

**POLİVİNİL ALKOL ARAYÜZEY TABAKALI  
SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN HAZIRLANMASI  
VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**2016  
DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Osman ÇİÇEK**

**POLİVİNİL ALKOL ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY ENGEL  
DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**Osman ÇİÇEK**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Temmuz 2016**

Osman ÇİÇEK tarafından hazırlanan “POLİVİNİL ALKOL ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Habibe TECİMER

Tez Danışmanı, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 19/ 07/ 2016

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL (GÜ)

Üye : Prof. Dr. İhsan ULUER (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Habibe TECİMER (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer KARAL (YBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Muhammet Tahir GÜNEŞER (KBÜ)



.../.../2016

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

  
Osman ÇİÇEK

## ÖZET

Doktora Tezi

### POLİVİNİL ALKOL ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Osman ÇİÇEK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Habibe TECİMER

Temmuz 2016, 110 sayfa

Bu çalışmada, karanlıkta ve farklı ışık koşulları altındaki saf ve grafen (Gr) katkılı PVA organik/polimer arayüzey tabakaların Schottky engel diyotlar (SBDs) üzerindeki fotovoltajik karakteristiklerine etkisinin araştırılması amacıyla Au/*n*-GaAs (MS) tipi (D<sub>1</sub>) SBDs, Au/saf PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>2</sub>) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>3</sub>) SBDs üretildi. SBDs'in akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri, dört farklı ışık şiddeti/seviyesi (50-200 W) için -2 V ile + 2 V aralığında, 50 mV'luk adımlarla oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Diyotlara ait temel elektriksel parametreler (sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_{Bo}$ ), idealite faktörü (*n*), doyum akımı (*I<sub>o</sub>*), seri direnç (*R<sub>s</sub>*) ve kısa devre direnci (*R<sub>sh</sub>*)), akım-voltaj (*I-V*) verilerinden faydalanılarak termiyonik emisyon (TE), Ohm yasası, Cheung metodu ve modifiye edilmiş Norde metodu kullanılarak karanlık ve farklı ışık şiddetleri/seviyeleri için oda sıcaklığında elde edildi ve birbirleri ile karşılaştırıldı.

Araştırmada, organik/polimer arayüzey tabakalı diyotların  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri karşılaştırıldığında; Gr-katkılı PVA'lı yapı, saf PVA'lı yapıya göre  $R_s$  değerini azaltırken  $R_{sh}$  değerini artırdığını, dolayısıyla doğrultma oranını da ( $RR=I_F/I_R$ ) artırdığını deneysel sonuçlar gösterdi. Ayrıca farklı hesaplama metotları kullanılarak elde edilen bu parametreler iyi bir uyum içerisindedir. Diğer taraftan MPS (saf ve Gr-katkılı PVA) tipi SBDs için TE modeli ve modifiye edilmiş Norde metodundan elde edilen  $\Phi_{Bo}$  değerleri, MS yapıdan daha küçüktür. Dolayısıyla, organik/polimer arayüzey tabaka olarak PVA (saf ve Gr-katkılı), arayüzey tabakasız yapıya göre engel yüksekliğini (BH) etkin bir şekilde değiştirdiği söylenbilir. Sonuç olarak; Gr-katkılı PVA tabakanın, karanlık ve farklı işık koşulları altındaki Au/PVA/n-GaAs tipi SBD'in performansını ve kalitesini önemli ölçüde artırdığı aşıkardır.

**Anahtar Sözcükler :** Schottky engel diyotlar, organik/polimer arayüzey tabakalar, nano-yapılar, fotovoltaik ve elektriksel özellikler.

**Bilim Kodu** : 905.1.035

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **THE PREPARATION OF SCHOTTKY BARRIER DIODES WITH POLYVINYL ALCOHOL INTERFACE LAYER AND THE INVESTIGATION OF THEIR ELECTRICAL PROPERTIES**

**Osman ÇİÇEK**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Electrics - Electronics Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Habibe TECİMER**

**July 2016, 110 pages**

In this study, Au/*n*-GaAs (MS) type (D<sub>1</sub>) SBDs, Au/pure PVA/*n*-GaAs (MPS) type (D<sub>2</sub>) SBDs and Au/Gr-doped PVA/*n*-GaAs (MPS) type (D<sub>3</sub>) SBDs were fabricated to investigate the effects of pure and Gr-doped PVA interfacial layers on photovoltaic characteristics of Schottky barrier diodes (SBDs) under dark and illuminated conditions. The current-voltage (*I-V*) measurements of SBDs for four different illumination intensities/levels (50-200 W) were performed with 50 mV steps between -2V and +2V, at room temperature. Using thermionic emission (TE) model, Ohm's Law, Cheung's method and Norde's method modified, the basic electrical parameters (i.e. saturation current ( $I_o$ ), ideality factor ( $n$ ), zero-bias barrier height ( $\Phi_{Bo}$ ), series resistance ( $R_s$ ) and shunt resistance ( $R_{sh}$ )) for the diodes were obtained from the current-voltage (*I-V*) data under dark and illuminated conditions, at room temperature and compared with each other. In this research, experimental results

indicate that here is a decrease in  $R_s$  value and an increase in  $R_{sh}$  value, therefore an increase in rectifier rate ( $RR=I_F/I_R$ ), for Gr-doped PVA structure according to the pure PVA structure, when the values of  $R_s$  and  $R_{sh}$  of the diodes with organic/polymer interfacial layer are compared between each other. Also, these parameters obtained from using the different calculation methods are a good consistency among the values. On the other hand, the  $\Phi_{Bo}$  values obtained from TE model and Norde's method modified for the MPS (pure and Gr-doped PVA) type SBDs is lower than the MS type SBDs. Therefore, it can be said that the PVA (pure and Gr-doped) as organic/polymer interfacial layer changed effectively the barrier height (BH) according to without interlayer. Consequently, it is obvious that Gr-doped PVA layer significantly improved the performance and the quality of Au/PVA/*n*-GaAs structure under dark and illuminated conditions.

**Key Word** : Schottky barrier diodes, organic/polymer interfacial layers, nano-structures, photovoltaic and electrical properties.

**Science Code** : 905.1.035





*Sevgili eşim ve kızım  
başta olmak üzere tm aileme...*

## TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, çalışmanın her aşamasında beni yönlendiren ve özverili yardımlarını esirgemeyen, danışmanım Sayın Doç. Dr. Habibe TECİMER'e şükranlarımı sunarım.

Bu araştırma boyunca engin bilgi ve tecrübesi ile bizi yönlendiren, destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a minnettarım. Ayrıca değerli jüri üyemiz KBÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı Sayın Prof. Dr. İhsan ULUER'e teşekkür ederim. Deneysel malzemelerinin temininde ve Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM)'nde numunelerin hazırlanmasındaki yardımlarından dolayı Sayın Prof. Dr. İbrahim USLU'ya ve Yrd. Doç. Dr. İkrım ORAK'a minnettarım. Çalışmada desteğini ve emeğini esirgemeyen saygıdeğer hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hüseyin TECİMER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmalarım boyunca verdiği maddi destek ve tüm imkanlar için Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje no: KBU-BAP-14/2-DR-005) teşekkür ederim.

Osman ÇİÇEK

Temmuz 2016

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	6
LİTERATÜR TARAMASI VE TEORİK ALTYAPILARI .....	6
2.1. METAL-YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR.....	6
2.1.1. Metal- <i>n</i> tipi Yarıiletken Kontaklar .....	8
2.1.2. Metal- <i>p</i> tipi Yarıiletken Kontaklar .....	13
2.2. SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARDA AKIM İLETİM MEKANİZMALARINI VE TERMİYONİK EMİSYON TEORİSİ .....	17
2.3. ARAYÜZEY DURUMLARI VE YALITKAN ARAYÜZEY TABAKASINA SAHİP KONTAKLAR .....	21
2.4. SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARDA İDEALİTEYİ ETKİLEYEN NEDENLER .....	24
2.4.1. İmaj-Kuvvet (Schottky) Etkisi.....	24
2.4.2. Seri Direnç Etkisi.....	28
2.4.3. Kuantum Mekaniksel Tünelleme Etkisi .....	30
2.4.4. Kenar Etkisi .....	31
2.4.5. Yüzey Durumları ve Schottky Engel Homojensizliği .....	31

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.5. FOTON.....	32
2.5.1. Fotonun Yapısı ve Özellikleri.....	33
2.5.2. Işımalı Geçişler.....	35
2.5.3. Fotovoltaik Etki.....	36
2.5.4. Schottky Engel Tipi Fotodiyotlar.....	38
BÖLÜM 3.....	42
MATERYAL VE YÖNTEM.....	42
3.1. GRAFEN (Gr).....	42
3.1.1. Özellikleri.....	43
3.1.1.1. Elektriksel İletkenlik.....	44
3.1.1.2. Mekaniksel Özellikleri.....	45
3.1.1.2. Termal Özellikleri.....	46
3.2. POLİVİNİL ALKOL (PVA).....	47
3.3. GALYUM ARSENİDE (GaAs) KRİSTALİN TEMEL ÖZELLİKLERİ.....	48
3.4. Au/ <i>n</i> -GaAs (MS) tipi (D <sub>1</sub> ) SBDs, Au/saf PVA/ <i>n</i> -GaAs (MPS) tipi (D <sub>2</sub> ) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/ <i>n</i> -GaAs (MPS) tipi (D <sub>3</sub> ) SBDs'İN HAZIRLANMASI.....	53
3.4.1. <i>n</i> -tipi GaAs Kristalin Temizlenmesi.....	54
3.4.2. Omik Kontaktların Oluşturulması.....	55
3.4.3. Electrospinning (Elektro-üretim) Yöntemi ile saf ve Gr-katkılı PVA Organik/Polimer Tabakaların Oluşturulması.....	57
3.4.4. Doğrultucu (Schottky) Kontakın Oluşturulması.....	60
3.5. DENEYSEL ÖLÇÜM SİSTEMİ.....	63
BÖLÜM 4.....	66
ARAŞTIRMA BULGULARI.....	66
4.1. Au/ <i>n</i> -GaAs (MS) tipi (D <sub>1</sub> ) SBDs, Au/saf PVA/ <i>n</i> -GaAs (MPS) tipi (D <sub>2</sub> ) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/ <i>n</i> -GaAs (MPS) tipi (D <sub>3</sub> ) SBDs'İN ODA SICAKLIĞINDAKİ AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİ.....	66

**Sayfa**

4.2. Au/n-GaAs (MS) tipi (D <sub>1</sub> ) SBDs, Au/saf PVA/n-GaAs (MPS) tipi (D <sub>2</sub> ) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/n-GaAs (MPS) tipi (D <sub>3</sub> ) SBDs'İN KARANLIK VE FARKLI IŞIK KOŞULLARINDAKİ (50W-200W) AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİ.....	77
BÖLÜM 5 .....	91
SONUÇ VE TARTIŞMA .....	91
KAYNAKLAR .....	98
ÖZGEÇMİŞ .....	110



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Schottky diyot için; kontak yapısı (a) ve sembol (b). .....	7
Şekil 2.2. Metal- $n$ tipi yarıiletken doğrultucu kontak için ( $\Phi_m > \Phi_s$ ) elektron enerji-band diyagramı; birbirinden ayrılmış nötral malzemeler (a), kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu ( $V=0$ ) (b).....	8
Şekil 2.3. Metal/ $n$ -tipi yarıiletken Schottky yapı için; termal denge (a), ileri ön-gerilim (b) ve ters ön-gerilim (c) durumlarındaki enerji-bant diyagramları.....	10
Şekil 2.4. $\Phi_m < \Phi_s$ için metal/ $n$ -tipi yarıiletken omik kantağın elektron enerji-bant diyagramı; birbirinden ayrı nötral materyaller (a), termal dengede kontak (b), yarıiletken negatif ön-gerilim altında (c) ve yarıiletken pozitif ön-gerilim altında (d). .....	12
Şekil 2.5. Metal- $p$ tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kantağın enerji-bant diyagramı; kontakta önce (a), kontakta sonra ve termal dengede (b), pozitif voltaj ( $V > 0$ ) (c), negatif voltaj ( $V < 0$ ) (d).....	14
Şekil 2.6. Metal/ $p$ -tipi yarıiletken omik kantağın enerji-bant diyagramı; kontakta önce (a), kontakta sonra ve termal dengede (b), $V > 0$ durumunda (c), $V < 0$ durumunda (d). .....	16
Şekil 2.7. MS kontaklarda ileri ön-gerilim altındaki akım-iletim mekanizmaları. ....	18
Şekil 2.8. Arayüzey tabakasına sahip MS kantağın enerji bant diyagramı.....	21
Şekil 2.9. Metal-dielektrik arayüzeyinde Schottky etkisi ve elektrik alan kuvvet çizgileri. ....	25
Şekil 2.10. Bir metaldeki görüntü (imaj) yükü (a), imaj-kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin azalması (b).....	27
Şekil 2.11. Metal-yarıiletken kontaklarda; termal denge durumu, ileri ön-gerilim ve ters ön-gerilim durumlarındaki Schottky etkisi dahil edilmiş enerji-bant diyagramları.....	27
Şekil 2.12. Au/ $n$ -GaAs ( $D_1$ ) MS tipi SBDs'de 200W için seri direnç ( $R_s$ ) etkisi. ....	28
Şekil 2.13. Kuantum mekaniksel tünellemenin şematik gösterimi. ....	30

Şekil 2.14. Schottky engel diyotlarda kenar etkisi ve koruma yüzükleri.....	31
Şekil 2.15. V gerilimi altındaki bir Schottky diyotun engel homojensizliğinin üç boyutlu enerji-bant diyagramı. ....	32
Şekil 2.16. Işık dalgası ve özellikleri. ....	34
Şekil 2.17. Elektromanyetik ışınım spektrumu. ....	35
Şekil 2.18. İki enerji seviyesi arasındaki üç temel optiksel işlem; soğurma (a), kendiliğinden yayılma (b) ve uyarılmayla yayılma etkileşimleri (c).. ....	36
Şekil 2.19. Fotovoltaik etkinin şematik gösterimi. ....	37
Şekil 2.20. Schottky fotodiyotlarda <i>p</i> -tipi yarıiletken için fotoemisyon olayı.....	39
Şekil 2.21. Schottky fotodiyotlar için soğutma gereksinimleri.....	40
Şekil 3.1. Karbon elementinin allotropları (Grafen, karbon nanotüp, fulleren, grafit). ....	43
Şekil 3.2. PVA için yapısal formül: kısmi hidrolizi (a), tam hidrolizi (b). ....	47
Şekil 3.3. Vinil alkol (a), polivinil asetatın hidrolizi ile sentezlenen PVA'nın yapısı (b). ....	48
Şekil 3.4. GaAs'ın kristal yapısı. ....	49
Şekil 3.5. GaAs ait enerji-bant diyagramı. ....	50
Şekil 3.6. Enerji-bant yapıları: GaAs (a) ve Si (b). ....	51
Şekil 3.7. GaAs kristalin kimyasal temizleme aşamaları. ....	55
Şekil 3.8. Omik kontakın oluşturulmasına ait şematik gösterim. ....	56
Şekil 3.9. Termal buharlaştırma ünitesine ait şematik gösterim. ....	57
Şekil 3.10. Electrospinning yönteminin şematik gösterimi. ....	58
Şekil 3.11. Saf PVA (a) ve Gr-katkılı PVA (b) için nano-fiberlerin yüzey morfolojisi. ....	60
Şekil 3.12. Doğrultucu (Schottky) kontakların oluşturulması. ....	61
Şekil 3.13. Au/ <i>n</i> -GaAs (MS) tipi (D <sub>1</sub> ) SBDs, Au/saf PVA/ <i>n</i> -GaAs (MPS) tipi (D <sub>2</sub> ) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/ <i>n</i> -GaAs (MPS) tipi (D <sub>3</sub> ) SBDs'in şematik gösterimi. ....	62
Şekil 3.14. D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub> ve D <sub>3</sub> SBDs'in <i>I-V</i> ölçüm sistemine ait şematik gösterim.....	64
Şekil 4.1. D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub> ve D <sub>3</sub> SBDs'in oda sıcaklığındaki ileri ve ters ön-gerilim <i>I-V</i> grafikleri. ....	67
Şekil 4.2. D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub> ve D <sub>3</sub> SBDs için oda sıcaklığındaki <i>R<sub>i</sub>-V<sub>i</sub></i> grafiği. ....	70

Şekil 4.3. D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub> ve D <sub>3</sub> SBDs için oda sıcaklığındaki $dV/d(\ln I)$ - $I$ (a) ve $H(I)$ - $I$ (b) grafikleri. ....	72
Şekil 4.4. D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub> ve D <sub>3</sub> SBDs'in oda sıcaklığındaki $F(V)$ - $V$ grafiği. ....	74
Şekil 4.5. D <sub>1</sub> (a), D <sub>2</sub> (b) ve D <sub>3</sub> (c) SBDs'in karanlıkta ve farklı ışık koşullarında akım-voltaj eğrileri. ....	77
Şekil 4.6. D <sub>1</sub> (a), D <sub>2</sub> (b) ve D <sub>3</sub> (c) SBDs için $\Phi_{Bo}$ ve $n$ - ışık seviyesi ( $W$ ) eğrileri. ....	82
Şekil 4.7. D <sub>1</sub> (a), D <sub>2</sub> (b) ve D <sub>3</sub> (c) SBDs için karanlık ve farklı ışık seviyeleri altındaki $R_i$ - $V_i$ eğrileri. ....	84
Şekil 4.8. D <sub>1</sub> (a), D <sub>2</sub> (b) ve D <sub>3</sub> (c) diyotlarının karanlık ve farklı ışık koşulları altındaki $F(V)$ - $V$ eğrileri. ....	87



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1. Grafen / polimer nanokompozitlerin elektriksel özellikleri.....	45
Çizelge 3.2. Grafen'in mekaniksel özellikleri.....	46
Çizelge 3.3. Grafen temelli malzemelerin termal özellikleri.....	46
Çizelge 3.4. Düşük katkı konsantrasyonları için $T=300K$ 'deki tipik mobilite değerleri.....	52
Çizelge 3.5. GaAs kristalinin bazı temel özellikleri ve çalışmada kullanılan kristale ait özellikler.....	53
Çizelge 4.1. $D_1$ , $D_2$ ve $D_3$ SBDs için $I_o$ , $n$ ve $\Phi_{Bo}$ 'ın elde edilen deneysel değerleri.....	69
Çizelge 4.2. $D_1$ , $D_2$ ve $D_3$ SBDs için modifiye edilmiş Norde fonksiyonundan elde edilen $\Phi_{Bo}$ ve $R_s$ değerleri.....	75
Çizelge 4.3. SBDs'ler için Ohm yasası, Cheung fonksiyonu ve modifiye edilmiş Norde fonksiyonundan elde edilen $\Phi_{Bo}$ , $n$ ve $R_s$ değerleri.....	76
Çizelge 4.4. Karanlık ve farklı ışık koşulları altındaki $D_1$ , $D_2$ ve $D_3$ SBDs için elde edilen deneysel $I_o$ , $n$ ve $\Phi_{Bo}$ değerleri.....	81
Çizelge 4.5. Karanlık ve farklı ışık koşulları altındaki $D_1$ , $D_2$ ve $D_3$ SBDs'in modifiye edilmiş Norde fonksiyonundan elde edilen $\Phi_{Bo}$ ve $R_s$ değerleri.....	89
Çizelge 5.1. Karanlık ve ışık koşulları altındaki $D_1$ , $D_2$ ve $D_3$ SBDs'in fotovoltaj davranışlarının literatür ile karşılaştırılması.....	93
Çizelge 5.2. Oda sıcaklığında organik/inorganik yalıtkan arayüzey tabakalı ve tabakasız MS ve MPS/MIS tipi SBDs'in karşılaştırılması ile ilgili yapılan çalışmalar ve elde edilen temel diyot parametreleri.....	95
Çizelge 5.3. Oda sıcaklığında PVA organik arayüzey tabakalı MPS tipi SBDs ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar ve elde edilen temel diyot parametrelerinin $D_2$ ve $D_3$ SBDs ile karşılaştırılması.....	96

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$\text{Å}$	: Angström
$A$	: Doğrultucu kontak alanı
$A^*$	: Richardson sabiti ( $n$ -tipi GaAs için $8.16 \text{ Acm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ )
$E_g$	: Yasak enerji aralığı
$E_v$	: Valans bant kenarı enerjisi
$E_c$	: İletkenlik bant kenarı enerjisi
$I_o$	: Doyum akımı
$k$	: Boltzmann sabiti ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ )
$n$	: İdealite faktörü
$N_{ss}$	: Arayüzey durumları
$\Phi_B$	: Potansiyel engel yüksekliği
$\Phi_{Bo}$	: Sıfır-beslem engel yüksekliği
$\Phi_s$	: Yarıiletken iş fonksiyonu
$\Phi_m$	: Metal iş fonksiyonu
$R_s$	: Seri direnç
$R_{sh}$	: Kısa devre direnci
$R_i$	: Yapı direnci
$V$	: Uygulanan voltaj
$V_F$	: İleri ön-gerilim
$I_F$	: İleri ön-gerilim altındaki akım
$V_R$	: Ters ön-gerilim
$I_R$	: Ters ön-gerilim altındaki akım
$q$	: Elektron yükü ( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )
$T$	: Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık
$F(V_{\min})$	: $F(V)$ - $V$ eğrisindeki minimum nokta
$V_{\min}$	: $F(V)$ - $V$ eğrisindeki minimum noktaya karşılık gelen voltaj
$I_{\min}$	: $F(V)$ - $V$ eğrisindeki minimum noktaya karşılık gelen akım

$\gamma$	: İdealite faktöründen büyük bir tamsayı (boyutsuz)
$\delta$	: Yalıtkan arayüzey tabaka kalınlığı
$\chi_s$	: Elektron yakınlığı
$W_D$	: Tüketim tabakası genişliği
$d_{ox}$	: Oksit tabaka kalınlığı
$qV_i$	: Kurulma voltajı
$m_n^*$	: Elektronun etkin kütlesi
$N_d$	: Donor atomlarının yoğunluğu
$J_o$	: Doyum akım yoğunluğu
$J_n$	: Toplam akım yoğunluğu
$\epsilon_o$	: Boşluğun elektrik geçirgenliği
$\epsilon_i$	: Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
$\epsilon_s$	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
$\lambda$	: Dalga boyu
$\mu_n$	: Elektronların mobilitesi
$\mu_p$	: Hollerin mobilitesi
$v_x$	: x yönünde hareket eden elektronların hız bileşeni
$x_m$	: Potansiyel engelin maksimum olduğu konum
$\Delta\Phi$	: İmaj-kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin azalması
$\Omega$	: Ohm

## KISALTMALAR

PV	: Photovoltaic (Fotovoltaik)
SBDs	: Schottky Barrier Diodes (Schottky engel diyotlar)
MS	: Metal-Semiconductor (Metal-Yarıiletken)
MPS	: Metal-Polymer-Semiconductor (Metal-Polimer-Yarıiletken)
MIS	: Metal-Insulator-Semiconductor (MetalYalıtkan-Yarıiletken)
SCs	: Solar Cells (Güneş Hücreleri)
LEDs	: Light Emitting Diodes (Işık yayan diyotlar)
FETs	: Field Effect Transistors (Alan etkili transistörler)
LDs	: Laser Diodes (Lazer diyotlar)
OLEDs	: Organic Light Emitting Diodes (Organik ışık yayan diyotlar)
OFETs	: Organic Field Effect Transistors (Organik alan etkili transistörler)
Si	: Silisyum
Ga	: Galyum
As	: Arsenide
GaAs	: Galyum arsenide
PVA	: Polyvinyl alcohol (Polivinil alkol)
PVAc	: Polyvinyl acetate (Polivinil asetat)
PANI	: Polyaniline
PVC	: Polivinil klorür
PMMA	: Poly (methyl methacrylate)
PPy	: Polypyrrole
PVDF	: Polyvinylidene difluoride
Gr	: Graphene (Grafen)
C	: Karbon
GO	: Graphene Oxide (Grafen oksit)
CRGO	: Chemically reduced GO (Kimyasal olarak indirgenmiş GO)
f-GO	: Functionalized GO (İşlevsel GO)
TRGO	: Thermally reduced GO (Termal olarak indirgenmiş GO)
f-CRGO	: Functionalized CRGO (İşlevsel CRGO)
2D	: İki boyutlu
AFM	: Atomic Force Microscopy (Atomik kuvvet mikroskopisi)

GPa	: Giga paskal
TPa	: Tera paskal
HVDC	: High Voltage Direct Current (Yüksek-voltaj doğru akım)
K $\Omega$	: Kiloohm
M $\Omega$	: Megaohm
BH	: Barrier Height (Engel yüksekliği)
E-k	: Enerji-k dalga vektörü
I-V	: Current-Voltage (Akım-voltaj)
TE	: Thermionic Emission (Termiyonik Emisyon)
TED	: Thermionic Emission Diffusion (Termiyonik Emisyon-Difüzyon)
TFE	: Thermionic Field Emission (Termiyonik Alan Emisyonu)
FE	: Field Emission (Alan Emisyonu)
RR	: Rectifier Rate (Doğrultma oranı)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Yarıiletkenler; güneş hücreleri (SCs), ışık yayan diyotlar (LEDs), lazer diyotlar (LDs), foto diyotlar, alan etkili transistörler (FETs), mikrodalga diyotlar, entegre devre (chip) gibi kompleks elektronik elemanların üretiminde ana maddeyi teşkil eder. Bu tip elektronik elemanların yapımında kullanılabilir olmaları nedeniyle yarıiletken malzemeler üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır [1-4].

Metal-yarıiletken doğrultucu yapılar üzerine ilk sistematik araştırma, 1874 yılında uygulanan voltajın polaritesine ve ayrıntılı yüzey durumları üzerine bir nokta-kontakt toplam direncine bağımlılığını kaydeden Braun'a atfedilir. Çeşitli formlarda nokta-kontakt doğrultucu yapılar ise, 1904 yılında başlayan pratik uygulamalara dayanmaktadır. 1931 yılında, Wilson tarafından, metal-yarıiletken kontaklara uygulanmasının ardından iletim teorisi formüle edilmiştir. 1938 yılında, Walter H. Schottky tarafından potansiyel engel yüksekliğinin, kimyasal tabaka olmadan tek başına yarıiletkende sabit uzay yüklerinden kaynaklandığını önerdi. Bu değerlendirmeden kaynaklanan model, Schottky engel olarak bilinir. Ayrıca 1938 yılında, Mott tarafından, Mott engeli olarak da bilinen Metal-yarıiletken kontaklar için daha uygun bir teorik model sunulmuştur. Bu modeller, elektriksel davranışın daha doğru bir şekilde açıklanabilmesi amacıyla termiyonik emisyon modeli haline 1942 yılında Bethe tarafından geliştirilmiştir. Çok sayıda hem teorik hem de deneysel çalışmalar o zamandan beri yürütülüyor olmasına rağmen, metal-yarıiletken kontakların tam olarak anlaşılması hala uzaktır [1].

Günümüzde, Schottky engel diyotlar (SBDs) olarak bilinen metal (M)-yarıiletken (S) yapılar ise, elektronik endüstrisindeki bu tür mikroelektronik elemanların ana bileşeni olup potansiyel uygulamaları nedeniyle kimyagerler, fizikçiler ve elektronik mühendisleri tarafından hala araştırılmaktadır [5,6]. Özellikle, MS arayüzeyine ince

bir organik polimer tabakanın kaplanması ile elde edilen metal-organik/polimer-yarıiletken (MPS) tipi SBDs, düşük maliyetli ve kolay üretilebilmeleri nedeniyle çok fazla ilgi uyandırmaktadır [7]. Bundan dolayı; fotovoltaik (PV) hücreler [8-10], organik ışık yayan diyotlar (organic light emitting diodes (OLEDs)) [11-13], fotodedektörler [14], organik alan etkili transistörler (organic field effect transistors (OFETs)) [15], vb. gibi SBDs temelli elektronik ve optoelektronik uygulamalar, ince bir organik polimer tabakanın varlığında elektronik elemanların potansiyel kapasitesini geliştirmesinden dolayı yoğun bir şekilde araştırılmaktadır [16-18]. Ancak, elektronik endüstrisinin gelişimi için büyük öneme sahip MPS tipi SBDs'in elektriksel karakteristiklerinin tam olarak anlaşılması sağlanamamıştır [19].

Birçok araştırmacı; benzersiz davranışlarından dolayı (azaltılmış boyutlarda ki (özellikle 1  $\mu\text{m}$ 'den 50-500 nm'e kadar) nanofiberlerin çaplarından kaynaklanan yüzey alanının hacime oranının yüksek oluşu, benzersiz nano-ölçekteki yapısal formu, vb. gibi) arayüzey tabakası olarak polimerler (özellikle polimer kompozit nano-fiberler), elektronik elemanların optik ve elektriksel özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine çalışmaktadır [20,21].

Diğer taraftan, polimer kompozit nanofiber filmler, bir katı-sıvı faz ayrıştırma [22], öztoplanma (self-assembly) [23,24], şablon sentezi [25], electrospinning (elektro-üretim) [26-28], vb. gibi kolay işleme teknikleri ile organik arayüzey tabaka olarak üretilebilirler. Bu tekniklerden; bir hedef kollektör ve şırınga pompasının iğnesi arasında yüksek-voltaj doğru akım (HVDC) kaynağı (+ veya - kV) ile oluşan bir elektrik alanından elde edilen elektrostatik kuvvetini (Coulomb kuvveti) temel alan electrospinning tekniği, birçok polimer kompozit çözeltiler için, polimer nanofiber üretilmesinde kolay ve uygun bir teknik olarak kullanılabilir [21]. Bu teknik kullanılarak; polyaniline (PANI), polypyrrole (PPy), poly(ethene), poly(3-hexylthiophene), polivinil alkol (PVA), vb. gibi organik polimerler, fotovoltaik uygulama için özellikle esneklik ve düşük maliyetlerinden dolayı bir arayüzey tabakası olarak özveri bir şekilde hala araştırılmaktadır [7,29].

Son zamanlarda, bir çok organik polimerler arasında özellikle polivinil alkol (PVA), potansiyel uygulamaları ve benzersiz özelliklerinden dolayı çoğu bilim insanı

tarafından araştırma konusu olarak önemli hale gelmiştir [30-34]. Fiziksel ve kimyasal olarak PVA'nın spesifik özellikleri (yüksek su çözünürlüğü (SW), büyük bir kristallik aralığı, işlenebilirlik, yüksek film oluşturma kapasitesi, vb.), yalnızca bir katkı materyali yapısı yanında, aynı zamanda katkı konsantrasyonu ve süreci tarafından da geliştirilebilir veya modifiye edilebilir [35-37]. Normalde; bu polimerler, zayıf bir elektriksel iletkenliğe, diğer bir ifadeyle dielektrik sabiti çok yüksek değerliğe ( $>1000 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) sahiptir. Ancak, PVA içerisinde uygun bir katkı maddesinin bulunması durumunda, elektriksel iletkenliği (yaklaşık  $10^6$  kat) arttırılabilir [38-40].

Grafitin tek katmanlı formu şeklinde adlandırılan Grafen (Gr), Karbon (C) atomlarının bir kristal allotropu (bir bal peteği örgülü yapısı benzeri) biçiminde iki-boyutlu (2D) hegzagonal bir yapısı olup, fiziksel olarak farklı elektronik uyarımlar sergilemesi nedeniyle üzerinde çalışılan bir araştırma konusu olarak ilgi çekmektedir [41-44]. Gr'in bant yapısındaki iletim ve valans bantları, Brillouin bölgesinde momentum uzayındaki konumları olarak ifade edilen Dirac noktalarını etkin bir şekilde karşıladığı için Gr, sıfır yasak enerji aralıklı yarıiletken veya yarı-metaldir. Gr'in en önemli özelliklerinden biri de, çok yüksek elektriksel iletkenliği (elektronlar (negatif yük taşıyıcılar) ve holler (pozitif yük taşıyıcılar) ile birlikte) ve sıfır-çakışıkta yarı-metal olmasıdır [45].

GaAs, III. grupta bulunan Galyum (Ga) ve V. grupta bulunan Arsenik (As) elementlerinden oluşan III-V bileşik yarıiletkeni olup diyot, transistör ve güneş hücresi gibi yarıiletken elemanlarda kullanılan önemli bir malzemedir [46]. Yarıiletkenler içerisinde özellikle GaAs tabanlı elemanların yüksek hız ve düşük güç tüketimi ile dikkat çekmektedir [47]. Ayrıca, GaAs'in doğrudan bant aralığına sahip bir yarıiletken olması ve optik özellikleri açısından belirli bir potansiyele sahip olmasından dolayı optoelektronik elemanlarda kullanılabilir.

Fotovoltaik özellikli MS tipi SBDs temelli fotodiyotların performans ve güvenilirliği;

- M ve S arasına hazırlanan ince bir arayüzey yalıtkan veya organik polimer tabakasının üretim sürecine,
- Polimer veya yalıtkan arayüzey tabakanın katkı yoğunluğuna,



- MS arayüzeyindeki Gaussian dağılımına atfedilen engel yüksekliği (BH)'nin homojensizliğine,
- Seri ( $R_s$ ) ve kısa devre ( $R_{sh}$ ) direnç parametrelerine,
- Arayüzey durum yoğunluğunun dağılımına ( $N_{ss}$ ),
- Sıcaklığa,
- Işık seviyesi veya yoğunluğunun varlığına,
- Uygulanan ileri (pozitif polarma,  $V>0$ ) ve ters (negatif polarma,  $V<0$ ) öngerilim değerlerine önemli ölçüde bağlıdır [1,3].

Özellikle, SBDs'in temel diyot parametrelerindeki (engel yüksekliği  $\Phi_B$ , idealite faktörü  $n$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ , sızıntı akımı  $I_o$ ,  $N_{ss}$ , vb.) değişim, harici ve dahili elektriksel alanlar olarak ışık seviyesi/yoğunluğu altında daha önemli hale gelmektedir [30,48-50].

SBD tipi fotodiyotların çalışma prensibini anlamak için farklı dalga boyuna sahip fotonların bu yapıların üzerine çarptığı andaki, yarı iletkenin tüketim bölgesinde oluşan hareketli taşıyıcıların davranışının iyi bilinmesi gerekmektedir. Işık altında, yarıiletkenin enerji bant aralığından ( $E_g$ ) daha fazla enerji değerlerine ( $hc/q\lambda$ ) sahip olan fotonlar, yarıiletkenin tüketim bölgesinde elektron - hol çiftleri oluşturabilir. İç elektrik alanı altındaki metal - organik/polimer -  $n$  tipi yarıiletken diyotlarda, eklem bölgesinde toplanan elektronlar arka omik kontak noktasına, holler ise ön kontak noktasına doğru sürüklenerek net bir fotoakım meydana gelecektir. Sonuç olarak, alışılmış karanlık diyot akımı üzerinde ilave bir fotoakım olacaktır [2,51,52].

Yukarıda değinilen bilgiler ışığında bu çalışmada, organik / polimer arayüzey tabakaya sahip ışığa duyarlı bir diyot imal etmek ve bir fotodiyot veya güneş hücresi olarak fotovoltaj uygulamalarda kullanım olasılığının araştırılması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda hazırlanan bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, SBDs olarak bilinen MS yapıların tarihsel gelişimi, mikroelektronik elemanların gelişmesindeki önemi, elektronik endüstrisindeki potansiyel uygulama alanları, ışık seviyesi altındaki davranışları ve yapılan çalışmanın ana hatları hakkında genel bilgi verildi. İkinci bölümde, genel bir literatür taraması, MS yapılar ve bu yapılardaki arayüzey durumları ve yalıtkan arayüzey tabakasının varlığı, idealiteyi etkileyen nedenler ile ilgili teorik altyapılar üzerinde durulmuştur. Üçüncü

bölümde, Au/*n*-GaAs (MS) tipi (D<sub>1</sub>) SBDs, Au/saf PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>2</sub>) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>3</sub>) SBDs hazırlanması için gerekli materyalleri, deneysel numunelerin hazırlanması ve ölçümlenmesinde izlenen yöntemleri içerir. SBDs'in yapımında daha iyi sonuç alınabilmesi ve numune üzerindeki organik ve metalik kirleri gidermek amacıyla numunelerin kimyasal temizlenme işlemi ayrıca bu bölümde açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, hazırlanan Au/*n*-GaAs MS tipi (D<sub>1</sub>) SBDs, Au/saf PVA/*n*-GaAs MPS tipi (D<sub>2</sub>) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/*n*-GaAs MPS tipi (D<sub>3</sub>) SBDs; oda sıcaklığında, karanlık ve farklı ışık koşulları (50-200W) altındaki elektriksel ve fotovoltaik karakteristikleri, akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri kullanılarak incelenmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise; elde edilen deneysel sonuçlar, literatürde yapılan benzer çalışmalar ve elde edilen temel diyot parametreleri ile karşılaştırılması yapılmış ve ileride yapılacak benzer çalışmalarla yol göstermesi adına önerilerde bulunulmuştur.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR TARAMASI VE TEORİK ALTYAPILARI

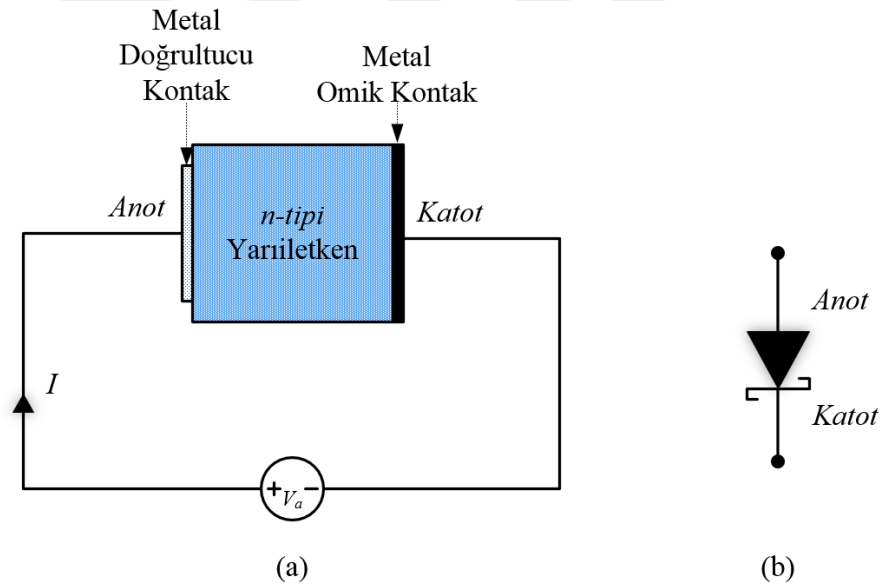
#### 2.1. METAL-YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR

Metal-yarıiletken (MS) kontaklar diğer adıyla Schottky yapılar (Schottky engel diyotlar, SBDs), elektronik devre elemanların en temel parçasıdır. Değişik malzemelerle ve değişik yöntemlerle üretilen bu yapıların karakteristiklerinin değişen parametrelere bağlı olarak incelenmesi, günümüz elektronik teknolojisinin gelişiminde oldukça önemli yere sahiptir. Schottky yapıların anlaşılabilmesi, yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin araştırılması, yarıiletken kristal üzerinde uygun kontak yapısının elde edilmesi ile mümkündür. Yarıiletken kristal ile kontak yapılacak malzemenin atomik boyutta en az, ideal durumda ise sıfır dirençle temas etmesi beklenmektedir. Kontakın ideal olması, temas ettirilecek malzeme yüzeyinin yeterince temiz ve pürüzsüz olmasıyla doğrudan ilişkilidir [53]. Metal ile yarıiletken kontak haline getirildiğinde, termal denge kuruluncaya kadar yani Fermi enerji seviyeleri (elektrokimyasal potansiyelleri) eşit oluncaya kadar, hem yarıiletkenden metale hem de metalden yarıiletkene doğru yük alışverişi olur [54]. Termal denge sonunda, M-S ara yüzeyinde yüklerin ayrışmasından dolayı bir potansiyel engel yüksekliği veya bir iç elektrik alan oluşur. Hareketli yüklerden arınmış bu bölgeye, yüksek dirençli yalıtkan tabaka, bu konuda ilk çalışan bilim adamına atfen Schottky tabakası olarak da adlandırılmaktadır. MS kontaklardaki Schottky-Mott teorisine göre potansiyel engel yüksekliğini, iki malzeminin iş fonksiyonları arasındaki fark belirler. SBDs'lerde metalin iş fonksiyonu  $\Phi_m$ , yarıiletkenin iş fonksiyonu ise  $\Phi_s$  ile ifade edilmektedir. Metalin iş fonksiyonu ( $\Phi_m$ ), vakum seviyesi ile Fermi enerji seviyesi ( $E_F$ ) arasındaki enerji farkı olarak ifade edilir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu( $\Phi_s$ ), Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı veya Fermi seviyesindeki bir elektronu vakum

seviyesine uyarmak için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı olarak tanımlanır [2].

Fermi enerjisi, yarıiletkene katkılanan alıcı veya verici atomlarının yoğunluğu ile değiştiğinden,  $\Phi_s$  değişen bir niceliktir. Diğer taraftan, yarıiletkenlerde katkı miktarına bağlı olmayan ve  $\chi_s$  ile gösterilen elektron ilgisi (yakınlığı), yarıiletkenin vakum seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki enerji seviyeleri farkı olarak tanımlanır [2].

MS kontaktlar, doğrultucu(Schottky) kontak ve omik kontak olmak üzere ikiye ayrılırlar. Schottky yapıdaki kontaktların doğrultucu veya omik olmasını, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları tayin eder [55]. Schottky diyota ait kontak yapısı ve sembolü Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Schottky diyot için; kontak yapısı (a) ve sembol (b).

