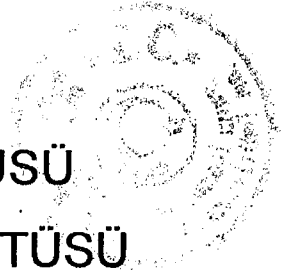


T.C.  
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİ: MASKE YAPIMI,  
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Özgür YAVUZÇETİN  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI

98258

TEZ DANIŞMANI  
Yrd.Doç.Dr. Engin BAŞARAN

GEBZE  
2000

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Özgür Yavuzçetin'in tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 18.07.2020.... tarih ve 2020/1.16... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.



JÜRI

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Engin BAŞARAN  
(Tez Danışmanı)

ÜYE : Doç. Dr. Serhat ÖZDER

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Alp E. KONUKMAN

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 16.08.2020. tarih ve 2020/1.17.... sayılı kararı.





## ÖZET

Fotovoltaik konularında geniş ölçekli üretim ve uygulama araştırması yapılmış, resim ve internet adresleriyle kaynaklar dahil edilmiştir. Günümüzde son teknoloji kullanılarak farklı tasarımlarda yapılan hücreler ve ülkemizde bugünkü uygulamalar konusunda bilgi verilmiştir.

Bu tez çalışmasında; tek kristal silisyum tabakalardan fotovoltaik hücreler üretilmiş ve bu hücreler karakterize edilmişlerdir. Hazırlanan bir ölçüm sistemi ile tüm hücrelerin akım-voltaj (I-V) eğrileri çıkartılmıştır. Açık devre voltajı, maksimum akım, dönüşüm verimi gibi fotovoltaik hücrelerin standart özellikleriyle ilgili denklemler türetilmiş, matematiksel ifadeler teorik ve deneysel olarak hazır bir hücreye ve üretilen hücrelere uygulanmıştır. Sonuçlar karşılaştırılarak iyileştirme imkanlarından bahsedilmiştir.

Hücrelere ızgara (üst kontak) yapmak için litografi teknikleri kullanılmış ve hem optik hem de fiziksel maskeler hazırlanmıştır. Böylelikle maske yapımı konusunda, başka alanlara da uygulanmak üzere know-how sağlanmıştır.

## SUMMARY

An extended research has been done in the area of photovoltaics about production and application, pictures and internet addresses have been added. Also, information about recent applications of cells with high technology and different designs has been given.

In this work, photovoltaic solar cells have been produced from single crystal silicon and they have been characterized. A measurement system was set-up and current-voltage (I-V) curves of all cells have been achieved. Equations concerning about standard properties of photovoltaic solar cells such as; open circuit voltage, maximum current, conversion efficiency have been derived and have been applied to the produced and standard cells both in experimental and theoretical ways. The results have been compared and methods of better efficiency was mentioned.

Lithography techniques were used to make grids (front contacts) and both optic and physical masks have been produced. So that, know-how has been established to be also used in other fields.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada; her zaman olduğu gibi bana bilgi ve tecrübesiyle yardımcı olan ve önceden de bu konularda çalışmış olan TÜBİTAK'taki hocam Sayın Doç. Dr. Şeref KALEM'e, GYTE'de bana teknik imkanları sunan, bilgi ve tavsiyeleriyle destek olan danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Engin BAŞARAN'a ve yardımı olan tüm asistan arkadaşlarıma teşekkür ederim. Örnekleri hazırlayarak p-n eklemlerini yapan tüm YİTAL (Yarıiletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı) ekibine de teşekkürleri borç bilirim. Ayrıca altyapı ve imkanlarını kullandığım UEKAE (Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü) ve MAM (Marmara Araştırma Merkezi) çalışanlarına da teşekkür ederim.

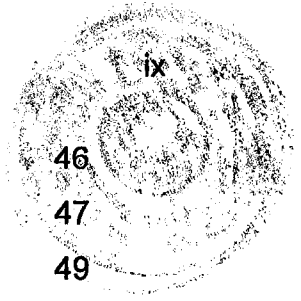


## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

### SAYFA

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| ÖZET                                          | iv    |
| SUMMARY                                       | v     |
| TEŞEKKÜR                                      | vi    |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ                            | vii   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR                       | xi    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                               | xiii  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ                             | xv    |
| FOTOĞRAFLAR DİZİNİ                            | xvi   |
| GRAFİKLER DİZİNİ                              | xviii |
| 1. GİRİŞ                                      | 1     |
| 1.1. Fotovoltaik Etki                         | 1     |
| 1.2. Tarihçe                                  | 1     |
| 1.3. Güneş Pillerinin Avantajları             | 2     |
| 1.4. Enerji Kaynağı Olarak PV: Ekonomik Bakış | 2     |
| 1.5. Güç Kullanımı                            | 4     |
| 1.6. Modüller ve Diziler                      | 4     |
| 1.7. PV Sistemler                             | 5     |
| 1.8. PV Hücrelerin Yalıtımı                   | 6     |
| 1.9. Günümüzde PV Sistem Uygulamaları         | 6     |
| 1.9.1. Bina ve Ev Uygulamaları                | 7     |
| 1.9.2. Taşıt Uygulamaları                     | 8     |
| 1.9.3. Uzay Uygulamaları                      | 10    |
| 1.9.4. Diğer Uygulamalar                      | 11    |
| 1.10. Ülkemizde PV uygulamaları               | 12    |
| 2. PV GÜNEŞ PİLLERİ                           | 13    |
| 2.1. PV Hücre Çeşitleri                       | 13    |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 2.1.1. GaAs                                               | 13 |
| 2.1.2. Kadmiyum Sülfid (CdS)                              | 13 |
| 2.1.3. Kadmiyum Tellurid (CdTe)                           | 14 |
| 2.1.4. Tek-Kristal Silisyum                               | 15 |
| 2.1.5. Amorf Silisyum Hücreler                            | 19 |
| 2.1.6. Poli-kristal Silisyum                              | 22 |
| 2.1.7. Kalkopiritler                                      | 24 |
| 2.1.8. Diğer Yarıiletken Tabanlı Hücreler                 | 26 |
| 2.2. Hücrelerin Karşılaştırılması                         | 27 |
| 2.3. Tipik Bir "p-n" Eklemi                               | 28 |
| 2.3.1. Yanal Kesit                                        | 28 |
| 2.3.2. Aydınlıkta-Karanlıkta Eklem Karşılaştırması        | 29 |
| 2.4. Ardışık (Tandem) Hücreler                            | 29 |
| 2.5. Işığın Yoğunlaştırılması                             | 31 |
| 2.5.1. Yoğunlaştırıcılar                                  | 31 |
| 2.5.2. Ardışık Hücreler ve Yoğunlaştırılmış Işığın Etkisi | 32 |
| 2.6. Kristal Büyütme İşlemleri                            | 33 |
| 2.7. Üst Kontak (Izgara) Tasarımı                         | 35 |
| 2.7.1. Izgara Üretimi                                     | 38 |
| 2.7.2. Fotolitografi                                      | 39 |
| a) Şekil oluşturma (artwork)                              | 39 |
| b) Fotorezist (photoresist)                               | 39 |
| c) Pozlandırma (exposure)                                 | 40 |
| d) Banyo (developing)                                     | 40 |
| 2.7.3. Izgara Yapımında Kritik Parametreler               | 40 |
| 2.7.4. Ohm'ik Kontaklar                                   | 42 |
| a) Si Güneş Pillerinin Kontakları                         | 42 |
| i) n-Si                                                   | 43 |
| ii) p-Si                                                  | 44 |
| b) Diğer Pillerin Kontakları                              | 45 |
| i) p-GaAs                                                 | 45 |
| ii) n-GaAs                                                | 45 |
| iii) p-Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As               | 45 |
| iv) Cu <sub>2</sub> S-CdS                                 | 46 |



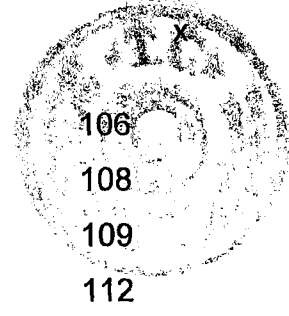
|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| 2.8. Film Tabakası Etkisi                                | 46 |
| 2.9. PV Hücrelerde Verimi Düşüren Faktörler              | 47 |
| 3. PV ETKİNİN TEORİK HESAPLARI                           | 49 |
| 3.1. Güneş Spektrumu                                     | 49 |
| 3.2. Spektral Etki                                       | 50 |
| 3.3. Soğurma Katsayısı                                   | 53 |
| 3.4. Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi                       | 55 |
| 3.5. Temel Akım-Voltaj Karakteristikleri                 | 57 |
| 3.6. Foton Akımı                                         | 60 |
| 3.7. Diyot Akımı                                         | 61 |
| 3.8. Kısa Devre ve Açık Devre Durumu                     | 62 |
| 3.9. Güç Tanımı ve Maksimum Güç                          | 64 |
| 3.10. Dönüşüm Verimi ( $\eta$ ) ve Doldurma Faktörü (FF) | 67 |
| 3.11. $\eta$ ile $E_g$ ilişkisi                          | 68 |
| 3.12. $\eta$ ile Sıcaklığın ilişkisi                     | 72 |
| 4. PV SİLİSYUM DENEYLERİ                                 | 74 |
| 4.1. Deney Düzenekinin Hazırlığı                         | 74 |
| 4.1.1. Tek-kristal güneş pili                            | 74 |
| 4.1.2. KEITHLEY Model 2400 SourceMeter                   | 75 |
| 4.1.3. OSRAM, ULTRA-VITALUX Güneş lambası                | 76 |
| 4.1.4. Ölçüm Tablası                                     | 78 |
| 4.1.5. Karanlık Bölge İçin Kapaklı Siyah Kutu            | 79 |
| 4.2. Hazır Pil Ölçüm ve Karakterizasyonu                 | 81 |
| 4.2.1. $V_m$ değeri (teorik)                             | 85 |
| 4.2.2. $I_m$ değeri (teorik)                             | 86 |
| 4.2.3. Deneysel Düzeltmeler                              | 87 |
| 4.2.4. Gerçek $I_m$ ve $V_m$ değerleri                   | 88 |
| 4.2.5. Gerçek FF değeri                                  | 89 |
| 4.3. PV Maskelerin Hazırlanması                          | 90 |
| 4.3.1. Optik Maskeler                                    | 90 |
| 4.3.2. Fotolitografi Yöntemi                             | 91 |
| 4.3.3. Metal Maskeler                                    | 95 |
| 4.4. Laboratuvarı Üretilen Piller ve Ölçümleri           | 97 |

5. SONUÇLAR

6. ÖNERİLER

KAYNAKLAR

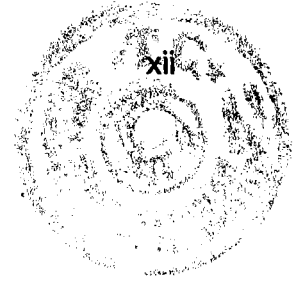
ÖZGEÇMİŞ





## SİMGELER VE KISALTMALAR

| Simgeler        | Açıklama                                                                        |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $a$             | Izgara çizgilerinin birbirlerine olan uzaklıkları                               |
| AC              | Alternatif akım                                                                 |
| AM              | Hava Kütlesi (Air Mass)                                                         |
| ANAEM           | Ankara Nükleer Araştırma ve Enerji Merkezi                                      |
| $a\text{-Si:H}$ | Hidrojenleştirilmiş amorf silisyum                                              |
| $b$             | Izgara çizgilerinin orta toplayıcıdan ölçüldüğünde boyları                      |
| $B_2H_6$        | Boran                                                                           |
| $CuMX_2$        | Kalkopirit genel formülü                                                        |
| $E_c$           | İletim bandının (conduction band) alt kısmında bulunan elektronların enerjileri |
| $E_F$           | Fermi düzeyindeki elektron enerjisi (Fermi energy)                              |
| $E_v$           | Valans bandının üst bölgelerinde olan elektronların enerjileri                  |
| FF              | Doldurma faktörü (Fill factor)                                                  |
| G               | Elektron-delik oluşum oranı (Generation rate)                                   |
| $h$             | Planc sabiti                                                                    |
| $H_2O_2$        | Perhidrol                                                                       |
| HCl             | Tuz Ruhu                                                                        |
| HF              | Hidroflorik Asit                                                                |
| $I_0$           | Ters doyum akımı                                                                |
| $I_e$           | Elektronların akımı                                                             |
| $I_f$           | Fotonların oluşturduğu akım                                                     |
| $I_h$           | Deliklerin akımı                                                                |
| $I_{sc}$        | Kısa devre akımı                                                                |
| ITO             | Indium-Tin Oxide                                                                |
| $k_B$           | Boltzman sabiti                                                                 |
| NA              | Delik sayısı                                                                    |
| NaOH            | Kostik soda                                                                     |
| $N_g$           | Toplam foton sayısı                                                             |



|             |                                                                |
|-------------|----------------------------------------------------------------|
| $PH_3$      | Fosgen                                                         |
| $P_{maks}$  | Maksimum güç                                                   |
| PV          | Fotovoltaiik                                                   |
| q           | Elektron veya deliğın yükü                                     |
| rf          | Radyo frekansı                                                 |
| $R_k$       | Paralel kısa devre direnci                                     |
| $R_L$       | Yük direnci                                                    |
| $R_s$       | Hücrelerdeki seri direnç                                       |
| SEM         | Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron<br>Microscope) |
| t           | Üst yarıiletken tabakanın kalınlığı                            |
| T           | Sıcaklık (K)                                                   |
| UV          | Ultraviole                                                     |
| $V_{foton}$ | Foton voltajı                                                  |
| $V_{oc}$    | Açık devre voltajı (Open circuit)                              |
| x           | Eklem derinliği                                                |
| $\phi$      | Foton yoğunluğu                                                |
| $\alpha$    | Soğurma katsayısı                                              |
| $\eta$      | Verim                                                          |
| $\nu$       | Frekans                                                        |
| $\rho$      | Üst yarıiletken tabakanın öz direnci                           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| Şekil                                                                                                                                                                                                                             | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2.1. İlk yapılan p-n eklemine sahip tek kristal silisyum PV pil hücresi örneği.                                                                                                                                                   | 15    |
| 2.2. Klasik (solda) ve modern (sağda) yani gömülü kontak teknikleriyle hazırlanmış güneş pillerinin karşılaştırılması.                                                                                                            | 17    |
| 2.3. Bir kristal yapısıyla amorf maddenin durum yoğunlukları açısından karşılaştırılması. $E_v$ : Değerlik (Valance) bandının enerjisi ve $E_c$ : İletim (conduction) bandının enerjisini verir.                                  | 20    |
| 2.4. Çok eklemli bir a-Si hücrenin yandan kesiti. Şekilde gözüken a-Si,Ge tabaka dar bantlı bir Si-Ge alaşımıdır ve ayrı bir fotovoltajik hücre oluşturur.                                                                        | 21    |
| 2.5. Bir CuInSe <sub>2</sub> fotovoltajik hücresinin yandan kesiti                                                                                                                                                                | 25    |
| 2.6. P-n eklemine sahip bir PV hücrenin kesit görüntüsü. Eklemle ulaşan ışığın oluşturduğu elektron-delik çiftleri eklem her iki yanında potansiyel oluşturur. Potansiyel sonucu oluşan akım ise alt ve üst kontaklarla toplanır. | 28    |
| 2.7. Bir eklemdeki enerji seviyelerinin aydınlatma olduğu ve olmadığı durumlardaki görüntüsü.                                                                                                                                     | 29    |
| 2.8. Ardışık (tandem) bir hücrenin yandan kesiti                                                                                                                                                                                  | 30    |
| 2.9. Czochraslki işlemi                                                                                                                                                                                                           | 33    |
| 2.10. Güneş pillerinde en çok karşılaşılan türden üst kontak (ızgara) tasarımı.                                                                                                                                                   | 35    |
| 2.11. Paralel ızgaranın teorik direnç hesaplamaları için boyutlarının gösterilişi. Buradaki ızgara çeşidi "ağ" şeklinde olmaktadır.                                                                                               | 36    |
| 2.12. n-tipi Si üzerine en iyi Ohm'ik kontak yapan ve sırasıyla kaplanan metal kombinasyonu.                                                                                                                                      | 44    |
| 3.1. Bir p-n eklemının yan kesidi.                                                                                                                                                                                                | 51    |



|                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2. Güneş pilinin idealleştirilmiş eşdeğer devresi. $R_s$ , hücrelerdeki seri direnç, $R_k$ , ise paralel kısa devre direnci, $R_L$ ise yük (load) direncidir. $I_0$ ters doyum akımı, $I_f$ ise fotonların oluşturduğu akım üreticidir.                            | 56 |
| 3.3. Aydınlık ortamda, 4. bölgenin büyütülmüş hali.                                                                                                                                                                                                                  | 58 |
| 3.4. Karanlık durumda eklem. Burada, $E_c$ : İletim bandının alt kısmında bulunan elektronların enerjileri (conduction band), $E_F$ : Fermi düzeyindeki elektron enerjisi (Fermi energy), $E_v$ : Valans bandının üst bölgelerinde olan elektronların enerjileridir. | 59 |
| 3.5. Aydınlanma anında eklem.                                                                                                                                                                                                                                        | 60 |
| 4.1. Tipik bir güç kaynağı ile kurulan I-V ölçüm düzeneği. Güneş pilinin üreteceği akım ters yönde olacaktır ve güç kaynağındaki bulunan diyot buna engel olacaktır bu yüzden ölçüm sisteminde ayarlamalar yapmak gerekir.                                           | 76 |
| 4.2. Ölçüm tablasının yan kesitten görünüşü. Üst ve alt kontaklar arasına güneş pili konulur ve her iki kontakten üretilen akım toplanır.                                                                                                                            | 79 |
| 4.3. Üzerine Alüminyum ve fotorezist kaplanmış p-n eklemlili örneklerin yan kesiti.                                                                                                                                                                                  | 93 |
| 4.4. Ölçümlerde kullanılan örneklerin yandan kesitleri. P-n eklemlili.                                                                                                                                                                                               | 97 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| Çizelge                                                                                                                | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2.1. CdTe pillerin kaplanma metodlarıyla bunların sağladıkları verimler [Hickok, 1975].                                | 14    |
| 2.2. Normal ve gömülü kontağa sahip tek kristal hücrelerde işlem sıraları.                                             | 18    |
| 2.3. Kalkopirit hücrelerde verimler [Hedstrom et al., 1993].                                                           | 24    |
| 2.4. Değişik PV hücrelerin karşılaştırılması [Emery, 1996].                                                            | 27    |
| 4.1. Tek-kristal silisyumun aydınlık ve karanlık ortamlarda alınan dataları. Veriler 50 mV'luk aralıklarla alınmıştır. | 82    |
| 4.2. Tek-kristal güneş pilinin aydınlanma anında daha sık veri aralıklarıyla (10 mV) yapılan ölçümleri.                | 84    |
| 4.3. Karanlıkta sourcemeter ile ölçülen örneklerin I-V verileri.                                                       | 99    |
| 4.4. Fotoğraf 4.7. de verilen örneklerin I-V eğrileri.                                                                 | 101   |



## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

| Fotoğraf                                                                                                                                                                                              | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1.1. Fotovoltaik sistemlerin temel elemanları: (a) Hücre, (b) Modül, (c) Diziler                                                                                                                      | 5     |
| 1.2. Kawneer Şirketi ve Solarex ortaklığı bir PV enerji üretim sisteminin bir bina uygulaması. Ön yüzey tümüyle PV panellerle kaplanmıştır.                                                           | 7     |
| 1.3. Japonya da bir evin çatısındaki uygulama. Son senelerde Japonya'da hükümet de bu tür yapıları oldukça fazla desteklemektedir.                                                                    | 8     |
| 1.4. Frankfurt'daki bir evin çatısındaki uygulama. Paneller, çatı ile arada boşluk kalacak şekilde konulmuşlardır böylelikle arada hava akımı sağlanmış olur. Bu ise ısınmayı azaltıp verimi artırır. | 8     |
| 1.5. Arizona'da denemeleri yapılan bir güneş enerjisi taşıtları.                                                                                                                                      | 9     |
| 1.6. Avustralya'da ve Japonya'da yapılan sürat yarışmalarına katılan PV enerjili taşıtlar.                                                                                                            | 9     |
| 1.7. PV hücrelerle enerji desteği sağlanmış bir yat.                                                                                                                                                  | 9     |
| 1.8. Enerjisini güneş panellerinden alan bir deniz taşıtı.                                                                                                                                            | 10    |
| 1.9. Bir uydunun güneş panelleri. Bu paneller sayesinde uydu kendisine gereken bir kaç kW'lık elektrik enerjisini temin eder.                                                                         | 10    |
| 1.10. Bir araba aküsünün PV şarj cihazı. Bu cihaz sayesinde araba park halinde bile olsa, akü şarj edilebilir.                                                                                        | 11    |
| 1.11. PV panellerin yollarda aydınlatma (a) ve sinyalizasyon (b) amaçlı uygulamaları.                                                                                                                 | 11    |
| 2.1. Gömülü kontaklı bir hücrenin yan kesitten alınmış bir Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) fotoğrafı.                                                                                              | 18    |
| 2.2. Tek kristal yapıya sahip "ingot"lar ve bunlardan dilimlenmiş "wafer"lar.                                                                                                                         | 34    |



**4.1.** Deneysel ölçümlerde kullanılan hazır bir fotovoltaiik hücre(tek-kristal silisyum, üzeri anti-refle film kaplı).

75

**4.2.** Deneylerde numunelerin üzerine konulduğu iletken ölçüm tablası. Alt tarafta alüminyum, üzerinde ise bakır plaketa bulunmaktadı. Üst kontaklardan akım toplayan parça ise fosfobronz metalindendir.

78

**4.3.** Güneş pillerinin karanlık bölgelerdeki ölçümleri için yapılan kapaklı siyah kutu. Kutu içerisinde yine metalden yapılmış ölçüm tablası bulunmaktadı.

80

**4.4.** Optik maskelerin geçirgen (a) ve negatif (b) kağıdındaki görüntüleri.

90

**4.5.** Örneklerin üzerine litografi yöntemleriyle maskeler kaplanmıştır. En son olarak ise kontak noktalarına gümüş pasta sürülerek hem iletkenlik arttırılmış, hem de darbelere karşı dayanıklılık kazandırılmıştır.

95

**4.6.** Yukarıda anlatılan işlemlerden geçtikten sonra vakum kaplamalarında kullanılmak üzere hazırlanmış metal maskeler.

96

**4.7.** Deneysel ölçümlerde kullanılan örnekler.

98

## GRAFİKLER DİZİNİ

### Grafik

### Sayfa

- 2.1.** Farklı güneş ışığı yoğunluklarında ( $C=1$  ve  $C=1000$ ), ardışık hücrelerin farklı sıcaklıklardaki verim grafiği [Gocsen and Loferski, 1979]. Buradaki değerler en iyi şartlar altında hesaplanmıştır, yani gerçekte çıkan bir çok etki (direnç, ışığın yansımaları...vb.) dahil edilmemiştir. 32
- 2.2.** Etkin olan seri birim direncin ( $R$ ),  $a/b$  cinsinden ifadesi. 37
- 2.3.** Seri direncin ideal ve ideal olmayan diyotlarda etkisi. 38
- 3.1.** "Air-Mass" ışımalarının atmosferden geçiş durumları. AM0; güneşin hiçbir şekilde soğurulup yansıtılmadığı, AM1; güneş deniz seviyesinde ve en tepede(grafikte gösterilmemiş), AM2 ise güneşin belli bir açıyla atmosfere girdiği durumları gösterir. 50
- 3.2.** Soğurma katsayısı sabiti ( $\alpha$ ) ile foton enerjilerinin belli fotovoltaiik yarıiletkenlerdeki değerleri. 54
- 3.3.** Si ve GaAs hücrelerde kalınlığın artmasıyla soğurulan fotonların oranı. 55
- 3.4.** Tipik bir güneş pilinin aydınlıkta ve karanlıkta I-V eğrisi. 57
- 3.5.** Bant aralığı enerjisine karşılık gelen dönüşüm veriminin farklı yarıiletken güneş pillerindeki değeri. Burada AM1.5 güneş tepedeyken yaptığı  $48^\circ$  lik açıdır.  $C$  (concentration) değeri ise güneşin ne kadar oranda yoğunlaştırıldığını gösterir.  $C=1000$  demek, güneş ışığının 1000 kere yoğunlaştırılmış halidir. 70
- 3.6.** Sıcaklığa bağlı olarak  $\eta_{max}$ 'a karşılık  $E_g$  grafiği. 73
- 4.1.** Tek-kristal silisyum güneş pili için aydınlık ve karanlık bölgelerde alınan verilerin grafikteki durumu (I-V eğrisi). Veri noktaları eşit aralıkta alınmıştır. 83

|                                                                                                                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.2. Daha yoğun data noktalarıyla <math>I_{sc}</math> ve <math>V_{oc}</math> değerlerinin grafikten bulunuşu. Grafik beklenildiği gibi tipik güneş pilinin aydınlık bölgesini göstermektedir.</b> | <b>85</b>  |
| <b>4.3. Veri noktalarına uydurulan dördüncü dereceden bir polinomla <math>I_m</math> ve <math>V_m</math> değerleri matematiksel yollarla tekrar bulunuyor.</b>                                       | <b>88</b>  |
| <b>4.4. Fotoğraf 4.7. de verilen örneklerin I-V eğrileri.</b>                                                                                                                                        | <b>100</b> |
| <b>4.5. Örnek 1'in I-V eğrisi (aydınlık)</b>                                                                                                                                                         | <b>101</b> |
| <b>4.6. Örnek 2'nin I-V eğrisi (aydınlık)</b>                                                                                                                                                        | <b>102</b> |
| <b>4.7. Örnek 3'ün I-V eğrisi (aydınlık)</b>                                                                                                                                                         | <b>103</b> |
| <b>4.8. Örnek 4'ün I-V eğrisi (aydınlık)</b>                                                                                                                                                         | <b>104</b> |
| <b>4.9. Örnek 5'in I-V eğrisi (aydınlık)</b>                                                                                                                                                         | <b>105</b> |



# 1. GİRİŞ

## 1.1. Fotovoltaik Etki:

Gaz, sıvı yada katı bir ortamın ışımayı soğurup bunun sonucu olarak da elektromotor kuvveti oluşturmalarına fotovoltaik (PV) etki denir. Fotovoltaik etkinin gerçekleşmesi için, soğuran ortamda iyonlaşma sonucu elektrostatik potansiyel fark oluşması gerekir.

## 1.2. Tarihçe

Fotovoltaik etki ile ilgili ilk çalışmayı E. Becquerel 1839'da yapmıştır. Becquerel'in gözlemlediği olay; asidik yada bazik çözeltilere batırılmış altın veya platin yapraklara ışık düşürüldüğünde oluşan elektromotor kuvvetidir. 1877 yılında ise, W. G. Adams ve R. E. Day, uçlarına platin kaplanmış bir selenyum çubukta bu etkiyi gözlemlediler ve rapor halinde sundular. Bu teknik ise sonraki 30 yıl içerisinde ışık sensörü olarak kullanılmaya başlandı.

Bundan sonraki önemli gelişmeler ise Lange (1930), Schottky (1930) ve Grondahl (1933) tarafından yapıldı. Bu kişiler fotovoltaik etkiyi bakır/bakıroksit aygıtlarda araştırdılar. Özellikle Schottky'nin bu konulardaki çabaları yarıiletken bilimine büyük katkılar sağlamıştır. Metal-yarıiletken potansiyel bariyeri (Schottky bariyeri) kavram olarak ilk bu zamanlarda ortaya çıktı. Schottky; Cu/CuO<sub>x</sub> ve metal-selenyum hücrelerde fotovoltaik olayı açıklamaya çalıştı. Bu aygıtların üretim kolaylıklarından dolayı ticari alanda da çok geniş bir alan bulmuşlardır.

Bununla birlikte fotovoltaik alanlardaki esas devrim, transistörün keşfiyle olmuştur [Brattain and Bardeen 1948, Shockley 1949]. Çünkü Shockley p-n eklemlerindeki elektrostatik potansiyel bariyerinin Schottky bariyerlerine göre

daha güvenilir sonuçları üzerine çalışmıştı. O zamanlarda yapılan çalışmalar, germanyum veya silisyum p-n eklemlerinden yapılmış olan doğrultucuların, metal-selenyum ve Cu/CuO<sub>x</sub> den yapılanlara göre çok daha iyi çalıştıklarını göstermiştir.

Bu gelişmelerle birlikte p-n eklemlerinden fotovoltaiik hücreler yapılmaya başlandı. İlk çıkan yayınlara baktığımızda tek kristal silisyum, germanyum ve cadmiyum sülfid hücrelerin verimleri %4-6 aralığında değişmektedir. Bu ise o ana kadar yapılan hücrelerden çok daha yüksek verim demektir. 1954 yılında ise Pearson tarafından ilk silisyum güneş pili yapıldı. Daha sonra da polisilisyum, CdTe ve GaAs piller üretildi.

### 1.3. Güneş Pillerinin Avantajları

Güneş pillerinin gelecekte yaygın bir şekilde kullanılmasını cazip kılan belli başlı avantajları şunlardır:

- 1- Sistemlerinde hareketli parçaların bulunmaması
- 2- Ömürlerinin çok uzun olması ( $\approx 20$  yıl)
- 3- Bakım masraflarının az olması
- 4- Çevre kirlenmelerine neden olmamaları
- 5- Birkaç watt'dan binlerce watt'a kadar geniş bir güç bölgesinde uygulanabilir olmaları
- 6- Ulaşımı zor bölgelerde, alçak güçlü sistemlerde, binaların üzerinde küçük birimler halinde kullanılması.

### 1.4. Enerji Kaynağı Olarak PV: Ekonomik Bakış

Tarihe baktığımızda; enerjinin üretimi, tüketimi ve dağıtımı altyapılarda olgunlaşma süreci olarak 50-100 sene geçirmiştir. Şu anda ise fosil yakıtlarına alternatif enerji kaynağı olarak gösterilen temiz (yenilenebilir)

enerji kaynakları (fotovoltaik, rüzgar türbinleri, yakıt hücreleri) istinasız kabul görmüş durumdadır. Dünya çapındaki fotovoltaik satışları 1998 yılında 150 MW olmuştur. 1973 dünya petrol krizinden sonra ise yıllık ortalama % 25'lik artışa ulaşmıştır.

Fakat günümüzde bu işe en büyük yatırımlardan birini yapan, Japonlardır. Şu anki tahminlerle Japonlar, 2010 yılına kadar 5 GW'lık sistemi uygulamaya geçirmek için hazırlık yapmaktadırlar.

Fotovoltaik sistemlerin ekonomik maliyeti ilk başta dizel ve klasik elektrik enerjisine göre çok daha fazladır. Fakat uygulanan sisteme göre, 3 seneden başlayan zamanlarla kendini belli bir süre sonra amorti eder. Mesela enerji nakil hatlarına çok uzakta bir yerleşim merkezi düşünelim. Bu bölgenin enerjisi için PV sistemleri dizayn etmiş olalım. Böyle tipik bir sistemin bileşenleri 2 kW'lık modüller, 20 tane 6 Voltluk, 300 A/saatlik akü grubu ve 4 kW'lık bir invertör'den oluşacaktır. Bu durumda maliyet 20000-25000 \$ olacaktır. Akü grubu her 4-5 senede bir değiştirilecektir. Ayrıca ufak tefek bakım masraflarıyla sistem ortalama aylık 130 \$ harcıyacaktır. Halbuki 4 kW'lık bir dizel jeneratör kullanıldığında ilk yatırım 3000 \$ olacaktır. Sürekli çalışmada ise günde 20-30 litre yakıt harcayacaktır. Her iki yılda bir motor bakımı ve parça değişimi, 10 yılda bir ise motorun komple değişimi gerekecektir. Dolayısıyla her ay ortalama 200 \$'lık masraf olacaktır. Sonuç olarak 10-20 senelik bir zaman zarfında, PV sistem dizel sisteme göre daha ucuza malolacaktır. Ayrıca bakım için çok daha az uğraştıracaktır ve çevreye olan zararı hemen hemen hiç olmayacaktır (Ses ve eksoz faktörleri). PV sistemlerin başka bir alternatifi de istenildiği anda modül eklenerek ömürleri uzatılabilir. Başka bir kullanım şekli de rüzgar veya dizel sistemlerle hibrid olarak kullanılabilirler. Ayrıca teknolojileri ilerledikçe verimleri artmakta ve ucuzlamaktadırlar [Benner and Kazmerski, 1999].

## 1.5. Güç Kullanımı

Fotovoltaik paneller tarafından üretilen elektriksel güç, düşük voltajlı ve doğru akımlıdır. Bu gücün ise bu şekilde kullanımı pek yoktur. Ayrıca her zaman güneş ışığı etkili olmayabilir. Dolayısıyla üretilen bu gücü bir şekilde kontrol etmek gerekir. Bu güç kontrol sistemi ise en kolay şekilde şöyledir; bu gücü depolamak için batarya grubu, ve bazı durumlarda bunu alternatif akıma çevirecek olan “inverter” denen elektronik bir sistem. Daha büyük sistemlerde ise tabii ki farklı güç kontrol ünitelerine ihtiyaç olacaktır.

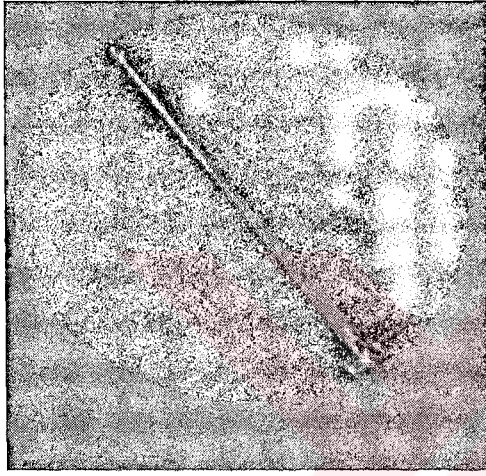
## 1.6. Modüller ve Diziler

Tek bir fotovoltaik hücrenin çıkışı düşüktür. Yani voltaj 0.6 V civarında ve verdiği akım  $10-30 \text{ mA/cm}^2$  civarındadır. Dolayısıyla istenilen çıkışı alabilmek için çok miktarda hücre seri ve paralel bağlanmalıdır. Bu hücrelerin bağlanmasıyla modüller, bunların da bağlanmasıyla diziler oluşur. Bütün hücrelerin ortak çalışması ve farklı karakteristiklere sahip olmasından dolayı, modüllerdeki verim tek hücrelerdeki verimden daha az olur.

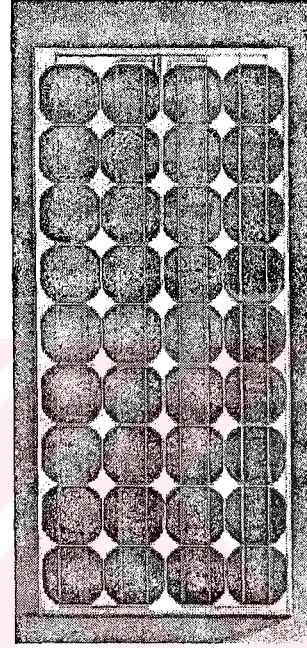
Bundan dolayı bir sistem oluşturulurken, hücrelerin uyumlu çalışmasına dikkat edilmelidir. Mesela modüldeki hücrelerden birinin üzerine yeterli ışık düşmezse, buna bağlı olan tüm sıra fonksiyonunu yitirir. Fakat buna paralel olan sıraların voltajı bu hücreye etkir. Bu da akımın gölgede kalan hücrenin üzerinden ters istikamette akmasına sebep olur. Böylelikle karanlıkta kalan hücre ısınarak zarar görebilir veya üzerinde bölgesel zararlar oluşabilir. Bu zararlar ise kalıcı olup genel performansı etkiler. Zararları önlemek için genelde modüllerin belli bölgelerine akımın ters yönde akmasını önleyecek şekilde diyotlar konulmaktadır.

