

T.C.  
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI

**KİMYASAL YÜZEY TEMİZLEME İŞLEMİNİN Sn/p-Si/Al SCHOTTKY TİPİ  
FOTOVOLTAİK KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ**

DOKTORA TEZİ

HAZIRLAYAN : ABDULLAH ÖZKARTAL

DANIŞMAN : Prof. Dr. CABİR TEMİRCİ

VAN – 2015

T.C.  
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI

**KİMYASAL YÜZEY TEMİZLEME İŞLEMİNİN Sn/p-Si/Al SCHOTTKY TİPİ  
FOTOVOLTAİK KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ**

DOKTORA TEZİ

HAZIRLAYAN : ABDULLAH ÖZKARTAL

Bu çalışma YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından **2011-FBE-D027**  
No'lu proje olarak desteklenmiştir.

VAN – 2015

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Fizik Anabilim Dalı'nda Prof. Dr. Cabir Temirci danışmanlığında, Abdullah Özkartal tarafından sunulan “**Kimyasal Yüzey Temizleme İşleminin Sn/p-Si/Al Schottky Tipi Fotovoltaik Karakteristikleri Üzerine Etkileri**” isimli bu çalışma “Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği” ve “Fen Bilimleri Enstitüsü Yönergesi”nin ilgili hükümleri gereğince 15/05/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT

İmza : 

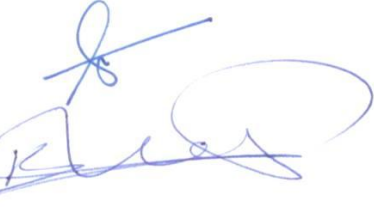
Üye : Prof. Dr. Rıdvan KARAPINAR

İmza : 

Üye : Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

İmza : 

Üye : Prof. Dr. Mehmet Salih AĞIRTAŞ

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI

İmza : 

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/05/2015 tarih ve 2015/20-1 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

  
İmza

Prof. Dr. Suat ŞENSOY

Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Abdullah Özkartal

## ÖZET

### KİMYASAL YÜZEY TEMİZLEME İŞLEMİNİN Sn/p-Si/Al SCHOTTKY TİPİ FOTOVOLTAİK KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

ÖZKARTAL, Abdullah

Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

Mayıs 2015, 83 sayfa

Bu çalışmada,  $\rho=1-10 \Omega \cdot \text{cm}$  öz dirençli, [100] doğrultusunda büyütülmüş, 280  $\mu\text{m}$  kalınlığında, Bor katkılı *p-Si* kristali kullanılarak, omik kontakları özdeş olan, *Sn/p-Si* kontakları içeren dört tür numune üretildi. Bunlardan biri referans numune olarak değerlendirildi. İkincisi, 0.1 M'lık potasyumhidroksit (KOH) çözeltisi kullanılarak 1  $\text{mA/cm}^2$  lik sabit akım yoğunluğunda anodik oksidasyona tabi tutulduktan sonra % 10' luk hidroflorik (HF) asit ile 30 sn süreyle kimyasal yüzey temizleme (KYT) yapıldı. Üçüncüsü, aynı şekilde anodik oksidasyon işleminden sonra 60 sn süreyle % 10' luk HF asit ile KYT yapıldı. Dördüncü numune ise, yine aynı anodik oksidasyon işleminden sonra 75 sn süreyle % 10' luk HF asit ile KYT yapıldı. Her bir numunenin ön yüzeyine KYT işleminin hemen ardından ~150 nm kalınlığında Sn buharlaştırıldı. Böylece kimyasal yüzey temizleme işlemleri birbirinden farklı olan dört ayrı tür numune üretildi.

Numunelerin akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri oda sıcaklığında karanlıkta ve aydınlıkta alındı. Ayrıca kapasite-voltaj (*C-V*) ve kapasite-frekans (*C-f*) ölçümleri de oda sıcaklığında ve karanlıkta alındı. Üretilen *Sn/p-Si* kontakların idealite faktörü (*n*), engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) gibi karakteristik diyot parametreleri belirlendi. Sonra, üretilen numunelerin fotovoltaiik özelliklerini ortaya koymak için, bir güneş simülatörü vasıtasıyla AM1.5 ve 100  $\text{mW/cm}^2$  aydınlatma altında *I-V* ölçümleri alındı. Numunelerin dolum çarpanları (*FF*) ve verimleri ( $\eta$ ) hesaplandı. Numunelere ait diyot ve güneş pili parametreleri karşılaştırılarak, KYT işleminin diyot ve güneş pili parametreleri üzerine etkileri incelendi. Bu bağlamda güneş pili parametreleri ile diyot parametreleri arasındaki ilişki KYT işleminin etkisine bağlı olarak yorumlandı.

**Anahtar kelimeler :** Schottky diyot, fotovoltaiik, güneş pili, anodik oksidasyon, yüzey kimyasal temizleme.



## ABSTRACT

### EFFECTS of SURFACE CHEMICAL CLEANING PROCESS on CHARACTERISTIC PARAMETERS at Sn/p-Si/Al SCHOTTKY TYPE PHOTOVOLTAICS

ÖZKARTAL Abdullah  
Ph. D. Thesis, Physics Department  
Supervisor: Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ  
May 2015, 83 pages

In this study, four samples of Sn/p-Si contacts were produced, which have identical ohmic contacts, by using Boron doped p-Si, with [100] orientation, 280  $\mu\text{m}$  thickness, and resistivities between 1-10  $\Omega\cdot\text{cm}$ . The first sample was selected as reference. The second one has been etched for 30 seconds with % 10 hydrofluoric (HF) acid solution after anodic oxidation process under  $1\text{mA}/\text{cm}^2$  constant current density and using 0.1 M potassium hydroxide (KOH) solution. The third one has been etched for 60 seconds with % 10 HF solution after the anodic oxidation process under  $1\text{mA}/\text{cm}^2$  constant current density and using 0.1 M KOH solution. The fourth one has been etched for 75 seconds with % 10 HF solution after the anodic oxidation process under  $1\text{mA}/\text{cm}^2$  constant current density and using 0.1 M KOH solution. Approximately 150 nm Sn was evaporated onto the front surface of each sample right after the etching process. Thus, we have obtained four samples, of which three were produced by different etching times.

Current-voltage ( $I$ - $V$ ) measurements of samples were taken at room temperature in dark and under illumination. Moreover, capacitance-voltage ( $C$ - $V$ ) and capacitance-frequency ( $C$ - $f$ ) measurements of samples were performed at room temperature in dark. Diode characteristic parameters of produced Sn/p-Si contacts such as ideality factor ( $n$ ), barrier height ( $\Phi_b$ ) and series resistance ( $R_s$ ) were determined. Then, for determining photovoltaic properties of produced samples,  $I$ - $V$  measurements were performed by a solar simulator under AM1.5 and  $100\text{ mW}/\text{cm}^2$  illumination. Fill factors ( $FF$ ) and solar cell efficiencies ( $\eta$ ) were calculated. Effects of etching process on the diode and solar cell parameters were investigated, comparing diode and solar cell parameters. In this context, the relationship between the solar parameters and diode parameters were interpreted as an influence of etching process.

**Key words :** Schottky diode, fotovoltaics, solar cells, anodic oxidation, etching.



## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından 2011-FBE-D027 No' lu proje olarak desteklenmiştir. Bu nedenle YYÜ BAP Koordinatörlüğü' ne teşekkür ederim.

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışmada varlığını hep yanımda hissettiğim, yardımlarını ve desteğini hiçbir şekilde esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ' ye teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında YYÜ Fen Fakültesi Fizik Bölümü imkanlarını kullanmam konusunda destek veren Bölüm başkanı Prof. Dr. Rıdvan KARAPINAR' a teşekkür ederim.

Bu tezin oluşması ve gelişmesinde katkılarından dolayı tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Rıdvan KARAPINAR, Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ ve Prof. Dr. Mehmet Salih AĞIRTAŞ' a teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını benden esirgemeyen, Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI ve Yrd. Doç. Dr. Arife GENCER İMER' e ve tez yazımında teknik desteklerinden dolayı, Yrd. Doç. Dr. Mustafa TEKPINAR ve Arş. Gör. Ömer Faruk ÖZDEMİR' e teşekkür ederim.

Moral ve desteklerini esirgemeyen Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyelerine ve öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

Doktora eğitimim ve çalışmalarım esnasında her türlü destek ve teşviklerini gördüğüm aileme özellikle çok büyük sabırlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Abdullah ÖZKARTAL

Mayıs / 2015



## İÇİNDEKİLER

|                                                                          |      |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                               | i    |
| ABSTRACT .....                                                           | iii  |
| ÖNSÖZ.....                                                               | v    |
| İÇİNDEKİLER.....                                                         | vii  |
| ÇİZELGELER LİSTESİ .....                                                 | ix   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                                    | xi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                            | xiii |
| 1. GİRİŞ .....                                                           | 1    |
| 2. LİTERATÜR BİLDİRİŞİ .....                                             | 3    |
| 3. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR.....                                      | 10   |
| 3.1. Metal n-Tipi Yarıiletken Kontaklar .....                            | 10   |
| 3.1.1. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak.....                   | 11   |
| 3.1.2. Metal n-tipi yarıiletken omik kontak.....                         | 13   |
| 3.2. Metal p-tipi yarıiletken kontaklar .....                            | 15   |
| 3.2.1. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak.....                   | 15   |
| 3.2.2. Metal p-tipi yarıiletken omik kontak.....                         | 17   |
| 3.3. Metal Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları.....        | 18   |
| 3.3.1. Termiyonik emisyon teorisi .....                                  | 18   |
| 3.3.2. Difüzyon teorisi.....                                             | 20   |
| 3.3.3. Termiyonik emisyon - difüzyon teorisi.....                        | 21   |
| 3.3.4. $T_0$ etkili akım iletimi .....                                   | 22   |
| 3.4. Akım-Voltaj Verilerinden Kontak Parametrelerinin Elde Edilmesi..... | 23   |
| 3.5. Metal Yarıiletken Kontaklarda Schottky Kapasitesi.....              | 25   |
| 3.6. Schottky Diyotlarının Kapasitansı .....                             | 28   |
| 3.7. Schottky Diyotlarının Kapasite-Voltaj Karakteristikleri .....       | 32   |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.8. Fotovoltaik Özelliklerin Belirlenmesi .....                                 | 33 |
| 3.8.1. Hava kütlesi.....                                                         | 33 |
| 3.8.2. Güneş pillerinin karakterizasyonu.....                                    | 35 |
| 3.9. Metal - Yarıiletken Schottky Diyotlarda Arayüzey Tabakasının Etkileri ..... | 38 |
| 4. DENEY DÜZENEĞİ VE ÖLÇÜMLER.....                                               | 40 |
| 4.1. Numunelerin Hazırlanması ve Temizlenmesi.....                               | 41 |
| 4.2. Schottky Diyotların Yapılması .....                                         | 41 |
| 4.3. Ölçümler ve Grafikler .....                                                 | 47 |
| 4.3.1. Akım-voltaj (I-V) ölçümleri ve cheung fonksiyonlarının kullanılması ..... | 47 |
| 4.3.2. Sabit frekans altında kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri .....              | 57 |
| 4.3.3. Kapasitans - frekans (C-f) ölçümleri .....                                | 63 |
| 4.4. Fotoelektriksel Özelliklerin Ölçülmesi .....                                | 66 |
| 5. SONUÇ ve TARTIŞMA .....                                                       | 71 |
| KAYNAKLAR.....                                                                   | 76 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                    | 77 |

## ÇİZELGELER LİSTESİ

| Çizelge                                                                                   | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 4.1. Üretilen diyotların etkin alanları .....                                     | 51    |
| Çizelge 4.2. Üretilen diyotların bazı karakteristik parametrelerin deneysel değerleri ... | 51    |
| Çizelge 4.3. Üretilen numunelere ait dolum çarpanı ve verimleri.....                      | 66    |
| Çizelge 4.4. Üretilen numunelere ait bazı parametrelerin ortalama değerleri.....          | 70    |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                         | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1. Metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji band diyagramları .....                                        | 12    |
| Şekil 3.2. Metal-n tipi yarıiletkende omik kontağın enerji- band diyagramı, .....                                             | 14    |
| Şekil 3.3. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı .....                                           | 16    |
| Şekil 3.4. Metal p tipi yarıiletken omik kontakta enerji bant diyagramları.....                                               | 17    |
| Şekil 3.5. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakta, potansiyel ve yük dağılımı .....                                     | 25    |
| Şekil 3.6. Hava kütle numarasına göre ışınların dünyaya geliş açıları.....                                                    | 34    |
| Şekil 3.7. Güneş ışınları spektrumu .....                                                                                     | 34    |
| Şekil 3.8. Bir güneş piline ait eş değer devre .....                                                                          | 35    |
| Şekil 3.9. Güneş piline ait akım-voltaj grafiği .....                                                                         | 35    |
| Şekil 3.10. Güneş pili verim hesaplama grafiği .....                                                                          | 36    |
| Şekil 3.11. Güneş piline paralel direncin etkisi ( $R_S=0$ durumunda) .....                                                   | 37    |
| Şekil 3.12. Güneş piline seri direncin etkisi ( $R_{sh}=\infty$ durumunda).....                                               | 37    |
| Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan vakum kaplama sistemi.....                                                                   | 40    |
| Şekil 4.2. Tavlama için kullanılan fırın.....                                                                                 | 42    |
| Şekil 4.3. Anodik oksidasyon işleminin devre şeması .....                                                                     | 43    |
| Şekil 4.4. Anodik Oksidasyon işleminde voltajın zamana göre değişimi .....                                                    | 45    |
| Şekil 4.5. Referans S0 numunesinin aydınlıkta ve karanlıkta $I-V$ grafiği .....                                               | 48    |
| Şekil 4.6. S30 numunesinin aydınlıkta ve karanlıkta $I-V$ grafiği .....                                                       | 48    |
| Şekil 4.7. S60 numunesinin aydınlıkta ve karanlıkta $I-V$ grafiği .....                                                       | 49    |
| Şekil 4.8. S75 numunesinin aydınlıkta ve karanlıkta $I-V$ grafiği .....                                                       | 49    |
| Şekil 4.9. S0 Referans numunesine ait $\ln I-V$ grafiğinden elde edilen Cheung<br>fonksiyonları $dV/d(\ln I)-I$ grafiği ..... | 53    |
| Şekil 4.10. S30 numunesine ait $\ln I-V$ grafiğinden elde edilen Cheung fonksiyonları<br>$dV/d(\ln I)-I$ grafiği .....        | 53    |
| Şekil 4.11. S60 numunesine ait $\ln I-V$ grafiğinden elde edilen Cheung fonksiyonları<br>$dV/d(\ln I)-I$ grafiği .....        | 54    |
| Şekil 4.12. S75 numunesine ait $\ln I-V$ grafiğinden elde edilen Cheung<br>fonksiyonları $dV/d(\ln I)-I$ grafiği .....        | 54    |
| Şekil 4.13. S0 numunesine ait $H(I)-I$ grafiği.....                                                                           | 55    |
| Şekil 4.14. S30 numunesine ait $H(I)-I$ grafiği.....                                                                          | 55    |

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.15.</b> S60 numunesine ait $H(I)$ - $I$ grafiği.....                                                                                | 56 |
| <b>Şekil 4.16.</b> S75 numunesine ait $H(I)$ - $I$ grafiği.....                                                                                | 56 |
| <b>Şekil 4.17.</b> S0 numunesine ait -2.0 V ile 0.5 V aralığında ters beslem $C$ - $V$ ölçümlerinden elde edilen $C^{-2}$ - $V$ grafiği .....  | 58 |
| <b>Şekil 4.18.</b> S30 numunesine ait -2.0 V ile 0.5 V aralığında ters beslem $C$ - $V$ ölçümlerinden elde edilen $C^{-2}$ - $V$ grafiği ..... | 58 |
| <b>Şekil 4.19.</b> S60 numunesine ait -2.0 V ile 0.5 V aralığında ters beslem $C$ - $V$ ölçümlerinden elde edilen $C^{-2}$ - $V$ grafiği ..... | 59 |
| <b>Şekil 4.20.</b> S75 numunesine ait -2.0 V ile 0.5 V aralığında ters beslem $C$ - $V$ ölçümlerinden elde edilen $C^{-2}$ - $V$ grafiği ..... | 59 |
| <b>Şekil 4.21.</b> S0 numunesindeki GP1 diyotunun $C$ - $V$ değişim grafiği .....                                                              | 61 |
| <b>Şekil 4.22.</b> S30 numunesindeki GP1 diyotunun $C$ - $V$ değişim grafiği .....                                                             | 61 |
| <b>Şekil 4.23.</b> S60 numunesindeki GP1 diyotunun $C$ - $V$ değişim grafiği .....                                                             | 62 |
| <b>Şekil 4.24.</b> S75 numunesindeki GP1 diyotunun $C$ - $V$ değişim grafiği .....                                                             | 62 |
| <b>Şekil 4.25.</b> S0 numunesindeki GP1 diyotunun 0 mV ile 230 mV aralığında $C$ - $f$ değişim grafiği .....                                   | 64 |
| <b>Şekil 4.26.</b> S30 numunesindeki GP1 diyotunun 0 mV ile 230 mV aralığında $C$ - $f$ değişim grafiği .....                                  | 64 |
| <b>Şekil 4.27.</b> S60 numunesindeki GP3 diyotunun 0 mV ile 230 mV aralığında $C$ - $f$ değişim grafiği .....                                  | 65 |
| <b>Şekil 4.28.</b> S75 numunesindeki GP1 diyotunun 0 mV ile 230 mV aralığında $C$ - $f$ değişim grafiği .....                                  | 65 |
| <b>Şekil 4.29.</b> S0 Referans numunesine ait güneş pili verim hesaplama grafiği .....                                                         | 67 |
| <b>Şekil 4.30.</b> S30 numunesine ait güneş pili verim hesaplama grafiği.....                                                                  | 67 |
| <b>Şekil 4.31.</b> S60 numunesine ait güneş pili verim hesaplama grafiği.....                                                                  | 68 |
| <b>Şekil 4.32.</b> S75 numunesine ait güneş pili verim hesaplama grafiği.....                                                                  | 68 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

|              |                                                           |
|--------------|-----------------------------------------------------------|
| $A$          | Diyot alanı                                               |
| $C$          | Kapasite (Sığa)                                           |
| $C_0$        | Arınma bölgesi kapasitesi                                 |
| $d$          | Arayüzey tabaka kalınlığı                                 |
| $E_S$        | Vakum seviyesi ile valans bandı arasındaki enerjisi farkı |
| $E_{SS}$     | Arayüzey hal enerjisi                                     |
| $E_F$        | Fermi enerjisi                                            |
| $E_0$        | Aktivasyon Enerjisi                                       |
| $E_V$        | Valans bandı enerji seviyesi                              |
| $E_{vak}$    | Vakum enerji seviyesi                                     |
| $\epsilon_i$ | Arayüzey tabakasının dielektrik sabiti                    |
| $\epsilon_s$ | Yarıiletkenin dielektrik sabiti                           |
| $\epsilon_o$ | Boşluğun dielektrik sabiti                                |
| $f_{(E)}$    | Fermi dağılım fonksiyonu                                  |
| $f$          | Frekans                                                   |
| $h$          | Planck sabiti                                             |
| $I$          | Akım                                                      |
| $I_0$        | Doyma (saturation) akımı                                  |
| $J$          | Akım yoğunluğu                                            |
| $J_0$        | Doyma akım yoğunluğu                                      |
| $\Phi_b$     | Schottky engel yüksekliği                                 |
| $\Phi_m$     | Metalin iş fonksiyonu                                     |
| $\Phi_s$     | Yarıiletkenin iş fonksiyonu                               |
| $N_a$        | Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu  |
| $N_v$        | Yarıiletkenin valans bandındaki durumların yoğunluğu      |
| $\rho(x)$    | Konuma bağlı uzay yük yoğunluğu                           |
| $k$          | Boltzman sabiti                                           |
| MIS          | Metal yalıtkan yarıiletken                                |
| MOS          | Metal oksit yarıiletken                                   |
| MS           | Metal yarıiletken                                         |
| $m_h^*$      | Değişin etkin kütlesi                                     |

|           |                                                   |
|-----------|---------------------------------------------------|
| $m_e^*$   | Elektronun etkin kütlesi                          |
| $m_e$     | Elektronun kütlesi                                |
| $\mu$     | Elektron mobilitesi                               |
| $N_d$     | Yarıiletkenin donör yoğunluğu                     |
| $N_a$     | Yarıiletkenin akseptör yoğunluğu                  |
| $N_{ss}$  | Yarıiletkenle dengede olan arayüzey hal yoğunluğu |
| $n$       | İdealite faktörü                                  |
| $n_x$     | Elektron yoğunluğu                                |
| $R_s$     | Seri direnç                                       |
| $R^*$     | Richardson sabiti                                 |
| $R^{**}$  | Etkin Richardson sabiti                           |
| $T$       | Ortam sıcaklığı (Kelvin)                          |
| $V_d$     | Difüzyon potansiyeli                              |
| $X_d$     | Arınma bölgesinin kalınlığı                       |
| $\chi_s$  | Yarıiletkenin elektron ilgisi                     |
| $V$       | Voltaj (gerilim)                                  |
| $V_p$     | Potansiyel fark                                   |
| $v_r$     | Rekombinasyon hızı                                |
| $v_x$     | İletim hızı                                       |
| $\Psi(x)$ | Kontagın yüzey potansiyel fonksiyonu              |

## 1. GİRİŞ

En yaygın kullanılan fosil yakıtları gibi yenilenemez enerji kaynaklarının artan hızla tükenişi ve çevreye verdiği zarar dolayısıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidrolik enerji dışında diğerlerinin teknolojik gelişmelerinin yeniliği ve geleneksel kaynaklarla ekonomik açıdan rekabet edememesinden dolayı henüz verim istenen düzeye ulaşamamıştır. Buna rağmen bilim ve teknoloji çevreleri ile enerji kuruluşlarının geleceğe dönük öngörüler; gelecekteki enerji ihtiyacının karşılanması için çevreye daha duyarlı yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmasının zorunlu olduğu yönündedir. 2025 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji tüketimin yarısını, daha iyimser tahminle üçte ikisini karşılayacağı tahmin edilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında birçok üstün yönüyle en ilgi çeken güneş enerjisi kullanımıdır. Güneş pilleri yada diğer adıyla fotovoltaik piller, üzerine düşen güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken aygıtlardır. Çevre kirliliği çok az olması, gürültü oluşturmaması, uzun yıllar kullanımı, modül kullanılabilirliği her yere pratik çözüm sunması avantajlarından bazılarıdır.

İlk olarak 1950' lerde uydu sistemlerinde kullanılmaya başlayan güneş pilleri, 1970' li yıllarda yeryüzündeki kullanımı uzaydaki kullanımını geçmiştir. Çeşitleri, tarihsel gelişimine de bağlı olarak şöyledir:

- **Birinci Nesil**
- Tek kristal Si güneş pilleri, verim ~%14-20
- Çok kristal Si güneş pilleri, verim ~%13-15
- **İkinci Nesil**
- Amorf güneş pilleri, verim ~%5-7
- İnce film yarıiletkenler, CuInSe ~%11, CdTe ~%9, GaAs ~%16
- **Üçüncü Nesil (Şu an çalışılanlar)**
- Organik güneş pilleri
- Nano teknolojik güneş piller
- Çok katmanlı güneş pilleri

- ***Gelecek Nesil***
- .....

Tek kristal Si güneş pilleri hala pratik kullanım açısından maliyeti yüksektir. Bunun yerine daha ekonomik ince film güneş pilleri araştırmaları sürdürülmektedir. Güncel çalışmalardaki hedef, GaAs, CuInSe ve CdTe gibi ince film güneş pillerinin verimlerine yakın veya daha yüksek verimde başka ince film güneş pilleri üretmektir.

## 1. LİTERATÜR BİLDİRİŞİ

Fransız bilim adamı Becquerel (1839), fotovoltaiik etkiyi gözlemleyen ilk kişi olmuştur. Becquerel, elektrolit çözeltileri içerisine daldırılmış gümüş çubukların (AgCl ve AgBr) üzerine ışık düşmesi ile devrede akım oluştuğunu gözlemlemiştir.

Adams ve Day (1876), Selenyum elektrotunun ışık altında akım üretmesini ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir. Ohl (1941), ilk olarak silisyum kullanarak, yarıiletken-yarıiletken yapıda daha verimli p-n kontakları elde etmiştir. Chapin ve ark. (1954), % 6 verimli p-n kontak yapılı ilk silisyum güneş pilini üretti.

Manificier ve Szepessy (1977), püskürtme yöntemi ile elde edilen ITO/n-Si ince film güneş pili yapılarında % 10 verim elde etti. AM1 ışınımı altında  $V_{oc}= 500$  mV,  $I_{sc}=32$  mAcm<sup>-2</sup> ve FF=0.60-0.65 verilerini elde etti.

Schunck ve Coche (1979), 500°C de polikristal Si üzerinde püskürtme yöntemi ile ITO ince filmleri oluşturmuş ve ITO nun katman direncini 20  $\Omega/\square$  olarak bulmuştur. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filmlerinde ise 350  $\Omega/\square$  olarak elde etmiştir. ITO/n-Si (tek kristal) güneş pillerinde  $V_{oc}=534$  mV,  $I_{sc}=41$  mAcm<sup>-2</sup> ve FF=0.46 parametrelerini elde etmiştir. Verimini ise % 9.1-11.3 olarak hesaplamıştır.

Ashok ve ark. (1980), ITO/n-Si güneş pili yapmışlar ve güneş pili parametrelerini  $V_{oc}=0.52$  V,  $I_{sc}=31.5$  mA/cm<sup>2</sup>, FF=0.7 olarak bulmuşlardır. ITO içersindeki Sn miktarı artmasına bağlı olarak öz direncinin de arttığını gözlemlemişlerdir.

Siefert (1984), In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SnO<sub>2</sub> ince filmlerini corona püskürtme yöntemi ile hazırlamış ve filmlerin elektriksel ve optiksel özelliklerini incelemiştir. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ince filmleri için görünür bölgede maksimum % 88 optik geçirgenlik özelliğine sahip olduğunu bulmuştur. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ince filminin oluşması için minimum 350 °C' de alttaban sıcaklığının olması gerektiğini vurgulamıştır. 0.36  $\mu$ m kalınlığındaki In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ince filminin öz direnci 16.5 10<sup>-4</sup>  $\Omega$ .cm olarak bulmuştur. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ince filmlerinin % 5.5 oranında Sn katkılanması ile oluşturulan 0.22  $\mu$ m kalınlığındaki ITO ince filminin öz direncini 2.0 10<sup>-4</sup>  $\Omega$ .cm, % 7.6 oranında Sn katkılanması ile oluşturulan 0.33  $\mu$ m kalınlığındaki ITO ince filminin öz direncini de 1.8 10<sup>-4</sup>  $\Omega$ .cm değerlerinde bulmuştur. Ayrıca püskürtme yöntemi ile vakumda buharlaştırma yöntemini karşılaştırmıştır.

Mulyadi ve Campbell (1989), buharlaştırma ve serigrafi (screen printing) yöntemleri ile Si üzerine oluşturulan ITO ince filminin katman direncini  $290 \Omega/\square$  olarak bulmuştur. Bu değer  $300^\circ\text{C}$  de vakumda tavlama sırasında ölçmüştür. Daha sonra atmosfer şartlarında birkaç gün beklettikten sonra katman direncinde artma olduğunu belirlemişlerdir.  $80 \text{ mW/cm}^2$  lik aydınlatma altında  $V_{oc} = 0.36 \text{ V}$ ,  $I_{sc} = 16.4 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 0.34$  olarak ölçmüşlerdir.

Li ve ark. (1989), ITO/InP güneş pillerini miknatıslı saçtırma (magnetron sputtering) yöntemi ile hazırlamışlardır. Saçtırmada kullanılan gaz bileşenleri incelenmiş ve yüksek verimli piller ITO ince filmi çöktürülmeden önce InP tabanı Ar/H<sub>2</sub> plazmasına maruz bırakıldığında elde edilmiştir. H<sub>2</sub> işleminden sonra  $25^\circ\text{C}$  de  $1000 \text{ W/m}^2$  aydınlatma altında % 18 gibi büyük bir verim elde etmişlerdir. H<sub>2</sub> pasivasyon işlemi yapılmayan pillerde düşük verim ve kararsızlık olduğunu belirlemişlerdir.

Rastogi ve Kakshmikumar (1989), güneş pilleri üzerinde metal-ITO kontakların yüksek dirençli olduğunu belirlemişlerdir.  $10 \Omega/\square$  katman dirençli ITO ince filmi üzerinde yapılan gümüş kontakların kontak direnci  $R_c = 3.55 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $450 \Omega/\square$  katman dirençli ITO için  $R_c = 4.9 \cdot 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$  olarak bulmuşlardır. Benzer sonuçların krom ve alüminyum kontaklar için de tesbit etmişler ve bu durumun güneş pillerinin performansında önemli kayıplar oluşturduğu sonucuna varmışlardır.

Sivridis ve Pananakakis (1991), miknatıslı saçtırma yöntemi ile elde ettikleri ITO/SiO<sub>2</sub>/Si (SIS, yarıiletken/yalıtkan/yarıiletken) güneş pilleri üzerinde ITO çöktürme yönteminin etkisini araştırmış ve çöktürme işlemi sırasında ortaya çıkan arayüzeylerin pilin fotovoltaiik performansını olumsuz yönde etkilediğini belirlemişlerdir. Miknatıslı saçtırma yöntemi ile n ve p tipli Si alttabakalar üzerinde güneş pili üretmenin uygun olmadığı sonucuna varmışlardır. Pil verimlerini % 0.2-4.0 arasında hesaplamışlardır.

Kobayashi ve ark. (1991), Püskürtme yöntemi ile elde ettiği güneş pillerinden %13 verim elde etmişlerdir.  $0.6 \mu\text{m}$  kalınlığındaki ITO ince filmlerin katman direncini  $20 \Omega/\square$  olarak bulmuşlardır.

Kobayashi ve ark. (1992), ITO/ SiO/Si kontaklı güneş pilleri elektron-ışın buharlaştırma tekniği ile ince silisyumoksit kaplı tek kristal Si alttabaka üzerinde oluşturmuşlardır. Akım-gerilim ( $I$ - $V$ ) eğrisinin, Si alttabakaya buharlaştırılan ITO buharının düşme açısına, çöktürmeden sonraki tavlama sıcaklığına ve ortamdaki gazın

cinsine de bağılı olduğunu belirlemişlerdir. ITO ince filmleri 380 °C’ de %73, 450 °C’ de % 89 optik geçirgenliğe sahip olduklarını belirlemişlerdir.

Antonaia ve ark. (1992), püskürtme yöntemi ile SnO<sub>2</sub> ince filmleri yapmışlar ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Stokiyometrik oranda su ve alkol karışımına 0.4 M SnCl<sub>4</sub> ile HF ilave edilerek püskürtme çözeltisi hazırlayarak, 440 °C’ de hazırlanan filmlerin taşıyıcı yük konsantrasyonu ile kristal büyüklüğü arasında fonksiyonel bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir.

