



**Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) TİPİ FOTO DİYOTLARIN  
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Muhammed Mustafa USLU**

**2021  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) TİPİ FOTO DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Muhammed Mustafa USLU**

**Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**KARABÜK  
Mart 2021**

Muhammed Mustafa USLU tarafından hazırlanan “Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) TİPİ FOTO DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK .....

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 24/03/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Engin GEDİK (KBÜ) .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdülsamed TABAK (NEÜ) .....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....

Lisansüstü Eğitim 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.”*

Muhammed Mustafa USLU

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) TİPİ FOTO DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Muhammed Mustafa USLU**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**Mart 2021, 53 sayfa**

Bu çalışmada, hazırlanan Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotların elektriksel ve foto diyot karakteristikleri oda sıcaklığında incelendi. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun akım-voltaj (I-V) ölçümleri, karanlık ve 50 mW/cm<sup>2</sup> ışık şiddeti için -3 V ile +3 V aralığında 50 mV' luk adımlarla, kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri ise -4 V ile +4 V aralığında 0.1 V' luk adımlarla 1 MHz frekansta gerçekleştirildi. I-V ölçümleri kullanılarak sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_{B0}$ ), idealite faktörü (n), ters doyum akımı ( $I_0$ ), seri direnç ( $R_s$ ) ve kısa devre direnci ( $R_{sh}$ ) gibi foto diyota ait temel elektriksel parametreler elde edildi. Ayrıca foto diyotun C-V ölçümleri kullanılarak da diyotun difüzyon potansiyeli ( $V_D$ ), Fermi enerji seviyesi ( $E_F$ ), tüketim tabakasının kalınlığı ( $W_D$ ), katkılanan alıcı atomlarının yoğunluğu ( $N_A$ ) ve potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ) gibi temel elektriksel parametreleri elde edildi. Ek olarak arayüzey tabakasının (SiO<sub>2</sub>) ve yapının direncinin elektriksel parametreler üzerinde etkisi

araştırıldı. Elde edilen sonuçlar hazırlanan Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotların optoelektronik uygulamalarda optik sensör veya fotodiyot olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Foto diyot, ışık etkisi, seri direnç, arayüzey durumları, Norde ve Cheung fonksiyonları.

**Bilim Kodu** : 92806

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **THE INVESTIGATIONS OF ELECTRICAL PROPERTIES OF Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) TYPE PHOTO DIODES**

**Muhammed Mustafa USLU**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Energy System Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**March 2021, 53 pages**

In this study, electrical and photo diode characteristics of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) type photo diodes were examined at room temperature. Current-voltage (I-V) and capacitance-voltage measurements of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) type photo diode, respectively, were carried out in the range of -3 V to + 3 V in 50 mV steps and -4 V to +4 V in 0.1 mV steps at 1 MHz for dark and 50 mW/cm<sup>2</sup> light intensity. The electrical parameters of photo diode such as zero-bias barrier height ( $\Phi_{B0}$ ), ideality factor (n), reverse saturation current ( $I_0$ ), series resistance ( $R_s$ ) and shunt resistance ( $R_{sh}$ ) were obtained from the I-V measurements. In addition, using the C-V measurements of the photo diode, basic electrical parameters such as the diffusion potential ( $V_D$ ), the Fermi energy level ( $E_F$ ), depletion layer width ( $W_D$ ), carrier doping density of acceptors ( $N_A$ ) and the potential barrier height ( $\Phi_B$ ) were obtained. In addition, the effect of the interface layer (SiO<sub>2</sub>) and the resistance of the structure on electrical parameters were

investigated. The obtained results showed that the prepared Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) type photo diodes can be used as optic sensors or photodiodes in optoelectronic applications.

**Keywords** : Photo diode, illumination effect, series resistance, interface states, Norde and Cheung functions.

**Science Code** : 92806



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK' a, numune yapımında ve deneysel ölçümlerin alınmasında yardımcı olan Prof. Dr. őemsettin ALTINDAL'a ve bu günlere kadar gelmemde en büyük emeğe sahip olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## 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
BÖLÜM 2 .....	5
TEORİK ALTYAPI.....	5
2.1. METAL-YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR.....	5
2.1.1. Metal-p tipi Yarıiletken (MS) Kontaklar.....	6
2.2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPISI.....	9
2.3. FOTON.....	10
2.4. IŞIMALI GEÇİŞLER.....	12
2.5. FOTOVOLTAİK ETKİ.....	13
2.6. FOTO DİYOT ÇEŞİTLERİ .....	14
BÖLÜM 3 .....	16
MATERYAL VE YÖNTEM .....	16
3.1. KULLANILAN MATERYALLARIN ÖZELLİKLERİ.....	16
3.1.1. Silisyum (Si) Kristali .....	16
3.1.2. Silisyum Dioksit (SiO <sub>2</sub> ) .....	18
3.2. Au/SiO <sub>2</sub> /p-Si MIS TİPİ FOTO DİYOTUN HAZIRLANMASI .....	19
3.2.1. p-Si Kristal Alttaşın Temizlenmesi .....	19

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.2.2. Termal Oksidasyon Sistemi ile SiO <sub>2</sub> Arayüzey Tabakasının Oluşturulması.....	20
3.2.3. Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Doğrultucu ve Omik Kontakların Hazırlanması.....	21
3.3. DENEYSEL ÖLÇÜM YÖNTEMİ .....	23
3.3.1. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri.....	25
3.3.1.1. Ketihley 2400 Akım-Gerilim Kaynağı .....	25
3.3.1.2. Janis vpf-475 Kriyostat.....	25
3.3.1.3. 67011 Model Newport-Oriel Işık Kaynağı ve 69931 Model Newport-Oriel Güç Kaynağı.....	26
3.3.2. C-V Ölçüm Sistemi .....	26
BÖLÜM 4 .....	27
DENEYSEL SONUÇLAR .....	27
4.1. GİRİŞ.....	27
4.2. KARANLIK VE IŞIK ALTINDA AKIM-VOLTAJ (I-V) VE KAPASİTANS-VOLTAJ (C-V) KARAKTERİSTİKLERİ .....	27
BÖLÜM 5 .....	44
GENEL SONUÇLAR .....	44
KAYNAKLAR .....	48
ÖZGEÇMİŞ .....	53

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Kontak türleri.....	5
Şekil 2.2. MS (p-tipi) kontak enerji band diyagramı kontak edilmeden önce edildikten sonra.....	6
Şekil 2.3. MS Schottky kontağa ileri voltaj ( $V>0$ ) ve ters voltaj ( $V<0$ ) uygulandığı zaman enerji band diyagramı.....	7
Şekil 2.4. MS yapılar için fiziksel parametreler. ....	8
Şekil 2.5. MS (p tipi) omik kontakın enerji-bant diyagramı; kontakten önce, kontakten sonra ve termal dengede, $V>0$ durumunda ve $V<0$ durumunda. ....	9
Şekil 2.6. MIS yapının şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.7. Max Planck kara cisim ile ilgili varsayımlar. ....	10
Şekil 2.8. Işık dalgası ve özellikleri. ....	11
Şekil 2.9. Fotonun özellikleri.....	11
Şekil 2.10. Işımalı geçişler.....	12
Şekil 2.11. Fotovoltaik etki.....	13
Şekil 2.12. Foto diyot çeşitleri. ....	14
Şekil 2.13. Schottky fotodiyot yapısı.....	15
Şekil 3.1. Katı haldeki doğal silisyum. ....	16
Şekil 3.2. Kristal ve amorf $\text{SiO}_2$ ' nin yapısal gösterimi.....	18
Şekil 3.3. p-Si Alttaşın kimyasal temizleme süreci. ....	20
Şekil 3.4. Termal oksidasyon sisteminin şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.5. Termal buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi. ....	21
Şekil 3.6. Omik ve doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maskeler.....	22
Şekil 3.7. Al/ $\text{SiO}_2$ /p-Si MIS tipi foto diyotun şematik gösterimi. ....	23
Şekil 3.8. Al/ $\text{SiO}_2$ /p-Si (MIS) tipi foto diyotun I-V ölçümü için kullanılan ölçüm sisteminin şematik gösterimi. ....	24
Şekil 4.1. Al/ $\text{SiO}_2$ /p-Si (MIS) tipi foto diyot için yarı logaritmik I-V eğrileri. ....	28
Şekil 4.2. Al/ $\text{SiO}_2$ /p-Si (MIS) tipi foto diyot için I-V eğrileri. ....	28
Şekil 4.3. Al/ $\text{SiO}_2$ /p-Si (MIS) tipi foto diyot için $\ln(I)$ -V eğrileri. ....	31
Şekil 4.4. Al/ $\text{SiO}_2$ /p-Si MIS tipi foto diyot için $R_i$ -V eğrileri.....	32
Şekil 4.5. Karanlık altında Cheung fonksiyonları.....	33

**Sayfa**

Şekil 4.6. Işık altında Cheung fonksiyonları.....	34
Şekil 4.7. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MIS) tipi foto diyot için F (V)-V eğrileri. ....	36
Şekil 4.8. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MIS) tipi foto diyot için N <sub>ss</sub> -(E <sub>ss</sub> -E <sub>v</sub> ) eğrileri.....	37
Şekil 4.9. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MIS) tipi foto diyot için ln(I)-ln(V) eğrileri. ....	38
Şekil 4.10. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MIS) tipi foto diyot için ln(I <sub>R</sub> )-V <sub>R</sub> <sup>1/2</sup> eğrileri.....	40
Şekil 4.11. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MIS) tipi foto diyot için C-V eğrileri.....	41
Şekil 4.12. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MIS) tipi foto diyot için C <sup>-2</sup> -V eğrileri.....	43

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı özellikleri. ....	17
Çizelge 3.2. SiO <sub>2</sub> 'nin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri. ....	19
Çizelge 4.1. Akım-voltaj ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri. ....	31
Çizelge 4.2. Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri. ....	34
Çizelge 4.3. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si MIS tipi foto diyot için Norde metodundan elde edilen parametreler. ....	35
Çizelge 4.4. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MIS) tipi foto diyot için temel diyot parametreleri. ....	43

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- A : Alan  
Å : Angstrom  
A\* : Etkin Richardson sabiti  
C : Kapasitans  
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>g</sub> : Yarıiletken yasak enerji aralığı  
E<sub>i</sub> : Saf durumdaki enerji seviyesi  
ε<sub>o</sub> : Boşluğun elektrik geçirgenliği  
ε<sub>i</sub> : Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti  
ε<sub>s</sub> : Yarıiletkenin dielektrik sabiti  
Hz : Frekans birimi (Hertz)  
K : Kelvin cinsinden sıcaklık  
k : Boltzmann sabiti  
m<sub>e</sub>\* : Elektronun etkin kütlesi  
m<sub>o</sub> : Serbest elektron kütlesi  
N<sub>D</sub> : Verici katkı atomlarının yoğunluğu  
N<sub>A</sub> : Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu  
N<sub>c</sub> : İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu  
N<sub>v</sub> : Değerlik bandındaki durumların yoğunluğu  
N<sub>ss</sub> : Arayüzey durum yoğunluğu  
q : Elektrik yükü  
R<sub>i</sub> : Direnç  
R<sub>s</sub> : Seri direnç  
R<sub>sh</sub> : Kısa devre direnci

T : Mutlak sıcaklık  
V : Gerilim  
V<sub>D</sub> : Difüzyon potansiyeli  
V<sub>F</sub> : Doğru ön-gerilim  
V<sub>R</sub> : Ters ön-gerilim  
V<sub>G</sub> : Metal plakaya uygulanan gerilim  
W<sub>D</sub> : Tüketim tabakasının genişliği  
Φ<sub>B</sub> : Potansiyel engel yüksekliği  
Φ<sub>B0</sub> : Sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği  
Φ<sub>s</sub> : Yarıiletkenin iş fonksiyonu  
Φ<sub>m</sub> : Metalin iş fonksiyonu  
δ : Yalıtkan tabaka kalınlığı  
Ω : Ohm  
ρ : Öz direnç  
E : Enerji  
h : Planck sabiti  
ν : Frekans  
c : Işık hızı

## **KISALTMALAR**

M : Metal  
S : Semiconductor (Yarıiletken)  
Si : Silisyum  
SiO<sub>2</sub> : Silisyum dioksit  
TE : Termiyonik Emisyon  
AC : Alternative Current (Alternatif Akım)  
DC : Direct Current (Doğru Akım)  
I-V : Current – Voltage (Akım – Voltaj)  
C-V : Capacitance – Voltage (Kapasitans – Voltaj)  
MS : Metal-Semiconductor (Metal-Yarıiletken)  
MIS : Metal – Insulator – Semiconductor (Metal – Yalıtkan – Yarıiletken)



SD : Schottky Diode (Schottky Engel Diyotu)

LED : Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Bir metal (M) ile yarıiletkenin (S) sıkı kontak edilmesi ile hazırlanan metal-yarıiletken (MS) kontakların, optik radyasyonu elektrik akımına dönüştüren türüne foto diyot adı verilmektedir [1]. Gelişen teknoloji ile elektronik alarm devrelerinde, lüksmetrelerde, kontrol-kumanda devrelerinde, transistörlerde vb. yarıiletken yapılarda kullanılmaktadır [2]. Endüstriyel olarak geniş bir alana sahip foto diyotlar, ters polarma uygulandıktan sonra üzerine ışık düşmesi ile aktive olan yarıiletken aygıtlardır. Doğru polarma uygulandığında ise normal diyot davranışı sergilemektedirler. Foto diyotların üretim kalitesini, ışığa karşı duyarlılık, bant genişliği, tepki süresi ve kazanç gibi parametreler oldukça etkilemektedir [3-6].

1960'lı yıllardan itibaren tüm devrenin üretildiği entegre devrelerin üretilmesi ile katihal elektroniği devri başlamıştır [7]. Ham maddesi toprak olduğundan, maliyeti ucuz ve bol olan silisyum (Si) yarıiletkeni ile teknolojinin gelişimi hızlanmıştır. Silisyum iki türlü katkılanabilirlik, mobilite ve serbest taşıyıcı sayısı gibi elektronik özelliklerinden dolayı yarıiletken teknolojisinde baskın haline gelmiştir [8]. Yarıiletken malzemelere farklı malzemeler katkılандığında, neredeyse metaller kadar iletken olabildikleri gibi elektriksel özellikleri de önemli ölçüde değiştirilebilir. Katkı malzemesi türüne göre; yarıiletkenin katkılanmış bölgesinde elektronlar daha fazla ise n-tipi, deşikler daha fazla ise p-tipi yarıiletken elde edilmiş olur [9]. Bu çalışmada, bir III A grubu elementi olan bor malzemesi ile katkılanarak elde edilmiş p-Si yarıiletkeni kullanılmıştır.

Bir foto diyotun performansını ve güvenilirliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri metal ile yarıiletken arasındaki eklem bölgesidir [9-12]. MS arayüzeyindeki difüzyonu engelleyerek yük geçişlerini düzenleyebilmek, yüzeyi pasivize etmek ve sızıntı akımını düşürmek metal ile yarıiletken arasına yalıtkan bir tabaka oluşturulması ile

mümkündür [9,13-16]. Böylece olası akım-iletim mekanizmalarını kontrol edilebilir ve doğrultucu özelliği arttırılabilir [17]. Bu çalışmada yalıtkan arayüzey malzemesi olarak silisyumun doğal oksit tabakası olan SiO<sub>2</sub> malzemesi kullanılmıştır.

Silisyumu yarıiletken endüstrisinde baskın hale getiren en önemli özelliklerinden biri SiO<sub>2</sub> gibi kararlı bir oksite sahip olmasıdır [7,9]. Mükemmel bir yalıtkan olan SiO<sub>2</sub>, katkılama ve aşındırma proseslerinde seçici davranır. Böylece aygıt geometrisini belirlemek kolaylaşır. Sahip olduğu yüksek dielektrik sabiti, SiO<sub>2</sub>'nin entegre devrelerde devre elemanlarının yalıtımı için kullanılmasına da olanak sağlamaktadır [7].

Metal-yarıiletken kontaklara dair çalışmalar 19. Yüzyılda F. Braun tarafından yapılan ve kontakların doğrultucu özelliğini gösteren çalışmalara dayanmaktadır [18,19]. O zamandan itibaren bu konuda çalışmak, keşfedilen her özelliği ile güncelliğini korumaktadır. Bir diyotun doğrultma davranışı, doğru polarma uygulandığında diyotun akımı rahatlıkla geçirmesi, ters polarma uygulandığında ise neredeyse hiç akım geçirmemesi davranışdır. Bu durumun metal ile yarıiletken arasındaki potansiyel engel yüksekliğinden ( $\Phi_{B0}$ ) kaynaklandığı fikrini ilk kez Schottky ve Mott eş zamanlı ama birbirlerinden bağımsız olarak ortaya koymuşlardır [9,19,20]. Daha sonra Bethe tarafından Termiyonik emisyon (TE) teorisi ortaya konarak, MS yapıların olası akım-iletim mekanizmalarının anlaşılması için önemli bir adım atılmıştır [21].

1839'da E. Becquerel, sıvı bir elektrolit içine daldırdığı iki elektrottan birinin üzerine ışık düşürdüğünde, bir gerilim farkının oluştuğunu gözlemlemiştir [21]. Böylece ilk fotovoltaiik güneş pili keşfedilmiştir. 1954 yılında L. Person ve arkadaşları tarafından, ilk modern güneş pili yapılmıştır [21]. Fakat %6 gibi düşük bir verim elde edildiğinden ve yüksek maliyetinden dolayı uygulamada çok kabul görmemiştir. 1970'ler ve sonrasında ise artan enerji ihtiyacı, petrol krizi ve fosil yakıtların sebep olduğu kirliliklerden dolayı, temiz ve yenilenebilir enerji arayışına giren dünya ile birlikte fotovoltaiik güneş pilleri önem kazanmıştır ve verimliliği ve maliyeti açısından da kayda değer yol katledilmiştir. Enerjinin hala büyük bir sorun olduğu dünyada, diyotların optoelektronik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda güncelliğini korumaktadır [22-28].

Fotodiyotların çalışma prensibi, 1905 yılında A. Einstein tarafından ortaya konan ve 1921 yılında Nobel ödülünü almasını sağlayan fotoelektrik etkiye dayanmaktadır [29]. Buna göre, ışıktan elektrona bir enerji transferi gerçekleşir ve bu enerji transferi ile uyarılan elektron serbest hale geçerek, arkasında deşik bırakır. MS kontağın eklem bölgesine ışık geldiği zaman, yarıiletkenin yasak enerji aralığından daha yüksek bir enerjiye sahip fotonlar ( $h\nu \geq E_g$ ) soğrulur ve elektronlar serbest hale geçer. Bu serbest elektronlar ve arkalarında bıraktıkları deşikler, difüzyon yolu ile MS kontağın farklı bölgelerine giderek, soğrulan fotonların ve oluşan taşıyıcıların sayısına orantılı bir akım oluşturur [9]. Kısaca foto diyotun çalışması, gelen ışığın verdiği enerji ile taşıyıcıların yer değiştirmesi olarak açıklanabilir. Yani, bir iç elektrik alana sahip olan metal/yalıtkan/p-tipi yarıiletken diyotlarda, eklem bölgesinde toplanan deşikler arka omik kontak tarafına, elektronlar ise ön doğrultucu kontak tarafına doğru hareket ederek, bir sürüklenme akımının (fotoakım) oluşmasına sebep olacaktırlar [30,31]. Böylece, sıradan karanlık diyot akımının üzerine bir de fotoakım eklenmiş olacaktır. Prensipinde bir akım kaynağı olarak kabul edilebilecek olan foto diyotların üzerinden geçen akım, diyotun üzerine düşen ışık şiddeti ile doğru orantılıdır [32]. Işık şiddeti arttığı zaman diyot akımı artarken, azaldığı zaman diyot akımı azalır. Bunun sebebi, ışık arttığında eklem bölgesindeki direnç azalırken, azaldığında eklem bölgesindeki direnç artar.