## 1.7. PV Sistemler

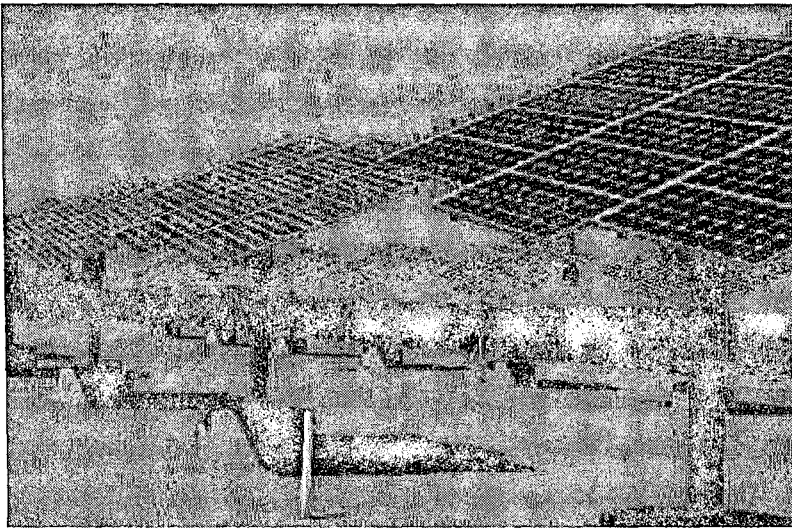
PV sistemler, öncelikle fotovoltaik hücrelerden ve sonra bunların birbirlerine seri ve paralel olarak bağlanıp modülleri oluşturmasıyla meydana gelir. Daha büyük sistemlerde de modüller kendi aralarında seri ve paralel bağlanırlar, böylelikle de diziler meydana gelir.



(a) Fotovoltaik Hücre



(b) PV Modül



(c) Fotovoltaik Diziler

**Fotoğraf 1.1.** Fotovoltaik sistemlerin temel elemanları: (a) Hücre, (b) Modül, (c) Diziler



## 1.8. PV Hücrelerin Yalıtımı

Laboratuvar şartlarında hazırlanmış bir hücre ile gerçek bir modül arasındaki fark hava şartlarından korunması için hücelere kaplanan yalıtım tabakasıdır. Yalıtımın birinci amacı maksimum güneş ışığı altında senelerce koruma işlevini görmesidir.

Yalıtımın başka bir görevi de bazen film tabakası gibi davranarak güneş ışığının fotovoltaiik olay dışında kalan spektrumunu filtrelemesi ve gereksiz ısınmayı önlemesidir. Günümüzde bazı büyük fotovoltaiik sıralarında güneş ışığını izleme sistemleri bulunmaktadır. Bu ise güneş ışığının direk olarak gelmesiyle ısınmayı artırır. Fotovoltaiik panellerin verimi sıcaklığın artmasıyla düşmektedir. Genelde ticari modüllerin değeri oda sıcaklığında verilir. Ama gerçek çalışma sıcaklıkları her zaman bu sıcaklığın üzerinde olur. Daha fazla ısınmanın engellenmesi için bazı modüllerin arkalarına soğutma sistemleri konur. Özellikle yoğunlaştırılmış ışık altında çalışan modüllerde soğutma şarttır. Diğerlerinde ise iyi bir ısı kontağı ile bu sorun giderilebilir.

## 1.9. Günümüzde PV Sistem Uygulamaları

Günümüzdeki gelişmelerle % 35'e kadar çıkan verimlerde çalışan fotovoltaiik hücreler yapılmıştır. Ayrıca silisyumun yanısıra birçok yarıiletken de hücre olarak denenmektedir.

Silisyum, yani güneş pillerinde kullanılan ve elektronik pazarının hala % 97 sinde kullanılan yarıiletken, esasında bildiğimiz kumdur ve dünyada en çok bulunan ikinci elementtir. Ayrıca tümüyle zararsızdır.

Fotovoltaiik teknolojisi küçük, ve kırsal merkezlerde ekonomik olarak kullanılan bir elektrik enerjisi kaynağıdır. Ayrıca şehir merkezlerinde de bir çok büyük yapıda kullanılır. Mesela; Atlanta (Amerika)'da olimpik yüzme

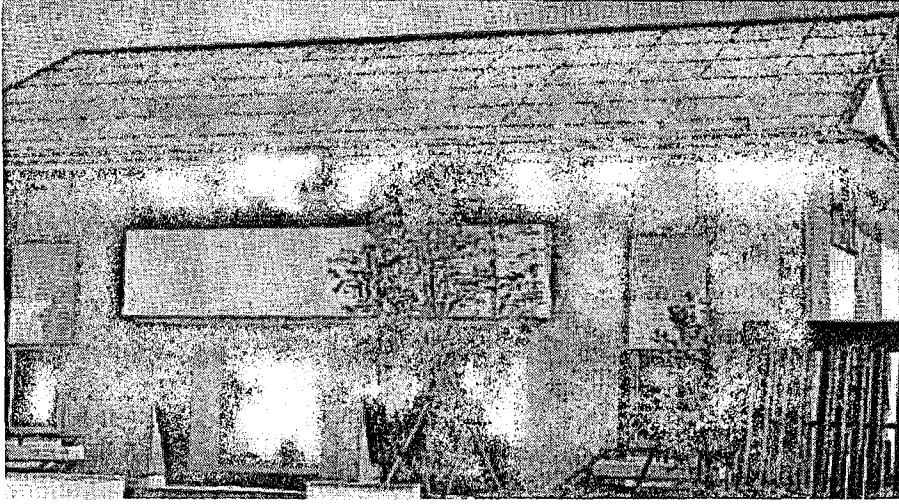
havuzlarına devasal PV çatılar (340 kW kapasiteli), New York'da gökdelenlerden biri olan Times Square (15 kW kapasiteli) dış yüzeyinde, Münih'deki gösteri ve fuar merkezinde (1 MW kapasiteli) birçok büyük uygulaması vardır. Burada önemli olan nokta PV dizilerin binaların yapılarına entegre edilmeleri ve şebekeye de bağlanarak gerekli olduğu durumlarda şebekeden enerji kullanmalarıdır. Enerji fazlalığı durumunda ise şebekeye de besleme sağlanabilir. Bu dizaynlarla günümüzde hibrid enerji sistemleri yapılmaktadır.

### 1.9.1. Bina ve Ev Uygulamaları

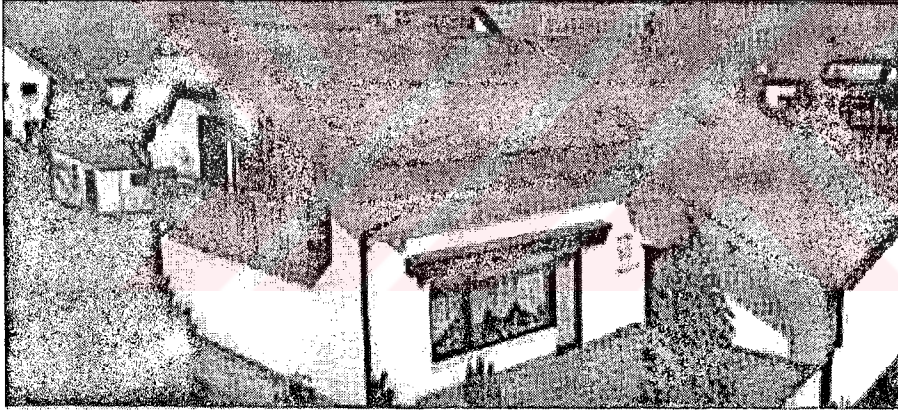
Günümüzde birçok çatı uygulamaların yanı sıra bazı binaların ön cephelerinde de PV uygulamaları vardır. Böylelikle güneşin genelde yatay geldiği yerlerde ışıktan daha iyi yararlanılmış olur. Gelen ışınlar PV modüllere daha dik gelir ve verim artar.



**Fotoğraf 1.2.** Kawneer Şirketi ve Solarex ortaklığı bir PV enerji üretim sisteminin bir bina uygulaması. Ön yüzey tümüyle PV panellerle kaplanmıştır.



**Fotoğraf 1.3.** Japonya da bir evin çatısındaki uygulama. Son senelerde Japonya'da hükümet de bu tür yapıları oldukça fazla desteklemektedir.



**Fotoğraf 1.4.** Frankfurt'daki bir evin çatısındaki uygulama. Paneller, çatı ile arada boşluk kalacak şekilde konulmuşlardır böylelikle arada hava akımı sağlanmış olur. Bu ise ısınmayı azaltıp verimi artırır.

### 1.9.2. Taşıt Uygulamaları

Günümüzde PV hücrelerin ürettiği elektrik gücüyle çalışan araçların yarışmaları bile yapılmaktadır. Bazı araçların dizaynına göre saatte 120-130 kilometre hıza çıkabildikleri bilinmektedir. Özellikle Amerika'nın güney

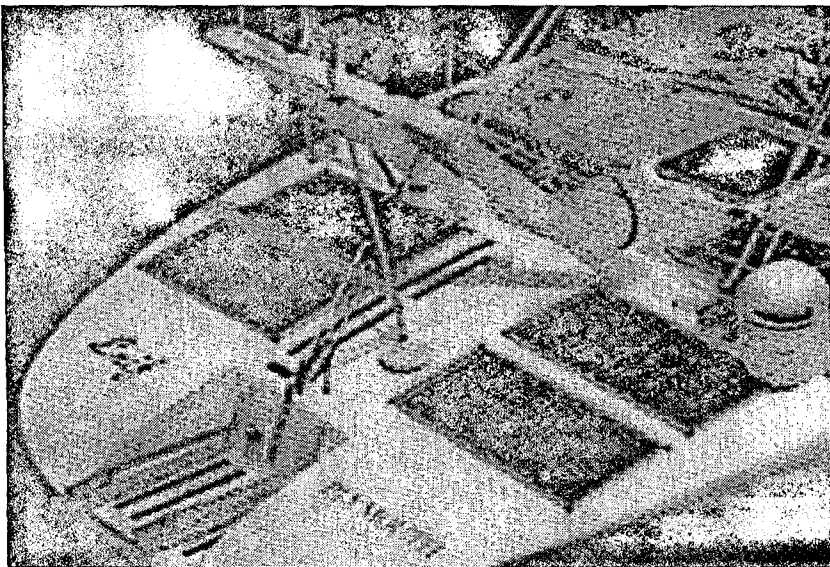
eyaletlerinde ve Avustralya'da bu işle uğraşan binlerce amatör ve üniversite öğrencileri bulunmaktadır.



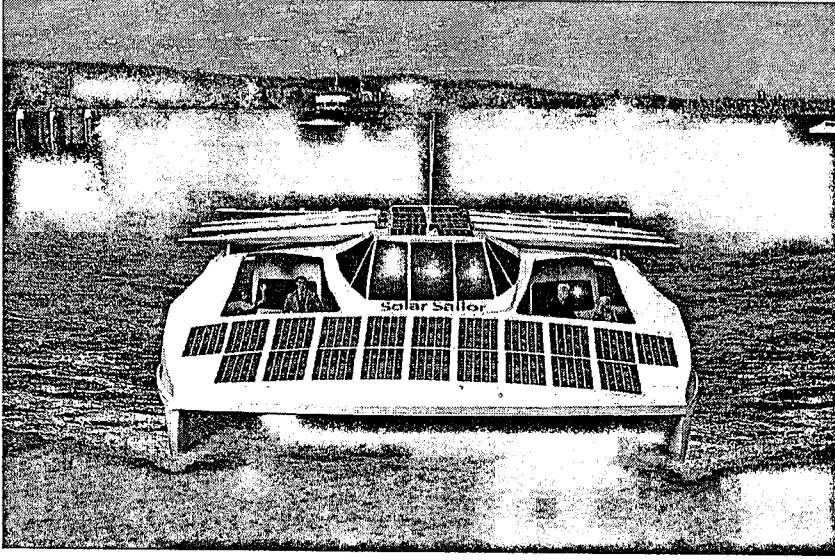
**Fotoğraf 1.5.** Arizona'da denemeleri yapılan bir güneş enerjisi taşıtları.



**Fotoğraf 1.6.** Avustralya'da ve Japonya'da yapılan sürat yarışmalarına katılan PV enerjili taşıtlar.

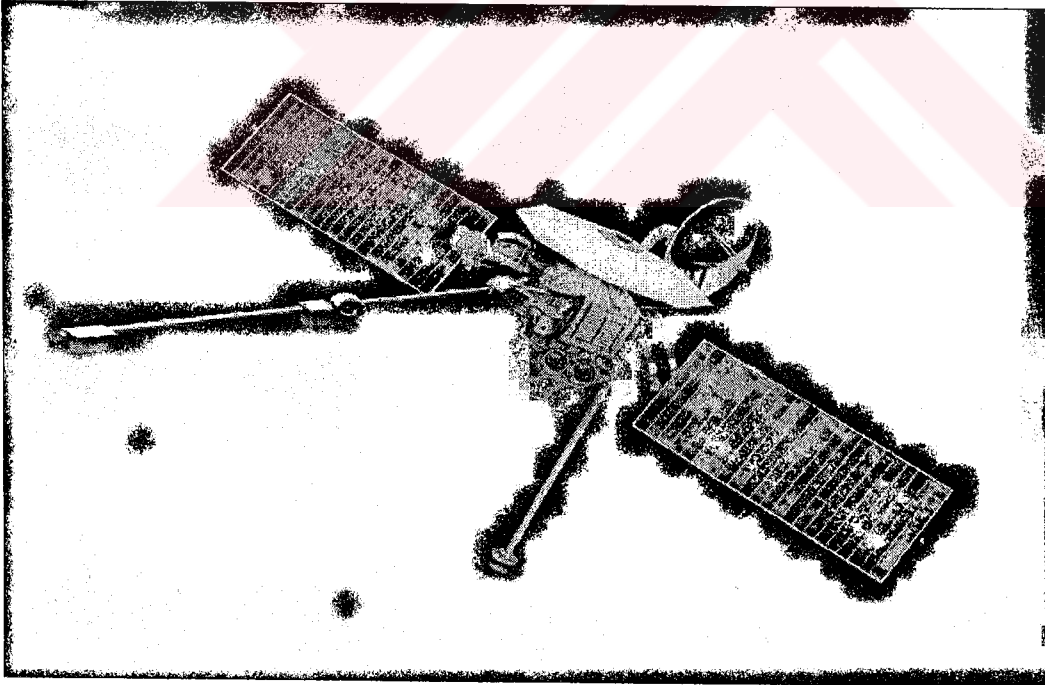


**Fotoğraf 1.7.** PV hücrelerle enerji desteği sağlanmış bir yat.



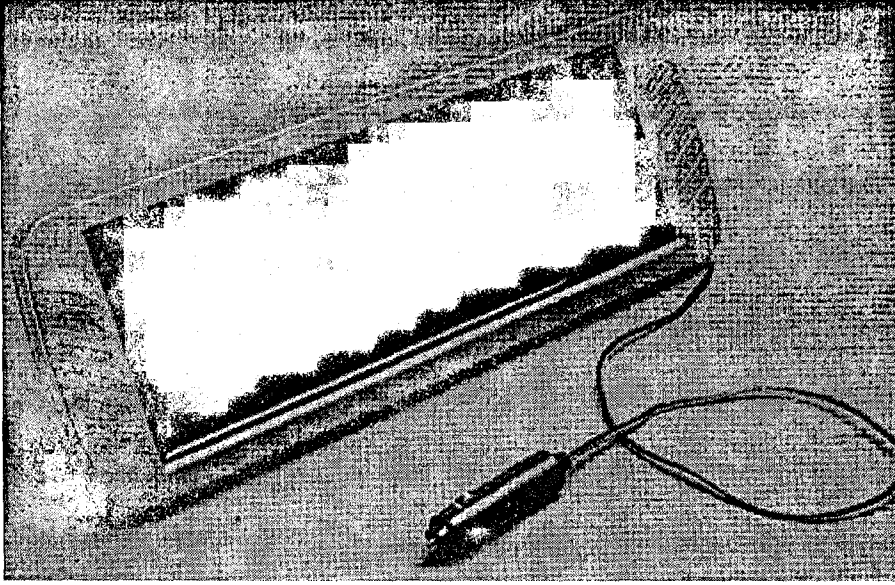
**Fotoğraf 1.8.** Enerjisini güneş panellerinden alan bir deniz taşıtı.

### 1.9.3. Uzay Uygulamaları

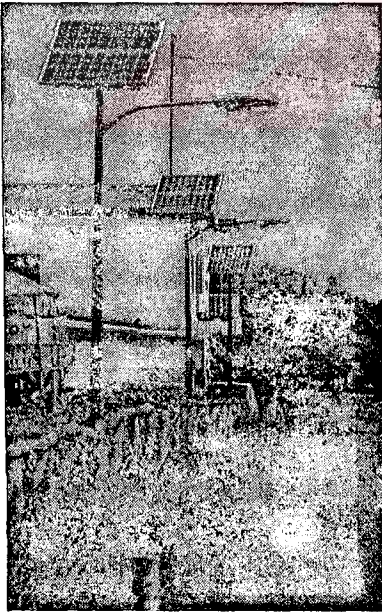


**Fotoğraf 1.9.** Bir uydunun güneş panelleri. Bu paneller sayesinde uydu kendisine gereken bir kaç kW'lık elektrik enerjisini temin eder.

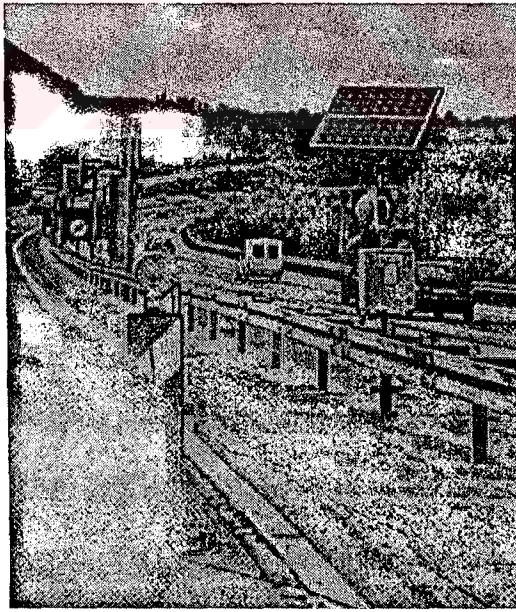
#### 1.9.4. Diğer Uygulamalar



**Fotoğraf 1.10.** Bir araba aküsünün PV şarj cihazı. Bu cihaz sayesinde araba park halinde bile olsa, akü şarj edilebilir.



**(a)** Aydınlatma Uygulaması



**(b)** Sinyalizasyon Uygulaması

**Fotoğraf 1.11.** PV panellerin yollarda aydınlatma (a) ve sinyalizasyon (b) amaçlı uygulamaları.

## 1.10. Ülkemizde PV uygulamalar

Güneş pilleri teknolojisinin dünyadaki gelişmesini izlemek ve ülkemiz genelinde bu konuda bilgi birikimini sağlamak amacıyla Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Direktörlüğü, ANAEM katıhal grubu laboratuvarı 1983 yılında ortak bir proje başlatmıştır. Fakat güneş enerjisi açısından son derece zengin olan ülkemizde PV uygulamalar çok azdır. Son zamanlarda enerjiye olan ihtiyaçla, PV uygulamalar bazı özel teşebbüslerle hayata geçirilmeye çalışılmaktadır. Diğer enerji kaynaklarından; özellikle rüzgar enerjisi konusunda birçok proje hayata geçirilmiş ve geçirilmeye devam edilmektedir. PV konusunda ise şu anlık sadece uygulama ve mühendislik bazında çalışmalar vardır. Temennimiz gelecekte, üretim aşamasına da geçilmesidir.

## 2. PV GÜNEŞ PİLLERİ

### 2.1. PV Hücre Çeşitleri

#### 2.1.1. GaAs

Grup III ve V elementlerinden bazılarının bileşikleri yarıiletkenlerdir. Bunların da bazıları fotovoltaiik özellik gösterirler ve daha verimlidirler. Özellikle GaAs pillerde direk ışııklandırma ile % 25 verime ulaşılmiştir [Benner and Kazmerski, 1999].

İlk GaAs güneş pilleri 1956 yıllarında [Jenny et al.] kadmiyumun n-tipi tek kristal "wafer"a difüzyonuyla yapılmıştır. Bunların yüzey alanları 0.1 – 6 mm<sup>2</sup> civarındaydı çünkü o zamanlar sadece bu büyüklükte tek kristaller bulunabiliyordu. Elde edilen verimler ise en yüksek % 6.5 idi. 1960'lı yıllarda çekilmiş kristallerin boyutları ve işlem kalitesi arttı. Böylelikle 2 cm<sup>2</sup> yüzey alanlı ve % 10 verimle çalışabilen hücreler hazırlandı.

1970'lerden sonra; GaAs'in geniş band aralığı, ona yeni uygulamalar buldu. Bu ise üzerindeki çalışmaları artırdı ve verim % 15'e kadar ulaştı. 1993 yılında ise verim % 23'ü aştı [Benner, 1999].

#### 2.1.2. Kadmiyum Sülfid (CdS)

1954 yıllarında, ince bir bakır tabakasının CdS tek kristaline depozisyonuyla CdS fotovoltaiik hücreleri yapıılıyordu. Bunların gerçek verimleri % 1.5 civarında oluyordu. 1956 yılında ise bu hücrelerin verimleri % 5 civarında gerçekleşmekteydi. İlk başlarda hücrenin sadece p-n eklemine

oluşturduğu zannediliyordu Ama 1960'ların ortalarında, hücre n-tipi bir CdS ve p-tipi bakır sülfid'den oluşturduğu anlaşıldı. Yani bu heteroyapıda bakır sülfid fotovoltaiik olarak aktif bir malzeme, CdS ise geniş band yapılı bir pencereydi.

Genelde CdS hücrelerin başka bileşiklerle oluşturduğu kristal yapılar fotovoltaiik etki gösterirler ama verimleri kararlı olmaz. Dolayısıyla günümüzde pek kullanılmazlar.

### 2.1.3. Kadmiyum Tellurid (CdTe)

Kadmiyum telluridin band aralığı 1.45 eV'dur [Sze, 1981]. Bu durum ileride grafik 3.6.'da görülecek olan,  $\eta_{\max}$  ve  $E_g$  grafiğinde maksimum verime karşılık gelen tepeye yakın bir değerdir, yani optimumu sağlayabilir. CdTe, p yada n tipi katkılanabilir. Böylelikle p-n eklemli hücreler yapmak mümkün olur. Bunların ilk yapılanları % 2 verimle çalışıyordu. 1963'lerde sonradan yapılanlar ise % 6 verimle çalışıyordu ve p-tipi  $Cu_xTe$  ile n-tipi CdTe yapısındaydılar.

Sonraki çalışmalar gösterdi ki, en başarılı CdTe hücreler geniş band aralıklara sahip olan CdS, ZnO ve ZnS gibi alaşım malzemeleriyle oluşturulmuştur.

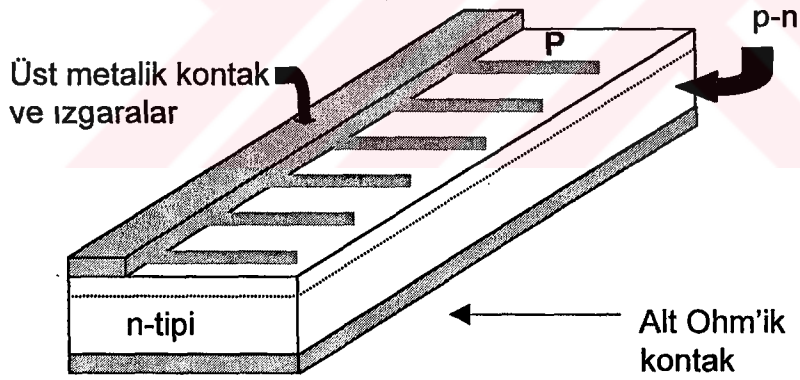
| Metod             | Verim (%) |
|-------------------|-----------|
| Süblimleştirme    | 15.8      |
| Kimyasal sprej    | 12.7      |
| Elektrodepozisyon | 12        |
| Yüzey baskısı     | 11.3      |
| Evaporasyon       | 11        |

**Çizelge 2.1.** CdTe pillerin kaplanma metodlarıyla bunların sağladıkları verimler [Hickok, 1975].

Çizelge 2.1.'de CdTe pillerin kaplanma metodları ve bu metodlarla yapılan kaplamaların verimleri görölüyor. Bu metodlardan bazılarının düşük maliyetli ve kolay olmaları, bu hücrelerin kullanımını artırmıştır. Böylelikle geniş yüzeyli güç üretim alanları kurulmuştur. Fakat günümüzde, üretim esnasında çevreye verdiği zararlardan dolayı bu hücrelerin üretimleri azalmıştır.

#### 2.1.4. Tek-Kristal Silisyum

İlk silisyum fotovoltaiik hücreler [Chapin et al.] 1954 yıllarında yapılmaya başlandı. Bunlarda difüzyonla boron katkılanmış p tipi ince bir katman, fosfor katkılanmış n tipi alttabaka (substrate) üzerindeydi. P-n eklemi ise yüzeyin 1  $\mu\text{m}$  altındaydı (şekil 2.1.).



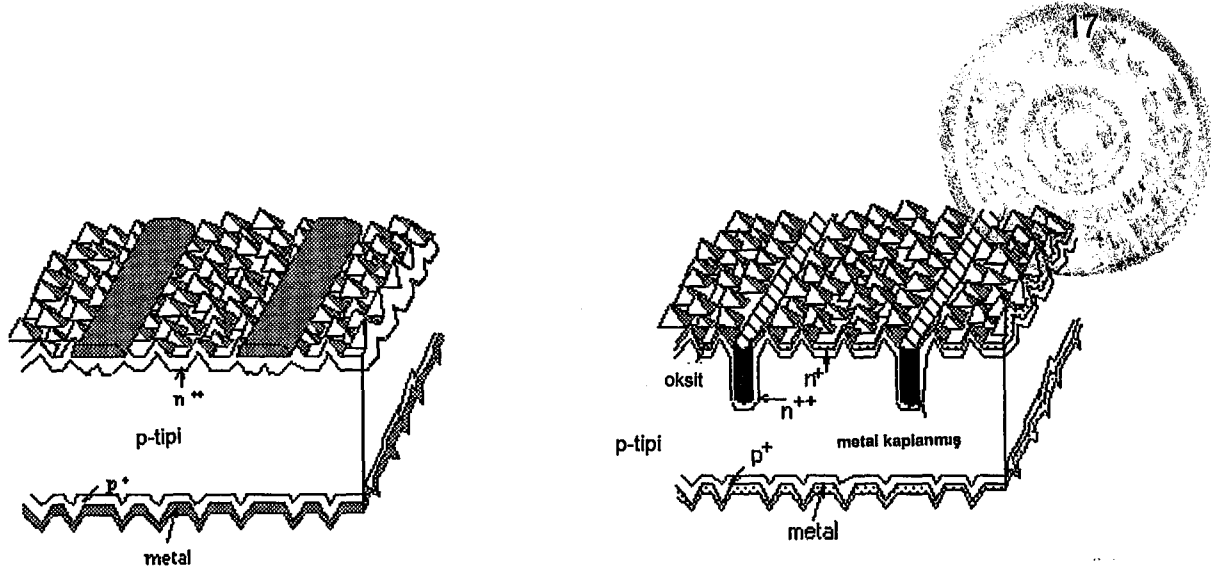
**Şekil 2.1.** İlk yapılan p-n eklemine sahip tek kristal silisyum PV pil hücresi örneği.

Üst tarafta bulunan ızgara şeklinde Ohm'ik metalik kontak ise ışığı geçirerek fotovoltaiik etkiyi oluştuyordu. Bu zamanlarda yapılan hücrelerde etkin alan genelde 3  $\text{cm}^2$  civarındayken, günümüzde 15-20  $\text{cm}^2$  civarındadır. Ayrıca günümüzdeki tek kristal hücrelerden % 23 verim alınabilmektedir. Tabii ki günümüzdeki fabrikasyon teknikleri o zamaninkilerden çok daha farklıdır ve en üst düzeyde verim elde etmeye yöneliklerdir.

Ayrıca günümüzde ışık yoğunlaştırıcılar (concentrator) kullanılır ve böylelikle güneş ışığı 200 kat yoğunlaştırılarak verim % 28'e kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla bugünkü fotovoltaik hücre satışlarının % 40'ı tek kristal hücrelerden oluşur.

Silisyum güneş pili yaparken öncelikle "float-zone" yada "Czochralski" teknikleriyle hazırlanmış, yüksek saflıkta "wafer"lar kullanılır. Arka yüzey alüminyum alaşımıyla  $p^+$  yapılır böylelikle iyi "Ohm"ik kontak elde edilir. Ön yüzey ise genelde alkali kullanımıyla pürüzlendirilir. Pürüzlendirme sonucu piramit şeklinde yapılar oluşur ve bunlar direk yansımayı önleyerek üzerine düşen ışığın daha verimli kullanımını sağlarlar. Ön yüzeyden yansımayı azaltmak için  $SiO_2$  veya başka bir anti-refle film de ( $Si_3N_4$ ,  $MgF_2$ ) kaplanabilir.

Günümüzde tek-kristal hücre üretiminde en çok karşılaşılan gömülü kontaktlardır. "Buried Contact Solar Cell" olan bu çeşit, klasik güneş pillerinden oldukça farklıdır ve verim çok artmıştır. Çünkü klasik silisyum güneş pillerinde; ön kontak gümüşlü bir pastanın direk yüzeye baskısıyla (screen printing) yapılır. Bu teknik kalem, plastik eşya gibi birçok malzemeye yazı veya şekil çıkartmada kullanılan bir tekniktir. Bu methodla yapılan piller de güvenilirlerdir ama verimleri sadece % 12-15 civarındadır. Halbuki gömülü kontaktlarda bu verim % 20'lerden fazla olabilmektedir.



**Şekil 2.2.** Klasik (solda) ve modern (sağda) yani gömülü kontak teknikleriyle hazırlanmış güneş pillerinin karşılaştırılması.

Sağdaki hücrede yarıklar oluşturulurken bir lazer yada mekanik delici kullanılır. Sonra buralara bakır kaplanır (bazen gümüş veya nikel de kullanılabilir). Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri de normal kontaklarda olduğu gibi gölge yapmaması ve kontak direncinin azalmasıdır. Sonuçta ise % 20'lerden fazla verim sağlayan hücreler çıkar[41].

Bu tip hücrelere bu kadar değinilmesinin amacı; günümüz teknolojiyle yapılabilecekleri göstermek ve en yaygın hücre türü olan bu türler hakkında biraz daha bilgi verebilmektir. Dolayısıyla bazı teknikler daha yüksek malzeme verimi olan maddelere de uygulanabilir.

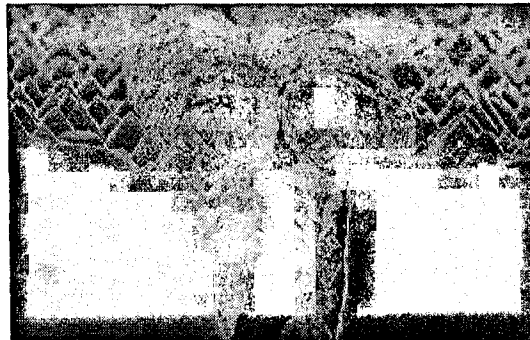
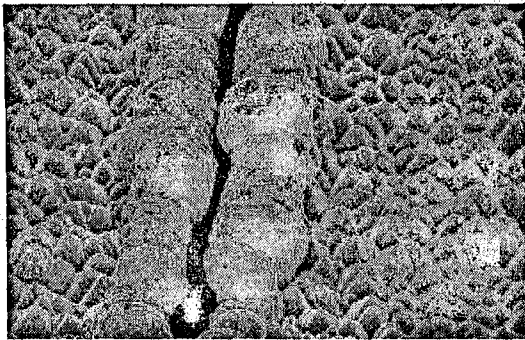
Aşağıdaki tabloda gömülü ve normal kontağa sahip hücrelerin işlem sıraları gözüküyor:

| Normal Hücre                          | Gömülü Kontak Hücresi              |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Alkali ile yapılandırma (Texture)     | Alkali ile yapılandırma (Texture)  |
| Üst yüzey difüzyonu                   | Üst yüzey difüzyonu                |
| Üst yüzeyin ızgaralandırılması (grid) | Oksitlendirme (Oxide growth)       |
| Fırınlama (bake and fire)             | Lazerle yarıklandırma ve aşındırma |
| Arka yüzey kaplanması                 | Yarıklara difüzyon                 |
| Fırınlama                             | Alüminyum difüzyonu ve yapıştırma  |
| Anti-refle kaplama                    | Metal kaplama                      |
| Keskinleştirme (Cleaving)             | Keskinleştirme (Cleaving)          |

**Çizelge 2.2.** Normal ve gömülü kontağa sahip tek kristal hücrelerde işlem sıraları.

Gömülü kontakların klasik kontaklara göre fiziksel olarak birçok avantajı vardır:

1-) Üstteki metal çizgiler insan saçının kalınlığından 10 kez daha ince olabilir çünkü metalin çoğu hücrede yüzeyden alt seviyeye kaplanmış olur. Bu da gölgelenmeyle kaybolan ışık şiddetini azaltır. Aşağıdaki SEM fotoğraflarında bu yarıklar daha iyi gözükmemektedir.



**Fotoğraf 2.1.** Gömülü kontaklı bir hücrenin yan kesitten alınmış bir Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) fotoğrafı.

2-) Metal çizgiler daha dar olduğu için yüzeyde birbirlerine daha yakın konumlanabilir. Bu ise kontak direncini düşürür ve verimi artırır.

3-) Yüzey baskısı yöntemiyle hazırlanan pillerde metal ve silisyum arasında iyi bir elektriksel kontak yapmak için üst düzey fazla miktarda katkılanmalıdır (heavily doped). Buraları şekilde  $n^{++}$  olarak görülür ve ölü bölgelerdir, çünkü mavi ışığı soğururlar. Ama gömülü kontak olduğu zaman bu soğurma olayı minimuma indirgenir. Sebebi ise bu durumda, sadece gömülü olan kontaklarda ölü bölgeler oluşmaktadır.

4-) Ön kontak metali için bazen gümüş yerine bakır kullanılabilir, böylelikle malzeme giderinden tasarruf edilmiş olunur.

Bu yeni teknik günümüzde birçok güneş pili üreticisi tarafından kullanılmaktadır. Bunların belli başlıları:

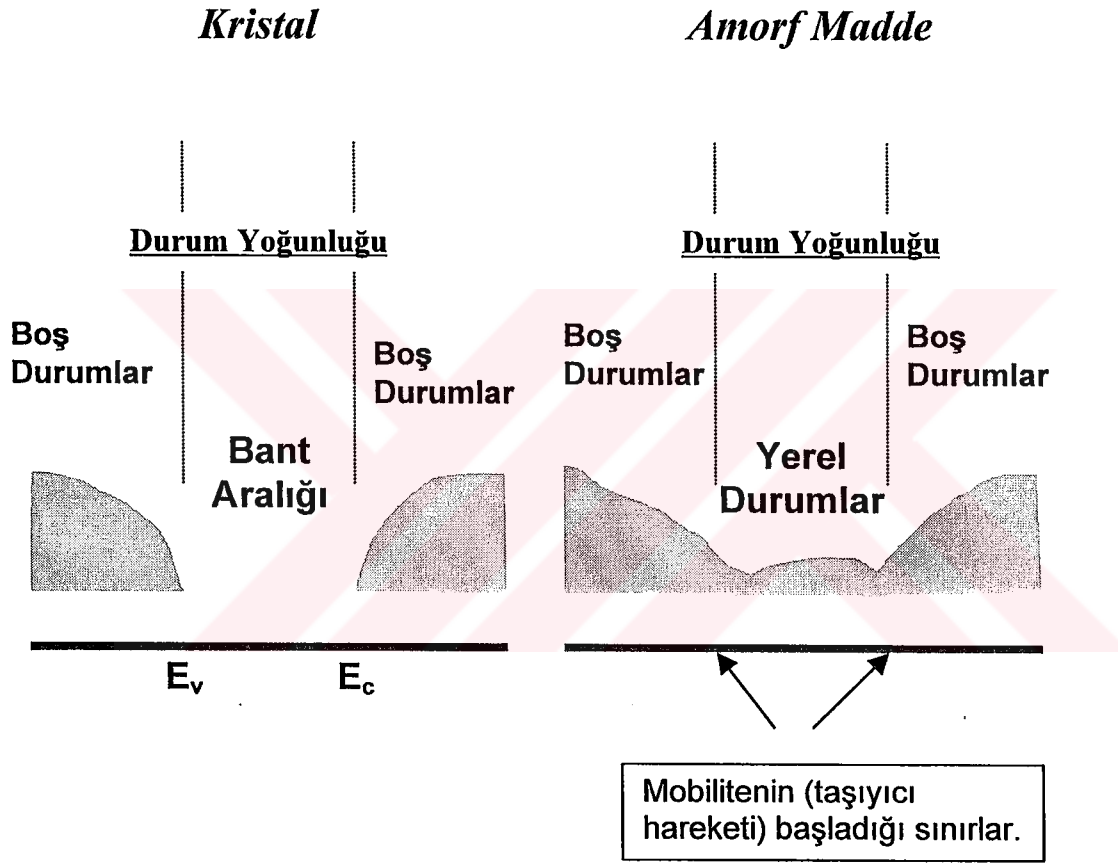
- İspanya'da BP solar
- Amerika'da Solarex
- Kore'de Samsung
- Almanya'da ASE

Bu tekniklerle ilgili daha ileri çalışmalar şu an yapılmaktadır. Amaç bu sefer de eski teknikle üretim yapan yerleri az bir modifikasyonla gömülü kontak üretebilecek duruma getirebilmektir [M. A. Green].