ITO/InGaAsP/GaAs (Matsubara ve ark., 1989), ITO/SnO<sub>2</sub>/CdTe ve ITO/SnO<sub>2</sub>/CdS/ CdTe (Das ve Murriss, 1993), kontaklı güneş pillerinde, ITO ince filminin optik geçirgenliğinin yüksek, öz direncinin düşük olması nedeni ile pencere materyali olarak kullanmışlardır.

Amanullah ve ark. (1994), ITO ince filmlerini 10<sup>-4</sup> Torr oksijen ortamında nispeten düşük alt tabaka sıcaklığında (130°C) buharlaştırma yöntemi ile hazırlamışlardır. Filmleri çeşitli sıcaklıklarda ve sürelerde tavlamışlardır. Elektriksel ve optiksel özelliklerin değişimini tavlama süresi ve sıcaklığa ve hazırlama oranlarına göre belirlemişlerdir. ITO ince filmlerinin fiziksel özellikleri Sn ve In oranlarına ve tavlama şartlarına kuvvetli bir şekilde bağılı olduğunu tesbit etmişlerdir.

Elangovan ve Ramamurthi (2005), püskürtme yöntemi ile oluşturdukları SnO<sub>2</sub>:F ve SnO<sub>2</sub>:Sb ince filmlerinde flor ve antimon katkılamanın filmlerin fiziksel özelliklerinde ne gibi değişiklikler oluşturduğunu incelemişlerdir. Filmleri 400 °C’ de cam alttabaka üzerine püskürterek oluşturmuşlardır. Katman dirençlerini 1.75-2.17 Ω/□ ve optik geçirgenliğini % 42-85 arasında ölçmüşlerdir.

Shadia ve Riyad (2009), püskürtme yöntemi ile hazırladıkları SnO<sub>2</sub>:F ince filmlerinde fiziksel özelliklerinin 360-480 °C arasındaki alttabaka sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Alttabaka sıcaklığı artarken öz direncinin 98.00 Ω.cm den 0.22 Ω.cm ye azaldığını tespit etmişlerdir.

Andreas Klein ve ark. (2010), In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SnO<sub>2</sub> ve ZnO ince filmlerinin katkılama sınırlarını, yasak band aralıklarını, iş fonksiyonlarını incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Bu fotovoltaiik geçirgen materyallerin teknolojik olarak uygun elektronik özelliklerinin yüzey sınırlarına, kristal yapılarına ve Fermi seviyelerine bağılılığını kimyasal kusurları altında incelemişlerdir.

Shadia ve ark. (2010), püskürtme yöntemi ile  $\text{SnO}_2\text{:F/CdS:In}$  kontak yapısını elde etmişler ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Kontakın omik ya da yarı omik yapıda olduğunu belirtmişlerdir. Optik geçirgenliğini ayrı ayrı cam alttabakada büyütürken optik spektroskopi ile incelemişlerdir.

Feng ve ark. (2010),  $\text{CdS/SnO}_2\text{/Cam}$  heteroeklem güneş pillerinde ince film büyütmede çözeltideki  $\text{CdCl}_2$  oranlarının ve tavlamanın etkisini Raman spektrometresi ile araştırmışlardır. CdS ince filminin güneş pilleri için iyi bir pencere materyali olduğunu tesbit etmişlerdir.

Metal-yarıiletken (MS) kontaklar, çok çeşitli elektronik devre elemanlarının yapısında yer aldıkları için büyük önem taşırlar. Hangi devrede, ne özellikli MS kontakının kullanılmasını belirlemek için MS kontaklarının idealite faktörü ( $n$ ) ve engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ) gibi elektriksel özellikleri iyi bilinmesi gerekir (Rhoderic ve Williams, 1988). Son yıllarda, yüzey ve ara yüzey tekniklerinin uygulaması, metaller ve yarıiletkenler arasında oluşan ara yüzeylerin kompleks bölgeler olduğunu ve fiziksel özelliklerinin, yüzey hazırlama şartlarına bağlı olduğunu açıkça göstermekte ve birçok durumda, bilinmeyen kirliliklerle kaplı olan yüzeyler üzerine oluşturulan kontaklar ara yüzey durumlarına sebep olduğu ve bu durumların diyotların performansını, kararlılığını, verimini, mekanik ve elektriksel özelliklerini etkilediği bilinmektedir (Bolotnikov, 2002).

Yarıiletken ile metali ayıran ince arayüzey yalıtkan tabakanın olması halindeki (MIS) Schottky engelli güneş pilinin açık devre voltajı ve verimliliğinde gözlenen artış nedeniyle MIS Schottky diyotlarına olan ilgiyi artırmıştır (Ashok ve ark.,1979).

Schottky diyotlarda elektriksel iletkenlik, çoğunluk taşıyıcıları ile sağlandığından yüksek frekanslarda ve düşük düz beslemede çalışabilen diyotlardır. GHz mertebesinde anahtarlama hızına sahiptirler. Bu nedenle Schottky engel diyotların optoelektronik ve telekomünikasyon alanlarında geniş kullanımları mevcuttur (Aydın, 2003).

Bir fotodiyot, temel olarak ışığa duyarlı bir yarıiletken diyottur. Diyotun yapısı ya bir p-n yarıiletken-yarıiletken kontakı ya da bir metal-yarıiletken kontak ile oluşturulur. Fotodiyotlar, ışığı en etkin şekilde elektrik akımına dönüştürürler. Dönüştürme işleminin etkinliği fotodiyotun karakteristiğine bağlıdır (Donati, 1999).

Metal-yarıiletken (MS) kontakların geçmişi Braun'ın 1874 yılında metal sülfat kristallerde elektriksel iletkenliğin asimetrik olduğunu keşfetmesi ile başlar. 1895 yılında Marconi'nin radyo iletişimine ait deneyleri Braun'un dikkatini çekmiş ve bu deneylerin sonuçları nokta kontak metal-yarıiletken doğrultuculara ve detektörlere başarıyla uygulamıştır. Kristal doğrultucuların yükseltmesinin zayıf olmasından dolayı, 1920 lerde vakum tüpleri radyo dalga ayarlamasında kristal doğrultucuların yerini almıştır.

Schottky ve ark. (1931), MS kontaklarda doğrultma özelliğinin olduğunu ilk olarak açıklamışlardır.

Schottky (1938) ve Mott (1938), birbirlerinden bağımsız olarak doğrultma işleminin elektronların potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon şeklinde geçişi ile açıklanabileceğini ileri sürmüşlerdir. Schottky-Mott teorisine göre, oluşan potansiyel engelin nedeni metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktır. Bu teoriye göre potansiyel engelinin büyüklüğü, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron ilgisi arasındaki farka eşittir (Rhoderick ve Williams, 1988). Fakat daha sonra yapılan çalışmalar Schottky engel yüksekliğinin, metalin iş fonksiyonundan ziyade metal-yarıiletken kontağın hazırlama yöntemlerine bağlı olduğunu göstermiştir. Schottky-Mott teorisinde ideal MS yapı kabul edilmiş, oluşan arayüzeyin durumları dikkate alınmamıştır. Oysa bu arayüzey yapı kontak oluşturma işlemlerine göre her zaman olmaktadır. Oluşan arayüzey hal yoğunlukları, yarıiletkene ait Fermi seviyesinin yasak enerji aralığındaki hareketini sınırlandırmaktadır. Bu sonuç üzerine Bardeen, MS arayüzeyinin varlığından dolayı potansiyel engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız olacağını belirtmiştir (Wilmsen, 1985).

Termoionik emisyon, sıcak bir yüzeyden elektron veya boşluk salınmasıdır (Bethe, 1942). Bethe (1981), Richardson'un bulduğu metal vakum sistemi için, 1942 yılında bulduğu termoionik emisyon teorisini metal-yarıiletken yapılara da uygulanabileceğini gösterdi.

Crowell ve Sze (1965), metal n-tipi yarıiletken kontaklarda engel yüksekliğini, iş fonksiyonunu ve arayüzey durumlarını incelemişlerdir.

Heine (1965), Al/n-Si Schottky diyotlarda,  $C-f$  karakteristiklerinde düşük frekanslarda görülen uzay yükü sığasına ilave kapasitenin sadece arayüzey hallerinden ileri gelmediği, bunun yanında ilave kapasitenin omik kontak direncinin belirgin bir

kapasitesinin olduğu ve artık sığanın sadece arayüzey hallerinin bir ölçüsü olmayacağı sonucuna vardı.

Crowell ve Sze (1966), Schottky' nin difüzyon teorisi ile Bethe'nin termoiyonik emisyon teorisini birleştirerek termoiyonik emisyon-difüzyon teorisini ortaya koymuştur.

Card ve Rhoderick (1971), doğru beslem  $I$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörünün niceliğine bağlı olarak, arayüzey hallerinin metalle mi yoksa yarıiletkenle mi dengede olduğunu teorik ve deneysel olarak açıklamışlardır.

Cheung ve Cheung (1986), ideal ve ideal olmayan diyotlar için doğru beslem  $I$ - $V$  karakteristikleri kullanarak Schottky diyotlarda engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnci hesaplamak için farklı bir hesaplama yöntemi ortaya koymuşlardır.

Werner ve ark.(1988), Schottky diyotlarda, doğru beslem durumunda Schottky kapasitesine ek olarak gözlenen kapasitenin, azınlık taşıyıcılarından ziyade arayüzey hallerine atfedilebileceğini illeri sürmüşlerdir.

Chattopadhyay ve Das (1991), seri direncin varlığında  $C$ - $V$  grafiklerinin gösterdiği pikler,  $C$ - $V$  karakteristiklerinde seri direnç etkisi düşünülerek,  $R_s$  seri direncinden kaynaklandığından  $C$ - $V$  grafiğindeki piklerin maksimumuna karşılık gelen voltaj değerlerini,  $I$ - $V$  karakteristiklerinde kullanarak,  $R_s$  değerlerini hesaplamak için bir model geliştirmişlerdir.

Schottky diyotlarında  $C$ - $V$  kapasite-gerilim ölçümleri konusunda araştırmalar yapılmıştır. Arayüzey oksit tabakalı ve arayüzey tabakasız Al/p-Si Schottky diyotlarında arayüzey durumları ve arayüzeydeki sabit yükleri dikkate alarak  $I$ - $V$  ve  $C$ - $V$  karakteristiklerini inceleyerek engel yüksekliğini, idealite faktörünü ve arayüzey durum yoğunluğunu belirlemişlerdir. Metal-yarıiletken kontaklarda arayüzey durum yoğunluğunu ve bunun neden olduğu artık sığayı deneysel olarak inceleyerek bu sığanın frekansın artmasıyla azaldığını, diğer bir ifadeyle arayüzey durum yoğunluğunun artan frekansla azaldığını belirtmişlerdir (Türüt ve Sağlam, 1992).

Chattopadhyay ve Raychaudhuri (1993),  $C$ - $V$  karakteristiklerinde gözlenen kapasite pikini seri direnç etkisine atfetmişlerdir.

Polyakov ve ark. (1994), InAs, InSb, GaSb ve InGaAsSb yarıiletken bileşiklerini kullanarak anodik oksidasyon yöntemiyle ürettikleri MIS diyotların özelliklerini araştırmışlardır.

Batı (1999), yaklaşık otuz yıldır metal yarıiletken Schottky diyotlarında arayüzey hallerinin etkisi, çok yoğun bir şekilde, çeşitli yöntem ve tekniklerle araştırıldığını belirtmiştir. Özellikle, son 25 yılda, arayüzey halleri hakkında bilgi ilave veya artık kapasite analizlerinden çıkarıldığını rapor etmiştir.

Temirci ve ark. (2001), Sn/p-Si Schottky kontaklarda anodik oksidasyon yöntemiyle metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşturulacak kontrollü bir oksidasyon işlemiyle engel yüksekliğinin arttırabileceğini göstermiştir.

Aguas ve ark. (2004), MIS Schottky tipi fotodiyotlarda, oksit tabakasını farklı tekniklerle üretmişler ve yüzey pasivasyonunda  $H_2O_2$ ' nin diyot performansına etkisini araştırmışlardır.

Kumta ve ark. (2005), yüksek dielektriğe sahip metal-yarıiletken diyotların karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimini incelemişlerdir.

Tataroğlu ve Altındal (2006), Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Shottky diyotların karakteristiklerinin diyodun yalıtkan tabakasının kalınlığına bağlı olarak nasıl değiştiğini ve idealite faktörü ile engel yüksekliğinin yalıtkan tabakasının kalınlığına bağlı olup olmadığını incelediler.

Yakuphanoglu (2007), Al/p-Si/Cu Phthalocyanine fotodiyot kontak yapılarında elektronik ve fotovoltaiik özellikleri incelemiştir.

Ocak ve ark. (2009), Sn/Metilen mavisi/p-Si Schottky diyotun *I-V* ve *C-V* karakteristiklerini incelemişlerdir.

Karataş ve Çakar (2009), Sn/Rhodamine-101/p-Si Schottky yapının elektriksel ve arayüzey durumlarının sıcaklığa bağlılığını incelemişlerdir.

Bu çalışmada, Sn/p-Si/Al Schottky tipi fotovoltaiiklerde yüzey kimyasal temizleme işleminin güneş pili karakteristikleri üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Schottky engelli bir güneş pilinde, güneş enerjisi yeteri kadar ince yarı geçirgen bir metali geçerek metal-yarıiletken arayüzeye ulaşmaktadır. Üretilen Schottky kontakların fotovoltaiik özelliklerini belirleyebilmek için, karanlıkta ve aydınlıkta *I-V* ölçümleri alınarak, grafikler yardımıyla ve hesaplamalarla karakterizasyon işlemleri yapıldı. İlave olarak, kontaklar hakkında daha detaylı bilgiler elde edebilmek amacıyla, mümkün oldukça kapasitans-voltaj (*C-V*) ve kapasitans-frekans (*C-f*) ölçümleri de alınarak gerekli grafikler elde edildi ve gerekli hesaplamalar yapıldı.

## 2. METAL–YARIİLETKEN KONTAKLAR

Bir metalin bir yarıiletkenle temas ettirilmesiyle oluşturulan metal-yarıiletken (MS) kontaklarda termal denge kuruluncaya kadar metal ile yarıiletken arasında yük geçişleri olur. Metalden yarıiletkenle, yarıiletkenle metale elektron geçişı metal ile yarıiletkenin Fermi enerji düzeylerinin eşit olduğu termal denge durumuna kadar devam eder. Böylece metal yarıiletken arayüzeyinde yüklerin ayrılmasıyla yeni bir dağılım sonucunda bir potansiyel engeli oluşur. Arayüzey bölgesi, yarıiletken tarafında oluşan ve hareketli yüklerin olmadığı yüksek dirençli bir bölgedir. Metal yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engel oluştuğunu ilk olarak Schottky, eklemde oluşan bu potansiyelin metal ile yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığını ise Mott açıklamıştır. Schottky-Mott teorisine göre potansiyel engeli, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle oluşur (Sharma, 1984).

MS kontaklar, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlı olarak doğrultucu kontak ve omik kontak olmak üzere iki çeşittir. Bir metalin kontak haline getirildiği yarıiletkenin tipi de önemlidir. Mesela bir altın tel, p tipi germanyuma kontak edilirse omik kontak oluşur; aynı tel n-tipi germanyuma kontak edilirse doğrultucu kontak oluşur.

### 3.1. Metal n-Tipi Yarıiletken Kontaklar

MS kantağın omik ya da doğrultucu olduğunu anlamak için iş fonksiyonlarına bakmak gerekir.  $\Phi_m$ , metalin iş fonksiyonudur ve bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji, olarak tanımlanır.  $\Phi_s$  ise yarıiletkenin iş fonksiyonudur. Yarıiletkenlerde fermi seviyesi katkı miktarına göre değiştii için değişken bir niceliktir. Fermi enerji seviyesi ( $E_f$ ); dolmuş yörüngeleri dolmamış yörüngelerden ayıran izafî bir seviyedir ve  $f(E)$  Fermi dağılım fonksiyonuna bağlı olarak ifade edilir.  $E_f$ 'nin  $f(E)$  ile ilişkisi

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp[-(E_f - E)/kT]} \quad (3.1)$$

ile verilir. Yarıiletkenin elektron ilgisi  $\chi_s$ , iletkenlik bandının tabanından ( $E_c$ ) bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarıdır. Vakum seviyesi, bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili elektronun enerji seviyesidir.

### 3.1.1. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak

Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların veya Schottky diyotlarının özelliklerinden biri kontak direncinin dışarıdan uygulanan gerilime bağılılığıdır. Bu bağılılık o kadar güçlüdür ki, metal yarıiletken kontağı tek yönlü iletkenliğe getirmektedir. Yani kontakta akım, bir yönden kolayca geçer, ters yönden ise zayıf geçer (Cafer, 2000).

Metal n-tipi yarıiletken kontaklarda  $\Phi_m > \Phi_s$  olduğunda doğrultucu kontak olur. Kontakta önce (Şekil 3.1.1(a)) yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden her iki yapının iş fonksiyonları arasındaki fark kadar ( $\Phi_m - \Phi_s$ ) yukardadır. Metal ile yarıiletken kontak haline getirildiğinde yarıiletkenden metale yük akışı başlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasından elektronlar metale geçerler ve termal denge kurulduktan sonra yük geçişi durur. Böylece her iki Fermi seviyeleri aynı hizaya gelir. Yarıiletkenin Fermi seviyesi  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar düşer (Şekil 3.1.1(b)) (Bozkurt, 2009).

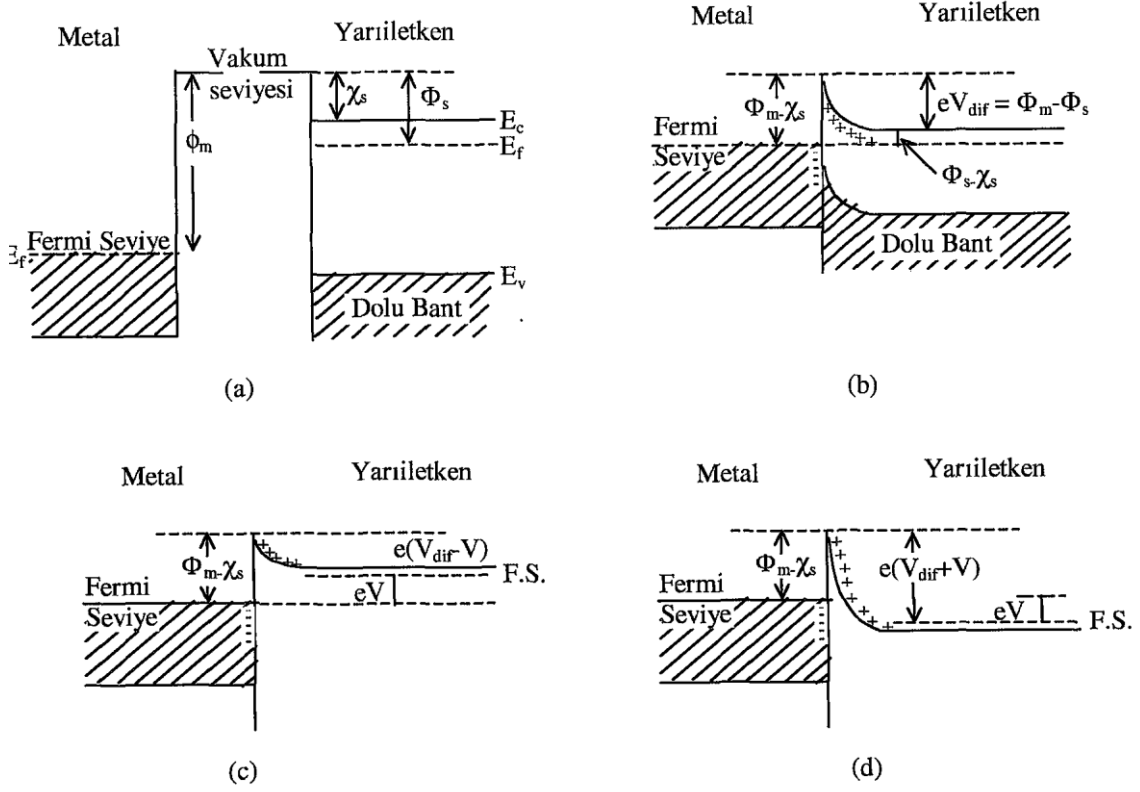
Bunun sonucunda metal tarafındaki yüzey yükleri ile yarı iletken tarafındaki uzay yüklerinin oluşturduğu dipol tabakasından dolayı, metal-yarıiletken arayüzeyinde yarıiletken enerji bantların yukarı doğru bükülmesiyle bir potansiyel engeli oluşur. Bu potansiyel engelinin yarıiletken tarafındaki yüksekliği;

$$eV_d = \Phi_m - \Phi_s \quad (3.2)$$

metal tarafındaki yüksekliği ise;

$$e\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (3.3)$$

denklemleri ile verilir.



**Şekil 2.1.** Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji band diyagramları  
 (a) kontak öncesi, (b) kontak sonrası termal denge,  
 (c)  $V < 0$  olması durumunda (düz beslem), (d)  $V > 0$  olması durumunda (ters beslem);

Kontağın yarıiletken tarafındaki iyonize olmuş donörlerin neden olduğu  $d$  kalınlığında, elektronlardan arınmış bir bölge oluşur (Şekil 3.1). Bu bölgeye engel bölgesi (tabakası), uzay yükü bölgesi, geçiş bölgesi, ‘arınma bölgesi’ veya ‘Schottky bölgesi’ denir. Arınma bölgesinin elektronlardan arınmasıyla geriye kalan sabit pozitif yüklere ‘uzay yükü’ denir. Arınma bölgesinin bir tarafında pozitif uzay yükü diğer tarafında negatif yüzey yükleri olduğundan bir kondansatör gibi davranır. Bu kapasiteye Schottky kapasitesi veya arınma bölgesi kapasitesi denir. Schottky kapasitesi arınma tabakasının kalınlığı  $d$  ile ters orantılıdır. Kalınlığı iyonize olmuş donörlerin konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyeline bağlıdır.

Termal uyarımla potansiyel engelini aşmaya yetecek enerjiye ulaşan elektronlar metalden yarıiletken ve yarıiletken metale eşit ve zıt  $I_0$  sızıntı akımı oluştururlar. Eğer yarıiletken  $(-V)$  gerilimi uygulanırsa (Şekil 3.1(c)) metalden yarıiletken geçen elektronlar için engel yüksekliği değişmez, akım da aynı kalır. Buna mukabil

yarıiletkenden metale geçen elektronlar için iletkenlik bandı eV kadar yükseleceğinden engel yüksekliği de eV kadar azalacaktır. Arınma bölgesinin kalınlığı ise;

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_d - V)}{eN_d}} \quad (3.4)$$

olmaktadır. ( $V < 0$ ) Böylece, metal yarıiletken kontağına ters yönde uygulanan gerilim elektronlar için potansiyel engelini yükseltir ve arınma bölgesinin kalınlığını büyütür. Dolayısıyla metalden yarıiletken doğru akan akım  $\exp(eV/kT)$  çarpanı kadar değişecektir. Oluşan net akım;

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

olur ki, akım pozitifdir. Burada  $I_0$  doyma akımı;

$$I_0 = AR^*T^2 \left[ \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \quad (3.6)$$

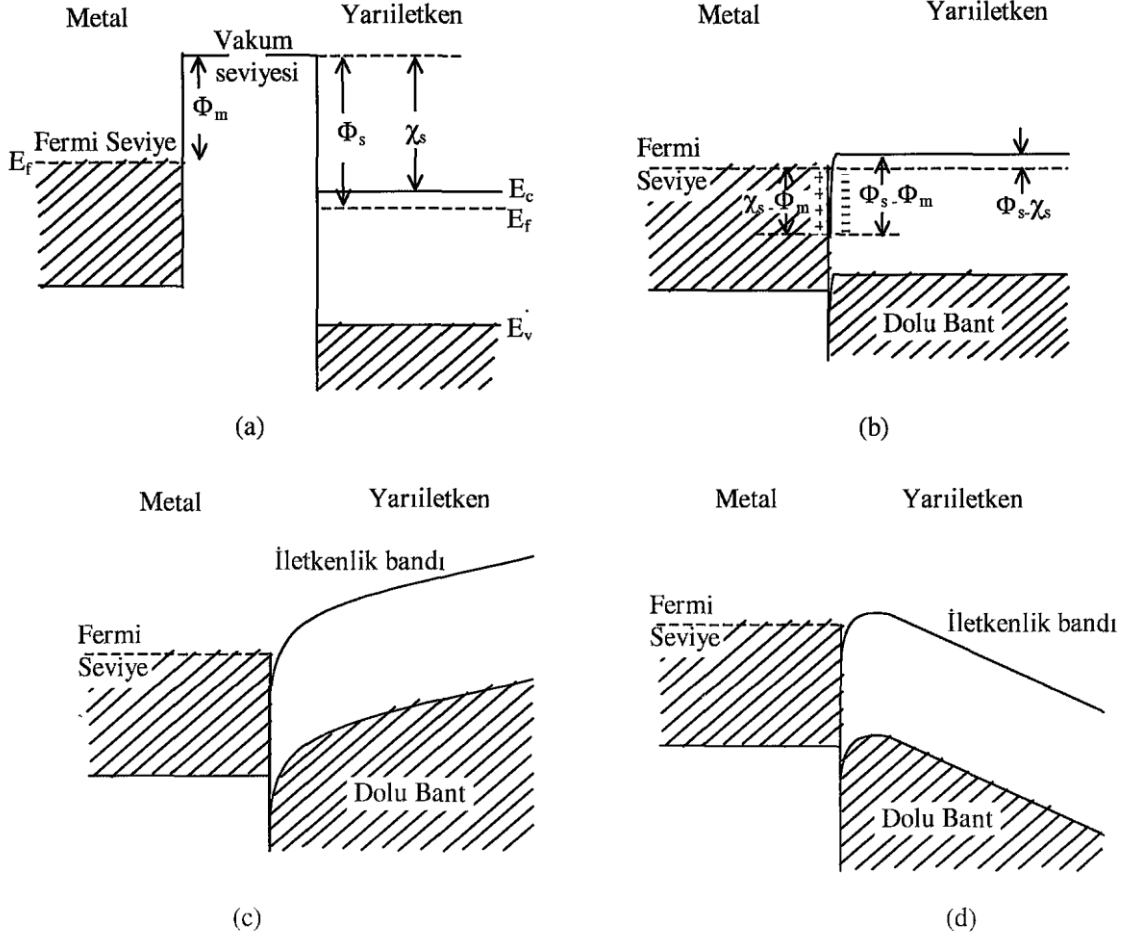
şeklindedir. A, kontağın kesit alanı ( $\text{cm}^2$ );  $R^*$ , Richardson sabiti; T, mutlak sıcaklık (K); k, Boltzman sabiti;  $e\Phi_b$  engel yüksekliğidir (eV).  $V \gg kT/e$  beslem durumuna doğru beslem denir. Yarıiletken tarafına +V gerilimi uygulanırsa (Şekil 3.1(d)) iletkenlik bandı eV kadar alçalır ve yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği eV kadar artar. Oluşan net akım  $-I_0$  değerine yaklaşır. Bu beslem durumuna da  $V \ll -kT/e$  olduğu için ters beslem denir.

Buradan anlaşılacağı gibi yarıiletken tarafındaki potansiyel engelini yüksekliği uygulanan voltaja bağlı olarak değişir. Metal tarafındaki engel yüksekliği voltajdan bağımsızdır.

### 3.1.2. Metal n-tipi yarıiletken omik kontak

Akımı her iki doğrultuda kolayca geçirebilen kontaklara omik kontak denir. Kontakta önce (Şekil 3.2(a)) yarıiletkenin fermi seviyesi metalin fermi seviyesinden  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar aşağıdadır ( $\Phi_m < \Phi_s$ ). Kontakta sonra (Şekil 3.2(b)) elektronlar metalden

yarıiletken, negatif bir yüzey yükü oluşturacak şekilde akarlar. Metal tarafında, ayrılan elektronlardan dolayı pozitif bir yüzey yükü ve böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası meydana gelir.



**Şekil 2.2.** Metal n-tipi yarıiletkende omik kontakın enerji- band diyagramı,  
 (a) kontak öncesi, (b) kontak sonrası (termal dengede),  
 (c)  $V < 0$  olması durumunda, (d)  $V > 0$  olması durumunda.

Yük değiş tokuşu bittikten sonra yarıiletkenin Fermi seviyesi  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar yükselir. Böylece her iki materyalin Fermi seviyeleri termal dengeye gelir. Termal denge kurulduktan sonra kontakın her iki tarafındaki yüzey yüklerinden dolayı dipol takakası oluşur. Bu tabaka oluşuktan sonra kontaktaki yük taşıyıcıları her doğrultuda kolayca akabilecek durumdadır.

Metal tarafına +V gerilimi uygulanırsa, yarıiletkeniden metale akan elektronlar için engel olmadığından kolayca hareket edebilirler (Şekil 3.2(c)). Eğer yarıiletkene +V gerilimi uygulanırsa yarıiletken tarafı aşırı negatif yüklerden kaynaklanan engel yüksekliği çok az olacaktır ve elektronlar metalden yarıiletkene doğru kolayca akacaklardır (Şekil 3.2(d)). Yani elektronlar her iki yönde de hareket halindedir.

Yarıiletkene pozitif ve metale negatif voltaj uygulandığında, metaldeki elektronlar yarı iletken tarafına kolay bir şekilde geçerler ve bundan dolayı omik kontaklar enjeksiyon kontakları da denir.

### 3.2. Metal p-Tipi Yarıiletken Kontaklar

Bu tür kontaklarda da kontağın türünü anlamak için, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bakmak gerekir. Bu kontaklar da omik ve doğrultucu kontak olmak üzere iki türdür.

