

**ZnO ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY ENGEL  
DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL  
ÖZELLİKLERİNİN AYDINLATMA ŞİDDETİNE  
BAĞLI İNCELENMESİ**

**2016  
DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Serhat Orkun TAN**

**ZnO ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN  
HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN AYDINLATMA  
ŞİDDETİNE BAĞLI İNCELENMESİ**

**Serhat Orkun TAN**



**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Mayıs 2016**

Serhat Orkun TAN tarafından hazırlanan “ZnO ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylım.

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. 20/ 05/ 2016

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL (GÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Habibe TECİMER (KBÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Perihan DURMUŞ (GÜ)	.....
Üye : Yrd.Doç. Dr. Mustafa Burak TÜRKÖZ (KBÜ)	.....
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.”*

Serhat Orkun TAN

## ÖZET

Doktora Tezi

### ZnO ARAYÜZEY TABAKALI SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI İNCELENMESİ

Serhat Orkun TAN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Habibe TECİMER

Mayıs 2016, 85 sayfa

Au/ZnO/n-GaAs Schottky engel diyotlar (SBDs) laboratuvar ortamında hazırlanmış olup akım-voltaj, kapasitans-voltaj ve kondüktans-voltaj karakteristikleri göz önüne alınarak oda sıcaklığında farklı aydınlatma şiddetleri altında incelenmiştir. Hazırlanmış diyotun ters polarma akımı aydınlatma şiddetinin artmasıyla artarken doğru polarma akımı neredeyse değişmemektedir. Dolayısıyla şönt direnci aydınlatma şiddeti ile azalırken seri direnç neredeyse sabit kalmıştır ki bu durum diyotun ışığa duyarlı olduğunu ve fotodiyot davranışı sergilediğini göstermektedir. Aydınlatmadan sonra idealite faktöründeki artış M/S arayüzünde homojensizlikler olduğu varsayımına atfedilebilir. Hem idealite faktörü hem de etkin engel yüksekliğinin voltaja bağlı değişimi dikkate alınarak yüzey durumlarının enerji dağılım profili ( $N_{ss}$ ) doğru polarma akım-voltaj verileri ile oluşturulmuş ve artan aydınlatma şiddeti ile artmıştır. Seri direnç dikkate alınarak elde edilen  $N_{ss}$  değerleri,

seri direnç ihmal edilerek elde edinilen değerlerden daha düşüktür. Frekansa bağlı ölçümler ele alındığında kapasitansın azalması kondüktans artışına ile sonuçlanmaktadır. Doğru polarmada yüksek frekansta negatif kapasitans (NC) değerlerindeki artış seri direnç, arayüzey durumları ve arayüzey tabakasının varlığı ile açıklanmaktadır. NC değerleri aydınlatma şiddetinin azalmasıyla kondüktans değerleri ise aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bu davranış SBD içinde polarizasyon ve akım taşıyıcıların artışına bağlanmıştır. Voltaja bağımlı direnç değerleri aydınlatma şiddetindeki artışa bağlı olarak azalmıştır. Sonuç olarak, yüzey durumları rekombinasyon merkezleri gibi davranmakta olup özellikle ters polarma akım-voltaj karakteristiklerinde büyük önem arz etmektedir. Ayrıca deneysel sonuçlar Au/ZnO/n-GaAs SBD' lerin elektriksel özellikleri ile frekans, aydınlatma ve uygulanan voltaj değerleri arasındaki güçlü etkileşimi ortaya koymaktadır.

**Anahtar Sözcükler** : Au/ZnO/n-GaAs Schottky diyotlar, ZnO, MIS, GaAs, aydınlatma etkisi, seri direnç, arayüzey durumları.

**Bilim Kodu** : 905.1.035

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **THE PREPARATION OF SCHOTTKY BARRIER DIODES WITH ZnO INTERFACE LAYER AND THE INVESTIGATION OF THEIR ELECTRICAL PROPERTIES DEPENDENT ON ILLUMINATION INTENSITY**

**Serhat Orkun TAN**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Habibe TECİMER**

**May 2016, 85 pages**

The Au/ZnO/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs) were fabricated and examined regarding to its current-voltage, capacitance-voltage and conductance-voltage characteristics both in dark and under distinct illumination levels at room temperature. While the reverse current increases with increasing illumination level, forward current is almost unchanged with illumination. So, while the value of series resistance is almost not changed with illumination the shunt resistance is decreased which indicates that the fabricated SBDs exhibit a photodiode behavior. The increase of  $n$  after illumination can be explained by assuming inhomogeneities at M/S interface. Considering both the ideality factor and the voltage dependent effective barrier height, the energy distribution profiles of surface states ( $N_{ss}$ ) were determined from the forward bias current-voltage data and increased with the increment in the

illumination level. The  $N_{ss}$  values extracted by taking into account series resistance are lower than those acquired by ignoring series resistance. The frequency dependence characteristics of measurements indicate that the relations between  $C$  and  $G/\omega$  were observed as the decrement in capacitance corresponds to an increment in conductance. The increment of negative capacitance (NC) values by high frequency at forward biases was attributed to the series resistance, interface states and interfacial layer. Considering the illumination intensity, the NC values increase with the decreasing illumination while the  $G/\omega$  values increase with the increasing illumination. This behavior of the capacitance and conductance referred to the increments in the polarization and carriers in the SBDs. The voltage dependent resistivity decreases with increasing illumination levels. Consequently, surface states can act as recombination centers and have great importance especially in reverse bias current-voltage characteristics. Eventually, a strong interaction between the electrical properties of Au/ZnO/n-GaAs SBDs and the values of frequency, illumination and applied bias voltage explained by experimental results.

**Key Word** : Au/ZnO/n-GaAs Schottky diodes, ZnO, MIS, GaAs, illumination effect, series resistance, surface states.

**Science Code** : 905.1.035



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Habibe TECİMER' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmam boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocalarım Prof. Dr. İhsan ULUER'e ve Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a, deneylerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Hüseyin TECİMER'e, Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM)'da numunenin hazırlanma aşamasında yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. İkrım ORAK' a ve çalışmamın sonuç aşamasında desteğini esirgemeyen Öğr. Gör. Kürşat M. KARAOĞLAN' a teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarım esnasında maddi destek veren Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje no: KBU-BAP-14/2-DR-005) teşekkür ederim.

Ayrıca üzerimde sonsuz emekleri bulunan rahmetli anneannem Münevver ERTUTAR ve büyükbabam Ahmet ERTUTAR' ın anısına ithaf ettiğim doktora tezimi hazırladığım süreçte manevi desteklerini esirgemeyen başta annem Rabia TAN, babam Yakup TAN, sevgili eşim Beril TAN ve çocuklarım olmak üzere bütün aile fertlerime tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
1.1. LİTERATÜR.....	3
BÖLÜM 2 .....	8
KURAMSAL TEMELLER .....	8
2.1. METAL/YARIİLETKEN (MS) YAPILAR.....	8
2.1.1. Metal Yarıiletken Kontak Türleri.....	8
2.1.2. Schottky-Mott Teorisi .....	9
2.2. MS KONTAKLARDA AKIM İLETİM MEKANİZMALARI.....	14
2.2.1. Termiyonik Emisyon Kuramı.....	15
2.3. METAL/YALITKAN/YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR.....	17
2.3.1. İdeal MIS Yapılar .....	17
2.3.2. Gerçek MIS Yapılar .....	21
2.4. MIS YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER .....	21
2.4.1. İdealite Faktörü.....	22
2.4.2. Seri Direnç.....	23
2.4.3. Engel Yüksekliği .....	25
2.4.4. Arayüzey Durumları.....	26

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.4.5. Negatif Kapasitans.....	28
<b>BÖLÜM 3</b> .....	<b>29</b>
<b>MATERYAL YÖNTEM</b> .....	<b>29</b>
3.1. ÇİNKO OKSİT.....	29
3.1.1. Kimyasal Özellikleri.....	30
3.1.2. Fiziksel Özellikleri .....	30
3.1.3. Mekanik Özellikleri.....	31
3.1.4. Elektriksel Özellikleri.....	31
3.1.5. Üretimi.....	32
3.1.6. Uygulama Alanları .....	34
3.1.7. Güvenlik .....	34
3.2. GALYUM ARSENİK .....	35
3.2.1. Temel Özellikleri.....	35
3.2.2. Silisyum Ve GaAs Karşılaştırması.....	38
3.3. Au/ZnO/GaAs MIS YAPISININ HAZIRLANMASI.....	40
3.3.1. Kristalin Temizlenmesi .....	41
3.3.2. Omik Kontakın Oluşturulması .....	42
3.3.3. Radyo-Frekans (RF) Püskürtme Yöntemi İle ZnO Biriktirme.....	44
3.3.4. Doğrultucu (Schottky) Kontak Hazırlanması.....	47
3.4. ÖLÇÜM SİSTEMİ .....	48
<b>BÖLÜM 4</b> .....	<b>51</b>
<b>ARAŞTIRMA BULGULARI</b> .....	<b>51</b>
4.1. AKIM-VOLTAJ (I–V) KARAKTERİSTİKLERİ.....	52
4.2. KAPASİTANS-VOLTAJ (C–V) VE KONDÜKTANS-VOLTAJ (G/Ω–V) KARAKTERİSTİKLERİ .....	65
<b>BÖLÜM 5</b> .....	<b>73</b>
<b>SONUÇLAR</b> .....	<b>73</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>77</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>85</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1.	Metal/n-tipi yarıiletken kontakta, elektron enerji-band diyagramı .....	10
Şekil 2.2.	Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji-band diyagramı.....	13
Şekil 2.3.	Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için doğru polarma altında akım ve elektron akış yönü.....	13
Şekil 2.4.	Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için ters polarma altında akım ve elektron akış yönü.....	14
Şekil 2.5.	Doğru polarmada metal/n-tipi yarıiletken yapıların farklı akım-iletim yöntemleri.....	15
Şekil 2.6.	Metal-yalıtkan-yarıiletken yapının şematik gösterimi. ....	17
Şekil 2.7.	İdeal bir MIS/n-tipi yapısının enerji-band diyagramı ( $V=0$ ).....	18
Şekil 2.8.	MIS kapasitansı eşdeğer devresi. ....	19
Şekil 2.9.	MS kontaklarda seri direnç ( $R_s$ ) etkisi. ....	23
Şekil 2.10.	MS kontak engel homojensizliğinin üç boyutlu enerji-band diyagramı. .	25
Şekil 2.11.	Yalıtkan arayüzey tabakasına sahip MS kantağın enerji band diyagramı.	27
Şekil 3.1.	Beyaz toz şeklindeki ZnO. ....	29
Şekil 3.2.	Çinko oksit kristal yapısı.....	31
Şekil 3.3.	GaAs yonga plakası.....	35
Şekil 3.4.	Zinc blende yapıdaki GaAs kristali. ....	36
Şekil 3.5.	GaAs için enerji-band diyagramı. ....	36
Şekil 3.6.	Direk band yapısı. ....	38
Şekil 3.7.	GaAs ve Si için enerji band yapıları. ....	39
Şekil 3.8.	Si ve GaAs için taşıyıcı hızlarının değişimi. ....	39
Şekil 3.9.	Kristal temizleme işlemi.....	41
Şekil 3.10.	Omik kontak oluşturmak için kullanılan maske.....	42
Şekil 3.11.	Termal buharlaştırma ünitesine ait şematik gösterim. ....	43
Şekil 3.12.	Vaksis MIDAS termal buharlaştırma PVD/3T cihazının fotoğrafı.....	44
Şekil 3.13.	RF püskürtme sisteminin temel bileşenleri. ....	45
Şekil 3.14.	Vaksis Nano-D 4S Magnetron Püskürtme cihazı.....	46
Şekil 3.15.	Schottky kontak oluşturulurken kullanılan maske çeşitleri. ....	47

## Sayfa

Şekil 3.16. Hazırlanan Au/ZnO/n-GaAs Schottky engel diyot. ....	48
Şekil 3.17. Bir ışık kaynağının altında Au/ ZnO/n-GaAs SBD'ler yapısına ölçüm sistemi bağlantısı. ....	48
Şekil 3.18. Deneysel ölçüm sistemi.....	49
Şekil 4.1. Farklı aydınlatma koşulları altında Au/ZnO/n-GaAs SBD için doğru ve ters polarma I-V karakteristikleri. ....	54
Şekil 4.2. Aydınlatma şiddetleri altında $\Phi_{B_0}$ ve n değişim grafiği.....	55
Şekil 4.3. Çeşitli aydınlatma şiddetleri altında Au/ZnO/n-GaAs SBD yapısında voltaja bağımlı direncin etkileri. ....	56
Şekil 4.4. Farklı aydınlatma koşulları altında I' ya karşı $dV/d\ln(I)$ ve H(I) grafikleri.....	58
Şekil 4.5. Belirli aydınlatma seviyelerinde $N_{ss}$ enerji dağılım profili ve $R_s$ etkisi. .	62
Şekil 4.6. Farklı aydınlatma koşullarında Au/ZnO/n-GaAs SBDs F(V)-V grafiği.	64
Şekil 4.7. Au/ZnO/n-GaAs SBD C-V karaktersitikleri.....	66
Şekil 4.8. Au/ZnO/n-GaAs SBD $G/\omega$ -V karakteristikleri.....	67
Şekil 4.9. Au/ZnO/n-GaAs SBDs için 500 kHz'de C-V ve $G/\omega$ -V grafikleri .....	69
Şekil 4.10. Au/ZnO/n-GaAs SBD $R_i$ -V karakteristikleri.....	71

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. MS kontaklarda iş fonksiyonlarına göre kontakların yapısı. ....	8
Çizelge 3.1. GaAs kristalinin elektron ve boşluklara göre mobilite ve etkin kütle değerleri. ....	37
Çizelge 3.2. GaAs kristalinin elektron ve boşluklara göre mobilite ve etkin kütle değerleri. ....	38
Çizelge 4.1. Au/ ZnO/n-GaAs yapısının aydınlatma bağımlı parametre değerleri...	65



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- A : Alan  
Å : Angstrom  
Au : Altın  
A\* : Richardson sabiti  
BH : Engel yüksekliği  
 $\beta$  : Etkin engel yüksekliği gerilim katsayısı  
c : Işık hızı  
C : Kapasitans  
C<sub>o</sub> : Boş kondansatörün sığası  
C<sub>ox</sub> : Yalıtkan tabakanın kapasitansı  
C<sub>sc</sub> : Uzay yükü kapasitansı  
C<sub>m</sub> : Ölçülen kapasitans değeri  
 $\delta$  : Yalıtkan/oksit tabakasının kalınlığı  
E : Elektrik Alan  
E<sub>v</sub> : Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi  
E<sub>c</sub> : İletkenlik bant kenarı enerjisi  
E<sub>F</sub> : Fermi enerjisi  
E<sub>FM</sub> : Metalin Fermi enerji seviyesi  
E<sub>FS</sub> : Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi  
E<sub>Vac</sub> : Vakum enerji seviyesi  
E<sub>g</sub> : Yarıiletken yasak enerji aralığı  
E<sub>i</sub> : Saf enerji seviyesi  
E<sub>SS</sub> : Arayüzey durumları enerjisi  
eV : Elektronvolt  
 $\epsilon_0$  : Boşluğun elektrik geçirgenliği  
 $\epsilon_i$  : Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti

$\epsilon_s$  : Yarıiletkenin dielektrik sabiti  
 $F(V)$  : Norde fonksiyonu  
 $F(V_0)$  : Norde fonksiyonu minimum noktası  
Hz : Frekans birimi (Hertz)  
h : Planck sabiti  
 $I_0$  : Doyum akımı  
 $I_F$  : Doğru polarma akımı  
 $I_R$  : Ters polarma akımı  
 $I_{s \rightarrow m}$  : Yarıiletkenden metale akım yoğunluğu  
K : Termodinamik sıcaklık  
k : Boltzmann sabiti  
 $m^*$  : Elektronun etkin kütlesi  
 $m_0$  : Serbest elektron kütlesi  
 $\mu_n$  : elektron mobilitesi  
 $\mu_p$  : boşluk mobilitesi  
n : İdealite faktörü  
 $N_D$  : Verici katkı atomları  
 $N_A$  : Alıcı katkı atomları  
 $N_{ss}$  : Arayüzey durum yoğunluğu  
 $Q_{sc}$  : Uzay yükü  
q : Elektrik yükü  
 $R_i$  : Voltaja bağlı direnç  
 $R_s$  : Seri direnç  
 $R_{sh}$  : Şönt direnç  
RF : Radyo frekans  
Si : Silisyum  
GaAs : Galyum arsenik  
ZnO : Çinko oksit  
T : Mutlak sıcaklık  
 $v_x$  : İletim yönündeki taşıyıcı hızı  
 $v_d$  : Sürüklenme hızı  
V : Voltaj  
 $V_D$  : Diyot voltajı



- $V_F$  : Doğru polarma voltajı  
 $V_R$  : Ters polarma voltajı  
 $V_G$  : Metal plakaya uygulanan voltaj  
 $V_o$  : Kesişme voltajı  
 $W_D$  : Tüketim tabakasının kalınlığı  
 $\Phi_B$  : Potansiyel engel yüksekliği  
 $\Phi_{Bo}$  : Sıfır polarma potansiyel engel yüksekliği  
 $\Phi_s$  : Yarıiletkenin iş fonksiyonu  
 $\Phi_m$  : Metalin iş fonksiyonu  
 $\Phi_e$  : Etkin engel yüksekliği  
 $\Phi_n$  : İletim bandı enerji seviyesi ile Fermi enerji seviyesi arasındaki fark  
 $d$  : Yalıtkan tabaka kalınlığı  
 $M\Omega$  : Megaohm  
 $GPa$  : Giga paskal  
 $r$  : Öz direnç  
 $\chi_s$  : Elektron yakınlığı  
 $\Psi_B$  : Fermi ile saf enerji seviyeleri arasındaki fark  
 $\lambda$  : Dalga boyu  
 $\gamma$  : İdealite faktöründen büyük bir sabit değer

## KISALTMALAR

- I-V : Current-Voltage (Akım-Voltaj)  
BH : Barrier Height (Engel Yüksekliği)  
SCs : Solar Cells (Fotovoltaik Hücreler)  
LEDs : Light Emitting Diodes (Işık Yayan Diyotlar)  
FETs : Field Effect Transistor (Alan Etkili Transistörler)  
NC : Negative Capacitance (Negatif Kapasitans)  
MS : Metal-Semiconductor (Metal-Yarıiletken)  
SBDs : Schottky Barrier Diodes (Schottky Engel Diyotları)  
MIS : Metal-Insulator-Semiconductor (Metal-Yalıtkan-Yarıiletken)  
MPS : Metal-Polymer-Semiconductor (Metal-Polimer-Yarıiletken)  
AC : Alternative current (Alternatif Akım)  
DC : Direct current (Doğru Akım)  
C-V : Capacitance-Voltage (Kapasitans-Voltaj)  
G/ $\omega$ -V : Conductance-Voltage (Kondüktans-Voltaj)  
TE : Termiyonik Emisyon Teorisi  
TED : Termiyonik Emisyon-Difüzyon  
AE : Alan Emisyonu  
TAE : Termiyonik Alan Emisyonu  
UV : Ultraviolet (Ultraviyole)  
PVA : (Polyvinyl Alcohol) Polivinil Alkol

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Schottky diyotlar yüksek frekanslarda üzerlerine uygulanan gerilimin yön değiştirmesi ve iletkenlik ve yalıtkanlık durumları arasındaki hızlı geçişlere cevap verebilmesi gibi özelliklere sahiptir. Bunun yanısıra Schottky diyotu diğer diyotlardan farklı kılan çok hızlı anahtarlama kabiliyeti ve düşük seviyede ileri gerilim düşümü gibi önemli avantajları vardır. Bu önemli avantajları göz önüne alındığında ideale yakın yüksek performansta bir Schottky diyot üretimi elektronik teknolojisinde kullanımı açısından önem arz etmektedir. Schottky engel diyotları bir metal ile yarıiletkenin sıkı kontak edilmesiyle oluşturulmuştur ve yarıiletken endüstrisinde yaygın halde kullanılmaktadır. Bu yaygın kullanımının gereği olarak metal-yarıiletken (MS), arayüzey tabakalı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) veya metal-polimer-yarıiletken (MPS) yapılarla ilgili deneysel ve teorik birçok çalışma yapılmaktadır [1-10].

Bir metal ile bir yarıiletkenin arasına herhangi farklı bir madde dâhil edilmeksizin kontak durumuna getirilmesiyle MS yapı meydana gelir. Elektronik ve optoelektronik cihazlar için önemli yere sahip olması ve büyük ilgi uyandırması ile MS yapılar, katı elektronik cihazların daha iyi anlaşılmasına ciddi katkı sağlamaktadır [11-13]. Metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlı olarak MS kontaklar, doğrultucu kontak veya Schottky kontak ve omik kontak olmak üzere ikiye ayrılır. Bu kontakların seçimi MS Schottky diyotların üretiminde oldukça önemlidir.

Metal ile yarıiletken tabakaların arasında doğal yöntemlerle veya yapay bir oksidasyon yöntemi kullanılarak yalıtkan bir tabakanın oluşturulması ile Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapılar elde edilir. Metal ile yarıiletken arasında yalıtkan olarak silisyum-dioksit ( $\text{SiO}_2$ ), kalay-dioksit ( $\text{SnO}_2$ ) gibi bileşikler kullanılarak

oluşturulan yalıtkan tabaka, metal ve yarıiletkeni birbirinden izole ederken aynı zamanda yük geçişlerini de düzenler [3].

Elektriksel karakteristikleri arayüzeysel yalıtkan/polimer tabaka oluşumuna, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeysel özelliklere, seri dirence ( $R_s$ ) ve Schottky engel yüksekliklerindeki homojensizliğe bağlı olan Metal-Polimer-Yarıiletken (MPS) yapılar bu özellikleri ile MIS yapılar ile benzerlik göstermektedirler [4].

Yarıiletkenin tipine (p/n) bağlı olarak seçilen uygun iş fonksiyonlu metaller doğrultucu kontak olarak MS, MIS veya MPS yapıların hazırlanmasında kullanılır. Metal olarak yüksek saflıkta altın (Au), gümüş (Ag) ve alüminyum (Al) gibi metaller kullanılır. Yarıiletken olarak ise yüksek sıcaklıkta kararlı ve daha ekonomik olması açısından genellikle silisyum (Si) tercih edilir. MIS/MPS yapılarda metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan/organik tabakanın kalitesi ve yarı iletken yüzeyi MIS/MPS Schottky engel diyotun performans ve güvenilirliği önemli ölçüde etkilediği gibi yük geçişlerini düzenlemek için de son derece önemlidir. Burada genellikle kontrol edilebilir akım-iletim mekanizması gerçekleştirecek, sızıntı akımını en aza indirecek, yüzeyi pasivize edecek, yüksek dielektrik sabitli malzemeler seçilmelidir [14-18]. Bu özelliklere sahip arayüzey tabakalara yalıtkan olarak  $SiO_2$ ,  $SnO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $TiO_2$ , organik olarak ise poli-indol, poli-anilin ve poli-vinil alkol (PVA) örnek gösterilebilir.

Birçok malzeme bugüne kadar arayüzey tabakası olarak kullanılmıştır. Bunlar arasında galyum arsenik (GaAs) tabanlı SBD' ler için etkili bir inorganik ara yüzey tabakası olarak bilinen çinko oksit ( $ZnO$ ) sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek şeffaflık, piezoelektrik, oda sıcaklığında ferromanyetizm gibi üstün özellikleri sayesinde geniş bant yapısına sahip olan  $ZnO$  oda sıcaklığındaki polariton lazerler, UV fotodedektörler, piezotronik gibi birçok uygulamada kendine yer bulmuştur [19-21]. Ayrıca bu çalışmada kullanıldığı gibi, Au/ $ZnO$  yapısı Schottky kontakların akım iletim mekanizmalarını incelemek için araştırmacılar tarafından defalarca kullanılmıştır [20-22].  $ZnO$  arayüzey tabakası ideal davranış göz önüne alındığında SBD özelliklerini önemli ölçüde değiştirir [23]. Ayrıca, metal yarıiletken engel

yüksekliği ( $\Phi_{B0}$ ), yalıtkan arayüzey tabakasının kalınlığı ( $\delta$ ),  $N_{ss}$  ve  $R_s$  gibi yapıyı ideal olmayan duruma getirebilen çeşitli faktörler de vardır [23-26].

Galyum Arsenik (GaAs) yarıiletkeni, MS kontaklar ve MIS yapılar üzerine yapılan çok sayıda bilimsel çalışmada kullanılmıştır [27-30]. Çok amaçlı yarı iletken olarak GaAs ayrıca güneş hücreleri, alan etkili transistor (FET) aygıtları, ışık yayan diyotlar (LED' ler), mikrodalga cihazlar ve diğer entegre devre elemanları gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Direk yasak band aralığı, yüksek elektron hareketliliği, daha düşük güç dağılımı, yüksek kırılma gerilimi ve mekaniksel stabilitesi, yüksek hızlı ve düşük güçteki cihazlarda GaAs kullanımının yaygınlaşmasını sağlayan en önemli özelliklerdir [5,8,31,32]. GaAs elektronik cihazlardaki gelişim nedeniyle, günümüzde GaAs metal kontakları hakkında geniş bilgiye sahip olunmuştur [8] Uygulanan doğru polarma, seri direnç ( $R_s$ ), frekans, arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) ve sıcaklık GaAs tabanlı cihazların performansını belirleyen önemli parametrelerdir [33-37].

Bu çalışmada, metal-yarıiletken (Au/n-GaAs) Schottky engel diyotları ZnO arayüzeyi eklenerek laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Böylece elektriksel karakteristikleri arayüzeyel yalıtkan tabaka oluşumuna, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyel özelliklere, seri dirence ( $R_s$ ) ve Schottky engel yüksekliklerindeki homojensizliğe bağlı olan Au/ZnO/n-GaAs yapısı elde edilmiştir. Geniş bir aydınlatma şiddeti aralığında akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj ( $G/\omega$ -V) ölçümleri alınarak oda sıcaklığında temel elektriksel özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen deneysel ölçüm sonuçları Au/ZnO/n-GaAs SBDs' nin elektriksel özellikleri ile frekans, aydınlatma ve uygulanan voltaj değerleri arasındaki güçlü etkileşimi ortaya koymaktadır.

## 1.1. LİTERATÜR

Braun 1874' te kurşun sülfid ve demir sülfid yarıiletkenleri üzerinde metal nokta kontaklar kullanarak elde ettiği ile MS diyotlar ile doğrultma işlemini gerçekleştirilmiştir. Kontak diyotlar ilk MS yapı olup bu yapının geliştirilmiş şekli

metal ve yarıiletken ara yüzeyinde vakum olan ve eklem bölgesindeki akım dağılımı ve kontak potansiyeli homojen olan Schottky engel diyottur [1-4].

1931'de MS kontakların anlaşılmasına olanak sağlayan çok önemli bir araştırmada, akımın etkisiyle kontağın bütününde potansiyelin düşmesini Schottky, Störmer ve Waibel engel yüksekliğinin varlığına işaret etmişlerdir [38].

Au/n-Si Schottky diyotların C-V karakteristiklerini inceleyen Crowell ve Roberts her ne kadar arayüzey hâllerinin enerji dağılım eğrilerini elde etmişlerse de bu dağılımın diyotun I-V karakteristikleri elde edilen dağılım eğrisi ile uyumunu dikkate almamışlardır [39].

Au/n-GaAs Schottky diyotların I-V ve C-V verileri derin donör seviyeleri için Borrego ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda arayüzey tabaka etkisini ihmal eden bir metodu metal ile dengedeki arayüzey hâllerinin enerji dağılımının tespiti için ortaya çıkarmışlardır [40].

Jin ve arkadaşları 1991 yılında yaptıkları çalışmada, Te katkılanmış n-GaAs yarıiletkenini kullanarak bunun yüzeyini hidrojene maruz bıraktıktan sonra Te/n-GaAs Schottky kontaklar elde ettiler. Hidrojene maruz bırakılan Schottky diyotlarda engel yüksekliğinin 0.76 eV'tan 0.58 eV'a kadar azaldığını gözlediler. Hidrojene maruz kalan Schottky kontaklar 100°C'de farklı ters polarma altında tavlendiğinde, bu gerilim değerleri ile birebir uyum halinde olan engel yükseklikleri elde ettiler. Bu işlem ters polarma tavlama voltajları ile engel yüksekliğinin kontrol edilebildiğini göstermektedir [41].

Türüt ve Sağlam 1992 yılında Al/n-Si Schottky engel diyotlar için yaptıkları çalışmada ideal olmayan bir I-V elde etmişlerdir ki idealite faktörünü 1.46 olarak bulmuşlardır. Yine engel yüksekliğinin deplasyon bölgesindeki elektrik alana kuvvetli bir şekilde bağlı olduğunu ve de imaj kuvvetten dolayı düştüğünü saptamışlardır [42].

Eftekhari 1993 yılında yaptığı bir çalışmada, n-GaAs'ın yüzey pasivasyonu için Selenyum kullandı ve elde ettiği MIS Schottky kontakların elektriksel karakteristikleri üzerindeki etkilerini inceledi. Arayüzey durum yoğunluğunun ve tuzak yoğunluğunun azaldığını, bunlara bağlı olarak engel yüksekliği ve ters polarma sızıntı akımının da azaldığını gösterdi. Bu sonuçları arayüzeyde ve GaAs gövdesinde yüzeye yakın ince bir tabakada gerçekleşen As-Se, Se-Se bağ oluşumlarıyla izah etmeye çalıştılar [43].

1996 yılında Sağlam ve arkadaşları, Au/n-GaAs Schottky diyotlarda arayüzey tabakasını dikkate alarak ve almayarak Cheung fonksiyonları yardımı ile seri direnç etkisini ve engel yüksekliğini incelemişlerdir. Bu hesaplamaları yaparken arayüzey tabakası boyunca gerilim düşmesini de hesaplamalara katmışlardır. Ayrıca, arayüzey hâl yoğunluğunun arayüzey hâllerinin enerji dağılımıyla değişimini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir [44].

Çetinkara ve arkadaşları 1999 yılında Au/n-Si Schottky diyotlarda, kontakta önce yüzeyde oluşan doğal oksit tabakasının diyot karakteristikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Omik kontakta sonra numuneyi parçalara bölerek, farklı sürelerde temiz oda havasına maruz bırakılmış Schottky diyotlar yaparak, bu diyotları engel yükseklikleri bakımından karşılaştırmışlardır [45].

Kılıçoğlu ve Asubay 2005 yılında arayüzey tabakalı ve arayüzey tabakasız Au/n-Si/Au-Sb Schottky diyotların I-V karakteristiklerinden idealite faktörü, seri direnç, engel yüksekliği ve arayüzey hâl yoğunluğunun değişimini incelemişlerdir. Ayrıca diyot için çizilen I-V karakteristiklerinden doğru polarma akım değerlerinin ters polarma tarafındaki akım değerlerine mutlak değerce oranlanması olarak tanımlanan doğrultma oranı ifadesini grafik olarak göstermişlerdir [46].

Biber ve arkadaşları 2005 yılındaki çalışmalarında Au/n-GaAs Schottky MIS engel diyotlarının elektriksel ölçümlerini 80-300 K sıcaklık aralığında aldılar. Anodik oksit tabakasının potansiyel engelindeki homojensizliği yok ederek engel yüksekliğini artırdığını gözlemlediler [47].

2006 yılında Duman ve arkadaşları Au-Ge/n-InSe Schottky engel diyotlarının geniş bir sıcaklık aralığında akım iletim mekanizmalarını elektriksel ölçümler neticesinde tespit etmişlerdir. Azalan sıcaklıklarda, engel yüksekliğindeki azalmayı ve idealite faktöründeki artmayı engelin homojen olmamasına atfettiler [48].

Aydın ve arkadaşları 2007 yılında Ni/4H-nSiC Schottky kontakların akım-voltaj karakteristiklerini 180-300 K sıcaklık aralığında incelediler. Artan sıcaklıkla, engel yüksekliğinin arttığını ve idealite faktörünün ise azaldığını gösterdiler. Bu durumu metal-yarıiletken arayüzeyindeki engel homojensizliklerinden dolayı Gauss dağılımlı Termiyonik Emisyon (TE) teorisiyle açıkladılar [49].

Vural ve arkadaşlarının 2009 yılında yaptıkları çalışmada Al/Rhodamine/n-GaAs MPS yapı kullanılmış ve 80-350 K sıcaklık aralığında I-V karakteristiği incelenmiştir. Sıcaklık artışları ile birlikte idealite faktöründe azalma, engel yüksekliğinde artma olduğu gözlemlenmiştir [50].

Uslu 2010 yılında yaptığı çalışmada hazırlanan Au/polivinil alkol (Co, Zn-katkılı)/n-Si Schottky engel diyotlarının temel elektriksel parametrelerinin aydınlatma şiddetine bağlı olduğu ve metal ile yarıiletken arasındaki polimer ara yüzey tabaka, seri direnç ve ara yüzey durumlarından oldukça etkilendiği gözlemlenmiştir [51].

2013 yılında Altındal ve arkadaşları çalışmalarında Zn katkılı PVA organik arayüzey kullanılmış ve ileri ve ters polarmada 80-350 K sıcaklık aralığında 30 K aralıklarla I-V karakteristiği incelemişlerdir. Sıcaklık artışları ile birlikte idealite faktörü 12.85' ten 2.8' e düştüğü, engel yüksekliğinin de 0.145' ten 0.606' ya çıktığı gözlemlenmiştir [52].

Korucu ve arkadaşları 2014 yılında fotolitografi tekniği ile hazırlanan Schottky diyotların sıcaklığa bağımlı karakteristiklerini incelemişlerdir. Kullandıkları Au/n-GaAs SDs yapısının I-V karakteristiklerinin örnek sıcaklıktan bağımsız olduğunu ve 160 - 320 K sıcaklıkları arasında idealite faktörünün 1.10 ve 1.04 aralığında değişmediğinden dolayı 160 K sıcaklığı üzerinde TE modeline uygunluğunu



gözlemlenmişlerdir. Ayrıca engel yüksekliğinin 190 K sıcaklığı üzerinde 0.81 eV civarında bir değerde sabit kaldığını ortaya koymuşlardır [53].

Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey tabakası genellikle silisyum-dioksit ( $\text{SiO}_2$ ), kalay-dioksit ( $\text{SnO}_2$ ) gibi yalıtkan özellikte bileşikler kullanılarak oluşturulmuştur. Metal ve yarıiletkeni birbirinden izole eden ve aynı zamanda yük geçişlerini de düzenleyen arayüzey tabakası bu tez çalışmasında şimdiye kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak yalıtkan yerine yarıiletken ZnO kullanılarak oluşturulmuştur. ZnO ve GaAs yarıiletkenlerinin birlikte çalışma karakteristikleri ve bant genişlikleri göz önüne alınarak arayüzey tabaka seçilen ZnO birçok önemli avantajı sayesinde iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, bundan sonraki çalışmalarda arayüzey tabaka olarak uygun bant genişliğine sahip farklı yarıiletkenlerin kullanılması ile daha yüksek performansa sahip diyot üretimi yapılabileğini ortaya koymaktadır.

Beş bölümden oluşan bu çalışmanın birinci bölümünde, Schottky engel diyotlarının elektronik teknolojisindeki önemi, kullanım alanları, metal yarıiletken yapılar ile ilgili genel bilgiler, yapılan çalışmanın içeriği ve literatür araştırması verilmiştir. İkinci bölümde, metal yarıiletken kontaklar ve bu kontaklardaki temel akım iletim mekanizmaları, metal-yalıtkan-yarıiletken yapılar ve bu yapılar üzerinde etkili olan temel elektriksel parametreler üzerinde durulmuştur. Üçüncü bölümde materyal ve yöntem başlığı altında Au/ZnO/n-GaAs tipi Schottky engel diyotu oluşturan malzemeler hakkında bilgiler, oluşturulacak Schottky engel diyotun hazırlanma aşamaları ve deneylerin yapılması için kullanılan deneysel düzenek ile ilgili bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde, üretilen diyotların akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj ( $G/\omega$ -V) karakteristikleri oda sıcaklığında farklı aydınlatma şiddetleri altında geniş bir frekans aralığında incelenmiştir. Beşinci ve son bölümde ise elde edilen deneysel ölçüm sonuçları literatürdeki benzer çalışmalar göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve sonraki çalışmalara yol göstermesi adına gerekli öneriler sunulmuştur.

## BÖLÜM 2

### KURAMSAL TEMELLER

#### 2.1. METAL/YARIİLETKEN (MS) YAPILAR

##### 2.1.1. Metal Yarıiletken Kontak Türleri

Bir metalin yarıiletken ile sıkı kontak haline getirilmesi sonucunda metal-yarıiletken kontaklar veya metal-yarıiletken Schottky diyotlar elde edilmektedir. Yarıiletken kullanılan elektronik devre elemanları için metal-yarıiletken Schottky diyotlar bir temel oluşturmaktadır. Metal-yarıiletken kontaklar, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları ile belirlenen doğrultucu kontaklar ve omik kontaklardır [51]. Metalin iş fonksiyonu  $\Phi_m$  ve yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\Phi_s$  olmak üzere doğrultucu ve omik kontakların oluşumu Çizelge 2.1' de gösterilmiştir

Çizelge 2.1. MS kontaklarda iş fonksiyonlarına göre kontakların yapısı.

n-tipi	$\Phi_m > \Phi_s$ » » Doğrultucu
	$\Phi_m < \Phi_s$ » » Omik
p-tipi	$\Phi_m < \Phi_s$ » » Doğrultucu
	$\Phi_m < \Phi_s$ » » Omik

Omik kontak metal ile yarıiletken arasında yük taşıyıcıların yani elektronların ve hollerin her iki yönde de kolayca geçebildiği, doğrultucu olmayan, akım voltaj karakteristiği Ohm kanununa uyan ve direnci mümkün olduğunca düşük olan bir kontaklıdır.

Doğrultucu kontak ise lineer olmayan akım-voltaj karakteristiğine sahip olup Schottky kontak olarak da bilinmektedir. Schottky kontakta metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale doğru yük taşıyıcıların iletiminin daha kolay olması durumuna doğrultma denir. Schottky diyotun iletme geçmesi için yeterli gerilim

değerinde, doğru polarma akımının ( $I_F$ ), ters polarma akımına ( $I_R$ ) oranı ise doğrultma oranı olarak adlandırılır [51].

$$\text{Doğrultma oranı} = \frac{I_F}{I_R} \quad (2.1)$$

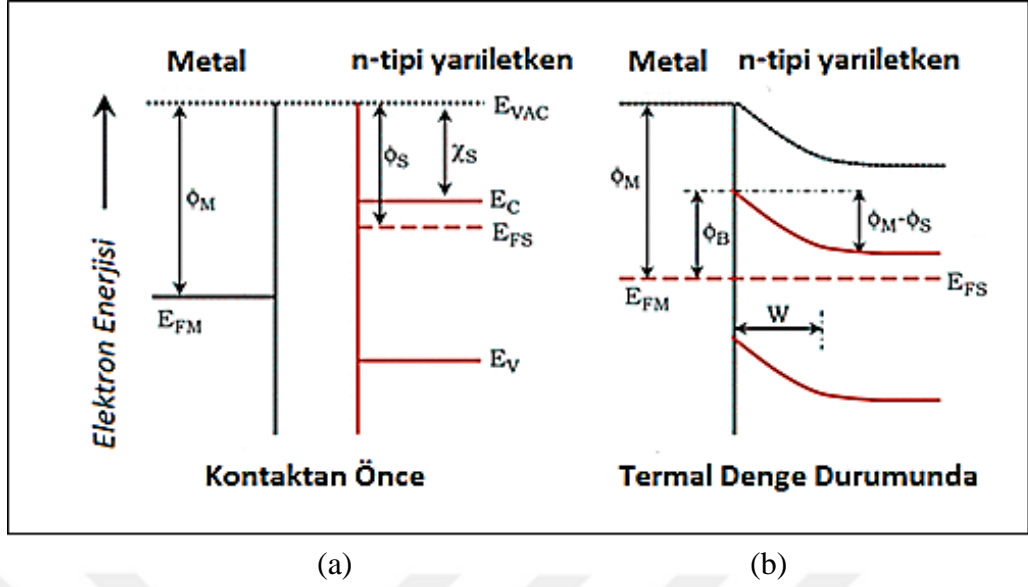
Diyotun kalitesini ve performansını belirleyen bu oran idealde yaklaşık olarak  $10^8$ - $10^{10}$  civarındadır [51].

### 2.1.2. Schottky-Mott Teorisi

Schottky diyot oluşumu sırasında metal ile yarıiletkenin sıkı kontak olması ile MS arayüzeyinde yükler ayrışmakta ve bir potansiyel engel yüksekliği oluşmaktadır. Bu durum, direnci yüksek ve hareketli yüklerden izole edilmiş bir arayüzey tabakası meydana getirmektedir. Metal ve yarıiletken malzemelerin iş fonksiyonları arasındaki fark Schottky-Mott modeline göre potansiyel engeli oluşturmaktadır [54-56].

Doğrultucu kontak oluşum şartı olan  $\Phi_s < \Phi_m$  durumundaki enerji-band diyagramı n-tipi bir yarıiletken için Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Metalin hemen dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi vakum seviyesi olarak belirlenmiştir. Fermi enerji seviyesi olan  $E_{FM}$  ile vakum seviyesi olan  $E_{VAC}$  arasındaki fark metalin iş fonksiyonu olan  $\Phi_m$  ile gösterilmiştir. Bu fark bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır [54-56]. Benzer şekilde bu tanımlama yarıiletkenin iş fonksiyonu olan  $\Phi_s$  için de geçerlidir.

Yarıiletkende katkılama sonucunda Fermi enerji seviyesindeki değişim yarıiletkenin iş fonksiyonu olan  $\Phi_s$ ' de de değişime sebep olacaktır.



Şekil 2.1. Metal/n-tipi yarıiletken kontakta, elektron enerji-band diyagramı, a) kontakstan önce b) kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu.

İletkenlerde Fermi enerjisi,  $T=0$  K sıcaklığında elektronların taban seviyesinden en üst dolu seviyeye kadar işgal ettiği enerji olarak ifade ediliyor iken, yarıiletkenlerde Fermi enerjisi yasağın enerji bölgesinde yer alan ve iletkenlik bandı ( $E_c$ ) ve valans bandındaki ( $E_v$ ) taşıyıcı miktarına bağlı olan izafi seviye olarak ifade edilmektedir. Bunların dışında Şekil 2.1' de  $\chi_s$  ile sembolize edilen parametre elektron yakınlığı olarak adlandırılmakta olup bir elektronun iletkenlik bandının kenarı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı olarak tanımlanmaktadır [4].

Yarıiletken yüzey durumları yarıiletken band yapısında bir değişikliğe neden olmayacağından kontak öncesi durumu gösteren Şekil 2.1 (a)' da bandlarda herhangi bir bükülme görülmemektedir. Şekil 2.1 (b)' de ise kontak yapıldıktan sonra termal denge durumuna ulaşmış olan metal-yarıiletken enerji-band yapısı gösterilmektedir. Metal- yarıiletken kontak halinde, yarıiletkenin iletkenlik bandında bulunan ve metaldeki elektronların enerjisine oranla daha yüksek enerjili olan elektronlar, metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar, yarıiletken tarafından metal tarafına geçmektedirler. Bu geçiş serbest elektronların yarıiletken sınırında azalmasına ve yarıiletkenin Fermi enerjisi seviyesinin yasağın enerji aralığının ortalarına doğru kaymasına neden olmaktadır. Elektron yoğunluğundaki azalma,  $E_c$  iletkenlik band kenarının termal dengede sabit olan  $E_F$  Fermi seviyesinden uzaklaşmasına

neden olmuş ve Şekil 2.1 (b)' de görüldüğü üzere iletkenlik ve valans band kenarlarının bükülmesi ile sonuçlanmıştır. Benzer şekilde bir bükülme yarıiletkenin vakum seviyesi ve yarıiletkenin elektron yakınlığında da görülmektedir [51].

İletkenlik bandı elektronlarının yarıiletken tarafından metal tarafına doğru transferi, arkalarında pozitif yüklü verici (donor) iyonları bırakmaları ile arayüzeyin yarıiletken tarafında pozitif yük tabakası metal tarafında ise ince bir negatif yük tabakası oluşması ile sonuçlanmaktadır. Aynı zamanda bu yük transferleri sonucunda yarıiletkenden metale doğal bir elektrik alan oluşmaktadır [4].

Vakum seviyesinin geçiş bölgesindeki sürekliliğinin termal denge durumunda sağlanması engel yüksekliğini belirlemek adına oldukça önemlidir. Metal ile yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki fark Şekil 2.1' de  $qV_i$  çarpımı ile gösterilen band bükülme miktarına eşittir.

$$qV_i = \Phi_m - \Phi_s \quad (2.2)$$

Bu band bükülme miktarı veya engel yüksekliği aynı zamanda yarıiletken tarafından metal tarafına transfer olan elektronun sahip olması gereken enerji miktarıdır [4].

Öte yandan Şekil 2.1' de  $\Phi_B$  olarak sembolize edilmiş metal tarafındaki engel yüksekliği, yarıiletken tarafındaki engel yüksekliğinden farklıdır.

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi_s \quad (2.3)$$

Metal tarafındaki engel yüksekliğini yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği cinsinden yazmak adına aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir.

$$\Phi_m = qV_i + \Phi_s \quad (2.4)$$

$$\chi_s = \Phi_n - \Phi_s \quad (2.5)$$

Bu eşitliklerin sonucu olarak engel yüksekliği aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\Phi_B = qV_i + \Phi_n \quad (2.6)$$

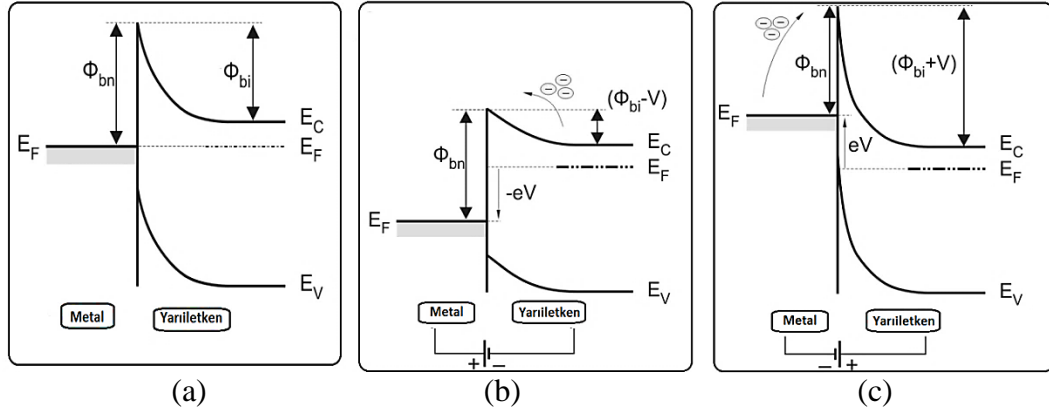
İletim bandı enerji seviyesi ile Fermi enerji seviyesi arasındaki fark Şekil 2.1'de  $\Phi_n$  ile gösterilmektedir.

$$\Phi_n = E_C - E_F \quad (2.7)$$

Metal-yarıiletkenin kontak durumu sonrasındaki termal denge, doğru polarma ve ters polarma enerji-band diyagramları Şekil 2.2' de verilmektedir.

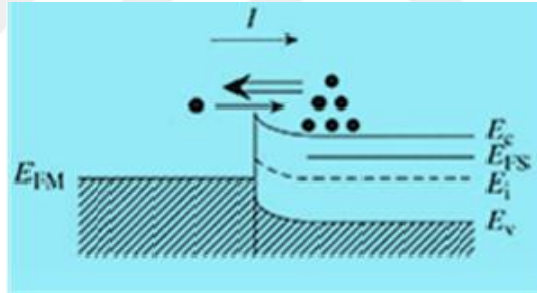
Termal denge durumu, yarıiletken -metal ve metal-yarıiletken arasında olan elektron geçişleri sonucunda, elektronların denge durumuna ulaşmasıyla net bir akımın oluşmadığı durumdur. Metal ve yarıiletkenin nötral kısımlarının direncine oranla taşıyıcı hareketliliğinin az olduğu yarıiletken tüketim bölgesinin direnci oldukça yüksektir. Sonuç olarak uygulanan voltajın tamamına yakını bu bölgeye düşmektedir. Termal denge durumunu değiştirebilecek olan doğru polarma veya ters polarma gerilimi aynı zamanda enerji-band diyagramında da değişikliğe neden olacaktır [4].

Metal/n-tipi yarıiletken kontakta uygulanan voltajın ( $V=V_F$ ) pozitif ucu metal tarafına, negatif ucu ise yarıiletken tarafına uygulandığında veya metal tarafına yarıiletken tarafından daha pozitif bir voltaj uygulandığında termal denge durumu potansiyel engel yüksekliğinin  $qV_F$  kadar azalmasıyla değişir. Bunun nedeni tüketim bölgesinin daralması ile termal denge durumuna göre aradaki engelin veya engelin azalması ve yarıiletkenden metale elektronların daha rahat geçiş yapması sonucunda elektron akımının artması olarak açıklanabilir. Metal tarafında bir voltaj düşümü olmadığından dolayı yarıiletken metal arasındaki elektron akımı artarken, metalden yarıiletkene elektron akımı değişmemektedir.



Şekil 2.2. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji-band diyagramı a) Termal denge durumu b) doğru polarma c) ters polarma.

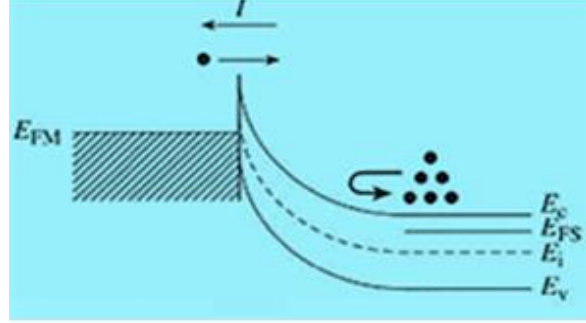
MS kontağın metal ucuna pozitif ve yarıiletken ucuna negatif dış gerilim uygulandığı doğru polarma durumunda, çoğunluk taşıyıcılar olan elektronların difüzyonu yarıiletkenden metale doğru olurken, elektriksel akım yönü aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere bunun ters istikametinde olacaktır.



Şekil 2.3. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için doğru polarma altında akım ve elektron akış yönü.

Doğru polarma akımı, uygulanan doğru polarma ( $V_F$ ) artışının üstel fonksiyonu şeklinde artar [57]. Schottky diyotun ters polarma alması veya yarıiletkene metale göre daha pozitif bir gerilim uygulandığında ( $V=-V_R$ ) enerji band diyagramı Şekil 2.2c'deki gibi değişmektedir. Burada tüketim bölgesinin potansiyel engel yüksekliği  $+qV_R$  kadar artmaktadır. Termal denge durumu ile kıyaslandığında, bu durum azınlık bölgesinin genişlemesine ve yarıiletkenden metale doğru elektron akımının aşağıdaki şekilden de görüleceği üzere güçleşmesine neden olmaktadır. Elektron akımının metal yarıiletken arasındaki durumu termal denge durumundaki ile aynı kalmıştır.

Sonuçta ters polarma altında tüketim bölgesindeki genişleme, doğru polarma durumuna göre çok daha az akımın akmasına imkân sağlamaktadır.



Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için ters polarma altında akım ve elektron akış yönü.

Termal denge durumu haricindeki Şekil 2.2.b ve 2.2.c' deki durumlarda, elektronların difüze olduğu bölgenin Fermi enerji seviyesi, elektronların çıktığı bölgenin Fermi enerji seviyesinden daha yüksek olduğundan tek bir Fermi enerji seviyesinden bahsetmek mümkün değildir.

## 2.2. MS KONTAKLARDA AKIM İLETİM MEKANİZMALARI

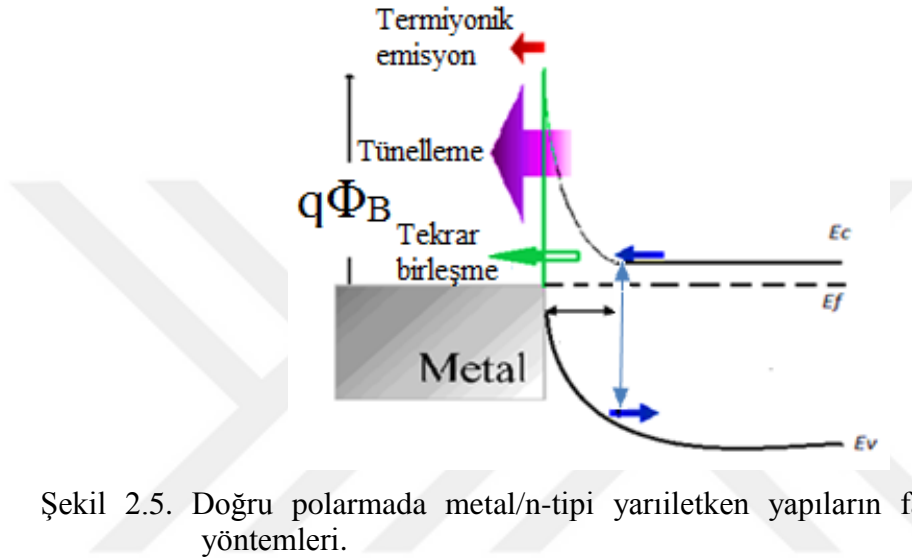
MS yapılar içindeki elektron hareketliliğini veya bu yapılar içinden geçen akımın uygulanan gerilimle nasıl değiştiğini ortaya koymak için çeşitli iletim mekanizmaları kullanılmaktadır. Doğru polarma altında, metal-n/yarıiletken için eklem boyunca elektronlar aşağıdaki kuramlar gözönüne alınarak yönlendirilebilirler.

- Termiyonik Emisyon (TE) Kuramı
- Difüzyon Kuramı
- Termiyonik Emisyon-Difüzyon (TED) Kuramı
- Alan Emisyonu (AE) Kuramı
- Termiyonik Alan Emisyonu (TAE) Kuramı
- Tüketim Bölgesinde Taşıyıcı Oluşması (Generation) ve Tekrar Birleşmesi (Recombination) Kuramı
- Azınlık Taşıyıcı Enjeksiyonu



- $T_0$  Etkili Akım İletim Kuramı

Yarıiletken tarafındaki engeli aşan elektronların metal tarafına geçmeleri olarak tanımlanabilen Termiyonik Emisyon (TE) kuramı Schottky engel diyotları üretimi açısından daha yaygın kullanılmaktadır. Doğru polarma altında metal/n-tipi yarıiletken yapılar için temel akım-iletim mekanizmaları veya yöntemleri Şekil 2.4’ te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Doğru polarmada metal/n-tipi yarıiletken yapıların farklı akım-iletim yöntemleri.

Uygulanan gerilim, kontak bölgesinde meydana gelen elektrik alan ve yüzey durumları MS kontaklarda hangi akım iletim yönteminin geçerli olduğunu belirlemeyi sağlayan parametrelerdir.

### 2.2.1. Termiyonik Emisyon Kuramı

Metal-yarıiletken Schottky kontaklarda taşıyıcıların kazandığı ısı enerjisi ile birlikte metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale transfer olmaları olayı Termiyonik Emisyon (TE) olarak tanımlanmaktadır. Bethe tarafından öne sürülen bu kuram aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır [2].

- Potansiyel engel yüksekliği olan  $\Phi_B$ ,  $kT/q$  enerjisinden büyüktür.
- Net akımın akışı kurulmuş olan ısı dengesini etkilemez.
- Taşıyıcılar arasında Schottky bölgesinde çarpışmalar olmadığından dolayı

ortalama serbest taşıyıcı yolları Schottky bölgesinin genişliğinden fazladır.

- İhmal edilen görüntü kuvvetlerin etkisi ile akım engel yüksekliği arasında engel profilinin önemsiz olduğu bir ilişki vardır.

Yukarıdaki maddelerde de dikkat çekildiği üzere engel profili biçimi önemsiz olup akım akışının sadece engel yüksekliğine bağlı olduğu öngörülmektedir. Akım yoğunluğunun yarıiletken metale ( $I_{s \rightarrow m}$ ) doğru olduğu durumdaki matematiksel ifadesi aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir. Bu durumda akım elektron dağılımının engel potansiyelini aşmak için gerekli olan enerjisine ve yönelimine bağlı olmaktadır [1].

$\Phi_F + q\Phi_B$  : termiyonik yayınım için gerekli minimum enerji

$v_x$  : iletim yönündeki taşıyıcı hızı

A : kontak alanı olarak tanımlandığında;

$$I_{S \rightarrow M} = \int_{\phi_f + q\phi_b}^{\infty} qv_x A dn \quad (2.8)$$

Ayrıca;

$m^*$  : taşıyıcı etkin kütlesi

k : Boltzmann sabiti

h : Planck sabiti

$\Phi_B$  : engel yüksekliği ( $V_n + V_d$ );

olmak üzere;

$$I_{S \rightarrow M} = \left( \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) A T^2 \exp \left[ - \frac{q(V_n + V_d)}{kT} \right] \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) \quad (2.9)$$

eşitliği yarıiletken metale geçen elektronların akım denklemi olarak kullanılmaktadır. Bu eşitlikte Richardson sabiti;

$$A^* = \left( \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) \quad (2.10)$$

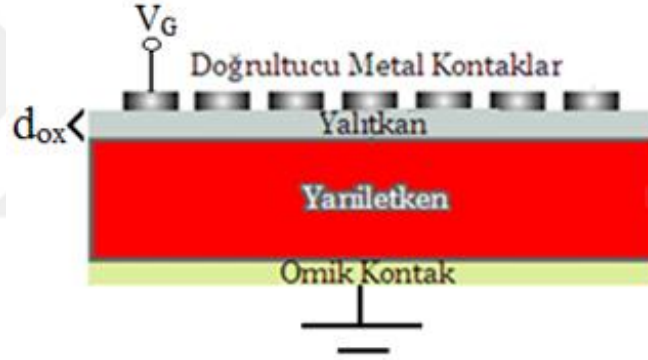
ile verilmiştir.

Engel yüksekliği metalden yarıiletkene transfer olan elektronlar için değişmediğinden dolayı, uygulanan gerilim yarıiletken tarafına doğru akan akım

yoğunluğunu etkilenmemektedir. Denge durumunda yani gerilimin sıfır olduğu andaki akım yoğunluğu yarıiletken den metale doğru akan akım yoğunluğuna eşit olmaktadır. Metalden yarıiletkene akan akım yoğunluğu, toplam akım yoğunluğu ve doyma akımı eşitlikleri dördüncü bölümde ifade edilmiştir.

### 2.3. METAL/YALITKAN/YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıyı oluşturmak için, metali yarıiletkenden izole edebilecek yalıtkan bir yapıyı metal ile yarıiletken arasında doğal yolla veya deneysel olarak eklemek gerekmektedir. MIS yapı Şekil 2.6' da gösterilmiştir. Burada yalıtkan tabaka metal ile yarıiletkeni izole etmesinin yanısıra metal ile yarıiletken arası yük geçişlerini de düzenlemektedir.



Şekil 2.6. Metal-yalıtkan-yarıiletken yapının şematik gösterimi.

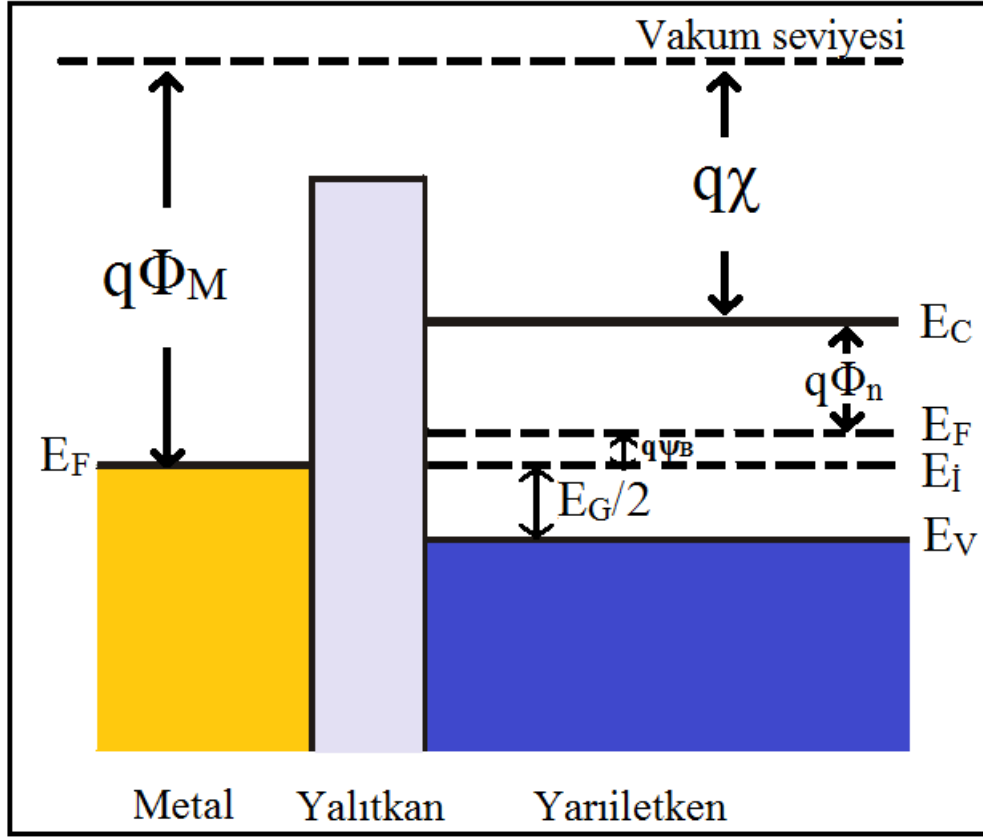
Metal-yarıiletken kontaklar veya Schottky diyotların üzerine uygulanan gerilim ( $V_G$ ), arayüzey tabakası ve seri direncin yapı içinde olması durumunda seri direnç ve diyot tarafından paylaşılmaktadır.

$$V_G = V_D + V_R + V_i \quad (2.11)$$

#### 2.3.1. İdeal MIS Yapılar

MIS yapının ideal olarak tanımlanabilmesi için arayüzey durumlarının ve seri direncinin ihmal edilebilecek kadar düşük seviyede ve kısa devre direncinin de  $M\Omega$  seviyesinde olması gerekmektedir. İdeal MIS yapılarda diyot polarma olmaksızın

( $V=0V$ ) iletme geçer ve aynı zamanda ters yönde de neredeyse hiç akım geçirmez. Bu tanıma uyan diyotların ideaita faktörü = 1 olarak kabul edilmektedir.



Şekil 2.7. İdeal bir MIS/n-tipi yapısının enerji-bant diyagramı ( $V=0$ ) [51].

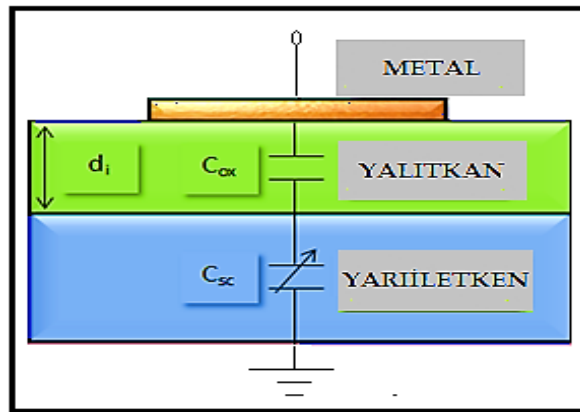
- $\chi$  : Elektron yakınlığı
- $E_g$  : yarıiletkenin yasak enerji aralığı
- $E_F$  : Fermi enerji seviyesi
- $E_i$  : saf enerji seviyesi
- $\psi_B$  :  $E_F$  ile  $E_i$  arasındaki enerji farkı

Taşıyıcıların DC polarmada yalıtkan tarafına geçişi mümkün olmadığından yalıtkanın öz direnci sonsuz kabul edilmektedir. Yalıtkan tabakaya bitişik olan metal ve yarıiletken yüzeyindeki yükler bir çeşit polarma altında eşit sayıda ancak zıt yönde olacaktır.

İdeal MIS yapıda yarıiletkende metale oranla serbest hareketli yük yoğunluğu uygulanan voltaja bağlı olarak daha az seviyededir. Bantlarda bükülmeye neden yarıiletken arayüzey bölgesindeki  $Q_{sc}$  uzay yükü termal dengede potansiyel büyüklüğü ile belirlenmektedir.

Katkı atomları çeşitlerine göre yarıiletkende çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olarak anılan yükler uygulanan voltaja bağlı olarak arayüzey bölgesindeki yığılmaları veya uzay yükü bölgesini oluşturmaktadırlar. Saf silisyum atomu içerisinde, 5 valans elektrona sahip fosfor belli bir oranda eklendiğinde n-tipi Si elde edilmekte olup yapı içinde elektronlar çoğunluk taşıyıcı ve holler (boşluklar) azınlık taşıyıcılar olarak adlandırılacaktır. Yine saf silisyum yarıiletkenine 3 valans elektrona sahip atomların belli bir oranda eklenmesi ile p-tipi Si kristal yapısı oluşur. Bu yeni kristal yapıda hollerin (boşluk) sayısı artırılmış olduğundan çoğunluk taşıyıcılar holler olacaktır. Akım iletimi yarıiletken diyotlarda hem elektronlar hem de boşluklar tarafından sağlanmaktadır. Bu sebepten akımda çoğunluk taşıyıcı akımı ve azınlık taşıyıcı akımı olarak iki şekilde isimlendirilmektedir [51].

Metal ile yarıiletken arasında yalıtkan tabakanın varlığından ötürü MIS kapasitansı denilen bir kapasitans (C) oluşmaktadır ki bu durum MS kontakların paralel plakalı bir kondansatöre benzetilmesinin temel nedenidir. MIS kapasitansının şematik olarak elektronik eşdeğer devresi Şekil 2.5’ de verilmiştir. Bu yapının toplam kapasitansı uygulanan gerilimdeki değişimlere bağlı olarak yalıtkan tabakanın kapasitansı  $C_{ox}$  ve uzay yükü kapasitansı  $C_{sc}$ ’ den oluşmaktadır.



Şekil 2.8. MIS kapasitansı eşdeğer devresi [51].

### Yığılma Bölgesi

Farklı yüklerin birbirini çekmesi prensibinden hareketle, metal plakaya uygulanacak negatif gerilim neticesinde oluşan elektrik alan yarıiletkendeki çoğunluk yük taşıyıcıları yani boşlukları yarıiletken arayüzeyine çekecektir. Fermi enerji seviyesi ideal diyotta yük akışı olmadığı zaman yarıiletken tarafında sabit kalacağından ve taşıyıcı yoğunluğu üstel fonksiyon olarak ( $E_F - E_V$ ) enerji farkına bağlı olacağından, çoğunluk taşıyıcı olan boşlukların yarıiletken yüzeyine yakın yerlere yığılması sonucunda bant bükülmesi gerçekleşecektir. Çoğunluk taşıyıcıların arayüzeyde birikimi nedeniyle yığılma veya yığılım olarak isimlendirilen bu durumda, yarıiletken arayüzeyinde valans bandı Fermi seviyesine yaklaşmakta ve iletkenlik bandı da bunun neticesinde yukarı yöne doğru bükülmektedir. Sonuç olarak arayüzeyde yığılan yük yüzey yüküdür ve bu durumda  $C_{sc} \rightarrow \infty$  ' a giderken  $C \rightarrow C_{ox}$  olmaktadır.

### Tüketim Bölgesi

Metal plakaya uygulanacak olan küçük büyüklükte pozitif bir gerilim ile yalıtkan içinde oluşacak elektrik alan yarıiletken arayüzeyindeki boşlukları ya da holleri aynı yüklerin birbirlerini itmesi prensibi ile yüzeyden uzaklaştırır. Sonuç olarak boşlukların yoğunluğu yarıiletken yüzeyinde azalmaya başlar ve bant bükülmesi aşağı yöne doğru gerçekleşir. Elektronlar iletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde toplanmaya başlar ve tüketim bölgesi olarak adlandırılan boşlukların azaldığı  $w$  genişliğinde bir bölge yarıiletken yüzeyinde oluşmuş olur.

### Terslenim Bölgesi

Tüketim bölgesi oluşurken uygulanan voltaja oranla çok daha büyük bir pozitif gerilim metal plakaya uygulandığında bantlardaki bükülme aşağı yönde olacaktır. Yarıiletken yüzeyindeki ve azınlık taşıyıcılar durumundaki elektronların sayısının artmaya başlamasıyla elektron yoğunluğu boşluk veya hol yoğunluğunu geçmiş olacaktır. Bu durum yarıiletken yüzeyi artık p-tipi değil de n-tipi yarıiletken gibi davranmasını sağlar ve yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak açıklanabilir.

Burada MIS kapasitansını ortaya çıkarabilecek faktör uygulanan A.C. sinyal geriliminin elektron yoğunluğu tarafından takip edilebilmesi olarak gösterilebilir. Küçük frekanslarda elektron yoğunluğu A.C. sinyali takip edebilmektedir ve bunun sonucunda gerilim artışı ile birlikte kapasitans yalıtkan oksit kapasitansına eşit değere ulaşacaktır. Sinyal takibi ara frekanslarda daha yavaş olmakla beraber yüksek frekanslarda ise takip edilemez seviyeye gelmektedir. Bu durum kapasitans değerinin minimum olmasını gerektirir ki yüksek frekansta olacak ani gerilim değişimleri kapasitansın bu minimum değerlerindeki altına inmesine neden olacaktır.

### **2.3.2. Gerçek MIS Yapılar**

Yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyinin elektriksel yükler açısından nötr olmadığı durum gerçek bir MIS yapısının varlığına işaret eder. Gerçek veya ideal olmayan bir MIS yapıda çok sayıda tuzaklanmış yük, sabit oksit, hareketli iyonlar ile birlikte çok farklı enerji durumları ve arayüzey yükleri bulunmaktadır. Bu durumlar yapının elektriksel özelliklerini değiştirebilen ve ideal durumdan sapmalara sebep olan durumlar olup aşağıda maddeler halinde detaylandırılmıştır.

- X-ışını radyasyonuna maruz kalan numunede oluşturulabilecek iyonize tuzaklar,
- Yalıtkan içinde bulunan hareketli iyonlar,
- Yarıiletken yüzeyi üzerinde veya etrafında yerleşen sabit yüzey yükleri,
- Yalıtkan-yarıiletken arayüzey durumları ya da yasaklanmış bant aralığında oluşan enerji seviyeleri.

### **2.4. MIS YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER**

MIS yapıların elektriksel özelliklerini etkileyen ve yapıyı ideal durumdan saptırabilecek faktörleri açığa çıkarmak ideala yakın bir Schottky kontak elde etmek adına oldukça önemlidir. Bu sebeple çalışmamızda elde ettiğimiz Au/ZnO/GaAs Schottky engel diyotun elektriksel özelliklerini etkilediğini saptadığımız idealite

faktörü ( $n$ ), seri direnç ( $R_s$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_{Bo}$ ), arayüzey durumları ( $N_{ss}$ ) ve negatif kapasitans (NC) parametreleri bu bölümde incelenmiştir.

#### 2.4.1. İdealite Faktörü

Ara yüzey durumları yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) ve yalıtkan tabakanın kalınlığına ( $\delta$ ) bağlı olarak idealite faktörü aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$n = 1 + \frac{\left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right)\left(\frac{\epsilon_s}{W_D + qN_{sb}}\right)}{1 + \left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right)qN_{sa}} \quad (2.12)$$

Burada;

$\epsilon_i$  : oksit tabakasının geçirgenliği

$\epsilon_s$  : yarıiletkenin geçirgenliği

$N_{sa}$  : metal ile denge de olan ara yüzey durumlarının yoğunluğu

$N_{sb}$ : yarıiletken ile dengede olan durumlarının yoğunluğu

$W_D$  : tüketim bölgesinin genişliğidir.

Ara yüzey durumları dikkate alındığında üç farklı durum ortaya çıkmaktadır. Eğer ara yüzey durum yoğunluğu küçük ise;

$$n = 1 + \left(\frac{\delta\epsilon_s}{W_D\epsilon_i}\right) \quad (2.13)$$

metal ile dengede ise;

$$n = 1 + \left(\frac{d_{ox}\epsilon_s}{W_D(\epsilon_i + \delta qN_{sa})}\right) \quad (2.14)$$

yarıiletken ile dengede ise,



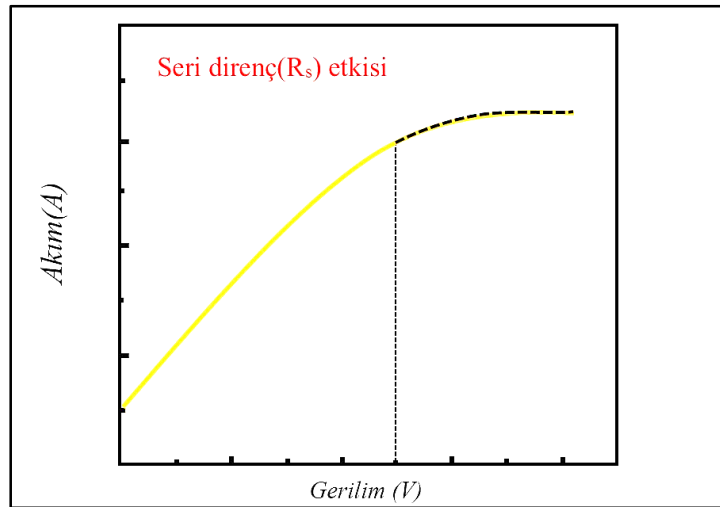
$$n = 1 + \left( \frac{\delta}{\varepsilon_i} \right) \left( \frac{\varepsilon_s}{W_D + qN_{sb}} \right) \quad (2.15)$$

şeklinde elde edilir.

Arayüzey durum yoğunluğunun küçük ve metal ile dengede olması durumlarında oksit tabakasının ve ara yüzey durumlarının idealite faktörüne katkısı azdır. Bu durumlarda numune ideal Schottky diyot davranışı sergiler. Arayüzey durum yoğunluğunun yarıiletken ile dengede olması durumunda ara yüzey durumları artar ve oksit tabakası kalınlaşarak idealite faktörü artar [26]. Ayrıca sıcaklığın artması toplam MIS akımındaki difüzyon bileşeninin artmasına sebep olacağından idealite faktörünü azaltmaktadır [58].

#### 2.4.2. Seri Direnç

MS Schottky kontaklarda, yarıiletken tarafında meydana gelen deplasyon bölgesinin dışındaki nötr bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği direnç seri direnç olup  $R_s$  ile sembolize edilmektedir. Yüksek gerilim seviyelerinde seri direnç etkisi artarak diyot akımının azalmasına neden olur (Şekil 2.9). Diyota uygulanan yüksek gerilim ile birlikte diyot akımının doyum seviyesine ulaşması ve zamanla azalması seri direnç etkisi olarak da ifade edilmektedir.



Şekil 2.9. MS kontaklarda seri direnç ( $R_s$ ) etkisi.

Seri direnç etkisi beş farklı nedenden ötürü MIS kontakların ideal durumdan sapmasına neden olabilmektedir. Bu sebepler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Ölçüm için Schottky kontaktan alınan iletken tel
- GaAs kristaline omik kontakın teması
- Omik kontak ile gövde arasına yerleşen kirli film tabakası,
- Doğrultucu kontak altında bulunan yüzeyin kıyısındaki tüketim tabakası ve omik kontak arasındaki gövde direnci
- Doğrultucu kontak altındaki yarıiletken içinde düzgün olmayan katkı dağılımı

Yarıiletken içerisinde bulunan düzensiz katkı profili yüksek öz dirence sahip bölgenin oluşmasına neden olur. Bu durum taşıyıcı yoğunluğunun yavaşlamasına yol açmaktadır. Seri direnç etkisinin azaltılması özellikle admittans ile hesaplanan arayüzey özelliklerinde önemli hataların ortaya çıkmasının önüne geçmek için önemlidir. Metalin yarıiletken yüzeyine ısıl işlem yoluyla çöktürülmesi omik kontak direncini azaltabilir. Seri direnç ölçümünü takiben admittansta düzeltme yapılarak gerekli bilgiler elde edilebilir. Yarıiletken gövde direncinin yol açtığı katkı direnci ihmal edilebilecek kadar küçük değerdedir [59].

Seri direnç değeri hesaplamak için geliştirilen bir yöntem olan Norde metodu ile idealite faktörü  $n = 1$  iken,  $R_s$  ve  $\Phi_B$  değerleri tanımlanmış bir  $F(V)$  fonksiyonu ile elde edilmektedir [60].

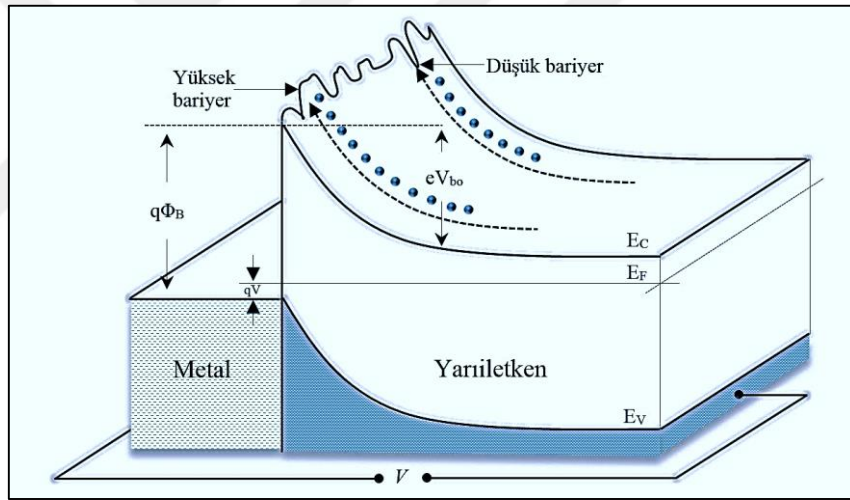
Bu yöntem, seri direnç ve engel yüksekliğinin sıcaklıkla sabit olduğu durumlara uygulanır ve sadece bir sıcaklık değerindeki I-V eğrisine gerek duyulur. Norde metodu daha sonra geliştirilerek,  $R_s$  ve  $\Phi_B$  değerlerini hesaplamak idealite faktörünün  $1 < n < 2$  olduğu aralıktada mümkün kılınmıştır [61].

Bu yöntem aynı zamanda en az iki farklı sıcaklıktaki I-V eğrisinden faydalanılarak sıcaklıkla değişen  $R_s$  ve  $\Phi_B$  değerlerini elde etmek için de kullanılmaktadır. Norde fonksiyonu her ne kadar I-V ölçümleri ile  $n$ ,  $R_s$  ve  $\Phi_B$  'nin elde edilmesini mümkün kılarsa da, seri direnci belirlemenin daha kolay bir yöntemi MS yapıların I-V

karakteristiklerinden belirlenen fonksiyonlar kullanılarak Cheung ve Cheung tarafından bulunmuştur [62,63].

### 2.4.3. Engel Yüksekliği

MIS kontaklarda doğru polarma altındaki I-V ölçümleri ve ters polarmadaki C-V ölçümleri için  $\Phi_B$  değerlerinde farklılıklar görülmektedir.  $\Phi_B$  değerlerinin sıcaklığa veya aydınlatma şiddetine bağlı olarak değişmesi ve idealite faktörünün 1'den büyük ( $n>1$ ) olmasının farklı nedenleri vardır. Metal ya da yarıiletkenin MS arayüzeyinde pürüzlülüğe sebep olması Şekil 2.10' da görüldüğü üzere potansiyel engel yüksekliğinin farklı uzaysal değişimlere uğramasına ve homojen olmayan bir dağılımın ortaya çıkmasına neden olmaktadır.



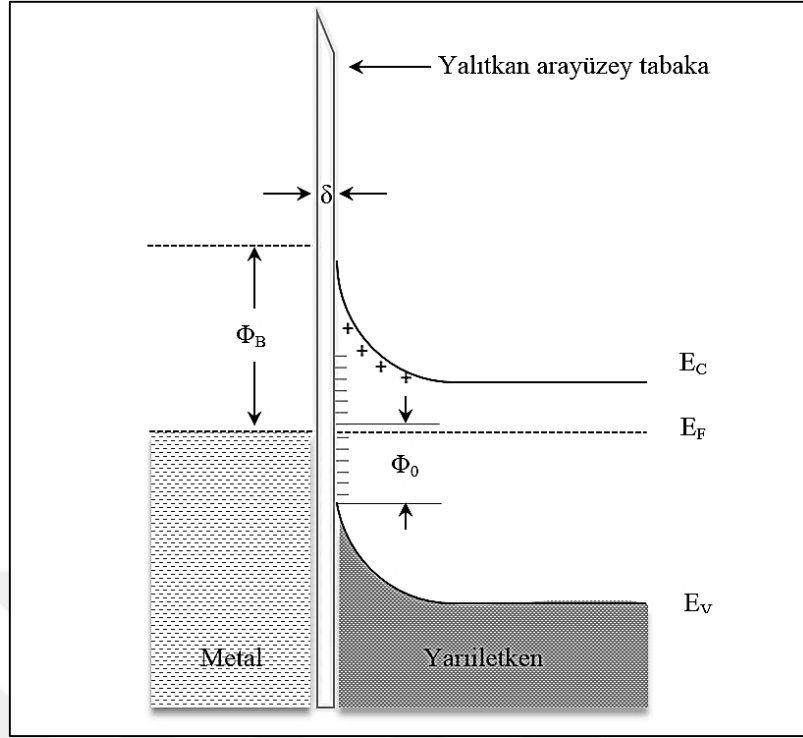
Şekil 2.10. MS kontak engel homojensizliğinin üç boyutlu enerji-bant diyagramı.

MS arayüzeyindeki pürüzlülük yarıiletken yüzeyi, metalin atomik yapısı, yerdeğiştirmeler ve metalin kalınlığındaki değişim gibi faktörlere bağlanabilmektedir. Bölgesel engel yüksekliğinde alan emisyonu kaynaklı olarak meydana gelebilecek azalma potansiyel değişimlere sebep olabilmektedir. Bu değişimler farklı metalik fazların arayüzeydeki etkisi ile de açığa çıkabilmektedir. Ayrıca  $\Phi_B$  değerlerinin değişimi düzenli yarıiletken örgü yapısında rastgele yerleşen donör atomları arasındaki farklı uzaklıklar da olabilmektedir.

#### 2.4.4. Arayüzey Durumları

MIS yapıda bulunan oksit yükleri ve ara yüzey tuzakları yapının ideal elektriksel parametrelerini etkilemektedir [23]. Hızlı ve yavaş olarak iki şekilde ortaya çıkan yüzey durumlarından hızlı yüzey durumları yalıtkan ile yarıiletken arasındaki yüzeye yakın olup enerji seviyesi yaklaşık olarak yarıiletken yasak enerji bölgesi orta seviyelerindedir. Sonuç olarak bantta meydana gelecek bükülme ve yüzey potansiyeli değişimi neticesinde aşağı yukarı yönlerde hareket eden yüzey durumları iletkenlik bandı ve valans bandı ile ani yük alışverişlerinde bulunmaktadır. Yalıtkanın metal tarafındaki yüzeyde bulunan yavaş yüzey durumları ısıl olarak oksit yapısındaki hareketsiz yükler ile uyarılmıştır. Bu yüzey durumlarını elektrik alandaki hareketli iyonlar oluşturmaktadır. Yavaş yüzey durumları MIS yapı kapasitesini etkilemezler.

MS kontaklarda metal biriktirme öncesi kimyasal temizle işlemi yapılan kristal yapı parlak yüzeyinde doğal oksit tabakası ya da isteğe bağlı yalıtkan özellikte ince bir oksit tabakası oluşturmak mümkündür. Yüzey hazırlama şartları yalıtkan arayüzey tabakası kalınlığını etkilemektedir. Yalıtkan tabakanın kalınlığı  $20\text{\AA}$  az olduğu durum iyi bir doğrultucu kontak olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 2.11.'de yalıtkan arayüzey tabakaya sahip kontakın enerji bant diyagramı sunulmuştur.



Şekil 2.11. Yalıtkan arayüzey tabakasına sahip MS kontağın enerji bant diyagramı.

Şekil 2.11’ de metal ve yarıiletken Fermi enerji seviyeleri aynı hiza olup yalıtkan arayüzey boyunca vakum seviyesi süreklidir. Arayüzey tabakanın hareketli yüklerden arınmış ideal bir yalıtkan olduğu düşünülürse arayüzey oksit tabaka boyunca potansiyelin lineer olarak düşeceği görülecektir. Burada yalıtkanın iletim bandı alçak kenarının vakum seviyesinin altına doğru uzandığı farzedilmektedir. Yarıiletken tüketim bölgesinde meydana gelen potansiyel düşme göz önüne alınırsa, arayüzey yalıtkan tabaka kalınlığı  $\delta \leq 20\text{Å}$  olduğunda yalıtkan tabaka boyunca görülen potansiyel düşme ihmal edilebilir. Yalıtkan tabakanın bu denli ince olması elektronların metalden yarıiletkene ve yarıiletken metale doğru geçiş yapmasını sağlayan yani elektron açısından geçirgen olan bir tabakadır. Bu nedenlerden dolayı ince yalıtkan arayüzey tabakasının varlığı  $\Phi_B$  değerlerini etkilemez. MS kontaklar arasındaki ince yalıtkan tabaka daha kolay analiz yapabilmeyi sağlamaktadır.

MS kontaklarda arayüzeyin varlığındaki etkileri özetlenecek olursa;

- $V=0$  olduğunda, ideal diyot engel yüksekliği değerinden potansiyel engel yüksekliği değeri daha az olacaktır.

- Elektronlar için yalıtkan arayüzey tabaka bir gerilim değeri için geçirgen özellikte olabilecektir.
- MIS kontaklara gerilim uygulandığı zaman yalıtkan tabaka nedeniyle potansiyel engel yüksekliği uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak azalacaktır.

#### **2.4.5. Negatif Kapasitans**

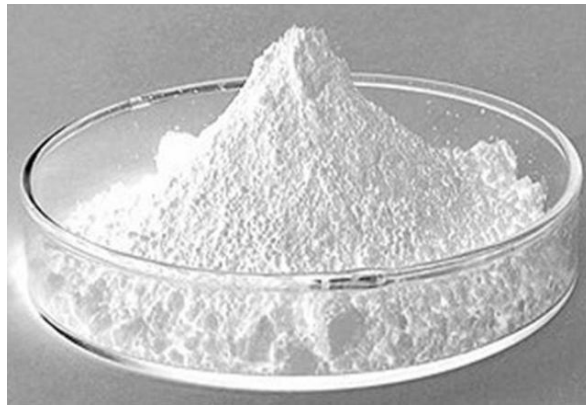
Son zamanlarda, bazı araştırmacılar tarafından negatif kapasitans (NC) davranışı hatalı tanımlanmış tepe değerleri olarak ifade edilmiştir ancak bu değerlerin kapsamı henüz tam olarak açıklanamamıştır. Literatürde, NC etkisi genellikle anormal bir durum olarak değerlendirilmiş ve deneysel ölçümlerde NC değerleri ortaya çıktığında, bu değerlere endüktans kaynaklı parazit, kötü ölçüm veya kalibrasyon hatası gibi bazı sorunların neden olduğu varsayılmıştır [64-66]. NC davranışı malzemenin endüktif bir davranış sergilemesi olarak açıklanabilir. Şimdiye kadar, NC davranışı üzerine yürütülen çalışmalar bu davranışın, farklı frekanslarda ve sıcaklık doğru polarma bölgesinde gözlenebilir olduğunu göstermiştir [64-67]. Bir çalışmaya göre, azınlık taşıyıcıların enjeksiyonunun NC davranışını sadece doğru polarmada ve düşük frekanslarda gözlendiğini ortaya çıkarmıştır [68]. Farklı cihazlar üzerinde NC fiziksel mekanizmasının davranışı belirgin şekilde farklıdır. Yük taşıyıcılarının enjeksiyonu arayüz tuzaklarının yerleşmesi için bir sıçrama süreci içermesine rağmen, enjeksiyonun fiziksel mekanizması henüz tam olarak anlaşılacak değildir [65]. Pratikte NC davranışı sıcaklık ve frekansa bağımlı admitans spektroskopisi ( $C-V$  ve  $G/\omega-V$ ) verileri ile ifade edilebilir [69].

## BÖLÜM 3

### MATERYAL YÖNTEM

#### 3.1. ÇİNKO OKSİT

Çinko oksit, formülü ZnO olan bir inorganik bileşiktir. ZnO, suda çözünmeyen, beyaz bir tozdur ve yaygın olarak plastik, seramik, cam, çimento, yağlayıcılar, boyalar, merhemler, yapıştırıcılar, sızdırmazlık maddeleri, pigmentler, gıdalar, piller, ferritler, yangın geciktiriciler ve ilk yardım bantları dâhil olmak üzere pek çok malzemede ve üründe katkı maddesi kullanılır. Doğal halde mineral çinkotaşı olarak bulunur, fakat çoğu çinko oksit sentetik olarak üretilir. ZnO II-VI yarıiletken grubunun geniş bant boşluklu bir yarıiletkenidir. Yarıiletkenin doğal katkılanması oksijen boşluklarının ve çinko arayüzeyinin n-tipi olmasına bağlıdır [70]. Bu yarı iletken iyi saydamlık, yüksek elektron hareketliliği, geniş band aralığı ve güçlü oda sıcaklığında lüminesans dâhil olmak üzere birçok önemli özelliklere sahiptir. Bu özellikleri ile elektronik alanında ince film transistör ve ışık yayan diyot uygulamalarında kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Beyaz toz şeklindeki ZnO.

### 3.1.1. Kimyasal Özellikleri

Saf ZnO beyaz bir toz olarak bulunur, fakat doğada genellikle kırmızı renge sarı renk kazandıran manganez ve diğer yabancı maddeleri içeren az bulunan bir mineral çinko taşı olarak ortaya çıkar.

Kristal çinko oksit hava ısıtıldığında beyazdan sarıya değişen ve tersine soğutulduğunda beyaz dönen bir termokromiktir [71]. Bu renk değişimi, 800 °C 'de  $x = 0,00007$  için tam oransız  $Zn_{1+x}O$  oluşturulması için yüksek sıcaklıklarda çevreye küçük miktarda oksijen salınmasından kaynaklanır. Çinko oksit amfoterik bir oksittir. Suda hemen hemen hiç çözünmez, ancak, hidroklorik asit gibi çoğu asitlerin içinde çözünür veya asitler tarafından parçalanır [72].



Ayrıca çinko taşları bazlar içinde de çözünür.

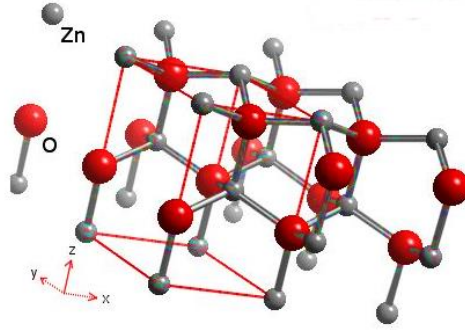


Oleat veya stearat gibi uygun karboksilatlar üretmek için ZnO yağlar içindeki yağ asitleri ile yavaş bir şekilde reaksiyona girer. ZnO çinko klorürün güçlü bir sulu çözeltisi ile karıştırıldığında siman benzeri ürünler oluşturur ve bunlar çinko hidroksi klorürler olarak ifade edilir [73]. Bu siman diş hekimliğinde kullanılmıştır [74].

### 3.1.2. Fiziksel Özellikleri

Çinko oksit altıgen wurtzite ve kübik zincblend olmak üzere iki ana formda kristalize olur [75]. Wurtzite yapı ortam koşullarında en kararlı ve bu sayede en yaygın olan yapıdır. Kübik kafes yapısında zincblend formu ZnO' nun alt tabakalar üzerinde büyütülmesi ile stabilize edilebilir. Her iki durumda da, çinko ve oksit merkezleri Zn (II) için en karakteristik geometri olan tetrahedral şekildedir. ZnO 10 GPa civarındaki nispeten yüksek basınçlarda kaya tuzu yapısına dönüşür [70].





Şekil 3.2. Çinko oksit kristal yapısı.

Altıgen ve zincblend polimorfları evrilme simetrisine sahip değildir. Bu ve diğer kafes simetri özellikleri altıgen ve zincblend ZnO' nun basınçsal ve ısı elektrikliliği (piezoelektrik ve piroelektrik) ile sonuçlanır.

### 3.1.3. Mekanik Özellikleri

ZnO Mohs ölçeğine göre yaklaşık sertliği 4.5 olan nispeten yumuşak bir malzemedir. Elastik sabitleri Galyum nitrat (GaN) gibi III-V yarı iletkenlerinden daha küçüktür. Yüksek ısı kapasitesi ve ısı iletkenliği, düşük ısı genleşme ve yüksek ergime sıcaklığı ZnO' nun seramikler için faydalı özelliklerindedir [76]. Tetrahedral bağlanmış yarıiletkenler arasında, ZnO en yüksek piezoelektrik tensörüne sahiptir ya da en azından GaN ve AlN karşılaştırılabilir seviyededir [77]. Bu özelliği onu büyük bir elektromekanik bağlantı gerektiren birçok piezoelektrik uygulamalar için teknolojik olarak önemli bir malzeme yapar.

### 3.1.4. Elektriksel Özellikleri

ZnO, oda sıcaklığında yaklaşık olarak 3.3 eV bir direkt bant boşluğuna sahiptir. Geniş bir bant aralığı ile ilişkili avantajları, yüksek dayanma gerilimleri, büyük elektrik alanları sürdürebilme yeteneği, düşük elektronik gürültü ve yüksek sıcaklık ve yüksek güçte çalışabilme olarak sayılabilir. ZnO band aralığı magnezyum oksit veya kadmiyum oksit alaşımları ile ~ 3-4 eV' a ayarlanabilir [70].

Çoğu ZnO katkılama olmadığında n-tipi bir karaktere sahiptir. Kontrol edilebilir n-tipi katkılama, Al, Ga, In gibi grup III elemanlarının Zn ile yer değiştirmesi ya da klorin ya da iyodin gibi grup VII elemanlarının oksijen ile yer değiştirmesi sonucunda kolayca elde edilir [78].

ZnO' nun güvenilir şekilde p-tipi katkılaması güçtür. Bu sorun, p-tipi katkılayıcıların düşük çözünürlüğü ve çok miktardaki n-tipi safsızlıkların onların yerini almasından kaynaklanır.

P-tipi katkılamadaki mevcut sınırlamalar elektronik ve opto-elektronik uygulamaları sınırlandırmaz. Bilinen p-tipi katkılayıcılar arasında Li, Na, K gibi grup-I elementleri, N, P ve As gibi grup V elementlerinin yanı sıra bakır ve gümüş gibi elementler bulunmaktadır.

ZnO elektron mobilitesi kuvvetle sıcaklığa göre değişir ve 80 K' de en fazla  $\sim 2000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  değerine sahiptir [79]. Hole mobilitesi için veriler ise 5-30  $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  değerleri aralığında sınırlanmıştır [80].

### 3.1.5. Üretimi

Endüstriyel kullanım için, ZnO üç ana süreç ile senede  $10^5$  ton seviyelerde üretilir [76].

#### Dolaylı Süreç

Dolaylı işlemden, çinko metali grafit pota içinde eritilmiş ve 907 °C üstündeki (tipik olarak yaklaşık 1000 °C) sıcaklıklarda buharlaştırılmıştır. Çinko buharı ZnO oluşturmak için havada oksijen ile reaksiyona girer bununla birlikte sıcaklığında ve parlaklığında düşme meydana gelir. Çinko oksit parçacıkları, bir soğutma kanalı içinde taşınır ve torbalı süzgeç odasında toplanır. Bu dolaylı yöntem 1844 yılında LeClaire (Fransa) tarafından geliştirilmiş olup yaygın olarak Fransız süreci olarak bilinmektedir. Bu ürün, normalde ortalama boyutu 0.1 ile birkaç mikrometre arasında

olan yığılmış çinko oksit parçacıklarından oluşur. Ağırlık olarak bakıldığında dünyadaki çinko oksitin çoğu Fransız işlemleri yoluyla üretilmektedir.

### Doğrudan Süreç

Doğrudan veya Amerikan süreci çinko cevherleri veya döküm yan ürünleri gibi çeşitli kirlenmiş çinko kompozitleri ile başlar. Çinko ön-maddeleri çinko buharını elde etmek için antrasit gibi karbon kaynağı ile ısıtılarak azaltılır. Düşük saflıktaki kaynak malzeme nedeniyle, nihai ürün dolaylı süreç ile kıyaslandığında, doğrudan süreçte daha düşük kaliteli olmaktadır.

### Yaş Kimyasal Süreç

Endüstriyel üretimin küçük bir miktarı, çinko karbonat veya çinko hidroksitten çöktürülen saflaştırılmış çinko tuzlarının sulu çözeltileri ile başlayan ıslak kimyasal işlemleri içerir. Çökelti daha sonra süzülür, yıkanır, kurutulur ve 800 °C civarında sıcaklıkta yakılarak toz haline getirilir.

### Laboratuvar Sentezi

Bilimsel çalışmalar ve uygulamalarla ZnO üretmek için çok sayıda özel yöntemler için mevcuttur. Bu yöntemler ZnO'ya şekil verme (dökme, ince film, nanotel), sıcaklık belirleme (oda sıcaklığı düşük,  $T \sim 1000$  °C yüksek), süreç tipi (buhar biriktirme veya çözümden büyütme) ve diğer parametreler olarak sınıflandırılabilir.

Geniş tek kristaller gaz taşıma (buhar fazlı çöküntü), hidrotermal sentez veya eriyik büyütme ile büyütülebilir [81,82]. Bununla birlikte, eriyikten büyütme ZnO'nun yüksek buhar basıncı sebebiyle sorunludur. Gaz taşıma ile büyütmeyi kontrol etmek zor olduğundan tercihen hidrotermal yöntemi kullanılır. İnce filmler, kimyasal buhar çöktürme, metalorganik buhar faz epitaksisi, elektrokaplama, darbeli lazer birikimi, püskürtme, sol-jel sentezi, atomik tabaka birikimi, püskürtme pirolizi ve benzeri yöntemler ile üretilir.

Beyaz bir toz halindeki çinko oksit, çinko anot ile bir sodyum bikarbonat çözeltisinin elektrolizi ile laboratuarda üretilebilir. Çinko hidroksit ve hidrojen gazı üretilmektedir. Çinko hidroksit ısıtma ile birlikte çinko oksite parçalanır.



### 3.1.6. Uygulama Alanları

Çinko oksitin uygulama alanları oldukça fazladır. Malzeme bilimi uygulamaları için, çinko oksit, yüksek refraktif indekse, yüksek seviyede termal iletkenliğe, bağlayıcı özelliğe, antibakteriyel ve UV koruma özelliklerine sahiptir. Sonuç olarak, plastik, seramik, cam, çimento, [83] lastik, madeni yağ, boyalar, merhemler, yapıştırıcı, sızdırmazlık ürünleri, beton imalatı, pigmentler, yiyecek, piller, ferritler, yangın geciktiriciler gibi malzemelerin ve ürünlerin içine ilave edilirler. ZnO'nun temel uygulama alanları ana başlıklar halinde lastik imalatı, seramik sektörü, tıp, sigara filtreleri, gıda katkı maddesi, pigment, UV soğurucu, kaplamalar, piezoelektrik olarak sıralanabilir.

### 3.1.7. Güvenlik

Bir gıda katkı maddesi olarak, çinko oksit güvenli madde olarak kabul edilmiştir. Çinko oksit kendisi toksik olmayan; ancak çinko ya da çinko alaşımı eritildiğinde ve yüksek sıcaklıkta okside edildiğinde, çinko oksit buharını solunması tehlikelidir. Pirinç erime noktası çinko kaynama noktasına yakın olduğu için pirinç eritme sırasında bu sorun oluşur. Galvanizli (çinko kaplama) çelik kaynağı yaparken meydana gelen havaya çinko oksit salınması metal ateşi dumanı diye adlandırılan bir problem oluşturabilir. Bu nedenle, tipik olarak galvanize çelik kaynaklanmaz veya çinko ilk önce ayrılır.

### 3.2. GALYUM ARSENİK

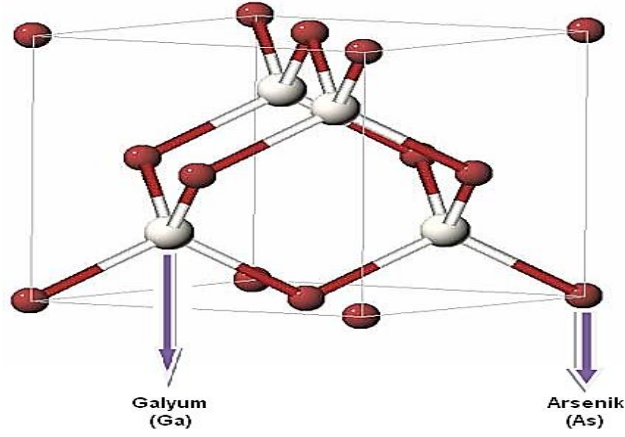
Galyum Arsenik (GaAs), ilk olarak 1920' li yıllarda Goldschmidt tarafından üretilen, periyodik tablonun III. ve V. grup elemanlarından Galyum (Ga) ve Arsenik (As) malzemelerinin bileşği olan bir yarıiletkenidir. Günümüzde GaAs, optik ve elektriksel özelliklerinin iyi olması, farklı teknikler ile işlenebilmesi sayesinde, bilim dünyasında üzerine çok sayıda çalışma yapılan ve silisyum teknolojisinin yerini alabilecek seviyede ilgi uyandıran bir duruma gelmiştir. Epitaksiyel büyümeye, Alüminyum-Galyum-Arsenik (AlGaAs) bileşğine ve mevcut elektronik cihazlara uygun düşen kafes yapısına sahip bir yarıiletken olması GaAs kullanımını özellikle optoelektronik alanda yaygınlaştırmıştır [84].



Şekil 3.3. GaAs yonga plakası.

#### 3.2.1. Temel Özellikleri

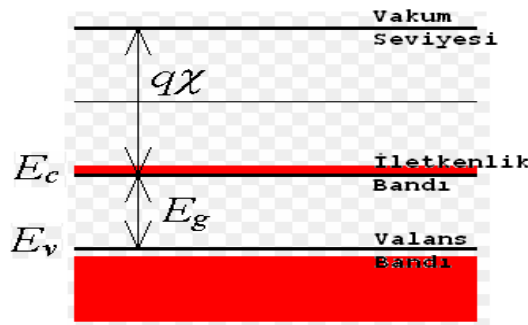
Galyum ve arsenik elementlerinden oluşan, polikristal bir yapıya sahip olan galyum arsenik (GaAs) önemli elektronik özelliklerinden dolayı birçok uygulama için kullanım alanına sahiptir. GaAs kristalinin yapısı Şekil 3.4' de gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Zinc blende yapıdaki GaAs kristali.

Enerji-bant diyagramında görüldüğü üzere, GaAs yarıiletkeni için iletkenlik bandı ( $E_c$ ), valans bandı ( $E_v$ ), elektron ilgisi ( $q\chi = 4.07$  eV), yasak enerji aralığı ( $E_g = 1.42$  eV) enerji seviyeleri ve vakum seviyesi verilmiştir. Bir elektronu yüzeyden koparmak için gereken en az enerji miktarı olan vakum seviyesi ile iletkenlik bandı kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkı elektron ilgisi olarak tanımlanır.

Sıcaklık, yarıiletken malzemenin cinsi, saflığı ve katkılama profili, iletkenlik bandı ile valans bandı arasındaki yasak enerji aralığını etkileyen faktörlerdir.



Şekil 3.5. GaAs için enerji-bant diyagramı.

Yüksek elektron mobilitesine sahip olması, hızlı çalışması ve düşük güç kaybı göstermesi gibi nedenlerle dijital devre elemanları, tümleşik devre elemanları ile düşük ve yüksek frekans devre elemanlarının yapısında GaAs yaygın olarak kullanılmaktadır.

Mobilite, elektrona  $-qE$  ve boşluğa  $qE$  kuvveti uygulayan elektrik alana karşı yarıiletken kristali içindeki taşıyıcı hareketine oluşan tepkinin bir ölçüsüdür.  $\mu_n$  elektron mobilitesi,  $\mu_p$  boşluk mobilitesi,  $E$  elektrik alan ve  $v_d$  sürüklenme hızı olmak üzere;

$$v_d = \mu_n E \quad (\text{Elektron için}) \quad (3.5)$$

$$v_d = \mu_p E \quad (\text{Boşluk için}) \quad (3.6)$$

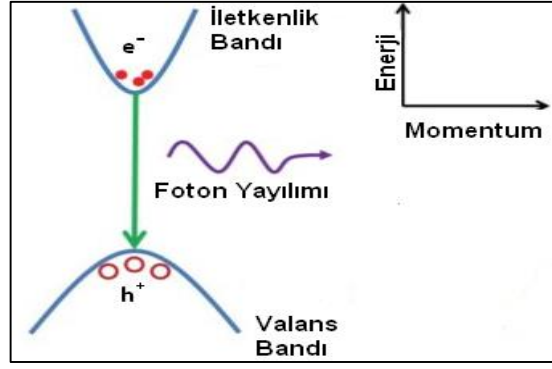
Mobilite taşıyıcıların etkin kütlesi ile ters orantılı olduğundan ve boşlukların etkin kütlesi elektronların etkin kütlesinden fazla olduğundan dolayı elektronların mobilitesi boşlukların mobilitelerinden yaklaşık olarak 2.5 kat yüksektir. ( $\mu_n \cong 2.5 \mu_p$ ) [85].

GaAs kristaline ait elektron ve boşlukların mobiliteleri ve etkin kütleleri Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. GaAs kristalinin elektron ve boşluklara göre mobilite ve etkin kütle değerleri.

<b>GaAs</b>	<b>Mobilite (cm<sup>2</sup>/Vs)</b>	<b>Etkin Kütle (m<sub>0</sub>)</b>
Elektron	8000	0.067
Boşluk	400	0.48

GaAs direk band aralıklı yapıya sahip bir yarıiletkendir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere iletkenlik bandının en alt noktası ile valans bandının en üst noktası aynı  $k$  dalga vektörü değerindedir. Bu durumda GaAs yapısında valans bandından iletkenlik bandına geçen bir elektron için momentum değişimi gözlemlenmeyecektir. Bu özelliği sayesinde GaAs optoelektronik devrelerde sıklıkla kullanılabilir.



Şekil 3.6. Direk band yapısı.

GaAs yarıiletkenine ait diğer özelliklere karşılık gelen sayısal değerler Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.2. GaAs kristalinin elektron ve boşluklara göre mobilite ve etkin kütle değerleri.

Erime noktası	1238 °C
Asal taşıyıcı konsantrasyonu	$1,8 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$
Termal genleşme katsayısı	$5,73 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Termal iletkenlik	$0,55 \Omega/\text{cm } ^\circ\text{C}$
Maksimum işlem sıcaklığı	400 °C

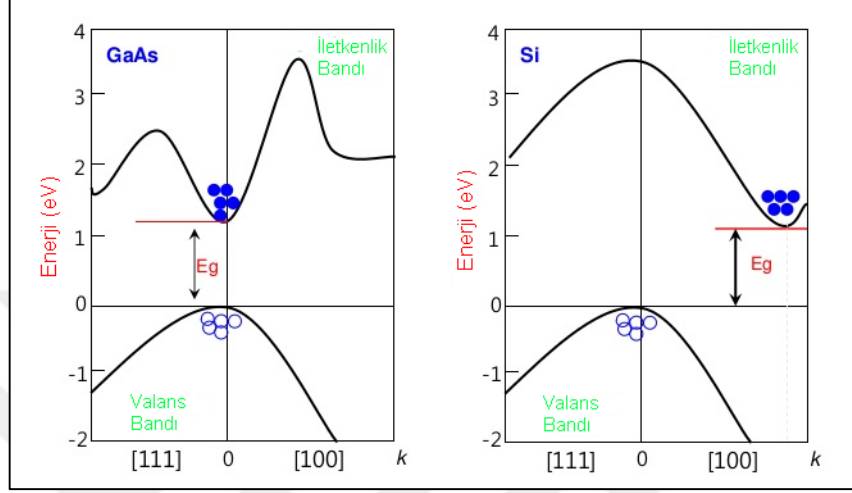
### 3.2.2. Silisyum Ve GaAs Karşılaştırması

Son yarım yüzyıl içerisinde üzerine çok sayıda araştırma yapılan silisyum, kolay işlenebilir olması, yüksek sıcaklıklardaki kararlı yapısı, doğada fazla miktarda bulunması gibi sebeplerden ötürü yarıiletken teknolojisinde en fazla kullanılan malzeme olmuştur. Bu dönemde çok fazla çalışma alanı bulamayan GaAs, son yıllarda mikrodalga frekanslarında çalışan yarıiletken devre elemanlarına olan talep ile birlikte yarıiletken pazarında kendisine önemli bir yer edinmiştir.

Silisyum (Si) yarıiletkeni doğrudan olmayan bant aralıklı yapıya sahiptir. Bu sebeple valans bandından iletkenlik bandına olan elektron geçişi esnasında momentum değişimi meydana gelmektedir. Çünkü şekilde görüldüğü üzere Si için valans

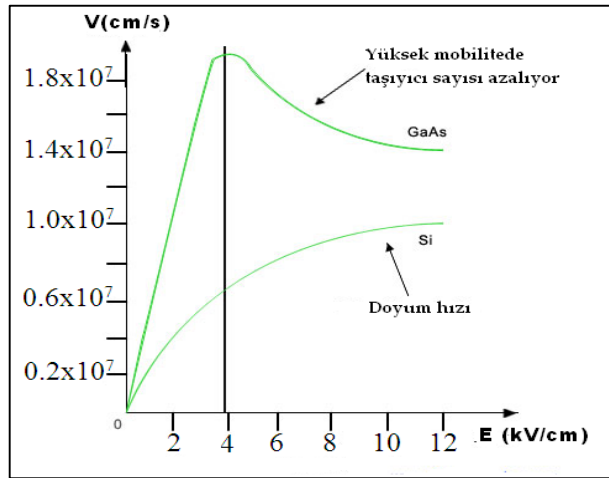


bandının en üst noktası ile iletkenlik bandının tabanı aynı  $k$  değerinde değildir. Bu durum Si yarıiletkeninin optik uygulamalarda çok fazla tercih edilmemesine sebeptir. GaAs ise doğrudan band aralıklı yapısı ile opto-elektronik devrelerde tercih edilmektedir.



Şekil 3.7. GaAs ve Si için enerji bant yapıları.

GaAs yarıiletkeninin mikrodalga frekanslarda çalışmasına olanak sağlayan en önemli neden yüksek elektron mobilitesine sahip olmasıdır. Elektronların uygulanan elektrik alandan ne derecede etkilendiğinin ölçüsü olan elektron mobilitesi için taşıyıcı hızının elektrik alana karşı grafiği Si ve GaAs malzemeleri için Şekil 3.8' de verilmiştir.



Şekil 3.8. Si ve GaAs için taşıyıcı hızlarının değişimi.

Aynı zamanda yarıyalıtkan taban malzeme olarak üretilmesi sayesinde GaAs, devre elemanlarının birbirinden izole olmasını ve daha düşük elektronik gürültüye sahip olmasını sağlar.

Silisyumun 1.12 eV olan yasak enerji aralığı seviyesi, GaAs yasak enerji aralığı seviyesinden düşüktür ve dolayısıyla daha düşük özdirence sahiptir. Özdirencinin daha yüksek olması ve azınlık taşıyıcılarının hareket süresinin daha kısa olması ile GaAs radyasyona karşı dayanıklılığı yüksek bir malzemedir.

Güneş pilleri uygulamalarında kullanılan GaAs, silisyuma oranla daha kısa foton soğurulma mesafesi sayesinde, daha az materyal ile daha ince yapıda oluşturulabilir. Silisyuma oranla sıcaklığa ve radyasyona daha dayanıklı olması GaAs güneş pillerinin uzay uygulamaları için üretilen optik yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılmasını sağlamaktadır [86]. Ticari verimi %22, laboratuvar verimi ise %25 civarında olan GaAs güneş pillerinin, farklı yarıiletkenler ile oluşturduğu çok eklemlı yapılar ile verimi %30 civarına çıkarttığı gözlemlenmiştir [87].

Sonuç olarak yüksek elektron mobilitesi, düşük gürültü sinyali seviyesi, yüksek güç aktarımı, yüksek kırılma gerilimi ve direk band yapısına sahip olması GaAs'ın silisyuma karşı öne çıkaran özellikler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlara ek olarak yüksek termal kararlılığı ve geniş sıcaklık aralığında çalışabilmesi diğer önemli avantajlarıdır. Silisyumun sahip olduğu doğal oksit yapısına sahip olmaması, yüksek üretim maliyetleri ve daha küçük ölçülerde elde edilmesi GaAs'ın dezavantajları olarak sayılabilir.

### **3.3. Au/ZnO/GaAs MIS YAPISININ HAZIRLANMASI**

Bu kısımda, Au/ZnO/n-GaAs Schottky Engel Diyotların hazırlanma aşamaları olan kristalin temizlenmesi, omik kontak ve doğrultucu kontakların oluşturulması ile ilgili bilgiler yer almaktadır. Kimyasal temizleme işlemi, numune üzerindeki metalik ve organik kirleri gidermek ve Schottky diyot üretiminde kaliteyi artırmak amacıyla numunelere uygulanmıştır. Bu süreci takiben termal buharlaştırma sistemi önce omik kontakın oluşturulması için, RF püskürtme tekniği ile ZnO tabakasının oluşturulması

sonrasında da doğrultucu kontağın oluşturulması için kullanılmıştır. Bu süreçte uygulanan işlemler detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır.

### 3.3.1. Kristalin Temizlenmesi

Elmas kesici ile alttaş uzunluğu 1.0 cm ve genişliği 1.0 cm olacak şekilde parçalara ayrılan n-tipi GaAs alttaşın tekrar kullanımı açısından yüzey temizliği son derece önemlidir. Temizleme işlemi yapının karakteristiğini olumlu etkilediği gibi yüzey üzerine filmin iyi yapışmasını da sağlamaktadır. Kristal temizleme işlemi yüzeyde bulunan organik kirleri ve parçacıkları yok etmek adına üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu işlem ile birlikte birçok yüzey kusuru bertaraf edilerek ideale yakın bir Schottky diyot elde edilmesi amaçlanmaktadır.

İlk olarak aseton ( $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ ) kullanılarak 5 dakika boyunca ultrasonik banyoda mekanik titreşimler ile n-tipi GaAs pul yüzeyinde bulunan pürüzsüzlükler ve organik kirlilikler temizlenmiştir. Daha sonra izo-propil alkol ( $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ ) yardımıyla 5 dakika ultrasonik banyoda temizleme işlemine devam edilmiştir. Temizleme işlemi 18 M $\Omega$  değerinde yüksek dirence sahip deiyonize su ile durulama ve azot ( $\text{N}_2$ ) gazı ile kurutulma işlemleri ile devam etmiştir.

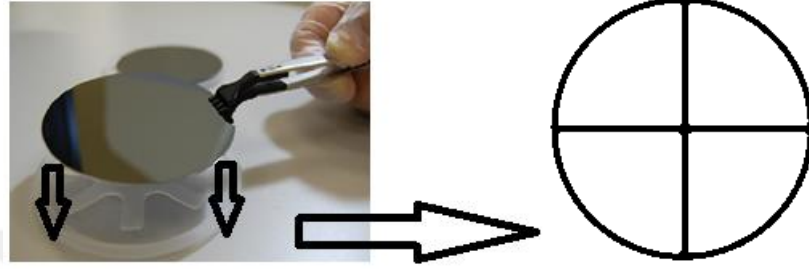
150 nm kalınlığında altının buharlaşması ile n-GaAs alttaşının arkasında oluşturulan omik kontak  $\text{N}_2$  atmosferinde 3 dakika boyunca 400 °C' de tavlansın ve daha sonra alttaşın ön yüzeyi üzerindeki doğal oksit tabakasını kaldırmak için  $\text{HF}+10\text{H}_2\text{O}$  çözeltisi uygulanmıştır. 30 saniye sonra de-iyonize su içinde durulama işlemi yapılmış ve daha sonra kontak  $\text{N}_2$  ile kurutulmuştur.



Şekil 3.9. Kristal temizleme işlemi.

### 3.3.2. Omik Kontakın Oluşturulması

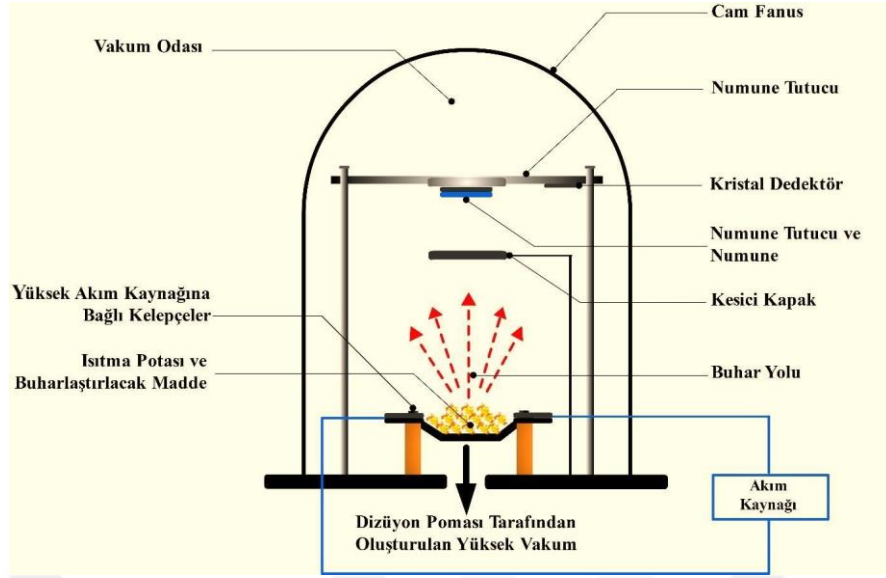
GaAs yarıiletken kristalinin temizleme işleminin ardından omik kontağı oluşturmak için, kristalin mat yüzeyi aşağıda olacak biçimde bir maske üzerine konumlandırılıp termal buharlaştırma ünitesine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Omik kontak oluşturmak için kullanılan maske.

Kimyasal temizleme sonrası %99,99 saflığındaki altın (Au) kaplanmak istenen miktar nispetinde termal buharlaştırma ünitesi içindeki potalara konularak sistem kapatılmıştır.

Yarıiletken yüzeyine metal filmlerin biriktirilmesi için termal buharlaştırma yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde küçük boyutlarda metal parçacıkları kontrollü olarak belirli oranlarda buharlaştırma potasına konulmakta ve buharlaştırma metal birikimi sağlanmaktadır. Önceden ısıtılan cam taban üzerine buharlaştırılmış materyal düşük basınç altında çöktürülür. Vakum odası, örnek tutucu, örnek altlığı, ısıtıcı flaman, buharlaştırılacak metal ve metal buharı Şekil 3.10' da gösterilen termal buharlaştırma sistemini oluşturan temel öğelerdir.



Şekil 3.11. Termal buharlaştırma ünitesine ait şematik gösterim.

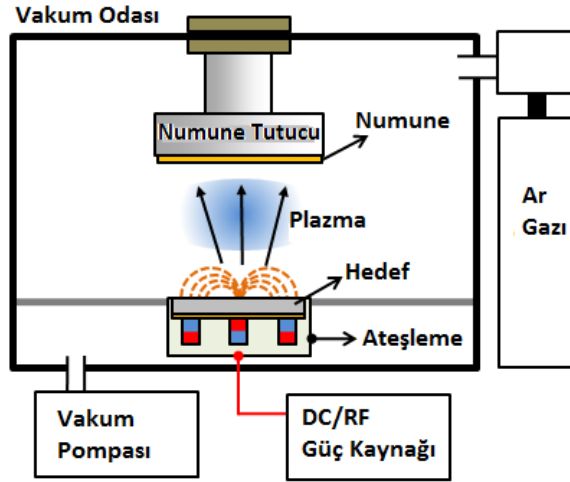
Altın (Au) tungsten pota içerisine yerleştirilerek kadar potadan kontrollü olarak geçirilen yüksek akım sayesinde maksimum 800 °C sıcaklığa pota etrafına sarılı rezistans teller yardımıyla ısıtılmaktadır. Pota içerisindeki saf Au yaklaşık olarak  $5 \times 10^{-8}$  Torr basınç altında vakum sistemi ile buharlaştırılarak GaAs pulun arka yüzeyine  $\sim 1500$  Å kalınlığında Au tabaka oluşturulmuştur. Au film kalınlığı Quartz osilatör kristal monitörü ile kontrol edilerek ayarlanmıştır. İstenilen seviyede kalınlık elde edildiğinde akım kontrollü olarak azaltılıp, düşük ergime sıcaklığındaki saf Au yüksek sıcaklıkta buharlaştırılmıştır. Buharlaştıran Au kapak üzerinde yerleştirilmiş tutucuya sabitlenmiş örnek üzerinde yoğunlaşmıştır. Öz direnci düşük omik kontak eldesi için vakum ortamında ısıl işlem yapılarak çöktürme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12. Vaksis MIDAS termal buharlaştırma PVD/3T cihazının fotoğrafı.

### 3.3.3. Radyo-Frekans (RF) Püskürtme Yöntemi İle ZnO Biriktirme

Radyo frekansı (RF) püskürtme sistemi, RF güç kaynağı, vakum odası, vakum pompası ve eşleştirme ünitesi olmak üzere dört temel bölümden oluşmaktadır. Vakum pompasının kullanım amacı vakum odasını düşük basınç değerlerine çekmektir. Havadaki diğer gazlardan vakum odasının temizlenmesi ve yüksek enerjili çarpışmalar elde etmek için iyonize parçacıkların ortalama serbest yolunun artırılması gibi nedenler ile basınç düşürülmekte ve oluşturulacak materyalin kalitesi ve saflığı artırılmaktadır. RF güç kaynağı ile oluşturulan elektromanyetik dalgalar eşleştirme ünitesi vasıtasıyla vakum odasında titreşim frekansı oluşturur ve oluşan bu titreşim ile enerjilen gazlar hedef materyali iyonize hale dönüştürür.



Şekil 3.13. RF püskürtme sisteminin temel bileşenleri.

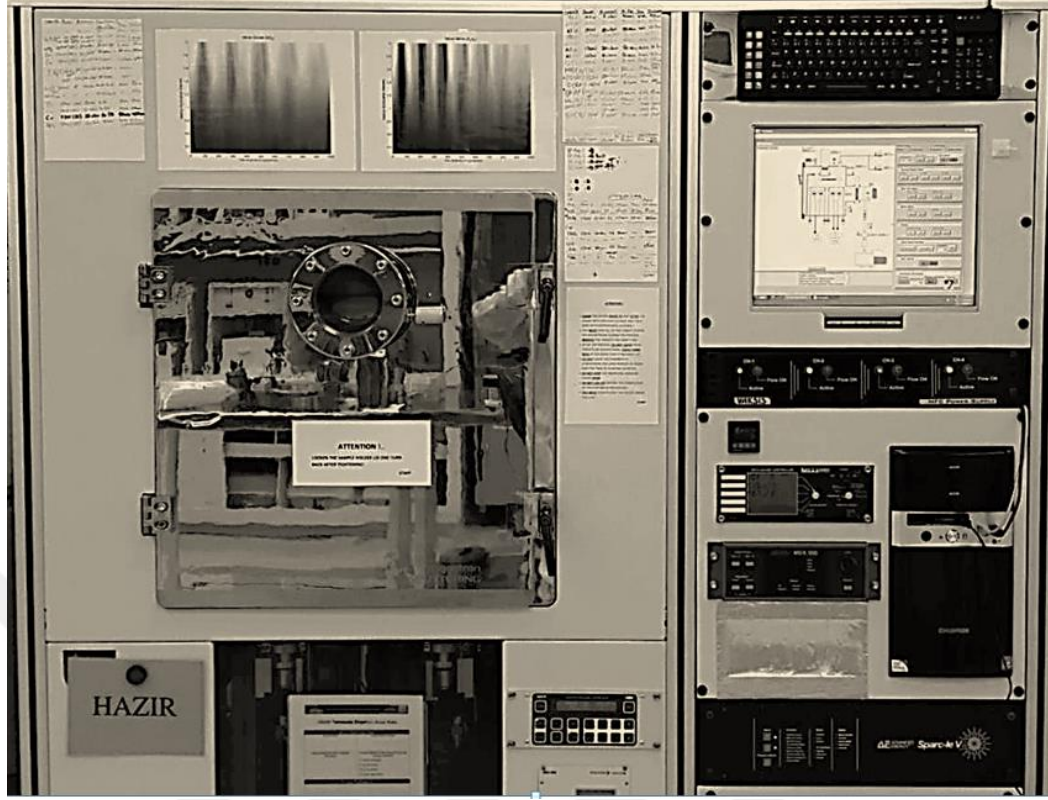
Özet olarak RF püskürtme sisteminin çalışması şu şekildedir.

- RF güç kaynağı elektromanyetik dalgaları oluşturur
- Eşleştirme ünitesi vakum odasında titreşim frekansı oluşturur.
- Argon (Ar) gazları 13,56 MHz frekans değerinde titreştirilir.
- Hedef materyal Ar gazları titreşerek enerji kazanması ile iyonize hale getirilir
- Sonuç olarak lamel üzerinde ince film katmanı oluşturur.

Püskürtme yöntemi çok çeşitli malzemeler için kullanılabilir. Bu yöntem içinde malzemeleri uygun duruma getirmek adına özelliklerini değiştirmeyi sağlayan pek çok süreç barındırır. Organometalik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) ve moleküler demet depolama (MBE) gibi diğer ince film biriktirme yöntemlerine göre püskürtme yöntemi daha basit, daha düşük biriktirme sıcaklığına sahip ve daha ekonomik olması bakımından tercih edilmektedir.

Bilkent Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (UNAM) bulunan Şekil.3.13’ deki Vaksis Nano-D 4S Magnetron Püskürtme cihazı malzemenin hazırlanmasında kullanılmıştır.





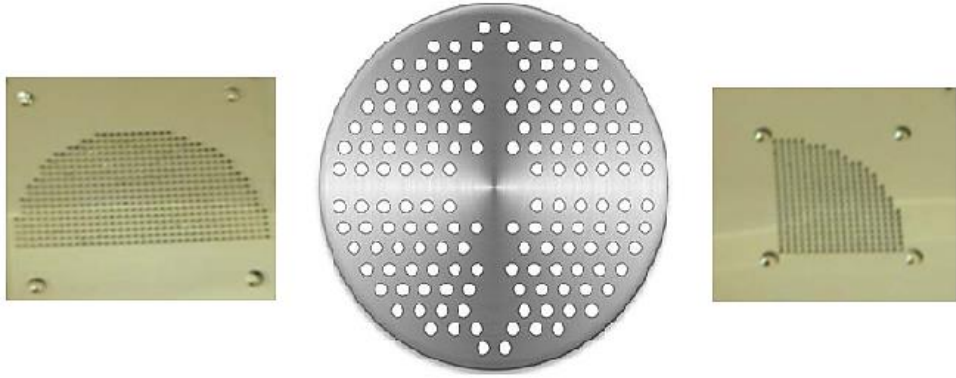
Şekil 3.14. Vaksis Nano-D 4S Magnetron Püskürtme cihazı.

Vaksis RF Püskürtme cihazı 4 adet magnetrona sahiptir ve reaktör çemberi açılmadan sırasıyla 4 farklı malzeme biriktirmesine izin vermektedir. İki adet RF güç kaynağı olan magnet yalıtkan ve yarıiletken malzeme biriktirmekte kullanılmaktadır. Temizlenmiş n-GaAs pul yüzey tutucu üzerine ZnO ince film hazırlamak için yerleştirilmiştir. Söktürme gazı olarak Ar, reaktif gaz olarak ise O<sub>2</sub> kullanılmıştır. RF gücü plazmaya uygulanarak hedef ZnO' dan söktürme yapılarak ürün oranı ayarlanmıştır. Ön-püskürtme işlemi ZnO üzerindeki kirliliğin giderilmesi ve sistemi kararlı hale getirmek adına biriktirme işlemi başlamadan önce gerçekleştirilmiştir. Optimum seviyeye ulaşıldıktan sonra yüksek saflıkta oksijen ve argon gazı ortama verilerek yaklaşık 10<sup>-3</sup> Torr basınçta istenilen kalınlıkta ZnO n-GaAs üzerine biriktirilmiştir. Özetle, ZnO (50 nm) film RF püskürtme tekniği ile n-GaAs alttaş üzerinde büyütülmüş ve kalınlık monitörü ile kalınlığı kontrol edilmiştir.



### 3.3.4. Doğrultucu (Schottky) Kontak Hazırlanması

n-tipi GaAs alttaş üzerine RF püskürtme tekniği ile ZnO (50 nm) film büyütülmesinden sonra sıra doğrultucu kontakların oluşturulması işlemine gelmiştir. Üzeri çok sayıda 1 mm çaplı deliklerden oluşan bir maske n-GaAs pulun ZnO kaplanmış yüzeyi üzerine konumlandırılarak termal buharlaştırma ünitesine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.15. Schottky kontak oluşturulurken kullanılan maske çeşitleri.

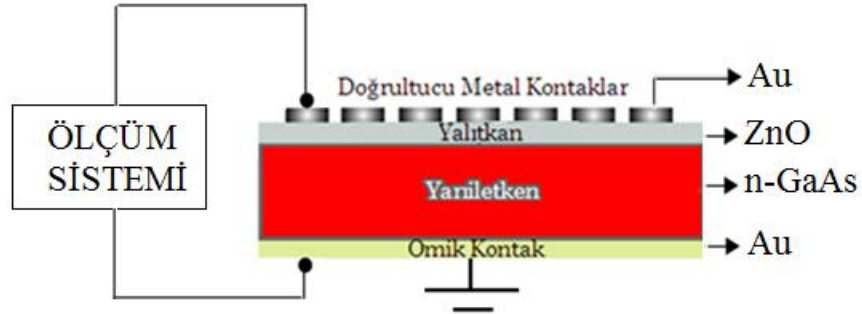
Termal buharlaştırma sistemi basıncı yaklaşık olarak  $10^{-6}$  Torr olduğunda kimyasal olarak temizlenip pota içerisine yerleştirilen %99,99 saflığındaki Au üzerinden yüksek akım geçen tungsten flaman yardımıyla buharlaştırılmıştır. Buharlaşan altının n-tipi GaAs kristali yüzeyine yapışmasıyla ince film tabakası oluşturur. Böylece kristalin parlak üst yüzeyine kalınlığı kalınlık monitörü ile kontrol edilen  $\sim 1500$  Å kalınlığında Au kaplanmıştır. Sonuçta,  $7.85 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup> alana sahip Schottky kontaklar, ZnO/n-GaAs/Au ön yüzeyine yaklaşık 1.0 mm çaplı noktalar halinde Au (150 nm) termal buharlaştırma yöntemi ile buharlaştırılarak oluşturulmuştur. Buharlaşma ve kaplamanın işlemleri  $4 \times 10^{-6}$  Torr vakumlu kaplama ünitesinde yapılmıştır. Hazırlanan Au/ZnO/n-GaAs Schottky engel diyotun fotoğrafı Şekil 3.15' de gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Hazırlanan Au/ZnO/n-GaAs Schottky engel diyot.

### 3.4. ÖLÇÜM SİSTEMİ

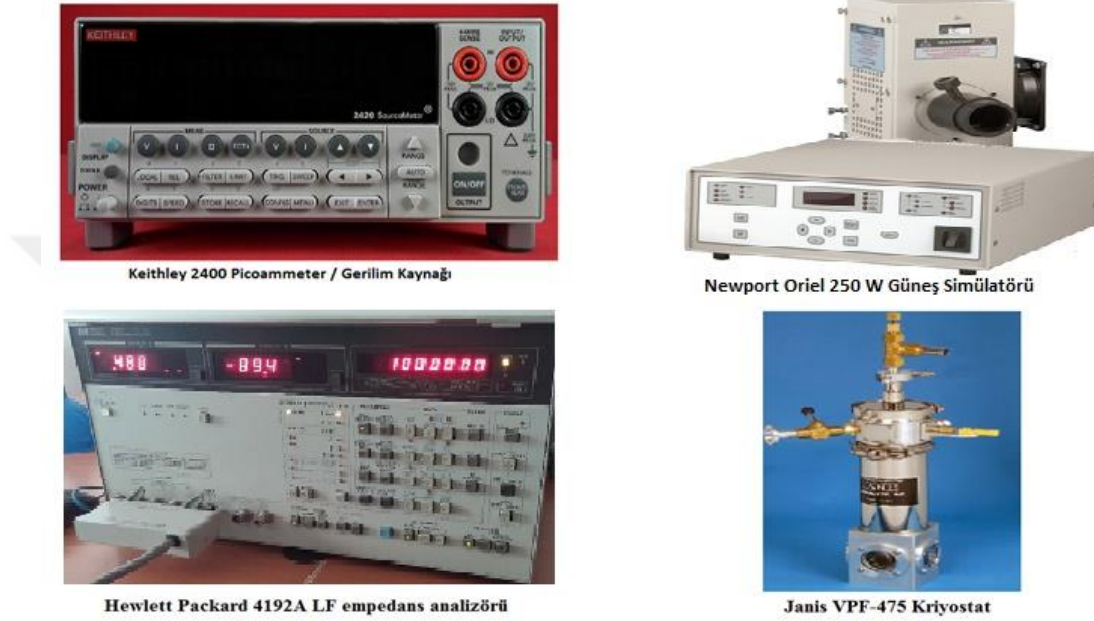
Au/ZnO/n-GaAs yapısının I-V, C-V ve  $G/\omega$ -V karakteristiklerini elde etmek için yapılan elektriksel ölçümler Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fotonik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9 Au/ ZnO/n-GaAs SBD' lerin enine kesitini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3.17. Bir ışık kaynağının altında Au/ ZnO/n-GaAs SBD'ler yapısına ölçüm sistemi bağlantısı.

Keithley 2400 Picoammeter / Gerilim Kaynağı diyotun I-V ölçümleri yürütmek için kullanılmıştır. C-V ölçümleri için ise Hewlett Packard 4192A LF Empedans analizöründen (5Hz-13MHz) faydalanılmıştır. Numunenin aydınlatılması için Newport Oriol (Model: 69931) 250 W güneş simülatörü bir ışık kaynağı olarak ve aydınlatma yoğunluğunu ölçmek için International Light Technologies (Model

ILT1700) ışınımölçer cihazı olarak kullanılmıştır. Janis VPF-475 kriyostat kullanımı gürültüyü azaltmak için ölçümlere katkıda bulunmaktadır. Ölçümlerin gerçekleştirilmesi için Kriyostat içinde bulunan IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kartı da kullanıldı. Aşağıda Şekil 3.10' da kullanılan cihazların bir arada gösterildiği ölçüm sistemini oluşturmaktadır.



Şekil 3.18. Deneysel ölçüm sistemi.

### I-V Ölçüm Sistemi

Keithley 2400 akım-voltaj kaynağı akım-voltaj ölçümlerini yapmak için kullanılmıştır. Bu cihaz akım kaynaklı gerilim ve gerilim kaynaklı akım ölçümü yapabilmekte olup  $\pm 1 \mu\text{V}$ 'dan  $\pm 200 \text{ V}$ 'a gerilim ve  $\pm 10 \text{ pA}$ ' den  $\pm 1 \text{ A}$ 'e kadar akım ölçüm aralıklarına sahiptir. Ayrıca IEEE-488 arayüzey veri yoluna sahip olan cihaz,  $\pm \% 0.15$  hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir.

### C-V / G/ $\omega$ -V Ölçüm Sistemi

Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analizörü frekansa bağlı kapasitans-voltaj ölçümleri almak için kullanılmıştır. 5Hz-13MHz arasında geniş frekans ölçüm aralığı ve 5mV-1V arasında osilatör genlik aralığı olan cihaza doğru ve ters polarma özelliği

ile -35 V ile +35 V aralığında ayar yapılabilir. Cihaz empedans, kapasitans, admitans ve indüktans ölçümleri yapabilmesinin yanında bu nicelikler arasındaki faz değerlerini ve kalite faktörlerini de ölçebilme kabiliyetine sahiptir. IEEE-488 arayüzü veri yoluna ve  $\pm\% 0.15$  ölçüm hassasiyetine sahip bu cihaz test point yazılımı sayesinde bilgisayar ile kontrol edilebilmektedir.

Gürültü ve diğer dış etkenlerin I-V, C-V ve G/ $\omega$ -V ölçümleri üzerindeki etkisini azaltmak için 4 optik pencereye sahip Janis VPF-475 kriyostat kullanılmıştır. Ölçümler 79-425 K sıcaklık aralığında ölçüm yapabilen ve Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemine sahip olan kriyostat içinde yaklaşık  $10^{-2}$  mbar basınçta gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM 4

### ARAŞTIRMA BULGULARI

Hazırlanan Au/ZnO/n-GaAs Schottky engel diyotların (SBDs) temel elektriksel parametreleri, akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj ( $G/\omega$ -V) ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. Öncelikle Au/ZnO/n-GaAs/Au SBDs' lerin I-V karakteristiklerinin incelenmesi, oda sıcaklığında 0-200 W aydınlatma aralığında gerçekleştirilmiştir. Voltaja bağlı direnç ( $R_i$ ), her bir aydınlatma şiddeti için belirli bir doğru polarma altında yapılan ölçümlerden elde edilmiştir. Seri direnç ( $R_s$ ) değerlerini elde etmek ve karşılaştırmak için hem Cheung hem de Norde yöntemleri kullanılmıştır. Doğru polarma I-V karakteristiklerinden  $N_{ss}$ -( $E_c$ - $E_{ss}$ ) enerji dağılım profili elde edilmiştir. Sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_{B0}$ ), idealite faktörü (n),  $R_s$  ve  $N_{ss}$  gibi temel elektriksel parametrelerin aydınlatma şiddetine bağlı değişimleri incelenmiştir.

I-V karakteristiklerinden elde edilen sonuçların ardından, Au/ZnO/n-GaAs SBD' ler için kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj ( $G/\omega$ -V) ölçümlerinin frekansa bağlı özellikleri hem karanlıkta hem de çeşitli aydınlatma şiddetlerinde incelenmiştir. Kapasitans ve kondüktans arasındaki ilişki incelenerek,  $R_s$ ,  $N_{ss}$  ve arayüzey tabakası gibi parametrelerin doğru polarmada yüksek frekanslarda negatif kapasitans artışına yol açtığı ileri sürülmüştür. Aydınlatma şiddetinin negatif kapasitans ve kondüktans değerlerini ne şekilde değiştirdiği, kutuplaşma ve yük taşıyıcıların etkisi ve voltaja bağlı olan yapının direncinin aydınlatma şiddetinden nasıl etkilendiği gözlemlenmiştir. Frekans, aydınlatma şiddeti ve uygulanan gerilimin Au/ZnO/n-GaAs SBD' nin temel elektriksel parametleri üzerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

#### 4.1. AKIM-VOLTAJ (I-V) KARAKTERİSTİKLERİ

Au/ ZnO/n-GaAs SBD yapısının akım gerilim karakteristikleri doğru ve ters polarma bölgelerinde yarı logaritmik olarak I-V değerleri grafik üzerinde Şekil 4.1' de gösterilmiştir. Artan aydınlatma şiddetlerinin ve aynı zamanda karanlığın etkisi Şekil 4.1' de sunulmuştur. Yapı Schottky engel diyotu gibi davranmaktadır ve seri direnç ( $R_s$ ) ile verilen SBD' lerin akım-voltaj karakteristikleri aşağıdaki gibi TE modeline uymaktadır.

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

Şekil 4.1' de görüldüğü üzere I-V eğrileri aydınlatma şiddetine oldukça bağlıdır. Bu davranış artan aydınlatma şiddetinin etkisiyle M/S eklem bölgesinde daha çok sayıda elektron hol çiftinin oluşmasından kaynaklanır. Schottky diyotların lnI-V eğrileri üç farklı bölgeye ayrılır. Bu bölgeler düşük gerilim ( $V < 0.2V$ ) bölgesi, orta gerilim ( $0.2V < V < 0.7V$ ) bölgesi ve yüksek gerilim ( $V > 0.7V$ ) bölgesidir. Düşük gerilim bölgesinde kaçak akımlar etkindir, lineer davranış görülmez. Yüksek gerilim bölgelerinde  $R_s$ 'den dolayı bir bükülme meydana gelir. Orta gerilim bölgesinde ise lnI-V eğrileri lineer bir davranış sergiler. Bu lineer bölgenin eğiminden idealite faktörü, lnI-V eğrilerinin y eksenini kestiği noktadan ise doyma akımı bulunur.

Eşitlik 4.1' de, elektron yükleri, Boltzmann sabiti, Kelvin olarak sıcaklık sırasıyla  $q$ ,  $k$  ve  $T$  olarak ifade edilmiştir.  $V$ , Schottky eklemi üzerine uygulanan gerilimdir. Diyot üzerindeki gerilim düşümü,  $V > 3kT/q$  ve seri direnç dikkate alındığında orta gerilim bölgesinde lnI-V eğrisi üzerindeki potansiyel arasındaki fark ( $V - IR$ ) olarak ifade edilebilir. Burada, doyum akımı olan  $I_o$  değeri, lnI-V grafiğinde akım ekseninin  $V=0$ ' da kestiği noktadan elde edilmiş ve açık ifadesi aşağıdaki gibi verilmiştir.

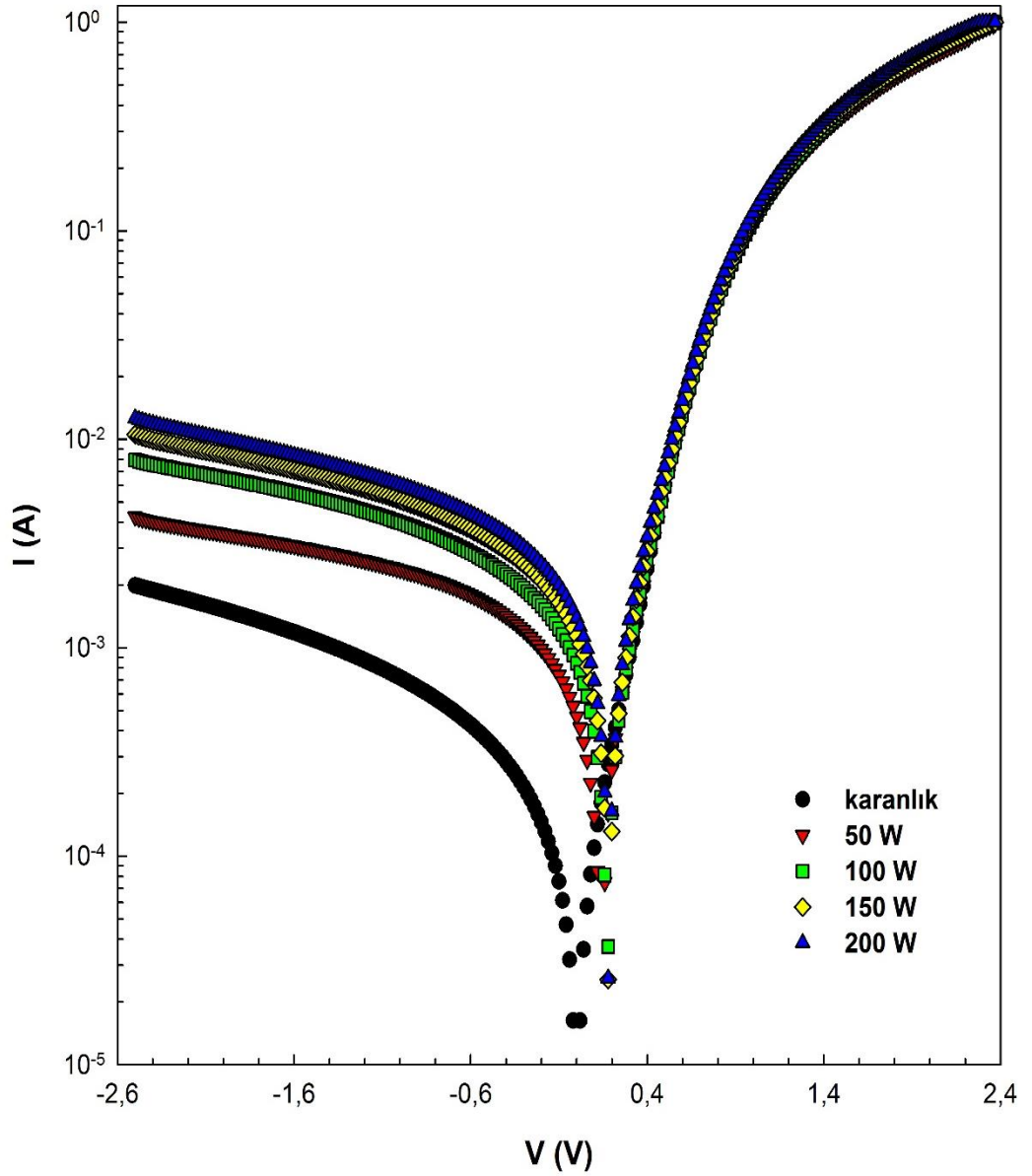
$$I_o = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

A diyotun doğrultucu kontak alanıdır ve n-GaAs için Richardson sabiti  $8.16 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$  eşittir ve  $A^*$  ile belirtilir. Sıfır polarma altında engel yüksekliği de eşitlik (4.3) ile elde edilebilir. Elde edilen doyma akım değeri, diyot doğrultucu kontak alanı ve Richardson sabiti kullanılarak sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği elde edilir.

$$\Phi_{Bo} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \quad (4.3)$$

Seri direnç, arayüzey tabakası, arayüzey durumları ve engel homojensizliği nedeniyle idealite faktörü n “1” değerinden oldukça büyüktür. lnI-V karakteristiğinin doğru polarma doğrusal bölge eğimi n değerinin belirlenmesini sağlar. lnI-V grafiğinde orta gerilim bölgesindeki lineer bölge eğiminden n değeri aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

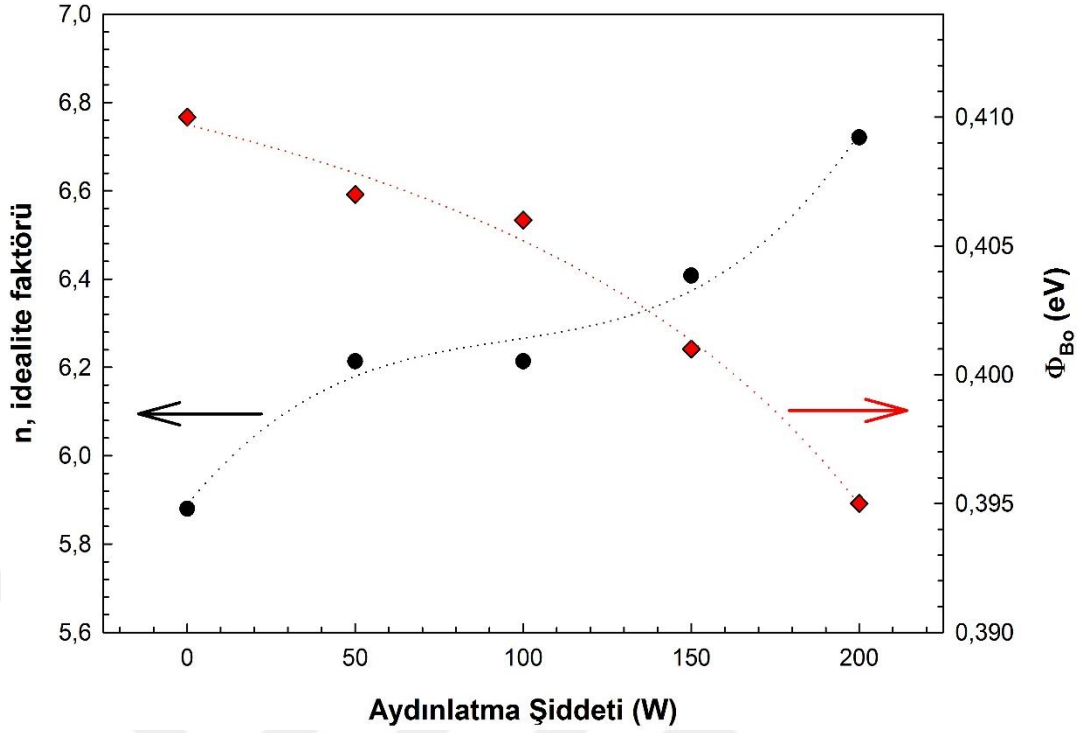
$$n = \frac{q}{kT} \frac{d(V - IR_s)}{d(\ln(I))} \quad (4.4)$$



Şekil 4.1. Farklı aydınlatma koşulları altında Au/ZnO/n-GaAs SBD için doğru ve ters polarma I-V karakteristikleri.

Çizelge 4.1’ de gösterildiği gibi I-V karakteristiklerinde elde ettiğimiz  $\Phi_{B_0}$  ve  $n$  parametreleri aydınlatma şiddetinden son derece etkilenmektedir. Bu durum şekilde görüldüğü gibi artan aydınlatma seviyelerinde  $n$  değerleri artarken  $\Phi_{B_0}$  değerlerinin azalması olarak ifade edilebilir. (Karanlıkta;  $\Phi_{B_0} = 0,410$  eV,  $n = 5,880$  ve 200 W aydınlatma şiddetinde  $\Phi_{B_0} = 0,395$  eV ve  $n = 6,721$ ) Burada  $n$  değerinin (5,88) 1’den büyük olması arayüzey tabakası kalınlığı ve arayüzey durumlarına bağlıdır.  $\Phi_{B_0}$  değerlerinin azalması doğru polarma bölgesinde tüketim tabakasının daralmasından kaynaklanmaktadır.





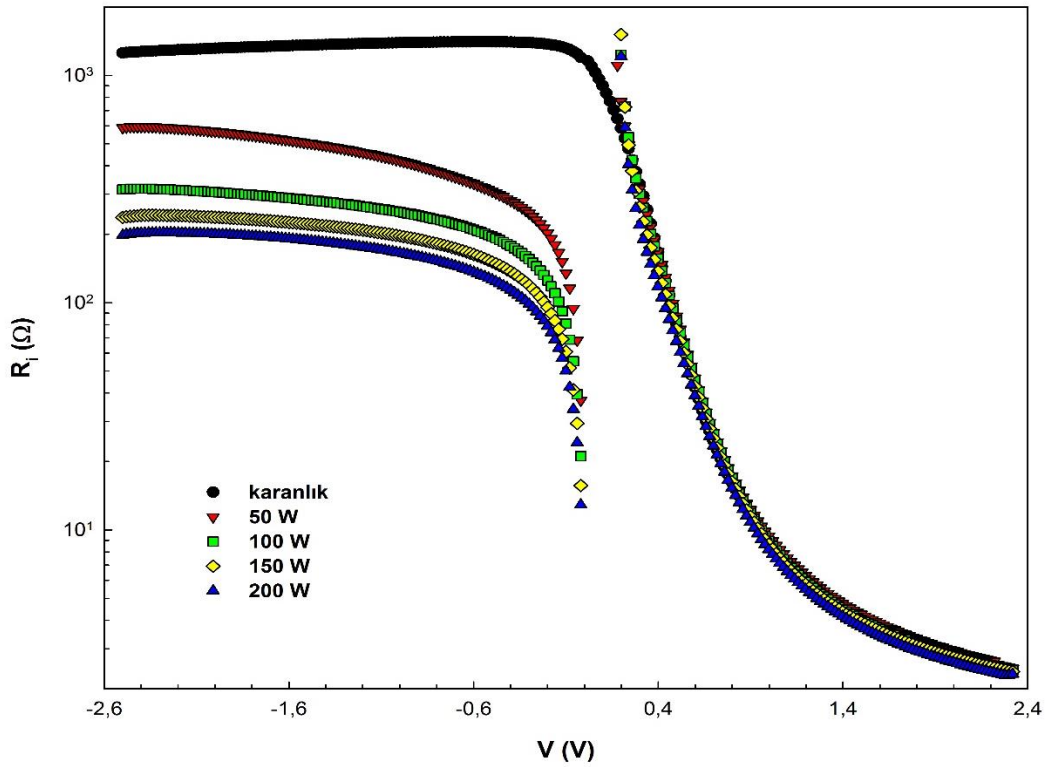
Şekil 4.2. Aydınlatma şiddetleri altında  $\Phi_{Bo}$  ve n değişim grafiği.

Diyot üzerine uygulanan voltaj V, yalıtkan arayüzey tabakası, tüketim tabakası ve diyotun seri direnci tarafından paylaşılır. Paylaşılan gerilim büyüklüğü arayüzey tabaka kalınlığına bağlı olduğundan,  $R_{sh}$  ve  $R_s$  SBD'lerin güvenilirlik ve performansını belirleyen önemli parametrelerdir. Artan aydınlatma seviyesi ile valans bandından iletkenlik bandına yüklerin uyarılması vesilesiyle  $R_s$  değeri azalır.  $R_s$  etkisi, yüksek doğru polarma bölgesinde 1V seviyeden sonra aşağı yönlü bir eğrilik olarak Şekil 4.1' deki yarı logaritmik I-V grafiğinden görülebilir.

Şekil 4.3' de görüldüğü üzere  $R_i$  değerleri hem voltaja hem de aydınlatma şiddetine bağlı olarak oldukça değişmektedir. Elde edilen  $R_i$  değerleri doğru polarma yönünde  $R_s$  direncine, ters polarma yönünde ise  $R_{sh}$  kısa devre direncine karşılık gelir. Hem  $R_s$  hem de  $R_{sh}$  değerleri artan aydınlatma şiddeti ile azalmaktadır. Bu beklenen bir davranış olup artan aydınlatma şiddeti ile valans bandındaki veya yasak enerji aralığındaki tuzaklarda bulunan taşıyıcıların çoğu ( $hc/q\lambda > E_g$  durumunda) iletim bandına uyarılarak öziletkenlik veya kondüktansı artırır ve dolayısıyla öz direnci veya direnci azaltacaktır. Burada;

- $h$  : Planck sabiti,  
 $c$  : ışık hızı,  
 $q$  : bir elektronun yükü,  
 $\lambda$  : dalga boyu ve  
 $E_g$  : yasak enerji aralığı olarak tanımlanmıştır.

$R_{sh}$  ve  $R_s$  değerleri Şekil 4.3' de  $R_i$  grafiğine karşı uygulanan sapma voltajı (V) ile tayin edilmiş ve Çizelge 4.1 'de verilmiştir. Voltaja bağlı  $R_i$  değerleri Ohm kanunu kullanılarak elde edilmiştir. Her iki direnç değerleri artan aydınlatma şiddeti ile azalırken  $R_s$  değerlerinin aynı zamanda artan gerilim ile de azaldığı Şekil 4.3' de görülmektedir.



Şekil 4.3. Çeşitli aydınlatma şiddetleri altında Au/ZnO/n-GaAs SBD yapısında voltaja bağımlı direncin etkileri.

Yüksek voltajlarda  $\ln I-V$  eğrilerinde özellikle seri dirençten dolayı sapma meydana gelir. Yukarıda belirtilen seri direncin aşağı doğru sapması doğru polarma  $\ln I-V$  eğrilerinde lineer bölgeyi daraltır. Yeterince yüksek gerilim uygulandığında grafiğin doğrusallıktan sapsması ve çok dar bir bölgede lineerlik göstermesi elde edilen

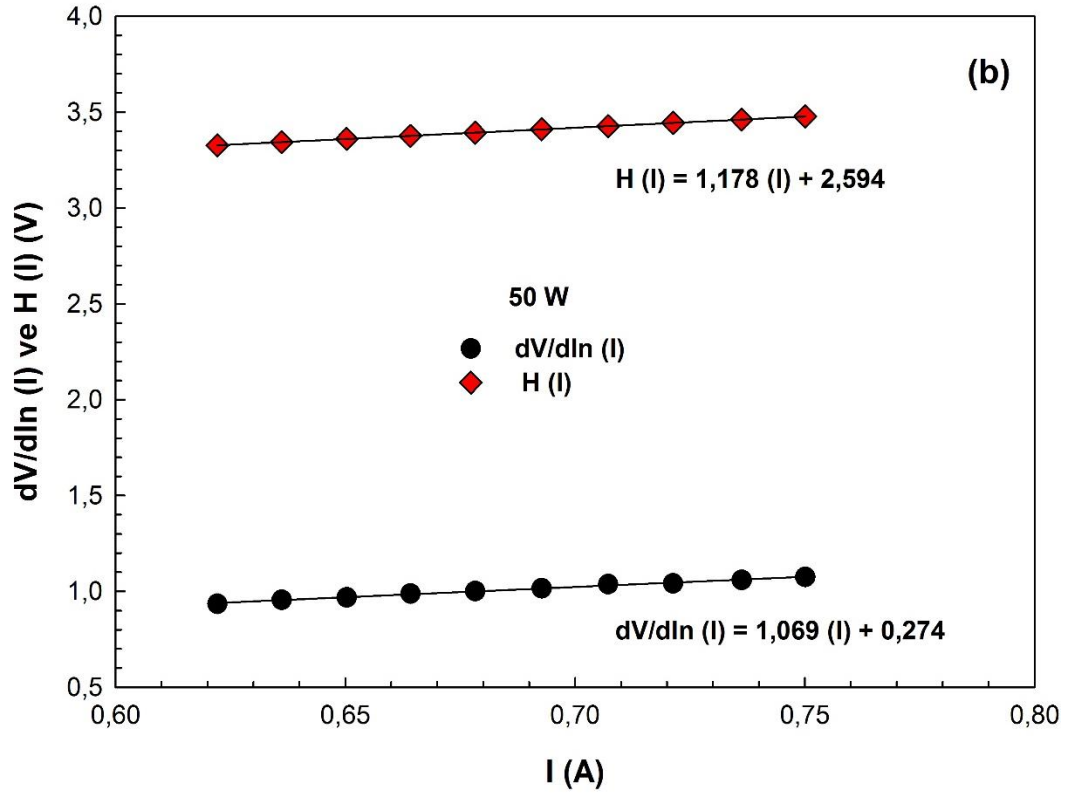
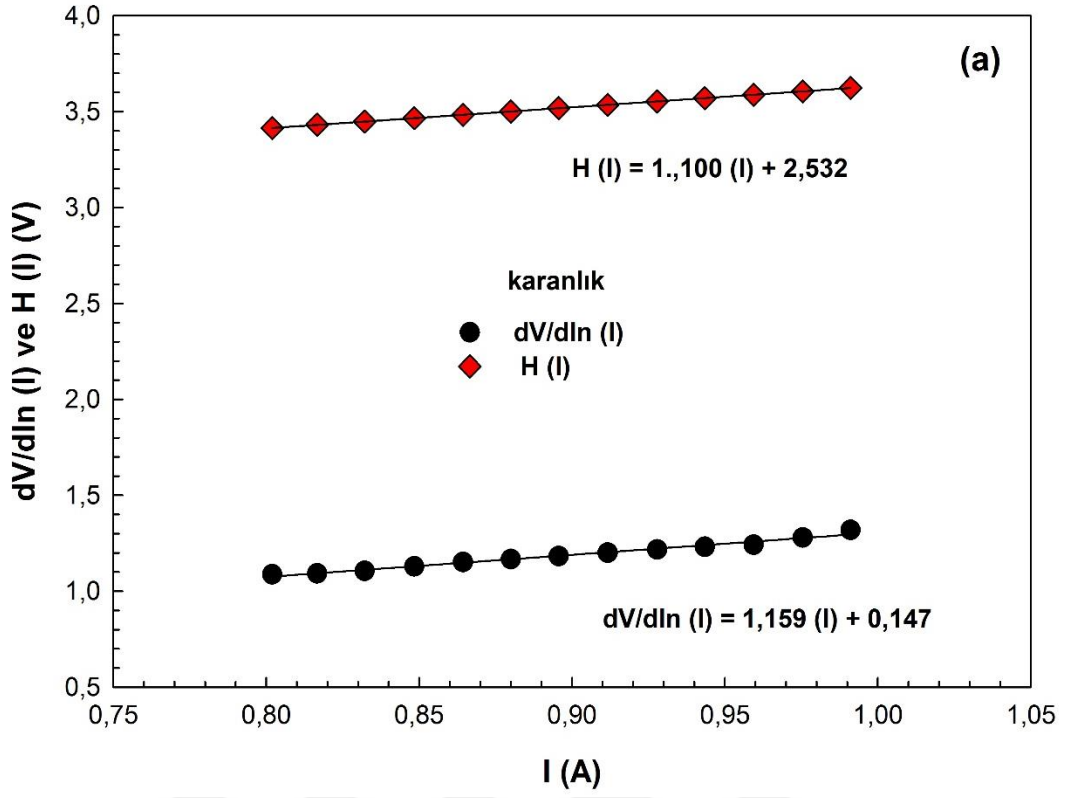
elektriksel parametrelerin doğruluğu ve güvenilirliğine gölge düşürmektedir. Ancak bilindiği gibi yarıiletken aygıtların gerçek direnci mümkün olduğu kadar pozitif voltajlar için elde edilen değerdir. Bu yüzden seri direnç değerleri bu bölgede hesaplanır. Yalıtkan tabakası ve arayüzey durumları da oldukça yüksek gerilim uygulandığında doğrusallıktan sapmanın nedenleri arasındadır.

Doğru polarma I-V karakteristiklerinin doğrusal olmayan bölgesinde çeşitli aydınlatma seviyeleri altında  $R_s$  değerlerini elde etmek için Cheung yöntemi kullanılmaktadır [62].

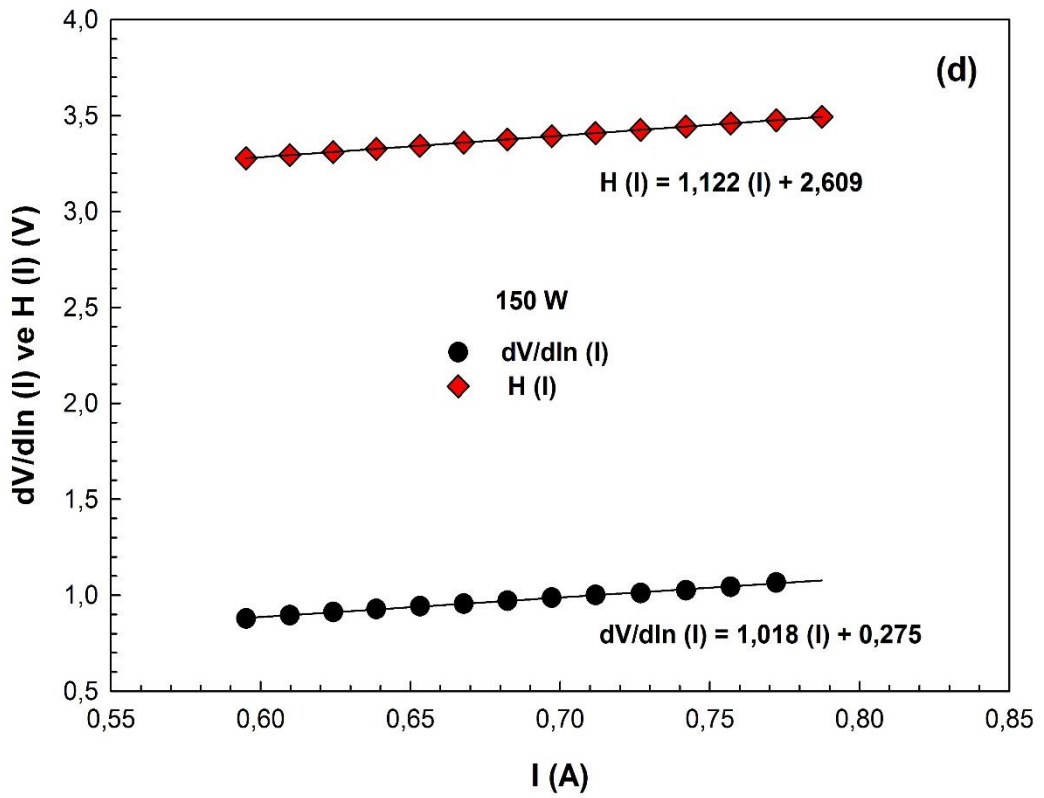
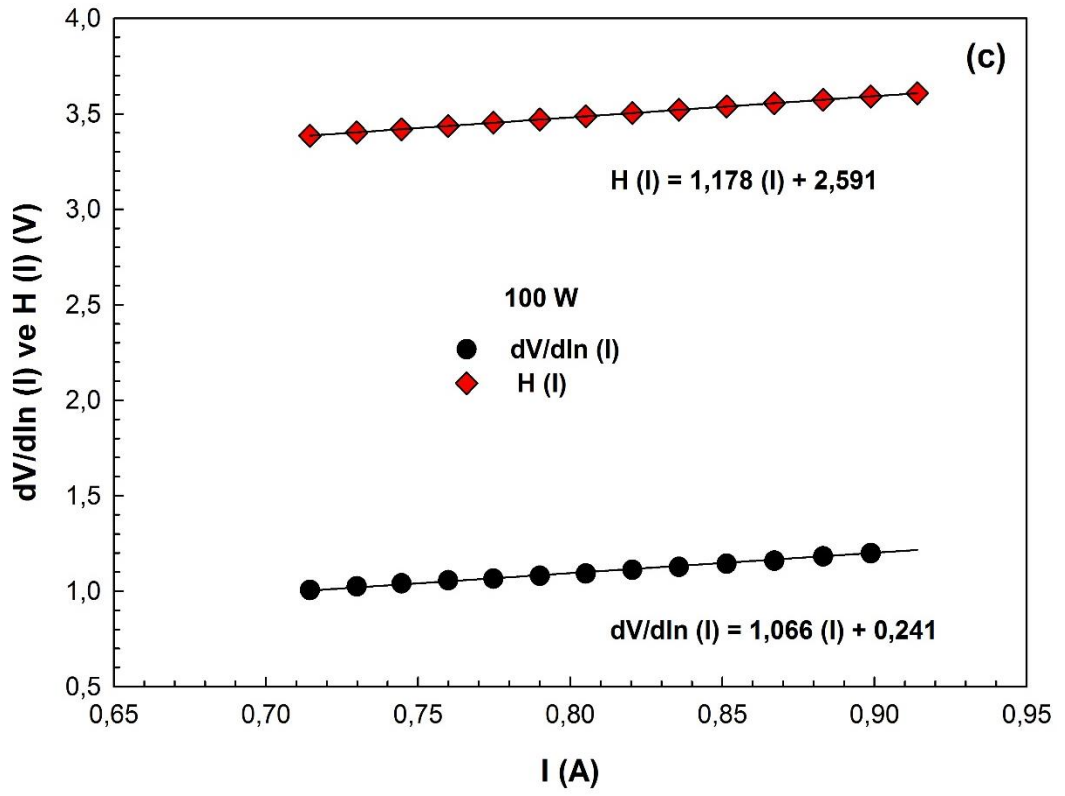
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad (4.5)$$

$$H(I) = V - n \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_{Bo} + IR_s \quad (4.6)$$

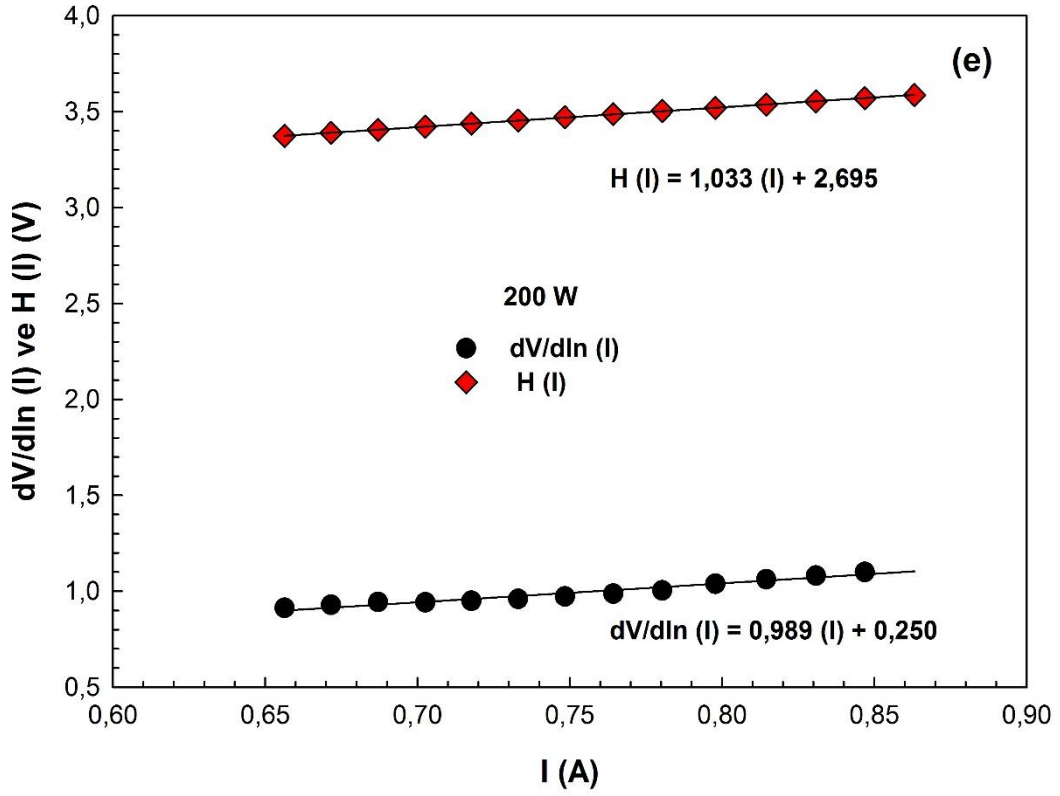
H(I)-I' ya karşı  $dV/d\ln(I)$ -I grafikleri oda sıcaklığı koşulları altında Au/ZnO/n-GaAs SBD için çeşitli aydınlatma şiddetlerinde Şekil 4.4' de verilmiştir.  $R_s$  değerleri eşitlik (4.5) kullanılarak elde edilebileceği gibi, aynı zamanda her bir aydınlatma şiddeti için  $dV/d\ln(I)$  ile I grafiğinin eğiminden de elde edilebilir. H(I)-I grafiğinin eğiminden de elde edilebilen seri direncin bu alternatif tespiti elde edilen  $R_s$  değerlerinin tutarlılığını karşılaştırma imkânı sağlar. Yukarıdaki eşitlikler (4.5) ve (4.6) ile elde edilen  $R_s$  değerlerinin tutarlı olduğu ve artan aydınlatma şiddetleri ile azaldığı Çizelge 4.1' de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.4. Farklı aydınlatma koşulları altında  $I'$  ya karşı  $dV/d\ln(I)$  ve  $H(I)$  grafikleri; a) karanlıkta b) 50W c) 100W d) 150W e) 200W.



Şekil 4.4. (devam ediyor).



Şekil 4.4. (devam ediyor).

Şekil 4.4’ de verilen grafiklerde  $dV/d\ln(I)$ -I ile  $H(I)$ -I grafiklerinin lineer olduğu görülmektedir ve her bir aydınlatma şiddeti için grafiklerin eğiminden  $R_s$  değerlerinin elde edilebilmektedir. Seri direncin bu tespiti elde edilen  $R_s$  değerlerinin tutarlılığını karşılaştırma imkânı sağlar. Literatürde artan aydınlatma seviyelerine bağlı olarak  $R_s$ ’ nin benzer değişimler gösterdiği birçok çalışma mevcuttur [88-91]. Aydınlatma etkisine ilişkin olarak, sonuçlar rekombinasyon merkezleri ve giriş tuzakları etkisiyle aygıtın tüketim bölgesinde taşıyıcı yoğunluğunun azalması ile ilişkilidir [92].

Diyotun arayüzey durum yoğunluğunun  $N_{ss}$  dağılım profili farklı aydınlatma şiddetlerinde doğru polarma I-V ölçümlerinden  $E_c-E_{ss}$  enerjisinin bir fonksiyonu olarak ve etkin engel yüksekliği dikkate alınarak ve ayrıca  $R_s$  dikkate alınarak elde edilmiştir. Şekil 4.5’ te görüldüğü gibi hem karanlık hem de aydınlatma şiddetlerinde  $N_{ss}$  değerleri iletim bandının alt kenarından yasak enerji aralığının ortasına doğru azalmakta ve bir minimumdan geçerek yaklaşık U şeklinde bir davranış sergilemektedir. Yasak enerji aralığının ortasına kadar verici tip veya donör ( $N_D$ )

arayüzey durumlarının ortasından sonra ise alıcı tipi veya akseptör ( $N_A$ ) arayüzey durumlarının katkısı etkin olmaktadır.

$N_{ss}$  enerji yoğunluğu dağılımı, voltaja bağımlı idealite faktörü  $n(V)$  ve etkin engel yüksekliği ( $\Phi_e$ ) göz önüne alınarak doğru beslem I-V verilerinden kolaylıkla belirlenebilir. Aşağıdaki eşitlikler sırasıyla  $n(V)$  ve ( $\Phi_e$ ) değerlerini hesaplamak için verilmiştir.

$$n(V) = 1 + \delta \varepsilon_i [\varepsilon_s / W_D + q N_{ss}(V)] \quad (4.7)$$

$$\Phi_e = \Phi_{Bo} + \beta (V - IR_s) \quad (4.8)$$

Etkin engel yüksekliği gerilim katsayısı  $\beta$  olarak tanımlanan eşitlik (4.9) ile elde edilen bir parametredir.

$$\beta = \partial \Phi_e / \partial V = 1 - 1/(n(V)) \quad (4.9)$$

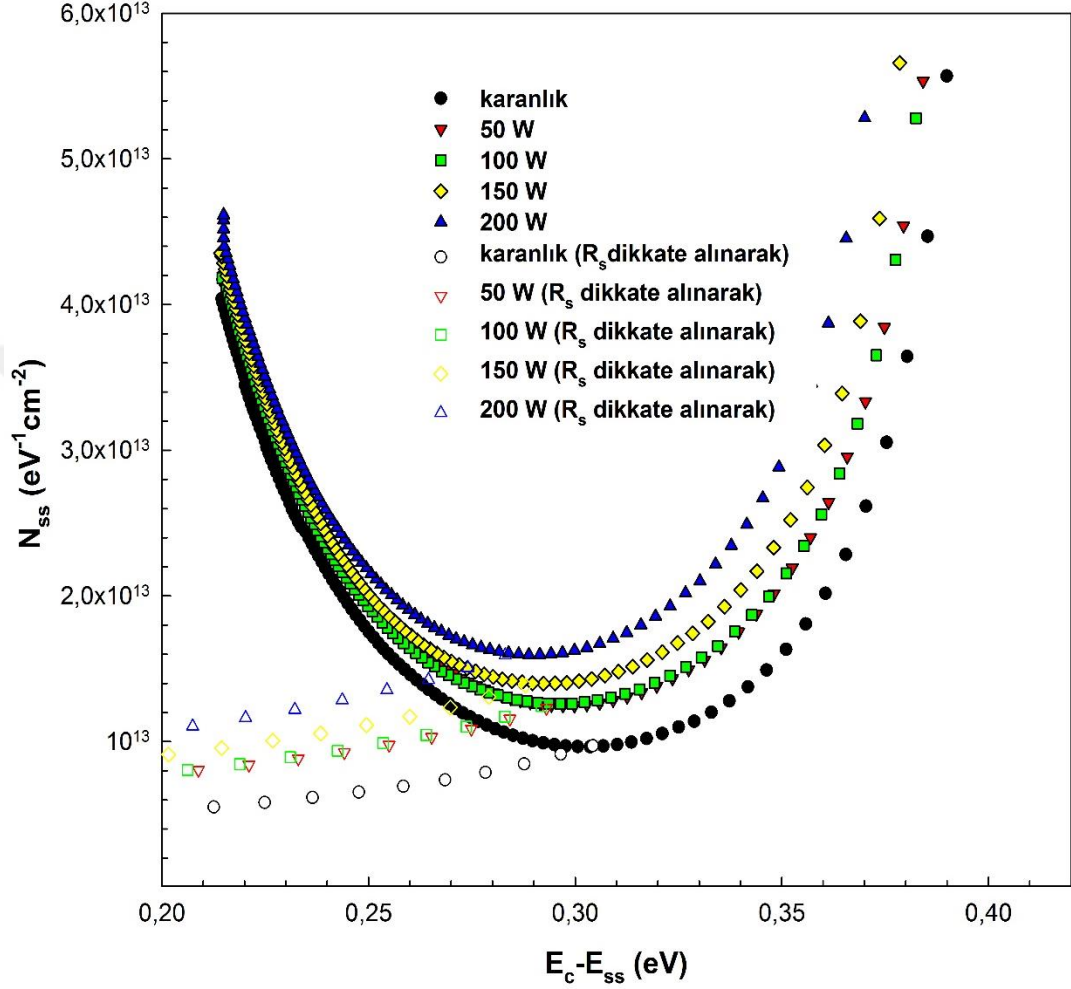
$\beta$  parametresi yarıiletken ile dengedeki arayüzey durumlarının etkilerini içerir. Card ve Rhoderick tarafından önerilen arayüzey durumları yoğunluk denkleminin basitleştirilmiş şekli aşağıda belirtilmiştir.

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[ \frac{\varepsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right] \quad (4.10)$$

Burada,  $W_D$  ve  $\delta$  sırasıyla tüketim bölgesi genişliği ve ara yüzey yalıtkan tabaka kalınlığıdır. Yarıiletkenin ve yalıtkan arayüzey tabakasının geçirgenlik parametreleri  $\varepsilon_s$  ve  $\varepsilon_i$  ile gösterilir. Bu iki parametre ile boş uzay yükünün geçirgenlik parametresi  $\varepsilon_0$  arasındaki ilişki  $\varepsilon_i = 3.8\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_s = 11.8\varepsilon_0$  olarak tanımlanır. Ayrıca, n-tipi yarı iletkenler yüzeyindeki edilebilir iletim bandının en alt seviyesindeki  $E_c$ ' ye göre arayüzey durumları enerjisi  $E_{ss}$  aşağıdaki eşitliklerden elde edilebilir.

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.11)$$

Karanlıkta ve belirtilen aydınlatma şiddetleri altında doğru polarmaya bağlı  $\Phi_e$  göz önüne alındığında, eşitlik (4.10)' dan  $n(V)$ ,  $\delta$  ve  $W_D$  değerleri kullanılarak  $N_{ss}$ ' e karşı  $(E_c - E_{ss})$  grafiği Şekil 4.5' deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Belirli aydınlatma seviyelerinde  $N_{ss}$  enerji dağılım profili ve  $R_s$  etkisi.

$N_{ss}$ 'in iletim bandı boyunca üstel olarak artışı Şekil 4.5' te açıkça görülmektedir. Ayrıca, aydınlatma şiddetinin  $(E_c - 0,21)$  ve  $(E_c - 0,39)$  eV aralığında artması ile  $N_{ss}$  değerleri de artmıştır.  $R_s$  dâhil edildiği zaman Şekil 4.5' te  $N_{ss}$  değerlerinin yaklaşık beş kat azaldığı görülmektedir. Bu durum arayüzey durumlarının hesaplanmasında seri direnç etkisinin kesinlikle dikkate alınması gerektiğini gösterir.

Literatürde arayüzey durumları yoğunluğu yaklaşık  $10^{12}$ - $10^{15}$   $eV^{-1}.cm^{-2}$  mertebesinde olup  $5 \times 10^{13}$  ile  $10^{13}$  arasında elde edilen sonuçlar ile uyumludur.



SBDs için  $R_s$  değerlerini bulmanın bir diğer yolu ise Norde fonksiyonu kullanılmasıdır. Norde fonksiyonu  $F(V)$  ile sembolize edilir ve Şekil 4.6' da görüldüğü gibi seri dirençten dolayı  $F(V)$  değeri bir minimum noktadan geçmektedir. Bu minimum noktaya karşılık gelen voltaj  $V_o$  ve akım  $I_o$  değerleri kullanılarak kullanılarak  $\Phi_b$  ve  $R_s$  elde edilir.

Au/ZnO/n-GaAs SBD yapısında seri direnç ve engel yükseklik değerlerini incelemek için kullanılan Norde yöntemi fonksiyonunu aşağıdaki eşitlik göstermektedir.

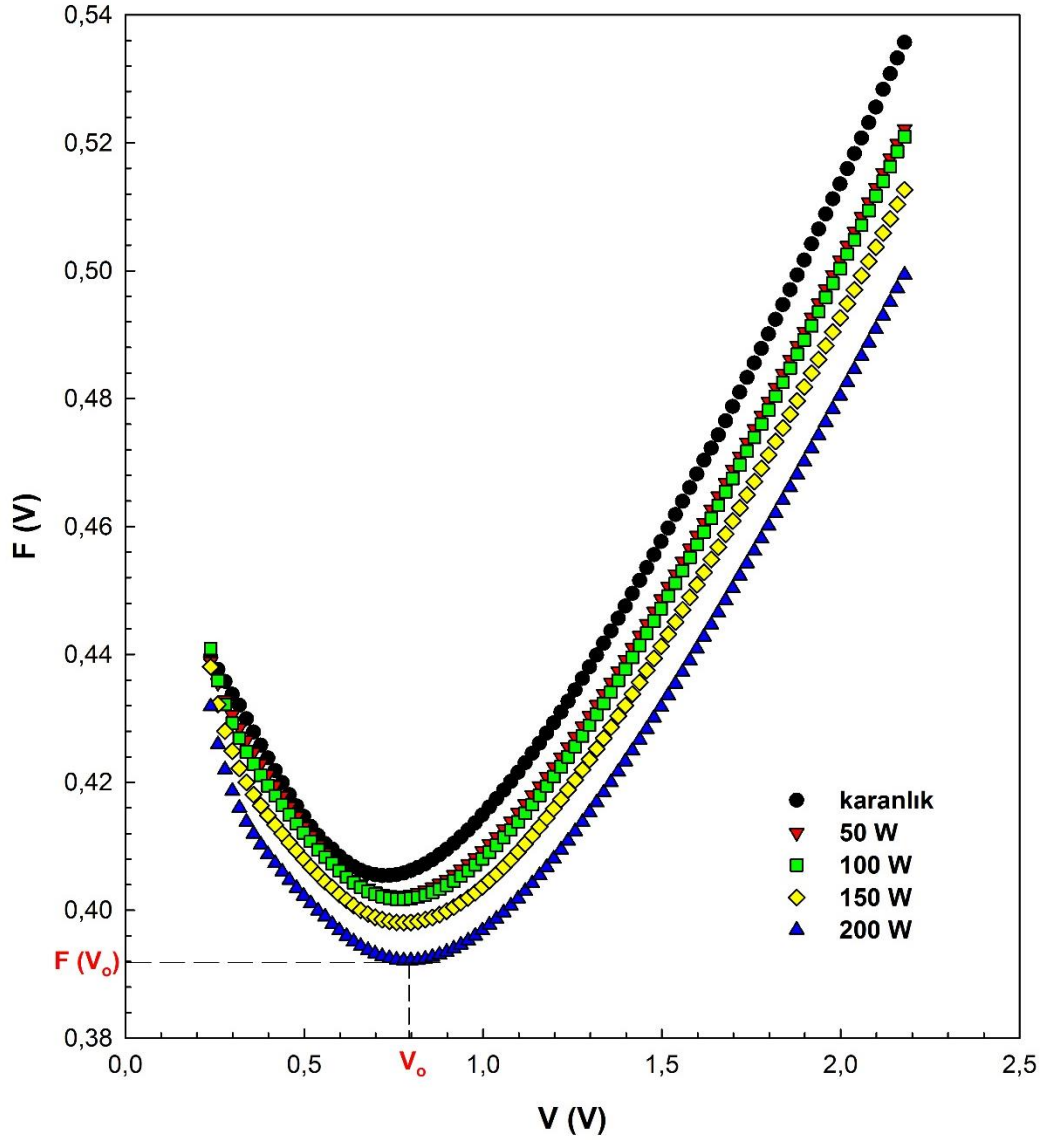
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (4.12)$$

Burada;  $I(V)$  akımı I-V eğrisinden elde edilmiştir ve  $\gamma$  idealite faktöründen büyük olmak üzere keyfi bir sabit olarak ifade edilebilir.  $F(V)$ 'nin minimum noktası  $F(V_o)$  ve buna karşılık gelen voltaj  $V_o$  olarak tanımlandığında cihazın engel yüksekliği, aşağıdaki eşitlik ile belirlenmiştir.

$$\Phi_B = F(V_o) + \frac{V_o}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.13)$$

Belirlenen aydınlatma koşulları altında Au/ ZnO/n-GaAs SBD' nin  $F(V)$ - $V$  grafiği Şekil 4.6' da gösterilmektedir.  $R_s$  değerleri hesaplanmasında Norde fonksiyonu kullanılmıştır.

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_o} \quad (4.14)$$



Şekil 4.6. Farklı aydınlatma koşullarında Au/ZnO/n-GaAs SBDs  $F(V)$ - $V$  grafiği.

Sonuçta Au/ZnO/n-GaAs SBD' nin Ohm yasası, Norde ve Cheung metodları kullanılarak temel diyot parametreleri olan idealite faktörü ( $n$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) hesaplanmış oldu. Norde ve Cheung metotları  $\ln I$ - $V$  eğrisinin dar bir bölgesinde lineer bölge seçimi zor olduğundan bu temel parametreleri hesaplamada kolaylık sağlamıştır.

Çizelge 4.1' de verilen değerler incelendiğinde, seri direnç ve engel yüksekliği değerleri artan aydınlatma şiddetleri ile azalmaktadır. Artan aydınlatma şiddeti ile  $R_s$  değerlerinin azalması Cheung ve Norde yöntemlerinin her ikisinde de ortak olarak gözlenmiştir.

Çizelge 4.1. Au/ ZnO/n-GaAs yapısının aydınlatma bağımlı parametre değerleri.

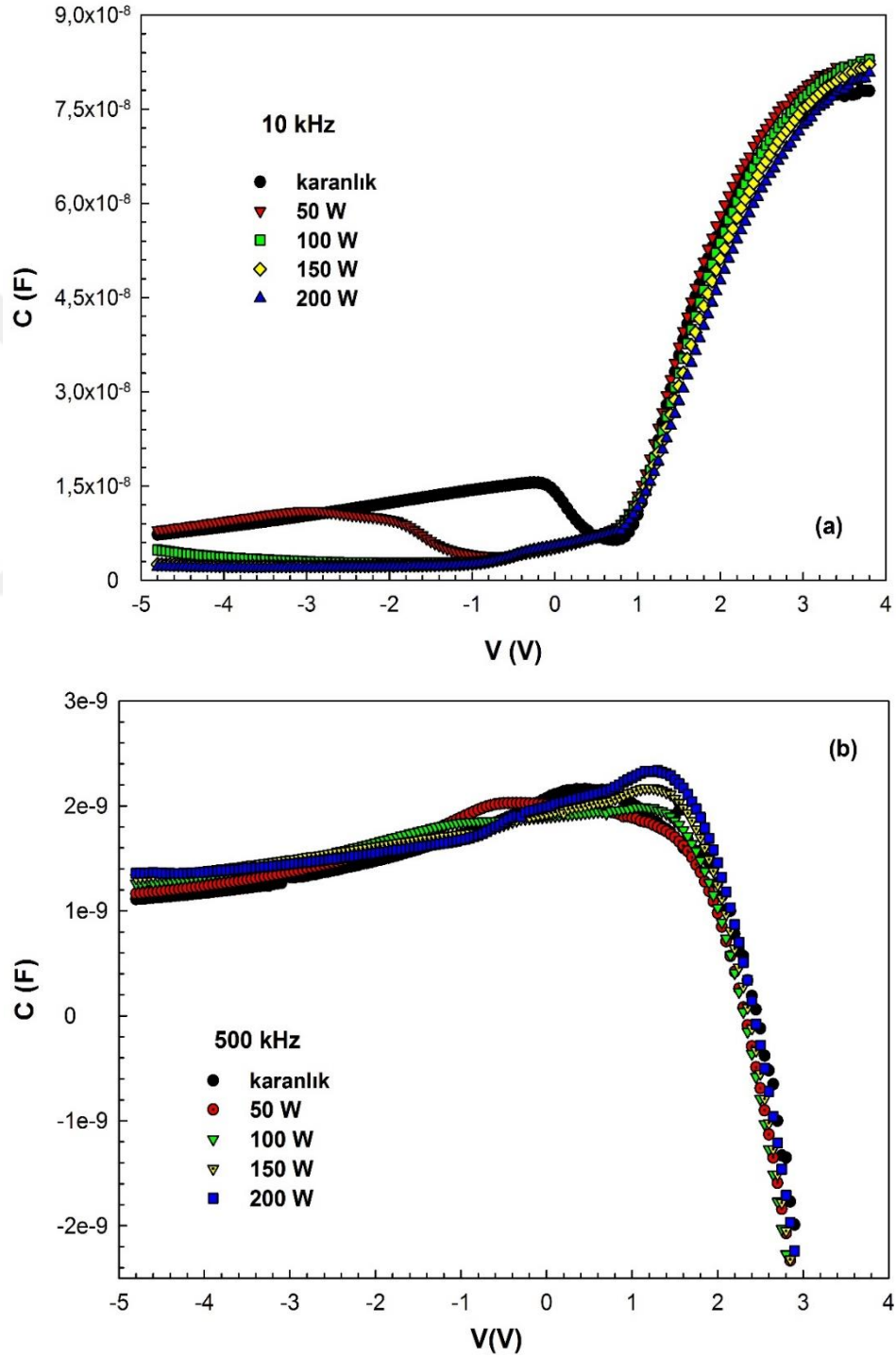
	$I_0$ (A)	n	$\Phi_{B0}$ (eV)	Norde		Cheung		Ohm Yasası	
						$dV/d\ln(I)$	H (I)		
				$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_B$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )
<b>Karanlık</b>	$4.03 \times 10^{-4}$	5.880	0.410	0.783	0.488	1.159	1.100	1254	2.379
<b>50W</b>	$4.58 \times 10^{-4}$	6.214	0.407	0.672	0.486	1.069	1.177	588	2.426
<b>100W</b>	$4.75 \times 10^{-4}$	6.214	0.406	0.588	0.485	1.065	1.112	407	2.392
<b>150W</b>	$5.72 \times 10^{-4}$	6.408	0.401	0.568	0.478	1.018	1.122	314	2.374
<b>200W</b>	$7.48 \times 10^{-4}$	6.721	0.395	0.479	0.471	0.988	1.033	267	2.360

#### 4.2. KAPASİTANS-VOLTAJ (C-V) VE KONDÜKTANS-VOLTAJ (G/ $\omega$ -V) KARAKTERİSTİKLERİ

Au/ZnO/n-GaAs SBD' ların kapasitans (C) ve kondüktans (G/ $\omega$ ) değerlerine karşı gerilim (V) karakteristikleri oda sıcaklığında 0-200 W aydınlatma aralığında incelenmiştir. Bu karakteristikler 10 kHz ve 500 kHz frekansları için sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' te gösterilmiştir. MIS tipi Schottky engel diyotun terslenim, tüketim ve birikim bölgelerindeki davranışları şekillerde her bir aydınlatma şiddeti için açıkça gösterilmektedir. C ve G/ $\omega$  değerlerinin değişimi güçlü terslenim bölgesi (-5 V) ile güçlü birikim bölgesi (4 V) arasında verilmiştir.

Kapasitans ölçümleri doğrultucu kontaklar için ters beslem voltajı ve frekansına bağlıdır. Kapasitans değerleri Şekil 4.7' de görüldüğü üzere artan frekans ile azalmakta ve grafik pozitif voltajlarda bir pik vermektedir. Bu pik frekansa bağlı olarak banttaki derin tuzakların varlığı, seri direnç ve arayüzey durumlarının varlığına atfedilebilir. Ayrıca yüksek frekanslarda arayüzey durumlarının a.c. sinyali takip edememesi nedeniyle arayüzey durumları kapasitansa katkıda bulunamaz. Bu nedenle kapasitans yüksek frekanslarda düşük frekanslar ile karşılaştırıldığında daha düşük değerlere sahiptir.

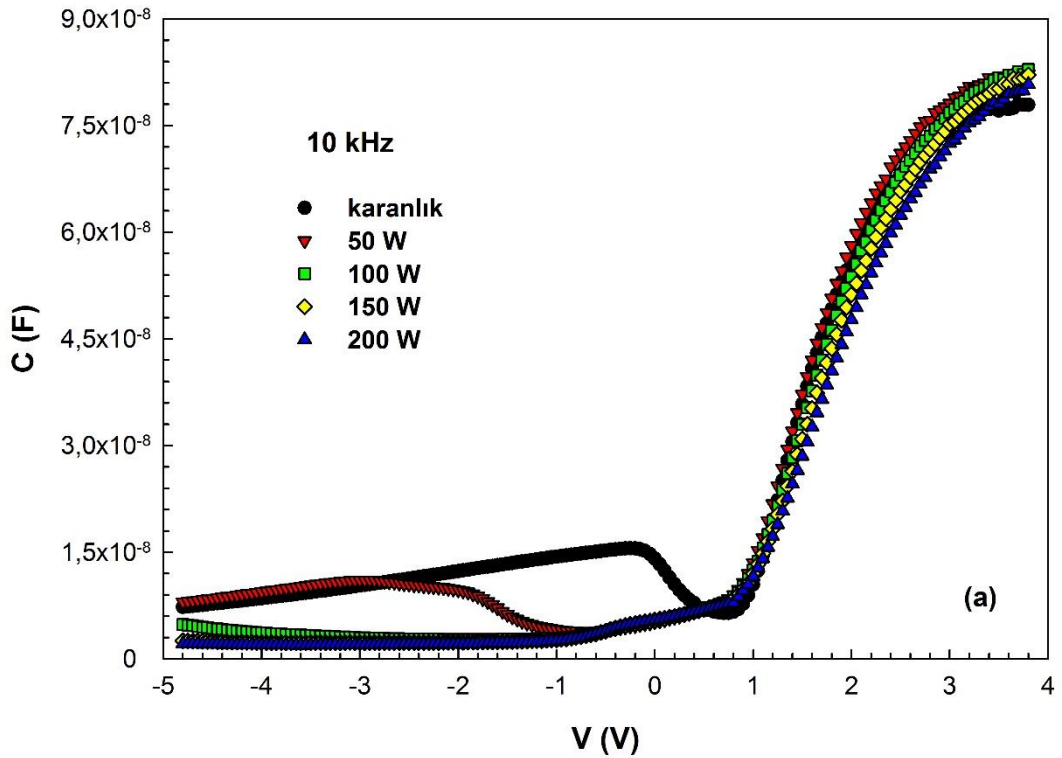
Şekil 4.7’ deki kapasitans değerleri +4V birikim bölgesine kadar uygulanan gerilimin artmasıyla birlikte artmıştır. Bu birikim bölgesindeki belirgin eğriliğin nedeni genellikle seri direnç etkisi olarak yorumlanabilir. Şekil 4.7’ de frekansa bağlı kapasitans değerleri ele alındığında, frekansın 10 kHz’den 500 kHz’e çıkmasıyla kapasitans değerleri azalmıştır.



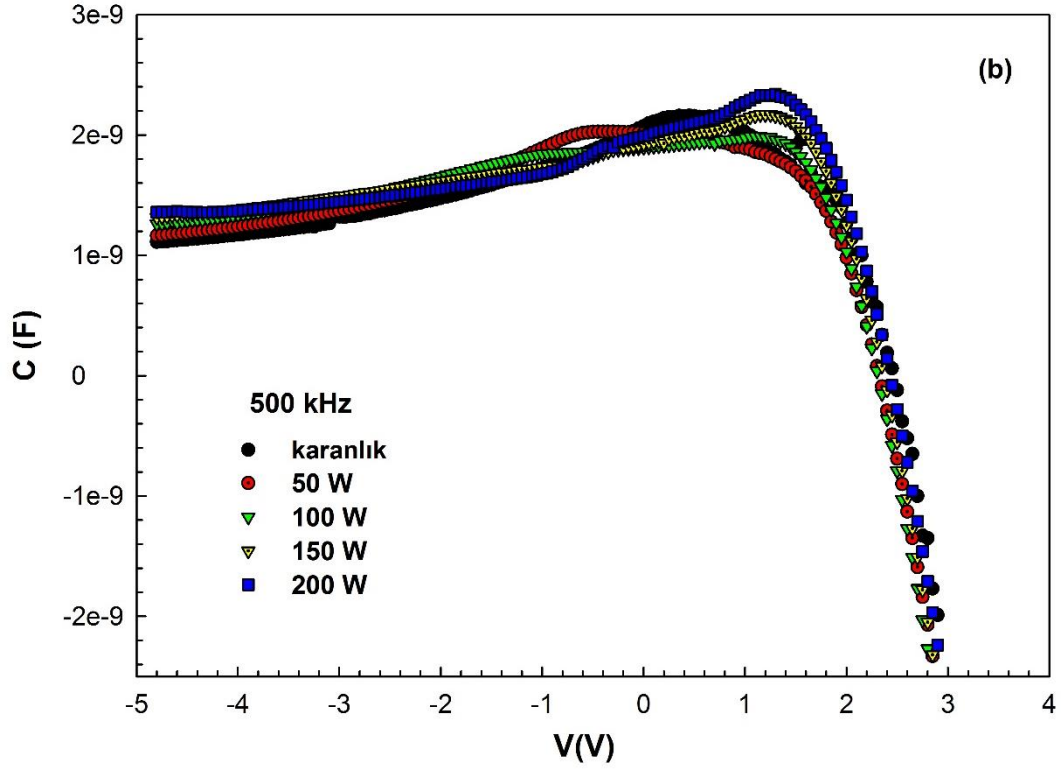
Şekil 4.7. Au/ZnO/n-GaAs SBD C-V karakterisitikleri a) 10 kHz , b) 500 kHz.

Arayüzeydeki yüklerin ac sinyali takip etmesi düşük frekanslarda daha kolay olması ölçüm değerlerinde kapasitans üzerinde bir artış olarak yansımaktadır. Bu yüzden, C-V grafiğinde 10 kHz’ de görülen en belirgin tepe,  $N_{ss}$ ’ in belirgin yoğunluk dağılımı ile ilgili olabilir. Bunun tersine, kapasitans tepe noktasından aşağı doğru azalmaya başlamış olup negatif polarma tarafına doğru geçmiştir ve 500 kHz’ de Şekil 4.7 b’ de de görüldüğü üzere negatif kapasitans (NC) gözlemlenmiştir. Şekil 4.7 a’ da açık bir şekilde görülmektedir ki negatif kapasitans değerleri 10 kHz frekans değerinde kaybolmaktadır. Doğru polarmada bu davranış benzer şekilde literatürde birçok kez belirtildiği üzere arayüzey halleri/tuzakları, seri direnç, arayüzey tabakasının kalınlığı ve katkı konsantrasyonlarına bağlanmıştır.

İletkenlik-voltaj ölçümleri ( $G/\omega$ -V) Şekil 4.8’ de gösterildiği üzere iki belirli frekans için SBD iletkenliği üzerinde voltajın etkisini ortaya koymaktadır. Şekil 4.8’ de Au/ZnO/n-GaAs SBD’ ların iletkenliğinin voltaja bağlı olduğu gibi frekansa da bağlı olduğunu göstermektedir. Frekans artışının diyotun kondüktansında azalışa yol açtığı görülmektedir.



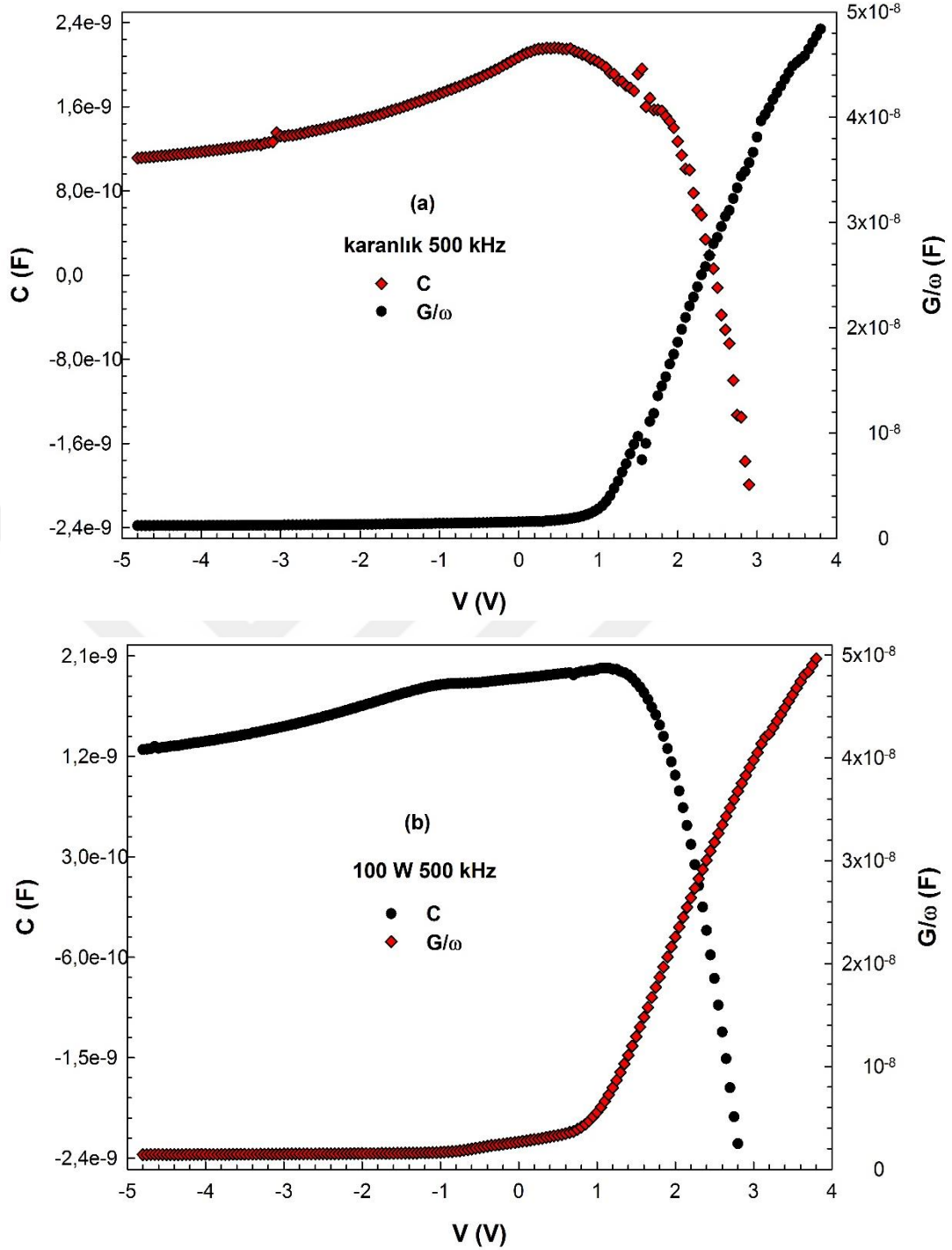
Şekil 4.8. Au/ZnO/n-GaAs SBD  $G/\omega$ -V karakteristikleri a) 10 kHz b) 500 kHz.



Şekil 4.8. (devam ediyor).

C-V ve  $G/\omega$ -V eğrileri de indüktif davranışları karşılaştırmak için yeterince yüksek frekansta (500 kHz) ve düşük frekansta (10 kHz) çizilmişlerdir. Terslenim bölgesine nazaran tüketim ve birikim bölgelerindeki frekans ve gerilim değişimlerinin ölçülen C ve  $G/\omega$  değerlerine etkisi Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' den, açıkça görülmekte olup kapasitans değerlerindeki azalış kondüktans değerlerindeki artışa karşılık gelmektedir. C' nin negatif değerleri yüksek frekansta (500 kHz) artmaktadır ve doğru polarmadaki bu davranış benzer şekilde literatürde birçok kez belirtildiği üzere arayüzey durumları/tuzakları, seri direnç, arayüzey tabakasının kalınlığı ve katkı konsantrasyonlarına bağlanmıştır. [93,94].

Aydınlatma şiddetinin kondüktans ve kapasitans özellikleri üzerine etkisi 500 kHz' de karanlıkta ve 100 W aydınlatma altında Şekil 4.9' da gösterilmiştir. Tüm polarma boyunca 500 kHz yüksek frekansta aydınlatma şiddetinin 100 W' a yükselmesiyle C ve  $G/\omega$  değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. Au/ZnO/n-GaAs SBDs için 500 kHz’de C-V ve  $G/\omega$ -V grafikleri a) karanlıkta b) 100 W.

C-V eğrisinin tepe değerine ulaşmasından sonra doğru polarma geriliminin artmasıyla kapasitans değerlerindeki azalma Şekil 4.9’ da görülebilmektedir. C değerleri yaklaşık 1,5 V civarında azalmaya başlamakta ve negatif değerlere doğru yönelmektedir. Bunun tersine, bütün polarma bölgesinde  $G/\omega$ -V değerlerindeki artış

doğru polarma gerilimi ile doğru orantılı olarak gerçekleşmektedir. Görünüşe göre, C değerlerindeki azalma  $G/\omega$  değerlerinin artışına tekabül etmektedir. Ancak, minimum kapasitans değerleri 3V doğru polarma gerilim değerinde maksimum kondüktans değerleri ile örtüşmektedir. Polarizasyon artışının C değerini azalttığı ve daha fazla taşıyıcının yapı içine nüfuz ettiği düşünülmektedir. C-V ölçümleriyle de doğrulandığı üzere, yarıiletken ve arayüzey tabakası arasında paylaştırılan doğru polarma gerilimi ile bağlantılı olarak SBD zerindeki negatif kapasitans etkisi, doğru polarmadaki seri direnç, arayüzey tabakası ve  $N_{ss}$  tarafından oluşmaktadır. Bu nedenle, C-V ve  $G/\omega-V$  karakteristikleri negatif kapasitansın varlığının 500 kHz yüksek frekansta karanlık ve 100W aydınlatma Şiddeti altında, SBD' nin maksimum iletkenliğine karşılık gelen noktada, görüldüğünü işaret etmektedir. İdeal C ve  $G/\omega$ 'nin voltaja karşı karakteristik davranışı düşünüldüğünde,  $R_s$  ile temsil edilen seri direnç parametresi SBD üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 4.10' daki grafikler verilen polarma voltajlarında C-V ve  $G/\omega-V$  ölçümlerinden elde edilen her aydınlatma düzeyi için voltaja bağlı direnç olan  $R_i$ ' yi göstermektedir. Sırasıyla terslenim, tüketim ve birikim olarak bilinen her üç bölgedeki voltaja bağlı direnç değerleri Nicollian ve Brews metoduyla elde edilmiştir. Gerçek  $R_s$  değerleri de güçlü tüketim bölgesinde bu metot ile elde edilebilir. Bu yöntem, ters ve ileri önyargı bölgeleri için  $R_i$  belirlenmesini sağlar. Seri direnç olan  $R_s$ ' in gerçek değerleri de güçlü tüketim bölgesinde bu metot ile elde edilebilir.  $R_i$  değerleri her aydınlatma düzeyleri için artan doğru polarma gerilimi ile azalır ve özellikle ters polarma bölgesinde aydınlatmaya bağlıdır.

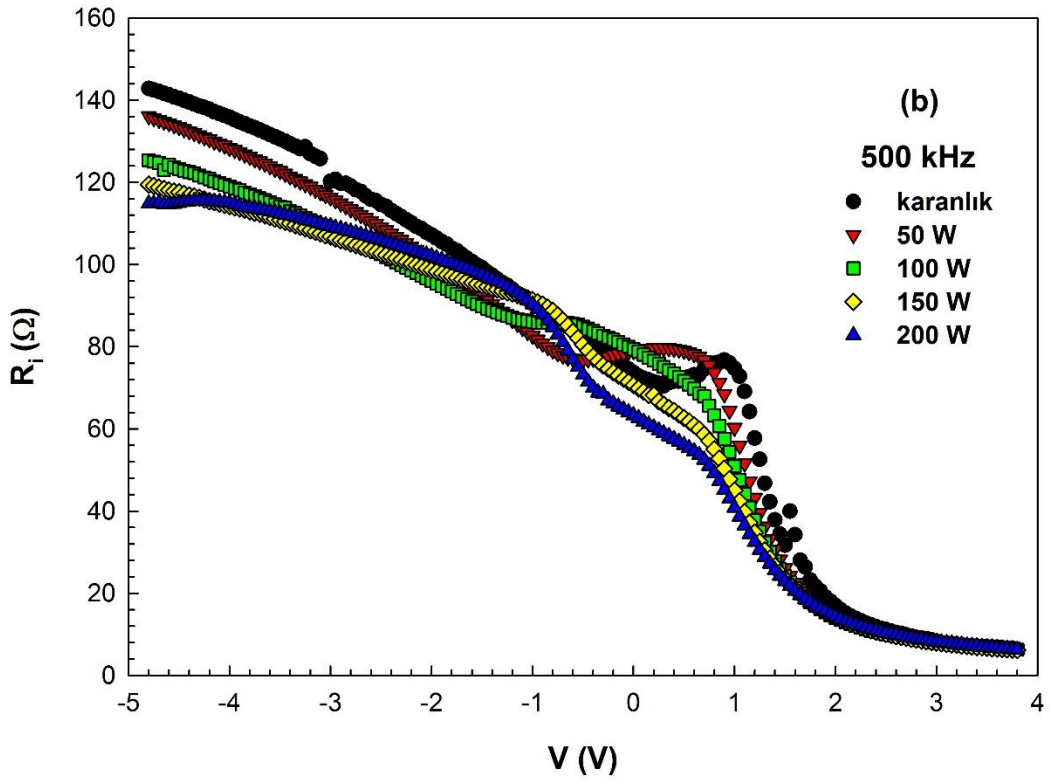
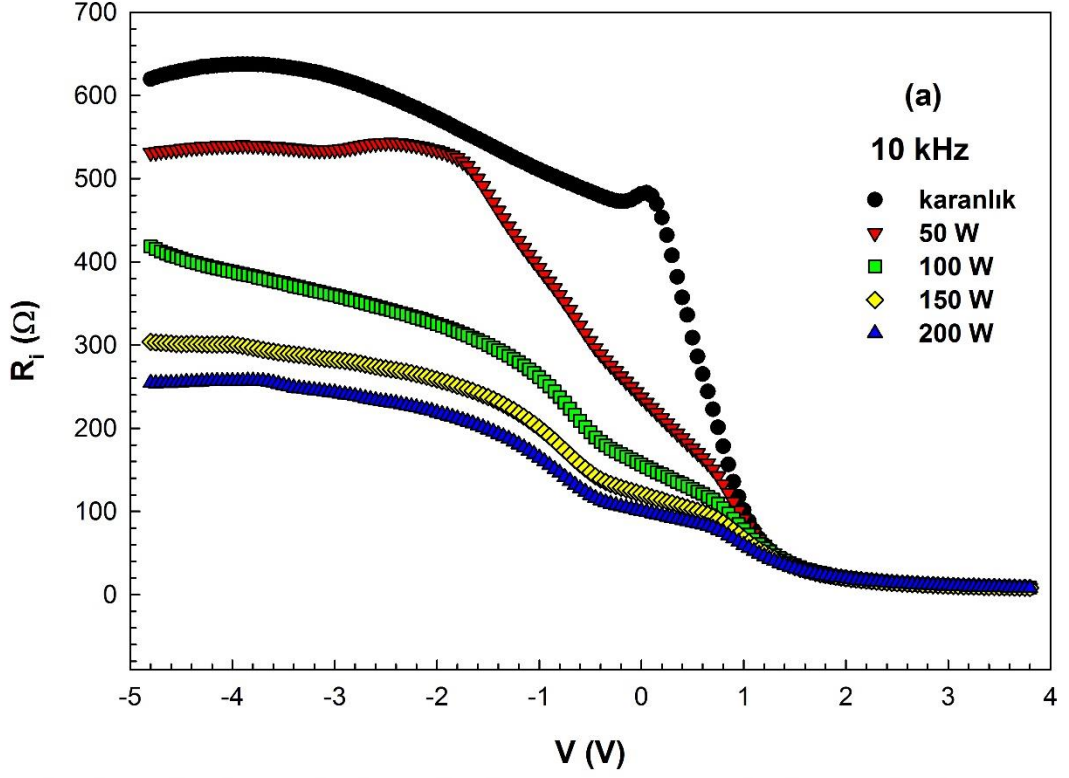
Sonuçta, her iki polarma bölgesi için Nicollian ve Brews metodu ile voltaja bağlı direnç değerleri doğru olarak belirlemektedir.  $R_i$  değerleri bu metot kullanılarak aşağıdaki Şekilde verilmiştir.

$$R_i = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.15)$$

Belirli gerilim aralığında düşük ve yüksek frekanslar için karanlıkta ve çeşitli aydınlatma seviyelerinde ölçülen kapasitans ve kondüktans değerleri  $C_m$  ve  $G_m$  ile



gösterilmiştir. Şekil 4.10.a ve Şekil 4.10.b' de hesaplanan  $R_i$  değerleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' deki verilerden elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Au/ZnO/n-GaAs SBD  $R_i$ -V karakteristikleri a) 10 kHz b) 500 kHz.

Bu sıradışı değerler  $C$  ve  $G/\omega$ ' nin voltaja karşı karakteristikleri üzerine  $R_i$  etkilerinin ortaya çıkması için belirli uyumluluk gerektirmektedir. Her ne kadar Şekil 4.10' daki birikim bölgelerinde yüksek polarmalandırma altında  $R_i$  değerlerinin aydınlatma Şiddetine bağlılığı zayıf olsa da, aydınlatma Şiddeti artışı  $R_i$  değerlerinde azalmaya neden olduğundan her bir polarmalandırmada değerlendirme yapmak gerekmektedir. Şekil 4.10' da gösterildiği üzere, her bir aydınlatma seviyesi için uygulanan polarmanın artmasıyla  $R_i$  değerleri azalmaktadır. Ters polarma bölgesindeki  $R_i$  değerlerinin aydınlatmaya güçlü bağlılığı Şekil 4.10' da çarpıcı bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Ters polarma bölgesinde aydınlatmanın etkisi ile direnç değerlerinin azalması, ters polarma bölgesinde diyotun aktif olduğu anlamına gelmektedir. Bu özelliği sayesinde diyot ters polarma altında çalışan foto diyotlara benzetilebilmektedir.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR

Hazırlanan Au/ZnO/n-GaAs SBD yapısı için öncelikle karanlık ve artan aydınlatma şiddetleri altında akım-voltaj karakteristikleri oda sıcaklığında incelenmiştir. Diyotun temel elektriksel parametrelerinin, aydınlatma şiddetinin ve uygulanan voltajın güçlü bir fonksiyonu olduğu açığa çıkarılmıştır. Aydınlatma altında valans bandındaki elektronlar ve tuzaklar yeterli enerjiyi absorbe edebilirler ve iletim bandına kolaylıkla atlayabilirler. Ayrıca, verilen voltaj değerinde ters polarma akımı her zaman karanlıktaki akımdan daha yüksek olmaktadır ve artan aydınlatma şiddeti ile artmaktadır. Çünkü ters polarma altında, iç elektrik alan ve dış elektrik alanın her ikisi de aynı yöndedir ve böylece oluşturulan elektron-boşluk çiftlerinin rekombinasyonu bu yüksek elektrik alan altında oldukça zorlaşmaktadır.

Aydınlatma şiddetinin artırılması ile  $\Phi_{Bo}$  değerlerinin n değerlerindeki artış ile ters orantılı olarak değiştiğini gözlemlenmiştir. I-V karakteristiklerinden voltaja bağlı direnç profili ( $R_i$ ) değerlerini belirlemek için Ohm kanunu kullanılmıştır. Bunun sonucunda  $R_i$ - $V_i$  grafiğinden hesaplandığı üzere yapının  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri sırasıyla, karanlıkta 2.379 $\Omega$  ve 1254  $\Omega$ , 200 W aydınlatma şiddeti altında 2.360  $\Omega$  ve 267  $\Omega$  olarak elde edilmiştir. Cheung ve Norde fonksiyonları da kullanılmış ve her iki yöntem ile elde edilen  $R_s$  değerlerinin artan aydınlatma ile azalma eğilimi göstermesi tutarlı olduğunu ortaya çıkartmıştır. Bu deneysel sonuçlar fabrikasyon Au/ZnO/n-GaAs SBD' lerin fotodiyot davranışı sergilemesinin güçlü kanıtlarıdır.

Aydınlatma ile n değerlerindeki artış M/S arayüzeyindeki BH ve  $N_{ss}$ ' in homojen olmayan düzensizlikleri, ZnO arayüzey tabakası, uzay yükü bölgesi içindeki jenerasyon-rekombinasyon olayları ve  $R_s$  etkisi varsayılarak açıklanabilir. Voltaja bağımlı  $\Phi_e$ , n ve  $R_s$  göz önüne alındığında,  $N_{ss}$  enerji yoğunluğu dağılım grafiği doğru polarma bölgesindeki I-V verilerinden elde edilmiştir.  $N_{ss}$ ' e karşı ( $E_c$ - $E_{ss}$ )

grafiği U şeklinde bir davranış sergilemekte olup ve aydınlatma düzeylerindeki artış ile artmaktadır.  $R_s$  değerleri dikkate alınarak bulunan  $N_{ss}$  değerleri, özellikle iletim bandına yakın kısımda,  $R_s$  değerleri görmezden gelerek bulunanlara göre daha düşüktür. I-V karakteristiklerinin sonucu olarak yarıiletken ile dengede olan yüzey durumları rekombinasyon merkezleri olarak görev yapmaktadırlar ve özellikle ters polarma bölgesinde önemli görev üstlenmektedirler.

Au/ZnO/n-GaAs SBD' lerin frekansa bağlı C-V ve  $G/\omega$  -V karakteristikleri oda sıcaklığında 0-200 W aydınlatma aralığında incelenmiştir. Deneysel sonuçlar ışığında, C-V ve  $G/\omega$ -V karakteristiklerinin uygulanan polarma gerilimlerine ve frekansa güçlü bağımlı olduğu açıkça ortaya konulmuştur. Polarma gerilimindeki artış 10 kHz frekans değerinde kapasitans değerlerinde artışa sebep olmaktadır. Bunun aksine, frekans 500 kHz gibi yüksek bir seviyeye çıkarıldığında C değerleri azalmış ve 1,5 V civarındaki doğru polarma gerilimlerinde negatif değerler almaya başlamıştır. Au/ZnO/n-GaAs SBD' nin frekans değerlerindeki artış, kondüktans değerlerinde azalmaya yol açmış ve bu durum yüksek frekansların diyotun iletkenliği üzerine etkisi olarak açıklanmıştır. C ve  $G/\omega$  arasındaki ilişki, kapasitanstaki azalmanın kondüktansta artmaya karşılık gelmesi olarak gözlemlenmiştir. Yüksek frekanslarda NC değerlerinin artması arayüzey durumları, seri direnç ve arayüzey tabakası üzerine yerleşen yüklerin kaybolmasına atfedilmiştir.

Deneysel ölçümler sonucunda doğru polarma bölgesinde negatif olarak elde edilen kapasitans değerleri azalan aydınlatma ile artış göstermekte iken kondüktans değerleri artan aydınlatma ile artmaktadır. Kapasitans ve iletkenliğin bu şekilde bir davranış göstermesi SBD yapısında kutuplaşma ve taşıyıcılarındaki artışlarla açıklanabilir. Voltaja bağlı seri direnç profilini açığa çıkarmak için Nicollian ve Brews metotlarından yararlanılmıştır. Aydınlatma artışının etkileri, özellikle ters polarma bölgesinde  $R_i$  değerlerine bir azalma olarak gözlenmiştir. Deneysel sonuçlar araştırılan SBD' lerin elektriksel özelliklerinin frekans, aydınlatma ve uygulanan voltaja oldukça bağlı olduğunu göstermektedir.

Genel olarak bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Au/ZnO/n-GaAs yapıda RF püskürtme yöntemi ile yalıtkan tabakanın istenilen kalınlıkta (ZnO) büyütülmesinde diğer yöntemlere göre pratik ve daha uygun bir metot olduğu görülmüştür.
- Hazırlanan Schottky engel diyotlarının temel elektriksel parametrelerinin aydınlatma şiddetine oldukça bağlı olduğu ve metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey tabaka, seri direnç ve arayüzey durumlarından oldukça etkilendiği gözlenmiştir.
- Hem I-V hem de C-V ölçümlerden elde edilen  $R_s$  değerlerinin literatüre uygun olarak artan aydınlatma şiddetiyle azaldığı görülmüştür.
- InI-V eğrilerinde  $R_s$  etkisinin düşük ve orta gerilim bölgelerinde ihmal edilebileceği ancak doğru polarma bölgesi için ise  $R_s$  etkisinin mutlaka dikkate alınması gerektiği gözlenmiştir.
- Artan aydınlatma şiddeti ile n değerleri artarken,  $\Phi_{Bo}$  değerlerinin azaldığı görülmüştür.  $N_{ss}$  değerlerinin ise artan aydınlatma şiddetiyle arttığı görülmüştür. Ara yüzey durumlarının  $10^{13} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  mertebesinde çıkması literatüre uyumlu olmakla birlikte hazırlanan yapının bir yarıiletken devresi için uygun olduğunu göstermektedir.
- C-V ölçümleriyle de doğrulandığı üzere, yarıiletken ve arayüzey tabakası arasında paylaşılan doğru polarma gerilimi ile bağlantılı olarak SBD üzerindeki negatif kapasitans etkisi, doğru polarmadaki seri direnç, arayüzey tabakası ve  $N_{ss}$  tarafından oluşturduğu gözlemlenmiştir.
- Elde edilen I-V eğrilerinden doğru polarma ve ters polarma akımlarının oranı dikkate alındığında diyotun iyi sayılabilecek bir doğrultma özelliği gösterdiği gözlenmiştir.
- Yapılacak çalışmalarda tüm hesaplamalarda elde edilen sonuçların doğruluğu ve güvenilirliğinin sağlanması için özellikle  $R_s$ , ara yüzey tabakanın kalınlığı ve ara yüzey durumlarının etkisinin dikkate alınmasının gerekliliği vurgulanmıştır.
- Elde edilen sonuçlar fabrikasyon Au/ZnO/n-GaAs SBD' ların fotodiyot davranışı sergilemesinin güçlü kanıtlarıdır.

Bu deneysel sonuçların daha sonra bu ve benzeri konularda yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından bir takım öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Ölçümler hem daha geniş bir aydınlatma hem de geniş bir voltaj aralığında alınabilir.
- Au/ZnO/n-GaAs yapıda yalıtkan tabakanın (ZnO) kalınlığı azaltılarak idealite faktörünün 1' e yakın bir değer olarak elde edilmesiyle ideale yakın bir Schottky diyot elde etmek mümkün olabilir.
- Kapasitansın değeri ZnO katkılama işleminde optimizasyon şartlarının belirlenmesi ile yalıtkan tabakanın kalınlığı azaltılarak uygun mertebeye çekilirse, hazırlanan diyot süper kapasitör olarak kullanılabilir.
- Arayüzey tabaka olarak önceki çalışmalardan farklı olarak yalıtkan yerine yarıiletken ZnO kullanılmış ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. Farklı yarıiletkenler kullanılarak performansı daha yüksek SBDs' lar elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Sze, S. M., “Physics of Semiconductor Devices 3<sup>rd</sup> ed.”, *John Wiley & Sons*, New Jersey, 362-390 (2007).
2. Rhoderick, E. H. and Williams R. H., “Metal Semiconductor Contacts”, *Oxford Press*, 20-45 (1988).
3. Northrop, D. C. and Rhoderick, E. H., “The Physics of Shottky barriers, in Impedance Devices”, *Solid State Electron.* 4: 37-73 (1978).
4. Sharma, B. L., “Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications”, *Plenum Press*, New York, 1-3 (1984).
5. Soyly, 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. Farag, A. A .M., Yahia, I. S. and Fadel, M., “Electrical and photovoltaic characteristics of Au/n-CdS Schottky diode”, *Int. J. Hydrogen Energ.*, 34: 4906-4913 (2009).
7. Sharma, A. T., Shahnawaz, Kumar, S., Katharria, Y. S. and Kanjilal, D., “Barrier modification of Au/n-GaAs Schottky diode by swift heavy ion irradiation”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 263: 424 (2007).
8. Demirezen, S. , Özavcı, E. and Altındal, Ş., “The effect of frequency and temperature on capacitance/conductance–voltage (C/G–V) characteristics of Au/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs)” *Materials Science in Semiconductor Processing*, 23: 1-6 (2014).
9. Gökçen, M., Altuntaş, H., Altındal, Ş. and Özçelik, S., “Frequency and voltage dependence of negative capacitance in Au/SiO<sub>2</sub>/n-GaAs structures”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 15: 41–46 (2012).
10. Bhajantri, R. F., Ravindrachary, V., Harisha, A., Ranganathalah, C. and Kumaraswamy, G. N., “Effect of barium chloride doping on PVA microstructure positron annihilation study”, *Appl. Phys. A*, 87: 797-805 (2007).
11. Afandiyeva, I. M., Dökme, İ., Altındal, Ş., Bülbül, M. M. and Tataroğlu, A., “Frequency and voltage effects on the dielectric properties and electrical conductivity of Al–TiW–Pd 2 Si/n-Si structures”, *Microelectronic Engineering*, 85: 247-252 (2008).

12. Marıl, E., Kaya, A., Koçyiğit, S. and Altındal, Ş., "On the analysis of the leakage current in Au/Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>Ga<sub>0.001</sub>O<sub>x</sub>/n-Si structure in the temperature range of 80–340 K", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 31: 256-261 (2015).
13. 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).
14. Ichenko, V. V., Marin, V. V., Lin S. D., Panarn, K. Y., Buyanin, A. A. and Tretyak, O. V., "Room temperature negative differential capacitance in self-assembled quantum dots", *J. Phys. D Appl. Phys.*, 41: 235107 (2008).
15. Yücedağ, İ., Kaya, A., Tecimer, H. and Altındal, Ş., "A comparative electric and dielectric properties of Al/p-Si structures with undoped and Co-doped interfacial PVA layer", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28: 37-42 (2014).
16. Tecimer, H., Türüt, A., Uslu, H., Altındal, Ş. and Uslu, İ., "Temperature dependent current-transport mechanism in Au/(Zn-doped) PVA/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs)", *Sensors and Actuators A*, 199: 194-201 (2013).
17. Werner, J. and Guttler, H., "Barrier inhomogeneities at Schottky contacts", *Journal of Applied Physics*, 69: 1522-1533 (1991).
18. Sakr, G. B. and Yahia, I. S., "Effect of illumination and frequency on the capacitance spectroscopy and the relaxation process of p-ZnTe/n-CdMnTe/GaAs magnetic diode for photocapacitance applications", *J. Alloys Compd.*, 503: 213-219 (2010).
19. Yakuphanoglu, F. and Farooq, W. A., "Photoresponse and electrical characterization of photodiode based nanofibers ZnO and Si", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14: 207-211 (2011).
20. Tsiarapas, C., Girginoudi, D. and Georgoulas, N., "Electrical characteristics and deep level traps study of Au/ZnO:H Schottky diodes", *Superlattices and Microstructures*, 75: 171-182 (2014).
21. Singh, C. S. , Agarwal, G. , Durga, R. G. , Chaudhary, S. and Singh, R. , "Effect of hydrogen peroxide treatment on the electrical characteristics of Au/ZnO epitaxial Schottky diode", *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14: 1-4 (2011).
22. Singh, B. K. and Tripathi, S., "Fabrication and characterization of Au/p-ZnO Schottky contacts", *Superlattices and Microstructures*, 85: 697-706 (2015).
23. Nicollian, E. H. and Brews, J. R., Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology, *John Willey & Sons*, New York (1982).
24. Aboelfotoh, M. O., "On Schottky barrier inhomogeneities at silicide/silicon interfaces", *J. Appl. Phys.*, 69 (5): 3351 (1991).



25. Tataroğlu, A. and Altındal, Ş., “Analysis of interface states and series resistance of MIS Schottky diodes using the current–voltage (I–V) characteristics”, *Microelectronic Engineering*, 85: 233-237 (2008).
26. Card, H. C. and Rhoderick E. H., “Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes”, *J Phys*, D4:1589 (1971).
27. Sze, S. M., Physics Semiconductor Devices, *John Wiley and Sons*, New York, 24-30 (1981).
28. Korucu, D., Efeoglu, H., Türüt, A. and Altındal, Ş., “Evaluation of lateral barrier height of inhomogeneous photolithography-fabricated Au/n-GaAs Schottky barrier diodes from 80 K to 320 K”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 15: 480-485 (2012).
29. Huang, T. S. and Fang, R. S., “Barrier height enhancement of Pt/n-InP Schottky diodes by P<sub>2</sub>S<sub>5</sub>/(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S solution treatment of the InP surface”, *Solid State Electronics*, 37: 1652-1661 (1994).
30. Chin, V. W. L., Green, M. A. and Storey, J. W. V., “Correlation between current-voltage and capacitance-voltage Schottky barrier height on (100) and (110) GaAs and (110) InP surfaces”, *Journal of Applied Physics*, 68: 3470-3474 (1990) .
31. Özdemir, A. F., Türüt, A. and Kökce, A., “The interface state energy distribution from capacitance–frequency characteristics of gold/n-type Gallium arsenide Schottky barrier diodes exposed to air”, *Thin Solid Films*, 425: 210-215 (2003).
32. Aydın, M. E., Soylu, M., Yakuphanoglu, F., and Farooq, W. A., “Controlling of electronic parameters of GaAs Schottky diode by poly(3,4-ethylenedioxiophene)-block-poly(ethyleneglycol) organic interlayer”, *Microelectronic Engineering*, 88: 867-871 (2011).
33. Borrego, J. M., Gutmann, R. J. And Ashok, S., “Interface state density in Au-nGaAs Schottky diodes”, *Solid-State Electronics*, 20: 125-132 (1977).
34. Padovani, F. A. and Sumner, G. G., “Experimental Study of Gold-Gallium Arsenide Schottky Barriers”, *Journal of Applied Physics*, 36: 3744-3747 (1965).
35. Özavcı, E., Demirezen, S., Aydemir, U. and Altındal Ş., “A detailed study on current–voltage characteristics of Au/n-GaAs in wide temperature range”, *Sensors and Actuators A*, 194: 259-268 (2013).
36. Güllü, Ö., Biber M., Duman, S. And Türüt, A., “Electrical characteristics of the hydrogen pre-annealed Au/n-GaAs Schottky barrier diodes as a function of temperature” *Applied Surface Science*, 253: 7246-7253 (2007).
37. Hudait, M. K., Venkateswarlu P. and Krupanidhi S. B., “Electrical transport characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes on n-Ge at low temperatures”, *Solid-State Electronics*, 45: 133-141 (2001).

38. Sze, S. M., Crowell C. R. and Khang, D., "Photoelectric Determine of The Image Force Dielektric Constant for Hot Electrons in Schottky Barriers", *J. Appl. Phys.*, 35: 2534- 2536 (1964).
39. Crowell, C. R. and Roberts G. I., "Surface State and Interface Effects on The Capacitance-Voltage Relationship in Schottky Barriers", *J. Appl. Phys.*, 40: 3726-3730 (1969).
40. Borrego, J. M., Gutmann, R. J. And Ashok S., "Interface State Density in Au/n-GaAs Schottky Diodes", *Solid State Elect.*, 20: 125-132 (1977).
41. Jin, S. X. , Wang, L. P. , Yuan M. H. , Chen J. J. , Jia Y. Q. and Qin G. G. , "Effects of hydrogen on the Schottky barrier of Ti/n-GaAs diodes", *Journal of Applied Physics*, 71 (1): 536 (1992).
42. Türüt, A. and Sağlam M., "The Determination Of The Density Of Si-Metal Interface States And Excess Capacitance Caused By Them", *Physica B*, 1: 79, (1992).
43. Eftekhari, G., "Electrical characteristics of selenium-treated GaAs MIS Schottky diodes" *Semiconductor Science and Technology*, 8 (3): 409 (1993).
44. Sağlam, M., Ayyıldız, E., Gümüş, A., Türüt, A., Efeoğlu, H. and Tüzemen, S., "Series resistance calculation for the Metal-Insulator-Semiconductor Schottky barrier diodes" *Appl. Phys. A.*, 62: 269-273 (1996).
45. Çetinkara, H. A., Sağlam, M., Türüt, A. and Yalçın, N., "The effects of the timedependent and exposure time to air on Au/epilayer n-Si Schottky diodes", *Eur. Phy. J. Ap.*, 6: 89 (1999).
46. Kılıçoğlu, T. and Asubay, S., "The Effect of Native Oxide Layer on Some Electronic Parameters of Au/n-Si/Au-Sb Schottky Barrier Diodes", *Physica B*, 368: 58-63 (2005).
47. Biber, M., Coşkun, C. and Türüt, A., "Current-voltage-temperature analysis of inhomogeneous Au/n-GaAs Schottky contacts", *The European Physical Journal Applied Physics*, 31 (02): 79-86 (2005).
48. Duman, S., Gurbulak B. and Türüt A., "Temperature-dependent optical absorption measurements and Schottky contact behavior in layered semiconductor n-type InSe(:Sn)", *Applied Surface Science*, 253/8 (15): 3899–3905 (2007).
49. Aydın, M. E., Nezir Y. and Türüt, A., "Temperature-dependent behavior of Ni/4H-nSiC Schottky contacts", *Journal of Applied Physics*, 102 (4): 043701 - 043701-7 (2007).
50. Vural, Ö., Şafak Y., Altındal Ş. and Türüt A., "Current and voltage characteristics of Al/Rhodamine-101/n-GaAs structures in the wide temperature range", *Current Applied Physics*, 10: 761 (2010).

51. Uslu, H., “Au/(Co, Zn- Katkılı) Polivinil Alkol/n-Si Schottky Engel Diyotlarının Hazırlanması Ve Elektriksel Özelliklerinin Aydınlatma Şiddetine Bağlı İncelenmesi” Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2010).
52. Tecimer, H., Türüt A., Uslu H., Altındal Ş. and Uslu İ. “Temperature dependent current-transport mechanism in Au/(Zn-doped)PVA/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs)” *Sensors and Actuators A: Physical*, 19(1): 194-200 (2013).
53. Korucu, D. and Türüt, A., “International Temperature dependence of Schottky diode characteristics prepared with photolithography technique”, *Journal of Electronics*, 101(11): 1595–1606 (2014).
54. Milness, A. G. and Feucht, D. L., “Heterojunctions and Metal-Semiconductor Contacts” *Academic Press*, New York and London, 156-165 (1972).
55. Sze, S. M., “Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.”, *Wiley*, New York, 245- 300 (1981).
56. Sharma, B. L., “Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions Their applications”, *Plenum Press*, New York and London, 49 (1984).
57. Rhoderick E. H. and Williams R. H., “Metal-Semiconductor Contacts”, *Clarendon Press*, Oxford, second edition, 257 (1988).
58. Krawczyk, S. K., Jakubawski, A. and Zurawska, M., “Effect of Temperature onElectrical and Photoelectrical Properties of Silicon MIS Solar Cells”, *Phys. Stat.Sol. (a)*, 67: 313-323 (1981).
59. Karadeniz, S., “Al/SnO<sub>2</sub>/p-Si/Al Yapılarında Yüzey Şartlarının Elektroniksel İletkenliğe Etkisi”, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2001).
60. Norde, H., “A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes With High Series Resistance”, *J. Appl. Phys.*, 50: 5052-5053 (1979).
61. Sato, K. and Yasamura, Y. , “Study of Forward I-V Plot for Schottky Diodes With High Series Resistance”, *J. Appl. Phys.*, 58: 3655-3657 (1985).
62. Cheung, S. K. and Cheung, N. W., “Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics”, *Appl. Phys. Lett.*, 49(2): 85 (1986).
63. Pakma, O., “Metal/TiO<sub>2</sub>/C-Si/Metal Yapılarında Yüzey Sartlarının Elektriksel Belirtkenler Üzerindeki Etkisi”, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2008).
64. Arslan, E., Şafak Y., Altındal Ş., Kelekçi Ö. and Özbay E., “Temperature dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGa<sub>N</sub>/AlN/GaN heterostructures”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356: 1006–1011 (2010).

65. Werner, A., Levi, F. J., Tung R. T., Anzlowar M. and Pinto M., “Origin of the Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts”, *Phys. Rev. Lett.*, 60: 53 (1988).
66. Liu, H. C., Li, L., Buchanan, M., Wasilewski, Z. R. and Jonscher, A. K., “Negative Capacitance Effect in Semiconductor Devices”, *IEEE Trans. Electron Devices*, 45: 2196 (1998).
67. Perera, A. G. U., Shen, W. Z., Ershov, M., Liu, H. C., Buchanan, M. and Schaff, W.J., “Negative capacitance of GaAs homojunction far-infrared detectors”, *App. Phys. Lett.*, 74: 3167 (1999).
68. Champness, C. H. and Clark, W. R., “Anomalous inductive effect in selenium Schottky diodes”, *Applied Physics Letters*, 56 (12): 1104–1106 (1990).
69. Wu, X., Yang, E. S., Evans, H. L., “Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces”, *J. Appl. Phys.*, 68: 2845 (1990).
70. Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S. J., and Morkoç, H., “A comprehensive review of ZnO materials and device”, *Journal of Applied Physics*, 98 (4): 041301 (2005).
71. Wiberg, E., Wiberg, N. and Holleman, A. F., “Inorganic Chemistry”, *Academic Press*, ISBN 0-12-352651-5 (2001).
72. Greenwood, N. N. and Earnshaw, A. “Chemistry of the Elements” (2<sup>nd</sup> ed.). *Butterworth-Heinemann*, ISBN 0-08-037941-9 (1997).
73. Nicholson, J. W. and Nicholson, J. W., “The chemistry of cements formed between zinc oxide and aqueous zinc chloride”, *Journal of Materials Science*, 33 (9): 2251 (1998).
74. Ferracane, J. L., “Materials in Dentistry: Principles and Applications”, *Lippincott Williams & Wilkins*, 70: 143 (2001).
75. Fierro, J. L. G., “Metal Oxides: Chemistry & Applications”, *CRC Press*, 182: ISBN 0824723716 (2006).
76. Porter, F., “Zinc Handbook: Properties, Processing, and Use in Design”, *CRC Press*, ISBN 0-8247-8340-9 (1991).
77. Corso, A. D., Posternak, M., Resta, R. and Baldereschi, A. “Ab initio study of piezoelectricity and spontaneous polarization in ZnO”, *Physical Review B*, 50 (15): 10715 (1994).
78. Kato, H., Sano, M., Miyamoto, K. and Yao, T., “Growth and characterization of Ga-doped ZnO layers on a-plane sapphire substrates grown by molecular beam epitaxy”, *Journal of Crystal Growth*, 538: 237–239 (2002).

79. Wagner, P. and Helbig, R., “Halleffekt und anisotropie der beweglichkeit der elektronen in ZnO”. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 35 (3): 327 (1974).
80. Ryu, Y. R., Lee, T. S. and White, H. W., “Properties of arsenic-doped p-type ZnO grown by hybrid beam deposition”, *Applied Physics Letters*, 83: 87, (2003).
81. Schulz, D, “Inductively heated Bridgman method for the growth of zinc oxide single crystals”, *Journal of Crystal Growth*, 310 (7–9): 1832 (2008).
82. Baruah, S., Thanachayanont, C. and Dutta, J., “Growth of ZnO nanowires on nonwoven polyethylene fibers”, *Science and Technology of Advanced Materials*, 9 (2): 025009 (2008).
83. Sanchez-Pescador, R., Brown, J.T, Roberts, M. and Urdea, M.S., “The nucleotide sequence of the tetracycline resistance determinant tetM from *Ureaplasma urealyticum*”, *Nucleic Acids Research*, 16 (3): 1216–1217 (1988).
84. Temiz, M. ve Sayın, A. R., “Geleceğin Yarıiletkeni GaAs”, *5. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Bildiriler, 286, Denizli (1993).
85. Singh, A. K., “Electronic Devices and Integrated Circuits”, *PHI*, ASIN: B00K7YFZGI: 78 (2011).
86. Conway, E. J., Walker, G. H. and Heinbockel, J. H., “A thermochemical model of radiation damage and annealing applied to GaAs Solar Cells”, *Fifteenth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1: 38-44 (1981).
87. Schnitzer, I., Yablonoitch, E., Caneau C., Gmitter, T. J. and Scherer, A., “30% external quantum efficiency from surface textured, thin-film light-emitting diodes”, *Applied Physics Letters*, 63: 2174-2176 (1993).
88. Hussain A. and Rahman, A., “Electrical and photovoltaic characteristics of Ni/(n)Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> Schottky barrier junction”, *Superlattices and Microstructures*, 80: 39–52 (2015).
89. Farag, A .A. M., Yahia, I. S. and Fadel, M., “Electrical and photovoltaic characteristics of Al/n-CdS Schottky diode”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 34: 4906 (2009).
90. 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”, *Int. Congress on Adv. In Appl. Phys. And Mater. Sci.*, AIP Conf. Proc. 1400, 541-545 (2011).
91. Yakuphanoglu, F., Mensah-Darkwa, K., Al-Ghamdi, A. A., Gupta, R. K. and Farooq W. A., “Novel organic doped inorganic photosensors”, *Microelectronic Engineering*, 160: 27-33 (2016).

92. Feteha, M. Y., Soliman, M., Gomaa, N. G. and Ashry, M., “Metal-insulator-semiconductor solar cell under gamma irradiation”, *Renew. Energy*, 26: 113-120 (2002).
93. Yan, H., Shunsuke, E., Yusuke, H. and Hidenori, O., “Plastic Schottky Barriers Fabricated by a Line Patterning Technology”, *Chemistry Letters*, 36 (8): 986–990 (2007).
94. Meirhaeghe, R. L. V., Lafle’ re, W. H. and Cardon, F., “Influence of defect passivation by hydrogen on the Schottky barrier height of GaAs and InP contacts”, *Journal of Applied Physics*, 76: 403–406 (1994).



## ÖZGEÇMİŞ

Serhat Orkun TAN 1979 yılında Karabük'te doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Karabük Anadolu Lisesi'nden 1997 senesinde mezun oldu. 1998 yılında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2005 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2005 yılında Ereğli Demir Çelik Fabrikaları T.A.Ş.'de (ERDEMİR) Çelikhane Elektrik Bakım bölümünde Elektrik Mühendisi olarak göreve başladı. 2009 yılına kadar burada çalıştıktan sonra sene askerlik vazifesini yerine getirmek üzere ERDEMİR'deki işinden ayrıldı. Askerlik hizmetini tamamladıktan sonra 2010 yılında NOV ASEP ELMAR isimli çok uluslu bir şirkette Üretim Mühendisi olarak görev yaptı. 2011 yılında ise halen çalışmakta olduğu Karabük Üniversitesi TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nda göreve başladı. KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2011 yılında başlamış olduğu yüksek lisans programını 2013 yılında tamamladı.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu  
Balıklarkayası Mevkii / 78050 / KARABÜK

Tel : (544) 544 2156  
E-posta : serhatorkuntan@karabuk.edu.tr