### 2.1.5. Amorf Silisyum Hücreler

Amorf silisyum güneş pilleri ilk olarak 1975 yıllarında RCA laboratuvarlarında keşfedildi ve 1976'larda verimleri % 5.5'e ulaştı [Carlson ve Wronski, 1976].

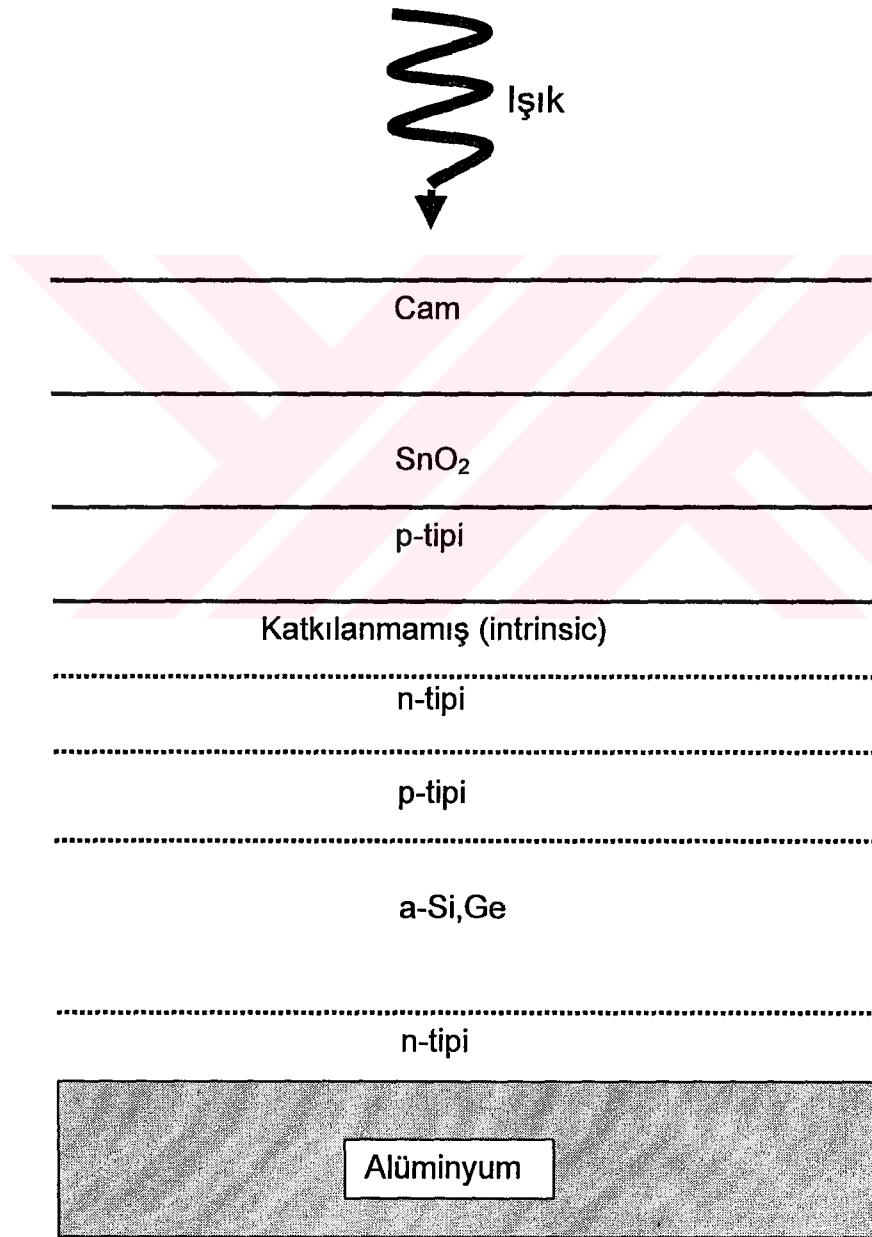
Amorf silisyum tabakaları silane gazının ( $\text{SiH}_4$ ), rf (radio frequency) plazmasındaki deşarjıyla oluşturulur. Böylelikle Si ve  $\text{H}_2$  arasında bir nevi alaşımlar oluşturulur. Bununla birlikte en iyi hücreler hidrojenleştirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) dan oluşturulur. Çünkü hidrojen bazı titreşim bağlarını pasif hale getirir, böylece yasak enerji aralığının yoğunluğu azalır. Bu durum şekil 2.3'de daha açık olarak görülebilir.



**Şekil 2.3.** Bir kristal yapısıyla amorf maddenin durum yoğunlukları açısından karşılaştırılması.  $E_v$  : Değerlik (Valance) bandının enerjisi ve  $E_c$  : İletim (conduction) bandının enerjisini verir.

Böylelikle malzeme III veya V grubu elementlerle katkılanabilir. Eğer p tipi tabakalar oluşturulmak istenirse biraz boran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ )  $\text{SiH}_4$ 'e eklenebilir. N tipi tabakalar oluşturmak içinse  $\text{SiH}_4$ 'e biraz fosgen ( $\text{PH}_3$ ) gazı eklenir. Dolayısıyla a-Si:H yapısında p-n eklemleri yapmak mümkündür. En iyi fotovoltaiik hücreler ise p-i-n yapısında olurlar (p tipi- katkısız- n tipi).

Bant aralığı ise karbon katkısıyla artar ve germanyum katkısıyla azalır. Mesela germanyum katkılanmış olanların (a-Si:Ge:H) bant aralığı 1.3 eV ve karbon katkılananların (a-Si:C:H) ise 2.0 eV olabilir. Dolayısıyla farklı bant aralığına sahip ve üst üste sıralanmış (tandem) a-Si:H güneş pilleri yapılabilir. Bu tip çok eklemli güneş pilleriyle yakın zamanda % 12 lere varan verimler elde edilmiştir[Green ve Emery, 1993]. Aşağıda bu yapıda olan (tandem) bir pil hücresinin kesiti görülüyor.



**Şekil 2.4.** Çok eklemli bir a-Si hücrenin yandan kesiti. Şekilde gözüken a-Si,Ge tabaka dar bantlı bir Si-Ge alaşımıdır ve ayrı bir fotovoltatik hücre oluşturur.

H<sub>2</sub> nin varlığıyla a-Si:H in optik bant aralığı 1.5 ve 1.8 eV arasında değişir. Yaklaşık 1 µm kalınlığındaki bir tabaka bu bant aralığındaki fotonların hemen hepsini soğurur. Çünkü optik soğurma katsayısı son derece büyüktür (Bkz. bölüm 3.1.). Bu ise tek kristal silisyuma göre en büyük avantajlarından biridir.

Buna karşılık amorf hücrelerin bir dezavantajı ise; aydınlatıldıkları zaman belli bir süre içerisinde bozulma göstermeleridir. En iyi durumlarda bile bozulmaya uğrayan hücrelerin verimi % 10'un altına düşer.

Benzer türde olan üç eklemlili piller ise genelde % 13.7 verimde olurlar. Zamanla aydınlatma altında çalışanların verimleri % 10 un altına düşebilir.

Amorf pillerin en büyük avantajlarından biri ise üretim tekniğindeki basitlik ve ucuz olmalarıdır. Ayrıca bir avantajları da, film olarak kaplanabildiği için esnek panellere uygulanabilirler. Günümüzde en çok uygulama alanları hesap makinelerindeki hücrelerdir. Fakat geniş yüzeyli güç panelleri de yapılmaktadır.

### 2.1.6. Poli-kristal Silisyum

Poli-kristal silisyumun üretimi tek-kristal silisyum üretimine göre daha ucuzdur. Verimi tek-kristal silisyuma göre daha düşük olmasına rağmen son zamanlarda çok fazlaca kullanılan pil çeşitlerindendir. Fotovoltaik amaçlı kullanımlar için bu pilin bir çok farklı metodla üretimi vardır. Bu yöntemlerden biri de; 100 kg veya daha fazla miktarlarda "ingot" lar hazırlanır. Bu hazırlama işleminde kullanılan eriyikler yüksek saflık oranlarında grafit, silikat yada silisyum nitrid'dir. Bunlardan hazırlanan "ingot" daha sonra silisyum "wafer" larına dilimlenir. Geri kalan işlemler tek-kristal "wafer" hazırlığındaki gibidir.

Polikristal silisyum üretiminin başka yolları da vardır. Mesela ince silisyum filmleri; seramik, kaplanmış çelik veya endüstriyel silisyum üzerine

de büyütülebilir. Bunları içeren metodlar ise; bir solusyondan yapılan depozisyon, vakum ortamında buhar depozisyonu ve diğerleridir. Bunların hepsi de yüksek sıcaklıklarda yapılan eriyik işlemlerine göre daha ucuzdur. Ayrıca bu metodlarla üretilen polikristal tabakaların kalınlıkları genelde 10-100  $\mu\text{m}$  arasında değişir.

Normal bir silisyum tabakasının fotovoltaiik olayı tam olarak gerçekleştirmesi için üzerine düşen fotonların en az % 90'ını soğurması gerekir. Bu soğurma olayı ise en az 200  $\mu\text{m}$  kalınlıkta gerçekleşebilir. Fakat yukarıda poli kristal silisyum kalınlıklarının bu kadar kalın üretilemediğini görüyoruz. Bundan dolayı bazı dizayn değişiklikleri uygulanır. En büyük amaç, fotovoltaiik hücre içine giren fotonların soğurulma olasılığını arttırmaktır. Yani mümkün olduğunca geri yansıyıp kaçmalarını önlemektir. Bunun ise bazı yolları vardır:

-Ön yüzey elektrokimyasal metodlarla aşındırılır. Böylelikle fotonların ön yüzeyden hemen yansımaları önlenmiş olur.

-Arka yüzeye yansıtıcı bir tabaka kaplanır. Ayna gibi davranan arka kısım böylelikle soğurulmadan arka kısma kadar ulaşan fotonları geri yansıtarak soğurulma katsayılarını artırır.

Bu iki yöntemin de uygulanmasıyla 4  $\text{cm}^2$  lik yüzeylerde ve % 17 verimle çalışabilen numuneler yapılmıştır.

Son zamanlarda poli kristal fotovoltaiik hücre yapımı ile ilgili yeni bir metoddan bahsedilmektedir [Levine, 1991]. Bu metodla; sprete tekniğıyle 0.75 mm çapında silisyum kürecikler oluşturulur. Aynı zamanda işlem sırasında katkılanma yapılarak p-n eklemleri yapılır. Bu kürecikler, cam bir matrisin içine konur ve metal evaporasyonu ile kontaklar alınır. Bu tip hücrelerden ise % 11.5 verim alındığı rapor edilmiştir.

### 2.1.7. Kalkopiritler

Güneş pili uygulamalarında başka bir yarıiletken grubu ise kalkopirit denilen ve genel formülleri  $\text{CuMX}_2$  olarak verilen bir gruptur.

$$M = \text{In, Ga} \quad \text{ve} \quad X = \text{S, Se} .$$

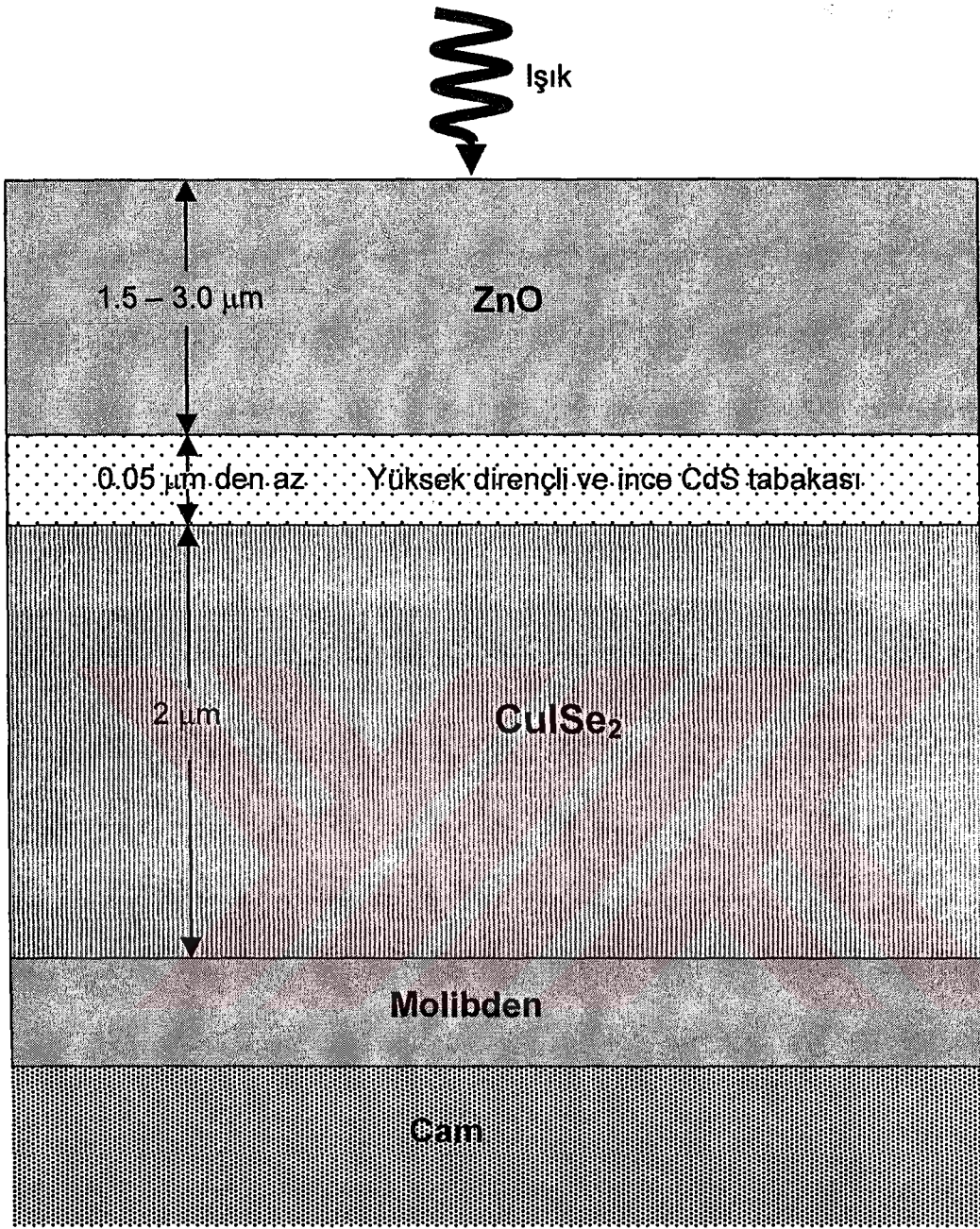
Bu grubun en etkin bileşeni ise  $\text{CuISe}_2$  dır. Bu yarıiletkenin band aralığı 1.0 eV'dur ve yüksek soğurma katsayısından dolayı çok ince filmler ( $0.5 \mu\text{m}$  den küçük) halinde bile kullanılabilir.

Kalkopiritlerin yapılışı ise; buhar depozisyonu veya metallerin "sputtering" yöntemi ve takiben selenyum-laden gazında tavllanmasıyla olur. İkinci yol ise günümüzde daha çok tercih edilir. Hetero eklem ise;  $0.005 \mu\text{m}$  lik yalıtkan CdS tabakasının depozisyonu, ve geçirgen olan ZnO katmanının (birkaç mikron kalınlığında) "sputter" edilmesiyle olur.

Bu hücrelerin en büyük özelliklerinden birisi de bu kadar incelikte çok yüksek verime sahip olmalarıdır. Bununla ilgili bazı sonuçlar aşağıdadır:

| Hücre alanı                            | Verim (%) |
|----------------------------------------|-----------|
| $1 \text{ cm}^2$                       | 17.7      |
| $3.5 \text{ cm}^2$                     | 14.6      |
| $0.37 \text{ (m}^2 \text{ lik modül)}$ | 9.7       |

**Çizelge 2.3.** Kalkopirit hücrelerde verimler [Hedstrom et al., 1993].



**Şekil 2.5.** Bir CuInSe<sub>2</sub> fotovoltaiik hücresinin yandan kesiti

Son yıllarda ayrıca, Se yerine S kullanıldığı da olmuştur. Bu da kalkopiritlerin başka bir cinsi olarak 1.5 eV'luk band ayrımıyla önem kazanır. S kullanan bu pillerde de 1 cm<sup>2</sup> lik olanlarda % 11-12 verim elde edilmiştir [Scheer et al., 1993].

### 2.1.8. Diğer Yarıiletken Tabanlı Hücreler

Daha birçok yarıiletken malzeme fotovolttaik özellik gösterir. Bunların en başında gelenler; InP, WSe<sub>2</sub>, ZnSe, Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub>, GaAs<sub>x</sub>P<sub>(1-x)</sub> ve diğer organik yarıiletkenler.

Bu grupların içinde en kaydadeğer olanı ise InP'dir. Bu tipte hücreler ilk olarak 1956 yıllarında yapılmaya başlandı. 1.25 eV'luk bir band aralığına sahip bu hücrenin o zamanlardaki verimi % 2 civarındaydı. Daha sonraki yıllarda InP üzerine çalışmalar durdu çünkü GaAs'in band aralığı daha fazlaydı ve daha popüler oldu. 1980'lerde ise InP üzerine çalışmalar yeniden arttı. 1990'larda epitaksiyel metodlarla hazırlanan numunelerde % 22 lere varan verimler alındı. InP hücrelerinin önemli bir özelliği keşfedildi; yüksek verimli ve radyasyona aşırı dirençli olmalarıydı. Bu ise onları uzay çalışmalarında favori yarıiletkenlerden biri haline getirdi.

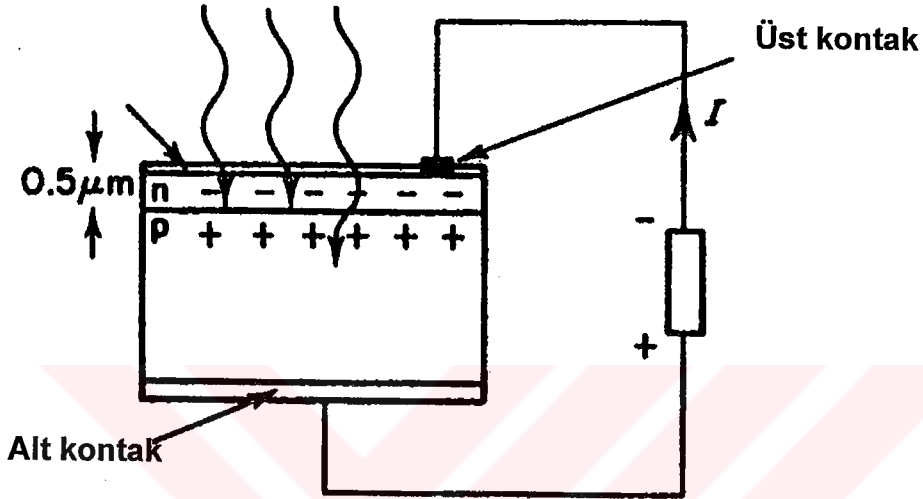
## 2.2. Hücrelerin Karşılaştırılması

| Yarıiletken         | Band Aralığı<br>(eV) | Katkılayıcı         | Teknolojisi  | Verim<br>(%) | Eklem Tipi              |
|---------------------|----------------------|---------------------|--------------|--------------|-------------------------|
| InP                 | 1.35                 | n: Zn, Cd           | Tek-kristal  | 21.9         | Heteroeklem             |
|                     |                      | p: Se, Te, Si       |              |              |                         |
| GaAs                | 1.45                 | n: Zn, Cd           | Tek-kristal  | 24.3         | Heteroeklem             |
|                     |                      | p: Se, Te, Si       |              |              |                         |
| CuInSe <sub>2</sub> | 1.0                  | n: In <sub>Cu</sub> | İnce film    | 17.7         | Heteroeklem             |
|                     |                      | p: Cu <sub>In</sub> |              |              |                         |
| CdTe                | 1.45                 | n: In, Cl           | İnce film    | 15.8         | Heteroeklem             |
|                     |                      | p: P                |              |              |                         |
| a-Si:H              | 1.7                  | n: P, Sn            | İnce film    | 10           | Heteroeklem<br>Homoyapı |
|                     |                      | p: B, Al            |              |              |                         |
| Si                  | 1.1                  | n: P, Sn            | Tek kristal  | 24           | Homoyapı                |
|                     |                      | p: B, Al            | Poli kristal | 18.6         |                         |

Çizelge 2.4. Değişik PV hücrelerin karşılaştırılması [Emery, 1996].

## 2.3. Tipik Bir “p-n” Eklemi

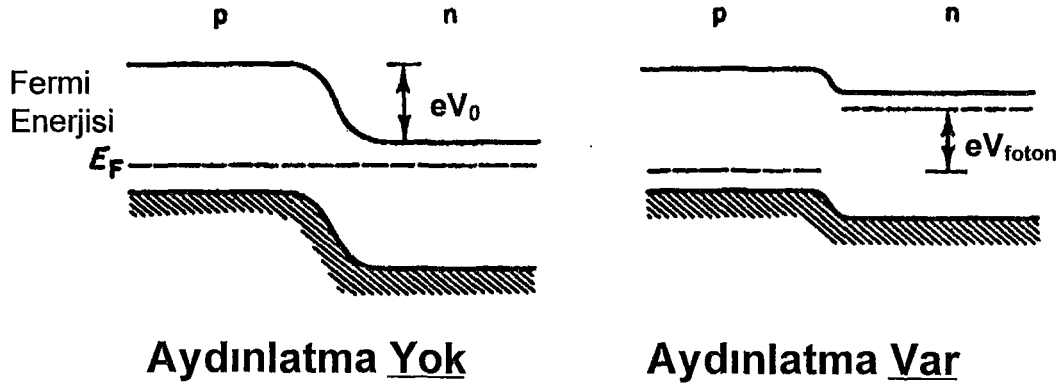
### 2.3.1. Yanal Kesit



**Şekil 2.6.** P-n eklemine sahip bir PV hücrenin kesit görüntüsü. Ekleme ulaşan ışığın oluşturduğu elektron-delik çiftleri eklemin her iki yanında potansiyel oluşturur. Potansiyel sonucu oluşan akım ise alt ve üst kontaklarla toplanır.

Görüldüğü gibi p-n eklemine sahip bir güneş pilinde, eğer alt tabaka p ise üst tarafa n tabaka yapılır. Bu üst tabaka gelen fotonların ekleme ulaşmasına engel olmayacak derecede bir kalınlıkta olmalıdır. Daha sonra da alt ve üst tarafa metalik kontaklar yapılarak oluşan foton akımları toplanır.

### 2.3.2. Aydınlıkta-Karanlıkta Eklem Karşılaştırması



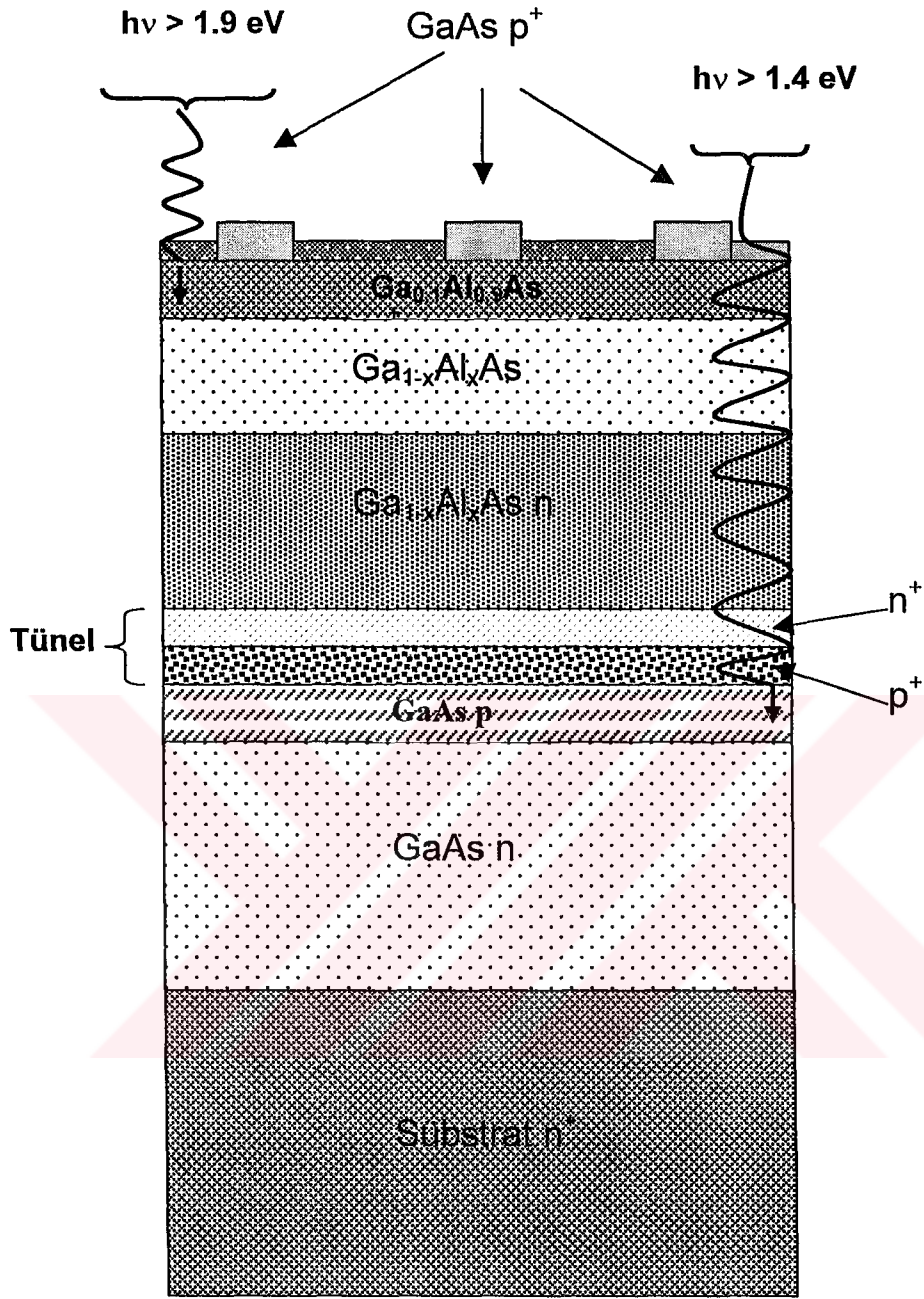
**Şekil 2.7.** Bir eklemdeki enerji seviyelerinin aydınlatma olduğu ve olmadığı durumlardaki görüntüsü.

Burada geçen  $V_{\text{foton}}$  yani fotonların oluşturduğu voltaj esasında açık devre voltajıdır. Yani  $V_{\text{foton}} = V_{\text{oc}}$  olarak geçer. Bunun anlamı; yük direnci konmadığında fotovoltaik hücrenin kontakları arasında okunan voltajdır.

$V_0 = \frac{E_g}{e}$  yani yasak bandın karşılığıdır. Silisyum için bu değer 0.6 volta karşılık gelir. Bu değer ayrıca  $V_{\text{oc}}$  değerinin alabileceği maksimum değerdir.

## 2.4. Ardışık (Tandem) Hücreler

Tek eklemli fotovoltaik hücrelerde; bant aralığından daha düşük enerjilerdeki fotonlar soğurulamazlar ve kaybolurlar. Fakat bazı yeni tekniklerle arka arkaya foto-aktif tabakalar sıralanır, böylelikle ilk tabaka tarafından soğurulamayan fotonlar bundan sonraki tabakalarda soğurulabilir [Kelly, 1995]. Bu şekilde arka arkaya sıralanan tabakalarla hücrelerin dönüşüm verimi çok artırılabilir. İyi bir şekilde ayarlanan ve farklı dalga boylarında aktif olan tabakalarla bu verimlerin AM1 seviyesinde % 36 (iki tabaka) ve % 40 (üç tabaka) olabileceği ölçülebilmıştır [Bennet, 1978].



**Şekil 2.8.** Ardışık (tandem) bir hücrenin yandan kesiti

Şekil 2.8'de iki ayrı katmanlı bir hücre görülüyor. Genelde GaAs'in kullanıldığı III-V bileşiklerinin yarıiletkenlerinde ardışık hücreler yaparken organik kimyasal buhar depozisyonu tekniği kullanılır. Ayrıca sistematik olarak iki ayrı hücre eklemi arasına bir ohm'ik kontak yapılır. Bu kontakın fotonlara karşı geçirgen özelliği olmalıdır. Bunun için tercih edilen tabaka; ileri beslemede tünel diyodu gibi davranan tabakadır.

Bu şekilde  $Ga_{1-x}Al_xAs$ 'ın band aralığı GaAs'dan daha fazladır. Dolayısıyla  $Ga_{1-x}Al_xAs$ 'dan daha düşük band aralığına denk enerjilerdeki fotonlar için şeffaftır. Çünkü sadece bu aralıktan daha fazla enerjiye sahip fotonlar soğurulurlar. Aşağıya geçen fotonlar ise tükenme bölgesinde yada yakın yerlerde GaAs tarafından soğurulurlar.  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ın band yapısı ise üzerinde oynanarak değiştirilebilir ve farklı band aralıkları kullanılır.

## 2.5. Işığın Yoğunlaştırılması

### 2.5.1. Yoğunlaştırıcılar

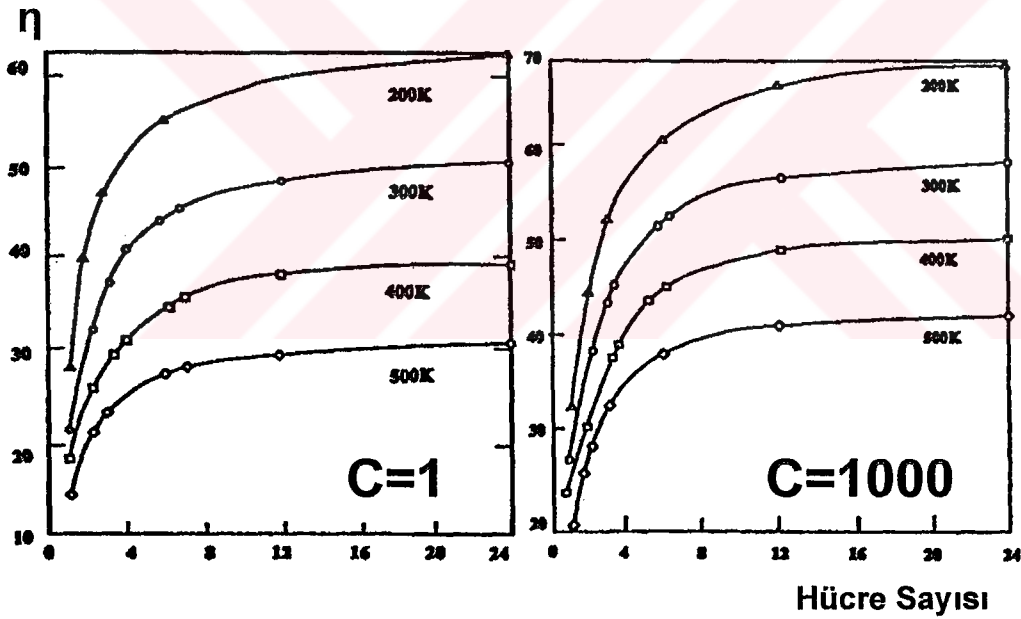
Şu ana kadar hep normal güneş ışığı altında çalışan hücreleri gördük. Fakat normal güneş ışığını 10 hatta 100 kere yoğunlaştırıp bu şekilde kullanmak da mümkündür. Bu şekilde bir kullanım belki gerekli olan fotovoltaik alanın ihtiyacını azaltacaktır ama kullanılacak olan yoğunlaştırıcılarla masraf artacaktır [Cuevas et al., 1989; Kuryla et al., 1990].

Günümüzde bir çok çeşit yoğunlaştırıcı vardır. Ama en etkin olarak fotovoltaik hücrelerde kullanılanlar genelde "Fresnel" mercekleridir. Bunun yanında fototermal olaylarda kullanılan yoğunlaştırıcılar ise genelde yansıtıcılardır.

Yoğunlaştırılmış ışığın en etkin kullanım şekli ise; fotovoltaik olaylar için gerekli olan spektrumu alabilme imkanının olmasıdır. Fakat bir dezavantajı ise, ışığı fazla yoğunlaştırıp ısıyı da arttırmasıdır. Isının artmasıyla verim büyük ölçüde düşer [Bkz. Bölüm 3.12.].

### 2.5.2. Ardışık Hücreler ve Yoğunlaştırılmış Işığın Etkisi

Bölüm 3.11.'de tek eklemli güneş pillerinde teorik hesaplamaları görebiliriz. Yine yapılan çalışmalarla [Landsberg et al., 1991] görülmüştür ki; ardışık hücrelerde bile bir teorik sınırlama vardır. Mesela teorik olarak band aralıkları 0 dan sonsuza kadar olan hücreler arka arkaya konga ve maksimum şekilde güneş yoğunlaştırılsa bile ancak  $\eta \approx \%86$  olabiliyor. Burada güneşin maksimum yoğunlaştırılması da teorik olarak 46747 ile sınırlıdır (optik ve açısal ayarlamalardan dolayı). Eğer hiç yoğunlaştırma kullanılmazsa  $\eta \approx \%68$  olabilmektedir. Bu durumu grafik 2.1.'de ardışık hücrelerde yoğunlaştırılan ışığın etkisi olarak görebiliriz.

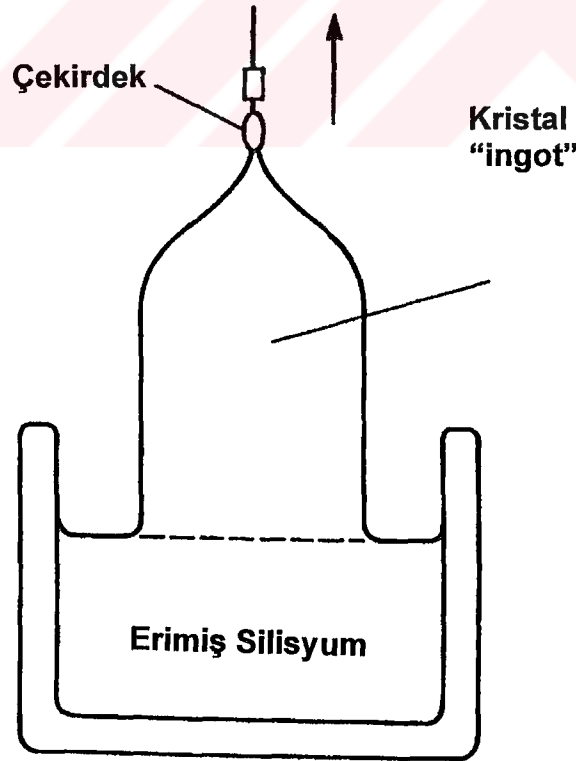


**Grafik 2.1.** Farklı güneş ışığı yoğunluklarında ( $C=1$  ve  $C=1000$ ), ardışık hücrelerin farklı sıcaklıklardaki verim grafiği [Gocsen and Loferski, 1979]. Buradaki değerler en iyi şartlar altında hesaplanmıştır, yani gerçekte çıkan bir çok etki (direnç, ışığın yansımaları...vb.) dahil edilmemiştir.