#### 3.2.1. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak

Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük ise ( $\Phi_m < \Phi_s$ ), doğrultucu kontak oluşur. Kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar düşüktür. Kontakta sonra metalden yarıiletkene Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar elektron akışı meydana gelir, buna bağlı olarak yarıiletkenin yüzey tabakası negatif olarak yüklenmiş olur. Bu negatif yük iyonize olmuş akseptörlerle oluşur ve bu yük d kalınlıklı bir uzay yükü tabakası boyunca dağılır. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar yükseldiğinden, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

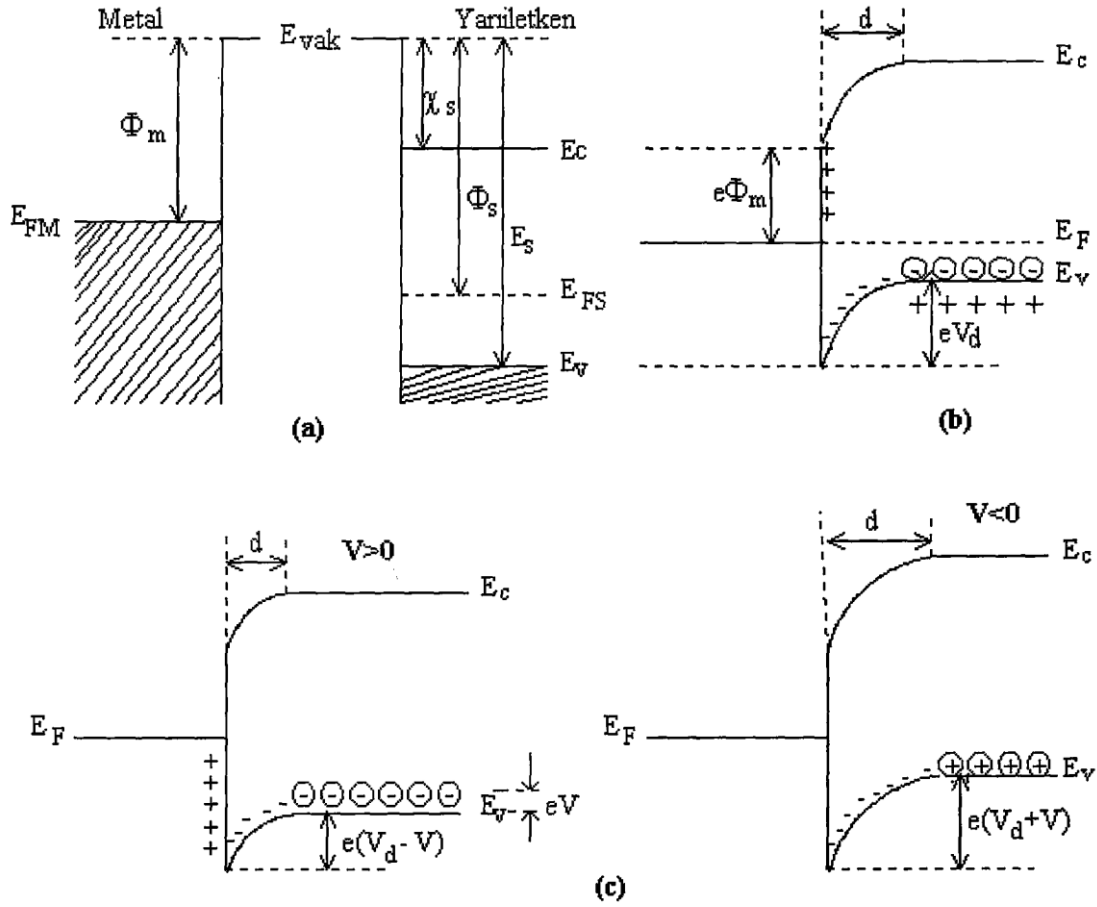
$$eV_d = e(\Phi_s - \Phi_m) \quad (3.7)$$

olur. Burada  $V_d$ , difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontakta metal tarafındaki holler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_b = e(E_s - \Phi_m) \quad (3.8)$$

burada  $E_s$ , valans bandın tepesi ile vakum seviyesinin tabanı arasındaki enerji farkıdır.

Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkendeki bazı holler potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanıp metalin içine geçebilir. Aynı şekilde metalde termal olarak oluşan bazı holler de engeli aşacak kadar enerji kazanıp, yarıiletken içine geçebilir. Böylece kontakta engelden geçen eşit ve zıt yüklü  $I_0$  akımı oluşur.



Şekil 2.3. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontakta enerji bant diyagramları  
a) kontak öncesi b) kontak sonrası durum c)  $V \neq 0$  durumu.

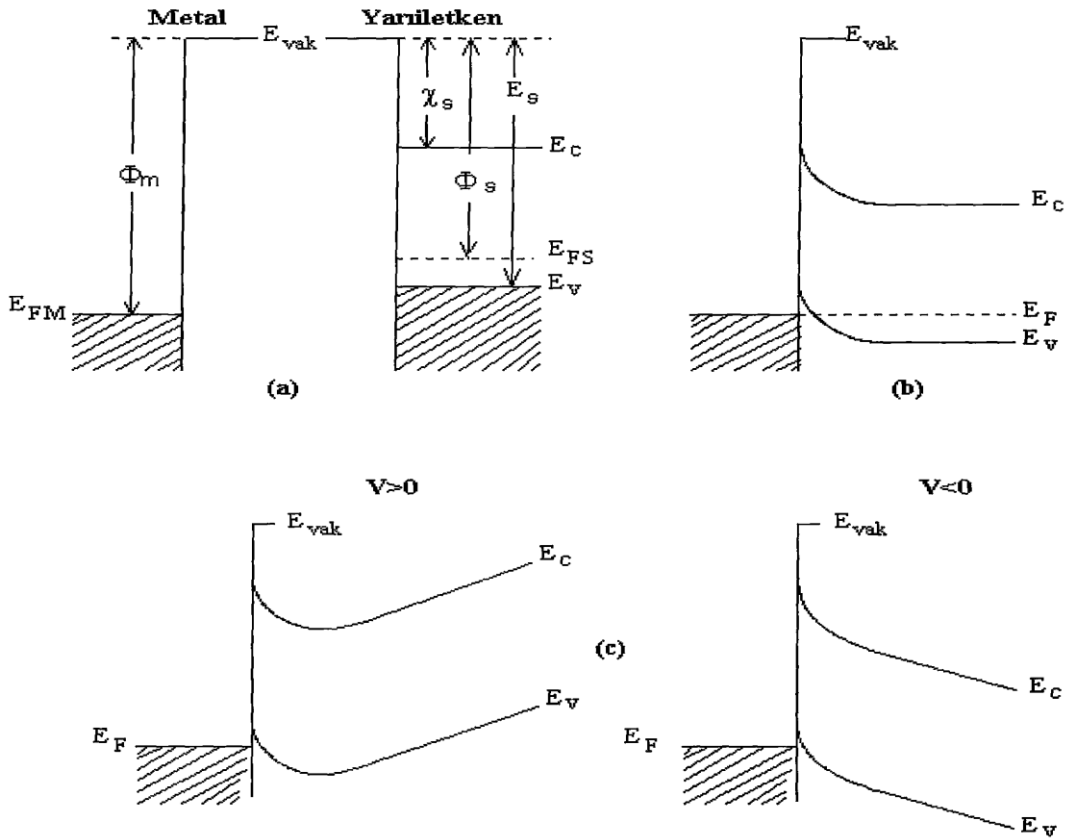
Eğer yarıiletkene bir  $V$  gerilimi uygulanırsa (Şekil 3.3(c)), soldan sağa akan hol akımı değişmez, fakat sağdan sola hol akımı  $\exp(eV/kT)$  çarpanı kadar değişir. Bundan dolayı yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü  $eV$  kadar düşer ve buna bağlı olarak sağdan sola geçen holler için engel yüksekliği  $eV$  kadar azalır. Sonuç olarak sağdan sola akım doğrultusu (yarıiletkenden metale geçen hollerin oluşturduğu akım) pozitif olarak kabul edilirse, karakteristik akım;

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.9)$$

olarak tanımlanır. Bu bir doğrultucu kontaklıdır.

### 3.2.2. Metal p-tipi yarıiletken omik kontak

Metal p tipi yarıiletken kontakta  $\Phi_m > \Phi_s$  olursa omik kontak oluşur. Yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar yukardadır. Kontaklıktan sonra metal ve yarıiletkenin elektrokimyasal enerjileri (Fermi seviyeleri) aynı düzeye gelinceye kadar yarıiletkenin metale elektron geçişi gerçekleşir. Denge durumunda yarıiletkenin Fermi seviyesi  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar alçalır.



Şekil 2.4. Metal p-tipi yarıiletken omik kontakta enerji bant diyagramları  
a) kontaklıktan önce b) kontaklıktan sonraki durum c)  $V \neq 0$  durumu.

### 3.3. Metal Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

MS ve MIS yapılarda akım iletimi genellikle çoğunluk taşıyıcılar ile gerçekleşir. Sıcaklık, arayüzey durumları seri direnç ve metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka nedeniyle akım iletim mekanizması MS ve MIS yapılarda farklılık gösterir. Bu yapılarda geçerli olabilecek akım iletim mekanizmaları şunlardır: Termiyonik emisyon (TE), Difüzyon, Termiyonik emisyon-difüzyon, Kuantum mekaniksel tünelleme, Üretilme–yeniden birleşme, Azınlık taşıyıcı konsantrasyonu ve  $T_0$  etkili akım iletimidir.

#### 3.3.1. Termiyonik emisyon teorisi

Termiyonik emisyon, sıcak bir yüzeyden elektron veya boşluk salınması olarak bilinir (Bethe, 1942). Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda termiyonik emisyon teorisi, taşıyıcıların (elektron ve boşluklar) ısısal enerjileri nedeniyle, potansiyel engelini asarak metalden yarıiletken veya yarıiletkenden metale geçmeleri esasına dayanır. Bu olay, metal/n-tipi yarıiletken yapılarda elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken yapılarda ise boşluklar tarafından, yani her iki yapıda da çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır (Ziel, 1968; Rhoderick ve Williams, 1988).

Bu teoriye göre;

- a) Akım termal olarak uyarılan çoğunluk taşıyıcılar ile sağlanır.
- b) Potansiyel engel yüksekliği  $kT/q$  enerjisinden çok büyüktür. ( $q\Phi_b \gg kT$ )
- c) Yarıiletkenden metale hareket eden serbest hollerin tüketim bölgesindeki çarpışmaları ihmal edilebilir.
- d) Görüntü (hayal) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmektedir ve akım engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır.

Bu varsayımlar doğrultusunda yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu  $J_{sm}$ , potansiyel engelini geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve bunların hızı ile ifade edilir:

$$J_{sm} = \int_{E_f + q\Phi_b}^{\infty} q v_x dn \quad (3.10)$$

Burada  $E_F + q\Phi_b$  metalden TE için gerekli minimum enerji,  $v_x$  ise iletim hızıdır.  $dn$ , küçük bir enerji aralığında enerji yoğunluğudur. Bu ifadeden hareketle metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda metalden yarıiletken geçen elektronlar için akım yoğunluğu denklemi;

$$J_{ms} = \left( \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(-\frac{q(\Phi_b)}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.11)$$

şeklinde verilir. Burada  $m^*$ , taşıyıcının etkin kütlesi;  $k$  Boltzmann sabiti;  $h$ , Planck sabitidir. Buradan,

$$J_{ms} = R^* T^2 \exp\left[-\frac{q\Phi_b}{kT}\right] \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.12)$$

ifadesi yazılır. Burada  $R^*$ , TE için Richardson sabitidir. Metalden yarıiletkene hareket eden elektronlar için engel yüksekliği aynı kaldığından metalden yarıiletkene doğru akım yoğunluğu uygulanan gerilimden etkilenmez. Bu akım yoğunluğu, dengede ( $V=0$ ) iken, yarıiletkenden metale geçen akım yoğunluğuna eşittir. Buna göre metalden yarıiletken doğru akan akım,

$$J_{ms} = -A^* T^2 \exp\left[\frac{-q\Phi_b}{kT}\right] \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilir. Toplam akım yoğunluğu 3.12 ve 3.13 denklemlerinin toplamı olarak ve metalden yarıiletkene geçen akımın yönü pozitif seçilirse,

$$J_n = J_{sm} + J_{ms} \quad (3.14)$$

$$J_n = \left( A^* T^2 \exp\left[\frac{-q(\Phi_b)}{kT}\right] \right) \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3.15)$$

şeklinde yazılır. Burada  $A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right)$  terimi, sızıntı akımı olarak da adlandırılan doyum akım yoğunluğudur.

### 3.3.2. Difüzyon teorisi

Aralarında yoğunluk farkı bulunan bölgeler arasında, yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru gerçekleşen yük geçiş olayına difüzyon denir. Schottky tarafından tanımlanan difüzyon teorisinin dayandığı varsayımlar aşağıda sıralanmıştır:

- i) Potansiyel engelin yüksekliği  $kT/q$  enerjisinden büyüktür
- ii) Tüketim bölgesindeki elektronların çarpışma etkisi ihmal edilemez.
- iii)  $x=0$  ve  $x=w'$  deki taşıyıcı konsantrasyonları, akımdan etkilenmemiştir (yani onlar termal denge değerine sahiptir)
- iv) Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir.

Bu kabuller doğrultusunda tüketim bölgesindeki akım, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğundan akım yoğunluğu denklemi kullanılır. Bu denklem metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için,

$$J_x = J_n = q \left[ n(x) \mu E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (3.16)$$

$$J_x = q D n \left[ \left( \frac{q n(x)}{kT} \right) \left( \frac{\partial v(x)}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial n}{\partial x} \quad (3.17)$$

şeklindedir. Burada  $n(x)$  elektron yoğunluğu  $\mu$  elektron mobilitesi,  $D_n$  elektron difüzyon sabiti ve  $E(x)$  Schottky bölgesindeki elektrik alanıdır. Buna göre difüzyon kuramında akım ifadesi,

$$J_x = J_{SD} \left[ \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.18)$$

Difüzyon teorisindeki doyma akım yoğunluğu ( $J_{SD}$ ) , gerilim ile çok daha hızlı değişir fakat TE doyum akım yoğunluğuna göre sıcaklığa daha az bağlıdır.

### 3.3.3. Termiyonik emisyon - difüzyon teorisi

Crowell ve Sze (1966), TE ve difüzyon teorisini birleştirerek termiyonik emisyon difüzyon teorisini geliştirdiler. Teori MS arayüzey kenarında tanımlanmış olan  $v_r$  rekombinasyon hızı üzerine kurulmuştur. Metal ile yarıiletken gövde arasına uygulanan gerilim, metale doğru bir elektron akısına neden olur. Taşıyıcıların bir kısmı optik fonon geri saçılmalarına bir kısmı da kuantum mekaniksel yansımalara uğradığından akım değeri azalır. Sze (1981), bunun nedenini rekombinasyon hızındaki azalmaya bağlamıştır. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisine göre elektronlar MS arayüzeyinde optik fononlarla etkileşmeksizin potansiyel engel üzerinden salınma olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değeri göz önüne alınarak  $R^*$  Richardson sabiti,  $R^{**}$  olarak değişir. Buna göre en genel akım-gerilim ( $I$ - $V$ ) ifadesi:

$$J = J_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (3.19)$$

ile verilir. Burada  $T$  sıcaklık,  $n$  diyotun idealite faktörü ve  $J_0$  doyma akım yoğunluğu olup,

$$J_0 = -R^{**}T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilir.  $R^{**}$ , düzenlenmiş etkin Richardson sabitidir.  $\beta$ , engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı olmak üzere,

$$R^{**} = R^* \exp\left(\frac{\beta}{kT}\right) \quad (3.21)$$

ile verilir. Termiyonik emisyon teorisine göre ideal bir Schottky diyotda  $n = 1$ 'dir. İdeal diyottan sapmaları belirlemek amacıyla bir idealite faktörü,  $n$  tanımlanır. Buna göre akım yoğunluğu ifadesi,

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (3.22)$$

şeklini alır. Burada  $n$  idealite faktörü 1'den uzaklaştıkça engel yüksekliğinin voltaja bağlılığı artmaktadır. İdealite faktörü yarıiletken ile dengede arayüzey durumları ( $N_{ss}$ ) ve metal yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakasının kalınlığı ( $\delta$ ) cinsinden,

$$n = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[ \frac{\varepsilon_s}{w} + qN_{ss} \right] \quad (3.23)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemde ikinci terimin artması ile ideallikten uzaklaşılır. Yani idealite faktörü, hem yalıtkan tabaka kalınlığının artmasıyla hem de arayüzey durumlarının artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Engel alçalması ve  $R^{**}$ 'nin alana bağımlı olması nedeniyle ideal Schottky diyotlarında  $n$  idealite faktörü  $1 < n < 1,2$  arasında değer alır.

### 3.3.4. $T_0$ etkili akım iletimi

İdealite faktörü 1'den büyük olması hayali kuvvet ya da arayüzey durumlarından ortaya çıkıyorsa  $n$  sıcaklıktan bağımsız olmalıdır, fakat idealite faktörünün 1'den büyük olması termoiyonik alan emisyonundan veya tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımlarından etkileniyorsa, idealite faktörü  $n$  sıcaklığa bağlıdır.  $T_0$  etkili akım yoğunluğu karakteristiği,

$$J = R^{**} T^2 \exp \left[ -\frac{q\Phi_b}{k(T+T_0)} \right] \left\{ \exp \left[ \frac{qV}{k(T+T_0)} \right] - 1 \right\} \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $T_0$  geniş bir sıcaklık aralığında sıcaklık ve voltajdan bağımsız olan sabit bir parametredir.  $n$ 'nin sıcaklığa bağlılığı deneysel olarak

$$n = 1 + \frac{T_0}{T} \quad (3.25)$$

olarak ifade edilir.

### 3.4. Akım Voltaj Verilerinden Kontak Parametrelerinin Elde Edilmesi

Termiyonik emisyon için akım gerilim ifadesi

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.25)$$

dır. Burada

$$I_0 = AR^*T^2 \exp \left( -\frac{e\Phi_b}{kT} \right) \quad (3.26)$$

ile verilir. Bu durum ideal Schottky diyotları için geçerlidir. Arayüzey tabakalı durumda uygulanan gerilimin tümü tüketim bölgesi boyunca düşmeyeceğinden, burada bir  $n$  idealite faktörü tanımlamalıyız bu faktör diyodun ideal oluşunun bir ölçüsüdür. Böylece karakteristik akım için,

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3.27)$$

şekline dönüşür. İdealite faktörü her zaman birden büyüktür. Ayrıca uygulanan gerilimin yüksek değerlerinde, akım gerilim karakteristiğinde bükülmeye sebep olan bir etken vardır. Bu seri dirençtir ve  $R_s$  ile gösterilir. Seri direncin de hesaba katılmasıyla karakteristik akım,

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3.28)$$

şeklini alır.  $I_0$  doyma akımı, yarı logaritmik akım gerilim grafiğinin doğru beslem tarafındaki lineer kısmının  $V=0$  noktasına doğru ekstrapolasyonu ile elde edilir.  $V > 3kT/e$  için 1 ihmal edilirse ve  $R_s$  göz ardı edilirse, idealite faktörü yine bu grafiğin lineer kısmının eğiminden bulunur. Yani,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3.29)$$

denklemleri ile idealite faktörü bulunur.

Ayrıca  $R_s$ ,  $\Phi_b$ ,  $n$  gibi kontak parametrelerinin bulunabilmesi için birçok yöntem ortaya konmuştur. Bunlardan en bilineni Cheung (1986) tarafından türetilen Cheung fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonları elde etmek için ilk önce  $I_0$ ' ın değeri yerine yazılarak denklem (3.27)' nin her iki tarafının doğal logaritması alındığında,

$$\ln I = \ln(AR^*T^2) - \frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (3.30)$$

elde edilir ve buradan  $V$  ifadesi için,

$$V = \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I}{AR^*T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (3.31)$$

elde edilir. Bu denklemin her iki tarafın  $\ln I$ ' ya göre türevi alınırsa,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (3.32)$$

Birinci Cheung fonksiyonu elde edilmiş olur. Denklem 3.32' den görüleceği gibi,  $dV/d(\ln I)$ 'nin  $I$ 'ya göre grafiği lineerdir. Grafiğin eğimi  $R_s$ 'yi verir. Aynı grafiğin,  $I=0$  için  $dV/d(\ln I)$  eksenini kestiği noktadan  $n$  idealite faktörü bulunabilir. Yani,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \Big|_{I=0} \quad (3.33)$$

dir. Diğer parametreleri bulabilmek için Denklem 3.31' de bir düzenleme yapılırsa.

$$V - \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I}{AR^*T^2}\right) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.34)$$

burada denklemin her iki tarafı  $H(I)$ 'ya eşitlenmesiyle aşağıdaki iki denklem elde edilir;

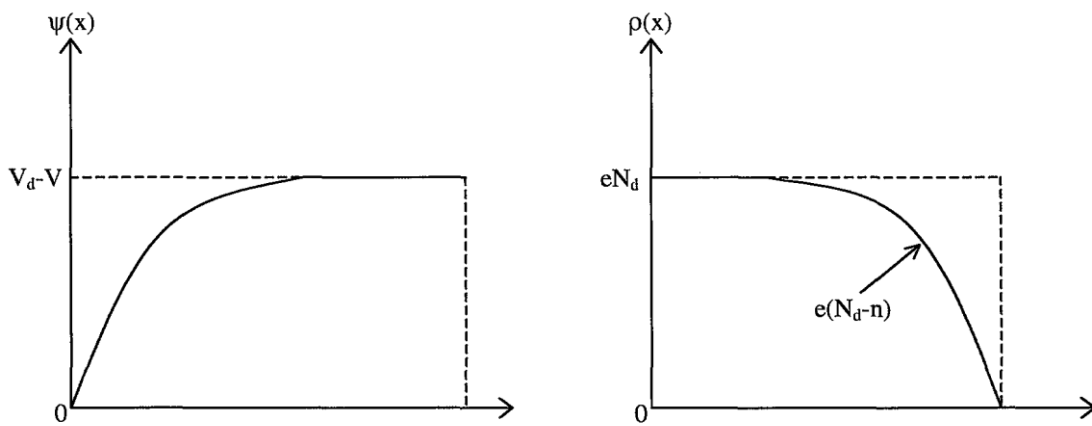
$$H(I) = V - \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I}{AR^*T^2}\right) \quad (3.35)$$

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.36)$$

Denklem (3.33)' ten elde edilen  $n$  değeri, Denklem (3.35)' deki  $H(I)$  denkleminde yerine yazılır. Buradan  $H(I)$ 'nın  $I$  ya grafiği çizilir. Bu grafik lineerdir. Denklem (3.36)' dan görüleceği gibi grafiğin eğimi  $R_s$ ' yi,  $I=0$  için  $H(I)$  eksenini kestiği nokta ise  $n\Phi_b$  yi verir.  $n$  değeri bilindiği için buradan engel yüksekliği  $\Phi_b$  elde edilir. Denklem 3.35 ve 3.36 ikinci Cheing fonksiyonlarıdır.

### 3.5. Metal Yarıiletken Kontaklarda Schottky Kapasitesi

Metal yarıiletken kontaklarda arınma bölgesi, yarıiletken tarafındaki uzay yükleri ( $n$  tipi için iyonize olmuş donörler;  $p$  tipi için iyonize olmuş akseptörler) ve metal tarafındaki negatif yüzey yüklerinden dolayı bir kondansatör gibi davranır. Ters beslemde gerilim artarsa yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metalden uzaklaşırlar ve buna bağlı olarak gerilim artmasından dolayı arınma bölgesinin genişliği artar. Arınma bölgesindeki yük değişir. Tüketim bölgesindeki bu yük değişimi sığa değişimine sebep olur (Rhoderick ve Williams, 1988; Ziel, 1968). Bu nedenden dolayı bu diyotlar kondansatör olarakta kullanılırlar. Kontakın yarıiletken tarafında metale yakın önemli bir hol yoğunluğu mevcutsa, yeni Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesi ile çakışacağından hol yoğunluğu düşecektir.



Şekil 2.5. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakta, a) potansiyel dağılımı b) Yük dağılımı

Ters beslem altındaki kontak sığasında diyot parametreleri ile ilgili önemli bilgiler elde edilebilir. Metal yarıiletken kontağın potansiyel dağılımı ve yük yoğunluğu arasındaki ilişki Poisson eşitliği ile verilir (Ziel, 1968):

$$\nabla^2 \psi(x) = \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.37)$$

Bu denklemde  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti,  $\rho(x)$  konuma bağlı uzay yük yoğunluğudur.  $N_d$  yarıiletkenin donör yoğunluğu,  $n$  metalin iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu olmak üzere;  $\rho(x)$  uzay yük yoğunluğu;

$$\rho(x) = e(N_d - n) \quad (3.38)$$

şeklinde ifade edilir. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın  $\psi(x)$  yüzey potansiyel fonksiyonu ile  $\rho(x)$  uzay yükü yoğunluğunun konuma bağlı değişimleri Şekil (3.5)' te verilmiştir.

Engel tabakasının difüzyon potansiyeli  $V_d$  ile, kontağa uygulanan potansiyel  $V$  ile gösterilir;  $e(V_d - V) \gg kT$  olduğundan  $0 \leq x \leq d$  aralığında  $N_d \gg n$  olur. Bu nedenle

$$\rho(x) \cong eN_d \quad (3.39)$$

ifadesi yazılabilir. (3.38) ve (3.39) denklemleri poisson denkleminde kullanılırsa

$$\frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = -\frac{eN_d}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.40)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (3.40) sınır şartları altında çözülürse potansiyel dağılımını bulunabilir. Sınır şartları:

- 1)  $x = 0$  da  $\psi(x) = 0$
- 2)  $0 \leq x \leq d$   $\psi(x) = V_d \pm V$

$$3) \quad x = d \text{ de } \quad \frac{d\psi(x)}{dx} = 0$$

Üçüncü sınır şartı göz önünde alınarak Denklem (3.40)' ın integrali alınırsa kontak bölgesindeki elektrik alanı elde edilir.

$$E(x) = \frac{d\psi(x)}{dx} = -\frac{eN_d}{\varepsilon_s \varepsilon_0} (x - d) \quad (3.41)$$

Bu ifadenin birinci sınır şartı altında integralini alınırsa potansiyel dağılım fonksiyonunu bulunur:

$$E(x) = -\frac{eN_d}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \left( \frac{1}{2} x^2 - dx \right) \quad (3.42)$$

Bu denklemi de ikinci sınır şartı altında çözümlerse Schottky tabakasının genişliği (d) bulunur:

$$d = \left[ \frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0}{eN_d} (V_d \pm V) \right] \quad (3.43)$$

Bu denklemde  $V_d$  sıfır gerilim altında difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken tarafına pozitif gerilim uygulandığında kontak ters beslemmedir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu;

$$Q = eN_d d = [2\varepsilon_s \varepsilon_0 eN_d (V_d \pm V)]^{1/2} \quad (3.44)$$

eşitliği ile ifade edilir. Birim alan başına küçük sinyal kapasitesi uygulanan voltaja göre yük değişimi olarak tanımlanır.

$$C = \frac{dQ}{dV} = \left[ \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 eN_d}{2(V_d \pm V)} \right]^{1/2} = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{d} \quad (3.45)$$

Bu ifadeden; C 'nin V ile ters,  $N_d$  ile doğru orantılı olduğu görülür. Uygulanan voltaj(V) artırıldığında; kapasite (C) azalır. Schottky tabakasının genişliği (d) artar. Donor

yoğunluğu ( $N_d$ ) artarsa, kapasite artar, buna bağlı olarak Schottky tabakasının genişliği ( $d$ ) azalır. Denklem 3.41' den;

$$C^{-2} = \frac{2(V_d+V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d} \quad (3.46)$$

olarak yazılabilir. Bu ifadeden anlaşılabacağı üzere  $C^{-2} - V$  grafiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğiminden,

$$N_d = \frac{2}{e \epsilon_s \epsilon_0} \cdot \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (3.47)$$

elde edilir. Doğrunun yatay eksenini kestiği noktadan ise  $V_d$  (difüzyon potansiyeli) bulunur.

### 3.6. Schottky Diyotlarının Kapasitansı

Metal/n-tipi yarıiletken ( $\Phi_m > \Phi_s$ ) ve metal/p-tipi yarıiletken ( $\Phi_s > \Phi_m$ ) kontaklarında, yük taşıyıcıları konsantrasyonlarının metal ve yarıiletken arasında yeniden dağılımı neticesinde, yarıiletkenin sınır bölgesinde elektronlardan (n-tipi baz için ) veya deliklerden (p-tipi baz için) arınma ve yüksek dirence sahip tabaka meydana gelmektedir. Bu bölgenin kalınlığı ( $L_0$ ) dışarıdan uygulanan gerilimle değişmektedir. Bu tür metal yarıiletken kontağın (veya Schottky diyotun) yapısı kondansatörün yapısına benzer. Metal-arınma bölgesi-yarıiletken sistemi, iki iyi iletkenin (metal-yarıiletken) arasındaki yüksek dirençli tabakadan oluşmaktadır. Bu tabakanın direnci, yarıiletkenin iç bölgesinin direncinden çok büyüktür. Bilinen kondansatörlerle karşılaştırıldığında, Schottky diyotundaki arınma tabakası, kondansatörün metalik elektrotları arasındaki yalıtkan tabakaya benzer.

Schottky diyota dışarıdan gerilim uygulandığında, devrede ilk anda oluşan akımın etkisiyle, uzay bölgesinin sınırlarındaki elektrik yükleri değişmektedir. Buradaki olaylar kondansatördeki olaylara benzer. Schottky diyotunun sığası, uzay yükü bölgedeki potansiyel engel yüksekliğinin değişimine bağlıdır, bu nedenle diyotun sığası engel sığası olarak adlandırılır. Diferansiyel engel sığası şu şekilde verilir,

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (3.48)$$

burada  $dQ$  engel bölgesindeki yük değişimi,  $dV$  uygulanan gerilimin değişimidir. Diyotun engel sığası, zamanla değişen gerilim uygulandığında kendini göstermektedir. Bu durumda kontaktan akım geçmektedir. Kontaktaki yük taşıyıcıların hareketine bağlı olmayan akım, engel sığasını belirlemektedir.

