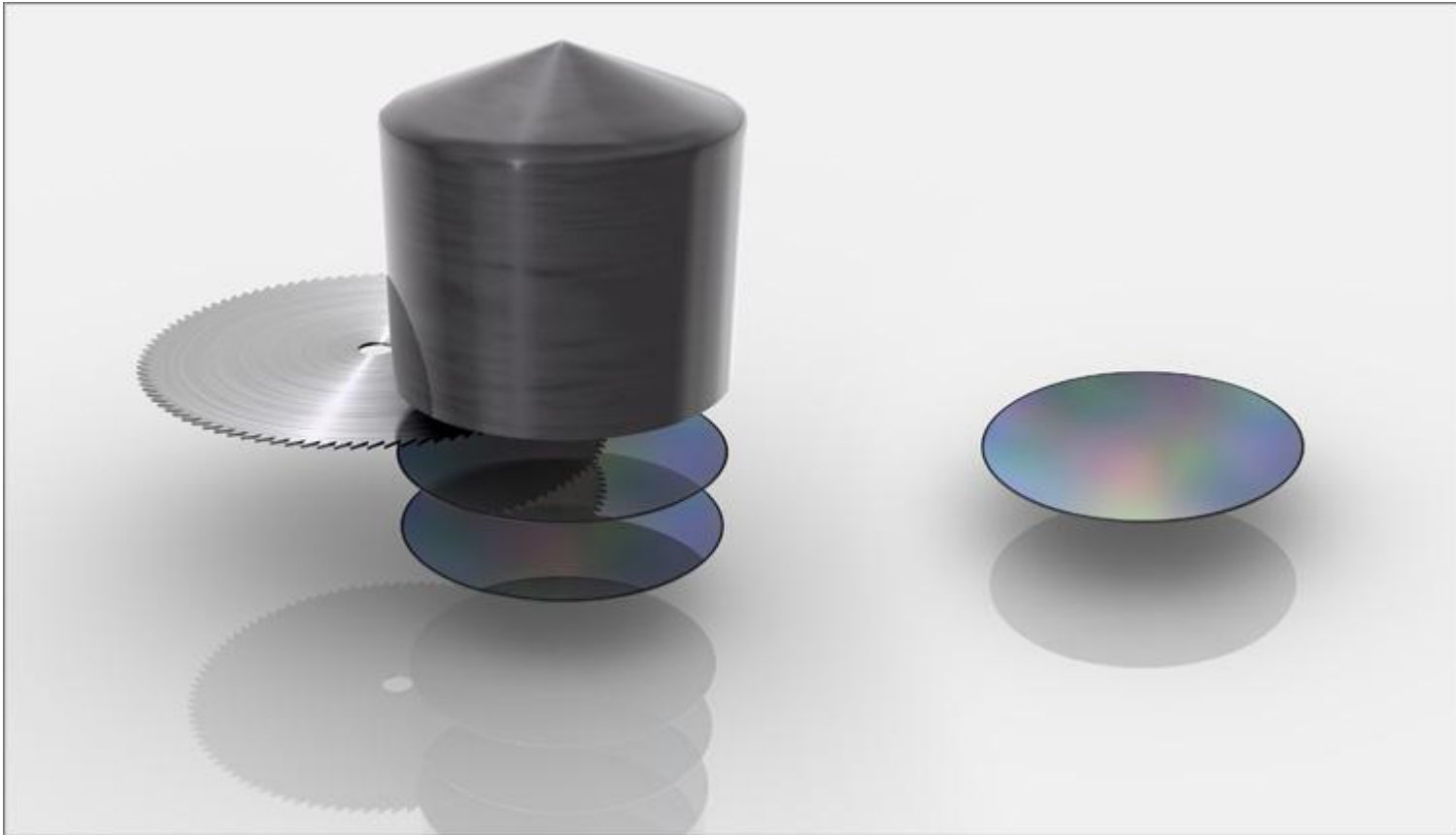
## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### Kristal silikon PV hücreler: Tek-kristal (monokristal) PV hücreler (c-Si)



## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### Kristal silikon PV hücreler: Tek-kristal (monokristal) PV hücreler (c-Si)



## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### Kristal silikon PV hücreler: Tek-kristal (monokristal) PV hücreler (c-Si)



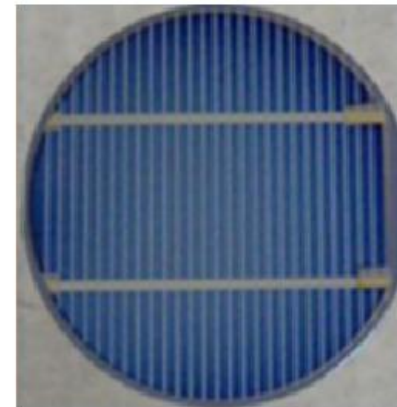
Monokristal Si külçe



Monokristal Si wafer



Monokristal Si PV hücre



Gazi Fotonik'te geliştirilen monokristal Si PV hücre **17**

## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### Kristal silikon PV hücreler: Çoklu-kristal (polikristal) PV hücreler (mc-Si)

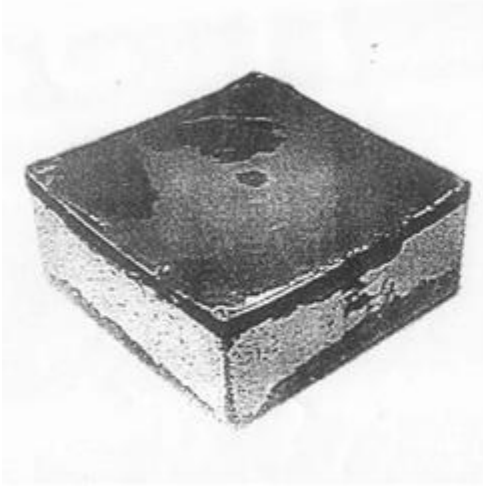


- ✓ Çoklu-kristal PV hücre üretiminde en çok kullanılan yöntem dökme yöntemidir. Çok kristalli silisyumda başlangıç malzemesi, tek kristalli silisyumda olduğu gibi hazırlanır. Aranılan saflık derecesi de benzer basamakta olmalıdır.

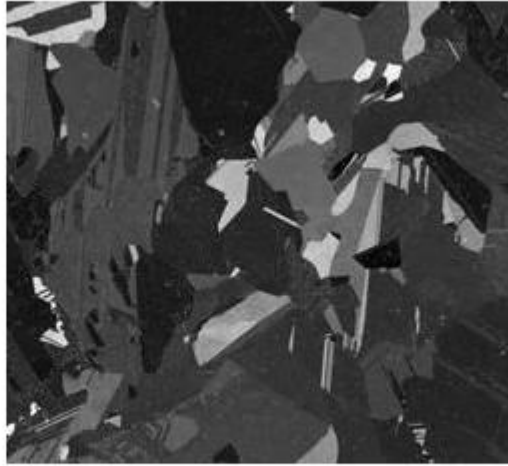


## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

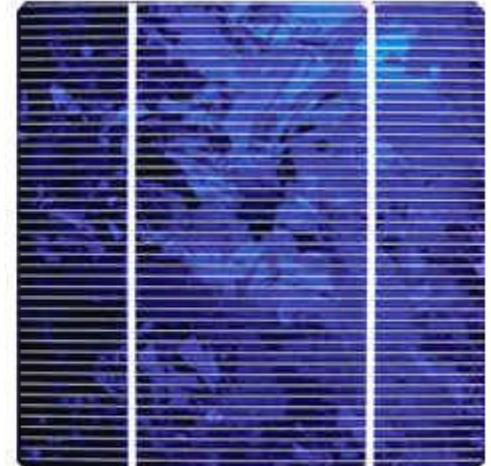
### Kristal silikon PV hücreler: Çoklu-kristal (polikristal) PV hücreler (mc-Si)



Polikristal Si külçe



Polikristal Si wafer

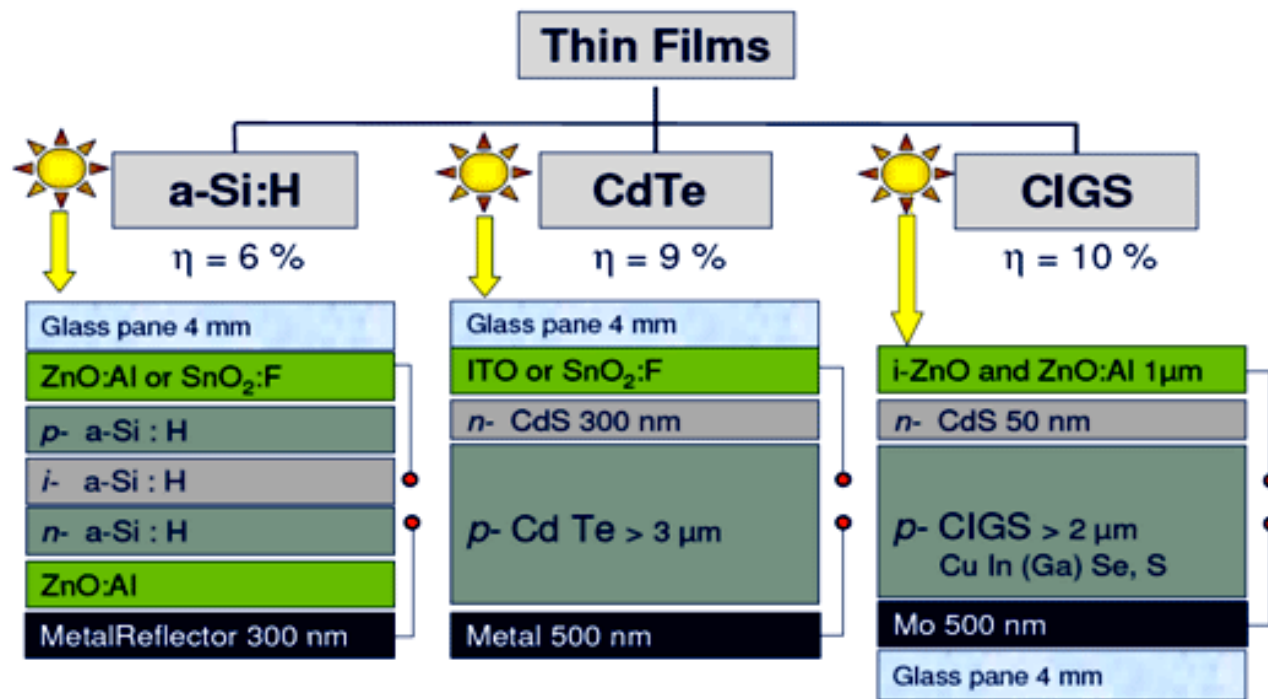


Polikristal Si PV hücre

## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### İnce film PV hücreler:

#### İnce Film PV hücrelerin yapıları

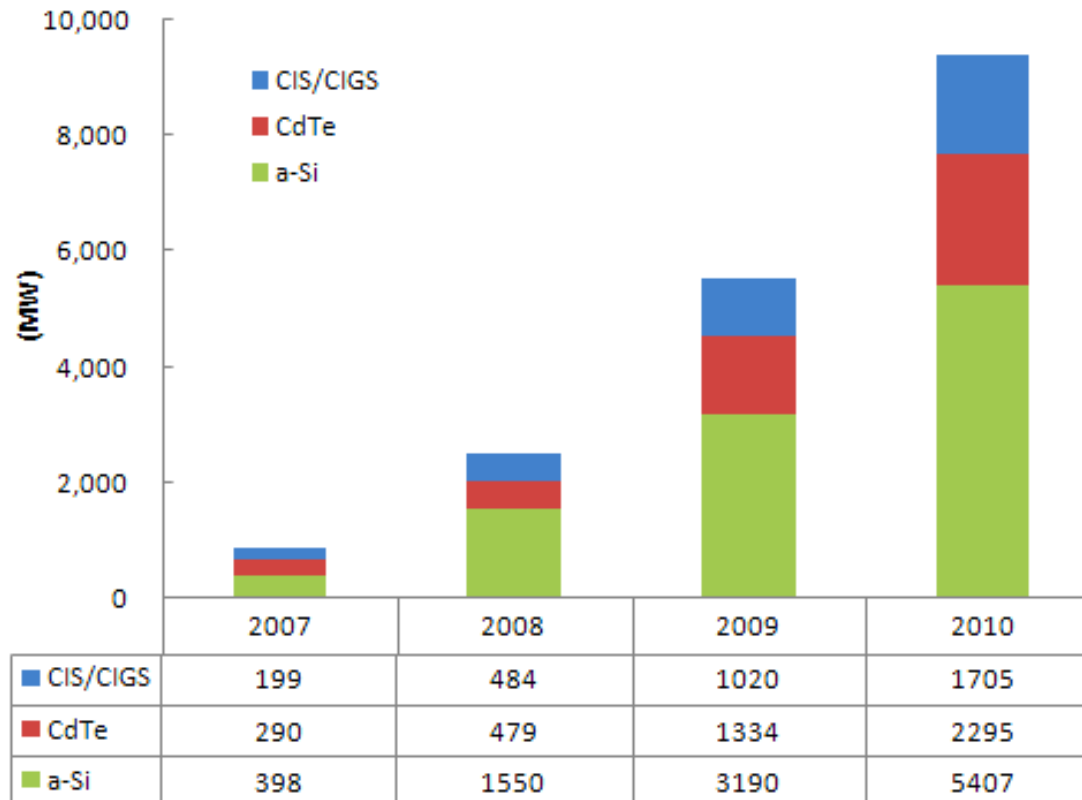


(Source: Credit Suisse, Thin Film Technology 2008.03)

## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### İnce film PV hücreler:

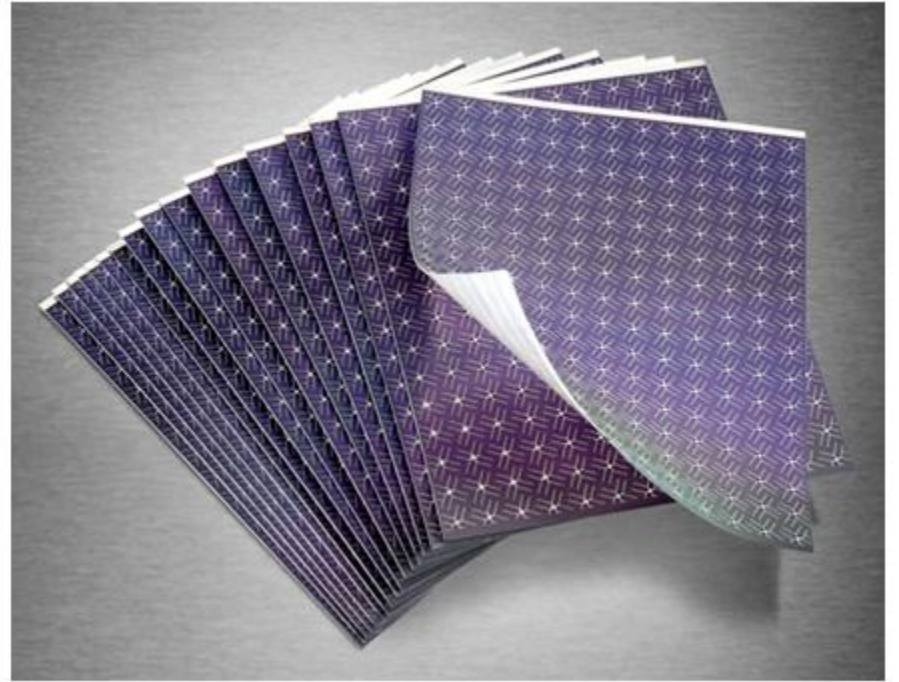
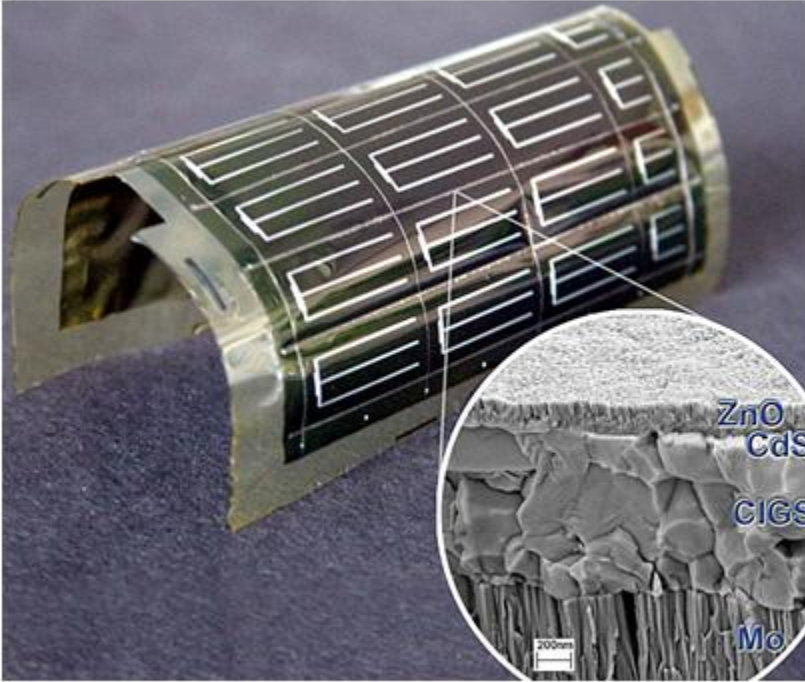
Tahmini ince film PV hücre üretimi



(Source: Credit Suisse, Thin Film Technology 2008.03)

## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

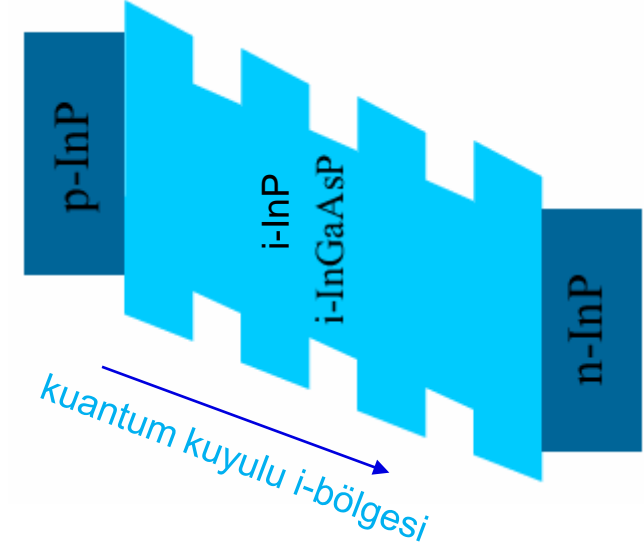
### İnce film PV hücreler:



## III-V Grubu PV Hücreler

### 1. Kuantum Kuyulu PV Hücreler

- ✓ Büyük bant aralığına sahip yarıiletken malzeme içerisinde, küçük bant aralığına sahip malzemenin çok ince katmanlar halinde üretilmesi ile elde edilir.
- ✓ Küçük bant aralığına sahip malzemenin soğurma özelliği ile fotoakımın artması, çıkış gerilimininse azalmaması hedeflenir. Kuantum kuyulu güneş pillerinde (QWSC) teorik verim sınırı %44 civarındadır.
- ✓ Kuantum kuyuları, özellikle fotovoltatik (PV) cihazların performansını artırmak amacıyla, solar spektrumun iyi uyumunu elde etmek için çok katmanlı yapı içerisine (p-n eklem içerisine) yerleştirilir.
- ✓ QWSC teknolojisi yüksek dönüşüm verimliliğine sahip cihazların geliştirilmesine önemli bir adaydır.