## 2.6. Kristal Büyütme İşlemleri

Kristal büyütmek için gerekli olan ilk malzeme bildiğimiz kum yani silicattır (silisyum dioksit). Bu malzeme ark fırınında yüksek sıcaklıklarda eritilir ve biraz da karbon katılır. Karbon malzemenin içindeki oksijenle birleşerek karbondioksit olarak çıkar ve geriye % 1'lik safsızlık oranıyla silisyum kalır. Güneş pilinde kullanılacak silisyumların mikroelektronikte kullanılan silisyum tabakalar kadar saflığa sahip olması beklenmez. Ama yine de mümkün olduğu kadar saflaştırılırlar.

Bundan sonra ise kristal büyütme işlemi gelir. Artık amaç eriyik halindeki polisilisyumu tek kristal silisyuma çevirmektir. Burada en sık kullanılan tekniklerden biri Czochralski (şekil 2.9.) işlemidir. Polisilisyum tekrar eritilerek sıcaklığı kontrol edilir, bir çubuğun ucuna takılan çekirdek kristal ise eriyiğin içine daldırılır ve yavaş yavaş yukarıya doğru çekilir.

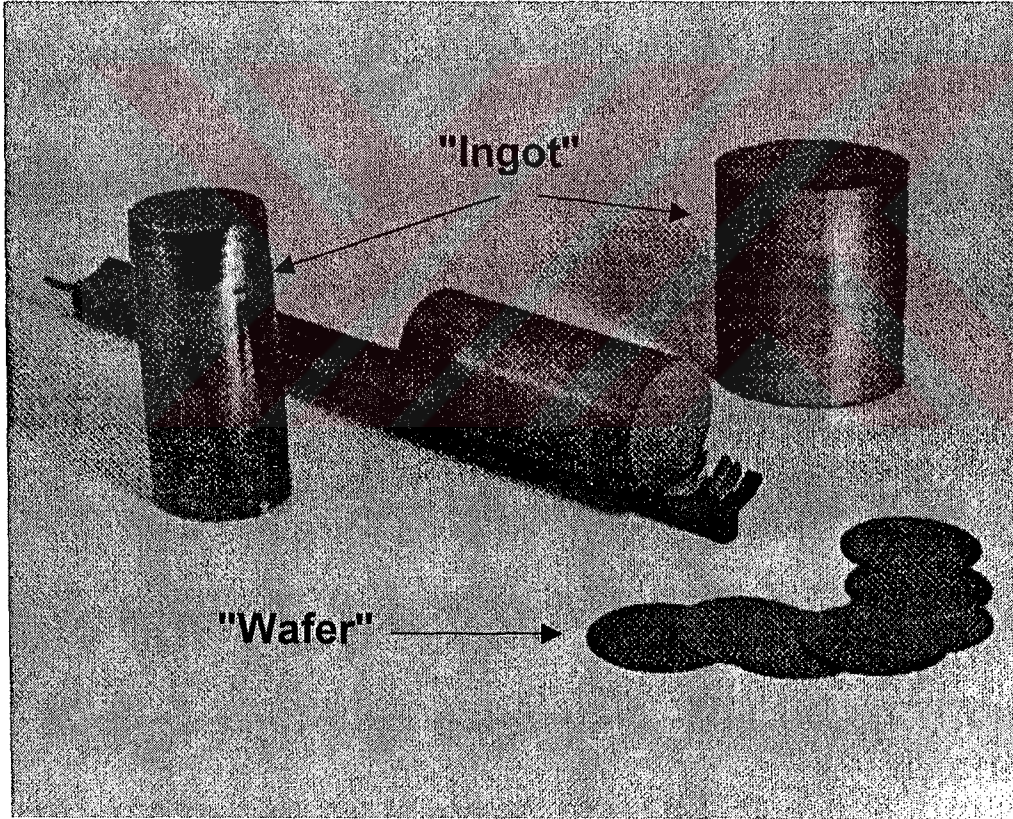


Şekil 2.9. Czochralski işlemi

Eriyik silisyum çekirdekten başlayarak donmaya başlar ve silindirik "ingot" oluşur. Büyüme hızı bazen 10 cm/s dir. Maliyeti düşürmek için genelde geniş yüzeyli (150 mm den fazla) "ingot" lar tercih edilir. Bu arada p tipi istenirse boron, n tipi istenirse fosfor katılır.

Bu metod haricinde daha birçok büyütme tekniği vardır. Ayrıca yarıiletken türüne göre de değişik teknikler denenmektedir.

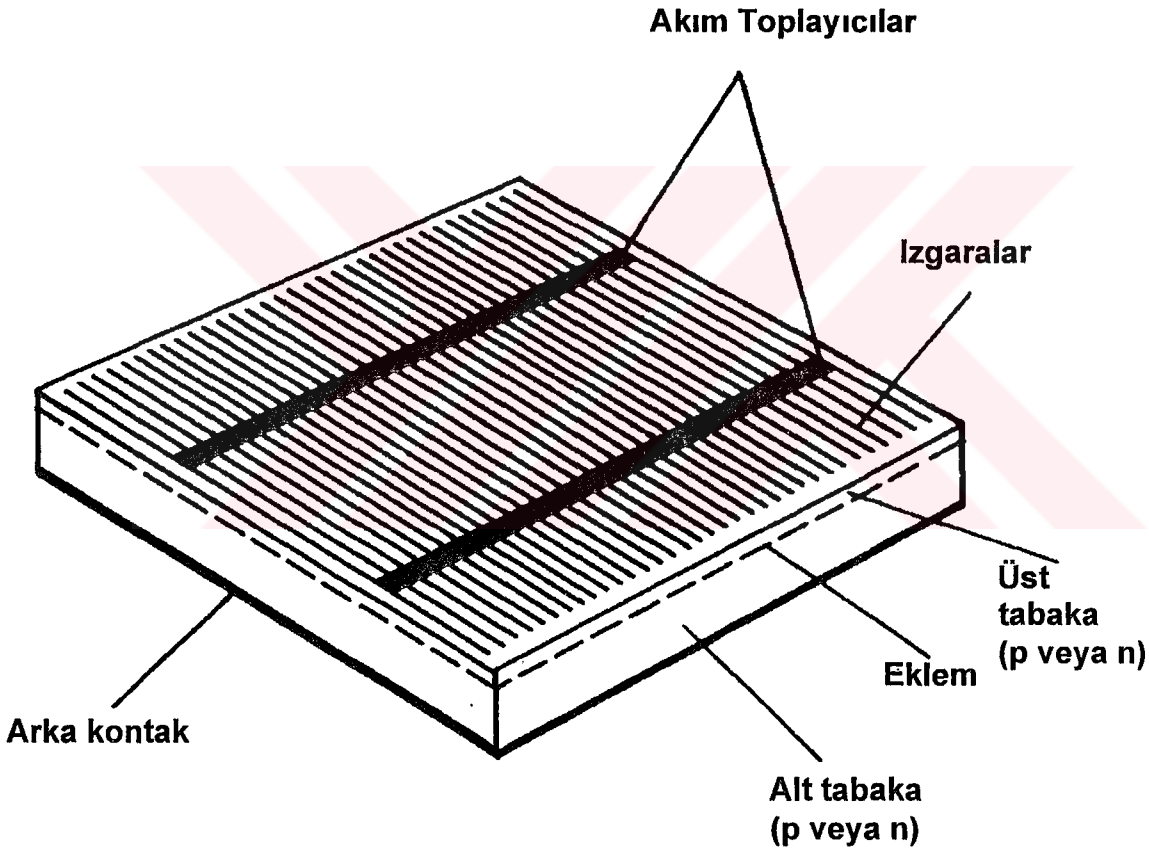
Daha sonra ise "ingot" elmas testerelerle salam gibi dilimlenerek "wafer"lar elde edilirler. Fotoğraf 2.2 de "Ingot" lar ve bunlardan dilimlenmiş tek kristal "wafer" lar görülüyor.



**Fotoğraf 2.2.** Tek kristal yapıya sahip "ingot"lar ve bunlardan dilimlenmiş "wafer"lar.

## 2.7. Üst Kontak (Izgara) Tasarımı

Bir fotovoltaik hücrenin dönüşüm verimine etki eden en büyük faktörlerden biri de kontaklardaki seri dirençlerdir. Seri direncin de en büyük sebebi yarıiletken tabakanın üzerindeki yüzeysel dirençtir. Bunun için üst tabakaya yapılacak olan ızgaranın düşük dirençli Ohm'ik kontak olması gerekir. Yani akımı toplayıp dış devreye en az kayıpla vermesi, aynı anda da ışığın aktif bölgeye girişine engel olmaması gerekir.



**Şekil 2.10.** Güneş pillerinde en çok karşılaşılan türden üst kontak (ızgara) tasarımı.

Metal ızgara ve yarıiletken arasındaki direnç ile ızgaranın kendi direnci yüzey direncini oluşturur. Dolayısıyla ızgara tasarlanırken yeterince kalın olmalıdır, böylelikle ızgaranın kendi direnci engellenmiş olur. Ayrıca yarıiletken ile iyi bir Ohm'ik kontak oluşturması ikisi arasındaki direnci de azaltmış olur. Genel olarak, ızgara çizgileri arasındaki mesafe ne kadar az

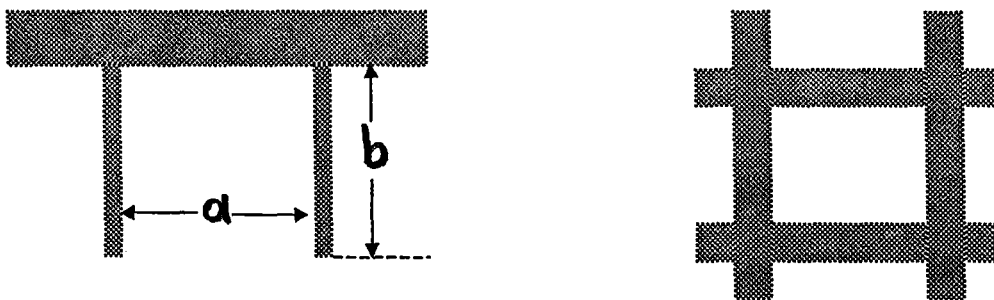
olursa, seri direnç o kadar az olur. Bunun yanında bu çizgilerin kalınlığı da bir o kadar az olmalıdır, böylece ışığı yeterince geçirecektir.

Fakat bu ızgara çizgilerinin kalınlığı da bazı fiziksel yöntemlerle sınırlıdır. Mesela yüzey baskısı yöntemiyle (screen printing), bu çizgiler 50  $\mu\text{m}$  kalınlığında olabilir. Fotolitografiyle yapılan evaporasyonla ise 20  $\mu\text{m}$  kalınlığa inilebilir.

Yüzey direncini minimuma indirecek hesaplamalar birçok kişi tarafından yapılmıştır. Bunun için birbirinden çok farklı geometriler kıyaslanmıştır[37]. Bu hesaplamalar için bazı genellemeler kabul edilir:

- a) Hücrenin üzerindeki akım oluşumu düzgün dağılmıştır.
- b) Üst yarıiletken tabakanın kalınlığı hücrenin genel boyutlarıyla karşılaştırıldığında çok ufaktır.
- c) Izgaranın kendi direnci, üstteki yarıiletken tabakanın direncinden çok daha azdır.
- d) Üst tabakadaki akım geçişi Ohm'iktir.

Bu kabullenmelerle birçok ızgara geometrisi analiz edilmiş ve teorik hesaplamalar kullanılmıştır. Bu geometrilerin oluşturduğu dirençler eğer bir hücre içinde alınacaksa, o zaman paralel hesaplar yapılır.



**Şekil 2.11.** Paralel ızgaranın teorik direnç hesaplamaları için boyutlarının gösterilişi. Buradaki ızgara çeşidi “ağ” şeklinde olandır.

Öncelikle bu çeşit ızgara için şimdiye kadar yapılan teorik hesaplara bakalım. Burada kullanılan değişkenler:

- a: Izgara çizgilerinin birbirlerine olan uzaklıkları
- b: Izgara çizgilerinin orta toplayıcıdan ölçüldüğünde boyları
- $\rho$ : Üst yarıiletken tabakanın öz direnci
- t: Üst yarıiletken tabakanın kalınlığı

Bu durumda  $\rho/t$  bize üst yüzeyin alansal direncini verir. <sup>1</sup>

R: Etkin olan seri birim direnç

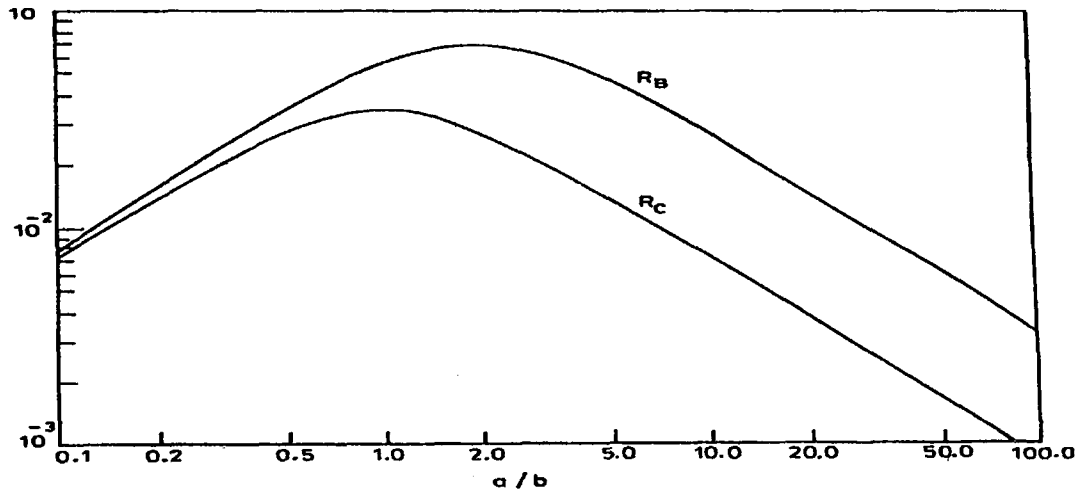
$$R = \left[ \frac{a}{12b} - \left( \frac{a}{b} \right)^2 \frac{8}{\pi^5} \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1)^{-5} \tanh(2m+1) \frac{\pi b}{a} \right] \frac{\rho}{t} \quad (2.1.)$$

Eğer  $\frac{a}{b} \ll 1$  olursa  $R \rightarrow \frac{a}{12b} \frac{\rho}{t}$  olur.

Tersi durumunda ise  $\frac{a}{b} \gg 1$  olursa  $R \rightarrow \frac{b}{3a} \frac{\rho}{t}$  değerine yaklaşır.

Eğer  $\frac{a}{b} = 2$  olursa R değeri maksimum değerine ulaşır. Bunu grafikten de

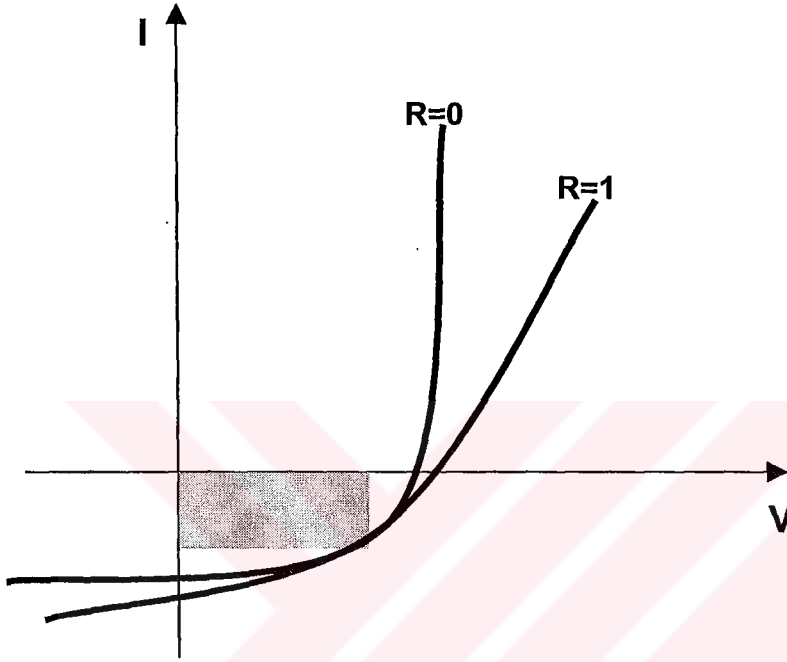
görebiliriz (grafik 2.2.).  $R_{\max} = 7.029 \times 10^{-2} \frac{\rho}{t}$  olur.



**Grafik 2.2.** Etkin olan seri birim direncin (R), a/b cinsinden ifadesi.

<sup>1</sup>  $\rho \approx \Omega \cdot \text{cm}$  ve  $t \approx \text{cm}$  birim cinsindendir, bu durumda  $\rho/t \approx \Omega$  birimindedir.

Yüzey direncinin doğrudan gözlenmesi ölçümlerle mümkündür. Grafik 2.3.'de bir eklem güneş pilindeki ideal yapı ve seri direncin etkisi görülmektedir. Gerçekte de ideal yapıya ulaşmak çok zordur. Bu yüzden seri direnç etkisi hep görülür.



**Grafik 2.3.** Seri direncin ideal ve ideal olmayan diyotlarda etkisi.

### 2.7.1. Izgara Üretimi

İyi bir ızgara paterni oluşturulduktan sonra bu şekil bir yolla güneş piline çıkarılmalıdır. Bunu ise yapmanın bir kaç yolu vardır. Eğer geniş yüzeyler kullanılacaksa yüzey baskısı (screen printing) yöntemi kullanılır. Fakat bu yöntemi kısıtlayan, ızgara çizgilerinin çözünürlüğüdür. Yani 10-20  $\mu\text{m}$  kalınlığında çizgiler pek yapılamaz. Bu duruma alternatif olarak; metal bir maskeyle evaporasyon yapılır ve istenen şekil yüzeye çıkartılır.

Diğer bir yol ise, metal pastaların laminasyonudur. Yani şeritler halindeki metal pastalar ızgaralar halinde güneş pilinin üzerine konulur ve fırınlanır. En üste de şeffaf bir epoksi tabakası konur ki, ızgaralar sağlam olsun. Fakat çözünürlük, güvenilirlik ve temizlik açısından fotolitografi

teknikleri en iyisidir. Zaten bahsedilen bu tekniklerin hepsinde bir şekilde fotolitografi kullanılır. Tezin deneysel kısmında da örneklere uygulanan fotolitografi tekniğinden detaylıca bahsedilecek ve yöntemde kullanılan malzemeler örneklerle açıklanacaktır. Şimdilik fotolitografi yöntemini genel olarak görelim.

## **2.7.2. Fotolitografi**

### **a) Şekil oluşturma (artwork)**

Öncelikle oluşturulacak desen büyük bir grafik kağıdına çıkartılır. Gerekirse pozitif ve negatif görüntüleri de alınır, tabi ki kullanılacak fotorezistin de negatif veya pozitif olması da dikkate alınır. En son aşamada ise desen fotoğraf yöntemleriyle gerekirse küçültülerek çıktısı alınır. Bunların yapılmasında bilgisayar kullanımı büyük kolaylık sağlar.

### **b) Fotorezist (photoresist)**

Ultraviyole ışığa maruz bırakıldığında fiziksel ve kimyasal değişikliğe uğrayan birçok organik maddeler vardır. Fakat kullanılacak fotorezistlerin bu özelliğinin yanında yüzeye kaplandığında iyi bir yalıtım maddesi olması gerekir. Ayrıca belli çözücülere (etchant) karşı duyarlı olması gerekir ki istenen bölgeler ayrıştırılsın.

Fotorezistlerin yüzeye uygulanması ise farklı metodlarla olabilir; spre, fırça ile sürme, laminat olarak kaplama gibi. Fotorezist kaplandıktan sonra pozlandırılır böylece istenen yerlerin yüzeyde kalması sağlanır.

### c) Pozlandırma (exposure)

Fotoresist kaplanan örnek, maske kapatılarak ultraviyole (UV) ışığa maruz bırakılır. Noktasal ışık kaynakları (mesela zenon lambası) ince çizgilere neden olur. Eğer yeterince uzaktan pozlandırma yapılırsa, ışınların birbirine neredeyse paralel halde olması böylece de pozlandırma miktarının homojen olması sağlanmış olur.

Pozlandırma, gereken süreden az yapılırsa çıkarılması istenen yerler kalmaya devam eder. Yani pozlanmamış yerlerle bir farkı olmayabilir, görüntü birbirine karışır. Eğer fazla pozlandırma yapılırsa bu sefer de maskenin altında kalan alanlar etkilenebilir.

### d) Banyo (developing)

Pozlandırılan numuneler, sonradan uygun bir kimyasal içeren banyoya batırılır. Bu kimyasala batırılan numuneler hafifçene sallanırlarsa, veya banyo sıvısının içinde karıştırılırlarsa bu süre indirgenmiş olur.

Bazı durumlarda banyo işlemine başlamadan önce hafif bir ısıtma uygulanır. Bunun yararı; fotoresist polimerinin kimyasal kararlılığını arttırmak ve tabakanın üzerinde kalan bazı artık maddeleri uzaklaştırmaktır.

## 2.7.3. Izgara Yapımında Kritik Parametreler

İyi bir ızgara tasarlanmadan önce kritik parametreler gözden geçirilmelidir. Bunlar genel olarak aşağıda verilmiştir:

- 1- Maximum gücün voltajı
- 2- Aktif bölgenin akım yoğunluğu
- 3- Yüzey direnci

- 4- Kontak metali ve yarıiletken arasındaki direnç
- 5- Kontak metalinin yüzey direnci
- 6- Minimum metal çizgi kalınlığı

Buradaki parametrelerden; 4, 5 ve 6 kolaylıkla değiştirilebilir. Bazı durumlarda da 3. parametre ile oynanabilir.

Fakat deneylerle ispatlanmıştır ki, normal koşullarla uygun metal-yarıiletken kontakları kolay kolay elde edilemez. Çünkü bu kriter, yüzeyin saflığına, gözenekli olup olmamasına, tutuculuğuna ve diğer birçok şarta bağlıdır. Bu şartlardan herhangi birindeki bazı değişiklikler, bazı durumlarda kontak direncinde çok farklı değişikliklere yol açabilir.

Genelde en düşük yüzey kontağı, en ince kalınlıktaki ızgara çizgileriyle mümkün olmaktadır ["Cox and Strack method"]. Tabi ki bu durumda da metalin göstereceği direnç artmaktadır. Dolayısıyla en az direnç gösteren metaller kullanmak en iyisidir. Hatta yüzeyin önceden argon plazmasıyla temizlenip Cr/Pd/Ag alaşımı kaplanmasıyla  $10^{-5} \Omega \text{ cm}^2$  dirençlerde kontaklar elde edilebilir.

Yine yapılan çalışmalarla görülmüştür ki [T.A. Gessert, 1990] sadece düşük dirençli metal malzeme seçmek yeterli değildir. Bunun yanında kaplama metodları da çok önemlidir. Genelde vakum ortamında yapılan kaplamalar daha düşük yüzey direnci göstermektedir. Bundan sonra gelen iyi bir teknik ise fotolitografi metodlarının uygulanmasıdır.

Izgara çizgilerinin ince olmasının bir avantajı da içeriye daha çok ışık girmesine izin vermesidir. Bunun için genelde 5-10  $\mu\text{m}$  kalınlığında çizgiler yapılır. Çünkü bu sefer de maksat bu çizgilerin yaptığı gölgelemeyi azaltmaktır. Gölgelemeyi minimuma indirmek için "Entech Inc." adlı firma, kontakların ve tüm hücrenin üzerine silikon plastik kaplamıştır. Tabiki yapılan

kaplama gelen ışığı çizgilerin haricindeki yerlere odaklayacak şekilde olmuştur. Yani kaplama bir nevi prizma olarak davranır.

Fakat çok ince ızgara yapmak, daha çok çizgi yapmayı gerektirir. Ayrıca fotolitografi kullanılacaksa, fotomaske yapımı da aynı oranda zorlaşır.

Sonuç olarak söylemek gerekirse; kontak direnci  $10^{-2} \Omega \text{ cm}^2$  den büyük olursa, yüzey direncinden dolayı kayıplar ağır basar. Ayrıca en iyi kontak yapımı metodları; plazma temizliği ve ani termal tavlama (rapid thermal annealing) dır. Ayrıca en iyi ızgara, en ince çizgilere sahip olan ızgaradır. Fakat yoğunlaştırılmış güneş ışığı (yaklaşık 1000 kere) altında en ince çizgili ızgara değil, belli bir optimum inceliğe sahip ızgara daha randımanlı olur.

Günümüzde kullanılan bir yüzey kontak türü de ITO (Indium-Tin Oxide) kaplamadır. Bu kontağın özelliği geçirgen olması ve tüm yüzeye rahatçana kaplanabilmesidir. Ancak maliyeti ve verimi açısından çok yaygın değildir. Fakat bazı güneş pillerinde üst kontak olarak kullanılır.

#### 2.7.4. Ohm'ik Kontaklar

Yüzeysel kontakların başka bir özelliği de fiziksel ve mekaniksel etkilere karşı sağlam olmasıdır. Ayrıca değişik sıcaklıklarda kararlılıklarını korumalıdır. Günümüzün en sık karşılaşılan güneş pilleri; Si, CdS, GaAs,  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{-GaAs}$ , Schottky bariyerleri ve heteroyapılardır.

##### a) Si Güneş Pillerinin Kontakları

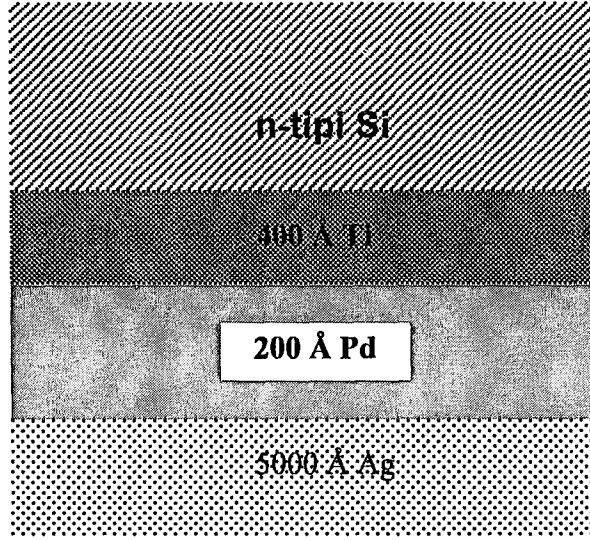
Bunlara uygulanan kontaklar akımsız veya akımlı kaplamayla Ni, Au yada Ag; evaporasyon veya "sputter" tekniğiyle Ni, Au, Ag, Ti, Pd ve Al dur. Akımlı veya akımsız kaplama metodları en kolay ve ucuz metodlar olduğu için ticari olarak tercih edilirler. Ama diğer metodlar kadar kararlı değildirler.

1980'lerde çokca kullanılan iyi bir kontak yapım metodu da; yüzey baskısı (screen printing) metoduyla nikel ve ardından bakır kaplanmasıydı. Direk olarak bakır kaplayıp ardından tavlama bakırın hızlı difüzyonu nedeniyle bazı sakıncalar doğurabilir. Bu nedenle önce nikel kullanılır. Ayrıca akımsız nikel banyosu gibi metodlarla kimyasal olarak az işlemle çok daha az maliyetle kaplanabilir. Tavlama ile da hem çok iyi Ohm'ik kontaklar yapar hem de yüzeye mekanik olarak iyi tutunan bir katman oluşturur. Ardından bakır kaplanarak iletkenlik artırılabilir. Kontaklarda rastlanan esas akım taşıyıcı budur. Ardından da gümüş kaplanarak hem iletkenlik artırılır hem de bakırın oksitlenmesini önleyerek koruma tabakası oluşturur.

İyi Ohm'ik kontak yapmanın en önemli aşaması uygun sıcaklıkta tavlama geçeri. Bu tavlama oranı iyi ayarlanmalıdır çünkü yüksek veya düşük sıcaklıkta tavlamanın avantaj ve dezavantajları vardır. Yüksek sıcaklıkta tavlama örneklerde iyi Ohm'ik kontak ve iyi Si-metal bağlantısı görülür. Düşük sıcaklıkta tavlama ile küçük kısa devre akımı ve daha uzun kararlı ömür görülür. Tavlama sıcaklığının artmasıyla ömürde önemli ölçüde kısalma görülmüştür [Frisson, 1979].

#### i) n-Si

Silisyum için en çok kullanılan kontak sistemlerinden biri Ti'nin evaporasyonu ve ardından Ag kaplanmasıdır. Çünkü Ti, silisyum (özellikle n tipi) ile düşük dirençli Ohm'ik kontak yapar, bunun üzerine kaplanan Ag ise sağladığı yüksek iletkenlikle, ızgaranın genelindeki direnci oldukça düşürür. Fakat Ti ve Ag arasında nemden dolayı zamanla elektrokimyasal reaksiyon olur. Bunu önlemek için araya bir de Pd kaplanır. Dolayısıyla kullanılan sistem şekil 2.12. deki gibidir.



**Şekil 2.12.** n-tipi Si üzerine en iyi Ohm'ik kontak yapan ve sırasıyla kaplanan metal kombinasyonu.

## ii) p-Si

P-tipi silisyum için ise genelde Al kontaklar tercih edilir. Düşük katkılama düzeylerinde silisyum tabaka 1 ila 10  $\Omega$  cm dirence sahip olur dolayısıyla bir çok metalle düşük dirençli kontak yapmak zor olur. Ancak Al, kontağı yüksek iletkenlikte katkılar (Al kaplanır ve 550-600°C de tavllanır). Saf Ag ve Au kontakları, düşük verimlerinden dolayı pek kullanılmazlar. Ni kontaklar ise daha iyi yapışırlar ama Ti, Pd, Ag yada Al kadar düşük kontak direnci sağlamazlar.

Hangi kontak sistemi kullanılırsa kullanılsın, düşük sıcaklıklarda (-50°C yada daha düşük) Schottky bariyerinin oluşmasını önlemek için kontaklar 550-600°C de 5-30 dakika asal gaz atmosferinde tavlamlıdırlar. Fakat burada dikkat edilmesi gereken nokta; üst ızgara kontağı çok uzun süre veya çok yüksek sıcaklıklarda tavlamlıdır yoksa eklemde oluşan bir mikro yarık yada başka bir kusurdan içeriye metal girer. Bu da düşük dirençli bir kısa devre oluşumuna yol açabilir.

## **b) Diğer Pillerin Kontakları**

### **i) p-GaAs**

GaAs güneş pillerinin p tarafı için ise kullanılan Ohm'ik kontaklar daha çok Ni, Ag, Al, In, Au-2% Zn, Ag-2% Zn olur. N-tarafı için Ni, Ag, Au-Sn, Ag-Sn, Au-Ge-Ni kullanılır. 475-550°C de 10 dakika boyunca tavlama ile bu metallerin yapışması, aynı metallerin Si'a yapışmasından daha iyidir. Fakat Ti-Pd-Ag kontaklarının Si'a yapışması kadar iyi değildir. Au-2%Zn kontakları genelde GaAs lazerleri için çok kullanılır, fakat üst kontak olarak kullanılması zordur çünkü üst kontaklar genelde bir mikrondan daha ince olur ve kolaylıkla üst taraftan alt tarafa kısa devre yapan bir yarık oluşabilir. Aynı kısa devre sorunlarına 560°C de tavlanan In-Zn-Ag kontaklarında da rastlanmıştır. Ag-%2 Zn ise 500 °C de 5 dakika tavlendiğinde iyi yapışan az dirençli kontaklar vermiştir.

### **ii) n-GaAs**

Genelde Au-Sn, Au-Ge-Ni kullanılır. Özellikle Au-Ge-Ni alaşımı 450 °C de birkaç dakika tavlendiğinde iyi sonuç verir. Au-Sn yada Ag-Sn alaşımı ise daha yüksek sıcaklıklarda tavlmalıdır.

### **iii) p-Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As**

500 °C de 2-5 dakikalık bir tavlama ile Au-2% Zn ve Ag-2% Zn alaşımlarından düşük dirençli kontaklar elde edilir fakat yapışmaları GaAs kadar iyi değildir.

#### iv) Cu<sub>2</sub>S-CdS

Bu pillerde kontaklar biraz daha farklı olur. CuCl çözeltisine CdS batırılır ve üzerine Cu<sub>2</sub>S filmi oluşturulur. Cu<sub>2</sub>S in iletkenliği zaten fazla olduğu için üzerine bakır veya altın buharlaştırılır. CdS üzerine ise Mo, Ag, Ag-Zn veya Ti-Pd-Ag buharlaştırılır.

### 2.8. Film Tabakası Etkisi

Güneş pillerinde film tabakasının etkisi deneylerle kanıtlanmış bir olaydır. Burada kaplamanın amacı; yansımayı minimuma indirmek, termal olarak kararlılığı sağlamak ve zararlı ışımalarından oluşabilecek kusurları engellemek [M. Koltun and A.P. Landsman, 1967].

Silisyum pillerde kullanılmak üzere tercih edilen kaplamalar genelde ZnS veya MgF<sub>2</sub> veya Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dür. Ayrıca fotovoltaiik hücrenin gelen ışığı maksimum kullanabilmesi için pilin alt yüzeyindeki metalik kaplama da bir avantajdır. Böylelikle en alt tabakaya kadar soğurulmadan ulaşan ışınlar buradan yansıyarak tekrar pilin eklem bölgesine giderler. Bu yansıma oranı iyi arka kontak kaplamalarında % 90 oranına ulaşabilir.

Bazı çalışmalarda ise kaplanan film tabakası olarak gözenekli silisyum (porous silicon) kullanıldığı belirlenmiştir [Web, 1998]. Böylelikle maliyet ve üretim kolaylığı ön plana çıkar.

## 2.9. PV Hücrelerde Verimi Düşüren Faktörler

Güneş pillerindeki enerji kayıpları başlıca 9 maddede sıralanabilir:

1- Ön kontağın (ızgaraların) gölgelemesi: Ön kontağın esas görevi yük taşıyıcılarının karşılaştıkları direnci azaltarak yüzeyden yükleri toplamaktır. (bakınız, ızgara tasarımı)

2- Ön yüzeyden yansımalar: Ön yüzeye gelen aydınlatmanın bir kısmı yansıyarak geri döner. Modern fotovoltaik hücrelerde bu kayıp % 2 nin altına indirilmiştir. Bunun için ön yüzeye genelde anti-refle film kaplanır ( gelen ışığın dalgaboyunun dörtte biri). Hatta bazı tasarımlarda ön yüzey aşındırılır böylelikle ön yüzeyde tırtıklı, mikro piramitler oluşturulur.

3- Tam gerçekleşmeyen soğurmalar: Gelen fotonların enerjileri eğer yarıiletkenin yasak band enerjisinden düşükse, bu durumda soğurma olmaz ve fotonlar direk olarak geçerek arka kontakda soğurulurlar. Bu işlem için yasak band enerjisi ne kadar düşük olursa o kadar soğurma oranı artar.

4- Foton enerjilerinden kısmi olarak yararlanılması: Gelen fotonların birçoğunun enerjisi gerekli olan soğurma enerjilerinden daha fazladır. Bu durumda gereksiz enerji ortaya çıkar. Bu fazla enerji ise ısı enerjisi olarak ortama yayılır. Bu durumda da yasak band enerjisi ne kadar fazla olursa o kadar artık enerji ortaya çıkar ve ısınma az oranda gerçekleşir. Dolayısıyla en iyi yarıiletken tipi, band enerjisi 3. maddedeki oranı da sağlayan arada optimum enerjiye sahip olandır (Bkz. Bölüm 3.11.)