Schottky diyotun arınma bölgesinin elektrik alanı ( $E$ ) veya potansiyelinin koordinatla dağılımını bulmak için Poisson denklemini çözmek gerekir.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon\epsilon_0} \quad (3.49)$$

$E$ , elektrik alan şiddeti,  $\rho(x)$ , maddenin hacimsel yük yoğunluğu,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti,  $\epsilon$  maddenin bağıl dielektrik sabitidir. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için, tüm kontak potansiyel farkı  $n$  tipi yarıiletkende oluşur. Elektrik alan şiddeti ve elektrostatik potansiyel arasındaki bağıntı,

$$E = -\frac{d\phi}{dx} \quad (3.50)$$

şeklindedir; burada  $d\phi$ , elektrostatik potansiyedir.

$$\rho(x) = en_{(x)} \quad (3.51)$$

$n_{(x)}$ ,  $n$  tipi yarıiletkenlerde mesafeye bağlı elektron konsantrasyonu,  $e$ ; elektron yüküdür. Verilen değerleri Denklem 3.48' de yerine yazılırsa,

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon\epsilon_0} \quad (3.52)$$

$$\frac{d}{dx} \left( -\frac{d\phi}{dx} \right) = \frac{en_{(x)}}{\epsilon\epsilon_0} \quad (3.53)$$

$$-\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{en_{(x)}}{\varepsilon\varepsilon_{(x)}} \quad (3.54)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{en(x)}{\varepsilon\varepsilon_0} = 0 \quad (3.55)$$

Denklem (3.55), 2. dereceden bir diferansiyel denklemdir, genel çözümü;

$$\varphi_{(x)} = \frac{en_{(x)}}{2\varepsilon\varepsilon_0} \left( \frac{x^2}{2} - L_0 x \right) + A(L_0 - x) + B \quad (3.56)$$

şeklindedir.  $L_0$ : kontak bölgesindeki elektrik alanının yarıiletkende yayılma derinliğidir. Denklem 3.56, sınır şartlarına uymaktadır.

$$\varphi(L_0) = 0 \quad (3.57)$$

$$E \Big|_{x=L_0} = -\frac{d\varphi}{dx} \Big|_{x=L_0} = 0 \quad (3.58)$$

(3.58) sınır şartları (3.56) denkleminde yerine yazılırsa

$$\varphi_{(L_0)} = \frac{en_{(x)}}{2\varepsilon\varepsilon_0} \left( \frac{L_0^2}{2} - L_0 L_0 \right) + A(L_0 - L_0) + B \quad (3.59)$$

$$\varphi(L_0) = 0 = B \quad (3.60)$$

$$E_{(0)} = E_0 = -\frac{d\varphi}{dx} \Big|_{x=0} = \left[ -\frac{2en_{(x)}}{2\varepsilon\varepsilon_0} \left( \frac{x^2}{2} - L_0 x \right) - 1 + A(-1) \right] \quad (3.61)$$

$$E_0 = -\frac{en}{\varepsilon\varepsilon_0} \left( \frac{x^2}{2} - L_0 x \right) + A \quad (3.62)$$

$$E_{\phi_0} = -\frac{d\phi}{dx}\bigg|_{x=L_0} \quad (3.63)$$

$$0 = -\left[ -\frac{2en_{(x)}}{2\epsilon\epsilon_0} (\phi_0 - x) + A(-1) \right] \quad (3.64)$$

$$0 = -\frac{en}{\epsilon\epsilon_0} (L_0 - x) - A \quad (3.65)$$

$X=L_0$ ; burada  $x=L_0$ ’ da  $A=0$  olur.

$$\phi_{(x)} = -\frac{en_{(x)}}{2\epsilon\epsilon_0} (\phi_0 - x) + A(L_0 - x) \quad (3.66)$$

$$\phi_{(x)} = -\frac{en_{(x)}}{2\epsilon\epsilon_0} (\phi_0 - x) \quad (3.67)$$

Yarıiletkende elektrik alanın yayılma derinliği  $L_0$ ’ ı bulmak için, arınma bölgesinin sınırında ( $x=0$ ) oluşan potansiyelin ifadesini kullanmak gerekir.

$$\text{Burada; } x_0=0 \text{ ise, } \phi_0 = -\frac{en}{2\epsilon\epsilon_0} L_0^2$$

$\phi_0$  ve  $\phi_k$  zıt taraflardan başlayıp sonlanıyor. Dolayısıyla  $\phi_0 = -\phi_k$

$$\frac{\phi_k}{e} = \frac{\phi_m - \phi_s}{e}$$

$$\phi_0 = \frac{\phi_m - \phi_s}{e} \text{ olur.}$$

$$-\frac{en}{2\epsilon\epsilon_0} L_0^2 = -\frac{\phi_m - \phi_s}{e} \quad (3.68)$$

$$L_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\phi_m - \phi_s)}{e.n.e}} \quad (3.69)$$

Yada

$$L_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\phi_k}{e.n.}} \quad (3.70)$$

Schottky kontağını paralel plakalı kondansatör olarak alırsak, sığası;

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0.S}{L_0} \quad (3.71)$$

olur. S, diyotun kesit alanıdır.

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0.S}{\left[\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\phi_k}{en}\right]^{1/2}}$$

$$C = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0.en}{2\phi_k}} S \quad (3.72)$$

### 3.7. Schottky Diyotlarının Kapasite-Voltaj Karakteristikleri

Schottky diyotuna dışarıdan gerilim uygulandığında, kontağın hacimsel yük bölgesinin kalınlığı değişmektedir. Diyot doğru yönde kutuplanırsa geçiş bölgesinin kalınlığı ve direnci azalır. Ters yönde uygulanan gerilim, geçiş bölgesinin kalınlığını ve direncini büyötmektedir. Böylece Schottky diyotuna uygulanan gerilimin etkisiyle, geçiş bölgesindeki hacimsel yük değişir.

Genellikle Schottky diyotların, p-n eklemlerin ve heteroeiklemlerin sığası iki bileşenden oluşmaktadır: engel sığası ve difüzyon sığası.

Kontağın ve eklemlerin engel sığası, geçiş bölgesindeki yük taşıyıcılarının yeniden dağılımına bağlıdır. Difüzyon sığası ise, yarıiletkenin baz bölgesindeki yüklerin yeniden dağılımı ile belirlenmektedir.

Schottky diyotlarının difüzyon sığası yoktur, onların karakteristikleri yalnızca engel sığası ile belirlenmektedir. Bu nedenle Schottky diyotların çalışma hızı çok

yüksektir. p-n eklemlerin hem engel sığası hem de difüzyon sığası vardır. Potansiyel fark uygulandığında geçiş bölgesine düşen potansiyel,

$$\varphi = \varphi_k - V \quad (3.73)$$

ile verilir.

$$C = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e n}{2(\varphi_k - V)}} \cdot S \quad (3.74)$$

V: + ise doğru beslem, V : - ise ters beslem olur. Görüldüğü gibi doğru beslemde C artar, ters beslemde C azalır. Uygulanan gerilimin işaret ve miktarına göre Schottky diyotun sığası değişir.

### 3.8. Fotovoltaik Özelliklerin Belirlenmesi

#### 3.8.1. Hava kütlesi

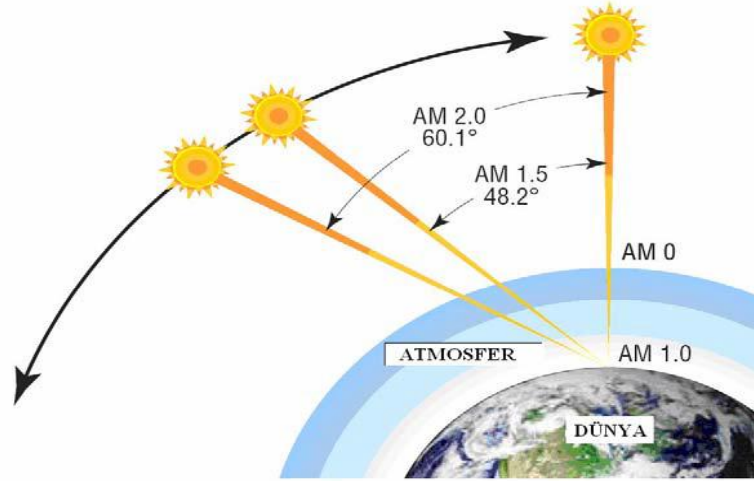
Güneş yüzeyi 5762 K sıcaklığa sahiptir ve ışıınım spektrumu bu sıcaklıktaki bir siyah cisim ışıma spektrumuna benzer. Güneş dünyadan yaklaşık ortalama 150 milyon km uzaklıktadır ve bundan dolayı dünya tarafından soğurulmaya uğrayan ışınların paralel geldiği kabul edilebilir. Güneş ışığının yoğunluğu atmosfer dışında yaklaşık 1370 W/m<sup>2</sup> ve yeryüzündeki yoğunluğu 0-1100 W/m<sup>2</sup> arasında değişim gösterir. Bu ışıınım spektral dağılımı sıfır hava kütlesi (AM0) olarak adlandırılır. Hava kütlesi dünya yüzeyine ulaşan ışınların spektrumunun ve yoğunluğunun atmosfer tarafından ne kadar etkilendiğini gösteren bir ölçüdür. Hava kütlesi (Air Mass)

$$\text{Hava Kütlesi} = 1/\cos\theta \quad (3.75)$$

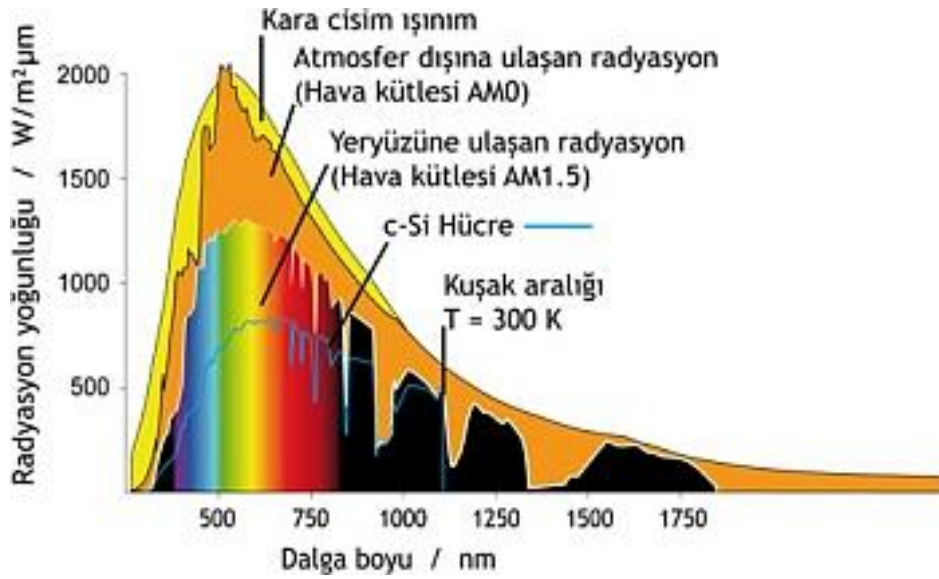
şeklinde tanımlanır. Burada  $\theta$  ışığın geliş açısıdır. Green (1992), hava kütlesini kolay yoldan bulmanın formülünü şöyle ifade etmiştir:

$$Hava\ Kütlesi = \sqrt{1 + \left(\frac{S}{H}\right)^2} \quad (3.76)$$

burada H cismin boyu ve S gölge boyudur. Güneş pillerinin performans ölçümleri AM1,5 spektrumlu ve toplam 1000 W/m<sup>2</sup> güce sahip ışık kullanılmaktadır. Şekil (3.6)'da hava kütlesi numaralarına göre güneş ışınlarının dünyaya gelişi ve Şekil (3.11)'de güneş ışınları spektrumu verilmiştir.



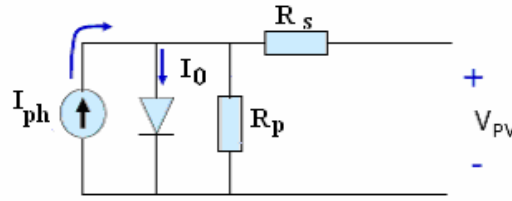
Şekil 2.6. Hava kütle numarasına göre ışınların dünyaya geliş açıları



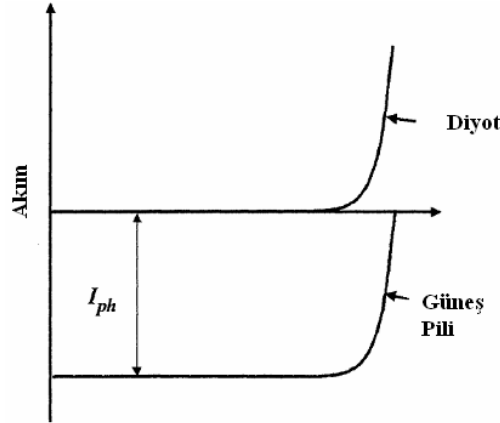
Şekil 2.7. Güneş ışınları spektrumu.

### 3.8.2. Güneş pillerinin karakterizasyonu

Güneş pillerinde fotovoltajik enerji dönüşümü iki basamaktan oluşur. Birincisi, soğurulan ışık tarafından elektron-hol çiftlerinin oluşması ve ikincisi, elektronların güneş pilinin negatif ucuna, hollerin pozitif ucuna gitmeleridir. Böylece elektriksel akım oluşur. Bir güneş pili Şekil (3.8)' de gösterildiği gibi doğrultucu bir diyota bağlanmış bir akım kaynağı gibi tanımlanabilir. Ayrıca Şekil (3.13)' te bir diyot ile bir güneş pilinin akım-voltaj grafikleri gösterilmiştir. Her güneş pili, iyi bir diyottur.



Şekil 2.8. Bir güneş piline ait eş değer devre.



Şekil 2.9. Güneş piline ait akım-voltaj grafiği.

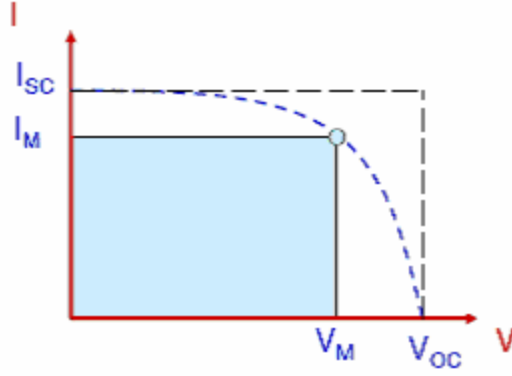
Shokley (1950), bir güneş pilinin akım-voltaj karakteristiğini şöyle ifade etmiştir;

$$I = I_{ft} + I_0 \left[ \exp \left( \frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.77)$$

Burada  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  mutlak sıcaklık,  $e$  elektronun yükü,  $V$  pilin iki ucuna uygulana gerilimi,  $I_0$  doyma akımıdır ve karanlıkta güneş pilinin klasik bir doğrultucu kontak gibi davrandığını ifade eder.  $I_{ft}$  ışık tarafından oluşturulan akımdır ve pil üzerine düşürülen ışık ile ilişkilidir. Şekil (3.10), Denklem (3.77)' e karşılık gelen akım-voltaj ifadesini temsil etmektedir. Burada  $I_{sc}$  kısa devre akımıdır ve ışık tarafından oluşturulan  $I_{ft}$  değerine eşittir.  $V_{oc}$  ise açık devre gerilimidir ve

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left( 1 + \frac{I_{ft}}{I_0} \right) \quad (3.78)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 2.10. Güneş pili verim hesaplama grafiği

Grafikte gösterilen  $I_m$  ve  $V_m$ , maksimum güce karşılık gelen akım ve voltaj değerleridir. Pilden elde edilen maksimum güç,

$$P_{max} = I_m \times V_m \quad (3.79)$$

olarak ifade edilir. Güneş pilinin enerji dönüşüm verimi ( $\eta$ ), pilden elde edilen maksimum gücün pil üzerine düşen ışığın gücüne oranıdır. Güneş pilinin verimi,

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (3.80)$$

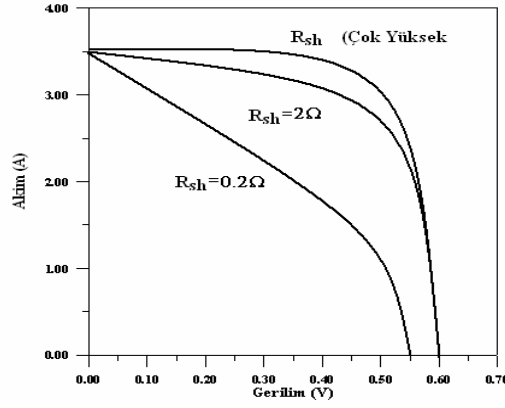
şeklindedir. Burada  $P_{in}$  pil yüzeyine düşen ışığın gücüdür.

Güneş pillerinin karakterizasyonunda kullanılan diğer bir parametre dolum çarpanı ( $FF$ ) dır. Elde edilen maksimum gücün, kısa devre akımı ile açık devre gerilimi çarpımı oranına dolum çarpanı,

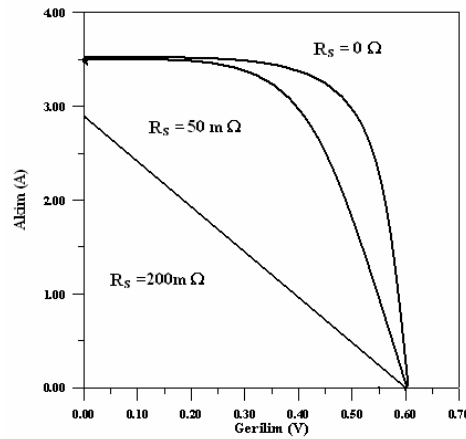
$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (3.81)$$

şeklinde ifade edilir.

Bir güneş pilinin dolum çarpanı bu pilin seri ve paralel direncinden doğrudan etkilenir. Paralel direncin ( $R_{sh}$ ) artması ve seri direncin ( $R_s$ ) azalması dolum çarpanını artırır. Paralel ve seri dirençlerin pil verimine etkileri Şekil (3.11) ve Şekil (3.12)' de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Güneş piline paralel direncin etkisi ( $R_s=0$  durumunda).



Şekil 2.12. Güneş piline seri direncin etkisi ( $R_{sh}=\infty$  durumunda).

### 3.9. Metal - Yarıiletken Schottky Diyotlarda Arayüzey Tabakasının Etkileri

Schottky–Mott teorisine göre Schottky diyotlarda engel yüksekliği metalle yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir, yani engel yüksekliği metalin iş fonksiyonuna çok sıkı bir şekilde bağlıdır. Fakat yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar, engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız olduğunu göstermiştir. N-tipi bir yarıiletken ile doğrultucu kontak haline getirilen bir metalin p tipi için omik kontak oluşturması gerekirken doğrultucu kontakta oluşturabileceği bulundu. Yarıiletken üzerindeki yüzey halleri cinsinden bunu açıkladı. Bu yüzey halleri yarıiletkenin içini metalden perdeler ve difüzyon potansiyelinin ve dolayısıyla engel yüksekliğinin gerçek değerinden farklı olmasına sebep olurlar. Yine Bardeen modeli, metal ile yarıiletken arasında bir yalıtkan tabakanın varlığını da kabul eder (Card ve ark., 1973).

Arayüzey halleri, tahmin edilen ve gözlenen Schottky engel yüksekliklerinin arasındaki farktan dolayı hesaba katılır. Bu arayüzey (yüzey) hallerini dört kısma ayırabiliriz.

i) Metal ile kontakten önce yarıiletken ve vakum seviyeleri arayüzeyinde mevcut olan asal yüzey halleri, bunlar genel olarak yarıiletken kristalin periyodik yapısının yüzeyde kesilmesinden ortaya çıkarlar (Crowel ve Sze, 1965).

ii) Metal ile kontakten sonra ortaya çıkan asal olmayan (extrinsic) yüzey halleri; bunlar yarıiletkenin yüzeyinde yığılmış olan yabancı atomların varlığından veya metalin yeteri kadar temiz olmayışından dolayı oluşan yüzey halleridir.

iii) Hem yarıiletkenin yüzeyinde hem de yarıiletkenin gövdesinde bulunan kusurlar (defects) ve kirlilerden ortaya çıkan asal olmayan yüzey halleri, bu haller metal buharlaştırıldığında yarıiletkenin ince bir tabakasıyla (arayüzey tabakası) metalden ayrılırlar. Bu durumda, bu hallerin dengede olduğu söylenir.

iv) Arayüzey kimyasal reaksiyonlarından ortaya çıkan arayüzey halleri veya metalle uyarılan yüzey halleri. Bazı metaller temiz yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırıldıklarında metal ile yarıiletken arasında kuvvetli bir kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyondan dolayı arayüzeyde arayüzey tabakası olarak kabul edilen yeni bir bileşik ve dolayısıyla yeni arayüzey halleri ortaya çıkmış olur. Metalle uyarılan veya metalle sebep olunan haller (metal-induced gap states- MIGS), metalden yarıiletkeneye yük transferiyle ortaya çıkan hallerdir. Bir metal bir yarıiletkenin yüzeyine temas

ettirildiğinde (kontak haline getirildiğinde) MIGS'ler yarıiletkenin yüzeyindeki asal yüzey hallerinin yerine geçebilirler.

Deneyssel olarak bu dört tipin varlığı gösterilmiştir. Teorik hesaplamalarda bu arayüzeylerin yapısı ve özellikleri ciddi bir şekilde tartışılmıştır. Bu dört tip arayüzey hallerini Schottky diyot karakteristiklerinin beklenilenden farklı çıkmasına sebep oldukları hem deneyssel hem de teorik olarak gösterilmiştir. Bunlara ilave olarak, metalle yarıiletken arasındaki ince oksit tabakası bant yapısı karakterine sahip değildir ve metal-yarıiletken kontaklardaki etkisi aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1) Bu tabakadaki potansiyel değişmesinden dolayı termal dengedeki sıfır beslem engel yüksekliği ideal bir Schottky diyotunun engel yüksekliğinden daha düşük olacaktır.

2) Elektronlar, bu tabakadan dolayı oluşan engelin içinden geçerler (tünelleme) ve bu durum Schottky parametrelerinin beklenilenden farklı çıkmasına neden olur.

3) Bir gerilim uygulandığında, bu gerilimin bir kısmı arayüzey tabakası boyunca düşeceğinden engel yüksekliği uygulanan geriliminin bir fonksiyonu olur. Engel yüksekliğinin bu beslem bağımlılığı,  $I$ - $V$  karakteristiklerinin biçiminin değişmesine sebep olur. Bu durum ideallikten sapma olarak tanımlanır ve idealite faktörü olan  $n$  cinsinden ifade edilir. Ayrıca, arayüzey tabakası ve arayüzey hallerinin Schottky diyot kapasitesine etki ve katkılarına aşağıdaki gibi söz edilebilir.

20 Å' dan daha küçük kalınlıklı arayüzey tabakası için arayüzey halleri metalle, 20 Å' dan daha büyük kalınlıklı arayüzey tabakası için arayüzey halleri yarıiletkenle dengededir. Arayüzey halleri, yüksek frekanslarda ( $f > \text{MHz}$ ) AC sinyaline cevap veremediğinden engel kapasitesine katkıda bulunamazlar. Bundan dolayı, arayüzey hal yoğunluğu beslemle değişmez ve sabit kalır (Bozkurt, 2009).

#### 4. DENEY DÜZENEGİ VE ÖLÇÜMLER

Bu bölüm Sn/p-Si/Al Schottky diyotunun yapımı için izlenen yöntemleri içerir. Bu çalışmada kullanılan kontaklar, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fizik Bölümü Yarı İletken Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarı'nda bulunan vakum kaplama sistemi (Şekil (4.1)) kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kontaklardan ölçümler sonucu elde edilen diyot parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç, dolum çarpanı ve pil verimi) ve karakteristikleri bu bölümde yer almaktadır.



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan vakum kaplama sistemi

#### 4.1. Numunelerin Hazırlanması ve Temizlenmesi

Bu çalışmada [100] doğrultusunda büyütülmüş, öz direnci  $\rho=1-10 \Omega.\text{cm}$  olan bor (B) katkılı p-tipi silisyum (p-Si) kullanılmıştır. Diyot yapımında iyi sonuçların alınabilmesi için, kullanılacak numunenin yüzeyinin organik ve mekanik kirlerden temizlenmesi için aşağıdaki işlemler sırasıyla yapılmıştır:

- 1) Aseton' da ultrasonik olarak 10 dk. yıkanır.
- 2) Metanol' da ultrasonik olarak 10 dk. yıkanır.
- 3) Deiyonize su ile iyice yıkanır.
- 4) RCA1 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ; 6:1:1) de  $60^\circ\text{C}$ ' de 10 dk. yıkanır.
- 5) Seyreltik HF ( $\text{H}_2\text{O}$ , HF; 10:1) ile 30 sn. yıkanır.
- 6) RCA2 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , HCl; 6:1:1) de  $60^\circ\text{C}$ ' de 10 dk. yıkanır.
- 7) Deiyonize su ile iyice yıkanır.
- 8) Seyreltik HF ( $\text{H}_2\text{O}$ , HF; 10:1) ile 30 sn. yıkanır.
- 9) 15-20 dk. akan deiyonize su ile iyice yıkanır.
- 10) Azot ( $\text{N}_2$ ) gazı ile kurutulur.

Ayrıca buharlaştırmada kullanılan metaller, metanol ve % 10 seyreltik hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde ve deiyonize su ile iyice yıkandı.

#### 4.2. Schottky Diyotların Yapılması

Numunenin önce mat tarafına omik kontak yapılması gerekir. Bunun için önce ısıtıcı pota % 10 seyreltik HCl ile yıkanıp, deiyonize su ile yıkanıp kurutuldu ve sonra vakum cihazındaki yerine yerleştirilerek yakılıp hazır hale getirildi. Sonra numuneler kimyasal olarak temizlendikten sonra daha önce çalıştırılarak hazır hale getirilen vakum cihazında mat yüzü aşağı bakacak şekilde yerleştirilir. Vakum işlemi sonucunda basınç  $10^{-5}$  torr değerine ulaşınca ısıtıcı pota içine yerleştirilmiş % 99.98 saflıktaki alüminyum (Al) metali buharlaştırıldı. Kısa bir süre bekledikten sonra ters işlem yaparak vakum cihazının içine hava girişi sağlandı. Numune vakum cihazından çıkartılarak daha önce kimyasal olarak temizlenmiş kuartz potanın içine yerleştirilerek, yine yakılarak temizlenmiş  $580^\circ\text{C}$  deki fırında 3 dk. tavlama işlemi yapıldı (Temirci, 2000). Tavlama işlemi yapılan fırın Şekil (4.2)' de gösterilmiştir. Böylece omik kontak

işlemi tamamlanmış oldu. Bu aşamadan sonra numune dört eşit parçaya kesildi. Bir parçası referans numune olmak üzere hemen Schottky kontak yapıldı. Bu işlem için daha önce kimyasal olarak temizlenen ve sadece kalay (Sn) metali buharlaştırma için kullanılan ısıtıcı potaya % 99.98 saflıktaki Sn metali kimyasal temizlenerek yerleştirildi. Sonra numuneyi uygun yükseklikte 1.2 mm çapındaki delikli maske üzerine, numunenin parlak tarafı aşağı gelecek şekilde Schottky kontak yapmak için yerleştirdik. Buharlaştırma için hazır hale gelen sistemimizin yeniden vakum alma işlemine başlayarak basıncın tekrar  $10^{-5}$  torr a düşmesi sağlandı ve buharlaştırma işlemi gerçekleştirdi.



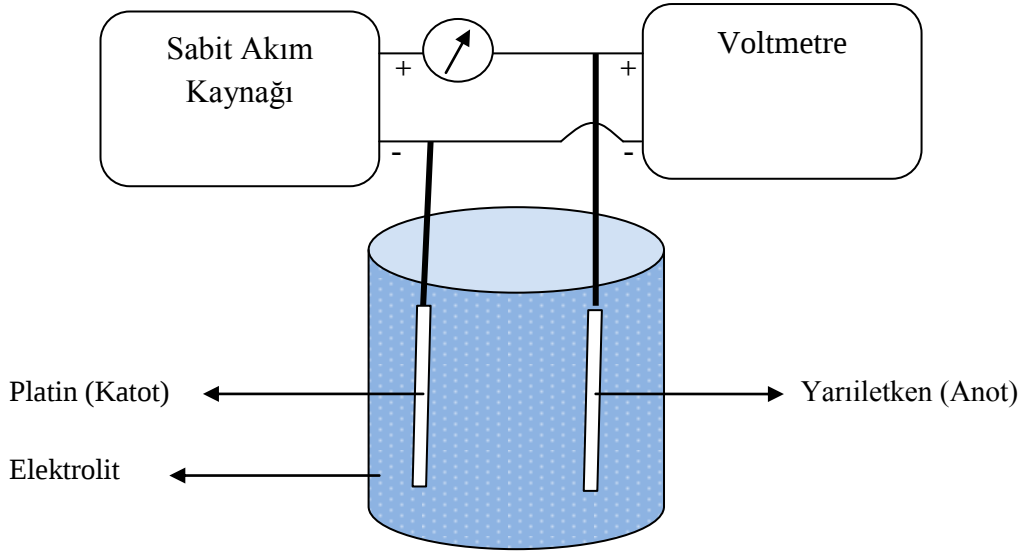
**Şekil 4.2.** Tavlama için kullanılan fırın

Böylece referans numune olarak  $Sn/p-Si/Al$  diyotu elde edilmiş oldu. Buharlaştırma işleminin ardından kısa bir süre bekledikten sonra sisteme hava verip numuneyi vakum cihazından çıkartılarak gerekli ölçümleri alındı.

Omik kontakları aynı olan, geriye kalan üç parça numuneyi anodik oksidasyon işleminden geçirmek üzere, numune tutucular ile numunenin omik tarafı gümüş pasta ile soğuk lehim yapıldı. Soğuk lehimlerin kuruması için 2 sa. bekledikten sonra lehim ve omik tarafının tamamına akım geçirmeyecek şekilde vaks ile kaplayıp, vaxın

kuruması için 24 sa. beklendi. Bu işlemlerin ardından numuneler anodik oksidasyon için hazır duruma gelmiş oldu.

Bir yarıiletken üzerinde dielektrik özelliği gösteren bir oksit tabakası oluşturmak için yapılan elektrokimyasal işleme ‘anodik oksidasyon’ işlemi denir. Anodik oksidasyon işleminin en belirgin karakteristiği genellikle oda sıcaklığında yapılmasıdır. Bu şekilde yarıiletken içindeki mevcut kirliliklerin konsantrasyonu değişmez. Anodizasyon işlemi Şekil (4.3)’ te görüldüğü gibi elektrolitik bir hücre içine yerleştirilmiş bir yarıiletken kullanılarak yapılır.



Şekil 4.3. Anodik oksidasyon işleminin devre şeması.

Yarıiletken güç kaynağının pozitif ucuna bağlanır. Güç kaynağının negatif ucuna ise asal bir metal olan platin elektrot bağlanmıştır.

Anodik oksidasyon (AO) işlemi ya düşük iç dirence sahip sabit gerilim kaynağı ile ya da yüksek iç dirence sahip sabit akım kaynağı altında yapılır. Akım yoğunluğunun değişken olması AO işlemini etkilemektedir. AO için güç kaynağı olarak gerilim kaynağı kullanıldığında, ilk gerilim uygulandığında geçecek akım değerleri, oksit tabaka direncinin küçük olması nedeniyle çok büyük olmaktadır. Bu da yarıiletken üzerinde oluşan oksit tabakasında bazı düzensizliklere ve doymamış bağ sayısında bir artmaya sebep olmaktadır. Sabit akım kaynağı kullanıldığında oksit tabakasını oluşturacak enerji denetimli olarak aktarıldığı için istenmeyen etkiler en aza

indirilmektedir. Bu nedenle AO işlemi, bu çalışmada sabit akım kaynağı ile yapılması tercih edilmiştir.

AO işleminden önce, numunenin parlak yüzünde laboratuvar ortamında oluşan oksit tabakasını kaldırmak için, numune seyreltilmiş % 10 luk HF çözeltisi ile temizleyerek ve deiyonize su ile iyice yıkayıp kurutulduktan sonra Şekil 4.3 de şematik olarak gösterilen AO işlemi düzeneğinde elektrolit içine yerleştirildi. Sabit akım altında oksitlenme işlemi  $1 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda yapıldı. Akım sabit olduğu göz önüne alınırsa, anodizasyon devresindeki voltmetreden gözlenen gerilim değerinin değişmesi devredeki direncin değişmesine, yani numune direncinin değişmesine, bu ise numune üzerindeki oksit tabakasının kalınlığının değişmesine bağlanır. Böylece gerilimin kontrol edilmesiyle dolaylı olarak numune yüzeyindeki oksit tabakasının kalınlığı kontrol edilmiş olur. Silisyum AO işleminde kimyasal tepkimeler aşağıdaki gibidir (Grandhi, 1983):

- 1) Elektrolit ortamındaki su,  $\text{H}^+$  ve  $(\text{OH})^-$  iyonlarına ayrışır.