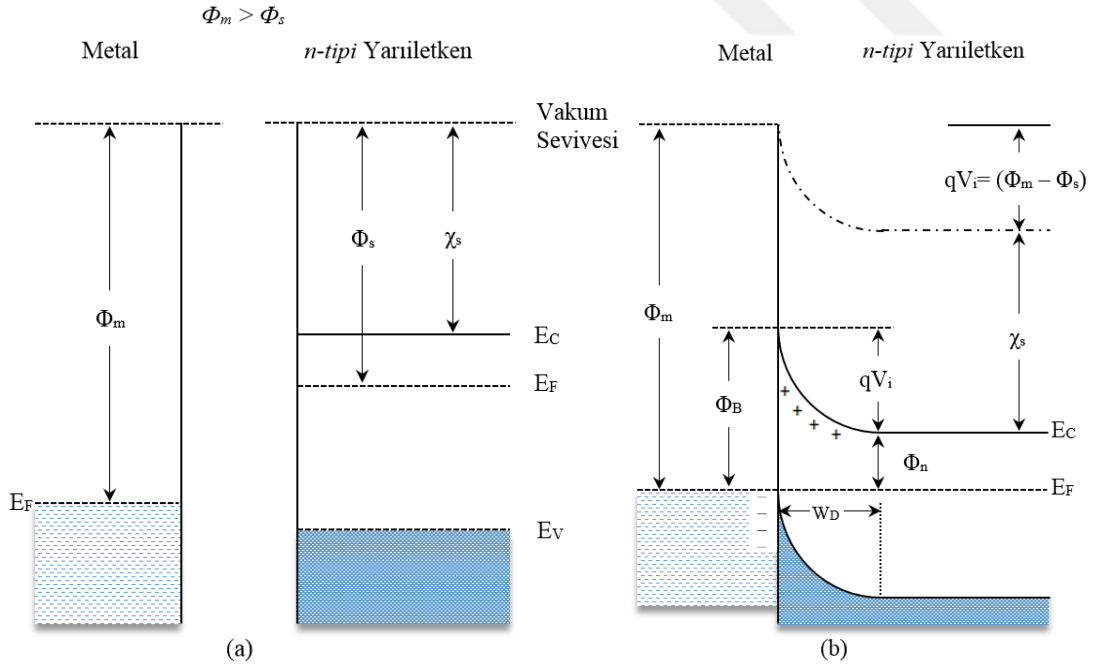
MS kontakta iletkenliği sağlayan akım taşıyıcılarını (elektronlar ve holler) bir yönden diğer yöne (metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenen metale doğru) daha kolay iletiliyorsa bu kontaktlara “doğrultucu kontak”, bu tür davranışa “doğrultma” denir. Yani, diyotun tam ilettime geçtiği voltaj değerinde, ileri ön-gerilim altındaki akımın ( $I_F$ ), ters ön-gerilim altındaki akıma ( $I_R$ ) oranına “doğrultma oranı” denir. Bu oran diyotun kalitesini ifade eder. İdeal diyotlarda doğrultma oranı ( $I_F/I_R$ ) yaklaşık

olarak  $10^8-10^{10}$  civarındadır. Diğer taraftan akım taşıyıcılarının her iki yönde de serbestçe hareket ediyorlarsa veya başka bir ifadeyle bir engel ile karşılaşmıyorsa bu kontaklara “omik kontak” denilir [3].

### 2.1.1. Metal-*n* tipi Yarıiletken Kontaklar

Metal-*n* tipi yarıiletken kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonlarına bağlı olarak  $\Phi_m > \Phi_s$  olması durumunda doğrultucu kontak,  $\Phi_m < \Phi_s$  olması durumunda ise omik kontak oluşur.

Şekil 2.2.a’da metal ile *n*-tipi yarıiletken kontak oluşturulmadan önce enerji bant diyagramları görülmektedir. Burada yarıiletkenin yüzey durumları içermemesi, bunun sonucu olarak yüzeyin bant yapısı ile yarıiletken gövde bant yapısı aynı olup bantlarda bir bükülme yoktur. Şekilde de görüldüğü üzere yarıiletken Fermi enerjisi, metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar yukarıdadır.



Şekil 2.2. Metal-*n* tipi yarıiletken doğrultucu kontak için ( $\Phi_m > \Phi_s$ ) elektron enerji-bant diyagramı; birbirinden ayrılmış nötral malzemeler (a), kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu ( $V=0$ ) (b) [1].

Şekil 2.2.b'deki gibi kontak oluşturulup termal dengeye ulaşmaya kadar yarıiletkenin metale bir yük geçişi başlar ve yarıiletkenin yüzeyindeki elektronlar, geride iyonlaşmış donörler bırakarak metale geçer. Metal ile  $n$ -tipi yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar yük geçişi devam eder [3].

Yük geçişi sırasında yasak enerji aralığı ( $E_g$ ), kontak sebebiyle değişmeyeceğinden  $E_v$  valans bandı,  $E_c$  iletkenlik bandına paralel aşağı doğru kayar. Yarıiletkenin elektron ilgisi de kontak nedeniyle değişmediğinden yarıiletkenin vakum seviyesi,  $E_v$  valans bant kenarı ve  $E_c$  iletkenlik bant kenarına paralel aşağı doğru bükülecektir [2]. Termal denge durumunda, metal ile yarıiletken arasında yük geçişleri durur. Ancak esas olan bu yük geçişlerinin sürekli olmasıdır. Kurulma voltajı diye adlandırılan  $qV_i$ , metal ile yarıiletken materyallerin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir ( $qV_i = (\Phi_m - \Phi_s)$ ). Diğer bir ifadeyle yarıiletkenin metale geçecek yüklerin (elektron veya hol) gördüğü potansiyel engel yüksekliği  $qV_i$  kadardır. Ayrıca metalden yarıiletkene geçecek olan yüklerin gördüğü potansiyel engel yüksekliği, yarıiletken tarafından gözükülen engel yüksekliğinden daha büyüktür. Bu engel yüksekliği,

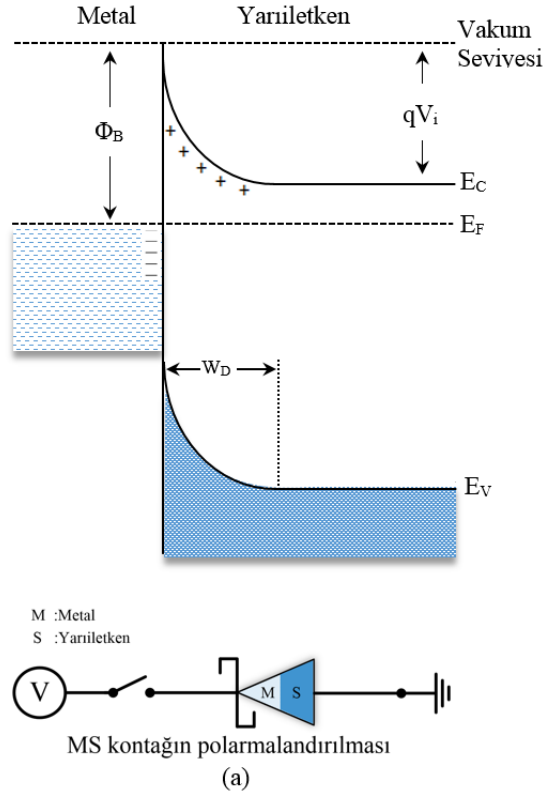
$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \quad (2.1)$$

ile ifade edilir [56].  $\Phi_s = (\chi_s + \Phi_n)$  ve  $\Phi_m = (qV_i + \Phi_s)$  olduğundan,

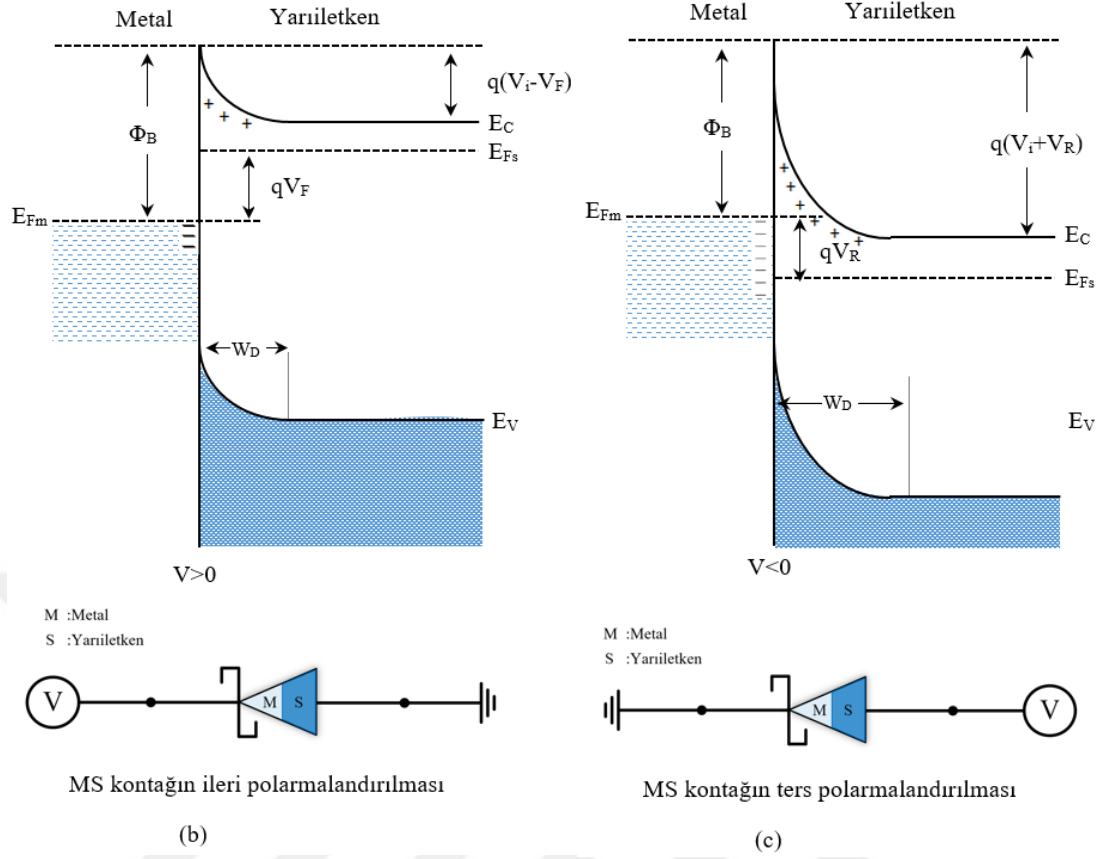
$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \quad (2.2)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik 2.2'de verilen ifadedeki  $\Phi_n = (E_c - E_F)$  olup,  $E_c$  referans alındığında  $\Phi_n = E_F$  dir. Eşitlik 2.1 ifadesi ise Schottky ve Mott tarafından bir birinden bağımsız olarak ifade edilmiştir. Metal-yarıiletken kontak edilip ve termal denge durumunda ( $V=0$ ), metalden yarıiletkene geçen elektronlar, yarıiletkenin metale geçen elektronlar ile dengelenir ve dolayısıyla net yük akışı sıfırdır. MS yapıda sürekli yük akışını sağlamak için metal MS kontağı ileri veya ters olarak ön-gerilimlemek gerekir. Metal- $n$  tipi yarıiletken Schottky yapıda, metal pozitif yarıiletken negatif olacak şekilde  $V=V_F$  gerilim uygulandığı duruma ileri ön-gerilim (doğru polarmalandırma) denir. Schottky-Mott teorisine göre, termal denge durumundaki engel yüksekliğinden daha küçük ( $V_F < \Phi_B$ ) bir gerilim uygulandığında;

yarıiletkenden metale doğru engel  $qV_F$  kadar azalır. Çünkü ileri ön-gerilim altında iç ( $\vec{\epsilon}$ ) ve dış ( $\vec{E}$ ) elektrik alan zıt yönlüdür ve dolayısıyla toplam elektrik alan azalır. Şekil 2.3.b’de görüldüğü üzere termal dengedeki potansiyel engel yüksekliği  $qV_i$ ’den  $q(V_i-V_F)$ ’ye iner. Burada ileri ön-gerilim altındaki akım, uygulanan  $V_F$  voltajı ile üstel olarak artar [1-3,57].



Şekil 2.3. Metal/ $n$ -tipi yarıiletken Schottky yapı için; termal denge (a), ileri ön-gerilim (b) ve ters ön-gerilim (c) durumlarındaki enerji-bant diyagramları [2].

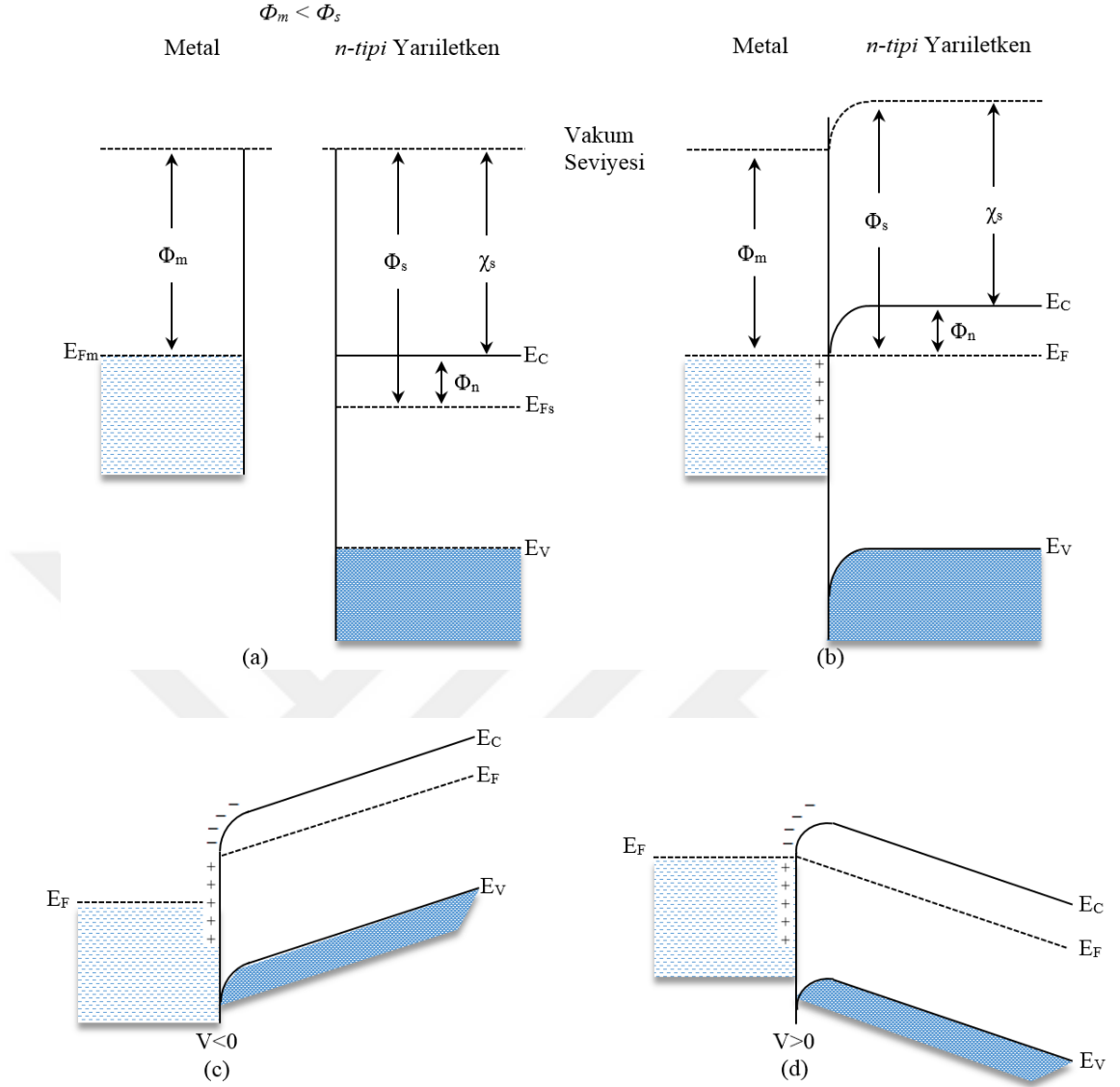


Şekil 2.3. (devam ediyor).

Metal- $n$  tipi yarıiletken Schottky yapıda yarıiletken tarafı metale göre pozitif, diğer bir ifadeyle metal negatif yarıiletken pozitif olacak şekilde  $V = -V_R$  gerilim uygulandığı duruma ise ters ön-gerilim (ters polarmalandırma) denir. MS tipi Schottky yapıya ait enerji bant diyagramı Şekil 2.3.c'de verilmektedir. Potansiyel engel yüksekliği ters ön-gerilim durumunda  $qV_i$ 'den  $q(V_i + V_R)$ 'ye yükselir. Dolayısıyla yarıiletkenden metale doğru elektron akımı termal denge durumuna göre azalır ve hemen hemen hiç akım geçirmez. Burada, ileri ön-gerilim altında azalan engel yüksekliği ile tam olarak iletimdeyken (doğrulturken), ters ön-gerilim altında ise kesimde olacaktır. Diyotun bu davranışına “doğrultma” denir.

Metal- $n$  tipi yarıiletken kontaklarda; metalin iş fonksiyonu  $\Phi_m$ , yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\Phi_s$ 'den küçük ise ( $\Phi_m < \Phi_s$ ) omik kontak oluşur. Omik kontak, uygulanan gerilimin polaritesinden (pozitif veya negatif) bağımsız, her iki yönde de akıma karşı zorluk göstermeyen MS yapılarıdır [4,58].  $\Phi_m < \Phi_s$  metal- $n$  tipi yarıiletken için omik kontakın enerji bant yapıları Şekil 2.4'de verilmiştir.





Şekil 2.4.  $\Phi_m < \Phi_s$  için metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontağın elektron enerji-bant diyagramı; birbirinden ayrı nötral materyaller (a), termal dengede kontak (b), yarıiletken negatif ön-gerilim altında (c) ve yarıiletken pozitif ön-gerilim altında (d) [1].

Malzemeler sıkı kontak haline getirilmeden önceki enerji bant diyagramları Şekil 2.4.a'da verilmiştir. Kontak oluşturulduktan sonra elektronlar metalden yarıiletkene, gerilerinde pozitif yüzey yükleri bırakarak akarlar ve kontağın yarıiletken tarafını negatif yüzey yüküyle yüklerler [4]. Şekil 2.4.b'de gösterildiği gibi termal denge sonunda *n*-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar yükselir.

Yarıiletken tarafına akan elektronlar yarıiletkenin yüzeyinde yüklerin yığılmasından dolayı, Debye mesafesinde sınırlanmış yüzey yükleri meydana getirir. Termal denge

durumunda,  $n$ -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklardan farklı olarak tüketim bölgesi yoktur ve yarıiletkenden metale ya da tersi yönde elektronların hareketi için potansiyel engel oluşmayacaktır. Burada omik kontak elde edilirken arayüzey oluşumundan dolayı meydana gelecek olumsuzlukların önlenmesi amacıyla, yarıiletkenin yüzeyine kaplanan metal ile yarıiletkenin alaşım haline getirilebilmesi için belli bir sıcaklıkta tavlama işlemi gerçekleştirilir [2]. Şekil 2.4. c ve d’de metal- $n$  tipi yarıiletken omik kontakın ters ( $V < 0$ ) ve ileri ön-gerilim ( $V > 0$ ) altındaki yarıiletken bölgesi görülmektedir. Yapının akım değeri, uygulanan voltajın yönünden bağımsız olduğu ve bu bölgenin direnci ile belirleneceği aşıkardır. Bu davranışı sergileyen kontaklar, akımı her iki yönde iletir ve omik kontak olarak isimlendirilir [59].

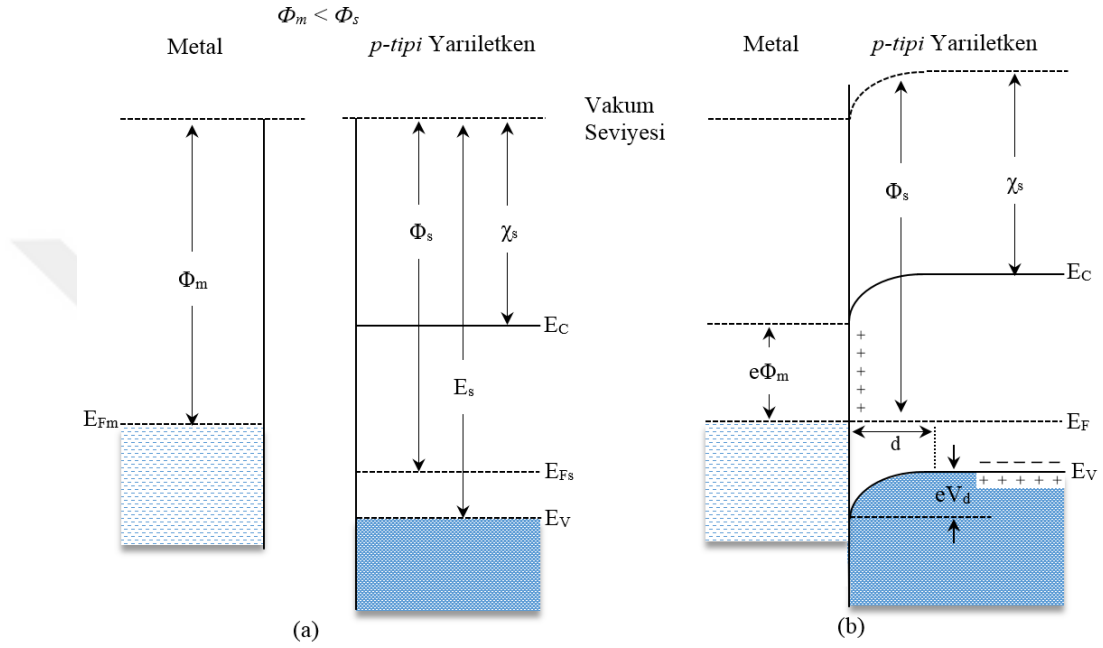
### 2.1.2. Metal- $p$ tipi Yarıiletken Kontaklar

Metal- $p$  tipi yarıiletken kontaklar ile metal- $n$  tipi yarıiletken kontakların bir birine benzer yaklaşımlarla açıklanabildiği bilinmektedir. Aralarındaki önemli ve en temel fark;  $n$ -tipi yarıiletkenlerde elektronlar çoğunluk akım taşıyıcılar iken,  $p$ -tipi yarıiletkenlerde azınlık akım taşıyıcılarıdır.  $p$ -tipi yarıiletken malzemelerde çoğunluk akım taşıyıcılar hollerdir. Metal- $p$  tipi yarıiletken kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonlarına bağlı olarak  $\Phi_m < \Phi_s$  olması durumunda doğrultucu kontak,  $\Phi_m > \Phi_s$  olması durumunda ise omik kontak oluşur. Şekil 2.5’te metal- $p$  tipi yarıiletken yapı için doğrultucu (Schottky) kontakın enerji bant diyagramları görülmektedir. Şekil 2.5.a’da görüldüğü gibi  $\Phi_s$ ,  $\Phi_m$ ’den büyük olduğundan Fermi enerji seviyeleri arasındaki fark  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar olur. Metal- $p$  tipi yarıiletken kontak oluşturulup (Şekil 2.5.b.) termal denge kuruluncaya, Fermi enerji seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar metaldeki fazla elektronlar yarıiletkene doğru akarlar. Burada elektron akışı yarıiletken tarafındaki hollerin iyonize olmasına neden olur.  $p$ -tipi yarıiletkenin yüzeyinde iyonize olmuş negatif yüklü akseptörler,  $d$  kalınlığındaki uzay yükü bölgesinde dağılırlar. Termal denge sonunda, yarıiletken tarafındaki holler için görülen engel yüksekliği [3],

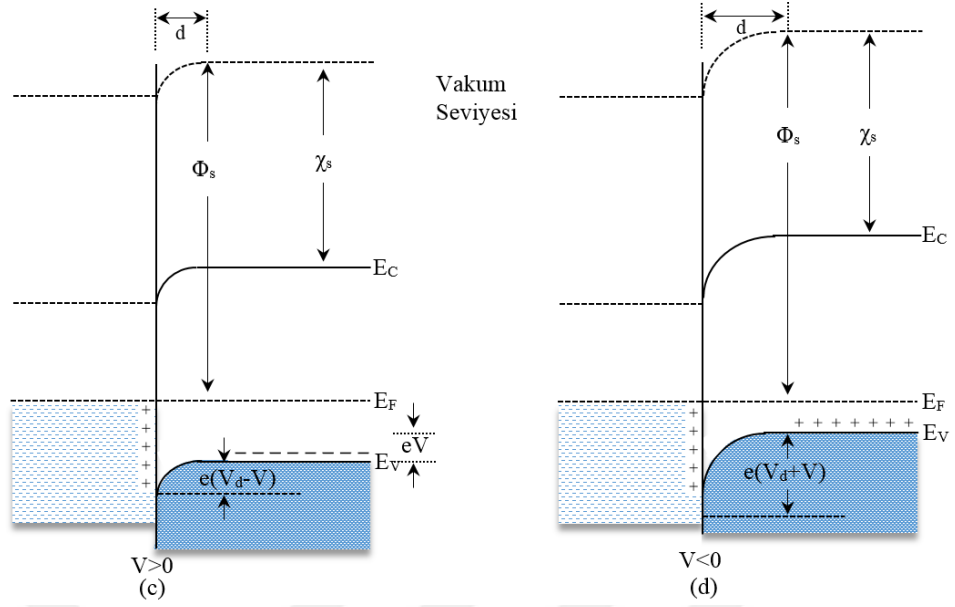
$$eV_d = (\Phi_s - \Phi_m) \quad (2.3)$$

dir. Burada  $V_d$ , kontak yapısında potansiyel farkını (veya difüzyon potansiyelini) ifade eder. Bu potansiyel fark yarıiletken, metalin yüzeyine göre alınır [4]. MS kontağın metal tarafındaki holler için engel yüksekliği ise,

$$e\Phi_B = (E_s - \Phi_m) \quad (2.4)$$



Şekil 2.5. Metal- $p$  tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontağın enerji-bant diyagramı; kontakten önce (a), kontakten sonra ve termal dengede (b), pozitif voltaj ( $V > 0$ ) (c), negatif voltaj ( $V < 0$ ) (d) [1].



Şekil 2.5. (devam ediyor).

dir. Termal denge kuruluncaya kadar,  $p$ -tipi yarıiletken ve metal tarafındaki hollerin bazıları potansiyeli aşacak kadar enerji kazanıp,  $p$ -tipi yarıiletkenden metale veya metalden  $p$ -tipi yarıiletkene geçerler. Temal dengenin sonucunda,  $p$ -tipi yarıiletkenden metale veya tersi yönde hollerin geçişi dengelenir ve karşılıklı iki  $I_o$  akımı oluşur. Şekil 2.5.c'de görüldüğü gibi yarıiletkene pozitif gerilim ( $V > 0$ ) uygulanırsa,  $p$ -tipi yarıiletkenden metale geçen hol akımında  $\exp(eV/kT)$  katı oranında azalırken, tersi yöndeki hol akımında bir değişiklik olmaz. Dolayısıyla  $p$ -tipi yarıiletkenden metale geçen holler için potansiyel engel yüksekliği  $eV$  kadar azalır. Hollerden dolayı oluşan akım pozitif olarak alınırsa, metal- $p$  tipi yarıiletken yapı için akım,

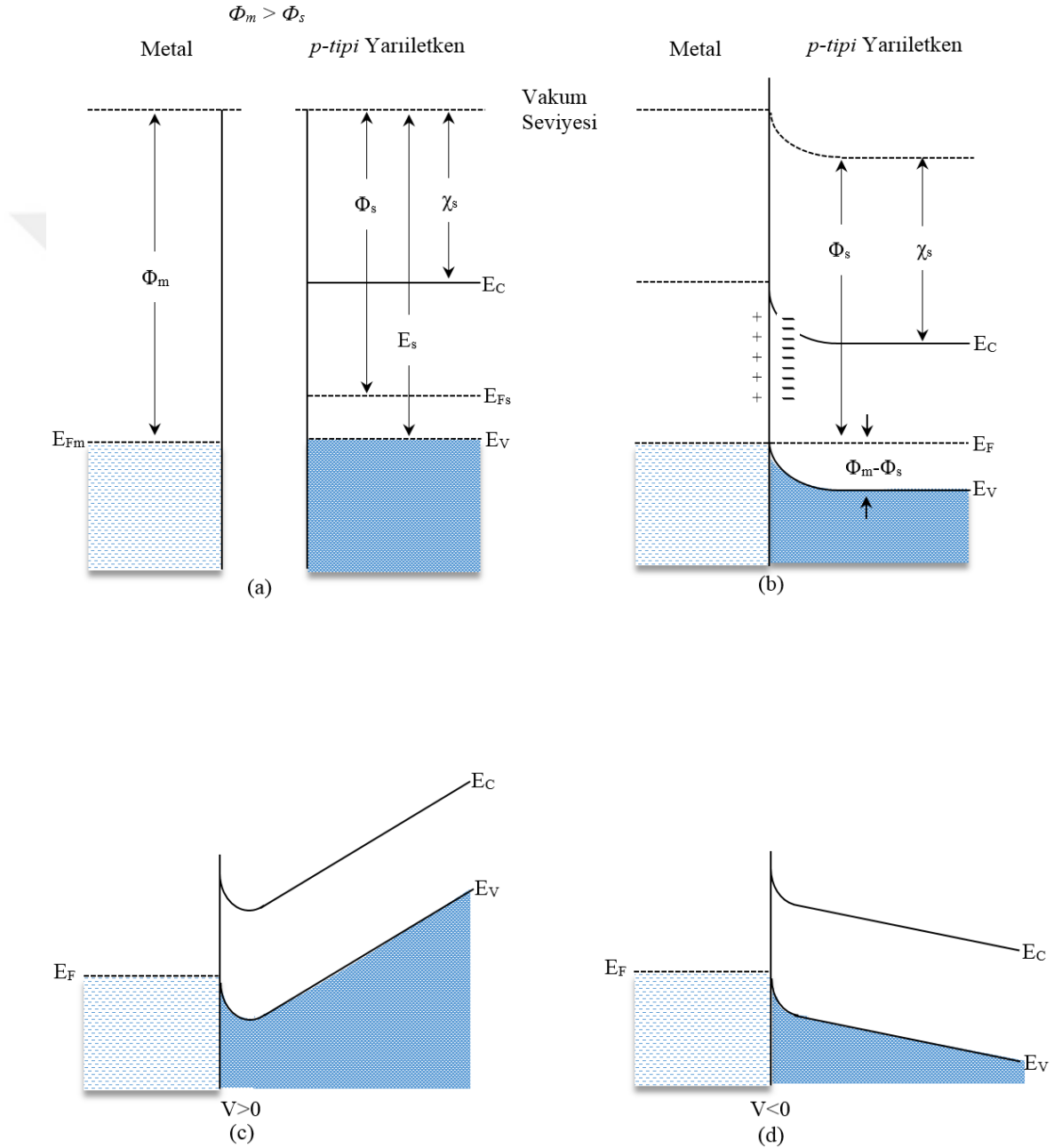
$$I = I_o \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir ve doğrultucu kontak elde edilmiş olur [1]. Burada  $I_o$  akımı doyma akımıdır. Eşitlik 2.5'de  $V > (3kT/q)$  olması durumunda,

$$I = I_o \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right] = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.6)$$

eşitliği yazılabilir.

Metal- $p$  tipi yarıiletken Schottky yapılarında  $\Phi_m > \Phi_s$  için uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akımın akışına minimum direnç gösteren kontak şekli “omik kontak” olarak adlandırılır. Kontak oluşturulmadan önce (Şekil 2.6.a)  $p$ -tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi, metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar yukarıdadır [60].

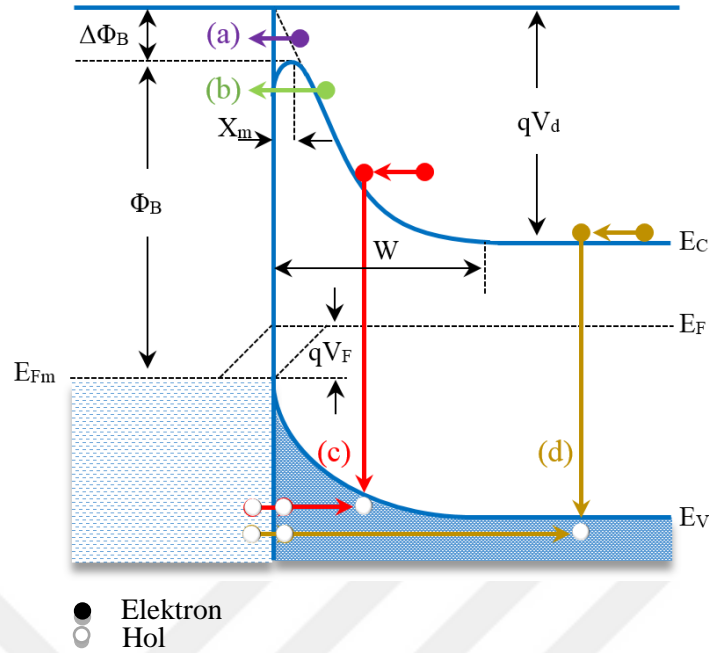


Şekil 2.6. Metal/ $p$ -tipi yarıiletken omik kontakın enerji-bant diyagramı; kontakten önce (a), kontakten sonra ve termal dengede (b),  $V > 0$  durumunda (c),  $V < 0$  durumunda (d) [1].

Kontakt durumunda (Şekil 2.6.b)  $p$ -tipi yarıiletkendeki elektronlar, arkalarında pozitif yüzey yükleri bırakarak metale geçerler ve metalin yüzeyinde negatif yükler oluşturur. Bunun sonucunda;  $p$ -tipi yarıiletken tarafında azalan elektron yoğunluğu, dolayısıyla  $p$ -tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi  $E_{Fs}$ ,  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar aşağı iner. İleri ön-gerilim ( $V > 0$ ) altında metaldeki elektronlar,  $p$ -tipi yarıiletkenin içindeki izinli durumlara kolayca geçebilir (Şekil 2.6.c). Bu durum aynı zamanda, hollerin  $p$ -tipi yarıiletkenden metale doğru akışına da karşılık gelir. Yüksek elektron yoğunluğundan dolayı metal tarafına geçen holler, nötr olurlar. Ters ön-gerilim ( $V < 0$ ) altında, termal denge durumunda metalin iletkenlik bandında oluşan holler,  $p$ -tipi yarıiletkenin tarafında kolaylıkla geçebilirler (Şekil 2.6.d). Bu durum göstermektedir ki, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akımın akışına minimum dirençle müsaade edilmektedir [1].

## **2.2. SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARDA AKIM İLETİM MEKANİZMALARINI VE TERMİYONİK EMİSYON TEORİSİ**

Schottky engel diyotların (SBDs) harici bir elektriksel alan altındaki akım-iletim mekanizmalarının belirlenmesi oldukça önemlidir. SBDs'e ait elektriksel parametreler (seri direnç ( $R_s$ ), arayüzeydeki oksit tabaka kalınlığı ( $d_{ox}$ ), metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan veya polimer tabaka, sıcaklık, arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ ), gerilimin yönü ve yarıiletkenin tipi vb.) ise akım iletim mekanizmalarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu parametrelerin etkisi dikkate alınarak, hangi durumda hangi iletim mekanizmasının en doğru sonucu vereceğini belirlemek oldukça önemli ve zordur. Bu amaçla MS ve MIS/MPS tipi SBDs'de muhtemel akım iletim mekanizmaları [1-4,61]; Termiyonik Emisyon (TE) Teorisi, Difüzyon Teorisi, Termiyonik Emisyon-Difüzyon(TED) Teorisi, Kuantum Mekaniksel Tünelleme (Termiyonik Alan Emisyonu (TFE), Alan Emisyonu (FE) ve Çok katlı tünelleme), Uzay yük bölgesinde rekombinasyon, Elektron veya hol enjeksiyonu,  $T_o$  etkili akım iletimi, Gaussian Dağılımı'dır.



Şekil 2.7. MS kontaklarda ileri ön-gerilim altındaki akım-iletim mekanizmaları [2].

İleri ön-gerilim ( $V > 0$ ) altında metal/ $n$ -tipi yarıiletkende temel akım-iletim mekanizmaları dört grupta toplanabilir (Şekil 2.7). Bunlardan (a); engelin üzerinden termiyonik emisyon (TE), (b); engel içerisinden tünelleme (c); deplasyon bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu (veya jenerasyonu) ve (d); azınlık taşıyıcı enjeksiyonu eşdeğerindeki yarıiletkenin doğal bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonudur. Gerçekleştirilen çalışmada, hazırlanan Schottky yapıların oda sıcaklığında, karanlık ve farklı ışık şiddetleri altındaki akım-voltaj ( $I$ - $V$ ) ölçümleri, genellikle Si ve GaAs bazlı Schottky diyotlarda baskın akım iletim mekanizmalarından TE modeli (Şekil 2.7.a) ile açıklanacaktır [2].

TE modeli, sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların (elektron veya hol) salınması, başka bir ifadeyle yeterli termal enerjiyi kazanan taşıyıcıların potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmeleri şeklinde ifade edilir. Bu durum, metal- $n$  tipi yarıiletken yapılarda elektronlar, metal- $p$  tipi yarıiletken yapılarda holler; yani çoğunluk taşıyıcılar tarafından gerçekleştirilir [1,62]. Termal enerjiden dolayı metal tarafındaki engeli aşan elektronların oluşturduğu akıma  $I_o$  termiyonik akım denir ve metale uygulanan gerilimden bağımsızdır. Bethe tarafından, akımın çoğunluk taşıyıcıları (elektron veya hol) tarafından iletildiği kabulüyle kurduğu TE teorisi ile ilgili [1,3]:

- $q\Phi_B, kT$  enerjisinden çok büyük olduğu ( $q\Phi_B \gg kT$ ),
- Schottky bölgesinde (tüketim bölgesi) taşıyıcı çarpışmalarının olmadığı,
- İmaj (Görüntü) kuvvet etkisinin ihmal edildiği, engelin biçiminin önemsiz olduğu ve akım engel yüksekliğine çok bağlı olmadığı [1].

varsayımları yapılır. Bu varsayımlar dikkate alınarak;  $q\Phi_B \gg kT$  olmak koşuluyla yarıiletken den metale akan elektronlar için akım yoğunluğu  $J_{s \rightarrow m}$  ve  $x$  yönünde engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların bir fonksiyonudur. Bu nedenle;

$$J_{s \rightarrow m} = \int_{E_F + q\Phi_B}^{\infty} q v_x dn \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Kontak yüzeyine dik doğrultuda,  $x$  yönünde hareket eden elektronların hız bileşeni  $v_x$  ifade edilirse, yarıiletkendeki hızları  $v_x$  ile  $v_x + \Delta v_x$  arasında değişen elektronların yoğunluğu;

$$dn_x = N_d \left( \frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT}\right)^{1/2} dv_x \quad (2.8)$$

dir. Eşitlikteki  $m_n^*$  elektronun etkin kütlesi,  $N_d$  donör atomlarının yoğunluğu,  $k$  Boltzmann sabiti ve  $T$  (Kelvin) ise mutlak sıcaklıktır. Yarıiletken den metale doğru akan akım yoğunluğu (yarıiletken tarafı  $V \neq 0$  iken),  $\frac{1}{2} m_n^* V_x^2 > eV_D$  koşuluyla birim zamanda birim yüzeyden geçen elektronların sayısının  $e$  ile çarpımına eşittir. Buradan yarıiletken den metale doğru akım yoğunluğu ifadesi,

$$\begin{aligned} J_{s \rightarrow m} &= \int_{V_{0x}}^{\infty} e v_x dn_x = \int_{V_{0x}}^{\infty} e N_d \left( \frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} v_x \exp\left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT}\right)^{1/2} dv_x \\ &= e N_d \left( \frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{m_n^* V_x^2}{2kT}\right)^{1/2} = e N_d \left( \frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{eV_D}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

elde edilir. Metal ile  $n$ -tipi yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliği,

$$q\Phi_{Bn} = qV_D + E_F \quad (2.10)$$



ile verilir. Termiyonik emisyon için etkin “Richardson sabiti”,

$$A^* = \frac{4 \pi q m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.11)$$

dir. Akım yoğunluğu ifadesini yeniden yazacak olursak,

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.12)$$

Metal- $n$  tipi yarıiletken Schottky kontağı ileri ön-gerilim ( $V > 0$ ) altında iken engel yüksekliği azalacağından akım yoğunluğu  $\exp\left(\frac{eV}{kT}\right)$  katı oranında artar. Böylelikle  $n$ -tipi yarıiletkenden metale doğru  $J_{s \rightarrow m}$  akım yoğunluğu,

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.13)$$

şeklinde düzenlenebilir. Termal dengede, metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluklarına eşittir yani net akım sıfırdır. Toplam akım yoğunluğu  $J_n$ ,

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.14)$$

dir. Bu eşitlikten elde edilebilecek doyum akım yoğunluğu ( $J_0$ ) ise,

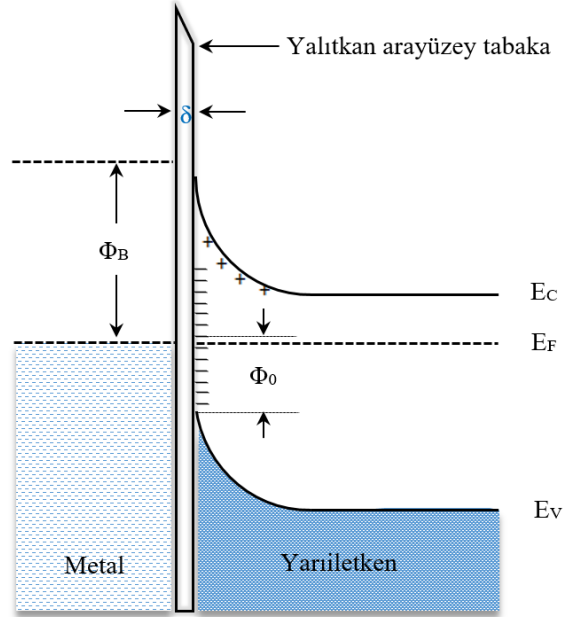
$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.15)$$

dir. Bu ifadeden, metal ile yarıiletken arasındaki  $\Phi_{Bn}$  değeri, ileri ön-gerilim  $J$ - $V$  ölçümlerinden hem karanlık hem de farklı ışık seviyeleri için Eşitlik 2.16 kullanılarak elde edilir [1]

$$\Phi_{Bn} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A^* T^2}{J_0}\right) \quad (2.16)$$

### 2.3. ARAYÜZEY DURUMLARI VE YALITKAN ARAYÜZEY TABAKASINA SAHİP KONTAKLAR

Yarıiletken elemanlar, genellikle yalıtkan arayüzey tabakalı kontaklardan üretilir ve bu kontakların Northrop ve Rhoderick [63] tarafından, daha çok Rhoderick [3] tarafından çalışıldığı bilinmektedir [2]. Metal-yarıiletken kontaklarda, metal biriktirilmeden önce kimyasal olarak temizlenen yarıiletken kristalin parlak yüzeyinde doğal olarak veya isteğe bağlı olarak ince bir yalıtkan oksit tabaka ile oluşturulabilir. Doğal olarak oluşan oksit tabakasına doğal oksit tabakası denilir. Yalıtkan arayüzey tabakanın kalınlığı  $\delta$ , yüzey hazırlama koşullarına bağlıdır. İyi bir Schottky kontak için yalıtkan tabaka kalınlığı  $20\text{Å}$  daha az olmalıdır [2]. Arayüzey oksit tabakaya sahip bir kantağın enerji bant diyagramı Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8. Arayüzey tabakasına sahip MS kantağın enerji bant diyagramı [2].

Şekil 2.8’te görülen enerji bant diyagramında metal ile yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri sistem boyunca aynı hizada ve vakum seviyesi yalıtkan arayüzey boyunca süreklidir. Arayüzey tabaka içerisinde hareketli yük barındırmayan ideal bir yalıtkan olarak kabul edildiğinden Şekil 2.8’de ki potansiyel, arayüzey oksit tabaka boyunca lineer olarak düşer. Ayrıca yalıtkanın iletim bandının düşük kenarı vakum seviyesinin altına uzandığı varsayılmaktadır. Arayüzey yalıtkan tabaka kalınlığı ( $\delta$ )

değeri yeterince küçük olduğunda ( $\delta \leq 20\text{\AA}$ ), yalıtkan tabaka boyunca görülen potansiyel düşme, yarıiletkendeki tüketim bölgesindeki potansiyel düşmeyle kıyaslandığında ihmal edilebilir. Bu incelikteki yalıtkan tabaka için, elektronlar hem metalden yarıiletkene hem de yarıiletken metale doğru kuantum mekaniksel tünelleme yapabilirler. Bu yalıtkan tabaka elektronlar için geçirgendir. Sonuç olarak engel yüksekliği ve kontak potansiyel farkı yalıtkan ince bir arayüzey tabakanın varlığından hemen hemen etkilenmeden kalır [2]. MS kontaklar arasında yalıtkan ince bir tabakanın varlığı, temiz sıkı kontaklardan daha kolay anlaşılmasını ve teorik olarak daha kolay analiz edilmesini sağlar.