5- Elektrik enerjisinin toplanmasındaki kayıplar: Sadece bariyer tarafından ayrılan ve kontaklara ulaşan elektron-delik çiftleri çıktı akımına etkide bulunur. Geri kalanlar ise ön ve arka kontaklarda birikerek ısıya sebep

olurlar. Bunu azaltmanın pek imkanı yoktur çünkü yarıiletkenin soğurma özellikleriyle ilgilidir.

6- Voltaj faktörü: Açık devre voltajı her zaman yasak band enerjisinden azdır (bakınız 3.11.). Ayrıca  $E_g$  değeri ile optimum olan bir verim vardır.

7- Sızıntılar: Eklem boyunca oluşan sızıntı akımları kısa devreye yolaçabilir. Bunlar mikro ölçekte de olsalar verimi önemli oranda düşürürler.

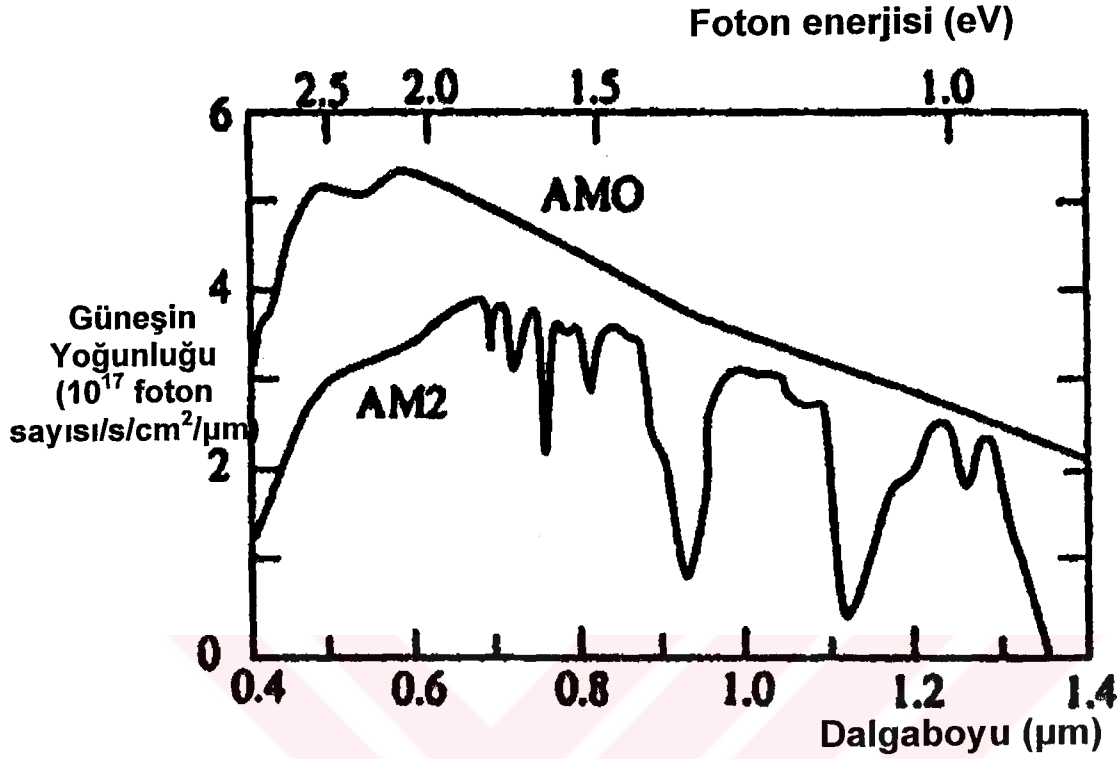
8- Seri Direnç: İyi bir kontak geometrisi ile (bakınız ızgara tasarımı), Ohm'ik kontaklarla ve düşük yüzey direnciyle bu faktör önemli ölçüde azaltılabilir.

9- Eklem karakteristiği faktörü: Tümüyle yarıiletkenin yapısına bağlı olan eklem karakteristikleri yarıiletkenin çalışmasını etkiler.

### 3. PV ETKİNİN TEORİK HESAPLARI

#### 3.1. Güneş Spektrumu

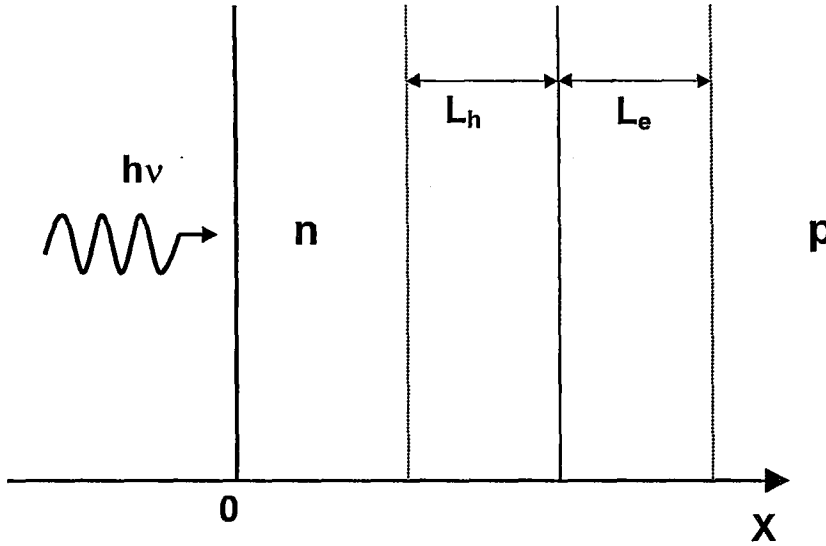
Güneşin enerji çıkışı elektromanyetik ışıma şeklinde olur. Bu ışımanın spektrumdaki aralığı  $0.2 \mu\text{m}$  den  $3 \mu\text{m}$  ye kadardır. Dünyaya ulaşan bu ışıma atmosferden yansır ve bir kısmı da atmosfer tarafından soğurulur, geri kalanı ise yeryüzüne ulaşır. Yeryüzüne ulaşan ışıma miktarı ışınların geliş açısına da bağlıdır ve genelde  $500$  ila  $1000 \text{ W/m}^2$  arasında değişir. Atmosfer tarafından soğurulmanın olmadığı uzay ortamında ise gelen ışıma  $140 \text{ mW/cm}^2$  civarındadır. Bu ışıma durumuna “air-mass-zero” (AM0) denir. Yani bu seviyede hiçbir soğurma ve yansıma olayı olmadığı kabul edilir. Dünyada deniz seviyesinde ve güneşin en tepede olduğu yerde güç seviyesi  $100 \text{ mW/cm}^2$  civarına düşer. Buna da AM1 denir. Eğer geliş açısı büyüyüp, ışınlar normal yollarından iki kat daha fazla yol katederlerse AM2 olur, bu durumda güç  $80 \text{ mW/cm}^2$  civarına düşer. Grafik 3.1. de bu durumu daha iyi görebiliriz [Ebony, 1994].



**Grafik 3.1.** "Air-Mass" ışınlarının atmosferden geçiş durumları. AM0; güneşin hiçbir şekilde soğurulup yansıtılmadığı, AM1; güneş deniz seviyesinde ve en tepede (grafikte gösterilmemiş), AM2 ise güneşin belli bir açıyla atmosfere girdiği durumları gösterir.

### 3.2. Spektral Etki

Bir güneş pilinde spektral etki; kısa devre akımının gelen ışığın dalgaboyuyla değişmesinden olur. Spektral etkiyi veren ifadeyi bulabilmek için bir eklemenin tek boyutlu görüntüsüne bakalım.



**Şekil 3.1.** Bir p-n ekleminin yan kesidi.

- X:** Eklemin derinliği.  $X=0$  yüzey noktasıdır.
- $L_h, L_e$ :** P ve n türü için difüzyon uzunlukları. Normal bir güneş pilinde bu uzunluklar 1-10  $\mu\text{m}$  civarındadır.
- d:** Arınma (depletion) bölgesinin yüzeyden olan uzaklığı. Bu bölgenin kalınlığı normal katkılamlarda (güneş pillerinde) 0.1  $\mu\text{m}$  civarındadır. Dolayısıyla difüzyon uzunluklarıyla karşılaştırıldığında bu bölgenin kalınlığı ihmal edilebilir.

Şimdi aşağıdaki denklemi tanımlayalım:

$$\phi = \phi_0 e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (\text{s}^{-1}.\text{cm}^{-2}) \quad (3.1.)$$

- $\alpha$ : Soğurma katsayısı
- $\lambda$ : Gelen ışığın dalgaboyu
- $\phi$ : Foton yoğunluğu

Görüldüğü gibi  $X=0$  noktasında yani yüzeyde  $\phi_0$  tane foton vardır. Ama yüzeyden içeriye girdikçe dalgaboyuna bağlı olan soğurma katsayısıyla bağlantılı olarak bu sayı üssel olarak düşer.

Elektron-delik oluşum oranı (electron-hole generation rate) ise:

$$G(x) = \phi_0 \alpha e^{-\alpha x} \quad (3.2.)$$

Eklem n tarafında, X mesafesinde oluşan azınlık taşıyıcılarının (delikler) difüzyonu  $e^{-(d-x)/L_h}$  ile orantılı olacaktır. Dolayısıyla eklem bölgesine ulaşan delik sayısı:

$$p_N^{op} = \int_0^d \phi_0 \alpha e^{-\alpha x} e^{-(d-x)/L_h} dx \quad (\text{op: optik, yani fotonlarla oluşan})$$

Integralin çözümü bize şunu verir:

$$p_N^{op} = \frac{\phi_0 \alpha}{\alpha - \frac{1}{L_h}} \left[ e^{-\frac{d}{L_h}} - e^{-\alpha d} \right] \quad (3.3.)$$

Aynı mantıkla eklem p tarafındaki azınlık taşıyıcılarının (elektronlar) eklem bölgesine ulaşanlarının sayısı:

$$n_p^{op} = \int_d^\infty \phi_0 \alpha e^{-\alpha x} e^{-(x-d)/L_e} dx \quad (3.4.)$$

$$n_p^{op} = \frac{\phi_0 \alpha}{\alpha + \frac{1}{L_e}} e^{-\alpha d} \quad (3.5.)$$

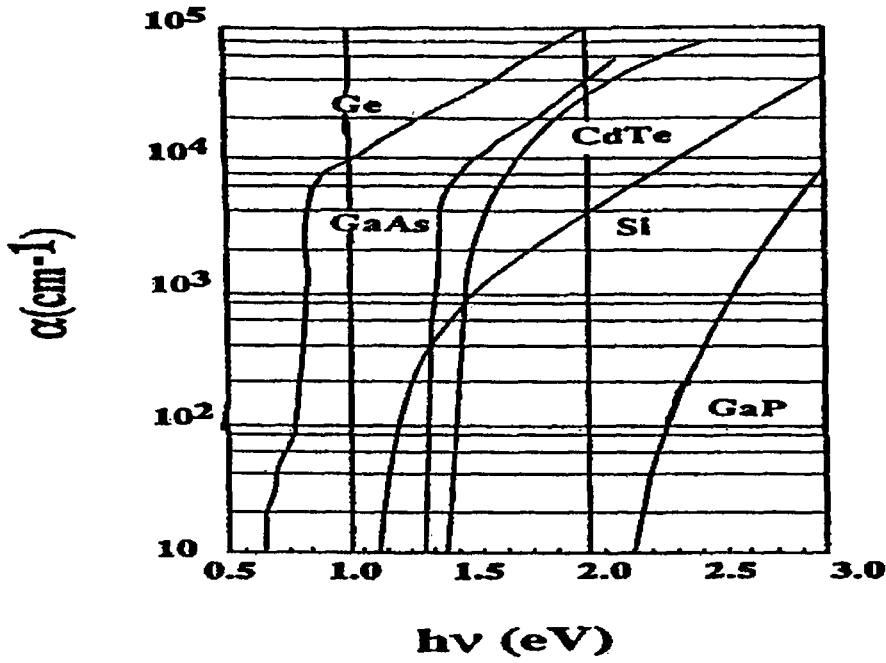
Dolayısıyla fotonlarla oluşan taşıyıcı sayısının toplamı:

$$p_N^{op} + n_p^{op} = \frac{\phi_0 \alpha}{\alpha - \frac{1}{L_h}} \left[ e^{-\frac{d}{L_h}} - e^{-\alpha d} \right] + \frac{\phi_0 \alpha}{\alpha + \frac{1}{L_e}} e^{-\alpha d} \quad (3.6.)$$

dir. Görüldüğü gibi oluşan akım, taşıyıcı sayısına bağlı; bu da dalgaboyuna bağlıdır. Uygulamaya göre bazı durumlarda güneş spektrumunun belli bölgelerinin seçilmesi avantajlı olabilir. Mesela, soğurma katsayısı  $\alpha$ 'nın küçük olduğu durumlarda eğer uzun dalga boyları ( $h\nu \approx E_g$ ) kullanılacaksa denklemlerden  $L_e$ 'nin büyük olması gerektiği görülür.  $L_e$ 'yi büyük yapabilmek için p tarafı az katkılanmalıdır. Fakat açık devre voltajının büyük olması isteniyorsa denklem (3.18.) de görüleceği gibi katkılanma büyük olmalıdır. Dolayısıyla arada bir optimum değer bulunmalıdır. Pratik uygulamalarda güneş pillerinde genelde taşıyıcı sayısı  $N_A \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  olur. Aynı mantıkla düşünüldüğünde kısa dalga boyları için ( $h\nu \gg E_g$ ) ve  $\alpha$  katsayısı da büyük olursa, d küçük olmalıdır. Yani eklem yüzeysel (shallow junction) olmalıdır.

### 3.3. Soğurma Katsayısı

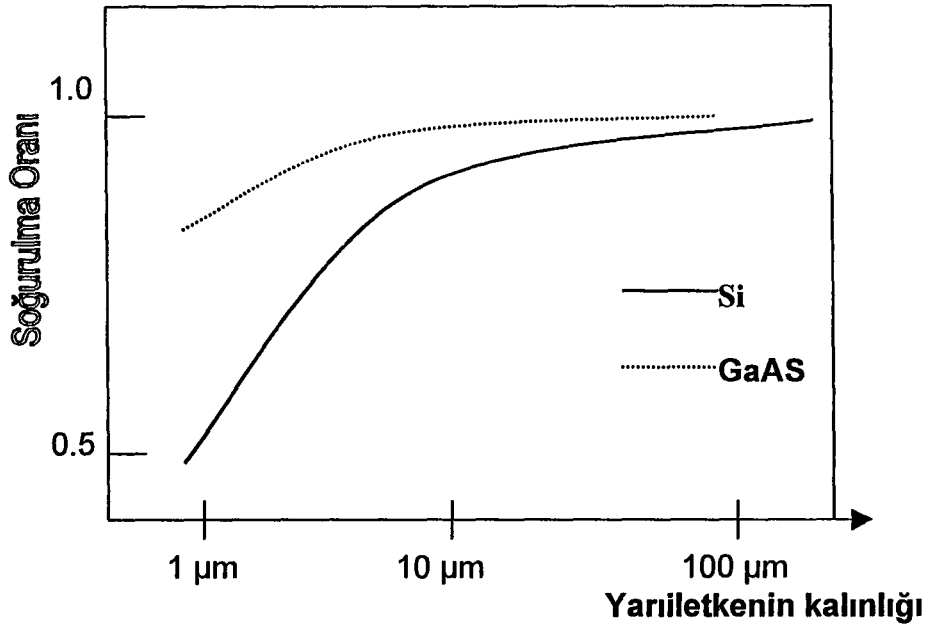
Şu ana kadar soğurma katsayısının etkisine değinmedik. Halbuki denklem (3.1.) de göreceğimiz gibi soğurma katsayısı ile soğurulan foton sayısı çok önemlidir ve malzemeden malzemeye değişir. Genel olarak soğurma katsayısı gelen ışığın dalgaboyuna bağlıdır ve yarıiletken malzemenin karakteristik özelliğidir. Soğurma katsayısının etkili olabilmesi için, yani onu kullanabilmemiz için gelen ışığın enerjisinin eşik enerjisinden büyük olması gerekir. Aşağıdaki şekilde, çok kullanılan yarıiletkenler ve bunların soğurma katsayıları arasındaki ilişkiler verilmiştir.



**Grafik 3.2.** Soğurma katsayısı sabiti ( $\alpha$ ) ile foton enerjilerinin belli fotovoltatik yarıiletkenlerdeki değerleri.

Grafiği incelediğimizde direk band yapısına sahip yarıiletkenlerde (GaAs, CdTe), soğurma katsayısının çok hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Ancak direk olmayan band yapısına sahip yarıiletkenlerde (Si, GaP ve Ge), soğurma katsayısı daha kademeli olarak artar. Direk band yapısına sahip yarıiletkenlerde soğurma katsayısı hızla arttığı için çok daha ince tabakalar kullanılabilir. Bunu da Si ve GaAs arasında yapılan bir kıyaslamayla görelim:

Şimdi göreceğimiz grafik AM0 spektrumunda çizilmiştir. Ayrıca gelen fotonların enerjilerinin band aralığından büyük olduğu kabul ediliyor. Yani deneyde kullanılan ışığın enerjisiyle ilgili olarak  $h\nu > E_g$  diyebiliriz. Grafiğin amacı, Si ve GaAs in soğurma katsayılarının kullanılacak malzemenin kalınlığı hakkında fikir vermektir. Örneğin silisyumun soğurabileceği fotonların % 90 'ını soğurmak için 100  $\mu\text{m}$  kalınlıktaki bir tabakaya ihtiyaç vardır. Ancak aynı orandaki fotonu soğurmak için GaAs den sadece 10  $\mu\text{m}$  yeterlidir.

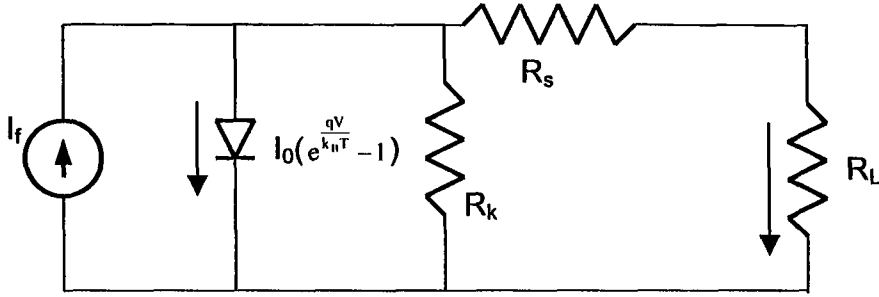


**Grafik 3.3.** Si ve GaAs hücrelerde kalınlığın artmasıyla soğurulan fotonların oranı.

### 3.4. Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi

Buradan itibaren güneş pillerinin mekanizmaları tek kristal eklemli olanlar üzerinde duracağız. Bu pillerin genel özellikleri bir p-n eklemi olması, geniş bir yüzey alanı ve ışığın % 10 undan fazlasını çevirme verimleri olmasıdır.

Bilindiği gibi beslenmemiş bir eklem foton düştüğünde elektron-delik çiftleri oluşur. Bu elektron-delik çiftlerinin bir devreyle toplanması sonucu ise elektrik akımı oluşur. Şekil 3.2'de bu durumun eşdeğer devresi görülmüyor [Kelly, 1995].



**Şekil 3.2.** Güneş pilinin idealleştirilmiş eşdeğer devresi.  $R_s$ , hücrelerdeki seri direnç,  $R_k$ , ise paralel kısa devre direnci,  $R_L$  ise yük (load) direncidir.  $I_0$  ters doyum akımı,  $I_f$  ise fotonların oluşturduğu akım üreticidir.

Normalde, ışık düşürülmediği zaman hücre sadece bir diyot ve seri dirençten oluşur. Diyodun üzerinden geçen akım klasik diyot denklemiyle zaten bellidir .

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1) \quad (\text{ideal diyot akımı})$$

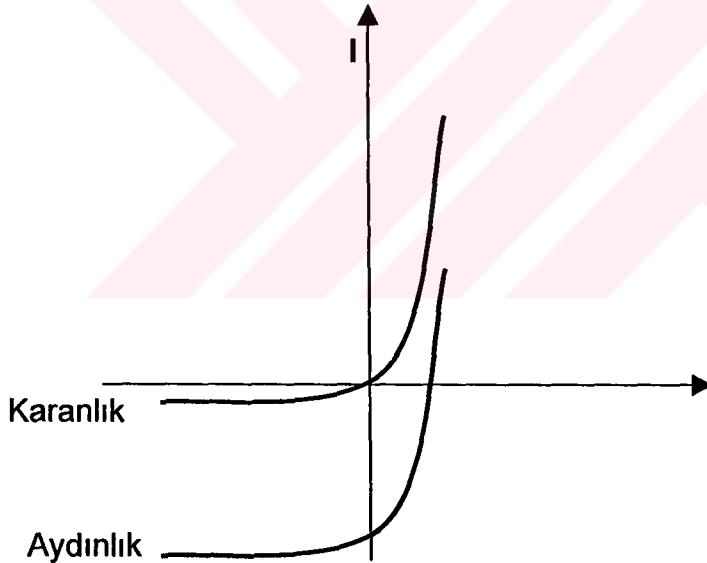
Bu diyot akımında  $q$ : elektron veya deliğin yükü,  $V$ : uygulanan potansiyet,  $k_B$ : Boltzman sabiti,  $T$ : Kelvin cinsinden sıcaklıktır.  $I_0$  ise çok küçük bir akım olan doyum akımıdır. Her elektronik aygıtta olduğu gibi bunda da seri direnç bulunur. Bu direnç ise  $R_s$  ile verilir.

Fakat aydınlatıldığında, bu devreye bir de akım üretici bağlanmış gibi davranır. Pratikte de bunu görmek mümkündür. Elimizdeki bir güneş pili aydınlatılmadığı zaman sadece basit bir diyot olarak davranır. Bir voltmetreyle ölçtüğümüzde; anod ve katod ucuna da yük bağlayıp üzerine de ışık düşürdüğümüzde, anod ucundan katod ucuna doğru bir akım geçer. Bu

da bize fotovoltaik hücrenin anot ucundan (+) ve katod ucundan (-) kaynak oluşturduğunu gösterir.

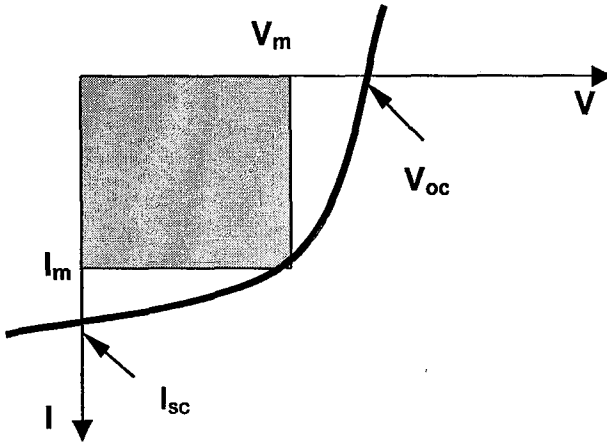
### 3.5. Temel Akım-Voltaj Karakteristikleri

Aşağıdaki şekilde tipik bir güneş pilinin karanlıkta ve aydınlatıldığında akım-voltaj karakteristiği görülüyor. I-V ekseninin 4. bölgesinden (pozitif voltaj ve negatif akım bölgesi) geçen eğrinin anlamı, burada güç üretimi var demektir. Karanlık yapılan uygulamada güneş piline ters besleme yapılıyor. Bu esnada sadece sızıntı akımı geçiyor. Ters akım ise azaltılarak 0 noktasına kadar geliyor ve geçen akım da sıfıra gidiyor. İleri yönde besleme yapıldığında, akım tipik bir diyot gibi davranarak üssel olarak artıyor.



**Grafik 3.4.** Tipik bir güneş pilinin aydınlıkta ve karanlıkta I-V eğrisi.

Aynı olay aydınlıkta (güneş pili ışıklandırma altında) tekrarlandığında ise sanki grafik sadece aşağı kaydırılmış gibi gözüküyor. Şimdi ise bu aydınlatma durumunu biraz daha dikkatli inceleyelim:

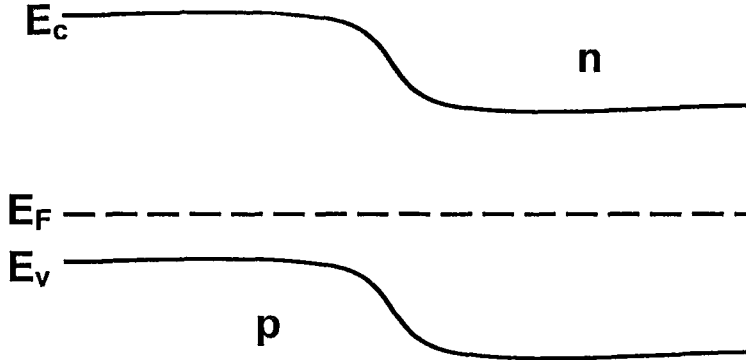


**Şekil 3.3.** Aydınlik ortamda, 4. bölgenin büyütölmüş hali.

Aydınlikta hücreye yine ters besleme yapılıyor. Yani güneş pilinin anod ucuna negatif, katod ucuna ise pozitif besleme yapılıyor. Bu esnada ölçölen akım negatiftir. Fakat besleme sıfıra yaklaştığı halde akım halen negatiftir. İşte tam olarak besleme sıfıra indiğinde, devreden halen negatif bir akım geçmektedir. Beslemenin sıfır olduğı durumda kısa devre oluşmuş demektir. Bu esnada yükten geçen maksimum akıma ise kısa devre akımı  $I_{sc}$  (short-circuit) denir. Aynı şekilde beslemeyi pozitif yönde arttırdığımızda bir noktada devreden geçen akım sıfır olur. Bu anda ise uyguladığımız ileri yöndeki besleme, güneş pilinin ürettiğı potansiyeli telafi eder ve devreden geçen toplam akım sıfır olur. Bu durumda ise güneş pilinin maksimum voltajını buluruz. Başka bir ismi de açık devre durumunda elde edilen maksimum  $V_{oc}$  (open-circuit) voltajdır.

Dolayısıyla güneş pilinin maksimum gücü bu eğri altında kalan alanın maksimize edilmesiyle bulunabilir. Bu da  $P_{maks} = I_{sc} \cdot V_{oc}$  olarak yazılabilir.

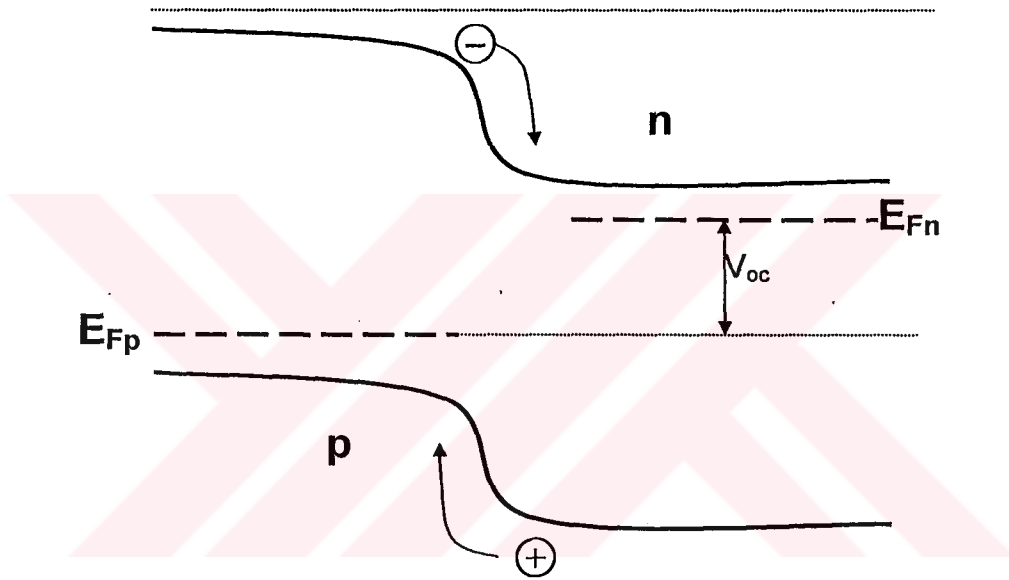
Şimdi ise bir p-n eklemindeki band yapılarını inceleyelim.



**Şekil 3.4.** Karanlık durumda eklem. Burada,  $E_c$  : İletim bandının alt kısmında bulunan elektronların enerjileri (conduction band),  $E_F$  : Fermi düzeyindeki elektron enerjisi (Fermi energy),  $E_v$  : Valans bandının üst bölgelerinde olan elektronların enerjileridir.

Eğer bu bariyerler boyunca herhangi bir sıcaklık farkı yoksa ve eğer bu yapı güneş pilinde olup aydınlatma bulunmuyorsa, Fermi enerjisi eklem boyunca hep aynıdır. Yukarıdaki şekilde karanlıkta, termal olarak oluşan azınlık taşıyıcılarının eklem boyunca sürüklenmesi ters doyum akımı oluşturur. Sıfır besleme anında ise bu akım çoğunlukta bulunan taşıyıcıların ters yöndeki akımıyla dengelenir. Dolayısıyla net akım sıfır olur. İleri beslemede ise akımın net yönü p'den n'e doğrudur. Bu bölgelerde bulunan enerji farkları;  $E_c - E_F$  ve  $E_F - E_v$  sıcaklığa ve p,n bölgelerinin katkılanmalarına bağlıdır. Bu şekillerde görülen ise sıcaklığın tüm bölgelerde aynı olması ama katkılanma miktarlarının farklı olduğudur. Eğer  $E_F - E_v$ ,  $E_c - E_F$  den küçükse bu durumda malzeme p-tipidir ve etkin taşıyıcılar delikler olur. Aksi olursa madde n-tipidir ve taşıyıcılar elektronlar olur.

Aydınlanma anında ise aşağıdaki şekilde durumu ortaya çıkar. Fotonlar p-n eklemine düşmeye başladıklarında elektron-delik çiftleri oluşur, bunlar ise dengeyi bozarlar. Çünkü n tarafında oluşan delikler ve p tarafında oluşan elektronlar artık fazla gelirler. Dolayısıyla p tarafında oluşan elektronlar n tarafına, n tarafında oluşan delikler de p tarafına gitmeye çalışırlar. Eğer eklem o anda açık devreyse bir akım beklenemez böylelikle eklem kendini ileri doğru besler durumda olur. Aşağıdaki şekilde ise p-n eklemlerindeki ileri besleme ortaya çıkar.



Şekil 3.5. Aydınlanma anında eklem

### 3.6. Foton Akımı

Öncelikle, aydınlatma altında elektron-delik çiftlerinin oluşması için ilk gerekli şart, fotonların enerjilerinin yasak band enerjisinden fazla olmasıdır.

$$h\nu \geq E_g \quad (3.7.)$$

İşte bu şart sağlandığında, elektron-delik çiftlerinin oluşma hızı (generation rate)  $G(\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1})$  ile gösterilebilir.

Diyodun alanı A olsun, difüzyon uzunluğunu ise L olarak tanımlayalım.

Bu durumda n tarafında saniyede oluşan delik sayısı =  $AL_h G$

Aynı şekilde p tarafında saniyede oluşan elektron sayısı =  $AL_e G$

Foton akımı ise bu parçacıkların sayısı ile yükün çarpımı demektir.

Dolayısıyla eklem boyunca bu taşıyıcıların sürüklenmesiyle oluşan akım:

$$I_h = qAGL_h \quad (\text{deliklerin akımı}) \quad (3.8.)$$

$$I_e = qAGL_e \quad (\text{elektronların akımı}) \quad (3.9.)$$

Toplam akım bu iki akımın toplamıdır. Aynı zamanda bu akımı foton akımı olarak tanımlayabiliriz:

$$\begin{aligned} I_f &= qAGL_h + qAGL_e \\ &= qAG(L_h + L_e) \end{aligned} \quad (3.10.)$$

Bu bulduğumuz foton akımı ( $I_f$ ) n tarafından p tarafına doğru akar. Ama esas diyot denklemi p tarafından n tarafına doğrudur.

### 3.7. Diyot Akımı

İdeal diyot denklemi şöyle verilir:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (3.11.)$$

Burada  $I_0$  olarak verilen doyum akımıdır.

Eğer bu p-n eklemi aydınlatılıyorsa foton akımı oluşur. Dolayısıyla toplam akım:

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1) - qAG(L_h + L_e) \quad (3.12.)$$

olur. (3.10.)'u kullanarak:

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1) - I_f \quad (3.13.)$$

elde ederiz. Burada foton akımını çıkartmamızın sebebi diyot akımına göre ters yönde olmasıdır. Ayrıca oluşan foton akımı ters doyum akımı  $I_0$  dan çok daha büyüktür ve yönü de  $I_0$  ile aynıdır.

### 3.8. Kısa Devre ve Açık Devre Durumu

Kısa devre olması durumunda  $V=0$  olacaktır. Bunu denklemde yerine koyduğumuzda:

Sadece:

$$I_f = I_{sc} = -qAG(L_h + L_e) \quad (3.14.)$$

kalacaktır. Dolayısıyla

$$I_f = qAG(L_h + L_e) \quad (3.15.)$$

şiddetindedir. Açık devre olması durumunda ise  $I = 0$  olacaktır.

Bu sefer denklemi yani (3.12.) yi sıfıra eşitleyelim,

$$I_0(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1) = qAG(L_h + L_e) \quad (3.16.)$$

$$e^{\frac{qV}{k_B T}} = \frac{qAG(L_h + L_e)}{I_0} + 1 \quad (3.17.)$$

$$V = V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left[ \frac{qAG(L_h + L_e)}{I_0} + 1 \right] \quad (3.18.)$$

Yukarıdaki (3.15.) de bulduğumuz değeri yerine koyarsak:

$$V = V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left[ \frac{I_f}{I_0} + 1 \right] \quad \text{elde ederiz.} \quad (3.19.)$$

$I_0$  akımı genelde ufak bir değerdir ve  $\frac{I_f}{I_0}$  değeri 1 sayısına göre büyük bir değerdir. Dolayısıyla denklemdaki 1 ihmal edilebilir. Elimizdeki açık devre voltajı ise:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left[ \frac{I_f}{I_0} \right] \quad \text{olur.} \quad (3.20.)$$

Buradan elde ettiğimiz sonuç gösterir ki, sabit bir  $I_f$  için,  $V_{oc}$  azalan doyum akımına karşılık logaritmik olarak artar. Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta da; band eğrilikleri ve enerji durumları ileri beslenmiş bir diyot gibi olmasına rağmen, taşıyıcı yönünün ters olmasıdır. Zaten  $V_{oc}$  potansiyel farkını oluşturan taşıyıcı akışıda budur.