## III-V Grubu PV Hücreler

### 2. Çok eklemlı PV hücreler

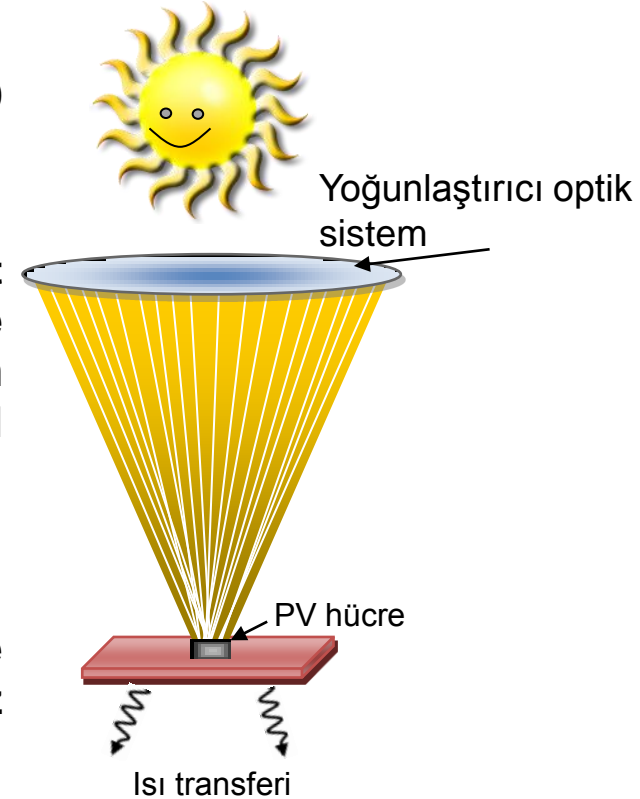
- ✓ p-n eklemlerinin üst üste bindirilmesiyle oluşturulan yapılar çok eklemlı güneş hücreleri olarak adlandırılır. Çok eklemlı ardışık güneş pilleri, farklı bant aralığına sahip malzemelerin üst üste konulması ile elde edilmektedir.
- ✓ Fotovoltaik hücrelerde verimin optimum değeri için, fotovoltaik hücrenin, güneş spektrumunun mümkün olduğu kadar büyük bölümünü soğurması hedeflenir. Bu yüzden çok eklemlı yapıyı oluşturan hücrelerin bant aralıklarının bu büyük spektrumu kapsaması istenir.

Üst hücre	Kep	n+ GaAs
	Pencere	n+ AlInP
		n+ InGaP
		p+ InGaP
Tünel Diyot	BSF	p+ AlInGaP
		p+ GaAs
		n+ GaAs
Orta hücre	Pencere	n+ InGaP
		n+ GaAs
		p+ GaAs
Tünel Diyot	BSF	p+ InGaP
		n+ GaAs
		p+ GaAs
Alt hücre	Pencere	n+ AlGaAs
		n+ Ge
	Alttaş	p+ Ge

## III-V Grubu PV Hücreler

### Çok eklemli PV hücreler

- ✓ Günümüzde üretilen üç eklemli yapılarda; GaInP (1.9 eV), GaAs (1.4 eV) ve Ge (0.7 eV) kullanılmaktadır.
- ✓ Tek alttaş üzerinde farklı yarıiletken katmanların direkt olarak büyütüldüğü çok eklemli güneş hücrelerinde de; optik geçirgenliğin ve maksimum akım iletkenliğinin sağlanması için bütün katmanların kristal yapılarının uyumlu olması gerekmektedir.
- ✓ Çok eklemli güneş pilinin çıkış akımı, eklemlerin ayrı ayrı ürettiği akımların küçüğü ile sınırlıdır; bu nedenle bu hücrelerdeki seri yapı, akım uyumunu kaçınılmaz kılmaktadır.
- ✓ Güneş ışınımının yoğunlaştırılması ile %43 dönüşüm verimliliğine sahip hücreler üretilebilmektedir.



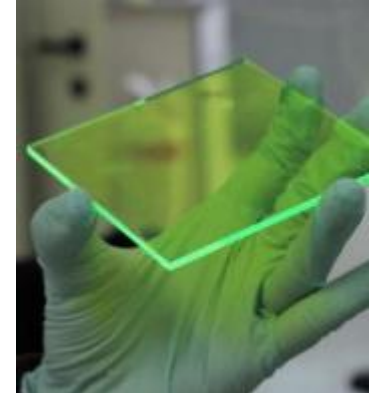
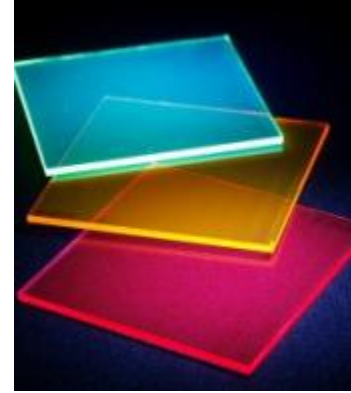
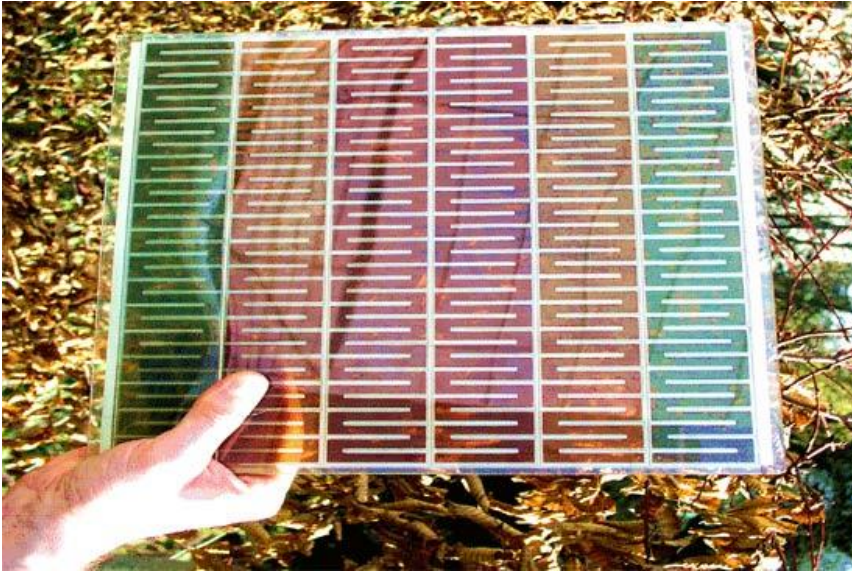
## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### AR-GE aşamasında olan diğer PV hücreler:

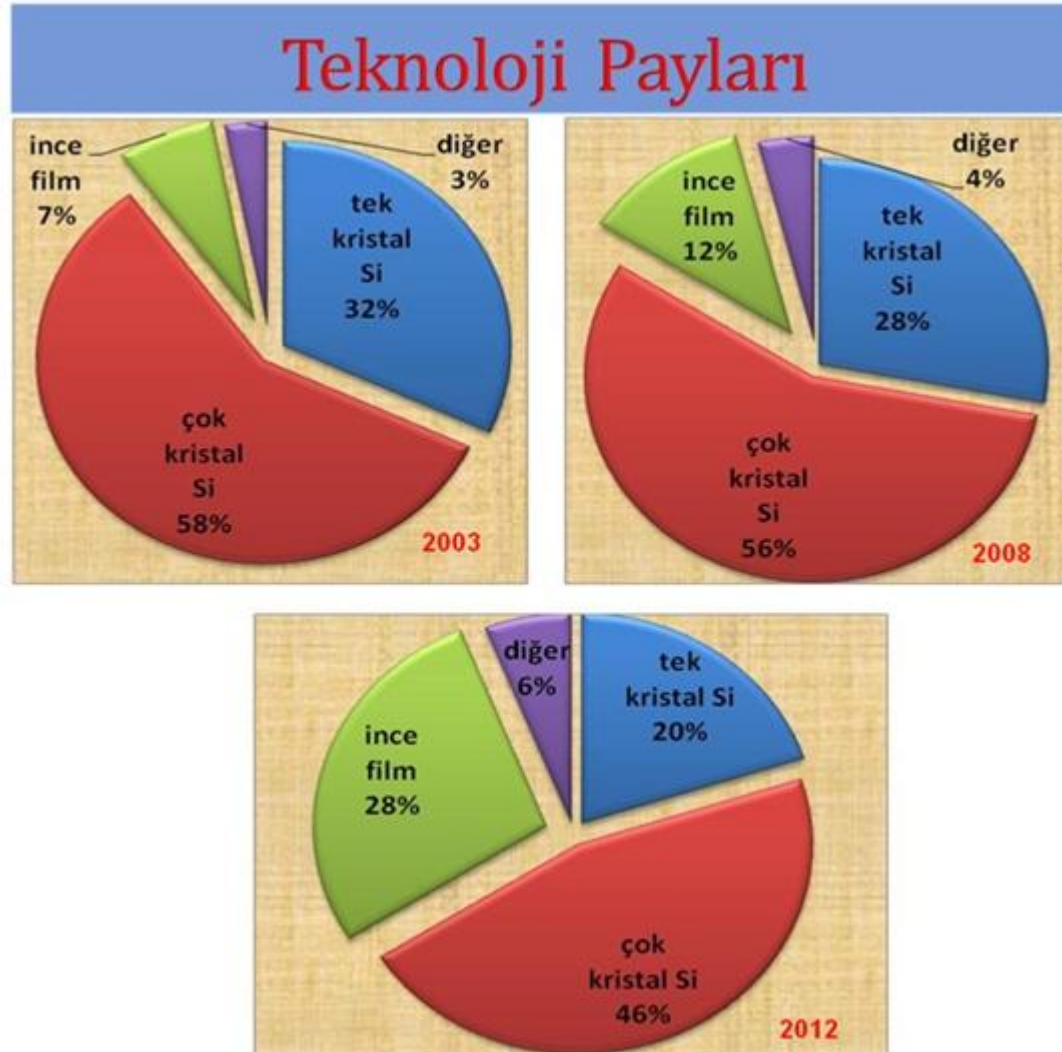
- ✓ Organik PV hücreler, ardışık eklemli (tandem) PV hücreler, kuantum kuyulu PV hücreler geliştirilmekte olan yeni nesil PV hücrelerdendir.
- ✓ Araştırmaları devam eden bu teknolojide ürünler ticarileşmeye geçiş aşamasındadır.
- ✓ Organik PV hücrelerin düşük maliyetleri gelecek için umut verirken, düşük verimleri ve ömür problemlerinin çözümüne yönelik ar-ge çalışmaları devam etmektedir.
- ✓ Çok eklemli hücreler, ulaştıkları yüksek verimden dolayı ilgi odağı haline gelmektedir.

## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

### AR-GE aşamasında olan diğer PV hücreler:



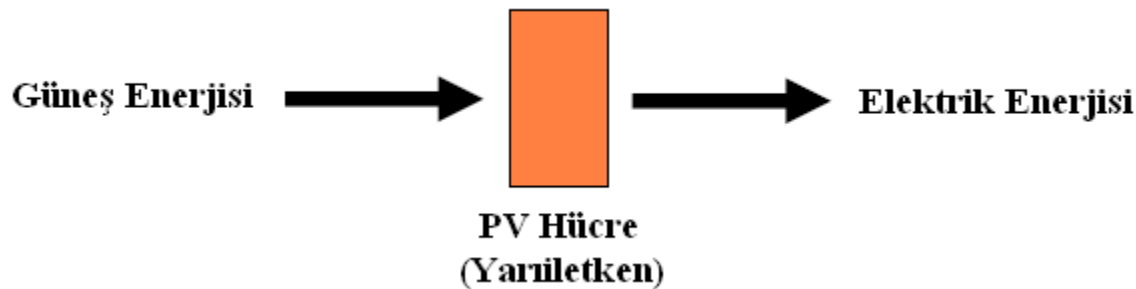
## Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi





## PV hücrelerin çalışma ilkesi

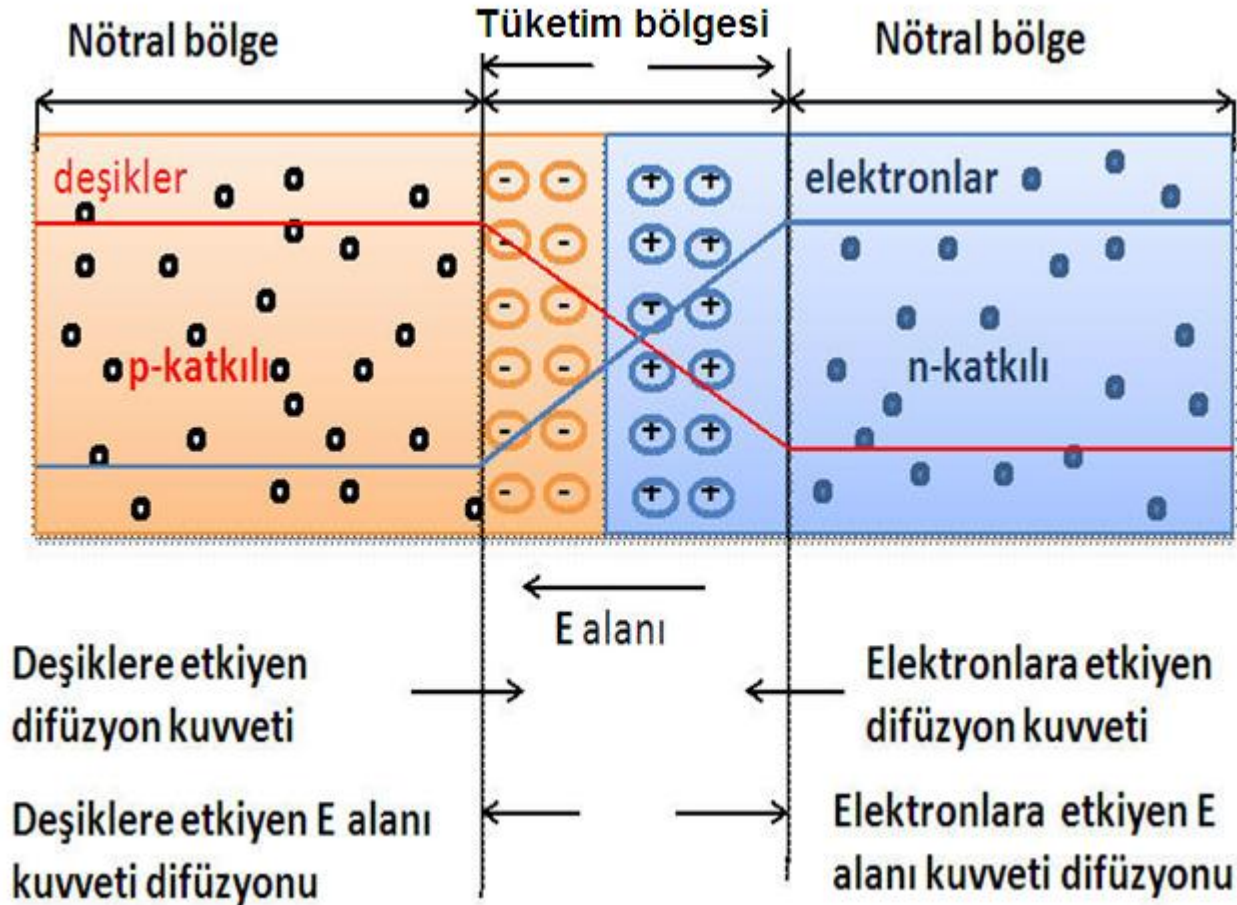
- ✓ PV hücrelerin çalışma ilkesi fotovoltatik olayına dayanır.
- ✓ Üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur.
- ✓ PV hücrenin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir.
- ✓ Fotovoltatik olayda güneş ışığını soğuracak malzeme, yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile uyumlu ve elektrik yüklerinin bir birinden ayrılabilmesine izin verebilecek özellikte bir yarıiletken olmalıdır (Si, GaAs, CdTe gibi).



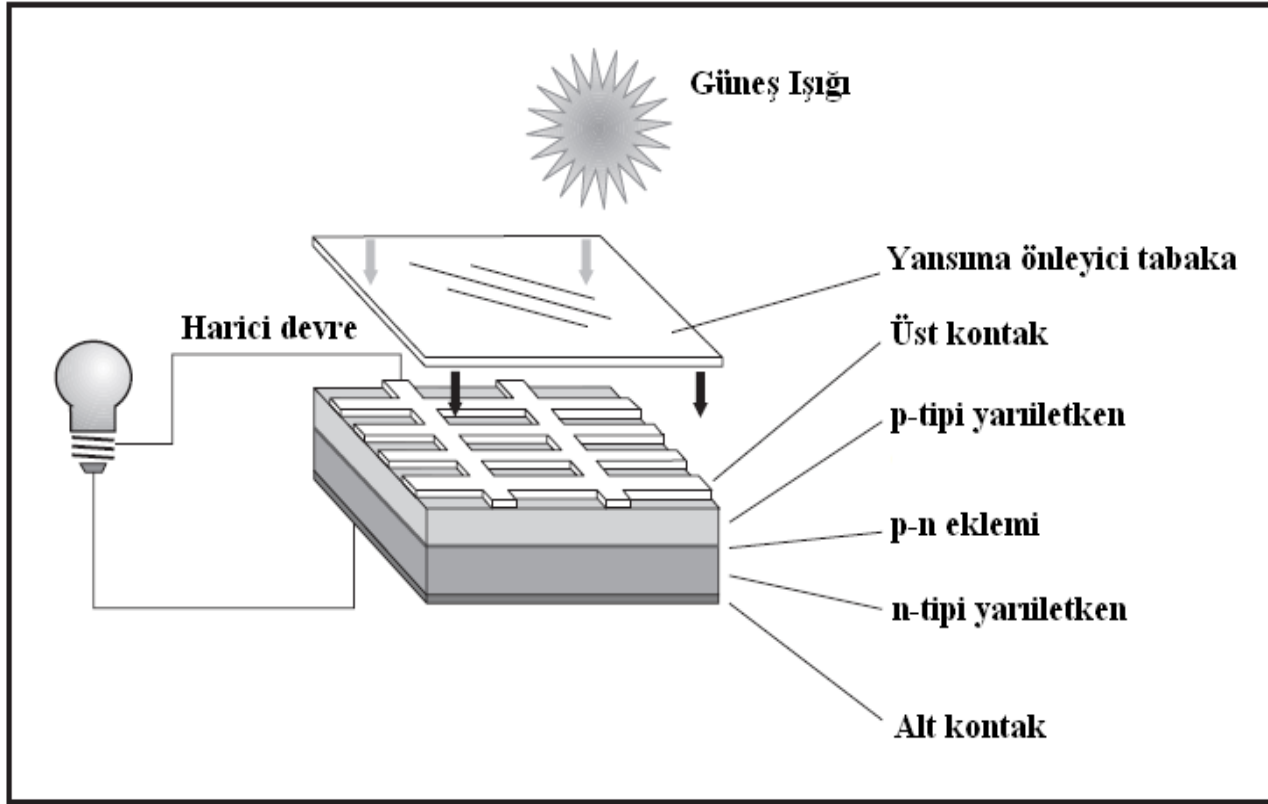
## PV hücrelerin çalışma ilkesi

- ✓ Basitçe bir PV hücre, yarıiletkende n-tipi ve p-tipi bölgeler oluşturularak gerçekleştirilebilir. Oluşturulan bu n-tipi ve p-tipi bölgelerin geçiş bölgesindeki p-n eklemi kesiminde, doğal olarak bir elektrik alanı kurulur.
- ✓ Yarıiletken malzemenin PV hücre olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltatik olayın sağlanması gerekir.
- ✓ Fotovoltatik olay iki aşamada sağlanır:
  - İlk olarak eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-hol çiftleri oluşturulur.
  - İkinci olarak ise; elektron-hol çiftleri bölgedeki elektrik alan yardımı ile birbirlerinden ayrılır.
- ✓ Böylelikle, birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, PV hücrenin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar.