Yüzey durumlarının ve yalıtkan ince bir arayüzey tabakanın varlığında MS kontakların genel bir analizi ilk olarak Cowley ve Sze [53] tarafından yapılmıştır. Bu kontakların detaylı bir şekilde incelenmesi, iş fonksiyonlarının yeniden gözden geçirilmesi ve  $\Phi_B$  için Cowley ve Sze'nin elde ettikleri eşitlikleri düz bant engel yüksekliğini ( $\Phi_B^0$ ) verdiğinin açıklanması ise Rhoderick [3] tarafından yapıldı [2].  $\Phi_B^0$ , Schottky engel kontağa yeterli seviyede ileri ön-gerilim ( $V_F$ ) uygulandığı zaman yarıiletkende ki gerilim düşmesinin ( $V_i - V_F$ ) sifıra gittiğini gösterir. Bu koşullar altında tüketim bölgesinde ki yük kaybolur ve metal tarafındaki yük yarıiletken tarafındaki arayüzey durumlarındaki yükler tarafından dengelenir. Bu düz bant engel yüksekliğini ( $\Phi_B^0$ ) [2]:

$$\Phi_B^0 = C_1(\Phi_m - \chi_s) + (1 - C_1)(E_g - \Phi_0) \quad (2.17a)$$

$$= C_1\Phi_m + C_2 \quad (2.17b)$$

burada  $C_1$ ,

$$C_1 = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i + q^2\delta D_s} \quad (2.18)$$

Eşitlik 2.18'de  $\varepsilon_i = \varepsilon_r \varepsilon_0$  olup yalıtkanın geçirgenliğini,  $\delta$  yalıtkan tabakanın kalınlığını,  $q$  elektron yükünü  $D_s$  birim alan ve birim enerji ( $eV$ ) başına arayüzey durumlarının yoğunluğunu ifade etmektedir. Nötral seviyenin ( $\Phi_0$ ) pozisyonu valans

bandın tepesinden ölçümlenir. Eşitlik 2.17a'da,  $D_s$  değeri 0'a giderken  $C_1$  değeri 1'e yaklaşır ve  $\Phi_B^0$  Eşitlik 2.1'deki Schottky limitine ulaşır. Diğer taraftan  $D_s$  sonsuza giderken,  $\Phi_B^0$  Bardeen limitine ( $\Phi_B = E_g - \Phi_0$ ) yaklaşır. Metal/ $p$ -tipi yarıiletkenin doğrultucu kontağı için benzer analizle aşağıdaki gibi ifade edilebilir [2].

$$\Phi_{B'}^0 = C_1(E_g - \Phi_m + \chi_s) + (1 - C_1)\varphi_0 \quad (2.19)$$

$\varepsilon_i$ ,  $\delta$  ve  $N_{ss}$  ifadeleri her iki durum içinde aynı olduğu varsayımıyla, verilen bir MS sistem için düz bant engel yükseklikleri toplamı  $\Phi_B^0 + \Phi_{B'}^0 = E_g$ 'dir. Bu eşitlik birçok yarıiletken üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla desteklendi. Arayüzey oksit tabaka içerisinde yük bulunduğu zaman düz bant engel yüksekliği yeniden düzenlenir.  $n$ -tipi bir yarıiletken dikkate alındığında, eğer oksit tabakada birim alandaki oksit yükü  $Q_{ox}$  alınır, Eşitlik 2.17a, aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Phi_B^0 = C_1(\Phi_m - \chi_s) + (1 - C_1)(E_g - \Phi_0) - \frac{C_1\delta Q_{ox}}{\varepsilon_i} \quad (2.20)$$

Oksit yükünün etkisi, Eşitlik 2.17a ile verilen ideal değerlerinden engel yüksekliğini değiştirir.  $Q_{ox}$  pozitif olduğunda, Eşitlik 2.20, eşitlik 2.17a'dan daha düşük bir  $\Phi_B^0$  değeri verir iken,  $Q_{ox}$  negatif olduğunda engel yüksekliği artar.  $Q_{ox}$  oksit yükü bulunduğu Eşitlik 2.17b'de  $C_2$ 'yi değiştirir ve bu gözleme dayanan  $\Phi_0$  ve  $Q_{ox}$ 'nin saptanması için bir yöntem ileri sürülmüştür. Yüksek arayüzey yoğunluğuna sahip Si ve GaAs gibi yarıiletkenler üzerindeki Schottky engeller için eğer oksit tabakası  $5 \times 10^{11}$  yük/cm<sup>2</sup>'den daha az yüke sahip ise Eşitlik 2.20'deki son terimin  $\Phi_B^0$ 'a katkısı  $\delta$ 'nın tüm pratik değerleri için nispeten küçüktür [2].

Eşitlik 2.17'deki düz bant engel yüksekliği  $\Phi_B^0$ , yarıiletken içerisinde elektrik alan olmadığı zaman elde edilir. Çoğu zaman, yarıiletkende elektrik alana yol açan bir bant bükülmesi mevcuttur ve engel yüksekliğini tüketim tabakasının voltajın bir fonksiyonu olarak etkiler. Sıfır beslem de yarıiletken içerisinde bir elektrik alan olduğu için, sıfır beslem engel yüksekliği düz bant engel yüksekliğinden farklıdır. Tüketim bölgesinde engel yüksekliğinin elektrik alanına bağlılığının birçok nedeni olabilir. Fakat biz bunlardan yalnızca iki tanesini inceleyeceğiz. İlk olarak Şekil

2.8'deki potansiyel engeli dikkate alırsak, yarıiletkende elektrik alanın varlığı arayüzeydeki potansiyel düşmeyi değiştirir ve dolayısıyla engel yüksekliği değişir. Elektriksel alanın bu bağıntı (Eşitlik 2.21) ile uygunluğunda engel yüksekliğini azalttığı gösterilmiştir [2].

$$\Phi_B = \Phi_B^0 - \alpha | \mathcal{E}_m | \quad (2.21)$$

burada  $\mathcal{E}_m$  yarıiletken yüzeyindeki anlık elektrik alan yoğunluğudur ve  $\alpha$ :

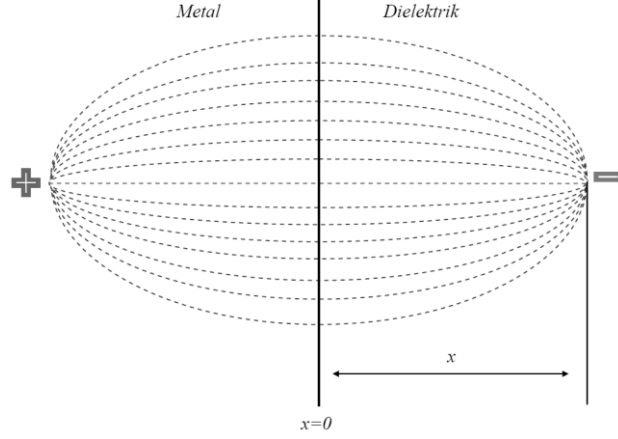
$$\alpha = \frac{\delta \epsilon_s}{\epsilon_i + q^2 \delta D_s} \quad (2.22)$$

$\epsilon_s$  ile yarıiletkenin geçirgenliği temsil edilir. İyi Schottky engeller için arayüzey tabaka kalınlığı  $\delta$ , 20Å'dan azdır ve  $\Phi_B$  ve  $\Phi_B^0$  arasındaki fark tüm ileri ön-gerilim değerleri ve ters ön-gerilimin küçük değerlerinde önemsizdir [2].

## 2.4. SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARDA İDEALİTEYİ ETKİLEYEN NEDENLER

### 2.4.1. İmaj-Kuvvet (Schottky) Etkisi

$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s)$  ifadesi, ideal bir Schottky yapıya ait engel yüksekliğini vermektedir. Ancak bazı etkiler, teorik olarak hesaplanan bu engel yüksekliğinin idealiteden sapmasına neden olmaktadır. Bu etkilerin ilki, engel yüksekliğinin azalmasına neden olan imaj-kuvvet veya Schottky etkisidir.



Şekil 2.9. Metal-dielektrik arayüzeyinde Schottky etkisi ve elektrik alan kuvvet çizgileri [4].

Şekil 2.9 ve Şekil 2.10.a’da gösterildiği gibi metalden  $x$  kadar uzaklıkta dielektrikteki bir elektron, bir elektrik alan meydana getirecektir. Elektrik alan kuvvet çizgileri, metal yüzeyine dik olmalıdır. Bu kuvvet çizgileri, metalin yüzeyinden iç kısma doğru  $x$  kadar uzaklıkta yerleşmiş bir  $+q$  imaj yükününki ile aynıdır. İmaj yükü ile Coulomb etkileşiminden dolayı elektron üzerine etki eden kuvvet,

$$F = \left( \frac{-q^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} \right) = -qE \quad (2.23)$$

ile ifade edilir. Potansiyel ifadesi ise [4],

$$-\Phi(x) = + \int_x^\infty E dx = + \int_x^\infty \frac{q}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} dx = \frac{-q}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.24)$$

ile elde edilir. Burada  $x$  ifadesi integral değişkeni olup,  $x=\infty$  iken potansiyel engel sıfır(0) olarak kabul edilmektedir. Elektronun potansiyel enerjisinin  $-q\Phi(x)$  değişimi, başka elektrik alanının olmadığı kabul edilerek Şekil 2.10.b’de gösterilmiştir. Metal-yarıiletken arayüzeyindeki toplam potansiyelle, imaj potansiyeli de katkıda bulunacağından toplam potansiyel ifadesini yeniden düzenleyecek olursak [4],

$$-\Phi(x) = \frac{-q}{16\pi\epsilon_s x} - E \cdot x \quad (2.25)$$

dir. Sabit elektrik alanının varlığında elektron potansiyel enerji değişimi (Şekil 2.10.b), potansiyel engelin maksimum değerinden azaldığı görülmektedir. Potansiyel engeldeki bu azalma, Schottky(imaj-kuvvet) etkisi ile engel yüksekliğinin azalması olarak bilinir. Toplam potansiyelin türevi, değerinin maksimum olduğu noktada sıfır olacağından [4],

$$\frac{d(q\Phi(x))}{dx} = 0 \quad (2.26)$$

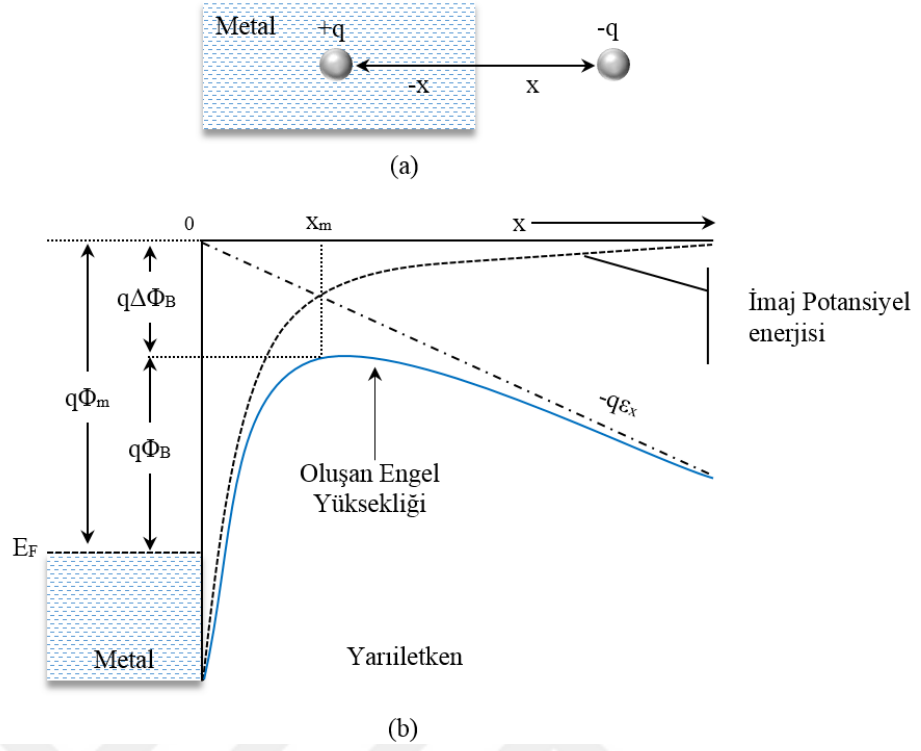
dir ve potansiyel engelin maksimum olduğu konum ( $x_m$ ),

$$x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_s E}} \quad (2.27)$$

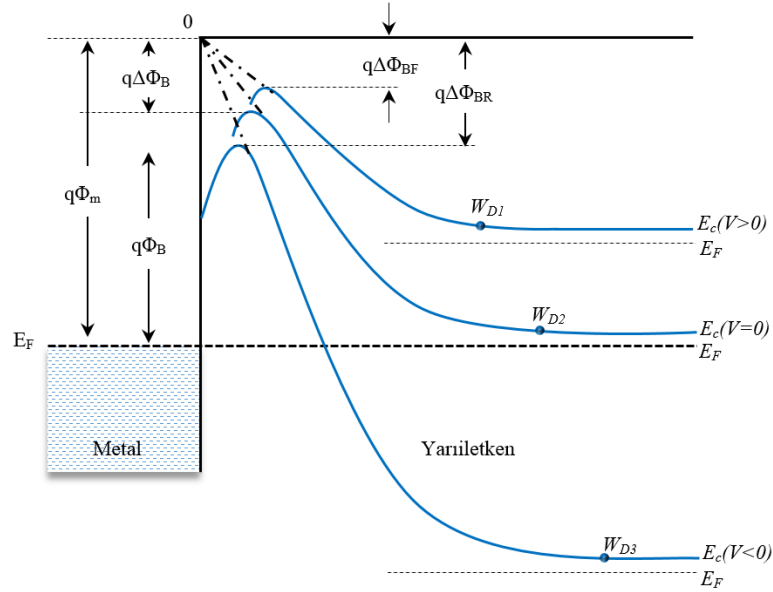
ile ifade edilir ve imaj-kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin azalması,

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.28)$$

eşitliği ile verilir [4].



Şekil 2.10. Bir metaldeki görüntü (imaj) yükü (a), imaj-kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin azalması (b) [64].



Şekil 2.11. Metal-yarıiletken kontaklarda; termal denge durumu, ileri ön-gerilim ve ters ön-gerilim durumlarındaki Schottky etkisi dahil edilmiş enerji-bant diyagramları [1].

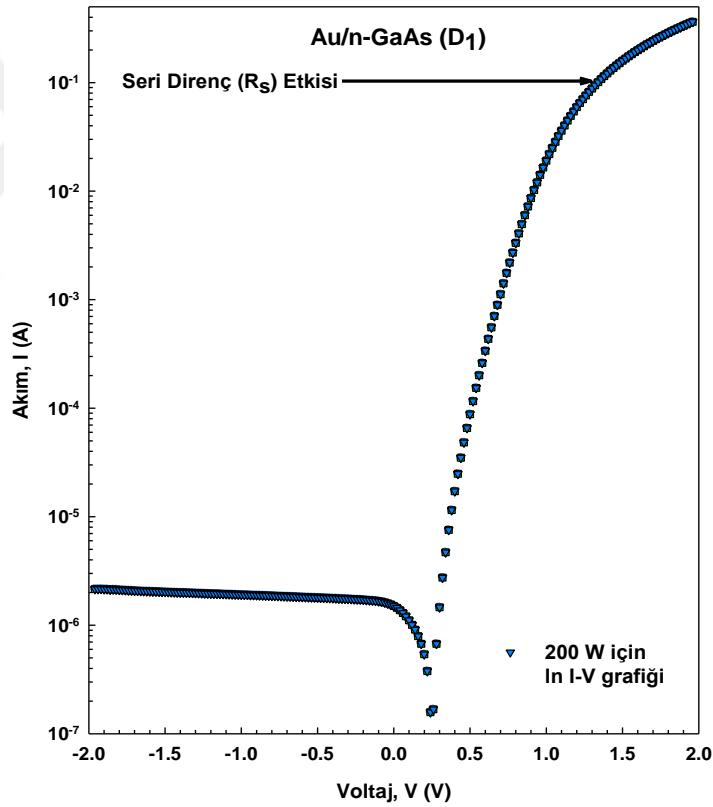
Metal-yarıiletken kontaklar için farklı ön-gerilim şartları altındaki, Schottky etkisi dahil edilmiş enerji-bant diyagramları Şekil 2.11’de görülmektedir. Burada, ileri ön-



gerilim ( $V>0$ ) durumundaki engel yüksekliği azalmasını  $q\Delta\Phi_{BF}$ , ters ön-gerilim ( $V<0$ ) durumundakini ise  $q\Delta\Phi_{BR}$  ifade etmektedir [1].

#### 2.4.2. Seri Direnç Etkisi

Seri direnç etkisi; MS doğrultucu (Schottky) kontaklarda, yarıiletken tarafında oluşan deplasyon bölgesi dışında kalan nötr bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği zorluktur ve  $R_s$  ile gösterilir. Seri direnç etkisi, yüksek gerilim değerlerinde baskın olmaya başlar ve diyot akımının azalmasına sebep olur(Şekil 2.12). Bu etki, diyota yüksek gerilim uygulandığı zaman seri direncin akımda doyum etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalma olarak da ifade edilmektedir [3].



Şekil 2.12. Au/n-GaAs ( $D_1$ ) MS tipi SBDs'de 200W için seri direnç ( $R_s$ ) etkisi.

Schottky diyotun ideal durumdan sapmasına sebep olan seri direnç beş farklı kaynaktan meydana gelebilir: (i) Doğrultucu kontakta ölçüm için alınmış iletken tel, (ii) silisyum (Si) veya galyum arsenide (GaAs) kristaline temas ettirilmiş omik kontak, (iii) gövde ile omik kontak arasına yerleşmiş kirli bir film tabakası veya

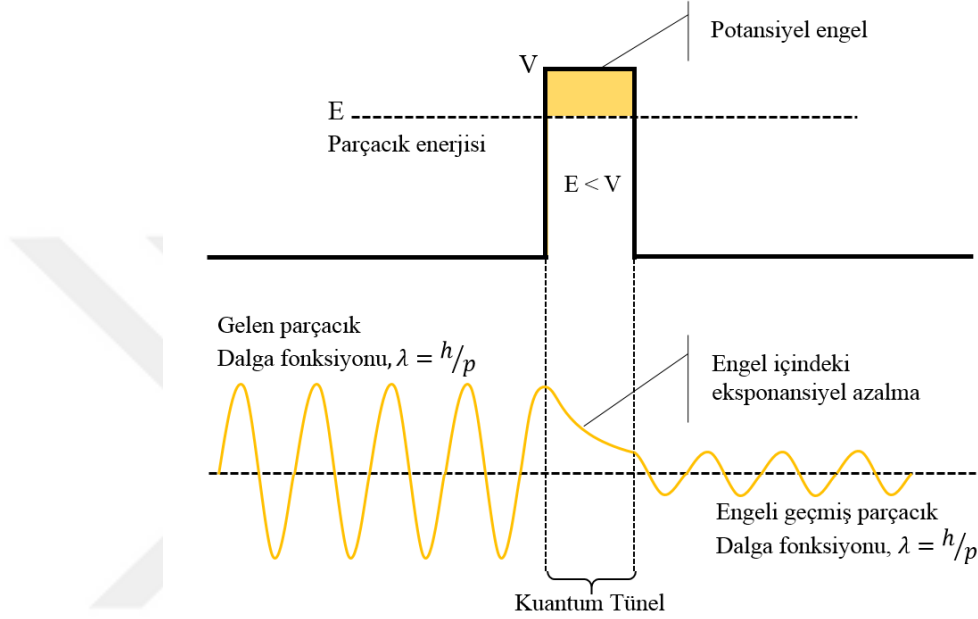
yabancı madde, (iv) doğrultucu kontak altındaki silisyum yüzeyi kıyısında bulunan tüketme tabakası ve omik kontak arasındaki gövde direnci, (v) doğrultucu kontak altında bulunan silisyum içerisindeki düzgün olmayan katkı dağılımı. Yarıiletken içerisindeki düzensiz katkı profili oldukça yüksek özdirençli bölge meydana getirdiği için, bu da yavaş taşıyıcı yoğunluğuna sebep olur.

Admittans yardımıyla arayüzey özelliklerinin hesaplanmasında ciddi hatalara sebep olan seri direnç etkisi azaltılmalıdır. Bu etki çeşitli şekillerde azaltılabilir. Omik kontak direnci, ısıl işlem ile metalin yarıiletken yüzeyine çöktürülmesi (alloying) ile azaltılabilir, ölçümler alçak frekanslarda yapılmak suretiyle azaltılabilir. Seri direncin ölçüm işleminden sonra, admittans üzerinde düzeltme yapıp gerekli bilgiler elde edilebilir. Yarıiletken gövde direncinden gelen katkı direnci ise küçüktür ve ihmal edilebilir [2].

Seri direnç değerini hesaplamak için bilinen geleneksel metotlar kullanılmaktadır. Bunlardan ilki Norde tarafından geliştirilmiş olup,  $n=1$  iken  $R_s$  ve  $\Phi_B$  değerlerini, tanımlanan  $F(V)$  fonksiyonu yardımıyla elde edilmesini amaçlamıştır [65]. Bu metot,  $R_s$  ve  $\Phi_B$ 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlara uygulandığı için yalnızca bir sıcaklıktaki  $I-V$  eğrisine ihtiyaç duyulur. Daha sonraları Sato ve Yasamura, Norde tarafından sunulan metodu geliştirerek idealite faktörünün ( $n$ ),  $1 < n < 2$  olduğu durumlarda da  $n$ ,  $R_s$  ve  $\Phi_B$  değerlerinin hesaplanabileceğini gösterdiler [66]. Bu metot  $R_s$  ve  $\Phi_B$ 'nin sıcaklık ile değiştiği durumlarda da uygulanabilir ve en az iki farklı sıcaklıktaki  $I-V$  eğrisine ihtiyaç duyulur. Benzer bir metotta McLean tarafından da geliştirilmiştir [67]. Yüksek idealite faktörü ve seri direncine sahip SBDs'de,  $I-V$  ölçümünden elde edilen  $n$ ,  $R_s$ , ve  $\Phi_B$  'nin belirlenmesini olası kılan Norde fonksiyonunu, Bohlin tarafından modifiye edilmiştir [68]. Ancak bu metotta bazı parametreleri belirlemek oldukça zordur. Cheung'ler tarafından metal-yarıiletken yapıların  $I-V$  karakteristiklerinden türetilen fonksiyonlar yardımıyla seri direnci belirlemek için daha kolay bir metot sunulmuştur [69].

### 2.4.3. Kuantum Mekaniksel Tünelleme Etkisi

Tünelleme etkisi, sadece kuantum mekaniksel olarak olası bir olay olup, bir parçacığın yeterli kinetik enerjiye sahip olmamasına rağmen, bir potansiyel engelini geçmesi olarak ifade edilebilir. Bu olay, parçacığın dalga özelliği göstermesinden kaynaklanmaktadır [70].



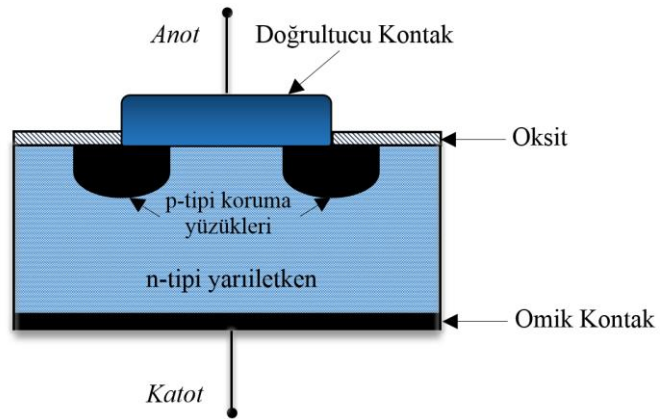
Şekil 2.13. Kuantum mekaniksel tünellemenin şematik gösterimi [71].

Tünelleme olayı, klasik fiziğe göre parçacıkların üzerinden aşması imkansız olan bir engel içerisinde hareket edebildiklerini belirten bir kuantum olgusudur. Bu engel, yalıtkan veya vakum ortamı gibi yüksek potansiyel enerjiye sahip fiziksel olarak geçilmez bir bölge olabilir. Klasik mekanikte, eğer bir parçacık potansiyel engeli aşmak için yeterli enerjiye sahip değil ise basitçe o parçacık engeli aşamaz. Ancak kuantum mekaniğinde, parçacıklar dalga özelliği gösterir ve bir engel ile karşılaştığında, bir kuantum dalgası aniden sönümlenmez ve kuantum dalgasının genliği eksponansiyel olarak azalacaktır. Genlikteki bu azalma engel içerisindeki izlediğimiz bir parçacığın bulunma olasılığındaki azalmaya karşılık gelir. Yani burada bazı parçacıkların engel boyunca tünelleme yaptığını dair sonlu bir olasılık vardır [71].

Kuantum mekaniksel tünelleme etkisi, yüksek oranda katkılanmış yarıiletkenler kullanılarak yapılan Schottky kontaklarda, düşük sıcaklıklarda baskın olan bir mekanizmadır. Burada yük taşıyıcılarının geçişleri, normal olarak engel üzerinden değil, engeli kuantum mekaniksel tünelleyerekten gerçekleşir. Bu etki Schottky diyotun elektriksel karakteristiklerinin ideal durumdan sapmasına neden olur [3].

#### 2.4.4. Kenar Etkisi

Schottky diyotlarda metal ile yarıiletken arasında, elektrik alan kuvvet çizgilerinin eklemeye dik olduğu daha önceki bölümlerde varsayılmıştır. Ancak Schottky (doğrultucu) kontaklar, geniş bir yarıiletken yüzeyine küçük metal nokta şeklinde oluşturulmaktadır ve metal noktanın kenarındaki elektrik alanının, merkezindeki alandan daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Bu konuda yapılan deneysel çalışmalar göstermiştir ki, Schottky kontakların ters ön-gerilim altındaki akım değerlerinin teorik değerlerden daha büyük olduğudur. Çalışmalarda bu durumun kenar sızıntı akımı ile açıklanabileceği ortaya konulmuştur. Schottky diyotlarda kenar etkisini yok etmek için guard(koruma yüzüğü) işlemi yapılır (Şekil 2.14). Diyotta koruma yüzüğü,  $n$ -tipi yarıiletken için  $p$ -tipi bölgeler oluşturularak yapılır [57].

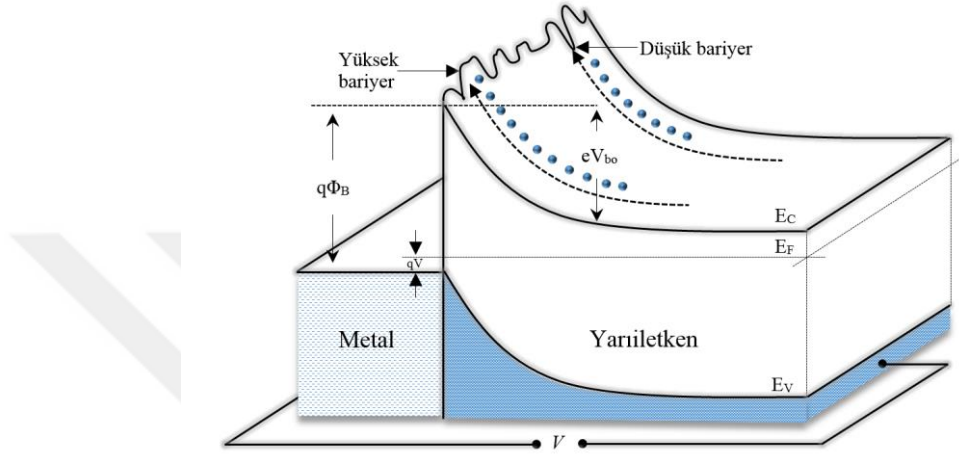


Şekil 2.14. Schottky engel diyotlarda kenar etkisi ve koruma yüzükleri.

#### 2.4.5. Yüzey Durumları ve Schottky Engel Homojensizliği

MS ve MIS SBDs'de  $\Phi_B$ , ileri ön-gerilim  $I-V$  ve ters ön-gerilim  $C-V$  ölçümleri için farklı sonuçlar verir. SBDs'de,  $I-V$  ve  $C-V$  ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı

potansiyel engel yüksekliğinin değişmesi ve idealite faktörünün 1'den büyük ( $n > 1$ ) olması farklı şekillerde açıklanmaktadır. Metal ve/veya yarıiletken kaynaklanan metal-yarıiletken arayüzeyinin pürüzlü olması veya düzgün olmaması,  $V_{bo}$  (built-in voltajı) ve potansiyel engel yüksekliğinin farklı uzaysal değişimlerine neden olup, homojen olmayan bir dağılıma neden olacaktır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15.  $V$  gerilimi altındaki bir Schottky diyotun engel homojensizliğinin üç boyutlu enerji-bant diyagramı.

Metal-yarıiletken arayüzeyinin pürüzlü (düzensiz) olması, yarıiletken yüzeyinin yapısı, metaldeki atomik yapı, dislokasyonlar ve tanecik sınırlarının (grain boundary) yanı sıra metalin kalınlığının değişimine de bağlıdır. Ayrıca, potansiyel değişimlerin bir başka nedeni de, alan emisyonundan dolayı bölgesel engel yüksekliğinin azalması olabilir. Burada arayüzeyde farklı metalik fazların etkisi ile de bu bölgesel değişimler meydana gelebilir. Bunun yanı sıra potansiyel engel yüksekliği değişiminin bir başka nedeni, yarıiletkendeki donör atomlarının rastgele yerleştiği düzenli bir örgüde, donör atomlarının arasındaki farklı mesafeler de olabilir [72].

## 2.5. FOTON

1900'lü yılların ilk çeyreğinde Alman fizikçi Max Planck, enerjinin sürekli olmayıp, temel bir büyüklüğün katları biçiminde kesikli olduğunu devrim niteliğindeki "kuantum teorisi" ile ortaya atmıştır. Planck siyah cisim ışınımını formüle eden ve

deneysel formülü önerirken, iki çarpıcı varsayımda bulunmuştur. Bu varsayımlar şunlardır [73]:

- Işınım yayan ve titreşen bir sistemin enerjisi, Eşitlik 2.29'da ile belirlenen kesikli enerji değerlerine sahiptir.

$$E = n \cdot h \cdot \nu \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (2.29)$$

- Atomlar, foton (kuanta) denilen ışık enerjisi formunda kesikli biçimde, bir enerji düzeyinden diğerine sıçrayarak enerji yayar veya soğrulurlar. Bu durumda, geçiş enerjisine karşılık gelen foton enerjisi, Eşitlik 2.30'da gösterildiği gibi ifade edilir.

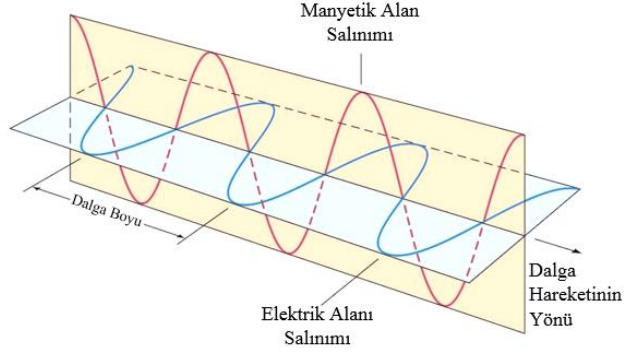
$$E = h \cdot \nu \quad (2.30)$$

Burada  $h$ , Planck sabiti ( $h=6,626 \cdot 10^{-34}$ Js)  $\nu$  ise, moleküllerin titreşim frekansı veya fotonun frekansdır. Bu ifadelerin ışığında foton, ışık enerjisi paketi veya elektromanyetik dalga paketi anlamına gelir. Bir elektromanyetik dalga için temel enerji birimi foton olarak ifade edilebilir. Fotonun enerjisini ( $E$ ), ışık hızı ( $c$ ) ve dalga boyuna ( $\lambda$ ) bağlı olarak Eşitlik 2.31'deki gibi ifade edilebilir.

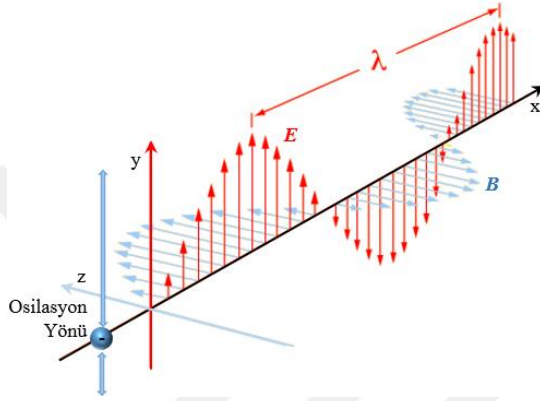
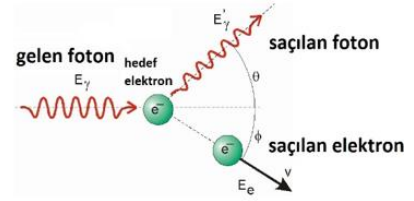
$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2.31)$$

### 2.5.1. Fotonun Yapısı ve Özellikleri

Işık, elektrik ve manyetik dalga vektörlerinin  $90^\circ$ 'lik açıda bir birini dik keserek, titreşen ve uzayda yol alan elektromanyetik bir dalgadır. Bununla ilgili 1873 yılında Maxwell, görünür ışığın elektromanyetik dalgalardan oluştuğunu ifade etmiştir. Işığın vakumlu ortamdaki hızı  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s'dir. Işık dalgasını ve özellikleri Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



### COMPTON SAÇILIMI



$$\begin{aligned} \rightarrow \lambda &= \frac{c}{\nu} \\ \rightarrow c &= \lambda \cdot \nu \\ \rightarrow \nu &= \frac{c}{\lambda} \end{aligned}$$

c: Dalga hızı (m/s)

λ: Dalga boyu (m)

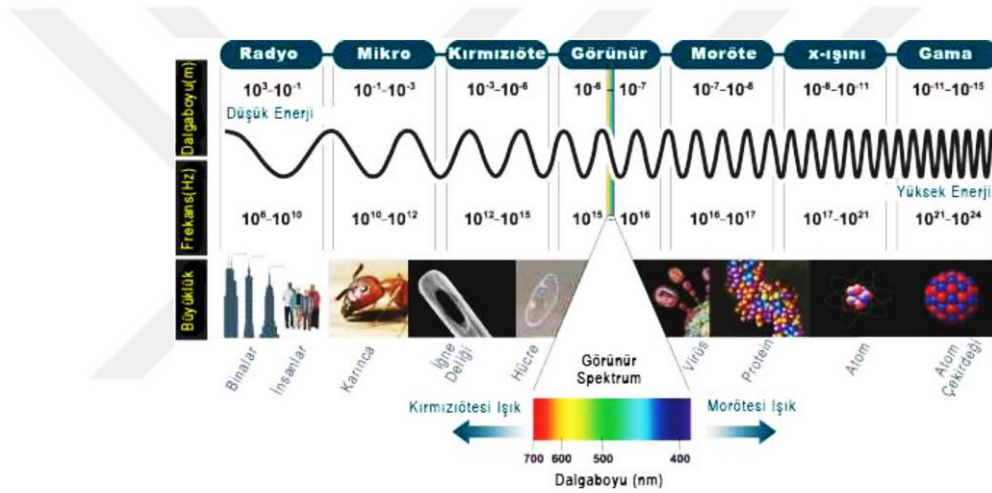
ν: Frekans (Hz)

Şekil 2.16. Işık dalgası ve özellikleri [74].

Elektronlar, çekirdek etrafındaki her biri belirli bir enerji seviyesine sahip yörüngelerde dönerler. Bu enerji seviyesi, yörüngenin çekirdekten olan uzaklığına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yörünge çekirdeğe ne kadar yakınsa elektronun enerjisi az, ne kadar uzaksa enerjisi o kadar yüksektir. Elektronlar, buldukları yörüngeden daha yüksek enerjili yörüngelere atlayabilirler. Elektronlar bu işlemi yaparken dışarıdan bir enerjiye ihtiyaç duyarlar. Üst enerji seviyesinin gerektirdiği enerji seviyesine ulaşmadan elektron, bu yörüngeler arası atlama yapamaz. Elektron için gerekli olan bu enerji “foton”dur. Fotonun en belirgin özellikleri şunlardır:

- Sıfır durgun kütleye sahiptirler.
- Işık hızında sabit hızla hareket ederler.
- Compton saçılımı olarak bilinen etkileşim içerisinde elektron ve diğer parçacıklarla etkileşimlere parçacık olarak girebilir.
- Yalnızca dalga formunda yayılır.
- $E = h \cdot \nu$ ,  $p = h / \lambda$  ve  $E = p \cdot c$  bağıntılarına uyar.
- Sıfır durgun kütlede olmalarına rağmen diğer parçacıklar gibi kütle çekiminden etkilenirler.

Işık parçacığı olarak da ifade edilen foton için evrendeki yıldızların her biri, en önemlisi de güneş foton kaynağıdır. Fotonlar, güneşten saniyede  $3 \cdot 10^8 m/s$  hızla uzaya dağılırlar. Elektromanyetik ışınım spektrumundaki görünür bölgedeki ışınımında, hem foton hem de dalga özellikleri gözlemlenebilir. Bu bölgedeki ışın demeti girişim olayları gösterir ve aynı zamanda foto elektronlar üretebilir. Elektromanyetik ışınım (Şekil 2.17), bütün biçimleriyle iki farklı şekilde ifade edilebilir. Dalga boylarına göre ışık, uzun dalga boyunda düşük foton enerjisine, çok kısa dalga boyunda oldukça yüksek enerjili foton enerjisine sahiptir. Bu durum göstermektedir ki ışık, hem foton hem de dalga özelliği gösteren bir yapıya sahiptir [74].



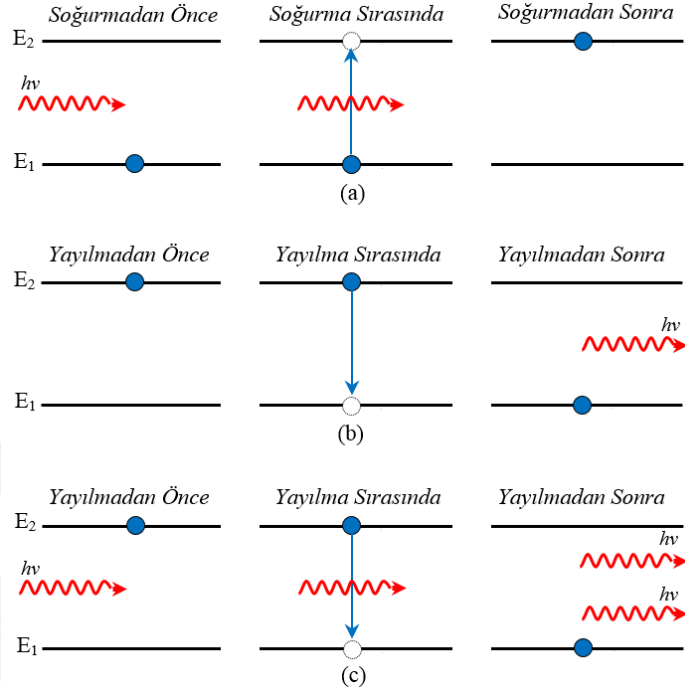
Şekil 2.17. Elektromanyetik ışınım spektrumu [74].

## 2.5.2. Işımalı Geçişler

Bir katı malzemede foton ile elektron arasında, soğurma (absorption), kendiliğinden yayılma (spontaneous emission) ve uyarılmayla yayılma (stimulated emission) olmak üzere üç şekilde ışımalı geçiş meydana gelmektedir. Işımalı geçişi açıklamak amacıyla, bir atomun iki enerji seviyesi için taban enerji seviyesini  $E_1$ , uyarılmış enerji seviyesini  $E_2$  olarak ele alalım. Burada enerji seviyeleri arasındaki herhangi bir geçiş,  $h\nu_{12} = E_2 - E_1$  enerji farkından dolayı  $\nu_{12}$  frekansında ki bir fotonun soğurulmasını veya yayılımını sağlar.  $E_1$  seviyesine sahip bir elektron, ancak  $h\nu_{12} = E_2 - E_1$  farkı kadarlık bir enerjiye sahip bir foton soğurduğunda  $E_2$  seviyesine



çıkabilir. Bu durum soğurma olarak adlandırılır (Şekil 2.18.a). Foto detektörler ve güneş hücreleri bu prensiple çalışırlar [57].



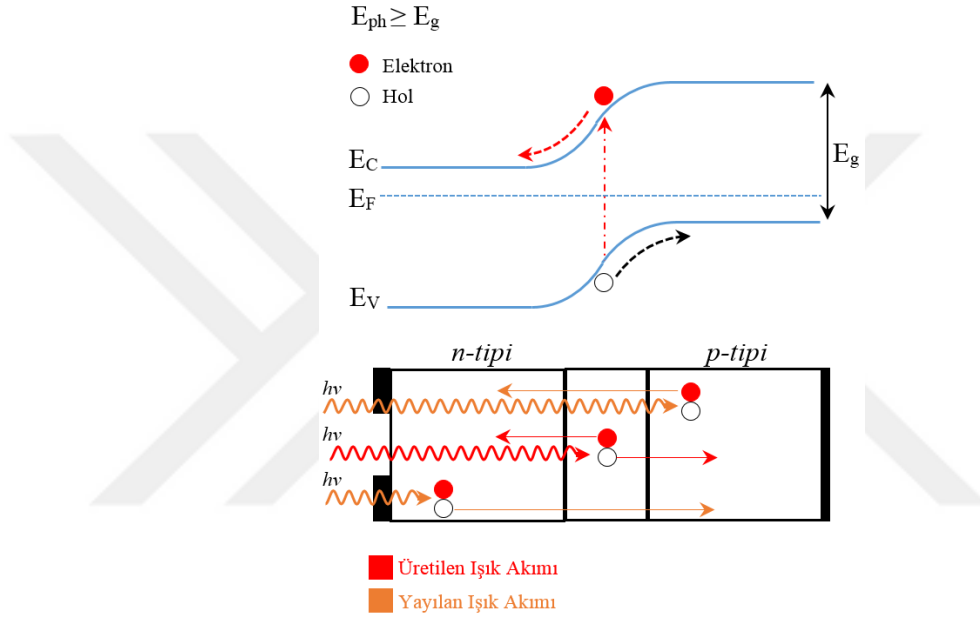
Şekil 2.18. İki enerji seviyesi arasındaki üç temel optiksel işlem: soğurma (a), kendiliğinden yayılma (b) ve uyarılmayla yayılma etkileşimleri (c) [1].

Atomun uyarılmış durumu kararlı olmayıp rastgele bir süre sonunda müdahale olmadan kendiliğinden  $h\nu_{12}$  enerjisinde bir foton salınımı ile temel duruma geçecektir. Bu durum kendiliğinden yayılma (rekombinasyon) olarak ifade edilir (Şekil 2.18.b). Işık yayan diyotlar (Light Emitting Diode (LED)) bu prensiple çalışır. Atom uyarılmış durumda iken,  $h\nu_{12}$  enerjisinde bir foton geldiğinde, fotonla aynı fazda ve  $h\nu_{12}$  enerjisinde foton salınımı ile temel duruma geçecektir. Bu durum ise uyarılmayla yayılma olarak ifade edilir (Şekil 2.18.c). Lazerler (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)), uyarılmayla yayılma prensibiyle çalışırlar [57].

### 2.5.3. Fotovoltaik Etki

*Fotovoltaik etki*, fotovoltaik bir hücre üzerine güneş ışınımı düştüğünde, güneş ışınım enerjisini doğrudan elektriğe dönüştüren temel bir fiziksel işlem olarak

tanımlanır. Bu enerji dönüşümünde, herhangi bir mekaniksel hareket söz konusu değildir. Güneş ışınımındaki fotonlar, Silikon, Galyum Arsenide gibi yarıiletkenlerin yüzeyine çarparak, atomlardan elektronları serbest bırakmaları ile fotovoltaik etki gerçekleşir. Güneş ışınımı, enerjiyi taşıyan fotonların birleşmesiyle oluşur. Fotonlar, ışınım spektrumundaki farklı dalga boylarında, farklı seviyelerde enerji içerirler. Fotovoltaik hücre üzerine düşen bu fotonlar, hücre üzerine geldiğinde kısmen soğurulur, yansıtılır veya hücre içerisinden geçer [74].



Şekil 2.19. Fotovoltaik etkinin şematik gösterimi [74].

Fotovoltaik hücre tarafından soğurulan foton, atomun valans bandındaki elektronun enerjisini fotonun enerjisi kadar artırır. Fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya büyük ise valans bandındaki elektron, iletkenlik bandına sıçırarak serbest hale gelir [75,76]. Eğer foton yeterli enerjiye sahip değilse, belirli bir seviyeye uyarılan elektron tekrar temel seviyesine düşer ve bu enerji ısı enerjisine dönüşerek malzemenin sıcaklığını artırır. Fotonun enerjisi, elektronu iletkenlik bandına çıkartmak için gerekli olan enerjiden çok fazla ise bu fazla enerji yarıiletken malzemede ısı enerjisine dönüşür ve bazı kimyasal bağları kopararak kusurları oluşturur. Yani, bir fotonun enerjisi ne kadar yüksek olursa olsun yalnızca bir elektronu serbest hale getirebilir [75,76].

$p-n$  eklemi oluşturulduğuna, eklem bölgesinin yakınındaki serbest yükler, yoğunluğun az olduğu bölgeye difüzyon yoluyla geçerler.  $n$ -tipi yarıiletkendeki çoğunluk taşıyıcılar (elektronlar)  $p$ -tipi yarıiletkenin ön yüzeyine,  $p$ -tipi yarıiletkendeki çoğunluk taşıyıcılar (holler)  $n$ -tipi yarıiletkenin ön yüzeyine difüzyon yoluyla geçerler. Bu geçiş termal denge kuruluncaya kadar devam edecektir. Bu durumda  $n$  ve  $p$  tipi yarıiletken malzemelerin Fermi enerji seviyeleri yük geçişi durur ve eklem çevresinde bir elektrik alanı oluşur. Oluşan bu elektrik alanının yönü  $n$ -tipi yarıiletkenden  $p$ -tipi yarıiletkene doğru iken, büyüklüğü yarıiletkenlere ve katkılanma oranlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [74]. Foton, yarıiletken tarafından soğrulduğunda, enerjisini valans bandındaki elektronu iletkenlik bandına çıkmasını sağlar ve arkasında hol bırakır. Böylelikle elektron-hol çifti oluşur. Bu işlem,  $p-n$  eklem ara yüzeyinde gerçekleşirse elektron-hol çifti elektrik alan tarafından zıt yönlerde sürüklenerek bir birinden ayrılır. Bu durumda, elektronlar  $n$  tarafına, hollerde  $p$  tarafına gönderilecektir.  $p-n$  eklem iki ucu bir dış devreye bağlanırsa, elektronlar yol boyunca, elektrik alan ile ayrılan holler ile birleşmek için  $p$  tarafına akarlar. Bu elektron akışı, akımın oluşmasını sağlar. Bu olaya “fotovoltaik olay” oluşumu, akıma da “foto-akım” denir. Bu süreç, eklem üzerine foton düştüğü sürece devam eder. [74-76].

#### 2.5.4. Schottky Engel Tipi Fotodiyotlar

Schottky engel tipi fotodiyotların iki tipi bulunmaktadır. Birinci tip fotodiyotlar MS veya MIS yapısının yarıiletkenliğinde fotonların emilimine ve diğer fotodiyotlar MS yapısının metalindeki fotonların emilimine dayanır. Birinci tip eleman, Eşitlik 2.32’den daha kısa dalga boyları algılamak için tasarlanmıştır [2].

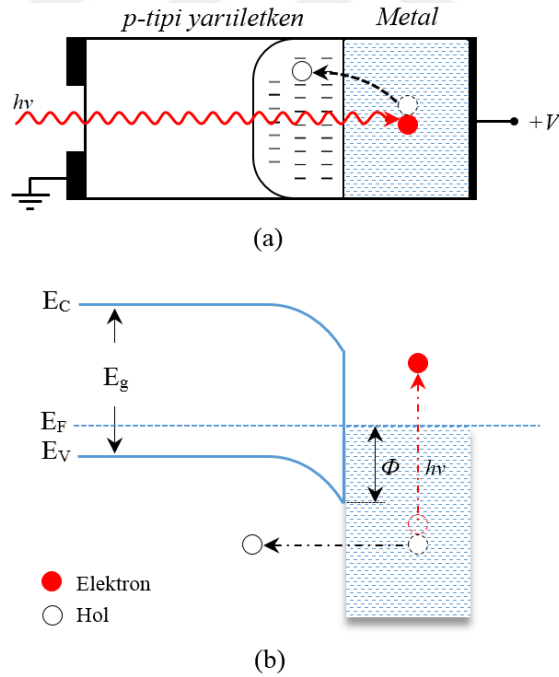
$$\lambda \leq 1.24/E_g \quad (2.32)$$

Burada  $E_g$  elektron voltu ifade etmektedir. İkinci tip eleman ise Eşitlik 2.33’den daha kısa dalga boylarını algılamak için tasarlanmıştır [2].

$$\lambda \leq 1.24/\Phi_B \quad (2.33)$$

$\Phi_B > E_g$  için, fotodiyotların ikinci tipi kızılötesinde daha uzak radyasyonu tespit edebilir. Fotodiyotlar, iki tür de ters ön-gerilim altında çalıştırılır. Eşitlik 2.32'ye uygun olan dalga boyundaki ışık bu yapılara çarptığı zaman, yarıiletkende elektron-hol çiftleri oluşur. Eğer eklemler ters ön-gerilim durumunda ise, engel bölgesinde oluşturulan taşıyıcılar, oluşturulan bir fotoakım tarafında dışarı süpürülür. Azınlık taşıyıcılar engeli geçebileceği ve daha sonra dışarı süpürülebileceği için, ana bölgede oluşturulan taşıyıcılara eklenebilir [2].

Schottky engel tipi bu fotodiyotu daha iyi anlamak için Şekil 2.20 verilmiştir. Eşitlik 2.33'e uygun olan dalga boyundaki ışık bu yapılara çarptığı zaman, ışık metal üzerinde hareketli taşıyıcıları oluşturur. Şekil 2.20'ye göre, metal üzerinde hareketli elektronlar ve holler oluşturulmaktadır ve hollerin bazıları engel üzerinden balistik olarak yayılmaktadır.



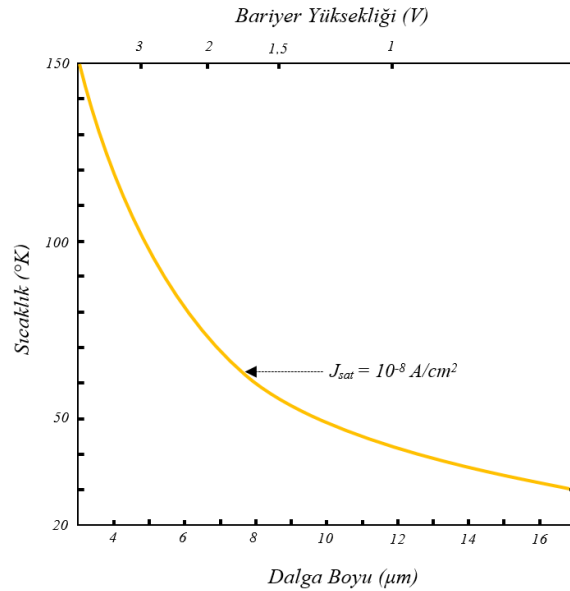
Şekil 2.20. Schottky fotodiyotlarda p-tipi yarıiletken için fotoemiyon olayı [2].

Bu şekilde, yarıiletken bölgedeki elektrik alanına yayılan holler daha sonra alanda oluşturulan bir fotoakım tarafında dışarı süpürülerekten atılır. Bu durumda  $QE$  her bir foton huzmesi başına fotoakımı ifade eder.  $QE$ 'nin matematiksel ifadesi ise,

$$QE = C'_1(h\nu - \Phi_B)^2 / h\nu \quad (2.34)$$

Şekil 2.20.b'de verilen yapı, termodinamik dengede gösterilmesine rağmen, bu fotodiyotlar normalde ters ön-gerilim altında Şekil 2.20.a. ile çalıştırılır. Çünkü ters ön-gerilim,  $\Phi_B$ 'nin altında artan birikim etkin engel yüksekliğini düşürür. Schottky engellerin özellikleri, ters ön-gerilim altındaki düşürücü engel olgusu, Schottky engel veya imaj kuvvet etkisi olarak adlandırılır [2].

Eşitlik 2.33 tarafından hesaplanan uzun dalga boyu sınır değerlerine sahip olması, ikinci sınıf Schottky-engel- tipi fotodiyotların avantajıdır. Bu sınır avantajından tam olarak yararlanmak için, çoğunluk taşıyıcıların metalden kolaylıkla geçmesine izin veren düşük engel yüksekliğinde bu cihazların imal edilmesi gerekir. Dolayısıyla  $\Phi_B$ 'nin düşük değerlerini elde edebilmek için metal yarıiletken çiftler seçilir. Ayrıca çoğunluk taşıyıcıların tünelleme etkisinin artırımı için engellerin şekillendirilmesi (implantasyon kullanılarak), etkin daha düşük engellerin kullanılması ile sağlanabilir [2].



Şekil 2.21. Schottky fotodiyotlar için soğutma gereksinimleri [2]

Bu sınıf fotodiyotlar, çoğunluk taşıyıcılı cihazlardır. Bu cihazlarda termiyonik emisyon (veya şekillendirme engeli kullanılmış ise termal destekli alan emisyonu)

karanlıktaki akım-gerilim karakteristiği hakimdir. Engel yükseklikleri düşük olduğunda, bu çoğunluk taşıyıcı akımları daha büyük olabilir. Kabul edilebilir bir seviyede karanlık ters ön-gerilim akımını  $J_{sat}$  azalmak için, bu elemanlara soğutma gereklidir.  $J_{sat}$ 'ın  $10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>'nin altında tutulduğu varsayılırsa, Şekil 2.21 engel yüksekliğine karşı soğutma gereksinimlerini ve sınır dalga boyunu göstermektedir [2].



## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE YÖNTEM

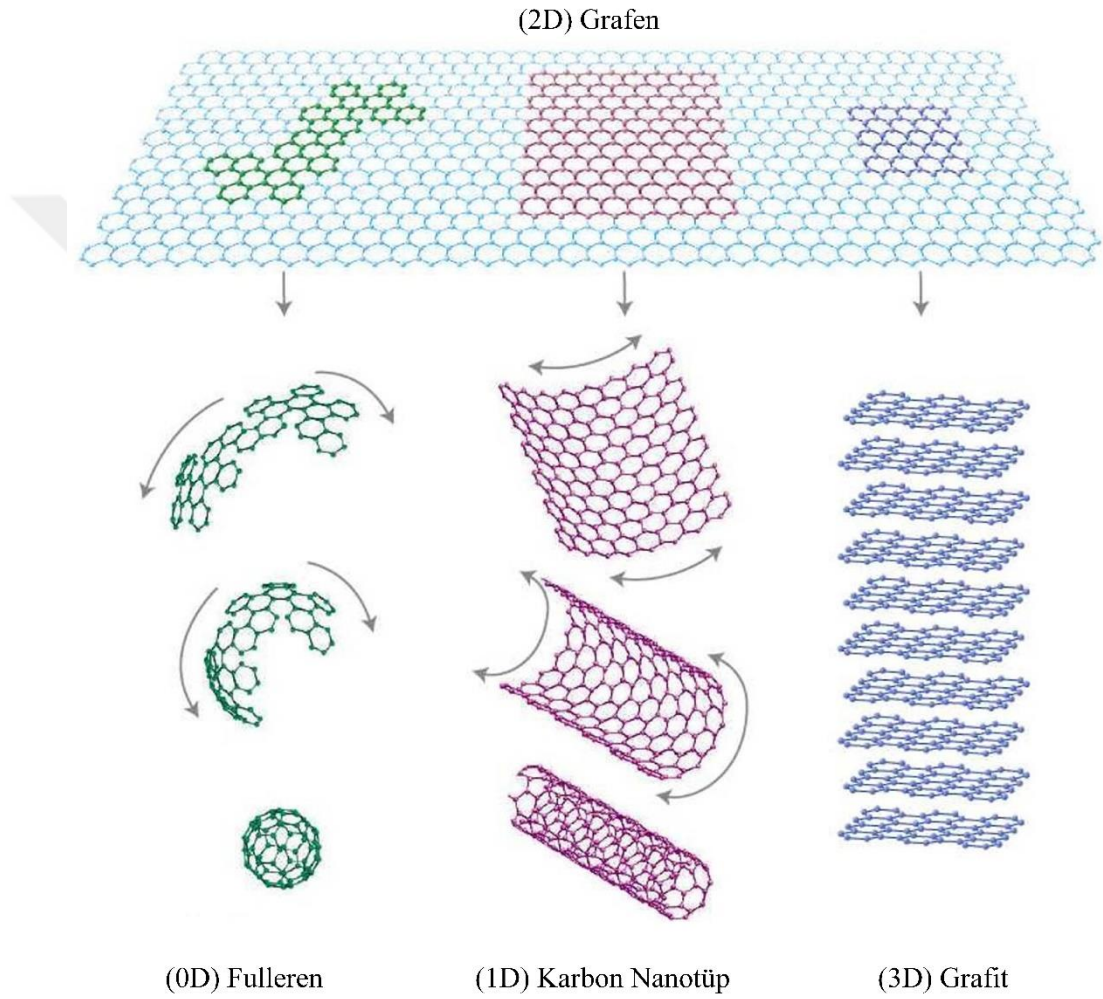
Bu bölüm, Au/*n*-GaAs (MS) tipi (D<sub>1</sub>) SBDs, Au/saf PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>2</sub>) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>3</sub>) SBDs hazırlanması için gerekli materyalleri, deneysel numunelerin hazırlanması ve ölçümlenmesinde izlenen yöntemleri içerir. SBDs'in yapımında daha iyi sonuç alınabilmesi ve numune üzerindeki organik ve metalik kirleri gidermek amacıyla numunelerin kimyasal temizlenme işlemi ayrıca bu bölümde açıklanmıştır. Burada, sırasıyla omik kontakın oluşturulması, electrospinning yöntemi ile MPS tipi (D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub>) SBDs için saf ve Grafen katkılı PVA'nın kaplanması, doğrultucu kontakın oluşturulması işlemlerinden bahsedilmiştir.

#### 3.1. GRAFEN (Gr)

Fizik 2010 Nobel ödülü, kalemdeki grafitin bir tabakası, iki boyutlu malzeme grafen ile ilgili çığır açan deneylerinden dolayı, “Andre Geim” ve “Konstantin Novoselov”a verildi [77]. Karbon elementinin allotropları (karbon nanotüp, fullerene, grafit)'ndan biri olan Grafen, 0.142 nm karbon-karbon bağı uzunluğuna sahip iki boyutlu (2D) bir petek örgü şeklinde karbon atomlarının düzlemsel tek tabakalı formudur [78]. Grafen içerisinde elektronlar, anormal kuantum Hall etkisi ve lokalizasyonu olmaması gibi çok tuhaf özelliklerine katkıda kütsüz bağıl parçacıklar gibi davranır [79, 80].

Grafen [79], oda sıcaklığında ( $250,000 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ ) yüksek elektron mobilitesi [41] [81] eksponansiyonel termal iletkenlik ( $5000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) [82] ve üstün mekaniksel özellikleri [83] ile benzersiz davranışlar sergilemektedir. Bu davranışları ile potansiyel uygulamaları; tek moleküllü gaz detektörleri, şeffaf iletim elektrotları, kompozitler ve enerji depolama elemanları (süper kapasitörler ve lityum iyon bataryaları)'dır [77].

Buna ek olarak, transistörlerin potansiyel uygulamalar ile yarıiletken grafen üretiminde, 1-2 nm genişliğinde nano-şeritler halinde azaltılan Grafenin boyutu, ayrı bir bant aralığı ile üretilebilir [84-86]. Grafen, gelecek elektronik ve kompozit endüstrisinin gelişmesinde ve yeni malzemelerin keşfi için bilim adamlarının araştırma yolundaki ufukta parlayan yıldızı olarak yükseldiğine hiç şüphe yoktur.



Şekil 3.1. Karbon elementinin allotropları (Grafen, karbon nanotüp, fulleren, grafit) [87].

### 3.1.1. Özellikleri

Son birkaç yıl içinde, grafenin birçok ilginç özelliği (görünür ışığın % 2.3 emilimi ile son derece yüksek yük (elektron ve holler) mobilitesi, termal iletkenlik, yüksek



düzeyde mukavemet, en yüksek teoriksel spesifik yüzey alanı (2600 m<sup>2</sup>/g) vb.) el değmemiş grafenin incelenmesi yoluyla keşfedildi [77].

### 3.1.1.1. Elektriksel İletkenlik

Elektriksel iletkenlik, grafenin en önemli özelliklerinden biridir [88, 89]. Grafen, yalıtkan polimer matrisini doldurduğu zaman, iletken polimer kompozitler olarak sonuçlanır. Polivinil Alkol (PVA), Polivinil klorür (PVC), Poly(methyl methacrylate) (PMMA), vb. gibi çeşitli polimerler, elektriksel olarak iletken grafen/polimer kompozitlerini hazırlamak için matrisler olarak kullanılmıştır [89, 90]. Bu gibi kompozit malzemeler, genel olarak dolgu maddesi konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak, elektrik iletkenliği doğrusal olmayan bir artış sergilerler. Burada, önemli iki parametre olan elektriksel iletkenlik ve perkolasyon eşiği (pc) birbirleri ile ilişkilidir. Perkolasyon eşiği olarak bilinen belirli bir dolgu malzemesi kesiminde, dolgu maddeleri kompozitlerin elektrik iletkenliğinin ani bir artışa yol açan bir bağ yapısı oluşturmaktadır [89,90]. Bazı durumlarda, iletken parçacıkların çok düşük bir miktarda eklenmesi, etkin iletken yolları oluşturmak için dolgu kontağı yapabilir ve böylece tüm kompozit iletken hale getirilebilir [88,89].

Ayrıca, dolgu konsantrasyonu, dolgu agregasyonu, işlem yöntemleri, fonksiyonel grupların varlığı ve grafen tabakaların en boy oranı, matris içinde dağılımı, gibi çeşitli faktörler elektriksel iletkenliği ve kompozit sızma eşiğini etkileyebilmektedir [77,91]. İletim, dolgu parçacıkları tarafından çevrelenen ince polimer tabakaları arasında tünelleme aracılığı ile yer alabilmesinden ziyade dolgu maddesinin, akım akışı için doğrudan temas halinde olmasına gerek yoktur [92]. El değmemiş grafen en yüksek iletkenliğe sahiptir; ancak kullanımındaki mekanik pul pul dökülmelerin kullanımında oluşturduğu kısıtlamalardan dolayı büyük miktardaki üretimi zordur. Grafen oksit (GO) elektriksel yalıtımın indirgenmesi, oksijen fonksiyonel gruplarını ortadan kaldırır ve kısmen kompozitler için grafen oksit uygun iletken dolgu yapısını azaltarak, elektriksel iletkenliği iyileştirir. Termal olarak indirgenmiş GO, oksijenli fonksiyonel grupların yokluğundan dolayı kimyasal olarak indirgenmiş GO göre daha yüksek bir elektriksel iletkenliğe sahip olduğu rapor edilmiştir [77].

Zhang ve arkadaşları [93] grafen-PMMA nanokompozitlerin elektriksel özellikleri üzerinde grafenin yüzey kimyasının (grafen tabakaların oksijen katkı oranı) etkilerini çalışmışlardır. Elektriksel perkolasyon eşiği, grafen tabakaların oksijen katkı oranının artması ile yükselmektedir. Grafendeki (grafen-13.2) en düşük oksijen katkılı PMMA kompozitleri elektriksel iletkenliğin önemli ölçüde bir artış gösterdiğini belirtmişlerdir [77]. Ayrıca, Grafen / polimer nanokompozitlerin elektriksel özellikleri ile ilgili çalışmalar Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Grafen / polimer nanokompozitlerin elektriksel özellikleri [89].

Matris	Dolgu Maddesi	Dolgu maddesinin miktarı (wt % <sup>a</sup> , vol% <sup>b</sup> )	Elektriksel Özellikleri		Çalışma
			Perkolasyon Eşiği (wt % <sup>a</sup> , vol% <sup>b</sup> )	Yüzey direnci <sup>a</sup> ( $\Omega$ ) / Elektriksel İletkenlik <sup>b</sup> ( $S\text{m}^{-1}$ )	
PMMA	CRGO <sup>1</sup>		0.62 <sup>b</sup>		[94]
	f-GO <sup>2</sup>		0.26 <sup>b</sup>	$4.47 \times 10^{-5b}$	[95]
	TRGO <sup>3</sup>		0.16 <sup>b</sup>		[93]
PE	TRGO <sup>3</sup>	1.0 <sup>a</sup>		$2 \times 10^{8a}$	[96]
	Grafen		3.8 <sup>b</sup>		[97]
PVA	f-CRGO <sup>4</sup>	3.0 <sup>a</sup>	0.37 <sup>b</sup>		[98]
PVDF	TRGO <sup>3</sup>		4.5 <sup>a</sup>		[99]
	TRGO <sup>3</sup>		0.016 <sup>b</sup>		[100]
PANI	CRGO <sup>1</sup>	10.0 <sup>a</sup>		$8.38 \times 10^{-4a}$	[101]
				$11.92 \times 10^{2b}$	

<sup>1</sup> Kimyasal olarak indirgenmiş GO (CRGO),

<sup>3</sup> Termal olarak indirgenmiş GO (TRGO),

<sup>2</sup> İşlevsel GO (f-GO),

<sup>4</sup> Kimyasal olarak indirgenmiş işlevsel GO (f-CRGO)

### 3.1.1.2. Mekaniksel Özellikleri

Elektronik elemanlarda istenmeyen gerilme veya zorlama, elemanların performansını ve ömrünü etkileyebilir. Genel olarak, kristal malzeme üzerine dış basınç uygulama, bölgesel elektron yüklerine dağıtılması ile sonuçlanan atomlar arası mesafeyi değiştirebilir. Bu durum, elektronik yapıda, bir bant aralığını üretebilir ve önemli ölçüde elektron iletim özelliğini değiştirebilir. Karbon nanotüplerden sonra grafen yüksek elastik modüler yapısına ve gücüne sahip olduğu bildirilmiştir. Birçok araştırmacı, grafenin tek, iki ve çok katmanlı tabaka ve bu katmanlı tabakaların

yapısal mekanik özelliklerini belirlediler ve bu durum Çizelge 3.2'de özetlenmiştir [77].

Çizelge 3.2. Grafen'in mekaniksel özellikleri [77].

Metot	Malzeme	Mekaniksel Özellikleri	Çalışma
<i>AFM (Atomic Force Microscopy)</i>	<i>Tek katmanlı grafen</i>	$E = 1 \pm 0.1$ TPa $\sigma_{int} = 130 \pm 10$ GPa ( $\epsilon_{int} = 0.25\%$ de )	[83]
<i>Raman Spektroskopisi</i>	<i>Grafen</i>	Gerilme altındaki $\sim 1.3\%$ gerginlik Basınç altındaki $\sim 0.7\%$ gerginlik	[102]
<i>AFM (Atomic Force Microscopy)</i>	<i>Tek katmanlı grafen</i>	$E = 1.02$ TPa; $\sigma = 130$ GPa	[103]
	<i>Çift katmanlı grafen</i>	$E = 1.04$ TPa; $\sigma = 126$ GPa	
	<i>Üç katmanlı grafen</i>	$E = 0.98$ TPa; $\sigma = 101$ GPa	

### 3.1.1.2. Termal Özellikleri

Grafen uygulamaları, elemanların gelişimi için büyük önem arz etmektedir. Burada, termal iletim elektronik bileşenlerin daha iyi bir performans ve güvenilirlik için en önemli faktörlerden biridir. Elektronik elemanların çalışması sırasında oluşan ısının, önemli ölçüde dağılmış olması gerekmektedir. Grafite, elmas ve karbon nanotüpleri gibi karbon allotropları, güçlü C-C kovalent bağları ve fonon saçılması sayesinde yüksek termal iletkenlik göstermiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarla, oda sıcaklığında en yüksek termal iletkenlik, tek katmanlı saf hatasız grafen için 5000 W/mK elde edildiği bildirilmiştir [82]. Çizelge 3.3, çeşitli yöntemlerle belirlenen grafen'in termal iletkenlik değerlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir [77].

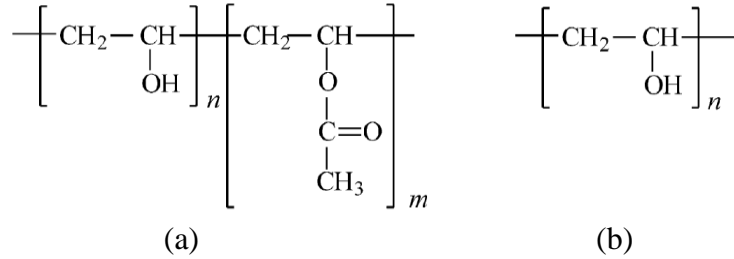
Çizelge 3.3. Grafen temelli malzemelerin termal özellikleri [77].

Metot	Malzeme	Termal İletkenlik	Çalışma
<i>Eşodaklı mikro-Raman Spektroskopisi</i>	<i>Tek katmanlı grafen</i>	Oda sıcaklığında 4840-5300 W/mK	[82]
<i>Eşodaklı mikro-Raman Spektroskopisi</i>	<i>Askıya alınan Grafen ince tabaka*</i>	Oda sıcaklığında 4100-4800 W/mK	[104]
	<i>Tek katmanlı grafen (askıda)*</i>	Oda sıcaklığında 3000-5000 W/mK (askıda)	
<i>Termal Ölçüm Metodu</i>	<i>Tek katmanlı grafen (SiO<sub>2</sub> üzerinde)</i>	Oda sıcaklığında 600 W/mK	[105]

\* Fiziksel olarak askıya alınma durumu diğer bir ifadeyle esas olarak sıcaklığın dışarı çıkacağı (sıcaklığın temas halindeki alt maddeye dağılmaması) yolların elimine edilmesi

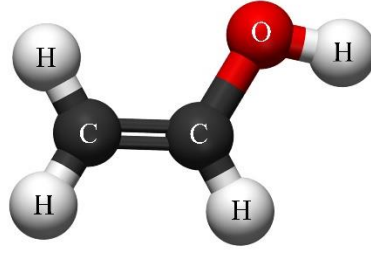
### 3.2. POLİVİNİL ALKOL (PVA)

Özünde hidroliz yoluyla polivinil asetatın (PVAc) elde edilen polivinil alkol (PVA), su içerisinde çözünen kristal yapıya sahip bir polimerdir [106]. PVA, ilk olarak 20. yüzyılın ilk yarısında kullanılmış olan yapay bir polimerdir. Endüstriyel, medikal, ticari, vb. gibi sektörlerde uygulanmakta olan PVA; fizyolojik hijyen ürünlerinin yanı sıra yapıştırıcı, reçine, ameliyat ipliği, gıda ambalaj malzemeleri gibi birçok son ürünlerin üretimi için kullanılmaktadır [107]. Ayrıca PVA, kağıt kaplama ve tekstil boyutlandırma için kullanılan doğal polimerlerin biyolojik olarak parçalanabilir özelliğini barındırır [108]. Bu polimer, hidrofilik özelliklere sahip diğer polimerler gibi yaygın olarak diğer polimer bileşikler ile karıştırılarak kullanılır. Özellikle, uyumlu bir yapı ve hidrofilik özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda film yapılarının mekanik özelliklerini geliştirmek için daha sık kullanılmaktadır [109]. Polivinil asetat özellikleri, kısmi (a) veya tamamen (b) hidroliz oranına veya derecesine bağlı olup, PVA için yapısal formülü aşağıda verilmiştir (Şekil 3.2) [110].

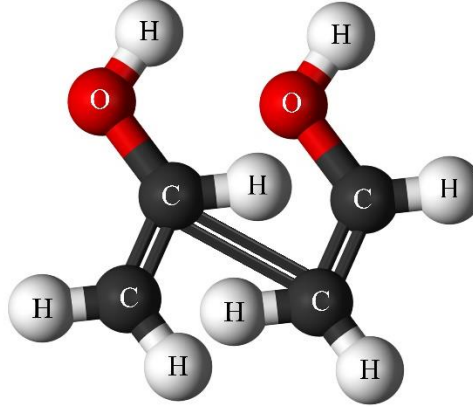


Şekil 3.2. PVA için yapısal formül: kısmi hidrolizi (a), tam hidrolizi (b) [107].

Alkalın veya asidik koşullar altında, başlangıç vinil asetat polimerinin uzunluğu ve hidroliz derecesi, çözünürlük, esneklik, yapışkanlık, gerilme mukavemeti ve değişen farklı molekül ağırlıklarında (20,000-400,000) PVA ürünleri vermektedir [107]. Çeşitli özellikler; pH, viskozite, erime noktası, kırılma indeksi, kurumadaki kayıp, ağır metaller ve kontak üzerindeki kalıntı gibi PVA'yı karakterize etmek için ölçümlenirler. Bu özellikler, PVA'nın kalitesi için molekül ağırlığı ve % hidrolize göre değişir [107]. Vinil alkolün yapısı (a) ve polivinil asetatın hidrolizi ile sentezlenmesi sonucundaki PVA yapısı (b) Şekil 3.3'de şematik olarak gösterilmektedir.



a. Vinil Alkol



b. Polivinil Alkol

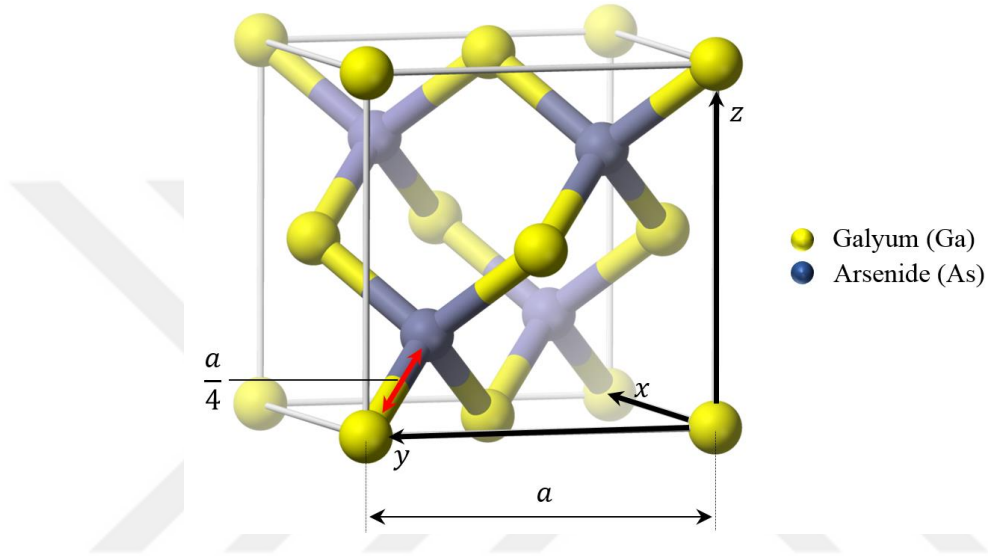
Şekil 3.3. Vinil alkol (a), polivinil asetatın hidrolizi ile sentezlenen PVA'nın yapısı (b) [111].

Hidrolizin tipik seviyeleri, neredeyse tamamen hidrolize edilmiş yapılardan oluşan PVA hidrojeller ile %80'den başlayıp %99 veya daha fazlasını içermektedir. PVA hidrojellerini, ayarlanabilir özellikleri ile akışkan (sol)-polimer (jel)'de, elde edilen doğrusal polimerlerin çapraz bağlanması ile oluşturulur. Düşük bir polimer katkı oranında akış, serbest bir şekilde zayıf bir malzeme ile sonuçlanan matris boyunca hareket eder. Artan polimer katkı oranında ise yapı önemli ölçüde sertleşir ve matris güçlendirilir [112].

### 3.3. GALYUM ARSENİDE (GaAs) KRİSTALİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

Galyum Arsenide (GaAs), III. grupta bulunan Galyum (Ga) ve V. grupta bulunan Arsenik (As) elementlerinden oluşan III-V bileşik yarıiletkeni olup diyot, transistör, güneş hücresi gibi yarıiletken elemanlarda kullanılan önemli bir malzemedir [46]. Yapılan çalışmalarda, yarıiletkenler içerisinde GaAs tabanlı elemanların yüksek hızlı ve düşük güç tüketimli elemanlar oldukları tespit edilmiştir [47].

GaAs Zinc Blende örgü yapısında kübik bir kristal olup kristal yapısının birim hücresi Şekil 3.4’de görülmektedir. Burada kristal yapının örgü sabiti  $a$  olmak üzere; Ga atomları yüzey merkezli kübik (face-centered cubic(fcc)) örgü şeklinde yerleşmiş olup, As atomları ise Ga atomlarından  $a/4$  uzaklıkta, alt ve üst çapraz köşelerden karşılıklı olarak merkeze yönelmiş bir şekilde yerleşmişlerdir. As atomlarının her biri kendisine en yakın dört Ga atomu ile bağ oluşturmaktadır [64].



Şekil 3.4. GaAs’ın kristal yapısı [113].

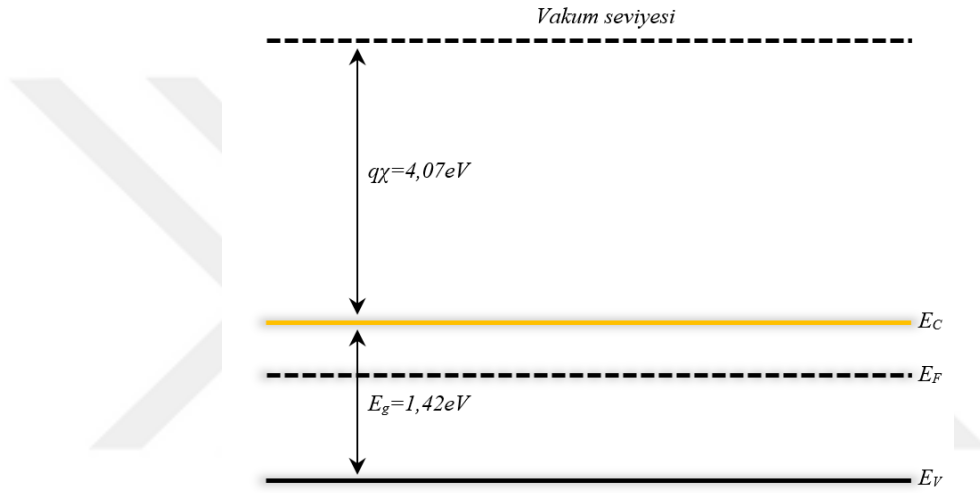
GaAs, farklı kristal büyütme teknikleri ile üretilirler. Bunlar: (a) GaAs, Ga ve As buharı bir ucu soğutucuya bağlı bir tohum kristal üzerinde reaksiyona girecek şekilde bir yatay fırın kullanılarak büyütülür. Bu metot Bridgman-Stockbarger tekniği olarak bilinir. (b) GaAs, As basıncı altında bir pota içindeki Ga eriyiğinin bir tohum kristal üzerinde büyütülmesiyle elde edilir. Bu teknik LEC (liquid encapsulated Czochralski) olarak isimlendirilir. (c) VPE (Vapour phase epitaxy) tekniğiyle gaz fazındaki Ga metali ile As triklorid’in aşağıda yazılan reaksiyonu ile GaAs filmler üretilir [113].



(d) GaAs kristali, MOCVD (Metal-organic chemical vapour deposition) tekniği kullanılarak, trimetilgalyum ve arsin’in aşağıda yazılan reaksiyonu sonucunda üretilir.



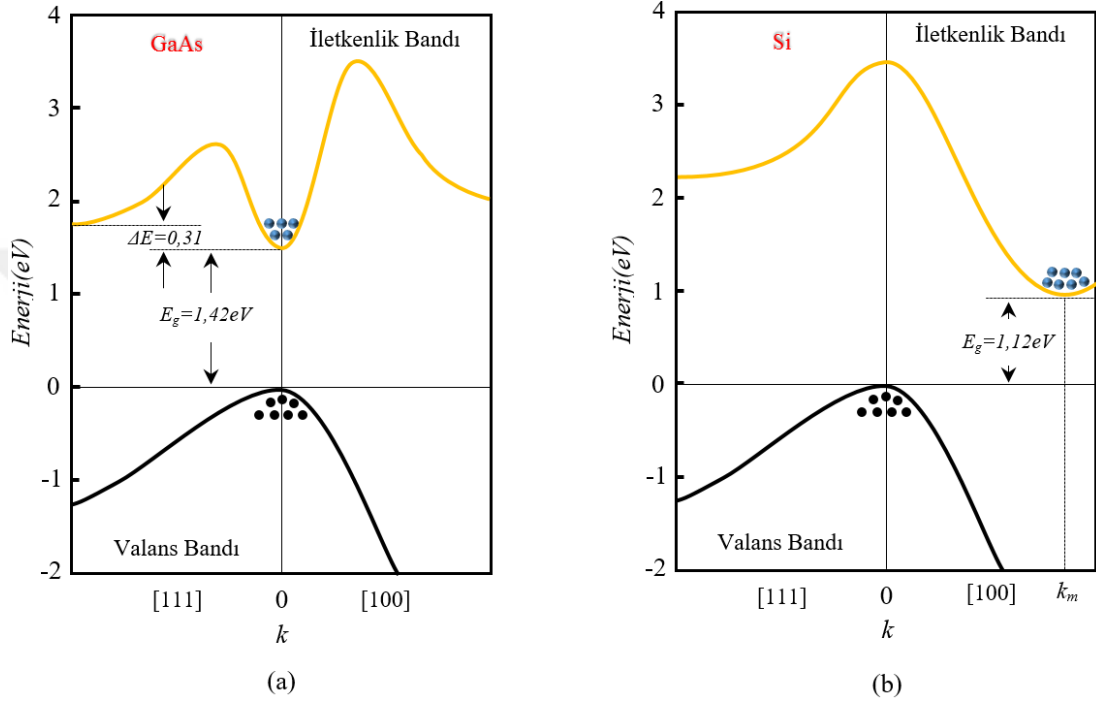
İlk olarak 1920'li yıllarda üretimi Goldschmidt tarafından gerçekleştirilen GaAs için enerji-bant diyagramı Şekil 3.5'de görülmektedir. Bu şekil, iletkenlik bandının taban enerji seviyesini  $E_c$ , Fermi enerji seviyesini  $E_F$ , valans bandının tavan enerji seviyesini  $E_v$ , yarıiletkenin elektron ilgisini  $q\chi$  (GaAs için  $q\chi = 4,07 \text{ eV}$ ), yasak enerji aralığını  $E_g$  (GaAs için  $E_g = 1,42 \text{ eV}$ ) göstermektedir.  $E_g$  değeri; sıcaklığa, yarıiletken malzemenin cinsine, saflığına ve katkılanma oranına bağlıdır [1, 82].



Şekil 3.5. GaAs ait enerji-bant diyagramı [82].

Si ve GaAs'ın Enerji-k dalga vektörü ( $E-k$ ) diyagramları Şekil 3.6'de görülmektedir. Bu basitleştirilmiş diyagramlar Si ve GaAs'a ait temel özelliklerini göstermektedir. GaAs'ın iletkenlik bandının minimumu(buraya serbest elektronlar yerleşmiştir) ile valans bandının maksimumu aynı  $k$  dalga vektörü değerindedirler (Şekil 3.6.a). Burada  $k$  dalga vektörü taşıyıcının momentumunu temsil eder ve momentumun değeri sıfırdır. İletkenlik bandındaki bir elektron ile valans bandındaki hol rekombinasyona (elektron-hol birleşimi) uğradığında momentumun korunumu kanununa uyulur. İletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu aynı  $k$  dalga vektöründe olduğu yarıiletkene “direkt bant aralıklı yarıiletkenler” ve elektronun iletkenlik bandından valans bandına atlamasına “*bandtan banda rekombinasyon*” denir. Bu tür rekombinasyon olayında momentum korunduğu için rekombinasyon sadece  $k=0$ 'daki bir elektronla  $k=0$ 'daki bir holü gerektirir. Rekombinasyon olayı gerçekleştiğinde, enerjinin korunumu yasası da bir enerji

kuantumunun foton formunda yayılacak ve fotonun enerjisi  $E_g = h\nu$ 'dir. Direkt bant aralıklı yarıiletkenlerin çoğunda, rekombinasyon olayı ile yayılan fotonlar, görünür veya kızıl ötesine yakın ışığa uygun enerjiye sahiptirler. Fotonun yayıldığı bu rekombinasyon olayı “ışıklı rekombinasyon” olarak adlandırılır. Bu özellikleri ile GaAs optik devre elemanlarında kullanım için idealdir [33].



Şekil 3.6. Enerji-bant yapıları: GaAs (a) ve Si (b) [81].

Si için  $E-k$  diyagramı Şekil 3.6.b'de görülmektedir. Valans bandının maksimumu  $k=0$ 'da iken iletkenlik bandının minimumu  $k=0$ 'da değildir, fakat [100] doğrultusundadır. İletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu arasındaki fark yasak enerji aralığı olup  $E_g$  ile gösterilir. İletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu aynı  $k$  dalga vektöründe olmayan yarıiletkenlere “indirekt band aralıklı yarıiletkenler” denir [81]. Bu tür bir yarıiletkende,  $k=[k_m,0,0]$  momentumuna sahip bir elektron, momentumu  $k=0$  olan bir holle rekombinasyona uğrayabilir. Bu durum yalnızca momentumun korunumunun gözlemlendiği, elektrona (veya hole) uygun momentum transferi yapıldığı zaman gerçekleşir. Bu, bir veya birkaç fonon ile gerçekleşen çarpışmayla meydana gelebilir. Momentumun kesin bir değerinin ( $k_m$ ) elektrona transfer edilmesi gerektiği için indirekt band aralıklı yarıiletkenlerde banddan banda rekombinasyon çok zayıf bir



ihtimaldir. Sonuç olarak silisyumda ışıklı rekombinasyon gerçekleşmez ve bu malzemeler ışık yayamazlar. Daha ziyade, band aralığı içerisinde farklı  $k$  değerlerindeki tuzak seviyeleri aracılığıyla rekombinasyon olayı gerçekleşir [33].

GaAs'ın silisyum ve germanyum gibi yarıiletkenlere karşı avantajlarından birincisi yüksek elektron mobilitesine sahip olmasıdır. Burada mobilite, birim elektrik alan başına yük taşıyıcıların (elektron veya hol) sürüklenme hızı olarak ifade edilir ve birimi  $cm^2(Volt)^{-1}s^{-1}$  'dir. İletkenlik bandındaki elektronların mobilitesi  $\mu_n$ , hollerin mobilitesi ise  $\mu_p$  ile ifade edilir (Çizelge 3.4). Bu özelliği ile GaAs, mikrodalga frekanslarda üzerinde çalışmasını sağlayan en önemli nedendir [81].

Çizelge 3.4. Düşük katkı konsantrasyonları için T=300K'deki tipik mobilite değerleri [113].

<i>Yarıiletken</i>	$\mu_n (cm^2(Volt)^{-1}s^{-1})$	$\mu_p (cm^2(Volt)^{-1}s^{-1})$
<i>Silisyum</i>	1350	480
<i>Galyum Arsenide</i>	8500	400
<i>Germanyum</i>	3900	1900

Çizelge 3.4'de görüldüğü gibi GaAs'ın düşük katkı konsantrasyonları için T=300K'deki elektron mobilitesinin silisyum'un elektron mobilitesinden yaklaşık 6 kat, germanyum'un elektron mobilitesinden yaklaşık 2 kattan daha yüksek olduğu açıkça görülebilir. Gerçekleştirilen çalışmalarda, GaAs tabanlı dijital devre elemanlarının silisyum tabanlı yapılara oranla 2 ile 5 kat arasında daha hızlı çalıştığı ve daha düşük güç kaybı gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, GaAs'ın yük taşıyıcı sürüklenme hızı avantajının yanı sıra yarıyalıtkan taban malzeme olarak üretilme özelliğinden dolayı yarıiletken endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özelliğiyle devre elemanları arasında yalıtım görevi göreceğinden, elektronik devrelerde karşımıza çıkan gürültünün azaltılması ve eksiksiz tümleşik bir devre üretimini sağlar [81].

Çizelge 3.5. GaAs kristalinin bazı temel özellikleri ve çalışmada kullanılan kristale ait özellikler [115].

<b>GaAs Genel Özellikler</b>					
Atom ağırlığı (g/mol)	144,63	Birim hacimdeki atom sayısı	4,42x10 <sup>22</sup>		
Kristal Yapısı	Zinc Blende	Özdirenç (Ω.cm)	10 <sup>8</sup>		
Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	5,32	Elektron yakınlığı (χ(eV))	4.15		
Erime sıcaklığı (°K)	1511	Dielektrik sabiti (ε)	12.8		
<b>Kullanılan Kristal Özellikleri</b>					
Katkısı ( <i>n</i> -tipi)	Katkı Yoğunluğu	Yüzey Yönelimi	Ön Yüzey	Çapı	Kalınlık
<b>Si</b>	<b>2.6x10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup></b>	<b>[100]</b>	<b>Parlatılmış</b>	<b>3"</b>	<b>~300μm</b>

Bu avantajlarının yanında GaAs yasak enerji aralığı ( $E_{g_{GaAs}} = 1,42eV$ ), silisyumun ( $E_{g_{Si}} = 1,12eV$ ) yasak enerji aralığından daha büyük ( $E_{g_{GaAs}} > E_{g_{Si}}$ ) olduğu için GaAs'ın özdirenci daha büyüktür. Özdirencin büyük olması, kısa azınlık taşıyıcı hayat süresine sahip olması durumuyla birleştiğinde GaAs'ın radyasyona karşı dayanıklı bir malzeme olmasına imkan sağlar [1]. Çizelge 3.5'de GaAs kristalinin bazı temel özellikleri ve çalışmada kullanılan kristale ait özellikler görülmektedir [115].

#### **3.4. Au/*n*-GaAs (MS) tipi (D<sub>1</sub>) SBDs, Au/saf PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>2</sub>) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>3</sub>) SBDs'İN HAZIRLANMASI**

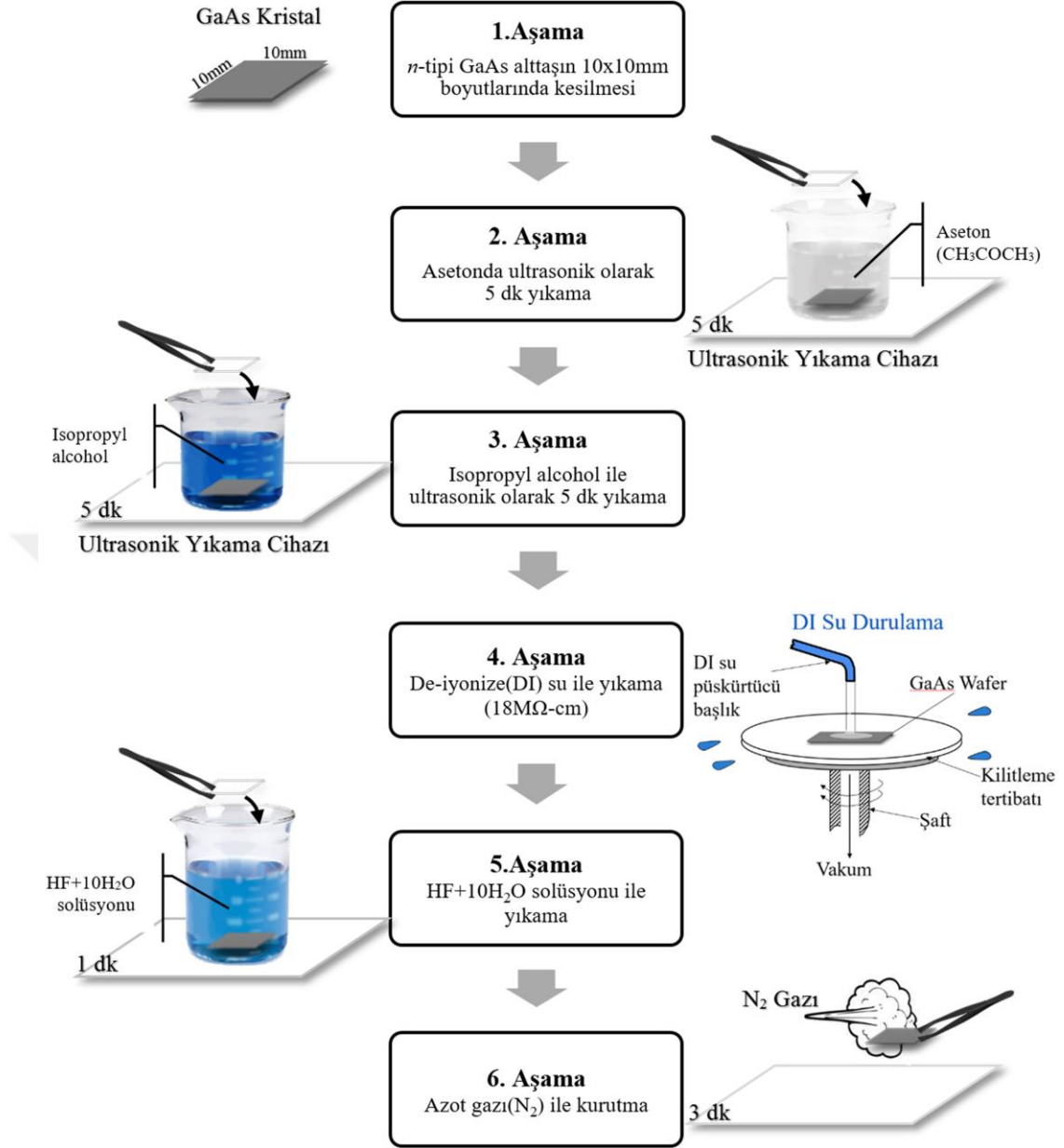
Bu kısım, Au/*n*-GaAs (MS) tipi (D<sub>1</sub>) SBDs, Au/saf PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>2</sub>) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>3</sub>) SBDs'in hazırlanması ile ilgili bilgileri içermektedir. Çalışmada, Moleculer Beam Epitaxy (MBE) tekniği ile büyütülmüş [100] doğrultulu, 300μm kalınlıkta, 3" çaplı, yüksek mobiliteye sahip *n*-tipi GaAs yarıiletken kullanılmıştır.

SBDs'in yapımında daha iyi sonuç alınabilmesi ve numune üzerindeki organik ve metalik kirleri gidermek amacıyla numuneler kimyasal temizlemeye tabi tutulmuştur. SBDs yapıların üretilmesine ait işlem sırası ise; *omik kontakların oluşturulması, Electrospinning yöntemi ile saf ve Gr-katkılı PVA organik/polimer tabakaların oluşturulması, doğrultucu (Schottky) kontakın oluşturulması* şeklindedir. Uygulanan bu işlemler detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır.

### 3.4.1. *n*-tipi GaAs Kristalin Temizlenmesi

D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs'in hazırlanmasında alttaş olarak 1-10 Ω cm özdirence, 300 µm kalınlığa ve [100] yüzey yönelimine sahip *n*-tipi GaAs (Si katkı) kullanılmıştır. Yarıiletken kristalin ön yüzeyi, satın alınan firma tarafından gerekli mekanik ve kimyasal parlatma işlemi uygulandığından ayrıca bir parlatma işlemine ihtiyaç duyulmayarak doğrudan kimyasal temizleme işlemine geçilmiştir. Kristalin yüzeyinin organik ve metalik kirlere arındırılması, oluşabilecek arayüzey durumlarının azaltılması ve sonuçların güvenilirliğinin artırılması amacıyla literatürde sıklıkla tercih edilen kimyasal temizleme yöntemi ve işlem sırası seçilmiştir.

İlk olarak, numunelerin hazırlanması için *n*-tipi GaAs alttaş 10mm genişliğinde ve uzunluğunda dilimler halinde kesildi. Daha sonra kristal, sırasıyla aseton (CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>), isopropyl alcohol ile 5 dk boyunca ultrasonik olarak, 18MΩ-cm özdirence sahip de-iyonize su ile yıkandı. Yüksek saflıktaki (%99,999) Au kullanılarak elde edilen omik kontakın oluşturulması süresince de HF+10H<sub>2</sub>O solüsyonu kullanılarak, doğal oksit tabakası önlenmiştir. Yarıiletken kristalin kimyasal temizleme işleminin son aşamasında, yüksek saflıkta (%99,99) Azot (N<sub>2</sub>) gazı ile 3dk kurutma işlemi, akabinde vakum ortamında bekletme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle ait işlem sırası ve kimyasal temizleme süreci ait şematik gösterim Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



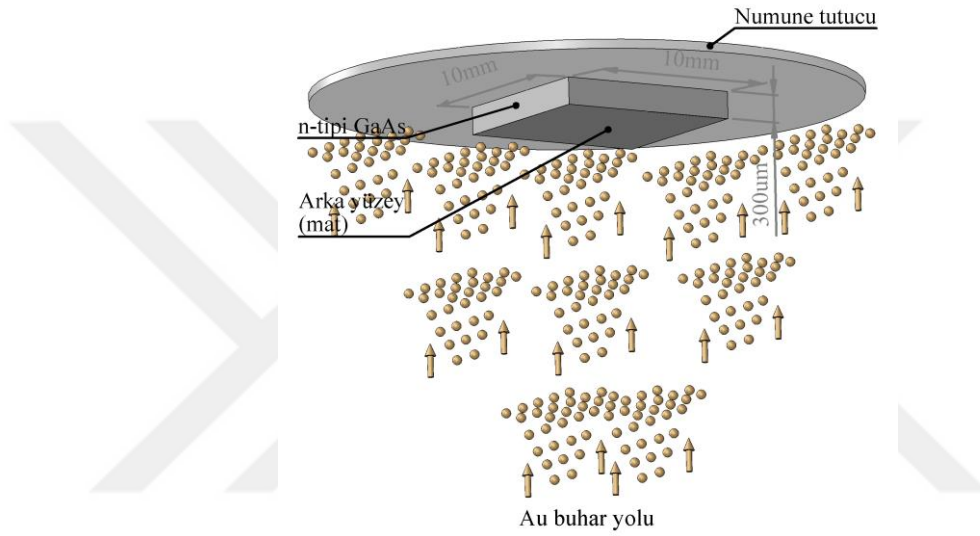
Şekil 3.7. GaAs kristalin kimyasal temizleme aşamaları.

### 3.4.2. Omik Kontaktların Oluşturulması

Atmosfer koşullarındaki bazı gazlar, fiziksel ve kimyasal işlemlerin gerçekleştirildiği ortamlarda istenmeyen olumsuzluklara neden olabilir. Yarıiletken malzeme üretimi esnasında, ortamda istenmeyen gaz atomların bulunması malzemenin safsızlığını, dolayısıyla elektriksel parametrelerini olumsuz yönde etkilemektedir [84]. Bundan dolayı, yarıiletken kristalin kimyasal temizleme işleminden sonra ve kontaktların oluşturulduğu ortamda vakum seviyesi yüksek tutulup, malzemeye girecek yabancı

atomları minimize ederekten en saf haliyle Schottky diyot elde edilmesi sağlanmalıdır.

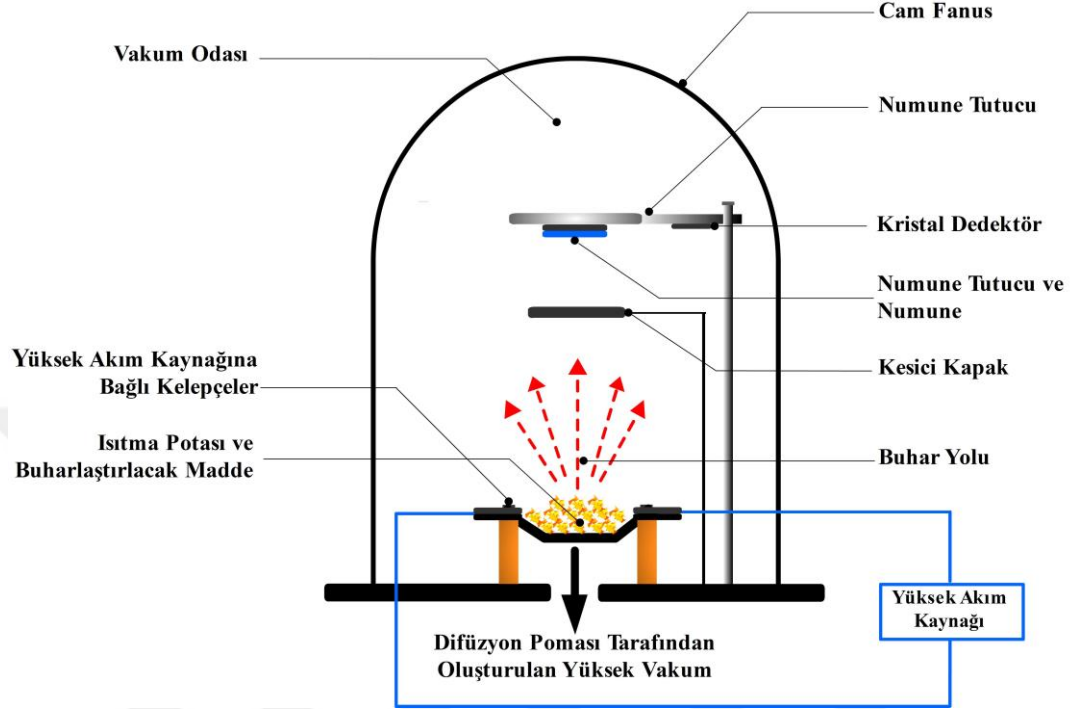
Daha önceden hazırlanan 10x10mm ebatlarındaki *n*-tipi GaAs kristal, temizleme işleminden sonra omik kontak oluşturmak için, kristalin mat yüzeyi aşağıya bakacak şekilde, Şekil 3.8’da verilen benzetimdeki bir numune tutucu üzerine konumlandırılarak, termal buharlaştırma ünitesine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Omik kontakın oluşturulmasına ait şematik gösterim.

Kimyasal olarak temizlenen %99,999 saflığındaki altın (Au) metali, termal buharlaştırma ünitesi içindeki potalara, kaplanmak istenen miktar kadar konulup sistem kapatılmıştır. Ünite içerisindeki vakumun istenilen değerlere düşmesi için belirli bir süre beklenmiştir. Vakum sistemi ile  $\sim 1 \times 10^{-6}$  Torr basınç altında, üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımıyla pota içerisine yerleştirilen Au metali buharlaştırılarak GaAs yaprağın mat yüzeyine  $\sim 150$ nm kalınlığında Au tabaka oluşturuldu. Oluşturulan Au film kalınlığının kontrolü, düzenek içindeki film ile aynı geometrik konumda bulunan ve üzerinde örnek ile aynı miktarda büyüyen kalınlık kontrol cihazı tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki aşamada yapı, düşük özdirençli omik kontak elde etmek için vakum ortamında ısıl işleme tabi tutularaktan çöktürme işlemi gerçekleştirilmiştir. D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs’in her birinde omik kontak oluşturma işlemi benzer süreçte ayrı ayrı uygulanmıştır. Sürecin uygulanmasında

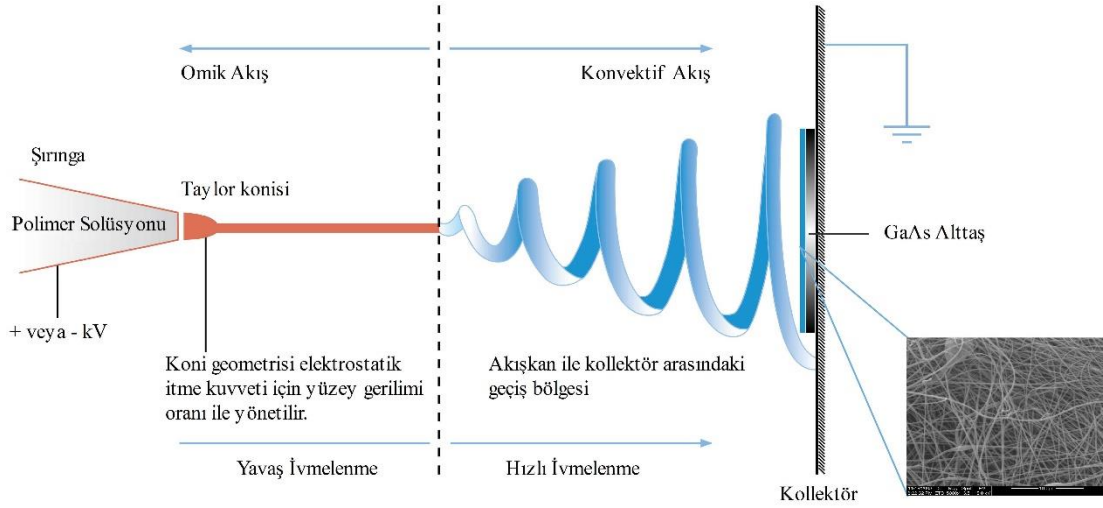
kullanılan termal buharlaştırma ünitesine ait şematik gösterim Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Termal buharlaştırma ünitesine ait şematik gösterim.

### 3.4.3. Electrospinning (Elektro-üretim) Yöntemi ile saf ve Gr-katlı PVA Organik/Polimer Tabakaların Oluşturulması

Elektronik, malzeme bilimi ve polimer mühendisliği gibi birçok farklı bilim ve mühendislik disiplinleri bünyesinde barındıran nano-teknolojide, nano ölçekteki fiber ince filmlerin üretimi için en basit ve etkin yöntemlerden biride electrospinning (elektro üretim) yöntemidir. Polimer bileşik ince filmlerin uygulamalarından biri de Schottky diyotlardır. Electrospinning yönteminde polimer ince film üretiminde yüksek gerilimden faydalanılmakta olup, gerekli deneysel düzenek temel olarak üç ana parçadan oluşmaktadır (Şekil 3.10). Bunlar: (a) Yüksek gerilim güç kaynağı, (b) Besleme ünitesi (şırınga metal iğne, vb.), (c) Toplayıcı metal plaka (kollektör, döner silindir, vb.)'dır [85].



Şekil 3.10. Electrospinning yönteminin şematik gösterimi [86].

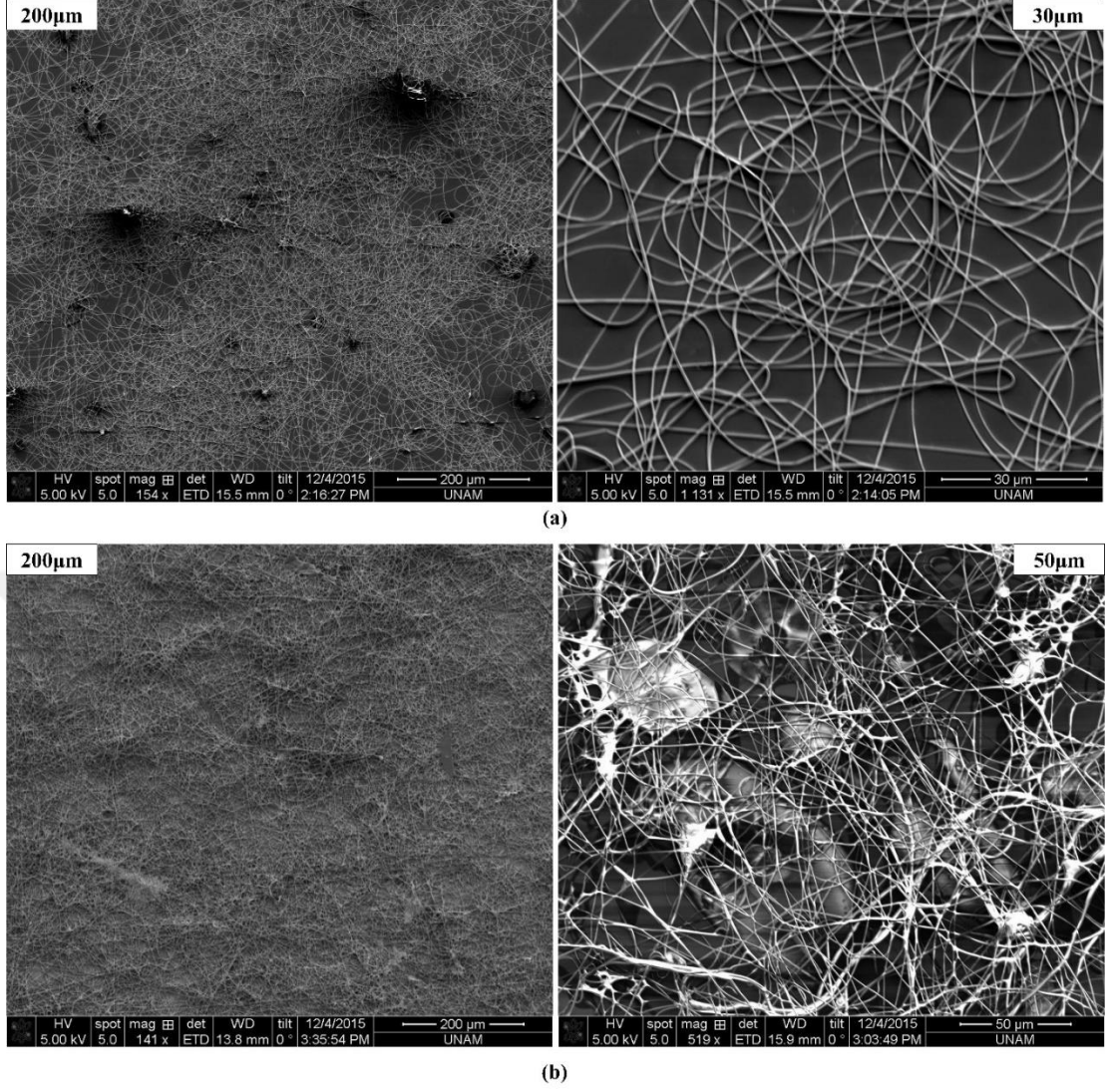
Bu yöntemde; uygun bir çözücüde veya ısı ile eritilen organik/polimer, şırınganın içerisine yerleştirilir. Polimer çözeltisi/eriğiğinin olduğu şırınganın metal iğne ucu ile toplayıcı/kollektör plaka arasına 50 kV'a kadar gerilim uygulanır. Kollektör üzerinde oluşan ağımsı yüzeyde, çapları 50 nm boyutunda nano-fiberlerin üretimine imkân sağlanır [87]. Diğer bir ifadeyle bu yöntem; yüksek elektrostatik alana maruz bırakılan polimer çözeltisinin, benzer yükler ile yüklenerek ayrışma ve incelleme gösterip, çok ince fibril yapılar oluşturmasıdır. Bu yöntemle, polimer çözeltisinin GaAs altaş üzerine kaplanmasıyla ilgili işlem sırasını açıklayacak olursak:

- Uygun bir çözücüde veya ısı ile eritilen polimer çözeltisi şırınga içerisine konular ve şırıngadan belirli bir mesafede toplayıcı/kollektör metal bir plaka konumlandırılır.
- Polimer çözeltisinin yüksek elektrostatik alana maruz bırakılması amacıyla, yüksek gerilim güç kaynağının artı (+) ucu şırınganın metal iğne ucuna bağlanırken, toplayıcı metal plaka da topraklanır.
- Yüksek gerilim güç kaynağından sağlanan gerilim değeri artırılıp yeterince yüksek değerlere ulaşan elektrik alan kuvveti, polimer çözeltisi üzerindeki visko-elastik ve yüzey gerilimi kuvvetlerini yener ve polimer molekülleri şırıngadan toplayıcıya metal plakaya doğru taşınır.
- Polimer moleküllerinin bu hareketi toplayıcı metal plaka üzerinde nano boyutta çaplara sahip lifler meydana getirir [87].

Çalışmada, saf PVA ve %7 grafen katkıli PVA polimer çözeltilerinin electrospinning yöntemiyle *n*-tipi GaAs alttaş üzerine kaplanmadan önce, MPS (D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub>) tipi SBDs için belirlenen katkılanma oranlarında çözeltiler hazırlanmıştır. Öncelikle, *n*-tipi GaAs alttaş üzerinde oluşabilecek doğal oksitlenmeyi temizlemek amacıyla HF+10H<sub>2</sub>O solüsyonu kullanılarak yıkandı. Şırınga içerisine yerleştirilecek organik/polimer solüsyonları saf PVA ve %7 grafen katkıli PVA olarak hazırlandı. Peristaltik şırınga pompası yardımıyla, saf ve %7 grafen katkıli PVA çözeltileri için şekilde verilen ivmelenme ile 0,9 mm iç çaplı metal iğne (10 ml) yardımıyla *n*-tipi GaAs kristalin parlak yüzeyine dağıtıldı. Metal iğne ucu, yüksek gerilim güç kaynağının artı (+) ucuna bağlanıp bir mengine de dikey konumlandırıldı. Düz alüminyum bir parça yaprak, nanofiber parçacıklarını toplamak için metal iğnenin 15 cm altına yerleştirildi. Yüksek gerilim güç kaynağından 20kV yüksek voltajın üzerinde bir voltaj uygulayarak jet iğne ucundan dışarı atıldı. Hazırlanan çözeltiler içerisindeki çözücü buharlaştı ve yüklü fiber, *n*-tipi GaAs alttaş üzerine çökertildi.

İnce film yüzey, elemanın performansını ve alınacak ölçümlerden elde edilecek sonuçların güvenilirliğini etkileyen, elektriksel ve fotovoltaiik özelliklerinin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Yüzey morfolojilerinin analizlerinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biride alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM)'dur. Organik/polimer solüsyonunun konsantrasyonu, fiziksel ve kimyasal (viskozite, elektriksel iletkenlik gibi) parametreleri, electrospinning yöntemi ile üretilen fiberlerin oluşumunu ve morfolojisini doğrudan etkiler [88]. Burada MPS (D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub>) tipi SBDs için SEM ölçümleri, saf PVA ve Gr-katkıli PVA'nın yüzey analizlerin yapılabilmesi amacıyla yüzey yapısı hakkında mikroskobik boyutta bilgi verir. *n*-tipi GaAs alttaş üzerine electrospinning yöntemiyle benzer süreçle ayrı ayrı olarak kaplanan PVA fiberlerin oluşumu ve morfolojisi Zeiss Supra 40 VP SEM kullanılarak çeşitli boyutlarda incelendi. Quorum Q 150R ES DC Sputter kullanılarak platin numuneler üzerine püskürtüldü ve fiber yapılar (saf ve Gr-katkıli) için SEM görüntüleri 10kV hızlandırma voltajında gözlemlendi. MPS tipi SBDs için *n*-tipi GaAs üzerinde nano-boyuttaki bir yapıda nano-fiberlerin yuvarlak, esnek, düzgün ve kesiksiz bir yapı oluşumları meydana getirdiği şekilde görülebilmektedir (Şekil 3.11. a ve b). Ayrıca bu oluşumlar etkin bir viskozite, iletkenlik ve yüzey gerilimini içerirler.

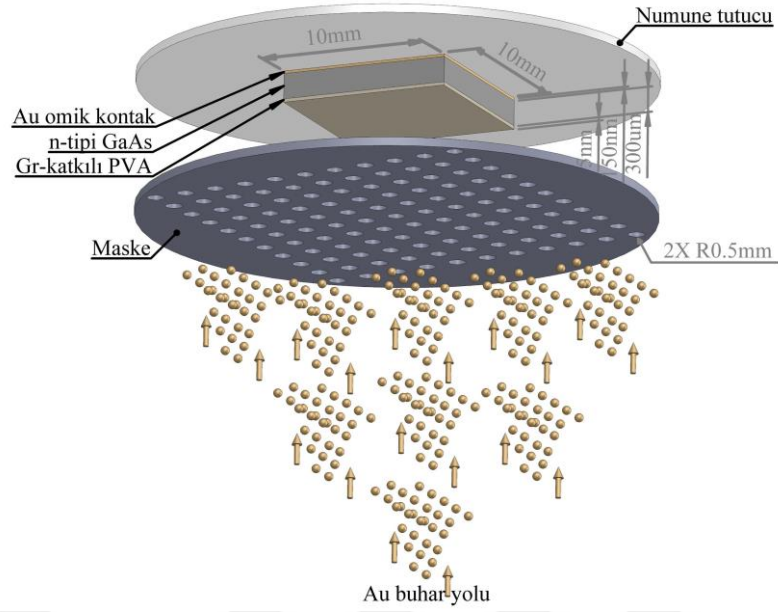




Şekil 3.11. Saf PVA (a) ve Gr-katkılı PVA (b) için nano-fiberlerin yüzey morfolojisi.

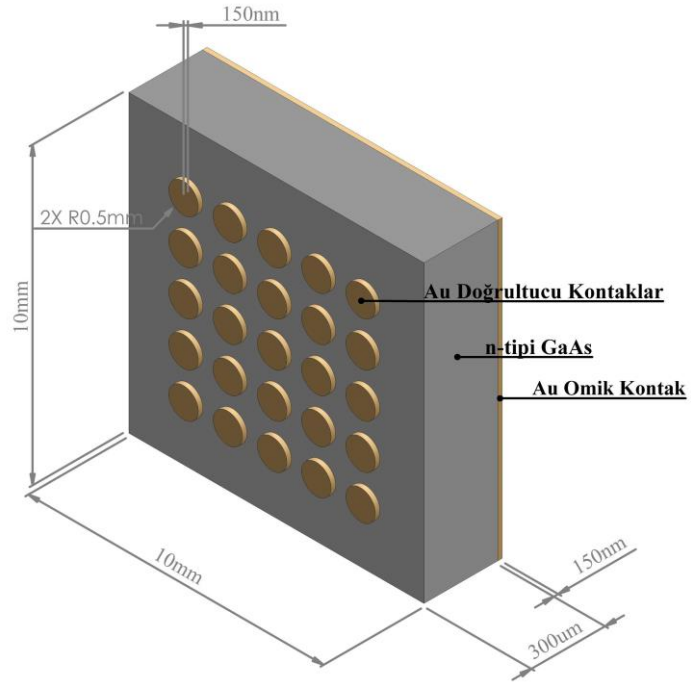
#### 3.4.4. Doğrultucu (Schottky) Kontakın Oluşturulması

*n*-tipi GaAs alttaş üzerine organik arayüzey tabakalarının (saf PVA ve Gr-katkılı PVA) oluşturma işleminden sonra, Schottky veya doğrultucu kontakların oluşturulması işlemine geçilmiştir. *n*-tipi GaAs kristalin, saf veya Gr-katkılı PVA kaplanmış yüzeyi aşağıya bakacak şekilde, üzeri çok sayıda 1mm çaplı deliklerden oluşan, Şekil 3.12’te verilen benzetimdeki bir maske üzerine konumlandırılarak termal buharlaştırma ünitesine yerleştirilmiştir.

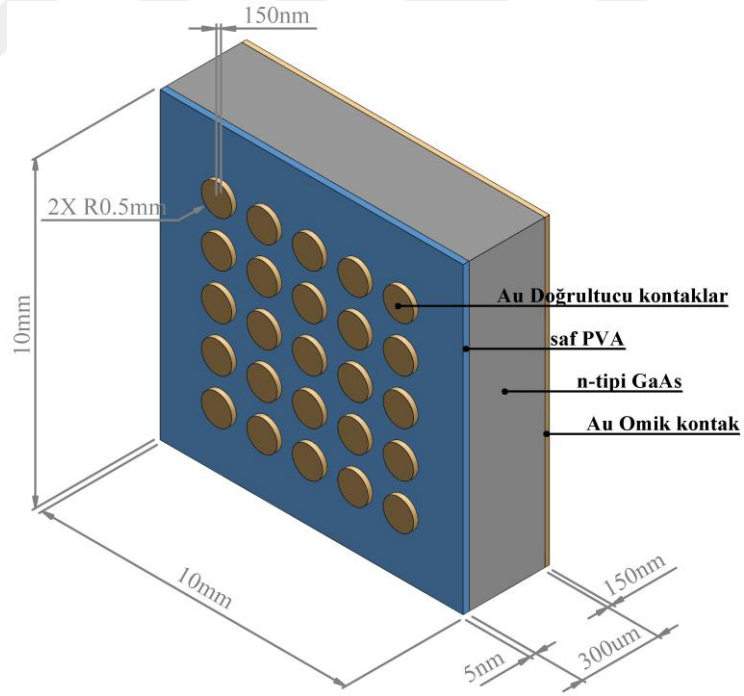


Şekil 3.12. Doğrultucu (Schottky) kontaktların oluşturulması.

Ünite içerisindeki vakumun istenilen değerlere düşmesi için belirli bir süre beklenmiştir. Termal buharlaştırma sistemi  $\sim 1 \times 10^{-6}$  Torr basınca ulaştığında, üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımıyla, kimyasal olarak temizlenip pota içerisine yerleştirilen %99,999 saflığındaki Au metali buharlaştırılarak, kristalin nano-fiberli yüzeyine yaklaşık olarak  $1 \mu\text{m}$  çapında ve  $\sim 150 \text{nm}$  kalınlığında (diyet alanı  $= 7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ) Au ile kaplandı. Buharlaştırma işlemi sırasında, tungsten flamanı üzerinden akım geçerken tel yüksek sıcaklık değerlerine ulaşır Au'nun sıcaklığı erime noktasına ( $1.064^\circ\text{C}$ ) gelindiğinde altın erimeye, kaynama noktasına ( $2.856^\circ\text{C}$ ) gelindiğinde buharlaşmaya başlar. Buharlaşan Au, *n*-tipi GaAs kristalin yüzeyine yapışarak ince film tabakası oluşturur. Oluşturulan Au film kalınlığının kontrolü, düzenek içindeki film ile aynı geometrik konumda bulunan ve üzerinde örnek ile aynı miktarda büyüyen kalınlık kontrol cihazı tarafından sağlanmaktadır. Sonuç olarak, yarıiletken numune üzerine  $\sim 150 \text{nm}$  kalınlığında Au ince film tabakası kaplanmış ve Au/*n*-GaAs (MS) tipi ( $D_1$ ) SBDs, Au/saf PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi ( $D_2$ ) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi ( $D_3$ ) SBDs'in fabrikasyon süreci tamamlanmıştır (Şekil 3.13).

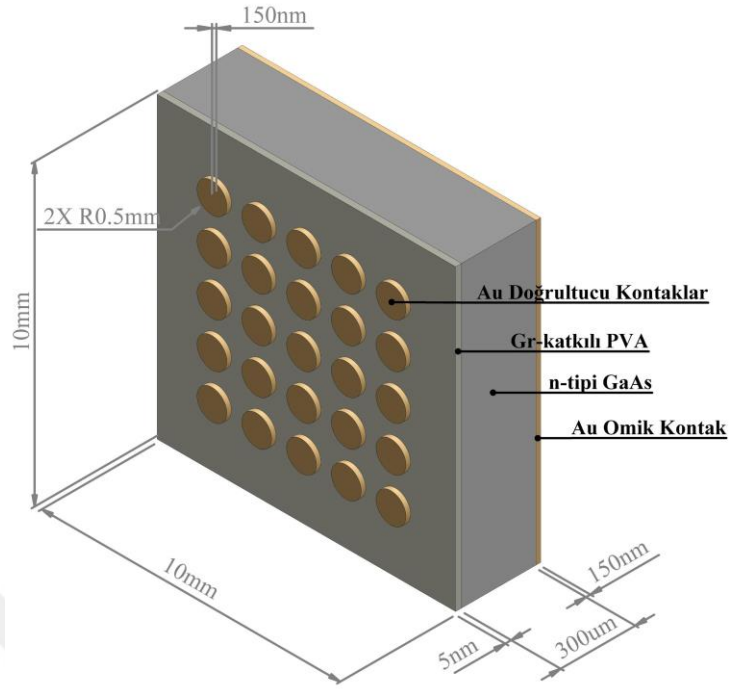


(a)



(b)

Şekil 3.13. Au/n-GaAs (MS) tipi ( $D_1$ ) SBDs, Au/saf PVA/n-GaAs (MPS) tipi ( $D_2$ ) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/n-GaAs (MPS) tipi ( $D_3$ ) SBDs'in şematik gösterimi.



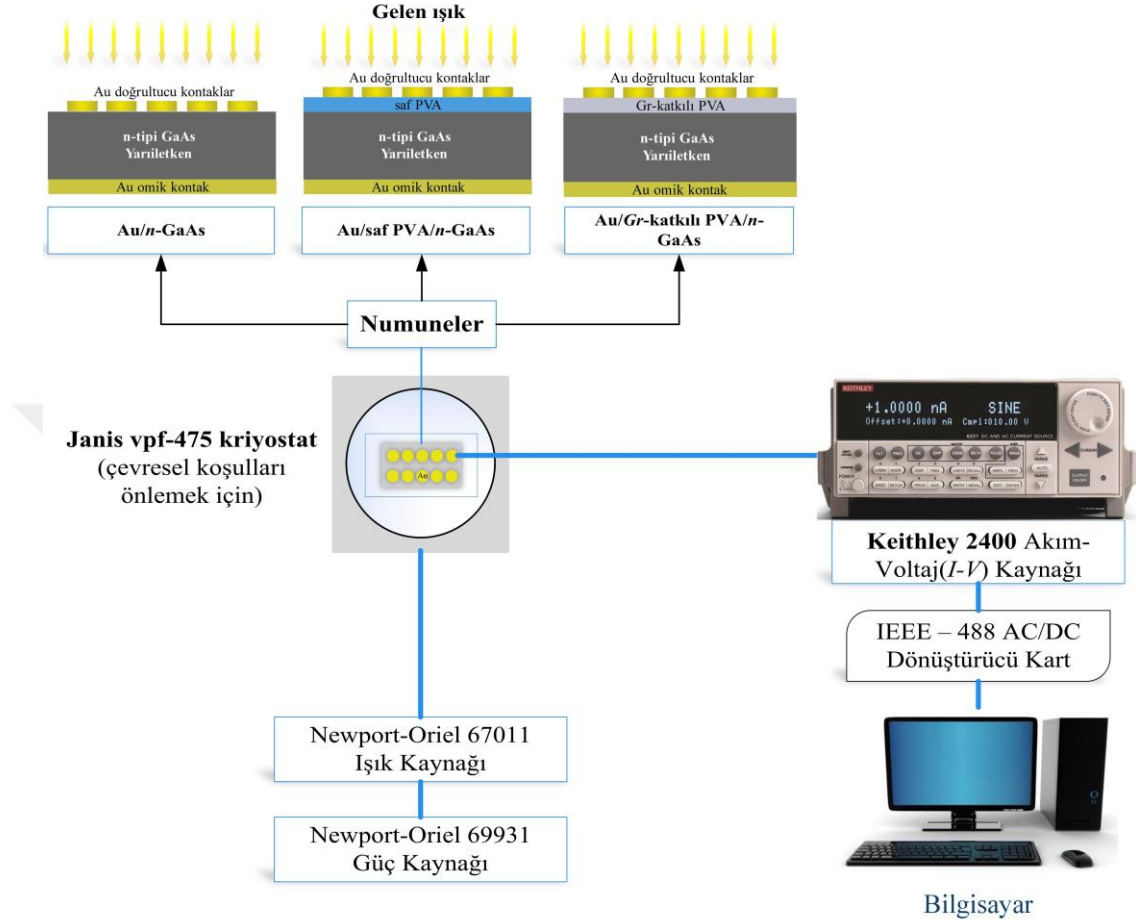
(c)

Şekil 3.13. (devam ediyor).

### 3.5. DENEYSEL ÖLÇÜM SİSTEMİ

$D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs'in doyum akımı ( $I_o$ ), idealite faktörü ( $n$ ), potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_{Bo}$ ), seri direnç ( $R_s$ ), kısa devre direnci ( $R_{sh}$ ) gibi temel diyot parametrelerinin, ışık şiddetinin bir fonksiyonu olarak incelenmesi amacıyla, akım-voltaj ( $I-V$ ) ölçüm işlemi karanlıkta ve farklı ışık koşulları altında oda sıcaklığında gerçekleştirildi. SBDs, Cu-holder üzerine gümüş pasta kullanılarak yerleştirildi ve daha sonra elektriksel kontaklar üst elektrotlara ince Cu teller ve Si pasta yardımıyla bağlandı. SBDs'in  $I-V$  ölçümleri, Keithley 2400 akım-voltaj kaynağı ve güneş simülatörü (Newport-Oriel ışık kaynağı (Model: 67011) ve Newport-Oriel güç kaynağı (Model: 69931) içerir.) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin tamamı, bir arayüz programı tarafından IEEE-488 A/D bir dönüştürücü kullanılarak kontrol edildi ve her hangi ses veya çevresel koşullarının etkisini önlemek için ölçümler yaklaşık  $1 \times 10^{-3}$  Torr vakumda Janis VPF-4785 kriyostat içerisinde gerçekleştirildi. Deneysel ölçümler Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fotonik

Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiş olup ölçüm sisteminin şematik görüntüsü Şekil 3.14’de verilmiştir.



Şekil 3.14.  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs’in  $I-V$  ölçüm sistemine ait şematik gösterim.

Bu deneysel ölçüm sisteminde kullanılan cihazlar aşağıdaki gibidir.

- Keithley 2400 akım-voltaj kaynağı
- Janis vpf-475 kriyostat
- Güneş simülatorü (Newport-Oriel ışık kaynağı (Model: 67011) ve Newport-Oriel güç kaynağı (Model: 69931))

#### Keithley 2400 akım-voltaj kaynağı

Farklı ışık koşullarında MS ve MPS tipi SBDs’in  $I-V$  ölçümlerinin alınabilmesi amacıyla Keithley 2400 akım-voltaj ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu ölçüm cihazı, hem akım kaynaklı gerilim ölçümü, hem de gerilim kaynaklı akım ölçümü

yapabilmektedir.  $\pm 1 \mu\text{V}$ ' dan  $\pm 200 \text{ V}$ ' a gerilim ve  $\pm 10 \text{ pA}$ ' den  $\pm 1 \text{ A}$ ' e kadar akım ölçümü yapabilmektedir.  $\pm \%0.15$  hassasiyetle ölçüm yapabilen cihaz IEEE-488 arayüz veri yoluna sahiptir.

#### Janis vpf-475 kriyostat

Sonuçların güvenilirliğini artırmak ve dış etkenlerin tüm ölçümler üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla MS ve MPS tipi SBDs'in  $I-V$  ölçümleri 4 optik pencerele bir Janis vpf-475 kriyostat içerisinde yaklaşık  $10^{-2}$  mbar basınç altında gerçekleştirilmiştir. Bu kriyostat, 79 K ile 425 K sıcaklık aralığında ölçüm yapabilme özelliğine sahip olup, farklı ışık seviyesi altında Schottky yapıların  $I-V$  ölçümleri oda sıcaklığında yapılmıştır.

#### Güneş simülatörü (Newport-Oriel ışık kaynağı (Model: 67011) ve Newport-Oriel güç kaynağı (Model:69931))

MS ve MPS tipi SBDs'in, Newport-Oriel 67011 ışık kaynağı (halojen lamba) ve Newport-Oriel 69931 güç kaynağı kullanılarak ışık seviyesine bağlı  $I-V$  ölçümleri gerçekleştirildi. Işık kaynağından çıkan 400-700 nm arasında dalga boyuna sahip fotonlar diyot üzerine odaklandıktan sonra ölçümler alınmıştır. Bu güneş simülatörü 0-250 W'lık geniş bir ışık seviyesi aralığına sahip olup  $\pm 1 \text{ W}$ 'lık adımlarla ölçüm almamıza imkan sağlar.

## BÖLÜM 4

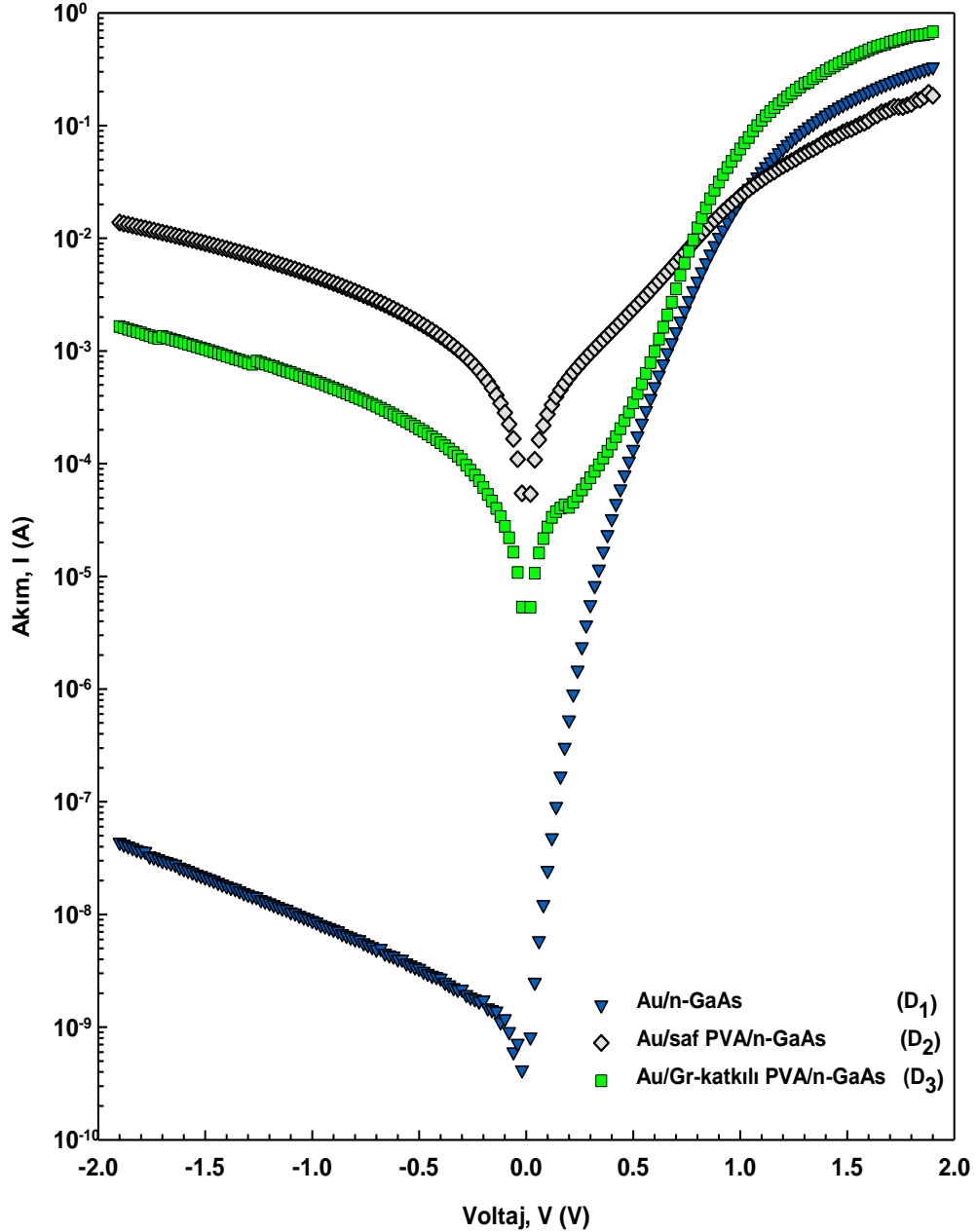
### ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde; hazırlanan Au/*n*-GaAs MS tipi (D<sub>1</sub>) SBDs, Au/saf PVA/*n*-GaAs MPS tipi (D<sub>2</sub>) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/*n*-GaAs MPS tipi (D<sub>3</sub>) SBDs; oda sıcaklığında, karanlık ve farklı ışık koşulları (50-200W) altındaki elektriksel ve fotovoltaik karakteristikleri, akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. İlk olarak, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs'in *I-V* karakteristikleri oda sıcaklığı, karanlık ve farklı ışık koşulları altında incelenmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Diyotlara ait temel elektriksel parametreler (sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_{Bo}$ ), idealite faktörü (*n*), doyum akımı (*I<sub>o</sub>*), seri direnç (*R<sub>s</sub>*) ve kısa devre direnci (*R<sub>sh</sub>*)), akım-voltaj (*I-V*) verilerinden faydalanılarak termiyonik emisyon (TE), Ohm yasası, Cheung metodu ve modifiye edilmiş Norde metodu kullanılmış ve hesaplanmıştır. Bu parametrelerin farklı metotlardan hesaplanması; her bir diyot için geçerli ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi ve sonuçların karşılaştırılabilmesine imkan sağlayacaktır.

#### **4.1. Au/*n*-GaAs (MS) tipi (D<sub>1</sub>) SBDs, Au/saf PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>2</sub>) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/*n*-GaAs (MPS) tipi (D<sub>3</sub>) SBDs'İN ODA SICAKLIĞINDAKİ AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİ**

Metal (M) ve yarıiletken (S) arasındaki organik arayüzey tabakalı (saf PVA ve Gr-katkılı PVA) ve arayüzey tabakasız Au/*n*-GaAs SBDs'in oda sıcaklığındaki yarı logaritmik ileri ve ters ön-gerilim *I-V* grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir. D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> tipi SBDs'in yüksek voltajlarda ( $V \geq 2 Volt$ ) ileri yön akımının düşük voltajda ( $V \leq -2 Volt$ ) ters yön akımından daha yüksek oluşu ile iyi bir doğrultma davranışı sergilediği açıkça görülmektedir.

Özellikle Gr-katkılı PVA organik/polimer tabaka ile MPS yapı, diğer yapılar göre düşük  $R_s$ 'den dolayı yeterli yüksek ileri ön-gerilim voltajlarında ( $V \geq +2\text{Volt}$ ) daha yüksek akım değerlerine sahiptir. Yani yüksek dielektrik Gr-katkılı PVA organik/polimer tabaka, metal ile yarıiletken arasındaki ara füzyonu önlemesinin yanında aynı zamanda çoğu yüzey durumlarını pasivize etmektedir.



Şekil 4.1.  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs'in oda sıcaklığındaki ileri ve ters ön-gerilim  $I$ - $V$  grafikleri.



Termiyonik emisyon (TE) teorisine göre,  $I$  ile  $V$  arasında SBDs'in bilinen ve neredeyse ideale yakın denklemi, aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir [1, 3]:

$$I = I_o \left[ \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

burada,  $I_o$  ters doyum akımını,  $V$  uygulanan voltajı,  $q$  elektron yükünü ( $1.6 \times 10^{-19}$  C),  $k$  Boltzmann sabitini ( $1.38 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>),  $T$  Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı,  $n$  her bir diyot için lineer bölgeden elde edilen diyotun idealite faktörünü,  $R_s$  diyotun seri direncini,  $IR_s$  ifadesi ise  $R_s$ 'den dolayı meydana gelen gerilim düşümünü ifade eder.  $I_o$  değeri,  $V=0$  anındaki  $\ln I-V$  eğrisinin lineer kısmına fit edilen doğrunun düşey eksenini kestiği kısımdan elde edilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I_o = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

burada,  $A$  doğrultucu kontak alanını,  $A^*$  etkin Richardson sabiti olup  $n$  tipi GaAs için  $8.16 \text{ A.cm}^{-2}.\text{K}^{-2}$ 'dir.  $\Phi_{Bo}$ , sıfır beslem veya belirgin engel yüksekliği olup Eşitlik (4.2)'den elde edilebilir. Üç farklı SBDs için  $n$  değerleri, ileri ön-gerilim  $\ln I-V$  grafiğinin lineer bölgesinden ayrıca hesaplanır ve eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilir [1, 3]:

$$n = \frac{q}{kT} \left( \frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (4.3)$$

Bu yolla, Eşitlik 4.2.'den elde edilen  $\Phi_{Bo}$  ifadesi, her bir diyot için elde edilen  $I_o$  ve  $A$  deneysel değerleri kullanılarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir:

$$\Phi_{Bo} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_o}\right) \quad (4.4)$$

Eşitlik (3) ve (4) kullanılarak hesaplanan  $\Phi_{Bo}$  ve  $n$  deneysel değerler sırasıyla, MS tipi (D<sub>1</sub>) SBDs için 0.6805 eV ve 1.918, MPS tipi (D<sub>2</sub>) SBDs 0.4260 eV ve 8.175 ve MPS tipi (D<sub>3</sub>) SBDs için 0.4952 eV ve 6.675 olarak karanlık koşullar için ölçümlendi ve ayrıca Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için  $I_o$ ,  $n$  ve  $\Phi_{Bo}$ ’ın elde edilen deneysel değerleri.

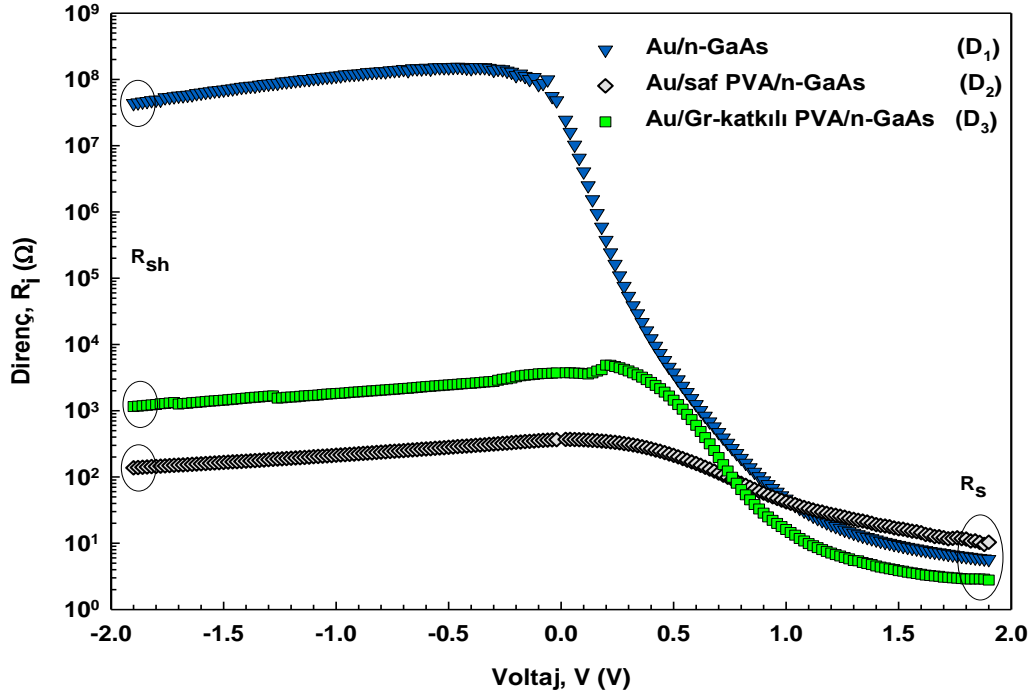
Numune		$I_o$ (A)	$n$	$\Phi_{Bo}$ (eV)
<b>Au/n-GaAs</b>	<b>(D<sub>1</sub>)</b>	8.12x10 <sup>-9</sup>	1.918	0.6805
<b>Au/saf PVA/n-GaAs</b>	<b>(D<sub>2</sub>)</b>	2.15x10 <sup>-4</sup>	8.175	0.4260
<b>Au/Gr-katkılı PVA/n-GaAs</b>	<b>(D<sub>3</sub>)</b>	1.35x10 <sup>-5</sup>	6.675	0.4952

Çizelgede de görülebildiği üzere; D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> diyotları için  $n$  değerleri anlamlı bir şekilde birden büyüktür ve ayrıca MPS tipi SBDs (D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub>) için  $n$  değerlerinin yüksek olması, arayüzey durumlarının ( $N_{ss}$ ) özellikle yoğun dağılımına, Au/n-tipi GaAs arasındaki polimer kompozit arayüzey tabakanın kalınlık ve homojenliğine, yanal olarak homojen olmayan engel yüksekliğine (BH) ve imaj kuvvet azalmasına atfedilmektedir [1,3,121]. MPS tipi SBDs’in  $I_o$  değerleri, MS tipi SBDs’den daha büyük iken, MPS tipi SBDs’in  $\Phi_{Bo}$  değerlerinden ise MS tipi SBDs’den daha düşüktür. Dahası, diyotların  $\Phi_{Bo}$  değerleri bir birleri ile karşılaştırıldığında, PVA (saf ve Gr-katkılı) arayüzey tabakası, arayüzey tabakasız yapıya göre engel yüksekliğini (BH) etkin bir şekilde değiştirmektedir.

$R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri, elektronik elemanların kalitesini belirleyen ve SBDs’in performansını etkileyen iki önemli parametredir. Diyotlar,  $R_s$  ve ara tabakaya sahip olduğundan, uygulanan toplam voltaj tüketim tabakası ve  $R_s$  tarafından paylaşılacaktır. Bu yüzden, bu elemanların kalitesi ve güvenilirliği önemli ölçüde arayüzey tabakası,  $R_s$  ve  $R_{sh}$  parametrelerine bağlıdır [122]. İdeal durumlarda;  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri sırasıyla 0 (sıfır) ve 10<sup>9</sup>’dan daha büyük olduğu varsayılır iken, bu durum pratikte anlamlı şekilde farklıdır.

Araştırmalarda, MS, MPS veya MIS tipi SBDs’in  $R_s$  değerlerini belirlemek için çok sayıda metot bulunmakta olup, bunlardan bazıları: Ohm Yasası, diyotun ileri ön-

gerilim  $I$ - $V$  verisi kullanılan Cheung and Cheung metodu [69] ve modifiye edilmiş Norde metodu [65] kullanılmıştır. Tüm bu metotlar,  $R_s$  için geçerli ve güvenilir sonuçlar elde etmek ve her bir diyotun sonuçları açısından karşılaştırılabilmesi için kullanılmıştır.



Şekil 4.2. D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için oda sıcaklığındaki  $R_i$ - $V_i$  grafiği.

İlk olarak,  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri, Ohm yasası kullanılarak sırasıyla  $I$ - $V$  verinin ileri ön-gerilim bölgesi ve ters ön-gerilim bölgesinden elde edilmiştir. Bu yolla her iki  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri, diyotlar için Şekil 4.2’de verilen yapı direnci ( $R_i$ )-voltaj( $V_i$ ) grafiğinden aşağıdaki eşitlik kullanılarak elde edildi:

$$R_i = \frac{dV_i}{dI_i} \quad (4.5)$$

burada,  $I$  diyotun akım değeridir. Şekil 4.2’de görülebileceği üzere; D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub>’in  $R_i$  değerlerinin maksimum olduğu yüksek ters ön-gerilim ( $V \leq -2\text{Volt}$ ) olduğu anda sırasıyla 43.57MΩ, 137.63Ω ve 1.15KΩ ile  $R_{sh}$  değerlerine karşılık gelirken, minimum olduğu yüksek ileri ön-gerilim ( $V \geq +2\text{Volt}$ ) noktalarında 5.73 Ω, 10.55 Ω

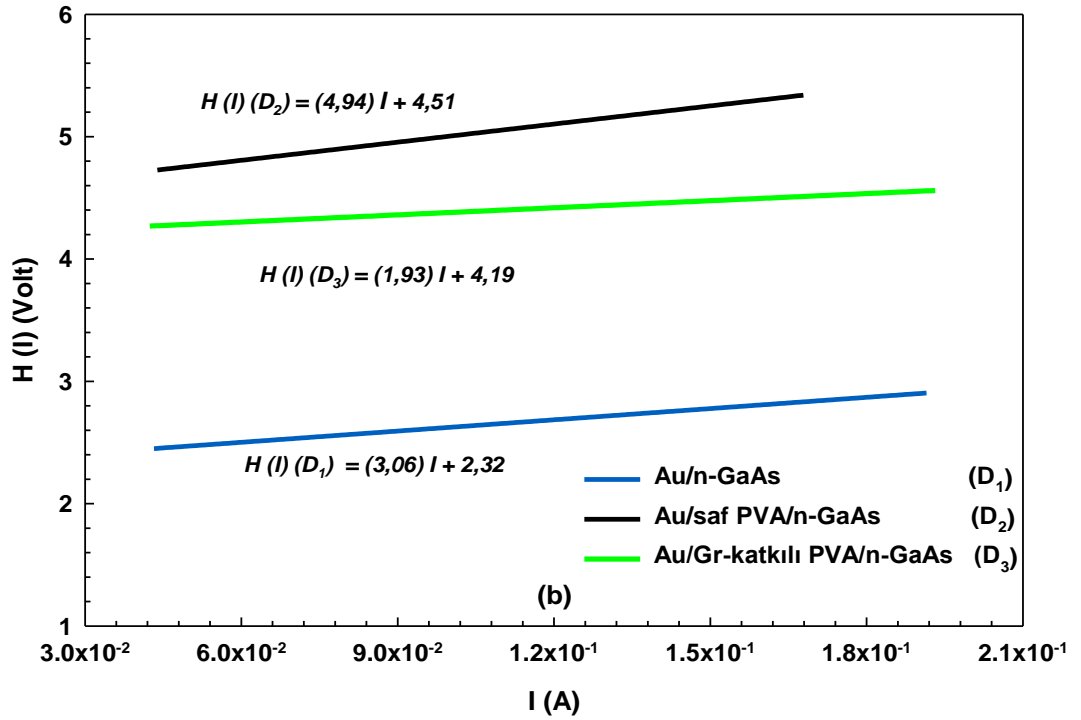
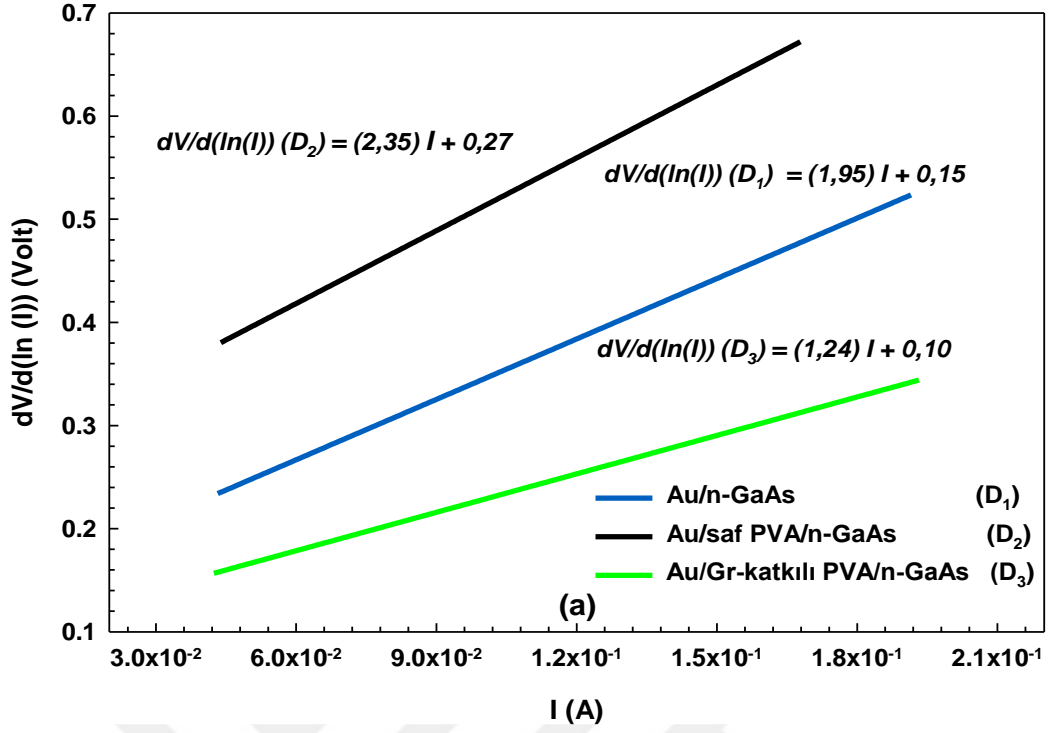
ve  $2.79\Omega$  ile  $R_s$  değerlerine karşılık gelmektedir.  $D_2$  diyotuna göre;  $D_3$  diyotu için  $R_{sh}$  direnç değerinin arttığı,  $R_s$  direnç değerinin ise azaldığı gözlemlenmiştir. Yani diğer MPS tipi SBDs ile karşılaştırıldığında, Gr-katkılı PVA'lı MPS yapının  $R_s$  değeri daha düşüktür.  $R_s$  ve  $R_{sh}$ 'deki bu davranış ( $R_s$  değerindeki azalma ve  $R_{sh}$  değerindeki artış), önemli ölçüde Gr-katkılı PVA ile doğrultma oranıyla ( $RR=I_F/I_R, \pm 2V$ ) ilgili olarak yapının kalitesini artırdığının bir delilidir. Buna ek olarak literatürde araştırmacılar,  $RR$ 'de önemli ölçüde bir artışa atfen ve bazı katkı materyalleri ile PVA'nın iletkenliğinin arttığını içeren çalışmalar gerçekleştirmişlerdir [35,121,123-125].

İkinci olarak, Cheung and Cheung metodu [69] ile ileri ön-gerilim  $I$ - $V$  eğrideki, aşağı doğru kavisli bölgenin verileri için, düz bir doğrudan geliştirilen bir metot yardımıyla, çalışmada  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  tipi SBDs'in  $R_s$  değerlerini belirlenmesi için gerçekleştirilmiştir. Cheung fonksiyonları aşağıdaki gibi açıklanabilir:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + \left( \frac{nkT}{q} \right), \quad (4.6)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) = IR_s + n\Phi_{B0}, \quad (4.7)$$

Şekil 4.3'de, oda sıcaklığındaki MS ve MPS tipi SBDs'in deneysel  $dV/d\ln(I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen  $R_s$  değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.



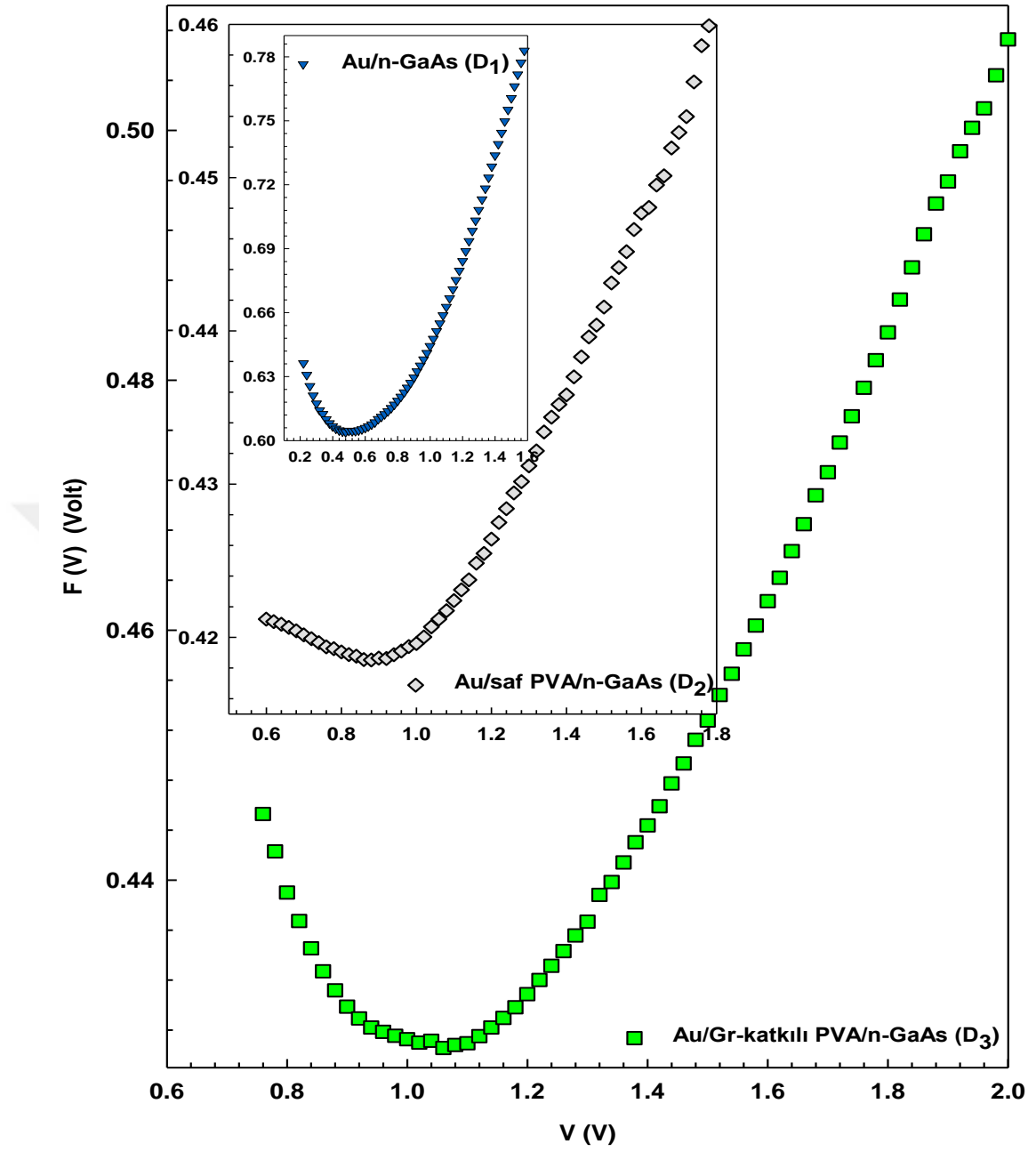
Şekil 4.3. D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için oda sıcaklığındaki  $dV/d(\ln I)$ -I (a) ve  $H(I)$ -I (b) grafikleri.

Şekilde de görülebileceği üzere; Eşitlik 4.6.'ya göre  $dV/d(\ln I)-I$ 'nin grafiği,  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs'in elektriksel parametreleri için y-ekseninin kesişim noktası olarak  $nkT/q$  ve eğiminden  $R_s$  değerini verecektir. Böylece  $R_s$  değerleri,  $dV/d(\ln I)-I$  grafiğinin eğiminden  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs için sırasıyla 1.95  $\Omega$ , 2.35  $\Omega$  ve 1.24  $\Omega$  olarak hesaplandı.  $H(I)-I$  grafiği, sonuçların karşılaştırılması ve hesaplanan  $R_s$  değerleri için ayrıca verildi ve  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs için sırasıyla 3.06  $\Omega$ , 4.94  $\Omega$  ve 1.93  $\Omega$  olarak elde edildi.

Son olarak, SBDs için  $\Phi_{Bo}$  ve  $R_s$  değerlerini belirlemek için kullanılan alternatif bir metot Norde metodu [65]'dur ve metoda ait fonksiyonun grafiği Şekil 4.4'de görülmektedir. Bununla birlikte Norde metodu,  $n$  değerleri 1 iken mümkündür. Sato ve Yasumura [66],  $n$  değerlerini nicel olarak 1 ile 2 arasında olduğu durumlar için bu metodu revize etti. Hazırlanan SBDs'ler için  $n$  değerleri, 2'den büyük olduğundan (Çizelge 4.1), modifiye edilmiş Norde fonksiyonu ( $F(V)$ ) Bohlin [68] tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I(V)}{AA^*T^2} \right), \quad (4.8)$$

burada,  $I$  akım-voltaj karakteristiklerinden elde edilen akım değerini,  $\gamma$  ise SBD'nin  $n$  değerinden daha büyük bir tamsayıdır (boyutsuz).



Şekil 4.4. D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs'in oda sıcaklığındaki  $F(V)$ - $V$  grafiği.

$F(V)$ - $V$  grafiğinin minimum noktaları ( $V_{min}$  ve  $I_{min}$  değerleri), aşağıda bağıntılar (Eşitlik 4.9a ve 4.9b) yardımıyla,  $\Phi_{Bo}$  ve  $R_s$  değerlerinin hesaplanması için kullanılmıştır:

$$\Phi_{Bo} = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q}, \quad (4.9a)$$

$$R_s = \frac{(\gamma - n)kT}{qI_{\min}} \quad (4.9b)$$

burada  $F(V_{\min})$ ,  $F(V)$ - $V$  grafiğindeki minimum nokta,  $V_{\min}$  ve  $I_{\min}$  ise sırasıyla  $V$  ve  $I$ 'nin uygun değerler olup ek olarak Çizelge 4.2'de verildi.

Çizelge 4.2. D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için modifiye edilmiş Norde fonksiyonundan elde edilen  $\Phi_{Bo}$  ve  $R_s$  değerleri.

Numune		$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$V_{\min}$ (V)	$I_{\min}$ (A)	$F(V_{\min})$ (V)
Au/n-GaAs	(D <sub>1</sub> )	257.80	0.739	0.48	1.05x10 <sup>-4</sup>	0.6040
Au/saf PVA/n-GaAs	(D <sub>2</sub> )	1.42	0.491	0.88	1.45x10 <sup>-2</sup>	0.4185
Au/Gr-katkılı PVA/n-GaAs	(D <sub>3</sub> )	0.09	0.553	1.059	8.99x10 <sup>-2</sup>	0.4266

Eşitlik 4.9a ve 4.9b'den elde edilen  $R_s$  ve  $\Phi_{Bo}$  değerleri, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> diyotları için sırasıyla 257.8  $\Omega$  ve 0.739 eV, 1.42  $\Omega$  ve 0.491 eV, 0.9  $\Omega$  ve 0.553 eV olarak hesaplandı. Deneysel çalışmamızda Ohm yasası, Cheung fonksiyonu ve modifiye edilmiş Norde fonksiyonundan elde edilen  $n$ ,  $R_s$  ve  $\Phi_{Bo}$  değerleri, iyi bir tutarlılık içerisindedir. Diğer taraftan, Çizelge 4.1 ve 2'de görülebileceği üzere her bir diyot için Norde fonksiyonun modifikasyonu ile elde edilen BH değerleri, kullanılan metodun doğallığı ve BH'nin voltaja bağlılık gösteren TE modelinden biraz daha yüksektir. Ohm yasası, Cheung metodu ve modifiye edilmiş Norde metodu kullanılarak elde edilen temel diyot parametre değerleri, karşılaştırılması amacıyla Çizelge 4.3'de verilmiştir.

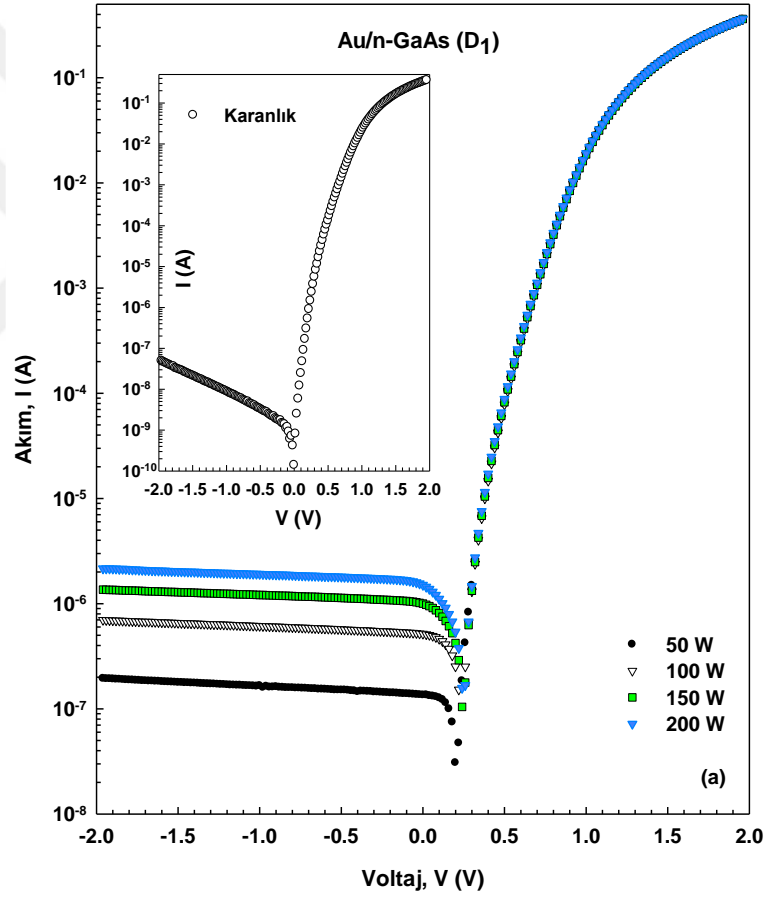


Çizelge 4.3. SBDs'ler için Ohm yasası, Cheung fonksiyonu ve modifiye edilmiş Norde fonksiyonundan elde edilen  $\Phi_{Bo}$ ,  $n$  ve  $R_s$  değerleri

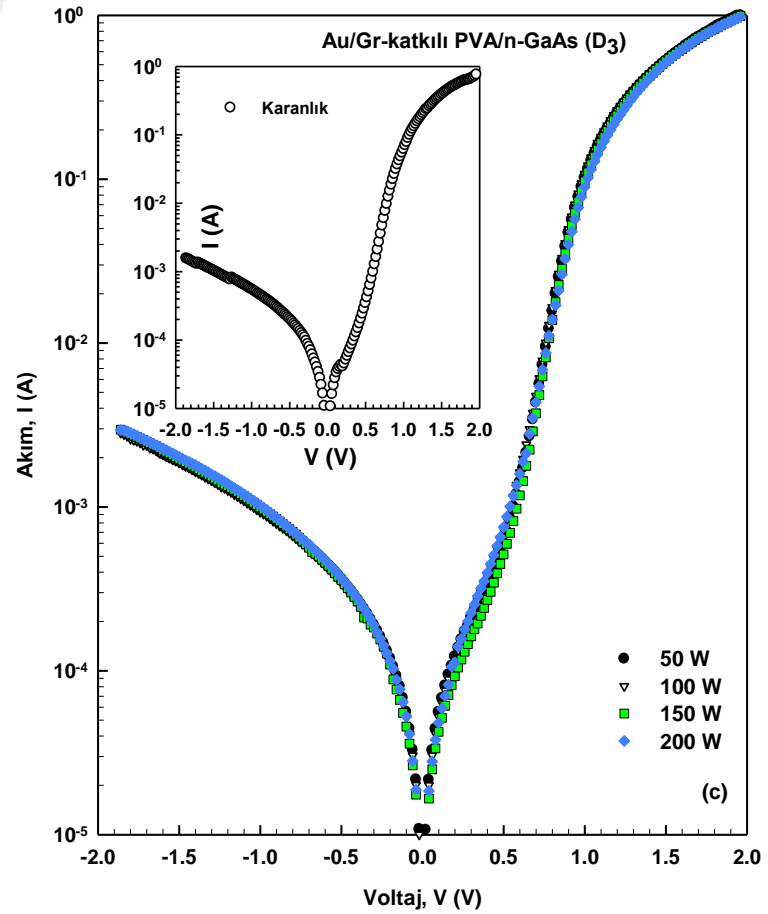
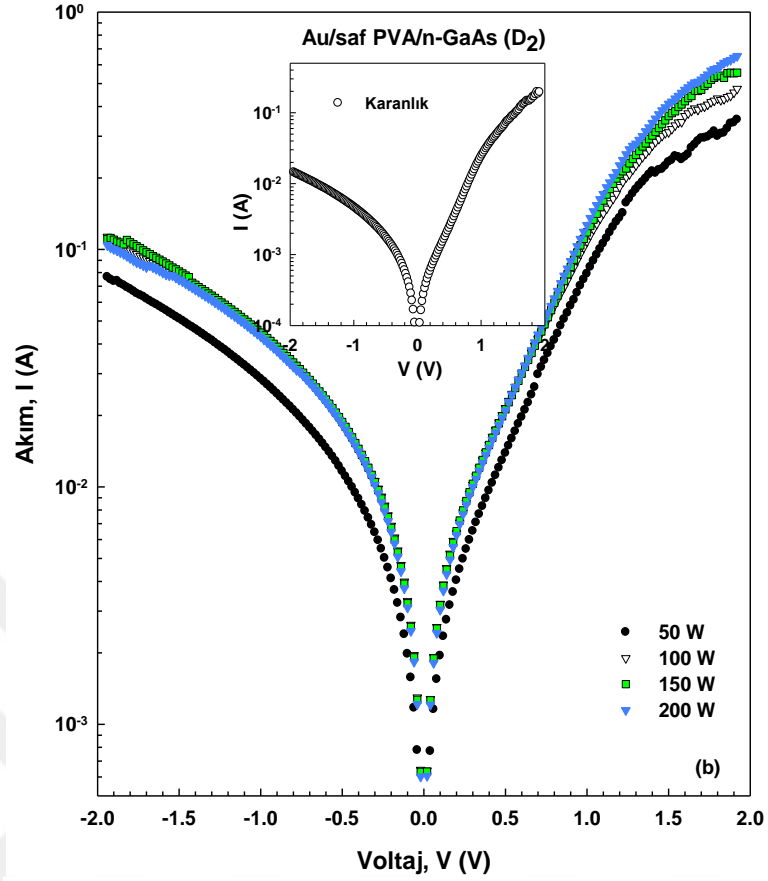
Metot	Au/n-GaAs (D <sub>1</sub> )	Au/saf PVA/n-GaAs (D <sub>2</sub> )	Au/Gr-katkılı PVA/n-GaAs (D <sub>3</sub> )
<b>Ohm yasası</b>			
Seri direnç, $R_s$ ( $\Omega$ )	5.73	10.55	2.79
Engel yüksekliği, $\Phi_{Bo}$ (eV)	0.6805	0.4260	0.4952
İdealite faktörü, $n$	1.918	8.175	6.675
Doyum akımı, $I_o$ (A)	$8.12 \times 10^{-9}$	$2.15 \times 10^{-4}$	$1.35 \times 10^{-5}$
<b>Cheung metodu</b>			
<b><math>dV/d(\ln I)</math>-I</b>			
Seri direnç, $R_s$ ( $\Omega$ )	1.95	2.35	1.24
<b><math>H(I)</math>-I</b>			
Seri direnç, $R_s$ ( $\Omega$ )	3.06	4.94	1.93
<b>Norde metodu</b>			
Seri direnç, $R_s$ ( $\Omega$ )	257.80	1.42	0.09
Engel yüksekliği, $\Phi_{Bo}$ (eV)	0.739	0.491	0.553

#### 4.2. Au/n-GaAs (MS) tipi (D<sub>1</sub>) SBDs, Au/saf PVA/n-GaAs (MPS) tipi (D<sub>2</sub>) SBDs ve Au/Gr-katkılı PVA/n-GaAs (MPS) tipi (D<sub>3</sub>) SBDs'İN KARANLIK VE FARKLI IŞIK KOŞULLARINDAKİ (50W-200W) AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİ

Karanlıkta ve farklı ışık koşullarında (50W-200W), M ve S arasındaki organik arayüzey tabakalı (saf PVA ve Gr-katkılı PVA) ve arayüzey tabakasız Au/n-GaAs SBDs'in akım-voltaj karakteristikleri, temel elektriksel parametrelerin incelenmesi için ölçümlendi ve Şekil 4.5 a, b ve c'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. D<sub>1</sub> (a), D<sub>2</sub> (b) ve D<sub>3</sub> (c) SBDs'in karanlıkta ve farklı ışık koşullarında akım-voltaj eğrileri.



Şekil 4.5. (devam ediyor).

$D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  tipi SBDs'in yüksek ileri ön-gerilim ( $V \geq 2 \text{ Volt}$ ) değerlerindeki ileri yön akımının, yüksek ters ön-gerilim ( $V \leq -2 \text{ Volt}$ ) değerlerindeki ters yön akımından daha yüksek oluşu ile iyi bir doğrultma sergilemesinin yanında, aynı zamanda fotovoltaik bir davranış sergilediği şekilde açıkça görülmektedir.

Ayrıca, yüksek ön-gerilim bölgesi ( $-2 \geq V$ ) için  $D_1$  ve  $D_2$  SBDs'in ters yön akımı, her bir ışık seviyeleri için artarken,  $D_3$  SBDs'in ters yön akımında değişim neredeyse sabittir. Diğer taraftan,  $D_2$  SBDs'in ileri yön akımı her bir ışık seviyesinde (50-200W) önemli ölçüde artarken,  $D_1$  ve  $D_3$  SBDs'in ileri yön akımında küçük bir değişim gözlemlenmektedir. Bu üç farklı SBDs için, farklı ışık şiddeti/seviyesi (50-200W) için ileri ve ters ön-gerilim durumunda karşılık gelen akım değerleri, karanlık koşullar altındaki akım değerlerinden daha yüksektir.

Karanlık ve farklı ışık koşulları altında özellikle  $D_3$  diyotu, diğer SBDs ( $D_1$ ,  $D_2$ ) göre düşük  $R_s$ 'den dolayı yeterli yüksek ileri ön-gerilim ( $V \geq +2$ ) değerlerinde daha yüksek akım değerlerine sahiptir. Bu koşullarda, yalıtkan bir tabaka olarak yüksek dielektrik Gr-katkılı PVA, M ile S arasındaki ara füzyonu önlemesinin yanında aynı zamanda yüzey durumlarının çoğunu pasivize etmektedir.

TE teorisine göre,  $I$  ile  $V$  arasında SBDs'in bilinen ve neredeyse ideale yakın denklemi, daha önce Eşitlik 4.1'de ifade edilmişti.  $V=0$  anında,  $\ln I-V$  eğrisinin ileri ön-gerilim kısmındaki lineer bölgeye fit edilen doğrunun düşey eksenini kestiği kısımdan elde edilen  $I_0$  değeri ise, Eşitlik 4.2.'de verilen matematiksel ifade yardımıyla  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  tipi SBDs için karanlık ve farklı ışık seviyeleri altında hesaplanabilir.  $\Phi_{Bo}$ , sıfır beslem engel yüksekliği ise Eşitlik 4.2'den elde edilebilir. Bu yolla elde edilen  $\Phi_{Bo}$  ifadesi Eşitlik 4.4'de ayrıca verilmiştir. Karanlıkta ve farklı ışık koşulları altında  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  tipi SBDs için  $n$  değerleri, ileri ön-gerilim  $\ln I-V$  grafiğinin lineer bölgesinden, Eşitlik 4.3 ifadesi yardımıyla ayrıca hesaplanabilir.

Deneysel olarak, üç farklı SBDs'in  $\Phi_{Bo}$  ve  $n$  değerleri, karanlık altında sırasıyla 0.6805 eV ve 1.918 ( $D_1$ ), 0.4260 eV ve 8.175 ( $D_2$ ), 0.4952 eV ve 6.675 ( $D_3$ ) olarak bulundu. Diğer taraftan, 200W ışık seviyesi altındaki  $\Phi_{Bo}$  ve  $n$  değerleri, sırasıyla 0.6515 eV ve 2.535 ( $D_1$ ), 0.3635 eV ve 9.159 ( $D_2$ ), 0.4773 eV ve 6.953 ( $D_3$ ) olarak

bulundu. Elde edilen bu değerler ve diğer farklı ışık şiddetlerine ait  $\Phi_{Bo}$  ve  $n$  değerleri Çizelge 4.4'de ayrıca verilmiştir.

İyi bilindiği üzere; ışık seviyesi altında valans banttaki yüklerin iletim bandına uyarılması, özellikle ters ön-gerilim koşulları altında akımın artışına yol açmaktadır [126].

Diğer bir deyişle, SBD ışık seviyesine maruz bırakıldığında, yüzey durumlarındaki veya valans banttaki elektronlar yeterli enerjiyi soğurur ve böylece kolayca iletim bandına geçerler. Ters ön-gerilim koşulu altında, eklem bölgesindeki hem iç hem de dış elektrik alanları aynı yönlüdür. Yüksek toplam elektrik alanı altında, elektron-hol çifti ışınması kolay bir şekilde rekombinasyona uğrayamaz. Diğer taraftan; ileri ön-gerilim altında toplam elektrik alanı, iç ve dış elektrik alanının zıt olmasından dolayı ters ön-gerilim koşulundan daha azdır. Bu düşük elektrik alanından dolayı, oluşan elektron-hol çiftlerinin bazıları, rekombinasyona uğrayacaktır. Bundan dolayı, foto-akımdaki bu artış, engel yüksekliğinin (BH) azalmasına, idealite faktörünün ( $n$ ) ise artmasına yol açar.

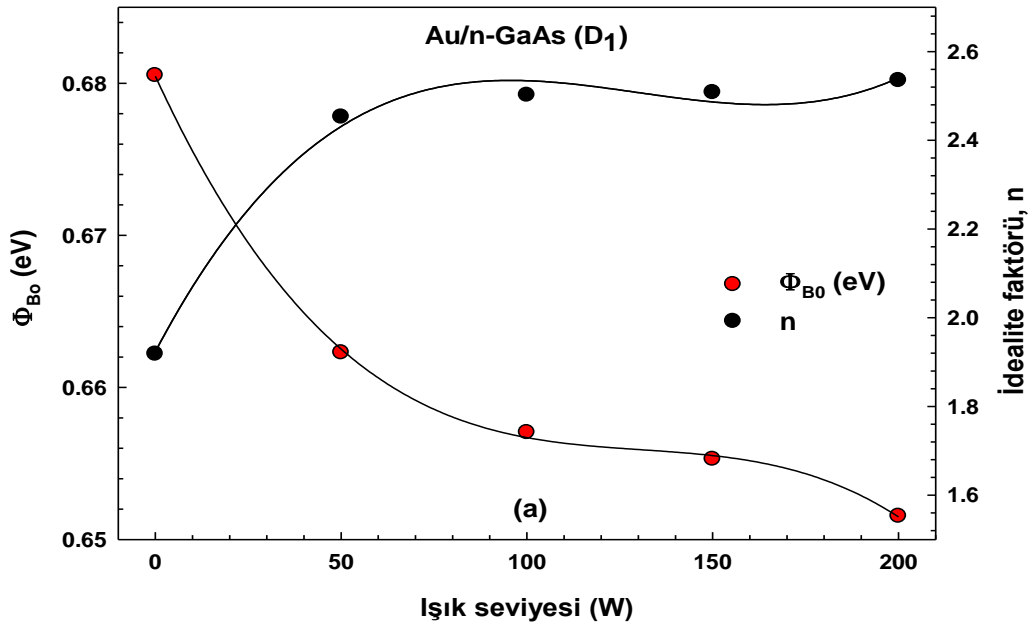
Işık seviyesi ile  $n$  ve BH davranışının başka bir açıklaması, metal ve yarıiletken arasındaki engel homojensizliği ve ışık etkisi altında taşıyıcıların moleküler olarak yeniden dizilimi ve yapılanması olabilir [127]. Benzer şekilde, ışık seviyesi altında SBD'nin kapasitans değeri, elektron-hol çiftlerinin oluşturulması nedeniyle, özellikle tersinim ve tüketim bölgelerindeki karanlık koşullardan daha yüksektir. Böylece, ışık altında ters ön-gerilim  $C^2$ - $V$  eğrisi, kesişim veya difüzyon potansiyelinde bir azalmaya yol açar. Dolayısıyla, tüketim tabakası genişliğinde ( $W_D=(2\epsilon_s\epsilon_0V_0/qN_A)^{0.5}$ ) azalma olur.  $W_D$ 'deki bu azalma, idealite faktöründe ( $n=1+d/\epsilon_i(\epsilon_s/W_D+qN_{ss})$ ) bir artışa yol açar [1, 2, 3]. Bu durum, Şekil 4.6 a, b ve c'de açıkça görülmektedir.

Çizelge 4.4. Karanlık ve farklı ışık koşulları altındaki D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için elde edilen deneysel  $I_o$ ,  $n$  ve  $\Phi_{Bo}$  değerleri.

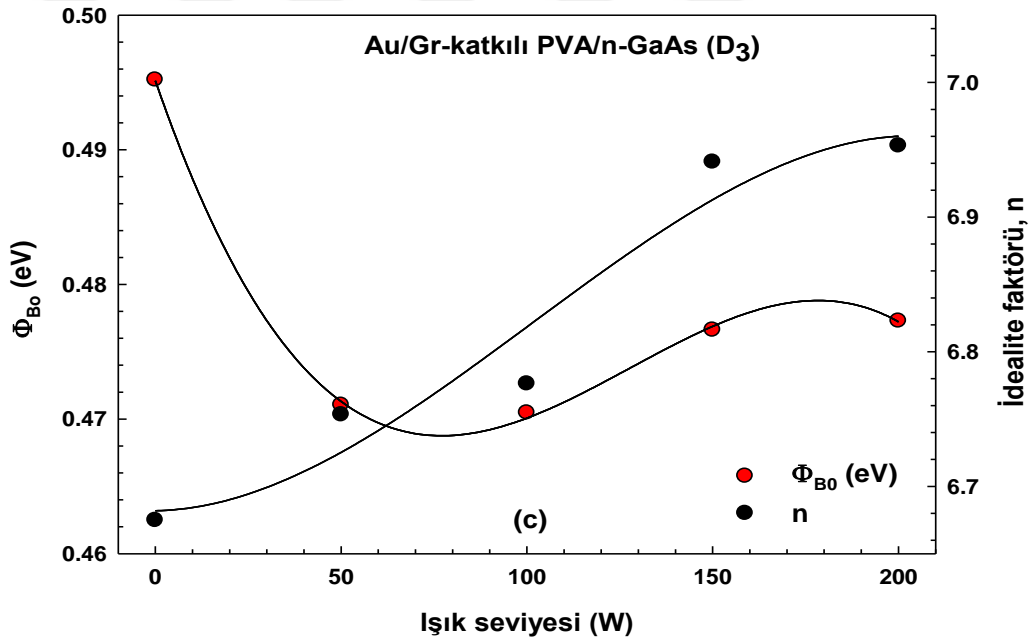
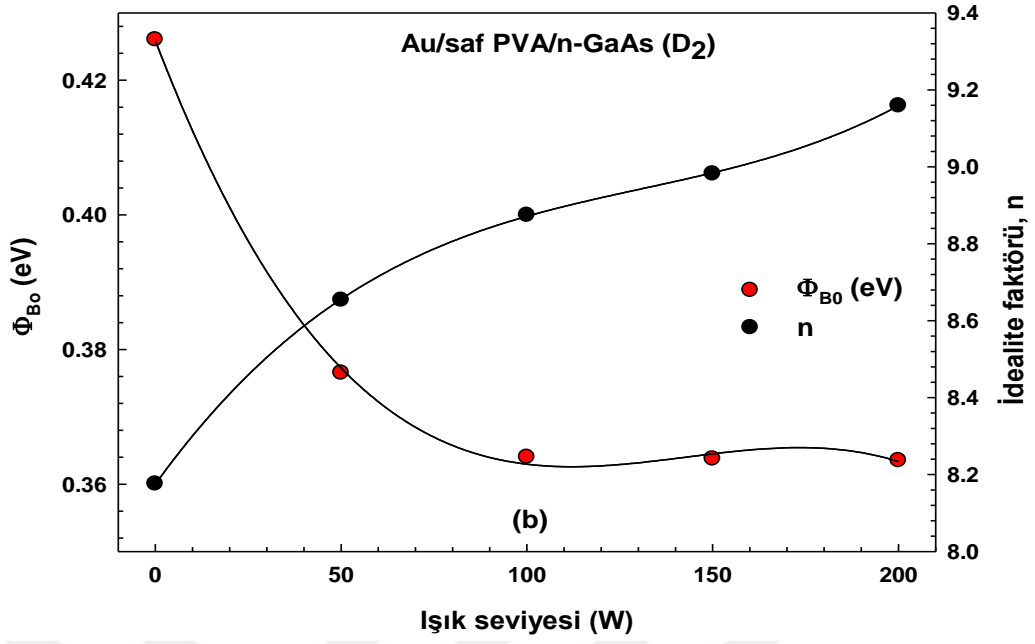
Işık seviyesi (W)	Au/n-GaAs (D <sub>1</sub> )			Au/saf PVA/n-GaAs (D <sub>2</sub> )			Au/Gr-katkılı PVA/n-GaAs (D <sub>3</sub> )		
	$I_o$ (A)	$n$	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$I_o$ (A)	$n$	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$I_o$ (A)	$n$	$\Phi_{Bo}$ (eV)
<b>0</b>	8.12x10 <sup>-9</sup>	1.918	0.6805	2.15x10 <sup>-4</sup>	8.175	0.4260	1.35x10 <sup>-5</sup>	6.675	0.4952
<b>50</b>	1.68x10 <sup>-8</sup>	2.453	0.6623	1.55x10 <sup>-3</sup>	8.654	0.3765	3.54x10 <sup>-5</sup>	6.753	0.4710
<b>100</b>	2.08x10 <sup>-8</sup>	2.502	0.6570	2.55x10 <sup>-3</sup>	8.875	0.3640	3.62x10 <sup>-5</sup>	6.776	0.4705
<b>150</b>	2.23x10 <sup>-8</sup>	2.508	0.6553	2.58x10 <sup>-3</sup>	8.982	0.3638	2.83x10 <sup>-5</sup>	6.941	0.4766
<b>200</b>	2.59x10 <sup>-8</sup>	2.535	0.6515	2.61x10 <sup>-3</sup>	9.159	0.3635	2.75x10 <sup>-5</sup>	6.953	0.4773

Çizelge 4.4’de görüldüğü üzere,  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs için artan ışık seviyeleri ile  $n$  değerleri artarken,  $\Phi_{Bo}$  değerleri ise hemen hemen azalmıştır. Bu durum, Şekil 4.6 a, b ve c’de açıkça görülebilmektedir. Çizelgede ayrıca, karanlıkta ve farklı ışık seviyelerinde (50-200W)  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs için elde edilen  $n$  değerleri önemli ölçüde 1’den daha büyüktür. Bunun dışında  $D_2$  veya  $D_3$  SBDs için  $n$ ’nin yüksek değerlikli olması, organik/polimer PVA (saf veya Gr-katkılı) arayüzey tabakanın kalınlığına,  $N_{ss}$  yoğunluğuna (üst ölçekte), imaj kuvvet azalmasına ve yanal olarak homojen olmayan BH’a atfedilebilir [1,3,121].

Deneysel sonuçlar açısından,  $D_2$  veya  $D_3$  SBDs için elde edilen  $\Phi_{Bo}$  değerleri,  $D_1$  diyotundan daha düşüktür. Dahası, Şekil 4.6’da görülebileceği üzere karanlıkta ve farklı ışık şiddetleri altında diyotların  $\Phi_{Bo}$  değerleri birbiri ile karşılaştırıldığında, arayüzey tabakalı SBDs (saf PVA ve Gr-katkılı PVA)’in, arayüzey tabakasız diyota göre BH’yi önemli ölçüde değiştirmektedir.



Şekil 4.6.  $D_1$  (a),  $D_2$  (b) ve  $D_3$  (c) SBDs için  $\Phi_{Bo}$  ve  $n$  - ışık seviyesi (W) eğrileri.



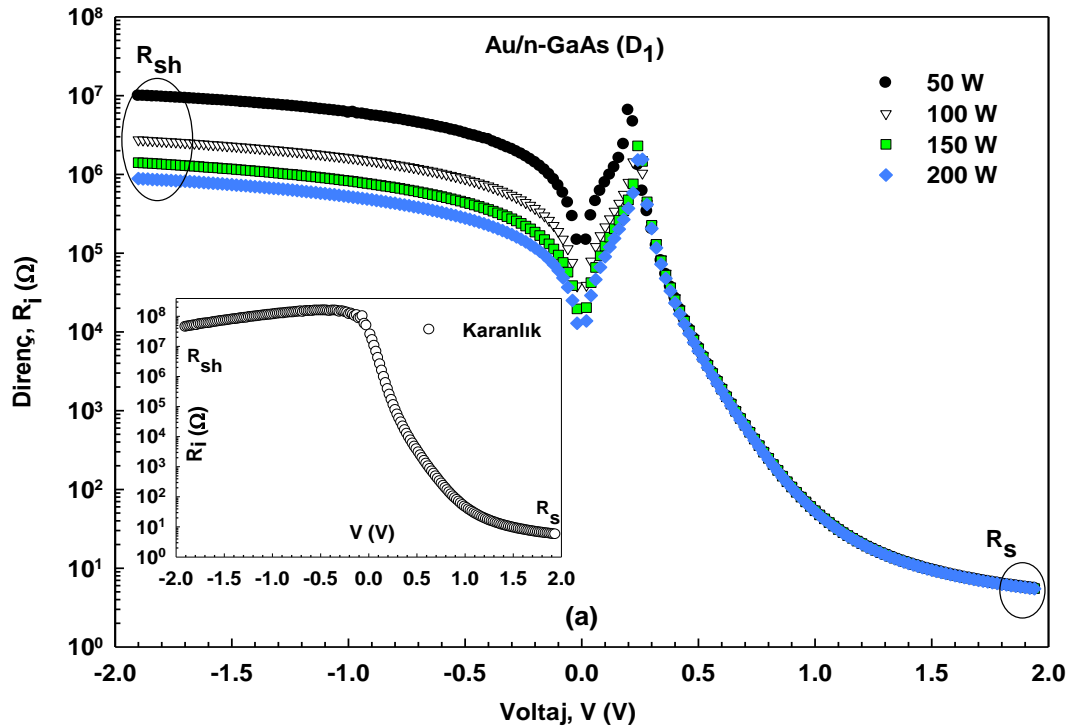
Şekil 4.6. (devam ediyor).

Elektronik elemanların kalitesini ve performansını incelemeye  $R_s$  ve  $R_{sh}$  parametreleri belirleyici olması açısından çok önemlidir. Karanlık ve farklı ışık seviyesi koşulları altında,  $R_i$  (yapı direnci) -  $V_i$  (uygulanan besleme voltajı) eğrilerinden  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri (pratikte, idealden oldukça farklıdır) elde edildi. D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için bu değerleri belirlemek için daha önceden de bahsedildiği üzere çok sayıda metot vardır. Bundan dolayı, geçerli ve güvenilir sonuçlar elde etmek ve her bir diyot için sonuçların karşılaştırılabilmesi amacıyla belirlenen bu koşullar için

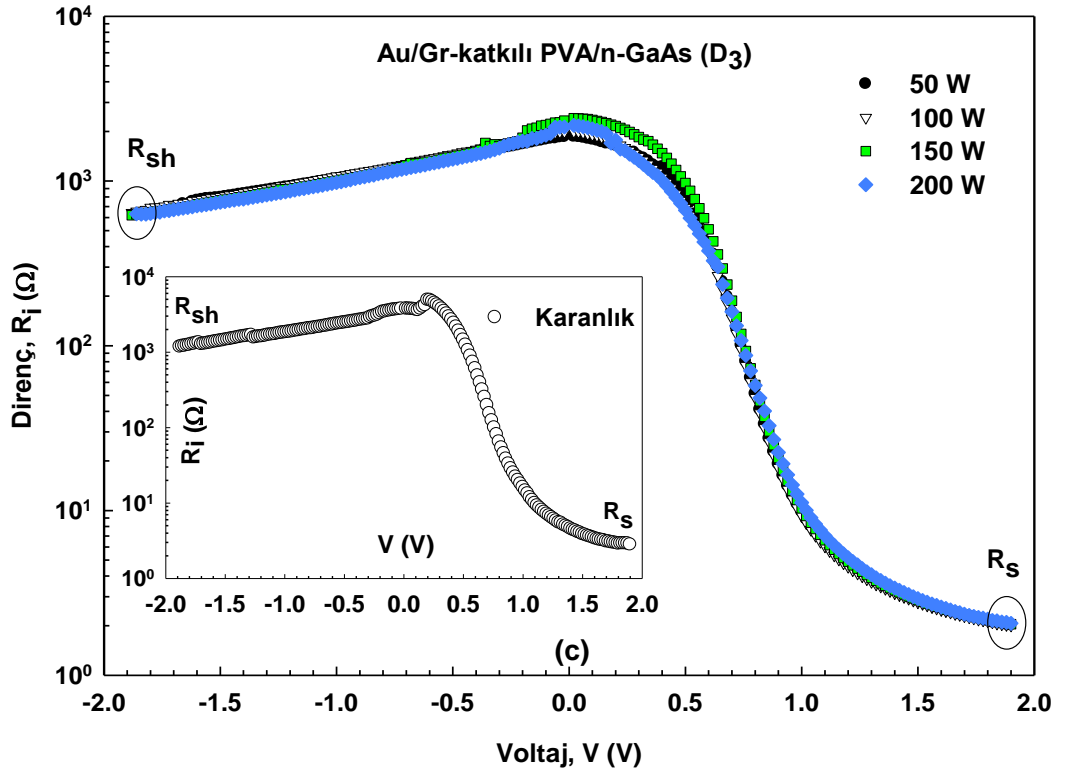
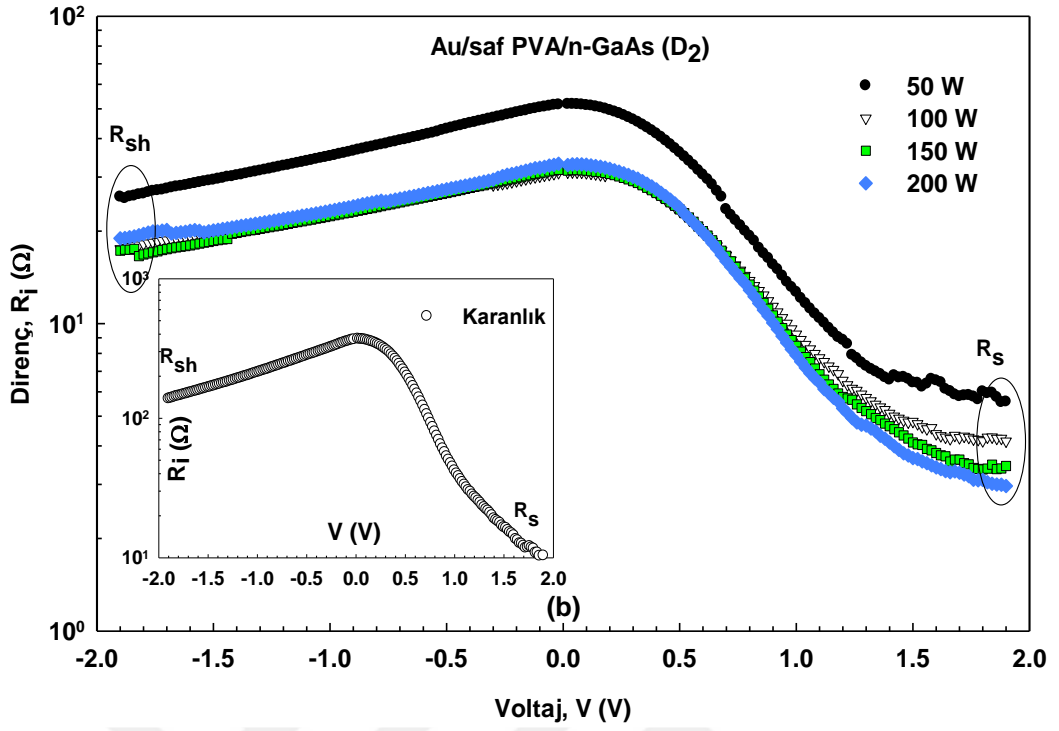


Ohm yasası (Eşitlik 4.5) ve modifiye edilmiş Norde metodu [65] kullanıldı. Diğer taraftan, diyota ait idealite faktörü, engel yüksekliği, yüzey durumları, seri ve kısa devre direnci gibi SBDs'in temel elektriksel parametrelerinin değerleri, sıcaklık benzeri uygulanan besleme voltajına bağlıdır. Bu nedenle; bu elektriksel parametreler, uygulanan besleme voltaj aralığı ve ölçümlenen sistemin doğası gereği bir metottan diğer bir metoda farklı olabilir. Bu metotların bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin; yarı-logaritmik  $I-V$  grafiği,  $R_s$  ve arayüzey tabaka nedeniyle yeterince büyük lineer aralığa sahip olmadığında, TE teorisi veya  $\ln I-V$  grafiğinin lineer eğri uydurmadan, elektriksel parametrelerinin değerlendirilmesinin doğruluğu ve güvenilirliği azalır. Bu durumda, Cheung ve Norde fonksiyonlarının kullanılması avantajlı olabilir. Bundan dolayı; elde edilen deneysel sonuçların güvenilirliğini geliştirmek için, çeşitli yöntemler, bu çalışmada kullanıldı ve elde edilen sonuçların çoğunlukla birbirleri ile uyumlu olduğu tespit edildi. Sonuç olarak; kullanılan metodun zaman alması, kolay ve hızlı olması belirleyici olmaktadır.

İlk olarak,  $I-V$  verilerin ileri (pozitif,  $V>0$ ) ve ters (negatif,  $V<0$ ) ön-gerilim bölgelerinden elde edilen  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri, Eşitlik 4.5 kullanılarak her bir diyot için hesaplandı ve  $R_i - V_i$  eğrisi olarak Şekil 4.7'de verildi.



Şekil 4.7. D<sub>1</sub> (a), D<sub>2</sub> (b) ve D<sub>3</sub> (c) SBDs için karanlık ve farklı ışık seviyeleri altındaki  $R_i - V_i$  eğrileri.



Şekil 4.7. (devam ediyor).

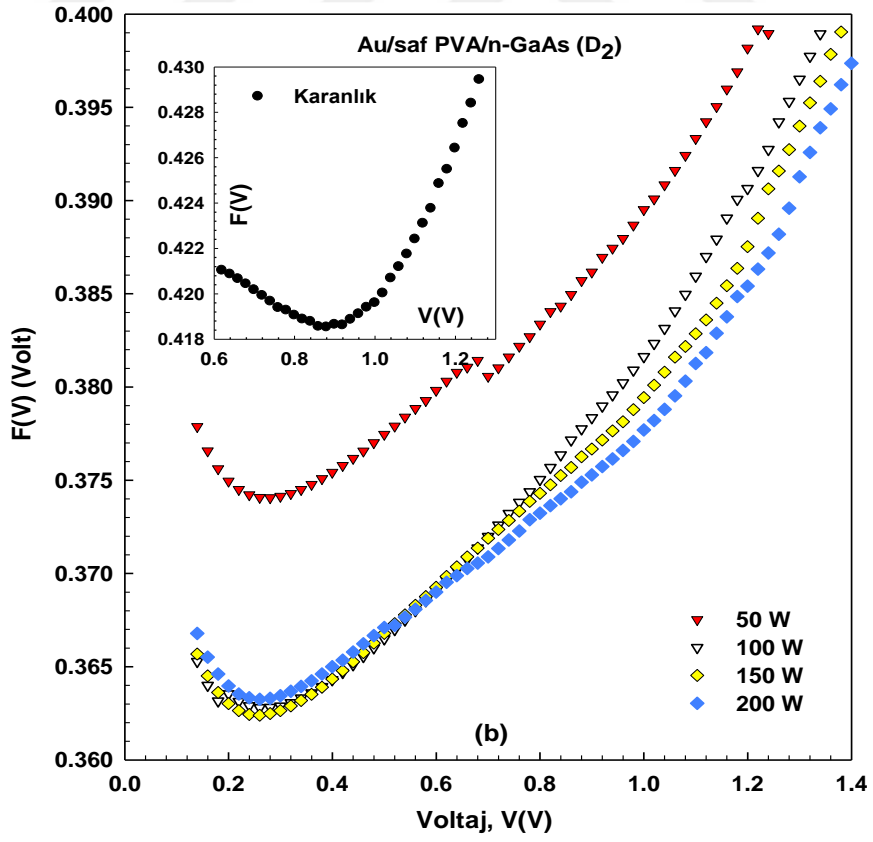
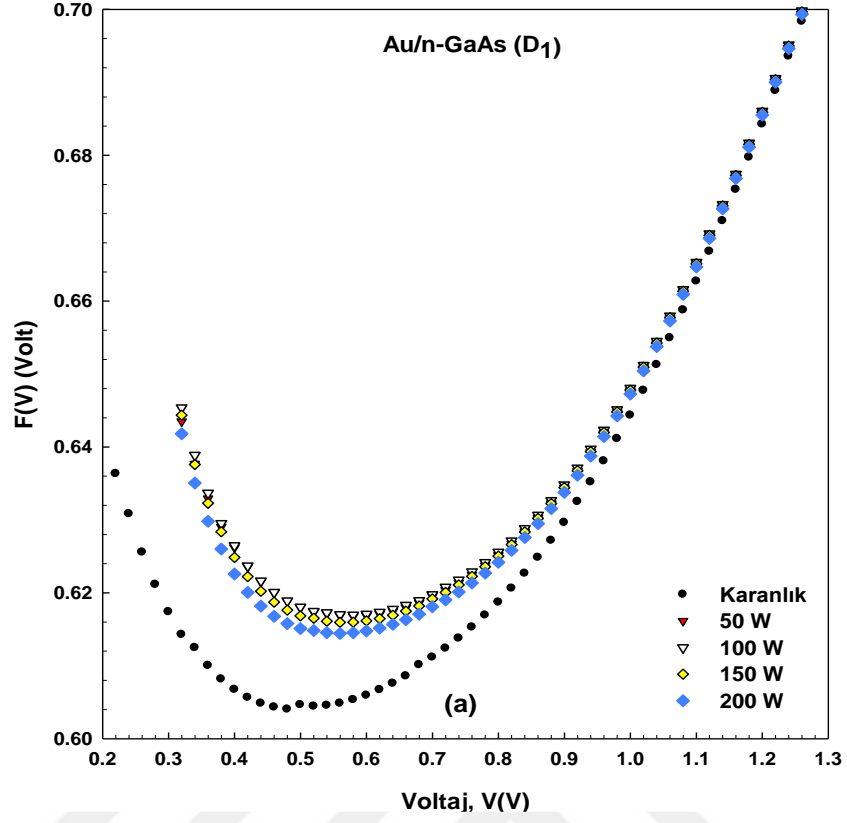
Şekil 4.7 a, b ve c'de karanlık altında D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için, yüksek ileri öngerilim ( $V \geq 2 \text{ Volt}$ ) durumunda  $R_i$ 'nin minimum değerlerine karşılık gelen  $R_s$ ,

değerleri, sırasıyla 5.73, 10.55 ve 2.79 $\Omega$  olarak bulunmuş iken, yüksek ters ön-gerilim ( $V \leq 2V$ ) durumunda  $R_i$ 'nin maksimum değerlerine karşılık gelen  $R_{sh}$  değerleri, sırasıyla 43.57M $\Omega$ , 137.63 $\Omega$  ve 1.15K $\Omega$  olarak bulundu. Benzer şekilde, 200W altında D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için  $R_s$  değerleri, sırasıyla 5.49, 2.96 ve 2.07  $\Omega$  olarak belirlenmiş iken,  $R_{sh}$  değerleri sırasıyla 883.68 K $\Omega$ , 18.95  $\Omega$  ve 631.14  $\Omega$  olarak belirlenmiştir.

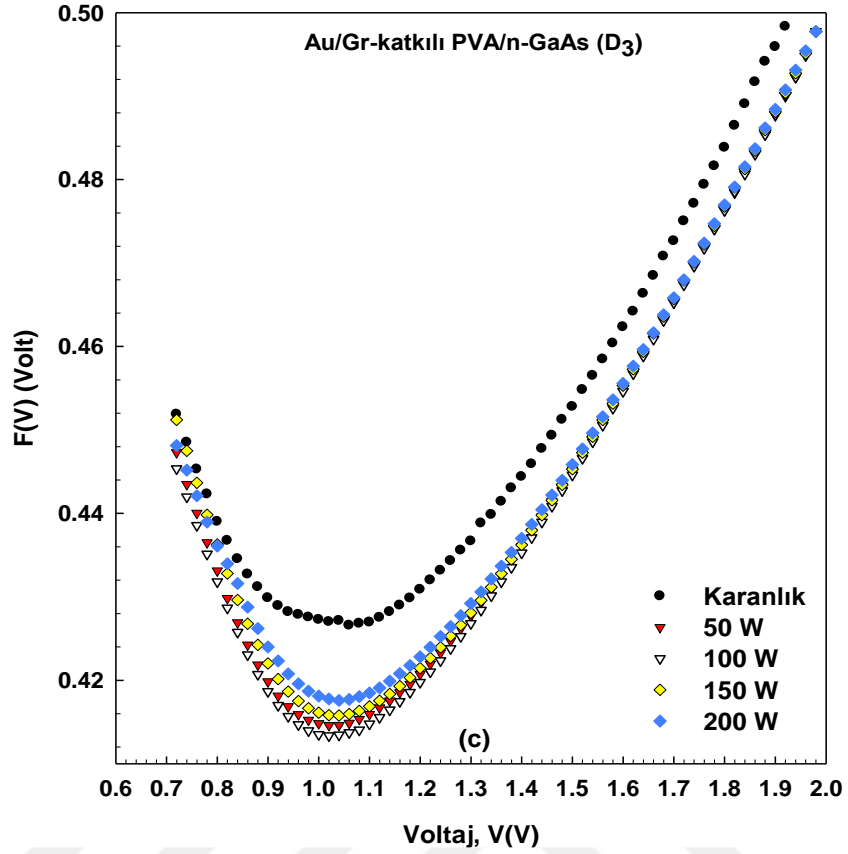
Karanlık ve farklı ışık seviyesi koşulları altında; D<sub>2</sub> diyotuna göre D<sub>3</sub> diyotunun  $R_{sh}$  direnç değerinin arttığı,  $R_s$  direnç değerinin ise azaldığını sonuçlar göstermektedir. Bundan dolayı, bu koşullar altındaki  $R_s$  ve  $R_{sh}$ 'nin bu davranışı, Gr-katkılı PVA ile doğrultma oranıyla ( $RR=I_F/I_R, \pm 2V$ ) ilgili olarak yapının kalitesini artırdığının önemli ölçüde bir delilidir.

Son olarak, karanlık ve farklı ışık seviyesi koşulları altındaki D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs'in  $\Phi_{Bo}$  ve  $R_s$  değerlerini hesaplamak için alternatif bir metot olarak modifiye edilmiş Norde metodu [65] kullanıldı.

D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs'in  $n$  değerleri nicel olarak, 2'den büyük olduğundan (Çizelge 4.4), Bohlin [68] tarafından Eşitlik 4.8'deki gibi ifade edilen modifiye edilmiş Norde fonksiyonu ( $F(V)$ ) kullanıldı ve fonksiyona ait sonuçlar her bir diyot için Şekil 4.8'de gösterildi.



Şekil 4.8. D<sub>1</sub> (a), D<sub>2</sub> (b) ve D<sub>3</sub> (c) diyotlarının karanlık ve farklı ışık koşulları altındaki  $F(V)$ - $V$  eğrileri.



Şekil 4.8. (devam ediyor).

Şekil 4.8 a, b ve c’de verilen  $F(V)$ - $V$  eğrilerinin minimum noktaları ( $V_{min}$  ve  $I_{min}$  değerleri), Eşitlik 4.9a ve 4.9b verilen bağıntılar yardımıyla, karanlık ve farklı ışık koşulları altındaki  $\Phi_{Bo}$  ve  $R_s$  değerlerinin hesaplanması için kullanılmıştır.

Burada, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için  $F(V)$ - $V$  eğrilerinin minimum noktalarına karşılık gelen  $F(V_{min})$  değerleri, karanlık ve farklı ışık seviyeleri için belirlendi ve Çizelge 4.5’de ayrıca verildi. Eşitlik 4.9a ve 4.9b bağıntıları kullanılarak, karanlık altında üç farklı SBDs’in  $R_s$  ve  $\Phi_{Bo}$  değerleri, 257.8 $\Omega$  ve 0.739eV (D<sub>1</sub>), 1.42 $\Omega$  ve 0.491eV (D<sub>2</sub>), 0.9 $\Omega$  ve 0.553eV (D<sub>3</sub>) olarak hesaplandı. Benzer şekilde 200W altında  $R_s$  ve  $\Phi_{Bo}$  değerleri, 182.19  $\Omega$  ve 0.729 eV (D<sub>1</sub>), 2.74  $\Omega$  ve 0.362 eV (D<sub>2</sub>), 0.23  $\Omega$  ve 0.523 eV (D<sub>3</sub>) olarak hesaplandı. Buna ek olarak, her bir diyot için diğer ışık seviyelerindeki hesaplanan  $R_s$  ve  $\Phi_{Bo}$  değerleri, Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Karanlık ve farklı ışık koşulları altındaki D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs'in modifiye edilmiş Norde fonksiyonundan elde edilen  $\Phi_{Bo}$  ve  $R_s$  değerleri.

Işık yoğunluğu (W)	Au/n-GaAs (D <sub>1</sub> )			Au/saf PVA/n-GaAs (D <sub>2</sub> )			Au/Gr-katkılı PVA/n-GaAs (D <sub>3</sub> )		
	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$F(V_{min})(V)$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$F(V_{min}) (V)$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$F(V_{min}) (V)$
<b>0</b>	257.80	0.739	0.6040	1.42	0.491	0.4185	0.09	0.553	0.4266
<b>50</b>	161.92	0.737	0.6168	5.64	0.377	0.3741	0.24	0.520	0.4146
<b>100</b>	206.63	0.732	0.6170	3.00	0.366	0.3628	0.23	0.519	0.4134
<b>150</b>	197.12	0.731	0.6160	2.92	0.363	0.3624	0.24	0.518	0.4158
<b>200</b>	182.19	0.729	0.6144	2.74	0.362	0.3633	0.23	0.523	0.4176

Çalışmada, karanlık ve farklı ışık koşulları altında Ohm yasası ve modifiye edilmiş Norde fonksiyonundan elde edilen,  $R_s$  ve  $\Phi_{Bo}$  değerleri, iyi bir tutarlılık içerisindedir. Diğer taraftan, benzer koşullarda  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs için TE model ve Norde metodu karşılaştırıldığında, Norde fonksiyonun modifikasyonundan elde edilen BH değerleri, TE modelden biraz daha yüksektir. Bu durum, TE modelin doğallığına ve BH'ın voltaja bağlılık göstermesine atfedilir.



## BÖLÜM 5

### SONUÇ VE TARTIŞMA

Çalışmada, sırasıyla D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> olarak adlandırılan MS (Au/*n*-GaAs) ve MPS (Au/saf PVA/*n*-GaAs ve Au/Gr-katkılı PVA/*n*-GaAs) tipi SBDs; oda sıcaklığında, karanlık ve farklı ışık koşulları (50-200W) altında diyotların elektriksel ve fotovoltaik özelliklerini incelemesi amacıyla hazırlanmış ve elde edilen deneysel sonuçlar açısından değerlendirilmiştir. Değişik hesaplama metotları (Termiyonik emisyon(TE) teorisi, Ohm yasası, Cheung and Cheung ve modifiye edilmiş Norde metodu) kullanılarak, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs'in temel elektriksel parametreleri (doyum akımı ( $I_o$ ), idealite faktörü ( $n$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_{Bo}$ ), seri direnç ( $R_s$ ), kısa devre direnci ( $R_{sh}$ )) Au ve *n*-GaAs arasında arayüzey tabakalı (saf PVA ve Gr-katkılı PVA) ve tabakasız olarak *I-V* verilerden hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Fotodiyot temelli elemanların kalitesini ve performansını incelemede  $R_s$  ve  $R_{sh}$  parametreleri; oldukça belirleyici bir role sahiptir. Elde edilecek bu parametreler, uygulanan besleme voltaj aralığı ve ölçümlenen sistemin doğası gereği bir metottan diğer bir metoda farklılık gösterebilir. Geçerli ve güvenilir sonuçlar elde etmek ve her bir diyot için sonuçların karşılaştırılabilmesi amacıyla Ohm yasası, Cheung and Cheung ve modifiye edilmiş Norde metodu kullanılmıştır. Pratikte, idealden çok farklı olması nedeniyle; oda sıcaklığında, karanlık ve farklı ışık koşulları altında,  $R_i$  (yapı direnci) -  $V_i$  (uygulanan besleme voltajı) eğrilerinden  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri elde edildi. Belirlenen bu koşullar altında D<sub>2</sub> diyotuna göre; D<sub>3</sub> diyotunun  $R_{sh}$  direnç değerinin arttığı,  $R_s$  direnç değerinin ise azaldığı tespit edilmiştir. Yani diğer MPS tipi SBDs ile karşılaştırıldığında, Gr-katkılı PVA'lı MPS yapının  $R_s$  değeri daha düşüktür.  $R_s$  ve  $R_{sh}$ 'deki bu davranış ( $R_s$  değerindeki azalma ve  $R_{sh}$  değerindeki artış), önemli ölçüde Gr-katkılı PVA ile (doğrultma oranıyla ( $RR=I_F/I_R$ ,  $\pm 2V$ ) ilgili olarak) yapının kalitesini artırdığının bir delilidir. SBDs için  $R_s$  değerleri, oda sıcaklığında Ohm yasası, Cheung and Cheung ve modifiye edilmiş Norde fonksiyonundan,



karanlık ve farklı ışık koşullarında ki  $R_s$  değerleri ise Ohm yasası ve modifiye edilmiş Norde fonksiyonundan hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların, belirlenen koşullar açısından iyi bir tutarlılık içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

Karanlıkta ve farklı ışık seviyeleri altında  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  tipi SBDs'in belirgin engel yüksekliği olarak ifade edilen  $\Phi_{Bo}$  değerleri, TE teorisi (Eşitlik 4.4) ve modifiye edilmiş Norde metodundan (Eşitlik 4.9a) faydalanılarak her bir diyot için hesaplandı. Ayrıca diyotun kalitesinin belirlenmesinde diğer önemli bir parametre olan  $n$  değerleri, ileri ön-gerilim  $\ln I-V$  grafiğinin lineer bölgesinden Eşitlik 4.3 ifadesi yardımıyla elde edildi.

Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere deneysel olarak ve fabrikasyonu gerçekleştirilen üç farklı SBDs'in  $\Phi_{Bo}$  ve  $n$  değerleri, karanlık altında sırasıyla 0.6805 eV ve 1.918 ( $D_1$ ), 0.4260 eV ve 8.175 ( $D_2$ ), 0.4952 eV ve 6.675 ( $D_3$ ) olarak hesaplandı. Işık seviyesi koşullarında (200W) ise  $\Phi_{Bo}$  ve  $n$  değerleri, sırasıyla 0.6515 eV ve 2.535 ( $D_1$ ), 0.3635 eV ve 9.159 ( $D_2$ ), 0.4773 eV ve 6.953 ( $D_3$ ) olarak hesaplandı. Hazırlanan diyotlar için karanlıkta ve ışık seviyesi koşullarında elde edilen  $n$  değerleri, literatürde yapılan arayüzey tabakalı ve tabakasız çalışmaları ile kıyaslandığında, karanlık koşullarda elde edilen  $n$  değerleri, literatüre uygun olarak ışık koşulları altında yükselme göstermiştir. Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere  $D_1$  diyotu ve arayüzey tabakasız gerçekleştirilen çalışmalardan [17,51,128] elde edilen  $n$  değerleri, arayüzey tabakalı  $D_2$  ve  $D_3$  diyotu ve Ref. [7], [48] ve [49] çalışmalarından beklendiği üzere daha düşük değerlidir. Bu durum arayüzey tabakanın kalınlığına,  $N_{ss}$  yoğunluğuna (üst ölçekte), imaj kuvvet azalmasına ve yanal olarak homojen olmayan BH'a atfedilebilir [1, 3].

Çizelge 5.1. Karanlık ve ışık koşulları altındaki D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs'in fotovoltaiik davranışlarının literatür ile karşılaştırılması.

Numune		Karanlık Koşullarda				Işık Seviyesi Koşullarında				Referans
		<i>n</i>	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	<i>n</i>	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	
Au/ <i>n</i> -GaAs	(D <sub>1</sub> )	1.918	0.681	5.73	43.57x10 <sup>6</sup>	2.535	0.6515	5.49	883.68x10 <sup>3</sup>	Çalışmada
1 Au/saf PVA/ <i>n</i> -GaAs	(D <sub>2</sub> )	8.175	0.426	10.55	137.63	9.159	0.3635	2.96	18.95	Çalışmada
Au/Gr-katkılı PVA/ <i>n</i> -GaAs	(D <sub>3</sub> )	6.675	0.495	2.79	1.15x10 <sup>3</sup>	6.953	0.4773	2.07	631.14	Çalışmada
2 Au/poly(propylene glycol)-b-polystyrene/ <i>n</i> -Si (MPS)		2.53	0.93	-	-	3.48	0.83	-	-	[49]
Au/poly(propylene glycol)-b-polystyrene(HAuCl <sub>4</sub> )/ <i>n</i> -Si (MPS)		2.29	0.96	-	-	3.42	0.87	-	-	
3 Au/ <i>n</i> -CdTe (MS)		2.86	0.698	24.1x10 <sup>3</sup>	523x10 <sup>3</sup>	4.98	0.512	1.4x10 <sup>3</sup>	2.71x10 <sup>3</sup>	[128]
4 Al/ <i>p</i> -GaAs/In (MS)		1.51	0.638	197	-	1.06	0.648	133	-	[17]
5 Au/Bi-katkılı PVA/ <i>n</i> -Si (MPS)		2.06* 5.08**	0.92* 0.82**	257.1	-	3.31	0.83	79.7	-	[7]
6 Au/Ni,Zn-katkılı PVA/ <i>n</i> -Si (MPS)		2.49* 7.52**	0.705* 0.597**	238.6	3.57x10 <sup>7</sup>	6.05	0.59	170.92	4.32x10 <sup>3</sup>	[48]
7 Al-TiW-Pd <sub>2</sub> / <i>n</i> -Si		5.25	0.701	986.5x10 <sup>3</sup>	-	3.92	0.764	835	-	[51]

\* Düşük ön-gerilim bölgesi

\*\* Yüksek ön-gerilim bölgesi

Karanlık koşullarda  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs için,  $R_s$  değerleri, sırasıyla 5.73, 10.55 ve  $2.79\Omega$  olarak hesaplanmış iken,  $R_{sh}$  değerleri, sırasıyla  $43.57M\Omega$ ,  $137.63\Omega$  ve  $1.15K\Omega$  olarak hesaplandı. Benzer şekilde, ışık koşulları altında (200W) altında  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  SBDs için  $R_s$  değerleri, sırasıyla 5.49, 2.96 ve  $2.07\Omega$  olarak belirlenmiş iken,  $R_{sh}$  değerleri sırasıyla  $883.68K\Omega$ ,  $18.95\Omega$  ve  $631.14\Omega$  olarak belirlenmiştir. Burada  $D_2$  diyotuna göre  $D_3$  diyotunun  $R_{sh}$  direnç değerinin arttığı,  $R_s$  direnç değerinin ise azaldığı görölmektedir. Literatür ile karşılaştırıldığında bu çalışmada karanlık ve ışık koşulları altında hesaplanan  $R_s$  değerlerinin önemli ölçüde diğer çalışmalardan [7,17,48,49,51,128] daha düşük olduğu ve istenen idealite değerlerine yakın olduğu görölmektedir.

$\Phi_{Bo}$  değerleri karşılaştırıldığında ise, karanlık koşullarda elde edilen değerler, literatüre uygun olarak ışık koşulları altında azalma göstermiştir. Arayüzey tabakalı  $D_2$  veya  $D_3$  (saf PVA ve Gr-katkılı PVA) SBDs için elde edilen değerler, arayüzey tabakasız diyota göre BH'yi önemli ölçüde değiştirmektedir (Çizelge 5.1).

Oda sıcaklığında organik/inorganik yalıtkan arayüzey tabakalı ve tabakasız MS ve MPS/MIS tipi SBDs'in karşılaştırılması ile ilgili yapılan çalışmalar ve elde edilen temel diyot parametreleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Burada Ref. [129], [130], [131] ve [132]'de yapılan çalışmalarda, arayüzey tabakalı ve tabakasız olarak fabrikasyonu yapılan numunelere ait oda sıcaklığındaki ölçümlerde  $\Phi_{Bo}$  değerlerinin çok fazla değiştirmedeği görölmektedir. Buna karşın Ref. [16], [40], ve [122]'de ise arayüzey tabakasız yapıların arayüzey tabaka varlığında  $\Phi_{Bo}$  değerlerinin arttığı belirtilmektedir. Bu çalışmada ise ara yüzey tabakasız ( $D_1$ ) diyotuna ait  $\Phi_{Bo}$  değerlerinin,  $D_2$  veya  $D_3$  (saf PVA ve Gr-katkılı PVA) diyotlarında elde ettiğimiz gibi Ref. [121], [133] ve [134] çalışmaları ile benzerlik gösterdiği ve azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.2. Oda sıcaklığında organik/inorganik yalıtkan arayüzey tabakalı ve tabakasız MS ve MPS/MIS tipi SBDs'in karşılaştırılması ile ilgili yapılan çalışmalar ve elde edilen temel diyot parametreleri.

Numune		Temel diyot parametreleri				Referans	
		$n$	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )		
1	Au/n-GaAs (MS)	(D <sub>1</sub> )	1.918	0.681	5.73	43.57x10 <sup>6</sup>	Çalışmada
	Au/saf PVA/n-GaAs (MPS)	(D <sub>2</sub> )	8.175	0.426	10.55	137.63	Çalışmada
	Au/Gr-katkılı PVA/n-GaAs (MPS)	(D <sub>3</sub> )	6.675	0.495	2.79	1.15x10 <sup>3</sup>	Çalışmada
2	Au/n-Si (MS)		1.65	0.62	164.15	0.597x10 <sup>6</sup>	[125]
	Au/ Zn-doped PVA/n-Si (MPS)		1.38	0.75	97.64	203x10 <sup>6</sup>	
3	Au/n-GaAs (MS)		1.25	0.73	1.41	-	[129]
	Au/SiO <sub>2</sub> /n-GaAs (MIS)		1.51	0.75	1.57	-	
4	Al/p-Si (MS)		3.83	0.707	716	1.82 x10 <sup>6</sup>	[130]
	Al/perylene/p-Si (MPS)		2.77	0.703	544	10.7 x10 <sup>6</sup>	
5	Au/n-Si (MS)		1.69	0.71	4.92x10 <sup>3</sup>	1.57x10 <sup>6</sup>	[122]
	Au/ SnO <sub>2</sub> /n-Si (MIS)		4.91	0.84	22.4x10 <sup>3</sup>	728x10 <sup>6</sup>	
6	Au/pure-PVC+TCNQ/p-Si (MPS)		2.93	0.78	252	8.04x10 <sup>6</sup>	[133]
	Au/Mo-doped PVC+TCNQ/p-Si (MPS)		5.76	0.57	107	9x10 <sup>3</sup>	
7	Au/n-InP (MS)		1.35	0.57	32	-	[134]
	Au/PVDF/n-InP (MPS)		1.14	0.73	11.1x10 <sup>3</sup>	-	
8	Au/n-Si (MS)		5.65	0.64	336.53	-	[121]
	Au/%2 Gr-katkılı Ca <sub>3</sub> Co <sub>4</sub> Ga <sub>0.001</sub> O <sub>x</sub> /n-Si (MPS)		8.82	0.48	9.36	-	
9	Au/n-Si (MS)		1.44	0.71	4.76 x10 <sup>3</sup>	-	[131]
	Au/Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -katkılı PVA/n-Si (MPS)		3.49	0.74	10.03x10 <sup>3</sup>	-	
10	Au/n-Ge (MS)		1.34	0.59	7.01	-	[132]
	Au/Monolayer-Gr/n-Ge		1.30	0.63	3.16	-	
11	Au/n-Si (MS)		1.44	0.71	4.78x10 <sup>3</sup>	-	[40]
	Au/Ni-katkılı PVA/n-Si (MPS)		4.21	0.77	19.15x10 <sup>3</sup>	-	
12	Au/n-Si/Ag (MS)		1.44	0.71	4.78x10 <sup>3</sup>	-	[16]
	Au /Co-katkılı PVA/n-Si/Ag (MPS)		2.45	0.79	3.92x10 <sup>3</sup>	-	

Benzer koşullarda, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için hesaplanan  $R_s$  değerleri, Ref. [16], [40], [122] [125], [130], [131], [133] ve [134]'de verilen  $R_s$  değerlerinden oldukça düşüktür. Ayrıca bu koşullarda MS ve MPS tipi SBDs'ler için elde edilen  $n$  değerleri

karşılaştırıldığında, organik arayüzey tabakalı diyotlar için hesaplanan değerler, arayüzey tabakasız [16,40,121,131,133] diyotlara göre  $n$  değerlerini, çalışmamızda da olduğu gibi yükseltmiştir.

PVA organik arayüzey tabakalı MPS tipi SBDs ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar ve hazırlanan D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için elde edilen temel diyot parametrelerinin karşılaştırılması Çizelge 5.3’de verilmiştir. Buna göre D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs için hesaplanan  $n$  değerleri, Ref. [7], [16], [40], [48], [125] ve [131]’ye göre yüksek değerlikte olmasına rağmen  $\Phi_{Bo}$  değerleri önemli ölçüde düşük değerlerdedir. Ayrıca diyot kalitesini belirleyen  $R_s$  değerleri, diğer organik/polimer PVA’lı yapılara göre oldukça düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu, diyotlar için istenen bir durumdur.

Çizelge 5.3. Oda sıcaklığında PVA organik arayüzey tabakalı MPS tipi SBDs ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar ve elde edilen temel diyot parametrelerinin D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> SBDs ile karşılaştırılması.

Numune	Temel diyot parametreleri				Referans
	$n$	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	
1 Au/saf PVA/ $n$ -GaAs (MPS) (D <sub>2</sub> )	8.175	0.426	10.55	137.63	Çalışmada
	Au/Gr-katkılı PVA/ $n$ -GaAs (MPS)(D <sub>3</sub> )	6.675	0.495	2.79	1.15x10 <sup>3</sup>
2 Au/ Zn-doped PVA/ $n$ -Si (MPS)	1.38	0.75	97.64	203x10 <sup>6</sup>	[125]
3 Au/Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -katkılı PVA/ $n$ -Si (MPS)	3.49	0.74	10.03x10 <sup>3</sup>	-	[131]
4 Au/Ni-katkılı PVA/ $n$ -Si (MPS)	4.21	0.77	19.15x10 <sup>3</sup>	-	[40]
5 Au /Co-katkılı PVA/ $n$ -Si/Ag (MPS)	2.45	0.79	3.92x10 <sup>3</sup>	-	[16]
6 Au/Bi-katkılı PVA/ $n$ -Si (MPS)	2.06*	0.92*	257.1	-	[7]
	5.08**	0.82**			
7 Au/Ni,Zn-katkılı PVA/ $n$ -Si (MPS)	2.49*	0.705*	238.6	3.57x10 <sup>7</sup>	[48]
	7.52**	0.597**			

\* Düşük ön-gerilim bölgesi  
\*\* Yüksek ön-gerilim bölgesi

Sonuç olarak, organik/polimer tabaka (saf PVA ve Gr-katkılı PVA), arayüzey tabakasız yapıya göre BH’ı etkin bir şekilde değiştirmektedir. Dahası Gr-katkılı PVA tabaka, karanlıkta ve farklı ışık seviyesi koşullarında Au/PVA/ $n$ -GaAs yapının kalitesini önemli ölçüde geliştirmiştir.

Bu çalışma, saf ve %7 grafen (Gr) katkılı PVA organik/polimer arayüzey tabakaların Schottky yapılar üzerindeki fotovoltaik karakteristiklerine etkisinin incelenmesi ve değerlendirilmesiyle sınırlandırılmıştır. Bundan sonraki aşamalarda; karanlık ve farklı ışık seviyeleri altında elde edilen sonuçların daha iyi değerlendirilebilmesi amacıyla organik/polimer arayüzey tabakanın farklı kalınlıkta ve konsantrasyonlarda kıyaslamaların yapılması faydalı olacaktır. Ayrıca, bu organik/polimer malzeme ile farklı metal-yarıiletken kontak materyalleri kullanılarak Schottky diyot yapıları incelenebilir. Elde edilen sonuçlar ve bundan sonraki yapılacak çalışmalar ışığında, Gr-katkılı PVA organik/polimer arayüzey tabakalı Schottky yapıların fotodiyot temelli elektronik elemanların üretiminde kullanılabileceği düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

1. Sze, S. M., "Physics of Semiconductor Devices, (Second Edition)", *Willey*, New York, 7-8 (1981).
2. Sharma, B. L., "Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications", *Plenum Press*, New York, 115-120, 191-192, 219-220, 273-274 (1984).
3. Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., "Metal Semiconductor Contacts, (Second Edition)", *Oxford Press*, New York, (1988).
4. Neamen, D. A., "Semiconductor Physics and Devices 3rd ed. ", *Mc Graw-Hill*, New York, 1-3 (2003).
5. Soylu, M. and Yakuphanoglu, F., "Photovoltaic and interface state density properties of the Au/*n*-GaAs schottky barrier solar cell," *Thin Solid Films*, 519: 1950-1954 (2011).
6. Uslu, H., Altındal, Ş., Tunc, T., Uslu, İ. and Mammadov T. S., "The illumination intensity and applied bias voltage on dielectric properties of Au/Polyvinyl Alcohol(Co, Zn-Doped)/ *n*-Si Schottky barrier diodes", *Journal of Applied Polymer Science*, 120: 322-328 (2011).
7. Demirezen, S., Altındal, Ş. and Uslu, İ., "Two diodes model and illumination effect on the forward and reverse bias *I-V* and *C-V* characteristics of Au/PVA (Bi-doped)/*n*-Si photodiode at room temperature", *Current Applied Physics*, 13: 53-59 (2013).
8. Khan, N., Kausar, A. and Rahman, A. U., "Modern drifts in conjugated polymers and nanocomposites for organic solar cells: a review", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 54: 140-154 (2015).
9. Zhu, Z., Waller D. and Gaudiana, R., "New polymers for optimizing organic photovoltaic cell performances", *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 44 (12): 1249-1253 (2007).
10. Senthilkumar, N., Kang, H.-S., Park, D.-W. and Choe, Y., "Improving efficiency of organic photovoltaic cells using PEDOT:PSS and MWCNT nanocomposites as a hole conducting layer", *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 47 (5): 484-490 (2010).

11. Tamilavan, V., Sakthivel, P., Li, Y., Song, M., Kim, C.-H., Jin, S.-H. O. and Hyun, M.H.O., "Synthesis and characterization of indenofluorene-based copolymers containing 2,5-Bis(2-thienyl)-N-arylpyrrole for bulk heterojunction solar cells and polymer light-emitting diodes", *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 48 (14): 3169-3177 (2010).
12. Anuragudom, P., El-daye, J., Chinwangso, P., Advincula, R. C., Phanichphant, S. and Lee, T. R., "New light-emitting poly{(9,9-di-n-octylfluorenediyl vinylene)-alt-[1,5-(2,6-dioctyloxy)naphthalene vinylene]}", *Polymer International*, 60 (4): 660-665 (2011).
13. Li, S.-S., Lin, Y.-Y., Su, W.-F. and Chen, C.-W., "Polymer/metal oxide nanocrystals hybrid solar cells", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 16 (6): 1635-1640 (2010).
14. Peumans, P., Bulović, V. ve Forrest, S. R., "Efficient, high-bandwidth organic multilayer photodetectors", *Applied Physics Letters*, 76 (26): 3855-3857 (2000).
15. Kwon, J. H., An, J. -Y., Jang, H., Choi, S., Chung, D. S., Lee, M. -J., Cha, H. -J., Park, J. -H., Park, C. -E. and Kim, Y. -H., "Development of a new conjugated polymer containing dialkoxynaphthalene for efficient polymer solar cells and organic thin film transistors", *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 49 (5): 1119-1128 (2011).
16. Gökçen, M., Tunç, T., Altındal, Ş. and Uslu, I., "Electrical and photocurrent characteristics of Au/PVA (Co-doped)/n-Si photoconductive diodes", *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 177 (5): 416-420 (2012).
17. Soylu, M., Al-Ghamdi, A. A. and Yakuphanoglu, F., "Influence of illumination intensity and temperature on the electrical characteristics of an Al/p-GaAs/In structure prepared by thermal evaporation", *Microelectronic Engineering*, 99: 50-57 (2012).
18. Tecimer, H., Uslu, H., Alahmed, Z. A., Yakuphanoglu, F. and Altındal, S., "On the frequency and voltage dependence of admittance characteristics of Al/PTCDA/p-Si (MPS) type Schottky barrier diodes (SBDs)", *Composites Part B: Engineering*, 57: 25-30 (2014).
19. Altuntaş, H., Altındal, S., Shtrikman, H. and Özçelik, S., "A detailed study of current-voltage characteristics in Au/SiO<sub>2</sub>/n-GaAs in wide temperature range", *Microelectronics Reliability*, 49 (8): 904-911 (2009).
20. Gökçen, M. and Allı, A., "Investigation of electrical and photovoltaic properties of Au/poly(propylene glycol)-b-polystyrene/n-Si diode at various illumination intensities", *Philosophical Magazine*, 94 (9): 925-932 (2014).



21. Dökme, I., Yildiz, D. E. and Altindal, S., "Illumination intensity effects on the dielectric properties of schottky devices with Co, Ni-doped PVA nanofibers as an interfacial layer", *Advances in Polymer Technology*, 31(1): 63-70 (2012).
22. Zhao, J., Han, W., Chen, H., Tu, M., Zeng, R., Shi, Y., Cha, Z. and Zhou, C., "Preparation, structure and crystallinity of chitosan nano-fibers by a solid-liquid phase separation technique", *Carbohydrate Polymers*, 83 (4): 1541-1546 (2011).
23. Whitesides, G. M. and Grzybowski, B., "Self-assembly at all scales", *Science*, 295 (5564): 2418-2421 (2002).
24. Wang, H. and Lu, Y., "Morphological control of self-assembly polyaniline micro/nano-structures using dichloroacetic acid", *Synthetic Metals*, 162 (15): 1369-1374, (2012).
25. Martin, J. and Mijangos, C., "Tailored polymer-based nanofibers and nanotubes by means of different infiltration methods into alumina nanopores", *Langmuir*, 25 (2): 1181-1187 (2009).
26. Dökme, I., Tunç, T., Uslu, I. and Altindal, Ş., "The Au/polyvinyl alcohol (Co, Zn-doped)/n-type silicon Schottky barrier devices", *Synthetic Metals*, 161 (5): 474-480 (2011).
27. Samad, Y. A., Asghar, A. and Hashaikeh, R., "Electrospun cellulose/PEO fiber mats as a solid polymer electrolytes for Li ion batteries", *Renewable Energy*, 56: 90-95 (2013).
28. Panda, P. K., "Preparation and characterization of Samaria nanofibers by electrospinning", *Ceramics International*, 39 (4): 4523-4527 (2013).
29. Alialy, S., Tecimer, H., Uslu, H. and Altindal, Ş., "A comparative study on electrical characteristics of Au/n-Si Schottky diodes, with and without Bi-doped PVA interfacial layer in dark and under illumination at room temperature", *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 4: 1-7 (2013).
30. Çetinkaya, H. G., Tecimer, H., Uslu, H. and Altindal, Ş., "Photovoltaic characteristics of Au/PVA (Bi-doped)/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) at various temperatures", *Current Applied Physics*, 13 (6): 1150-1156 (2013).
31. Tunç, T., Altindal, Ş., Dökme, I. and Uslu, H., "Anomalous peak in the forward-bias C-V plot and temperature-dependent behavior of Au/PVA (Ni,Zn-doped)/n-Si(111) structures", *Journal of Electronic Materials*, 40 (2): 157-164 (2011).

32. Uslu, H., Altındal, Ş. and Dökme, İ., "Illumination effect on electrical characteristics of organic-based Schottky barrier diodes", *Journal of Applied Physics*, 108 (104501) (2010).
33. Çetinkaya, H. G., Kaya, A., Altındal, Ş. and Koçyiğit, S., "Electrical and dielectric properties of Au/1% graphene (GP)+Ca<sub>1.9</sub>Pr<sub>0.1</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>x</sub> doped poly(vinyl alcohol)/n-Si structures as function of temperature and voltage", *Canadian Journal of Physics*, 93 (10): 1213-1220 (2015).
34. Roy, A. S., Gupta, S., Sindhu, S., Parveen, A. and Ramamurthy, P. C., "Dielectric properties of novel PVA/ZnO hybrid nanocomposite films", *Composites Part B: Engineering*, 47: 314-319 (2013).
35. Shehap, A., Abd Allah, R. A., Basha, A. F. and Abd El-Kader, F. H., "Electrical properties of gamma-irradiated, pure, and nickel chloride-doped polyvinyl alcohol films", *Journal of Applied Polymer Science*, 68 (5): 687-698 (1998).
36. Bhajantri, R. R. V., Harisha, A., Ranganathaiah, C. and Kumaraswamy, G. N., "Effect of barium chloride doping on PVA microstructure: Positron annihilation study", *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 87 (4): 797-805 (2007).
37. Pawde, S. M., Deshmukh, K. and Parab, S., "Preparation and characterization of poly(vinyl alcohol) and gelatin blend films", *Journal of Applied Polymer Science*, 109 (2):1328-1337 (2008).
38. Gibson, P., Schreuder-Gibson, H. and Rivin, D., "Transport properties of porous membranes based on electrospun nanofibers", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 187-188: 469-481 (2001).
39. Tawansi, A., El-Khodary, A. and Abdelnaby, M. M., "A study of the physical properties of FeCl<sub>3</sub> filled PVA", *Current Applied Physics*, 5 (6): 572-578 (2005).
40. Tunç ,T. and Gökçen, M., "Preparation and electrical characterization of Au/n-Si (1 1 0) structure with PVA-nickel acetate composite film interfacial layer", *Journal of Composite Materials*, 46 (22): 2843-2850 (2012).
41. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I. V., Dubonos, S. V. and Firsov, A. A., "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene", *Nature*, 438 (7065): 197-200 (2005).
42. Kim, K. S., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S. Y., Kim, J. M., Kim, K. S., Ahn, J. -H., Kim, P., Choi, J. -Y. and Hong, B. H., "Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes", *Nature*, 457 (7230): 706-710 (2009) .

43. Novikov, D. S., "Elastic scattering theory and transport in graphene", *Physical Review B*, 76 (245435) (2007).
44. Ren, L., Qiu, J. and Wang, S., "Photovoltaic properties of graphene nanodisk-integrated polymer composites", *Composites Part B: Engineering*, 55: 548-557 (2013).
45. Radadiya, T. M., "A properties of graphene", *European Journal of Material Sciences (EJMS)*, 2 (1): 6-18 (2015).
46. Wang, C. C., Huang, H. -K., Wang, Y. -H., Houg, M. -P., Wu, C. -L. and Chang, C. -S., "Fabrication of GaAs Schottky diode by liquid phase chemical enhanced oxidation", *Solid State Electronics*, 48 (9): 1683-1686 (2004).
47. Ambica, M., Losurdo, M., Capezzuto, P., Bruno, G., Ligonzo, T., Schiavulli, L., Farella, I. ve Augelli, V., "A study of remote plasma nitrided n-GaAs/Au Schottky barrier", *Solid State Electronics*, 49: 413-419 (2005).
48. Altındal, Ş., Tunç, T., Tecimer, H. and Yücedağ, I., "Electrical and photovoltaic properties of Au/(Ni, Zn)-doped PVA/n-Si structures in dark and under 250 W illumination level", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28: 48-53 (2014).
49. Gökçen, M., Yildirim, M., Demir, A., Alli, A., Alli, S. and Hazer, B., "UV illumination effects on electrical characteristics of metal-polymer-semiconductor diodes fabricated with new poly(propylene glycol)-b-polystyrene block copolymer", *Composites Part B: Engineering*, 57: 8-12 (2014).
50. Yakuphanoglu, F., "Transparent metal oxide films based sensors for solar tracking applications", *Composites Part B: Engineering*, 92: 151-159 (2016).
51. Uslu, H., Dökme, İ., Afandiyeva, I. M. and Altındal, Ş., "Illumination effect on  $I$ - $V$ ,  $C$ - $V$  and  $G/w$ - $V$  characteristics of Al-TiW-Pd<sub>2</sub>Si/n-Si structures at room temperature", *Surface and Interface Analysis*, 42: 807-811 (2010).
52. Margolis, J. M., "Conducting polymer and plastics", *Chapman&Hall*, New York, (1989).
53. Cowley, A. M., and Sze, S. M., "Surface states and barrier height of metal-semiconductor system", *Journal of Applied Physics*, 36 (10): 3212 (1965).
54. Ziel, A. V., "Solid State Physical Electronics", *Prentice-Hall, Inc.*, New-Jersey, (1968).
55. Li, S. S., "Semiconductor Physical Electronics", *Springer*, New York, 2006.

56. Wilson, A. H., "The theory of electronic semi-conductors", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 133 (822): 458-491 (1931).
57. Sze, S. M. and Kwok, K. N., "Metal-Semiconductor Contacts, Physics of Semiconductor Devices, 3rd ed.", *John Wiley & Sons*, New York, 245-300, 362-390, (2007).
58. Brillson, L. J., "Contacts to Semiconductors", *Noyes Publications*, New Jersey, 1993.
59. Henisch, H. K., "Semiconductor Contacts", *Celerondon Press*, New York, (1984).
60. Milnes, A. G. and Feucht, D. L., "Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junction", *Academic Press Inc.*, New York, (1972).
61. Nicollian, E. H. and Brews, J. R., "MOS Physics and Technology", *John Wiley & Sons*, New York, (1982).
62. Ray, W. P., Mabrook, M. F. and Nabok, A. V., "Transport mechanisms in porous silicon", *Journal of Applied Physics*, 84: 3232-3235 (1998).
63. Northrop, D. C. and Rhoderick, E. H., "The physics of Schottky barriers, in Variable Impedance Devices (M.J. Howes and D.V. Morgan, ed.) Chap. 2", *John Wiley and Sons.*, New York, 37-73, (1978).
64. Aydoğan, Ş., "Katılhal Fiziği 1. Basım", *Nobel Yayın*, Ankara, 287-288, (2011).
65. Norde, H., "A modified forward  $I$ - $V$  plot for Schottky diodes with high series resistance", *Journal of Applied Physics*, 50: 5052-5053 (1979).
66. Sato, K. and Yasumura, Y., "Study of forward  $I$ - $V$  plot for Schottky diodes with high series resistance", *Journal of Applied Physics*, 58: 3655 (1985).
67. McLean, A. B., "Limitations to the Norde  $I$ - $V$  plot", *Semiconductor Science and Technology*, 1: 177-179 (1986).
68. Bohlin, K., "Generalized Norde plot including determination of the ideality factor", *Journal of Applied Physics*, 60 (3): 1223-1224 (1986).
69. Cheung, S. K. and Cheung, N. W., "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", *Applied Physics Letters*, 49 (2): 85 (1986).

70. DeVault, D., "Quantum Mechanical Tunneling in Biological Systems", *Cambridge University Press.*, Cambridge, (1984).
71. İnternet: Wikimedia Foundation Inc., "Quantum tunnelling", [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_tunnelling#cite\\_note-Razavy-3](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_tunnelling#cite_note-Razavy-3) (2016).
72. Werner, J. H. and Gütter, H. H., "Barrier inhomogeneities at Schottky contacts", *Journal of Applied Physics*, 69 (3): 1522-1532 (1991).
73. Şenyel, M. ve Ayberk, A. Ş., "Kuantum Fiziği", Fizik, *Anadolu Üniversitesi Yayınları No 1060*, Eskişehir, 41-57 (1998).
74. Öztürk, H. ve Kaya, D., "Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji", *Umuttepe Yayınları*, Kocaeli, 34-46, (2013).
75. Goswami, D. Y., Frank, K. and Kreider, J. F., "Principles of Solar Engineering 2nd ed.", *Taylor & Francis*, Philadelphia, 5-67, 415, 418, (2000).
76. Messenger, R. A. and Ventre, J., "Photovoltaic Systems Engineering 2nd ed.", *CRC Pres.*, New York, 21-35, 415-431, (2004).
77. Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S. I. and Seal, S., "Graphene based materials: Past, present and future", *Progress in Materials Science*, 56: 1178-1271 (2011).
78. Slonczewski, J. C. and Weiss, P. R., "Band structure of graphite", *Physical Review Letters, Physical Review, and Reviews of Modern Physics*, 109 (2): 272 (1958).
79. Zhang, Y., Tan, Y., Stormer, H. L. and Kim, P., "Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene", *Nature*, 438: 201-204 (2005).
80. Novoselov, K., Jiang, Z., Zhang, Y., Morozov, S. S. H., Zeitler, U., Maan, J. C., Boebinger, G. S., Kim, P. and Geim, A. K., "Room-temperature quantum Hall effect in graphene", *Science*, 315 (5817): 1379 (2007).
81. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V. and Firsov, A. A., "Electric field effect in atomically thin carbon films", *Science*, 306 (5696): 666-669 (2004).
82. Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F. and Lau, C. N., "Superior thermal conductivity of single-layer graphene", *Nano Letters*, 8 (3): 902-907 (2008).

83. Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W. and Hone, J., "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene", *Science*, 321(5887) 385-388 (2008).
84. Ritter, K. A. and Lyding, J. W., "The influence of edge structure on the electronic properties of graphene quantum dots and nanoribbons", *Nature Materials*, 8: 235-242 (2009).
85. Wu, J., Becerril, H. A., Bao, Z., Liu, Z., Chen, Y. and Peumans, P., "Organic solar cells with solution-processed graphene transparent electrodes", *Applied Physics Letters*, 92 (263302) (2008).
86. Li, X., Wang, X., Zhang, L., Lee, S. and Dai, H., "Chemically derived, ultrasmooth graphene nanoribbon semiconductors", *Science*, 319 (5867): 1229-1232 (2008).
87. Kuila, T., Bose, S., Mishra, A., Khanra, P., Kim, N. and Lee, J., "Chemical functionalization of graphene and its applications", *Progress in Materials Science*, 57: 1061-1105 (2012).
88. Sadasivuni, K. K., Ponnamma, D., Kim, J. and Thomas, S., "Graphene-based polymer nanocomposites in Electronics", *Springer Series on Polymer and Composite Materials*, 382: 175 (2015).
89. Galpaya, D., Wang, M., Liu, M., Motta, N., Waclawik, E. and Yan, C., "Recent advances in fabrication and characterization of graphene-polymer nanocomposites", *Graphene*, 1: 30-49 (2012).
90. Kuilla, T., Bhadrab, S., Yao, K. N. H., Bose, D. S. and Lee, J. H., "Recent advances in graphene based polymer composites", *Progress in Polymer Science*, 35: 1350-1375 (2010).
91. Verdejo, R., Bernal, M. M., Romasanta, L. J. and Lopez-Manchado, M. A., "Graphene filled polymer nanocomposites", *Journal of Materials Chemistry*, 21 (10): 3301-3310 (2011).
92. Potts, J. R., Dreyer, D. R., Bielawski, C. W. and Ruoff, R. S., "Graphene-based polymer nanocomposites", *Polymer*, 52 (1): 5-25 (2011).
93. Zhang, H.-B., Zhang, W.-G., Yan, Q., Jiang, Z.-G. and Yu, Z.-Z., "The effect of surface chemistry of graphene on rheological and electrical properties of polymethyl-methacrylate composites", *Carbon*, 50 (14): 5117-5125 (2012).
94. Pham, V. H., Dang, T. T., Hur, S. H., Kim, E. J. and Chung, J. S., "Highly conductive poly (methyl methacrylate) (PMMA)-reduced graphene oxide composite prepared by self-assembly of PMMA latex and graphene oxide through electrostatic interaction", *ACS Applied Materials Interfaces*, 4 (5): 2630-2636 (2012).

95. Yang, Y. -K., He, C. -E., Peng, R. -G., Baji, A., Du, X. -S., Huang, Y. -L., Xie, X. -L. and Maia, Y. -W., "Non-covalently modified graphene sheets by imidazolium ionic liquids for multifunctional polymer nanocomposites", *Journal of Materials Chemistry*, 22 (12): 5666-5675 (2012).
96. Kim, H., Kobayashi, S., AbdurRahim, M., Zhang, M. J., Khusainova, A., Hillmyer, M. A., Abdala, A. A. and Macosko, C. W., "Graphene/polyethylene nanocomposites: effect of polyethylene functionalization and blending methods", *Polymer*, 52 (8):1837-1846 (2011).
97. Yang, S.-Y., Lin, W. -N., Huang, Y. -L., Tien, H.-W., Wang, J. -Y., Ma, C. -C. M., Li, S. -M. and Wang, Y. -S., "Synergetic effects of graphene plate- lets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites", *Carbon*, 49 (3): 793-803 (2011).
98. Layek, R. K., Samanta, S. and Nandi, A. K., "The physical properties of sulfonated graphene/Poly (Vinyl Alcohol) composites", *Carbon*, 50 (3): 815-827 (2012).
99. Jinhong, Y., Huang, X., Wu, C. and Jiang, P., "Permittivity, thermal conductivity and thermal stability of Poly (Vinylidene Fluoride)/graphene nanocomposites", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18 (2): 478-484 (2011).
100. Tang, H., Ehlert, G. J., Lin, Y. and Sodano, H. A., "Highly efficient synthesis of graphene nanocomposites", *Nano Letters*, 12 (1): 84-90 (2011).
101. Harish, C., SreeHarsha, V. S., Santhosh, C., Rajendran, R., Murugan, S., Vanchinathan, T. M., Govardhan, K. and Grace, A. N., "Synthesis of Polyaniline/graphene nanocomposites and its optical, electrical and electro-chemical properties", *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 5 (2): 140-148 (2013).
102. Tsoukleri, G., Parthenios, J., Papagelis, K., Jalil, R., Ferrari, A.C., Geim, A. K. and Novaslov, K. S., Galiotis, C., "Subjecting a graphene monolayer to tension and compression", *Small*, 5: 2397-2402 (2009).
103. Lee, C., Wei, X. D., Li, Q. Y., Carpick, R., Kysar, J. W. and Hone, J., "Elastic and frictional properties of graphene", *Physica Status Solidi B - Basic Solid State Physics*, 246 (11): 2562-2567 (2009).
104. Ghosh, S., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Pokatilov, E., Nika, D. L., Balandin, A. A., Bao, W., Miao, F. and Lau, C. N., "Extremely high thermal conductivity of graphene: prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits", *Applied Physics Letters*, 92 (151911) (2008).

105. Seol, J. H., Jo, I., Moore, A. L., Lindsay, L., Aitken, Z. H., Pettes, M. T., Li, X., Yao, Z., Huang, R., Broido, D., Mingo, N., Ruoff, R. S. and Shi, L., "Two-dimensional phonon transport in supported graphene", *Science*, 328 (5975): 213-216 (2010).
106. Razzak, M. T., Darwis, D., Zainuddin and Sukirno, «Irradiation of polyvinyl alcohol and polyvinyl pyrrolidone blended hydrogel for wound dressing", *Radiation Physics and Chemistry*, 62: 107-113 (2001).
107. Demerlis, C. C. and Schoneker, D. R., "Review of the oral toxicity of polyvinyl alcohol (PVA)", *Food and Chemical Toxicology*, 41: 319-326 (2003).
108. Liu, M., Guo, B., Du, M. and Jia, D., "Drying induced aggregation of halloysite nanotubes in polyvinyl alcohol/halloysite nanotubes solution and its effect on properties of composite film", *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 88: 391-395 (2007).
109. Limpan, N., Prodpran, T., Benjakul, S. and Prasarpran, S., " Influences of degree of hydrolysis and molecular weight of poly (vinyl alcohol)(PVA) on properties of fish myofibrillar protein/PVA blend films", *Food Hydrocolloids*, 29: 226-233 (2012).
110. Gaaz, T. S., Sulong, A. B., Akhtar, M. N., Kadhum, A. A. H., Mohamad, A. B. and Al-Amiery, A. A., "Properties and applications of polyvinyl alcohol, halloysite nanotubes and their nanocomposites", *Molecules*, 20: 22833-22847 (2015).
111. Baker, M. I., Walsh, S. P., Schwartz, Z. and Boyan, B. D., "A review of polyvinyl alcohol and its uses in cartilage and orthopedic applications", *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 100: 1451-1457 (2012).
112. Tan, C. J. and Tong, Y. W., "The effect of protein structural conformation on nanoparticle molecular imprinting of ribonuclease a using miniemulsion polymerization", *Langmuir* , 23: 2722-2730 (2007).
113. Neamen, D. A., "Semiconductor Physics and Devices, Basic Principles, (Yarıiletken Fiziğine Giriş, 1.Baskı)", Çeviri Editörleri: M. Sağlam ve A. Ateş, *Aktif Yayınevi*, İstanbul, 24, 215, (2007).
114. Pierret, R. F., "Semiconductor Fundamentals", *Addison-Wesley Publishing*, New York, (1989).
115. Adachi, S., "Properties of Group IV, III-V and II-VI Semiconductors", *Wiley Series*, England, 406, (2005).



116. Tarımcı, Ç. ve Sarı, H., "Vakum Tekniği", *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 168, (2006).
117. Subbiah, T., Bhat, G. S., Tock, R. W., Parameswaran, S. and Ramkumar, S. S., "Electrospinning of nanofibers", *Journal of Applied Polymer Science*, 96: 557-569 (2005).
118. İnternet: Wikimedia Foundation Inc., "Electrospinning", <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrospinning>, (2016).
119. Hagewood, J. "Polimerik Nanoelyaf Üretimi", *Tekstil Maraton Dergisi*, Temmuz-Ağustos (4): 18-20 (2004).
120. Ramaseshan, R., Sundarrajan, S., Jose, R. and Ramakrishna, S., "Nanostructured ceramics by electrospinning", *Journal of Applied Physics*, 102 (11) (2007).
121. Kaya, A., Marıl, E., Altındal, Ş. and Uslu, İ., "The comparative electrical characteristics of Au/n-Si (MS) diodes with and without a 2% graphene cobalt-doped  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{Ga}_{0.001}\text{O}_x$  interfacial layer at room temperature", *Microelectronic Engineering*, 149: 166-171 (2016).
122. Gökçen, M., Altındal, Ş., Karaman, M. and Aydemir, U., "Forward and reverse bias current-voltage characteristics of Au/n-Si Schottky barrier diodes with and without  $\text{SnO}_2$  insulator layer", *Physica B: Condensed Matter*, 406 (21): 4119-4123 (2011).
123. Uma Devi, C., Sharma, A. K. and Rao, V. R. N., "Electrical and optical properties of pure and silver nitrate-doped polyvinyl alcohol films", *Material Letters*, 56 (3): 167-174 (2002).
124. Vijaya Kumar, G. and Chandramani, R., "Doping and irradiation dependence of electrical conductivity of  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  doped polyvinyl alcohol films", *Acta Physica Polonica A*, 117: 917-920 (2010).
125. Aydemir, U., Taşçioğlu, I., Altındal, Ş. and Uslu, I., "A detailed comparative study on the main electrical parameters of Au/n-Si and Au/PVA:Zn/n-Si Schottky barrier diodes", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16 (6): 1865-1872 (2013).
126. Tan, S. O., Uslu Tecimer, H., Çiçek, O., Tecimer, H., Orak, İ. and Altındal, Ş., "Electrical characterizations of Au/ZnO/n-GaAs Schottky diodes under distinct illumination intensities", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* (2016).

127. Yerişkin, S. A., Uslu, H., Tunç, T. and Altındal, Ş., "Illumination effect on admittance measurements of polyvinyl alcohol (Co, Zn-Doped)/n-Si Schottky barrier diodes in wide frequency and applied bias voltage range", *International Congress on Advances in Applied Physics and Materials Science*, 1400: 541-545 (2011).
128. Kanbur, H., Altındal, Ş, Mammadov, T. and Şafak, Y., "Effects of illumination on  $I$ - $V$ ,  $C$ - $V$  and  $G/w$ - $V$  characteristics of Au/n-CdTe Schottky barrier diodes", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 13 (6): 713-718, (2011).
129. Altuntaş, H., Altındal, Ş., Özçelik, S. and Shtrikman, H., "Electrical characteristics of Au/n-GaAs Schottky barrier diodes with and without SiO<sub>2</sub> insulator layer at room temperature", *Vacuum*, 83: 1060-1065 (2009).
130. Bilkan, Ç., Zeyrek, S., San, S. E. and Altındal, Ş., "A compare of electrical characteristics in Al/p-Si (MS) and Al/C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>/p-Si (MPS) type diodes using current-voltage ( $I$ - $V$ ) and capacitance-voltage ( $C$ - $V$ ) measurements,» *Materials Science in Semiconductor Processing*, 32: 137-144 (2015).
131. Gökçen, M., Tunç, T., Altındal, Ş. and Uslu, İ., "The effect of PVA (Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped) interfacial layer and series resistance on electrical characteristics of Au/n-Si (110) Schottky barrier diodes (SBDs)", *Current Applied Physics*, 12: 525-530 (2012).
132. Khurelbaatar, Z., Kil, Y. -H., Yun, H. -J., Shim, K. -H. and Nam, J. T., "Modification of Schottky barrier properties of Au/n-type Ge Schottky barrier diode using monolayer graphene interlayer", *Journal of Alloys and Compounds*, 614: 323-329 (2014).
133. Demirezen, S., Kaya, A., Vural, Ö. and Altındal, Ş., "The effect of Mo-doped PVC+TCNQ interfacial layer on the electrical properties of Au/PVC+TCNQ/p-Si structures at room temperature", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 33: 140-148 (2015).
134. Reddy, V. R., "Electrical properties of Au/polyvinylidene fluoride/n-InP Schottky diode with polymer interlayer", *Thin Solid Films*, 556: 300-306 (2014) .

## ÖZGEÇMİŞ

Osman ÇİÇEK 1986 yılında Konya'nın Bozkır ilçesinde doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2003 yılında Gazi Üniversitesi Elektrik Öğretmenliği bölümünde lisans öğrenimine başladı. 2008 yılında “onur” derecesi ile mezun oldu. Elektrik-Elektronik alanındaki iş tecrübesinin ardından 2011 yılında, halen çalışmakta olduğu Kastamonu Üniversitesi Araç Rafet Vergili Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak göreve başladı. KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2011 yılında başlamış olduğu yüksek lisans öğrenimini 2013 yılında başarıyla tamamladı ve aynı yıl doktora öğrenimine başladı. İyi derece İngilizce bilen Osman ÇİÇEK evli ve bir kız çocuk babasıdır.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Kastamonu Üniversitesi Araç Rafet Vergili Meslek Yüksekokulu  
Yeşil Mah. Kastamonu Cad. No:15  
Araç / KASTAMONU

Tel : +90 505 650 50 55

E-posta : [ocicek@kastamonu.edu.tr](mailto:ocicek@kastamonu.edu.tr)