### 3.9. Güç Tanımı ve Maksimum Güç

Gücün tanımı  $P = VI$  dır. Bunu elde ettiğimiz denklemlere uygularsak;

$$P = VI \quad (3.21.)$$

$$P = V \left[ I_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - qAG(L_h + L_e) \right] \quad (3.22.)$$

$$P = V \left[ I_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - I_f \right] \quad \text{olarak yazabiliriz.} \quad (3.23.)$$

Yine bildiğimiz gibi maksimum gücü ( $P_m$ ) bulmak için;  $I_m$  ve buna karşılık gelen  $V_m$ 'i bulmak gerekir. Dolayısıyla yukarıdaki denklemin voltaja göre türevini alıp sıfıra eşitleyelim.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (3.24.)$$

$$\frac{d}{dV} \left[ VI_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - VI_f \right] = 0 \quad (3.25.)$$

Türevin sonucu ise:

$$\left[ I_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) + \frac{q}{k_B T} VI_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} \right) - I_f \right] = 0 \quad \text{olur.} \quad (3.26.)$$

$$\left[ I_0 e^{\frac{qV}{k_B T}} \left( 1 + \frac{q}{k_B T} V \right) - I_0 - I_f \right] = 0 \quad (3.27.)$$

$$e^{\frac{qV}{k_B T}} = \frac{I_0 + I_f}{I_0 \left( 1 + \frac{q}{k_B T} V \right)} \quad (3.28.)$$

$$V = \frac{k_B T}{q} \ln \left[ \frac{I_0 + I_f}{I_0 \left(1 + \frac{q}{k_B T} V\right)} \right] \quad (3.29.)$$

$$V = \frac{k_B T}{q} \ln \left[ \frac{1 + \frac{I_f}{I_0}}{\left(1 + \frac{q}{k_B T} V\right)} \right] \quad (3.30.)$$

$$V = \frac{k_B T}{q} \ln \left[ 1 + \frac{I_f}{I_0} \right] - \frac{k_B T}{q} \ln \left( 1 + \frac{q}{k_B T} V \right) \quad (3.31.)$$

(3.20.) yi kullanarak;

$$V = V_{oc} - \frac{k_B T}{q} \ln \left( 1 + \frac{q}{k_B T} V \right) \quad (3.32.)$$

buluruz. Bu denklem bize maksimum güç elde edilen yerdeki potansiyeli verir. Dolayısıyla aynı denklemi şöyle yazabiliriz:

$$V_m = V_{oc} - \frac{k_B T}{q} \ln \left( 1 + \frac{q}{k_B T} V_m \right) \quad (3.33.)$$

Şimdi ise  $I_m$  akımını tanımlayalım: Bunun için aşağıdaki denklemleri tekrar kullanmalıyız.

$$\left[ I_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) + \frac{q}{k_B T} V I_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} \right) - I_f \right] = 0 \quad (3.26.)$$

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - I_f \quad (3.13.)$$

$$I_m = I_0 \left( e^{\frac{qV_m}{k_B T}} - 1 \right) - I_f \quad (\text{Güneş pilindeki maksimum noktanın denklemi})$$

(3.26.) dan  $I_f$ 'i çekip (3.13) de yazarsak:

$$I_m = -\frac{q}{k_B T} V_m I_0 e^{\frac{qV_m}{k_B T}} \quad \text{bulunur.} \quad (3.34.)$$

Şimdi ise (3.14.)  $I_f = I_{sc}$  ve (3.19.) da olan  $V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left[ \frac{I_f}{I_0} + 1 \right]$  denklemlerini kullanalım. (3.19.) dan  $I_0$ 'ı çekersek ve  $I_f$  yerine de  $I_{sc}$  yazarsak,

$$\ln \left[ \frac{I_f}{I_0} + 1 \right] = \frac{qV_{oc}}{k_B T} \quad (3.35.)$$

$$\frac{I_f}{I_0} = e^{\frac{qV_{oc}}{k_B T}} - 1 \quad (3.36.)$$

$$I_0 = \frac{I_f}{e^{\frac{qV_{oc}}{k_B T}} - 1} \quad (3.37.)$$

elde ederiz. Denklem (3.14.)'e göre  $I_f = I_{sc}$ , bunu ise (3.34.) de kullanırsak,

$$I_m = -\frac{qV_m}{k_B T} \frac{I_{sc} e^{\frac{qV_m}{k_B T}}}{e^{\frac{qV_{oc}}{k_B T}} - 1} \quad (3.38.)$$

olur.

Şimdi ise gücün tanımını yeniden kullanalım.  $P_m = V_m I_m$ . Bu ise (3.33.) ve (3.38.) in çarpımıdır:

$$P_m = -V_m \frac{qV_m}{k_B T} \frac{I_{sc} e^{\frac{qV_m}{k_B T}}}{e^{\frac{qV_{oc}}{k_B T}} - 1} = -V_m^2 \frac{q}{k_B T} e^{\frac{qV_m}{k_B T}} \frac{I_{sc}}{e^{\frac{qV_{oc}}{k_B T}} - 1} \quad (3.39.)$$

veya

$$P_m = -I_0 V_m^2 \frac{q}{k_B T} e^{\frac{qV_m}{k_B T}} \quad (3.40.)$$

Bu denklemlerde gücün negatif değer taşıması sistemin bize iş yaptığını gösterir.

### 3.10. Dönüşüm Verimi ( $\eta$ ) ve Doldurma Faktörü (FF)

Fotovoltaik hücrelerle ilgili diğer önemli karakteristiklerden dönüşüm verimi (conversion efficiency)  $\eta = \frac{P_m}{P_i}$  olarak tanımlanır. Burada  $P_m$  maksimum güç (yukarıda bulduğumuz) ve  $P_i$  ise hücreye giren güçtür. Yani hücreye giren ışığın gücünün ne kadarının fotovoltaik güce dönüştüğünü belirtir. Denklemlerle ifade edersek ve (3.40.)'ı kullanırsak:

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{I_0 V_m^2 \left( \frac{q}{k_B T} \right) e^{\frac{qV_m}{k_B T}}}{P_i} \quad \text{olarak tanımlayabiliriz.} \quad (3.41.)$$

Bir de en sık kullanılan özelliklerden biri olan doldurma faktörü (fill factor) vardır. Bunun tanımı ise:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{sc}} \quad (3.42.)$$

Bu değer de hücreler tasarlanırken sıklıkla kullanılan bir özelliktir. Birçok güneş pili için bu değer yaklaşık 0.7 civarındadır.

### 3.11. $\eta$ ile $E_g$ ilişkisi

Görüldüğü gibi fotovoltaiik hücre tasarlarken öncelikle dönüşüm verimine dikkat etmemiz gerekiyor. Çünkü belli bir aydınlatma altında, hücrelerin performansını belirleyen faktör(ler), gelen ışığın ne kadarının fotovoltaiik olarak çevrildiğidir yani dönüşüm verimidir.

Daha önceki çalışmalarda,  $E_g$ 'nin yani yasak bant aralığının enerjisinin  $\eta$  değerine doğrudan etki ettiği gösterilmiştir [Loferski, 1956]. Şimdi bunu denklemlerle görelim:

Temel diyot denklemlerinde türetilen doyum akımı;  $I_0 = K(T)e^{\frac{E_g}{k_B T}}$  şeklinde verilir. Burada  $K(T)$  sıcaklığa bağlı olarak değişen bir katsayıdır.  $I_0$  akımı genelde düşük bir akımdır ancak üssel ifadelerde etkisi artar. Oda sıcaklığında  $T \approx 300^\circ\text{K}$  alınabilir. Yani  $k_B T \approx 26 \text{ meV}$  olur. Bu durumda doyum akımı:

$$I_0 \approx K(300^\circ\text{K}) e^{-38 E_g} \text{ olur.}$$

Daha önce bulduğumuz denklemde  $V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left[ \frac{I_f}{I_0} \right]$  (3.20.) şeklindeydi.

$$V_{oc} \approx 0.026 (\ln I_f - \ln I_0)$$

$$\ln I_0 = \ln K(300^\circ\text{K}) - 38 E_g$$

$$V_{oc} \approx 0.026 (\ln I_f - \ln K(300^\circ\text{K}) + 38 E_g)$$

$$V_{oc} \approx 0.026(38E_g + \ln(\frac{I_f}{K_{300}})) \text{ olarak buluruz.}$$

Bu denkleme göre;  $E_g$  arttıkça  $V_{oc}$  de artmaktadır.

Denklem (3.33.)'ü eğer oda sıcaklığında incelersek,  $V_{oc}$  arttıkça  $V_m$  da artacaktır. Dolayısıyla  $V_m$  da doğrudan  $E_g$  değerinden etkileniyor. Yani  $E_g$  arttıkça  $V_m$  nin değeri de artıyor.

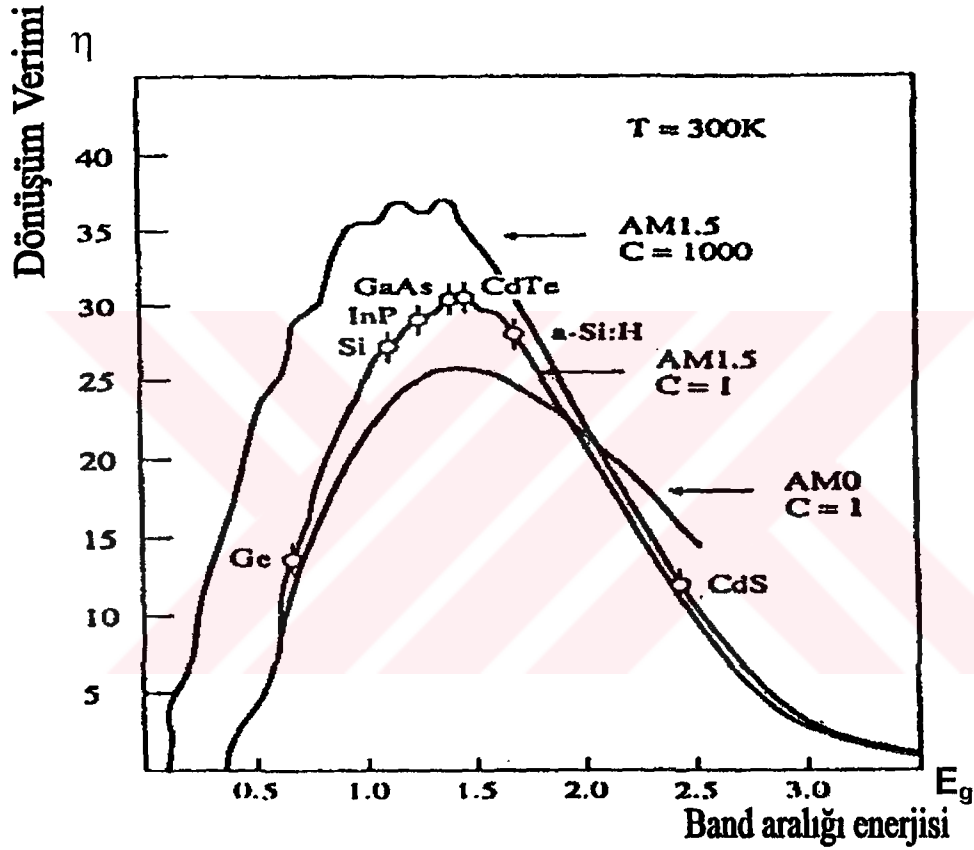
Son olarak dönüşüm verimi denklemine bakarsak :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{I_0 V_m^2 \left( \frac{q}{k_B T} \right) e^{\frac{qV_m}{k_B T}}}{P_i} \quad (3.41)$$

Bulduğumuz  $I_0 \approx K(300^\circ K) e^{-38E_g}$  değerini yerine koyarsak,

$$\eta = \frac{38K(300^\circ K) V_m^2 e^{38(V_m - E_g)}}{P_i} \text{ buluruz.}$$

Bu matematiksel ifade bize,  $\eta$  değerinin belli bir noktada maksimuma ulaştığını gösterir. Bu denklemde kullanılan  $K$  değeri esasında her yarıiletken için ayrı ayrı hesaplanmalıdır ama genelde değişik yarıiletkenlerde yakın değerler alır. Aşağıdaki grafikte değişik yarıiletkenlerin yasak band enerjisi aralıklarıyla  $\eta$  değerinin nasıl değiştiğini görelim:



**Grafik 3.5.** Bant aralığı enerjisine karşılık gelen dönüşüm veriminin farklı yarıiletken güneş pillerindeki değeri. Burada AM1.5 güneş tepedeyken yaptığı  $48^\circ$  lik açıdır. C (concentration) değeri ise güneşin ne kadar oranda yoğunlaştırıldığını gösterir. C=1000 demek, güneş ışığının 1000 kere yoğunlaştırılmış halidir.

Buradan şu sonucu çıkartabiliriz. Daha önceden gördüğümüz gibi, yasak band aralığının altında kalan daha düşük enerjili fotonlar soğurulmuyorlar. Bu durumda enerjisi band aralığından fazla olan fotonları kullanmak gerekir. Fakat gelen fotonların enerjileri bu aralığı fazla

geçmemelidir, yoksa ısı enerjisine dönüşüm olur ve verim yine düşer. Dolayısıyla gelen fotonlar için en ideal dalga boyu, hücrenin maksimum soğurmayı yaptığı  $E_g$  civarındaki enerjiye karşılık gelen dalgalı boylardır.

Yine grafiklerden anlaşılıyor ki, her yarıiletkenin dönüşüm veriminin teorik bir sınırı var. Dolayısıyla ne kadar teknolojik yenilikler yaparsak yapalım, ancak bu sınırları zorlayabiliriz.

Yapılan teorik hesaplamalarda hep deneysel değerler ve bunlara sahip olan p-n eklemleri kullanılmıştır. Bunların sonucunda da  $qV_{oc}$  hiçbir zaman  $E_g$ 'a eşit olamaz. Ama matematiksel olarak eşit oldukları varsayılsa (yani her soğurulan foton  $I_{sc}$  için bir taşıyıcı oluştursa):

Dönüşüm verimi :

$$\eta(E_g) = \frac{E_g N_g}{E_{toplam enerji}} \text{ olur.}$$

Bu denklemde kullanılan  $N_g$  toplam foton sayısıdır ( $E \geq E_g$ ).

Spektrumdaki foton dağılımı ise:

$$N_g = \int_{h\nu=E_g}^{\infty} n(h\nu) d(h\nu)$$

$$E_{toplam enerji} = \int_{h\nu=E_g}^{\infty} h\nu n(h\nu) d(h\nu)$$

Eğer 6000°K de bir siyah cisim kullanılarak güneş spektrumu uygulanır ve  $E_g \approx 1.1$  eV alınırsa buna karşılık gelen  $\eta_{max}(1.1\text{eV}) \approx \%44$  olur [Trivich and Flinn, 1955].

GaAs güneş pilleri grafiklerden de anlaşılabilir gibi güneş spektrumuyla en uyumlu ve verimli çalışan pillerdir. Ama pahalı olmalarından dolayı daha çok uzay çalışmalarında kullanılırlar.

### 3.12. $\eta$ ile Sıcaklığın İlişkisi

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left[ \frac{I_f}{I_0} \right] \quad (3.20.)$$

Temel diyot denklemlerinde türetilen doyum akımı:

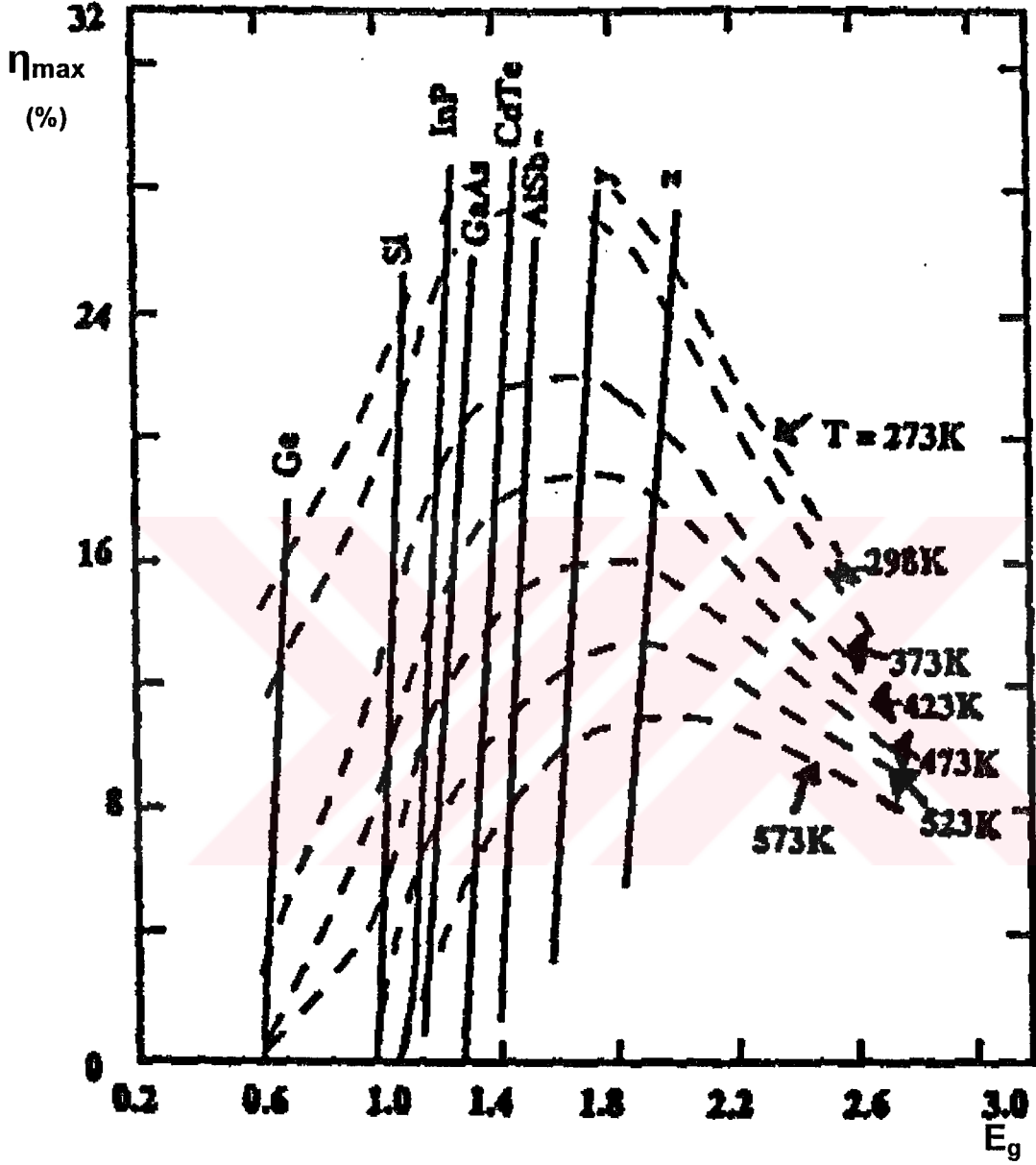
$$I_f = I_0 \left( e^{\frac{qV_{oc}}{k_B T}} - 1 \right)$$

Bunu denklemdeki yerin koyarsak:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( e^{\frac{qV_{oc}}{k_B T}} - 1 \right) \text{ buluruz.}$$

Bu matematiksel ifadeden sıcaklık arttıkça  $V_{oc}$  değerinin azaldığını göreceğiz.

Aşağıdaki grafikte bazı hesaplanan değerleri görelim.



Grafik 3.6. Sıcaklığa bağlı olarak  $\eta_{\max}$ 'a karşılık  $E_g$  grafiği.

Grafikten de görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça tüm yarıiletkenlerin  $\eta_{\max}$  değeri düşmektedir. Ayrıca  $\eta_{\max}$  a karşılık çizilen  $E_g$  değeri de sıcaklık arttıkça daha büyük  $E_g$  değerlerine denk gelmektedir.

## 4. PV SİLİSYUM DENEYLERİ

### 4.1. Deney Düzenekinin Hazırlığı

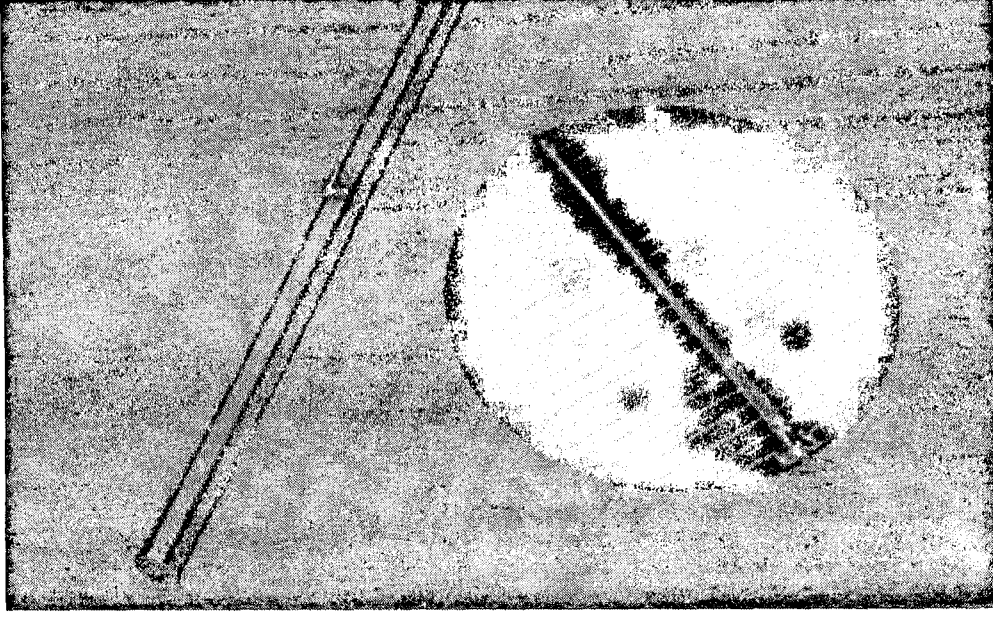
Fiziksel prensipler bölümünde bulduğumuz teorik hesaplamaları burada üretilen pillerde daha sağlıklı kullanabilmek için öncelikle hazır bir fotovolttaik hücre kullanıldı.

#### Ölçüm Malzemeleri:

- 1-) Tek-kristal güneş pili
- 2-) KEITHLEY-2400 model SourceMeter
- 3-) OSRAM, ULTRA-VITALUX Güneş lambası
- 4-) Ölçüm Tablası
- 5-) Karanlık bölge için kapaklı siyah kutu.

#### 4.1.1. Tek-kristal güneş pili

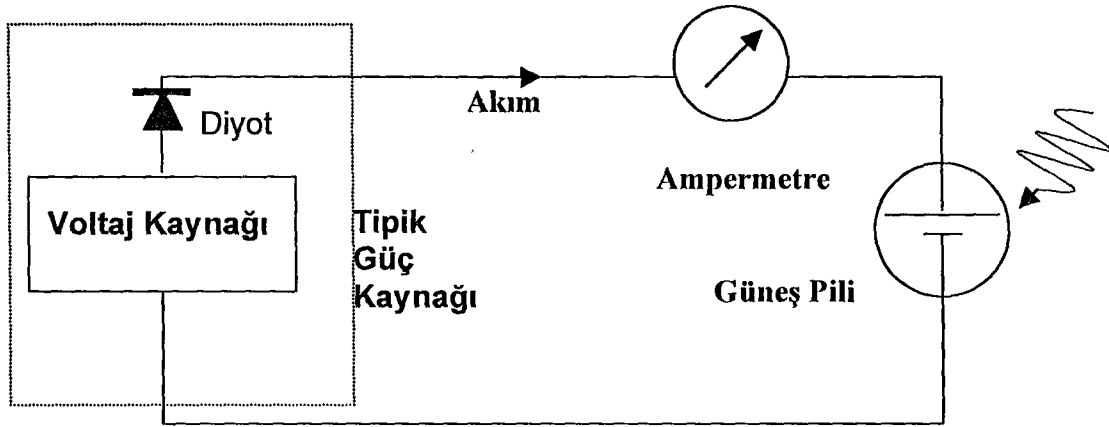
Bu güneş pili piyasadan temin edildi. Tahminen Alman yapısı olan bu pilin çapı bir standart olan 76 mm boyundadır. Fakat pil sonradan alt tabakadan ve yanlardan tıraşlanmıştır. Böylelikle kalınlığı 0.32 mm ye kadar düşürülmüştür. Bu kalınlık tabakasına arka kontak olarak kaplanmış bulunan nikel metalinin kalınlığı da dahildir. Ön tarafında ise ızgara olarak yine nikel metali kullanılmış ve birbirine 3.3 mm aralıklarla çizgiler yapılmıştır. Bu çizgileri ise birleştiren ve en ortadan geçen 72 mm uzunluğunda bir toplayıcı mevcuttur. Ön tarafına bakıldığında ise mavi-lacivert görünen bir film tabakası vardır. (Fotoğraf 4.1.).



**Fotoğraf 4.1.** Deneysel ölçümlerde kullanılan hazır bir fotovoltaiik hücre(tek-kristal silisyum, üzeri anti-refle film kaplı).

#### 4.1.2. KEITHLEY Model 2400 SourceMeter

Daha önceki denemelerde bir voltaj kaynağı bir de ampermetre kullanılmıştı. Fakat güneş pilinin ürettiği akım devrede voltaj kaynağının akımına ters yönde akmaktadır. Genelde güç kaynaklarında ters akım koruma bulunur. En sık kullanılan basit güç kaynaklarında ise akım diyotlar üzerinden doğrultulmaktadır. Dolayısıyla güneş pilinin ürettiği akım ters yönde kaynaklardan geçemez. Bu yüzden sadece tek yönde ölçüm yapılır (şekil 4.1.). Fakat kullanılan SourceMeter hem voltaj kaynağı hem de ampermetre olarak kullanılabilir. Bunu kullanışlı yapan en önemli özelliği ise ters yönde de akımı geçirebilmesi yani "current-sink" olarak davranabilmesidir.



**Şekil 4.1.** Tipik bir güç kaynağı ile kurulan I-V ölçüm düzeneği. Güneş pilinin üreteceği akım ters yönde olacaktır ve güç kaynağındaki bulunan diyot buna engel olacaktır bu yüzden ölçüm sisteminde ayarlamalar yapmak gerekir.

Kullanım anında SourceMeter tarama moduna ayarlandı. Kaynak olarak voltaj, ölçüm olarak ise akım otomatik-aralık bulma modundaydı. Ölçüm aralığı ise 20 volt ve buna karşılık gelen en uygun akım aralığı 1.05 A idi. Ölçüm zamanı ise "normal" modundaydı. Dolayısıyla -2.5 volttan başlayarak 0.05 volt aralıklarla 2.5 volta kadar hem karanlıkta, hem de aydınlıkta ölçümler yapıldı. Fakat aydınlatma anında 4. bölgede çıkan fotovoltaj olayın daha iyi görülmesi için -0.1 volttan başlayarak 0.01 volt aralıklarla 0.72 volta kadar veri alındı. Bu sayede  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  gibi özellikler daha iyi ölçülmüş oldu.

#### 4.1.3. OSRAM, ULTRA-VITALUX Güneş lambası

Deneyler esnasında ise OSRAM firmasına ait ULTRA-VITALUX marka güneş lambası kullanıldı. Bu lambanın genel özellikleri aşağıdadır:

- E-27 tip ampul yuvasına sahip.
- 220 VAC
- 300 W

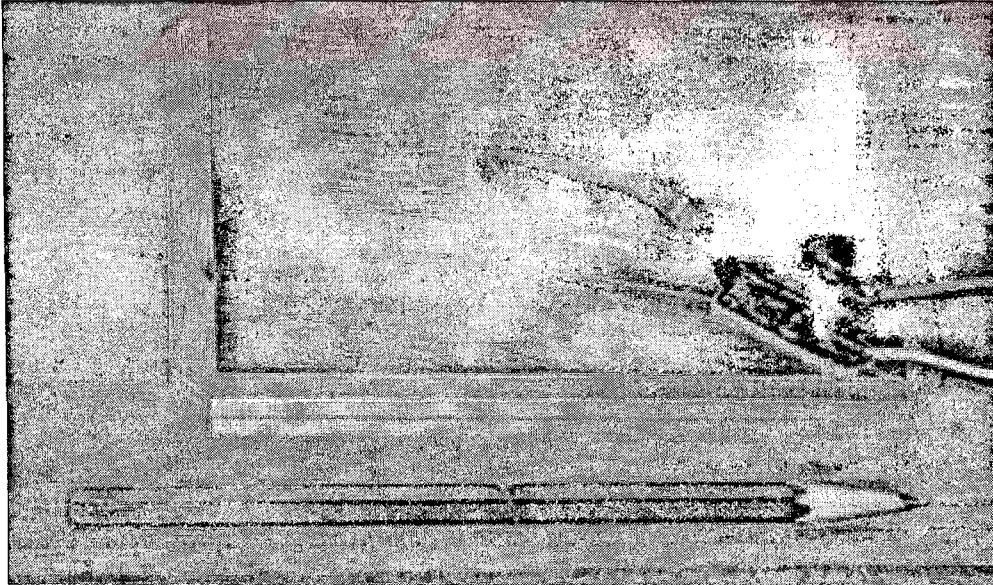
Lambanın iç yapısında quartz bir yakıcı ve tungsten filaman vardır. Ayrıca iç çeperlerinde yansıtıcı tabaka bulunur. Dolayısıyla ışığın genel olarak paralel bir şekilde ortama verilir. Işığın bileşimi ise güneşte olduğu gibi ultraviyole + görünür + infrared bileşenlerden oluşur.

Ölçümlerde lamba metal bir kafes içerisinde tutulmuştur ve numunelere 20 cm uzaklıktadır. Ölçümler esnasında önce lamba 1-2 dakika kendi halinde ısıtılmıştır. Böylelikle katalog değerlerine en yakın spektruma ulaşması sağlanır. Örnekler ise hızlı bir şekilde ölçülürler ve ısınmadan dolayı olabilecek hatalar minimuma indirilir.

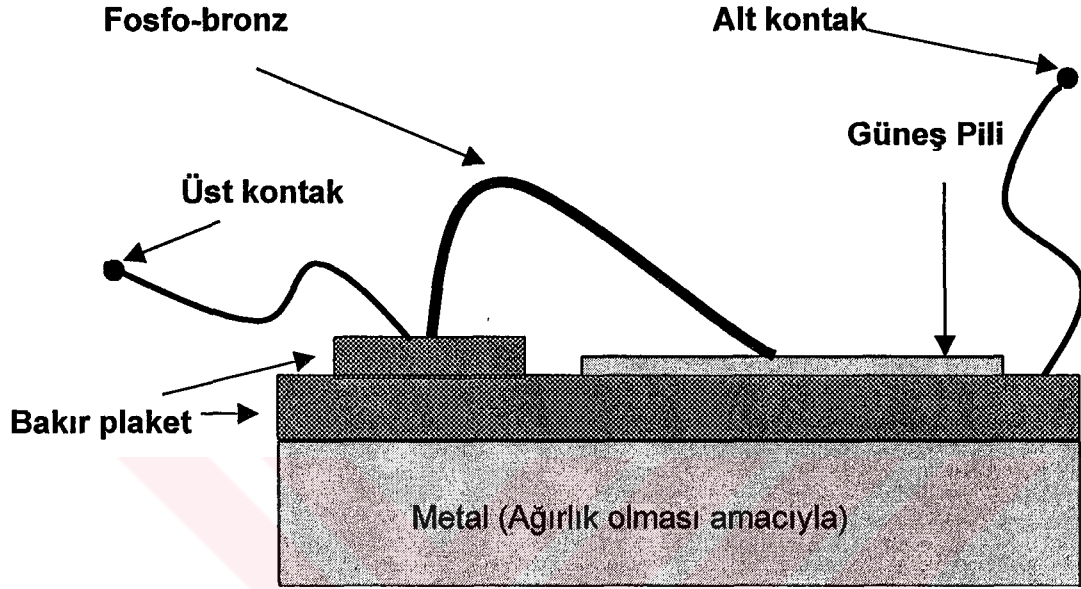
Lamba, TÜBİTAK-UME optik laboratuvarında ölçülmüştür. Güç ölçümü sadece  $525 \pm 10$  nm aralığında yapılmıştır. Sonuç olarak  $4 \cdot 10^{-3} \text{ W / cm}^2$  güç ölçümü yapılmıştır.

#### 4.1.4. Ölçüm Tablası

Deneyde kullanılan numunelerin hem ön hem de arka yüzeyleri metalizasyonla kaplı olduğu için bunlardan iki taraflı kontak almak gerekir. Bunun için bir ölçüm tablası tasarlanmıştır. Bu ölçüm tablasının en alt kısmında kalın bir plaka (5 mm) alüminyum levha vardır. Bunun üzerine piyasada elektronik devre yapmak için kullanılan tek yüzü bakır kaplı bir plaket yapıştırılmıştır. Bakır kaplı olan yüz (üst taraf) parlatılıp temizlenmiştir. Böylelikle direnç mümkün olduğu kadar azaltılmaya çalışılmıştır. Ayrıca kalın bir tel buraya lehimlenip alt kontak alınmıştır. Yine aynı plakaya kesilmiş ufak bir bakır plaket yapıştırılmıştır. Bunun üzerine ise yay özelliği taşımasından dolayı fosfo-bronz metali eğilerek lehimlenmiştir. Fosfo-bronzun zamanla oksitlenmesini önlemek için kontağın uç kısmı lehimlenmiştir. Bu ise üst kontak alınmasını sağlar. Dolayısıyla araya konan güneş pili aynı zamanda da fosfo-bronz ile sıkıştırılmış olur. Bu ise direnci azaltır. Tabii ki üst kontağı sağlayan fosfo-bronz parça, gelen ışığı engellememesi için belli oranda kesilmiştir ve boyutu küçültülmüştür (fotoğraf 4.2.).



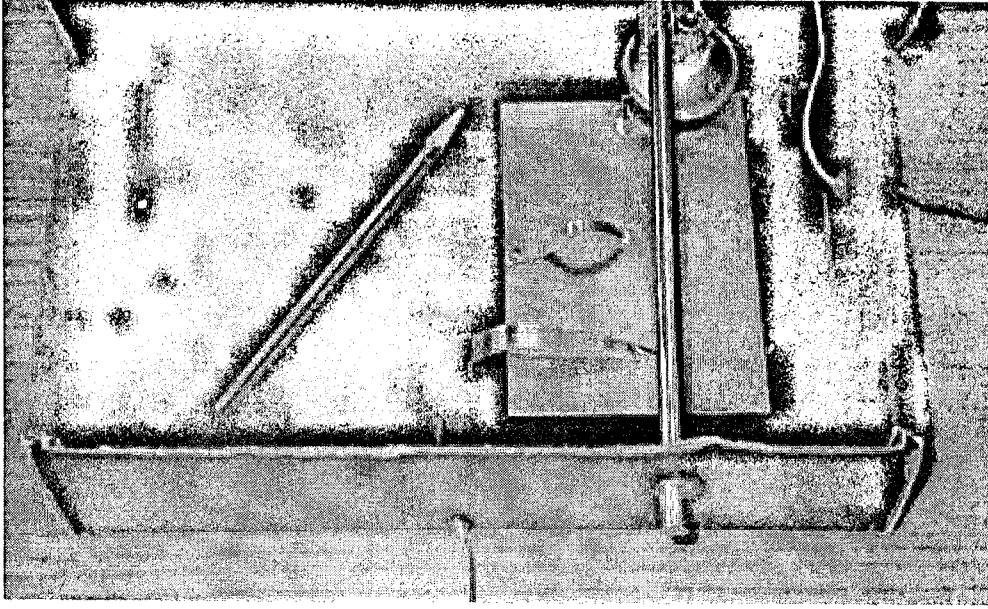
**Fotoğraf 4.2.** Deneylerde numunelerin üzerine konulduğu iletken ölçüm tablası. Alt tarafta alüminyum, üzerinde ise bakır plaket bulunmaktadır. Üst kontaklardan akım toplayan parça ise fosfobronz metalindendir.



**Şekil 4.2.** Ölçüm tablasının yan kesitten görünüşü. Üst ve alt kontaklar arasına güneş pili konulur ve her iki kontakta üretilen akım toplanır.

#### 4.1.5. Karanlık Bölge İçin Kapaklı Siyah Kutu

Karanlık ölçümleri için basit bir siyah karton kutu kullanılmıştır. Bu kutunun içerisine de yine metalden yapılmış ölçüm tablosu yerleştirilmiştir. Ayrıca yan ve diğer bölümlerden ışığın sızmasını önlemek için ek parçalar yapıştırılmıştır. Dolayısıyla mümkün olan en az ışık ortamında ölçümler yapılmıştır (fotoğraf 4.3.).



**Fotoğraf 4.3.** Güneş pillerinin karanlık bölgelerdeki ölçümleri için yapılan kapaklı siyah kutu. Kutu içerisinde yine metalden yapılmış ölçüm tablası bulunmaktadır.