## PV hücrelerin çalışma ilkesi

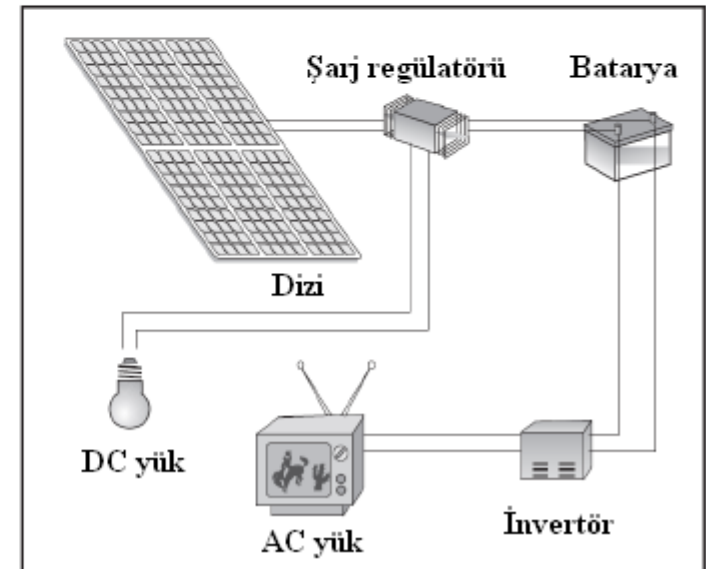
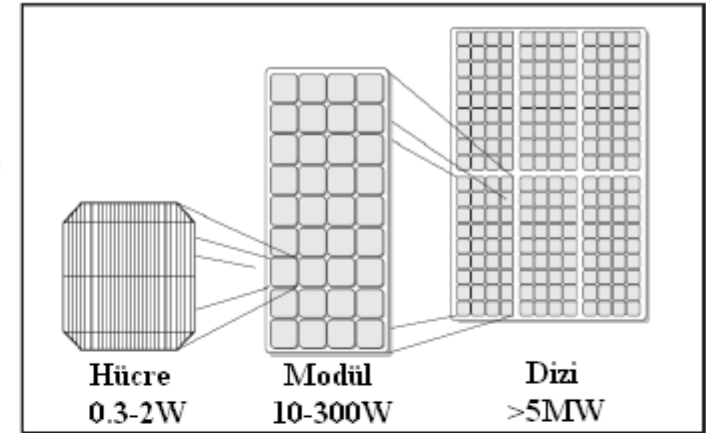
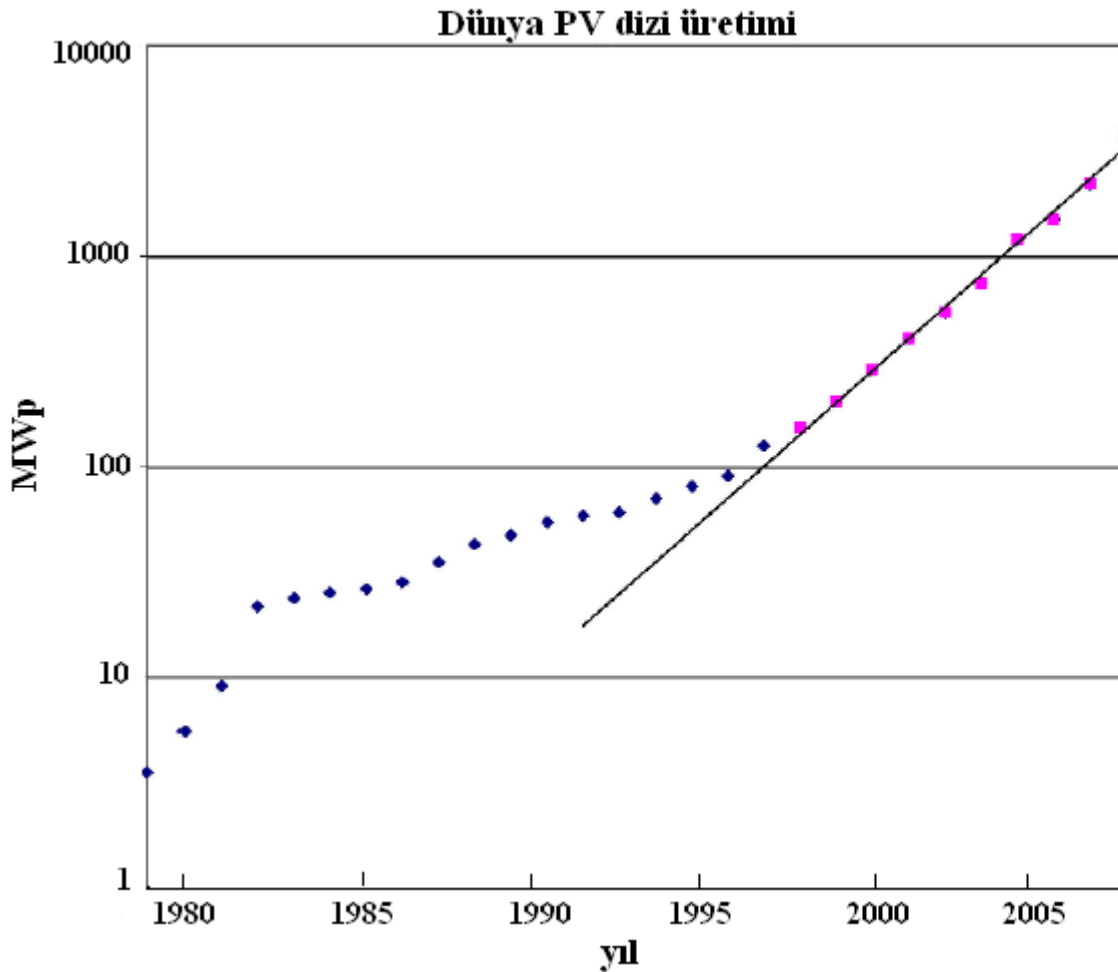


## PV hücrelerin çalışma ilkesi



- ✓ PV hücrelerin yüzeyine güneş ışığı düştüğünde bu elektrik alanı momentum (kuvvet) sağlar ve ışıkla uyarılmış elektronlar oluşur.
- ✓ Hücre bir devreye bağlandığında elektrik akımı meydana gelir.

## PV hücrelerin çalışma ilkesi





## PV hücrelerin kullanım alanları



- ✓ Trafik işaret lambalarında
- ✓ Cep telefonlarının şarj edilmesinde
- ✓ Bahçe aydınlatmasında
- ✓ Sokak aydınlatmasında
- ✓ Güneş arabalarında
- ✓ Uçaklarda
- ✓ Hesap makinelerinde
- ✓ Saatlerde
- ✓ Yapay uydularda
- ✓ Güneş kulelerinde
- ✓ Yemek pişirilmesinde
- ✓ Giysi ve çantalarda



## PV hücrelerin kullanım alanları

### Waldpolenz PV Güç Santrali, Almanya (40MW)





## PV hücrelerin kullanım alanları

### Marcantonio Bentegodi Stadyumu, İtalya





## PV hücrelerin kullanım alanları

### Solucar Platformu, Üç Enerji Kulesi, İspanya





## PV hücrelerin kullanım alanları

### Londra Belediye Binası, İngiltere





## PV hücrelerin kullanım alanları

### Fotovoltaik Dağlar, Fransa





## PV hücrelerin kullanım alanları

### Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, Türkiye





## PV hücrelerin kullanım alanları

### Muğla Üniversitesi Rektörlük Binası, Türkiye





## PV hücrelerin kullanım alanları

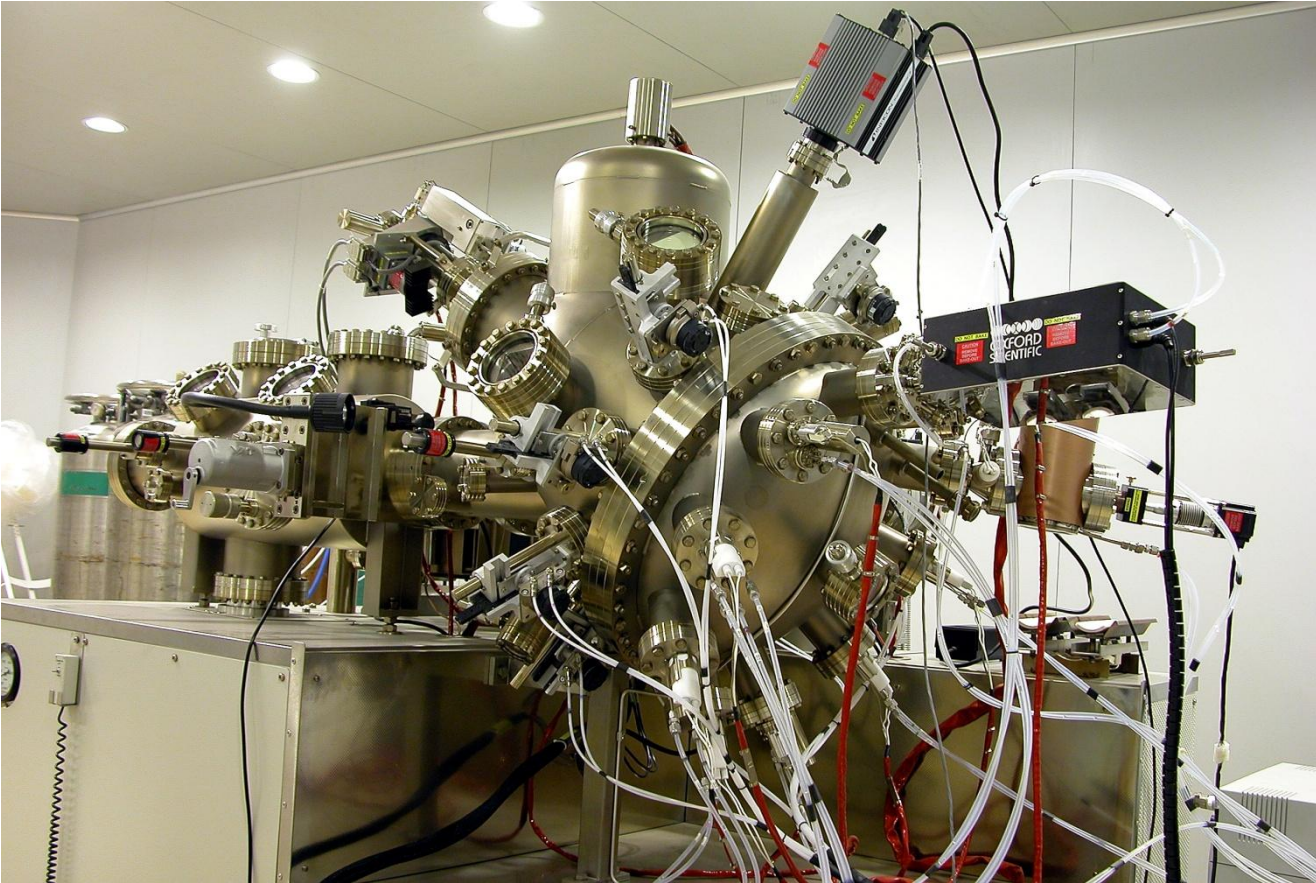
### Gazi Üniversitesi Teknopark, Türkiye





## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

### V80H MBE sistemi:

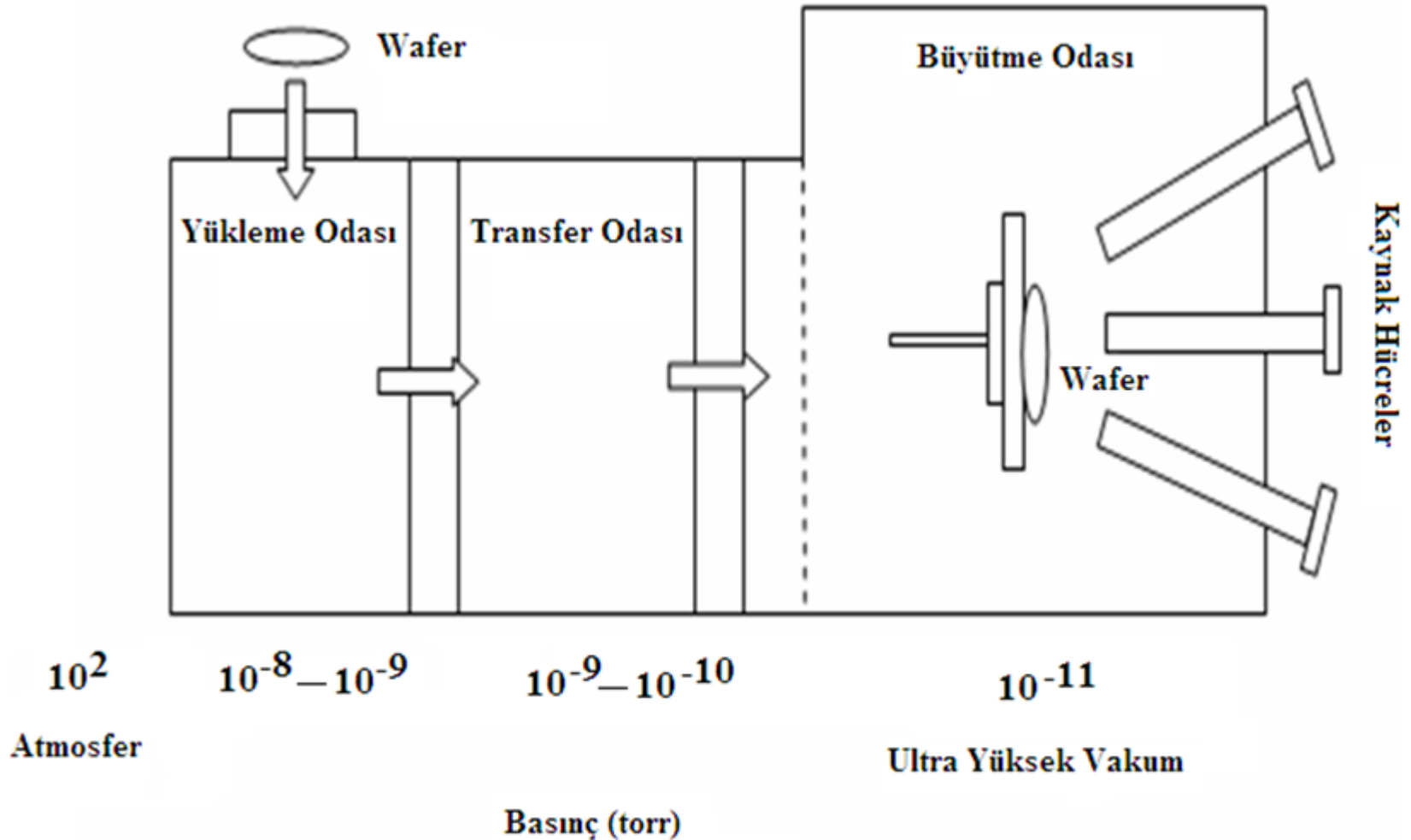


- ✓ **V80H MBE sistemi, Ülkemizde ilk olarak Gazi Üniversitesi Fizik Bölümünde kurulan katı-kaynaklı Moleküler Demet Epitaksi Sistemidir.**



## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

### V80H MBE sistemi;



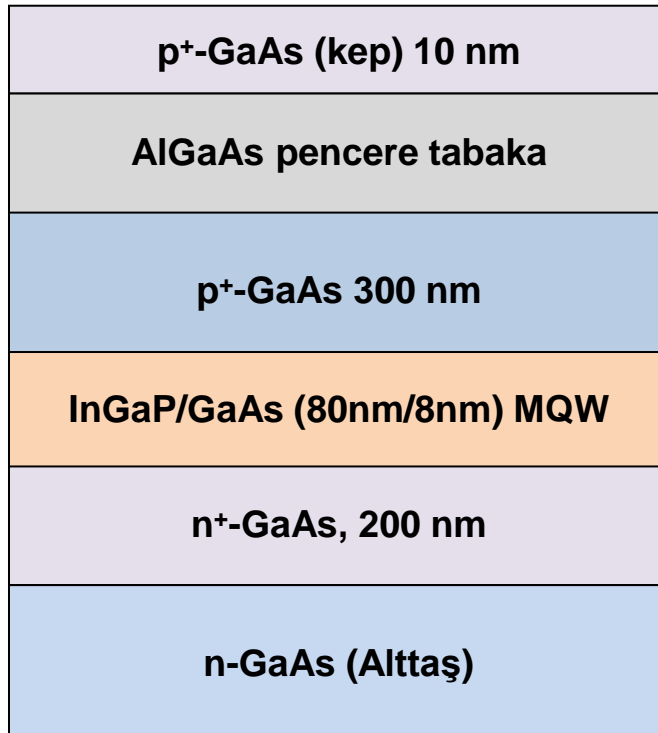
## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

### V80H MBE sistemi;

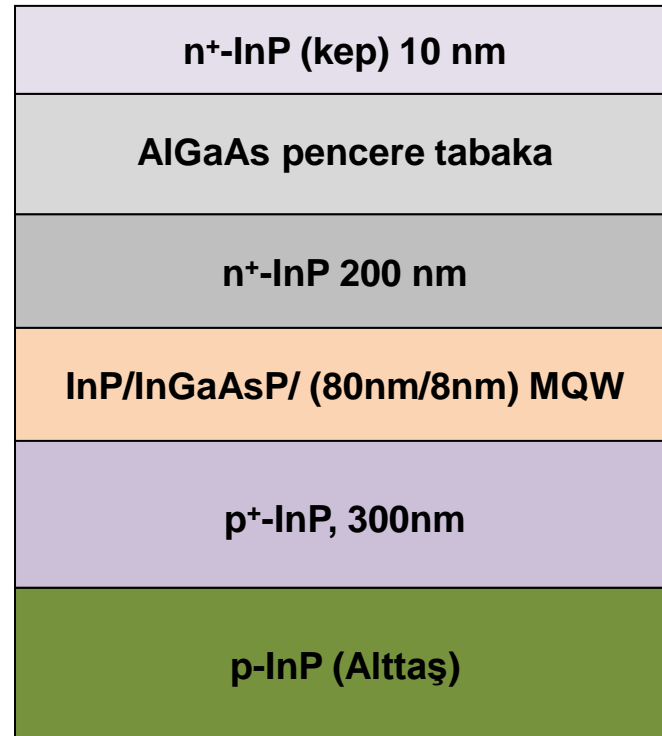


## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

### Kuantum kuyulu PV hücre yapıları;



(a)

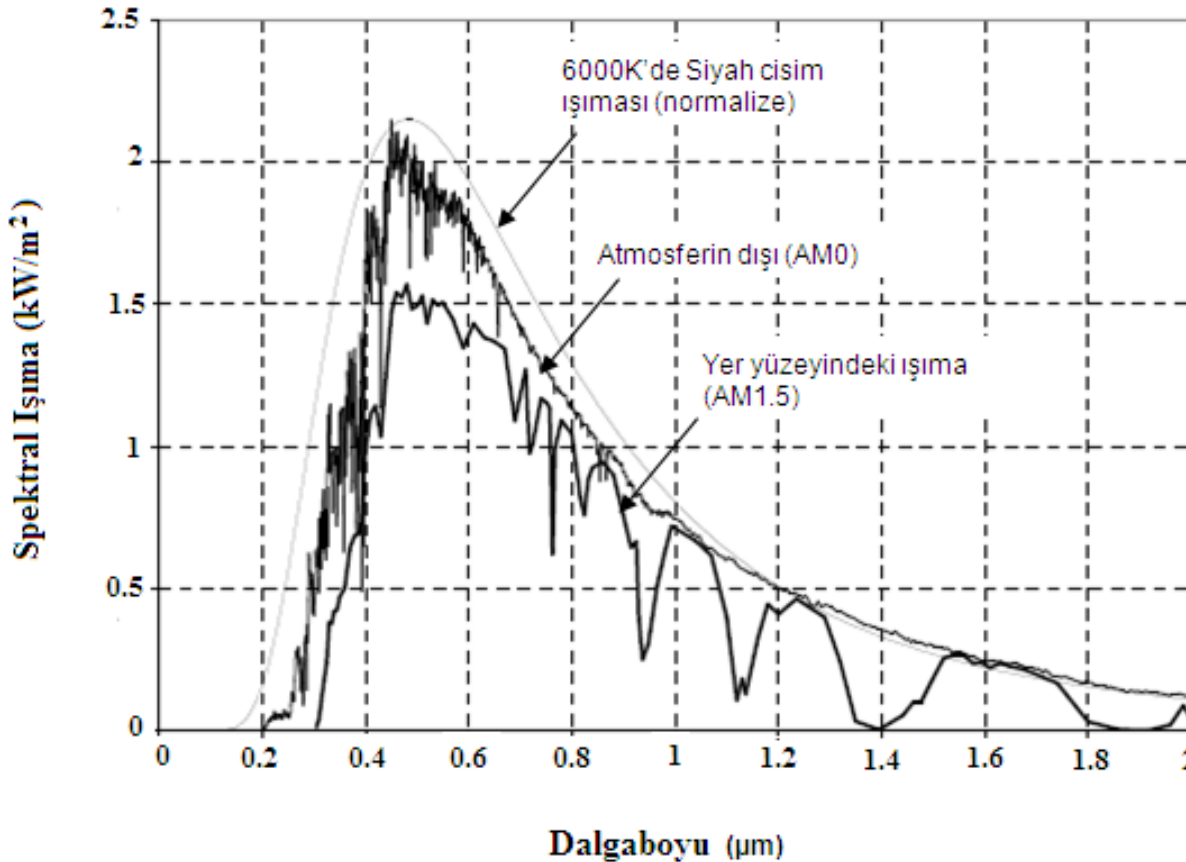


(b)

✓ Kuantum kuyulu (a) InGaAs/GaAs ve (b) InGaAsP PV hücrelerin yapıları

## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

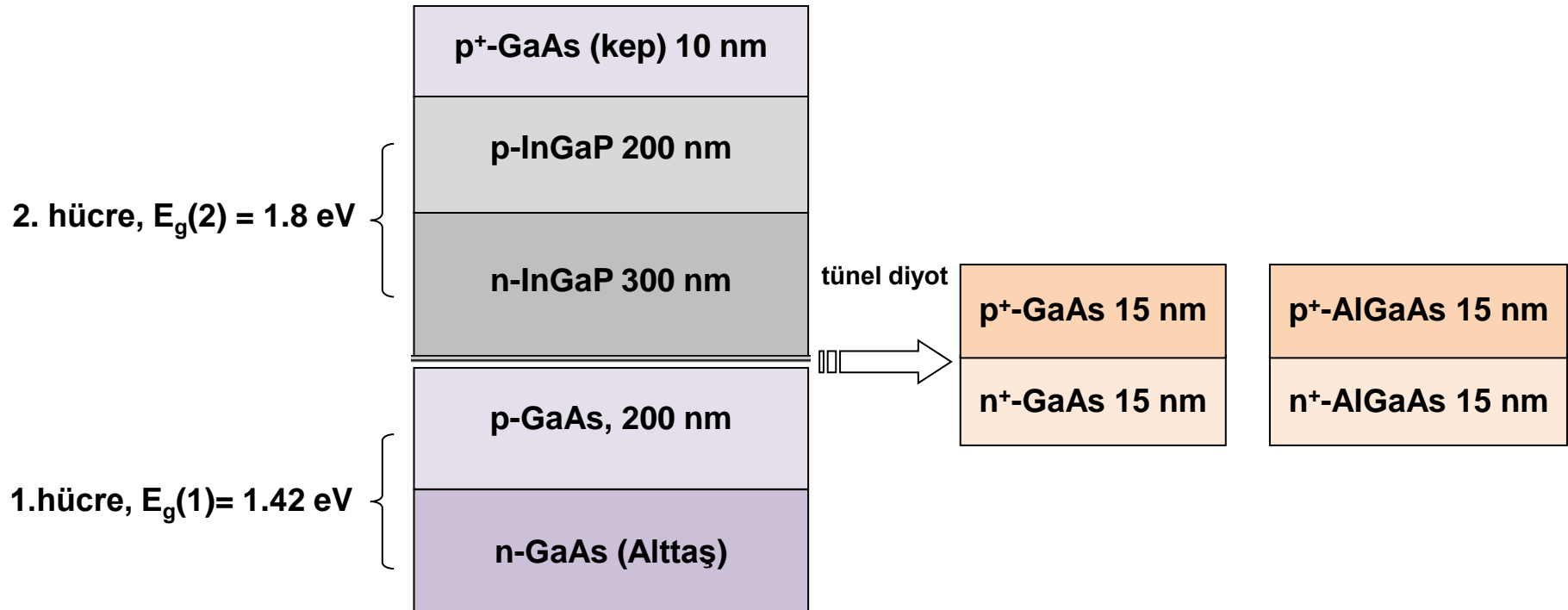
### Neden çok eklemli PV hücreler?



- ✓ PV hücreler, güneş spektrumunun bazı bölgelerini foto akıma dönüştürebilirler. Bu dönüşüm doğrudan bant aralığı ile ilgilidir. Daha fazla bölgeden foto akım dönüşümü sağlayabilmenin yolu, farklı bant aralıklı hücreleri üst üste getirebilmekle olur.

## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

### Çok eklemli PV hücre yapısı:

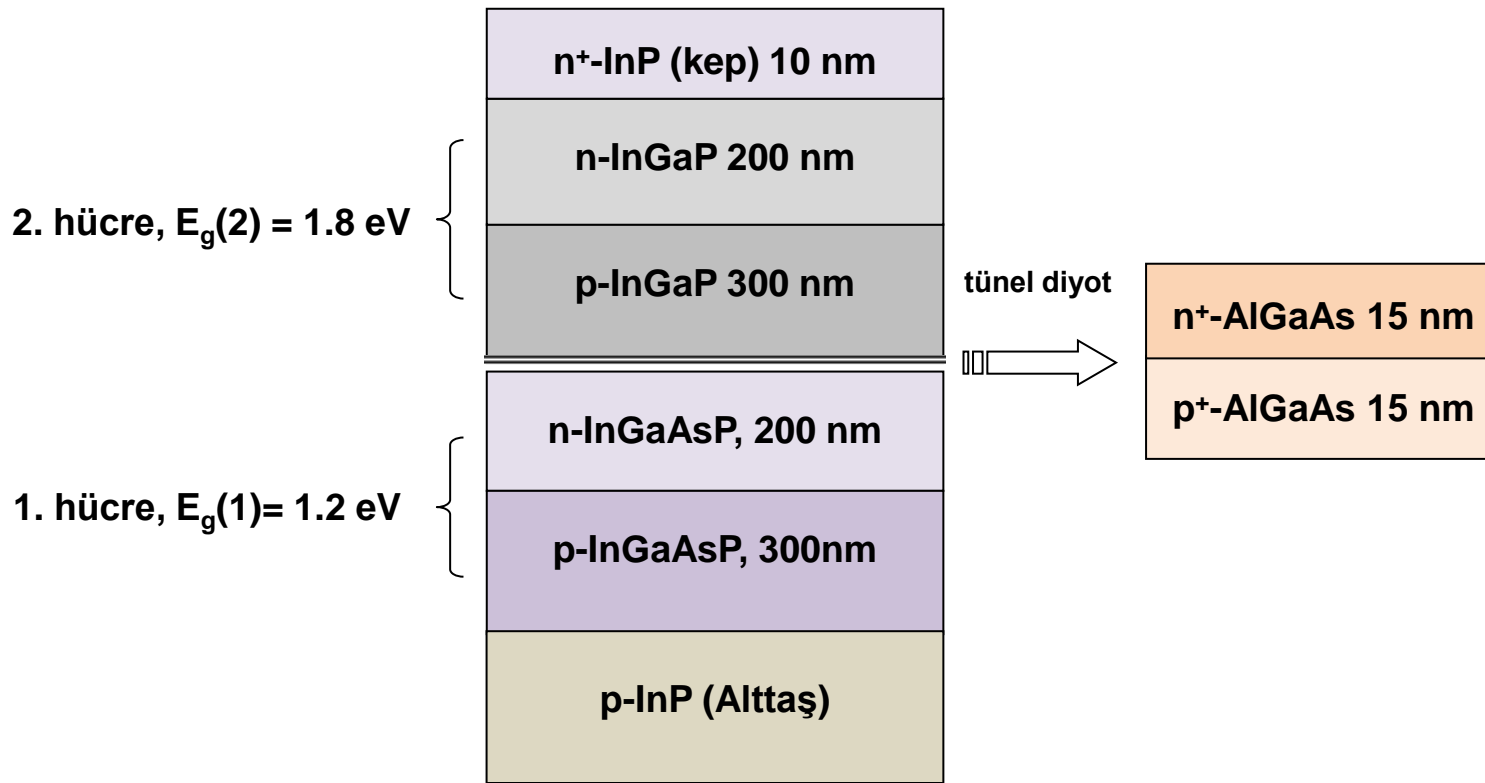


✓ İki eklemli InGaP/GaAs PV hücrelerin yapıları



## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

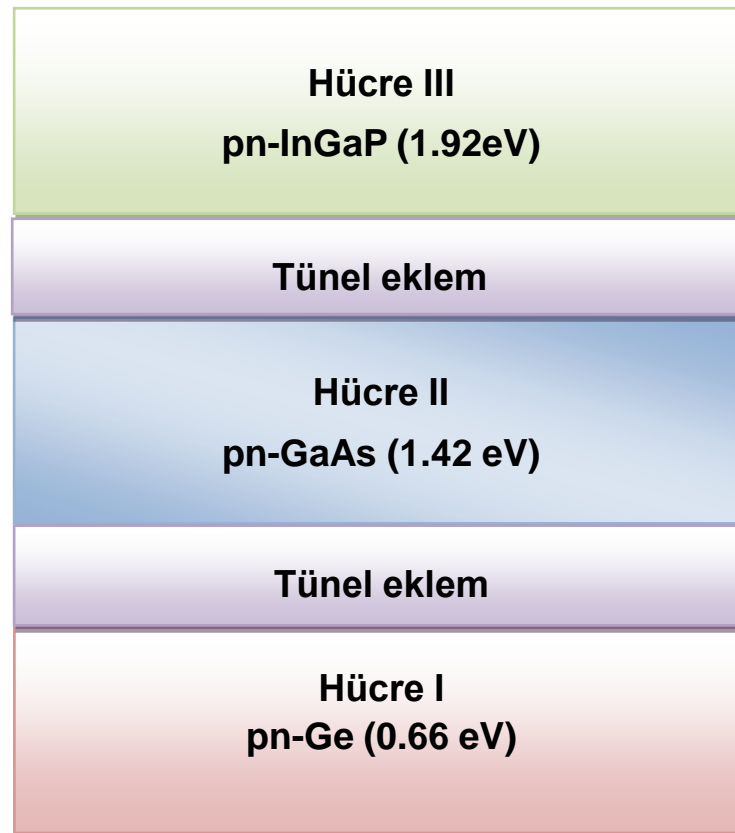
### Çok eklemli PV hücre yapısı:



✓ İki eklemli InGaP/InGaAsP/InP PV hücrelerin yapıları

## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

### Çok eklemli PV hücre yapısı:

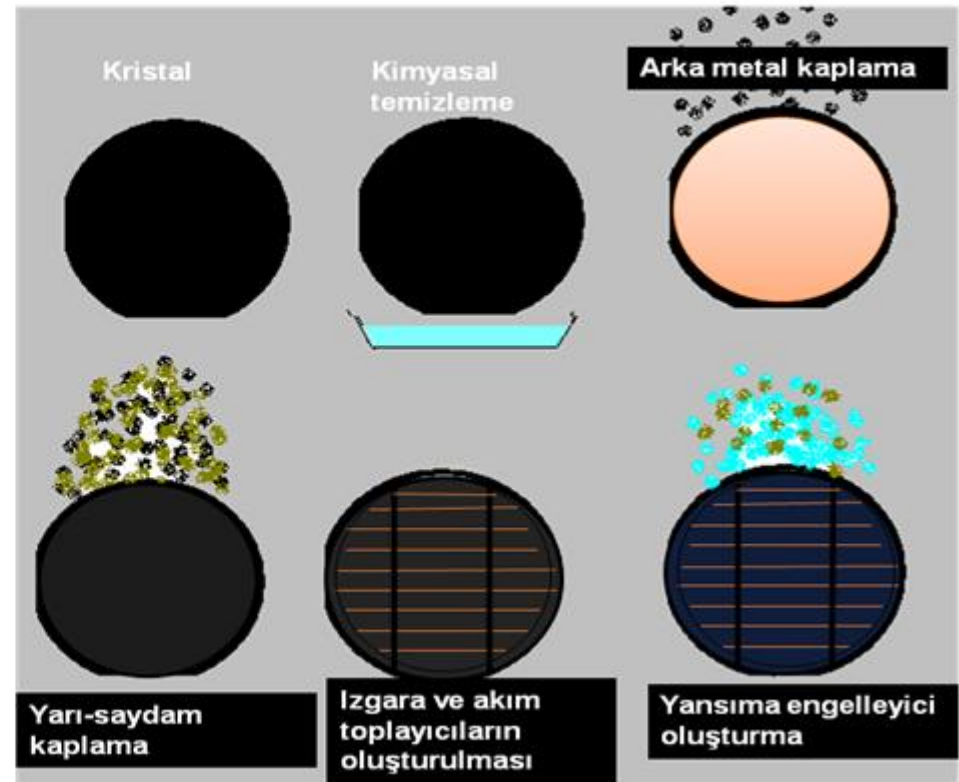


✓ Üç eklemli InGaP/GaAs/Ge PV hücrelerin yapıları

## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

Geliştirdiklerimiz;

### HÜCRE ÜRETİM ADIMLARI

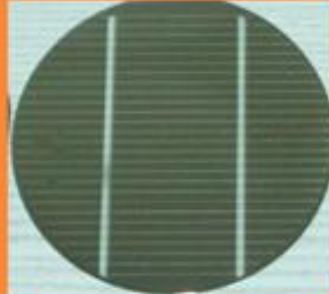


## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

### Geliştirdiklerimiz;



- n-tipi Si epitaksiyel katman üzerine güneş pili
- Altın ızgaralı
- TiO Yansıma önleyici kaplı



- p-tipi pc-Si üzerine güneş pili
- Aliminyum ızgaralı
- SiO<sub>2</sub> Yansıma önleyici kaplı

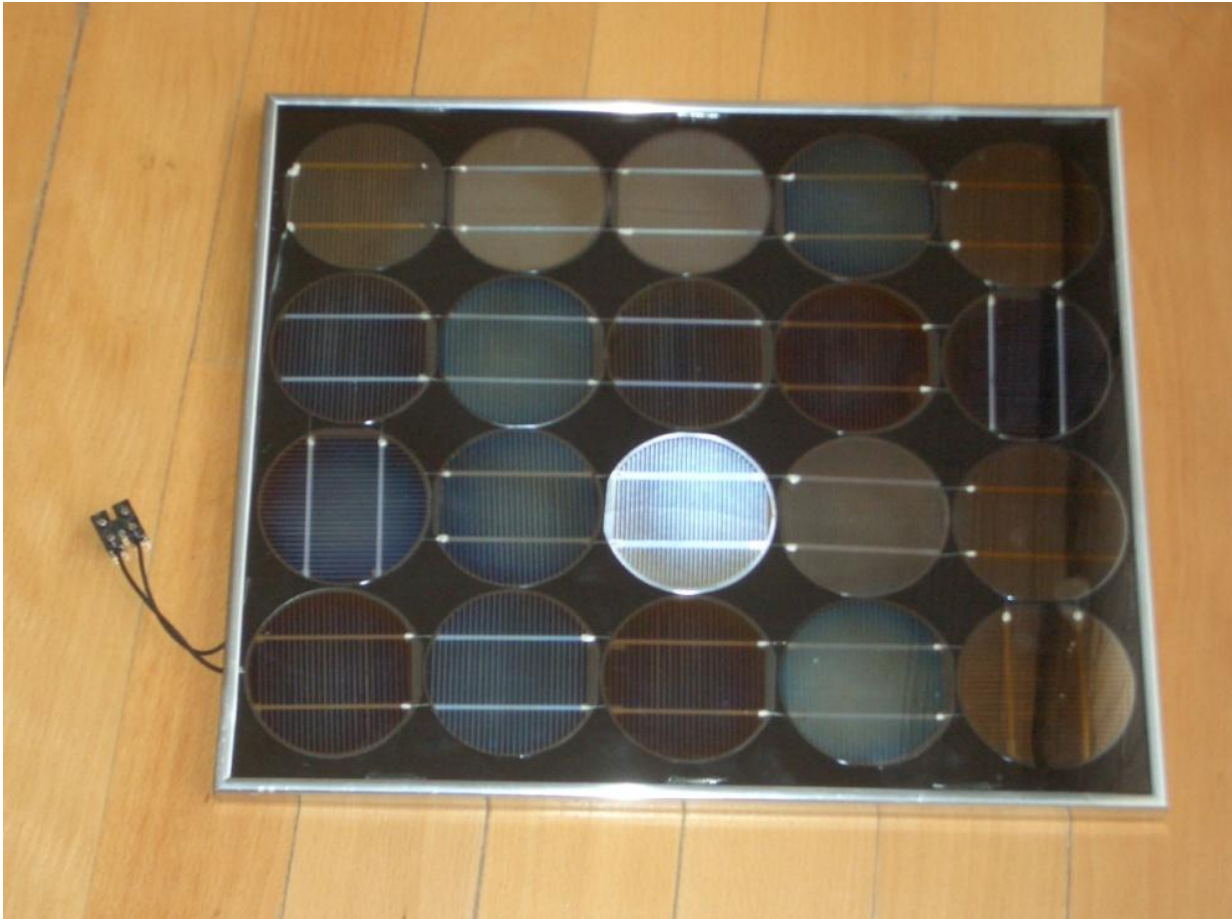


- p-tipi pc-Si üzerine güneş pili
- Aliminyum ızgaralı
- Üçgen tipli, geniş alanlı ince ızgara modeli: Yeni tasarım
- Yansıma önleyicisiz
- Yüksek verimli

- ✓ Geliştirdiğimiz PV hücreler, yurtdışındaki ileri araştırma kuruluşlarında geliştirilen hücrelerle verim ve ömür bakımından yarışabilir niteliktedir.

## Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Çalışmalar

**Geliştirdiklerimiz;**





## Kaynaklar

1. <http://electronics.ege.edu.tr/boztepe/download/ees487lecture4.pdf>
2. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar\\_cell.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar_cell.png)
3. [http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline\\_of\\_solar\\_cells](http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_solar_cells)
4. <http://www.nihanakin.com/?p=271>
5. <http://www.gunessistemleri.com/guneshucreleri.php>
6. <http://org.ntnu.no/solarcells/pages/generations.php>
7. [http://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F\\_pili](http://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F_pili)
8. <http://www.physorg.com/news193557233.html>
9. <http://pascalschniepp.blogspot.com/2009/08/is-this-interesting-konarka-and-its.html>
10. <http://www.infinitepower.org/pdf/FactSheet-11.pdf>
11. <http://www.stbenerji.com/index.htm>
12. [http://umumble.com/blogs/company\\_intel/385/](http://umumble.com/blogs/company_intel/385/)
13. <http://www.top-alternative-energy-sources.com/solar-cell.html>
14. <http://www.gunessistemleri.com/uretimsureci.php>
15. Mustafa Karamanav, “Güneş enerjisi ve güneş pilleri”, Sakarya Üniversitesi, Mayıs 2007.
16. Roger A. Messenger, Jerry Ventre, “Photovoltaic Systems Engineering”, CRC press, 2004.



***TEŞEKKÜRLER...***