- 2) Silisyum ve elektrolit arasında, elektrokimyasallar arasındaki farklılık sonucunda denge oluşana kadar silisyumdan yük transferi olur. Yüzey tabakasında kısmen elektronların tükenmesine yol açar. AO işlemi sırasında holler, yarıiletken kristalin içlerinden, yarıiletken elektrolit arayüzeyine giderler. Böylece Si yüzey atomları daha yüksek oksitlenme basamağına ilerlerler.



- 3)  $\text{Si}^{2+}$ ,  $(\text{OH})^-$  ile birleşerek,



hidroksitini oluşturur.

- 4)  $\text{Si}(\text{OH})_2$  ardışık olarak süreçte hidrojeni serbest bırakarak  $\text{SiO}_2$  oluşturur.



Toplam reaksiyon

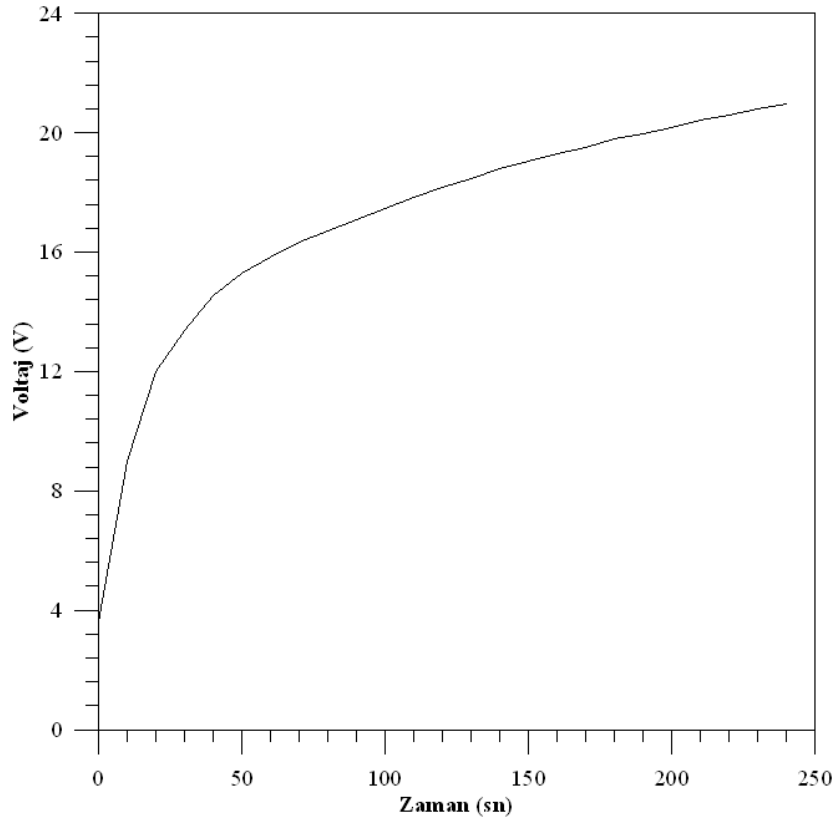


ile verilir. Devrenin dış gerilimi kesildiğinde hollerin reaksiyon arayüzeyine sürekli sağlanması durur. Termal olarak üretilmiş hollerin konsantrasyonu, bir tek tabakadan sonra  $\text{SiO}_2$  nin oluşumu için yetersizdir. Eğer dış batarya (dış gerilim) bağlanırsa, bu

anot reaksiyonu için gerekli holleri sağlar ve böylece oksit büyüme süreci desteklenir.  $H^+$  iyonu katoda sürüklenir ve elektronların eklenmesiyle moleküler hidrojen olarak ortaya çıkar.



AO işleminde zaman/voltaj arasındaki ilişki Şekil (4.4) de verilmiştir.



Şekil 4.4. Anodik oksidasyon işleminde voltajın zamana göre değişimi

Bu bilgiler ışığında bu çalışmada 0.1 M'lık KOH çözeltisi kullanıldı. Referans numune ile omik tarafları aynı olan diğer üç numuneyi AO işlemine tabi tutmak için 0.1 M'lık KOH çözeltisi hazırlandı. S0 olarak adlandırdığımız numune referans numune olarak AO işlemi yapılmamış ve normal temizleme işlemi yapılmıştır. S30, S60 ve S75 olarak adlandırdığımız numunelere ise AO işlemi yapılmıştır. Numunelerin isimlerindeki sayılar ise AO işleminden sonra kimyasal olarak oksitten arındırma sürelerini belirtmektedir. S30 numunesi üç defa AO işleminden sonra otuzar saniye % 10'luk HF



### 4.3. Ölçümler ve Grafikler

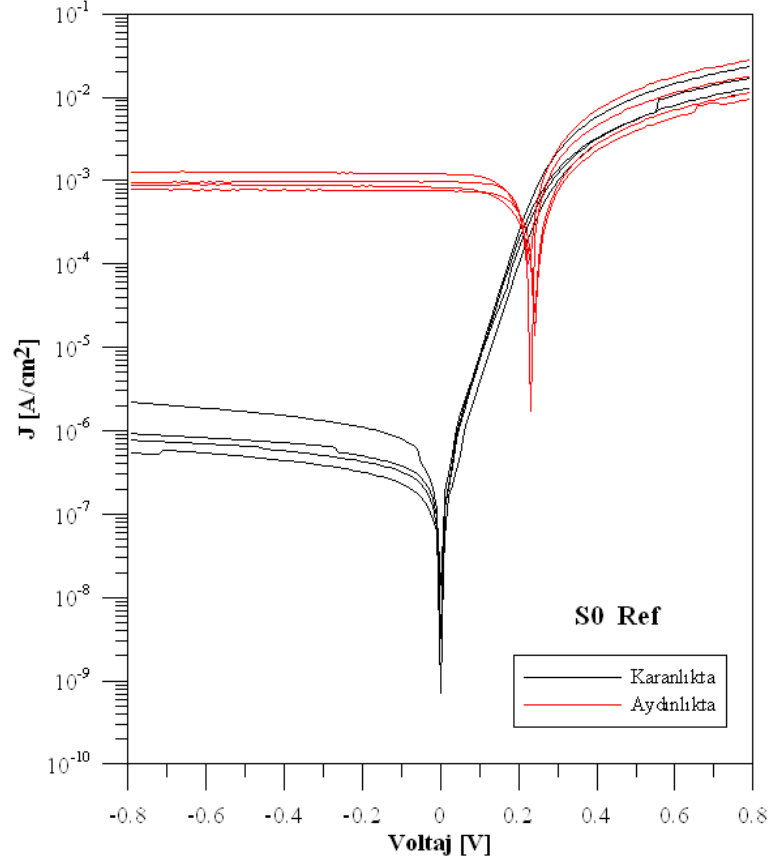
Referans numuneye S0, 30 sn KYT yapılan numuneye S30, 60 sn KYT yapılan numuneye S60 ve 75 sn KYT yapılan numuneye de S75 isimleri verilmiştir. Her dört numunenin hem karanlıkta hem de AM1.5 ve 100 mV/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri alındı. Sonra sırasıyla kapasite-voltaj (*C-V*) ve kapasite-frekans (*C-f*) ölçümleri alındı. Ölçümler, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Yarı İletken Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarı' ndaki Keithley 6487 Picoammeter/Voltage Source ve Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer cihazları ile yapıldı.

#### 4.3.1. Akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri ve cheung fonksiyonlarının kullanılması

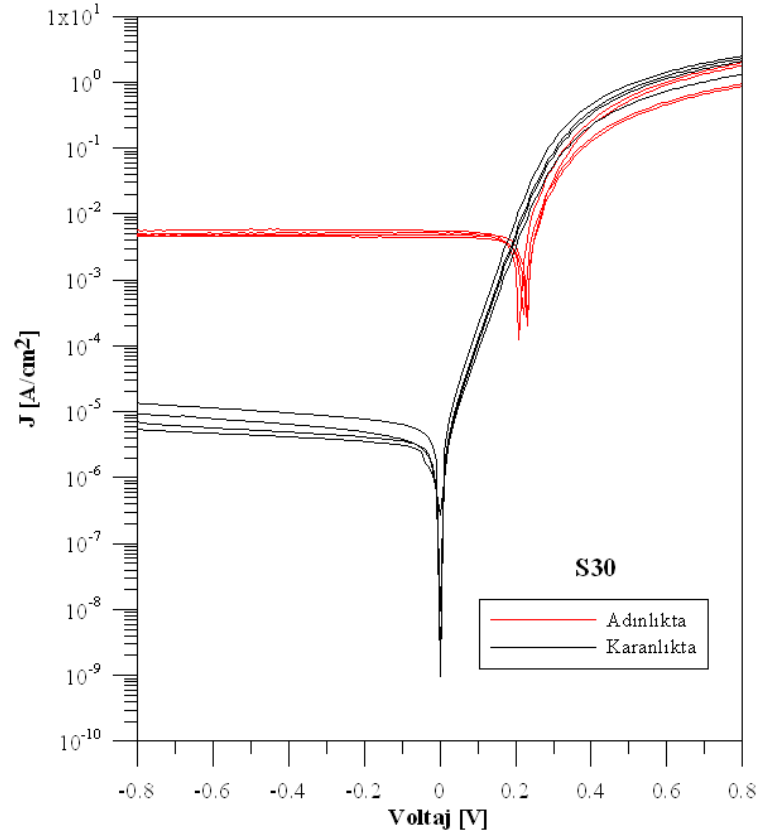
Numunelerde kullanılan yarıiletken p-Si kristalinin öz direnci  $\rho=1-10 \Omega.cm$  ve kalınlığı 200  $\mu m$  olarak üretici firma tarafından verilmiştir.  $T=300 K$  için p-Si yarıiletkenin mobilitesi  $\mu_p= 480 cm^2/V.sn$  ve  $N_v=1.04.10^{19} cm^{-3}$  literatür olarak verilmiştir. Bu değerler kullanılarak akseptör yoğunluğunu ve Fermi enerji seviyesi aşağıdaki gibi hesaplandı;

$$N_a = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad ve \quad N_a = N_v \exp\left(\frac{-E_f}{kT}\right) \quad (4.7)$$

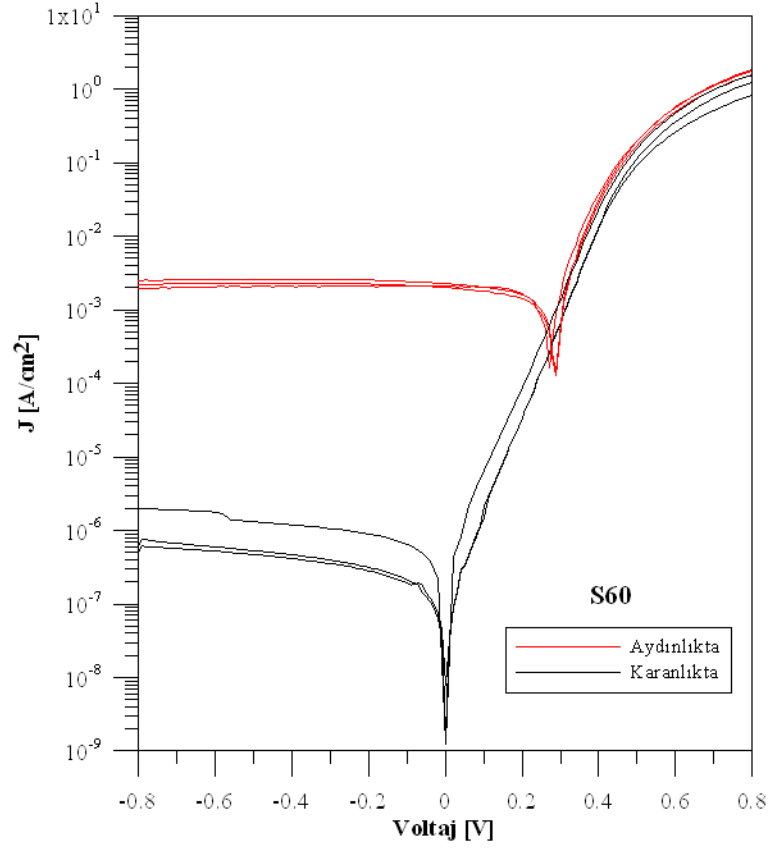
formüllerinden  $N_a=2,6.10^{15}-1,3.10^{15} cm^{-3}$  arasında ve Fermi enerji seviyesi  $E_f= 0.17-0.23 eV$  arasında hesaplanmıştır. Fermi enerji seviyesi ortalama 5  $\Omega.cm$  öz dirence karşılık olarak 0.21 eV olarak alınmıştır. Numunelerin akım-voltaj grafikleri 100 mV/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında ve karanlıkta olmak üzere sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' de verilmiştir.



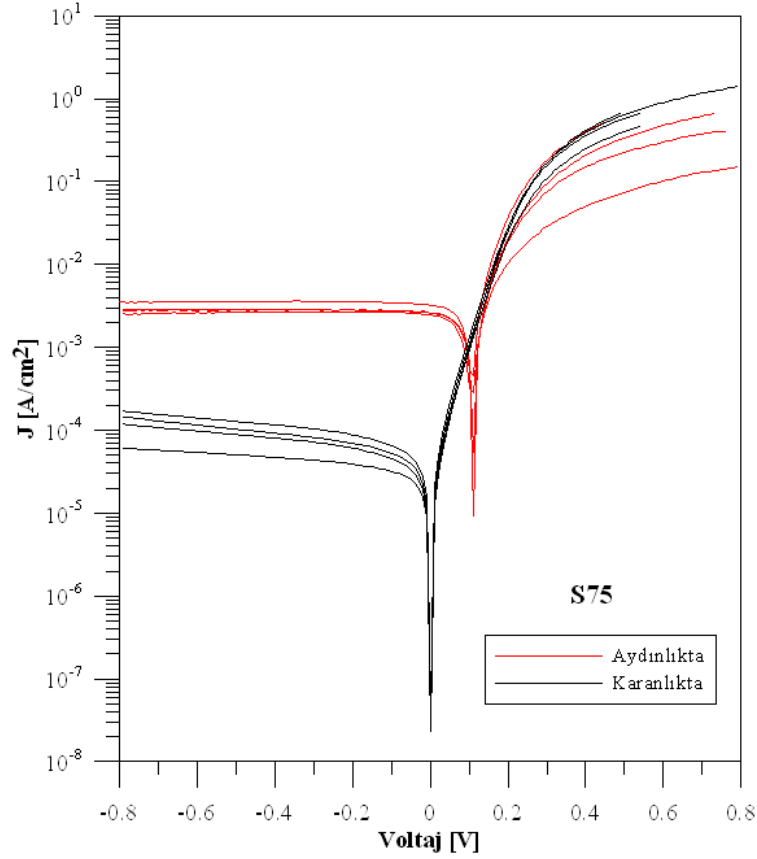
Şekil 4.5. Referans S0 numunesinin aydınlıkta ve karanlıkta I-V grafiği.



Şekil 4.6. S30 numunesinin aydınlıkta ve karanlıkta I-V grafiği.



Şekil 4.7. S60 numunesinin aydınlıkta ve karanlıkta I-V grafiği.



Şekil 4.8. S75 numunesinin aydınlıkta ve karanlıkta I-V grafiği.

Grafiklerden idealite faktörlerini ( $n$ ), engel yüksekliklerini ( $\Phi_B$ ) ve seri dirençleri ( $R_S$ ) elde edilmiştir. Diyotların idealite faktörlerini hesaplamak için Denklem 3.27' yi tekrar düzenlersek;

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.8)$$

ve  $eV \gg 3kT$  olduğu hesaba katılırsa 1 ihmal edilir. Denklem 4.8 ifadesinin tabii logaritması alınır ve sonra  $V$  ye göre türevi alınır,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.9)$$

denkleminde  $n$  idealite faktörü hesaplanır. Denklem (4.9)' dan  $dV/d(\ln I)$  teriminin değeri,  $\ln I-V$  grafiğindeki doğru kısmının eğiminden elde edilerek yerine yazılırsa idealite faktörü hesaplanır. Doyma akım yoğunluğu Denklem (3.26)' dan

$$I_0 = AR^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (4.10)$$

engel yüksekliği için

$$e\Phi_b = kT \cdot \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.11)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede yer alan  $A$  diyotların etkin alanıdır. Hazırlanan diyotların etkin alanları Çizelge 4.1 de verilmiştir.  $R^*$ , Richardson sabiti (p-Si için  $R^* = 32 \text{ A/K}^2 \cdot \text{cm}^2$ ) (Andrews ve Lepselter, 1970; Werner ve Rau, 1994);  $T$ , Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı ( $T=300 \text{ K}$ );  $k$ , Boltzmann sabiti ( $k=8.625 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ ) dir.

**Çizelge 4.1.** Üretilen diyotların etkin alanları

| Numune Adı | Etkin Alan (cm <sup>2</sup> ) |
|------------|-------------------------------|
| S0         | $3,14.10^{-2}$                |
| S30        | $7,85.10^{-3}$                |
| S60        | $1,13.10^{-2}$                |
| S75        | $3,14.10^{-2}$                |

Deneysel olarak doyma akım yoğunluğu  $\ln I-V$  grafiğinin doğru beslem tarafındaki eğrinin doğru kısmına çizilen doğrusal fitin düşey eksenini kestiği noktadan elde edilir. Elde edilen idealite faktörleri Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Üretilen diyotların bazı karakteristik parametrelerin deneysel değerleri

| Numune          |     | n<br>(I-V) | n<br>(Cheung) | $\Phi_B(eV)$<br>(I-V) | $\Phi_B(eV)$<br>(Cheung) | $\Phi_B(eV)$<br>(C-V) | $R_s (\Omega)$<br>( $dV/d\ln I$ )-I | $R_s (\Omega)$<br>( $H(I)$ -I) |
|-----------------|-----|------------|---------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| S0 (Referans)   | GP1 | 1.12       | 1.13          | 0.80                  | 0.76                     | 0.70                  | 36.14                               | 42.21                          |
|                 | GP2 | 1.18       | 1.20          | 0.70                  | 0.77                     | 0.70                  | 36.66                               | 41.37                          |
|                 | GP3 | 1.16       | 1.15          | 0.76                  | 0.76                     | 0.65                  | 18.21                               | 19.21                          |
|                 | GP4 | 1.19       | 1.21          | 0.76                  | 0.74                     | 0.70                  | 35.61                               | 32.88                          |
| S30 (30 sn KYT) | GP1 | 1.08       | 1.07          | 0.74                  | 0.64                     | 0.67                  | 0.210                               | 0.402                          |
|                 | GP2 | 1.05       | 1.08          | 0.74                  | 0.62                     | 0.71                  | 0.198                               | 0.320                          |
|                 | GP3 | 1.05       | 1.08          | 0.75                  | 0.61                     | 0.73                  | 0.179                               | 0.244                          |
|                 | GP4 | 1.06       | 1.08          | 0.74                  | 0.61                     | 0.68                  | 0.171                               | 0.213                          |
| S60 (60 sn KYT) | GP1 | 1.30       | 1.31          | 0.55                  | 0.62                     | 0.50                  | 0.136                               | 0.187                          |
|                 | GP2 | 1.29       | 1.32          | 0.62                  | 0.60                     | 0.66                  | 0.352                               | 0.381                          |
|                 | GP3 | 1.30       | 1.33          | 0.59                  | 0.59                     | 0.51                  | 0.231                               | 0.255                          |
| S75 (75 sn KYT) | GP1 | 1.22       | 1.26          | 0.58                  | 0.62                     | 0.73                  | 0.367                               | 0.497                          |
|                 | GP2 | 1.25       | 1.28          | 0.58                  | 0.62                     | 0.82                  | 0.289                               | 0.417                          |
|                 | GP3 | 1.29       | 1.33          | 0.58                  | 0.63                     | 0.82                  | 0.528                               | 0.759                          |
|                 | GP4 | 1.19       | 1.23          | 0.59                  | 0.59                     | 0.82                  | 0.329                               | 0.456                          |

Temel akım denklemi, 4.8 denkleminde elde edilen

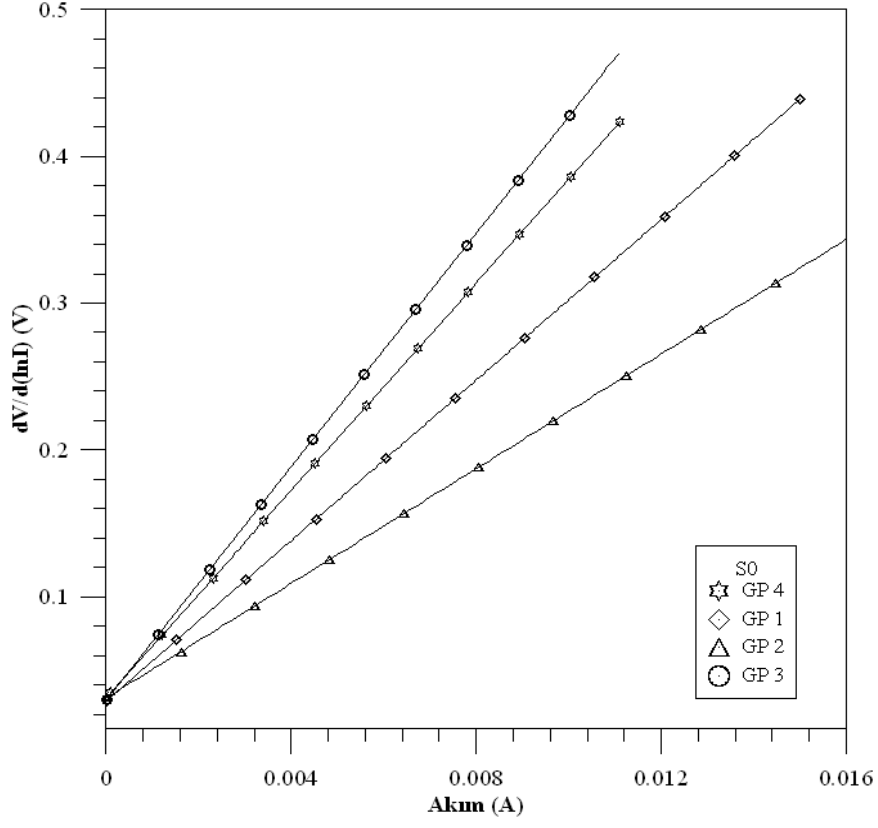
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_S \quad (4.12)$$

ve

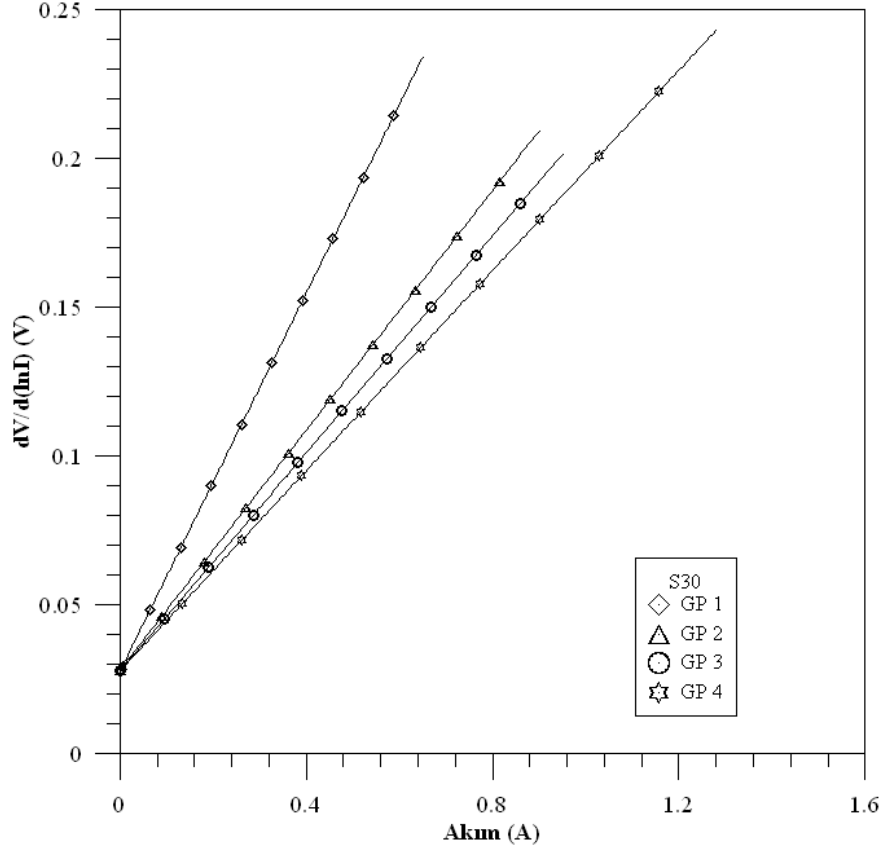
$$H(I) = n\Phi_b + IR_S \quad (4.13)$$

Cheung fonksiyonları yardımıyla, diyotların nötral bölge seri dirençlerinin yanı sıra idealite faktörleri ve engel yükseklikleri yeniden elde edildi. Elde edilen değerler Çizelge 4.2’ de verilmiştir. Denklem 4.11 ile verilen  $dV/d(\ln I)$ ’ ın  $I$ ’ ya karşı çizilen grafiği bir doğru vermektedir. Bu doğrunun,  $I=0$  iken düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörü ve eğiminden de  $R_S$  seri direnci elde edilir. Numunelere ait Cheung fonksiyonundan elde edilen  $dV/d(\ln I)$ - $I$  grafikleri Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’ de verilmiştir.

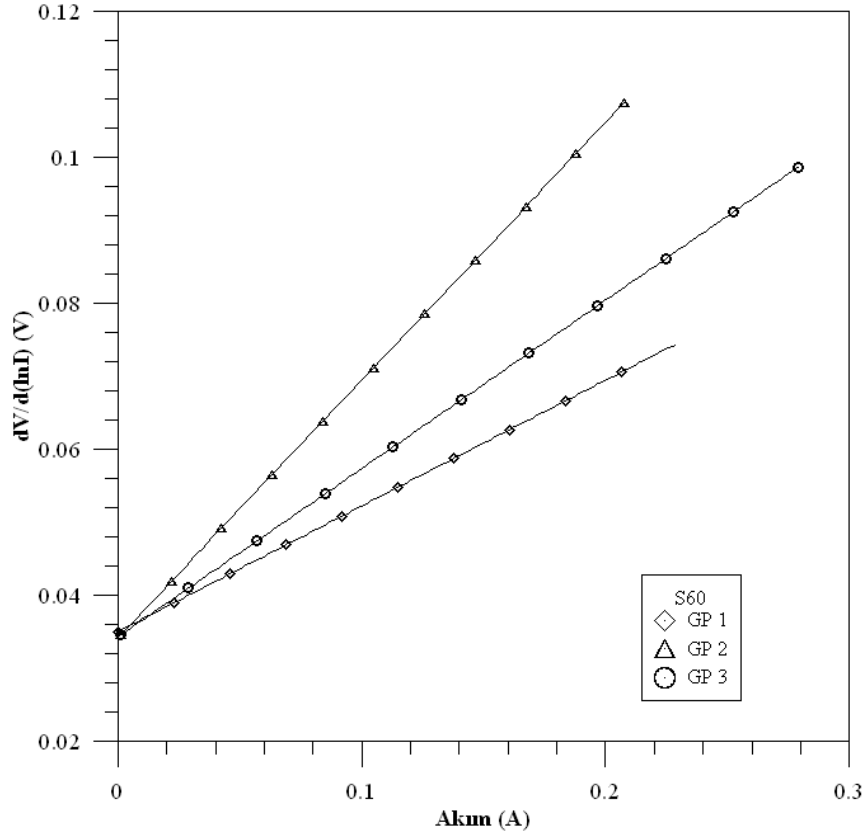
Denklem 4.13 ile verilen  $H(I)$ ’ nın  $I$ ’ ya göre çizilen grafiği de bir doğru vermektedir. Elde edilen doğrunun  $I=0$ ’ da düşey eksenini kestiği noktadan, diyotun Schottky engel yüksekliği elde edilir. Bu eğrinin eğimi yine  $R_S$  seri direnci vermektedir. II. Cheung fonksiyonu diye de adlandırılan  $H(I)$  eşitliğine bağlı olarak elde edilen  $H(I)$ - $I$  grafikleri Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’ da verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen  $\Phi_b$  engel yüksekliği ve  $R_S$  seri direncine ait değerler Çizelge 4.2’ de verilmiştir.



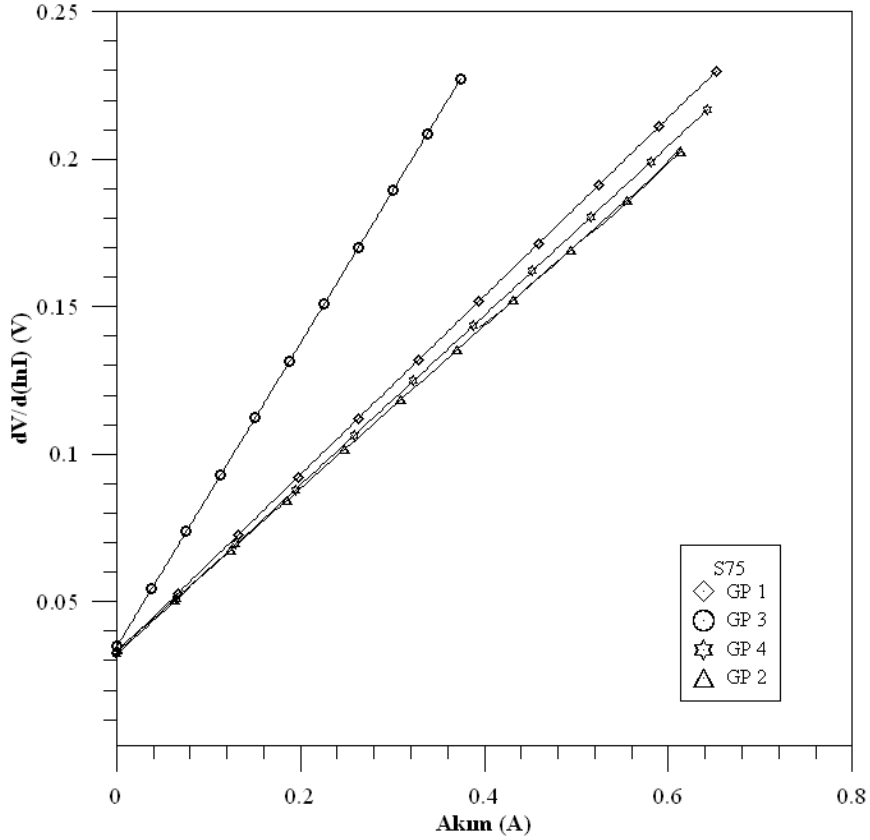
Şekil 4.9. S0 Ref. numunesine ait  $\ln I$ -V grafiğinden elde edilen Cheung fonksiyonları  $dV/d(\ln I)$ -I grafiği.



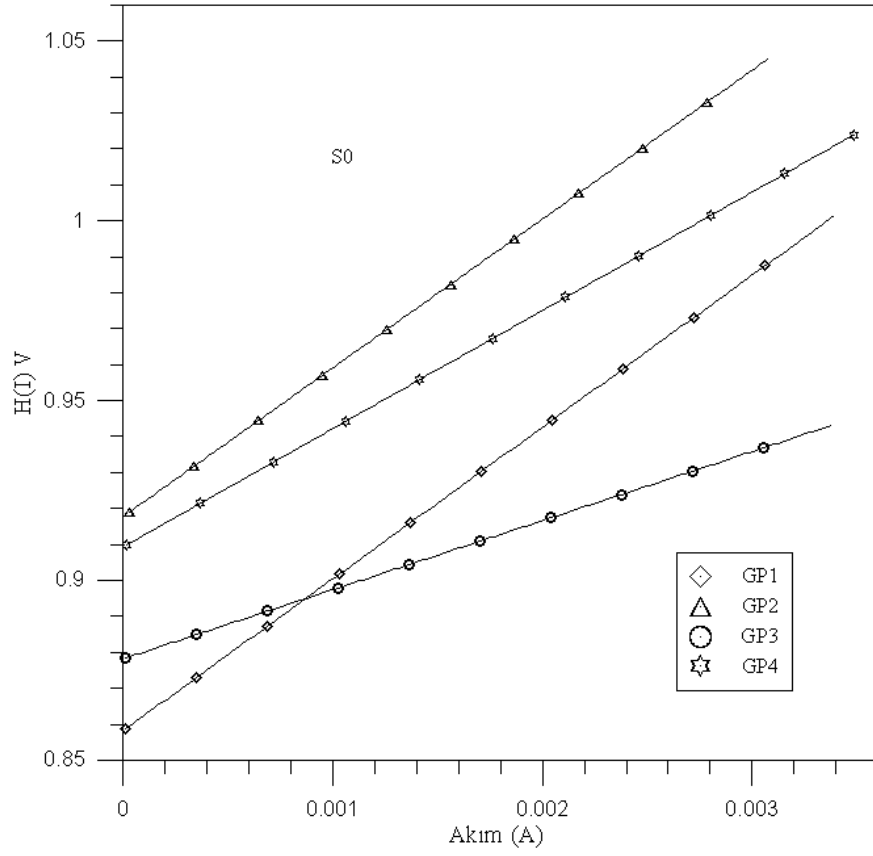
Şekil 4.10. S30 numunesine ait  $\ln I$ -V grafiğinden elde edilen Cheung fonksiyonları  $dV/d(\ln I)$ -I grafiği.



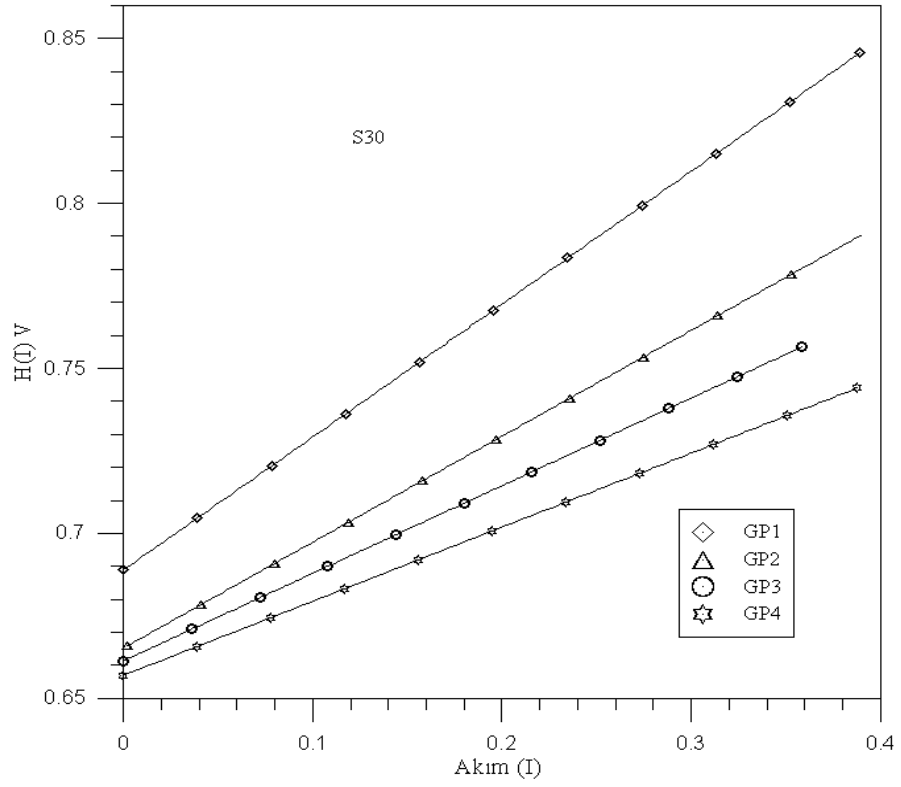
Şekil 4.11. S60 numunesine ait  $\ln I$ -V grafiğinden elde edilen Cheung fonksiyonları  $dV/d(\ln I)$ -I grafiği.



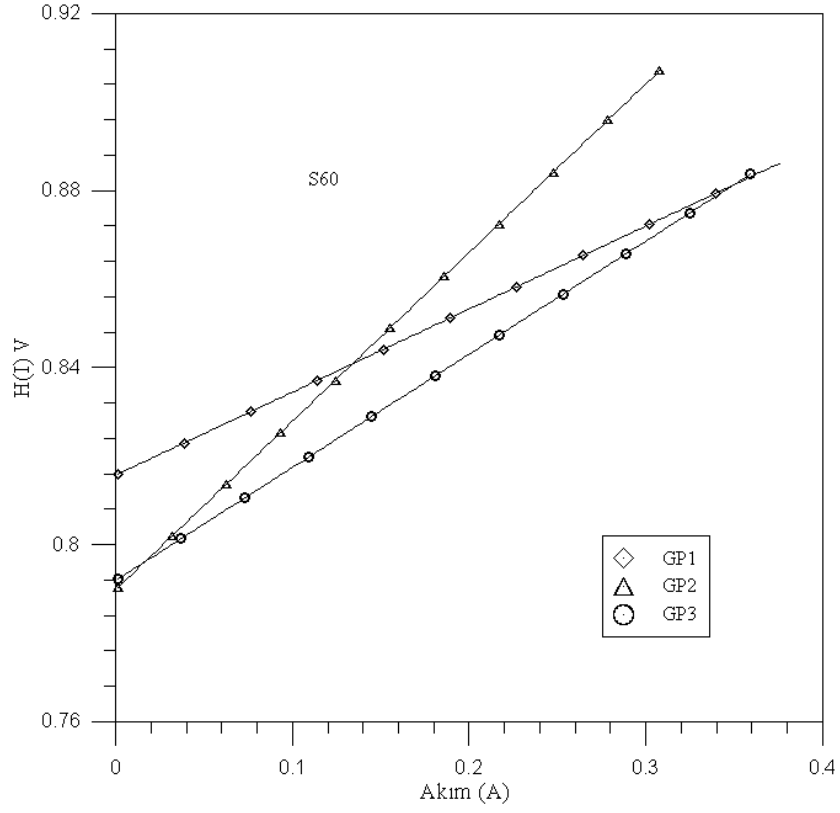
Şekil 4.12. S75 numunesine ait  $\ln I$ -V grafiğinden elde edilen Cheung fonksiyonları  $dV/d(\ln I)$ -I grafiği.



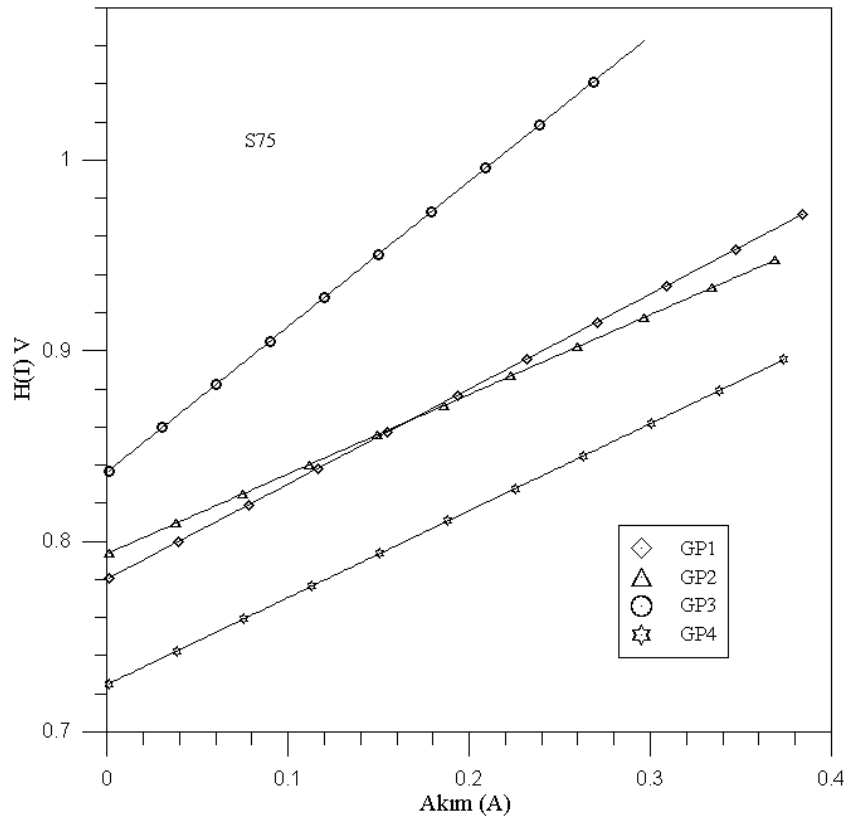
Şekil 4.13. S0 numunesine ait  $H(I)$ - $I$  grafiği.



Şekil 4.14. S30 numunesine ait  $H(I)$ - $I$  grafiği.



Şekil 4.15. S60 numunesine ait  $H(I)$ - $I$  grafiği.



Şekil 4.16. S75 numunesine ait  $H(I)$ - $I$  grafiği.

#### 4.3.2. Sabit frekans altında kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri

Kapasite-voltaj (C-V) ve kapasite-frekans (C-f) ölçümleri *Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer* cihazı ile yapıldı. Numunelerin ters beslem C-V ölçümleri -2.0 V ile 0.5 V voltaj aralığında alındı. İdeal bir metal-yarıiletken (M-S) kontağın birim yüzey alanı başına arınma (deplasyon) bölgesinin sığası,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d - V)}{q\epsilon_s N_A} \quad (4.14)$$

belirlenir. Bu denklemde  $V_d$ , difüzyon potansiyeli;  $q$ , elektronun yükü;  $\epsilon_s$ , yarıiletkenin dielektrik sabiti ve  $N_A$ , akseptör yoğunluğudur. Denklem 4.14 göre  $C^{-2}$ -V grafiği bir doğru verecektir. Bu doğrunun yatay eksenini kestiği noktadan difüzyon potansiyeli elde edilir. C-V karakteristiklerinden engel yüksekliği

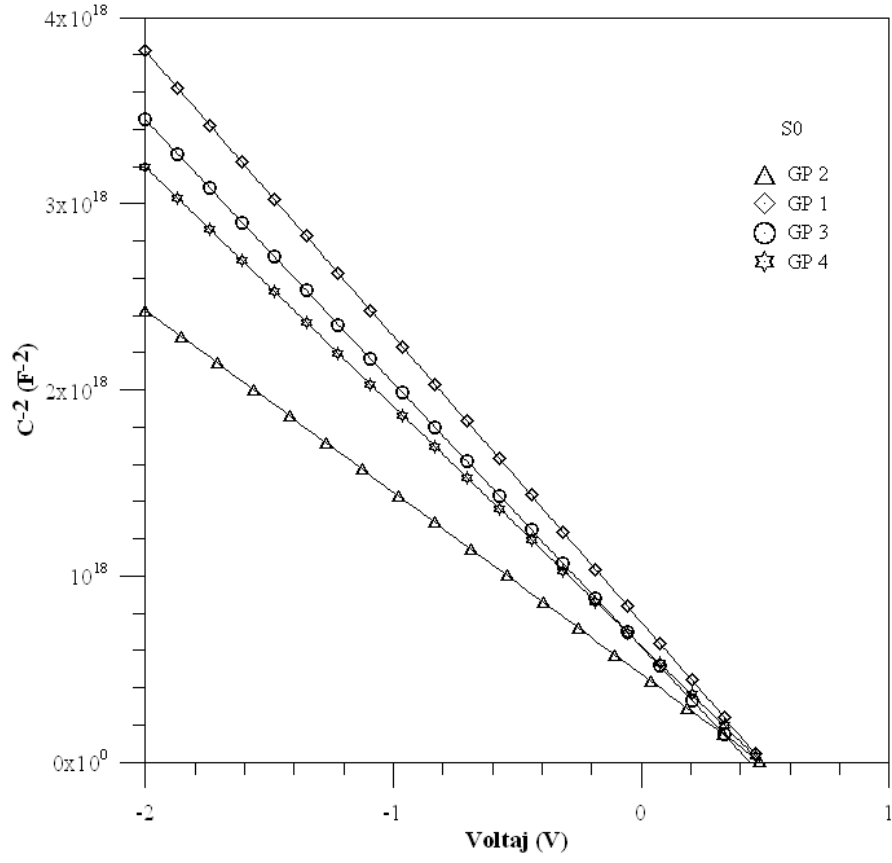
$$\Phi_b = (C_2 V_d + V_p) \quad (4.15)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $C_2 = 1/n$  ve  $V_p$  p-tipi yarıiletken için valans bandının kenarına göre alınan  $E_F$ ' ye eşittir. Denklem 4.14'ün  $V$  ye göre diferansiyeli alınarak, yüzey alanı  $A$  olan bir diyot için  $N_A$ ' ya göre çözümü yapılırsa,

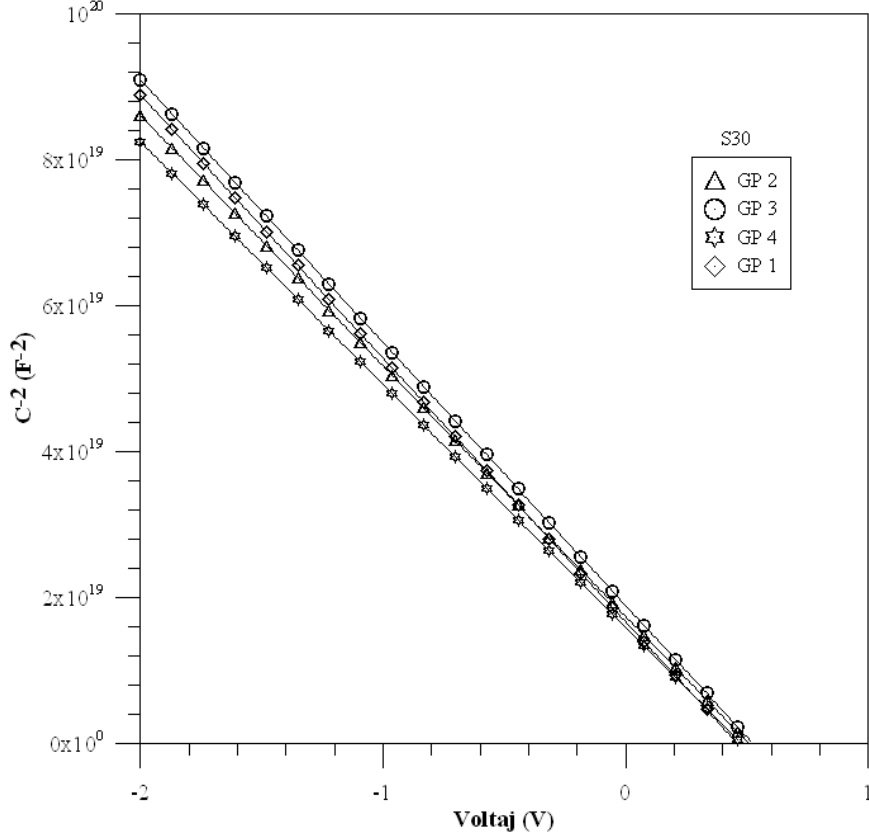
$$N_A = \frac{2}{qA^2 \epsilon_s \epsilon_0} \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (4.16)$$

eşitliği elde edilir. Bu ifadedeki son terim  $C^{-2}$ -V grafiğindeki doğrunun eğiminden elde edilerek, yerine yazılırsa her bir diyot için akseptör yoğunluğu elde edilir.

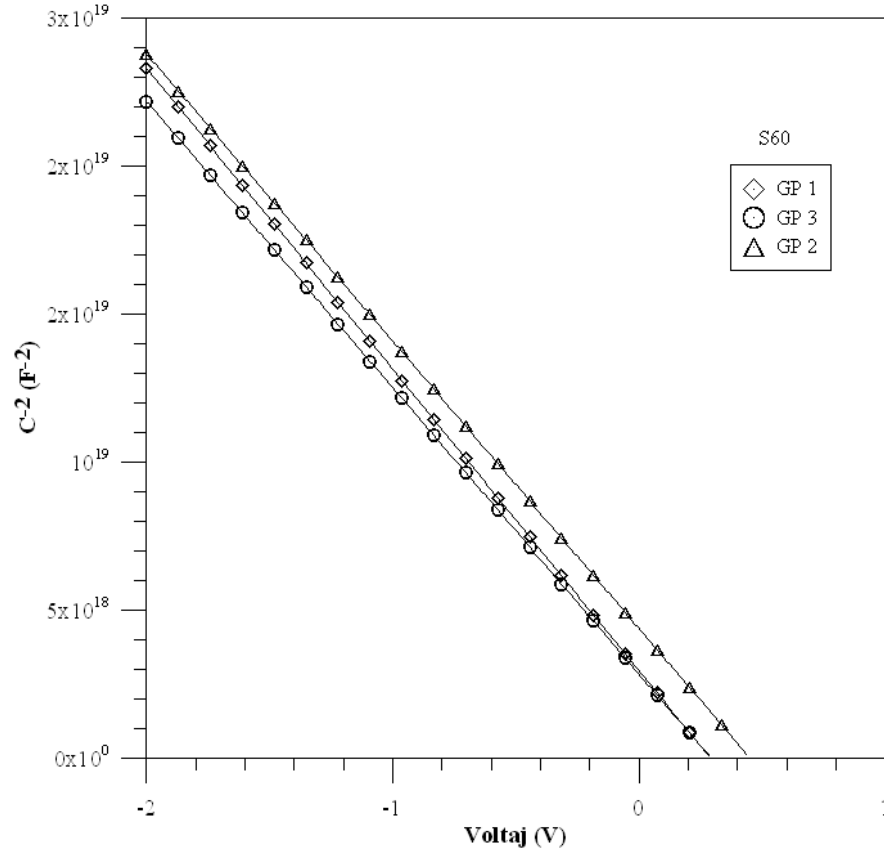
Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20' da sırasıyla S0, S30, S60 ve S75 numunelerine ait  $C^{-2}$ -V grafikleri verilmiştir.  $C^{-2}=0$  ( $V_d=V$ ) iken yatay (voltaj) eksenini kestiği noktadan Denklem 4.14' e göre  $V_d$  difüzyon potansiyeli hesaplanır.



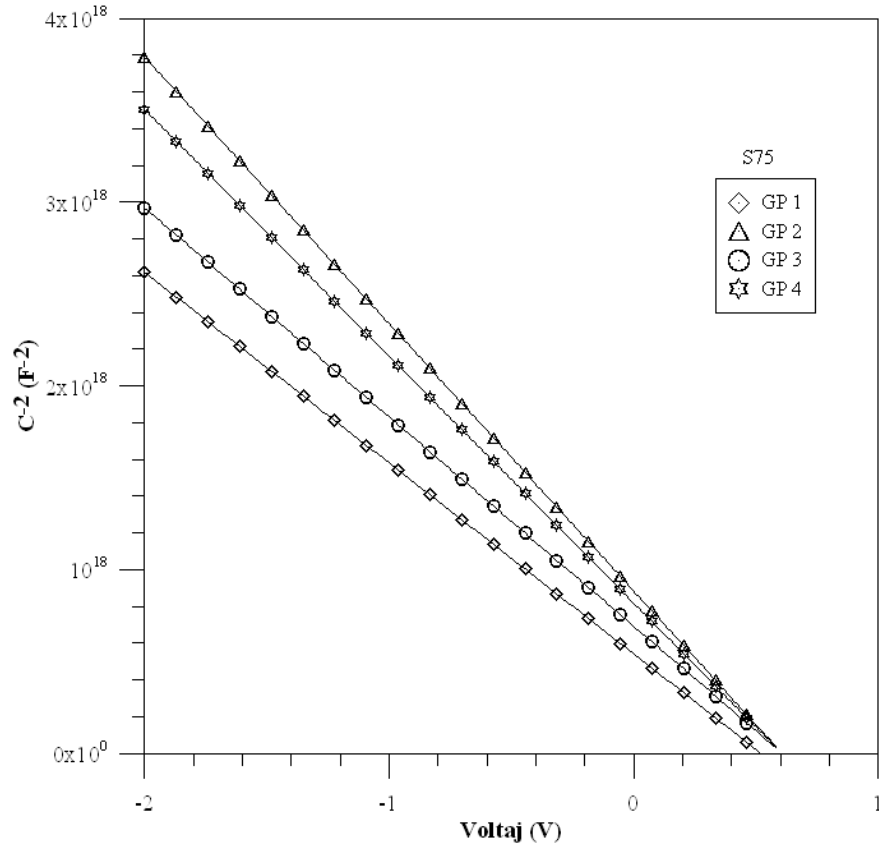
Şekil 4.17. S0 numunesine ait -2.0 V ile 0.5 V aralığında ters beslem C-V ölçümlerinden elde edilen  $C^{-2}$ -V grafiği.



Şekil 4.18. S30 numunesine ait -2.0 V ile 0.5 V aralığında ters beslem C-V ölçümlerinden elde edilen  $C^{-2}$ -V grafiği.



Şekil 4.19. S60 numunesine ait -2.0 V ile 0.5 V aralığında ters beslem  $C$ - $V$  ölçümlerinden elde edilen  $C^{-2}$ - $V$  grafiği.



Şekil 4.20. S75 numunesine ait -2.0 V ile 0.5 V aralığında ters beslem  $C$ - $V$  ölçümlerinden elde edilen  $C^{-2}$ - $V$  grafiği.

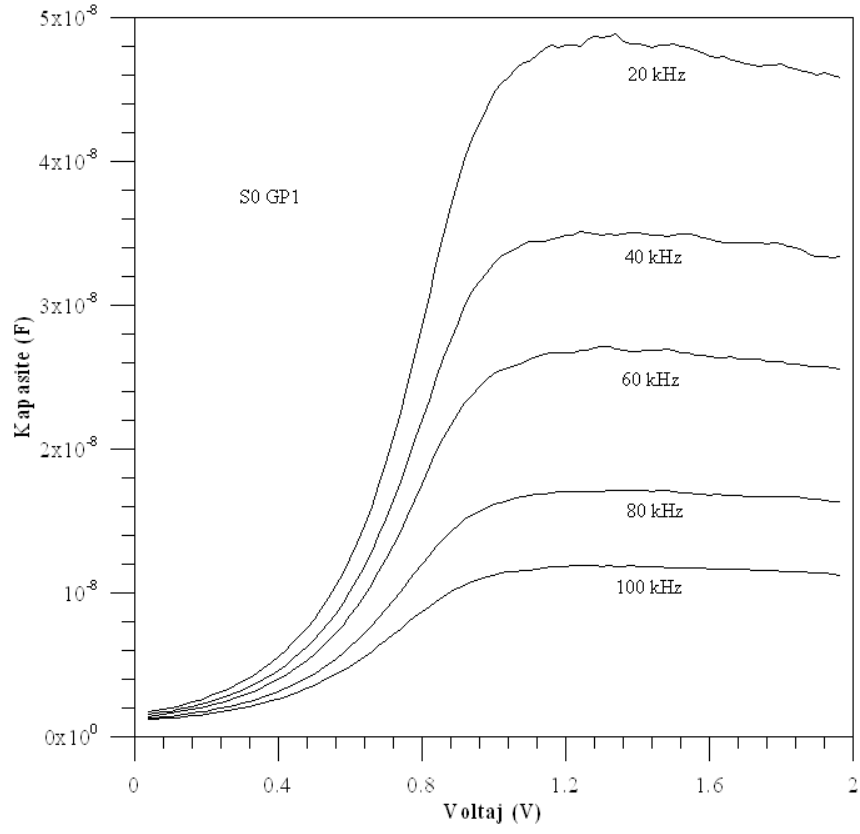
Hesaplanan  $V_d$  difüzyon potansiyeli,

$$e\Phi_b = \frac{V_d}{n} + V_p \quad (4.17)$$

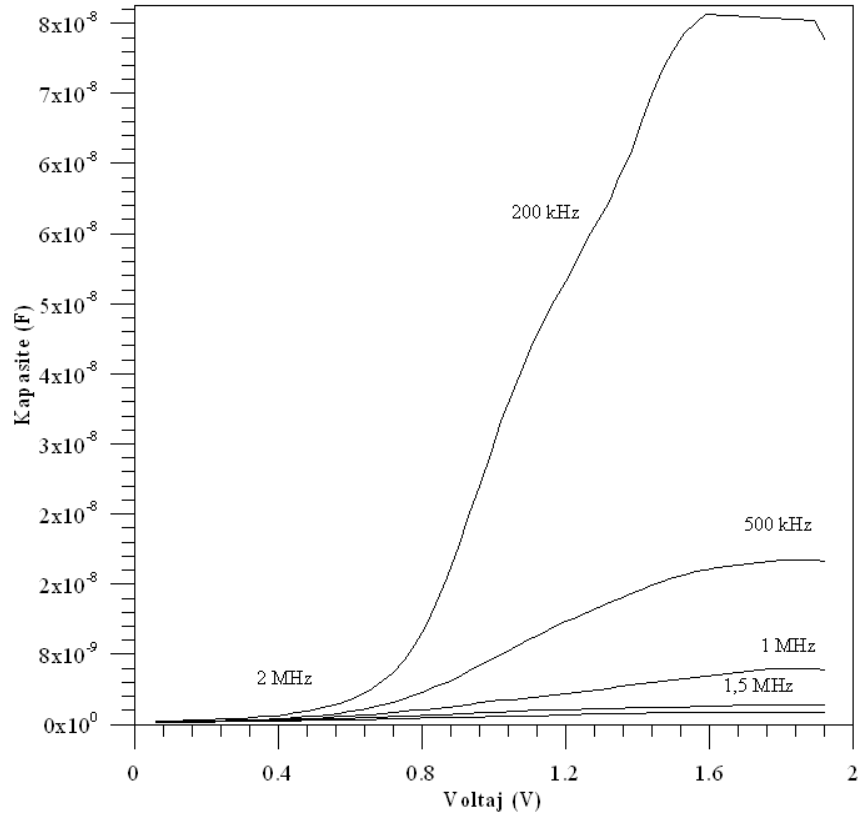
denkleminde yerine yazılarak  $\Phi_b$  engel yükseklikleri hesaplanır. Burada  $V_p = E_f = 0.21$  eV olarak hesaplandı. Bulunan engel yükseklik değerleri Çizelge 4.2 de verilmiştir.

Kapasitans-voltaj karakteristiği Schottky diyotların en önemli özelliklerinden biridir. Schottky diyotların C-V karakteristiği arayüzey durumlarına karşı oldukça duyarlıdır ve arayüzey durumlarının devre elemanlarının elektriksel özellikleri üzerine etkisi mevcuttur. S0, S30, S60 ve S75 numunelerine ait bazı diyotların sabit frekanslarda kapasitans-voltaj ölçümlerinin grafikleri Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24' de verilmiştir. Her bir ölçüm 0 V ile 2 V arasında belirli sabit frekanslarda yapılmıştır. Frekans değerleri arttıkça kapasite değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu durum düşük frekanslarda AC sinyalinin elektronlar tarafından takip edilebildiğini göstermektedir. Yeterince yüksek frekansta alınan kapasite-voltaj ölçümleri arayüzeydeki yüklerin AC sinyalini takip edemedikleri görülmektedir.

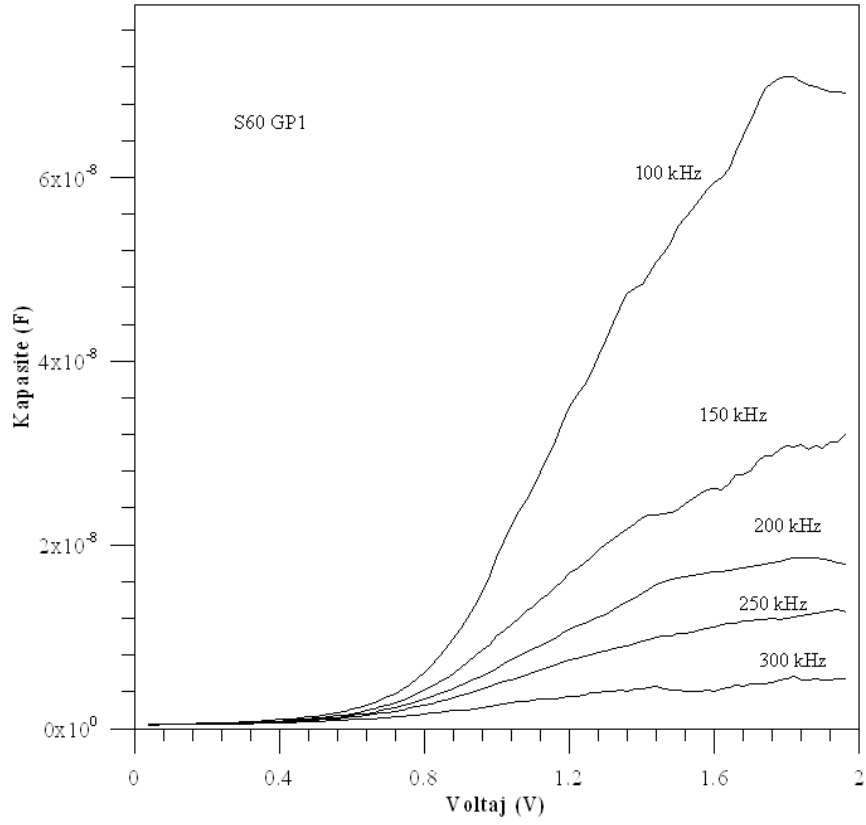
Arayüzey durumları azaldıkça diyotların kapasite değerleri de azaldığı görülmektedir.



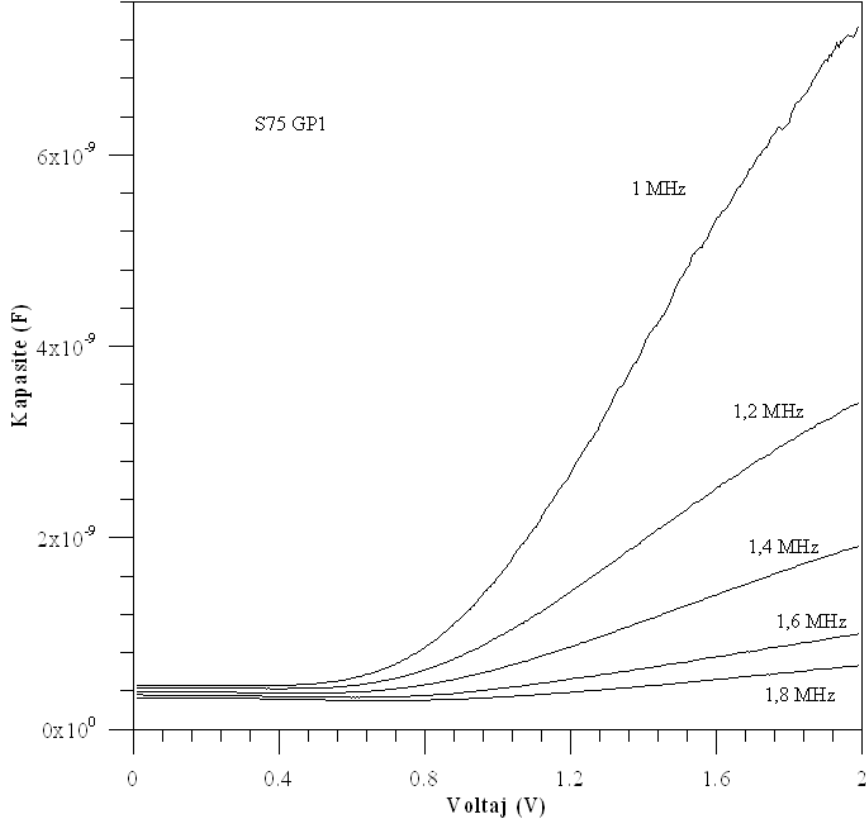
Şekil 4.21. S0 numunesindeki GP1 diyotunun C-V değişim grafiği.



Şekil 4.22. S30 numunesindeki GP1 diyotunun C-V değişim grafiği.



Şekil 4.23. S60 numunesindeki GP1 diyotunun C-V değişim grafiği.



Şekil 4.24. S75 numunesindeki GP1 diyotunun C-V değişim grafiği.

#### 4.3.3. Kapasitans - frekans (C-f) ölçümleri

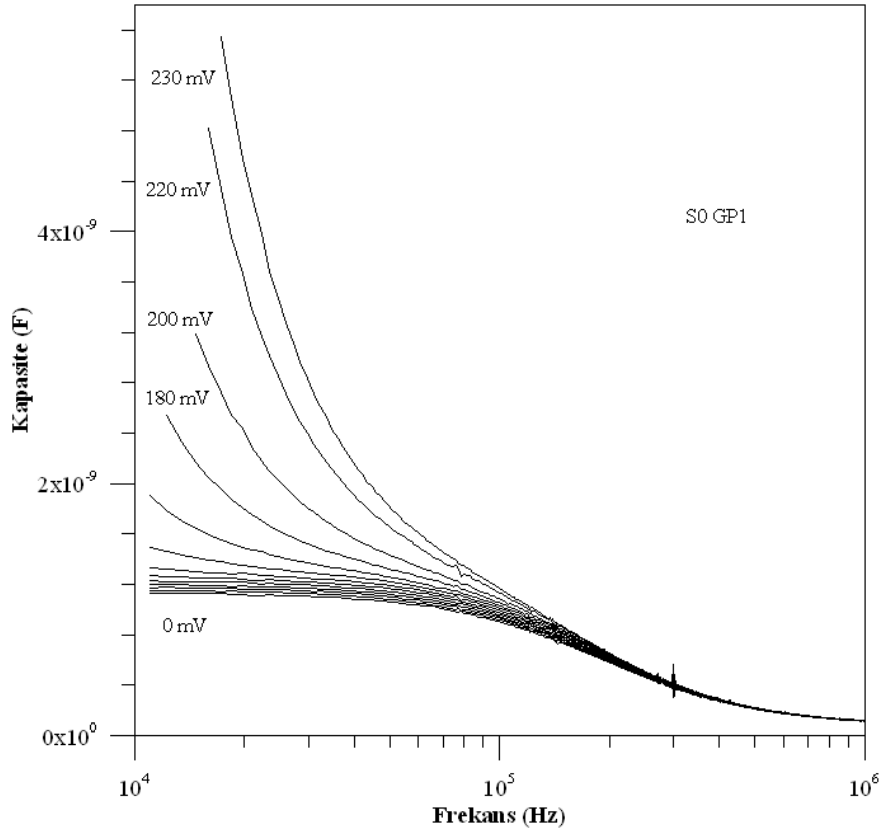
Ölçümlerin tamamı 00, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 ve 230 mV değerlerinde alınmıştır. Böylece bir taraftan frekansa bağlı olarak sığa değişimleri gözlenirken, diğer taraftan  $C-f$  ölçümlerinin uygulanan gerilimle ne şekilde etkilendiği görülmektedir. S0, S30, S60 ve S75 numunelerine ait  $C-f$  grafikleri sırasıyla Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’ te verilmiştir.

Düşük frekanslarda diyotun kapasitesine arayüzey hallerinden katkılar, yüksek frekanslara doğru gidildikçe azalmakta ve yeterince yüksek frekanslarda arayüzey hallerinden gelen sığa katkısı sıfıra çok yaklaşır, dolayısıyla ihmal edilebilir. Bu durumda yüksek frekanslarda kontak sığası, arayüzey hallerinin AC sinyalinin takip edememesinden dolayı sadece uzay yükü bölgesi sığasından ( $C_{SC}$ ) ibarettir.  $C-f$  ölçümlerinden elde ettiğimiz verilerde, düşük frekanslara karşılık gelen sığa ( $C$ ), yaklaşık olarak uzay yükü sığasıyla ( $C_{SC}$ ) arayüzey hallerinde kaynaklanan sığanın ( $C_{it}$ ) toplamına eşittir (Sing,1985; Baret ve Maaref,1993).

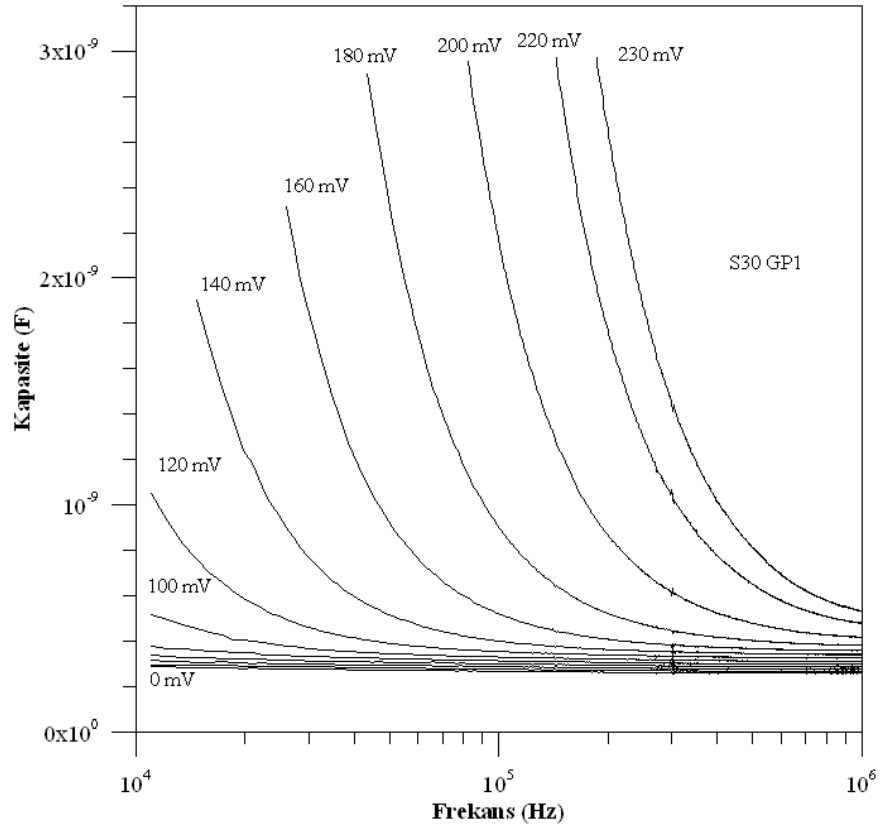
$$C = C_{SC} + C_{it} \quad (\text{düşük frekanslarda}) \quad (4.18)$$

$$C = C_{SC} \quad (\text{yüksek frekanslarda}) \quad (4.19)$$

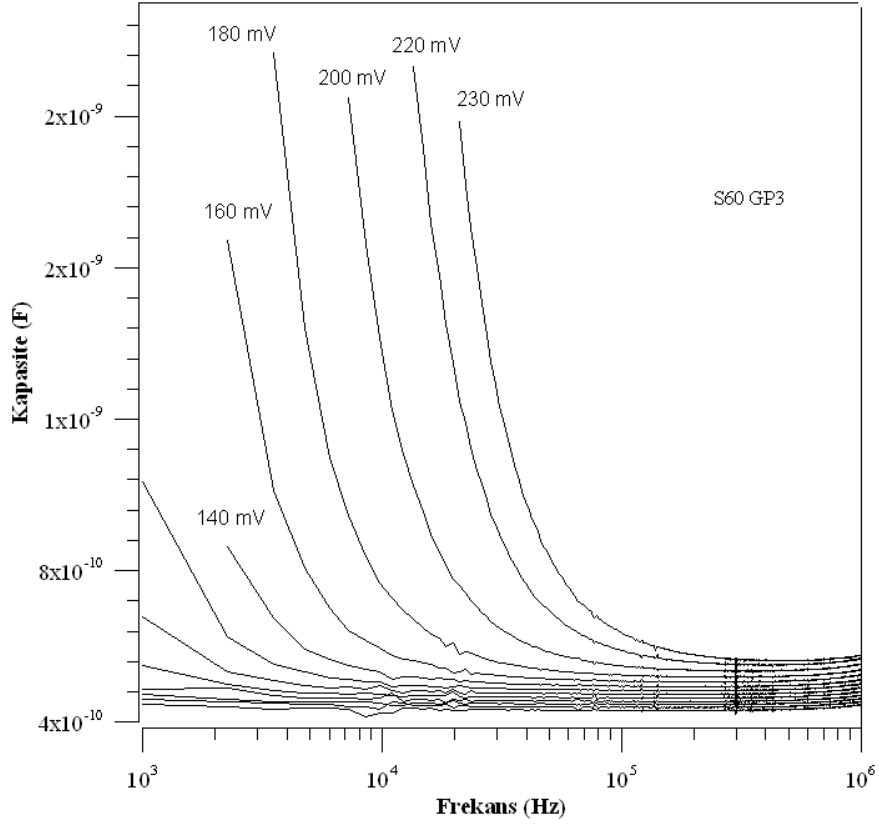
4.18 ve 4.19 denklemlerinden  $C-f$  verilerini kullanarak arayüzey hallerinden kaynaklanan sığanın  $C_{it}$  frekansla değişimi elde edilir.



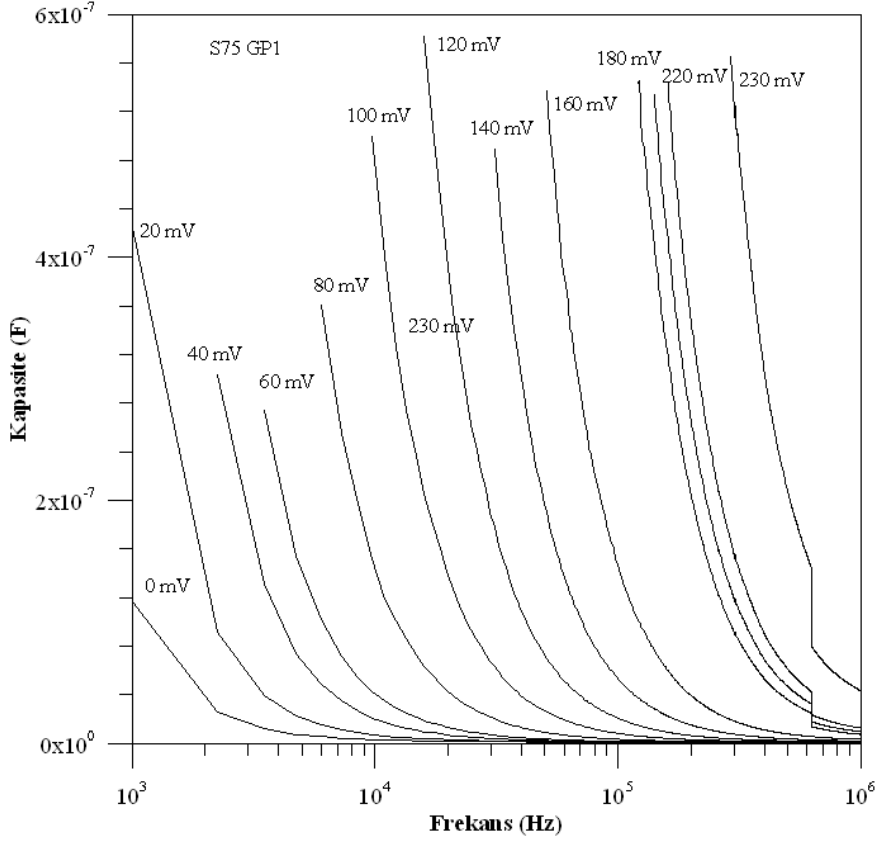
Şekil 4.25. S0 numunesindeki GP1 diyotunun 0 mV ile 230 mV aralığında  $C$ - $f$  değişim grafiği.



Şekil 4.26. S30 numunesindeki GP1 diyotunun 0 mV ile 230 mV aralığında  $C$ - $f$  değişim grafiği.



Şekil 4.27. S60 numunesindeki GP3 diyotunun 0 mV ile 230 mV aralığında  $C$ - $f$  değişim grafiği.



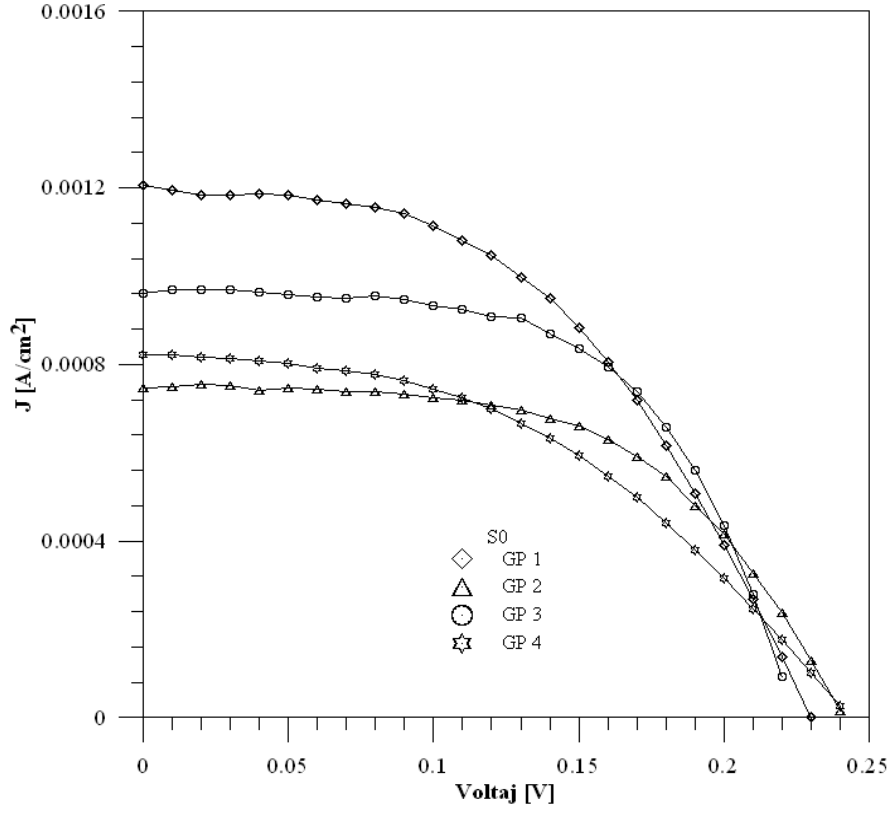
Şekil 4.28. S75 numunesindeki GP1 diyotunun 0 mV ile 230 mV aralığında  $C$ - $f$  değişim grafiği.

#### 4.4. Fotoelektriksel Özelliklerin Ölçülmesi

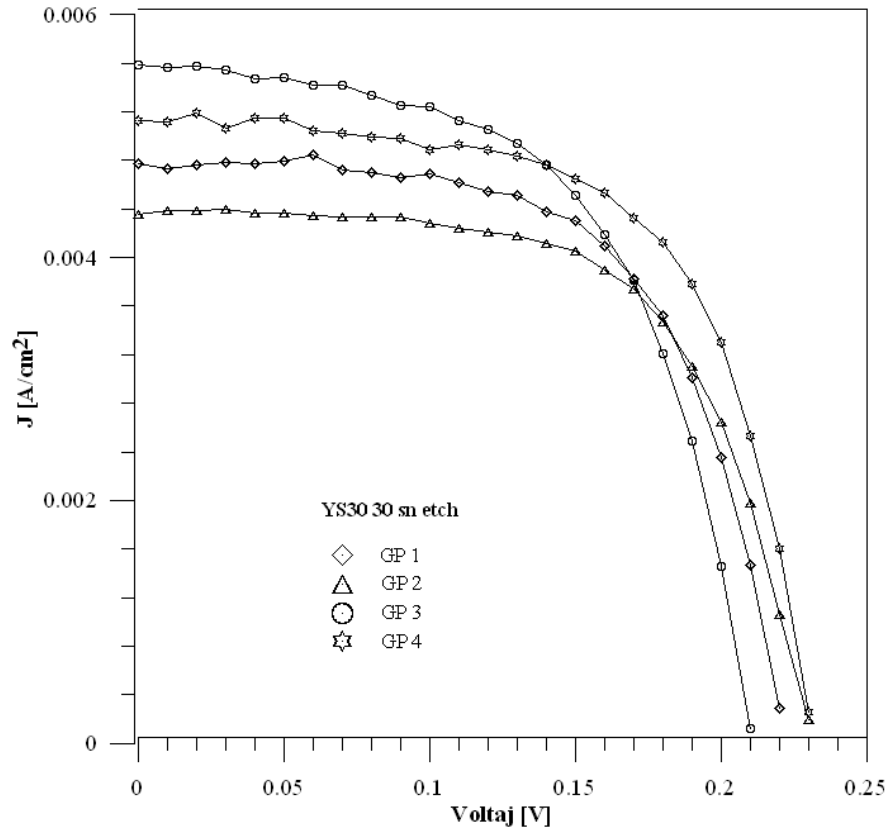
S0, S30, S60 ve S75 isimli Sn/p-Si/Al yapıları numunelerin fotoelektriksel karakterizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için yapıların tamamının  $I$ - $V$  ölçümleri AM1.5 global filtreye sahip güneş simülatörü altında  $100 \text{ mV/cm}^2$  şiddetindeki aydınlatma altında yapıldı. Karanlıkta ve aydınlatma altındaki ölçümlere ait grafikler Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’ de verilmiştir. Şekillerden de çok net bir şekilde görüldüğü gibi ışığa karşı oldukça duyarlıdır. Fakat diyotların ışığa olan duyarlılığı diyottan diyota farklılık göstermektedir. Bu farklılıkları daha iyi anlayabilmek için  $100 \text{ mV/cm}^2$  aydınlatma altında  $I$ - $V$  grafikleri çizilmiş ve bu grafiklerden dolum çarpanları ve verimleri hesaplanmıştır. Numunelere ait fotoelektriksel parametreler Çizelge 4.3’ de verilmiştir. Her bir numuneye ait güneş pili verim hesaplama grafiği elde edilmiş ve grafikler Şekil 4.29, Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’ de verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Üretilen numunelere ait dolum çarpanı ve verimleri

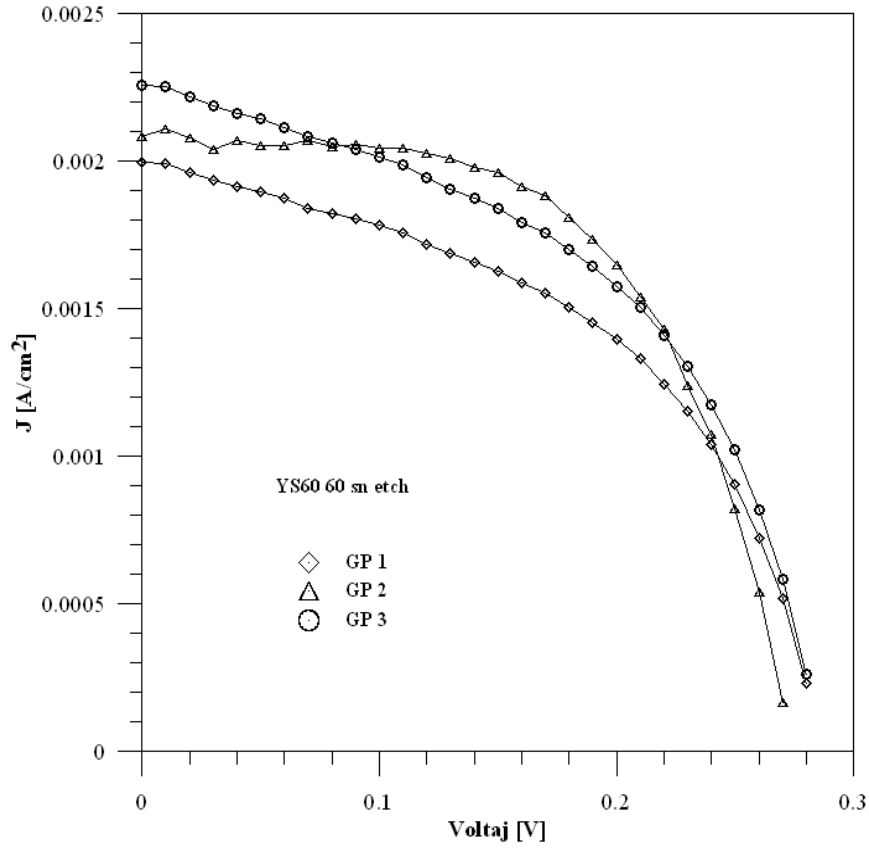
| Numune        |     | $n$  | $\Phi_B$ | FF   | $\eta$ |
|---------------|-----|------|----------|------|--------|
| S0 Referans   | GP1 | 1.12 | 0.80     | 0.48 | 0.133  |
|               | GP2 | 1.18 | 0.70     | 0.56 | 0.101  |
|               | GP3 | 1.16 | 0.76     | 0.60 | 0.127  |
|               | GP4 | 1.19 | 0.76     | 0.45 | 0.089  |
| S30 30 sn KYT | GP1 | 1.08 | 0.74     | 0.62 | 0.654  |
|               | GP2 | 1.05 | 0.74     | 0.63 | 0.635  |
|               | GP3 | 1.05 | 0.75     | 0.57 | 0.677  |
|               | GP4 | 1.06 | 0.74     | 0.63 | 0.743  |
| S60 60 sn KYT | GP1 | 1.30 | 0.55     | 0.48 | 0.280  |
|               | GP2 | 1.29 | 0.62     | 0.58 | 0.330  |
|               | GP3 | 1.30 | 0.59     | 0.48 | 0.316  |
| S75 75 sn KYT | GP1 | 1.22 | 0.58     | 0.44 | 0.158  |
|               | GP2 | 1.25 | 0.58     | 0.40 | 0.111  |
|               | GP3 | 1.29 | 0.58     | 0.44 | 0.126  |
|               | GP4 | 1.19 | 0.59     | 0.45 | 0.130  |



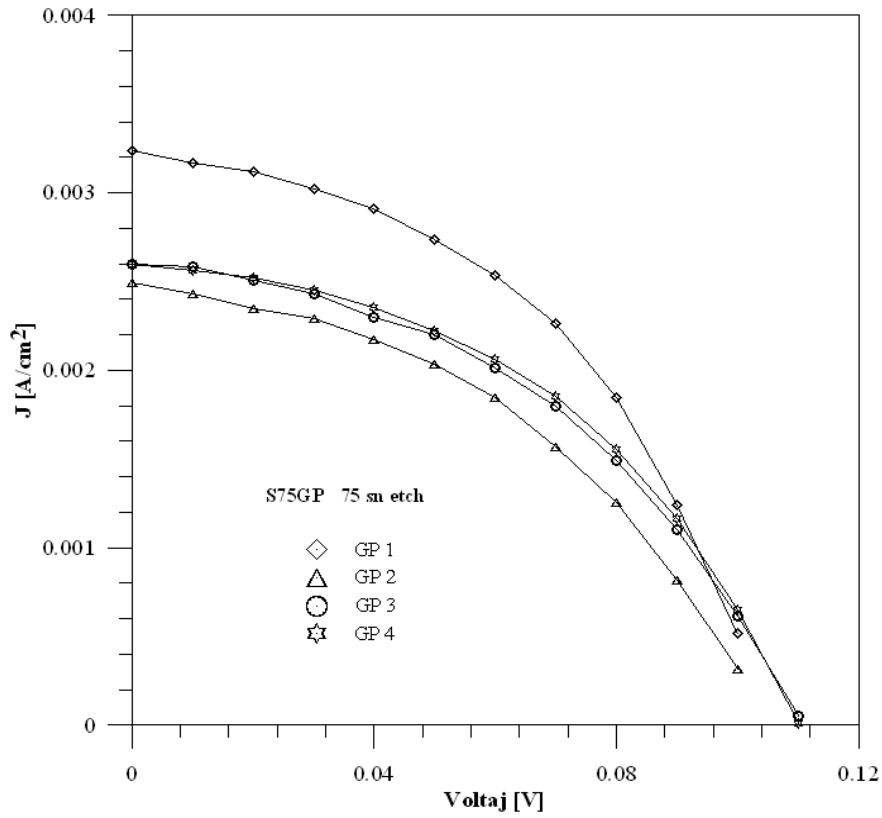
Şekil 4.29. S0 Referans numunesine ait güneş pili verim hesaplama grafiği.



Şekil 4.30. S30 numunesine ait güneş pili verim hesaplama grafiği.



Şekil 4.31. S60 numunesine ait güneş pili verim hesaplama grafiği.



Şekil 4.32. S75 numunesine ait güneş pili verim hesaplama grafiği.

Yukarıdaki grafiklerde de görüldüğü gibi S0 referans numunesinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ),  $\sim 1 \text{ mA/cm}^2$  ve açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ),  $\sim 0.23 \text{ V}$  civarındadır. Schottky yapılı fotovoltaiik diyotumuzu kontrollü oksitlendirmeye yani AO işlemine tabi tutup daha sonra kimyasal yolla oksitlerinden 30 sn süre ile arındırdığımız S30 numunesinde ise kısa devre akım yoğunluğu,  $\sim 5 \text{ mA/cm}^2$  ve açık devre gerilimi,  $\sim 0.23 \text{ V}$  civarında kalmıştır. Oksitlerden arındırma süresini 30 sn daha artırdığımız S60 numunesinde ise kısa devre akım yoğunluğu azalmış  $\sim 2.2 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi ise hafif artmış  $\sim 0.28 \text{ V}$  olmuştur. Oksitlerden arındırma süresini bir 15 sn daha artırdığımız S75 numunesinde ise kısa devre akım yoğunluğu  $\sim 2.8 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi ise azalarak  $\sim 0.1 \text{ V}$  olmuştur.

Güneş pillerinin karakterizasyonunda kullanılan parametrelerden biri de dolum çarpanı (FF);

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (4.20)$$

formülü ile hesaplanmıştır. S0 numunesinde dolum çarpanı  $\sim 0.52$  iken S30 da  $\sim 0.62$  olmuştur. Oksitten arındırma süresini artırdıkça numune S60 da  $\sim 0.51$  ve numune S75 de  $\sim 0.43$  olarak azaldığı görülmüştür.

Güneş pilinin fotovoltaiik özelliklerinin belirlenmesinde en temel parametre olan güneş pili verimi;

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = FF \frac{I_{sc} \times V_{oc}}{P_{in}} \times 100 \quad (4.20)$$

formülü ile hesaplanmıştır. Bu formülde  $P_{max}$  değeri olarak diyottan alınan maksimum güç,  $P_{in}$  ise pil üzerine düşürülen simülatörün aydınlatma gücüdür.  $100 \text{ mV/cm}^2$  aydınlatma altında S0 numunesinin güneş pili verimi  $\sim 0.113$  iken S30 numunesinin verimi  $\sim 0.677$  dir. Oksitten arındırma süresini artırdıkça S60 numunesinin verimi  $\sim 0.309$  a geriledi ve S75 numunesinde ise  $\sim 0.131$  olarak ölçülmüştür.

**Çizelge 4.4.** Üretilen numunelerin diyot ve fotovoltaik karakteristik parametrelerinin ortalama değerleri

| Numune        | n    | $\Phi_B(eV)$ | $I_{sc}(A)$ | $V_{oc}(V)$ | FF   | $\eta$ |
|---------------|------|--------------|-------------|-------------|------|--------|
| S0 Referans   | 1.16 | 0.76         | 0.0009      | 0.23        | 0.52 | 0.113  |
| S30 30 sn KYT | 1.06 | 0.74         | 0.0050      | 0.22        | 0.61 | 0.677  |
| S60 60 sn KYT | 1.30 | 0.59         | 0.0021      | 0.28        | 0.51 | 0.309  |
| S75 75 sn KYT | 1.24 | 0.58         | 0.0027      | 0.11        | 0.43 | 0.131  |

Çizelge 4-4' de üretilen *Sn/p-Si* doğrultucu kontakların karakteristik diyot parametrelerinin (idealite faktörü, engel yüksekliği) ortalama değerlerinin yanısıra, fotovoltaik parametrelerinin (kısa devre akımı, açık devre gerilimi, dolum çarpanı, verim) ortalama değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4 incelendiğinde açıkça görülmektedir ki, üretilen *Sn/p-Si* Schottky tipi fotovoltaik kontaklarda, referans numuneye (S0) göre kıyaslama yapıldığında; 0.1 M'lık KOH çözeltisi %10 luk seyreltik HF ile kristal yüzeyi iyileştirme işlemi neticesinde en iyi sonuç 30 saniyelik KYT işlemi S30 numunesindeki 1.06'lık idealite faktörü değeri ile elde edilmiştir. KYT süresi arttırıldığında, idealite faktörü değerinde arttığı, yani doğrultucu kontakların ideallikten uzaklaştığı görülmektedir. Diğer diyot ve fotovoltaik parametreler için de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

## 5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada *Sn/p-Si/Al* Schottky tipi fotovoltaiik diyotlarında yüzey kimyasal temizleme işleminin güneş pili karakteristikleri üzerine etkileri araştırıldı. [100] doğrultuda büyütülmüş, ~280 µm kalınlıklı ve öz direnci 1-10 Ω.cm olan Bor katkılı p-Si kullanılarak referans, standart temizleme yöntemi ve anodizasyon-kimyasal işlem ile yüzey pasivasyonlu *Sn/p-Si/Al* Schottky engel yükseklikli diyotları üretildi. Çalışmamızın amacımız kimyasal yüzey temizleme işleminin üretilen *Sn/p-Si* Schottky tipi fotovoltaiiklerin hem diyot parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği) üzerine etkilerini gözlemek ve hem de fotovoltaiik parametrelerin (kısa devre akımı, açık devre gerilimi, dolum çarpanı, verim) üzerine etkilerini gözlemek, ve böylece uygulanan yüzey kimyasal temizleme işlemi neticesinde karakteristik parametreleri birbirinden farklı diyotlar ile güneş pilleri arasında bir kıyaslama yapabilme imkanı elde etmektir. Bu çalışmada kullanılan p-Si kristalinin oda sıcaklığındaki mobilitesi  $\mu_p=450 \text{ cm}^2/\text{V.sn}$  ve valans bandındaki durum yoğunluğu  $N_v=1.02.10^{19} \text{ cm}^{-3}$  olarak verilmektedir (Sze, 1981).

Omik tarafları aynı olan (referans ve anodik oksidasyon işlemine tabi tutulmuş) dört grup numunelerin parlak yüzlerini anodik oksidasyon işleminden sonra birbirinden farklı sürelerde %10 luk HF ile KYT işlemine tabi tutarak Schottky kontaklar yapıldı ve referans numune ile birlikte S0, S30, S60, S75 olarak isimlendirilinen dört grup numune üretildi. Her bir numunenin akım-voltaj (*I-V*), kapasitans-voltaj (*C-V*) ve kapasitans-frekans (*C-f*) ölçümleri, karanlıkta ve oda sıcaklığında alındı. Üretilen Schottky tipi fotovoltaiiklerin (S0, S30, S60, S75) AM1.5 ve 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında Akım-Voltaj (*I-V*) ölçümleri alındı. Bu ölçümlere ait grafikler çizilerek numunelere ait karakteristikler incelendi. Böylece yüzey pasivasyonu sonucunda idealite faktörü değerleri, engel yükseklikleri, kısa devre akımı, açık devre gerilimi, dolum çarpanı, verim değerleri belirlenerek, elde edilen karakteristik parametrelerin birbiri ile karşılaştırma imkanı elde edildi. *I-V* karakteristiklerinden fotovoltaiik diyotların idealite faktörleri, engel yükseklikleri, dolum çarpanları ve güneş pili verimleri hesaplandı. *C-V* karakteristiklerinden diyotların difüzyon potansiyelleri ve engel yükseklikleri hesaplandı. Ayrıca *C-f* ölçümleri alınarak grafikleri çizildi.

S0 adlı referans numunesinin arayüzeyi standart temizleme işlemine tabi tutulmuştur. S30, S60 ve S75 adlı numuneler ise anodik oksit işleminden sonra % 10 seyreltik HF çözeltisinde anodik oksit tabakasını temizlenme süreleri sırasıyla 30 sn, 60 sn ve 75 sn' dir.

Şekil 4.5 te oda sıcaklığında referans S0 numunesinin, Şekil 4.6 da S30 numunesinin, Şekil 4.7 de S60 numunesinin ve Şekil 4.8 de S75 numunesinin karanlıkta ve  $100 \text{ mW/cm}^2$  aydınlatma altında  $I$ - $V$  karakteristikleri birlikte gösterilmektedir. İdealite faktörleri, seri direnç etkisi önemszenmeyerek, karanlıktaki  $I$ - $V$  karakteristiklerinin doğru beslem kısmının lineer bölgesinin eğiminden Denklem 4.8' e göre hesaplandı. Sn/p-Si/Al Schottky diyotların engel yüksekliği değerleri, yarı logaritmik doğru beslem  $I$ - $V$  karakteristiklerinde, eğrinin düşey eksenini kestiği noktadan doyma akımı ( $I_0$ ), Denklem 4.10 yardımıyla hesaplandı. Çizelge 4.2 de görüldüğü gibi S0 referans numunesinin engel yüksekliği 0.70 – 0.80 eV aralığında elde edilirken, anodik oksidasyon işleminden sonra 30 sn temizlenen S30 numunesinin engel yüksekliği 0.74 – 0.75 eV değerine yükselmiştir. S60 numunesinde engel yüksekliği azalarak 0.59 -0.62 eV olurken S75 numunesinde daha da azalarak 0.58 – 0.59 eV olmuştur. Engel yüksekliğindeki bu farklılıkların oluşması ve en yüksek engel yüksekliğinin S30 numunesinde görülmesi en ideal kimyasal yüzey temizleme süresinin 30 sn olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar daha önce aynı konuda çalışan Temirci ve ark., (2001) ile uyum göstermektedir. KYT süresinin artması ile engel yüksekliğinin azalması p-Si kristalinin yüzey morfolojisinin bozularak kusurlar oluşturmalarına atfedilebilir.

Diğer taraftan, Çizelge 4.2' de görüleceği gibi S30 adlı numunenin idealite faktörü 1.05 – 1.08 civarında bulunmuştur. Bu değerler ideale en yakın bir Schottky diyot olarak kabul edilmektedir (Rhoderick, 1978; Sze, 1981). Çünkü ideal durumda yarıiletkenin yüzeyinde bir oksit tabakası ve Schottky kontak yapımı sırasında oluşacak doğal oksit tabakası yoktur (Türüt ve ark., 1992). İdealite faktörünün 1.08 olması Sn ile p-Si arasında 8 – 15 Å kalınlığında ince bir oksit tabakasının var olması demektir. İnce bir arayüzey tabakasına sahip diyotlar elektriksel olarak ideal Schottky diyot özelliği taşırlar ve bunların engel yükseklikleri Schottky-Mott değerine yakındır (Wittner ve Freeouf, 1992).

Çizelge 4.2' de ve Şekil 4.6' da görüleceği gibi anodik oksidasyon işlemine tabi tutulduktan sonra 30 sn süreyle kimyasal yüzey temizlemeye tabi tutulan S30 numunesindeki diyotların engel yükseklik değeri 0.75 eV ve idealite faktörü 1.06 olarak hesaplandı. Bu değerler ideal davranış gösteren bir Schottky diyot olarak kabul edilebilir (Card ve Rhoderick, 1971). Bu diyot için engel yükseklik değeri, bir Sn/p-Si Schottky diyot için Schottky-Mott değeri olan 0.75 eV olarak elde edildi. Bu, pasivasyon işleminin Sn/p-Si Schottky diyotta Fermi seviyesinin mihlanmasını bertaraf etmesi sonucunu verdiğini gösterir. İyi bilindiği gibi, istenen engel yüksekliği ve düşük idealite faktörüne sahip Schottky diyotlar elde etmek oldukça zordur. Çünkü metal-yarıiletken arayüzeyi, yüzey hazırlama işlemine karşı duyarlıdır (Temirci, 2000). Beklenen engel yüksekliği ve düşük idealite faktörü, S30 diyotunun yüksek kaliteli bir Sn/p-Si Schottky diyot olduğunu göstermektedir. Ayrıca diyotların termiyonik emisyon modeline çok iyi uyum sağladığı ifade edilebilir.

Kimyasal yüzey temizleme süreleri daha da artırılan S60 ve S75 numunelerinin sırasıyla 1.3 ve 1.24'lük nispeten daha yüksek idealite faktörü değerleri ve sırasıyla 0.59 eV, 0.58 eV'luk daha düşük Schottky engel yüksekliği değerleri, arayüzey atomik yapının ve tane sınırları (grain boundaries), çoklu fazlar (multiple phase), gözenekler (facet), bozukluklar (defect) gibi nedenlerle ortaya çıkan metal-yarıiletken (MS) arayüzeyindeki homojen olmayan bir atomik durumundan kaynaklanabileceği olarak açıklanabilir (Sullivan ve ark., 1991). Yani, aşırı KYT ile arayüzey ideallikten uzaklaşmaktadır diye de yorumlanabilir. Buna bağlı olarak 30 sn lik KYT süresinin, bizim yaptığımız bu çalışmada optimum kimyasal yüzey temizleme süresi olduğu ve yaptığımız pasivasyon işleminin arayüzeydeki homojen olmayan atomik durumları ortadan kaldırdığını söylenebilir.

Cheung fonksiyonları kullanılarak, S0, S30, S60 ve S75 diyotların idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri dirençleri hesaplandı. Cheung fonksiyonlarından  $[dV/d(\ln I)]-I$  grafikleri sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 de verilmiştir. Denklem 4.11 ve grafikler yardımıyla referans S0 numunesinin idealite faktörleri 1.13 ile 1.21 arasında, S30 numunesinin idealite faktörü 1.07 ile 1.08 arasında, S60 numunesinin idealite faktörü 1.31 ile 1.33 arasında, S75 numunesinin idealite faktörü 1.26 ile 1.33 arasında hesaplanmıştır. Cheung fonksiyonlarından elde edilen bu idealite faktörleri Denklem 3.35 ve 3.36 kullanılarak hesaplanan engel

yükseklikleri, referans S0 numunesi için 0.74 ile 0.77 arasında, S30 numunesi için 0.61 ile 0.63 arasında, S60 numunesi için 0.60 ile 0.88 arasında ve S75 numunesi için 0.59 ile 0.63 arasında elde edildi. Ek olarak, Cheung fonksiyonlarından  $R_s$  seri dirençleri de elde edildi ve değerleri Çizelge 4.2 de verilmiştir.

S0 referans numunesi, S30, S60 ve S75 numunelerinin sabit frekansta ve -2.0 V ile +0,5 V voltaj aralığında alınan C-V ölçümlerinden elde edilen ters beslem  $C^{-2}$ -V grafikleri ile Denklem 4.16 yardımıyla elde ettiğimiz engel yükseklik değerleri de Çizelge 4.2 de verilmiştir. Bu engel yükseklik değerleri de diğer I-V ve Cheung fonksiyonlarından elde ettiğimiz engel yükseklikleri ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

Son olarak, üretilen tüm numunelerin I-V ölçümleri, AM1.5 filtreye sahip güneş simülatörü kullanılarak 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında alınmış ve tüm numunelerin fotovoltaiik duyarlılığa sahip olduğu gözlenmiştir. S0 referans numunesinin fotovoltaiik karakteristiğini gösteren grafik veya diğer ifade ile güneş pili verim hesaplama grafiği Şekil 4.25 de, S30 numunesinin Şekil 4.26 da, S60 numunesinin Şekil 4.27 de ve S75 numunesinin Şekil 4.28 de verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen dolum çarpanı ve güneş pili verim değerleri Çizelge 4.3 de verilmiştir, kısa devre akımı ( $I_{SC}$ ) ve açık devre gerilimi de ( $V_{OC}$ ) eklenerek ortalama değerleri ise Çizelge 4.4' de verilmiştir.

Bu değerlerden kontrollü kimyasal yüzey temizlemenin geleneksel temizlemeye göre güneş pili parametrelerinde yaklaşık 4 kat iyileştirme oluşturduğu tesbit edilmiştir. En ideal KYT süresi olan 30 sn ile hazırlanan S30 numunesinde % 0.743 ile en yüksek güneş pili verimi elde edildiği görülmektedir. Daha önceki çalışmalara baktığımızda Schottky tipi fotovoltaiiklerde genelde pil verimleri yaklaşık bu civarlardadır. Au/MnHA/n-Si yapısında güneş pili verimini % 0.872 olarak elde edilmiştir (Ocak, 2010). Au/n-GaAs Schottky engel yükseklikli güneş pilinde  $V_{OC}$ =362 mV ve  $J_{SC}$ =28.3  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir (Soylu, 2011).

Schottky tipi fotovoltaiiklerde, engel yüksekliği modifiye edilerek, fotovoltaiik parametreler değiştirilebilir (Halder ve ark. 2015). Bizim yaptığımız çalışmada da açıkça görüleceği gibi engel yüksekliği ile güneş pili parametreleri arasında yakın bir ilişki vardır. Ortalama engel yüksekliği değeri en büyük olan S30 numunesinde güneş pili verimi de 0.677'lik ortalama değeri ile en büyük değere sahiptir. Bu ilişki aslında hem karakteristik diyot parametrelerinin ve hem de karakteristik fotovoltaiik

parametrelerin yüzey temizleme işlemine bağımlılığından kaynaklanır. Angermann ve ark. (2008), Si yüzeyine uygulanan ıslak kimyasal temizleme işleminin (n)a-Si:H/(p)c-Si heteroeklem güneş pili  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$  ve  $\eta$  parametrelerinde önemli artışlar sağladığını ifade etmişlerdir. Dikkat çekici en önemli artışın ise bu parametrelerden özellikle kısa devre akımında ( $I_{SC}$ ) olduğunu ifade etmişlerdir. Bizim yaptığımız çalışmada da genel olarak bir artış gözlenmiştir. Ancak, KYT süresine bağlı olarak, fotovoltaiik parametrelerde değişiklik göstermektedir. Örneğin, referans numuneye göre, S30 numunesindeki verim artışı 5.99 kat, S60 numunesindeki verim artışı 2.73 kat ve S75 numunesindeki verim artışı ise 1.16 kat olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde anodik oksidasyon KYT işlemi ile yüzey iyileştirmenin dolum çarpanı ( $FF$ ) üzerinde de olumlu etkileri görülmektedir. Referans numuneye göre, S30 numunesinin dolum çarpanı değerindeki artış 1.17 kat olarak tespit edilmiş, ancak S60 ve S75 numune gruplarında dolum çarpanı değerlerinde bir iyileşme görülmemektedir. Bu durum, Schottky tipi fotovoltaiiklerde dolum çarpanının, doğrultucu kontağın akım-voltaj karakteristiğinin termiyonik emisyon teorisine uygunluğu ile ilgili oluşuna atfedilebilir. Zira bir doğrultucu kontak termiyonik emisyon teorisine uygun bir davranış sergiliyorsa, ters beslem durumunda akım hemen hemen voltajdan bağımsız ve minimum, doğru beslem durumunda ise voltaja bağlı olarak üstel bir artış gösterir. Bu ifade ile dolum çarpanı birlikte göz önüne alındığında, Termiyonik Emisyon Teorisine uygun bir davranış sergileyen doğrultucu kontağın, ideal bir kontak olduğu, yani kontağı ideallikten uzaklaştıracak arayüzey tabakasının olmadığı veya minimum (8-15 Å civarında) olduğu bir yapı anlaşılır. İdeal bir diyotta idealite faktörü değeri 1 olarak alınır. Bizim çalışmamızda da ortalama idealite faktörü değeri 1'e en yakın olan S30 numune grubu olduğu görülmektedir. Böylece, karakteristik diyot parametreleri ile karakteristik fotovoltaiik parametreler arasında bir ilişki olduğu açıkça anlaşılmaktadır.

Mevcut çalışmamızda Sn/p-Si Schottky tipi fotovoltaiikler üretilerek, yüzey kimyasal temizleme işleminin karakteristik diyot parametreleri ve karakteristik güneş pili parametreleri üzerine etkileri araştırıldı. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgulardan, kontrollü bir yüzey kimyasal temizleme işleminin hem karakteristik diyot parametreleri üzerine ve hem de karakteristik güneş pili parametreleri üzerine olumlu etkileri olduğu belirlendi. Çalışmamızda kullanılan *p-Si* kristalinin doğrultucu kontak yapılacak olan ön yüzeyini anodik oksidasyon işleminden sonra 30

saniye %10 luk HF çözeltisi ile kimyasal temizleme işlemine tabi tuttuğumuzda, hem diyot ve hem de fotovoltaiik parametrelerde optimum değerler elde edildiği gözlemlendi. Buna ilaveten, KYT süresi arttırıldığında ise, bu optimum değerlerden uzaklaşıldığı gözlemlendi. Ayrıca, uygulanan yüzey kimyasal temizleme işlemi neticesinde elde edilen diyot ve fotovoltaiik parametreler arasında da ilişkiler olduğu tespit edildi. Ortalama olarak en yüksek güneş pili veriminin (0.677), yine ortalama olarak en düşük idealite faktörü değerine (1.06) sahip numunede (S30) elde edildiği belirlendi. Benzer şekilde yine ortalama olarak en yüksek dolum çarpanı değeri (0.61), ortalama olarak en düşük idealite faktörü değerine (1.06) sahip numunede (S30) elde edilmiştir. Netice olarak, ürettiğimiz Sn/p-Si Schottky tipi fotovoltaiiklerde, karakteristik güneş pili parametreleri ile karakteristik diyot parametreleri arasında yakın bir ilişki olduğu ve yüzey iyileştirmesi ile diyot ideal bir nitelik kazanırken, buna paralel olarak güneş pili parametrelerinde olumlu olarak ekilendiği sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Adams, W.G., Day, R. E., 1876. On the action of light on selenium. *Proceedings of the Royal Society of London*, **25**: 113-117.
- Aguas H., Pereira, L., Fortunato, E., Martins, R., 2004. Efect of tunneling oxide thickness and density on the performance of MIS photodiodes. *Thin Solid Films*, **451**: 361-365.
- Amanullah, F.M., Pratap, K.J., Babu, V.H., 1995. Characterization of isochronally and isothermally annealed indium tin oxide films. *Thin Solid Films*, **254**: 28-32.
- Andrew, J. M., Lepselter, M.P., 1970. Reverse current-voltage characteristics of metal-silicide Schottky diodes. *Solid State Electronics*, **13**: 1011.
- Angerman, H., Korte, L., Rappich, J., Conrad, E., Sieber, I., Schmidt, M., Hübener, K., Hauschild, J., 2008. Optimisation of electronic interface properties of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells by wet-chemical surface pre-treatment. *Thin Solid Films*, **516**: 6775-6781.
- Antonaia, A., Menna, P., Addonizio, M.L., Crocchiolo, M., 1992. Transport properties of polycrystalline tin oxide films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **28**: 167-173.
- Ashok, S., Borrego, J. M., Gutmann, R. J., 1979. Electrical characteristics of GaAs MIS Schottky diodes. *Solid State Electronics*, **22**: 621-631.
- Ashok, S., Sharma, P.P., Fonash, S.J., 1980. Spray-deposited ITO/silicon SIS heterojunction solar cells. *IEEE Transation on Electron Devices*, **ED-27**, **4**: 725-730.
- Aydın, M. E., 2003. *Metal/yarıiletken ve metal/oksit/yarıiletken Pb/p-Si ve Pb/n-Si Schottky engel diyotların karakteristik parametreleri ve arayüzey hallerinin enerji dağılımının belirlenmesi.*, (doktora tezi basılmamış), D. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Barret, C., Maaref H., 1993. Study of Cleaved Metal-Inp(n) Contacs. *Solid State Electronics*, **36**: 879.

- Batı, B., 1999. *İdeal ve ideal olmayan omik ve doğrultucu kontaklı Au/n-Si Schottky diyotlarında doğru beslem kapasite-voltaj-frekans karakteristikleri*, (doktora tezi basılmamış), A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Becquerel E., 1839. Memoire sure les effets electriques produits ous l'influence des rayons solaires, *Comptes Rendues*, **6**: 561.
- Bethe, H. A., 1942. Theory of the boundry layer of crystal rectifiers. *Mass Inst. Technol. Radiat Lab. Rep.*, 43
- Bethe, H. A., 1981. Theory of the boundry layer of crystal rectifiers. *Mass Inst. Technol. Radiat Lab. Reba.*, 1942, 43-12.
- Bolotnikov, A.E., Boggs, S.E., Hubert Chen, C.M., Cook Walter, R., Harrison, F.A. and Schindler, S.M., 2002, Properties of Pt Schottky type contacts on high-resistivity CdZnTe detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **482**: 395-407.
- Bozkurt, H., 2009. *Metal-yarıiletken kontaklarda kapasitenin arayüzey hallerine bağlı incelenmesi*, (yüksek lisans tezi basılmamış), Y.Y.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Cafer, T., 2000. *Katıhal Elektronikçi*. YTÜ Vakıf Yay., Istanbul. 233.
- Card, H. C., Rhoderick, E.H., 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. interface effects in silicon schottky diodes. *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **4**: 1589.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., Pearson, G. L., 1954. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, **25**: 676-677.
- Chattopadhyay, P., Das, K., 1991. Control of barrier height of MIS tunnel diodes using deep level impurities. *Solid State Electronics*, **34(4)**: 367.
- Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., 1993. Frequency dependence of forward capacitance-voltage characterics of Schottky barrier diodes. *Solid-State Electron*, **36(4)**: 605-610.
- Cheung, S.K., Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky diode parametres from forwed current-voltage characteristics. *Appl Phys.Let.* **49(2)**: 85-90.
- Crowell, C.R., Sze, S. M., 1965. Electron optical phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal semiconductor structures., *Solid State Electronics*, **8(12)**: 979-990.

- Crowell, C.R., Sze, S. M., 1966. Current transport in metal-semiconductors, barriers, *Solid State Electronics*, **9**: 1035-1048.
- Das, S.K., Morris, G.C., 1993. Preparation and properties of electro deposited indium tin oxide/SnO<sub>2</sub>/CdTe and indium tin oxide/ SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe solar cells. *Journal of Applied Physics*, **73**: 782-786.
- Donati, S., 1999. *Photodetectors: devices, circuits and applications*, Prentice Hall, New Jersey.
- Elangovan, E., Ramamurthi, K., 2005. A study on low cost-high conducting fluorine and antimony-doped tin oxide thin films. *Applied Surface Science*, **249**: 183-196.
- Feng, Z. C., Wei, C. C., Wee, A. T. S., Rohatgi, A., Lu, W., 2010. Effects of CdCl<sub>2</sub> treatment and annealing on CdS/SnO<sub>2</sub>/glass heterostructures for solar cells. *Thin Solid Films*, **518**: 7199-7203.
- Ghandi, S. K., 1983. *VLSI Fabrication Principles*, John Wiley and Sons. Inc, New York.
- Halder, N. N., Biswas, P., Kundu, S., Banerji, P., 2015, Au/p-Si Schottky junction solar cell: Effect of barrier height modification by InP quantum dots. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **132**: 230-236.
- Heine, V., 1965. Calculation of the optical absorption between surface states of silicon *Surface Science*. **43(2)**: 417-430.
- Karataş, Ş., Çakar, M., 2009. Temperature dependence of the electrical and interface states of the Sn/Rhodamine-101/p-Si Schottky structures. *Synthetic Metals*, **159**: 347-351.
- Kittel, C., 1996. *Katıhal Fizikine Giriş*, Bilgi Tek Yayıncılık, İstanbul.
- Klein, A., Körber, C., Wachau, A., Sauberlich, F., Gassenbauer, Y., Harvey, S. P., Proffit, D.E., Mason, T. O., 2010. Transparent Conducting Oxides for Photovoltaics: Manipulation of Fermi Level, Work Function and Energy Band Alignment. *Open Access Materials*, **3**: 4892-4914.
- Kobayashi, H., Ishida, T., Nakato, Y., Tsubomura, H., 1991. Mechanism of carrier transport in highly efficient solar cells having indium tin oxide/Si junction. *Journal of Applied Physics*, **69**: 1736-1743.

- Kobayashi, H., Ishida, T., Nakato, Y., Tsubomura, H., 1992. Properties of indium tin oxide films prepared by electron beam evaporation method in relation to characteristics of indium tin oxide/silicon junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, **72**: 5288-5293.
- Kumta, A., Rusli, C., Tin, C., Ahn, J., 2006. Design of field-plate terminated 4H-SiC Schottky diodes using high-k dielectrics. *Microelectronic Reliability*, **46**: 1295-1302.
- Li, X., Wanlass, M. W., Gessert, T. A., Emery, K. A., Coutts, T. J., 1989. High-efficiency indium tin oxide/ indium phosphide solar cells. *Applied Physics Letters*, **54**: 2674-2676.
- Manifacier, J.C., Szepessy, L., 1977. Efficient sprayed In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn/n-type silicon heterojunction solar cell. *Applied Physics Letters*, **31**: 7, 459-462.
- Matsubara, S., Narui, H., Tsuc Hiya, N., Takahashi, S., Kurita, S., 1989. Effect of InGaAsP surface treatment for indium tin oxide/InGaAsP/GaAs solar cells. *Journal of Applied Physics*, **66**: 7, 3337-3341.
- Mott, N. F., 1938. Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor. *Proc. Cambridge Philos. Soc.* **34**: 548.
- Mulyadi, R., Campbell, D. J., 1989. Combinations of evaporation and screen printing techniques for fabricating ITO/tin(Sn)/p-type silicon solar cells. *Solar Energy Materials*, **19**: 187-198.
- Ocak, Y. S., Kulakci, M., Kılıçoğlu, T., Turan, R., Akkılıç, K., 2009. Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of a Sn/Methylene Blue/p-Si Schottky diode. *Synthetic Metals*, **159**: 1603-1607.
- Ocak, Y.S., 2010. *Organik, inorganik hibrit yapıların elektriksel ve fotoelektriksel karakterizasyonu*. (doktora tezi basılmamış), D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Ohl, R. S., 1941. *Light-sensitive electric device*. U.S. Patent No:2, 402,662.
- Pankove, J. I., 1971. Optical Processes in Semiconductors, *Dover Publications*, New York.
- Polyakov, A. Y. ve ark., 1994. Hydrogen passivation effects in quaternary solid solutions of InGaAsSb lattice matched to GaSb. *Materials Science and Engineering B*, **27**: 137-141.

- Rastogi, A. C., Lakshmikumar, S. T., 1989. Indium tin oxide/metal interfacial resistance and its implication for solar cells. *Solar Cells*, **26**: 323-328.
- Rhoderick, E. H., Williams, R. H., 1988. *Metal-semiconductor contacts*. Claredon Press, Oxford.
- Schunck, J. P., Coche, A., 1979. Efficient indium tin oxide/polycrystalline silicon solar cells. *Applied Physics Letters*, **35**: 863-.
- Schottky, W., Stormer, R., Waibel, F., 1931. Rectifying action at the boundary between CuProus oxide and applied electrodes. *Zeits Hoch Frequenztechnik*, **37**: 162-165.
- Schottky, W., 1938. Halbleitertheorie der sperrschicht. *Naturwissenschaften*, **26**: 843.
- Selçuk, A. B., 2007. On the dielectric characteristics of Au/SnO<sub>2</sub>/n-Si capacitors. *Physica B*, **396**: 181-186.
- Shadia, J. I., Riyad, N. A. B., 2009. Effect of the substrate temperature on the electrical and structural properties of spray-deposited SnO<sub>2</sub>:F thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **12**: 122-125.
- Shadia, J.I., Riyad, N.A.B., 2010. Characterization of the SnO<sub>2</sub>:F/CdS:In structures prepared by the spray pyrolysis technique. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **94**: 878-883.
- Sharma, L. H., 1984. *Metal Semiconsuactor Schottky Barrier Junctions Their Applications*, Plenum Pres, New Yok and London, 176.
- Siefert, W., 1984. Properties of thin In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SnO<sub>2</sub> films prepared by corona spray pyrolysis and a discussion of the spray pyrolysis process. *Thin Solid Films*, **121**: 275-282.
- Sigh, A., 1985. Characterization of Interface States at Ni/nCdF<sub>2</sub> Schottky Barrier Type Diodes and The Effect of CdF<sub>2</sub> Surface Preparation. *Solid State Electronics*, **28**: 223.
- Sivridis, D. K., Pananakakis, G., 1991. Influence of ITO deposition technology on the performance of SIS (ITO/SiO<sub>2</sub>/Si) solar cells. *Solid State Electronis*, **34**: 10, 1175-1177.
- Soylu, M., Yakuphanoglu, F., 2011. Photovoltaic and interface state density properties of the Au/n-GaAs Schottky barrier solar cell. *Thin Solid Films*, **519**: 1950-1954

- Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M. R., Graham, W. R., 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: a numerical study. *Journal of Applied Physics*, **70**(12): 7403–7424
- Sze, M. S., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*, Willey, New York.
- Tataroğlu, A., Altındal, S., 2006. Characterization of current-voltage (I-V) and capacitance-voltage-frequency (C-V-f) features of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Schottky diodes, *Microelectronic Engineering*, **83**: 582-588.
- Temirci, C., 2000. *Anodik Oksidasyon Metoduyla Yüksek Engelli ve Yüzey Pasivasyonlu Sn/p Si Schottky Diyotlarının Fabrikasyonu*, (doktora tezi basılmamış), A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Temirci, C., Batı, B., Sağlam, M., Türüt, A., 2001. High-barrier height Sn/p-Si Schottky diodes with interfacial layer by anodization process. *Appl. Surf. Sci.*, **172**:1-7.
- Türüt, A., Sağlam, M., 1992. Determination of the density of Si-metal interface states and excess capacitance caused by them. *Physica B*, **179**: 285.
- Werner, J. H., Levi, A., Tung, R. T., Anzlowar, M., Pinto, M., 1988. Origin of excess capacitance at intimate Schottky contacts. *Phys. Rev. Lett.*, **60**: 53.
- Werner, J. H., Rau, U., 1994. *Springer Series In Electronics and Photonics*, Springer Press, **32**: 89.
- Wilmsen, C. W., 1985. *Physics and chemistry of III- V compound semiconductor interfaces*. Plenum Press, New York.
- Wittmer, M. ve Freeouf, J. L., 1992. Ideal Schottky diodes on passivated silicon., *Physics Review Letters*, **69**: 2701.
- Wittmer, M., Freeouf, J. L., 1993. Interface states and the barrier height of Schottky diodes, *Physics Letters A*, **173**: 190-194.
- Yakuphanoglu, F., 2007. Electronic and photovoltaic of Al/p-Si/copper phthalocyanine photodiode junction barrier. *Solar Energy Materials*, **91**: 1182-1186.
- Yıldız, D.E., Altındal, Ş., Tekeli, Z., Özer, M., 2010. The effects of surface states and series resistance on the performance of Au/SnO<sub>2</sub>/n-Si and Al/SnO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Schottky barrier diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **13**: 34-40.

## ÖZGEÇMİŞ

Abdullah Özkartal 12.06.1970 tarihinde Kütahya’da doğdu. İlk, orta ve Lise eğitimini Kütahya Merkezde tamamladı. Diyarbakır Dicle Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fizik Öğretmenliği Bölümünden 1992 yılında mezun oldu. Aynı yıl, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Eylül 1993’de Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında başladığı Yüksek Lisans eğitimini Mart 1996’da tamamladı. Şubat 2009’da Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında Doktora eğitimine başladı. Bir dönem burada devam ettikten sonra Yüzüncü Yıl Üniversitesi’nde açılan doktora programına yatay geçiş yaptı. Halen Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve 3 çocuk babasıdır.