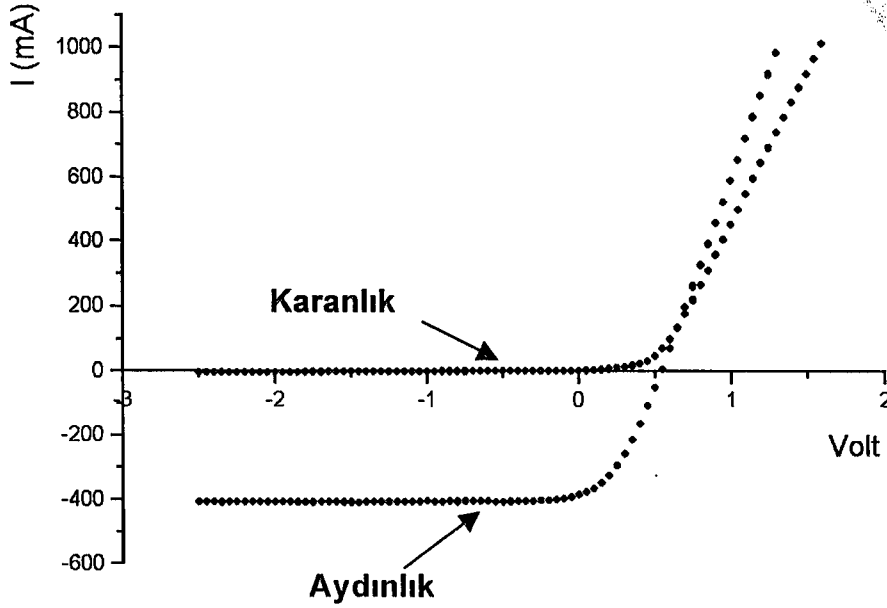
## 4.2. Hazır Pil Ölçüm ve Karakterizasyonu

Yukarıda anlatılan malzemelerle hem aydınlık hem de karanlık ortamda ölçümler alınmıştır. Fakat aydınlık bölge ölçümleri sırasında veriler mümkün olduğu kadar çabuk alınmıştır çünkü lambanın oluşturduğu ısı belli bir süre sonra verimin düşmesine neden olabilir. Bu ise sağlıklı bilgileri engellemiş olur.

Dikkat edilmesi gereken başka bir husus ise; ölçümün küçük akımlardan büyük akımlara doğru yapılması gereğidir. Çünkü büyük akımlardan başlanırsa yine ısınma olacak ve örnek üzerinden geçen diğer küçük akımlar bundan etkileneceklerdir. Çizelge 4.1. de ölçüm sonuçları görülmektedir. Ayrıca grafik 4.1.'de de bu sonuçların tipik bir diyot eğrisi çizdiği görülür.

| Volt  | I (mA)   |          | Volt  | I (mA)   |          |
|-------|----------|----------|-------|----------|----------|
|       | Aydınlık | Karanlık |       | Aydınlık | Karanlık |
| -2,50 | -410,0   | -6,0     | -0,45 | -407,6   | -1,0     |
| -2,45 | -409,5   | -6,5     | -0,40 | -406,4   | -0,9     |
| -2,40 | -408,7   | -6,6     | -0,35 | -405,6   | -0,8     |
| -2,35 | -410,3   | -6,5     | -0,30 | -405,5   | -0,7     |
| -2,30 | -409,5   | -6,4     | -0,25 | -404,6   | -0,7     |
| -2,25 | -409,8   | -6,3     | -0,20 | -403,5   | -0,6     |
| -2,20 | -408,4   | -6,1     | -0,15 | -401,7   | -0,5     |
| -2,15 | -408,1   | -5,9     | -0,10 | -397,6   | -0,4     |
| -2,10 | -409,2   | -5,7     | -0,05 | -392,7   | -0,2     |
| -2,05 | -408,5   | -5,5     | 0,00  | -386,9   | 0,0      |
| -2,00 | -409,0   | -5,4     | 0,05  | -378,5   | 0,6      |
| -1,95 | -409,4   | -5,2     | 0,10  | -367,7   | 1,8      |
| -1,90 | -409,2   | -5,0     | 0,15  | -349,4   | 3,6      |
| -1,85 | -410,2   | -4,8     | 0,20  | -325,2   | 5,9      |
| -1,80 | -410,6   | -4,6     | 0,25  | -295,0   | 8,7      |
| -1,75 | -410,5   | -4,4     | 0,30  | -257,9   | 12,1     |
| -1,70 | -409,8   | -4,3     | 0,35  | -214,6   | 16,4     |
| -1,65 | -409,8   | -4,1     | 0,40  | -164,9   | 22,3     |
| -1,60 | -409,4   | -3,9     | 0,45  | -109,9   | 31,4     |
| -1,55 | -410,3   | -3,8     | 0,50  | -52,6    | 45,9     |
| -1,50 | -410,2   | -3,6     | 0,55  | 5,1      | 68,2     |
| -1,45 | -410,9   | -3,5     | 0,60  | 68,7     | 98,3     |
| -1,40 | -410,0   | -3,3     | 0,65  | 131,4    | 134,7    |
| -1,35 | -409,2   | -3,2     | 0,70  | 195,0    | 175,1    |
| -1,30 | -409,3   | -3,0     | 0,75  | 259,1    | 217,9    |
| -1,25 | -408,2   | -2,9     | 0,80  | 323,5    | 262,2    |
| -1,20 | -409,8   | -2,7     | 0,85  | 388,3    | 307,7    |
| -1,15 | -409,3   | -2,6     | 0,90  | 454,0    | 354,4    |
| -1,10 | -409,0   | -2,5     | 0,95  | 519,4    | 401,2    |
| -1,05 | -409,0   | -2,3     | 1,00  | 585,1    | 448,4    |
| -1,00 | -407,2   | -2,2     | 1,05  | 651,0    | 495,9    |
| -0,95 | -409,2   | -2,1     | 1,10  | 716,9    | 543,7    |
| -0,90 | -409,3   | -2,0     | 1,15  | 783,3    | 592,4    |
| -0,85 | -407,2   | -1,9     | 1,20  | 849,4    | 641,1    |
| -0,80 | -407,9   | -1,8     | 1,25  | 915,4    | 688,0    |
| -0,75 | -407,1   | -1,6     | 1,30  | 981,4    | 735,1    |
| -0,70 | -406,1   | -1,5     | 1,35  | -        | 781,9    |
| -0,65 | -406,5   | -1,4     | 1,40  | -        | 829,5    |
| -0,60 | -407,0   | -1,3     | 1,45  | -        | 874,4    |
| -0,55 | -408,9   | -1,2     | 1,50  | -        | 916,3    |
| -0,50 | -408,4   | -1,1     | 1,55  | -        | 963,6    |
|       |          |          | 1,60  | -        | 1009,3   |

**Çizelge 4.1.** Tek-kristal silisyumun aydınlık ve karanlık ortamlarda alınan dataları. Veriler 50 mV'luk aralıklarla alınmıştır.



**Grafik 4.1.** Tek-kristal silisyum güneş pili için aydınlık ve karanlık bölgelerde alınan verilerin grafikteki durumu (I-V eğrisi). Veri noktaları eşit aralıkta alınmıştır.

Görüldüğü gibi aydınlık ve karanlık ölçümlerde tipik sonuçlar çıkmıştır. Fakat dikkat edilirse aydınlık ölçümlerde direnç biraz daha düşüktür. Bu çıkan dirençleri kabaca hesaplayabiliriz:

0.6 Volt'luk eşik enerjisini geçtikten sonra güneş pili hem aydınlık hem de karanlık bölgelerde yaklaşık lineer bir grafik gösteriyor. Dolayısıyla her iki ayrı ölçümde de eğimlerden yaklaşık direnci hesaplayabiliriz:

Karanlık ölçüm: (1.55 V, 963.6 mA) ve (0.75 Volt, 217.9 mA)

Aydınlık ölçüm: (1.25 V, 915.4 mA) ve (0.90 Volt, 454.0 mA)

$$R_{\text{karanlık}} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1.55 - 0.75}{963.6 - 217.9} \frac{V}{mA} = 0.81 \Omega$$

$$R_{\text{aydınlık}} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1.25 - 0.90}{915.4 - 454.0} \frac{V}{mA} = 0.76 \Omega$$



Görülüyor ki her iki durumda da ölçümlerdeki toplam direnç oldukça küçüktür. Dolayısıyla dirençlerden dolayı fazla kayıp söz konusu değildir.

Şimdi ise aydınlık ölçümünü biraz daha yakından inceleyip pili biraz daha karakterize edelim (çizelge 4.2.).

| <b>Volt</b> | <b>I (mA)</b> | <b>Volt</b> | <b>I (mA)</b> | <b>Volt</b> | <b>I (mA)</b> | <b>Volt</b> | <b>I (mA)</b> |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| -0,10       | -399,03       | 0,10        | -366,47       | 0,30        | -255,65       | 0,51        | -35,73        |
| -0,09       | -397,18       | 0,11        | -364,38       | 0,31        | -246,91       | 0,52        | -23,94        |
| -0,08       | -397,77       | 0,12        | -360,18       | 0,32        | -238,65       | 0,53        | -11,83        |
| -0,07       | -396,42       | 0,13        | -357,40       | 0,33        | -229,39       | 0,54        | -0,15         |
| -0,06       | -394,22       | 0,14        | -354,00       | 0,34        | -220,00       | 0,55        | 12,70         |
| -0,05       | -393,91       | 0,15        | -349,37       | 0,35        | -210,89       | 0,56        | 24,35         |
| -0,04       | -392,65       | 0,16        | -345,80       | 0,36        | -200,95       | 0,57        | 36,49         |
| -0,03       | -391,53       | 0,17        | -341,09       | 0,37        | -190,96       | 0,58        | 48,81         |
| -0,02       | -390,86       | 0,18        | -336,11       | 0,38        | -180,97       | 0,59        | 61,12         |
| -0,01       | -387,91       | 0,19        | -330,92       | 0,39        | -170,55       | 0,60        | 73,37         |
| 0,00        | -386,49       | 0,20        | -323,71       | 0,40        | -160,16       | 0,61        | 85,77         |
| 0,01        | -385,61       | 0,21        | -318,27       | 0,41        | -149,43       | 0,62        | 98,04         |
| 0,02        | -383,42       | 0,22        | -312,47       | 0,42        | -137,86       | 0,63        | 110,48        |
| 0,03        | -382,58       | 0,23        | -305,75       | 0,43        | -127,04       | 0,64        | 122,92        |
| 0,04        | -379,09       | 0,24        | -299,14       | 0,44        | -115,96       | 0,65        | 135,32        |
| 0,05        | -377,84       | 0,25        | -292,67       | 0,45        | -104,95       | 0,66        | 148,32        |
| 0,06        | -376,48       | 0,26        | -285,81       | 0,46        | -90,24        | 0,67        | 160,83        |
| 0,07        | -373,60       | 0,27        | -279,09       | 0,47        | -82,79        | 0,68        | 173,45        |
| 0,08        | -371,87       | 0,28        | -271,36       | 0,48        | -71,15        | 0,69        | 186,19        |
| 0,09        | -369,54       | 0,29        | -263,64       | 0,49        | -59,55        | 0,70        | 198,72        |
|             |               |             |               | 0,50        | -47,65        | 0,71        | 211,29        |

**Çizelge 4.2.** Tek-kristal güneş pilinin aydınlanma anında daha sık ölçüm aralıklarıyla (10 mV) yapılan ölçümleri.

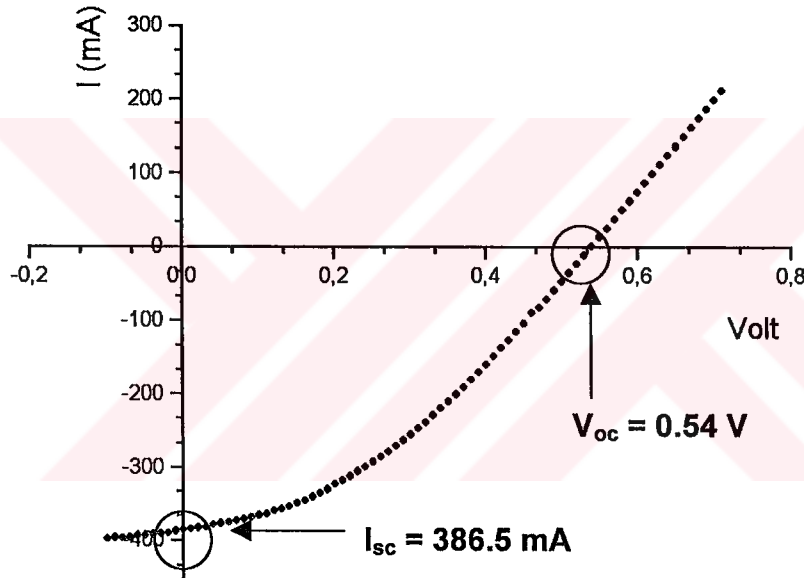
Hesaplamalara geçmeden önce bazı değerleri gözden geçirelim:

Örneğin oda sıcaklığı 23 °C olarak alınırsa:

$$\begin{aligned}
 k_B T &= (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) (23 + 273 \text{ K}) \\
 &= 408.4 \times 10^{-23} \text{ J} \\
 &= 408.4 \times 10^{-23} \text{ J} \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \\
 &= 0.0255 \text{ eV} \text{ bulunur.}
 \end{aligned}$$

$$\frac{q}{k_B T} \approx 39.2 \text{ V}^{-1} \text{ olarak alınabilir.}$$

Şimdi ise grafikten (grafik 4.2.)  $V_{oc}$  ve  $I_{sc}$  değerlerini bulalım:



**Grafik 4.2.** Daha yoğun data noktalarıyla  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  değerlerinin grafikten bulunuşu. Grafik beklenildiği gibi tipik güneş pilinin aydınlık bölgesini göstermektedir.

#### 4.2.1. $V_m$ değeri (teorik)

Öncelikle  $V_m$  değerini hesaplayalım.

$$V_m = V_{oc} - \frac{k_B T}{q} \ln \left( 1 + \frac{q V_m}{k_B T} \right) \quad (3.33.)$$

Grafikten okuduğumuz kadarıyla  $V_{oc} = 0.54$  V dur. Bu durumda denklemimiz:

$$V_m = 0.54 - 0.0255 \ln(1 + 39.2 V_m) \text{ olur.}$$

İterasyon metoduyla bunu denersek (MS-Excel de bulunan ve Tools menüsündeki "solver" fonksiyonu bunu çözmekte yardım eder) görürüz ki 0.46 Voltluk bir değer tam olarak buraya uygun gelir.

Dolayısıyla:

$$V_m = 0.46 \text{ V}$$

#### 4.2.2. $I_m$ değeri (teorik)

Şimdi ise  $V_m$  değerine karşılık gelen  $I_m$  değerini bulalım.

$$I_m = - \frac{q V_m}{k_B T} \frac{I_{sc} e^{\frac{q V_m}{k_B T}}}{\left( e^{\frac{q V_{oc}}{k_B T}} - 1 \right)} \quad (3.38.)$$

Yine değerleri yerine koyalım. Yani ;

$$V_m = 0.46 \text{ V}, V_{oc} = 0.54 \text{ V ve } I_{sc} = 386.5 \text{ mA.}$$

$$I_m = -39.2 V_m \frac{0.3865 e^{39.2 V_m}}{e^{39.2 V_{oc}} - 1}$$

$$I_m = -6.97 e^{39.2(V_m - V_{oc})}$$

$$I_m = -303 \text{ mA}$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{sc}}$$

$$FF = \frac{(-303mA)(0.46V)}{(-386.5mA)(0.54V)} = 0.67 \text{ olarak bulunur.}$$

### 4.2.3. Deneysel Düzeltmeler

Bulduğumuz bu  $V_m$  ve  $I_m$  teorik değerlerinin, I-V grafiğine göre fazla iyimser olduğu görülmektedir. Dolayısıyla şu ana kadar türetilen denklemleri tekrar gözden geçirmemiz gerekir.

Öncelikle diyot denkleminde bulunan değerleri tekrar gözden geçirelim:

Denklem 3.13.'ü bir daha yazalım:

$$I_m = I_0 \left( e^{\frac{qV_m}{Ak_B T}} - 1 \right) - I_{sc}$$

Burada gördüğümüz "A" değeri deneysel gözlemler sonucu çıkmıştır [Photovoltaic Devices, Encyclopedia of Physics]. Genel olarak:

$2 \geq A > 1$  olarak verilir. İdeal denklemlerde ise  $A=1$  olarak alınır. Dolayısıyla bundan sonra  $k_B T$  olarak gördüğümüz her yere  $k_B T \rightarrow A k_B T$  olarak düzeltme çarpanını koymak gerekir.

Şimdi de deneysel güneş pilinin yapısına göz atalım:

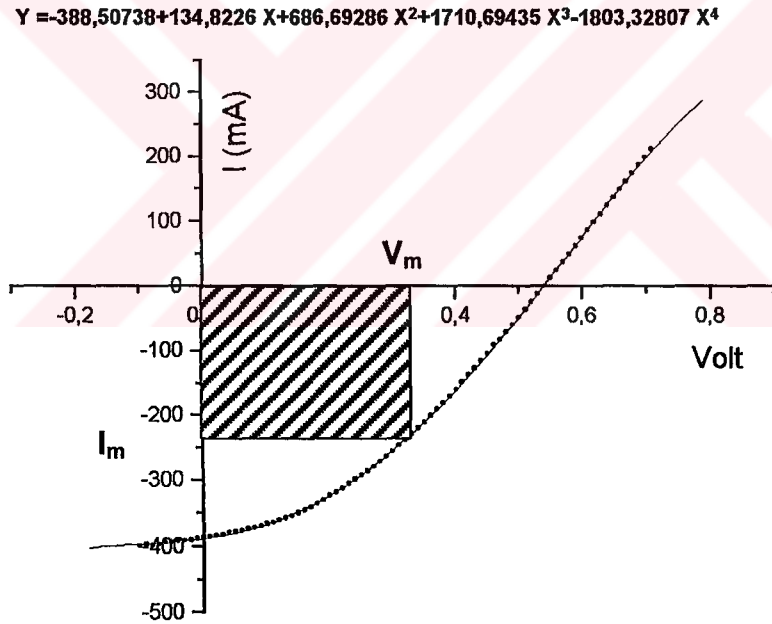
Eğer şekil 3.2.'ye bir daha bakarsak ideal güneş pili denklemini deneysel anlamda bir daha yazmamız gerekir:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{q(V-IR_s)}{Ak_B T}} - 1 \right) - I_{sc} - \frac{V - IR_s}{R_k}$$

Fakat bu kadar çok bilinmeyi hesaplamak yerine deneysel değerlerden bize gerekli olan  $I_m$  ve  $V_m$  bulmak daha iyi olacaktır. Böylelikle grafik üzerinde gerçek  $P_m$  değerini bulmuş oluruz.

#### 4.2.4. Gerçek $I_m$ ve $V_m$ değerleri

Bunun için veri noktalarının grafiğine bir daha bakalım. Nokta nokta görünenler direk ölçümlerin sonuçlarıdır. Microcal Origin programını kullanarak bu noktalara uygun bir polinom denklemi elde edelim. Bu işlemi yapan "Fit Polynomial" adlı fonksiyon; 4. dereceden ve bu noktalardan en uygun şekilde geçen denklemi bize verir. Aşağıda bu polinomu ve veri noktalarıyla grafiğinin uyumunu görüyoruz:



**Grafik 4.3.** Veri noktalarına uydurulan dördüncü dereceden bir polinomla  $I_m$  ve  $V_m$  değerleri matematiksel yollarla tekrar bulunuyor.

Bize gerekli olan deneysel  $I_m$  ve  $V_m$  değerleridir. Bu değerleri veren grafiğin altında kalan ve maksimum alanı veren dikdörtgendir. Bu denklemde  $Y = I$  (mA), ve  $X = \text{Volt}$  olarak geçer.

Ayrıca  $y = f(x)$  yani  $I = I(V)$  dir. Maksimum alan ise:  $A(x)=xf(x)$  olarak verilir. Maksimum alanı veren  $x$  değeri ise  $A(x)$  denkleminin türevinin alınıp sıfıra eşitlenmesiyle bulunur.  $A(x)$  bizim bildiğimiz maksimum güçtür.

Şimdi bu denklemleri uygulamaya koyalım:

$$A(x) = xf'(x) \text{ olarak geçer.}$$

$$A'(x) = f(x) + xf'(x)$$

$$A'(x) = -388.50738 + 134.8226x + 686.69286x^2 + 1710.69435x^3 - 1803.32807x^4 + x(134.8226 + 1373.38572x + 5132.08305x^2 - 7213.31228x^3)$$

$$A'(x) = -388.50738 + 269.6452x + 2060.07858x^2 + 6842.7774x^3 - 9016.64035x^4 = 0$$

Bu denklemi sağlayan “x” değeri (Excel tablolama fonksiyonunu kullanarak) 0.304 olarak bulunur. Yani bize lazım olan  $V_m=0.304$  Volt dur.

$$I_m = f(V_m) \text{ dir.}$$

Bu durumda  $I_m = -251.2$  mA bulunur.

#### 4.2.5. Gerçek FF değeri

Şimdi ise güneş pilinin gerçek FF değerini bulabiliriz.

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{sc}}$$

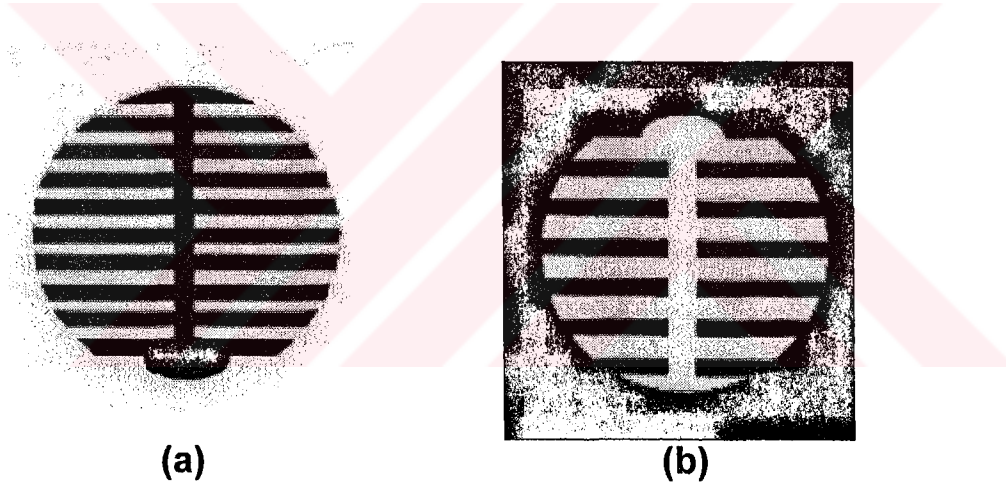
$$FF = \frac{(-251.2mA)(0.304V)}{(-386.5mA)(0.54V)} = 0.37 \text{ olarak bulunur.}$$

### 4.3. PV Maskelerin Hazırlanması

Hazırlanan güneş pillerinden kontak almak için değişik tekniklerle optik ve fiziksel maskeler hazırlanmıştır. Öncelikle optik maskelerin hazırlanışına değinelim.

#### 4.3.1. Optik Maskeler

İstenen şekiller bilgisayarda büyük ölçekte çizildi. Böylelikle detaylar büyük ölçekte daha iyi ayarlandı. Kullanılan program Word'ün şekil çizme araçlarıydı (Line, rectangle gibi...)



**Fotoğraf 4.4.** Optik maskelerin geçirgen(a) ve negatif(b) kağıdındaki görüntüleri.

Lazer yazıcıdan çıktı alındı ve fotoğraf atölyesinde beyaz kağıttaki bu şekil 1/3 oranında küçültülerek şeffaf fotoğraf kağıdına alındı, (Fotoğraf 4.4.a.). Aynı zamanda bu filmin negatifi (Fotoğraf 4.4.b.)'de maske olarak kullanılmak üzere alındı. Böylelikle hem pozitif hem de negatif görüntüye sahip optik maskeler elde edilmiş oldu. Daha çok çeşit ve boyut olması açısından bu maskelerden A4 kağıdına değişik boylarda yapıldı böylece örneklerin yüzey alanına göre farklı ölçeklerde maskeler elde edildi.

Izgara dizaynı bölümünde değinildiği gibi, maskeler fotolitografi yöntemiyle kullanılacaklardır. Bu kısımda da kullanılacak fotoresistin tipi önemlidir. Çünkü duruma göre negatif veya pozitif maske kullanmak gerekir.

### 4.3.2. Fotolitografi Yöntemi

Deneylerde kullanılan fotoresist piyasada elektronikçilerde bulunan "Positiv 20" türüdür. Bazı denemelerde de "R.P.S. 5843" marka fotoresist kullanıldı. Kullanılan fotoresistin markasının çok önemli olmadığı, tazeliğinin önemli olduğu anlaşıldı. Şimdi teknik ve işlemlere göz atalım:

Kullanılan malzemeler:

- 1- Optik Maskeler
- 2- Fotoresist
- 3- Üzerine fotoresist kaplanacak örnek
- 4- UV lamba
- 5- Karanlık mekan
- 6- Aseton
- 7- Metanol
- 8- Ultrasonik temizleyici
- 9- HF
- 10- Kulak temizleme pamukları
- 11- Çeker-ocak
- 12- Deiyonize su
- 13- Aside dayanıklı eldivenler
- 14- Kostik soda
- 15- HCl
- 16-  $H_2O_2$
- 17- Gümüş pasta
- 18- Fosfobronz alaşımı veya alüminyum levha (1-2 mm kalınlığında)

### İşlemler:

Kullanılan p-n ekleme sahip örnekler önce mekanik olarak temizlendi. Çeker-ocak altında, HF'e batırılmış kulak temizleme pamuklarıyla Si örneklerin ön ve arka yüzleri hafifçe bastırılarak temizlendiler\*. Bu şekilde temizlenen örnekler deiyonize su ile yıkandılar. Sonra yine içinde deiyonize su bulunan bir kapta ultrasonik banyo içinde 10-15 dakika kadar yıkandılar. Çıkarıldıklarında ise metanol ve aseton (ultra-pure cinsten) ile temizlendiler ve kurumaya bırakıldılar. Burada önemli olan örnekler üzerinde hiçbir yüzey kirliliği bırakmamaktır. Ayrıca yüzeyler yağdan tamamiyle arındırılmalıdır.

Artık işlem sırası fotoresistin kaplanmasıdır. Bunun için karanlık bir mekan seçildi ve örneklerin kaplanmak istenen yüzeyleri yukarıda olacak şekilde düz bir zeminde kurutma kağıdının üzerine konuldu. Fotoresist çalkalandı ve 3-5 saniye örneklerin üzerinde gezdirilerek sıkıldı. Bu esnada zararlı gazlar teneffüs edilmemelidir. Örnekler 15 dakika kadar kendi hallerine bırakıldılar. Bu esnada fotoresist ince bir tabaka olarak örneklerin üzerine yayıldı ve homojen bir hal aldı. Eğer yüzeyde kirlilik varsa, fotoresist o bölgeye kaplanmaz ve bu belli olur.

Eğer işlem çabuklaştırılmak istenirse, kurutma makinasıyla örnekler kurutulabilir. Bunun için saç kurutma makinasıyla, ya da daha temiz olması isteniyorsa etüv (kurutma dolabı) kullanılarak fotoresist iyice kurutulur.

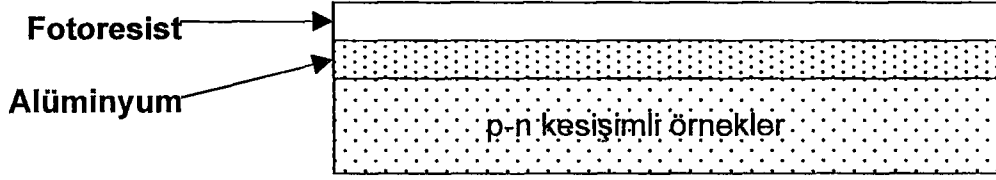
Artık örnekler pozlandırılmaya hazırdır. Örneklerin üzerine çıkartmak istediğimiz şekle göre maske konur.

Şimdi ise deneylerde kullanılan örneklerin hazırlanmasını anlatalım. Bu örneklerin bir kısmı önceden evaporatörde Al kaplanmıştı. Dolayısıyla bu temizlik işlemleri sırasında sadece HF aşaması kullanılmaz. Yoksa HF Al

---

\*HF çok tehlikeli bir asit olduğu için özellikle dikkat edilmelidir. İşlem esnasında önlük ve eldiven giyilmeli gözler korunmalı ve çeker-ocak çalışır durumda tutulmalıdır.

tabakayı aşındırır. Ama diğer tüm temizleme işlemleri uygulanır. Dolayısıyla şu anda elimizde aşağıdaki şekilde örnekler vardır.



**Şekil 4.3.** Üzerine Alüminyum ve fotorezist kaplanmış p-n eklemli örneklerin yan kesiti.

Artık pozlandırma işlemini yapabiliriz. Yukarıdaki örneklere fotoğraf 4.4.a.'daki görüntüyü çıkartmak istiyoruz. Bu durumda kullanacağımız optik maske de aynen şekildeki gibi olacaktır. Bu maske örneğin tam üzerine konur. 3-5 cm üzerine ise UV lamba konulur. Deneylerde kullanılan piyasada black-light adıyla geçen ve çoğu elektrikçide bulunan düşük güçlü (5-10 W) bir floresan lambaydı. Süre tutularak 15-20 dakika kadar pozlandırıldı.

Bu arada kostik soda çözeltisi hazırlandı. Esas formülü NaOH'dir. İlk alındığı zaman katı haldedir. Bir kabın dibine bir kaç parça (parçalar mercimek büyüklüğündedirler) atılarak çözülürler. Bu esnada ekzotermik reaksiyonun sonucu olarak kap ısınır ve kimyasal buhar çıkabilir. İyice çözdükten sonra artık solüsyon kullanıma hazırdır. Bu çözeltiden 1/5 veya 1/6 oranında başka bir kaba alınır ve üzerine su katılır. Çözeltinin derişikliği kullanılan fotorezistin çözünme oranına göre ayarlanır.

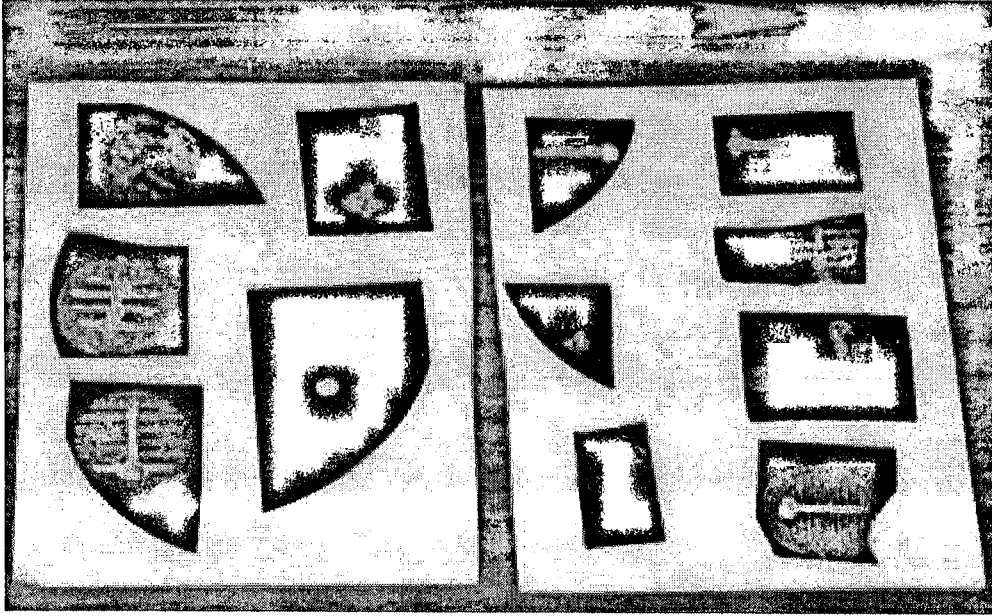
Eğer iyi bir pozlandırma yapılmışsa, örneklerin üzerlerinde şekil az çok seçilebilir. Hemen çözeltinin içinde daldırılırlar. Fotorezist çok çabuk çözünürse çözelti çok derişiktir ve seyreltilmelidir. Ama 1-2 dakika daldırıldıktan sonra bile hala fotorezist çözülüyorsa bu durumda biraz daha ana çözeltiden ilave edilmelidir. Bir kaç denemeden sonra optimum çözelti ayarlanabilir.

Eğer herşey yolunda giderse artık örneklerin üzerine şekiller çıkmıştır, örneklerin yüzeyinde istenen şekilde fotoresist kaplıdır. Fotoresistin altında ise tüm yüzey boyunca alüminyum kaplıdır. Şimdi ise alüminyum yüzeyden sökülmelidir. Sökme işlemi için HCl ve  $H_2O_2$  çözeltisi kullanılır. Alüminyum aktif bir metal olduğu için HCl suyla seyreltik hale getirilebilir. Ama eğer reaksiyon düşük hızda giderse bu durumda biraz perhidrol ( $H_2O_2$ ) katılabilir bunun amacı reaksiyonu katalizlemektir.

Alüminyum iyice söküldükten sonra elimizde şeklin bulunduğu örnekler olur. Yani artık p-n eklemleri örnekler bunların üzerinde alüminyum ve fotoresist kaplı şekil vardır. Fotoresist ise aseton ile kolaylıkla sökülür. Artık sadece alüminyum şekle sahip örnekler elimizde bulunurlar.

Örneklerin arka yüzlerine de vakum altında evaporatör yardımıyla Al kaplandı. En son ise bunlar bir tüp fırında  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  de azot gazı ortamında 10-15 dakika kadar tavlandılar. Bu literatürde en çok geçen (ızgara tasarımı bölümüne bakınız) Ohm'ik kontak elde etme yollarından biridir. Önceden örnekler tavlanmamışlardı. Bu durumda ölçümlerde pek bir sonuç elde edilemedi çünkü çok yüksek direnç verdiler.

En son işlem olarak ise kontak bölgelerine gümüş pasta sürüldü. Bu pasta elektronikçilerde (Electrofix, iletken boya diye satılır) bulunabilen, ve sürüldükten sonra 1-2 saatte kuruyan cinstendir. Genelde arabaların rezistanslarının tamirinde kullanılır. Öz direnci son derece küçüktür ve akışkandır. Pasta nokta olarak kontak bölgelerine sürüldü. Kuruduktan sonra ise ölçümlere geçildi. Örneklerin en son hali fotoğraf 4.5.'deki gibidir.



**Fotoğraf 4.5.** Örneklerin üzerine litografi yöntemleriyle maskeler kaplanmıştır. En son olarak ise kontak noktalarına gümüş pasta sürülerek hem iletkenlik artırılmış, hem de darbelere karşı dayanıklılık kazandırılmıştır.

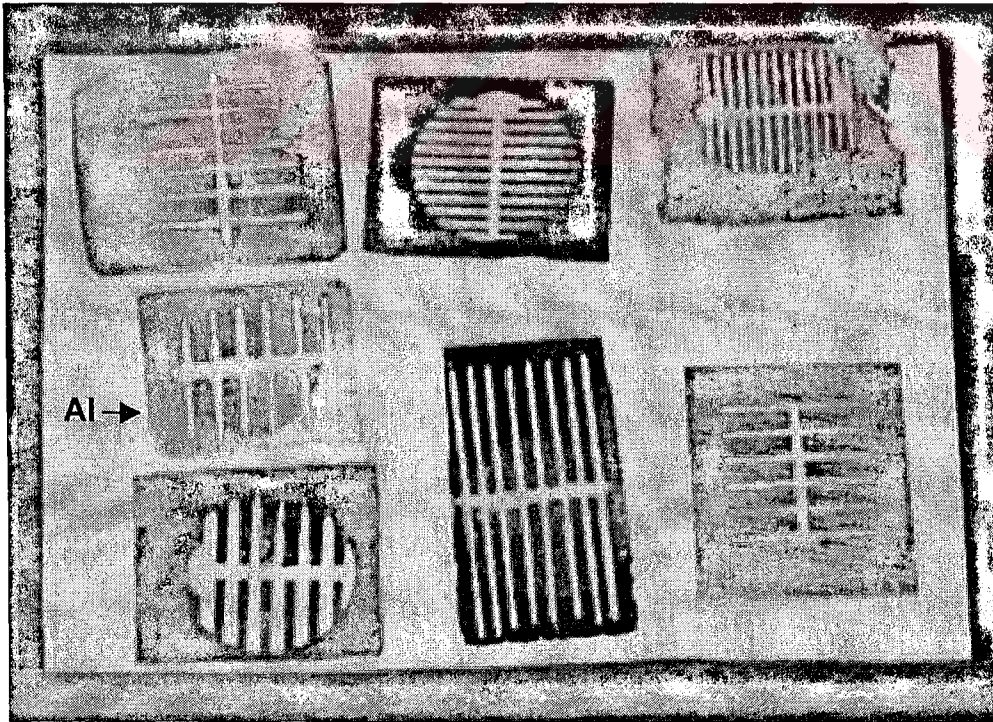
#### 4.3.3. Metal Maskeler

Metal maskelerin hazırlanmasının amacı doğrudan vakum kaplamalarında fiziksel maske kullanmaktır. Böylelikle örneğin üzerine doğrudan metal maske yerleştirilir ve vakum altında evaporatörle kaplama yapılır. Şimdi metal maskelerin hazırlanışlarını görelim:

Metal olarak fosfobronz alaşımı olan metal seçildi. Çünkü bu alaşım hem ince hem de sert bir katmandı. Dolayısıyla ince işler için daha uygundu. Ayrıca asitlerle olan reaksiyonu yavaştı. Dolayısıyla işlemin hızını takip etmek daha kolay oluyordu.