Bir foto diyotun kalitesi, yalıtkan arayüzey tabakasının katkı yoğunluğuna, MS eklem bölgesindeki Gaussian dağılımından kaynaklı homojen olmayan engel yüksekliğine ( $\Phi_B$ ), arayüzey durum yoğunluğuna ( $N_{ss}$ ), seri ( $R_s$ ) ve kısa devre ( $R_{sh}$ ) direncine, sıcaklığa, uygulanan doğru ve ters polarma büyüklüğüne ve ışık şiddetine bağlıdır [9,19,35]. Bu yüzden ışık şiddetine bağlı, idealite faktörü ( $n$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ), doyum akımı ( $I_0$ ),  $R_s$ ,  $R_{sh}$  ve  $N_{ss}$  gibi temel diyot parametrelerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır [15,36].

Bu çalışmada, termal buharlaştırma yöntemi ile hazırlanan Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun hem karanlıkta hem de 50mW/cm<sup>2</sup> ışık şiddeti altında akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-gerilim (C-V) ölçümlerinden temel diyot parametreleri elde edilmiştir. I-V ölçümleri  $\pm 3$  V aralığında 0.05 V' luk adımlarla oda sıcaklığında alınmıştır. C-V ölçümleri ise, 1MHz'lik frekans için,  $\pm 4$  V aralığında 0.1 V' luk adımlarla oda

sıcaklığında alınmıştır. Tüm ölçümler gürültüyü azaltmak için, vpf-475 kriyostat içinde  $10^{-2}$  mbar basınç altında alınmıştır. Hem I-V ölçümleri hem de C-V ölçümleri, IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kart ile kontrol edilmiştir. Ölçümler ile elde edilen grafikler ve hesaplama sonuçları, mevcut literatür ile kıyaslanarak yorumlanmıştır.

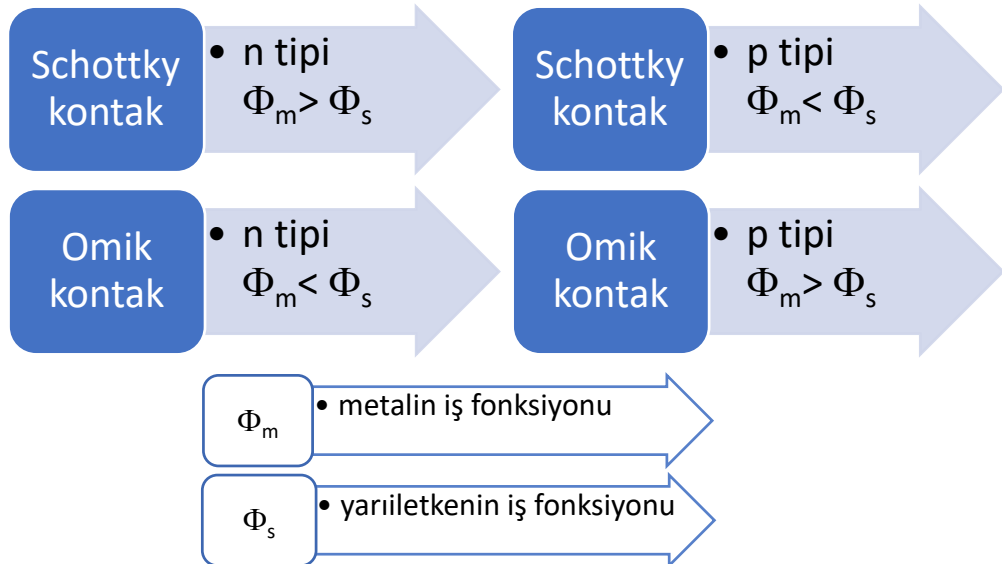
Beş bölümden oluşan bu tez çalışmasının ilk bölümü olan Giriş kısmında, MS yapılar ve foto diyotların önemi, uygulanan alanları ve temel özellikleri ile ilgili başlıca bilgiler verilmiştir. İkinci bölüm olan Teorik Altyapı kısmında ise MS/MIS yapılar hakkında temel teorik bilgilerden, çalışma prensiplerinden, foton ve foto diyotlardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölüm olan Materyal ve Yöntem kısmında ise, Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot üretilmesinde kullanılan malzemelerin özellikleri, hazırlanma süreçleri ve ölçüm sistemi anlatılmıştır. Dördüncü bölüm olan Sonuçlar kısmında, I-V ve C-V ölçümlerinden yararlanarak hazırlanan grafikler ve çizelgeler ile hesaplanan temel diyot parametreleri verilmiştir. Son bölüm olan Tartışma ve Öneri kısmında ise elde edilen tüm deneysel sonuçlar, mevcut literatür ile kıyaslanarak yorumlanmıştır ve mümkün olan öneriler ortaya konmuştur.

## BÖLÜM 2

### TEORİK ALTYAPI

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

Bir metal yarıiletken ile sıkı kontak edildiğinde MS kontak/Schottky diyot (SD) oluşur. Elektronik devre elemanlarından önemli yere sahip olan farklı malzemeler ve yöntemlerle üretilen MS kontakların/SD incelenmesi günümüz teknolojisinde oldukça önemlidir. Bu yapıların anlaşılabilmesi için, yalıtkan/yarıiletken kristallerin iletkenliklerinin araştırılması ve kontak türünün seçimi bu yapılar için oldukça önemlidir. Kontakın sıfır dirençle temas etmesi için (ideal durum için) yüzey oldukça temiz ve pürüzsüz olmalıdır [37]. MS kontaklar metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlı olarak doğrultucu (Schottky) ve omik kontak olmak üzere ikiye ayrılır [9]. Kontak türleri Şekil 2.1' de verildi.

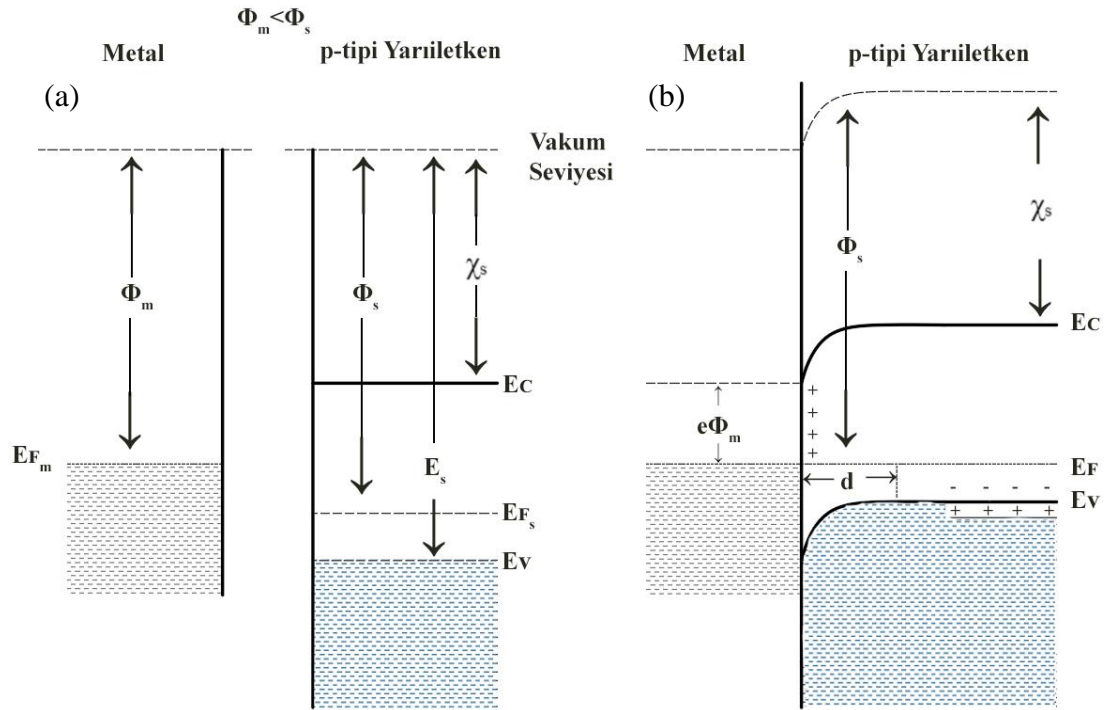


Şekil 2.1. Kontak türleri.

MS kontaklarda iletimi sağlayan elektronlar/holler metalden yarıiletkene/yarıiletkenden metale doğru daha kolay geçiyorsa bu tür kontaklara Schottky/doğrultucu kontak denir ve bu tür davranışa doğrultma denir. Doğrultma oranı, MS kontağın tam ilettime geçtiği voltaj değerinde, ileri voltaj altındaki akım değerinin ( $I_F$ ), ters voltaj altındaki akım değerine ( $I_R$ ) oranı olarak tanımlanır. Omik kontak ise, elektronlar/holler her iki yönde rahatça hareket ediyorsa ya da başka bir deyişle herhangi bir engelle karşılaşmıyorsa bu kontaklara denir [9].

### 2.1.1. Metal-p tipi Yarıiletken (MS) Kontaklar

Metal-p tipi yarıiletken kontaklarda Şekil 2.1' de de verilen malzemelerin iş fonksiyonlarına bağlı olarak doğrultucu ve omik kontak oluşur. p-tipi yarıiletken ile metal kontak edilmeden önce enerji bant diyagramı Şekil 2.2.a' da verildi.



Şekil 2.2. MS (p-tipi) kontak enerji band diyagramı kontak a) Edilmeden önce, b) Edildikten sonra [9].

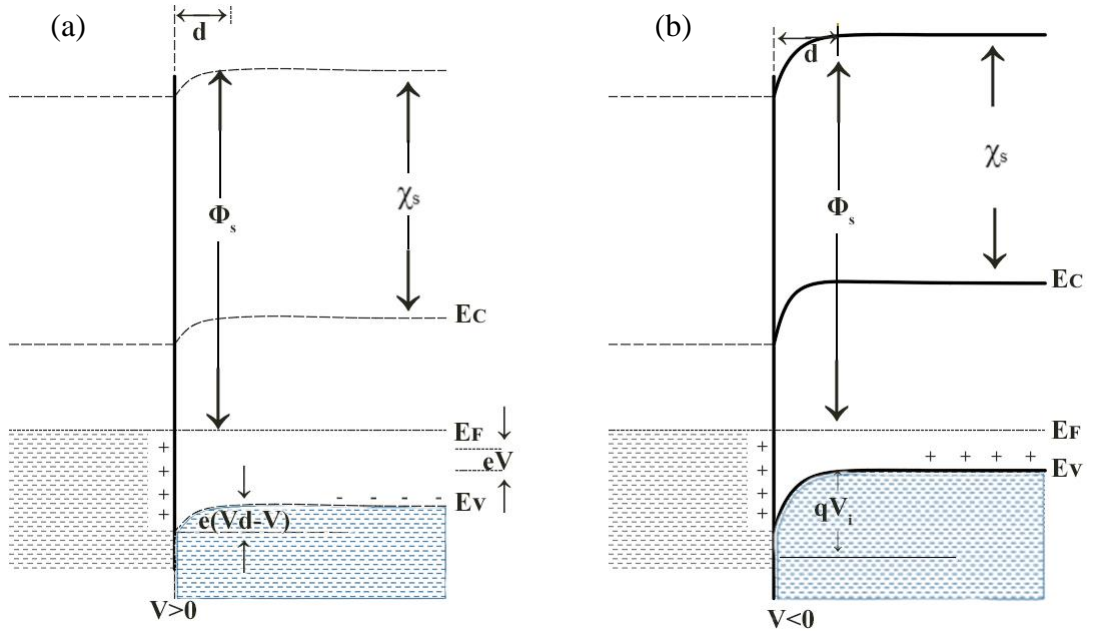
Metal/p-tipi yarıiletken kontak edildikten sonra termal dengeye ulaşmaya kadar metalde elektronlar (metalın enerji seviyesi yüksek olduğu için) yarıiletken doğru akarlar ve bu akış malzemelerin Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder. p-

tipi malzemelerde çoğunluk taşıyıcıları holler iken azınlık taşıyıcıları elektronlardır. Bu yüzden akım holler tarafından sağlanır. Yük geçişi sırasında geçiş yapan elektronlar metal tarafında pozitif yüklü bir tabaka oluşturur. Bu oluşan pozitif yükler p-tipi yarıiletkenin metale bakan kısmında elektronlarla birleşirler.

Bu birleşmeden sonra p-tipi yarıiletkende iyonize akseptörler/alıcılar uzay yük tabakası meydana getirir. p-tipi yarıiletkende oluşan uzay yük tabakasında hol konsantrasyonu elektron konsantrasyonuna göre azdır ve alıcı atomlarının konsantrasyonuna bağlı olan tüketim tabakası (W genişlikli) içerir. Bunun sonucunda potansiyel engeli oluşur ve holler için oluşan bu potansiyel engel yüksekliği Eş.2.1 ile verildi.

$$eV_d = (\phi_s - \phi_m) \quad (2.1)$$

Eş. 2.1' de  $V_d$  ifadesi difüzyon potansiyelidir.

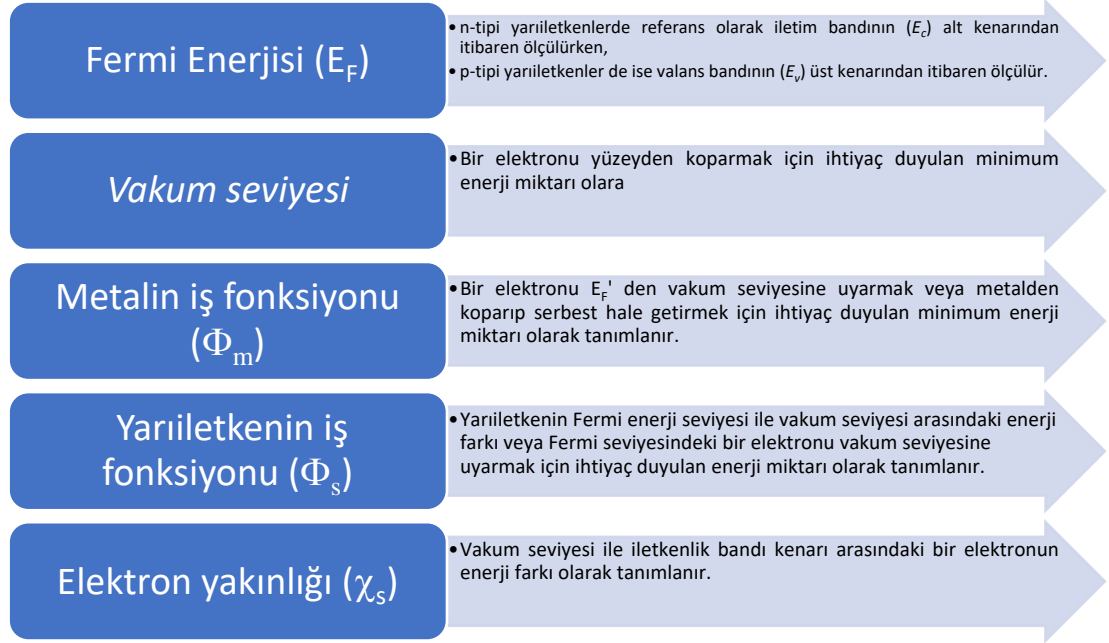


Şekil 2.3. MS Schottky kontağa a) ileri voltaj ( $V > 0$ ) ve b) ters voltaj ( $V < 0$ ) uygulandığı zaman enerji bant diyagramı.

p-tipi yarıiletkene uygulanan voltaja göre ( $V > 0$  ve  $V < 0$  Şekil 2.1.b' de verilen termal denge durumundaki enerji-bant diyagramı değişir. Yarıiletkene ileri voltaj uygulandığı

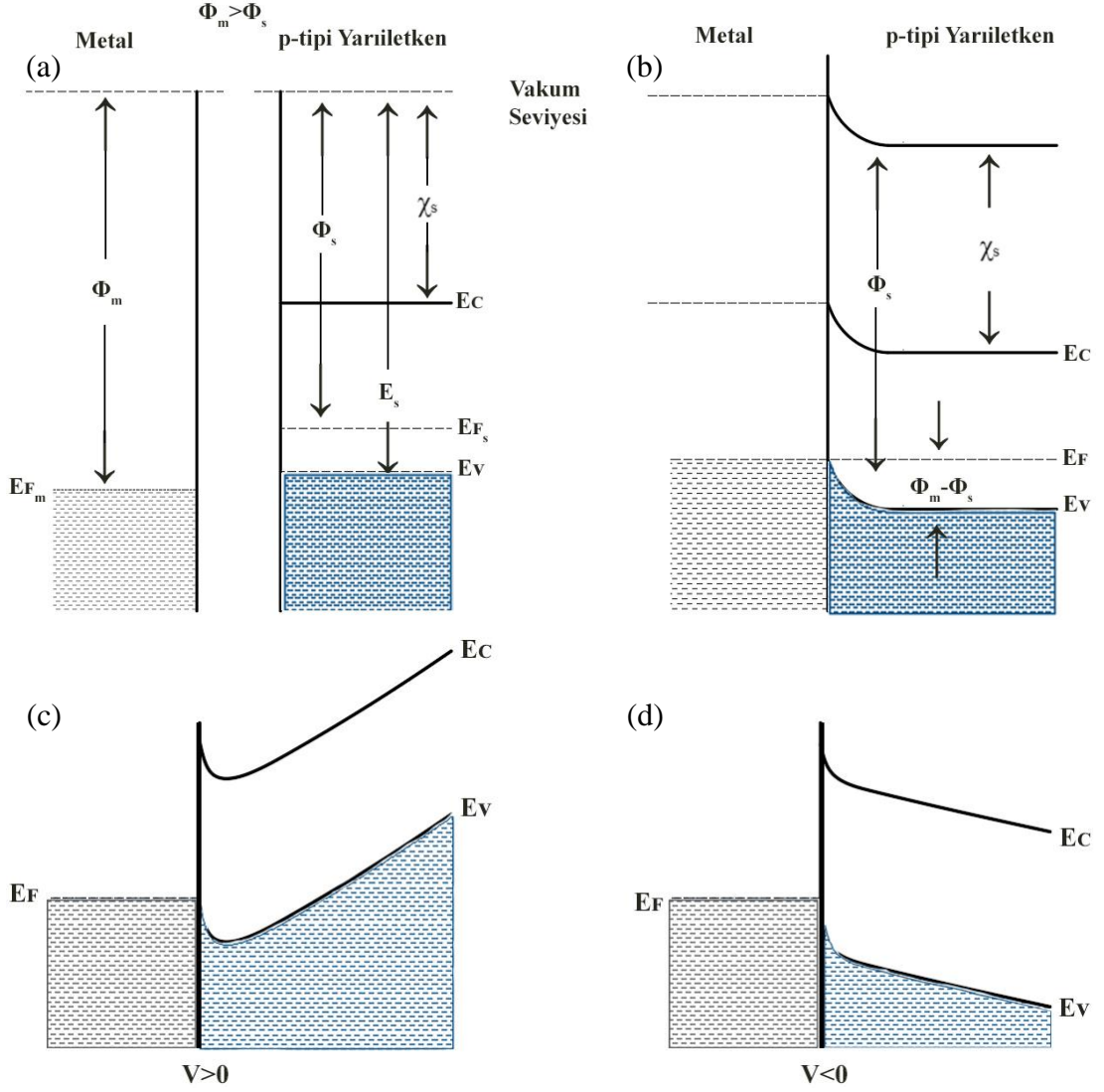


zaman, Şekil 2.3.a yarıiletken den metale geçen holler için potansiyel engel yüksekliği eV kadar azalır. Ters voltaj uygulandığında ise eV kadar artar (Şekil 2.3.b). Yarıiletken  $V>0$  uygulandığı zaman iletme geçerken,  $V<0$  uygulandığı zaman hemen hemen akım iletimi yoktur. Bu davranışa doğrultma oranı denir. Şekil 2.3' de verilen temel fiziksel parametrelerin tanımı Şekil 2.4' te verilmiştir.



Şekil 2.4. MS yapılar için fiziksel parametreler.

Metal/p-tipi yarıiletken yapılarda uygulanan gerilimden bağımsız olarak her iki yönde rahatça yük geçişleri (akım akışı) varsa bu tür kontaklar omik ( $\Phi_m > \Phi_s$ ) kontaklardır. Şekil 2.5.a' da görüldüğü gibi kontak edilmeden önce yarıiletkenin  $E_F$  metalinkinden daha yukarıdadır ( $\Phi_m - \Phi_s$ ). Kontak edildikten sonra Şekil 2.5.b' de görüldüğü gibi p tipi yarıiletken de azalan elektron yoğunluğundan dolayı  $E_F$ ,  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar aşağı iner. Şekil 2.5.c' de görüldüğü gibi ileri voltaj uygulandığı zaman ( $V > 0$ ) yarıiletken metale hollerin geçişi ve metalden yarıiletkene elektronların geçişi kolaydır. Ters voltaj uygulandığı zaman ( $V < 0$ ), Şekil 2.5.d' de görüldüğü gibi metalin iletkenlik bandındaki holler yarıiletken tarafına kolayca geçer. Yani uygulanan voltajdan bağımsız olarak her iki yönde de minimum dirençle akım akışı olmaktadır [9].

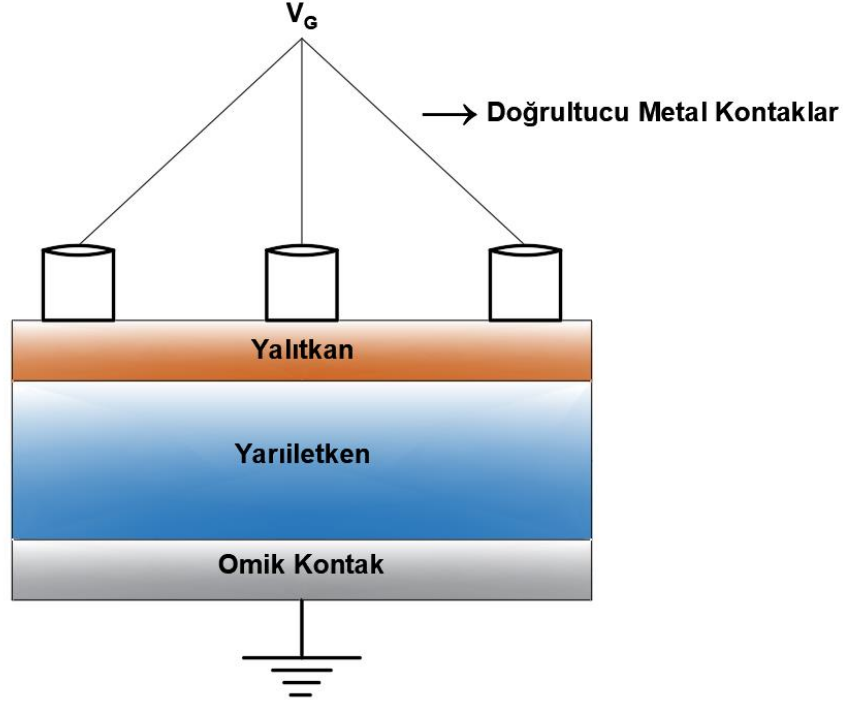


Şekil 2.5. MS (p tipi) omik kontakın enerji-bant diyagramı; a) Kontakdan önce, b) Kontakdan sonra ve termal dengede, c)  $V > 0$  durumunda ve d)  $V < 0$  durumunda [9].

## 2.2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPISI

Yarıiletken devre elemanları, çoğunlukla yalıtkan arayüzey tabakalı kontaklardan üretilir. Metal-yarıiletken (MS) yapılarda, metal/yarıiletken (M/S) arayüzeyi yalıtkan bir tabaka ile kaplandığı zaman bu yapı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıya dönüşür. Yalıtkan arayüzey tabakası metal ile yarıiletkeni birbirinden izole ederek M/S arasındaki yük geçişlerini düzenler. MS ve MIS kontaklarda yapı üzerine uygulanan gerilim ( $V_G$ ); oluşturulan arayüzey tabaka, yapının seri direnci ve yapı tarafından

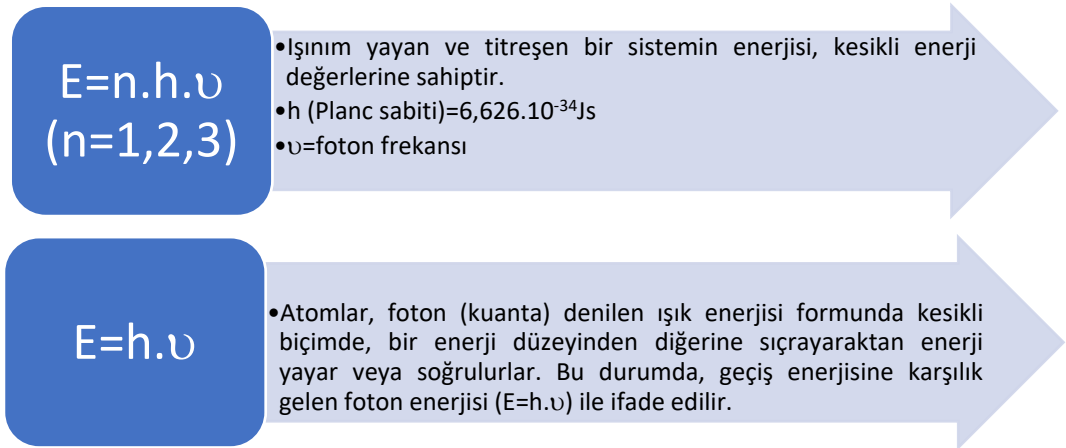
$(V_G = V_D + V_R + V_i)$  paylaşılır. Şematik diyagramı Şekil 2.6' da verilen MIS yapılarda akım iletimi, MS yapılardan farklıdır.



Şekil 2.6. MIS yapının şematik gösterimi.

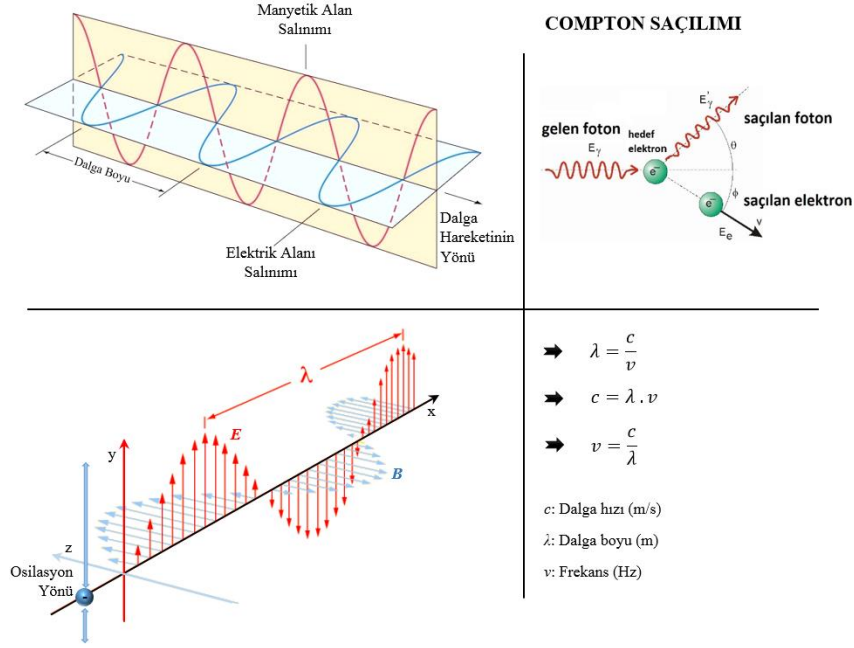
### 2.3. FOTON

Max Planck 1900'lü yıllarda, enerjinin kesikli olduğunu kuantum teorisiyle ortaya atmıştır. Max Planck kara cisim ışıması ile şu iki varsayımı sunmuştur Şekil (2.7) [31]:



Şekil 2.7. Max Planck kara cisim ile ilgili varsayımlar.

Yukarıda verilen açıklamalar doğrultusunda Elektromanyetik dalga (emd) paketi ya da ışık enerji paketine foton denir emd için temel enerji birimidir ve bir fotonun enerjisi  $E$  (enerji) =  $h$  (Planck sabiti). $c$  (ışık hızı) /  $\lambda$  (dalga boyu) ile verilir. Görünür ışık, elektromanyetik dalgadır ve hızı  $3 \times 10^8$  m/s olarak verilir. Işık dalgası ve özellikleri Şekil 2.8 ışık dalgası ve özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.8. Işık dalgası ve özellikleri [31].

Elektronların daha yüksek enerjili bir yörüngeye atlayabilmek için enerjiye ihtiyaçları vardır ve bu enerji foton olarak bilinir. Foton özellikleri şöyledir (Şekil 2.9);

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

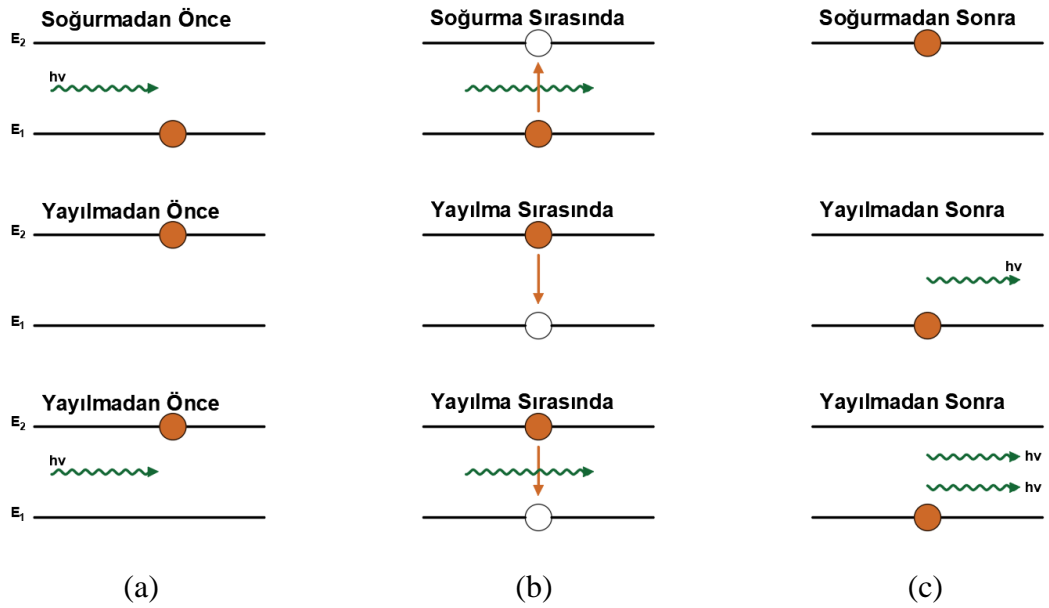
Şekil 2.9. Fotonun özellikleri.

## 2.4. IŞIMALI GEÇİŞLER

Üç temel ışımalı geçiş vardır bunlar soğurma, kendiliğinden yayılma ve uyarılmayla yayılma. İki enerji seviyeli bir atom için taban durum enerjisi  $E_1$ , uyarılmış enerji seviyesi  $E_2$  olarak tanımlarsak ve bu enerji seviyeleri arasındaki fark  $E=h\nu_{12}=E_2-E_1$  olarak verilir. İki enerji seviyesi arasındaki geçiş foton soğurulması ya da salınmasını sağlar. Taban seviyesindeki ( $E_1$ ) bir elektron  $E$  kadarlık enerjiye sahip foton soğurduğu zaman uyarılmış enerji seviyesine ( $E_2$ ) çıkabilir. Soğurma (Şekil 2.10.a) olarak bilinen bu durum foto dedektör ve güneş hücrelerinin çalışma prensibinin temelini oluşturur [31].

Kendiliğinden yayılma (Şekil 2.10.b), herhangi bir müdahale olmaksızın atomun uyarılmış durumdan  $E$  enerjisinde bir foton salarak temel duruma geçmesiyle açıklanır. Işık yayan diyotlar (LED) kendiliğinden yayılma prensibi ile çalışır.

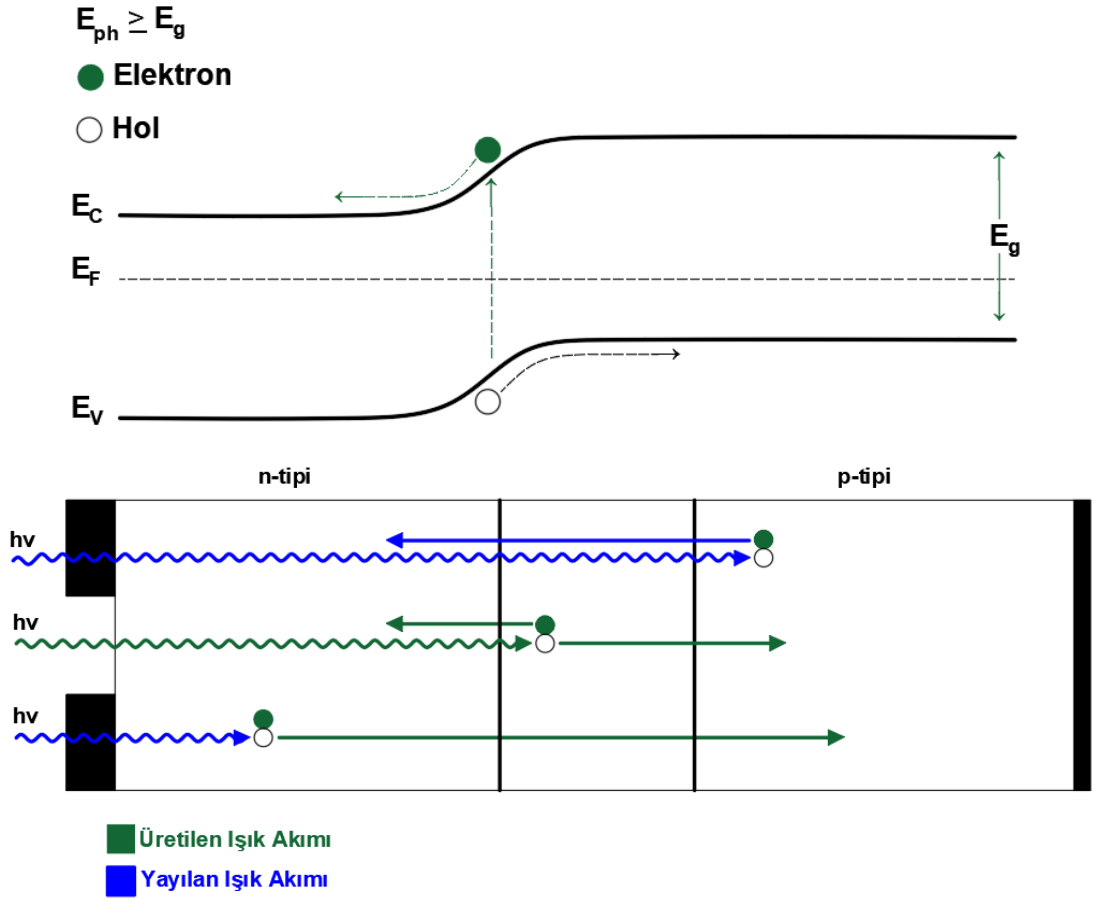
Uyarılmış durumda bulunan atoma  $E$  enerjili bir foton geldiği zaman fotonla aynı fazda  $E$  enerjili foton salarak temel enerji seviyesine geçer. Buna uyarılmayla yayılma denir. (Şekil 2.10.c) ve Lazerler (LASER) bu prensiple çalışırlar [9].



Şekil 2.10. Işımalı geçişler; a) Soğurmadan önce, b) Soğurma sırasında ve c) Soğurmadan sonra.

## 2.5. FOTOVOLTAİK ETKİ

Fotovoltaik bir hücre üzerine güneş ışığı düşürüldüğü zaman, bu enerjiyi (güneş enerjisi) elektrik enerjisine dönüştürür. Buna fotovoltaik etki denir (Şekil 2.11). Yarıiletken (Si, Ge gibi) yüzeyine çarpan güneş enerjisindeki fotonlar, atomlardan elektronları serbest bırakarak fotovoltaik olayı gerçekleştirir. Güneş enerjisindeki fotonlar farklı dalga boylarına sahip olduğu için yarıiletken tarafından kısmen soğurulur, yansıtılır veya hücre içerisinden geçer [31].



Şekil 2.11. Fotovoltaik etki [31].

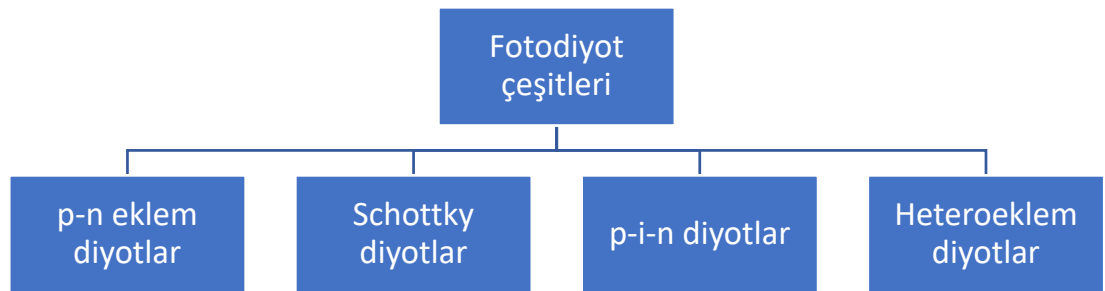
Fotovoltaik hücre tarafından soğurulan fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya büyük olduğu zaman valans bandındaki elektron, iletkenlik bandına geçer ve serbest hale gelir [33,34]. Buna karşın foton yasak enerji aralığından daha düşük bir enerjiye sahipse, elektron tekrar temel enerji seviyesine döner ve bu enerji

ısı enerjisine dönüşerek malzemenin sıcaklığını artırır. Eğer fotonun enerjisi yasak enerji aralığının enerjisinden çok yüksek ise, bu fazla enerji yarıiletken malzemede ısı enerjisine dönüşür ve bazı kimyasal bağları kopararak kusurları oluşturur. Sonuç olarak bir fotonun enerjisi ne kadar yüksek olursa olsun yalnızca bir elektronu serbest hale getirebilir [33,34].

Yarıiletkenin soğurduğu foton, valans bandındaki elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlayarak elektron-hol çifti oluşturur. Bu işlem,  $p-n$  eklem ara yüzeyinde gerçekleşirse elektron-hol çifti elektrik alan tarafından zıt yönlerde sürüklenerek birbirinden ayrılarak elektronlar  $n$  tarafına, hollerde  $p$  tarafına yönelecektir.  $p-n$  eklem iki ucu bir dış devreye bağlanırsa, elektronlar yol boyunca, elektrik alan ile ayrılan holler ile birleşmek için  $p$  tarafına akarak, akım oluşmasını sağlar. Bu olaya “fotovoltaik olay” oluşumu, akıma da “foto-akım” denir. Bu süreç, eklem üzerine foton düştüğü sürece devam eder. [31,34].

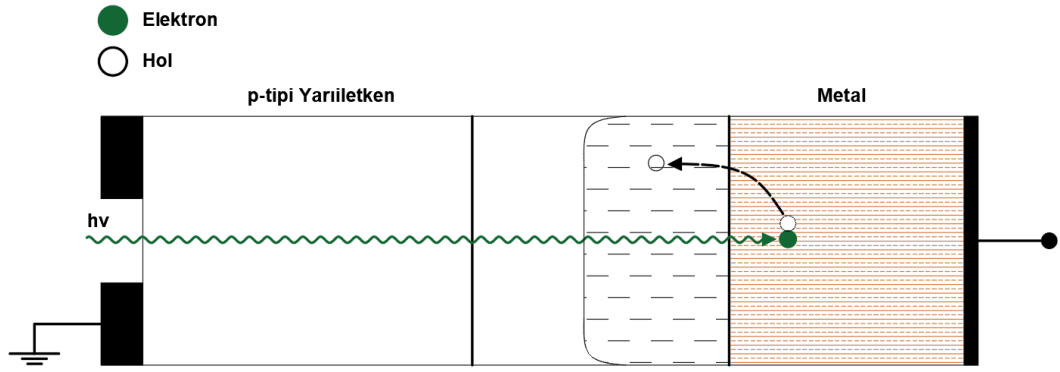
## 2.6. FOTO DİYOT ÇEŞİTLERİ

Işık enerjisiyle iletme geçen diyotlara foto diyot denir. Foto diyotların ışığa karşı oldukça duyarlı olmaları ve çalışma hızlarının yüksek olmasından dolayı veri iletiminde kullanılır. Foto diyotlar dört grupta sınıflandırılabilir (Şekil 2.12) [31].



Şekil 2.12. Foto diyot çeşitleri.

Schottky foto diyotlar metal ile yarıiletkenin sıkı kontak edilmesiyle oluşur ve Schottky foto diyot yapısı Şekil 2.13’ de verilmiştir. Şekil 2.13’ den de açıkça görüldüğü gibi metal üzerinde hareketli elektronlar ve holler oluşturulmaktadır ve hollerin bazıları engel üzerinden balistik olarak yayılmaktadır.



Şekil 2.13. Schottky fotodiyot yapısı [31].



## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun hazırlanması için kullanılan malzemelerin özellikleri ile üretim ve karakterizasyonu için kullanılan yöntemler anlatılmaktadır. İlk olarak alttaş olarak kullanılan p-Si kristalinin ve yalıtkan arayüzey malzemesi olan SiO<sub>2</sub>'nin özelliklerinden bahsedildi. Daha sonra, numunenin hazırlanma süreci olarak; alttaşın temizlenmesi, termal oksit büyütme yöntemi ile arayüzey tabakasının oluşturulması ve termal buharlaştırma yöntemi ile doğrultucu (ön) ve omik (arka) kontakların hazırlanması anlatıldı. Son olarak, karanlıkta ve ışık altında, fotovoltaj karakterizasyonu için alınan ölçümlerin sistemi ve yöntemi anlatıldı.

### 3.1. KULLANILAN MATERYALLARIN ÖZELLİKLERİ

#### 3.1.1. Silisyum (Si) Kristali



Şekil 3.1. Katı haldeki doğal silisyum.

Şekil 3.1'de görülen Silisyum (Si) bir IV A grubu elementidir ve son orbitalinde 4 elektron bulduğundan bor (B) gibi bir III A grubu elementi ile katıldığında p-tipi bir yarıiletken oluşurken, arsenik (As) gibi bir V A grubu elementi ile

katkılandığında n-tipi bir yarıiletken oluşur. Bilindiği gibi p-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları deşikler iken n-tipi yarıiletkenlerde elektronlardır. Doğada siliksat asidi ve tuzları halinde bulunan silisyumun saf kristal ve amorf silisyum olmak üzere iki tane allotropu bulunmaktadır. Saf kristal silisyum, elmas örgü yapısına sahiptir ve sert, parlak, koyu gri renkli ve kırılmandır. Amorf silisyum ise, koyu kahverengi rengi ve tane büyüklüğü ile kristal silisyumdan ayrılır [38]. Her ne kadar silisyumun keşfi 19. yüzyıl başlarında olsa da elektronik dünyasında kullanımı 20. yüzyılda başlamıştır. İlk transistör germanyum (Ge) ile yapılmış olsa da daha sonraları, iki türlü katkılanabilirlik, mobilitesi ve serbest taşıyıcı sayısı gibi sahip olduğu birçok avantajdan dolayı Si ile yapılan transistörler baskın olmuştur [39]. Hammaddesi toprak olan silisyum doğada bolca bulunur ve üretim maliyeti de oldukça düşüktür. Sahip olduğu mekanik özellikler, silisyumdan geniş waferlar (alttaşlar) hazırlanmasına olanak sağlar. Ayrıca sıcaklığa karşı kararlı olduğundan oksidasyon, tavlama ve difüzyon işlemlerinde kolaylık sağlar [40]. Çizelge 3.1’de, oda sıcaklığındaki silisyumun özelliklerini göstermektedir [38].

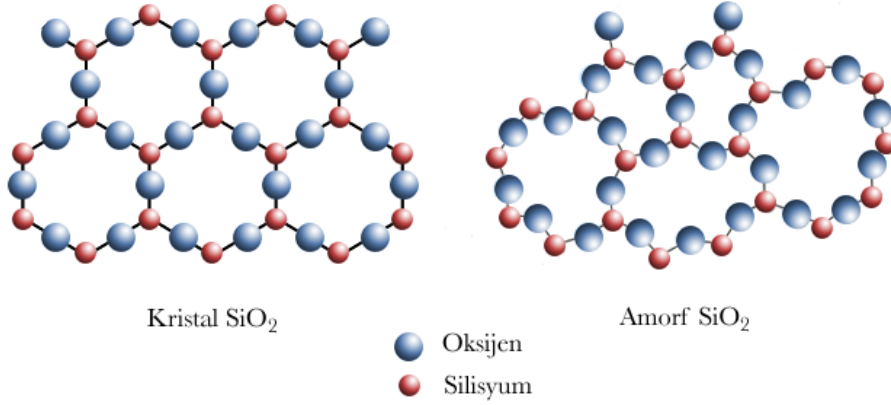
Çizelge 3.1. Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı özellikleri.

Özellik	Silisyum (Si)
Kristal Yapısı	Elmas
Örgü Sabiti (A)	5.43095
Atom Ağırlığı	28.09
Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	2.33
Dielektrik Sabiti	11.9
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu (N <sub>c</sub> ) (cm <sup>-3</sup> )	2.8x10 <sup>19</sup>
Valans bandındaki durumların yoğunluğu (N <sub>v</sub> ) (cm <sup>-3</sup> )	1.04x10 <sup>19</sup>
Saf Taşıyıcı Yoğunluğu n <sub>i</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.45x10 <sup>10</sup>
Yasak Enerji Aralığı (eV)	1.12
Elektron Yakınlığı $\chi$ (eV)	4.05
Elektronların Etkin Kütlesi (m <sup>*</sup> /m <sub>o</sub> )	m <sub>i</sub> <sup>*</sup> =0.98, m <sub>t</sub> <sup>*</sup> =0.19
Deşiklerin Etkin Kütlesi (m <sup>*</sup> /m <sub>o</sub> )	m <sub>lh</sub> <sup>*</sup> =0.16, m <sub>hh</sub> <sup>*</sup> =0.49
Elektron ve Deşik mobilitesi (cm <sup>2</sup> /V.s)	1.450-500
Erime Sıcaklığı (°C)	1414
Kaynama Sıcaklığı (°C)	2900
Termal İletkenlik (W/cm.K)	1.56

Düzlemsel mikroelettronik endüstrisinde silisyumu üstün kılan en önemli özelliği, SiO<sub>2</sub> gibi mükemmel bir yalıtkan olan doğal, kararlı bir oksite sahip olmasıdır. Bu

sayede yüzey pasivasyonu kolaydır ve yüzeyde rekombinasyonu engelleyerek kararlı bir oksit tabaka oluşturmak mümkündür [7].

### 3.1.2. Silisyum Dioksit (SiO<sub>2</sub>)



Şekil 3.2. Kristal ve amorf SiO<sub>2</sub>' nin yapısal gösterimi.

Şekil 3.2' de görülen silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>), doğada kuvars ve kum şeklinde bolca bulunan bir malzemedir. Gıda, ilaç ve mikroelektronik alanında kullanımı oldukça yaygındır. Çizelge 3.2'de görülen elektronik özellikleri ile elektronik endüstrisinde vazgeçilmez bir materyal haline gelmiştir. SiO<sub>2</sub> seçici katkılama ve seçici aşındırma özelliğine sahiptir ve bu sayede kimyasal temizlik işlemi sırasında SiO<sub>2</sub>' yi aşındırırken, yapısındaki silisyuma dokunmaz [7, 38,40]. Bu da yapının geometrisinin belirlenmesine yardımcı olur. Çok iyi bir yalıtkan olan SiO<sub>2</sub>, entegre devrelerde devre elemanlarını birbirlerinden yalıtım için ve MOS kapasitör ve MOSFET gibi yapılarda dielektrik tabaka olarak kullanılabilir. Yüksek pasivasyon özelliği ile bütün devreyi kapatmada anahtar rolü oynayabilmektedir. Tüm bu özellikleri ve silisyum ile doğal bir bileşik olarak doğada bulunmasından dolayı, arayüzey malzemesi olarak yarıiletken aygıtlarda kullanımı tercih edilmektedir [7,38,40].

Çizelge 3.2. SiO<sub>2</sub>'nin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri [38].

Özellik	SiO <sub>2</sub>
Yapı	Amorf
Moleküler Ağırlık	60.08
Yoğunluk	2.27
Elektron Yakınlığı $\chi$ (eV)	0.9
Yasak Enerji Aralığı (eV)	9
Dielektrik Sabiti	3.9
Termal İletkenlik (W/cm.K)	0.014
Özdirenç ( $\Omega$ cm)	$10^{14}$ - $10^{16}$
Erime Noktası (°C)	$\approx 1700$

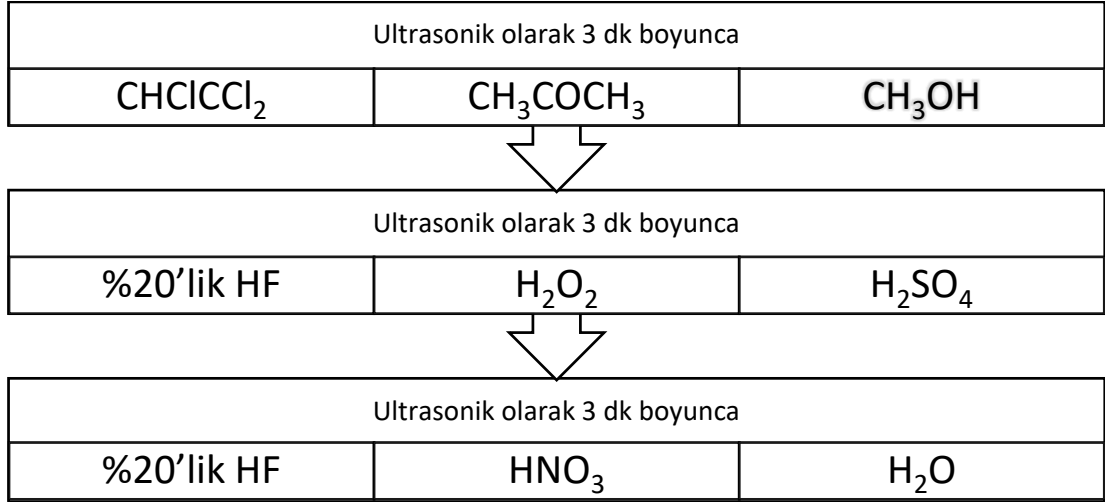
Bu çalışmada, Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) tipi foto diyotun hazırlanması, elektriksel özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapının hazırlanmasında, yarıiletken malzemesi olarak 1 $\Omega$  özdirence sahip, 350  $\mu$ m kalınlıkta ve 2'' çapında <100> yüzey yönelimine sahip, tek kristal, bor (B) katkılı p-tipi silisyum kullanılmıştır. Hazırlık aşamasındaki en önemli basamak, Si alttaşın üzerine arayüzey tabakası olarak SiO<sub>2</sub> oksit tabakasının büyütülmesidir. Çünkü bu arayüzey tabakasının yapısal özellikleri, yarıiletken aygıtın performansını etkileyen en önemli parametrelerden biridir [40].

### 3.2. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS TİPİ FOTO DİYOTUN HAZIRLANMASI

#### 3.2.1. p-Si Kristal Alttaşın Temizlenmesi

Arayüzey tabakalı Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun hazırlanmasında arayüzey tabakası olarak SiO<sub>2</sub> oksit tabakasının büyütülmesi en önemli süreçtir. Oksit tabakanın yarıiletken üzerine homojen olarak büyütülmesi, aygıt performansını etkileyen ve arayüzey durumlarına sebep olan kusurlar açısından önemlidir. Bu nedenle, arayüzey büyütme işleminden önce, safsızlıklardan arınması için kimyasal temizlik işlemine tabi tutulmalıdır. Literatürde sıklıkla kullanılan temizlik süreci Şekil 3. 3'te adım adım anlatıldığı gibi, önce 3' er dakika boyunca CHCl<sub>3</sub> (Trikloretilen), CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub> (Aseton) ve CH<sub>3</sub>OH (Metanol) organik çözücülerinde ultrasonik olarak yıkandı. Daha sonra, yine ultrasonik olarak, %20'lik HF (Hidroflorik Asit), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Hidrojen Peroksit) ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Sülfirik Asit) bileşiklerinde 3'er dakika boyunca yıkandı. Son olarak,

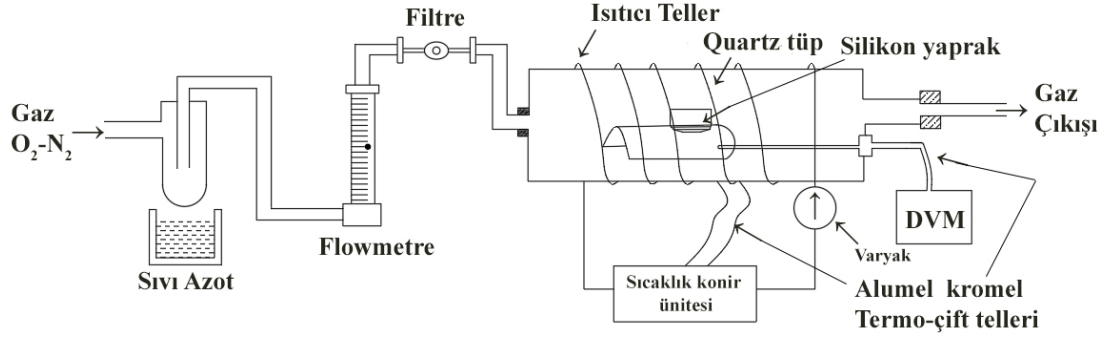
%20'lik HF, HNO<sub>3</sub> (Nitrik Asit) ve H<sub>2</sub>O (de-iyonize su) karışımında ultrasonik olarak banyo yaptırılan p-Si alttaş, H<sub>2</sub>O'da durularıp N<sub>2</sub> gazı ile kurutularak kimyasal temizlik işlemi tamamlanmıştır [31].



Şekil 3.3. p-Si Alttaşın kimyasal temizleme süreci.

### 3.2.2. Termal Oksidasyon Sistemi ile SiO<sub>2</sub> Arayüzey Tabakasının Oluşturulması

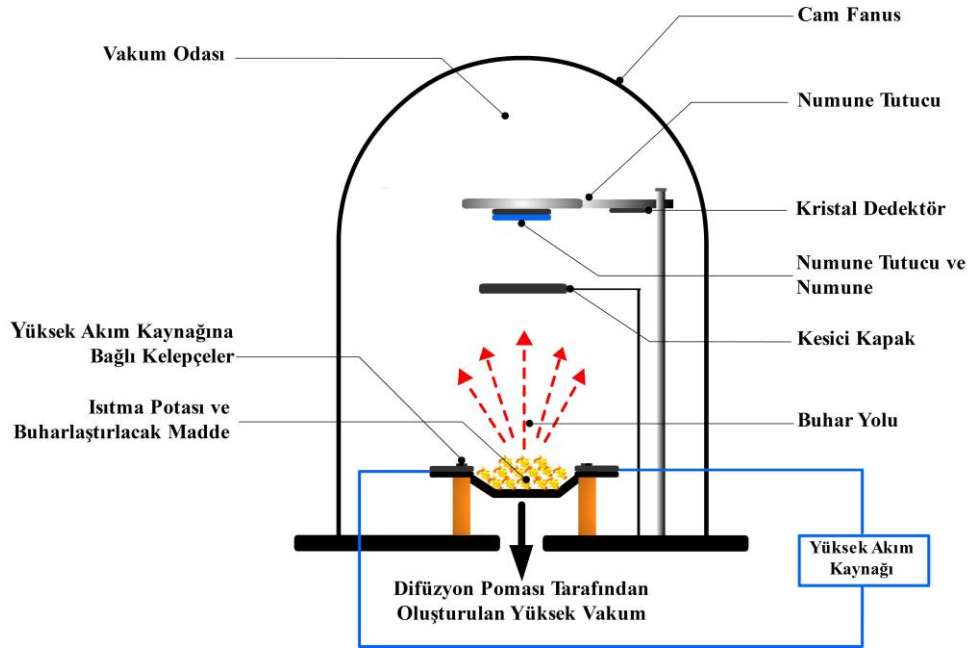
p-Si alttaşın üzerine SiO<sub>2</sub> arayüzey tabakası, 1950'li yıllarda mısırlı bir mühendis olan Mohamed Atalla tarafından geliştirilen termal oksidasyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Bu yöntemde, oksitleyici madde, yüksek sıcaklık altında alttaş yüzeyine difüze edilerek reaksiyona girer ve SiO<sub>2</sub> tabakasının oluşumu sağlanır [21]. Öncelikle, yukarıda bahsedilen kimyasal temizleme işlemine tabii tutulan p-Si alttaş üzerine SiO<sub>2</sub> biriktirilerek yalıtkan arayüzey tabakasının oluşturulması için Şekil 3.4'te görülen düzenek kullanılmıştır. Rezistans telinden geçen akım sayesinde kuartz tüpü ısınmıştır. Sıcaklık kontrolü hem ELIMKO 6000 sıcaklık kontrol ünitesi ile hem de numunelere yakın konumlandırılmış kromel-alümel termokupl ile sağlanmıştır. Oksitlenme işlemi için kullanılan O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> gaz karışımının akış hızı bir akış-ölçer ile kontrol edilmiştir ve neminin alınması için sıvı azot kabının üstündeki cam tüpten geçerek oksidasyon fırınına ulaşmıştır. p-Si alttaşın parlak (ön) yüzeyine oluşturulan SiO<sub>2</sub> oksit tabakasının kalınlığı, dakikada yaklaşık 0.8 lt akış hızında kuru oksijen (O<sub>2</sub>) gazı ile 30 Å olarak oluşturuldu.



Şekil 3.4. Termal oksidasyon sisteminin şematik gösterimi [21].

### 3.2.3. Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Doğrultucu ve Omik Kontaktların Hazırlanması

Termal buharlaştırma yöntemi, ince film hazırlamak için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS tipi foto diyotun ön (doğrultucu) ve arka (omik) kontaktların hazırlanmasında bu yöntem kullanılmıştır. Şekil 3.5'te termal buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi görülmektedir.



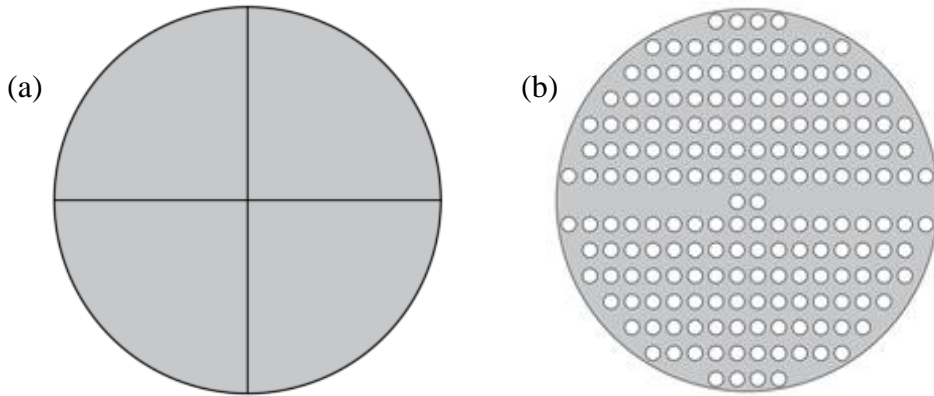
Şekil 3.5. Termal buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi [31].

Kaplama işlemi, düşük basınç altında gerçekleştirilerek yabancı maddelerin alttaş üzerine birikerek olası kirlilik atomlarının önünce geçmesi engellenir [41].

Buharlaştırılacak madde, bu çalışma için alüminyum (Al) metali ısıtma potasının içine yerleştirilir. Tungsten flaman üzerinden akım geçirilerek, numune tutucuya konumlandırılmış altaş malzemesinin, bu çalışma için p-Si, ön parlak yüzeyine biriktirilmesi ile doğrultucu kontak, arka mat yüzeyine biriktirilmesi ile omik kontak oluşumu sağlanmış olur. Oluşan kontakların kalınlıkları, altaş ile aynı geometrik konumda bulunan ve üzerine numune ile aynı miktarda birikmenin gerçekleştiği bir kalınlık kontrol cihazı ile kontrol edilir [31].

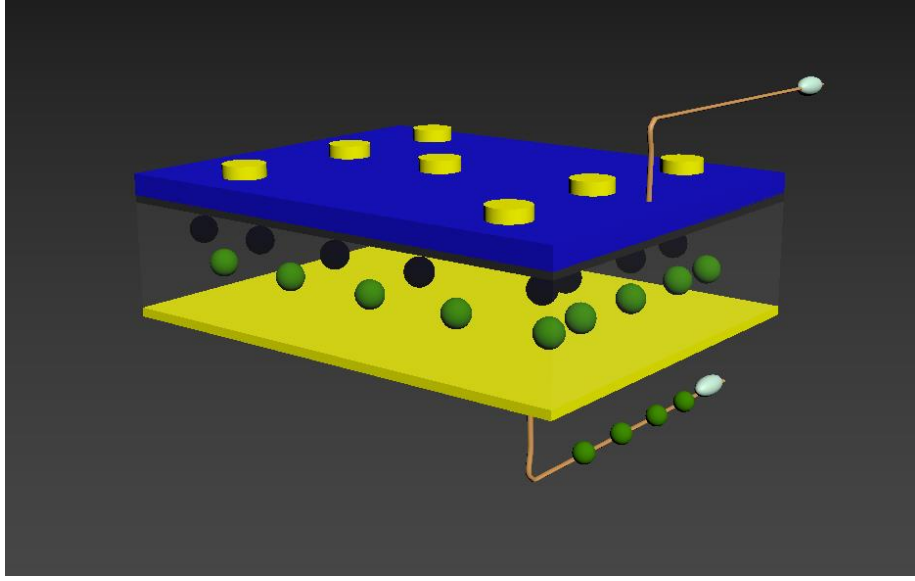
Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS tipi foto diyotun ön (doğrultucu) ve arka (omik) kontakları termal buharlaştırma yöntemi ile hazırlanmıştır. Omik kontak için, p-Si altaşın arka (mat) yüzeyine, doğrultucu kontak için ise ön (SiO<sub>2</sub> tabakasının oluşturulduğu) yüzeyine alüminyum (Al) metali bu yöntem ile biriktirilmiştir.

Omik kontak oluşturmak için termal buharlaştırma ünitesinin vakum odasının basıncı  $2 \times 10^{-6}$  Torr olarak ayarlanmıştır. p-Si altaşın mat yüzeyine Şekil 3.6.a' da görülen maske konumlandırıldıktan sonra, ısıtma potasına bakacak şekilde numune tutucuya yerleştirilmiştir. Tungsten flamana gerilim uygulanarak, % 99.999 saflıktaki Al metali buharlaştırılarak altaşın mat yüzeyine biriktirilmiştir ve 150 nm kalınlığında Al tabakası oluşmuştur. Daha sonra, düşük öz dirençli bir omik kontak elde etmek için 650 °C'de 60 dk boyunca dakikada yaklaşık 2 lt kuru azot (N<sub>2</sub>) gazı geçirilerek, Al tabaka p-Si altaş içine çöktürülmüştür. Böylece omik kontakın hazırlanma süreci tamamlanmıştır.



Şekil 3.6. a) Omik ve b) Doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maskeler.

Omik kontakın hazırlanmasının ardından doğrultucu kontakı oluşturmak için p-Si alttaşın parlak ve SiO<sub>2</sub> tabakası büyütülmüş yüzeyi ısıtma potasına bakacak şekilde numune tutucuya yerleştirilmiştir. Şekil 3.6.b' de görülen, 2.5 mm çapında deliklere sahip maske alttaşın üzerine konumlandırılarak yine 2x10<sup>-6</sup> Torr basınç altında, Al buharlaştırılarak alttaş üzerine biriktirildi. Böylece 150 nm kalınlığında ve 2.5 mm çapında doğrultucu kontakların hazırlanma süreci tamamlanmıştır. Şekil 3.7'de hazırlanan Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun kesit alanı görülmektedir.

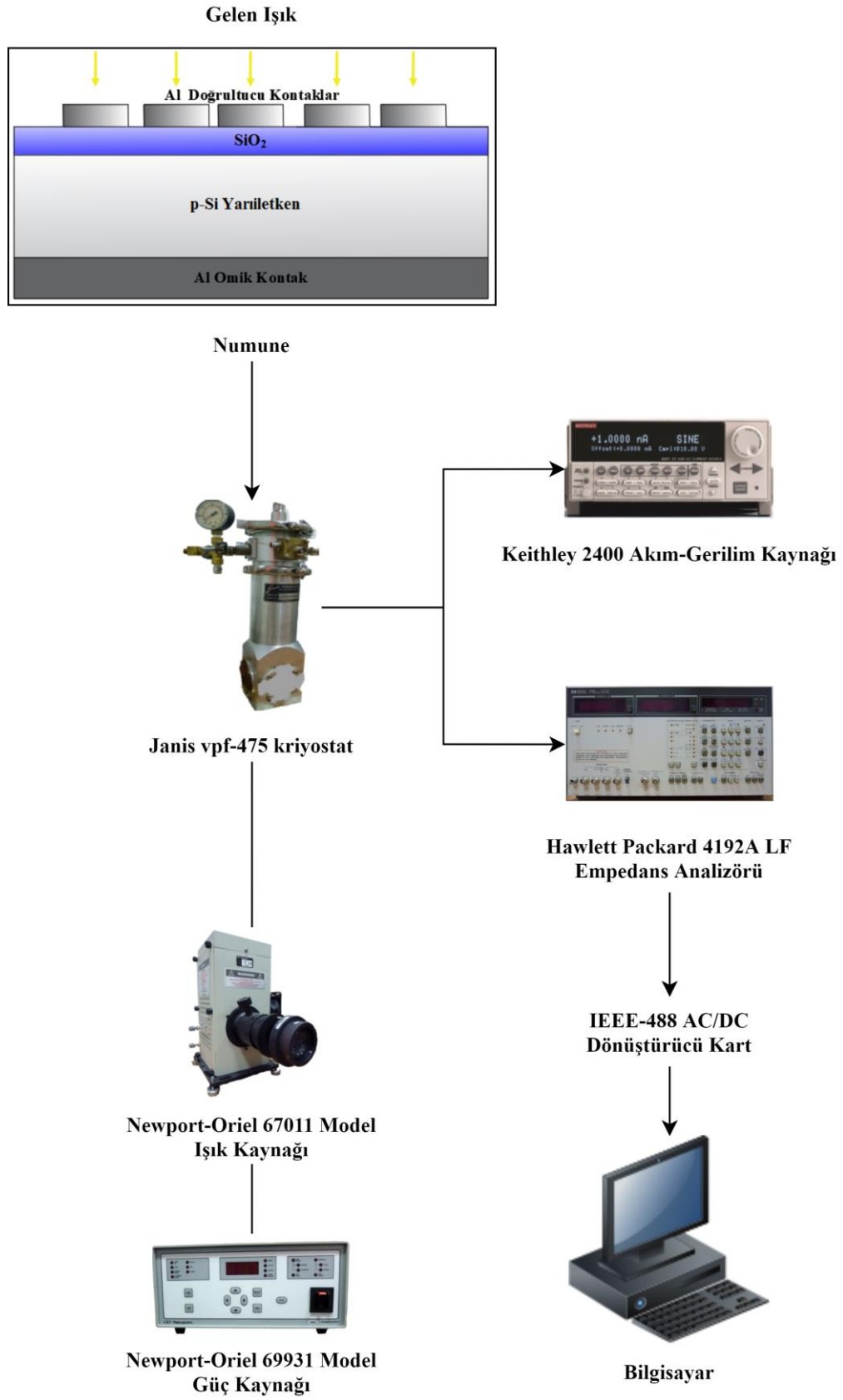


Şekil 3.7. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS tipi foto diyotun şematik gösterimi.

### 3.3. DENEYSEL ÖLÇÜM YÖNTEMİ

Bu çalışmada Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun elektriksel karakteristikleri karanlıkta ve 50 mW/cm<sup>2</sup> ışık altında incelenerek, fotovoltajik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-gerilim (C-V) ölçüm metotları kullanılmıştır. Kullanılan ölçüm sistemi Şekil 3.8' de gösterilmiştir. Doğru ön-gerilim I-V ölçümlerinden idealite faktörü (n), sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_{B0}$ ), ters doyma akımı ( $I_0$ ), arayüzey durumları ( $N_{ss}$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) gibi temel diyot parametreleri hesaplanmıştır. Ters voltaj C-V ölçümleri kullanılarak da diyotun difüzyon potansiyeli ( $V_D$ ), Fermi enerji seviyesi ( $E_F$ ), tüketim tabakasının kalınlığı ( $W_D$ ), katkılanan alıcı atomlarının yoğunluğu ( $N_A$ ) ve potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ) gibi temel elektriksel parametreleri hesaplanmıştır.





Şekil 3.8. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun I-V ve C-V ölçümleri için kullanılan ölçüm sisteminin şematik gösterimi.

Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun hazırlanma süreci tamamlandıktan sonra, numune bakır tutuculara gümüş pasta yardımı ile yapıştırılarak gümüş kaplamalı ince teller kullanılarak elektriksel kontakları yapılmıştır. Böylece ölçüme hazır hale gelen çok sayıdaki foto diyotlardan, iyi özellik gösteren Telequipment CT7 Curve Tracer ile tespit edilmiş ve onun elektriksel özellikleri incelenmiştir.

### **3.3.1. Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri**

Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun I-V ölçümleri Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı, 67011 model Newport-Oriel ışık kaynağı ve 69931 model Newport-Oriel güç kaynağı kullanılarak yapılmıştır. Oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde, ses veya çevresel koşullar nedeniyle oluşabilecek gürültüyü azaltmak için Janis VPF-475 kriostat kullanılmıştır. Kriostat içindeki IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kartı ile ölçümler kontrol edilmiştir. Kullanılan ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.8' de görülmektedir.

#### **3.3.1.1. Keithley 2400 Akım-Gerilim Kaynağı**

Karanlıkta ve 50 mW/cm<sup>2</sup> ışık altındaki I-V ölçümleri hem akım kaynaklı gerilim ölçümü hem de gerilim kaynaklı akım ölçümleri yapabilen, Keithley 2400 akım-gerilim ölçüm cihazı kullanılmıştır. Gerilim ölçümünü  $\pm 1\mu\text{V}$ 'tan  $\pm 200\text{ V}$ ' a kadar, akım ölçümünü ise  $\pm 1\text{ pA}$ 'den  $\pm 1\text{ A}$ ' e kadar yapabilmektedir. Cihaz IEEE-488 arayüzü veri yoluna ve  $\pm 0.15\%$  hassasiyete sahiptir.

#### **3.3.1.2. Janis vpf-475 Kriostat**

Ölçüm sonuçlarına gürültünün etkisini azaltmak için Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS tipi foto diyotun I-V ve C-V ölçümleri, 4 optik penceresi olan Janis vpf-475 kriostat içinde yaklaşık 10<sup>-2</sup> mbar basınçta yapılmıştır. Kriostat 79 K'den 425 K'e kadar ölçüm yapabiliyor olsa da numunenin I-V ve C-V ölçümleri oda sıcaklığında (300 K) yapılmıştır.

### **3.3.1.3. 67011 Model Newport-Oriel Işık Kaynağı ve 69931 Model Newport-Oriel Güç Kaynağı**

Işık altındaki I-V ve C-V ölçümleri için, 50 mW/cm<sup>2</sup> ışık seviyesinde ölçüm almaya olanak sağlayan 67011 Model Newport-Oriel Işık Kaynağı ve 69931 Model Newport-Oriel Güç Kaynağı kullanılmıştır.

### **3.3.2. C-V Ölçüm Sistemi**

Karanlık ve ışık altında alınan C-V ölçümleri, Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analizörü ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz kapasitans, empedans ve indüktans ölçme kabiliyetine sahiptir. Frekans ölçüm aralığı 15 Hz-13MHz arasında, osilatör genlik aralığı 5mV-1V ve doğru ve ters ön-gerilim aralığı -35 V ile +35 V arasındadır. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun C-V ölçümleri 1 MHz frekans altında, yine gürültüyü en aza indirebilmek için Janis vpf-475 kriyostat kullanılarak 10<sup>-2</sup> mbar basınç altında ve oda sıcaklığında (300 K) gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL SONUÇLAR

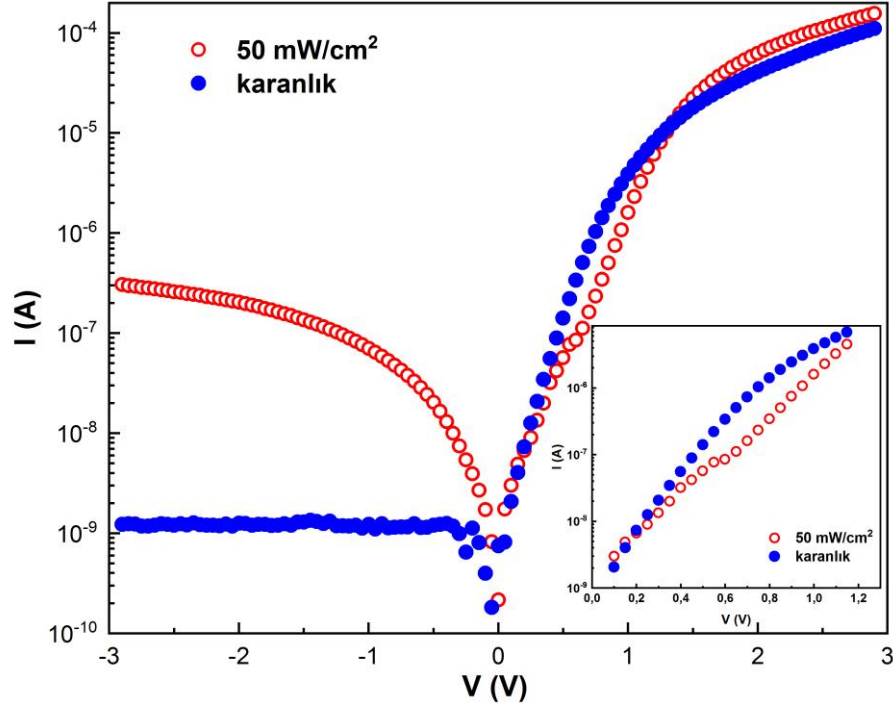
#### 4.1. GİRİŞ

Bu bölümde, hazırlanan Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotların elektriksel ve fotodiyot karakteristikleri akım-voltaj (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri kullanılarak incelendi ve elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar ile verildi. Alınan deneysel ölçümler karanlık ve 50 mW/cm<sup>2</sup> ışık altında oda sıcaklığında gerçekleştirildi. I-V ölçümleri ± 3 V aralığında 50 mV' luk adımlarla ve C-V ölçümleri ise ± 4 V aralığında 0.1 V' luk adımlarla 1MHz frekansta alındı. İlk olarak, Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS tipi foto diyotların temel elektriksel parametreleri (sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_{B0}$ ), idealite faktörü (n), ters doyum akımı ( $I_0$ ), seri direnç ( $R_s$ ) ve kısa devre direnci ( $R_{sh}$ )) I-V ölçümleri kullanılarak elde edildi. C-V ölçümleri kullanılarak da diyotun difüzyon potansiyeli ( $V_D$ ), Fermi enerji seviyesi ( $E_F$ ), tüketim tabakasının kalınlığı ( $W_D$ ), katkılanan alıcı atomlarının yoğunluğu ( $N_A$ ) ve potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ) gibi temel elektriksel parametreleri elde edildi. Ölçümlerden elde edilen sonuçlar literatür ile kıyaslamalı olarak incelendi. Buna ek olarak arayüzey tabakasının (SiO<sub>2</sub>) ve yapının direncinin elektriksel parametreler üzerinde etkisi araştırıldı.

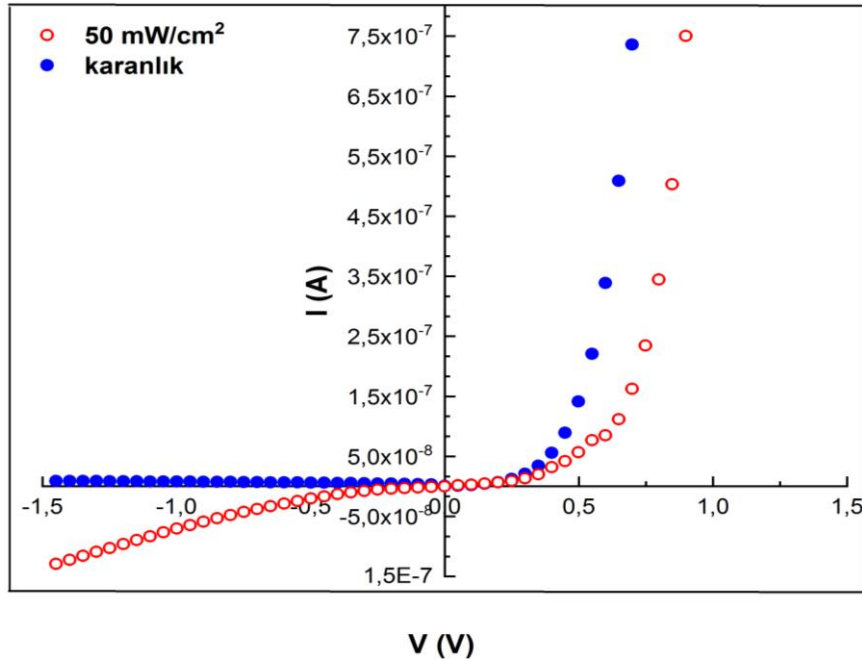
#### 4.2. KARANLIK VE IŞIK ALTINDA AKIM-VOLTAJ (I-V) VE KAPASİTANS-VOLTAJ (C-V) KARAKTERİSTİKLERİ

Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için yarı-logaritmik akım-voltaj (I-V) ölçümleri karanlık ve 50 mW/cm<sup>2</sup> ışık şiddeti için oda sıcaklığında elde edilerek Şekil 4.1' de verildi. Ayrıca diyotun fotonik davranışını daha iyi görebilmek için I-V eğrilerini ± 1.5 V aralığında çizilerek Şekil 4.2' de verildi. Şekil 4.1' den görüldüğü gibi ışık altında sızıntı akım değerinin arttığı görüldü. Diyota ışık uygulandığında M/S eklem bölgesinde daha çok sayıda elektron-hol çiftinin oluştuğu için akım değerlerindeki bu

değişim gözlenir. Buna ek olarak tüketim bölgesinde uygulanan ışığın şiddetine bağlı olarak daha fazla tuzaklanmış yüklerin uyarılması ve bu yüklerin sızıntı akımına katkı sağlaması olarak açıklanmaktadır [31].



Şekil 4.1. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için yarı logaritmik I-V eğrileri.



Şekil 4.2. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için I-V eğrileri.

İdealite faktörünün 1' den büyük ve seri direncin ( $R_s$ ) mevcut olması durumunda bir MIS tipi foto diyot için akım-voltaj ilişkisi Eş. 4.1' de verildi [9,21].

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

Burada V diyot üzerine uygulanan gerilim, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık ve  $IR_s$  terimi ise foto diyotun seri direnci üzerine düşen voltajdır. Eş. 4.1' deki ters doyma akımı olan  $I_o$  Eş. 4.2' de verildi [9,21].

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

Eş.4.2' de  $\Phi_{Bo}$  M/S arayüzeyinde oluşan sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği, A ( $=7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ) diyotun doğrultucu kontak alanı ve  $A^*$  ( $=32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ , p-tipi Si için) etkin Richardson sabitidir [3]. Buna göre Eş. (4.2), Eş. (4.1)' de yerine yazılırsa ve  $R_s$  etkisi ihmal edildiğinde Eş. 4.1.

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Eş.4.3' te  $V_D$  foto diyot üzerine düşen voltajdır ve Eş.4.4 ile verilir.

$$V_D = V - IR_s \quad (4.4)$$

Foto diyotlarda, ileri voltaj  $\ln(I)$ -V eğrisi düşük gerilim ( $V \leq 0,1 \text{ V}$ ) bölgesi (I. bölge), orta gerilim ( $0,1 < V < 0,6 \text{ V}$ ) bölgesi (II. bölge) ve yüksek gerilim ( $V > 0,6 \text{ V}$ ) bölgesi (III. bölge) olmak üzere üç farklı bölgeye sahiptir. Kaçak akımların etkin olduğu I. Bölgede lineer davranış gözlenmez. Seri dirençten dolayı III. Bölgede bükülme meydana gelir. Foto diyotun temel diyot parametrelerinin elde edildiği II. Bölge lineer davranış sergiler. Bu lineer davranış gösteren eğri denklemi Eş.4.5' te verildi.

$$\ln(I) = \ln(I_o) + \frac{q}{nkT} V_D \quad (4.5)$$

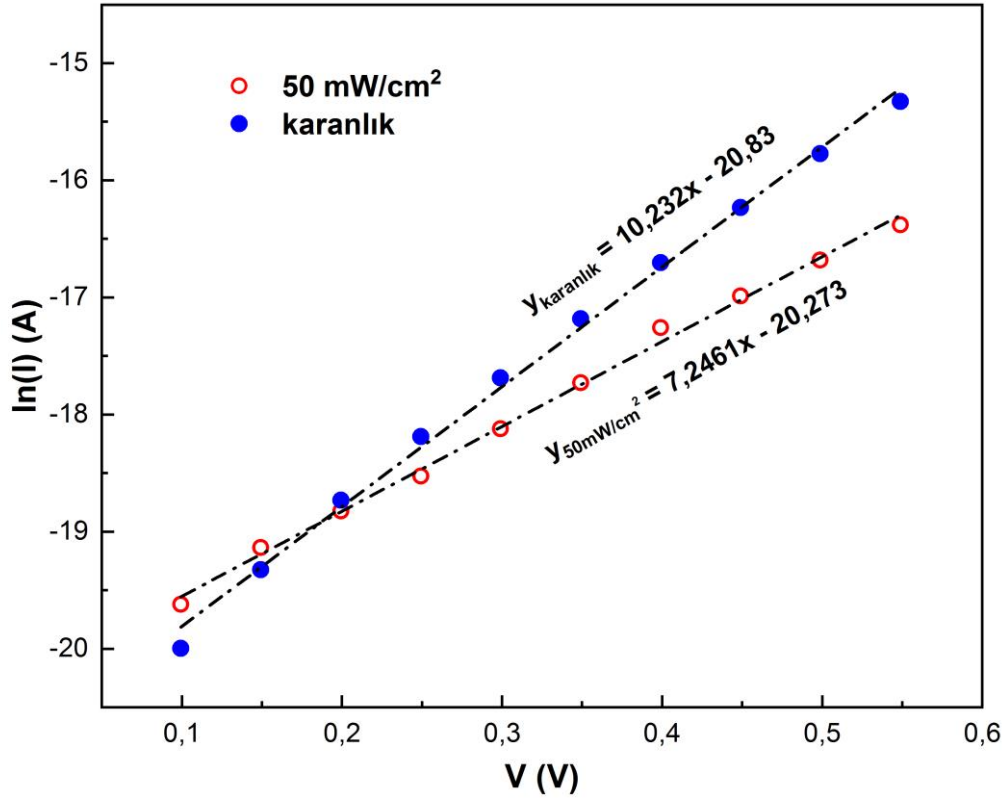
Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için ileri voltaj ln(I)-V eğrileri Şekil 4.3' te verildi. Eş.4.6 ve ln(I)-V doğrusunun eğimi kullanılarak hem karanlık hem de ışık altında foto diyotun idealite faktörü değerleri elde edildi.

$$n = \frac{q}{kT \tan \theta} \quad (4.6)$$

Foto diyotun diğer önemli parametrelerinden biri olan I<sub>o</sub> doyma akımı hem karanlık hem de ışık altında Şekil 4.3' te verilen doğruların sıfır voltaja extrapole edilmesiyle elde edildi. Foto diyotun Φ<sub>B0</sub> sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği Eş.4.7 kullanılarak hem karanlık hem de ışık altında elde edildi.

$$\Phi_{B_0} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{AA^*T^2}{I_o} \right) \quad (4.7)$$

Hem karanlık hem de ışık altında elde edilen I<sub>o</sub>, n ve Φ<sub>B0</sub> değerleri Çizelge 1' de verildi. Işık altında Φ<sub>B0</sub> değeri azalırken I<sub>o</sub> ve n değerlerinin arttığı Çizelge 1' den açıkça görülmektedir. Foto diyotun hem karanlık hem de ışık altındaki n değerlerinin idealden saptığı görüldü. n değerlerinin 1' den büyük olması M/S arayüzeyinde oluşan SiO<sub>2</sub> tabaka ile potansiyel engel yüksekliğinin biçimi, homojensizliği ayrıca arayüzey durumlarına atfedilebilir [21]. Ek olarak ışık altında doğrultma oranının (RR=I<sub>F</sub>/I<sub>R</sub>) azaldığı görüldü.



Şekil 4.3. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için ln(I)-V eğrileri.

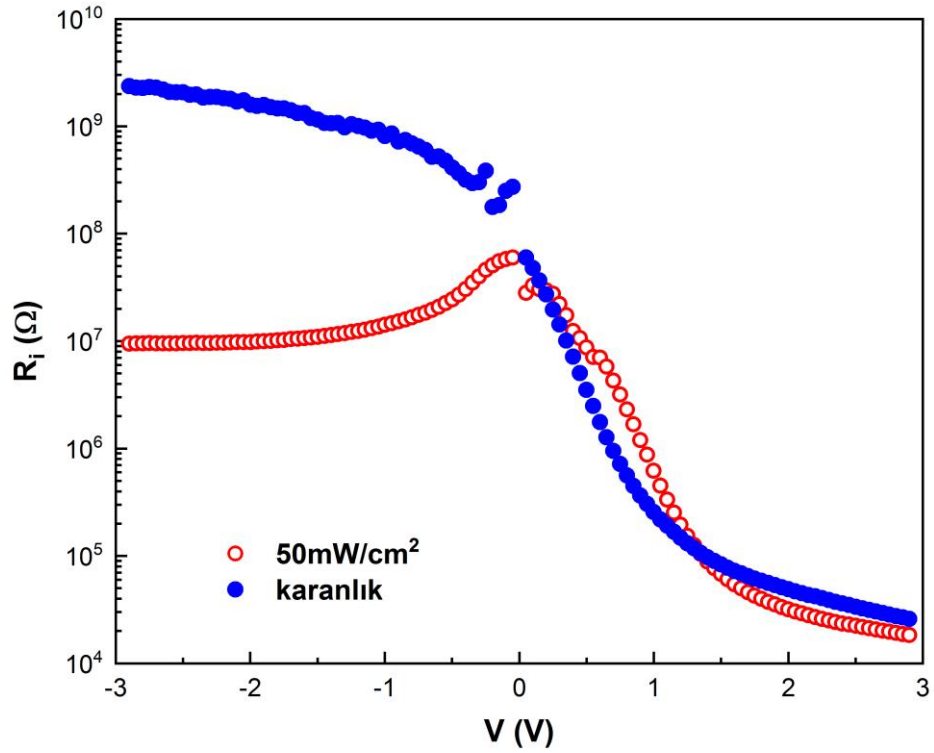
Çizelge 4.1. Akım-voltaj ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri.

	$I_0$ (A)	n	$\Phi_{Bo}$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	RR
<b>Karanlık</b>	$8,99 \times 10^{-10}$	3,812	0,771	$2,45 \times 10^4$	$2,36 \times 10^9$	$9,63 \times 10^4$
<b>50 mW/cm<sup>2</sup></b>	$1,57 \times 10^{-9}$	5,382	0,757	$1,77 \times 10^4$	$9,51 \times 10^6$	$5,38 \times 10^2$

Seri direnç ( $R_s$ ) ve şönt direnci ( $R_{sh}$ ) parametreleri, diyotun kalitesini ve performansını oldukça etkiler. Diyotlara uygulanan voltaj, seri direnç ve tüketim tabakası tarafından paylaşılır. Bundan dolayı bu parametreler diyotun kalitesini ve performansını oldukça etkiler [21]. İdeal bir diyot için seri direnç değeri sıfır şönt direnci ise  $<10^9$  olduğu varsayılır fakat bu durum pratikte farklıdır. Diyotun seri direncini belirlemek için literatürde yaygın olarak kullanılan metotlardan bazıları şunlardır; Ohm Yasası, Cheung ve Cheung metodu [42] ve Norde metodu [43]. Bu metotların hepsi, elde edilen  $R_s$  değerlerinin daha güvenilir ve karşılaştırılabilir olması için kullanıldı.



İlk olarak, Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için yapının direnci (R<sub>i</sub>) karanlık ve ışık altında Ohm yasası kullanılarak hesaplandı. Direnç değişimi, ±3 V aralığında 50 mV' luk adımlarla Şekil 4.4' te gösterildi. R<sub>i</sub>-V eğrileri voltaja ve ışığa bağlı olarak değişim gösterdi. Yapının direnç eğrilerinde (Şekil 4.4' te) +3 V (yüksek pozitif voltaj)' taki değeri diyotun seri direncini (R<sub>s</sub>) verirken, -3 V (yüksek negatif voltaj)' daki diyotun kısa devre direncini (R<sub>sh</sub>) verir. Diyotun R<sub>s</sub> ve R<sub>sh</sub> değerleri Çizelge 1' de verildi. Şekil 4.4' ten elde edilen seri direnç değerleri R<sub>s</sub> (karanlık) =2,45x10<sup>4</sup> Ω ve R<sub>s</sub> (ışık) =1,77x10<sup>4</sup>Ω olarak, şönt direnci ise R<sub>sh</sub> (karanlık) =2.36x10<sup>9</sup> Ω ve R<sub>sh</sub> (ışık) =9,51x10<sup>6</sup> Ω olarak bulundu. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun R<sub>s</sub> ve R<sub>sh</sub> değerlerinin ışık altında azaldığı görüldü. Valans bandı ve yasak enerji aralığındaki tuzaklarda bulunan taşıyıcıların çoğu ( $hc/q\lambda > E_g$  durumunda) iletim bandına geçerek iletkenliği (G) artırdığı için foto diyotun direnci (R=1/G) beklenildiği gibi azalacaktır [21].



Şekil 4.4. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS tipi foto diyot için R<sub>i</sub>-V eğrileri.

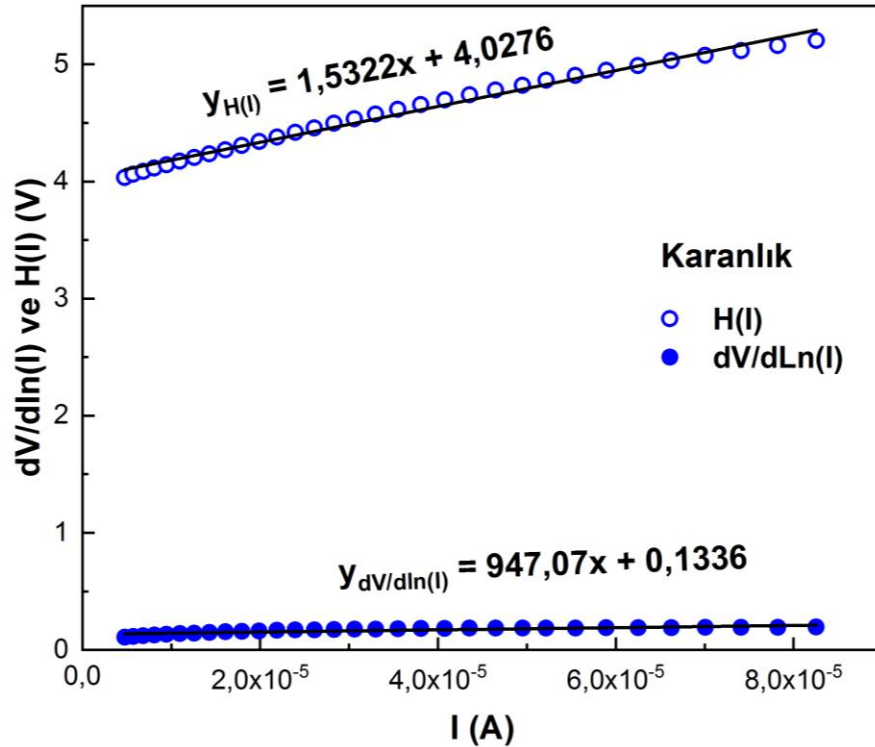
İkinci olarak Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için R<sub>s</sub> değerleri Cheung ve Cheung metodu (Eş. 4.9 ve 4.10) kullanılarak hesaplandı [42]. Cheung ve Cheung metodunda,

$R_s$  değerleri hesaplanırken ileri voltaj bölgesindeki akım değerlerinin bükülmeye başladığı noktadan itibaren etkili olduğu için ileri pozitif voltaj bölgesi alınır.

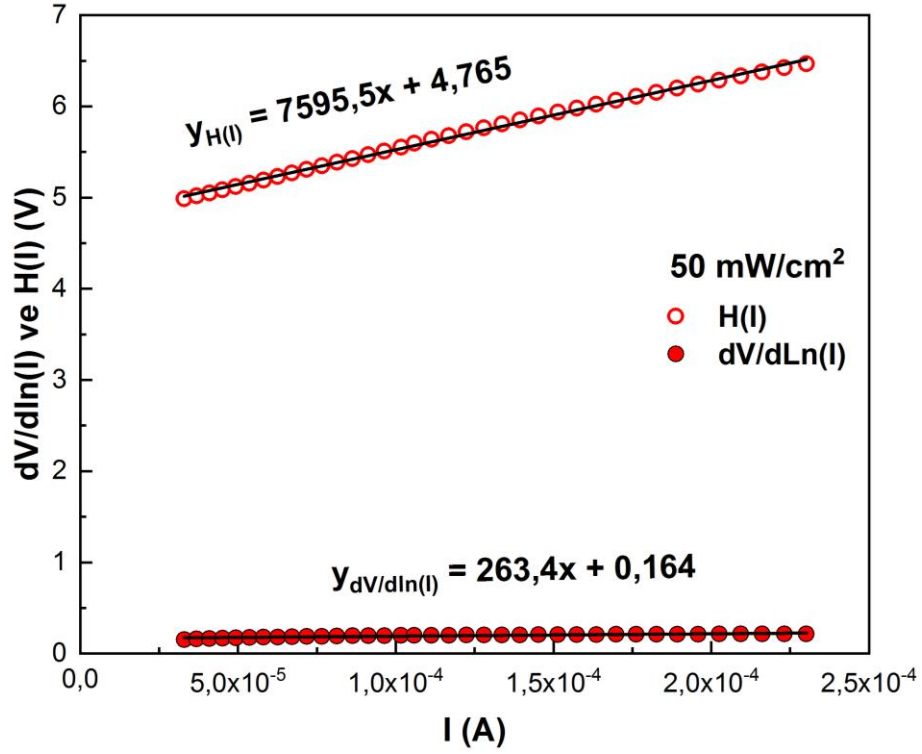
$$\frac{dV}{d \ln(I)} = n_{(Cheung)} \frac{kT}{q} + R_s I \quad (4.8)$$

$$H(I) = V - n \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_{B(Cheung)} + R_s I \quad (4.9)$$

Diyotun  $dV/d \ln(I)$ -I ve  $H(I)$ -I eğrileri karanlık için Şekil 4.5 ve ışık için Şekil 4.6' da verildi. Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen eğrilerin lineer bir doğru verdiği gözlemlendi. Foto diyotun  $R_s$  değerleri doğruların eğiminden elde edildi. Cheung fonksiyonlarından elde edilen  $R_s$  değerlerinin literatüre uygun olarak ışık altında azaldığı görüldü. Ayrıca,  $dV/d \ln(I)$ -I eğrisinin kesişim noktasından ( $n_{(Cheung)}kT/q$ ) diyotun idealite faktörü,  $H(I)$ -I eğrisinin kesişim noktasından diyotun potansiyel engel yüksekliği hesaplandı. Elde edilen bütün parametreler Çizelge 2' de verildi. Çizelge 2' den görüldüğü gibi ışık altında  $n$  değeri artarken,  $\Phi_{B(Cheung)}$  değeri azalmaktadır.



Şekil 4.5. Karanlık altında Cheung fonksiyonları.



Şekil 4.6. Işık altında Cheung fonksiyonları.

Çizelge 4.2. Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri.

	dV/dln(I)		H (I)	
	$R_s (dV/dln(I)) (\Omega)$	$n(\text{Cheung})$	$R_{s(H(I))} (\Omega)$	$\Phi_{B(\text{Cheung})} (eV)$
<b>Karanlık</b>	$9,47 \times 10^2$	5,360	$1,53 \times 10^4$	0,752
<b>50 mW/cm<sup>2</sup></b>	$2,63 \times 10^2$	6,560	$7,60 \times 10^3$	0,726

Üçüncü olarak Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için  $R_s$  değerleri Norde metodu [43] kullanılarak hesaplandı. Diyotun  $n$  değeri büyük olduğu zaman ( $n > 2$ ) Bohlin tarafından geliştirilen modifiye edilmiş Norde fonksiyonu Eş. 4.10' da verildi [44].

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.10)$$

Bu eşitlikte  $\gamma$  ( $n < \gamma$  keyfi bir değer) boyutsuz bir tamsayıdır. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için  $F(V)$ - $V$  eğrisi karanlık ve ışık altında Şekil 4.7' de verildi.  $R_s$ ' den

dolayı Eş. 4.10' dan elde edilen eğri bir minimum noktasından geçmektedir. (Şekil 4.7' de de açıkça görülmektedir).

$$R_s = \frac{(\gamma - n)kT}{qI_m} \quad (4.11)$$

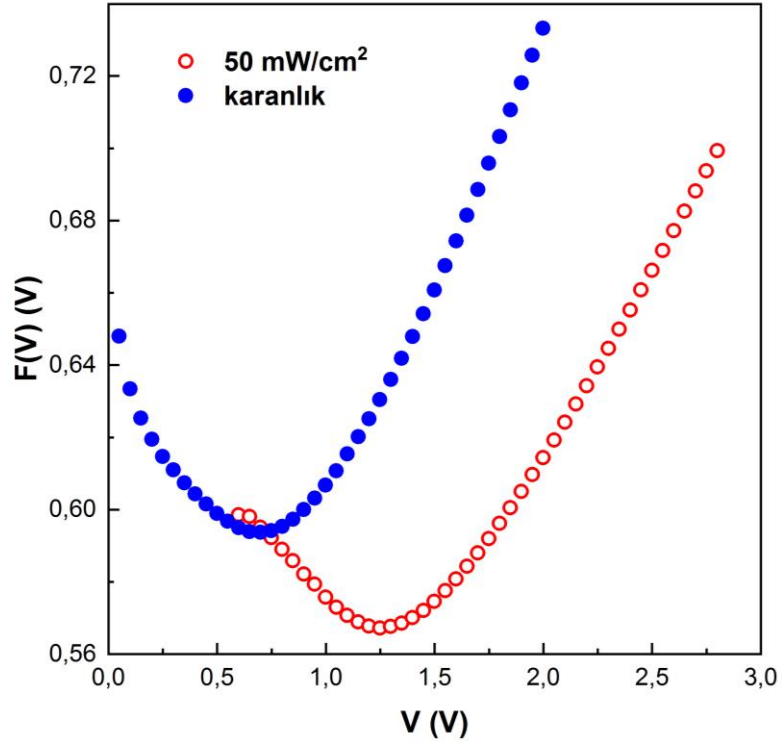
$$\Phi_{B(Norde)} = F(V_m) + \frac{V_m}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.12)$$

Eş. 4.11 ve Eş. 4.12' de bulunan  $V_m$ , minimum noktasına karşılık gelen voltaj ve  $I_m$  ise minimum noktasına karşılık gelen akım değeridir. Eş. 4.11' de bulunan  $n$  değeri  $\ln(I)$ - $V$  eğrisinden elde edilen Çizelge 4.1' de verilen değerdir. Norde metodu kullanılarak elde edilen bu parametreler Çizelge 4.3' de verildi. Çizelge 4.3' ten de görüldüğü gibi elde edilen  $R_s$  değerleri ışık altında azalmaktadır.

Çizelge 4.3. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS tipi foto diyot için Norde metodundan elde edilen parametreler.

	$I_m$ (A)	$V_m$ (V)	$F(V_m)$ (V)	$\Phi_{B(Norde)}$ (eV)	$R_{s(Norde)}$ ( $\Omega$ )
<b>Karanlık</b>	$7,36 \times 10^{-7}$	0,70	0,594	0,700	$5,36 \times 10^4$
<b>50 mW/cm<sup>2</sup></b>	$8,10 \times 10^{-6}$	1,25	0,567	0,708	$6,88 \times 10^3$

Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için üç metottan elde edilen idealite faktörü, potansiyel engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin birbirleriyle tutarlı olduğu görüldü.



Şekil 4.7. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için F (V)-V eğrileri.

MIS tipi Schottky/foto diyotlarda metal/yarıiletken ara yüzündeki yalıtkan tabakasının kalınlığı 25 Å' dan büyük olduğu zaman arayüzey durumları tamamıyla yarıiletkenin denetimindedir [1]. Bu diyotlar için enerjiye ( $E_{ss}-E_v$ ) bağlı arayüzey durumlarının yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) Eşit. 4.13 yardımıyla pozitif akım değerleri kullanılarak elde edilir [9,21,45].

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[ \frac{\varepsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right] \quad (4.13)$$

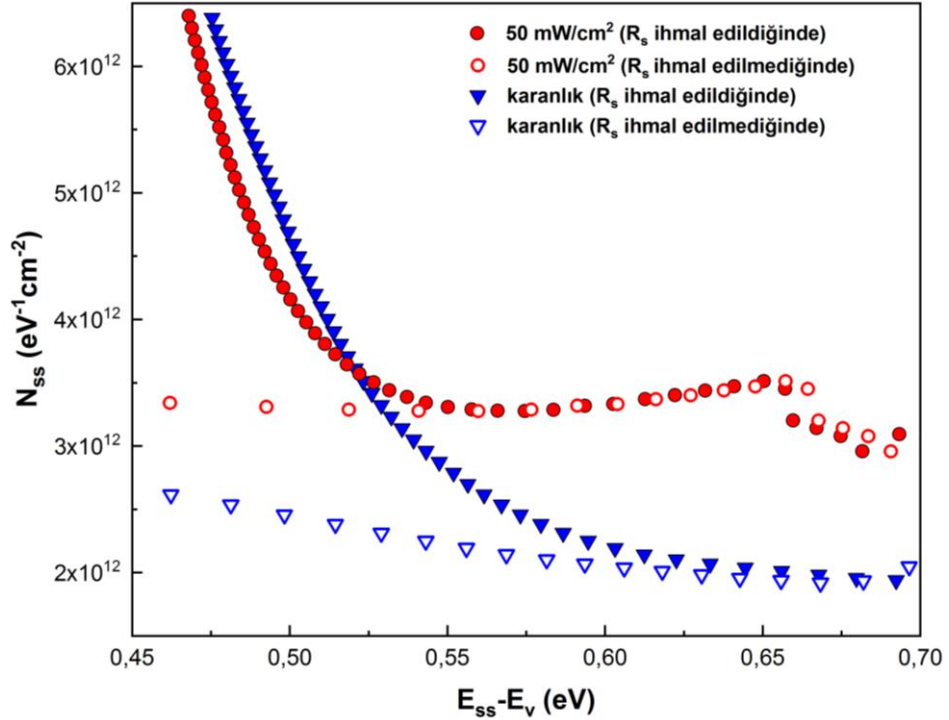
Burada  $\varepsilon_s$  (p-Si için  $11.8\varepsilon_0$ ) yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $\varepsilon_i$  (p-Si için  $3.8\varepsilon_0$ ) arayüzey yalıtkan tabakanın dielektrik sabitidir [21]. Diyotun tüketim tabakasının genişliği  $W_D$  ters voltaj kapasitans ölçümlerden elde edilir ve  $\delta$  ( $=30 \text{ \AA}$ ) arayüzey tabakasının kalınlığıdır.

Arayüzey durumlarının enerjisi p-tipi yarıiletkenler için  $E_{ss}$  ve yarıiletken yüzeyinin valans bandının üst kenarı arasındaki enerji farkı [9,21,45].

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (4.14)$$

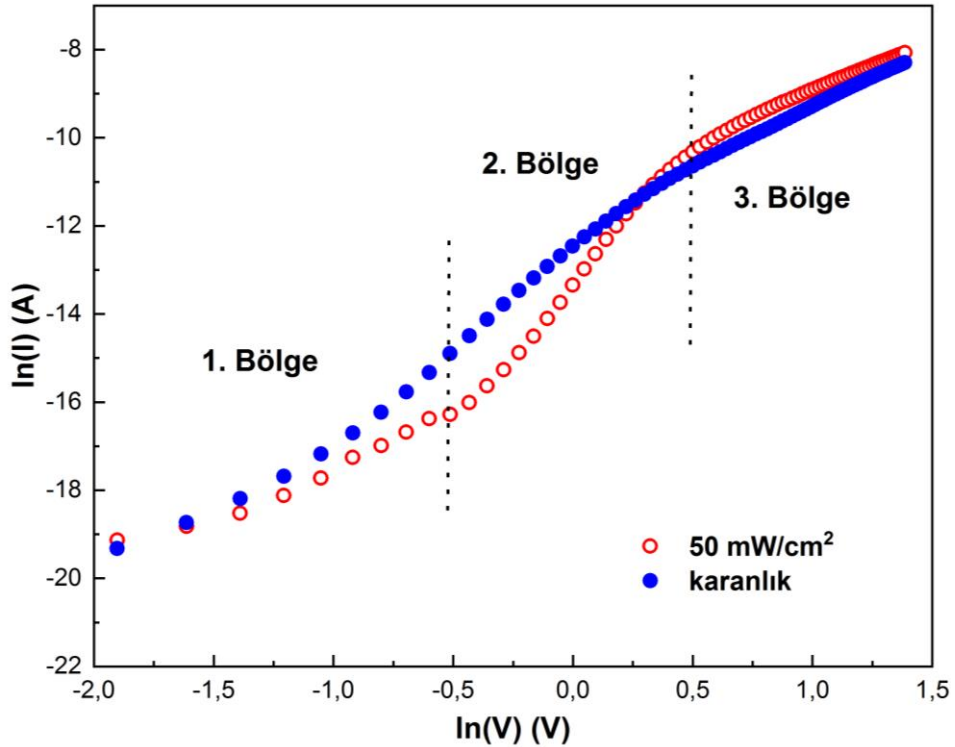
şeklinde verilir.

Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için N<sub>ss</sub> değerleri E<sub>ss</sub>-E<sub>v</sub> enerjisi ve gerilime bağlı engel yüksekliğinin (Φ<sub>e</sub>) dikkate alınarak hesaplandı ve Şekil 4.9' da verildi. Buna ek olarak R<sub>s</sub>' nin arayüzey durumlarının yoğunluğu üzerindeki etkisini görebilmek için R<sub>s</sub> dikkate alınarak N<sub>ss</sub> tekrar hesaplandı ve Şekil 4.8' de gösterildi. N<sub>ss</sub>-(E<sub>ss</sub>-E<sub>v</sub>) eğrilerinden görüldüğü gibi ara yüzey durumlarının yoğunluğunun, ışık altında valans bandından yasak enerji aralığının yaklaşık ortasına doğru arttığı görüldü. Bu davranış Si/SiO<sub>2</sub> arayüzeyindeki tuzaklardaki taşıyıcıların uyarılmasına atfedilebilir. Buna ek olarak R<sub>s</sub> dikkate alınarak hesaplanan N<sub>ss</sub> değerlerinin dikkate alınmadığı durumdaki N<sub>ss</sub> değerlerinden daha az olduğu görüldü. Bu durum literatüre uygun beklenen bir davranıştır. Ayrıca arayüzey durum yoğunluklarının eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup> başına 10<sup>12</sup> mertebesinde çıkması mevcut literatüre göre küçük sayılır [46]. Bu nedenle hazırlanan yapıların bir yarıiletken devresi için oldukça uygun olduğu söylenebilir. Ayrıca N<sub>ss</sub> değerleri hesaplanırken mutlaka R<sub>s</sub> etkisinin dikkate alınması gerektiği görülmektedir.



Şekil 4.8. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için N<sub>ss</sub>-(E<sub>ss</sub>-E<sub>v</sub>) eğrileri.

Akım iletim mekanizmalarının (CM) hangisi ya da hangilerinin etkili olduğunu belirlemek için diyotun ileri voltaj akım ölçümleri kullanılarak  $\ln(I)$ - $\ln(V)$  grafiği çizildi ve Şekil 4.9’ da verildi. İleri voltajda çizilen bu eğriler, uzay yük bölgesinde sınırlandırılmış akım (SCLC) olarak bilinen mekanizma tarafından kontrol edildiğini gösterir [46-49]. Şekil 4.9’ dan da görüldüğü gibi eğriler 3 farklı lineer bölgeye sahiptir. 1. bölge  $V < 0.6$  V olan düşük voltaj, 2. bölge  $0.6$  V  $\leq V < 1.6$  V aralığında orta voltaj ve 3. Bölge ise  $V \geq 1.6$  V olan yüksek voltaj bölgesi olarak adlandırıldı. 1. Bölgedeki eğim yaklaşık 1’ e eşit olduğu için bu bölgede geçerli olan mekanizma Ohm yasası ile açıklanır [46-49]. 2. Bölgede tuzak yüklerden gelen katkı fazla ve eğim 2’ den büyük olduğu için tuzak yükleriyle sınırlandırılmış akım (TCLC) mekanizması ile açıklanır [46-49]. Karanlıkta 4.70 ve ışık altında 6.59 eğim değerleri referans alınarak, akıma katkı sağlayan enjekte edilmiş taşıyıcılara ek olarak tuzaklarda bulunan taşıyıcıların da olduğu görüldü. 3. Bölgede akıma tuzak seviyelerinden bir katkı gelmediği için eğim yaklaşık 2’ ye eşit olur yani azalır ve bu bölgede tuzaklardan bağımsız uzay yük dağılım mekanizması (tuzaksız SCLC) ile açıklanır [46-49]. Yüksek voltaj bölgesinde akımın sınırlandırılması sadece  $R_s$ ’ den kaynaklanmayıp diyota uygulanan voltajın  $R_s$  ve  $SiO_2$  üzerinde paylaşılmasından kaynaklanır.



Şekil 4.9. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için  $\ln(I)$ - $\ln(V)$  eğrileri.

Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotların akım iletim mekanizmalarını belirlemek için bir başka yöntem ters voltaj bölgesinde ln(I)-V<sup>1/2</sup> grafiğini çizmektir ve Poole-Frenkel (PFE) / Schottky emisyon (SE) mekanizmaları dikkate alınarak belirlenir [50-54].

$$I_R = I_o \exp\left(\frac{\beta_{PF} V^{1/2}}{kTd^{1/2}}\right) \quad (4.15)$$

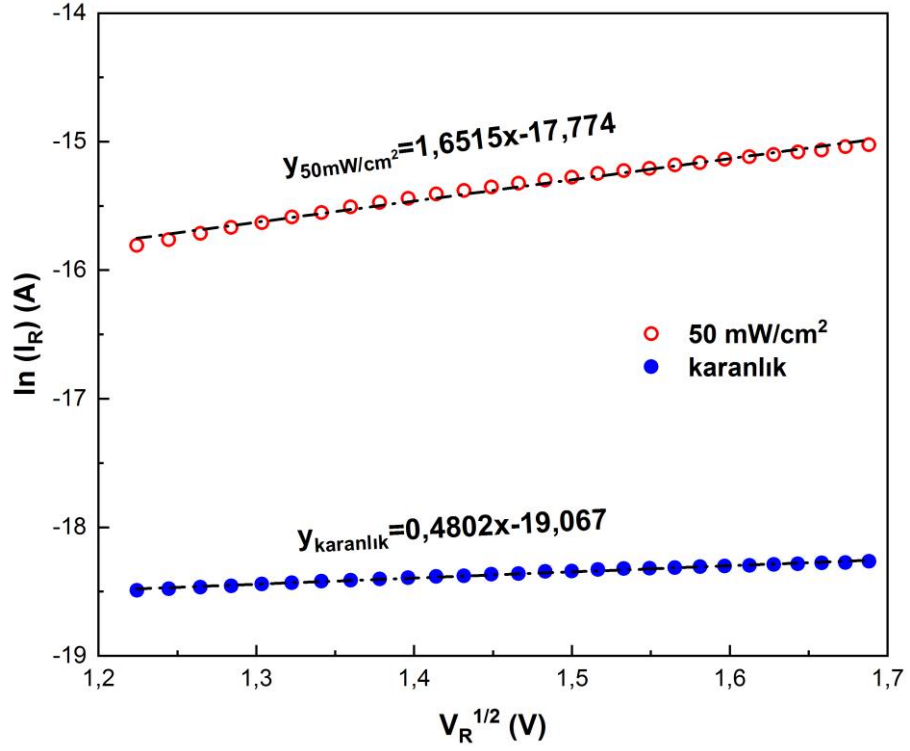
$$I_R = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-\Phi_{Bo}}{kT}\right) \exp\left(\frac{\beta_{SC} V^{1/2}}{kTd^{1/2}}\right) \quad (4.16)$$

Eşitlikteki  $\beta_{PF}$  ve  $\beta_{SC}$  sırasıyla PFE ve SE nin alan-düşürücü katsayılarıdır. Teorik olarak katsayılar arasındaki ilişki Eş.4.17 ile verilir.

$$2\beta_{SC} = \beta_{PF} = \left(\frac{q^3}{\pi\epsilon_o\epsilon_i}\right)^{1/2} \quad (4.17)$$

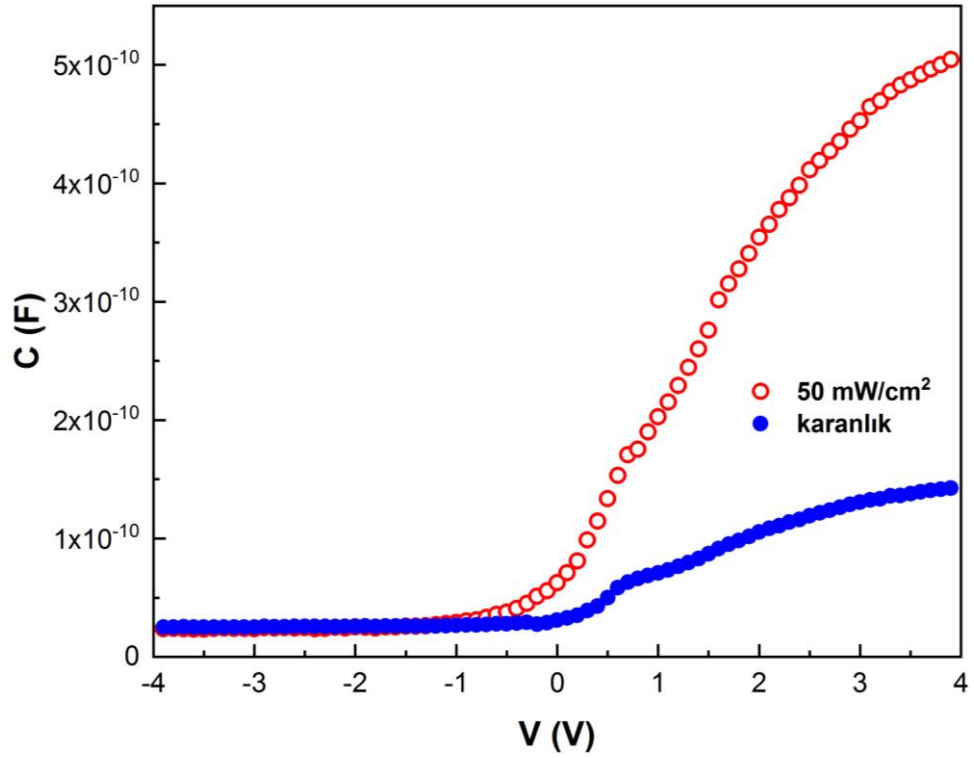
İlk olarak  $\beta_{PF}$  ve  $\beta_{SC}$  değerleri teorik olarak sırasıyla  $2,2 \times 10^{-5} \text{ eVm}^{1/2}\text{V}^{-1/2}$  ve  $1,1 \times 10^{-5} \text{ eVm}^{1/2}\text{V}^{-1/2}$  olarak hesaplandı. Şekil 4.10' da verilen  $\ln(I_R)-V_R^{1/2}$  eğrileri hem karanlıkta hem de ışık altında iyi bir lineer bölgeye sahiptir. Lineer bölgelerin eğiminden hesaplanan deneysel  $\beta_{PF}$  değeri karanlıkta  $2.15 \times 10^{-5} \text{ eVm}^{1/2}\text{V}^{-1/2}$  ve ışık altında  $7.41 \times 10^{-5} \text{ eVm}^{1/2}\text{V}^{-1/2}$  olarak hesaplandı ve deneysel değerlerin Poole-Frenkel mekanizmasının teorik değerine yakın olduğu görüldü. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotların hem karanlık hem de ışık altında SE mekanizması yerine PFE mekanizmasının etkili olduğu görüldü.





Şekil 4.10. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için  $\ln(I_R)$ - $V_R^{1/2}$  eğrileri.

Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotlarının ters ve ileri voltaj altındaki kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri Şekil 4.11’ de verildi. C-V ölçümleri 1 MHz frekansta  $\pm 4$  V aralığında 0.1 V adımlarla gerçekleştirildi. Şekil 4.11’ den de görüldüğü gibi ışık altında kapasitans değerleri artmakta ve bu değişim tüketim ve yığılma bölgesinde gerçekleşmektedir. Eğrilerde görülen yarıлма (tüketim bölgesinde) Si ile SiO<sub>2</sub> arasında ve yasak enerji aralığında lokalize olmuş arayüzey durumlarının ( $N_{ss}$ ) varlığına atfedilebilir [38,21].



Şekil 4.11. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için C-V eğrileri.

Şekil 4.12’ de verilen ve 1 MHz frekansta elde edilen C<sup>-2</sup>-V eğrileri lineer bir davranış sergilenmektedir. MIS Schottky/foto diyotlar, güneş pilleri için C<sup>-2</sup> ile V arasındaki ilişki Eş. 4.22’ deki gibi ifade edilebilir [9,21,38]:

$$C^{-2} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_o A^2 N_A} (V_o + V_R) \quad (4.18)$$

Burada A doğrultucu kontak alanı, N<sub>A</sub> alıcı katkı atomlarının yoğunluğu, V<sub>R</sub> uygulanan ters voltajdır. Şekil 4.12’ de verilen doğrunun voltaj eksenine extrapole edilmesiyle V<sub>o</sub> kurulma (built-in) voltajı bulunur. Diyotun potansiyel engel yüksekliği (Φ<sub>B</sub>) değerleri Eş. 4.24 kullanılarak elde edildi.

$$\Phi_B = V_o + \frac{kT}{q} + E_F - \Delta\Phi_B \quad (4.19)$$

Bu eşitlikte  $kT/q$  termal enerji (eV cinsinden),  $\Delta\Phi_B$  hayali kuvveti engel düşmesi ve  $E_F$  yarıiletkenin Fermi enerji seviyesidir ve sırasıyla Eş. 4.25 ve 4.26 kullanılarak elde edilir [9,21,38]:

$$\Delta\Phi_B = \left[ \frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_o} \right]^{1/2} \quad (4.20)$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln(N_V / N_A) \quad (4.21)$$

Hayali kuvvet engel düşmesindeki  $E_m$  elektrik alanı Eş.4.26' dan elde edilir.

$$E_m = \left[ \frac{2qN_A V_D}{\epsilon_s\epsilon_o} \right]^{1/2} \quad (4.22)$$

Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu ( $N_V$ ) Si için Eş. 4.27' de verildi.

$$N_V = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} (m_h^* / m_o)^{3/2} = 1,04 \times 10^{19} \quad (4.23)$$

Burada  $m_h^*/m_o=0,55$  olarak bulunur ve  $m_h^*$  deşiklerin etkin kütlesi,  $m_o$  ise elektron kütlesidir.

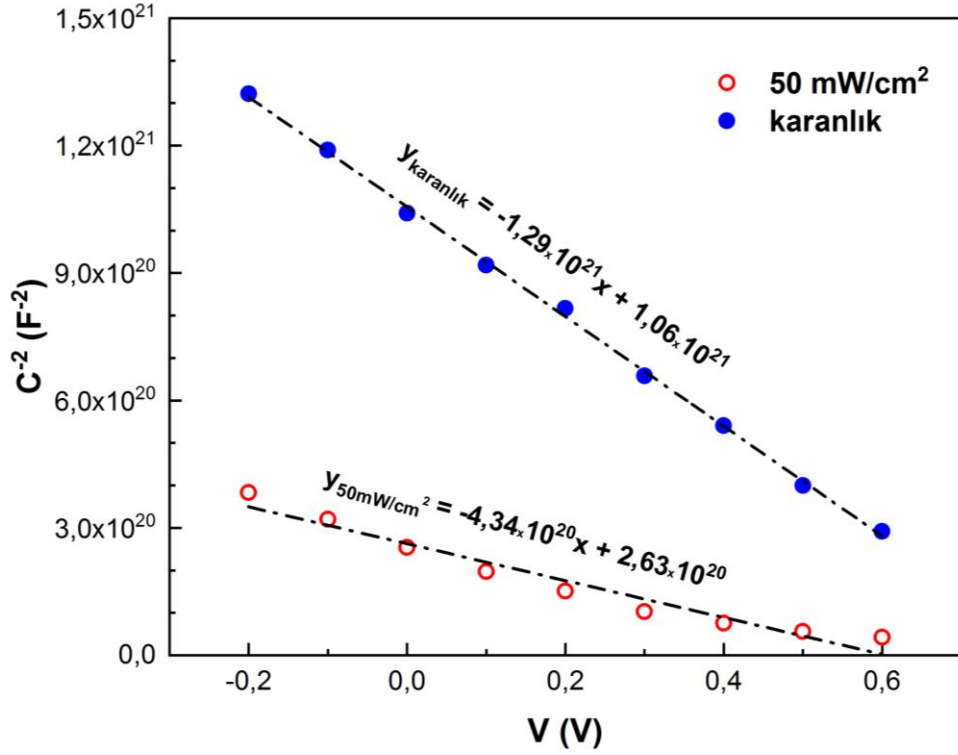
Tüketim tabakası kalınlığı ( $W_D$ ) Eş. 4.28' den elde edilir.

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_o V_D}{qN_A}} \quad (4.24)$$

C<sup>-2</sup>-V eğrilerinden elde edilen temel diyot parametreleri  $V_o$ ,  $N_A$ ,  $E_F$ ,  $\Delta\Phi_B$ ,  $W_D$  ve  $\Phi_B$  Çizelge 4.4' te verildi. Elde edilen temel diyot parametrelerinin ışığa bağlı olduğu görüldü.  $N_A$  değerinin ışık altında arttığı, diğer parametrelerin ise azaldığı Çizelge 4.4' ten açıkça görülmektedir.

Çizelge 4.4. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için temel diyot parametreleri.

	$N_A$ (cm <sup>-3</sup> )	$V_o$ (V)	$E_F$ (eV)	$\Delta\Phi_B$ (meV)	$\Phi_B$ (eV)	$W_D$ (cm)
<b>Karanlık</b>	$1,51 \times 10^{14}$	0,822	0,2786	8,73	1,117	$2,71 \times 10^{-4}$
<b>50 mW/cm<sup>2</sup></b>	$4,48 \times 10^{14}$	0,606	0,2513	10,65	0,872	$1,36 \times 10^{-4}$



Şekil 4.12. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için  $C^{-2}$ - $V$  eğrileri.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hazırlanan Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotların elektriksel özellikleri akım-voltaj ve kapasitans-voltaj ölçümleri kullanılarak karanlık ve 50 mW/cm<sup>2</sup> ışık altında oda sıcaklığında incelendi. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotun akım-voltaj ölçümleri Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı, kapasitans-voltaj ölçümleri Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analizörü kullanılarak alındı. Bu tez çalışmasında foto diyotun temel elektriksel parametrelerinin ışık etkisi ile nasıl değiştiği incelendi.

I-V ve C-V ölçümlerinden elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- Işık altında M/S eklem bölgesinde daha çok sayıda elektron-hol çiftleri oluştuğu için akım değerlerinin ışık altında arttığı görüldü.
- Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS tipi foto diyot için ileri voltaj ln(I)-V eğrileri kullanılarak  $n$ ,  $\Phi_{B0}$  ve  $I_0$  değerleri elde edildi. Işık altında  $\Phi_{B0}$  değeri azalırken  $I_0$  ve  $n$  değerlerinin arttığı görüldü. Yani ışık altında foto diyot ideal davranıştan uzaklaşmakta ve elektronlar gelen fotonların enerjisini soğurarak daha düşük bir bariyer yüksekliğini aşmak zorunda kalmaktadır.
- Foto diyotun hem karanlık hem de ışık altındaki  $n$  değerlerinin 1' den büyük olduğu yani idealden saptığı görüldü.  $n$  değerlerinin 1' den büyük olması engel homojensizliklerine, foto diyotun seri direncine, SiO<sub>2</sub> arayüzey tabakasının varlığına ve SiO<sub>2</sub>/Si arayüzeyindeki arayüzey durumlarının özel bir dağılımına atfedilebilir [21].
- Karanlıkta doğrultma oranı  $9,63 \times 10^4$  iken ışık altında bu değer  $5,38 \times 10^2$  olarak elde edildi.

- Foto diyotun seri direnç değeri 3 farklı metod kullanılarak elde edildi (ohm yasası, Cheung ve Cheung metodu ve Norde metodu)
- Ohm yasası kullanılarak foto diyotun voltaja bağlı direnç değeri hem karanlık hem de ışık için elde edildi. Diyotun seri direnç değeri karanlıkta  $2.45 \times 10^4 \Omega$  ışık altında  $1.77 \times 10^4 \Omega$  olarak elde edildi. Işık altında diyotun iletkenliği arttığı için  $R_s$  değerlerinin azalması beklenen bir davranıştır.
- I-V değerlerinin ileri pozitif voltaj bölgesinde meydana gelen bükülme seri dirençten kaynaklandığı için bu bölgeden Cheung ve Cheung metodu kullanılarak foto diyotun  $R_s$  değeri hesaplandı. Bu metod kullanılarak elde edilen  $R_s$  değerlerinin beklenildiği gibi ışık altında azaldığı gözlemlendi.
- Cheung ve Cheung metodu kullanılarak ayrıca diyotun idealite faktörü ve potansiyel engel yüksekliği değeri hesaplandı.  $n$  değerlerinin ışık altında arttığı  $\Phi_{B(\text{Cheung})}$  değerlerinin azaldığı gözlemlendi.
- Norde metodu kullanılarak elde edilen  $R_s$  değeri karanlıkta  $5,36 \times 10^4 \Omega$  iken ışık altında  $6,88 \times 10^3 \Omega$  olarak bulundu.
- Üç farklı metod kullanılarak ışığa bağlı değişimleri elde edilen seri direnç değerlerinin birbirleriyle uyum içinde olduğu görüldü.
- Işık altında tuzaklanmış yük seviyelerinden salınan yük taşıyıcıları akıma daha fazla katkı sağlar. Bu yüzden foto diyot üzerine düşürülen ışığın arayüzey durumlarının yoğunluğunun artmasına neden olduğu görüldü.
- Diyotta enerjiye bağlı arayüzey durumlarını hesaplanırken seri direnci dikkate almak gerekir. Beklenildiği gibi seri direnç dikkate alınarak hesaplanan  $N_{ss}$  değerlerinin dikkate alınmadığı durumdan daha düşük olduğu görüldü.

- İleri voltaj akım ölçümleri kullanılarak SCLC akım iletim mekanizmasının etkili olduğu görüldü.
- Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyot için ters voltaj akım ölçümleri dikkate alınarak Poole-Frenkel (PFE) mekanizmasının etkili olduğu görüldü.
- Foto diyotun C-V eğrileri terslenim, tüketim ve yığılma bölgelerinden oluşmaktadır. Ayrıca C değerleri ışık altında artmaktadır.
- Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotların ters voltaj bölgesinde C<sup>-2</sup>-V eğrileri geniş bir voltaj aralığında lineer davranış sergilediği görüldü. Bu eğriler kullanılarak V<sub>o</sub>, N<sub>A</sub>, E<sub>F</sub>, W<sub>D</sub> ve Φ<sub>B</sub> gibi temel diyot parametreleri elde edildi. N<sub>A</sub> değerinin ışık altında arttığı, diğer parametrelerin ise azaldığı görüldü.

Sonuç olarak, hazırlanan Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotların hem I-V hem de C-V ölçümleri kullanılarak elde edilen temel diyot parametrelerinin ışığa ve voltaja oldukça bağlı olduğu görüldü.

Işık altında alınan ölçümlerden elde edilen sonuçların bu ve benzeri konularda çalışacak olan araştırmacılara yol göstermesi açısından verilebilecek öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotlar son derece temiz laboratuvar ortamında hazırlanması
- Üretilen foto diyotlar hakkında daha fazla araştırma yapabilmek için frekans, radyasyon ve sıcaklık etkisi incelenmesi.
- Foto diyotun I-V ve C-V karakteristikleri incelenmeden önce SEM, XRD, FTIR gibi analizlerin yapılması.
- Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) tipi foto diyotu SiO<sub>2</sub> arayüzey tabaka kalınlığı değiştirilerek elektriksel ölçümler üzerinde etkisinin incelenmesi.

- Yine farklı katkı malzemeleri kullanılarak temel diyot parametreleri üzerinde nasıl bir değişikliğe sebep olduğu gözlenmesi.



## KAYNAKLAR

1. Çavaş, M., “Nano yapılı metal oksit yarıiletkenler kullanılarak foto diyotların üretilmesi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2011).
2. Kocyigit, A., Karteri, İ., Orak, İ., Uruş, S., and Çaylar M. “The structural and electrical characterization of Al/GO-SiO<sub>2</sub>/p-Si photodiode” *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 103:452-458 (2018).
3. Al-Hardan, N. H., Jalar, A., Abdul Hamid, M. A., Keng, L. K., Ahmed, N. M., and Shamsudin, R., “A wide-band UV photodiode based on n-ZnO/p-Si heterojunctions”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 207: 61-66 (2014).
4. Yakuphanoglu, F., Caglar, Y., Caglar, M., and Ilıcan, S., “ZnO/p-Si heterojunction photodiode by solgel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13 (3): 137-140 (2010).
5. Luo, L., Zhang, Y., Mao, S. S., and Lin, L., “Fabrication and characterization of ZnO nanowires based UV photodiodes”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 127 (2): 201-206 (2006).
6. Yildiz, A., Uzun, S., Serin, N., and Serin, T., “Influence of grain boundaries on the figure of merit of undoped and Al, In, Sn doped ZnO thin films for photovoltaic applications”, *Scripta Materialia*, 113: 23-26 (2016).
7. Sah, C.-T., “Fundamentals of Solid State Electronics”, *World Scientific Publishing Company*, (1991).
8. Tyagi, M. S., “Physics of Schottky barrier junctions”, Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications, *Springer*, 1-60 (1984).
9. Sze, S.M., K. Ng Kwok, “Physics of Semiconductor Devices 3<sup>rd</sup> ed.”, *John Wiley & Sons*, New Jersey, 362-390 (2007).
10. Crowell, C. R. and Rideout, V. L., “Normalized thermionic-field (TF) emission in metal-semiconductor (Schottky) barriers”, *Solid-State Electronics*, 12 (2): 89-105 (1969).
11. Tung, R. T., “Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers”, *Applied Physics Letters*, 58 (24): 2821-2823 (1991).
12. Gülnahar, M., “Temperature dependence of current-and capacitance-voltage characteristics of an Au/4H-SiC Schottky diode”, *Superlattices and Microstructures*, 76: 394-412 (2014).

13. Song, Y. P., Van Meirhaeghe, R. L., Laflère, W. H., and Cardon, F., “On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers”, *Solid State Electronics*, 29 (6): 633-638 (1986).
14. Mönch, W., “Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities”, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 17 (4): 1867-1876 (1999).
15. Simon M, S. and Ng, Kwok K., "Physics of Semiconductor Device", *Wiley Interscience*, New Jersey, (2007).
16. Özavci, 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: Physical*, 194: 259-268 (2013).
17. Varol, S. F., Sayin, S., Eymur, S., and Uzun, K., “A theoretical scaling for rectifying and surface properties of highly-crystalline NC anthracene Schottky junctions”, *Materials Research Bulletin*, 85: 249-254 (2017).
18. Mönch, W., "Electronic Structure of Metal-Semiconductor Contacts", *Springer Science & Business Media*, (2012).
19. Rhoderick, E.H., Williams R.H., “Metal Semiconductor Contacts”, *Oxford Press*, 257-264 (1988).
20. Neamen, D.A., “Semiconductor Physics and Devices 4th ed.”, *Mc Graw-Hill*, New York, 420-450, 517-523 (2012).
21. Altındal, Ş., “Al-SiO<sub>x</sub>-P Si Aygıtların ve Güneş Pillerinin elektriksel Karakteristikleri”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1993).
22. Saad, M. and Kassis, A., “Thermally and light-activated current in ZnO/CdS/CuGaSe<sub>2</sub> single crystal solar cells”, *Renewable Energy*, 33 (5): 974-978 (2008).
23. Farag, A. A. M., Ashery, A., Ahmed, E. M. A., and Salem, M. A., “Effect of temperature, illumination and frequency on the electrical characteristics of Cu/p-Si Schottky diode prepared by liquid phase epitaxy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 495 (1): 116-120 (2010).
24. Tataroglu, A., Altındal, S., Azizian-Kalandaragh, Y., “Electrical and Photoresponse of CoSO<sub>4</sub>-PVP Interlayer Based MPS Diodes”, *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 31-14, 11665-11672 (2020).
25. Yigiterol, F., Güllü, H. H., Bayraklı, and Yıldız, D. E., “Temperature-Dependent Electrical Characteristics of Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/4H n-SiC MIS Diode”, *Journal of Electronic Materials*, 47 (5): 2979-2987 (2018).

26. Gullu, H. H., Yildiz, D. E., Kocyigit, A., and Yıldırım, M., “Electrical properties of Al/PCBM:ZnO/p-Si heterojunction for photodiode application”, *Journal of Alloys And Compounds*, 827: 154279 (2020).
27. Çetinkaya, H. G., Sevgili, Ö., and Altındal, Ş., "The fabrication of Al/p-Si (MS) type photodiode with (%2 ZnO-doped CuO) interfacial layer by sol gel method and their electrical characteristics", *Physica B:Condensed Matter*, 560: 91-96 (2019).
28. Demirezen, S. and Altındal Yerişkin, S., “A detailed comparative study on electrical and photovoltaic characteristics of Al/p-Si photodiodes with coumarin-doped PVA interfacial layer: the effect of doping concentration”, *Polymer Bulletin*, 77 (1): 49-71 (2020).
29. Klassen, S., “The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom”, *Science and Education*, 20 (7): 719-731 (2011).
30. Uslu, H., Dökme, İ., Afandiyeva, I. M., and Altındal, Ş., “Illumination effect on I-V, C-V and G/w-V characteristics of Al/TiW/Pd<sub>2</sub>Si/n-Si structures at room temperature”, *Surface and Interface Analysis*, 42 (6-7): 807-811 (2010).
31. Çiçek, O., “Polivinil Alkol Arayüzey Tabakalı Schottky Engel Diyotların Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi”, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2016).
32. Öztürk, H. H. and Kaya, D., “Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji”, *Umuttepe Yayınları*, (2013).
33. Goswami, D. Y., Kreith, F., and Kreider, J. F., “Principles of Solar Engineering”, *CRC Press*, (2000).
34. Messenger, R. A. and Abtahi, A., “Photovoltaic Systems Engineering”, *CRC Press*, (2017).
35. Imer, A.G., Kaya, E., Dere, A., Al-Sehemi, A.G., Al-Ghamdi, A.A., Karabulut, A., Yakuphanoglu, F., “Illumination Impact on the Electrical Characteristics of Au/Sunset Yellow/n-Si/Au Hybrid Schottky Diode”, *Journal of Material Science-Materials in Electronics*, 31 (17): 14665-14673 (2020).
36. Yakuphanoglu, F., “Transparent metal oxide films based sensors for solar tracking applications”, *Composites Part B: Engineering*, 92: 151-159 (2016).
37. Cowley, A. M., and Sze, S. M., "Surface states and barrier height of metal-semiconductor system", *Journal of Applied Physics*, 36 (10): 3212 (1965).
38. Kanbur, H., “Yalıtkan tabakalı Al/p-Si Schottky diyotlarda elektriksel karakteristiklerin sıcaklığa bağlı incelemesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2008).

39. Deniz Eygi, Z., “Production of amorphous silicon/p-type crystalline silicon heterojunction solar cells by sputtering and pecvd methods”, Doktora Tezi, **Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2011).
40. Sharma, B.L., “Physics of Schottky Barrier Junctions”, Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications, **Plenum Press**, New York and London, 1-56 (1984).
41. Ritter, K. A. and Lyding, J. W., “The influence of edge structure on the electronic properties of graphene quantum dots and nanoribbons”, **Nature Materials**, 8: 235-242 (2009).
42. Cheung, S. K. and Cheung, N.W., “Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics”, **Appl. Phys. Lett.**, 49 (2):85-88 (1986).
43. Norde, H., “A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance”, **J. Appl. Phys.**, 50 (7): 5052-5053 (1979).
44. Bohlin, K., "Generalized Norde plot including determination of the ideality factor", **Journal of Applied Physics**, 60 (3): 1223-1224 (1986).
45. Saxena, A.N., “Forward Current-Voltage Characteristics of Schottky Barrier on n-Type Silicon “, **Surface Science**, 13:151-171 (1969).
46. Taşçıoğlu, İ., “Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Yapılarda Temel Fiziksel Parametrelerin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2008).
47. Alptekin, S., Altındal, Ş. “A comparative study on current/capacitance: voltage characteristics of Au/n-Si (MS) structures with and without PVP interlayer” **Jorunal of Materials Science : Materials in Electronics** 30: 6491-6499 (2019)
48. Altındal, Ş., Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y. “A comparison of electrical parameters of Au/n-Si and Au/(CoSO<sub>4</sub>-PVP)/n-Si structures (SBDs) to determine the effect of (CoSO<sub>4</sub>-PVP) organic interlayer at room temperature” **Jorunal of Materials Science : Materials in Electronics**, 30: 9273-9280 (2019).
49. Sharma, B.L., “Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications”, **Plenum Press**, New York, 1-3 (1984).
50. Büyükbaş-Uluşan, A., Tataroğlu, A., Azizian-Kalandaragh, Y. and Koşal M., “Double-exponential current–voltage (I–V) and negative capacitance (NC) behavior of Al/(CdSe-PVA)/p-Si/Al (MPS) structure” **Journal of Materials Science : Materials in Electronics**, 30: 9572-9581 (2019).
51. Riad, A.S. “Influence of dioxygen and annealing process on the transport properties of nickel phthalocyanine Schottky-barrier devices” **Physica B**, 270:148-156 (1999).

52. Buyukbaş-Uluşan, A. and Tataroğlu, A. Electrical characterization of silicon nitride interlayer-based MIS diode” *Jorunal of Materials Science:Materials in Electronics*, 31:9888-9893(2020).
53. L. Yong, W. Ling-Li, W. Xiao-Bo, Y. Ling-Ling, S. Li-Xia, T. Yong-Tao, L. Xin-Jian, “Forward and reverse electron transport properties across a CdS/Si multi-interface nanoheterojunction” *Chin. Phys. B* 23:087307 (2014).
54. Sreenu, K., Prasad, C.V. and Rajagopal Reddy V., “Barrier Parameters and Current Transport Characteristics of Ti/p-InP Schottky Junction Modified Using Orange G (OG) Organic Interlayer” *Journal of Electronics Materials*, 46:5746-5754 (2017).

## ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Mustafa USLU 1993 yılında Ankara’da doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2021 yılında Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisansını tamamladı.