Fosfobronz levha 3x5 veya 4x5 boyutlarda dikdörtgen olarak kesildi. Bulaşık teliyle iyice temizlendi ve parlatıldı. Üzerindeki yağlar ise, deterjan ve asetonla temizlendi kurumaya bırakıldı. Bir tarafına fotoresist yukarıda

anlatıldığı gibi kaplandı. Fakat bu sefer istenen, çıkması beklenen şeklin boşluk oluşturmasydı. Dolayısıyla maske olarak hazırlanan maskenin negatifi kullanıldı. Yani fotoğraf 4.4.b.'deki şekil aynen levha üzerine çıkartıldı. Buraya kadar izlenen prosedür yukarıda anlatıldığı gibidir. Yani, HF kullanmadan yapılan temizlik işlemleri ve fotoresist kaplanması, kurutulması ve en sonunda kostik sodayla bunun sökülmesi işlemleri aynıdır. Sonuçta fosfobronz levha ve bunun üzerinde fotoğraf 4.4.b.'de gözüken şekil elimizdedir. Şimdi ise arka tarafa ve yanlara tırnak ojesi sürülür. Böylelikle sadece şeklin bıraktığı yerler metal olarak açıkta kalır. Sonra ise doğrudan yukarıda bahsedilen HCl ve perhidrol içine atılır. Artık reaksiyon başlar. Zamanla asit çözeltisinin rengi değişir. Yeşil ve mavi renkler alır bu ise reaksiyona işarettir. Arada bir levhayı kaldırıp ışığa tutmak gerekir. Eğer fazla bekletilirse kenarlardan aşınabilir. Şeklin tam olarak çıktığı görüldüğünde artık çözeltiden çıkarılır ve suyla temizlenir. Kontrol edilip artık aside atmaya gerek duyulmadığında ise asetonla temizlenir. Elimizde şu an şekillerin boşluk bırakarak çıkmış olduğu levhalar (fotoğraf 4.6.) bulunmaktadır.

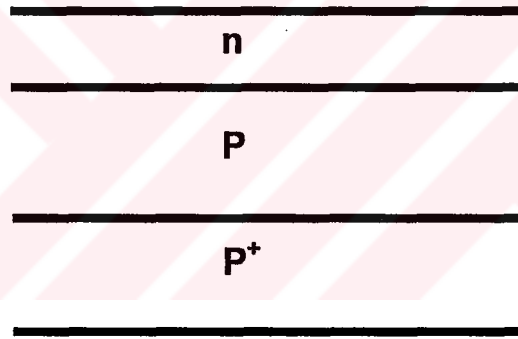


**Fotoğraf 4.6.** Yukarıda anlatılan işlemlerden geçtikten sonra vakum kaplamalarında kullanılmak üzere hazırlanmış metal maskeler.

Bu işlemler sırasında eğer metal olarak fosfobronz bulunamazsa, yerine başka sert bir metal hatta alüminyum bile kullanılabilir. Nitekim fotoğraf 4.6.'da aynı metodla elde edilmiş alüminyum maske gözüküyor (en solda, üstten ikinci maske).

#### 4.4. Laboratuvarda Üretilen Piller ve Ölçümleri

Deneylerde kullanılan örnekler ilk olarak Gebze'deki TÜBİTAK-YİTAL (Yarı-iletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı)'da hazırlandılar. Buraya gelen boron katkılanmış p-tipi "wafer" üzerine "ion-implantation" metoduyla n katmanı yapıldı. 1000 °C de tavlama sonucu ise 1-4  $\mu\text{m}$  kalınlığında p-n eklemler elde edildi. Aşağıda bunların kesitlerini görüyoruz:

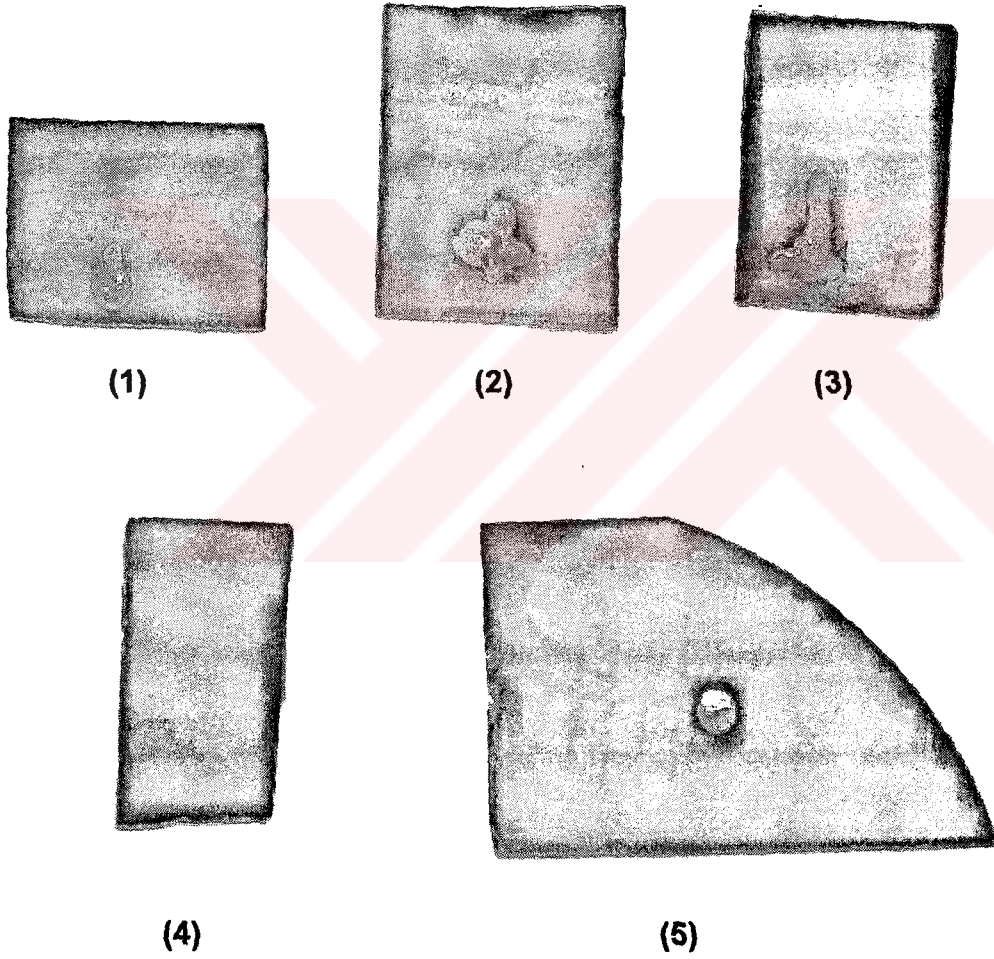


Şekil 4.4. Ölçümlerde kullanılan örneklerin yandan kesitleri. P-n eklemleri.

En üstte bulunan n tabakasının katkılanması yaklaşık  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  dür ve muhtemelen P ile katkılanmıştır. Öz direnci 2.15  $\Omega\cdot\text{cm}$  dir. Altında bulunan p tabakasının katkılanması ise B ile yapılmış ve  $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dür. Öz direnci ise 20  $\Omega\cdot\text{cm}$  dir. Bunun da altına ise aşırı katkılanma yapılmış ve böylelikle direnci az, Ohm'ik kontakta uygun bölge elde edilmiştir. Bir evaporatör kullanılarak alüminyum buharlaştırılmıştır. Maske hazırlama bölümünde anlatıldığı gibi, buharlaştırılan alüminyum ya direk olarak metal maskelerden geçirilmiştir ya da alüminyum tüm yüzeye evapore edildikten sonra kimyasal ve litografik yollarla istenen şekil ön yüzeye çıkarılmıştır. Arka kısımlara ise

gerekli temizlikten sonra yine Al buharlaştırılmıştır. En son aşama olan tavlama ise  $400^{\circ}\text{C}$  de 10-15 dakika azot gazını tüp fırının içinden geçirilmesiyle yapılmıştır. Artık Ohm'ik kontaklar da hazırdır. Fakat yüzeylerden daha rahat fiziksel kontak alabilmek için üst ızgaranın bileşim yerine gümüş pasta nokta olarak sürülmüştür ve ölçümler bu pasta kuruduktan sonra direk buralardan kontak alınarak yapılmışlardır.

Deneyisel kısımda yani ölçümler için toplam 5 adet örnek hazırlandı. Bunlar fotoğraf 4.7. de numaralandırılarak verilmiştir.



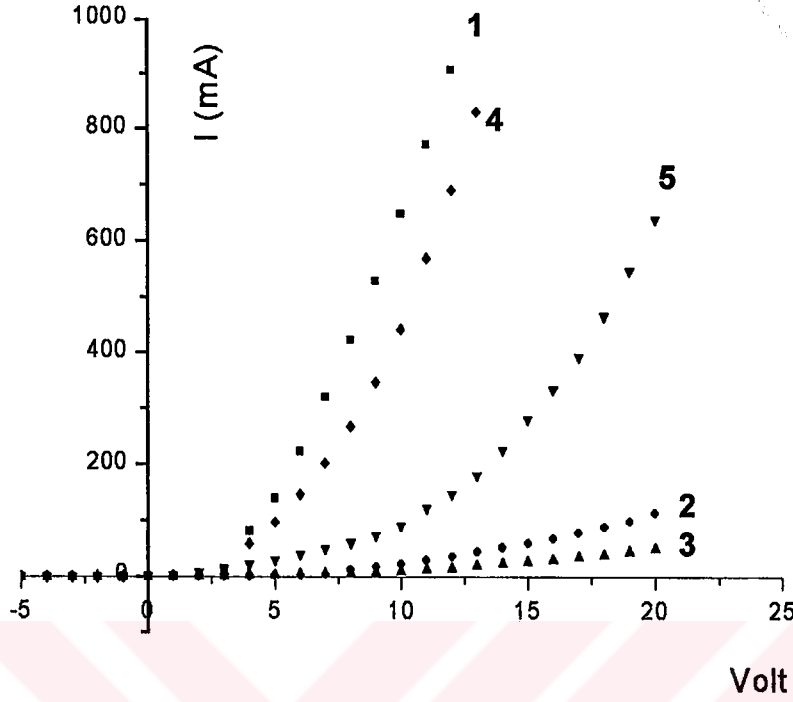
**Fotoğraf 4.7.** Deneyisel ölçümlerde kullanılan örnekler.

Bu örneklerle yapılan ölçümler tek-kristal numunenin ölçümündeki tekniklerle yapılmıştır. Aynı işlem takip edilerek yine sourcemeter ile "sweep" modunda benzer veriler alınmıştır. Aşağıdaki tabloda beş örneğin karanlıkta -5 ile 20 volt arasındaki davranışı görülmüyor. Bu ölçümler ilk aşamada

karanlıkta yapılmıştır. Görüldüğü gibi 1 ve 4 numaralı örnekler daha az direnç gösterip daha iyi bir diyot karakteristiği çıkartıyorlar. Sonuçlar grafik 4.4'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

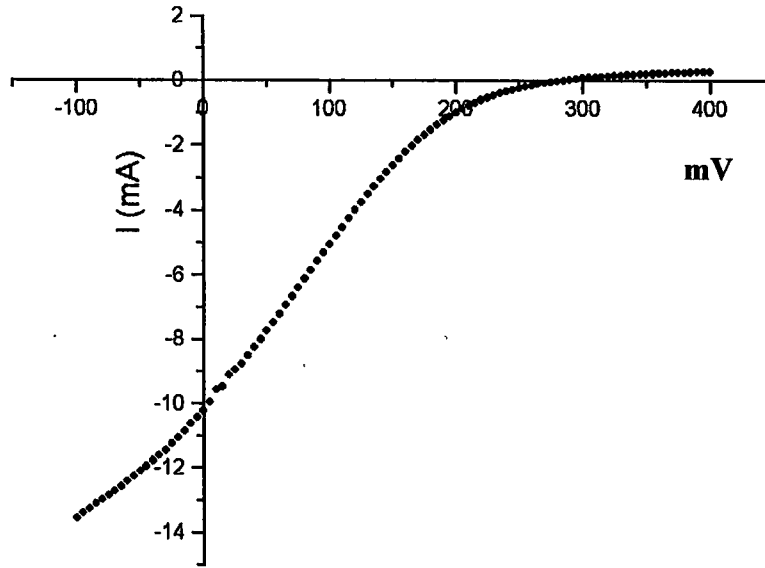
|      | Örnek 1 | Örnek 2 | Örnek 3 | Örnek 4 | Örnek 5 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Volt | I (mA)  | I (mA)  | I (mA)  | I (mA)  | I (mA)  |
| -20  | -7,6    | -0,9    | -1,9    | -0,8    | -15,2   |
| -19  | -7,0    | -0,9    | -1,9    | -0,8    | -14,1   |
| -18  | -6,4    | -0,8    | -1,8    | -0,8    | -13,0   |
| -17  | -5,9    | -0,8    | -1,7    | -0,7    | -11,8   |
| -16  | -5,4    | -0,7    | -1,6    | -0,7    | -10,7   |
| -15  | -4,8    | -0,7    | -1,5    | -0,7    | -9,7    |
| -14  | -4,3    | -0,6    | -1,4    | -0,6    | -8,7    |
| -13  | -3,9    | -0,6    | -1,2    | -0,6    | -7,7    |
| -12  | -3,4    | -0,5    | -1,1    | -0,5    | -6,8    |
| -11  | -3,0    | -0,4    | -1,0    | -0,5    | -5,8    |
| -10  | -2,6    | -0,4    | -0,9    | -0,5    | -5,0    |
| -9   | -2,3    | -0,4    | -0,8    | -0,4    | -4,2    |
| -8   | -2,0    | -0,3    | -0,7    | -0,4    | -3,4    |
| -7   | -1,6    | -0,3    | -0,6    | -0,3    | -2,7    |
| -6   | -1,4    | -0,2    | -0,6    | -0,3    | -2,1    |
| -5   | -1,1    | -0,2    | -0,5    | -0,2    | -1,5    |
| -4   | -0,8    | -0,2    | -0,4    | -0,2    | -1,1    |
| -3   | -0,6    | -0,1    | -0,3    | -0,1    | -0,7    |
| -2   | -0,4    | -0,1    | -0,2    | -0,1    | -0,4    |
| -1   | -0,2    | 0,0     | -0,1    | 0,0     | -0,2    |
| 0    | 0,0     | 0,0     | 0,0     | 0,0     | 0,0     |
| 1    | 0,4     | 0,1     | 0,2     | 1,0     | 2,7     |
| 2    | 1,2     | 0,3     | 0,6     | 2,7     | 7,6     |
| 3    | 14,8    | 0,5     | 1,1     | 4,9     | 14,2    |
| 4    | 80,9    | 0,8     | 1,8     | 58,9    | 21,6    |
| 5    | 139,1   | 1,2     | 2,7     | 96,7    | 30,0    |
| 6    | 223,0   | 1,7     | 3,7     | 146,1   | 39,2    |
| 7    | 320,0   | 4,0     | 4,8     | 202,0   | 49,4    |
| 8    | 422,9   | 11,7    | 6,1     | 267,6   | 60,5    |
| 9    | 527,6   | 16,8    | 7,6     | 346,7   | 72,7    |
| 10   | 648,3   | 22,2    | 9,6     | 441,6   | 89,9    |
| 11   | 771,8   | 28,2    | 12,5    | 568,5   | 121,2   |
| 12   | 907,6   | 34,8    | 14,7    | 689,4   | 147,0   |
| 13   |         | 44,0    | 18,5    | 831,0   | 180,4   |
| 14   |         | 51,4    | 22,1    |         | 225,5   |
| 15   |         | 59,2    | 25,6    |         | 279,6   |
| 16   |         | 67,5    | 29,4    |         | 333,3   |
| 17   |         | 77,3    | 33,9    |         | 392,0   |
| 18   |         | 87,3    | 38,5    |         | 465,0   |
| 19   |         | 98,0    | 43,7    |         | 545,7   |
| 20   |         | 112,3   | 49,5    |         | 638,5   |

**Çizelge 4.3.** Karanlıkta sourcemeter ile ölçülen örneklerin I-V verileri.



**Grafik 4.4.** Fotoğraf 4.7. de verilen örneklerin I-V eğrileri.

Bu sefer ise yine sourcemeter kullanılarak örneklerin karanlık ölçümleri alındı. Verilerin daha hassas okunabilmesi için ölçüm aralığı olarak  $-100$  mV dan başlayarak  $5$  mV luk arttırmılarla  $400$  mV'a kadar çıkıldı. Böylece her bir numune için  $100$  veri noktası alındı. Herbir nokta uygulanan voltaja karşı akım okunarak grafikte yerine konuldu. Ayrıca güç hesaplaması herbir nokta için yapıldı. Dolayısıyla deneysel  $I_m$  ve  $V_m$  değerleri daha doğru olarak saptandı. Halbuki daha önceki ölçümlerde  $I_m$  ve  $V_m$  değerlerinin iki farklı şekilde hesaplanabildiğini görmüştük. Bunlardan biri teorik hesaplama idi, diğeri ise iterasyonla türetilen bir denklem vasıtasıyla idi. Ama burada yapılan işlemle deneysel olarak en hassas değerler tablodan rahatlıkla bulunabilir. Grafiklerde ise örneklerin ışık altında davranışları daha rahat görülüyor. Ayrıca tablolardan bunların  $I_{sc}$ ,  $I_m$ ,  $V_{sc}$ ,  $V_m$  değerleri bulunabilir.



**Grafik 4.5. Örnek 1'in I-V eğrisi (aydınlık)**

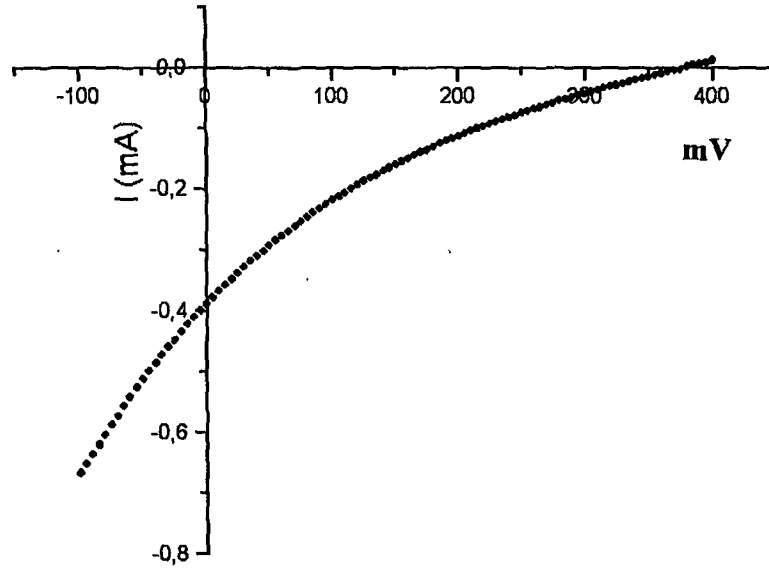
$$I_{sc} = -10.232 \text{ mA}$$

$$V_{oc} = 286 \text{ mV}$$

$$I_m = -5.056 \text{ mA}$$

$$V_m = 100 \text{ mV}$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = 0.17$$



**Grafik 4.6. Örnek 2'nin I-V eğrisi (aydınlık)**

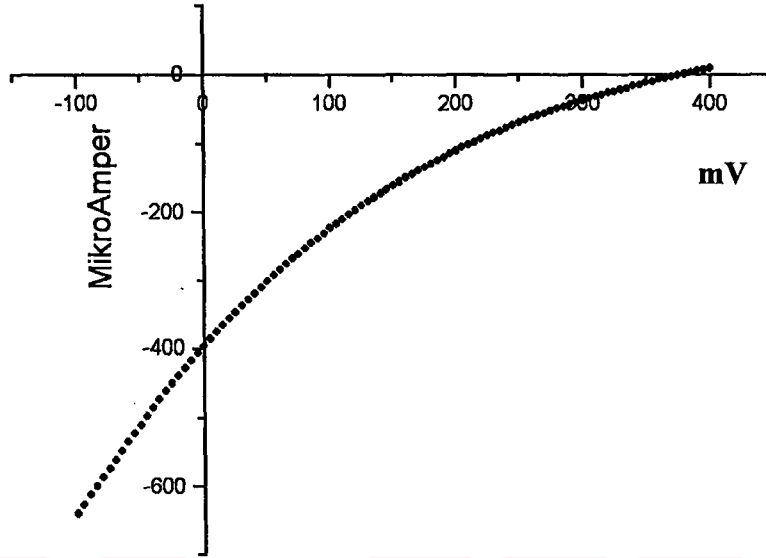
$$I_{sc} = -0.389 \text{ mA}$$

$$V_{oc} = 377 \text{ mV}$$

$$I_m = -0.166 \text{ mA}$$

$$V_m = 145 \text{ mV}$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = 0.16$$



**Grafik 4.7. Örnek 3'ün I-V eğrisi (aydınlık)**

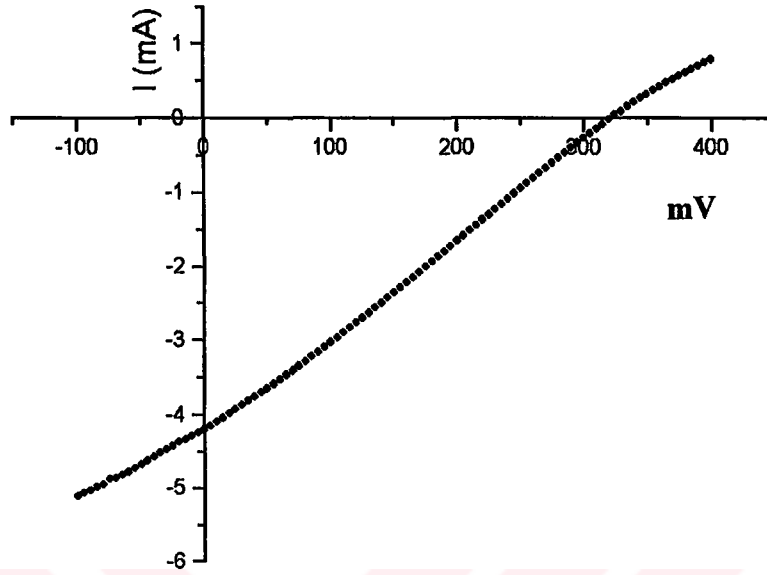
$$I_{sc} = -397 \mu A$$

$$V_{oc} = 378 \text{ mV}$$

$$I_m = -167 \mu A$$

$$V_m = 145 \text{ mV}$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = 0.16$$



Grafik 4.8. Örnek 4'ün I-V eğrisi (aydınlık)

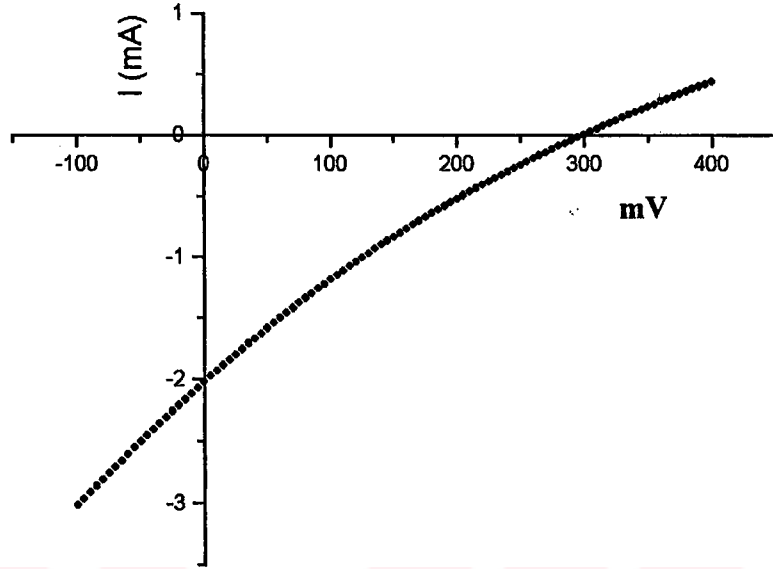
$$I_{sc} = -4.204 \text{ mA}$$

$$V_{oc} = 322 \text{ mV}$$

$$I_m = -2.216 \text{ mA}$$

$$V_m = 160 \text{ mV}$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = 0.26$$



**Grafik 4.9. Örnek 5'in I-V eğrisi (aydınlık)**

$$I_{sc} = -2.024 \text{ mA}$$

$$V_{oc} = 300 \text{ mV}$$

$$I_m = -0.915 \text{ mA}$$

$$V_m = 137 \text{ mV}$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = 0.21$$

## 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında yapılanlar amaçlarıyla aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

a) PV piller hakkında fotoğraflarla, uygulama alanları hakkında bilgiler verilmiştir. Böylelikle hücresel bazda incelenen PV olay, daha büyük ölçekli uygulamalarıyla gösterilerek daha somutlaştırılmıştır.

b) Değişik güneş pilleri hakkında da bilgiler verilmiştir. Özellikle kontak yapımı ve ideal metalin kontak olarak kullanılması, hem optik hem de metal maske yapımı ile ilgili kısımlar, deneysel olarak yarıiletkenlerle uğraşanlar için değerli bilgiler kapsar.

c) Güneş pillerinde verimi etkileyen parametrelerden en önemlilerine değinilmiştir. Bu parametrelerden uygulanması mümkün olanlar güneş pillerinde denenmiştir.

d) Güneş pillerinde ve fotodiyot gibi diğer optik aygıtların da ölçümünde kullanılabilecek bir ölçüm sistemi hazırlanmıştır.

Deneysel olarak yapılan uygulamalarda da, teorik olarak türetilen denklemler hazır ve laboratuvarda üretilen pillere uygulanmıştır. Aşağıda bunlar hakkında bilgiler verilmektedir:

a) Türetilen denklemler öncelikle hazır bir tek-kristal güneş pilinde uygulanmıştır. Teorik olarak türetilen denklemler sonucu çıkan doldurma faktörü ile deneysel ölçüm değerleri arasında fark olduğu görülmüştür. Bu durumda deneysel veri noktalarına uyacak bir polinom denklemi türetilmiştir ve gerçek doldurma faktörü bulunmuştur. Gerçek değerlerle teorik değerlerin farklı çıkmasının sebebi olarak güneş pilinin gerçek eşdeğer devresi gösterilmiştir.

b) Laboratuvarında farklı boyutlarda ama aynı deneysel ortamlarda güneş pilleri üretilmiştir. Bu pillerin de akım-voltaj grafikleri veri noktalarına göre çizilmiştir. Bu sefer deneysel noktalar için maksimum gücü veren bölge verilerden bulunmuştur. Gerçek doldurma faktörü hepsi için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Aynı ölçüm lambası kullanıldığı için maksimum güç aynı şartlarda ölçülmüştür ama pillerin değerleri birbirlerinden çok farklı çıkmıştır. Düşük verimde çıkan örneklerde kontaklardan dolayı kısa devre yaptıkları belirlenmiştir. Çünkü açık devre voltajları kimisinde oldukça düşüktür. İyileştirme metodlarından "öneriler" kısmında ayrıca bahsedilecektir.

## 6. ÖNERİLER

Deneylerde kullanılan örneklerin verimlerini arttırabilmek için aşağıdaki metodlardan bazıları uygulanabilir. Bu metodların bazılarında bölüm 2.9.'da da bahsedilmiştir:

- Kullanılan waferlar  $2 \Omega \cdot \text{cm}$  veya daha az öz dirence sahip olmalılar.
- Önce NaOH gibi alkaline çözeltilerinde aşındırılmalıdırlar.
- Eklem derinliği daha derin yapılabilir (fosfor difüzyonu sırasında  $880^\circ \text{C}$  de daha uzun tutulabilirler).
- Eklem ön yüzü  $n^+$  yapılabilir.
- Daha iyi Ohm'ik kontaklar için diğer metaller de kullanılabilir (Ti, Pd, Ag, gibi, bölüm 2.7.).
- Anti-refle tabakalar kaplanabilir (bölüm 2.8.).

Bunların yanında başka tavsiyeler de bulunmaktadır:

Örneklere yapılacak kontaklar daha temiz şartlarda yapılabilir. Deneylerde kullanılan örnekler bazı şartların olumsuzluğundan dolayı uzun bir süre atmosfer ortamında beklemiştir. Ayrıca metalik kontağın temiz yapıldığından da emin olmak gerekir, yoksa bu bazı noktalardan kısa devreye neden olacaktır. İyi Ohm'ik kontak oluşması açısından uygun sıcaklıkta tavlmalıdır. Eğer süre uzun tutulursa bu da kısa devreye neden olur.

## KAYNAKLAR

- Aladlı, F., Birgül, G., Öktü, Ö., Alüminyum / SiO<sub>2</sub> / p-Si, Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapılı Güneş Pilleri, *Güneş Enerjisi Konferansı Tebliğleri*, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Direktörlüğü, 16-18 Mayıs 1984.
- Backus, C. E., Solar Cells, *IEEE Press*, 1976.
- Balda, J. R., A Silicon Junction Solar Energy Converter, Ph. D. Dissertation for The University of Arizona in Dept. of EE. 1975.
- Baum, V. A., Semiconductor Solar Energy Converters, Plenum Publishing Company, 1969.
- Beard, J. T. and Ebadian, M. A., Solar Engineering, *The Twelfth annual, ASME International Solar Energy Conference*, 357-360, Miami Florida, 1990.
- Benner, J. P. & Kazmerski, L., "Photovoltaics: Gaining greater visibility.", *IEEE-SPECTRUM*, 35-42, September- 1999.
- Brinkworth, B.J., Solar Energy of Man, The Compton Press Ltd., 1974.
- Bube, R. H., Photoelectronic Properties of Semiconductors, Cambridge University Press, 1992.
- Chopra, K. L. and Das, S. R., Thin Film Solar Cells: Thin Film Deposition Techniques, Sec 5.3., Chapter 5, Pages 234-, Plenum Press, New York 1983.
- Conti, M. and Modelli, A., "High efficiency silicon solar cell for concentrator systems.", *2nd Photovoltaic Solar Energy Conference*, Batı Berlin, 23-26 Nisan-1979.
- Daniels F., Direct use of the sun's energy, The Colonial Press Inc., 1977.
- Dickinson, W. C. and Cheremisinoff, P. N., Solar Energy Technology Handbook., Part A, Engineering Fundamentals, Marcel Dekker Inc., 1980.
- Duffie, J. A., Solar Energy Thermal Processes, John Wiley & Sons, 1974.
- Ebony, A. U., Taouk, M. A. and Wenham, S. R., "A low cost metallization scheme for double sided buried contact silicon solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol 31, 499-507, 1994.

Frisson , L., "Influence of the double exponential on the efficiency and the yield of screen printed solar cells.", *2nd Photovoltaic Solar Energy Conference*, Batı Berlin, 23-26 Nisan, 1979.

Hickok F., Handbook of solar and wind energy, Cahnrs Publishing Company, 1975.

Hook, J. R. and Hall, H. E., Solid State Physics, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1991.

Kelly, M. J., Low dimensional Semiconductor Materials, Physics and Technology Devices, Oxford, 1995.

Kreider, J. F. and Kreith, F., Principles of solar engineering, McGraw-Hill Book Company, 1978.

Landa, H. C., The Solar Energy Handbook, FICOA/SEECOA, 1977.

Mc Veigh, J. C., Sun Power, An introduction to the applications of solar energy, Pergamon Press, 1977.

Messel, H. and Butler, S. T., Solar Energy, Pergamon Press, 1974.

Neville, R. C., Solar Energy Conversion: The Solar Cell, Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.

Pierret, R. F., Semiconductor Device Fundamentals, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.

Rudden, M. N. and Wilson J., Elements of Solid State Physics, Wiley 1992.

Sayigh, A. A. M., Solar Energy Engineering, 12. ve 13. bölümler, Academic Press, 1977.

Singh, J., Semiconductor Optoelectronics, Physics and Technology, Mc. Grawhill International, 349-395, 1995.

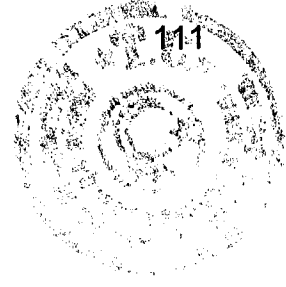
Streetman, B. G., Solid State Electronic Devices, Prentice-Hall International, 1990.

Sze, S. M., Physics of Semiconductor Devices, solar cells, Chapter 14, John Wiley & Sons, 1981.

Treble, F. C., Generating Electricity from the sun, Pergamon Press, 1991.

Trigg, G. L., Encyclopedia of Applied Physics, **13**, 533-557 (photovoltaic devices), Wiley, 1997.

Wagner, H., Dünnschichtsolarzellen aus amorphem Silizium, *5. Türk-Alman Enerji Sempozyumu*, İzmir-1995.



## WEB Adresleri ve Diğer Kaynaklar

[www.coe.uncc.edu/~mhasan/schottky.html](http://www.coe.uncc.edu/~mhasan/schottky.html)

[www.intersolar.com](http://www.intersolar.com)

[www.orjinsolar.com](http://www.orjinsolar.com)

[www.pss.fit.edu/solarproj1.html](http://www.pss.fit.edu/solarproj1.html)

[www.punto.com.tr](http://www.punto.com.tr)

[www.punto.com.tr](http://www.punto.com.tr)

[www.pv.unsw.edu.au/info/bcsc.html](http://www.pv.unsw.edu.au/info/bcsc.html)

- International Solar Energy Congress and Exposition, Notes, University of California Los Angeles ,1975.  
Solar Energy Fundamentals and Applications, *Abstracts of Lectures and Papers*, Izmir-Turkey , 1-5- Ağustos 1977.
- KALEM, Ş., Fotovoltaik Güneş Enerjisi Çevirgeçleri ve p-CdTe / n-CdS çevirgecinin dönüşüm veriminin hesaplanması, Tez çalışması, Hacettepe Üniversitesi Fizik Enstitüsü, Ankara, Temmuz –1977.
- PHILIPS, Cellules solaires, Güneş pilleri kataloğu, 1978.
- *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Conference(C 21) at the Royal Society September, 1979.
- Siemens ve BP-Solar Fotoğraf Arşivleri.



## ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Bursa'da doğdu. İlköğrenimine Bursa'da başladı. İstanbul'da ilköğretimini bitirdi. 1986 yılında başladığı orta ve lise öğrenimini İstanbul Kadıköy Anadolu Lisesi'nde 1993 yılında tamamladı. 1993 yılında Boğaziçi Üniversitesi Fizik bölümünde lisans eğitimine başladı. 1997 yılında buradan mezun olarak aynı yıl Eylül ayında TÜBİTAK – Marmara Araştırma Merkezi, Elektronik Estitüsünde, Mezoskopik Sistemler Laboratuarında Doç. Dr. Şeref Kalem ile çalışmaya başladı. 1998 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fizik bölümünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı.