

**SOL JEL SPİN KAPLAMA YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN NANO YAPILI  
METAL OKSİT FİLMLEİNİN FİZİKSEL KARAKTERİZASYONU**

**Seval AKSOY**

**DOKTORA TEZİ**

**Katıhal Fiziği Bilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR**

**Eskişehir**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Mayıs, 2017**

*Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1001F05 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Seval AKSOY'un "Sol Jel Spin Kaplama Yöntemiyle Elde Edilen Nano Yapılı Metal Oksit Filmlerinin Fiziksel Karakterizasyonu" başlıklı tezi 16/05/2017 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı - Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	:Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR	.....
Üye	:Prof. Dr. Saliha ILICAN	.....
Üye	:Prof. Dr. Evrim HÜR	.....
Üye	:Prof. Dr. Abdulmecit TÜRÜT	.....
Üye	:Prof. Dr. Gökhan SAVAROĞLU	.....

.....  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

### SOL JEL SPİN KAPLAMA YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN NANO YAPILI METAL OKSİT FİMLERİNİN FİZİKSEL KARAKTERİZASYONU

Seval AKSOY

Fizik Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, 2017

Danışman: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR

Bu çalışmada sol jel spin kaplama yöntemiyle farklı alttaşlar (cam, ITO ve p-Si) üzerine metal oksit (ZnO, CdO, TiO<sub>2</sub> ve SnO<sub>2</sub>) filmleri elde edilmiştir. Döndürme hızı, çözelti molaritesi, çözeltinin pH değeri, depolama sıcaklığı ve tavlama sıcaklığı gibi depolama ve çözelti parametrelerinin filmlerin kristallenmesi, yüzey morfolojileri ve yasak enerji aralığı değerlerinin üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmalarda X-ışını kırınım spektrumları (XRD), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) analizleri ve optik ölçümlerinden faydalanılmıştır. Ortalama kristal boyutu, örgü parametreleri ve yapılanma katsayısı gibi yapısal parametreler hesaplanmıştır. Filmlerin yüzey morfolojileri FESEM ile incelenmiştir. Optimum parametre değerleri belirlendikten sonra, belirlenen filmler kullanılarak n-XO/p-Si (X:Zn<sup>+2</sup>, Cd<sup>+2</sup>, Ti<sup>+4</sup>, Sn<sup>+4</sup>) pn heteroeklem diyotları üretilmiştir. Heteroeklem diyotların elektriksel karakterizasyonları akım-voltaj ( $I - V$ ) karakterizasyonları ile araştırılmıştır. Öncelikle p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotu üretilmiştir.  $I - V$  ölçümlerinden; diyotların idealite faktörü ( $n$ ), engel yüksekliği ( $\phi_b$ ), doyma akımı ( $I_0$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) değerleri bulunmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Metal oksit film, Sol jel spin kaplama, Yarıiletken filmlerin fiziksel özellikleri, Heteroeklem diyot.

## ABSTRACT

### PHYSICAL CHARACTERIZATION OF NANO STRUCTURE METAL OXIDE FILMS DEPOSITED BY SOL GEL SPIN COATING METHOD

Seval AKSOY

Department of Physics

Anadolu University, Graduate School of Sciences, May, 2017

Supervisor: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR

In this thesis, metal oxide (ZnO, CdO, TiO<sub>2</sub> and SnO<sub>2</sub>) films were deposited by sol gel spin coating method on different substrates (glass, ITO and p-Si). X-ray diffraction (XRD) patterns, field emission scanning electron microscope (FESEM) analysis and optical measurements were used to investigate the effect of deposition and sol parameters such as spin speed, sol molarity, pH value, deposition temperature and annealing temperature on crystallinity, surface morphology and band gap value of the films. Structural parameters such as grain size, lattice parameters and texture coefficients were calculated. Surface morphology was investigated by a FESEM. After the best-formed film parameter was determined, the pn heterojunction diodes were fabricated n-XO/p-Si (X:Zn<sup>+1</sup>, Cd<sup>+1</sup>, Ti<sup>+2</sup>, Sn<sup>+2</sup>) using this films. The electrical characterization of heterojunction diodes have been investigated by current-voltage characterization. Firstly, n-ZnO/p-Si heterojunction diode was fabricated. From the  $I - V$  results the ideality factor ( $n$ ), barrier height ( $\phi_b$ ), saturation current ( $I_0$ ) and series resistance ( $R_s$ ) of diodes have been calculated.

**Keywords:** Metal oxide film, Sol gel spin coating, Physical properties of semiconductor films, Heterojunction diode.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince araştırma imkanı sağlayan, bilgi ve birikimlerini esirgemeyen, yönlendiren, manevi destek ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında önerileriyle beni yönlendiren, bilimsel bilgi ve tecrübelerine sık sık başvurduğum, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen tez izleme jürimde bulunan Prof. Dr. Saliha ILICAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme jürimde bulunan Prof. Dr. Evrim HÜR'e desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazım aşamasında benimle birlikte o heyecanı paylaşan ve beni yalnız bırakmayan arkadaşlarım Uzm. Neslihan ŞAHİN, Arş. Gör. Özge BAĞLAYAN, Arş. Gör. Seçil ŞENTORUN, Şükrü ARDALI, Uzm. Züliyet ADIGÜZEL, Esmâ GÜNEŞ, ve M. Fatih KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince gösterdikleri sabır ve destekleri için özellikle aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Herşeyimi borçlu olduğum, her zaman yanımda olduğunu bildiğim, tez yazım aşamasında da manen yanımda olan canım annem Raziye AKSOY'a minnettarım...

*Saygılarımla*

*Seval AKSOY*

*Mayıs, 2017*

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

.....  
Seval AKSOY

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI .....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BELGESİ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
GÖRSELLER DİZİNİ .....	xx
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
1. GİRİŞ VE AMAÇ .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Metal Oksit Bileşikleri ve Genel Özellikleri.....	2
1.2.1. Çinko oksitin genel özellikleri.....	2
1.2.2. Kadmiyum oksitin genel özellikleri.....	5
1.2.3. Titanyum oksitin genel özellikleri .....	6
1.2.4. Kalay oksitin genel özellikleri.....	7
1.3. Önceki Çalışmalar .....	8
1.4. Amaç .....	20
2. TEORİK BİLGİLER.....	21
2.1. Yapısal Karakterizasyon.....	21
2.2. Morfolojik Karakterizasyon .....	26
2.3. Optik Karakterizasyon.....	29
2.3.1. Absorpsiyon katsayısının hesaplanması .....	29
2.3.2. Temel absorpsiyon olayı.....	31
2.3.2.1. İzinli doğrudan geçişler .....	31
2.3.2.2. Yasaklı doğrudan geçişler .....	32
2.3.2.3. Dolaylı bandlar arası dolaylı geçişler.....	33
2.3.2.4. Doğrudan bandlar arası dolaylı geçişler .....	36

2.3.3. Absorpsiyon yöntemi ile yasak enerji aralığının belirlenmesi.	36
2.3.4. Fotolüminesans (PL) spektroskopisi .....	37
2.3.5. Kubelka-Munk teorisi .....	42
2.4. Elektriksel Karakterizasyon .....	43
2.4.1. Metal yarıiletken kontaklar .....	43
2.4.1.1. Omik kontak .....	44
2.4.1.2. Schottky kontak .....	45
2.4.2. Akım iletim mekanizmaları .....	48
2.4.2.1. Termiyonik emisyon (TE) .....	49
2.4.2.2. Termiyonik alan emisyonu (TFE) .....	51
2.4.2.3. Alan emisyonu (FE) (Doğrudan tünelleme) .....	51
2.4.3. Space charge limited current (SCLC).....	52
2.4.4. pn heteroeklem yapılar.....	54
2.4.5. İdeal pn eklem akımı .....	62
2.4.6. Chung fonsiyonları yardımıyla diyot karakteristiği.....	63
2.4.7. Norde fonsiyonları yardımıyla diyot karakteristiği .....	64
2.4.8. Akımın sıcaklık ile değişimi ve aktivasyon enerjisi .....	65
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	68
3.1. Giriş.....	68
3.2. Sol Jel Yöntemi.....	69
3.3. Sol Jel Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları .....	70
3.4. Sol Jel Spin Kaplama Yöntemi ile Film Oluşumu .....	71
3.5. Metal Oksit (ZnO, CdO, TiO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> ) Filmlerinin Elde Edilmesi .....	73
3.5.1. Alttaşların temizlenmesi .....	73
3.5.2. ZnO filmlerinin elde edilmesi.....	75
3.5.3. CdO filmlerinin elde edilmesi .....	77
3.5.4. TiO <sub>2</sub> filmlerinin elde edilmesi .....	78
3.5.5. SnO <sub>2</sub> filmlerinin elde edilmesi.....	79
3.6. Elektriksel Ölçümler için Kontakların Oluşturulması .....	80
4. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	83
4.1. ZnO .....	83
4.1.1. ZnO filmlerinin kalınlıkları .....	83

	<u>Sayfa</u>
4.1.2. ZnO filmlerinin yapısal özellikleri .....	85
4.1.3. ZnO filmlerinin morfolojik özellikleri .....	103
4.1.4. ZnO filmlerinin optik özellikleri .....	112
4.1.5. p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun elektriksel özellikleri.....	118
4.2. CdO .....	125
4.2.1. CdO filmlerinin yapısal özellikleri .....	125
4.2.2. CdO filmlerinin morfolojik özellikleri.....	132
4.2.3. CdO filmlerinin optik özellikleri .....	136
4.2.4. p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun elektriksel özellikleri ....	138
4.3. TiO <sub>2</sub> .....	141
4.3.1. TiO <sub>2</sub> filmlerinin yapısal özellikleri .....	141
4.3.2. TiO <sub>2</sub> filmlerinin morfolojik özellikleri.....	146
4.3.3. TiO <sub>2</sub> filmlerinin optik özellikleri .....	150
4.3.4. n- TiO <sub>2</sub> /p-Si heteroeklem diyotunun elektriksel özellikleri ...	152
4.4. SnO <sub>2</sub> .....	156
4.4.1. SnO <sub>2</sub> filmlerinin yapısal özellikleri .....	156
4.4.2. SnO <sub>2</sub> filmlerinin morfolojik özellikleri .....	158
4.4.3. SnO <sub>2</sub> filmlerinin optik özellikleri.....	161
4.4.4. p-Si/n-SnO <sub>2</sub> heteroeklem diyotunun elektriksel özellikleri....	163
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	167
KAYNAKÇA .....	174
ÖZGEÇMİŞ	

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Çizelge 2.1.</b> Metal-yarıiletken kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontakların yapısı.....	44
<b>Çizelge 2.2.</b> Bazı metallerin iş fonksiyonları .....	44
<b>Çizelge 3.1.</b> ZnO filmlerinin elde edilme parametreleri .....	76
<b>Çizelge 3.2.</b> CdO filmlerinin elde edilme parametreleri .....	77
<b>Çizelge 3.3.</b> TiO <sub>2</sub> filmlerinin elde edilme parametreleri .....	78
<b>Çizelge 3.4.</b> SnO <sub>2</sub> filmlerinin elde edilme parametreleri .....	79
<b>Çizelge 4.1.</b> 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin ( <i>hkl</i> ), $2\theta$ , <i>FWHM</i> , <i>d</i> ve <i>TC</i> değerleri .....	86
<b>Çizelge 4.2.</b> 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri ( <i>a</i> ve <i>c</i> ), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri.....	86
<b>Çizelge 4.3.</b> Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin ( <i>hkl</i> ), $2\theta$ , <i>FWHM</i> , <i>d</i> ve <i>TC</i> değerleri .....	88
<b>Çizelge 4.4.</b> Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri ( <i>a</i> ve <i>c</i> ), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri.....	88
<b>Çizelge 4.5.</b> 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm’de farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin ( <i>hkl</i> ), $2\theta$ , <i>FWHM</i> , <i>d</i> ve <i>TC</i> değerleri.....	90
<b>Çizelge 4.6.</b> 0,5 molar ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaş üzerine 4000 rpm de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri ( <i>a</i> ve <i>c</i> ), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri.....	90
<b>Çizelge 4.7.</b> 0,5 molar ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaş üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de edilen ZnO filmlerinin ( <i>hkl</i> ), $2\theta$ , <i>FWHM</i> , <i>d</i> ve <i>TC</i> değerleri.....	92
<b>Çizelge 4.8.</b> 0,5 molar ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaş üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri ( <i>a</i> ve <i>c</i> ), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri.....	92

<b>Çizelge 4.9.</b>	Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşılar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin ( <i>hkl</i> ), $2\theta$ , <i>FWHM</i> , <i>d</i> ve <i>TC</i> değerleri .....	94
<b>Çizelge 4.10.</b>	Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşılar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri ( <i>a</i> ve <i>c</i> ), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri.....	94
<b>Çizelge 4.11.</b>	0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşılar üzerine 4000 rpm’de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin ( <i>hkl</i> ), $2\theta$ , <i>FWHM</i> , <i>d</i> ve <i>TC</i> değerleri .....	96
<b>Çizelge 4.12.</b>	0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşılar üzerine 4000 rpm’de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri ( <i>a</i> ve <i>c</i> ), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri.....	96
<b>Çizelge 4.13.</b>	0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşılar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin ( <i>hkl</i> ), $2\theta$ , <i>FWHM</i> , <i>d</i> ve <i>TC</i> değerleri .....	98
<b>Çizelge 4.14.</b>	0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşılar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri ( <i>a</i> ve <i>c</i> ), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri.....	98
<b>Çizelge 4.15.</b>	Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşılar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin ( <i>hkl</i> ), $2\theta$ , <i>FWHM</i> , <i>d</i> ve <i>TC</i> değerleri .....	100
<b>Çizelge 4.16.</b>	Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşılar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri ( <i>a</i> ve <i>c</i> ), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri.....	100
<b>Çizelge 4.17.</b>	Farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin ( <i>hkl</i> ), $2\theta$ , <i>FWHM</i> , <i>d</i> ve <i>TC</i> değerleri.....	102
<b>Çizelge 4.18.</b>	Farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri ( <i>a</i> ve <i>c</i> ), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri.....	102
<b>Çizelge 4.19.</b>	Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun farklı ortam sıcaklıklarındaki $\phi_b$ ve $R_s$ değerleri .....	121
<b>Çizelge 4.20.</b>	Farklı döndürme hızlarında cam alttaşılar üzerine elde edilen CdO filmlerinin $2\theta$ , <i>TC</i> , <i>FWHM</i> ve ortalama kristal boyutu değerleri .....	126
<b>Çizelge 4.21.</b>	Farklı döndürme hızlarında p-Si alttaşılar üzerine elde edilen CdO filmlerinin $2\theta$ , <i>TC</i> , <i>FWHM</i> ve ortalama kristal boyutu değerleri .....	127

<b>Çizelge 4.22.</b> Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin $2\theta$ , $TC$ , $FWHM$ ve ortalama kristal boyutu değerleri .....	129
<b>Çizelge 4.23.</b> Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin $2\theta$ , $TC$ , $FWHM$ ve ortalama kristal boyutu değerleri .....	130
<b>Çizelge 4.24.</b> Cam ve p-Si alttaşlar üzerine farklı pH değerlerinde elde edilen CdO filmlerinin ortalama kristal boyutu değerleri .....	131
<b>Çizelge 4.25.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında cam ve p-Si alttaş üzerine 5 kat elde edilen $TiO_2$ filmlerinin ortalama kristal boyutu ve örgü sabiti değerleri.....	143
<b>Çizelge 4.26.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen $TiO_2$ filmlerinin ( $hkl$ ), $2\theta$ , $FWHM$ , $d$ ve $TC$ değerleri .....	145
<b>Çizelge 4.27.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen $TiO_2$ filmlerinin ortalama kristal boyutu ve örgü sabiti değerleri.....	146
<b>Çizelge 4.28.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında cam alttaşlar üzerine elde edilen $TiO_2$ filmlerinin görünür bölgedeki ortalama $\%T$ ve $E_g$ değerleri .....	152
<b>Çizelge 4.29.</b> Farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen $SnO_2$ filmlerinin ( $hkl$ ), $2\theta$ , $FWHM$ , $d$ , $TC$ , örgü parametreleri ve ortalama kristal boyutu değerleri.....	158

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. ZnO kristal yapılar: (a) kübik (b) kübik zinc blend (c) hekzagonal wurtzite.....	3
Şekil 1.2. CdO kristal yapısı .....	5
Şekil 1.3. TiO <sub>2</sub> 'nin kristal yapısı (a) rutil (b) brukit (c) anataz .....	7
Şekil 1.4. Tetragonal SnO <sub>2</sub> 'nin kristal yapısı.....	8
Şekil 2.1. X-ışını tüpü .....	22
Şekil 2.2. Bir düzlemdeki A ve B ardışık örgü noktalarından X-ışınlarının saçılması.....	23
Şekil 2.3. Ardışık düzlemlerden X-ışınlarının saçılması .....	24
Şekil 2.4. Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) şematik yapısı .....	27
Şekil 2.5. Elektron demeti ile numune etkileşimi .....	28
Şekil 2.6. $\Delta x$ kalınlığındaki bir tabakada absorpsiyon.....	30
Şekil 2.7. Parabolik bir band yapısında doğrudan geçiş .....	32
Şekil 2.8. Dolaylı bandlar arası dolaylı geçişler .....	34
Şekil 2.9. Dejenere n-tipi germanyumun enerji-momentum diyagramı (Foton absorpsiyon mekanizması) .....	35
Şekil 2.10. $E_i$ ilk durumdan iletim bandına olası geçişlerden bazıları.....	36
Şekil 2.11. Yarıiletkenin absorpsiyon katsayısının enerji ile değişimi .....	37
Şekil 2.12. (a-c) Işımalı geçiş türleri: (a) banttan banda (b) donör seviyesinden valans bandına (c) iletim bandından akseptör bandına (d) bir orta seviye yoluyla ışımsız geçiş .....	38
Şekil 2.13. (a) Doğrudan ve (b) dolaylı geçişlerin şematik gösterimi .....	40
Şekil 2.14. Bir omik kontağın enerji bandları .....	45

<b>Şekil 2.15.</b> Bir metal ve bir yarıiletkenin enerji bandları .....	46
<b>Şekil 2.16.</b> Bir metal/n-tipi yarıiletkenin oluşturduğu Schottky kontağın denge durumundaki enerji-band diyagramı .....	47
<b>Şekil 2.17.</b> Bir metal-yarıiletken kontakta enerji-band diyagramı; <b>(a)</b> ileri besleme, <b>(b)</b> geri besleme .....	48
<b>Şekil 2.18.</b> <b>(a)</b> Termoiyonik emisyon (TE) <b>(b)</b> termoiyonik alan emisyonu (TFE) ve alan emisyonu (FE) (direk tünelleme) durumları için ileri besleme durumundaki Schottky engelinde potansiyel enerji diyagramı ve akım taşınım mekanizmaları .....	49
<b>Şekil 2.19.</b> <b>(a)</b> Metalurjik pn eklemesinin basitleştirilmiş geometrisi <b>(b)</b> Düzgün olarak katkılanmış ideal bir pn eklemesinin katkı profili <b>(c)</b> Kıtık bölgesi, elektrik alan ve yüklü taşıyıcılar üzerine etkileyen kuvvetler .....	55
<b>Şekil 2.20.</b> Termal dengedeki pn eklemesinin enerji-band diyagramı .....	56
<b>Şekil 2.21.</b> Geri besleme altındaki pn eklemesinin enerji-band diyagramı .....	58
<b>Şekil 2.22.</b> Geri besleme voltajı uygulanmış bir pn eklemi .....	59
<b>Şekil 2.23.</b> Bir pn eklemi boyunca iletkenlik bandı enerjisinin durumu.....	59
<b>Şekil 2.24.</b> <b>(a)</b> İleri besleme voltajı uygulanmış pn eklemesinde uzay yükü elektrik alanı ve $V_a$ tarafından oluşturulan elektrik alan <b>(b)</b> İleri besleme voltajı uygulanmış pn eklemesinin enerji-band diyagramı .....	61
<b>Şekil 2.25.</b> Seri direncin $I-V$ karakteristiğine etkisi.....	63
<b>Şekil 2.26.</b> Bir atomun veya parçacığın yüksek enerjili bir durumdan geçerek yarı kararlı bir durumdan daha kararlı bir duruma hareketi.....	65
<b>Şekil 2.27.</b> İletkenliğin sıcaklıkla değişimi .....	66
<b>Şekil 3.1.</b> Çeşitli sol jel türevli ürünlerin şematik gösterimi.....	70
<b>Şekil 3.2.</b> Sol jel spin kaplama yönteminin aşamaları .....	73
<b>Şekil 3.3.</b> Heteroeklem diyotların şematik diyagramları .....	81

<b>Şekil 4.1.</b>	Farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin döndürme hızı – kalınlık grafiği .....	84
<b>Şekil 4.2.</b>	Farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin molarite – kalınlık grafiği .....	84
<b>Şekil 4.3.</b>	0,5 molar ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları .....	85
<b>Şekil 4.4.</b>	Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm döndürme hızında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları.....	87
<b>Şekil 4.5.</b>	0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm’de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları .....	89
<b>Şekil 4.6.</b>	0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları ( * : ITO alttaş) .....	91
<b>Şekil 4.7.</b>	Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları ( * : ITO alttaş).....	93
<b>Şekil 4.8.</b>	0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine 4000 rpm’de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları ( * : ITO alttaş) .....	95
<b>Şekil 4.9.</b>	0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları ( * : p-Si alttaş) .....	97
<b>Şekil 4.10.</b>	Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları ( * : p-Si alttaş) .....	99
<b>Şekil 4.11.</b>	0,5 molar ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine 4000 rpm’de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları ( * : p-Si alttaş).....	101
<b>Şekil 4.12.</b>	0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında cam alttaş üzerine elde edilen filmlerin 50.000 ve 500.000 büyütmedeki FESEM görüntüleri .....	105

<b>Şekil 4.13.</b> Farklı molaritelerde hazırlanmış ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaş üzerine 4000 rpm de elde edilen ZnO filmlerinin 50.000 ve 500.000 büyütmedeki FESEM görüntüleri .....	106
<b>Şekil 4.14.</b> 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında ITO alttaş üzerine elde edilen filmlerin 30.000 ve 100.000 büyütmedeki FESEM görüntüleri .....	107
<b>Şekil 4.15.</b> Farklı molaritelerde hazırlanmış ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaş üzerine 4000 rpm de elde edilen ZnO filmlerinin 30.000 ve 100.000 büyütmedeki FESEM görüntüleri .....	108
<b>Şekil 4.16.</b> 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında p-Si alttaş üzerine elde edilen filmlerin 50.000 ve 500.000 büyütmedeki FESEM görüntüleri .....	109
<b>Şekil 4.17.</b> Farklı molaritelerde hazırlanmış ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaş üzerine 4000 rpm 'de elde edilen ZnO filmlerinin 30.000 ve 100.000 büyütmedeki FESEM görüntüleri .....	110
<b>Şekil 4.18.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında p-Si alttaş üzerine elde edilen ZnO filmlerinin 30.000 ve 300.000 byütmedeki FESEM görüntüleri....	111
<b>Şekil 4.19. (a-d)</b> ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin %T spektrumları .....	113
<b>Şekil 4.19 (e-f) (Devam).</b> ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin %T spektrumları.....	114
<b>Şekil 4.20. (a-d)</b> ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ grafikleri .....	115
<b>Şekil 4.20 (e-f) (Devam).</b> ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ grafikleri .....	116
<b>Şekil 4.21. (a)</b> Farklı döndürme hızlarında ve <b>(b)</b> farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi hazırlanarak elde edilen ZnO filmlerinin PL spektrumları.....	117
<b>Şekil 4.22.</b> Nano yapıli p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun farklı ortam sıcaklıklarındaki yarı logaritmik $I - V$ grafikleri .....	119
<b>Şekil 4.23.</b> Nano yapıli p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun farklı ortam sıcaklıklarındaki $I_0 - 1000/T$ değişimi .....	119

<b>Şekil 4.24.</b> Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun farklı ortam sıcaklıklarındaki $n$ ve $\phi_b$ değerleri.....	120
<b>Şekil 4.25.</b> Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun farklı ortam sıcaklıklardaki $F(V) - V$ grafiği .....	121
<b>Şekil 4.26.</b> Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun (a) 296 K, (b) 323 K ve (c) 383 K ortam sıcaklıklarındaki ileri besleme $\log I - \log V$ eğrileri .....	122
<b>Şekil 4.27.</b> Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun karanlık ve UV aydınlatması altında alınan $\log(I) - V(V)$ grafikleri.....	123
<b>Şekil 4.28.</b> Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun 100 mWcm <sup>-2</sup> aydınlatmada Fotoakım-Zaman grafiği.....	124
<b>Şekil 4.29.</b> Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun enerji-band diyagramı .....	125
<b>Şekil 4.30.</b> Farklı döndürme hızlarında cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları .....	126
<b>Şekil 4.31.</b> Farklı döndürme hızlarında p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları .....	127
<b>Şekil 4.32.</b> Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları....	128
<b>Şekil 4.33.</b> Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları....	130
<b>Şekil 4.34.</b> Farklı döndürme hızlarında cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin 10.000 ve 100.000 büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri.....	132
<b>Şekil 4.35.</b> Farklı döndürme hızlarında p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin 5.000 ve 100.000 büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri.....	133
<b>Şekil 4.36.</b> Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin 5.000 ve 100.000 büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri .....	134
<b>Şekil 4.37.</b> Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin 1.000, 5.000 ve 100.000 büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri .....	135
<b>Şekil 4.38.</b> (a) CD-4C-7 filminin %T spektrumu (b) CD-4C-7 filminin $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ grafiği .....	137

<b>Şekil 4.39.</b> (a) CD-2C-7 filminin % <i>T</i> spektrumu (b) CD-2C-7 filminin $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ grafiği .....	137
<b>Şekil 4.40.</b> p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun oda sıcaklığındaki yarı logaritmik <i>I</i> – <i>V</i> grafiği .....	138
<b>Şekil 4.41.</b> p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun oda sıcaklığındaki <i>F(V)</i> – <i>V</i> grafiği .....	139
<b>Şekil 4.42.</b> p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun karanlık ve UV aydınlatması altında yarı logaritmik <i>I</i> – <i>V</i> karakteristikleri .....	140
<b>Şekil 4.43.</b> p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun 100 mWcm <sup>-2</sup> aydınlatmada Fotoakım - Zaman grafiği.....	140
<b>Şekil 4.44.</b> Nano yapıli p-Si/n-CdO heteroeklem diyotun enerji-band diyagramı....	141
<b>Şekil 4.45.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında cam altaş üzerine 5 kat elde edilen TiO <sub>2</sub> filmlerinin XRD spektrumları .....	142
<b>Şekil 4.46.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında p-Si altaş üzerine 5 kat elde edilen TiO <sub>2</sub> filmlerinin XRD spektrumları .....	142
<b>Şekil 4.47.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında p-Si altaş üzerine 15 kat elde edilen TiO <sub>2</sub> filmlerinin XRD spektrumları .....	144
<b>Şekil 4.48.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında cam altaşlar üzerine 5 kat elde edilen TiO <sub>2</sub> filmlerinin 50.000 ve 300.000 büyütmeledeki FESEM görüntüleri .....	147
<b>Şekil 4.49.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında p-Si altaşlar üzerine 5 kat elde edilen TiO <sub>2</sub> filmlerinin 30.000 ve 100.000 büyütmeledeki FESEM görüntüleri .....	148
<b>Şekil 4.50.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında p-Si altaşlar üzerine 15 kat elde edilen TiO <sub>2</sub> filmlerinin 30.000 ve 100.000 büyütmeledeki FESEM görüntüleri .....	149
<b>Şekil 4.51.</b> Farklı depolama sıcaklıklarında cam altaşlar üzerine elde edilen TiO <sub>2</sub> filmlerinin % <i>T</i> spektrumları .....	150
<b>Şekil 4.52.</b> (a-e) Farklı depolama sıcaklıklarında cam altaşlar üzerine elde edilen TiO <sub>2</sub> filmlerinin $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ grafikleri.....	151
<b>Şekil 4.53.</b> Nano yapıli p-Si/n-TiO <sub>2</sub> heteroeklem diyotun oda sıcaklığındaki yarı logaritmik <i>I</i> – <i>V</i> grafiği .....	152
<b>Şekil 4.54.</b> Nano yapıli p-Si/n-TiO <sub>2</sub> heteroeklem diyotun <i>logI</i> – <i>logV</i> grafiği.....	153

<b>Şekil 4.55.</b> Nano yapılı p-Si/n-TiO <sub>2</sub> heteroeklem diyotun ileri besleme bölgesinde $\frac{dV}{d(\ln V)} - I$ grafiği .....	154
<b>Şekil 4.56.</b> Nano yapılı p-Si/n-TiO <sub>2</sub> heteroeklem diyotun $H(I) - I$ grafiği .....	155
<b>Şekil 4.57.</b> Nano yapılı p-Si/n-TiO <sub>2</sub> heteroeklem diyotun $F(V) - V$ grafiği .....	155
<b>Şekil 4.58.</b> Nano yapılı p-Si/n-TiO <sub>2</sub> heteroeklem diyotun ideal enerji-band diyagramı .....	156
<b>Şekil 4.59.</b> Elde edilen SnO <sub>2</sub> filmlerinin XRD spektrumları .....	157
<b>Şekil 4.60.</b> 400°C depolama sıcaklığında elde edilen SnO <sub>2</sub> filminin 50.000 ve 300.000 büyütmeledeki FESEM görüntüleri .....	159
<b>Şekil 4.61.</b> Farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen SnO <sub>2</sub> filmlerinin 50.000 ve 300.000 büyütmeledeki FESEM görüntüleri .....	160
<b>Şekil 4.62.</b> Farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen SnO <sub>2</sub> filmlerinin reflektans spektrumları ve $h\nu - (F(R)h\nu/t)^2$ grafikleri.....	162
<b>Şekil 4.63.</b> p-Si/n-SnO <sub>2</sub> heteroeklem diyotunun oda sıcaklığındaki yarı logaritmik $I - V$ grafiği .....	163
<b>Şekil 4.64.</b> p-Si/n-SnO <sub>2</sub> heteroeklem diyotunun oda sıcaklıklarındaki ileri besleme $\log I - \log V$ eğrisi .....	164
<b>Şekil 4.65.</b> p-Si/n-SnO <sub>2</sub> heteroeklem diyotunun oda sıcaklığındaki $F(V) - V$ grafiği.....	165
<b>Şekil 4.66.</b> p-Si/n-SnO <sub>2</sub> heteroeklem diyotunun enerji-band diyagramı.....	166

## GÖRSELLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Görsel 2.1.</b> BRUKER D8 Advance X-ışını kırınım (XRD) cihazı.....	22
<b>Görsel 2.2.</b> ZEISS ULTRA PLUS model yüksek çözünürlüklü FESEM cihazı .....	27
<b>Görsel 3.1.</b> LAURELL marka WS-400B-6NPP/LITE model spin kaplama cihazı ..	72
<b>Görsel 3.2.</b> VAKSİS PVD Handy-MT/101T model metal buharlaştırma sistemi ....	80
<b>Görsel 3.3.</b> KEITHLEY 4200 SCS-CV yarıiletken karakterizasyon sistemi .....	81
<b>Görsel 3.4.</b> SIGNATONE yarıotomatik prop istasyonu.....	82

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\text{\AA}$	: Angstrom
$A^*$	: Richardson sabiti
$a, c$	: Kristal yapının örgü parametreleri
$d$	: Kristal düzlemleri arası mesafe
$D$	: Ortalama kristal boyutu
$E_a$	: Akseptör enerji seviyesi
$E_C$	: İletim bandı enerji seviyesi
$E_d$	: Donör enerji seviyesi
$E_F$	: Fermi enerjisi
$E_{Ft}$	: Asal Fermi enerjisi
$E_{Fm}$	: Metalin Fermi enerjisi
$E_{Fs}$	: Yarıiletkenin Fermi enerjisi
$E_g$	: Yasak enerji aralığı
$E_p$	: Fonon enerjisi
$E_u$	: Urbah enerjisi
$E_v$	: Valans bandı enerji seviyesi
$E_t$	: Tuzak enerji seviyesi
$E_x$	: Bağlanma enerjisi
$F(R)$	: Kubelka-Munk fonksiyonu
$h$	: Planck sabiti
$h\Omega$	: Fonon enerjisi
$I$	: Akım
$I_0$	: Doyum akımı

$I_{0(hkl)}$	: (hkl) düzleminin standart şiddeti
$I_{(hkl)}$	: (hkl) düzleminin gözlenen şiddeti
$J$	: Akım yoğunluğu
$k$	: Dalga sayısı
$k_B$	: Boltzmann sabiti
$m_e^*$	: Elektronun etkin kütlesi
$m_h^*$	: Holün etkin kütlesi
$m_r$	: İndirgenmiş kütle
$n_0$	: n bölgesindeki elektron konsantrasyonu
$p_0$	: p bölgesindeki hol konsantrasyonu
$n'$	: Yansımanın mertebesini veren tam sayı
$n$	: İdealite faktörü
$n_i$	: Asal taşıyıcı konsantrasyonu
$n_{n0}$	: n bölgesi çoğunluk taşıyıcı elektronların termal denge konsantrasyonu
$n_{p0}$	: p bölgesi azınlık taşıyıcı elektronların termal denge konsantrasyonu
$N_a$	: Akseptör konsantrasyonu
$N(E_i)$	: $E_i$ enerji seviyesindeki durumların yoğunluğu
$N(E_f)$	: $E_f$ enerji seviyesindeki durumların yoğunluğu
$N_d$	: Donör konsantrasyonu
$N_p$	: Fonon sayısı
$P_{if}$	: Elektronun ilk durumdan son duruma geçiş olasılığı
$r$	: Donör ve akseptör arasındaki mesafe
$R$	: Reflektans
$R_s$	: Yariletkenin direnci
$t$	: Film kalınlığı

$T$	: Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı
$\%T$	: % Geçirgenlik
$TC$	: Yapılanma katsayısı
$V_a$	: Besleme voltajı
$V_{oc}$	: Maksimum açık devre voltajı
$V_t$	: Termal voltaj
$V_R$	: Geri besleme voltajı
$V_f$	: İleri besleme voltajı
$I_{sc}$	: Kısa devre akımı
$I_{te}$	: Termoiyonik emisyon akımı
$I_{te0}$	: Doyum akımı
$\alpha$	: Absorpsiyon katsayısı
$\delta$	: Kusur (dislokasyon) yoğunluğu
$\epsilon$	: Ortamın statik dielektrik sabiti
$\epsilon_0$	: Boşluğun dielektrik sabiti
$\epsilon_s$	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
$\phi_b$	: Potansiyel engel yüksekliği
$\phi_m$	: Metalin iş fonksiyonu
$\phi_s$	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$\phi_{Fn}$	: n bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği
$\phi_{Fp}$	: p bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği
$\lambda$	: Dalgaboyu
$\Delta m$	: Kütle farkı
$q$	: Elektronun yükü
$\rho_f$	: Film yoğunluğu

$\theta$	: Yansıma açısı
$\nu$	: Frekans
$\nu_s$	: Sürüklenme hızı
$\sigma$	: Elektriksel iletkenlik
$\sigma_0$	: Oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenlik
$W$	: Kıtık bölgesinin genişliği

# 1. GİRİŞ VE AMAÇ

## 1.1. Giriş

Yarıiletken malzemeler, günümüzdeki teknolojiye ulaşılmada önemli derecede paya sahiptir. Bu malzemelerin, üstün optik ve elektriksel özelliklerinden dolayı iletken ve yalıtkan malzemelerden ayrılan birçok yönü bulunmaktadır. Önemli bir çalışma alanına sahip olan yarıiletkenler, günümüzde kullandığımız birçok teknolojik aygıtın temelini oluşturur ve bu konuda yapılan çalışmaların insan yaşamına doğrudan katkısı olması sebebiyle de yarıiletkenler güncelliklerini korumaktadır.

Yarıiletken teknolojisini geliştirmek için yapılan araştırmalar yıllardır devam etmektedir. Bu alanda yapılmış olan araştırmaların bir bölümü yeni yarıiletken malzemelerin hazırlanması yönünde gelişirken, bir bölümü de bu malzemelerin elektronik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerden faydalanılarak yeni metal-yarıiletken devre elemanları geliştirmeyi amaçlar. Bu alanda yapılan çalışmalar sonucu üretilen devre elemanlarının nano yapılı olması da gelişen nanoteknoloji açısından önemli bir yer teşkil etmektedir. Kendilerine özgü özellikleri sayesinde yarıiletkenler içerisinde ayrı bir grup oluşturan metal oksitler ( $ZnO$ ,  $CdO$ ,  $TiO_2$ ,  $SnO_2$ ,...), pek çok aygıt yapımında elverişli olmalarından dolayı önemli bir malzeme sınıfıdır. Elektrotlar [1], transistörler [2], gaz sensörleri [3], fotovoltaj aygıtları [4], enerji toplama aygıtları [5], bilgi depolama aygıtları [6] gibi pek çok uygulama alanında kullanılırlar.

Metal oksit filmlerin üretilmesi aşamasında sol jel spin kaplama yöntemi ekonomik oluşu, vakum gerektirmemesi, oda şartlarında uygulanabilir olması ve film kalınlığının kontrol edilebilmesinden dolayı diğer çözelti metotlarına bir alternatiftir.

Sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilen metal oksit filmler kullanılarak üretilen pn heteroeklem diyotlar yarıiletken teknolojisinde önemli yer tutmaktadır. Heteroeklem yapılar, yasak enerji aralığı birbirinden farklı iki yarıiletken materyalin birleşmesiyle meydana gelir. Eklemdeki yapısal ani değişikliklerin sebep olduğu örgü uyumsuzlukları, ısıl yayılım uyumsuzluğu gibi nedenlerden dolayı arayüzey enerji durumları oluşur. Heteroeklem yapının akım-voltaj mekanizmasının anlaşılmasında arayüzey yakınlarındaki enerji durumları büyük önem taşır. Aynı zamanda bu malzemeleri elektronik devrelerde kullanmak için uygun metal yarıiletken kontaklar oluşturulması, sonrasında ise elde edilen devre elemanlarının elektriksel karakteristiklerinin iyi yapılması gerekir. Üretilen bir devre elemanının istenilen performansta çalışabilmesi, devre yapısına ait bütün özelliklerinin bilinmesi ve

doğabilecek olumsuzlukların giderilmesine bağlıdır. Bu nedenle metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ve metal-okisit-yarıiletken (MOS) yapıları araştırmak da büyük önem taşımaktadır.

## **1.2. Metal Oksit Bileşikleri ve Genel Özellikleri**

### **1.2.1. Çinko oksitin genel özellikleri**

Çinko oksit (ZnO) bileşiği periyodik tablonun II. grup elementlerinden olan Zn ile VI. grup elementlerinden olan O'dan oluşan II-VI grup elementlerinin oluşturduğu bir bileşiktir. ZnO geniş yasak enerji aralığına ( $E_g = 3,37$  eV) sahip n-tipi yarıiletken bir malzemedir. Filmlerinin kırılma indisi görünür bölgede ( $\sim 400-800$  nm)  $\sim 2$  dir. ZnO, yüzyılı aşkın süredir merhemler [7], kozmetik ürünler [8], güneş kremleri [9], katalizörler [10], piezoelektrik dönüştürücüler [11], varistörler [12] ve geçirgen iletken elektrotlar [13] gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

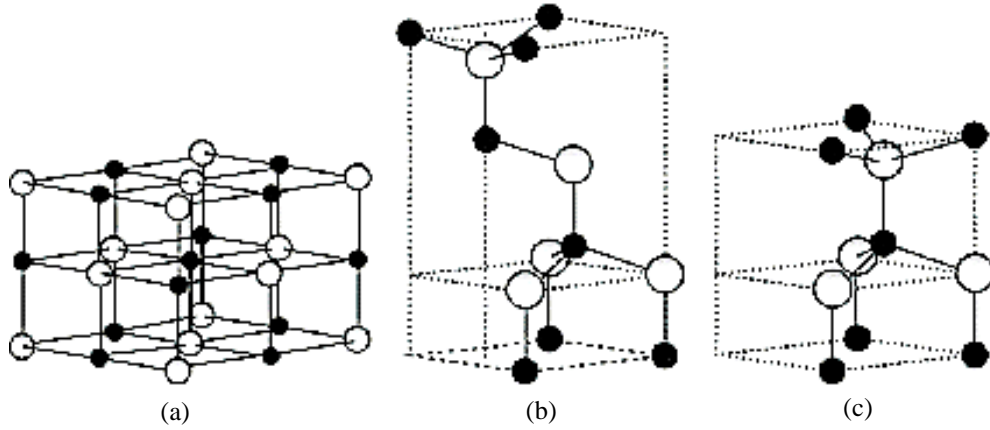
Bu malzemeler, görünür bölgede yüksek geçirgenliğe sahiptir. Eksiton band enerjisi yaklaşık 60 meV dir. Bu değer GaN için yaklaşık 25 meV civarında olduğu düşünüldüğünde pek çok malzemeye kıyasla oldukça yüksek eksiton band enerjisine sahiptir. Eksiton band enerjisinin yüksek olması, malzemenin lüminesans verimliliğinin artması anlamına gelir. Uzay ve nükleer uygulamalarda ZnO malzemenin yapılmış olan aygıtlar pek çok malzemeye göre (GaN gibi) radyasyona karşı daha fazla direnç göstermektedir.

ZnO filmlerin optik özellikleri ile ilgili çalışmalarda fononlar, plazmonlar, dielektrik sabitleri ve kırılma indisleri dahil olmak üzere şimdiye kadar pek çok konu üzerinde durulmuştur. Bir yarıiletkenin optik özellikleri, hem kendi yapısının değiştirilmesi ile hem de dış etkiler ile değiştirilebilir. Dış etkiler, yani katkılar/kirlilikler veya nokta kusurlar yasak enerji aralığında elektronik durumlar meydana getirdiği için hem absorplama hem de emisyon (yayma) süreçlerini etkiler. ZnO, katkılama işleminin kolay yapıldığı bir malzemedir. Dolayısıyla optik ve elektriksel özellikleri araştırmacının istediği doğrultuda değiştirilebilir.

ZnO, cam gibi düşük maliyetli altaşlar başta olmak üzere pek çok altaş üzerine büyütülebilen bir malzemedir. Aynı zamanda büyütme işlemi esnasında çok yüksek sıcaklıklara da ihtiyaç duyulmamaktadır. ZnO kullanılarak nanoçubuk (nanorod), nanotel (nanowire), nanotüp (nanotube) ve nanoçiçek (nanoflower) şeklinde yapılar

üretilebilmektedir. Bu yapılarda geniş bir yüzey alanı söz konusu olduğu için sensör uygulaması için ideal bir malzemedir [14].

ZnO üç farklı kristal yapıya sahiptir. Bunlar kübik, kübik çinko blend ve hekzagonal wurtzite yapılar olup, şematik olarak Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Normal koşullar altında termodinamik olarak kararlı faz hekzagonal wurtzite yapısıdır. Kübik yapısının oluşması için diğer fazlara göre daha yüksek basınç gerekmektedir [15].



**Şekil 1.1.** ZnO kristal yapıları: (a) kübik (b) kübik çinko blend (c) hekzagonal wurtzite (Beyaz küreler Zn atomlarını, siyah küreler O atomlarını temsil etmektedir.)

**Kaynak:** [15]

ZnO'nün örgü parametreleri uzun yıllardır araştırılmaktadır [16]. Bir yarıiletkenin örgü parametreleri genellikle aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Serbest elektron konsantrasyonu
- Yabancı atomların konsantrasyonu
- Dış gerilmeler (external strain) (örneğin alttaşıma sebep olduğu gerilmeler)
- Sıcaklık

Oda sıcaklığında wurtzite yapı için örgü parametreleri çeşitli deneysel ölçümler ve teorik hesaplamalar yardımıyla belirlenmektedir. Elde edilen sonuçlar genelde birbiri ile uyum içindedir. Çoğunlukla bulunan örgü sabitleri  $a$  parametresi için 3,2475–3,2501 Å aralığında,  $c$  parametresi için 5,2042–5,2075 Å aralığındadır [17]. Deneysel çalışmalarda örgü parametreleri değerlerinin ideal wurtzite kristaldeki değerinden sapması örgünün dengede olmayışından ve iyoniklikten kaynaklanmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalar serbest yük miktarının da örgü sabitlerinin oranındaki büyüme ile ilişkili olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Ayrıca mevcut olan nokta kusurların

varlığının da örgü sabitlerinin değerlerinde artışlara neden olduğu ortaya koyulmuştur [15].

ZnO filmlerin üretilmesi için pek çok yöntem kullanılmaktadır. Filmin üretim tekniğinin seçilmesi üretilen filmin hangi alanda kullanılacağı ile yakından ilişkilidir. Kullanılan film büyütme yöntemlerinde yüksek kalitede ZnO film üretilmesi amaçlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda, moleküler demet büyütme (MBE) [18], pulsed laser deposition (PLD) [19], organometalik buhar faz (OMVPE) [20] ve sol jel [21] gibi kimyasal yöntemlerin ağırlıklı olarak kullanıldığı film üretim yöntemleri kullanılmıştır.

ZnO aygıt uygulamaları alanında pek çok açıdan GaN ile rekabet içerisinde olan bir malzemedir. Geçirgen ince film transistörlerin (TFTs) yapımında ZnO önemli bir potansiyele sahiptir. Diğer yandan dünya çapında artan indium kalay oksit (ITO) talebinin karşılanmasında yaşanan zorluklar nedeniyle ZnO geçirgen oksitlerin ticari olarak üretimi sıkça gündeme gelmektedir. ZnO adına bu alanda başarılı olduğu takdirde, çok büyük bir uygulama alanı kazanacaktır. Diğer yandan ZnO'nun bağlanma enerjisinin 60 meV olduğu düşünüldüğünde, etkili bir ışık yayıcı olduğu da görülmektedir. Ayrıca ZnO'nun elektromekanik birleşimi (coupling), özellikle c-ekseni yönünde GaN'dan daha yüksektir. Bu özelliği sayesinde, akustik dalga aygıtları gibi uygulamalarda daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Bunlara ilave olarak, nano malzeme üretimi için de uygun bir malzemedir. Özellikle, aygıt üretimi için yapılan malzeme seçiminde bu durum ayırt edici bir özelliktir. ZnO tabanlı aygıtlar ve uygulama alanları üzerine yapılan son araştırmaların önemli bir kısmı nano yapı malzemeler (nanotel, nanaoçubuk, nanotip, nanobelt gibi) ile ilgilidir. Bu alandaki ZnO kullanımı genellikle Si, GaN ve organik yarıiletkenler gibi ana yarıiletken malzemelerin içine entegre edilerek gerçekleşmektedir. Nanoteller gibi bir boyutlu (1D) yarıiletkenler iyi yük taşıma özellikleri ve yüksek kalitede kristal yapıya sahip olmaları gibi avantajları nedeniyle de çok fazla ilgi çekmektedirler [15].

Geniş bir eksiton band enerjisine sahip olan ZnO, UV bölgede ışık yayan aygıtların üretimi için de çok cazip bir malzemedir. p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotlar idealite faktörlerinin çok yüksek olmamasından dolayı pek çok çalışmaya konu olmuşlardır. pn heteroeklemler UV fotodedektörler (PDs) olarak kullanılmışlardır ve ışığa duyarlılıkları (fotorespons özellikleri) araştırılmıştır. Yüksek iletkenlik ve geçirgenliğe sahip olması nedeniyle de özel bir malzemedir. Örneğin fotodedektörlerde, sahip olduğu elektrik ve optik özellikleri nedeniyle geçirgen kontak malzemesi (transparent contact material) olarak da kullanılmaktadır. Bu özelliklerine ilave olarak

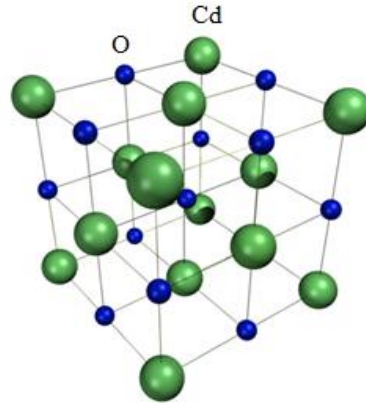
ZnO'nun düşük maliyetli olması, zehirsiz olması ve diğer malzemelere nispeten daha düşük sıcaklıklarda elde edilebilmesi, bu malzemenin tercih edilmesinde belirleyici özelliklerindedir [15].

### 1.2.2. Kadmiyum oksitin genel özellikleri

Kadmiyum oksit (CdO) bileşiği periyodik tablonun II. grup elementlerinden olan Cd ile VI. grup elementlerinden olan O'dan oluşan II-VI grup bir bileşiktir. CdO yüksek absorpsiyon ve emisyon kapasitesine sahip olması nedeniyle geçirgen iletken oksit (TCO) bir malzemedir. Yasak enerji aralığı 2,2–2,7 eV arasında olup, doğrudan band geçişlidir ve n-tipi iletkenlik göstermektedir. Elektriksel iletkenliği  $10^2 - 10^4 S/cm$  arasındadır. Bu filmler yüksek mobiliteye ( $130 cm^2/Vs$ ) sahiptirler [22]. CdO filmlerinin kırılma indisi yaklaşık olarak 2–2,2 değerleri arasındadır. CdO; fotodiyotlar, gaz sensörleri, güneş pilleri, fototransistörler, yansıma önleyici kaplamalar ve IR dedektörler için uygun bir malzemedir. Cd ve onun bileşikleri oldukça zehirli olmasına rağmen pil üretiminde ve çelikte korozyonu engellemede kilit malzemelerdir [23]. Ancak CdO filmleri dar yasak enerji aralığına sahip olmalarından dolayı az ilgi görmüş malzemelerdir. ZnO ile karşılaştırıldığında görünür bölgede geçirgenliği çok yüksek değildir, fakat direnç değeri daha düşüktür.

CdO filmler; sol jel, DC magnetron püskürtme, rf püskürtme, spray pyrolysis ve kimyasal buhar depolama gibi çeşitli yöntemler kullanılarak üretilebilir.

CdO yüzey merkezli kübik yapıya sahiptir. Kristal yapı, iki tane iç içe geçmiş paralel yüzey merkezli kübik örgüye sahiptir. CdO'nun kristal yapısı Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. CdO kristal yapısı  
Kaynak: [22]

### 1.2.3. Titanyum oksitin genel özellikleri

Titanyum oksit ( $\text{TiO}_2$ ) toz halinde antik çağlardan beri kullanım alanı bulmuş bir malzemedir. Bu malzemenin yıllardır tercih edilmesinin sebebi; malzemenin pahalı olmaması, kimyasal olarak kararlı bir yapıya sahip olması ve görünür bölgede absorplama yapmaması sayılabilir. 1970'ler de rutil fazda tek kristal n-tipi  $\text{TiO}_2$  yarıiletken elektrotu geliştirilmiş ve suyun fotoelektrolizini araştırmada kullanılmıştır. 1970'lerin petrol krizi fotokatalitik kullanılarak hidrojen gazı ( $\text{H}_2$ ) üretmek için toz  $\text{TiO}_2$  kullanılarak kısmen aşılmıştır. Bununla birlikte elektrotların kullanılmasıyla  $\text{H}_2$  üretilmiş fakat toz halinde  $\text{TiO}_2$  yeniden elde edilememiştir. 1990'larda  $\text{TiO}_2$ 'nin; fotokatalitik temizleme, antibakteriyel ve hidrofilik özellikleri araştırılmıştır.  $\text{TiO}_2$ 'nin fotokatalitik özelliği sayesinde  $\text{TiO}_2$  ile kaplanmış fayansların egzoz ortamında temiz kaldığı bulunmuştur. 2000'lerde yapı malzemeleri kullanılarak hava kirleticileri ayrıştırmak için fotokatalist olarak  $\text{TiO}_2$  kullanımı üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmanın 3-boyutlu uzayda etkili olmaması, sorun çıkmasına neden olmuştur. Çünkü  $\text{TiO}_2$  kaplı malzemeler o zamana kadar hep iki boyutlu malzemeler için çalışılmıştı. Yaklaşık olarak son on beş yıldır ticari olarak çimento üretiminde kullanılmaktadır [24].

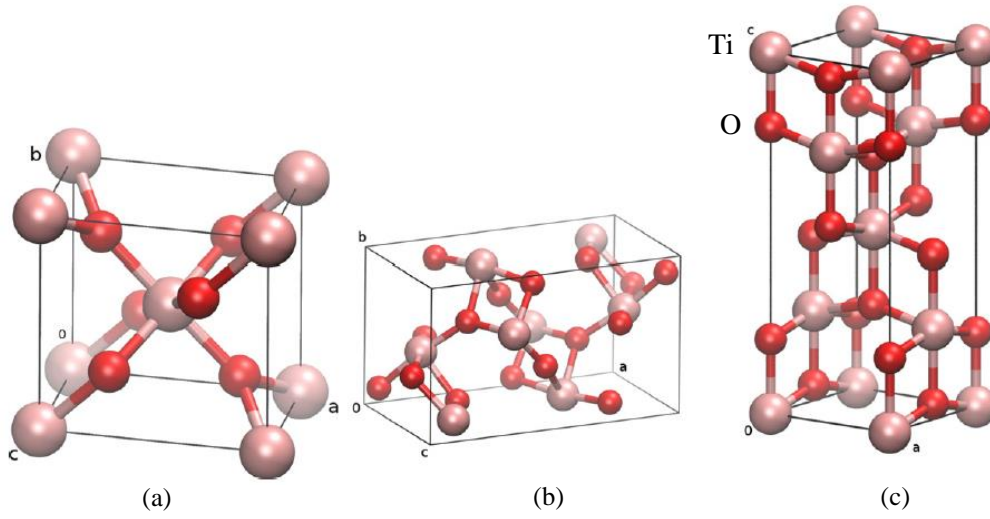
$\text{TiO}_2$  bileşiği periyodik tablonun IV. grup elementlerinden olan Ti ile VI. grup elementlerinden olan O'dan oluşan IV-VI grup bir bileşiktir.  $\text{TiO}_2$  yarıiletken malzemeler, kristal yapısına bağlı olarak hem doğrudan hem de dolaylı band yapısına sahiptir. Rutil faz için  $\sim 3,06$  eV ile doğrudan band yapısı ve  $\sim 3,10$  eV ile dolaylı band yapısına sahip iken, anataz fazda kristallenmiş  $\text{TiO}_2$  ise  $\sim 3,23$  eV yasak enerji aralığına sahip dolaylı band yapısına sahiptir [25].

$\text{TiO}_2$  kristal yapısı itibariyle de çok dikkat çeken bir malzemedir.  $\text{TiO}_2$  üç farklı kristal formdan birinde kristallenme sergileyebilir (Şekil 1.3). Bunlar  $3,84 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğundaki anataz tetragonal yapı,  $4,065 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğundaki brukit ortorombik yapı ve  $4,235 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğundaki rutil tetragonal yapıdır. Örgü parametreleri anataz faz için  $a=3,7852 \text{ \AA}$ ,  $c=9,5139 \text{ \AA}$ , brukit faz için  $a=5,4360 \text{ \AA}$ ,  $b=9,1660 \text{ \AA}$ ,  $c=5,1350 \text{ \AA}$ , rutil faz için  $a=4,5900 \text{ \AA}$ ,  $c=2,9570 \text{ \AA}$  değerlerine eşittir.

Yapılan çalışmalarda,  $800^\circ\text{C}$  ve üzerindeki sıcaklıklarda film yapısının anatazdan rutile kaydığı ve sıcaklığın  $1000^\circ\text{C}$  üzerine çıkarılmasıyla kristal yapının rutil faza kaydığı görülmüştür. Bu fazlar arasında rutil en kararlısıdır. Rutil faz, yüksek dayanıklılık gösteren çelik imalatında kullanılan ferrotitanyum kaynağıdır. Rutil faz hem görünür bölge hem de UV ışık altında uyarılabilir. Fakat anataz faz yalnızca UV ışık altında

uyarılabilir. Eğer yapıda brukit fazda kristallenme söz konusu ise ışık altında uyarılmayı sağlayabilmek için yüksek ısı altında kristal yapının önce rutil faza doğru kayması sağlanmalıdır. Çünkü brukit faz ne görünür ne de UV ışık altında uyarılamamaktadır.  $TiO_2$  filmlerinin kırılma indisi rutil faz için yaklaşık olarak 3,18; anataz faz için yaklaşık olarak 2,90 değerindedir [26].

Genellikle,  $TiO_2$ , n-tipi bir iletkenlik davranışı sergiler ve iletkenlik tipi, oksijen boşlukları ve titanyum geçiş atomları gibi donör atomlarına bağlıdır [27].



**Şekil 1.3.**  $TiO_2$ 'nin kristal yapısı (a) rutil, (b) brukit, (c) anataz  
**Kaynak:** [28]

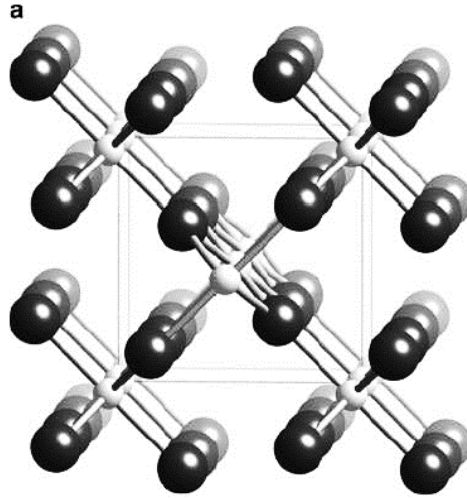
#### 1.2.4. Kalay oksitin genel özellikleri

Kalay oksit ( $SnO_2$ ) bileşiği periyodik tablonun IV. grup elementlerinden olan Sn ile VI. grup elementlerinden olan O'dan oluşan IV-VI grup bir bileşiktir.  $SnO_2$  geniş band aralıklı ( $\sim 3,6$  eV) olmasından dolayı literatürde sıkça kullanılan yarıiletken bir malzemedir.  $SnO_2$  optik özelliklerinden dolayı TCO grubunda yer almaktadır. Yüksek kararlılığa sahip olması nedeniyle korozyon ortam uygulamalarında kullanılan bir malzemedir. Bu özellikleri nedeniyle piller, düşük emisyonlu pencere kaplamaları, güneş pilleri gibi uygulamaları vardır.

$SnO_2$ , doğada kasiterit minerali olarak bulunur. Tetragonal birim hücreli rutil kristal yapıya sahiptir. Örgü parametreleri sırasıyla  $a = b = 4,738 \text{ \AA}$  ve  $c = 3,188 \text{ \AA}$  değerlerine eşittir.  $SnO_2$ 'nin kristal yapısı Şekil 1.4'te gösterilmektedir.

$SnO_2$ , kararlı ve teknolojik olarak önemli bir oksit olmasına rağmen, SnO ve  $Sn_3O_4$  gibi kalay oksitler de vardır. Fakat diğer kalay oksitler daha az bilinir.  $SnO_2$ ,

yüksek iletkenliğe sahip n-tipi bir malzemedir. Diğer ikili metal oksitlerde ( $ZnO$ ,  $In_2O_3$  gibi) olduğu gibi oksijen boşlukları  $SnO_2$  de elektronların taşınmasından sorumludurlar [29].



**Şekil 1.4.** *Tetragonal  $SnO_2$ 'nin kristal yapısı*  
**Kaynak:** [29]

$SnO_2$  kaplamalarının hem yüksek iletkenliğe hem de görünür bölgede yüksek geçirgenliğe sahip olması ilgi çekicidir. Katkısız iletken  $SnO_2$  filmler 3,6 eV değerinden daha geniş yasak enerji aralığına sahiptirler. Aynı zamanda doğrudan band geçişli bir malzemedir. Geniş band aralıklı  $SnO_2$ 'ler UV led uygulamaları için uygundur. Yaklaşık olarak 130 meV gibi bir yüksek eksiton band enerjisine sahip olması uygulamalar için umut vericidir.  $SnO_2$  filmlerinin kırılma indisi yaklaşık olarak 1,9–2 değerleri arasında gözlenir.  $SnO_2$  filmler, geçirgen film transistörler, gaz sensörleri, geçirgen iletken oksitler ve manyetik özelliklerinden dolayı spintronik uygulamalar için çok uygun malzemelerdir.

### 1.3. Önceki Çalışmalar

Sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilmiş metal oksit filmler, bu filmlerin karakterizasyonları ve bu filmlerle yapılmış aygıtların performansları pek çok araştırmacının çalışmasına konusu olmuştur. Bu metal oksit filmlerden  $ZnO$ ,  $CdO$ ,  $TiO_2$  ve  $SnO_2$  yarıiletken filmlerinin üretilmesi, üretilen filmlerin karakterizasyonları ve bu filmler kullanılarak üretilen aygıtların özelliklerinin araştırılması ile ilgili literatür araştırması yapılmış ve bu çalışmalardan bazılarında aşağıda yer verilmiştir.

Sol jel spin kaplama yöntemiyle ZnO filmlerin elde edilmesi ile ilgili ilk çalışma 1996 yılında R. Konekamp ve A. Wahi tarafından yayınlanmıştır. Elde edilen filmlerin 50 Å değerinden daha küçük kümeleşmiş yapılardan oluştuğu rapor edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, filmlerin elektronik özelliklerinin filmlerin morfolojik özellikleri ile kontrol edilebileceği belirtilmiştir [30].

Sol jel spin kaplama yöntemiyle yapılmış katkılı ZnO filmler ile ilgili ilk çalışma ise yine 1996 yılında K. Nishio ve arkadaşları tarafından yayınlanmıştır. Çalışmalarında, kuvars alttaşlar üzerine elde edilmiş Al katkılı ZnO filmlerin elektriksel özelliklerine çözücünün etkisini araştırmışlardır. Çözücünün, filmlerin kristallenmelerinde ve iletkenliklerinde oldukça etkili olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca filmlerin görünür bölgedeki geçirgenlik değerlerini yaklaşık %85 olarak bulmuşlardır [31].

Sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilmiş ZnO film kullanılarak üretilen heteroeklem yapı ile ilgili ilk çalışma ise 1998 yılında D. G. Baik ve S. M. Cho tarafından yayınlanmıştır. n-Si alttaş üzerine ZnO film elde ederek, heteroeklem güneş pillerini üretmişlerdir. ZnO filmlerin elektriksel iletkenlik değerlerini arttırmak için Al katkısı yapmışlardır. Üretilen güneş pillerinin verimliliğini yaklaşık %5,3 olarak rapor etmişlerdir [32].

Sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilmiş ZnO filmlere tavlama işleminin uygulanması ile ilgili ilk çalışma 2001 yılında Y. Natsume ve H. Sakata tarafından yayınlanmıştır. 350°C'de elde etmiş oldukları ZnO filmleri, 500, 525, 550 ve 575°C'de tavlama işlemlerinden tavlama sıcaklığının filmlerin elektriksel ve optik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. En düşük özdirenç değerini 350°C'de ilk elde ettikleri film için 0,22 Ωcm olarak bulmuşlardır. Tüm filmlerin yüksek geçirgenliğe sahip olduğunu ve  $E_g$  değerinin tavlama sıcaklığı ile değişmediğini (3,21 eV) rapor etmişlerdir [33].

C. Z. Lu ve arkadaşları sol jel spin kaplama yöntemiyle ZnO filmlerini elde etmişler ve filmlerin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri üzerine tavlama sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Filmlerin kristallenmelerinin ve morfolojik özelliklerinin tavlama sıcaklığına bağlı olarak iyileştiğini, tüm filmlerin görünür bölgede yaklaşık % 80 optik geçirgenliğe sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca 500°C'de tavlama sıcaklığına sahip olan filmin  $5,5 \times 10^{-3}$  Ωcm ile en düşük dirence sahip olduğunu bulmuşlardır [34].

Y. Cao ve arkadaşları sol jel spin kaplama yöntemiyle katkısız, N katkılı ve In-N katkılı ZnO filmler elde etmişlerdir. Katkısız filmin n-tipi yarıiletken özellik gösterdiğini, katkılı filmlerin p-tipi yarıiletken özellik gösterdiğini ve katkılı filmlerin direnç

değerlerinin  $10^{-1} \Omega\text{cm}$  mertebesinde olduğunu rapor etmişlerdir. n-tipi katkısız ZnO film ile p-tipi N katkılı ZnO filmi kullanarak pn homoeklem yapı üretmişlerdir. Bu yapının doğrultma karakteristiği sergilediğini ve idealite faktörünü yaklaşık 24 olduğunu bulmuşlardır [35].

Sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilen ZnO filmlerin fiziksel özelliklerine çözeltinin pH değerinin etkisi ile ilgili ilk çalışma, 2006 yılında P. Sagar ve arkadaşları tarafından literatüre eklenmiştir. Çinko asetat (ZnAc) çözeltisinin pH değerini çözeltiye monoethanolamin (MEA) ilave ederek değiştirmişlerdir. Çözeltiye MEA ilavesi ile çözeltinin pH değerini 6,4'ten 10,6'ya kadar değiştirmişlerdir. pH değeri 10,6 olan çözelti kullanılarak elde edilen filmin en iyi film olduğunu rapor etmişlerdir [36].

Sol jel spin kaplama yöntemiyle farklı döndürme hızlarında elde edilen ZnO filmler ile ilgili ilk çalışma 2008 yılında S. Ilican ve arkadaşları tarafından literatüre eklenmiştir. Filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerine döndürme hızının etkisini araştırmışlardır. Artan döndürme hızı ile ortalama kristal boyutunun 32 nm'den 26 nm'ye azaldığını,  $E_g$  değerinin 3,28 eV'den 3,29 eV'ye arttığını, Urbah enerji değerinin ( $E_u$ ) 73 meV değerinden 53 meV değerine azaldığını ve tüm filmler için % geçirgenlik (%T) değerinin %92'nin üzerinde olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca, karanlık ve UV aydınlatması altında filmlerin  $I - V$  ölçümlerini almışlar ve fotovoltaiik malzeme olarak kullanılabilceğini rapor etmişlerdir [37].

M. H. Mamat ve arkadaşları 2009 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle farklı molaritelerde çözeltiler hazırlayarak ZnO filmler elde etmişlerdir. Bu filmlerin elektriksel özelliklerini ve fotoluminesans (PL) spektroskopisi yardımıyla optik özelliklerini araştırmışlardır. Yüksek molaritelerdeki çözeltiler kullanılarak elde edilen filmlerin fotoakım ölçümlerinin iyileştiğini rapor etmişlerdir. PL ölçüm sonuçlarından da artan molarite değeriyle UV emisyon pikinin şiddetinin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek molaritelerde hazırlanan çözeltiler kullanılarak elde edilen filmlerdeki kusur oluşumunun daha fazla olduğunu rapor etmişlerdir [38].

Sahoo ve arkadaşları 2010 yılında sol jel spin kaplama yöntemini kullanarak farklı molaritelerde ZnO filmler elde etmişler ve bu filmlere farklı sıcaklıklarda tavlama işlemi uygulamışlardır. Depolama sıcaklığı olarak  $200^\circ\text{C}$ , tavlama sıcaklığı olarak sırasıyla 700, 800 ve  $900^\circ\text{C}$ 'yi seçmişlerdir. Daha sonra elde etmiş oldukları filmlerin yapısal ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Molariteye bağlı olarak film kalınlığı ve kristal boyutunun değiştiğini rapor etmişlerdir. Kristal boyutunun artan metal iyon

konsantrasyonuna bağılı olarak arttığını ve bu büyümenin de hidroliz işleminden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, 2-metoksietanol gibi polar bir çözücünün çinko naftenat (zinc naphthenate) için bir sabitleyici ile işlenmesinin kristallenme enerjisini azaltarak, kristallerde şekil ve boyutta homojenliği sağlamak suretiyle oldukça düşük tavlama sıcaklıklarında homojen kristallenmeyi kolaylaştırabileceğini ifade etmişlerdir [39].

Sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilen ZnO filmlerin depolama parametrelerinin filmlerin yapıları, morfolojik özellikleri ve PL özellikleri üzerine etkisi ile ilgili yapılmış ilk çalışma S. Aksoy ve arkadaşları tarafından 2011 yılında literatüre eklenmiştir. Ayrıca bu çalışmada filmlerin kalınlıklarının döndürme hızı ve çözelti molaritesi ile değişimleri araştırılmıştır. Bu çalışmada artan döndürme hızı ile film kalınlığının azaldığı, artan molarite ile de film kalınlığının arttığı rapor edilmiştir. En iyi kristallenme 0,5 M çözelti kullanılarak 4000 rpm hızında elde edilen filmde gözlenmiştir. En büyük kristal boyutu 1 M çözelti kullanılarak elde edilen filmde gözlenmiştir. Tüm filmlerin yüksek geçirgenliğe sahip olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca PL ölçüm sonuçları depolama parametrelerinin film kalitesi üzerine önemli etkilere sahip olduğunu göstermiştir [40].

S. Aksoy ve Y. Çağlar 2012 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle p-Si alttaş üzerine ZnO film elde ederek p-Si/n-ZnO heteroeklem diyot üretmişlerdir. Bu çalışmada ilk olarak ZnO filmin yapısal ve morfolojik özellikleri incelenmiş, ardından diyotun elektriksel karakterizasyonu  $I - V$  ölçümleri yardımıyla yapılmıştır.  $I - V$  ölçümleri farklı ortam sıcaklıklarında yapılmıştır. 296 K’de idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla 6,40 ve 0,61 eV olarak bulunmuştur. 100 mWcm<sup>-2</sup> aydınlatma şiddeti altında maksimum açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) 0,19 V ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ )  $8,03 \times 10^{-8}$  A olarak bulunmuştur [41].

S.İlican ve arkadaşları 2008 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle cam alttaşlar üzerine Cd<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O filmlerini elde etmişlerdir. Bu işlem sırasında Cd/Zn oranını 0’dan 1’e kadar değiştirmişlerdir. Elde ettikleri filmlerin yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Tüm filmlerin polikristal yapıda olduğunu ve x değerinin 0’dan 1’e değişimi halinde kristal yapının da wurtzite (ZnO) yapıdan kübik (CdO) yapıya dönüştüğünü rapor etmişlerdir. CdO için (x=1)  $E_g=2,35$  eV ve ZnO için (x=0)  $E_g=3,27$  eV olarak bulmuşlardır.  $E_u$  enerjisinin de yapının CdO’dan ZnO’ya kaymasıyla 447 meV’den 81 meV’e azaldığını rapor etmişlerdir [42].

M. Caglar ve F. Yakuphanoglu 2008 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle p-Si alttaş üzerine CdO film üretmişlerdir. Daha sonra ürettikleri pn heteroeklem diyotun 80–400 K arasındaki ortam sıcaklıklarında elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca filmin yapısal ve optik özelliklerini de incelemişlerdir. Filmin polikristal yapıda ve (111) tercihli yönelime sahip olduğunu rapor etmişlerdir.  $E_g$  değerini ise 2,57 eV olarak hesaplamışlardır. Ortam sıcaklığının 80 K'den 400 K'e artması durumunda heteroeklem diyotun idealite faktörünün de 8,62'den 5,11'e azaldığını belirtmişlerdir. Akım taşınım mekanizmasının düşük sıcaklıklarda tünelleme mekanizması ile yüksek sıcaklıklarda ise rekombinasyon akımları ile kontrol edildiğini belirtmişlerdir [43].

S. Aksoy ve arkadaşları 2009 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle CdO filmlerini üretmişler ve farklı tavlama sıcaklıklarında (400–600°C) 1 saat tavlamışlardır. Tavlama sıcaklığının filmin yapısal ve optik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Filmlerin polikristal yapıda kristallendiğini ve (111) tercihli yönelime sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca  $E_g$  değerinin artan tavlama sıcaklığı ile 2,47 eV'den 2,22 eV'ye azaldığını rapor etmişlerdir. Hem yapısal hem de optik karakterizasyon sonuçlarını göz önünde bulundurarak, en iyi filmin 400°C tavlama sıcaklığına maruz kalan film olduğunu rapor etmişlerdir [44].

S. Ilıcan ve arkadaşları 2009 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle katkısız ve Al katkılı CdO filmler elde etmişlerdir. Al katkısı olarak %1 ve %3 oranlarını kullanmışlardır. Katkısız ve Al katkılı filmlerin polikristal yapıda kristallendiklerini ve (111) tercihli yönelime sahip olduklarını belirtmişlerdir. Optik absorpsiyon ölçümleri sonucunda filmlerin  $E_g$  değerlerini hesaplamışlardır. Katkısız, %1 Al katkılı ve %3 Al katkılı filmler için sırasıyla 2,476; 2,591; 2,682 eV olarak bulmuşlardır. Optik sabitlerin Al katkısından oldukça fazla etkilendiğini buna bağlı olarak da optik sabitlerin ve absorpsiyon sınırının Al katkısı ile rahatlıkla kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir [45].

S. Dhankhar ve arkadaşları 2010 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle CdO filmlerini elde etmişlerdir. Depolama sıcaklığı olarak 200°C, tavlama sıcaklığı olarak da 250°C'den başlayarak dakikada 3°C artan sıcaklıklarla 450°C'ye kadar 2 saat hava ortamını seçmişlerdir. CdO filmlerinin polikristal yapıda kristallendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çözelti molaritesi ve kaplama sayısındaki artışa bağlı olarak film kalınlığının arttığını, kalınlığın artmasına bağlı olarak da ortalama kristal boyutunun arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca çözelti molaritesinin artmasıyla örgü parametre değerlerinin

azaldığını rapor etmişlerdir. Kaplama sayısı ve molaritenin artmasıyla  $E_g$  değerinin de azaldığını belirtmişlerdir [46].

M. J. Cheon ve arkadaşları 2011 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle  $Cd_xZn_{1-x}O$  filmlerini elde etmişlerdir. Filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini incelemişlerdir.  $x$  değerinin 0'dan 1'e değişmesiyle; filmlerin ortalama kristal boyutlarının 42,1 nm'den 63,9 nm'ye arttığını ve  $E_g$  değerinin 3,25 eV'den 2,16 eV'ye azaldığını belirtmişlerdir [47].

F. Yakuphanoglu 2011 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle katkısız ve Ni katkılı CdO filmler elde etmiştir. Ni katkısı olarak %2, 4, 6 ve 8 katkı oranlarını belirlemiştir. Filmlerin yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonlarını yapmıştır. Tüm filmlerin polikristal yapıya sahip olduğunu ve kübik yapıda kristallendiğini ayrıca filmlerin (111) ve (200) düzlemlerinde iki karakteristik pike sahip olduğunu belirtmiştir. Filmlerin  $E_g$  değerlerinin 2,26–2,60 eV aralığında olduğunu, %6 Ni katkılı CdO filmine kadar  $E_g$  değerinin arttığını, %8 Ni katkılı CdO filminin  $E_g$  değerinin azaldığını belirtmiştir. Sonuç olarak CdO filminin  $E_g$  değerinin ve ortalama kristal boyutunun Ni katkısı ile kontrol edilebileceğini belirtmiştir [48].

Gupta ve arkadaşları 2011 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle Cu katkılı CdO filmler elde etmişlerdir. Filmlerin optik ve morfolojik özelliklerini araştırmışlardır. AFM sonuçlarından filmlerin kristal boyutlarının nanometre mertebesinde olduğunu ve artan Cu katkısı ile boyutların azaldığını rapor etmişlerdir. Cu katkılama işleminin katkısız CdO filmine göre  $E_g$  değerinde azalmaya sebep olduğunu, fakat Cu katkı miktarının artmasıyla  $E_g$  değerlerinin 2,41 eV'den 2,49 eV değerine arttığını rapor etmişlerdir. Bu artışın sebebinin kuantum boyut etkisi olduğunu belirtmişlerdir [49].

S. Aksoy ve Y. Caglar 2011 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle elde ettikleri CdO filmi kullanarak p-Si/n-CdO heteroeklem diyot üretmişlerdir. İlk olarak filmin yapısal ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Filmin polikristal yapıda olduğunu ve nanoboyuttaki parçacıkların biraraya gelerek oluşturdukları kümeleşmiş yapıların filmi oluşturduğunu belirtmişlerdir. Al/p-Si/n-CdO/Au heteroeklem diyotunun elektriksel karakterizasyonu sonucu diyotun idealite faktörünü 3,02; engel yüksekliğini 0,64 eV olarak bulmuşlardır. Ayrıca diyotun ışığa duyarlılığını araştırmışlar ve  $100 \text{ mWcm}^{-2}$  aydınlanma şiddeti altında maksimum açık devre voltajını  $V_{oc}=0,04 \text{ V}$ , kısa devre akımını  $I_{sc}=9,92 \times 10^{-9} \text{ A}$  bulmuşlardır [50].

N. Ozer ve arkadaşları 1991 yılında ilk kez sol jel spin kaplama yöntemiyle TiO<sub>2</sub> filmleri elde etmişlerdir. Filmlerin yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. 350°C'nin altındaki sıcaklıklarda amorf yapıda olduğunu belirtmişlerdir. Ultraviyole, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerdeki geçirgenlik spektrumlarından yararlanarak kırılma indisi ve sönüm katsayısı değerlerini hesaplamışlardır [51].

M.Z. Atashbar ve W. Wlodarski 1997 yılında yüzey akustik dalga (SAW) aygıtlarını üretmek için ilk kez sol jel spin kaplama yöntemiyle LiNbO<sub>3</sub> alttaşlar üzerine katkılı TiO<sub>2</sub> filmler elde etmişlerdir. Yüksek frekanslı bir elektronik yazılım paketi kullanarak SAW oksijen sensörünün performansını belirleyebilmek için modelleme ve simülasyon çalışmaları yapmışlardır. Simüle edilen sonuçları değerlendirmek için yapılan deneysel çalışmalar sayesinde, oksijen konsantrasyonundaki düşmeye bağlı olarak katkılı TiO<sub>2</sub> filmlerin direncinin de düştüğünü rapor etmişlerdir. Sonuç olarak, katkılı TiO<sub>2</sub> filmleri ile kaplanmış olan SAW sensörlerinin belirli konsantrasyon aralığında oksijen tesbiti yapabileceğini rapor etmişlerdir [52].

Y.X. Li ve arkadaşları 1997 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle ITO alttaşlar üzerine TiO<sub>2</sub> filmlerini elde etmişlerdir. TiO<sub>2</sub> filmlerinin yapısal analizleri sonucu anataz fazda kristallendiklerini rapor etmişlerdir. TiO<sub>2</sub> filmlerini kullanarak boya duyarlı fotovoltaiik piller üretmişlerdir.  $I - V$  karakteristikleri yardımıyla  $I_{sc}$  değerini 7 mA/cm<sup>2</sup> ve  $V_{oc}$  değerini 0,6 V bulmuşlardır [53].

N. Kaliwoh ve arkadaşları 2000 yılında ilk kez sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin fiziksel özellikleri üzerine döndürme hızının etkisini araştırmışlardır. Filmlerin kalınlıklarının 10–200 nm arasında olduğunu ve kalınlık değerlerinin döndürme hızı ile kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir. Kırılma indisini 2,4; görünür bölgedeki ortalama geçirgenlik değerlerinin de %85–95 aralığında olduğunu rapor etmişlerdir [54].

T. Attia ve arkadaşları 2000 yılında ilk kez sol jel spin kaplama yöntemiyle farklı konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlayarak TiO<sub>2</sub> filmlerini elde etmişlerdir. Daha sonra farklı döndürme hızlarının ve farklı tavlama sıcaklıklarının filmlerin kalınlıkları ve optik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Film kalınlıklarının 56–129 nm aralığında olduğunu ve artan döndürme hızı ile film kalınlıklarının eksponansiyel olarak azaldığını rapor etmişlerdir. Kırılma indisinin, artan döndürme hızı ile azaldığını, artan tavlama sıcaklığı ile de arttığını ifade etmişlerdir. Çözelti konsantrasyonu ve yaşlanma süresine bağlı olarak başlangıç çözeltilisinin viskozitesinin arttığını rapor etmişlerdir [55].

X. S. Li ve arkadaşları 2004 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle TiO<sub>2</sub> filmlerini elde etmişler ve bu çalışmada ilk kez bu yöntemle elde edilen filmlerin fiziksel özellikleri üzerine pH'nin etkisi araştırılmıştır. Filmlerin solucan benzeri gözenekli bir yapıya sahip olduğunu ve filmlerin yapısal özelliklerinin, özellikle gözeneklilik oranının pH ve çözücü buharlaştırma gibi yöntemlerle kontrol edilebileceğini rapor etmişlerdir [56].

Z. Liu ve arkadaşları 2006 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle elde ettikleri TiO<sub>2</sub> filmini kullanarak ilk kez ITO/nano-crystalline TiO<sub>2</sub>/polyaniline/ITO heteroeklem yapısını üretmişlerdir. Heteroeklem yapının doğrultma özelliği gösterdiğini, bu pn heteroeklem yapının fotovoltaiik güneş pili olarak kullanıma uygun olduğunu belirtmişlerdir [57].

T. S. Senthil ve arkadaşları 2010 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle TiO<sub>2</sub> filmlerini elde etmişlerdir. Filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerine tavlama sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Tavlanmamış filmin amorf yapı sergilediğini, 450°C ve 550°C'de tavlanan filmlerin anataz fazda kristallendiğini ve ortalama kristal boyutlarının sırasıyla 19 nm ve 22 nm olduğunu rapor etmişlerdir. Elde edilen filmlerin Raman spektrumlarında 145 cm<sup>-1</sup>, 394 cm<sup>-1</sup>, 513 cm<sup>-1</sup> ve 635 cm<sup>-1</sup>'de bulunan titreşim piklerinin TiO<sub>2</sub>'nin anataz fazının Raman modları olduğunu rapor etmişlerdir [58].

Ü. Ö. Akkaya Arıer ve F. Z. Tepehan 2011 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle TiO<sub>2</sub> filmler elde etmişlerdir. Hazırladıkları çözeltilerin pH değerlerini asetik asit yardımıyla 4 olarak sabitlemişlerdir. Filmlerin fiziksel özellikleri üzerine sıcaklığın etkisini araştırmak için 400°C'de depolanan filmleri 450, 500 ve 550°C'de tavlama yapmışlardır. Filmlerin kristal boyutlarının tavlama sıcaklığı ile arttığını bu sonucun da sıcaklığa bağlı olarak artan kristalizasyon hızından kaynaklandığını ve tüm filmlerin tercihli yöneliminin (211) düzleminde olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, artan kristal boyutu ile filmlerin pürüzlülüğünün arttığını, geçirgenliklerinin azaldığını belirtmişlerdir. Bunlara ilave olarak artan tavlama sıcaklığı ile  $E_g$  değerinin azaldığını da rapor etmişlerdir [59].

M. M. El-Nahass ve arkadaşları 2012 yılında sol jel spin kaplama yöntemi ile kuvars alttaşlar üzerine farklı kalınlıklarda TiO<sub>2</sub> filmler elde etmişlerdir. Filmlerin yapısal ve optik karakterizasyonlarını yapmışlardır. Tüm filmler için doğrudan enerji aralığı değerini 3,721 eV, dolaylı enerji aralığı değerini 3,47 eV olarak bulmuşlardır. Ayrıca

Urbach enerji değerini de 415 meV olarak bulmuşlardır. Filmlerin görünür ve NIR bölgedeki ortalama %T değerinin yaklaşık %95 olduğunu rapor etmişlerdir [60].

S. Nadzirah ve U. Hashim 2013 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle TiO<sub>2</sub> filmler elde etmişlerdir. Tavlama sıcaklığının filmlerin morfolojik, yapısal ve elektriksel özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Tavlama sıcaklığının 300°C'den 900°C'ye arttırılmasıyla ortalama kristal boyutlarının 14,4 nm'den 39,8 nm'ye arttığını rapor etmişlerdir. Her sıcaklıkta hem anataz hem de rutil faza ait piklere rastlanmış olup, tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte rutil faza ait piklerin şiddetlerinin daha da arttığını XRD spektrumlarından yararlanarak rapor etmişlerdir [61].

S. Aksoy ve Y. Caglar 2014 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle farklı depolama sıcaklıklarında TiO<sub>2</sub> filmler elde etmişlerdir. Bu filmlerin yapısal ve morfolojik özelliklerini araştırmışlardır. XRD spektrumları yardımıyla, artan depolama sıcaklığı ile birlikte filmlerin kristal yapılarının anataz fazdan rutil faza geçtiğini belirtmişlerdir. Artan depolama sıcaklığı ile kristal boyutunun arttığını belirtmişlerdir. Ardından 700°C'de depolanan filmi kullanarak n- TiO<sub>2</sub>/p-Si heteroeklem diyot yapmışlardır. Diyotun idealite faktörünü ve engel yüksekliğini sırasıyla 5,39 ve 0,58 eV olarak bulmuşlardır. Ayrıca Cheung ve Norde metotları yardımıyla da engel yüksekliklerini ve seri direnç değerlerini hesaplamışlardır. Engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini Cheung metodunu kullanarak 0,68 eV ve 30,8 kΩ, Norde metodunu kullanarak 0,51 eV ve 49,0 kΩ olarak bulmuşlardır [62].

D. J. Yoo ve arkadaşları 1996 yılında ilk kez sol jel spin kaplama yöntemiyle kuvars alttaşlar üzerine 150 nm'ye kadar farklı kalınlıklarda SnO<sub>2</sub> filmlerini elde etmişlerdir. Ayrıca filmleri 800°C'ye kadar farklı sıcaklıklarda ısıl işleme maruz bırakmışlardır. Kalınlığı daha az olan filmlerde kristal boyutunun daha küçük olduğunu belirtmişlerdir. Isıl işleme maruz bırakılmış filmlerdeki kristal boyutunun bastırılmasının yani daha küçük kristal boyutu oluşmasının, artan sıcaklıkla birlikte ultra ince SnO<sub>2</sub> filmdeki tanelerin hareket ettirilmesi ve birbiri ile birleşmesinden dolayı kristal boyutlarının küçüldüğünü belirtmişlerdir [63].

Y. J. Lin ve C. J. Wu sol jel spin kaplama yöntemiyle ilk kez 1996 yılında katkılı SnO<sub>2</sub> filmler elde etmişlerdir. Katkı maddesi olarak antimon (Sb) kullanmışlardır. Elde ettikleri filmlerin yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Yüzey morfolojilerinin pürüzsüz olduğunu belirtmişlerdir. Filmlerin görünür bölgedeki en düşük ortalama geçirgenlik değerini %80 olarak bulmuşlardır. Sb katkısı ile jelleşme işleminin

hızlandığını, kristal boyutunun küçüldüğünü ve filmlerin direnç değerlerinin düştüğünü rapor etmişlerdir [64].

C. Goebbert ve arkadaşları sol jel spin kaplama yöntemiyle ilk kez 1998 yılında Sb katkılı SnO<sub>2</sub> toz üretimi yapmışlar ve bu tozların fiziksel özellikleri üzerine hazırlanan çözeltinin pH değerinin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında pH değeri 8 ve daha yüksek çözeltiler kullanmışlardır. Ancak sol jel spin kaplama yöntemiyle farklı pH (10,5 ve 12,2) değerlerinde çözeltiler kullanarak SnO<sub>2</sub> filmini ilk kez 2004 yılında D. D. Vuong ve arkadaşları üretmiştir. Bu çalışmada ise elde ettikleri filmlerin yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Her bir çözelti için farklı hidrotermal işlem (200°C ve 250°C) uygulamışlardır. Ayrıca hidrotermal işlemin uygulanma süresi üzerinde de çalışmalar yapmışlar ve filmleri 1–36 saat arası değişen sürelerde ısı işleme maruz bırakmışlardır. Sonuç olarak artan pH değerinin ve ısı işlem süresinin ortalama kristal boyutunda artışa neden olduğunu rapor etmişlerdir [65, 66].

S. S. Kim ve arkadaşları sol jel spin kaplama yöntemiyle 1999 yılında In katkılı SnO<sub>2</sub> filmler elde etmişler ve ilk kez bu yöntemle elde edilmiş filmlerin bazı fiziksel özellikleri üzerine tavlama sıcaklığının etkilerini araştırmışlardır. Daha homojen olması ve istenilen kalınlıkta film üretilebilmesi için her spin-kurutma işleminin 150°C ve 300°C olmak üzere iki aşamadan oluştuğunu belirtmişlerdir. Film kalınlıklarını 50–500 nm arasında olacak şekilde belirlemişlerdir. Ayrıca tavlama sıcaklıklarını da 350–550°C arasında seçmişlerdir. Elde ettikleri filmleri farklı ortamlarda (hava, oksijen ve azot) ve farklı ortam sıcaklıklarında tavlama işlemine maruz bırakmışlardır. 250 nm kalınlığındaki filmleri 350, 400 ve 500°C hava ortamında tavlama işlemine maruz bıraktıktan sonra filmlerin optik özelliklerini incelemek için geçirgenlik ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta artan tavlama sıcaklığı ile filmlerin görünür bölgedeki ortalama %*T* değerlerinin arttığını rapor etmişlerdir. Bu sonucu, artan tavlama sıcaklığına bağlı olarak filmlerin yapısal olarak homojenleşmesi ve kristal yapının iyileşmesinden kaynaklandığı şeklinde yorumlamışlardır [67].

L. B. Roberson ve arkadaşları sol jel spin kaplama yöntemiyle 2004 yılında ilk kez farklı spin hızlarında (17, 33, 50 ve 83 rps) SnO<sub>2</sub> filmler elde etmişlerdir. Artan döndürme hızına bağlı olarak film kalınlıklarını sırasıyla 100, 70, 40 ve 12 nm olarak bulmuşlardır. Filmlerin AFM görüntüleri yardımıyla, ısı işlem sırasında kalın filmlerin yüzeylerinde çatlaklar gözlemlendiğini, oysa daha ince filmlerin yüzeylerinin daha homojen olduğunu belirtmişlerdir [68].

E. Savarimuthu ve arkadaşları sol jel spin kaplama yöntemiyle 2006 yılında en iyi kalitede SnO<sub>2</sub> film elde etmek için en uygun parametreleri araştırmışlardır. Bu parametreler arasında çözelti konsantrasyonu, döndürme hızı ve süresi, kaplama kalınlığına bağlı olarak film kalınlığı ve ısıl işlem için uygun sıcaklık değerlerine yer vermişlerdir. Molarite değerini 0,06; 0,055; 0,050; 0,045; 0,035; 0,030 ve 0,025 M olarak belirlemişlerdir. Azalan molarite değerine bağlı olarak filmlerin direnç değerlerinin azaldığını, çözelti konsantrasyonunun 0,035 M değerinde en düşük dirence sahip olduğunu, daha düşük konsantrasyonlarda ise filmlerin direnç değerlerinin arttığını rapor etmişlerdir. Bu durumun sebebi olarak, çözelti konsantrasyonunun artmasıyla, atom sayısının ve dolayısıyla oksijen boşluklarının sayısının artabileceğini ve buna bağlı olarak iletkenlik değerinin artabileceğini, dolayısıyla da direnç değerinin düşebileceğini belirtmişlerdir. Bu durumun, çözünen madde konsantrasyonunun, dolaylı olarak atom sayısının film için en uygun değeri alıncaya kadar devam edeceğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak oksijen boşluklarının sayısının ve buna bağlı olarak da iletkenliğin maksimum olduğu, direnç değerinin minimum olduğu bu değer film için optimum değer olabileceğini rapor etmişlerdir [69].

Y. Caglar ve arkadaşları 2009 yılında sol jel spin kaplama yöntemi ile SnO<sub>2</sub> filmi elde etmişlerdir. Filmin optik ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Filmin  $E_g$  değerini 3,58 eV olarak bulmuşlardır. Filmin FESEM görüntüleri yardımıyla nano yapıli taneciklerden oluştuğunu belirtmişlerdir. Bu fiziksel özelliklerin araştırılmasından sonra ilk kez bu çalışmada SnO<sub>2</sub>/p-Si diyotunu üretilmişlerdir. Diyotun  $I - V$  karakteristiği yardımıyla idealite faktörünü, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini sırasıyla 2,1; 0,87 eV ve 36,35 k $\Omega$  olarak hesaplamışlardır. Ayrıca  $C - V$  ölçümleri yardımıyla da engel yüksekliği değerini hesaplamışlardır.  $C - V$  ölçümü yardımıyla hesaplanan engel yüksekliği,  $I - V$  ölçümü yardımıyla hesaplanan engel yüksekliğinden daha yüksektir. Bu durumun, SnO<sub>2</sub>/p-Si arayüzeyinde engel yüksekliğinin homojen olmamasından kaynaklanmış olabileceğini ifade etmişlerdir [70].

Z. L. Gui ve arkadaşları 2010 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle Nb katkıli SnO<sub>2</sub> filmler üretmişlerdir. Filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini incelemişlerdir. %0,99 değerinden daha az Nb katkıli SnO<sub>2</sub> filmlerinin tetragonal rutil fazda kristallendiğini, filmin homojen dağılmış nanoparçacıklardan oluştuğunu ve bu parçacıkların boyutlarının 5–7 nm arasında olduğunu rapor etmişlerdir. En düşük direnç değerinin  $9,49 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}$  ile %0,37 Nb katkıli SnO<sub>2</sub> film için hesaplandığını

belirtmişlerdir. Filmlerin  $E_g$  değerlerinin 3,9–4,1 eV arasında bulunduğunu rapor etmişlerdir [71].

J. S. Jeng 2012 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle Sb katkılı SnO<sub>2</sub> filmler elde etmişlerdir. Filmlerin fiziksel karakterizasyonlarını araştırmadan önce N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> ortamlarında tavlama işlemi yapmışlardır. Bu filmlerin artan tavlama sıcaklığı ile direnç değerlerinin azaldığını, bu durumun ise film kusurlarının azalmasından ve kristal yapının iyileşmesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. XRD spektrumlarında yer alan SnO<sub>2</sub> pikinin şiddetinin artan tavlama sıcaklığı ile arttığını belirtmişlerdir. N<sub>2</sub> ortamında tavlama işlemi yapılan SnO<sub>2</sub> filmlerinin yüzeylerinde ortaya çıkan boşlukların, aynı atmosfer ortamında Sb katkısından sonra yüksek sıcaklıklarda tavlama işlemiyle kaybolduğunu rapor etmişlerdir [72].

R. D. Sakhare ve arkadaşları 2013 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle SnO<sub>2</sub> filmlerini elde etmişlerdir. Depolama sıcaklığının filmlerin yapısal, morfolojik, elektriksel iletkenlikleri ve optik özellikleri üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Filmlerin tetragonal fazda kristallendiklerini, filmlerin yüzeyinin nano yapıdaki taneciklerden oluştuğunu, nanokristallerin 5 – 10 nm çapında olduğunu ve film yüzeylerinin pürüzsüz olduğunu rapor etmişlerdir. Filmlerin oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenlik değerlerinin depolama sıcaklığının 400°C'den 700°C'ye artırılmasıyla 10<sup>-7</sup> (Ωcm)<sup>-1</sup> mertebesinden 10<sup>-5</sup> (Ωcm)<sup>-1</sup> mertebesine arttığını rapor etmişlerdir. Depolama sıcaklığının artışı ile birlikte  $E_g$  değerinin 3,88 eV'den 3,60 eV değerine azaldığını rapor etmişlerdir [73].

M. P. S. Rana ve arkadaşları 2014 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle Sb katkılı SnO<sub>2</sub> filmleri farklı tavlama sıcaklıklarında elde etmişlerdir. Tavlama işleminin filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. UV-görünür bölgede filmlerin  $E_g$  değerindeki değişimin kuantum boyut etkisinden kaynaklanmış olabileceğini belirtmişlerdir [74].

B. Özüğür Uysal ve Ü. Ö. Akkaya Arıer 2015 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle SnO<sub>2</sub> filmlerini elde etmişlerdir. Filmler elde edilirken farklı su oranlarında çözeltiler hazırlanmıştır. Su oranının ve ısıtma işleminin filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak SnCl<sub>2</sub>:su oranı ile kristal boyutunun kontrol edilebileceğini ve tetragonal rutil fazın 450°C'ye yakın bir sıcaklıkta ortaya çıkmaya başladığını belirtmişlerdir. Filmlerin aktivasyon enerjisi ( $E_a=42,8$  kJ/mol) ve  $E_g$  değerlerinin (3,02 – 3,25 eV) SnCl<sub>2</sub>:su oranı ile ilişkili olduğunu,  $E_g$  değerindeki

kaymanın nano parçacıklar üzerindeki kuantum boyut etkisinden kaynaklandığını rapor etmişlerdir [75].

S. Aksoy ve arkadaşları 2016 yılında sol jel spin kaplama yöntemiyle SnO<sub>2</sub> filmlerini elde etmişler ve tavlama sıcaklığının filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerine etkisini araştırdıktan sonra p-Si/n-SnO<sub>2</sub> diyotunu üretmişlerdir. Artan tavlama sıcaklığı ile ortalama kristal boyutunun arttığını, filmlerin yüzeyinin yaklaşık 10 nm boyutundaki taneciklerin homojen dağılımından oluştuğunu belirtmişlerdir. 600°C’de tavlanan film kullanılarak elde edilen heteroeklem diyotun idealite faktörünü ve engel yüksekliğini sırasıyla 5,22 ve 0,49 eV olarak bulduklarını rapor etmişlerdir. Ayrıca ara yüzey durumlarının diyotun iletim mekanizmasında önemli rol oynadığını belirtmişlerdir. Difüz reflektans spektrumları yardımıyla 400, 500 ve 600°C’de tavlanan filmlerin  $E_g$  değerlerini sırasıyla 3,70; 3,86 ve 4,06 eV olarak bulmuşlardır [76].

#### **1.4. Amaç**

Bu tez çalışmasında, farklı alttaşlar üzerine sol jel spin kaplama yöntemi kullanılarak ZnO, CdO, TiO<sub>2</sub> ve SnO<sub>2</sub> metal oksit filmleri farklı çözelti ve depolama parametrelerinde elde edilerek, fiziksel karakterizasyonlarının yapılması, ardından da bu filmler kullanılarak üretilen heteroeklem diyotların elektriksel karakterizasyonlarının yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak ZnO, CdO, TiO<sub>2</sub> ve SnO<sub>2</sub> farklı depolama ve çözelti parametrelerinde elde edilmiştir. Elde edilen bu filmlerin kristal yapıları, yüzey morfolojileri, görünür bölgedeki geçirgenlik değerleri ve yasak enerji aralığı değerleri araştırılmıştır. Daha sonra elde edilen bu filmlerden uygun olanları ile n-XO/p-Si (X:Zn<sup>+2</sup>, Cd<sup>+2</sup>, Ti<sup>+1</sup>, Sn<sup>+1</sup>) pn heteroeklem diyotlarının fabrikasyonları yapılmıştır. Ardından bu yapıların  $I - V$  ölçümleri kullanılarak, elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır.

## 2. TEORİK BİLGİLER

### 2.1. Yapısal Karakterizasyon

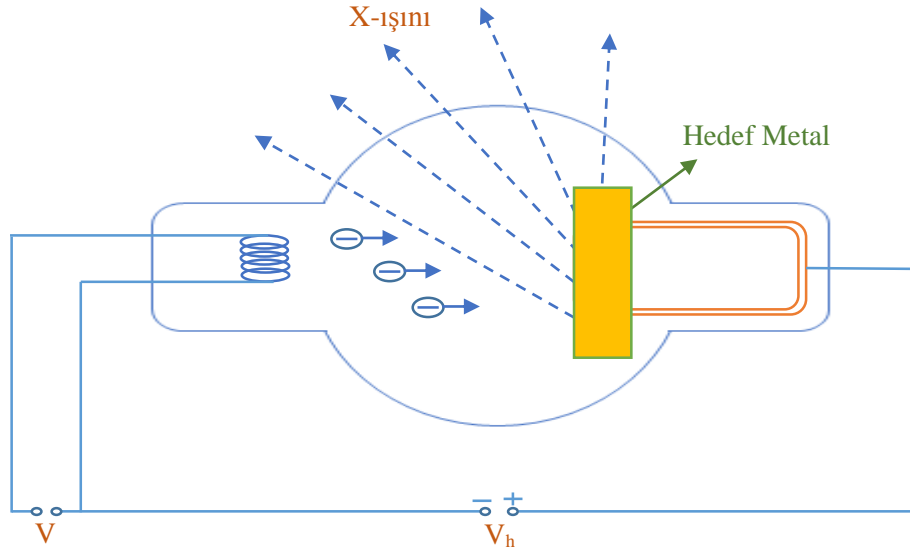
X-ışınları, dalga boyları  $\sim 1\text{Å}$  mertebesinde olan elektromagnetik dalgalardır. X-ışınlarının dalga boylarının kristaldeki atomlar arası mesafe mertebesinde olması, kristal yapı hakkında bilgi edinme imkanı sağlar. Kristal yapının analizi X-ışını kırınım (XRD) metodu ile yapılabilir. XRD metodu, analiz sırasında kristalin yapısına zarar vermez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasına olanak sağlar. Bu nedenle X-ışınları, yapı analizi çalışmalarında oldukça önemli bir yer tutar.

Bu tez çalışmasında, elde edilen filmlerin yapısal karakterizasyonları Görsel 2.1’de gösterilen BRUKER D8 Advance marka ve modelindeki XRD kullanılarak yapılmıştır. Cihaz bakır hedefli X-ışını tüpüne ve tüpteki ani sıcaklık değişimlerini kontrol eden su soğutucusuna sahiptir. Karakterizasyon çalışmaları  $\lambda = 1,54059\text{Å}$  dalga boylu  $CuK\alpha$  ışını kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Toz örneklerin ya da filmlerin XRD spektrumu elde edildikten sonra yapılan kalitatif analizlerde, cihazın kütüphanesindeki kartlarla karşılaştırma yapılarak fazlar belirlenmektedir. Elde edilen XRD spektrumu, DIFFRAC EVA programında ve kütüphanedeki kartlara göre değerlendirilmektedir. Bu program ile elde edilen XRD spektrumu ve veri kartları eşleştirilmektedir. Örneğin, bir malzeme için hesaplanan örgü sabiti değerleri veri kartındaki değerle kıyaslandığında arada bir fark olması, malzemede bir deformasyon olduğunu gösterir. Bu durum yer değiştiren kusurlardan veya amorf alttaş tarafından oluşturulan gerilmelerden kaynaklanabilir [77].

X-ışınlarının elde edilmesinde, Şekil 2.1’de gösterilen X-ışını (Röntgen) tüplerinden yararlanılmaktadır. Bu sistemlerde, havası boşaltılmış cam tüp içerisindeki anot ve katot levhaları arasına yüksek voltaj uygulanır. Termoiyonik olay sonucu katottan kopan elektronlar, anot-katot arasına uygulanan yüksek voltajın etkisiyle hızlandırılarak hedef metal konumunda olan anot üzerine düşürülür. Bu sırada enerjisini ve hızını kaybeden elektronlar her doğrultuda X-ışını yayar. Hedefe çarpan elektronların enerjilerinin çoğu ısıya dönüşürken %1 kadarı da X-ışınına dönüşür. Bu yüzden hedefin erimemesi için soğutma işlemi yapılır. Uygulanan voltaj değerine bağlı olarak çeşitli dalga boylarında X-ışınları elde edilebilir.



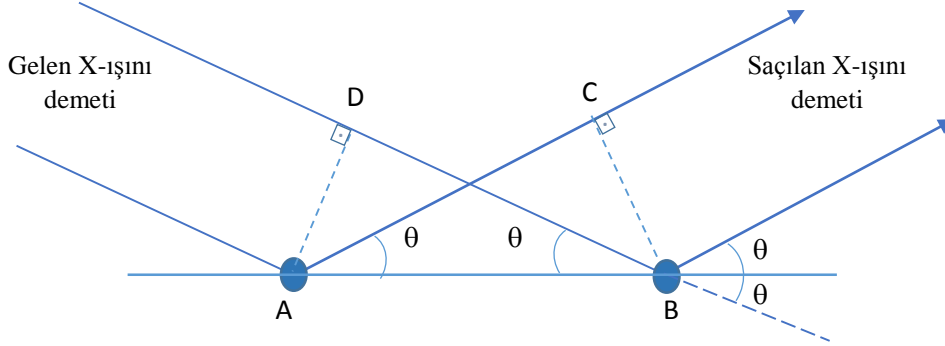
**Görsel 2.1.** BRUKER D8 Advance X-ışını kırınım (XRD) cihazı



**Şekil 2.1.** X-ışını tüpü

X-ışınları kristal yapı üzerine düşürüldüğünde, ışınlar katı yüzeyinden küçük geliş açılılarıyla tam yansımaya uğrarlar ve kristaldeki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılırlar. Kristal yapıdaki bu saçılmalar kırınım olarak adlandırılır. İngiliz fizikçi Sir William Henry Bragg ve oğlu Sir William Lawrence Bragg 1913 yılında X-ışınlarının

kristale belirli açılarda ( $\theta$ ) geldiğinde yansımaya uğradığını açıklayan bir ilişki geliştirmişlerdir. Bu çalışmalarını sayesinde 1915 yılında Nobel Fizik ödülünü almışlardır.



**Şekil 2.2.** Bir düzlemdeki A ve B ardışık örgü noktalarından X-ışınlarının saçılması

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi düzlem takımının bir düzlemine  $\theta$  açısı ile gelen X-ışınları ele alınsın. Bu şekil, AC ve DB uzaklıkları eşit ise, düzlemdeki iki ardışık A ve B örgü noktalarından saçılan dalgaların yapıcı bir girişimi olacağını açıklamaktadır. Saçılan dalga, gelen dalga gibi, düzlemle aynı  $\theta$  açısını yaparsa durum yukarıda belirtildiği gibidir. Böylece kırınıma uğramış dalga düzlemde yansımış gibi bir izlenim bırakır. X-ışını demetinin  $2\theta$  açısı kadar sapması gerekir ve bu durum yansıma şartı olarak bilinir. Burada  $2\theta$  kırınım açısı olup, gelen X-ışınının doğrultusu ile kırınıma uğrayan X-ışını arasındaki açıdır.

Kristalin gerçek tekrarlanan birimi, her örgü noktasına eşlik eden ve atomlardan oluşan yapı birimi olduğu için, atomlardan daha çok örgü noktalarıyla ilgili saçılma göz önüne alınır. Örgü noktası bir optik kırınım ağındaki çizgilerin benzeridir. Yapı birimi ise çizginin yapısını belirler. Şekil 2.2’de verilen bir düzlemde gerçekleşen saçılma bir kırınım maksimumu elde etmek için yeterli değildir. Aynı zamanda ardışık düzlemlerden de aynı fazda saçılma olmalıdır. Şekil 2.3’te görüldüğü gibi iki ardışık düzlemde olan saçılmalarda yol farkı, dalga boyunun tam katı ise yapıcı girişim gerçekleşir ve bir kırınım maksimumu elde edilir. Yani,

$$\text{yol farkı} = n'\lambda \quad (n'=1, 2, 3,...) \quad (2.1)$$

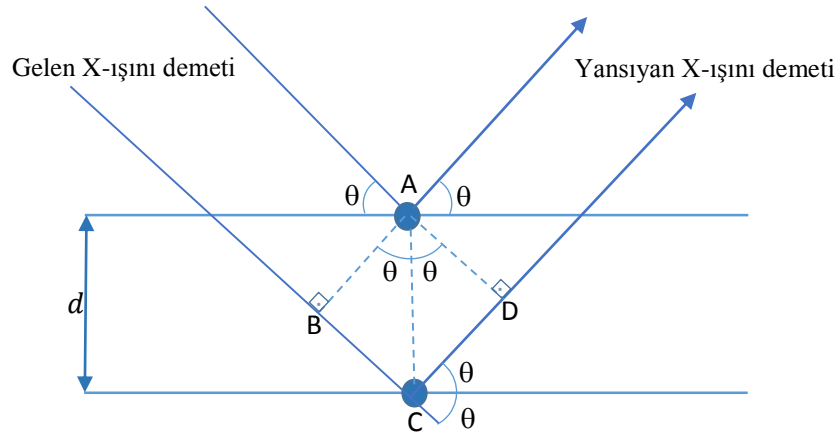
olmalıdır. Buna göre Şekil 2.3’teki gelen ışınlar arasındaki yol farkı

$$yol\ farkı = BC + CD = n'\lambda \quad (2.2)$$

$$d\sin\theta + d\sin\theta = n'\lambda \quad (2.3)$$

$$2d\sin\theta = n'\lambda \quad (2.4)$$

olmalıdır. Bu denklem Bragg Yasası olarak adlandırılır. Burada  $d$ , düzlemler arasındaki mesafedir ve  $n'$  ise yansımanın mertebesini veren bir tam sayıdır [78].



**Şekil 2.3.** Ardışık düzlemlerden X-ışınlarının saçılması

XRD spektrumları; amorf, polikristal ya da tek kristal durum, kristalografik yönelim, örgü parametreleri ve ortalama kristal boyutu hakkında bilgi vermektedir.

Bileşimi bilinen bir malzemede tercihli yönelimi karakterize etmenin en yaygın yolu, tercihli yönelim gösteren malzemenin kırınım şiddetlerini cihazda kayıtlı olan veri kartlarındaki şiddetlerle karşılaştırmaktır. Tercihli yönelimleri belirlemek amacıyla yapılanma katsayısı ( $TC$ ) için aşağıda verilen ifade kullanılır [79].

$$TC = \frac{I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}}{(1/N)[\sum_N I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}]} \quad (2.5)$$

Burada  $I_{0(hkl)}$ ,  $(hkl)$  düzleminin standart şiddeti,  $I_{(hkl)}$  ise aynı düzlemin gözlenen şiddetini ifade eder. Tercihli bir yönelme için  $TC$  değeri birden büyük olmalıdır [80].

Hekzagonal kristal yapının  $a$  ve  $c$  örgü parametreleri ve  $d$  düzlemler arası uzaklığı arasındaki ilişki [81].

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.6)$$

eşitliği ile tanımlanır.

Kübik kristal yapının  $a$  örgü parametresi ve  $d$  düzlemler arası uzaklığı arasındaki ilişki

$$\frac{1}{d^2} = \left[ \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right] \quad (2.7)$$

eşitliği ile tanımlanır.

Tetragonal kristal yapının birim hücreleri  $a$  ve  $c$  örgü parametreleri ve  $d$  düzlemler arasındaki ilişki

$$\frac{1}{d^2} = \left[ \frac{h^2 + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.8)$$

eşitliği ile tanımlanır.

Scherrer formülü kullanılarak ortalama kristal boyutu belirlenebilir. Ortalama kristal boyutu ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilir [82]

$$D = \frac{0,94 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.9)$$

Burada  $D$  ortalama kristal boyutu,  $\beta$  ilgili kristal yönü için radyan olarak yarı pik genişliği,  $\theta$  Bragg açısı ve  $\lambda$  kullanılan X-ışınının dalgaboyudur. Bir malzemedeki parçacıkların boyutları ne kadar küçülürse, XRD spektrumundaki piklerde de buna bağlı olarak bir genişleme söz konusu olur. Aynı zamanda kristaldeki kristal boyutu değerinden faydalanılarak kusur (dislokasyon) yoğunluğu da hesaplanabilir. Kusur yoğunluğu ( $\delta$ ) malzemenin kristallenmesi hakkında bilgi verir. Bu değer küçük olması malzemenin kristallenmesinin iyi olduğunun göstergelerinden biridir.

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (2.10)$$

Kristalizasyon kalitesi kusur yoğunluğu ile yakından ilişkilidir. Yukarıdaki bağıntı gereğince, kusur yoğunluğunun küçük olması, kristal boyutunun büyük olmasını gerektirir. Kristal boyutu büyük olan bir kristal için yarı pik genişliğinin dar olduğu yorumu yapılabilir. Bu durum da kristallenmenin iyi olduğunun kanıtıdır.

## 2.2. Morfolojik Karakterizasyon

Gelişen teknoloji ile birlikte literatüre giren yeni malzemelerin morfolojik karakterizasyonları da oldukça önem kazanmıştır. Malzemelerin ortalama kristal boyutları, homojenliği, elde edilen malzemenin yapısının gözenekliliği, kristallerin geometrisi gibi pek çok özellik taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenebilir.

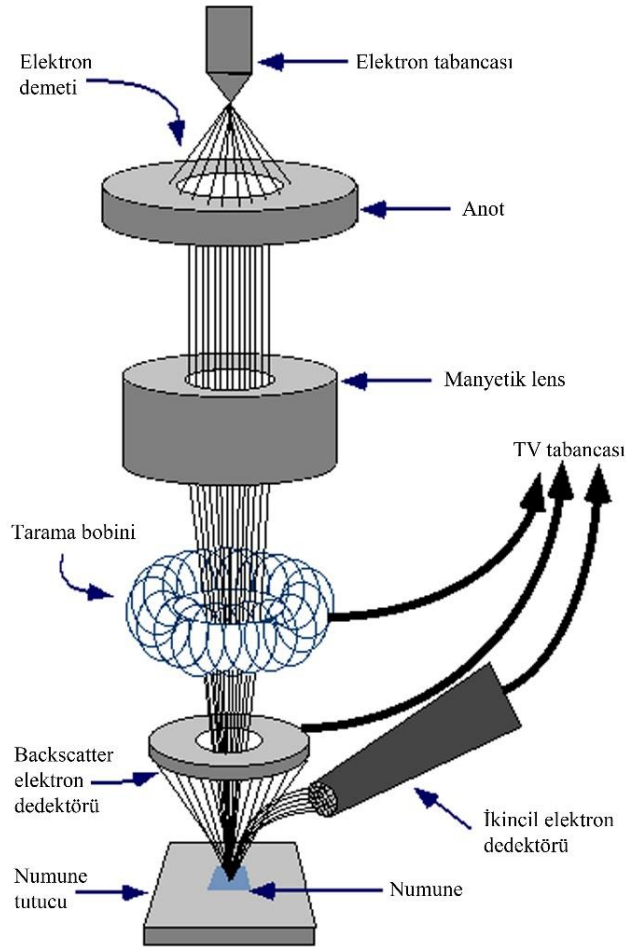
SEM'in tıp ve fizik alanında kullanılması 1950'lerin başlarından itibaren olmuştur. SEM'in diğer standart mikroskoplara göre çok çeşitli numunelerin incelenmesine izin vermesi ve yüksek çözünürlüğe sahip olması gibi birçok avantajı vardır. Bu yüzden küçük taneli ya da iç içe geçmiş taneli yapılar kolaylıkla incelenebilir. Çünkü SEM'de, lensler yerine elektromagnetler kullanır. Bu sayede incelenen numunenin büyütmesi araştırmacının kontrolündedir. Tüm bu avantajlar SEM'i günümüz araştırmaları için vazgeçilmez cihazlardan birisi yapmıştır.

SEM görüntü oluşturmak için ışık yerine elektronları kullanır. SEM'de görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir.

Bu çalışmada elde edilen filmlerin morfolojik karakterizasyonları Görsel 2.2'de gösterilen ZEISS ULTRA PLUS model yüksek çözünürlüklü alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) kullanılarak yapılmıştır. Şekil 2.4'te bir SEM cihazının ayrıntılı bir şematik yapısı verilmiştir. Elektron demeti, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi mikroskobun üst tarafında yer alan bir elektron tabancası tarafından üretilir. Elektron demeti vakum içinde tutulan bir mikroskop boyunca lensler ve elektromanyetik alan boyunca numuneye odaklanacak şekilde dikey bir yol izler. Elektron demeti numuneye çarptıktan sonra, numuneden elektronlar ve X-ışınları saçılır.

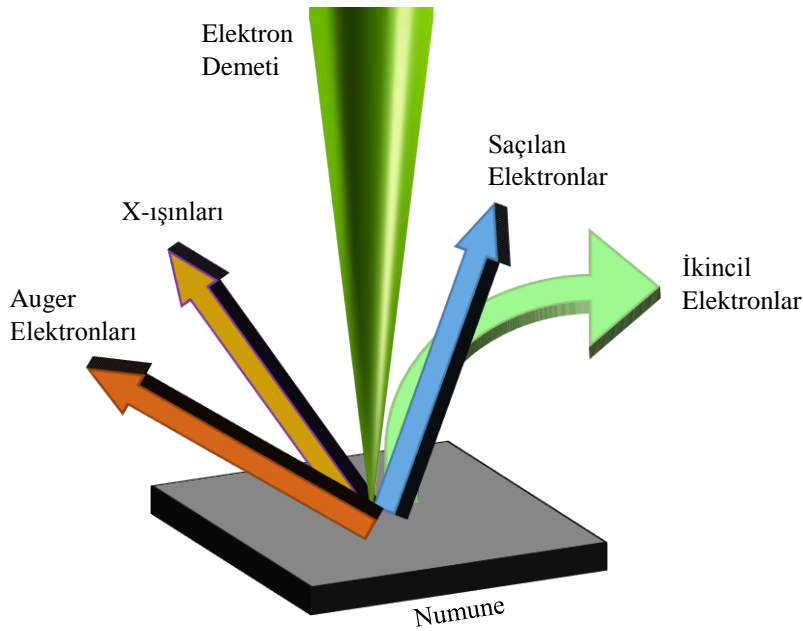


**Görsel 2.2.** ZEISS ULTRA PLUS model yüksek çözünürlüklü FESEM cihazı  
**Kaynak:** [83]



**Şekil 2.4.** Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) şematik yapısı  
**Kaynak:** [83]

Yüksek voltaj altında ivmelendirilen elektron demeti ile numune arasındaki etkileşim sonuçları Şekil 2.5'te şematik olarak gösterilmektedir. Yüksek enerjili elektron demeti numune atomlarının dış yörünge elektronları ile elastik olmayan girişimi sonucunda düşük enerjili Auger elektronları oluşur. Bu elektronlar numune yüzeyi hakkında bilgi taşır ve Auger spektroskopisinin çalışma prensibini oluşturur. Yine yörünge elektronları ile olan girişimler sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan demet elektronları numune yüzeyine doğru hareket ederek yüzeyde toplanırlar. Bu elektronlar ikincil elektronlar olarak tanımlanırlar. İkincil elektronlar numune odasında bulunan sintilatörde toplanarak ikincil elektron görüntüsü sinyaline çevirilir. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinlikten geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılırlar. Numune atomları ile elektron demeti arasında elastik olmayan girişimler sonucu numunede X-ışınları ve sürekli ışımlar da meydana gelmektedir. Karakteristik ışımlar yardımıyla numunenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi edinilebilir. Numune üzerine odaklanan elektron demeti, numune atomları ile ayrıca elastik girişimlerde de bulunabilir. Bu girişimlerde elektron demetleri, numune atomlarının çekirdeğinin çekim kuvveti ile saptırılarak numune yüzeyinden geri saçılmaktadırlar. Bu elektronlar geri saçılmış (back scattered) elektronlar olarak tanımlanır [84].



**Şekil 2.5.** Elektron demeti ile numune etkileşimi

SEM’de çalışmalar vakum ortamında yapılmalıdır. Bunun için birçok neden bulunmaktadır.

- (i) Eğer ortam vakum edilmez ise elektron demetinin yüksek kararsızlığından dolayı elektron demeti üretilemez, üretilse bile kalıcı olması sağlanamaz.
- (ii) Ortamda bulunan gazlar elektron kaynağı ile etkileşime girerek yanmasına neden olabilir veya elektron demeti bu gazların iyonlaşmasına neden olarak rasgele yüklerin oluşmasına neden olabilirler.
- (iii) Elektron demetinin örneğe ulaşması güçleşir.
- (iv) Ortamdaki gaz veya mikroskobun kendinden kaynaklanabilecek moleküller örneğin safsızlığını etkileyebilirler.

Tüm bu durumlar, ışık şiddetinin azalmasına veya görüntüde belirsizliklerin oluşmasına neden olmaktadır [85].

### 2.3. Optik Karakterizasyon

Yarıiletkenlerin  $E_g$  değerlerini belirlemek için kullanılan yöntemlerden bazıları

- Absorpsiyon yöntemi,
- PL (fotoluminesans) yöntemi ve
- Kubelka-Munk yöntemidir.

Bu yöntemler arasında optik absorpsiyon yöntemi en yaygın kullanılanlardan biridir. Absorpsiyon yöntemi ile  $E_g$  değerinin belirlenebilmesi için absorpsiyon katsayısının da hesaplanması gerekmektedir.

#### 2.3.1. Absorpsiyon katsayısının hesaplanması

Tek renkli ışık demeti absorplayıcı özelliği olan bir numune üzerine düşürülürse, Şekil 2.6’da gösterildiği gibi gelen ışığın şiddeti  $I_0$  ve geçen ışığın şiddeti  $I_T$  olup, numunenin çok ince olduğu düşünülürse ışık  $\Delta x$  kalınlığındaki bölgeden geçtikten sonra gelen ışığın şiddeti  $-\Delta I$  kadar azalır, azalma miktarı

$$-\Delta I = I_T - I_0 = I_0 \alpha \Delta x \quad (2.11)$$

olur.  $\alpha$ , absorpsiyon katsayısıdır ( $\alpha = 2,303 \times \text{absorpsiyon/kalınlık}$ ) ve absorplayıcı ortam ile ışığın dalgaboyu hakkında bilgi verir. ışığın iki ya da daha fazla ince  $\Delta x$

kalınlığındaki tabakadan geçtiği kabul edildiğinde, absorpsiyon katsayısı, numunenin karakteristiğini gösterecek ve gelen ışın şiddetinden bağımsız olacaktır. Böylece  $\Delta x$  kalınlığındaki plakanın arkasına yerleştirilen ikinci plakadan geçen ışığın şiddeti biraz daha az olacaktır. Fakat ikinci plakaya gelen ışığın şiddeti birinci plakaya gelenden az olacağı için kayıp daha az olacaktır. Fakat mutlak kayıp az olsa da her iki tabakadan olan ışık kaybı oranı eşit olacaktır. Bu durum N tabaka olsa da geçerli olacaktır. Bu durumda eşitliğin en genel hali

$$\Delta I = -I_0 \alpha \Delta x \quad (2.12)$$

$$\alpha = -\frac{\Delta I}{I_0 \Delta x} \quad (2.13)$$

şeklinde yazılacaktır. Katmanları  $dx$  kadar çok küçük kalınlıklara indirgersek, ışık her katmanı geçerken absorplanan ilk ışık şiddeti oranı  $(dI/I_0) = -\alpha dx$  halini alır. Toplam  $x$  kalınlıktan geçen ışık şiddetindeki azalmayı bulmak için bu ifade,  $x_i = 0$ 'da  $I_0$  ve  $x_f = x$ 'de  $I_T$  olmak üzere integral alınır;

$$\int_{I_0}^{I_T} \frac{dI}{I} = -\alpha \int_0^x dx \quad (2.14)$$

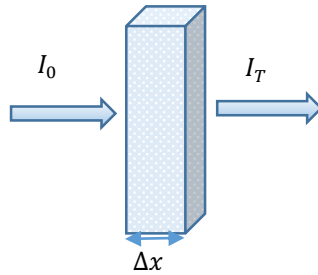
$$\ln\left(\frac{I_T}{I_0}\right) = -\alpha x \quad (2.15)$$

$$I_T = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.16)$$

Bu yasa absorpsiyon yasası olarak bilinir ve Lambert tarafından geliştirilmiştir. Beer Lambert yasası;

$$\alpha = \frac{1}{I(\lambda)} \frac{dI(\lambda)}{dx} \quad (2.17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $I(\lambda)$  ışık şiddetini,  $x$  ortam içinde gidilen yolu göstermektedir [86].



**Şekil 2.6.**  $\Delta x$  kalınlığındaki bir tabakada absorpsiyon

### 2.3.2. Temel absorpsiyon olayı

Temel absorpsiyon valans bandından iletim bandına bir elektronun, bandtan banda veya eksitonik geçişlerine karşılık gelir. Temel absorpsiyon bir yarıiletkenin yasak enerji aralığını belirlemede kullanılır.  $\lambda$  ışığın dalgaboyu,  $a$  örgü sabiti olmak üzere bir fotonun momentumu  $h/\lambda$ , kristalin momentumu  $h/a$  ile kıyaslandığında çok küçük olduğundan foton absorplama esnasında elektronun momentumu korunmalıdır.  $h\nu$  enerjili bir foton için absorpsiyon katsayısı  $\alpha$ , elektronun ilk durumdan son duruma geçiş olasılığı  $P_{if}$ , ilk durumdaki elektron yoğunluğu  $n_i$  ve son durumdaki elektron yoğunluğu  $n_f$  ile orantılıdır.

$$\alpha(h\nu) = A \sum P_{if} n_i n_f \quad (2.18)$$

Kolaylık olması açısından 0 K'de katkısız yarıiletkenler için tüm alt durumların dolu, tüm üst durumların boş olduğu kabul edilir [86].

#### 2.3.2.1. İzinli doğrudan geçişler

İki doğrudan band arasında absorpsiyon geçişleri düşünülürse, tüm korunumlu momentum geçişleri izinli olmalıdır. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi  $E_i$ 'deki her ilk durum  $E_f$ 'deki son durum ile ilişkilidir. Yani,

$$E_f = h\nu - |E_i| \quad (2.19)$$

olarak yazılır.

Parabolik bir band için

$$E_f - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (2.20)$$

$$E_i = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (2.21)$$

olarak alınır. Buradan hareketle,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left( \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (2.22)$$

bulunur. Durum yoğunluğu;

$$N(h\nu)d(h\nu) = \frac{8\pi k^2 dk}{(2\pi)^3} = \frac{(2m_r)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (h\nu - E_g)^{1/2} d(h\nu) \quad (2.23)$$

bulunur. Burada  $m_r$  indirgenmiş kütle olup

$$\frac{1}{m_r} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \quad (2.24)$$

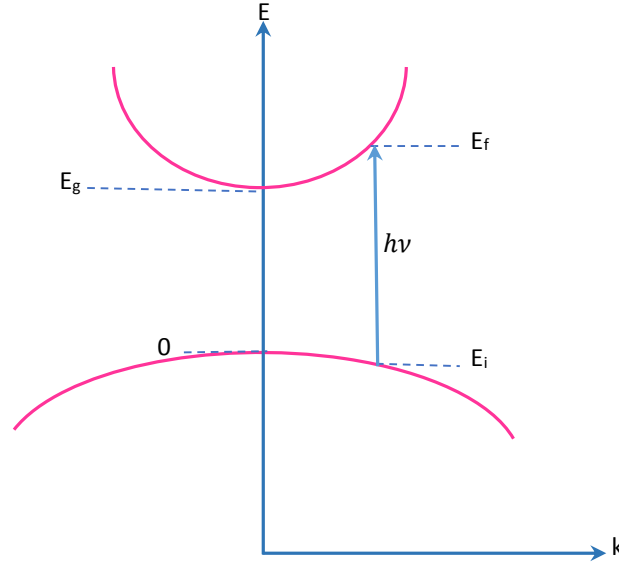
eşitliği ile tanımlıdır. Absorpsiyon katsayısı

$$\alpha(h\nu) = A^*(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $A^*$

$$A^* \approx \frac{q^2 \left( \frac{2m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{3/2}}{nch^2 m_e^*} \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilir. Yukarıda ifade edilen  $h\nu$  ve  $E_g$ , eV cinsinden ifade edilir [86].



**Şekil 2.7.** Parabolik bir band yapısında doğrudan geçiş

**Kaynak:** [86]

### 2.3.2.2. Yasaklı doğrudan geçişler

Bazı malzemelerde, kuantum seçim kuralları doğrudan geçişler için  $k = 0$ 'da izinsiz iken  $k \neq 0$ 'da izinlidir. Geçiş olasılığı  $k^2$  ile artar. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi, bu durum geçiş olasılığının  $(h\nu - E_g)$  ile artması anlamına gelir. Doğrudan geçişlerde durum yoğunluğu  $(h\nu - E_g)^{1/2}$  ile orantılı olduğundan absorpsiyon katsayısı;

$$\alpha(h\nu) = A'(h\nu - E_g)^{3/2} \quad (2.27)$$

ile tanımlanır. Burada  $A'$

$$A' = \frac{4q^2 \left( 2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{5/2}}{3 nch^2 m_e^* m_h^* hv} \quad (2.28)$$

şeklinde ifade edilir.

### 2.3.2.3. Dolaylı bandlar arası dolaylı geçişler

Bir geçiş hem enerji hem de momentumda bir değişim gerektirdiği zaman ikili ya da iki aşamalı işlem söz konusudur. Çünkü foton momentumunda bir değişme sağlayamaz. Momentum Şekil 2.8'de görüldüğü gibi fonon etkileşmesi yoluyla korunur. Fonon, örgü titreşiminin bir kuantumudur. Fononlar geniş bir spektrumda kullanılabilir olmalarına rağmen yalnızca yeterli momentum değişimi yapanlar kullanılabilir. Bunlar genellikle boyuna ve enine akustik fononlardır. Bu fononların her biri karakteristik bir  $E_p$  enerjisine sahiptir. Bu yüzden  $E_f$  ile  $E_i$  geçişini sağlamak için ya bir fonon yayılır (emission) ya da bir fonon absorplanır. Bu iki süreç Denklem 2.29 ve 2.30 ile ifade edilir.

$$h\nu_e = E_f - E_i + E_p \quad (\text{emisyon}) \quad (2.29)$$

$$h\nu_a = E_f - E_i - E_p \quad (\text{absorpsiyon}) \quad (2.30)$$

Dolaylı geçişlerde, valans bandının tüm işgal edilmiş durumları iletim bandının tüm boş durumlarına bağlanabilir.  $E_i$  enerji seviyesindeki ilk durumların yoğunluğu

$$N(E_i) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_h^*)^{3/2} |E_i|^{1/2} \quad (2.31)$$

$E_f$  enerji seviyesindeki durumların yoğunluğu,

$$N(E_f) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (E_f - E_g)^{1/2} \quad (2.32)$$

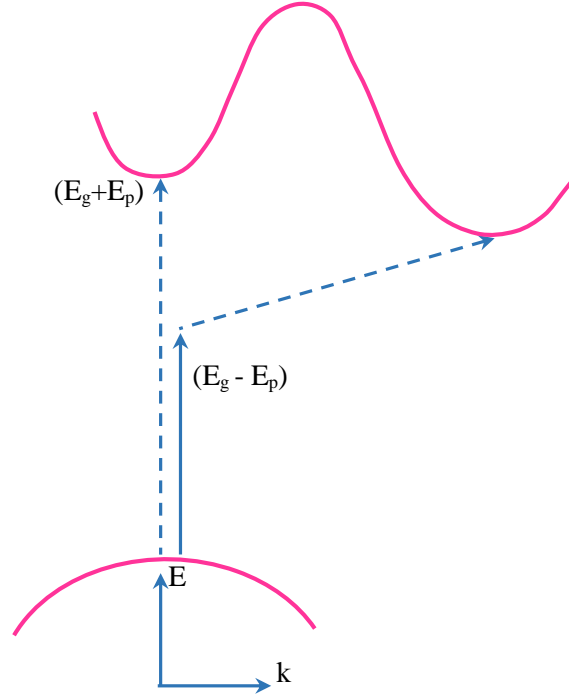
Denklem (2.22) ve (2.23) kullanılarak,

$$N(E_f) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (h\nu - E_g \mp E_p + E_i) \quad (2.33)$$

şeklinde yazılabilir.

$\alpha$ ; Denklem (2.31) ve (2.32) ile tanımlı  $N(E_i)$  ve  $N(E_f)$  ifadelerinin çarpımıyla orantılıdır.  $\alpha$ , aynı zamanda fononların birbirleri ile etkileşmesinin bir ölçüsü olarak tanımlanır. Fonon sayısı  $N_p$ , Bose-Einstein istatistiği ile Denklem (2.34)'teki gibi verilir.

$$N_p = \frac{1}{\exp \frac{E_p}{kT} - 1} \quad (2.34)$$



**Şekil 2.8.** Dolaylı bandlar arası dolaylı geçişler  
Kaynak: [86]

Böylece,

$$\alpha(h\nu) = Af(N_p) \int_0^{-(h\nu - E_g \pm E_p)} |E_i|^2 (h\nu - E_g \pm E_p + E_i)^{\frac{1}{2}} dE_i \quad (2.35)$$

Yukarıdaki denklemde  $N_p$  yerine yazılıp, integral alındıktan sonra fonon absorplamalı geçiş için absorpsiyon katsayısı,

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^2}{\exp \frac{E_p}{kT} - 1} \quad (h\nu > E_g - E_p) \quad (2.36)$$

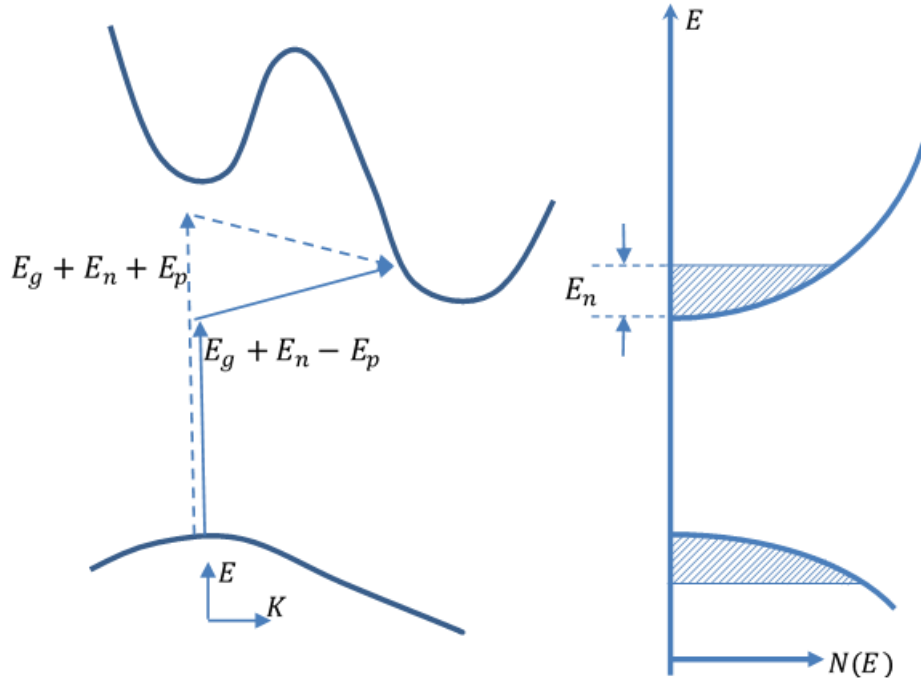
olarak bulunur. Fonon emisyon olasılığı  $(N_p + 1)$  ile orantılıdır. Bu yüzden fonon emisyonuyla geçiş için absorpsiyon katsayısı,

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^2}{1 - \exp \left( -\frac{E_p}{kT} \right)} \quad (h\nu > E_g + E_p) \quad (2.37)$$

$h\nu > E_g + E_p$  olduğu zaman hem fonon emisyonu hem de fonon absorpsiyonu olasılığı olduğu için absorpsiyon katsayısı,

$$\alpha(h\nu) = \alpha_a(h\nu) + \alpha_e(h\nu) \quad (h\nu > E_g + E_p) \quad (2.38)$$

Eğer yarıiletken aşırı katkılı ise band içindeki Fermi seviyesi n-tipi yarıiletken için  $E_n$  dir.  $E_n$  enerjisinin altındaki durumlar dolu olduğundan  $E_g + E_n$  altındaki durumlara olan temel geçişler yasaktır. Böylece absorpsiyon sınırı  $E_n$  kadarlık bir değerle daha yüksek enerji seviyelerine kayar (Şekil 2.11) [86].



**Şekil 2.9.** Dejenere n-tipi germanyumun enerji-momentum diyagramı (Foton absorpsiyon mekanizması)

**Kaynak:** [86]

Aşırı katkılanmış dolaylı enerji aralığına sahip yarıiletkenlerde elektron-elektron saçılması gibi saçılma işlemleriyle momentumu korumak mümkündür. Böyle durumlarda fonon katkısına ihtiyaç duyulmaz ve saçılma olasılığı saçıcıların sayısı N ile orantılıdır. Absorpsiyon katsayısı;

$$\alpha(h\nu) = AN(h\nu - E_g - E_n)^2 \quad (2.39)$$

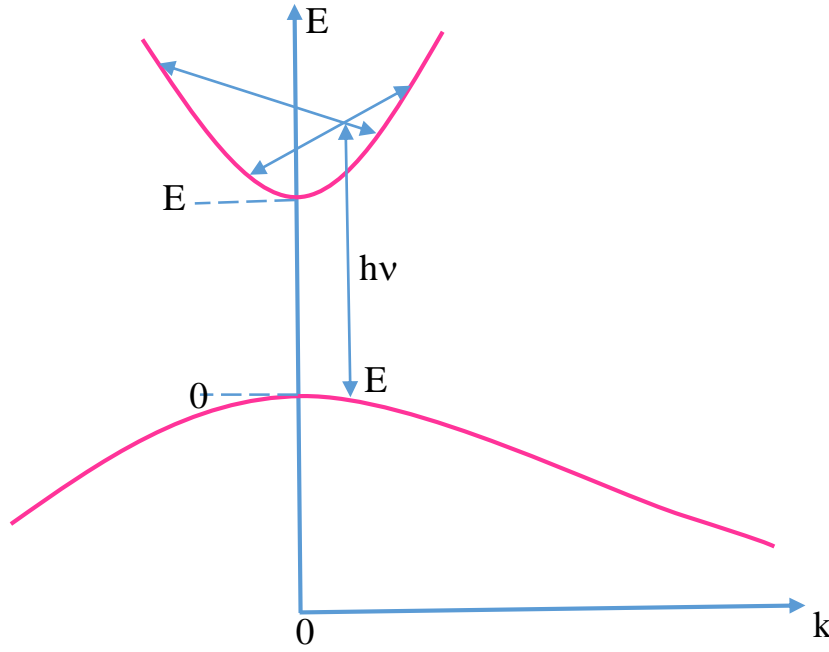
olarak bulunur [86].

#### 2.3.2.4. Doğrudan bandlar arası dolaylı geçişler

Doğrudan bandlar arasında dolaylı geçişler Şekil 2.12’de verilmiştir. Momentum; fonon emisyonu, fonon absorpsiyonu veya taşıyıcıların saçılması gibi süreçlerle korunur. Valans bandındaki herhangi işgal edilmiş ilk durum iletim bandının tüm boş durumları ile bağlıdır. Bu yüzden bu durum için absorpsiyon katsayısı eğer fononlar mevcutsa, momentum korunumunda fononlar kullanılmıyorsa, Denklem 2.36’dan Denklem 2.38’e kadar olan denklemlerle,

$$\alpha(h\nu) = AN(h\nu - E_g - E_n)^2 \quad (2.40)$$

ifadesi bulunur. Bu tür dolaylı geçişler iki adımlı işlemlerle olur ve bunların olasılığı doğrudan geçişlerin olasılığından azdır.



**Şekil 2.10.**  $E_i$  ilk durumdan iletim bandına olası geçişlerden bazıları  
**Kaynak:** [86]

#### 2.3.3. Absorpsiyon yöntemi ile yasak enerji aralığının belirlenmesi

Bir yarıiletkenin  $E_g$  değerinin belirlenmesinde sıkça tercih edilen yöntemlerden biri optik ölçüm sonuçlarından faydalanılarak  $E_g$  değerinin belirlenmesidir.  $\alpha$  ile  $E_g$  arasındaki ilişki

$$(\alpha h\nu) \approx (h\nu - E_g)^n \quad (2.41)$$

ile verilmişti. Optik absorpsiyon yöntemi ile  $E_g$  değerinin belirlenmesi işleminde  $h\nu - (\alpha h\nu)^2$  grafiği çizilir (Şekil 2.13). Bu grafiğin lineer kısmına karşı gelen doğrunun, enerji eksenini kestiği noktanın değeri yarıiletkenin  $E_g$  değerini vermektedir. Yarıiletken  $n=2, 3$  ise doğrudan enerji aralığına,  $n=1/2, 3/2$  ise dolaylı bant aralığına sahip olacaktır.



**Şekil 2.11.** Yarıiletkenin absorpsiyon katsayısının enerji ile değişimi

Bu tez çalışmasında, elde edilen filmlerin optik karakterizasyonları Shimadzu marka UV 2450 model fotometre kullanılarak yapılmıştır.

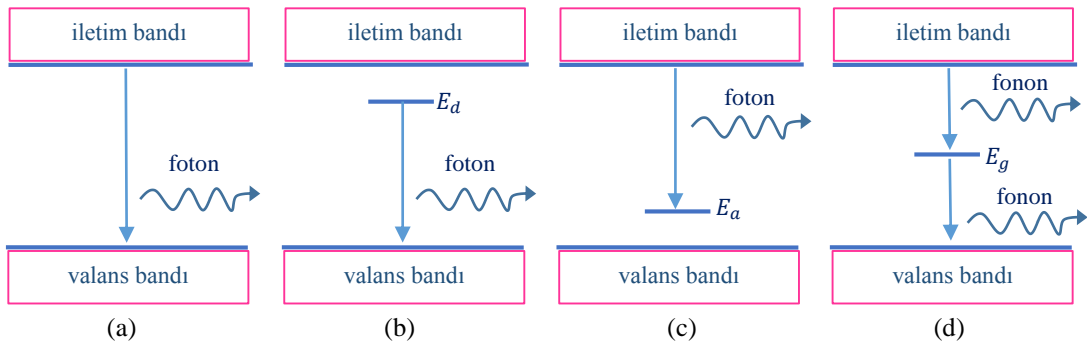
#### 2.3.4. Fotolüminesans (PL) spektroskopisi

Enerjinin madde tarafından absorplanması ve görünür dalga boyunda yayınlanmasına lüminesans adı verilir. Lüminesans uyarıcı kaynağa göre adlandırılır. Eğer uyarıcı fotonlar ise buna fotolüminesans (PL), uyarıcı yüksek enerjili elektronlar ise katotlüminesans (CL), uyarıcı akım ise elektrolüminesans (EL) denir. PL ışımamlı bir geçiş olayıdır ve ışınım yayınımlı uyarılmış durumdaki malzemenin denge durumuna gelmesi olarak tanımlanabilir. PL, yarıiletkenlerde kirlilikleri, malzeme kalitesini, yasak enerji aralığını ve arayüzey pürüzlülüğü bilgilerini belirleyen ve malzemeye zarar vermeyen bir tekniktir. Özellikle sığ seviye kirliliklerini bulmak için uygun olmasına rağmen derin seviye kirlilikleri için de uygulanabilir. PL ile kirliliklerin tanımlanması kolaydır. Fakat kirliliklerin konsantrasyonunu ölçmek zordur. Yarıiletkendeki kirlilikler sadece ışımamlı yeniden birleşme (recombination) yaptığında belirlenebilir [87].

Oluşum mekanizmasına bakıldığında absorplama olayının tersi olduğu söylenebilir.

Fotoluminesans geçişleri ışımalı ve ışısız olmak üzere iki grupta incelenebilir. Işımsız geçişler Auger ve termal geçişler, ışımalı geçişler ise bandtan banda geçişler, donör-akseptör çifti geçişleri ve eksitonik geçişler olarak sınıflandırılabilir. Bu mekanizmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Kendiliğinden ya da dışarıdan bir uyarıcı yardımıyla oluşturulan luminesans geçişlerin şematik olarak gösterimi Şekil 2.14'te verilmiştir.



**Şekil 2.12.** (a-c) Işımalı geçiş türleri: (a) bandtan banda (b) donör seviyesinden valans bandına (c) iletim bandından akseptör bandına, (d) bir orta seviye yoluyla ışısız geçiş

**Işımsız Geçişler:** İletim bandındaki bir elektronun, valans bandındaki bir hol ile birleşmesi sonucunda oluşabilecek fazla enerji yarıiletken kristal örgüde ısı enerjisi olarak ortaya çıkması, bir ışısız geçişe karşılık gelir. Bu birleşmede enerji foton olarak değil, örgü titreşimi veya fonon yayınlanması şeklinde salınır. Bu birleşme mekanizması LED ve LD gibi aygıtların performansına etki eder ve eşik akımını artırır. Işımsız yeniden-birleşme süreçleri: Auger yeniden-birleşmesi, yüzey yeniden-birleşmesi ve kusurların yeniden-birleşmesi olaylarını içerir.

Bir elektron-hol birleşmesinde oluşan fazla enerjinin bir elektron veya bir hole aktarılması süreci olarak tarif edilebilen Auger süreci, bir ışısız yeniden-birleşme olayıdır. Bu süreçte elektron-hol çifti birleşmesinde bir foton yayınlanmaz. İki hol ve bir elektron veya iki elektron ve bir hol etkileşmesi sonucunda elektron-hol çifti yok olur; sıcak elektron veya sıcak hol üretilmiş olur. Sıcak elektron veya hol fazla enerjisini fonon yayınlamak kaybeder ve böylece ışısız geçiş meydana gelir. Auger oranı, yasak enerji aralığı arttıkça azalır; sıcaklıkla artar. Işımsız geçiş mekanizmaları içerisinde en etkeni kabul edilen Auger süreci, 1,5 eV'dan büyük (GaAs, GaAsP, InGaN, ...) band aralıklı yarıiletkenlerde önemsizdir.

İzinli bandlarda bulunan serbest elektronlar, yapıdaki kusurlar ve kirlilikler tarafından tuzaklanabilir. Kusurlar, elektron ve holün yeniden birleşmesine, bir foton yayınlanmaksızın izin de verebilir. Bu ışımsız yeniden birleşme yasak enerji aralığı içerisinde yer alan tuzak-kusur seviyelerinde oluşur. Bu kusur enerji seviyeleri, düşük sıcaklık PL ölçümlerinde, pik şiddetinin değişimi analiz edilerek belirlenebilir. Kusur seviyesi, yasak enerji aralığı içerisinde yakın olduğunda taşıyıcıların tuzaklanma oranı artacaktır. Bu tuzaklanma sonrasında ışımalı geçiş de gözlenebilir. Eğer kusur-enerji seviyeleri band kenarlarına yakın olarak yerleşmiş (sığ seviyeler) ise banda aktarılacak termal emisyon, ışımalı yeniden-birleşme oranını azaltacaktır.

Yarıiletkenlerde diğer önemli bir ışımsız yeniden-birleşme mekanizması da yüzey veya arayüzey yeniden birleşmeleridir. Yarıiletkenlerin yüzeyleri boş bağlar ve kirlilikler içerebilir. Bunlar yüzeyde band bükülmesine ve yüzey durumlarının (yasak enerji aralığında oluşan ara enerji seviyelerine karşılık gelir) oluşmasına neden olur. Öte yandan, örgü uyumsuz yapıların büyütülmesinde, arayüzeylerde oluşabilecek boş bağlar da bir birleşme mekanizması gibi davranır ve burada tuzaklanan taşıyıcılar saçılmaya uğrayarak ışımsız geçiş yaparlar.

*Işımalı Geçişler:* Bandtan banda geçişler, valans bandındaki serbest hollerle iletim bandındaki serbest elektronlar arasındaki birleşmelerden kaynaklanan geçişlerdir. Yüksek sıcaklık ve uyarım yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda meydana gelir. Doğrudan band aralıklı bir yarıiletkende enerjinin korunumuna göre uyarıcı fotonun enerjisi,

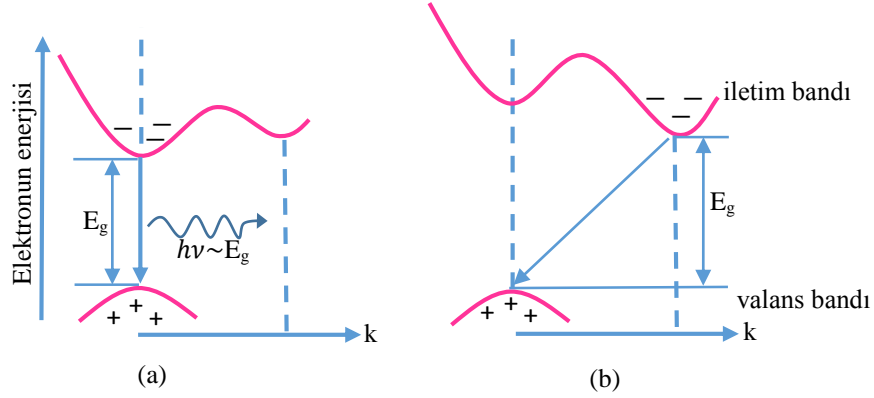
$$h\nu = E_f - E_i \quad (2.42)$$

ile verilir.

Dolaylı band aralıklı bir yarıiletkende yüksek seviyelere uyarılan elektron iletim bandı minimumuna gelmek için ilave bir momentuma ihtiyaç duyar. Elektron bu ihtiyacını bir fonon ile etkileşerek kazanır. Çünkü momentumun korunması için elektron böyle bir etkileşmeyi yapmak zorundadır. Bu durumda yayınlanan fotonun enerjisi,

$$h\nu = E_f - E_i \pm h\Omega \quad (2.43)$$

ile verilir. Burada  $h\Omega$  geçişe dâhil olan fononun enerjisidir. (+) ve (-) işaretleri fononun emisyonuna ve absorpsiyonuna karşılık gelir. Doğrudan ve dolaylı geçişlerin şematik gösterimi Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13. (a) Doğrudan ve (b) dolaylı geçişlerin şematik gösterimi

Donör-akseptör çifti geçişleri, yarıiletken hiçbir katkılama yapılmamasına rağmen yarıiletkenin yapısında doğal olarak bulunan ya da katkılama sonucunda oluşan kirlilik seviyeleri arasında gözlenen geçişlerdir. Donör-akseptör çiftleri arasındaki geçişlerin enerjisi,

$$E = E_g - E_a - E_d + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (2.44)$$

ile verilir. Buradaki Coulomb etkileşimi nedeniyle gelen  $e^2/4\pi\epsilon_0 r$  terimini,  $r$  ise donör ve akseptör arasındaki mesafeyi göstermektedir. Formüldeki Coulomb kuvvetinin anlamı, nötral durumdaki donör ve akseptörlerin iyonize olmasıyla oluşan elektrostatik enerjiyi ifade etmektedir. Bu nedenle fotoluminesans spektrumunda ayırık çizgiler grubu geçişleri gözlenebilir. Eğer  $r$  yeterince büyük ise, donör-akseptör çifti arasındaki enerji dağılımı azalır ve böyle durumlarda ayırık çizgiler gözlenmez. Donör-akseptör geçişleri, aradaki mesafenin kritik yarıçap ( $r_c$ ) değerinden daha büyük olduğu durumlarda meydana gelir. Eğer çiftler arasındaki etkileşim enerjisi elektron ve hol tarafından perdelenir ise, çiftler arasındaki elektrostatik etkileşim enerjisi sıfır olur ve  $E_d + E_a$  enerjisi örgüye aktarılır. Bu nedenle perdeleme süreci sadece  $E_d + E_a \geq e^2/4\pi\epsilon_0 r$  olduğunda meydana gelir.

Kirlilik geçişleri yarıiletkenlerin yapısında doğal olarak bulunan ya da istenmeden oluşmuş geçişlerdir.  $kT=0$  için bu geçişlerin enerjileri Denklem 2.45 ve 2.46 ile verilir.

$$E = E_g - E_d \text{ (donör - band geçişi)} \quad (2.45)$$

$$E = E_g - E_a \text{ (band - akseptör geçişi)} \quad (2.46)$$

Sonlu sıcaklık değerlerinde tepe geçiş enerjilerinde  $\frac{1}{2}k_B T$ 'lik bir artış olur. Bu durumda enerji değerleri,

$$E = E_g - E_d + \frac{1}{2}k_B T \quad (2.47)$$

$$E = E_g - E_a + \frac{1}{2}k_B T \quad (2.48)$$

şeklinde. Burada  $k_B$  Boltzmann sabiti ( $8,625 \times 10^{-5}$  eV/K), T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Bazı durumlarda iyonize olmuş donör ve iyonize olmuş akseptör enerji seviyelerinde de geçişler görülmektedir.

Eksitonik geçişler, düşük sıcaklıklarda görülür. Eksitonlar, birbirine Coulomb etkileşimi yolu ile küçük bir bağlanma enerjisi ( $E_x$ ) ile bağlı elektron-hol çiftleridir. Buradaki Coulomb etkileşimi hidrojen atomu gibi düşünülebilir. Coulomb etkileşimi ile birbirine bağlı olan elektron-hol çiftleri başka hiçbir merkez ile etkileşmiyorsa bunlara serbest eksitonlar denir ve bağlanma enerjileri hidrojen atomuna benzetilerek hesaplanabilir. PL spektrumunda serbest eksitona ait tepe enerji değeri  $E = E_g - E_x$  olacaktır. Bağlı eksitonlar ise nötr veya iyonize olmuş sığ kirlilik merkezleri, derin kirlilik merkezleri ya da yarıiletken örgüsündeki diğer kusurlar gibi çekici merkezlere bağlıdırlar. Bağlı eksitonların enerjisi, eksitonun bağlı olduğu merkez tarafından düşürüldüğünden serbest eksitonun enerjisinden düşüktür. Bağlı eksitonlar bir kusur ya da kirlilik merkezine bağlı olduklarından herhangi bir kinetik enerjiye sahip değildirler.

Özetle PL ölçümleri materyalin;

- Yasak enerji aralığının belirlenmesini sağlar. Yarıiletkenlerdeki en yaygın ışımali geçiş, iletim ve valans bandları arasındaki geçiştir. Yasak enerji aralığının belirlenmesi, özellikle bileşik yarıiletkenlerin elektronik devre elemanı uygulamalarında önemlidir.
- Kirlilik seviyeleri ve kusurların belirlenmesini sağlar. Yarıiletkenler ışımali geçişlere izin veren kirlilik seviyeleri ve kusurları içerirler. PL, kusurları belirtmek için faydalıdır, miktarı ise bunların derişimlerini belirlemek amacıyla kullanılabilir.
- Birleşme mekanizmalarının belirlenmesini sağlar. Yeniden birleşme olarak da bilinen dengeye dönüş hem ışımali hem de ışımsız süreçleri içerebilir. PL miktarı kirlilik seviyeleriyle ve sıcaklıkla doğrudan bağlantılıdır.

- Malzeme kalitesinin anlaşılmasını sağlar. Genelde ışımaz geçişler, malzeme kalitesine ve sonradan cihaz performansına zararlı olan lokalize kirlilik seviyeleri ile ilgilidir. Bu nedenle malzeme kalitesi, ışımali birleşme miktarı hesaplanarak ölçülebilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan PL deney düzeneğinde, uyarma kaynağı olarak 325 nm dalga boyuna sahip He-Cd lazer kullanılmıştır.

### 2.3.5. Kubelka-Munk teorisi

$E_g$  değerini belirlemek için kullanılan yöntemlerden biri de reflektans spektrumu yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Bunun için Kubelka-Munk teorisi kullanılmaktadır. Bu yöntemde reflektans değerleri Kubelka-Munk fonksiyonu yardımıyla absorpsiyon değerlerine dönüştürülür. Kubelka-Munk fonksiyonu [88, 89]:

$$F(R) = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (2.49)$$

ile tanımlanır. Burada  $R$  diffuse reflektans,  $F(R)$  absorbans değerine karşılık gelen Kubelka-Munk fonksiyonudur.  $F(R)$  değeri absorpsiyon katsayısına Denklem 2.50 ile dönüştürülür [90].

$$a = \frac{F(R)}{t} = \frac{\text{Absorpsiyon}}{t} \quad (2.50)$$

Burada  $t$ , filmin kalınlığıdır. Bu durumda Denklem (2.42) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\left(\frac{F(R)h\nu}{t}\right) = A(h\nu - E_g)^n \quad (2.51)$$

$h\nu - \left(\frac{F(R)h\nu}{t}\right)^2$  grafiğinin lineer kısmı ekstrapole edilerek  $h\nu$  eksenini kestiği noktadan  $E_g$  değeri bulunur.

## 2.4. Elektriksel Karakterizasyon

Yarıiletken fiziğinin en önemli uygulama alanlarından biri, yarıiletken aygıtların kullanıldığı elektronik devreleri içeren aygıtlardır. İçinde bulunduğumuz yüzyıldaki bütün elektronik gelişmelerin temelinde yatan başlıca iki temel aygıt diyot ve transistördür [91]. Bu aygıtların performanslarını etkileyen en önemli faktörlerden biri aygıt için uygun kontağın yapılmasıdır.

### 2.4.1. Metal yarıiletken kontaklar

Yarıiletken aygıtın pek çok özelliği dışarıdan gelebilecek etkilere bağlıdır. Aygıtın dış etkilerle performansının değişmemesi ancak kullanılan yarıiletkenin düşük dirençli omik kontakla sahip olmasıyla sağlanabilir. Kontakın ideal olabilmesi için yarıiletken malzeme ile birleştirildiğinde pozitif ya da negatif yöndeki hiçbir taşıyıcı akışına engel teşkil etmemesi gerekir. Bu durum, yarıiletkenin iş fonksiyonu ile metalin iş fonksiyonu değerlerinin aynı olduğu ve arayüzey durumlarının olmadığı ideal koşullarda gerçekleşir. Ancak metal-yarıiletken sistem düşünüldüğünde, böyle ideal bir iş fonksiyonu kombinasyonu mevcut değildir. Özellikle yarıiletkenin iş fonksiyonunun katkı ile değiştiği düşünülürse, tamamen doğru olan iş fonksiyonu kombinasyonunu bulmak imkansızdır. Kontakın omik olmadığı durumda ise, metal-yarıiletken arayüzeyinde yüksekliği metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları tarafından belirlenen bir Schottky engeli oluşur [92].

Metal ve yarıiletken arasında kontak oluşturulduğunda elde edilen kontak doğrultucu ve omik olmak üzere ikiye ayrılır. Kontakın doğrultucu veya omik olması metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları tarafından belirlenir. Eğer  $\phi_m$  metalin iş fonksiyonu,  $\phi_s$  de yarıiletkenin iş fonksiyonu olarak ifade edilirse, metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için  $\phi_s < \phi_m$  olması halinde doğrultucu kontak ve  $\phi_s > \phi_m$  olması halinde de omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için ise  $\phi_s < \phi_m$  olması halinde omik kontak ve  $\phi_s > \phi_m$  olması halinde de doğrultucu kontak oluşur. Bu durum Çizelge 2.1’de özetlenmiştir. Bazı metallerin iş fonksiyonu değerleri ise Çizelge 2.2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Metal-yarıiletken kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontakların yapısı

	Yarıiletken	Eklem
$\phi_m > \phi_s$	n-tipi	Schottky (Doğrultucu)
$\phi_m < \phi_s$	p-tipi	Schottky (Doğrultucu)
$\phi_m > \phi_s$	p-tipi	Omik
$\phi_m < \phi_s$	n-tipi	Omik

**Kaynak:** [93]

**Çizelge 2.2.** Bazı metallerin iş fonksiyonları

Metal	İş fonksiyonu (eV)
Alüminyum (Al)	4,33
Altın (Au)	5,10
Gümüş (Ag)	4,64

**Kaynak:** [93]

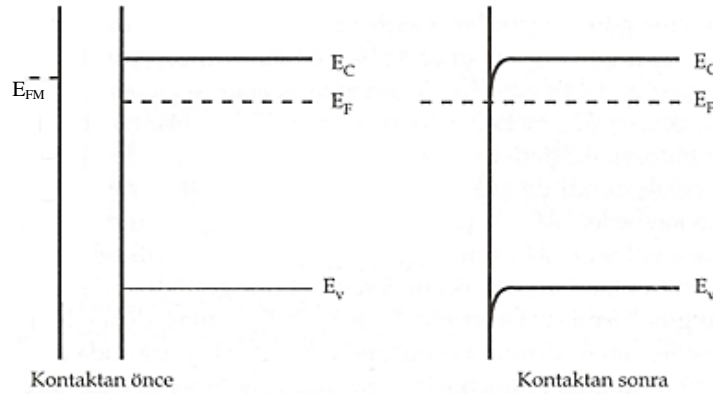
#### 2.4.1.1. Omik kontak

Yarıiletkenden elektrik akımının geçebilmesi için omik kontak büyük önem taşımaktadır. Bir omik kontak en basit şekilde, hem pozitif hem de negatif voltaj değerleri için doğrusal ve simetrik akım-voltaj ilişkisinin varlığı olarak tanımlanabilir. İdeal olan bir durumda bu lineerliği ve simetriyi bozacak hiçbir dirençle karşılaşılması gerekir. Kontak direncinin varlığı aşırı güç sarfiyatına neden olduğu için optik ve elektriksel aygıtların uzun ömürlü çalışmasında önemli engellerden biridir. Yüksek dirençli metal-yarıiletken omik kontakların termal stres ve/veya kontak arızasına sebep olmaları nedeniyle cihazın performansında önemli bir kayba neden olurlar. Bu yüzden yüksek performanslı optik ve elektriksel cihazlar elde etmek için omik kontaklar termal olarak kararlı ve düşük dirençli olmalıdır. Bu nedenle metal-yarıiletken arası engel yüksekliğini azaltabilmek için, yani düşük dirençli bir omik kontak yapabilmek için, kontak yapılacak yüzeyi işleme hazırlarken dikkatli olunması gerekir. Bu durum, taşıyıcı tünelleme olasılığını arttırarak veya oksijen kaybından yararlanılarak yüzeye yakın taşıyıcı konsantrasyonunun arttırılması sayesinde gerçekleştirilebilir.

Düşük dirençli omik kontaklar aygıt performansını geliştirmede rol alan önemli unsurlardandır. Geniş band aralıklı yarıiletkenlerde düşük dirençli omik kontak termal

tavlama yoluyla elde edilebilir. Termal tavlama sayesinde yüzey pürüzlülüğü ve yapısal bozulmalar en aza indirilir. Bu yolla aygıt performansını arttırmak çok fazla mümkün değilken, aygıtın güvenilirliğini arttırmak mümkündür. Bu yüzden bazı durumlarda termal tavlama kullanımı düşük dirençli omik kontaklar geliştirmek için çok güvenilir değildir. Bu nedenden dolayı, düşük kontak dirençli alaşımsız omik kontaklar tercih edilir [92].

Bir omik kontak, doğrultucu olmayan bir kontakır. Kontakın akım-voltaj karakteristikleri Ohm yasasına uyar ve kontak direnci mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Metalin Fermi enerjisi  $E_{Fm}$  olmak üzere  $E_{Fm} > E_F$  olduğu durumda, n-tipi yarıiletkenin enerji bandları kontak yakınında bükülür (Şekil 2.14). Bandın bükülme miktarı ve yarıiletkendeki genişliği çok küçüktür. Sonuçta, metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli yoktur ve elektronlar kontak boyunca serbestçe akabilirler. Bu tür bir kontak omik kontakır [94].

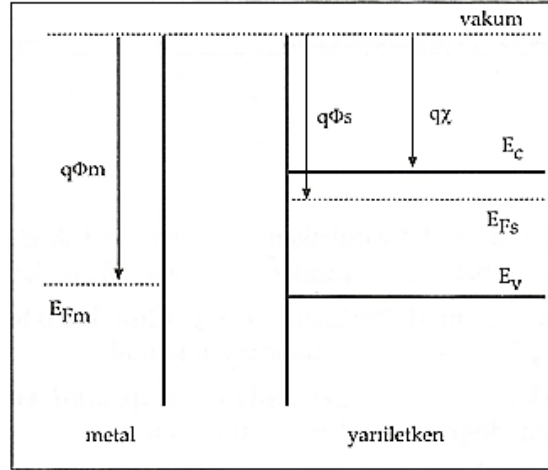


**Şekil 2.14.** Bir omik kontakın enerji bandları  
**Kaynak:** [94]

#### 2.4.1.2. Schottky kontak

Schottky kontak, bir metal ile bir yarıiletken arasında bir doğrultucu kontak oluşmasıyla meydana gelir. n-tipi bir yarıiletken ile bir metalin enerji-band diyagramı Şekil 2.15'de görülmektedir. Metalden elektronların koparılıp, elektronların vakum ortamına itilebilmesi için en az  $q\phi_m$  ile gösterilen metalin iş fonksiyonuna eşit bir enerji gereklidir. Metalin iş fonksiyonu,  $E_{Fm}$  enerjisine sahip bir elektronu metalden uzaklaştırmak için elektrona verilmesi gereken enerjidir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu ise  $E_{Fs}$  enerjisine sahip bir elektronu yarıiletkenden uzaklaştırmak için gerekli olan enerjidir [94].

Bir yarıiletkende bazı elektronlar  $E_{Fs}$ 'den daha fazla enerjiye sahiptir. Bu elektronlar iletim bandında bulunurlar ve enerjileri yaklaşık olarak  $E_C$ 'ye eşittir. Bir elektronu iletim bandından vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji elektron ilgisi ( $q\chi$ ) olarak adlandırılır.



**Şekil 2.15.** Bir metal ve bir yarıiletkende enerji bandları  
**Kaynak:** [94]

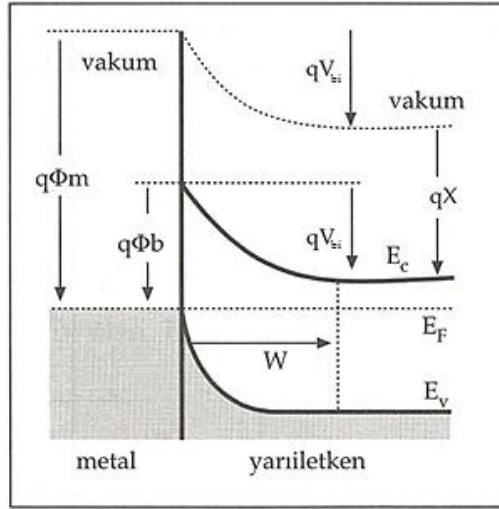
$E_{Fm} < E_{Fs}$  olan n-tipi bir yarıiletken ile metal kontak haline getirildiklerinde Fermi seviyeleri eşitlenir ve  $E_C > E_{Fs}$  olduğu için yarıiletkenin iletim bandından metale elektronların geçmesi ile termodinamik denge hali oluşur. Bu elektronlar yarıiletkende pozitif yüklü donör kirlilik atomları bırakırlar. Böylece yarıiletkenin yüzeyi yakınında, metal ile yarıiletken arayüzeyinde bir kıtlık bölgesi ( $W$ ) oluşur. Metalde, metal-yarıiletken arayüzeyinde bir elektron yükü görülür. Tüm pratik amaçlar için bu yük bölgesi sonsuz derecede ince kabul edilebilir. Bu tür bir yük dağılımı bir yük tabakası olarak adlandırılır. Fermi seviyelerinin eşitlenmesinden ve bir kıtlık bölgesinin varlığından dolayı yarıiletkende band bükülmesi;

$$qV_{bi} = q(\phi_m - \phi_{sc}) \quad (2.52)$$

ifadesine eşit olacaktır. Burada  $V_{bi}$  built-in potansiyel engel yüksekliğidir. Bu eğrilik daha fazla elektronun metale geçmesini engelleyen bir  $V_{bi}$  potansiyel engelini ifade eder. Metaldeki elektronlar,

$$q\phi_b = q(\phi_m - \chi) = qV_{bi} + (E_C - E_F) \quad (2.53)$$

ifadesine eşit bir  $\phi_b$  potansiyel engeli görürler (Şekil 2.16) [94].



**Şekil 2.16.** Bir metal/n-tipi yarıiletkenin oluşturduğu Schottky kontağın denge durumundaki enerji-band diyagramı

**Kaynak:** [94]

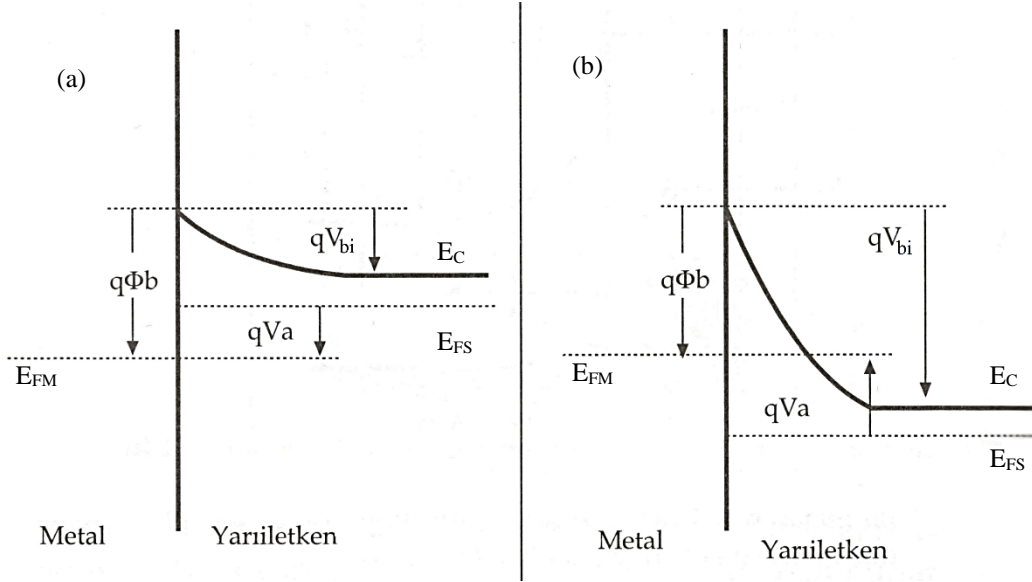
Oda sıcaklığında bu potansiyel engelleri  $kT/q$ 'dan çok daha büyüktür ve birkaç tane elektron bu engelleri aşabilecek kadar yeterli enerjiye sahiptir. Yarıiletkendeki engeli aşıp metale geçen elektronlardan kaynaklanan akım;  $I_{m \rightarrow s}$  ile gösterilir. Bu şekilde gösterilmesinin nedeni; elektronların negatif bir yük taşımamasından dolayıdır. Bu yüzden yarıiletkenden metale geçen elektronlar, metalden yarıiletkene akan pozitif bir akıma karşılık gelir.

Termodinamik dengede ve dış bir uygulama voltajının olmaması durumunda  $I_{m \rightarrow s}$  akımı tamamen  $I_{s \rightarrow m}$  akımı ile dengelenmiştir. Bu yüzden denge durumunda  $-I_{m \rightarrow s} = I_{s \rightarrow m}$  olur.

Yapıya  $V_a > 0$  olacak şekilde bir ileri besleme voltajı uygulanırsa (metal tarafına +, yarıiletken tarafına -) yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli  $V_{bi}$ 'den  $V_{bi} - V_a$ 'ya düşer (Şekil 2.17 (a)). Böylece çok daha fazla sayıda elektron yarıiletkenden metale akar. Diğer taraftan metalden yarıiletkene elektron akışı,  $I_{s \rightarrow m}$ , sabit kalır. Çünkü metal tarafında görülen  $\phi_b$  potansiyel engeli değişmeden sabit kalır. Sonuç olarak yarıiletkenden metale doğru net bir elektron akımı gözlenir.

Yapıya  $V_a < 0$  olacak şekilde bir geri besleme voltajı uygulanırsa (metal tarafına -, yarıiletken tarafına +) yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli  $V_{bi}$ 'den  $V_{bi} - V_a$ 'ya yükselir (Şekil 2.17 (b)). Sonuç olarak  $I_{s \rightarrow m}$  değişmeden kalırken, yarıiletkenden metale doğru olan elektron akışı,  $I_{m \rightarrow s}$  azalmış olur. Sonuçta metalden yarıiletkene akan geri besleme akımı ( $I_{s \rightarrow m} - I_{m \rightarrow s}$ ) ölçülür. İleri ve geri akım akış mekanizmaları arasındaki

asimetri pn eklemine benzer olarak lineer olmayan bir akım-voltaj karakteristiği oluşturur.



**Şekil 2.17.** Bir metal-yarıiletken kontakta enerji-band diyagramı; (a) ileri besleme, (b) geri besleme

**Kaynak:** [94]

Bir Schottky diyotta kıtlık bölgesinin genişliği

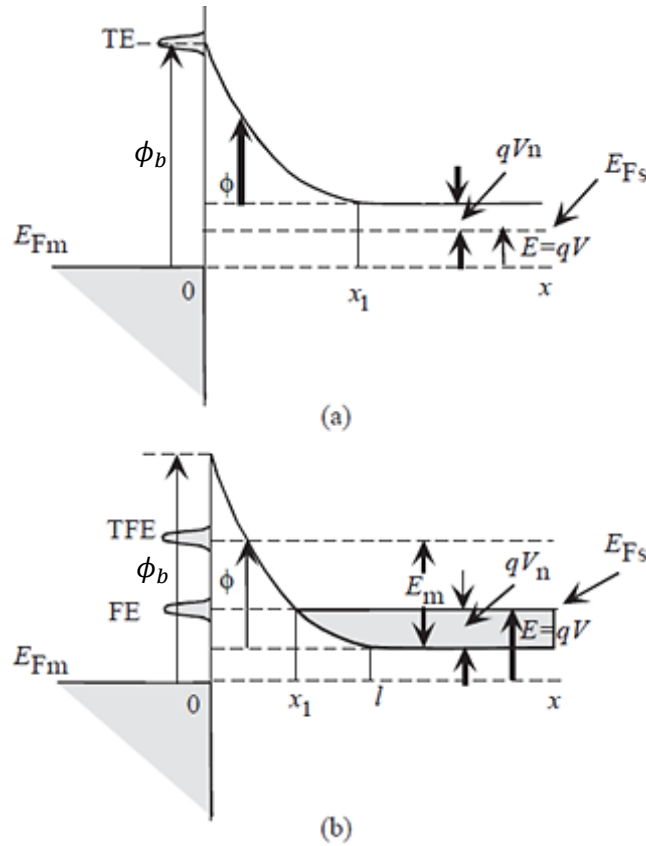
$$W(V_a) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_d} (V_{bi} - V_a)} \quad (2.54)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada  $\varepsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $N_d$  donör konsantrasyonudur.

#### 2.4.2. Akım iletim mekanizmaları

Metal-yarıiletken sisteme bir voltaj uygulandığı zaman, metal veya yarıiletkendeki taşıyıcılar yeterli enerjiyi kazanırsa akım akışı gerçekleşir. Yeterli enerjiyi kazanmaları ya termal yolla, ya elektrik alan yoluyla ya da her ikisinin de etkisiyle potansiyel engeli aşmak anlamına gelir. Fakat engel yeterince ince olduğu zaman, taşıyıcılar doğrudan tünelleme yoluyla engelden geçebilirler. Bir metal-yarıiletken kontak durumunda meydana gelen engelin içinden ya da üzerinden gerçekleştirilebilecek akım taşınım mekanizmaları Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Bu mekanizmalar tuzakların meydana getirebileceği kusurlar tarafından engellenebilir. Bu durumda metal-yarıiletken akım

taşıyımını açıklayan üç temel mekanizmadan söz edilebilir. Bunlar termiyonik emisyon (TE), termioyonik alan emisyonu (TFE) ve alan emisyonudur (FE) [92, 95].



**Şekil 2.18.** (a) Termioyonik emisyon (TE) (b) termioyonik alan emisyonu (TFE) ve alan emisyonu (FE) (direk tünelleme) durumları için ileri besleme durumundaki Schottky engelinde potansiyel enerji diyagramı ve akım taşınım mekanizmaları

**Kaynak:** [92]

#### 2.4.2.1. Termioyonik emisyon (TE)

Şekil 2.18’de görüldüğü gibi termal olarak uyarılmış bir süreç termioyonik emisyon olarak adlandırılır ve sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların salınması anlamına gelir. Bu olay, metal-yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklarda metal ya da yarıiletken tarafındaki taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşmaları olarak tanımlanır. Bu olay metal/p-tipi yarıiletken yapılarda holler tarafından sağlanırken, metal/n-tipi yarıiletken yapılarda elektronlar tarafından sağlanır. Geri besleme durumunda, yarıiletkenden metale geçiş yapan elektronlar için engel daha yüksektir. Böyle bir ideal durum düşünülerek çizilmiş Şekil 2.18’de yarıiletkenden metale elektron akışı yoktur. Kontakın metal tarafında, elektronlar uygulanan voltaj sayesinde yeterli enerji kazanırlarsa engeli aşabilirler. Bu olay, geri besleme akımı için baskın mekanizmadır.

Doğal olarak omik davranış gözlenmez. Kararlı durumda ve besleme voltajının sıfır olduğu durumda metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale elektron akışı dengede olmak zorundadır. Bu durumda net akım sıfırdır. Termioyonik süreçte akımın oluşabilmesi için önemli miktarda enerji kazanmış elektronlar gerekir. Termioyonik emisyon için akım

$$I_{te} = I_{te0} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.55)$$

ve

$$I_{te0} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{k_B T}\right) \quad (2.56)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada  $I_{te}$  termemasyon için akım,  $I_{te0}$  doyum akımı,  $A^*$  Richardson sabitidir. Denklem (2.55) yazılırken devrenin seri direncinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu varsayılmıştır. Denklem (2.55)'te yarıiletkenden metale taşıyıcı akışında engel yüksekliği voltaja ( $\phi_b - V$ ) şeklinde bağlıdır. Eğer  $\phi_b$  sabit ise, devrede yarıiletken direnci ( $R_s$ ) gibi bir parasitik direnç vardır. Bu durumda termioyonik emisyon akımı

$$I_{te} = I_{te0} \left[ \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.57)$$

ile ifade edilir.  $A^*$  ve  $\Delta\phi_b$  değerleri voltaja bağlı olduğu için uygulanan voltajın ( $3kT/q$ ) değerinden büyük olduğunda akım-voltaj karakteristiği

$$I_{te} = I_{te0} \left[ \exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.58)$$

eşitliği ile tanımlıdır. Burada  $n$  idealite faktörüdür ve ideal termioyonik emisyonun sapmanın bir ölçüsüdür [92]. Termioyonik emisyon teorisine göre, yarılogaritmik akım-voltaj eğrilerinin eğiminden hesaplanan idealite faktörü genelde  $n > 1$  dir. Dolayısıyla termioyonik emisyon teorisine göre hesaplanan potansiyel engel yüksekliği, artan sıcaklıkla artar. İdealite faktörünün  $n > 1$  olmasının birkaç nedeni vardır. Birincisi, metal ve yarıiletken arasındaki istenmeyen ince oksit tabakanın varlığıdır. İkincisi, yüksek katkılı yarıiletkenlerde düşük sıcaklıklarda gerçekleşebilen tünelleme akımıdır (TFE ve FE). Üçüncüsü, ara yüzeyde elektrik alandan dolayı hayali Schottky engel alçalmasıdır ( $\Delta\phi_b$ ). Dördüncüsü, uzay yük bölgesinde oluşma/yeniden birleşme

(generation/recombination) akımlarıdır. Bu dört neden Schottky kontaklarının durumlarını (ara yüzey tabakası, yüksek katkılama, yüksek elektrik alan, kitlek bölgesindeki tuzaklar) ve metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyin atomik olarak tam düzgün olmadığı ve genelde uzaysal bir homojenliğe sahip olmadığını gösterir [95, 96].

#### 2.4.2.2. Termiyonik alan emisyonu (TFE)

Ara seviyede katkılı yarıiletkenler ( $\approx 10^{17} \text{cm}^{-3} < N_d \lesssim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) için, kitlek bölgesinin genişliği taşıyıcıların doğrudan tünelleme yapmasına izin verecek kadar dar değildir.

Şekil 2.18 (b)'de de verildiği gibi tünellemenin gerçekleşebilmesi için dolayısıyla elektronun enerjisini  $E_m$  değerine kadar arttırabilmek için bir miktar enerji gerekir. Termiyonik alan emisyonu, çok yüksek olmayan sıcaklıklarda ve iletim bandının üzerinde bir  $E_m$  enerji değerinde, elektronların yarıiletkenden metale tünelleme yoluyla geçtikleri varsayılır. Tünellemeden dolayı Fermi seviyesi üzerindeki enerjiye sahip elektron sayılarının hızlı bir şekilde azalması, engel yüksekliğinin azalmasına ve engel kalınlığının daralmasına sebep olur. TFE sürecinde akım ifadesinin en sade şekli Stratton [97] ve Padovani [98] tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \quad (2.59)$$

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{k_B T}\right) \quad (2.60)$$

$$E_{00} = \left(\frac{q\hbar}{2}\right) \left(\frac{N_d}{m^* \epsilon_s}\right)^{1/2} \quad (2.61)$$

Burada  $E_0$  ve  $E_{00}$  enerji boyutunda kıyas parametreleridir.

#### 2.4.2.3. Alan emisyonu (FE) (Doğrudan tünelleme)

Yarıiletkenin  $N_d \gtrsim 10^{18} \text{cm}^{-3}$  mertebelerinde çok fazla katkılanmış olduğu durumda, kitlek bölgesi çok dardır. Düşük sıcaklıklarda ileri besleme yönündeki akım, yarıiletkenin Fermi enerjisine yakın elektronların tünellemesi ile artar. Bu olay alan emisyonu (FE) olarak adlandırılır (Şekil 2.18 (b)). Alan emisyonu için akım ifadesi ile termiyonik alan emisyonu için akım ifadesi aynı denklem ile ifade edilir.

Özetle,  $kT/qE_{00}$  oranı termoiyonik emisyon ve tünelleme mekanizmaları hakkında önemli bilgiler verir.  $E_{00}$ , kıtlık bölgesi kenarında iletkenlik bandının tabanıyla çakışan enerjiye sahip bir elektron için karşı tarafa geçme ihtimalinin  $1/e$ 'ye karşılık gelen Schottky engelinin difüzyon potansiyelidir.  $kT \ll qE_{00}$  ise alan emisyonu,  $kT \sim qE_{00}$  ise termoiyonik alan emisyonu ve  $kT \gg qE_{00}$  ise termoiyonik emisyon mekanizmalarının varlığından söz edilebilir [93].

### 2.4.3. Space charge limited (SCL) akımı

Metal–yarıiletken–metal kontağa bir dış elektrik alan uygulandığında, elektrik alanın büyüklüğüne bağlı olarak, akümülyasyon bölgesinden yarıiletkene yeteri kadar elektron enjekte edilir. Eğer elektrik alan yeteri kadar büyük ise, elektron materyal içerisine, uzay yüklerinin miktarıyla sınırlandırılmış bir akım formunda enjekte edilir. Bu akım, space charge limited (SCL) akımı olarak adlandırılır. Tuzak etkisinin bulunmadığı bir materyale, bir elektrik alanı uygulandığı zaman SCL akımının büyük olması beklenir. Ancak pratikte büyük SCL akımlarının nadiren bulunması, materyalde bulunan tuzakların SCLC iletim olayını etkilediğine atfedilir [95]. Tuzakların bulunduğu bir materyalde, akım-voltaj karakteristiği incelenmeden önce, tuzak etkisinin olmadığı ve ısı dengede serbest taşıyıcı yoğunluğunun ihmal edildiği mükemmel yalıtkanlar dikkate alınır [99]. Enjekte edilen elektronların tamamı, iletim bandında serbest kalır ve uzay yüküne katkıda bulunur. Elektrostatik bakış açısından, akım enjeksiyon problemi, kondansatördekine benzerdir. Bu durumda, temel elektrostatik yaklaşım ve paralel plakalı kondansatör mantığına benzer bir yaklaşım uygulanarak enjekte edilen yük yoğunluğunun uygulanan voltaja bağımlılığını dikkate alarak akım yoğunluğu  $J$ , aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$J = \frac{\epsilon v V_s}{d^2} \quad (2.62)$$

Burada  $d$  elektrotlar (katot ve anot) arasındaki mesafe,  $\epsilon$  plakalar arasındaki ortamın statik dielektrik sabiti,  $v$  serbest bir elektronun ortalama sürüklenme hızıdır. Akım ifadesi yazılırken, herhangi bir difüzyon katkısı ihmal edilmiştir. Difüzyon akımları, sadece kontakların yakınında büyüktür [99].

Katının iletim bandında elektronun sürüklenmesi, katıdaki ısı titreşimli sık çarpışmalar, katkı atomları ve yapısal kusurlarla belirtilmiştir. Çok büyük olmayan elektrik alanlarda bir elektronun sürüklenme hızı, uygulanan elektrik alanla orantılıdır.

Buradan, serbest elektronların sürüklenme hızı ve geçiş zamanı, sırasıyla aşağıdaki bağıntılarla verilir.

$$v = \mu_e E = \mu_e \left( \frac{V}{d} \right) \text{ ve } t = d^2 / \mu_e V \quad (2.63)$$

Burada,  $\mu_e$  elektron mobilitesidir. Denklem (2.62) ile Denklem (2.63) birleştirilirse, akım yoğunluğu,

$$J = \varepsilon \mu_e \left( \frac{V^2}{d^3} \right) \quad (2.64)$$

elde edilir. Bu akım yoğunluğu bağıntısı, analitik olarak elde edilen bağıntıdan sadece (9/8) nümerik değeri kadar farklıdır. Yani, akım yoğunluğu  $J$ ,

$$J = \left( \frac{9}{8} \right) \varepsilon \mu_e \left( \frac{V^2}{d^3} \right) \quad (2.65)$$

bağıntısı ile verilir. Dolayısıyla, buradaki  $d$ , arasında yarıiletken olan iki kontak arasındaki mesafedir. Bu son denklem, “Mott and Gurney square law” olarak bilinir ve bazen trap-free SCL akımları için “kare yasası” olarak da tanımlanır [99, 100]. Böylece, SCL akım yoğunluğu  $J$ ;  $J \sim V^m$  olarak yazılabilir. Burada  $m > 1$  değerlerini alır. Başka bir deyişle,  $m$ 'nin birden büyük değerleri için SCL akımı beklenmelidir.  $m$  değeri 1 olduğu zaman, iletim basit olarak omiktir.  $\log J - \log V$  grafiğinin eğimi olan  $m$ , 1'den daha küçük veya 1'den daha büyük olabilir. Bu durumda,  $m$  değeri 2 olduğu zaman, iletim mekanizması, SCLC olarak tanımlanır [100, 101].

Denklem (2.65)'te, SCL akımına, tuzakların etkisi yoktur. Bu nedenle, probleme,  $n_0$  yoğunluklu ısıl olarak elde edilen serbest elektronlar dahil edilmelidir. Bu elektronların kaynağı küçük bağlanma enerjisine sahip olan sığ (shallow) seviyede bir donör grubu olabilir. Yasak enerji aralığında derin elektron tuzaklarının olmadığı kabul edilmiştir [99]. Buna göre, düşük voltaj değerlerinde Ohm kanunu,

$$J = e n_0 \mu_e \left( \frac{V}{d} \right) \quad (2.66)$$

bağıntısı ile verilir. Ohm kanununa uyan akımlar, omik akım olarak adlandırılır. Herhangi bir düşük  $V$  voltajı altında yalıtıkana enjekte edilen fazla yük olacaktır. Enjekte edilen fazla serbest elektronların yoğunluğu  $n_i$ , ısıl olarak oluşan  $n_0$  yoğunluklu elektronlarla

kıyaslanmaya başlayınca kadar Ohm kanunundan önemli bir sapma olmaz. Böylece, Ohm kanunundan SCL enjeksiyonuna geçme,

$$en_0d = Q = CV_{geç} \cong \left(\frac{\epsilon}{d}\right) V_{geç} \quad (2.67)$$

bağıntısı ile belirlenen  $V_{geç}$  voltaj değerinde meydana gelir.

Yalıtıkanda elektron tuzaklarının varlığı, genellikle daha düşük enjeksiyon seviyelerinde akımın azalmasına sebep olacaktır. Çünkü başlangıçta boş olan bu tuzaklar, enjekte edilen taşıyıcıların çoğunu yakalayacaklardır ve bu elektronlar, hareketsiz kalacaklardır. Diğer taraftan, uygulanan  $V$  voltaj değerinde yalıtkanı besleyen fazla yük miktarı, serbest veya tuzaklanan fazla yük miktarı ile aynıdır. Yani  $Q=CV$ 'dir. Paralel plakalı kondansatörün plakalarında depolanan yük miktarı, verilen bir voltaj değerinde, yükün serbest veya hareketsiz oluşundan bağımsızdır [99].

Eğer  $E_F$  Fermi enerji seviyesi,  $E_t$  tuzak enerji seviyesinden, iletim bandının alt sınırına göre aşağıda bulunuyorsa,  $E_t$  enerjisinde bulunan bir elektron tuzağı, sığ olarak adlandırılır. SCL akımında gözlenen sıcaklık bağımlılığı, sığ tuzaklardan kaynaklanmaktadır [99].

SCLC mekanizması, uygulanan voltajla bir yarıiletken malzemede enjekte olan taşıyıcıların dengede olmayan yoğunluğunu ortaya çıkardığında oluşur. Eğer voltaj yeterince yüksek ise, tuzaklanmış taşıyıcılar ilettime katkıda bulunur ve durumların yoğunluğu hakkında güvenilir bilgi *akım-voltaj* karakteristiklerinden çıkarılabilir [102].

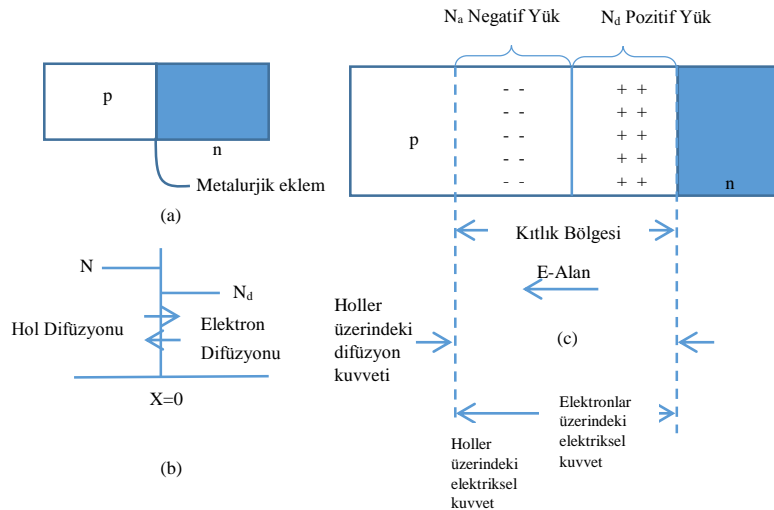
#### 2.4.4.pn heteroeklem yapılar

Bir pn eklemi, p ve n-tipi iki yarıiletkenin kontak durumuna getirilmesiyle oluşur. p-tipi ve n-tipi malzemeler kontak haline getirildiği zaman, termal denge durumundan söz edilebilir. Termal denge, bütün yarıiletken sistem boyunca Fermi enerjisinin sabit olduğu anlamına gelir.

p ve n bölgeleri arasına bir potansiyel fark uygulandığı zaman, pn eklemi artık termal dengede değildir. Yani, Fermi enerjisi artık devre elemanı boyunca sabit değildir. Eklem kapasitesi olarak adlandırılan bir kapasite vardır ve eklem kapasitesi, bir pn eklemi içeren herhangi bir yarıiletken devre elemanının karakteristiklerini etkiler [103].

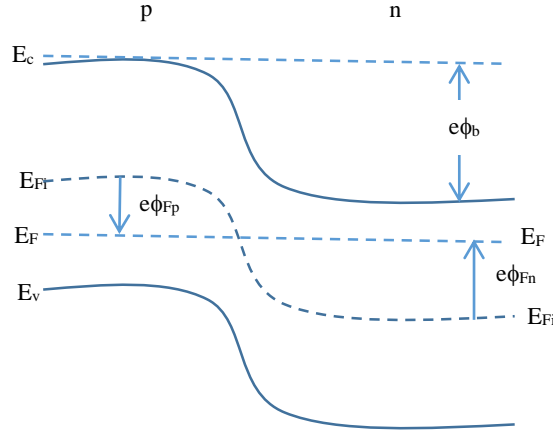
Şekil 2.19 (a)'da bir pn eklemi şematik olarak gösterilmiştir. p ve n bölgelerini ayıran arayüzey metalürjik eklem olarak adlandırılır. p-tipi ve n-tipi bölgelerdeki kirlilik

katkı konsantrasyonları Şekil 2.19 (b)'de gösterilmektedir. Başlangıçta, eklem bölgesinde, hem elektron hem de hol konsantrasyonlarında çok büyük yoğunluk gradyenti vardır. n bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı olan elektronlar p bölgesine ve p bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı olan holler de n bölgesine difüze etmeye başlayacaklardır. Eğer yarıiletkene, harici bir bağlantının olmadığı farz edilirse; o zaman bu difüzyon işlemi bir yerde son bulacaktır. n bölgesinden elektronlar difüze olduğu için geride pozitif olarak yüklenmiş donör atomları, p bölgesinden holler difüze olduğu için geride negatif olarak yüklenmiş akseptör atomları bırakırlar. n ve p-tipi bölgelerdeki net pozitif ve negatif yükler, ekleme yakın bölgede bir elektrik alan oluştururlar. Bu alanın yönü pozitif yükten negatif yüke doğrudur veya n bölgesinden p bölgesine doğrudur. Bu bölgedeki net pozitif ve negatif yük, Şekil 2.19 (c)'de gösterilmektedir. Esasında bütün elektronlar ve holler elektrik alanın etkisiyle kıtlık bölgesinin dışına çıkarlar. Yoğunluk gradyentleri, kıtlık bölgesinin her bir kenarındaki çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonlarında hala mevcuttur. Çoğunluk taşıyıcılar üzerinde etkili olan ve difüzyon kuvveti üreten bir yoğunluk gradyenti düşünülebilir. Bu difüzyon kuvvetleri Şekil 2.19 (c)'de görüldüğü gibi kıtlık bölgesinin kenarlarındaki elektronlara ve hollere etki ederler. Kıtlık bölgesindeki elektrik alan, parçacıkların her bir tipi için, difüzyon kuvvetinin yönüne zıt yönde, holler ve elektronlar üzerinde etkili olan diğer bir kuvveti oluşturur. Termal denge durumunda difüzyon kuvvetiyle  $E$ -elektrik alan kuvveti birbiriyle tamamen dengededir [103]. Termal dengedeki pn eklemi için enerji-band diyagramı Şekil 2.20'de görülmektedir.



**Şekil 2.19.** (a) Metalurjik pn eklemi geometrisi (b) Düzgün olarak katkılanmış ideal bir pn eklemi katkı profili (c) Kıtlık bölgesi, elektrik alan ve yüklü taşıyıcılar üzerine etkiyen kuvvetler

**Kaynak:** [55]



**Şekil 2.20.** Termal dengedeki pn eklemnin enerji-band diyagramı

İletim ve valans bandlarının görece konumları p ve n bölgeleri arasındaki Fermi enerji değişimleri ile ilgili olduğundan dolayı, iletim ve valans band enerjileri kıtlık bölgesi boyunca bükülmelidir. n bölgesinin iletim bandındaki elektronlar p bölgesinin iletim bandı içerisine yerleşmeye çalıştığında bir potansiyel engel görülür. Bu potansiyel engeli  $\phi_b$  ile gösterilir. Yerleşik potansiyel engeli n bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı elektronları ile p bölgesindeki azınlık taşıyıcı elektronları arasındaki dengeyi ve yine p bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı holleri ile n bölgesindeki azınlık taşıyıcı holleri arasındaki dengeyi sağlar [103].

Asal Fermi seviyesi eklem boyunca iletim bandı kenarından eşit uzaklıktadır. Bu yüzden potansiyel engeli, p ve n bölgelerindeki asal Fermi seviyeleri arasındaki fark olarak tayin edilebilir. Şekil 2.20’de gösterildiği gibi  $\phi_{Fn}$  ve  $\phi_{Fp}$  potansiyelleri belirlenebilir. Böylece

$$\phi_b = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| \quad (2.68)$$

denklemini yazılabilir. n bölgesinde iletim bandındaki elektron konsantrasyonu,

$$n_0 = N_c \exp \left[ \frac{-(E_c - E_F)}{k_B T} \right] \quad (2.69)$$

bağıntısıyla verilir. Bu denklem aşağıdaki formda da yazılabilir;

$$n_0 = n_i \exp \left[ \frac{E_F - E_{Fi}}{k_B T} \right] \quad (2.70)$$

burada  $n_i$  ve  $E_{Fi}$  sırasıyla asal taşıyıcı konsantrasyonu ve asal Fermi enerjisidir. n bölgesindeki  $\phi_{Fn}$  potansiyeli

$$e\phi_{Fn} = E_{Fi} - E_F \quad (2.71)$$

olarak verilir. O zaman

$$n_0 = n_i \exp \left[ \frac{-(e\phi_{Fn})}{k_B T} \right] \quad (2.72)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (2.72)'nin her iki tarafının logaritması alınıp  $n_0$  yerine  $N_d$  yazarak potansiyel bu denklemden çekilirse

$$\phi_{Fn} = \frac{-k_B T}{e} \ln \left( \frac{N_d}{n_i} \right) \quad (2.73)$$

bağıntısı elde edilir. Burada  $N_d$  donör konsantrasyonudur. Benzer şekilde p bölgesindeki hol konsantrasyonu;

$$p_0 = N_a = n_i \exp \left[ \frac{E_{Fi} - E_F}{k_B T} \right] \quad (2.74)$$

bağıntısıyla verilir. Burada  $N_a$  akseptör konsantrasyonudur. p bölgesindeki  $\phi_{Fp}$  potansiyeli

$$e\phi_{Fp} = E_{Fi} - E_F \quad (2.75)$$

olarak verilir. Denklem (2.74) ve Denklem (2.75) birleştirilerek

$$\phi_{Fp} = + \frac{k_B T}{e} \ln \left( \frac{N_a}{n_i} \right) \quad (2.76)$$

denklemini elde edilir. Sonuç olarak, potansiyel engeli Denklem (2.73) ve Denklem (2.76)'nın, Denklem (2.68)'de yerine yazılmasıyla

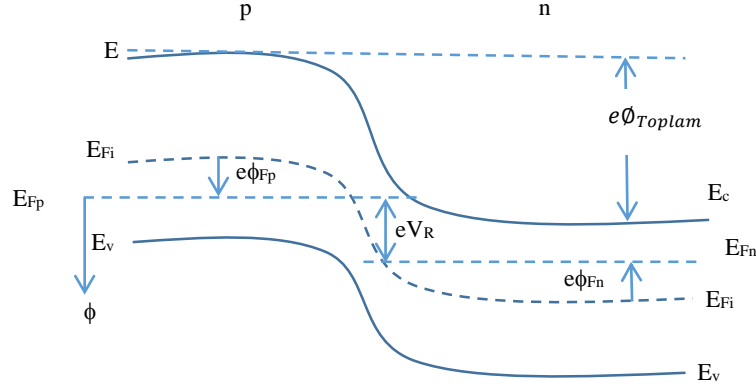
$$\phi_b = \frac{k_B T}{e} \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = V_t \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (2.77)$$

elde edilir. Burada  $V_t = kT/e$ 'dir ve termal voltaj olarak tarif edilir.

Eğer p ve n bölgeleri arasında bir potansiyel uygulanırsa denge şartı bozulacaktır ve sistem boyunca Fermi enerjisi sabit olmayacaktır. p bölgesine göre n bölgesine bir pozitif voltaj uygulandığı durumda, pn eklemının enerji-band diyagramı Şekil 2.21'de görülmektedir [103]. Pozitif potansiyel aşağı yönlü olduğundan, n bölgesi üzerindeki Fermi seviyesi p bölgesi üzerindeki Fermi seviyesinden aşağıdadır. Bu iki Fermi seviyesi arasındaki fark, enerji birimlerinde uygulanan voltaja eşittir.  $\phi_{toplamlam}$  ile gösterilen toplam potansiyel engeli artmıştır. Toplam potansiyel engeli

$$\phi_{toplamlam} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| + V_R \quad (2.78)$$

ile verilir. Burada  $V_R$  uygulanan geri besleme voltajının büyüklüğüdür.



**Şekil 2.21.** Geri besleme altındaki pn eklemının enerji-band diyagramı

Burada Denklem (2.78)

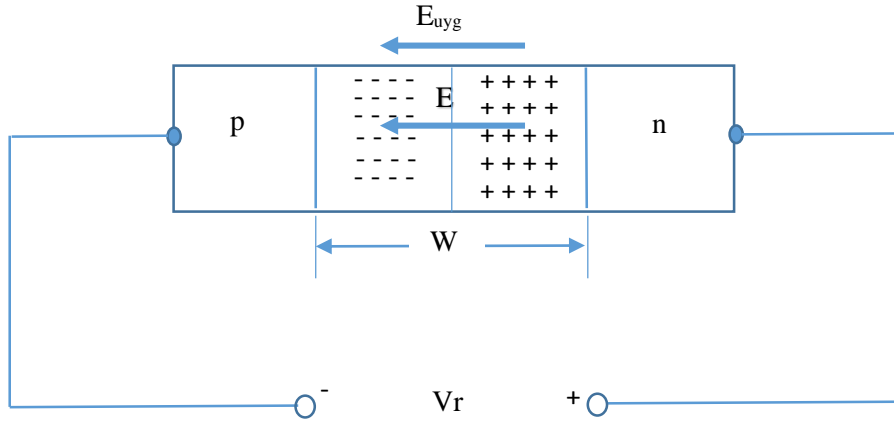
$$\phi_{toplamlam} = \phi_b + V_R \quad (2.79)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada  $V_{bi}$ , termal denge durumu için tanımlanan potansiyel engeli ile aynıdır.

Şekil 2.22’de  $V_R$  geri besleme voltajının uygulandığı bir pn eklemi verilmiştir. Ayrıca şekilde, kılık bölgesindeki elektrik alanla uygulanan voltajın oluşturduğu alan görülmektedir. Nötral p ve n bölgelerindeki elektrik alanlar esasında sıfırdır veya çok küçüktür. Yani kılık bölgesindeki elektrik alanın büyüklüğü uygulanan voltajdan dolayı termal dengedeki değerinden daha büyük olmalıdır. Elektrik alan pozitif yükten başlar ve negatif yükte son bulur. Elektrik alan artarsa, pozitif ve negatif yüklerin sayısı da artar. Verilen katkı konsantrasyonları için, kılık bölgesindeki pozitif ve negatif yüklerin sayısı, eğer sadece uzay yükü genişliği  $W$  artarsa artar. Geri besleme voltajı  $V_R$ ’nin artmasıyla  $W$  artabilir. Burada n ve p bölgelerindeki elektrik alanın sıfır olduğu kabul edilir. Toplam  $W$  aşağıdaki şekilde verilir:

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s(\phi_b + V_R)}{e} \left[ \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.80)$$

Bu denklemden de görüldüğü gibi, toplam uzay yükünün genişliği, bir geri besleme voltajı uygulandığında artar [103].



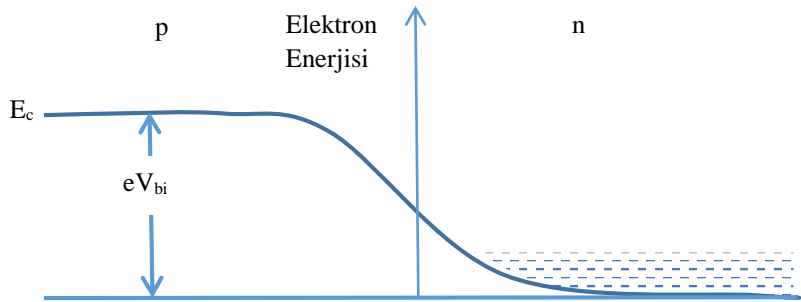
**Şekil 2.22.** Geri besleme voltajı uygulanmış bir pn eklemi

Şekil 2.23, termal dengedeki pn eklemi boyunca iletim bandının enerjisini göstermektedir. İletim bandında n bölgesinde p bölgesinden daha çok elektron vardır. Potansiyel engeli, bu büyük elektron yoğunluğunun p bölgesine akmasını engeller. Potansiyel engel, eklemin her iki tarafı üzerindeki taşıyıcı dağılımları arasındaki dengeyi sağlar.

Potansiyel engeli

$$\phi_b = V_t \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (2.81)$$

şeklinde ifade edilebilir.



**Şekil 2.23.** Bir pn eklemi boyunca iletkenlik bandı enerjisinin durumu

**Kaynak:** [103]

Denklem (2.81)'in her iki tarafının eksponansiyelini alıp,  $V_t$  yerine  $k_B T/e$  yazılırsa

$$\frac{n_i^2}{N_a N_d} = \exp\left(\frac{-eV_{bi}}{k_B T}\right) \quad (2.82)$$

denklemini elde edilir. Tam iyonizasyon durumu kabul edilirse

$$n_{n0} \approx N_d \quad (2.83)$$

yazılır. Burada  $n_{n0}$ , n bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı elektronların termal denge konsantrasyonudur. p bölgesinde

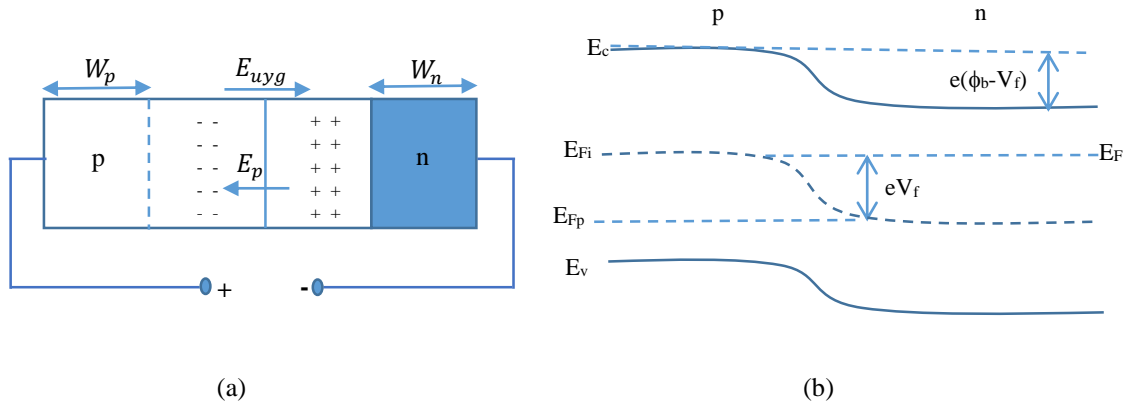
$$n_{p0} \approx \frac{n_i^2}{N_a} \quad (2.84)$$

ilişkisi yazılabilir. Burada  $n_{p0}$ , azınlık taşıyıcı elektronlarının termal denge konsantrasyonudur. Denklem (2.83) ve Denklem (2.84), Denklem (2.82)'de yerine yazılırsa

$$n_{p0} = n_{n0} \exp\left(\frac{-eV_{bi}}{k_B T}\right) \quad (2.85)$$

denklemini elde edilir. Denklem (2.85) termal dengede eklem n tarafındaki çoğunluk taşıyıcı elektron konsantrasyonu ile eklem p tarafındaki azınlık taşıyıcı elektron konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi vermektedir.

Eğer n bölgesine göre p bölgesine bir pozitif voltaj uygulanırsa, potansiyel engeli azalır. Şekil 2.24 (a), bir  $V_f$  voltajının uygulandığı pn eklemine göstermektedir. p ve n bölgelerindeki elektrik alan normal olarak çok küçüktür. Esasında uygulanan voltajın tümü eklem bölgesi üzerindedir. Uygulanan voltajın oluşturduğu  $E_{uyg}$  elektrik alanı termal denge uzay yükü elektrik alanına zıt yöndedir. Bu yüzden kitlelik bölgesindeki net elektrik alan termal denge değerinden daha azdır. Termal denge durumunda ulaşılan E- elektrik alan kuvveti ve difüzyon kuvveti arasındaki hassas denge bozulur. Kitlelik bölgesinden geçen çoğunluk taşıyıcıları engelleyen elektrik alan kuvveti azalır. Bu durumda, n tarafındaki çoğunluk taşıyıcı elektronları kitlelik bölgesi üzerinden p materyali içine difüz olurlar ve p tarafındaki çoğunluk taşıyıcı holleri de kitlelik bölgesi üzerinden n materyali içine difüz olurlar.  $V_f$  beslemi uygulandığı sürece taşıyıcıların enjeksiyonu kitlelik bölgesi üzerinden devam eder ve pn eklemine bir akım oluşur. Bu, ileri besleme olarak bilinir ve ileri beslenmiş pn eklemine enerji-band diyagramı Şekil 2.24 (b)'de görülmektedir.



**Şekil 2.24.** (a) İleri besleme voltajı uygulanmış pn eklemide uzay yükü elektrik alanı ve  $V_a$  tarafından oluşturulan elektrik alan (b) İleri besleme voltajı uygulanmış pn eklemimin enerji-band diyagramı

Eklem ileri beslendiği zaman Denklem (2.85)'teki  $V_{bi}$  potansiyel engeli yerine  $(\phi_b - V_f)$  alınabilir. Denklem (2.85)

$$n_p = n_{n0} \exp\left(\frac{-e(\phi_b - V_f)}{k_B T}\right) = n_{n0} \exp\left(\frac{-e\phi_b}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{eV_f}{k_B T}\right) \quad (2.86)$$

eşitliğine dönüşür. Düşük enjeksiyon durumu göz önüne alındığında çoğunluk taşıyıcı elektron konsantrasyonu  $n_{n0}$  yeterince değişmez. Bununla birlikte azınlık taşıyıcı konsantrasyonu  $n_p$ , onun termal dengedeki  $n_{p0}$  değerinden türetilebilir. Denklem (2.85) kullanılarak, Denklem (2.86)

$$n_p = n_{p0} \exp\left(\frac{eV_f}{k_B T}\right) \quad (2.87)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem (2.87)'nin sol tarafı p bölgesindeki toplam azınlık taşıyıcı elektron konsantrasyonudur ve termal denge değerinden daha büyüktür. n bölgesindeki kılık bölgesinin kenarındaki azınlık taşıyıcı hollerin konsantrasyonu  $p_n$  ise,

$$p_n = p_{n0} \exp\left(\frac{eV_f}{k_B T}\right) \quad (2.88)$$

şeklinde yazılabilir.

#### 2.4.5. İdeal pn eklem akımı

Akım-voltaj karakteristiği incelenerek diyotun idealite faktörü ileri besleme tarafındaki değişiminden hesaplanabilir. İdealite faktörü; diyotun kalitesini belirleyen önemli bir birimsiz parametredir. İdeal bir diyot için akımın iletiminde termoyonik emisyon mekanizmasının etkin olduğu düşünüldüğünde  $n=1$ 'dir ve  $n$  değeri 1'den uzaklaştıkça diyot idealden uzaklaşıyor demektir.  $I - V$  ölçümleri yardımıyla elde edilen diyotun ileri besleme karakteristiğinden idealite faktörü ve metal-yarıiletken kontak arasında oluşan engel yüksekliği değerlerine ulaşılabilir. İdealite faktörünü hesaplamak için,

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.89)$$

denklemini kullanılır. Bu denklem bir diyottan elde edilen akımın voltaj bağımlılığını verir. Bu ifadede  $eV \gg nkT$  olması durumunda 1 terimi, üstel terim yanında ihmal edilebilir. İfadenin yeni hali;

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (2.90)$$

olur. Denklem (2.90)'nın her iki tarafının logaritması alınıp, sonrada  $V$ 'ye göre türevi alınacak olursa idealite faktörü için,

$$n = \frac{e}{k_B T} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.91)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $e$  elektronun yüküdür ( $1,6 \times 10^{-19}$  C).  $\ln I - V$  grafiği çizildiğinde, grafiğin ileri besleme tarafındaki lineer kısmına doğrusal fit uygulanarak, bu doğrunun eğimi yardımıyla  $n$  değeri bulunabilir. Bu değerle birlikte yukarıda verilen sabitler de Denklem (2.91) ifadesinde yerine yazılarak idealite faktörü elde edilir. Fit edilen doğrunun  $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta  $I_0$  doyuma akım değerini verir.  $I_0$  doyum akım değeri,

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_b}{k_B T}\right) \quad (2.92)$$

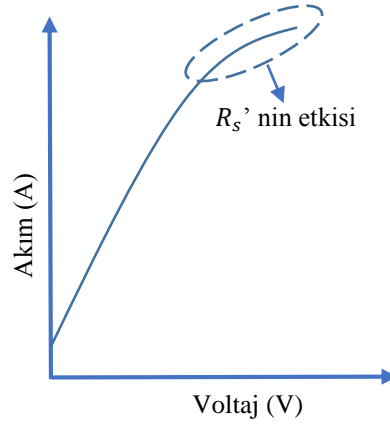
ile verilmektedir. Burada  $A$  diyot alanı,  $A^*$  Richardson sabitidir. Denklem (2.92)'nin her iki tarafın doğal logaritması alınır,

$$e\phi_b = k_B T \ln \left( \frac{AA^* T^2}{I_0} \right) \quad (2.93)$$

ifadesi elde edilir [104].

#### 2.4.6. Cheung fonksiyonları yardımıyla diyot karakteristiği

Metal–yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yarıiletken tarafında oluşan kıtlık bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirence seri direnç denir ve  $R_s$  ile gösterilir. Bu etki, büyük voltaj değerlerinde baskın olmaya başlar ve diyot akımının düşmesine neden olur. Şekil 2.25, bir Schottky diyotta büyük voltaj değerlerinde seri direncin etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı göstermektedir [93].



Şekil 2.25. Seri direncin  $I$ - $V$  karakteristiğine etkisi

Metal–yarıiletken yapıların ileri besleme  $I$ - $V$  karakteristiklerinin yardımı ile Schottky diyotların elektriksel parametrelerinin hesaplanmasında Cheung tarafından bir metot sunulmuştur [105]. Termoyonik emisyon teorisi dikkate alındığında bir diyottan geçen akımın denklemi

$$I = AA^* T^2 \exp \left( -\frac{e\phi_b}{k_B T} \right) \left[ \exp \left( \frac{eV}{nk_B T} \right) \right] \quad (2.94)$$

olarak yazılır. Seri direnç etkisi dikkate alındığında uygulanan potansiyelin  $IR_s$  kadarlık voltajı nötral bölge üzerine düşüreceği göz önüne alınırsa  $(V - IR_s)$  olarak yazılır ve denklem

$$I = AA^* T^2 \exp \left( -\frac{e\phi_b}{k_B T} \right) \left[ \exp \left( \frac{e(V - IR_s)}{nk_B T} \right) \right] \quad (2.95)$$

halini alır. Son denklem kullanılarak potansiyel fark

$$V = \left( \frac{nk_B T}{e} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^* T^2} \right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.96)$$

olarak elde edilir. Denklem 2.96'nın  $\ln I$ 'ya göre türevi alındığında

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nk_B T}{e} + IR_s \quad (2.97)$$

elde edilir. Bu eşitliğe göre  $dV/d(\ln I)$ 'nin  $I$ 'ya göre grafiği bir doğruyu verecektir ve bu doğrunun eğimi seri direnç değerini verecektir. Bu doğrunun  $dV/d(\ln I)$  eksenini kestiği noktadan  $n$  değeri hesaplanabilir. Engel yüksekliğini bulmak için

$$H(I) = V - \left( \frac{nk_B T}{e} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (2.98)$$

şeklinde bir  $H(I)$  fonksiyonu tanımlanmıştır. 2.96 ve 2.98 denklemleri kullanılarak

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (2.99)$$

yazılabilir. Bu denklem kullanılarak  $H(I)-I$  grafiği çizildiğinde yine bir doğru elde edilir. Bu doğrunun eğimi, seri direncin değerini verir. Bu doğrunun  $H(I)$  eksenini kestiği noktadan da  $\phi_b$  hesaplanabilir.

#### 2.4.7. Norde fonksiyonları yardımıyla diyot karakteristiği

Norde metodu, diyotun seri direnç değerini ve engel yüksekliğini hesaplamak için alternatif bir yöntemdir [106]. Termiyonik emisyon teorisi sadece diyotun ileri besleme  $I - V$  karakteristiğinin lineer bölgesinde kullanılır. Yüksek seri direnç nedeniyle lineer bölge  $k_B T/e \ll V \ll IR_s$  aralığıyla sınırlanır ve daralma gösterir. Bu durumda  $\ln(I)-V$  grafiğinin değerlendirilmesi daha karışık bir hal alır ve bu bölgede doyum akımı  $I_0$  ve engel yüksekliği  $\phi_b$  değeri güvenilir olarak hesaplanamaz.  $n$ ,  $R_s$  ve  $\phi_b$  değerleri hesaplamak için daha güvenilir metotlar mevcuttur. Norde metodu da bunlardan biridir. Bohlin, Norde tarafından sunulan yöntemi geliştirerek yüksek seri direnç ve idealite

faktörüne sahip diyotlar için modifiye etmiş ve Denklem (2.100) ile tanımlı Norde fonksiyonunu ortaya koymuştur. Norde fonksiyonu,

$$F(V) = \frac{V_0}{\gamma} - \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{I(V)}{AA^* T^2} \right) \quad (2.100)$$

ile tanımlanır. Burada  $\gamma$ ,  $n$  değerinden büyük boyutsuz tam sayıdır.  $F(V) - V$  grafiğinde, seri dirençten dolayı  $dF(V)/dV=0$  şartında eğri bir minimumdan geçmektedir. Eğrinin minimum olduğu noktaya karşılık gelen voltaj değeri ( $V_0$ ) ve akım ( $I_0$ ) değeri ile  $I - V$  grafiği eğimi yardımıyla hesaplanan  $n$  değeri kullanılarak  $R_s$  ve  $\phi_b$  değeri hesaplanabilir. Bu hesaplamalar yapılırken

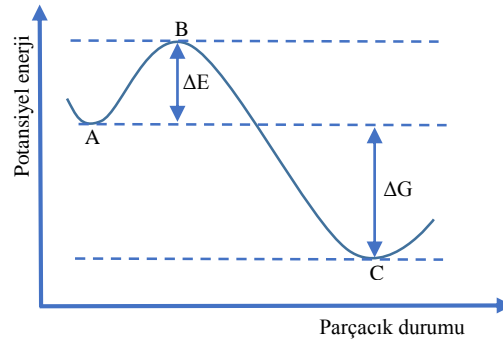
$$R_s = \frac{k_B T (\gamma - n)}{q I_0} \quad (2.101)$$

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{k_B T}{q} \quad (2.102)$$

denklemlerinden faydalanılmaktadır.

#### 2.4.8. Akımın sıcaklık ile değişimi ve aktivasyon enerjisi

Bir atom veya parçacık, fiziksel veya kimyasal değişimler sırasında içinde bulunduğu yarı kararlı durumdan daha kararlı bir duruma geçebilir. Bu durum Şekil 2.26' da gösterilmektedir.



**Şekil 2.26.** Bir atomun veya parçacığın yüksek enerjili bir durumdan geçerek yarı kararlı bir durumdan daha kararlı bir duruma hareketi

**Kaynak:** [107]

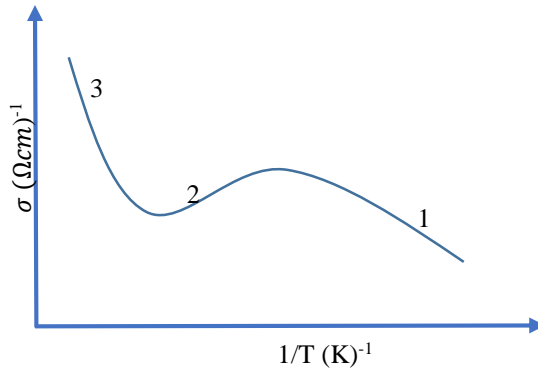
A durumundaki bir parçacık kararsız B durumundan geçerek, daha kararlı C durumuna gelebilir. Bunun için önce kararsız duruma geçişi sağlayacak kadar  $\Delta E$  enerjisini alması gerekir. Bu enerji aktivasyon enerjisi olarak adlandırılır. C durumu en düşük enerjili durumdur. İlk durumdan son duruma geçerken parçacık  $\Delta G$  kadar net bir enerjiyi herhangi bir şekilde dışarıya verir. Aktivasyon enerjisinden daha büyük veya eşit enerjilere sahip parçacıklar, buldukları yarı kararlı durumdan kararlı duruma potansiyel enerji engelini aşarak geçeceklerdir.

Elektriksel iletkenlik, sıcaklığa eksponansiyel olarak,

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/k_B T) \quad (2.103)$$

ifadesiyle bağlıdır. Burada  $E_a$  aktivasyon enerjisini,  $\sigma$  herhangi bir  $T$  sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği,  $\sigma_0$  ise oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği göstermektedir.

İletkenliğin sıcaklıkla değişimi Şekil 2.27’de gösterilmiştir. Şekil 2.27’ye göre 1. bölgede sıcaklık çok düşük olduğundan, elektronlar donör enerji seviyesinden iletim bandına veya valans bandından akseptör enerji seviyesine geçerler. Valans bandından iletim bandına elektronların geçişi azdır. İletkenlikteki bu artış katkı atomlarından kaynaklanmaktadır ve bu bölge katkılı (extrinsic) bölge olarak adlandırılmaktadır. 2. bölgede sıcaklık arttıkça donör enerji seviyelerindeki elektronlar tükenebilir veya akseptör enerji seviyeleri doyabilir. Sıcaklık arttığı için fononların sayıları artar ve dolayısıyla mobilite düşecektir. Mobilitenin düşmesiyle birlikte iletkenlik bir miktar azalacaktır. 3. bölgede daha yüksek sıcaklıklarda yeterli ısı enerjisi nedeniyle çok sayıda elektron valans bandından iletim bandına geçer. Katkı atomlarının taşıyıcı yoğunluğunda bir artış olamayacağından iletim bu bölgede has (intrinsic) iletkenlik şeklinde olur [103].



**Şekil 2.27.** İletkenliğin sıcaklıkla değişimi  
**Kaynak:** [103]

Elektriksel iletkenlik ile akım yoğunluğu, dolayısıyla da akım doğru orantılıdır. Buradan akımın sıcaklığa göre değişimi,

$$I = I_0 \exp(-E_a/k_B T) \quad (2.104)$$

bağıntısıyla verilir. Denklem (2.104)'ün her iki tarafının logaritması alınır,

$$\ln I = -\frac{E_a}{k_B T} + \ln I_0 \quad (2.105)$$

eşitliği elde edilir ve  $\ln I$ 'nin  $(1/T)$ 'ye karşı grafiği lineerdir. Bu doğrunun eğiminden  $E_a$  aktivasyon enerjisi hesaplanabilir [95]. Ayrıca doğrunun y-ksenini kestiği nokta ise  $\ln(I_0)$ 'dir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Giriş

Yarıiletken filmlerin üretiminde kullanılan pek çok yöntem vardır. Bu yöntemler fiziksel ve kimyasal olarak iki başlık altında toplanabilir. Bu yöntemlerin bazıları aşağıda verilmiştir.

##### ❖ Film Hazırlama Yöntemleri

###### ➤ Fiziksel Yöntemler

- Buharlaştırma
  - Reaktif buharlaştırma
  - Termal buharlaştırma
  - Kimyasal buhar biriktirme (CVD)
- Saçtırma (Sputtering)
  - Glow deşarj
  - İyon demeti saçtırması

###### ➤ Kimyasal Yöntemler

- Sol jel
  - Dip (dip coating) (daldırma)
  - Drop (drop casting) (damlatma)
  - Spin (spin coating) (döndürme)
- Elektrodepozisyon
- Kimyasal banyo
- Püskürtme

Fiziksel yöntemler; bir malzemenin vakum ortamında buharlaştırılması esasına dayanır. Kimyasal yöntemler ise; kimyasal reaksiyonlar, elektrik akımı ve termal etki ile gerçekleşen yöntemlerdir. Bu yöntemlerde kaplama, başlangıç kaplama malzemesinin belirli kimyasal reaksiyonlara sokulması sonucu kimyasal formülünün değiştirilmesi ile yapılır.

Fiziksel metotların pek çoğu pahalı ve karmaşık sistemlere gereksinim duyar. Fakat kimyasal yöntemlerden biri olan sol jel yöntemi kolay uygulanabilir bir metot olmasının yanı sıra pek çok üstünlüğe sahiptir. Bu yöntem, laboratuvar koşullarında kolaylıkla

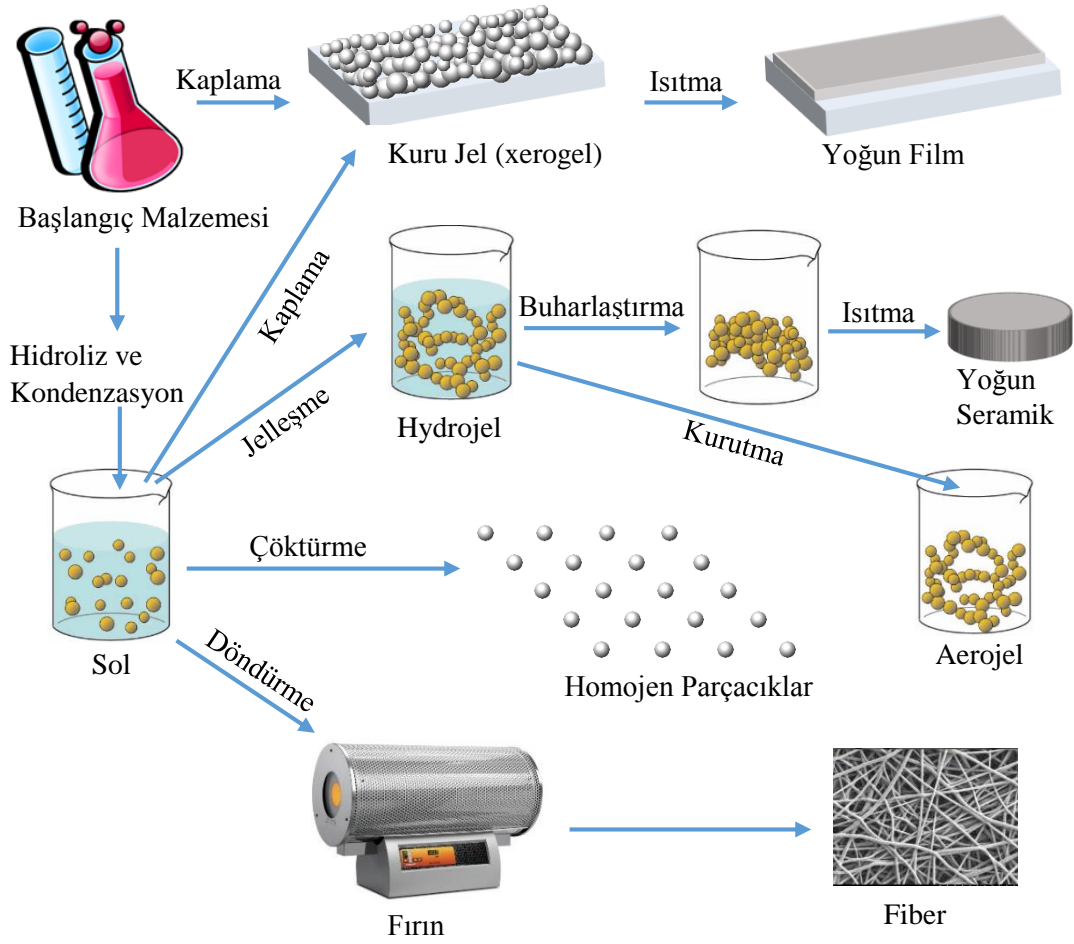
uygulanabilir. Ayrıca büyük ölçekli üretimler için de kullanımı giderek artmaktadır. Fiberler, filmler, monolitler ve partiküller gibi çeşitli boyut, şekil ve biçimlerde ürün elde etmek için de oldukça fazla tercih edilmektedir [108].

Literatürde yapılan çalışmalarda bu yönteme çok yakın deneysel koşullar kullanılmasına rağmen oldukça farklı karakteristikte son ürünler elde edildiği görülür. Çünkü sol jel yönteminin her bir adımı son ürün üzerinde önemli etkilere sahiptir [108].

### **3.2. Sol Jel Yöntemi**

Sol jel, çözeltiler ya da kolloidal süspansiyonlardan üretilen jellerin proseslerinin geniş bir sınıfını tanımlar. Sol, sıvı içindeki kolloidal katı partiküllerin stabil süspansiyonudur. Sol oluşumu için katı parçacıklar, sıvının sardığı moleküllerden daha yoğun, fakat sıvı içerisinde yayılmayı sağlayan kuvvetlerden daha küçük kuvvette olmalı ve makroskopik olarak belirgin atomları içermelidir.

Jel, sıvı bileşen içeren iç yapısı yüksek yoğunlukta sıvı ve katı dağılımına sahip, gözenekli durumdur. Bütün sollar jel olmayabilirler. Jel oluşumu için önemli kriter, en küçük çözücü parçacıkları ile çözünen parçacıklar arasında bağ kurulmasıdır. Jeli oluşturan moleküller birbirine zayıf veya kuvvetli bağlarla bağlanarak, aralarındaki boşluklarda sıvı bulunan iskelet şeklinde dokular oluştururlar. Sonuç olarak, sıvı bağlarıyla sıvı ortamının birleşmesi sonucu oluşan akıcı olmayan ortam yani jel oluşur [109]. Jel sıvı tabakası, katı gibi görünmesine rağmen ıslak bir çözeltilerdir. Jel, sıvı içindeki gözenekli bir ağ yapı olarak düşünülebilir. Islak jelde alkol, su gibi maddeler de mevcuttur. Jel ısıtılarak su, organik çözücüler gibi maddeler uzaklaştırılabilir. Bu prosesin en önemli adımı, bu jelin çatlak oluşumuna imkân vermeden kurutulmasıdır. Kurutma işleminde çözücü fazlalığının (alkol, su) giderilmesiyle jel büzülür ve yüksek gözeneklilik içeren xerogel olarak adlandırılan katı (kuru jel) oluşur. Isıl işlemler uygulanırken, jel miktarında oldukça büyük bir azalma meydana gelir [110]. Şekil 3.1' de görüldüğü gibi çözeltilinin (solün) farklı prosesleri ile malzemelerin değişik formları oluşturulabilir. Bu proses, film, seramik, aerojel, partiküller ve fiber gibi çeşitli boyut, şekil ve biçimlerde ürün elde etmek için kullanılabilir.



Şekil 3.1. Çeşitli sol jel türevli ürünlerin şematik gösterimi

### 3.3. Sol Jel Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

Sol jel yöntemi pekçok avantaja sahiptir. Bunlardan bazıları şunlardır:

1. Film oluşumu çok yüksek sıcaklık gerektirmez. Böylece malzemenin termal bozunma riski en aza indirilmiş olur [109].
2. Başlangıç malzemeleri çoğunlukla uçucudur ve kolayca çok yüksek seviyelerde saflaştırılabilirler. Bu da yüksek saflıkta ürün elde edilmesini sağlar.
3. Farklı metaller içeren başlangıç malzemeleri çoğunlukla karıştırılabildiğinden, homojen bir şekilde kontrollü katkılama kolayca yapılır [111].
4. Bu yöntemle nanokristal malzemeler hazırlanabilir.
5. Başlangıç malzemesinin uygun kimyasal modifikasyonu ile hidroliz, yoğunlaşmanın hızı, kolloidal partikül boyutu, gözenek boyutu, son ürünün gözeneklilik ve gözenek yüzey kimyası kontrol edilebilir [109].

6. Yaşlandırma ve kurutma koşulları kontrol edilerek, gözenek boyutu ve mekanik mukavemet kontrol edilebilir.
7. Materyallerin optik kalitesi optik aygıt uygulamalarında kullanılabilir kadar iyidir.
8. Sol jel yönteminin çok yüksek sıcaklıklar gerektirmemesi ve bu sıcaklıkların çoğunlukla oksit malzemelerin kristalizasyon sıcaklığının altında olması istenildiği takdirde amorf malzeme üretimine de izin verir [112].

Tüm bu avantajlara rağmen, sol jel yöntemi ile üretilen malzemeler için sınırlamalar da mevcuttur. Çok fazla olmamakla beraber bu yöntem de diğer bazı yöntemler gibi dezavantajlara sahiptir. Bunlardan bazıları şunlardır:

1. Başlangıç malzemeleri neme duyarlıdır [109]. Bu, optik kaplamalar gibi özel uygulamalar için büyük ölçeklerdeki üretimi sınırlar.
2. Yöntem çok aşamalıdır.
3. Tam olarak sınırlayıcı bir etken olmamasına rağmen, uzun ve sürekli bir üretimin planlandığı durumlarda, süreçte kullanılan toplam malzeme miktarı, daha hızlı süreçlere göre önemli ölçüde fazladır [112].

Sol jel yöntemi; dip kaplama, drop kaplama ve spin kaplama gibi alt yöntemlere ayrılır. Bu yöntemlerden dip kaplama yönteminde, hazırlanan çözeltiye taşıyıcı olarak kullanılan malzemenin (alttaş) sabit bir hızla daldırılması ve aynı hızla çıkarılması esasına dayanır. Bir diğer yöntem olan drop kaplama yönteminde, çözeltinin pipetle alttaş üzerine damlatılması sonucu yayılması ve ısıtılarak kurutulması prensibine dayanır. Spin kaplama yönteminde, alttaşın üzerine pipetle çözelti damlatılması ve yatay olarak bir eksen etrafında sabit bir hızla döndürülmesi esnasında, çözeltinin merkezkaç kuvvetinin etkisiyle taşıyıcı yüzeyine yayılması prensibine dayanmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan yöntem olan sol jel spin kaplama yöntemi ile film oluşumu aşağıda daha detaylı olarak anlatılmaktadır.

#### **3.4. Sol Jel Spin Kaplama Yöntemi ile Film Oluşumu**

Sol jel spin kaplama yöntemi ile malzeme üretimi, bir grup jeli oluşturmak için çözeltinin jelleşmesi ve kurutma sonrası bu jelin xerogel şekline dönüşmesini içerir [113].

Bu çalışmada LAURELL marka WS-400B-6NPP/LITE model spin kaplama cihazı kullanılmıştır (Görsel 3.1). Spin kaplama yönteminde, vakum yardımıyla yatay konumda tutturulan alttaşlar üzerine damlatılan çözeltinin, döndürülürken merkezkaç kuvvetinin etkisiyle alttaş üzerine yayılması esasına dayanır. Elde edilen filmin kalınlığı çözeltinin molaritesi, alttaşın cinsi ve döndürme hızı gibi parametrelere bağlıdır.

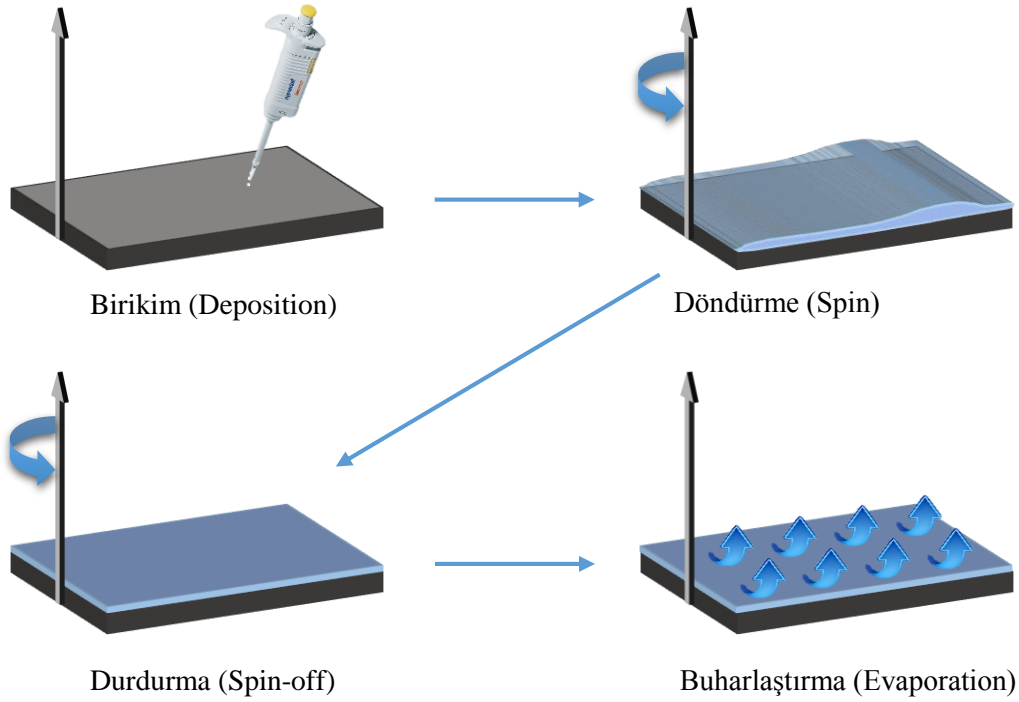


**Görsel 3.1.** LAURELL marka WS-400B-6NPP/LITE model spin kaplama cihazı

Sol-jel spin kaplama yöntemi dört aşamadan oluşur (Şekil 3.2).

- i. Birikim (Deposition)
- ii. Döndürme (Spin-up)
- iii. Durdurma (Spin-off)
- iv. Buharlaşma (Evaporation)

Birikim aşamasında, alttaş üzerine damlatılan çözelti son kalınlık için gerekli miktarla karşılaştırıldığında çok fazladır. Bu aşamada, çözelti yüzey üzerinde yayılır. Damlatılan çözelti miktarı, işlem boyunca alttaşın nemli kalmasını sağlayacak miktarda olmalıdır. Aksi takdirde, alttaşın tamamı kaplanmayacaktır. İkinci aşama olan döndürmede, alttaş istenilen döndürme hızına ulaşır. Merkezkaç kuvvetinin etkisindeki çözelti merkezden dışa doğru akar. Üçüncü aşama olan durdurma aşamasında fazla çözelti yüzeyi terk eder. Film kalınlığı azaldıkça durdurma aşamasında yüzeyden dökülen çözelti miktarı azalır, çünkü film inceldikçe uçucu olmayan bileşenlerin konsantrasyonu artar. Bu da viskozitenin artmasına sebep olup akışa karşı direnci arttırmaktadır. Buharlaşma aşaması son aşamadır. Ancak tüm aşamalarda bir miktar buharlaşma mevcuttur.



**Şekil 3.2.** Sol jel spin kaplama yönteminin aşamaları

### 3.5. Metal Oksit (ZnO, CdO, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>) Filmlerinin Elde Edilmesi

Metal oksit yarıiletken (ZnO, CdO, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>) filmleri sol jel spin kaplama yöntemi kullanılarak farklı alttaşlar üzerine elde edilmiştir. Depolama ve çözelti parametrelerine göre metal oksit yarıiletken filmlerinin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerinde değişimler gözlenmiştir. Bu parametreler; çözelti molaritesi, çözelti pH değeri, döndürme hızı, depolama sıcaklıkları ve tavlama sıcaklıkları olarak sıralanabilir. Ayrıca sol jel spin kaplama yöntemi ile elde edilecek filmlerin kalitesinin iyileştirilmesi için gerekli olan en önemli unsurlardan bir tanesi de alttaşların temizliğidir. Alttaşın temiz olması filmin kristal yapısı ve elektriksel ölçümleri üzerinde oldukça etkilidir. Bu çalışmada alttaş olarak cam, ITO ve p-Si kullanılmıştır.

#### 3.5.1. Alttaşların temizlenmesi

Alttaşların üzerine kaplanan metal oksit filmin homojen olarak kaplanabilmesi ve alttaş üzerinde kalan kirliliklerin elde edilen filmin karakteristik özelliklerini etkilememesi için alttaşların bazı özel işlemlerle temizlenmesi gerekir. Bu yüzden her bir alttaş için farklı temizleme prosedürü kullanılarak alttaş temizleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Cam alttaşların temizlenmesi;

- Bu iş için 1mm kalınlığında mikroskop camları kullanılmıştır. Mikroskop camları yaklaşık olarak 12x12 mm<sup>2</sup> ebatlarında düzgün olarak kesilmiştir.
- Kesilen camlar deterjanlı saf suda kaynatılmış ve daha sonra deiyonize su ile durulanmıştır.
- Durulanan camlar sıcak hava ile kurutulduktan sonra teker teker temizleme zltisinden (5 g potasyum dikromat + 250 ml slfirek asit) geirilmış ve deiyonize su ile durulandıktan sonra yine kurutulmuştur.
- Camlar son olarak asetondan geirilmış ve tekrar kurutularak temizlenmiştir.
- Temizlenen alttaşlar vakumlu desikatöre yerleştirilmıştir.

ITO alttaşların temizlenmesi;

- Deterjanlı saf su içerisindeki alttaşlar 10 dk ultrasonik banyoda tutulmuştur.
- Etanol içerisinde 10 dk ultrasonik banyoda tutulmuştur.
- Aseton içerisinde 10 dk ultrasonik banyoda tutulmuştur.
- Son olarak kurutularak temizlenmiştir.
- Temizlenen alttaşlar vakumlu desikatöre yerleştirilmıştir.

Silisyum alttaşların RCA yöntemi ile temizlenmesi;

- 20 ml Amonyum hidroksit + 100 ml deiyonize su 70°C’de 15 dk ısıtılmıştır.
- Karışım, ısıtıcı üzerinden alınıp üzerine 20 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (hidrojen peroksit) eklenmiştir (amonyum hidroksit: hidrojen peroksit: deiyonize su=1:1:5).
- Hidrojen peroksitin eklenmesinden sonra 1–2 dk beklenmiştir. (Karışım içerisinde fokurdamalar gözlenecektir.)
- Karışım içerisine Si alttaşlar atılmıştır.
- Si alttaşlar zlti içinde 15 dk bekledikten sonra soğuk deiyonize su ile durulanmış ve ardından hidroflorik asit (HF) içerisinde bekletilmıştir. Bu işlem için %5 HF zltisi hazırlanmıştır.
- HF den çıkartılmış olan Si alttaşlar deiyonize su ile durulanmış ve azot gazı (N<sub>2</sub>) ile kurutulduktan sonra vakumlu desikatöre yerleştirilmıştir.

### 3.5.2. ZnO filmlerinin elde edilmesi

ZnO filmleri, farklı alttaşlar üzerine (cam, ITO, p-Si), farklı molaritelerde (0,1; 0,3; 0,5 ve 1 molar) hazırlanan çözeltiler kullanılarak ve farklı döndürme hızlarında (1000, 2000, 3000, 4000 ve 5000 rpm) sol jel spin kaplama yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Başlangıç malzemesi olarak çinko asetat dihidrat (ZnAc) [(ZnCH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O)] (Merck, ≥ %99,5) kullanılmıştır. Çözücü ve sabitleyici olarak sırasıyla 2-metoksietanol (Sigma Aldrich, ≥ %99,5) ve monoetanolamin (MEA) (Merck, ≥ %99) kullanılmıştır. ZnAc:MEA oranı 1 olarak alınmış ve ZnAc çözeltileri hazırlanmıştır. Spin kaplama cihazında döndürme hızı ayarlandıktan sonra alttaşın yüzey alanına göre ~125 µl çözelti mikropipet yardımıyla alttaş üzerine damlatılmış ve 30s süre ile döndürülmüştür. Bu işlem sonunda filmler 300°C'deki fırında 10 dakika kurutulmuş sonra soğumaya bırakılmıştır. Farklı alttaşlar üzerine yapılan bu işlemler 10 kez tekrarlanmıştır. Filmler son olarak 60 dakika süresince farklı depolama sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Aynı işlemler farklı molaritelerdeki (0,1; 0,3; 0,5 ve 1 molar) çözeltilerle de yapılmıştır. ZnO filmlerinin elde edilme parametreleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1. ZnO filmlerinin elde edilme parametreleri**

Film Kodu	Altaş	Döndürme hızı (rpm)	Molarite (M)	Depolama sıcaklığı (°C)
Z1-C	Cam	1000	0,5	500
Z1-I	ITO	1000	0,5	500
Z1-S	p-Si	1000	0,5	500
Z2-C	Cam	2000	0,5	500
Z2-I	ITO	2000	0,5	500
Z2-S	p-Si	2000	0,5	500
Z3-C	Cam	3000	0,5	500
Z3-I	ITO	3000	0,5	500
Z3-S	p-Si	3000	0,5	500
Z4-C	Cam	4000	0,5	500
Z4-I	ITO	4000	0,5	500
Z4-S	p-Si	4000	0,5	500
Z5-C	Cam	5000	0,5	500
Z5-I	ITO	5000	0,5	500
Z5-S	p-Si	5000	0,5	500
Z6-S	p-Si	4000	0,1	500
Z7-C	Cam	4000	0,3	500
Z7-I	ITO	4000	0,3	500
Z7-S	p-Si	4000	0,3	500
Z8-C	Cam	4000	1	500
Z8-I	ITO	4000	1	500
Z8-S	p-Si	4000	1	500
Z9-C	Cam	4000	0,5	600
Z9-I	ITO	4000	0,5	600
Z9-S	p-Si	4000	0,5	600
Z10-S	p-Si	4000	0,5	700
Z11-S	p-Si	4000	0,5	800

### 3.5.3. CdO filmlerinin elde edilmesi

CdO filmleri farklı alttaşlar (cam, p-Si) üzerine farklı döndürme hızlarında (2000, 3000 ve 4000 rpm) ve farklı pH (4–12) değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak sol jel spin kaplama yöntemi ile elde edilmiştir. Bu sayede farklı alttaşlar üzerine büyütülen CdO filmlerinin kalitesi üzerine, çözeltinin pH değerinin etkisi araştırılmıştır. Başlangıç malzemesi olarak kadmiyum asetat dihidrat (CdAc) ( $C_4H_6CdO_4 \cdot 2H_2O$ ) (Sigma Aldrich,  $\geq \%98,0$ ) tuzu kullanılmıştır. Çözücü ve sabitleyici olarak sırasıyla 2-metoksietanol (Sigma Aldrich,  $\geq \%99,5$ ) ve monoetanolamin (MEA) (Merck,  $\geq \%99$ ) kullanılmıştır. CdAc:MEA oranı 1 olarak alınmış ve CdAc çözeltileri hazırlanmıştır. Spin kaplama cihazında döndürme hızı ayarlandıktan sonra alttaşın yüzey alanına göre  $\sim 125$   $\mu$ l çözelti mikropipet yardımıyla alttaş üzerine damlatılmış ve 30 s süre ile döndürülmüştür. Bu işlem sonunda filmler  $300^\circ C$ 'deki fırında 10 dakika kurutulmuş sonra soğumaya bırakılmıştır. Farklı alttaşlar üzerine yapılan bu işlemler 10 kez tekrarlanmıştır. Filmler son olarak 60 dakika  $500^\circ C$  depolama sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Elde edilen filmlerin kodları ve elde edilme parametreleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** CdO filmlerinin elde edilme parametreleri

Film Kodu	Döndürme hızı (rpm)	pH	Alttaş		
<b>CD-2C-7</b>	2000	7	cam		
<b>CD-3C-7</b>	3000				
<b>CD-4C-7</b>	4000			4	
<b>CD-4C-4</b>				5	
<b>CD-4C-5</b>				10	
<b>CD-4C-10</b>				12	
<b>CD-4C-12</b>	4000			7	p-Si
<b>CD-2S-7</b>		2000			
<b>CD-3S-7</b>		3000			
<b>CD-4S-7</b>		4000	4		
<b>CD-4S-4</b>			5		
<b>CD-4S-5</b>			10		
<b>CD-4S-10</b>			12		
<b>CD-4S-12</b>					

### 3.5.4. TiO<sub>2</sub> filmlerinin elde edilmesi

TiO<sub>2</sub> filmleri farklı depolama sıcaklıklarında farklı alttaşlar (cam ve p-Si) üzerine sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilmiştir. Bu sayede depolama sıcaklığının TiO<sub>2</sub> filminin kristal yapısı üzerine etkisi araştırılmıştır. Başlangıç malzemesi olarak tetrabütülorotitanat (TBOTi) kullanılmıştır. Hazırlama aşamasında ilk olarak 1,1 ml TBOTi ve 5,2 ml etanol belirli bir süre manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Daha sonra 32,5 µl nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) ilave edilmiştir. Elde edilen çözelti 2 saat 60°C de karıştırılmıştır. Filmler için 400–1100°C depolama sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda cam alttaşın deformasyona uğraması nedeniyle 700–1100°C sıcaklık aralığında yapılan çalışmalarda yalnızca p-Si alttaşlar kullanılmıştır. TiO<sub>2</sub> filmlerinin elde edilme parametreleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** *TiO<sub>2</sub> filmlerinin elde edilme parametreleri*

Film Kodu	Depolama Sıcaklığı	Alttaş	Kat
T-400-C-5	400	cam	5
T-400-S-5		p-Si	5
T-450-C-5	450	cam	5
T-450-S-5		p-Si	5
T-500-C-5	500	cam	5
T-500-S-5		p-Si	5
T-550-C-5	550	cam	5
T-550-S-5		p-Si	5
T-600-C-5	600	cam	5
T-600-S-5		p-Si	5
T-700-S-15	700	p-Si	15
T-800-S-15	800	p-Si	15
T-900-S-15	900	p-Si	15
T-1000-S-15	1000	p-Si	15
T-1100-S-15	1100	p-Si	15

### 3.5.5. SnO<sub>2</sub> filmlerinin elde edilmesi

SnO<sub>2</sub> filmleri p-Si alttaşlar üzerine sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilmiştir. Başlangıç malzemesi olarak (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>)<sub>2</sub>Sn (SnAc) (Sigma Aldrich) kullanılmıştır. Çözücü ve sabitleyici olarak sırasıyla 2-Mehoxyethanol (Sigma Aldrich, ≥ %99,5) ve monoethanolamin (MEA) (Merck, ≥ %99) kullanılmıştır. SnAc:MEA oranı 1 olarak alınmış ve SnAc çözeltileri hazırlanmıştır. Her bir film için kurutma sıcaklığı 300°C ve depolama sıcaklığı 400°C olarak belirlenmiştir. Filmler için 500–900°C tavlama sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Kaplama işleminde döndürme hızı olarak 3000 rpm seçilmiştir. Spin kaplama cihazında döndürme hızı ayarlandıktan sonra yaklaşık 125 µl çözelti mikropipet yardımıyla alttaş üzerine damlatılmış ve 30 s döndürülmüştür. Bu işlem sonunda alttaşlar 300°C'deki fırında 10 dakika kurutulmuştur. Döndürme/kurutma işlemi 10 kez tekrarlanmıştır. Bu işlemler sonucunda 400°C'de 60 dakika tüp fırında depolanmıştır. Tavlama sıcaklığı olarak 500–900°C arası sıcaklıklar uygulanmıştır. Film kodları ve tavlama sıcaklıkları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** SnO<sub>2</sub> filmlerinin elde edilme parametreleri

Film Kodu	Kurutma sıcaklığı (°C)	Depolama sıcaklığı (°C)	Tavlama sıcaklığı (°C)
S-400 <sup>(1)</sup>	300	400	Tavlama yapılmadı.
S-500			500
S-600			600
S-700			700
S-800			800
S-900			900

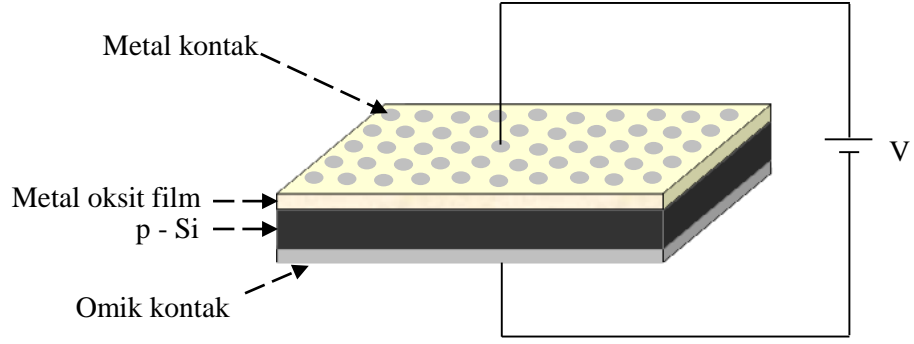
<sup>(1)</sup>Bu film 300°C kurutma ve 400°C depolama sıcaklığı dışında ilave bir tavlama sıcaklığına maruz bırakılmamıştır. S-400 filmi, diğer filmlerin tavlama sonrasında yapılarında meydana gelebilecek değişiklikleri gözlemleyebilmek için karşılaştırma amacıyla elde edilmiştir.

### 3.6. Elektriksel Ölçümler için Kontakların Oluşturulması

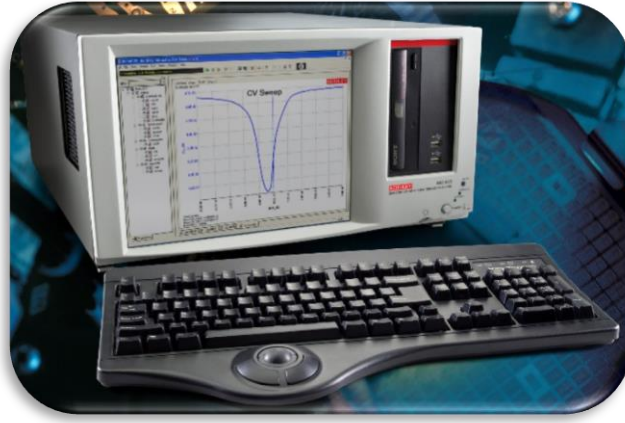
Elektriksel ölçümler için omik kotaklar VAKSİS PVD Handy-MT/101T model metal buharlaştırma sistemi (Görsel 3.2) ile yapılmıştır. Omik kontak için p-Si alttaşın mat tarafına gümüş pasta uygulanmış ya da alüminyum (Al) buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma için % 99,9 saflıkta Al kullanılmıştır. Al buharlaştırılmadan önce seyreltilmiş hidroklorik asit (HCl:H<sub>2</sub>O; 1:10) ile ultrasonik olarak temizlenmiştir. Buharlaştırma işlemi  $5 \times 10^{-5}$  torr basınçta yapılmıştır. Buharlaştırma işleminden sonra, 570°C'ye ayarlanan fırında 3 dakika tavlansmıştır. p-Si alttaşın üzerine sol jel spin kaplama yöntemi yardımıyla metal oksit (MO) filmi kaplandıktan sonra, film kaplı tarafına 1 mm çapında shadow-maske kullanılarak Al buharlaştırılmıştır. Böylece Al/n-MO/p-Si/Al yapısı oluşturulmuştur. Elde edilen heteroeklem diyotların şematik yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir. Elde edilen diyotların elektriksel karakterizasyonu yarıiletken karakterizasyon sistemi (KEITHLEY 4200 SCS-CV) (Görsel 3.3) ve yarıotomatik prop istasyonu (SIGNATONE) (Görsel 3.4) kullanılarak yapılmıştır.



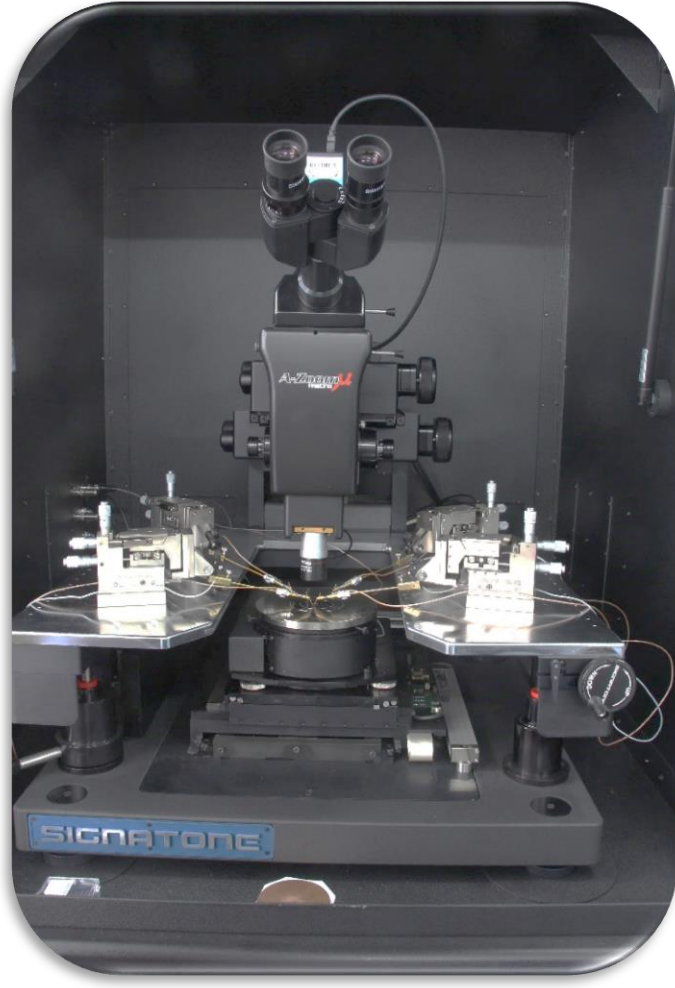
**Görsel 3.2.** VAKSİS PVD Handy-MT/101T model metal buharlaştırma sistemi



**Şekil 3.3.** Heteroeklem diyotların şematik diyagramları



**Görsel 3.3.** KEITHLEY 4200 SCS-CV yarıiletken karakterizasyon sistemi



**Görsel 3.4.** *SIGNATONE yarıotomatik prop istasyonu*

#### 4. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Elde edilen ZnO, CdO, SnO<sub>2</sub> ve TiO<sub>2</sub> filmlerinin yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonları ile fabrikasyonları yapılan bazı diyotların elektriksel karakterizasyonları ve sonuçları bu bölümde verilmiştir. Bu karakterizasyonlar dört farklı metal oksit film için ayrı ayrı incelenmiştir.

##### 4.1. ZnO

###### 4.1.1. ZnO filmlerinin kalınlıkları

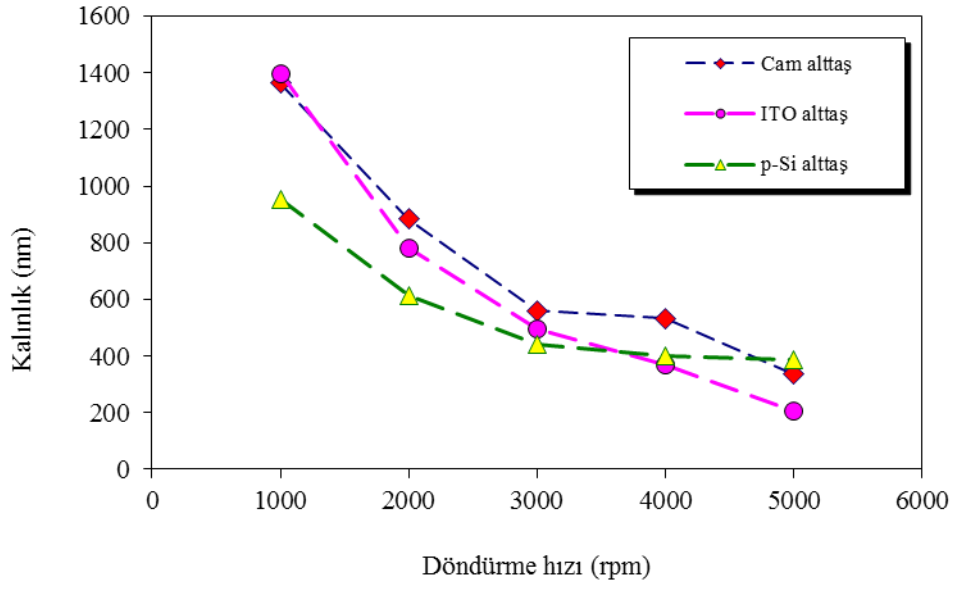
Farklı alttaşlar üzerinde elde edilen ZnO filmlerinin kalınlıkları tartım yöntemi ile bulunmuştur. Bu yöntem kullanılırken

$$t = \frac{\Delta m}{s\rho_f} \quad (4.1)$$

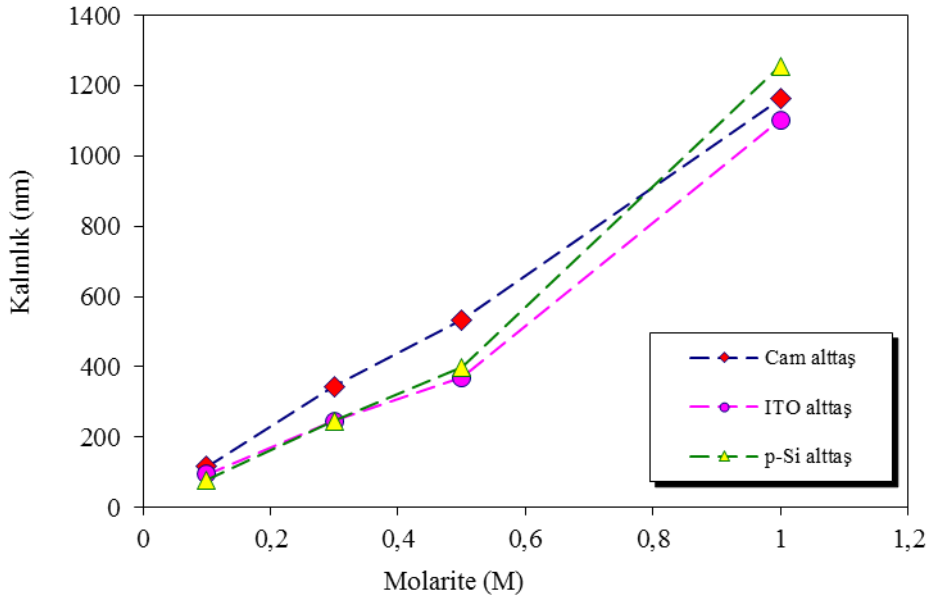
formülü kullanılmıştır. Burada  $\Delta m$  kütle farkını,  $\rho_f$  filmin yoğunluğunu,  $s$  alttaşın yüzey alanını göstermektedir. Film kalınlıkları hesaplanırken gerekli olan ZnO filminin yoğunluk değeri 5,67 g/cm<sup>3</sup> olarak alınmıştır.

Şekil 4.1’de farklı alttaşlar üzerine 0,5 M çözelti hazırlanarak 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin, döndürme hızı-kalınlık grafiği verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi döndürme hızının artışı ile birlikte alttaş üzerinde kalan çözelti miktarının azalmasına bağlı olarak film kalınlığı azalmıştır [114]. Şekil 4.2’de ise farklı alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin, molarite–kalınlık grafiği verilmiştir. Artan çözelti molaritesine bağlı olarak çözelti içerisindeki ZnAc miktarı artmıştır. Dolayısıyla, çözünen parçacıklar arasındaki elektrostatik etkileşme de artmıştır. Böylece çözünen maddelerin bir araya toplanma ihtimali artmış ve şekilden de görüldüğü gibi molarite artışına bağlı olarak film kalınlığının arttığı görülmüştür [114].

Farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen Z9-C, Z9-I, Z9-S, Z10-S ve Z11-S filmlerinin kalınlıkları ise sırasıyla 716, 441, 634, 536 ve 623 nm bulunmuştur.



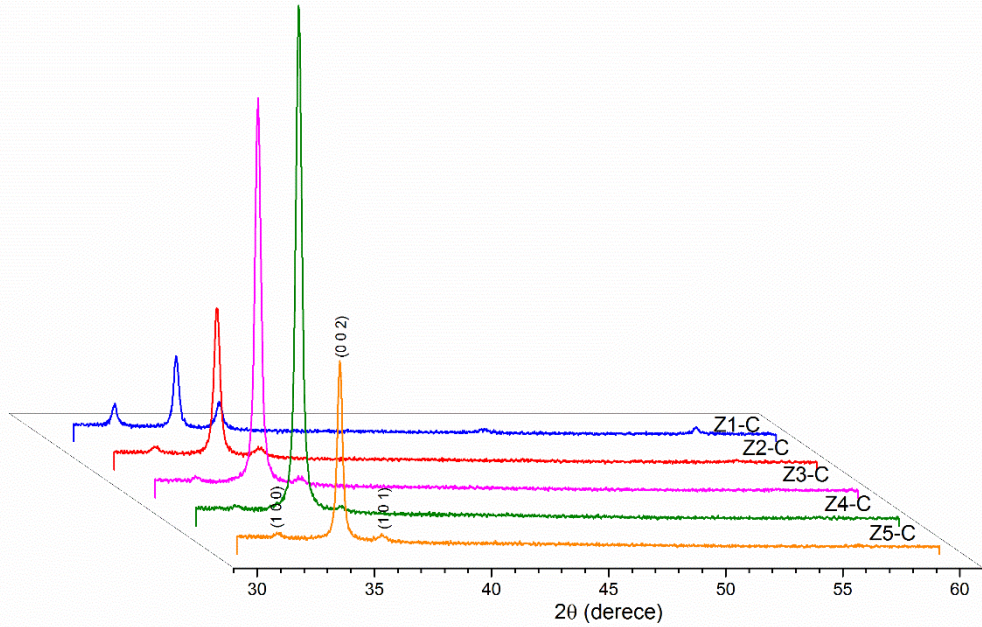
**Şekil 4.1.** Farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin döndürme hızı–kalınlık grafiği



**Şekil 4.2.** Farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin molarite–kalınlık grafiği

#### 4.1.2. ZnO filmlerinin yapısal özellikleri

Şekil 4.3'te 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C'de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Tüm filmler hekzagonal wurtzite polikristal yapıda kristallenmiştir (JCPDS kart no: 36–1451, ZnO). Filmlerin (100), (002) ve (101) yansıma düzlemlerine sahip olduğu görülmüştür. Şekil 4.3'ten görüldüğü gibi artan döndürme hızıyla kristallenme iyileşmiştir. XRD spektrumları incelendiğinde, 4000 rpm döndürme hızında elde edilen ZnO filminin (Z4-C) en şiddetli ve dar olan pike sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Z4-C filminin en iyi kristallenmeye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 5000 rpm' de ise kristal yapının tekrar bozulmaya başladığı görülmüştür. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de filmlere ait  $2\theta$ ,  $FWHM$ ,  $d$ ,  $TC$ , örgü sabitleri, ortalama kristal boyutu ve kusur yoğunluğu değerleri verilmiştir. Her filmin en yüksek  $TC$  değerinin (002) düzleminde olduğu görülmüştür. En yüksek  $TC$  değeri Z4-C filminde elde edilmiştir. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri nanometre mertebesinde olup, lineer bir değişim gözlenmemiştir.



**Şekil 4.3.** 0,5 molar ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C'de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları

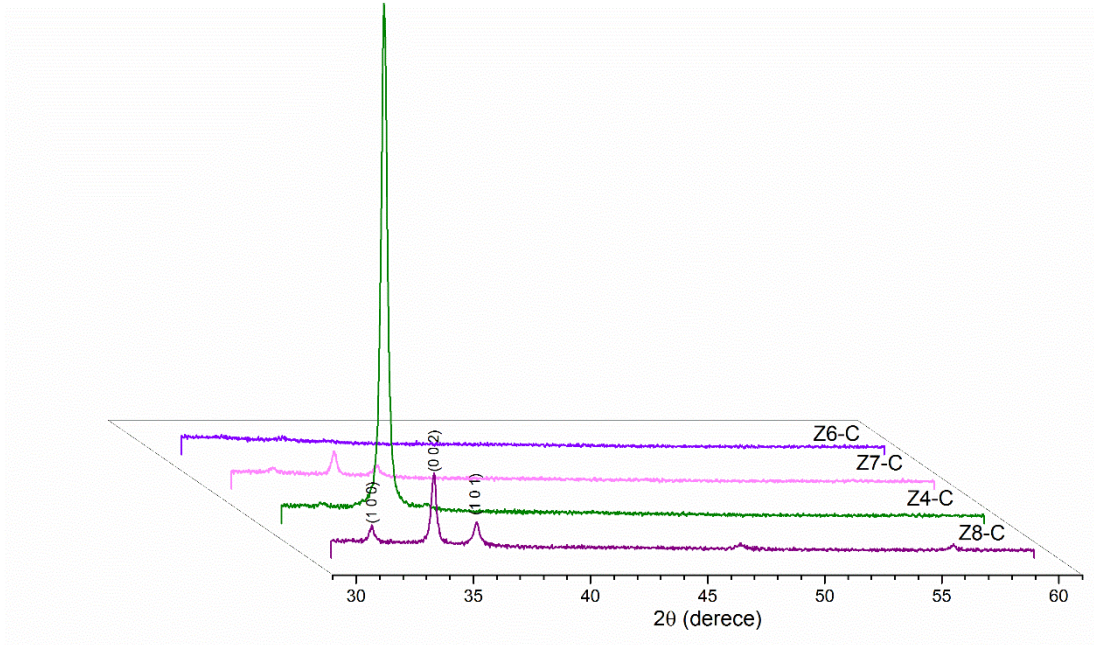
**Çizelge 4.1.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin (*hkl*),  $2\theta$ , FWHM, *d*, ve TC değerleri

Film kodu	( <i>hkl</i> )	$2\theta$ (derece)	FWHM (derece)	<i>d</i> (Å)	TC
<b>Z1-C</b> (1000 rpm)	100	31,757	0,229	2,82	0,66
	002	34,388	0,265	2,61	<b>1,59</b>
	101	36,229	0,303	2,48	0,74
<b>Z2-C</b> (2000 rpm)	100	31,737	0,325	2,82	0,34
	002	34,397	0,291	2,61	<b>2,37</b>
	101	36,208	0,333	2,48	0,29
<b>Z3-C</b> (3000 rpm)	100	-	-	2,80	0,14
	002	34,387	0,281	2,59	<b>2,72</b>
	101	-	-	2,47	0,13
<b>Z4-C</b> (4000 rpm)	100	-	-	2,82	0,11
	002	34,388	0,297	2,61	<b>2,79</b>
	101	-	-	2,48	0,11
<b>Z5-C</b> (5000 rpm)	100	-	-	2,81	0,25
	002	34,402	0,256	2,60	<b>2,49</b>
	101	-	-	2,48	0,26

**Çizelge 4.2** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri (*a* ve *c*), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri

Film kodu	<i>a</i> (Å)	<i>c</i> (Å)	D (ortalama kristal boyutu) (nm)	$\delta$ (kusur yoğunluğu) ( $1/nm^2$ ) $\times 10^{-4}$
<b>Z1-C</b> (1000 rpm)	3,25098	5,21164	33,94	9,30
<b>Z2-C</b> (2000 rpm)	3,25295	5,21024	29,86	11,21
<b>Z3-C</b> (3000 rpm)	3,23085	5,17780	30,92	10,46
<b>Z4-C</b> (4000 rpm)	3,25432	5,21166	29,26	11,68
<b>Z5-C</b> (5000 rpm)	3,24842	5,20960	33,94	8,68

Şekil 4.4'te farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm döndürme hızında 500°C'de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. XRD spektrumları incelendiğinde 0,1 M çözelti kullanılarak elde edilen Z6-C filminin kristallenmediği gözlenirken, diğer filmlerin hekzagonal wurtzite polikristal yapıda kristallendiği gözlenmiştir (JCPDS kart no: 36–1451, ZnO). Filmlerin (100), (002) ve (101) yansıma düzlemlerine sahip olduğu görülmüştür. Şekil 4.4'ten görüldüğü gibi 0,5 M çözelti kullanılarak elde edilen ZnO filminin (Z4-C) en şiddetli ve dar olan pike sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Z4-C filminin en iyi kristallenmeye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te filmlere ait  $2\theta$ ,  $FWHM$ ,  $d$ ,  $TC$ , örgü sabitleri, ortalama kristal boyutu ve kusur yoğunluğu değerleri verilmiştir. En yüksek  $TC$  değerinin (002) düzleminde olduğu görülmüştür. En iyi  $TC$  değeri Z4-C filminde elde edilmiştir. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri nanometre mertebesinde olup, lineer bir değişim gözlenmemiştir. En büyük ortalama kristal boyutunun 1 M çözelti kullanılarak elde edilen ZnO filmine (Z8-C) ait olduğu bulunmuştur.



**Şekil 4.4.** Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm döndürme hızında 500°C'de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları

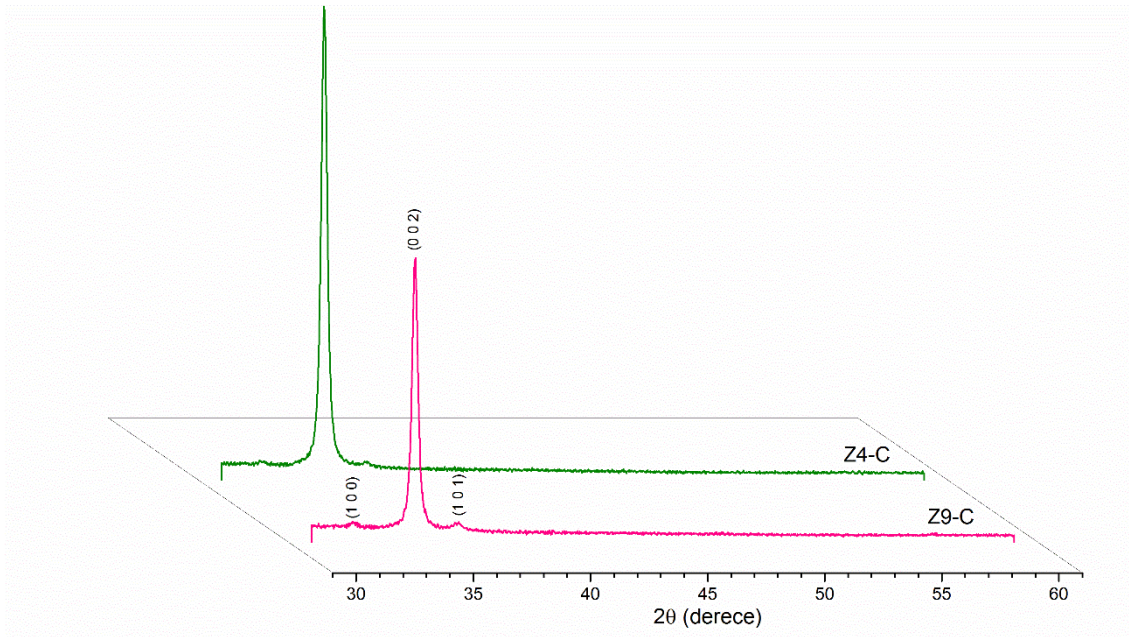
**Çizelge 4.3.** Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin (hkl), 2θ, FWHM, d, ve TC değerleri

Film kodu	(hkl)	2θ (derece)	FWHM (derece)	d (Å)	TC
<b>Z7-C</b> <b>(0,3 M)</b>	100	31,764	0,303	2,81	0,77
	002	34,391	0,252	2,61	<b>1,41</b>
	101	36,200	0,271	2,47	0,82
<b>Z4-C</b> <b>(0,5 M)</b>	100	-	-	2,82	0,11
	002	34,388	0,297	2,61	<b>2,79</b>
	101	-	-	2,48	0,11
<b>Z8-C</b> <b>(1 M)</b>	100	31,727	0,224	2,82	0,64
	002	34,377	0,242	2,61	<b>1,66</b>
	101	36,195	0,275	2,48	0,70

**Çizelge 4.4.** Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri (a ve c), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri

Film kodu	a (Å)	c (Å)	D (ortalama kristal boyutu) (nm)	δ (kusur yoğunluğu) (1/nm <sup>2</sup> )x10 <sup>-4</sup>
<b>Z7-C</b> <b>(0,3 M)</b>	3,25029	5,21120	34,48	8,41
<b>Z4-C</b> <b>(0,5 M)</b>	3,25432	5,21166	29,26	11,68
<b>Z8-C</b> <b>(1 M)</b>	3,25397	5,21320	35,90	7,76

Şekil 4.5'te 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. XRD spektrumları incelendiğinde her iki film de hekzagonal wurtzite polikristal yapıda kristallenmiştir (JCPDS kart no: 36–1451, ZnO). Filmlerin (100), (002) ve (101) yansıma düzlemlerine sahip olduğu görülmüştür. Şekil 4.5'ten görüldüğü gibi 500°C depolama sıcaklığında elde edilen ZnO (Z4-C) filminin en şiddetli ve dar olan pike sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Z4-C filminin en iyi kristallenmeye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da filmlere ait  $2\theta$ ,  $FWHM$ ,  $d$ ,  $TC$ , örgü sabitleri, ortalama kristal boyutu ve kusur yoğunluğu değerleri verilmiştir. En yüksek  $TC$  değerinin (002) düzleminde olduğu görülmüştür. En iyi  $TC$  değeri Z4-C filminde elde edilmiştir. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri nanometre mertebesinde olup, birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.5.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm'de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları

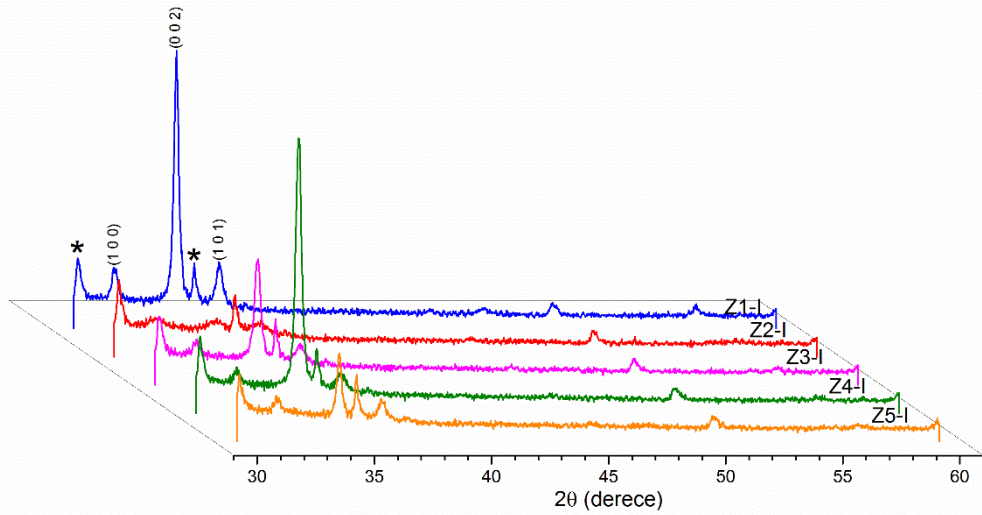
**Çizelge 4.5.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaşlar üzerine 4000 rpm 'de farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin (hkl), 2θ, FWHM, d, ve TC değerleri

Film kodu	(hkl)	2θ(derece)	FWHM (derece)	d (Å)	TC
<b>Z4-C</b> (500°C)	100	-	-	2,82	0,11
	002	34,388	0,297	2,61	<b>2,79</b>
	101	-	-	2,48	0,11
<b>Z9-C</b> (600°C)	100	31,761	0,271	2,82	0,18
	002	34,414	0,287	2,60	<b>2,65</b>
	101	36,245	0,306	2,48	0,17

**Çizelge 4.6.** 0,5 molar ZnO çözeltisi kullanılarak cam alttaş üzerine 4000 rpm de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri (a ve c), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri

Film kodu	a (Å)	c (Å)	D (ortalama kristal boyutu) (nm)	δ (kusur yoğunluğu) (1/nm <sup>2</sup> )x10 <sup>-4</sup>
<b>Z4-C</b> (500°C)	3,25432	5,21166	29,26	11,68
<b>Z9-C</b> (600°C)	3,25062	5,20788	30,28	10,91

Şekil 4.6’da 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Tüm filmler hekzagonal wurtzite polikristal yapıda kristallenmiştir (JCPDS kart no: 36–1451, ZnO). Filmlerin (100), (002) ve (101) yansıma düzlemlerine sahip olduğu görülmüştür. XRD spektrumları incelendiğinde alttaşa ait piklere rastlanmıştır. 4000 rpm döndürme hızında elde edilen ZnO filminin (Z4-I) en şiddetli ve genişliği dar olan pike sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Z4-I filminin en iyi kristallenmeye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de filmlere ait  $2\theta$ ,  $FWHM$ ,  $d$ ,  $TC$ , örgü sabitleri, ortalama kristal boyutu ve kusur yoğunluğu değerleri verilmiştir. Z2-I filmi hariç, en yüksek  $TC$  değerinin (002) düzleminde olduğu görülmüştür. En yüksek  $TC$  değeri Z4-I filminde elde edilmiştir. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerlerinin nanometre mertebesinde olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.6.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları (\* : ITO alttaş)

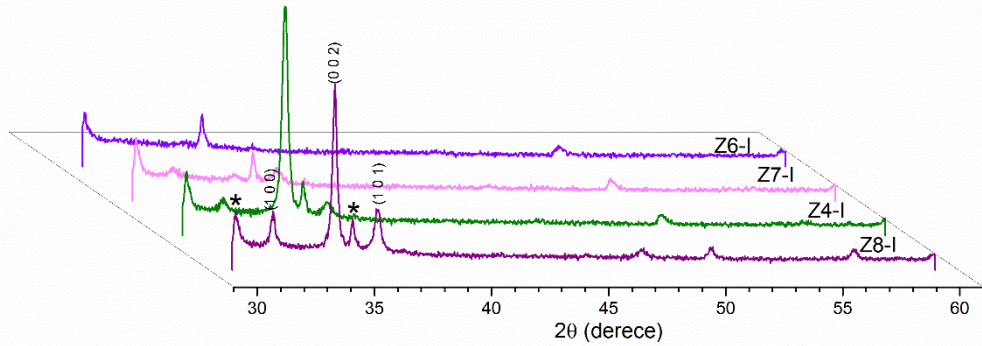
**Çizelge 4.7.** 0,5 molar ZnO çözeltisi kullanılarak ITO alttaş üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de edilen ZnO filmlerinin (hkl), 2θ, FWHM, d, ve TC değerleri

Film kodu	(hkl)	2θ(derece)	FWHM (derece)	d (Å)	TC
<b>Z1-I</b> (1000 rpm)	100	31,757	0,255	2,82	0,42
	002	34,398	0,231	2,61	<b>2,12</b>
	101	36,229	0,264	2,48	0,45
<b>Z2-I</b> (2000 rpm)	100	31,835	0,665	2,81	1,09
	002	34,400	0,687	2,60	0,97
	101	36,206	0,356	2,48	0,93
<b>Z3-I</b> (3000 rpm)	100	13,733	0,249	2,82	0,57
	002	34,366	0,280	2,61	<b>1,81</b>
	101	36,210	0,365	2,48	0,61
<b>Z4-I</b> (4000 rpm)	100	31,733	0,237	2,82	0,38
	002	34,386	0,277	2,61	<b>2,29</b>
	101	36,185	0,277	2,48	0,33
<b>Z5-I</b> (5000 rpm)	100	31,726	0,305	2,82	0,76
	002	34,339	0,237	2,61	<b>1,55</b>
	101	36,201	0,244	2,48	0,69

**Çizelge 4.8.** 0,5 molar ZnO çözeltisi kullanılarak ITO alttaş üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri (a ve c), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri

Film kodu	a (Å)	c (Å)	D (ortalama kristal boyutu) (nm)	δ (kusur yoğunluğu) (1/nm <sup>2</sup> )x10 <sup>-4</sup>
<b>Z1-I</b> (1000 rpm)	3,25102	5,21022	37,62	7,07
<b>Z2-I</b> (2000 rpm)	3,24320	5,20990	12,65	62,50
<b>Z3-I</b> (3000 rpm)	3,25336	5,21490	31,03	10,38
<b>Z4-I</b> (4000 rpm)	3,25341	5,21190	31,37	10,16
<b>Z5-I</b> (5000 rpm)	3,25405	5,21886	36,66	7,44

Şekil 4.7’de farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alattaşlar üzerine 4000 rpm döndürme hızında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. XRD spektrumları incelendiğinde, 0,1 M çözelti kullanılarak elde edilen Z6-I filmi ile 0,3 M çözelti kullanılarak elde edilen Z7-I filminin kristallenmelerinin çok iyi olmadığı görülmüştür. Filmler hekzagonal wurtzite polikristal yapıda kristallenmiştir (JCPDS kart no: 36–1451, ZnO). Filmlerin (100), (002) ve (101) yansıma düzlemlerine sahip olduğu görülmüştür. XRD spektrumları incelendiğinde alattaşa ait piklere rastlanmıştır. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi 0,5 M çözelti kullanılarak elde edilen ZnO filminin (Z4-I) en şiddetli ve dar olan pike sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Z4-I filminin en iyi kristallenmeye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10’da filmlere ait  $2\theta$ ,  $FWHM$ ,  $d$ ,  $TC$ , örgü sabitleri, ortalama kristal boyutu ve kusur yoğunluğu değerleri verilmiştir. En yüksek  $TC$  değerinin (002) düzleminde olduğu görülmüştür. En iyi  $TC$  değeri Z4-I filminde elde edilmiştir. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri nanometre mertebesinde olup, artan molarite ile birlikte artış göstermiştir. En büyük ortalama kristal boyutunun 1 M çözelti kullanılarak elde edilen ZnO filmine (Z8-I) ait olduğu bulunmuştur.



**Şekil 4.7.** Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alattaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları (\* : ITO alattaş)

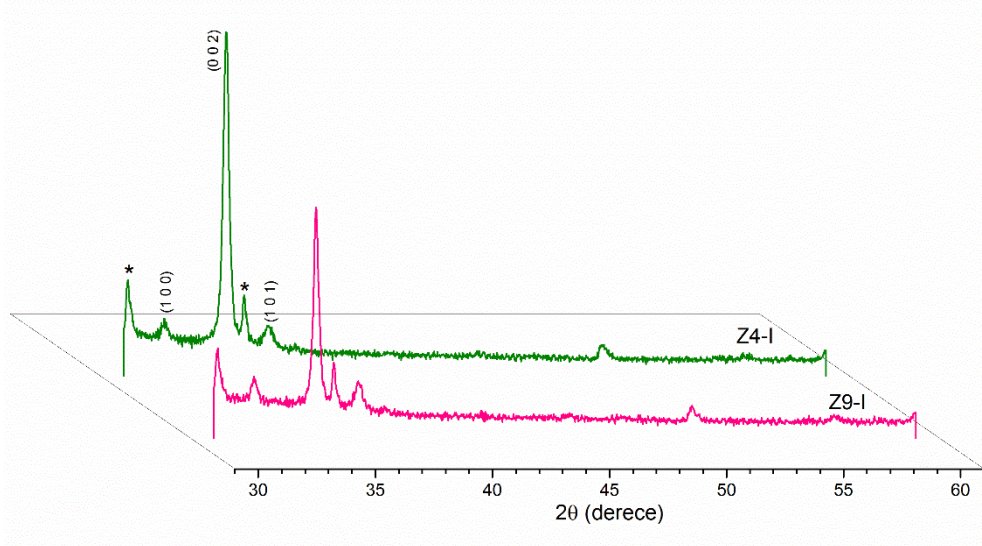
**Çizelge 4.9.** Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin (hkl), 2θ, FWHM, d, ve TC değerleri

Film kodu	(hkl)	2θ(derece)	FWHM (derece)	d (Å)	TC
<b>Z7-I</b> (0,3 M)	100	31,744	0,292	2,82	1,12
	002	34,363	0,386	2,61	0,86
	101	36,174	0,327	2,48	1,03
<b>Z4-I</b> (0,5 M)	100	31,733	0,237	2,82	0,38
	002	34,386	0,277	2,61	<b>2,29</b>
	101	36,185	0,277	2,48	0,33
<b>Z8-I</b> (1 M)	100	31,744	0,195	2,82	0,58
	002	34,389	0,209	2,61	<b>1,83</b>
	101	36,285	0,317	2,48	0,59

**Çizelge 4.10.** Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri (a ve c), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri

Film kodu	a (Å)	c (Å)	D (ortalama kristal boyutu) (nm)	δ (kusur yoğunluğu) (1/nm <sup>2</sup> )x10 <sup>-4</sup>
<b>Z7-I</b> (0,3 M)	3,25552	5,38002	22,51	19,74
<b>Z4-I</b> (0,5 M)	3,25341	5,21190	31,37	10,16
<b>Z8-I</b> (1 M)	3,25225	5,21142	41,58	5,79

Şekil 4.8’de 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine 4000 rpm’de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. XRD spektrumları incelendiğinde her iki film de hekzagonal wurtzite polikristal yapıda kristallenmiştir (JCPDS kart no: 36–1451, ZnO). Filmlerin (100), (002) ve (101) yansıma düzlemlerine sahip olduğu görülmüştür. XRD spektrumları incelendiğinde, alttaşa ait piklere rastlanmıştır. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi 500°C depolama sıcaklığında elde edilen ZnO (Z4-I) filminin en şiddetli ve dar olan pike sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Z4-I filminin en iyi kristallenmeye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’de filmlere ait  $2\theta$ ,  $FWHM$ ,  $d$ ,  $TC$ , örgü sabitleri, ortalama kristal boyutu ve kusur yoğunluğu değerleri verilmiştir. En yüksek  $TC$  değerinin (002) düzleminde olduğu görülmüştür. En iyi  $TC$  değeri Z4-I filminde elde edilmiştir. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri nanometre mertebesinde olup, depolama sıcaklığındaki artış ile birlikte artmıştır. Genel olarak kristal boyutu sıcaklıkla yakından ilişkilidir. Sıcaklık artışı ile birlikte, izotermal büyüme gerçekleşir. Bu büyüme mekanizmasının temelinde bir kristal sınırından diğerine atomların geçmesi olayı yatmaktadır [115].



**Şekil 4.8.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine 4000 rpm’de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları (\* : ITO alttaş)

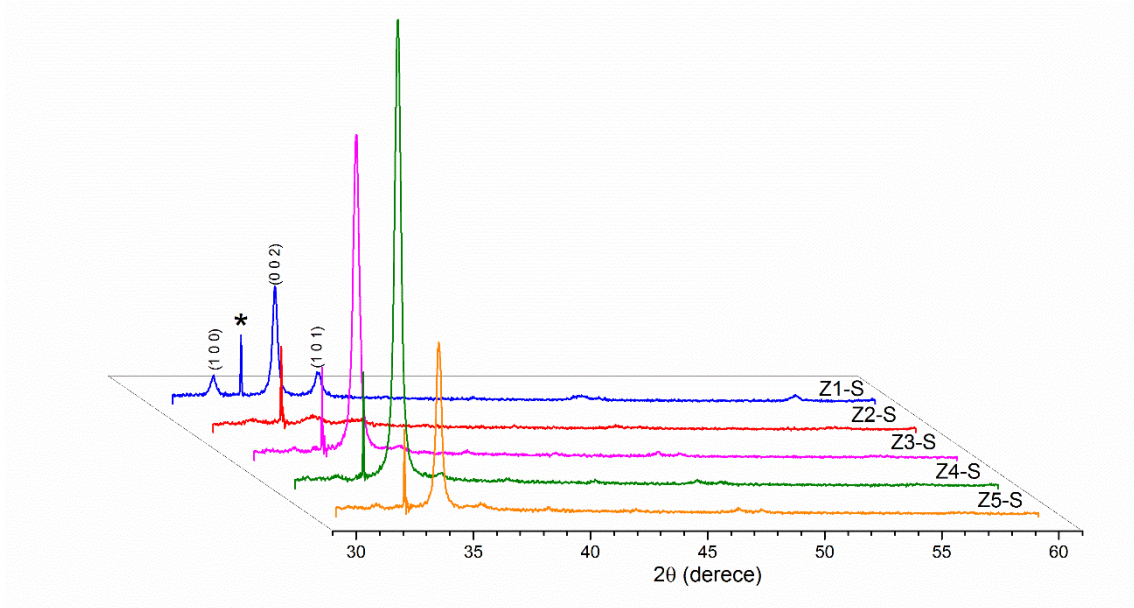
**Çizelge 4.11.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine 4000 rpm 'de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin (hkl), 2θ, FWHM, d, ve TC değerleri

Film kodu	(hkl)	2θ(derece)	FWHM (derece)	d (Å)	TC
<b>Z4-I</b> (500°C)	100	31,733	0,237	2,82	0,38
	002	34,386	0,277	2,61	<b>2,29</b>
	101	36,185	0,277	2,48	0,33
<b>Z9-I</b> (600°C)	100	31,709	0,288	2,82	0,52
	002	34,422	0,250	2,60	<b>1,97</b>
	101	36,225	0,371	2,48	0,51

**Çizelge 4.12.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaşlar üzerine 4000 rpm 'de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri (a ve c), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri

Film kodu	a (Å)	c (Å)	D (ortalama kristal boyutu) (nm)	δ (kusur yoğunluğu) (1/nm <sup>2</sup> )x10 <sup>-4</sup>
<b>Z4-I</b> (500°C)	3,25341	5,21190	31,37	10,16
<b>Z9-I</b> (600°C)	3,25577	5,20664	34,76	8,28

Şekil 4.9’da 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Tüm filmler hekzagonal wurtzite polikristal yapıda kristallenmiştir (JCPDS kart no: 36–1451, ZnO). Filmlerin (100), (002) ve (101) yansıma düzlemlerine sahip olduğu görülmüştür. XRD spektrumları incelendiğinde, alttaşa ait piklere rastlanmıştır. 4000 rpm döndürme hızında elde edilen ZnO filminin (Z4-S) en şiddetli ve dar olan pike sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Z4-S filminin en iyi kristallenmeye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’te filmlere ait  $2\theta$ ,  $FWHM$ ,  $d$ ,  $TC$ , örgü sabitleri, ortalama kristal boyutu ve kusur yoğunluğu değerleri verilmiştir. En yüksek  $TC$  değerinin (002) düzleminde olduğu görülmüştür. En yüksek  $TC$  değeri Z4-S filminde elde edilmiştir. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerlerinin nanometre mertebesinde olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.9.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları (\* : p-Si alttaş)

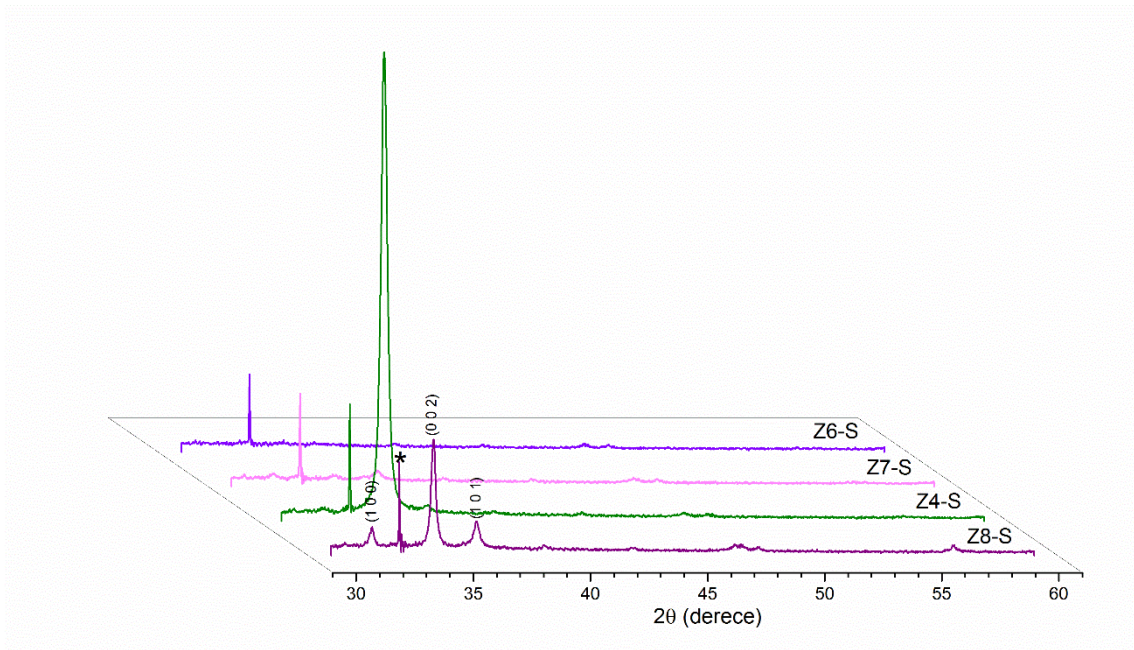
**Çizelge 4.13.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin (hkl), 2θ, FWHM, d, ve TC değerleri

Film kodu	(hkl)	2θ(derece)	FWHM (derece)	d (Å)	TC
<b>Z1-S</b> (1000 rpm)	100	31,727	0,264	2,82	0,47
	002	34,369	0,248	2,61	<b>2,00</b>
	101	36,206	0,303	2,48	0,52
<b>Z2-S</b> (2000 rpm)	100	31,671	0,549	2,82	0,89
	002	34,210	0,533	2,61	<b>1,17</b>
	101	36,177	0,644	2,48	0,94
<b>Z3-S</b> (3000 rpm)	100	31,721	0,231	2,82	0,11
	002	34,363	0,309	2,61	<b>2,76</b>
	101	36,200	0,202	2,48	0,12
<b>Z4-S</b> (4000 rpm)	100	31,772	0,125	2,81	0,08
	002	34,389	0,312	2,61	<b>2,82</b>
	101	36,237	0,263	2,48	0,10
<b>Z5-S</b> (5000 rpm)	100	31,724	0,254	2,82	0,20
	002	34,397	0,273	2,61	<b>2,61</b>
	101	36,221	0,112	2,48	0,19

**Çizelge 4.14.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine farklı döndürme hızlarında 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri (a ve c), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri

Film kodu	a (Å)	c (Å)	D (ortalama kristal boyutu) (nm)	δ (kusur yoğunluğu) (1/nm <sup>2</sup> )x10 <sup>-4</sup>
<b>Z1-S</b> (1000 rpm)	3,25396	5,21436	35,04	8,15
<b>Z2-S</b> (2000 rpm)	3,25957	5,22890	16,30	37,66
<b>Z3-S</b> (3000 rpm)	3,25463	5,21526	28,12	12,65
<b>Z4-S</b> (4000 rpm)	3,24948	5,21154	27,85	12,89
<b>Z5-S</b> (5000 rpm)	3,25429	5,21026	31,83	9,87

Şekil 4.10’da farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. XRD spektrumları incelendiğinde, 0,1 M çözelti kullanılarak elde edilen Z6-S kristallenmesinin çok iyi olmadığı görülmüştür. Filmler hekzagonal wurtzite polikristal yapıda kristallenmiştir (JCPDS kart no: 36–1451, ZnO). Filmlerin (100), (002) ve (101) yansıma düzlemlerine sahip olduğu görülmüştür. XRD spektrumları incelendiğinde alttaşa ait piklere rastlanmıştır. Şekil 4.10’da görüldüğü gibi 0,5 M çözelti kullanılarak elde edilen ZnO filminin (Z4-S) en şiddetli ve genişliği dar olan pike sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Z4-S filminin en iyi kristallenmeye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16’da filmlere ait  $2\theta$ ,  $FWHM$ ,  $d$ ,  $TC$ , örgü sabitleri, ortalama kristal boyutu ve kusur yoğunluğu değerleri verilmiştir. En yüksek  $TC$  değerinin (002) düzleminde olduğu görülmüştür. En iyi  $TC$  değeri Z4-S filminde elde edilmiştir. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri nanometre mertebesinde olup, en büyük ortalama kristal boyutunun Z8-S filmine ait olduğu bulunmuştur.



**Şekil 4.10.** Farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları (\* : p-Si alttaş)

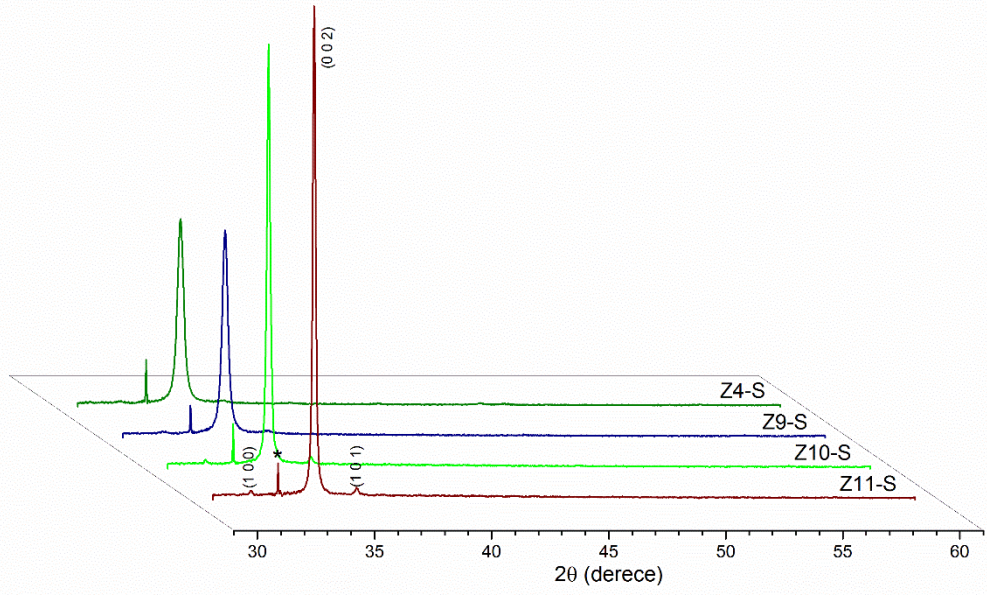
**Çizelge 4.15.** Farklı molaritelerde ZnO çözeltilisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin (hkl), 2θ, FWHM, d, ve TC değerleri

Film kodu	(hkl)	2θ(derece)	FWHM (derece)	d (Å)	TC
<b>Z6-S</b> (0,1 M)	100	31,760	0,441	2,82	0,28
	002	34,361	0,307	2,61	<b>2,19</b>
	101	36,183	0,399	2,48	0,53
<b>Z7-S</b> (0,3 M)	100	31,806	0,308	2,81	0,99
	002	34,359	0,274	2,61	0,80
	101	36,220	0,341	2,48	1,21
<b>Z4-S</b> (0,5 M)	100	31,772	0,125	2,81	0,08
	002	34,389	0,312	2,61	<b>2,82</b>
	101	36,237	0,263	2,48	0,10
<b>Z8-S</b> (1 M)	100	31,722	0,214	2,82	0,45
	002	34,353	0,225	2,61	<b>2,04</b>
	101	36,151	0,271	2,48	0,51

**Çizelge 4.16.** Farklı molaritelerde ZnO çözeltilisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine 4000 rpm, 500°C’de elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri (a ve c), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri

Film kodu	a (Å)	c (Å)	D (ortalama kristal boyutu) (nm)	δ (kusur yoğunluğu) (1/nm <sup>2</sup> )x10 <sup>-4</sup>
<b>Z6-S</b> (0,1 M)	3,25071	5,21556	28,30	12,48
<b>Z7-S</b> (0,3 M)	3,24479	5,20824	31,71	9,94
<b>Z4-S</b> (0,5 M)	3,24948	5,21154	27,85	12,89
<b>Z8-S</b> (1 M)	3,25448	5,21684	38,62	6,71

Şekil 4.11’de 0,5 molar ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine 4000 rpm de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Filmler hekzagonal wurtzite polikristal yapıda kristallenmiştir (JCPDS kart no: 36–1451, ZnO). Filmlerin (100), (002) ve (101) yansıma düzlemlerine sahip olduğu görülmüştür. Her filmde, en yüksek *TC* değerinin (002) düzleminde olduğu görülmüştür. XRD spektrumları incelendiğinde alttaşa ait piklere rastlanmıştır. Görüldüğü gibi depolama sıcaklığındaki artışla birlikte kristal yapıda iyileşme gözlenmiştir. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi 800°C depolama sıcaklığında elde edilen ZnO (Z11-S) filminin en şiddetli ve genişliği dar olan pike sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Z11-S filminin en iyi kristallenmeye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18’de filmlere ait  $2\theta$ , *FWHM*, *d*, *TC*, örgü sabitleri, ortalama kristal boyutu ve kusur yoğunluğu değerleri verilmiştir. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri nanometre mertebesinde olup, artan depolama sıcaklığı ile birlikte 27,9 nm den 62,5 nm’ye artış gözlenmiştir. Daha önce ITO alttaş üzerine elde edilen filmlerde de olduğu gibi, sıcaklık artışı ile birlikte, bir kristal sınırından diğerine atomların geçişi ile izotermal büyüme gerçekleşmiştir [115].



**Şekil 4.11.** 0,5 molar ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine 4000 rpm’de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumları (\* : p-Si alttaş)

**Çizelge 4.17.** Farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin (*hkl*),  $2\theta$ , *FWHM*, *d*, ve *TC* değerleri

Film kodu	( <i>hkl</i> )	$2\theta$ (derece)	<i>FWHM</i> (derece)	<i>d</i> (Å)	<i>TC</i>
<b>Z4-S</b> (500°C)	100	31.772	0,125	2.81423	0.08
	002	34.389	0,312	2.60577	<b>2.82</b>
	101	36.237	0,263	2.47700	0.10
<b>Z9-S</b> (600°C)	100	31.737	0,098	2.81720	0.06
	002	34.370	0,285	2.60715	<b>2.84</b>
	101	36.176	0,150	2.48100	0.09
<b>Z10-S</b> (700°C)	100	31.621	-	2.82721	0.06
	002	34.306	0,163	2.61187	<b>2.87</b>
	101	36.107	-	2.48558	0.07
<b>Z11-S</b> (800°C)	100	31.604	-	2.82873	0.05
	002	34.342	0,139	2.60918	<b>2.88</b>
	101	36.152	-	2.48259	0.07

**Çizelge 4.18.** Farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabitleri (*a* ve *c*), kristal boyutları ve kusur yoğunluğu değerleri

Depolama sıcaklığı	<i>a</i> (Å)	<i>c</i> (Å)	<i>D</i> (ortalama kristal boyutu) (nm)	$\delta$ (kusur yoğunluğu) ( $1/nm^2$ ) $\times 10^{-4}$
<b>Z4-S</b> (500°C)	3.24948	5.21154	27,85	12,89
<b>Z9-S</b> (600°C)	3.25388	5.21340	30,49	10,76
<b>Z10-S</b> (700°C)	3.26458	5.22374	53,30	3,52
<b>Z11-S</b> (800°C)	3.26634	5.21836	62,51	2,56

#### 4.1.3. ZnO filmlerinin morfolojik özellikleri

Elde edilen ZnO filmlerinin morfolojik karakterizasyonları FESEM kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 4.12’de farklı döndürme hızlarında cam alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Mikroskop görüntüleri, ortalama kristal boyutunun değişen döndürme hızına bağlı olarak, çok fazla değişim sergilemediğini ortaya koymuştur.

Şekil 4.13’te farklı molaritelerde hazırlanan çözeltiler kullanılarak cam alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Mikroskop görüntüleri ortalama kristal boyutunun artan molariteye bağlı olarak büyüme eğiliminde olduğunu ve en büyük kristal boyutunun 1 M ZnAc çözeltisi kullanılarak elde edilen ZnO filmine (Z8-C) ait olduğu görülmüştür [40]. Aynı zamanda, FESEM görüntülerinden yaklaşık olarak gözlenen ortalama kristal boyutu değerleri, XRD verileri yardımıyla hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri ile uyum içindedir. Her iki karakterizasyon sonucundan da gözlemlendiği gibi kristal boyutu ile çözelti molaritesi arasında yakın bir ilişki söz konusudur. Genel olarak, çözelti molaritesi arttıkça, çözeltilerde çözünen madde miktarı da (ZnAc) artacaktır. Bu nedenle çözünen parçacıklar arasındaki elektrostatik etkileşim de artacaktır. Böylece daha fazla çözünen madde bir araya toplanarak bir kristal oluşması ihtimalini artıracaktır. Özetle, molarite artışı ile kristal boyutu da artmaktadır.

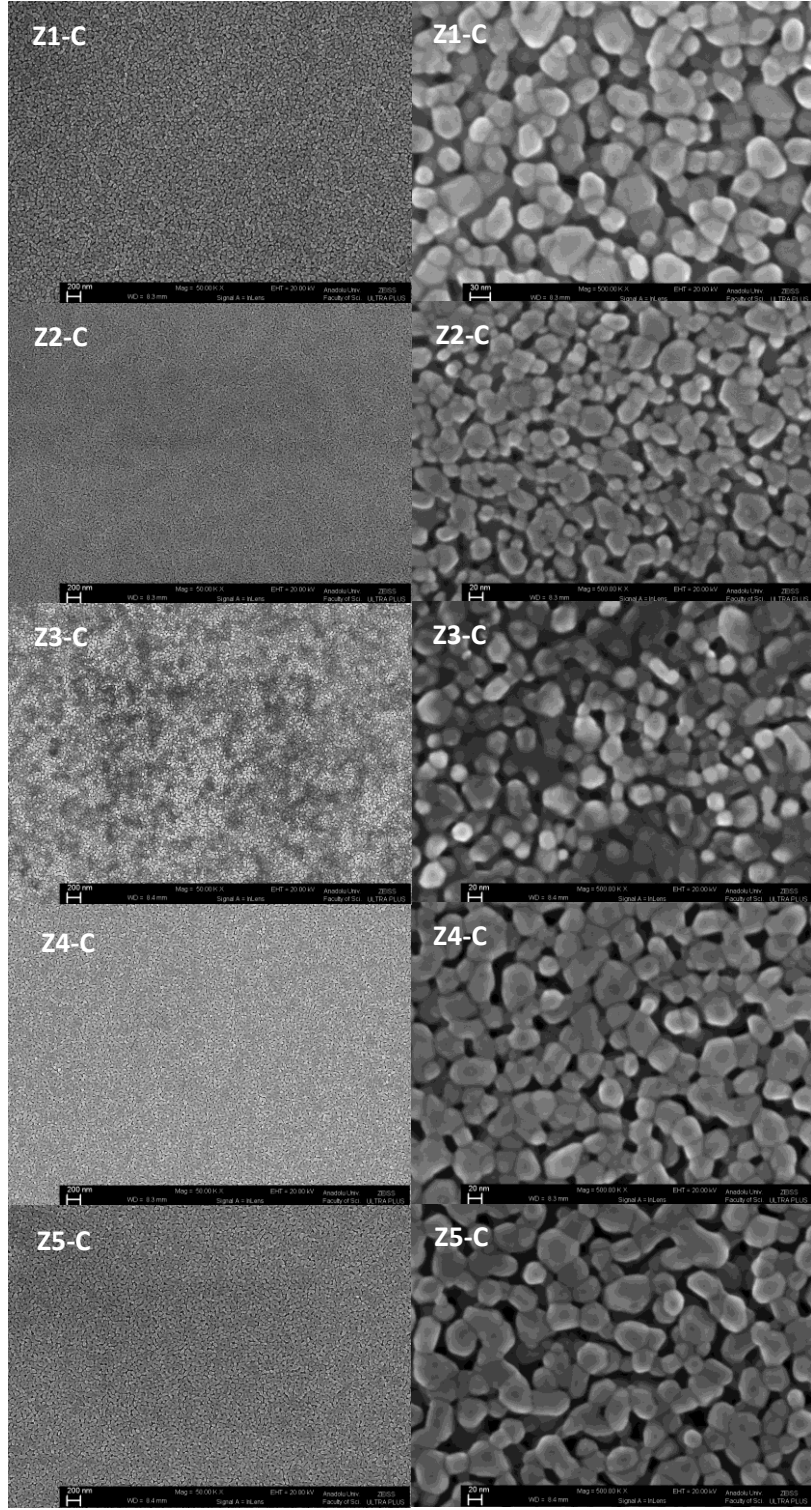
Şekil 4.14’te farklı döndürme hızlarında ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, kristal boyutlarında düzenli bir değişime rastlanmamıştır. En homojen kaplama Z5-I filminde elde edilmiştir.

Şekil 4.15’te farklı molaritelerde hazırlanan çözeltiler kullanılarak ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, kristal boyutlarında artan molariteye bağlı olarak artış gözlenmiştir. En büyük kristal boyutu Z8-I filminde görülmüş olup, sonuçlar XRD sonuçları (Çizelge 4.10) ile uyum içinde çıkmıştır.

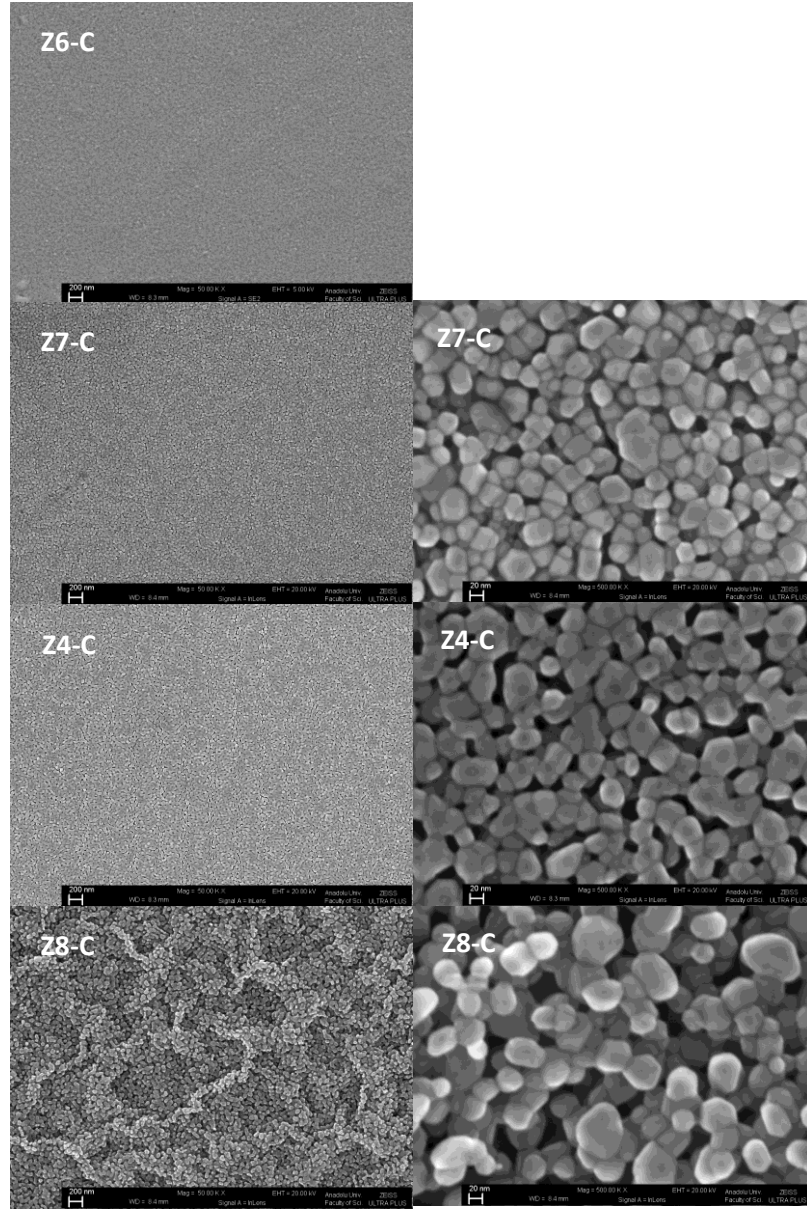
Şekil 4.16’da farklı dönme hızlarında p-Si alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, kristal boyutlarında düzenli bir değişime rastlanmamıştır. En küçük kristal boyutunun Z2-S filminde, en büyük kristal boyutunun ise Z1-S filminde olduğu görülmüştür. Sonuçlar, XRD sonuçları (Çizelge 4.14) ile uyum içinde çıkmıştır.

Şekil 4.17’de farklı molaritelerde hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, kristal boyutlarında artan molariteye bağlı olarak büyüme gözlenmiştir. En büyük kristal boyutu Z8-S filminde görülmüş olup, sonuçlar XRD sonuçları ile uyum içinde çıkmıştır (Çizelge 4.16).

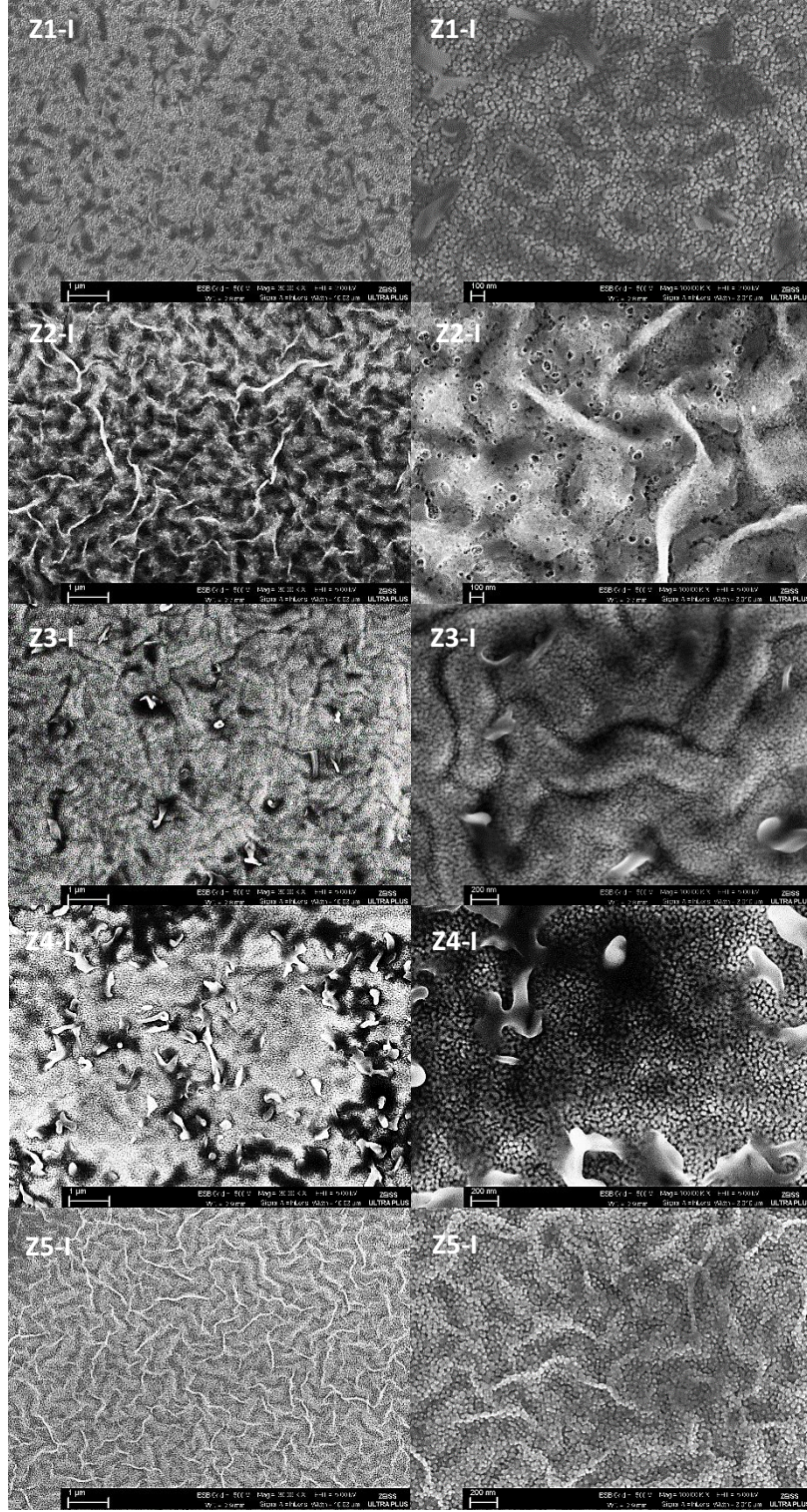
Elde edilen tüm filmler düşünüldüğünde, aynı parametrelerde cam, ITO ve p-Si alttaşlar üzerine elde edilen filmler karşılaştırıldığında, p-Si alttaş üzerine elde edilen filmlerin diğerlerine nazaran daha homojen kaplamaya sahip oldukları görülmüştür. Bu durum, alttaşın filmin kalitesi üzerine etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca ITO üzerine kaplanmış filmlerde network (ağ) yapısı belirgin bir şekilde gözlenmiştir.



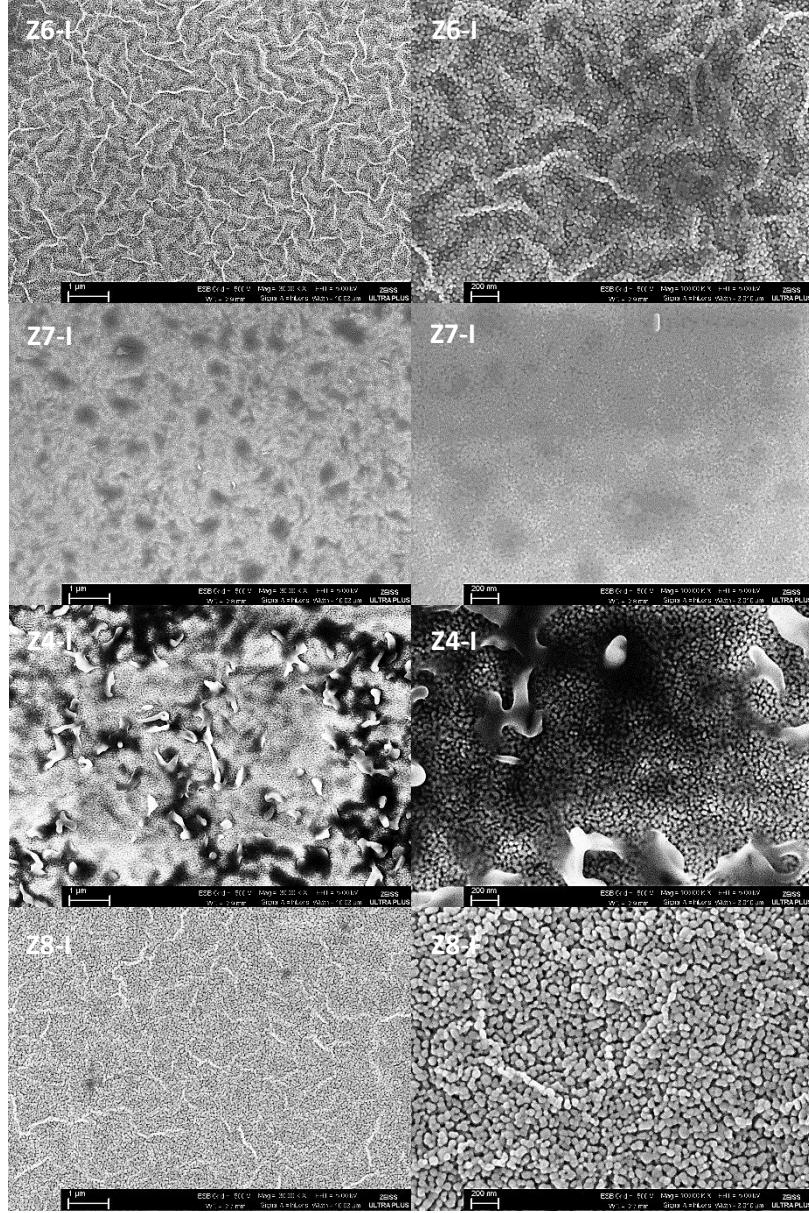
**Şekil 4.12.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında cam alttaş üzerine elde edilen filmlerin 50.000 ve 500.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri



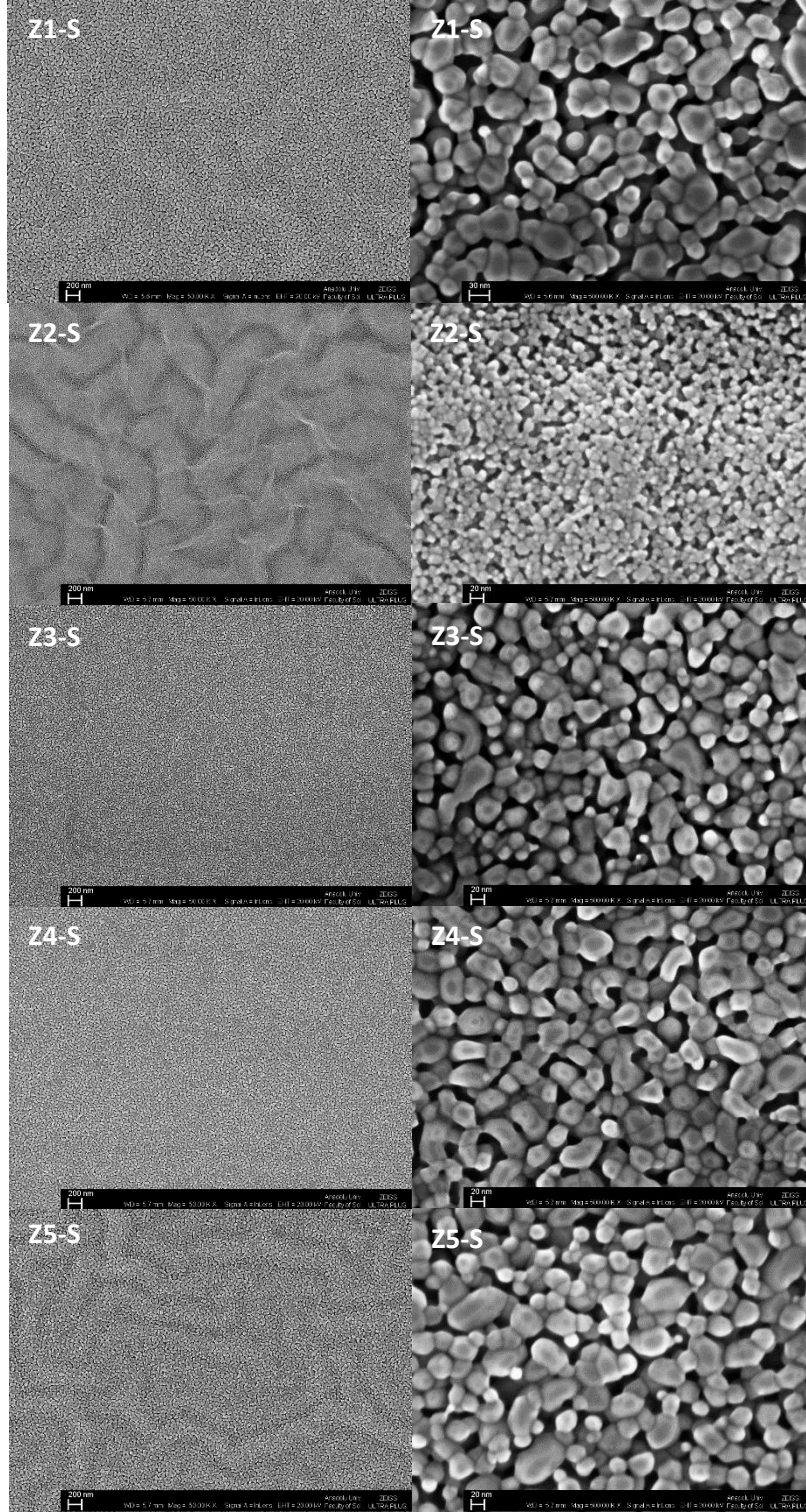
**Şekil 4.13.** Farklı molaritelerde hazırlanmış ZnAc çözeltisi kullanılarak cam alttaş üzerine 4000 rpm de elde edilen ZnO filmlerinin 50.000 ve 500.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri



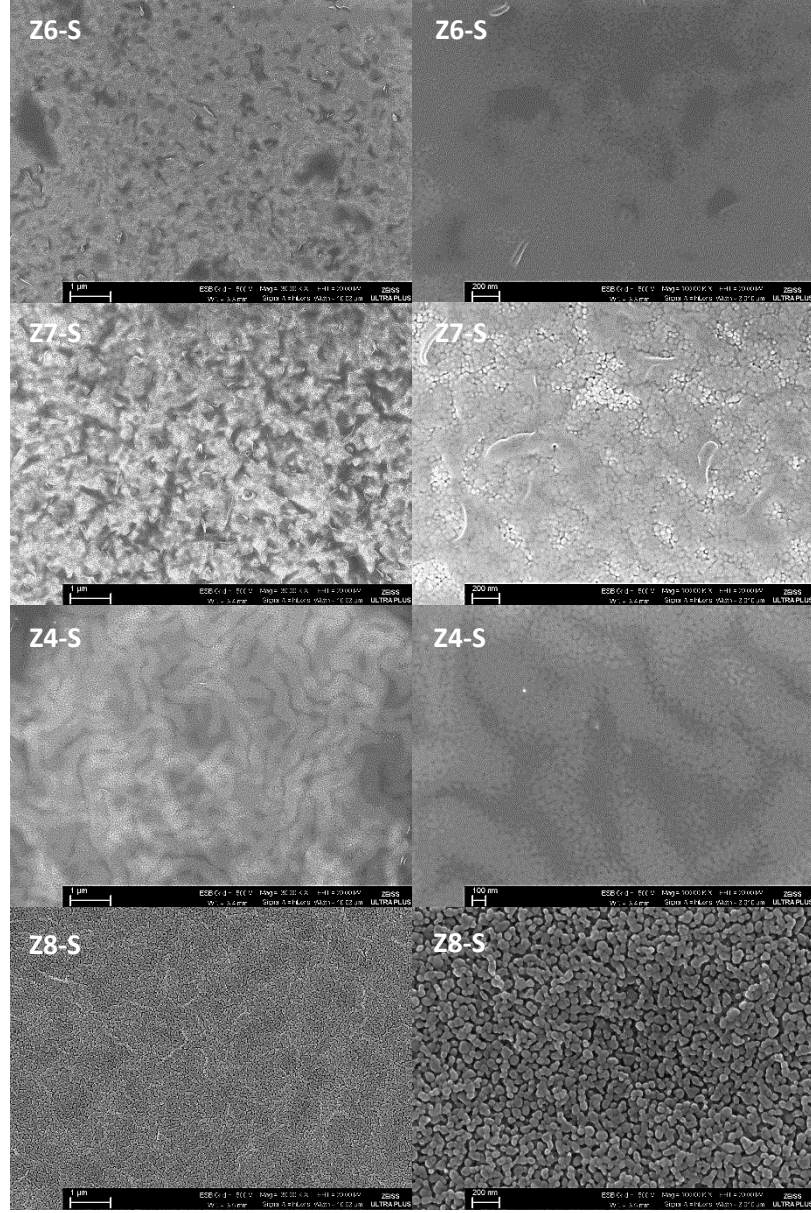
**Şekil 4.14.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında ITO alttaş üzerine elde edilen filmlerin 30.000 ve 100.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri



**Şekil 4.15.** Farklı molaritelerde hazırlanmış ZnAc çözeltisi kullanılarak ITO alttaş üzerine 4000 rpm de elde edilen ZnO filmlerinin 30.000 ve 100.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri

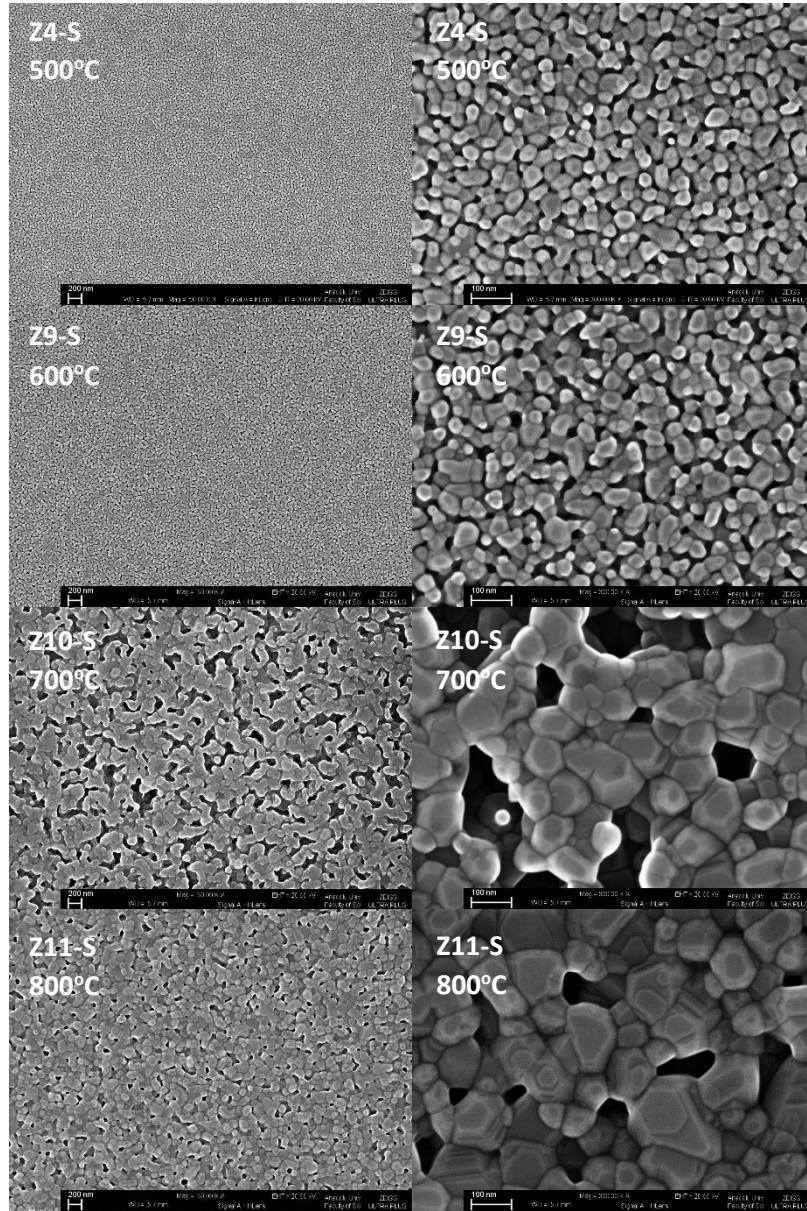


**Şekil 4.16.** 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında p-Si alttaş üzerine elde edilen filmlerin 50.000 ve 500.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri



**Şekil 4.17.** Farklı molaritelerde hazırlanmış ZnAc çözeltisi kullanılarak p-Si alttaş üzerine 4000 rpm'de elde edilen ZnO filmlerinin 30.000 ve 100.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri

Şekil 4.18’de verilmiş olan FESEM görüntülerinden de anlaşıldığı gibi ölçülen ortalama kristal boyutu değerleri ile XRD verilerinden hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri (Çizelge 4.18) uyum içindedir. Ayrıca, artan depolama sıcaklığı ile birlikte, hekzagonal yapıya sahip taneciklerin sayısında artış gözlenmiştir. 500°C ve 600°C’de elde edilen filmlerde hemen hemen hiç oyuk (void) oluşmamış, diğerlerine göre daha homojen yapı sergilemişlerdir. Sıcaklık artışı ile birlikte, izotermal büyüme gerçekleşmiş ve kristal boyutları artmıştır.



**Şekil 4.18.** Farklı depolama sıcaklıklarında p-Si alttaş üzerine elde edilen ZnO filmlerinin 30.000 ve 300.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri

#### 4.1.4. ZnO filmlerinin optik özellikleri

Farklı depolama ve çözelti parametrelerinde elde edilen ZnO filmlerinin transmittans ve absorpsiyon spektrumlarından yararlanılarak filmlerin görünür bölgedeki ortalama % $T$  ve  $E_g$  değerleri belirlenmiştir. Filmlerin  $E_g$  değerlerinin belirlenmesinde optik absorpsiyon metodu kullanılmıştır.

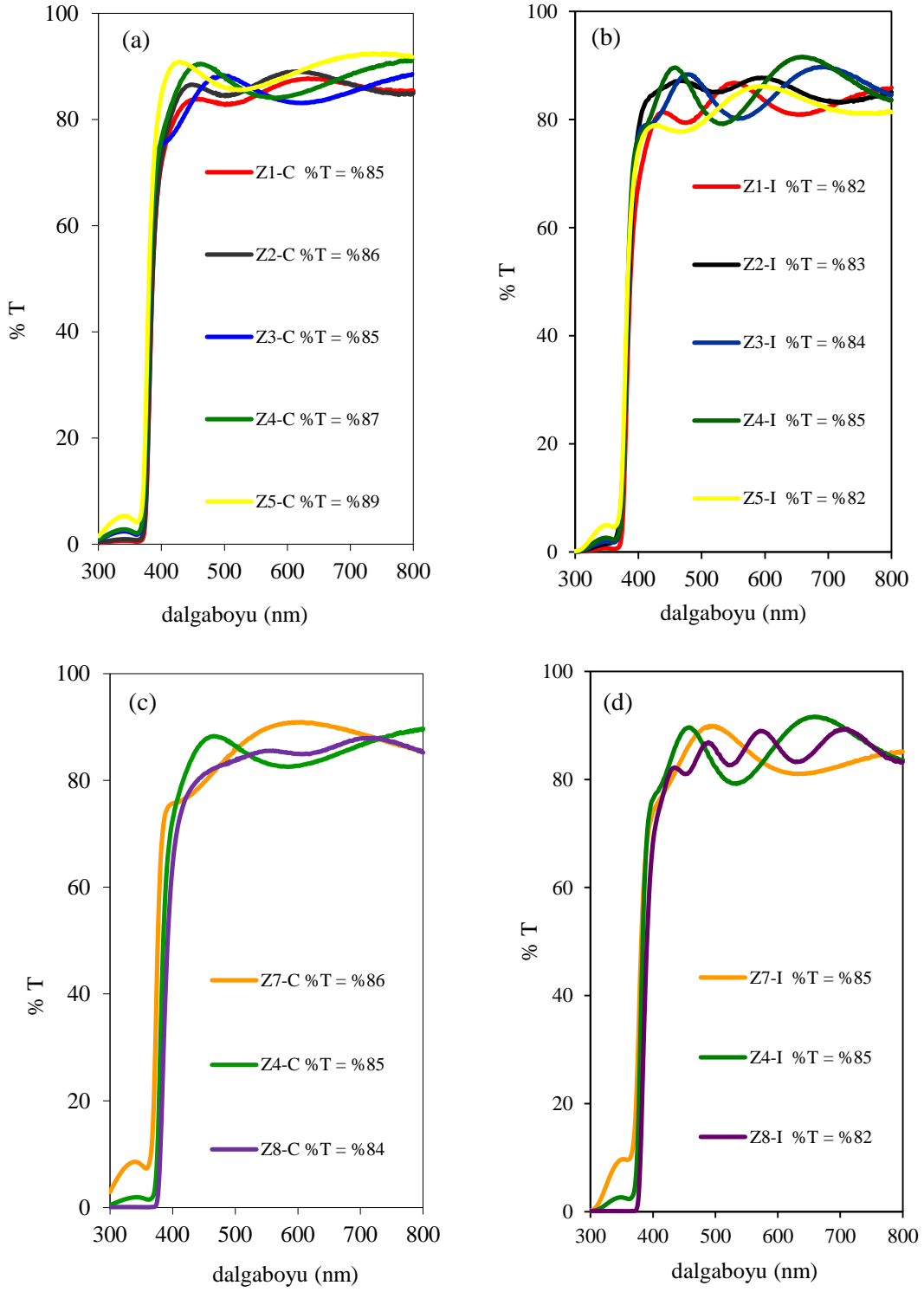
Şekil 4.19'da farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında cam ve ITO alttaş üzerine elde edilen ZnO filmlerinin % $T$  spektrumları verilmiştir.

Şekil 4.19 (a-b)'de 0,5 M ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında sırasıyla cam ve ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin % $T$  spektrumları verilmiştir. Spektrumlar incelendiğinde, artan döndürme hızına bağlı olarak görünür bölgedeki ortalama % $T$  değerlerinin artış eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Artan döndürme hızı ile ortalama % $T$  değerlerinde artış gözlenmesi, film kalınlığındaki azalmadan kaynaklanmıştır.

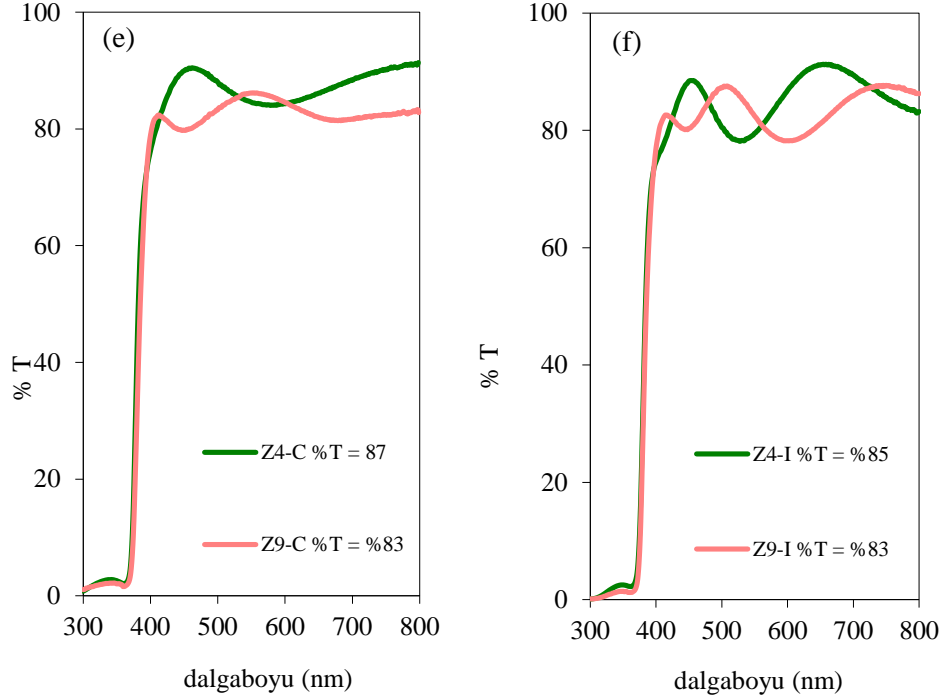
Şekil 4.19 (c-d)'de 4000 rpm'de farklı molarite değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak sırasıyla cam ve ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin % $T$  spektrumları verilmiştir. Spektrumlar incelendiğinde, molaritenin artışına bağlı olarak filmler için görünür bölgedeki ortalama % $T$  değerlerinde azalma gözlenmiştir. Artan molarite değeri ile ortalama % $T$  değerlerinde azalma gözlenmesi, film kalınlığının artmasından kaynaklanmıştır.

Şekil 4.19 (e-f)'de farklı depolama sıcaklıklarında sırasıyla cam ve ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin % $T$  spektrumları verilmiştir. Depolama sıcaklığındaki artışla birlikte görünür bölgedeki % $T$  değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Ortalama % $T$  değerlerinde azalma gözlenmesi, film kalınlığının artmasından kaynaklanmıştır.

Tüm bu sonuçlar, transmittans değerinin film kalınlığı ile doğrudan ilişkili olmasından ileri gelmiştir [40].



**Şekil 4.19 (a-d).** ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin %T spektrumları



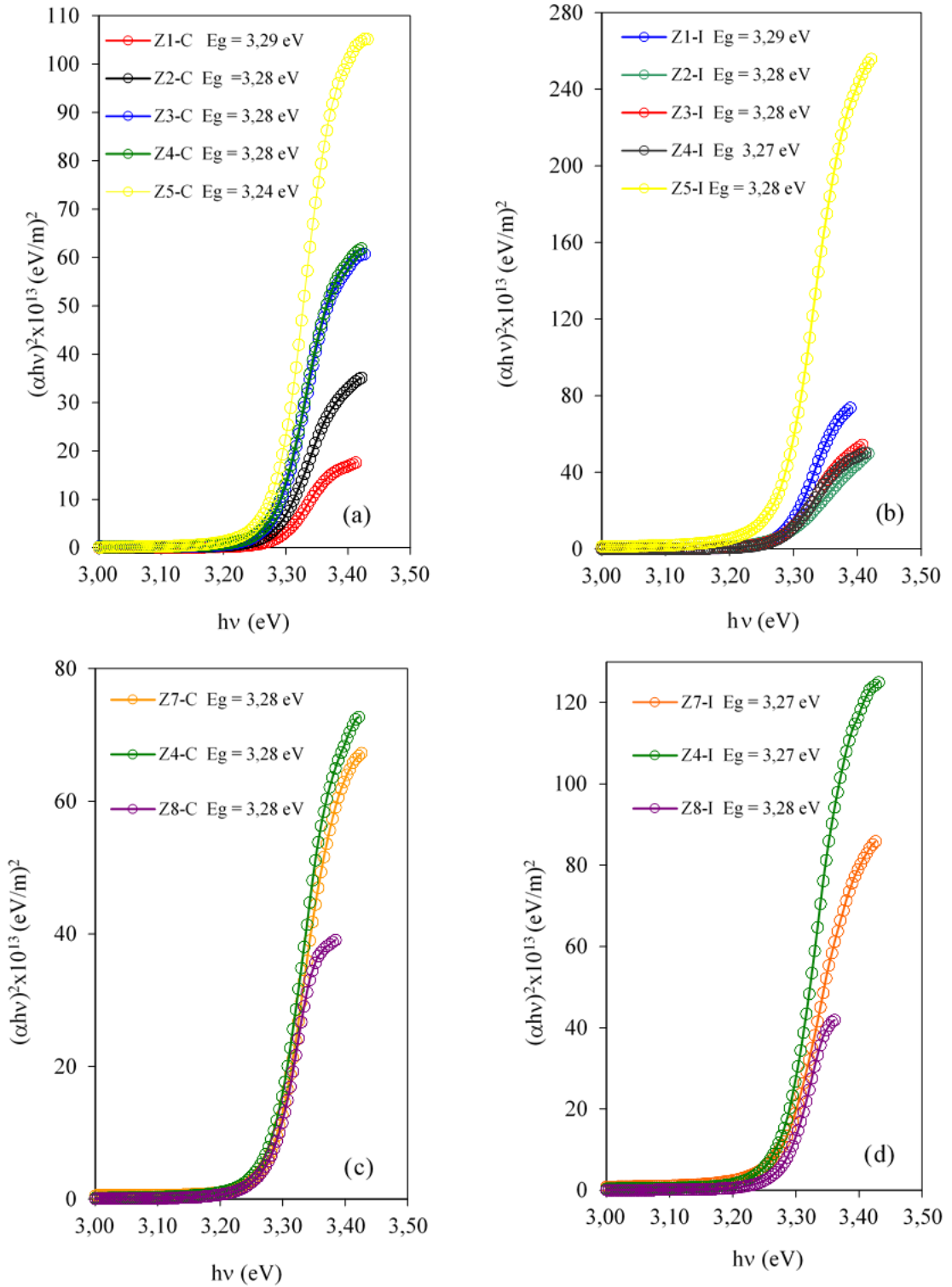
**Şekil 4.19 (e-f) (Devam).** *ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin %T spektrumları*

Şekil 4.20’de farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında cam ve ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin  $h\nu - (\alpha h\nu)^2$  grafikleri verilmiştir.

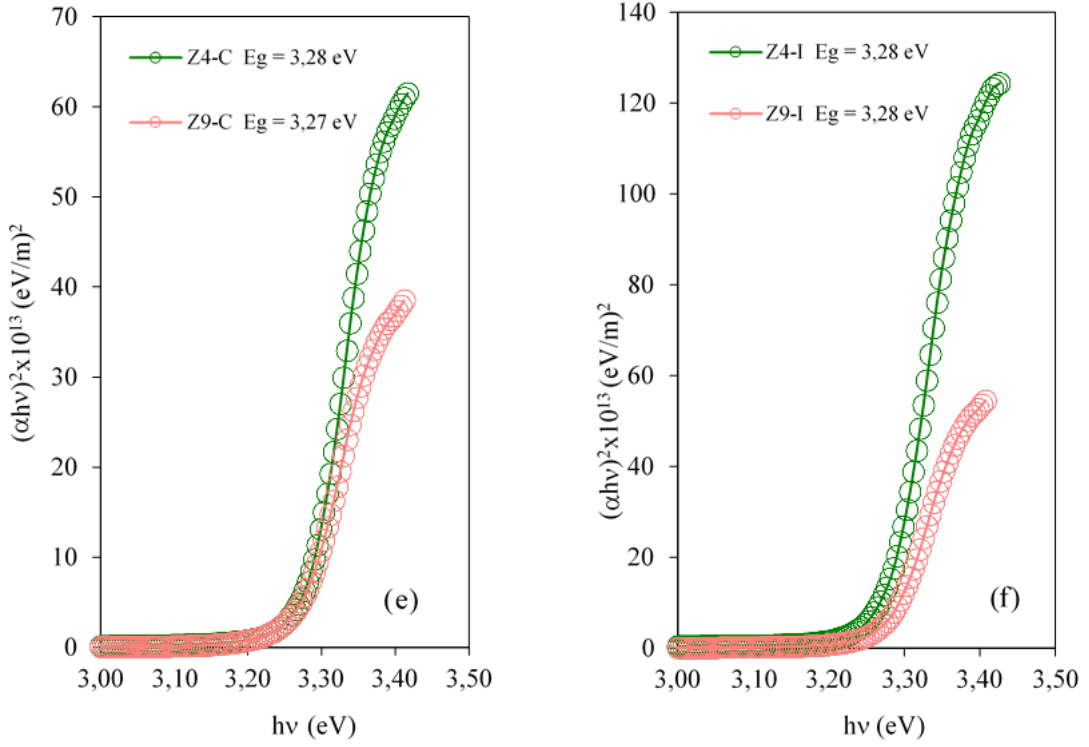
Şekil 4.20 (a-b)’de farklı döndürme hızlarında sırasıyla cam ve ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin  $h\nu - (\alpha h\nu)^2$  grafikleri verilmiştir. Filmlerin  $E_g$  değerlerinin artan döndürme hızıyla azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Filmlerin  $E_g$  değerindeki bu azalmanın kuantum boyut etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir [116].

Şekil 4.20 (c-d)’de farklı molarite değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak sırasıyla cam ve ITO alttaşlar üzerine 4000 rpm’de elde edilen filmlerinin  $h\nu - (\alpha h\nu)^2$  grafikleri verilmiştir. Yapılan çalışma, çözeltinin molarite değerindeki değişimin filmlerin  $E_g$  değerini çok fazla değiştirmedini göstermiştir.

Şekil 4.20 (e-f)’de farklı depolama sıcaklıklarında sırasıyla cam ve ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin  $h\nu - (\alpha h\nu)^2$  grafikleri verilmiştir. Depolama sıcaklığına bağlı olarak filmlerin  $E_g$  değerlerinde çok fazla değişim gözlenmemiştir.



**Şekil 4.20 (a-d).** *ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin  $h\nu - (\alpha h\nu)^2$  grafikleri*



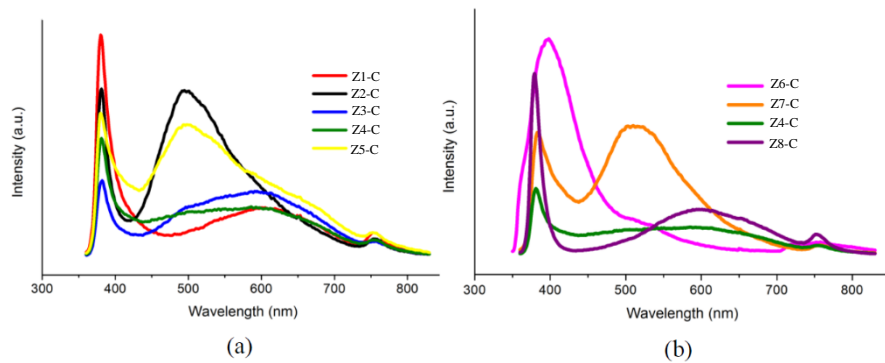
**Şekil 4.20 (e-f) (Devam).** *ZnAc çözeltisi kullanılarak farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin  $h\nu - (\alpha h\nu)^2$  grafikleri*

Döndürme hızının ve molaritenin filmlerin kalitesi üzerine etkisini araştırmak için ve filmlerin kusur durumları hakkında bilgi sahibi olabilmek için PL ölçümleri alınmıştır.

Şekil 4.21 (a)'da farklı döndürme hızlarında cam alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin 350–850 nm dalgaboyu aralığındaki PL spektrumları verilmiştir. Spektrumlar esas olarak iki bölgeye ayrılabilir. İlk bölge UV bölgedeki sıg seviyelerle ilgili eksitonik emisyonla ilgili olan kısım, ikinci bölge görünür bölgedeki derin seviye kusur emisyonlarıyla ilgili olan kısımdır. Spektrumlar, yaklaşık 380 nm'de bir emisyon bandına sahiptir. Bu emisyon, ZnO'nun yakın band aralığı (NBE = near band gap) emisyonuna karşılık gelen eksitonların rekombinasyonundan kaynaklanmaktadır [117]. NBE bandının şiddeti döndürme hızına bağlı olarak değişim göstermiş ve bu değişim lineer olmamıştır. Spektrumlar, Z2-C ve Z5-C için şiddetli ve geniş yeşil emisyonu (~496 nm) gösterirken, diğer filmler için zayıf ve geniş sarı emisyonu (~600 nm) göstermiştir. Yeşil emisyon sıkça gözlemlenmiş ve genel olarak oksijen boşlukları, çinko arageçişler ve katkı atomları

gibi kusurlardan kaynaklanmaktadır [117]. Z2-C ve Z5-C filmleri için yeşil emisyon pikleri NBE kadar şiddetli olduğu gözlenmiştir. Bu durum filmlerin çok fazla kusura sahip olduğuna işaret etmektedir. Sarı emisyon muhtemelen anti-site kusurların oluşmasından kaynaklanmıştır [117]. Ek olarak, ~750 nm’de zayıf kırmızı emisyon bandı gözlenmiştir. Kırmızı emisyon pikinin şiddetinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. ~730 nm’de zayıf kırmızı emisyon piki, oksijen ve çinko anti-sitelerin varlığından kaynaklanmıştır [118].

Şekil 4.21 (b)’de farklı molaritelerde hazırlanan ZnAc çözeltileri kullanılarak, cam alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin 350–850 nm dalgaboyu aralığındaki PL spektrumları verilmiştir. Spektrumlar incelendiğinde, çözelti molaritesinin film kalitesi üzerine önemli etkisi olduğu görülmüştür. Eksiton bandının maksimum pik pozisyonunun artan molaritenin etkisiyle düşük dalgaboyuna doğru (397 nm’den 379 nm’ye) kaydığı görülmüştür. Aynı zamanda, Z8-C filmi hariç, pik şiddeti artan molariteye bağlı olarak azalmıştır. Z6-C filminin ~379 nm’de geniş ve şiddetli emisyon bandına sahip olduğu görülmüştür. ~379 nm (3,13 eV)’deki emisyon piki tanımlanamamıştır. Muhtemelen yapısal kusurlar veya kirliliklerle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Çünkü XRD sonuçlarından da görüldüğü gibi, ZnO yapısı bu filmde tam olarak oluşturulamamıştır. PL spektrumları eksitonik rekombinasyonun neden olduğu band kenar emisyonu nedeniyle 379–383 nm yakınlarında bir emisyon bandı sergilemiştir. PL spektrumları Z7-C filmi için 512 nm civarında, Z6-C filmi için 515 nm civarında şiddetli ve geniş yeşil emisyon piki göstermiştir. Z4-C filmi boşluktaki kusur seviyelerine bağlı olarak 450–700 nm’de çok geniş ve zayıf bir banda sahiptir. Z8-C filminin yaklaşık 600 nm’de sarı emisyon bandına sahip olduğu görülmüştür. Z6-C filmi hariç, diğer filmlerde 750 nm’de zayıf kırmızı emisyon bandı da gözlenmiştir.



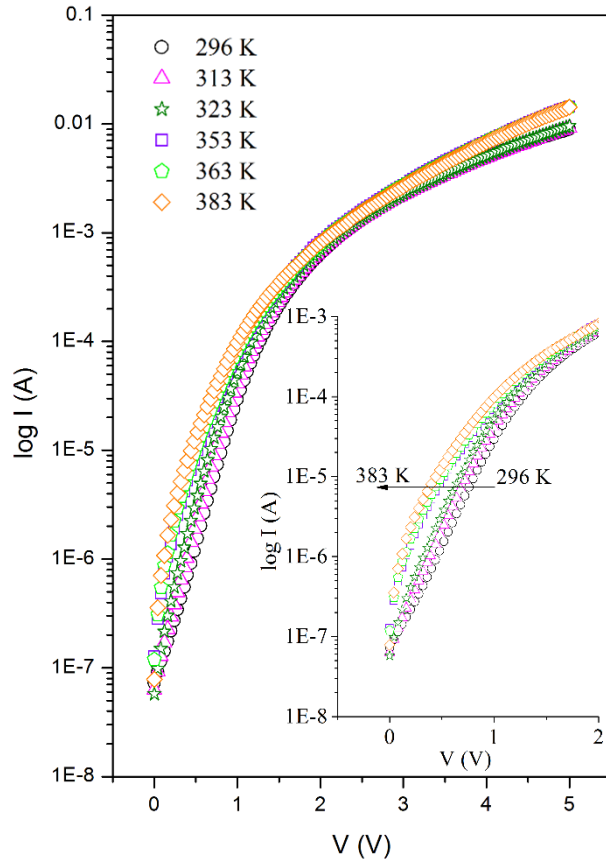
**Şekil 4.21.** (a) Farklı döndürme hızlarında ve (b) farklı molaritelerde ZnAc çözeltisi hazırlanarak elde edilen ZnO filmlerinin PL spektrumları

#### 4.1.5. p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun elektriksel özellikleri

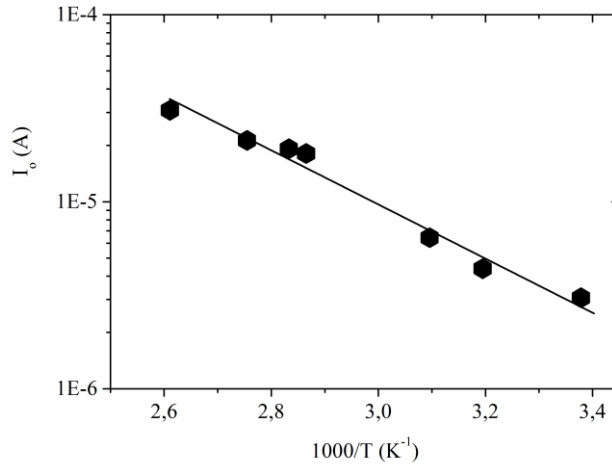
Heteroeklem aygıtlarda pek çok yük taşıyım mekanizması mevcuttur. Bunlardan bazıları termioyonik emisyon (TE), tuzak alan emisyonu (TFE), azınlık taşıyıcı enjeksiyonu, rekombinasyon-üretim ve çok aşamalı tünellemedir. Bu mekanizmalardan biri bazı sıcaklık ve bazı voltaj bölgelerinde diğerlerine göre daha baskın durumdadır. Fakat, aynı anda iki veya daha fazla mekanizmanın yük taşıyımına katkı sağlamasında söz konusu olabilir [119, 120]. Bu çalışmada, iletim mekanizmaları yarılogaritmik  $I - V$  grafikleri yardımıyla açıklanmaya çalışılmıştır.

Elde edilen ZnO filmler arasından Z9-S kodlu film ile fabrikasyonu yapılan nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun farklı ortam sıcaklıklarındaki (296–383 K) yarı logaritmik  $I - V$  grafikleri Şekil 4.22’de verilmiştir. Karakterizasyon sonuçları gözününde bulundurularak bazı filmlerin deneme ölçümleri alınmış ve en iyi sonuçların Z9-S filmi kullanılarak üretilen diyot için elde edildiği görülmüştür. Şekil 4.22’nin içindeki yakınlaştırılmış şekilden görüldüğü gibi yarı logaritmik  $I - V$  eğrisinin eğimi sıcaklıkla ters orantılıdır.

İleri besleme karakteristiğinden heteroeklem diyotun  $I_0$  değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.23’te  $I_0$  değerlerinin ortam sıcaklığındaki artışa bağlı olarak eksponansiyel olarak arttığı görülmüştür [121].  $E_a$  değeri Şekil 4.23’teki eğrinin eğiminden hesaplanmış ve 283 meV olarak bulunmuştur. Bu değer, tuzak enerji seviyelerinin ( $E_t$ ) iletim bandının altında bu enerji değerinde yer aldığını göstermekle birlikte, literatürdeki sonuçlarla [122-124] uyumlu olduğu görülmüştür. Genel olarak oksijen, kolaylıkla tutunabildiği kristal sınırlarında ve film yüzeyinde tuzak merkezi olarak önemli rol oynamaktadır. Tuzak seviyelerine göre tuzak merkezlerinin kaynağı için sınıflandırma yapıldığında;  $E_t < 30$  meV ise tuzak merkezinin kaynağı yüzeydeki kimyasal olarak adsorplanan oksijenden [125],  $30$  meV  $< E_t < 100$  meV eV ise kristal sınırlarında adsorplanan oksijenden ve yoğun taşıyıcı konsantrasyonundan [125, 126],  $E_t > 100$  meV ise lokalize durumlardaki kusurlardan dolayıdır [126]. Dolayısıyla, ZnO filmi için  $E_t$  değeri, lokalize durumlardaki kusurlardan kaynaklanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.



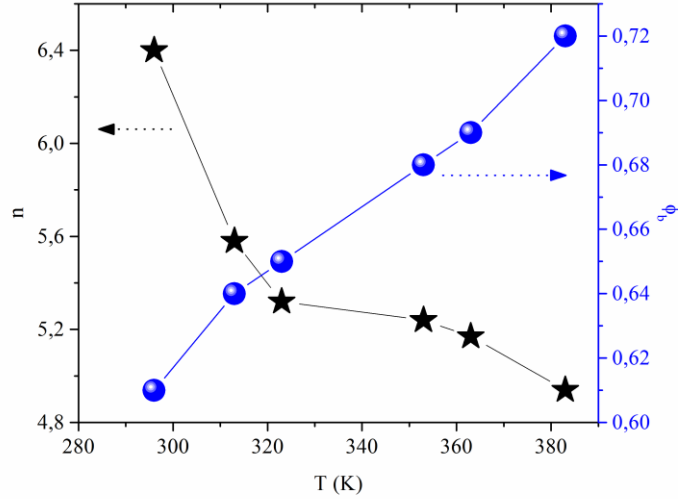
**Şekil 4.22.** Nano yapılı *p-Si/n-ZnO* heteroeklem diyotunun farklı ortam sıcaklıklarındaki yarı logaritmik  $I - V$  grafikleri



**Şekil 4.23.** Nano yapılı *p-Si/n-ZnO* heteroeklem diyotun farklı ortam sıcaklıklarındaki  $I_0$ - $1000/T$  değişimi

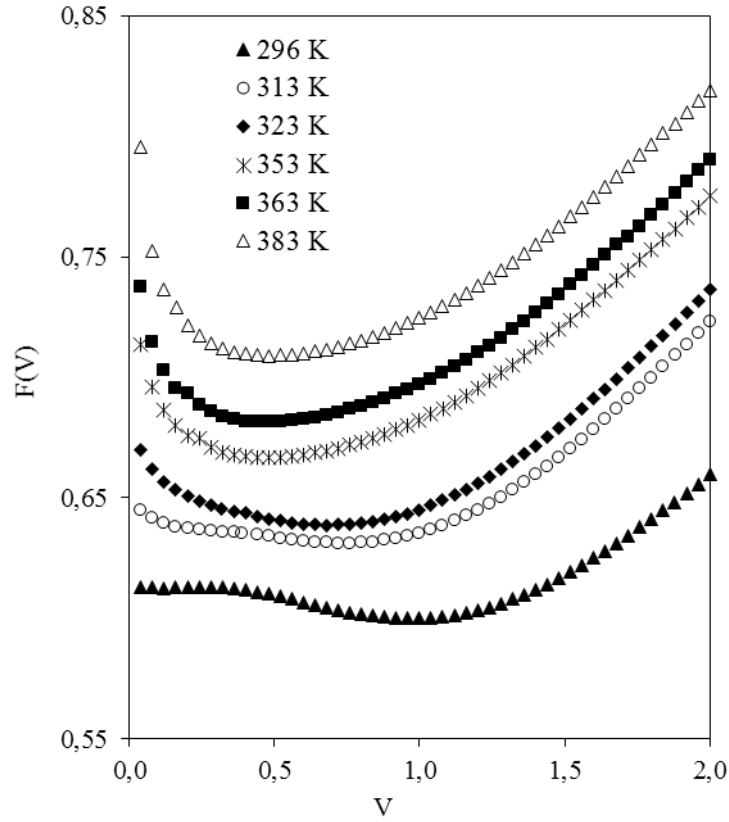
Şekil 4.24'te  $0,2 < V < 0,5$  voltaj aralığında  $n$  ve  $\phi_b$  değerlerinin ortam sıcaklığına bağlı değişim grafiği verilmiştir. Artan ortam sıcaklığına bağlı olarak  $n$  değerinin

azaldığını,  $\phi_b$  değerinin arttığını göstermiştir. Ortam sıcaklığı arttığı zaman daha fazla elektron engel yüksekliğini aşmak için gerekli enerjiye sahip olduğundan dolayı,  $\phi_b$  değeri artan ortam sıcaklığına bağlı olarak artmıştır.



**Şekil 4.24.** Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun farklı ortam sıcaklıklarındaki  $n$  ve  $\phi_b$  değerleri

Norde metodu, diyotun  $R_s$  ve  $\phi_b$  değerini hesaplamak için alternatif bir yöntemdir. Şekil 4.25'te farklı ortam sıcaklıklarındaki  $F(V)$  değerlerinin voltaja bağlı değişimleri verilmiştir. Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun farklı ortam sıcaklıkları için hesaplanan  $\phi_b$  ve  $R_s$  değerleri Çizelge 4.19'da verilmiştir. Ortam sıcaklığının artmasıyla birlikte hem  $\phi_b$  hem de  $R_s$  değerinin artış eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Çizelge 4.19 incelendiğinde,  $I - V$  grafiği kullanılarak hesaplanmış olan  $\phi_b$  değerlerinin, Norde metodu kullanılarak hesaplanmış olan  $\phi_b$  değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni,  $I - V$  yardımıyla  $\phi_b$  değeri hesaplamalarının çok küçük voltaj değerlerinde (sıfıra yakın) yapılması, Norde metodunda ise minimum bir voltaj değerinde hesaplanmasından kaynaklanmaktadır.  $R_s$  değerleri ise oksit tabakalardan dolayı oldukça yüksek bulunmuştur.  $R_s$  değerinin büyük olması lineer olmayan (non-linear) davranışa sebep olduğu için idealite faktörünün büyük değerlere ulaşmasına neden olmaktadır [127].



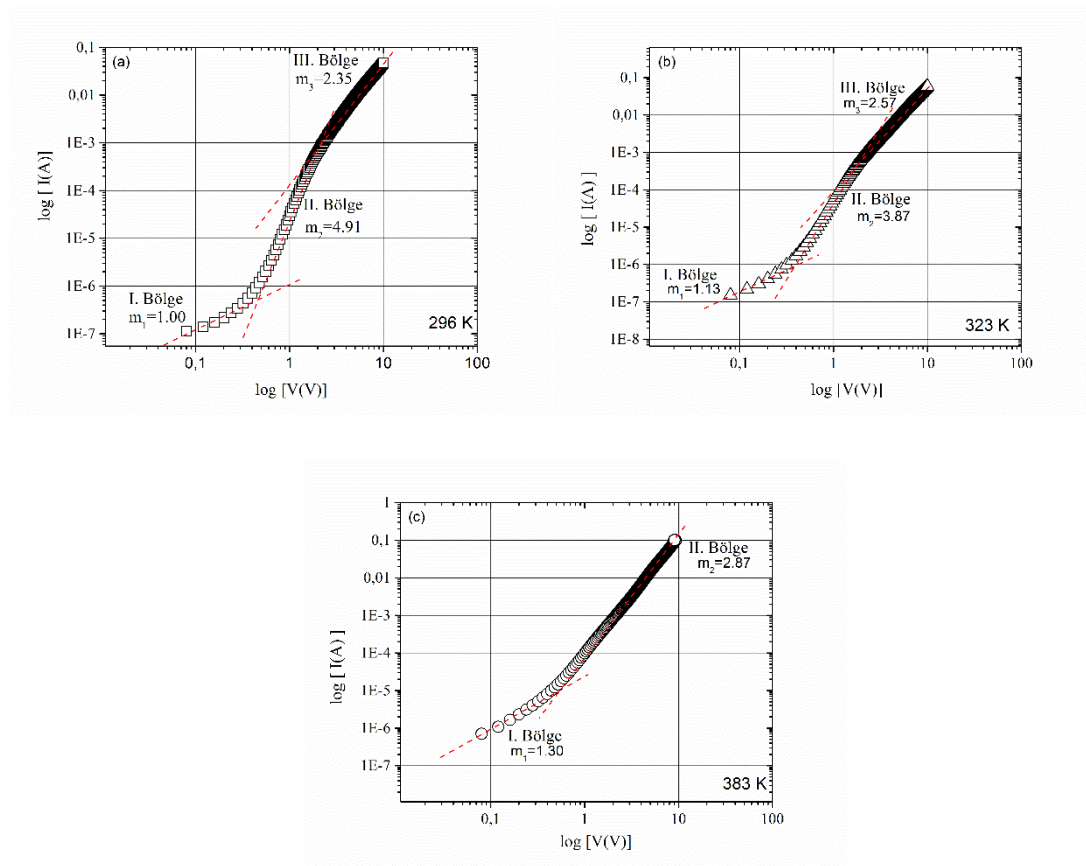
**Şekil 4.25.** Nano yapılı *p*-Si/*n*-ZnO heteroeklem diyotunun farklı ortam sıcaklıklardaki  $F(V) - V$  grafiği

**Çizelge 4.19.** Nano yapılı *p*-Si/*n*-ZnO heteroeklem diyotunun farklı ortam sıcaklıklarındaki  $\phi_b$  ve  $R_s$  değerleri

Sıcaklık (K)	296	313	323	353	363	383
$\phi_b$ (eV) (Norde metodu yardımıyla hesaplanan)	0,71	0,72	0,72	0,71	0,72	0,75
$\phi_b$ (eV) ( $I - V$ karakteristiği yardımıyla hesaplanan)	0,61	0,64	0,65	0,68	0,69	0,72
$R_s$ (k $\Omega$ ) (Norde metodu yardımıyla hesaplanan)	0,65	1,61	2,32	3,51	3,48	3,52

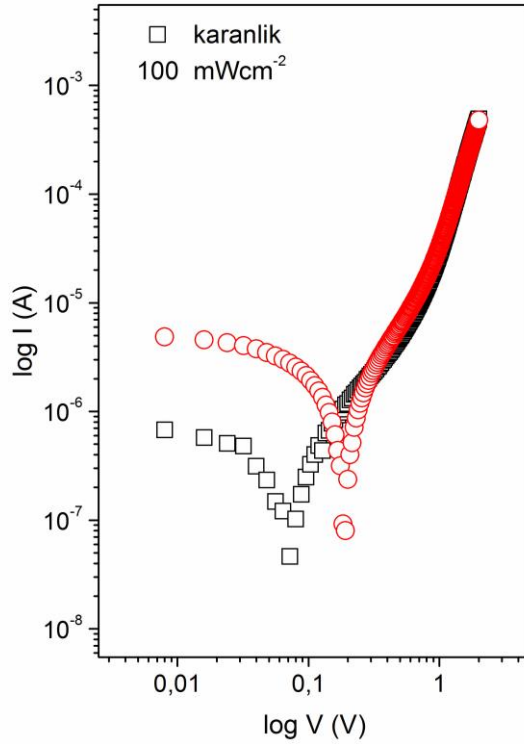
İletim mekanizmalarını belirlemek için Şekil 4.26'da nano yapılı *p*-Si/*n*-ZnO heteroeklem diyotunun farklı ortam sıcaklıklarındaki ileri besleme  $\log I - \log V$  eğrileri verilmiştir.  $\log I - \log V$  eğrisinin ileri besleme voltajına karşılık gelen kısmı farklı iletim mekanizmalarına işaret eden farklı bölgelerle karakterize edilmiştir. Şekil 4.26 (a-b)'de

görüldüğü gibi, ileri besleme karakteristikleri üç farklı lineer bölgeden oluşmuştur. Her iki sıcaklık için de I. bölge yani 0,2 V'luk geçiş voltajına kadar olan kısım omik bölgedir. Aynı şekilde, her iki sıcaklık için II. bölgede  $I \sim \exp(\alpha V)$  ilişkisi gereği akım değeri eksponansiyel olarak artış göstermiştir. Bu durum genellikle geniş band aralıklı pn diyotlarında gözlenmektedir [128, 129]. III. bölgede eğim değerleri 296 K ve 323 K için sırasıyla 2,35 ve 2,57 olarak bulunmuştur. Bu durum, bu bölgede SCLC mekanizmasının baskın olduğunu göstermiştir [130, 129]. Yüksek voltaj değerlerinde eğrinin eğimi artmıştır. Çünkü enjeksiyon seviyesi yüksek olduğunda aygıt tuzak (trap-filled) sınırına yaklaşır [131]. Şekil 4.26 (c)'de görüldüğü gibi, ileri besleme karakteristiği iki lineer bölgeden oluşmaktadır. I. bölge omik bölgedir. II. bölgede eğim değeri 2,87'dir. Bu değer yasak enerji aralığında eksponansiyel tuzak dağılımına karşılık gelen SCLC mekanizmasının varlığına işaret etmiştir.



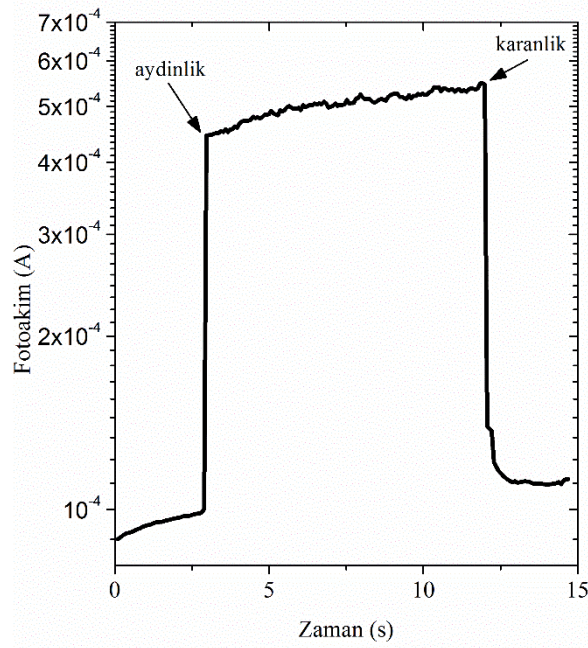
**Şekil 4.26.** Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun (a) 296 K, (b) 323 K ve (c) 383 K ortam sıcaklıklarındaki ileri besleme  $\log I$ - $\log V$  eğrileri

Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun fotovoltaiik davranışını karakterize etmek için karanlık ve UV aydınlatması altında  $I - V$  ölçümleri alınmış ve Şekil 4.27’de verilmiştir. Fotoakım ölçümleri için 500 W halojen lamba kullanılmıştır. Şekil 4.27’de görüldüğü gibi geri besleme bölgesinde akım aydınlatma şiddetine bağlı olarak artış göstermiştir. Maksimum açık devre voltajı  $V_{oc} = 0,19$  V, kısa devre akımı  $I_{sc} = 8,03 \times 10^{-8}$  A olarak bulunmuştur. Işık şiddetine maruz kalmış bir pn eklemde fotovoltaiik etkinin varlığından söz edebilmek için bu etkinin voltaj ve akım meydana getirmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, elde edilen bu değerler nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun fotovoltaiik davranış sergilediğini göstermiştir.  $V_{oc}$  değeri oldukça düşük bulunmuştur. Aydınlatma altında diyotun ileri besleme akımı karanlık ortamda ölçülen akım değerinden daha yüksek bulunmuştur. Işıma, karanlık akımının niteliğini değiştirmektedir. Ayrıca, ZnO’nun eksiton bağlanma enerjisi büyük olduğu için, uygulanan voltaj yardımıyla meydana gelen ayrışma (dissociation) ileri besleme yönündeki fotoakımı etkilemiştir [132].



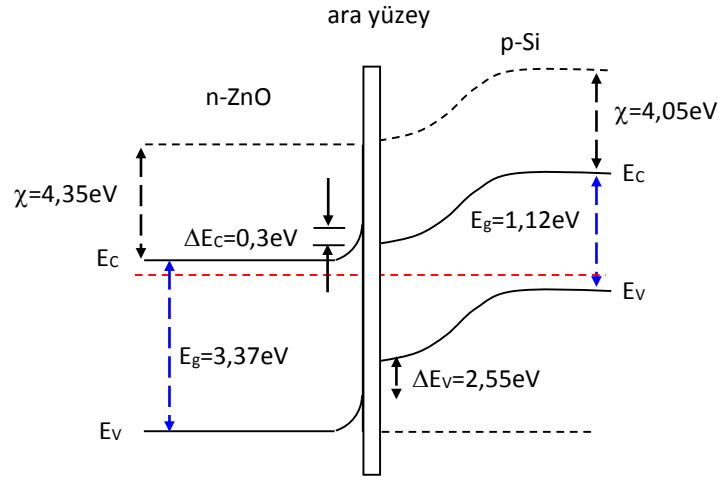
**Şekil 4.27.** Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun karanlık ve UV aydınlatması altında alınan  $\log(I)-V(V)$  grafikleri

Şekil 4.28’de nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun zamana bağlı fotoakım ölçümü verilmiştir. Ölçüm 296 K’de  $100 \text{ mWcm}^{-2}$  aydınlatma şiddeti altında gerçekleştirilmiştir. Fotoakım değerleri lambanın açık ve kapalı olduğu durumlardan sonra zamanla değişim göstermiştir. Bu durum diyotun iyi fotoiletken özellik sergilediğine işaret etmiştir. Diyot üzerine aydınlatma uygulandıktan sonra yani, lamba açıldıktan sonra fotoakım değeri zamana bağlı olarak aniden artış göstermiş ve fotoakım sabit bir değer almıştır. Diyotun fotoakım değerindeki bu artış p-Si ve ZnO yarıiletkenlerinin elektron afiniteleri arasındaki farktan kaynaklanmıştır. Lamba kapatıldıktan sonra akım ilk değerlerine ulaşmıştır.



**Şekil 4.28.** Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun  $100 \text{ mWcm}^{-2}$  aydınlatmada Fotoakım-Zaman grafiği

Şekil 4.29’da nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun enerji-band diyagramı verilmiştir.  $E_g$  yasak enerji aralığı ve  $\chi$  elektron afinitesi olmak üzere,  $E_{g(Si)} = 1,12 \text{ eV}$ ,  $\chi_{Si} = 4,05 \text{ eV}$ ,  $E_{g(ZnO)} = 3,37 \text{ eV}$ ,  $\chi_{ZnO} = 4,35 \text{ eV}$  değerleri kullanılmıştır. Valans bandındaki band süreksizliği, iletim bandına göre geniştir. Bu durum, diyotun ileri beslenmesi durumunda çok yüksek akım geçirirken, ters beslenmesi durumunda çok küçük akım geçireceği şeklinde yorumlanmıştır.

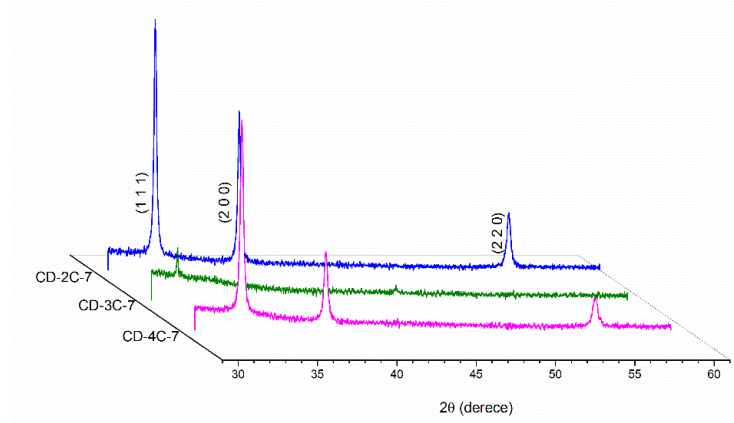


**Şekil 4.29.** Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun enerji-band diyagramı

## 4.2. CdO Filmleri

### 4.2.1. CdO filmlerinin yapısal özellikleri

Şekil 4.30’da farklı dönme hızlarında (2000, 3000 ve 4000 rpm) cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Spektrumlar incelendiğinde, CD-2C-7 ve CD-4C-7 filmlerinin kübik ve polikristal yapıda kristallendiği (JCPDS kart no: 05–0640, CdO), CD-3C-7 filminin ise kristallenmesinin çok iyi olmadığı görülmüştür. Bu nedenle bu filmin yapısal analizi yapılamamıştır. CD-2C-7 ve CD-4C-7 filmlerinin (111), (200) ve (220) yansıma düzlemlerine sahip oldukları görülmüştür. Şekil 4.30’dan görüldüğü gibi, en iyi kristallenmenin CD-4C-7 filmine ait olduğu görülmüştür. Çizelge 4.20’de filmlere ait  $2\theta$ ,  $TC$ ,  $FWHM$  ve ortalama kristal boyutu değerleri verilmiştir. En yüksek  $TC$  değerinin her iki filmde de (111) düzleminde olduğu görülmüştür. Filmlerin yapılanma katsayıları karşılaştırıldığında en yüksek yapılanma katsayısının CD-4C-7 filmine ait olduğu görülmüştür. En büyük ortalama kristal boyutunun CD-2C-7 filmine ait olduğu görülmüştür. XRD spektrumları incelendiğinde, en iyi film oluşumunun CD-2C-7 filmde olduğu sonucuna varılmıştır.

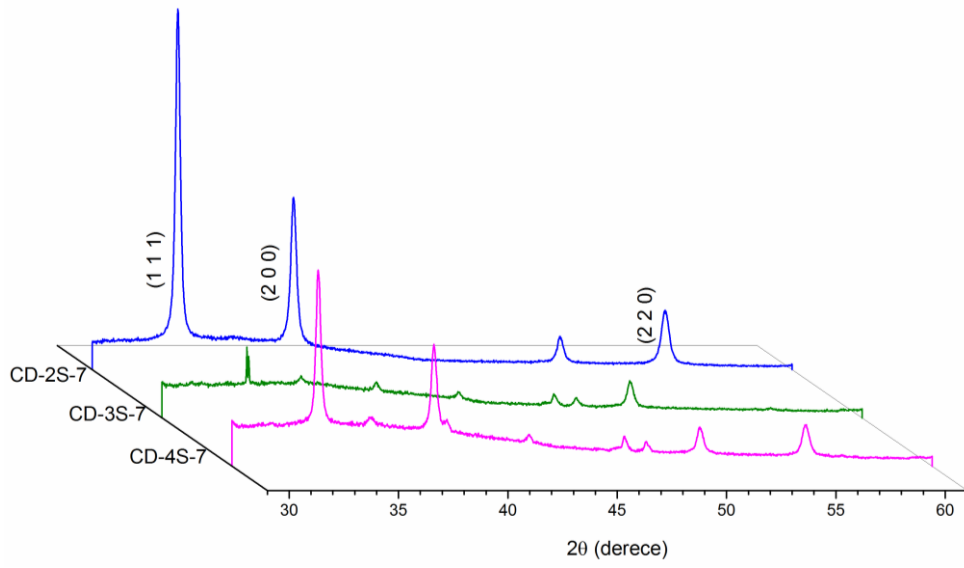


**Şekil 4.30.** Farklı döndürme hızlarında cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları

**Çizelge 4.20.** Farklı döndürme hızlarında cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin  $2\theta$ ,  $TC$ ,  $FWHM$  ve ortalama kristal boyutu değerleri

Film kodu	(hkl)	$2\theta$ (derece)	$TC$	$FWHM$ (derece)	$D$ (Ortalama kristal boyutu) (nm)
CD-2C-7	111	33,007	1,56	0,182	47,57
	200	38,294	1,04	0,208	
	220	55,283	0,39	0,266	
CD-4C-7	111	32,975	1,89	0,234	37,00
	200	38,265	0,76	0,271	
	220	55,246	0,34	0,360	

Şekil 4.31’de farklı döndürme hızlarında (2000, 3000 ve 4000 rpm) p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Spektrumlar incelendiğinde, CD-2S-7 ve CD-4S-7 filmlerinin kübik ve polikristal yapıda kristalleştiği (JCPDS kart no: 05–0640, CdO), CD-3S-7 filminin ise kristallenmesinin çok iyi olmadığı görülmüştür. CD-2S-7 ve CD-4S-7 filmlerinin (111), (200) ve (220) yansıma düzlemlerine sahip oldukları görülmüştür. Şekil 4.31’den görüldüğü gibi, en iyi kristallenmenin CD-4S-7 filmine ait olduğu görülmüştür. Çizelge 4.21’de filmlere ait  $2\theta$ ,  $TC$ ,  $FWHM$  ve ortalama kristal boyutu değerleri verilmiştir. En yüksek  $TC$  değerinin (111) düzleminde olduğu görülmüştür. Filmlerin yapılanma katsayıları karşılaştırıldığında en yüksek yapılanma katsayısının CD-4S-7 filmine ait olduğu görülmüştür. Ortalama kristal boyutu değerlerinde lineer bir değişim gözlenmemiştir.

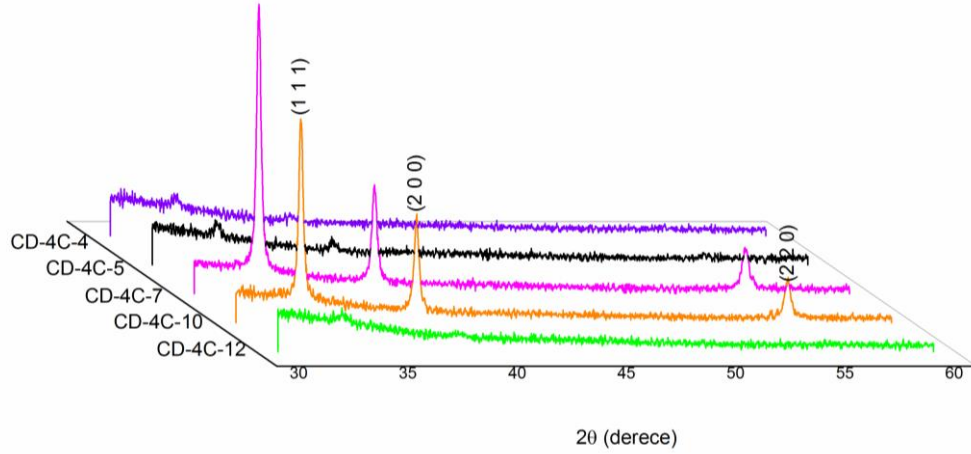


**Şekil 4.31.** Farklı döndürme hızlarında *p*-Si alttaşılar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları

**Çizelge 4.21.** Farklı döndürme hızlarında *p*-Si alttaşılar üzerine elde edilen CdO filmlerinin  $2\theta$ , *TC*, *FWHM* ve ortalama kristal boyutu değerleri

Film kodu	( <i>hkl</i> )	$2\theta$ (derece)	<i>TC</i>	<i>FWHM</i> (derece)	<i>D</i> (Ortalama kristal boyutu) (nm)
CD-2S-7	111	32,911	<b>1,83</b>	0,252	34,35
	200	38,213	0,87	0,304	
	220	55,201	0,30	0,407	
CD-3S-7	111	32,914	<b>1,38</b>	0,387	22,36
	200	38,770	1,19	0,259	
	220	-	0,42	-	
CD-4S-7	111	32,858	<b>2,12</b>	0,092	94,07
	200	38,131	0,63	0,248	
	220	55,140	0,25	0,305	

Şekil 4.32’de farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Spektrumlar incelendiğinde, CD-4C-7 ve CD-4C-10 filmlerinin kübik (fcc) polikristal yapıda kristalleştiği (JCPDS kart no: 05–0640, CdO), CD-4C-4 CD-4C-5 ve CD-4C-12 filmlerinin kristallenmesinin çok iyi olmadığı görülmüştür. Çizelge 4.22’de filmlere ait  $2\theta$ ,  $TC$ ,  $FWHM$  ve ortalama kristal boyutu değerleri verilmiştir. En yüksek  $TC$  değerinin (111) düzleminde olduğu görülmüştür. Filmlerin yapılanma katsayıları karşılaştırıldığında en yüksek yapılanma katsayısının CD-4C-7 filmine ait olduğu görülmüştür. CD-4C-7 ve CD-4C-10 filmlerinin ortalama kristal boyutu birbirine çok yakın ve diğer filmlere nazaran daha büyük kristal boyutlarına sahip oldukları görülmüştür.

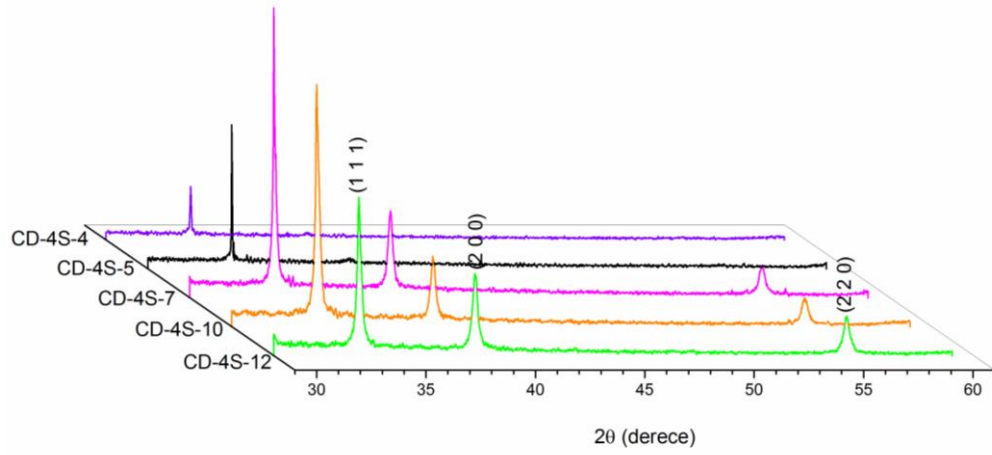


**Şekil 4.32.** Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları

**Çizelge 4.22.** Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin  $2\theta$ ,  $TC$ ,  $FWHM$  ve ortalama kristal boyutu değerleri

Film kodu	( $hkl$ )	$2\theta$ (derece)	$TC$	$FWHM$ (derece)	$D$ (Ortalama kristal boyutu) (nm)
CD-4C-4	111	32,997	1,44	0,358	24,18
	200	38,252	0,93	0,792	
	220	55,358	0,63	-	
CD-4C-5	111	32,984	1,42	0,338	25,62
	200	38,260	0,92	0,223	
	220	55,246	0,67	-	
CD-4C-7	111	32,975	1,89	0,234	37,00
	200	38,265	0,76	0,271	
	220	55,246	0,34	0,360	
CD-4C-10	111	32,990	1,65	0,235	36,84
	200	38,279	0,92	0,254	
	220	55,253	0,43	0,318	

Şekil 4.33'te farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Spektrumlar incelendiğinde, CD-4S-7, CD-4S-10 ve CD-4S-12 filmlerinin kübik ve polikristal yapıda kristalleşmiştir (JCPDS kart no: 05-0640, CdO). CD-4S-4 ve CD-4S-5 filmlerinde ise CdO'ya ait karakteristik piklere rastlanmamıştır. Bu filmlere ait spektrumda gözlenen pik ise p-Si alttaşının  $33,498^\circ$ 'de yer alan (301) kristal yönelimindeki pikedir. Filmler arasında en iyi kristallenmenin CD-4S-7 filmine ait olduğu görülmüştür. Çizelge 4.23'te filmlere ait  $2\theta$ ,  $TC$ ,  $FWHM$  ve ortalama kristal boyutu değerleri verilmiştir. En yüksek  $TC$  değerinin (111) düzleminde olduğu görülmüştür. Filmlerin yapılanma katsayıları karşılaştırıldığında en yüksek değerlerin ve ortalama kristal boyutunun CD-4S-7 filmine ait olduğu görülmüştür. Ayrıca CD-4C ve CD-4S serileri karşılaştırıldığında, aynı parametrelerde sırasıyla cam ve p-Si alttaşlar üzerine elde edilen filmlerden, p-Si tek kristal alttaş üzerine elde edilen filmlerin daha iyi kristallendiği sonucuna ulaşılmıştır.



**Şekil 4.33.** Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları

**Çizelge 4.23.** Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin  $2\theta$ , TC, FWHM ve ortalama kristal boyutu değerleri

Film kodu	(hkl)	$2\theta$ (derece)	TC	FWHM (derece)	D (ortalama kristal boyutu) (nm)
CD-4S-7	111	32,858	2,12	0,092	94,07
	200	38,131	0,63	0,248	
	220	55,140	0,25	0,305	
CD-4S-10	111	32,926	2,03	0,194	44,62
	200	38,215	0,68	0,264	
	220	55,191	0,29	0,360	
CD-4S-12	111	32,871	1,71	0,215	40,25
	200	38,166	0,87	0,279	
	220	55,164	0,42	0,330	

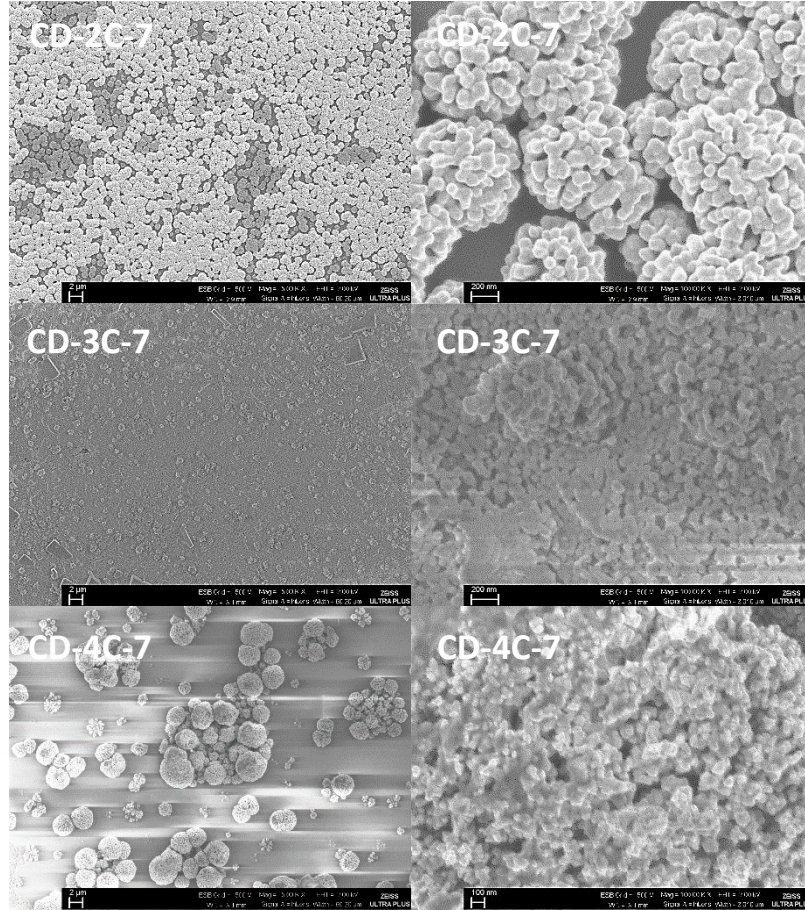
Çizelge 4.24'te cam ve p-Si alttaşlar üzerine farklı pH değerlerinde elde edilen CdO filmlerinin ortalama kristal boyutları verilmiştir. Sonuçlar, hazırlanan çözeltinin pH değerinin film kalitesini büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir. Hem cam hem de p-Si alttaş üzerine elde edilen filmler düşünüldüğünde, pH=7 değerine gelinceye kadar FWHM değerleri azalmıştır. Bu sonuç, kristallenmeyle ilgilidir. Yani ilk aşamada (pH=7'ye kadar) pH değerinin artmasıyla CdO'nun iyi çekirdeklenebilmesi için gerekli olan  $OH^-$  iyonlarının miktarı da artmıştır. Hem cam hem de p-Si alttaş için en büyük ortalama kristal boyutu pH=7 değerinde hazırlanan çözelti kullanılarak elde edilen filmler için bulunmuştur. pH=7 değerinin üzerinde FWHM değerinin artışı başlamıştır. Yani  $OH^-$  iyonlarının miktarı kritik değeri aştığı zaman, CdO'nun çözünmesi daha küçük parçacıkların oluşmasına yol açmıştır. Bu nedenle bu kritik değerden sonra parçacık boyutunda azalma meydana gelmiş ve filmlerin kristallenmesi bozulmaya başlamıştır.

**Çizelge 4.24.** Cam ve p-Si alttaşlar üzerine farklı pH değerlerinde elde edilen CdO filmlerinin ortalama kristal boyutu değerleri

Film kodu	Alttaş	pH	D (Ortalama kristal boyutu) (nm)
CD-4C-4	cam	4	24,18
CD-4C-5		5	25,62
CD-4C-7		7	<b>37,00</b>
CD-4C-10		10	36,84
CD-4C-12		12	-
CD-4S-4	p-Si	4	-
CD-4S-5		5	-
CD-4S-7		7	<b>94,07</b>
CD-4S-10		10	44,62
CD-4S-12		12	40,25

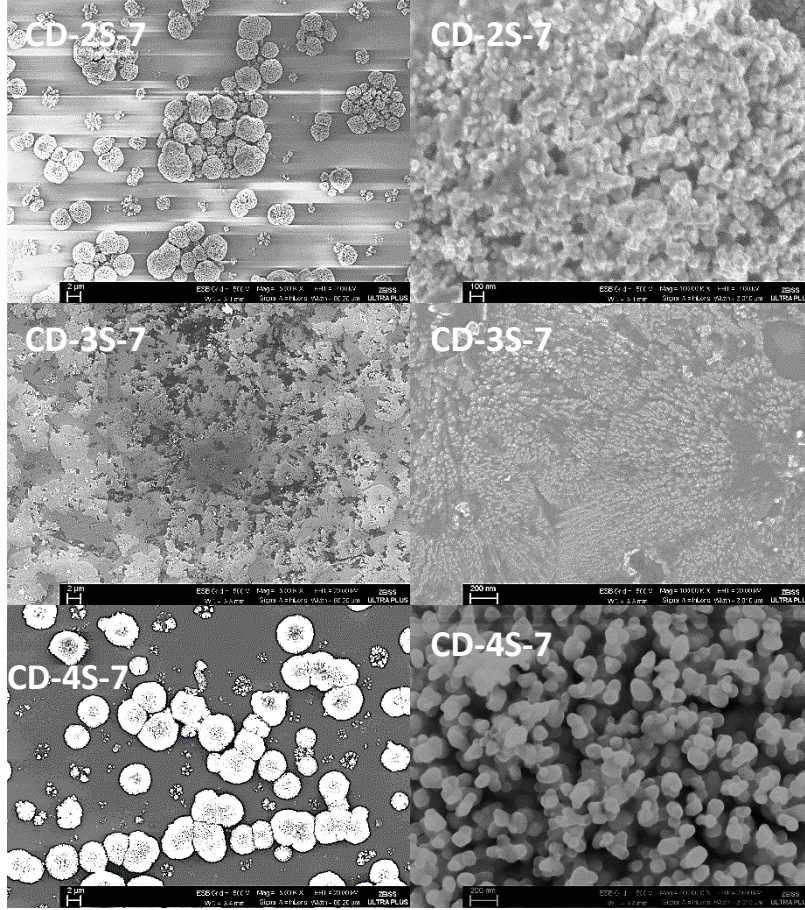
#### 4.2.2. CdO filmlerinin morfolojik özellikleri

Şekil 4.34'te farklı döndürme hızlarında cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Filmlerin hepsi küresel yapılardan oluşmuştur. Ayrıca, artan döndürme hızı ile film kalitesi bozulmuştur. En düzgün ve homojen kaplamanın CD-2C-7 filmine ait olduğu görülmüştür.



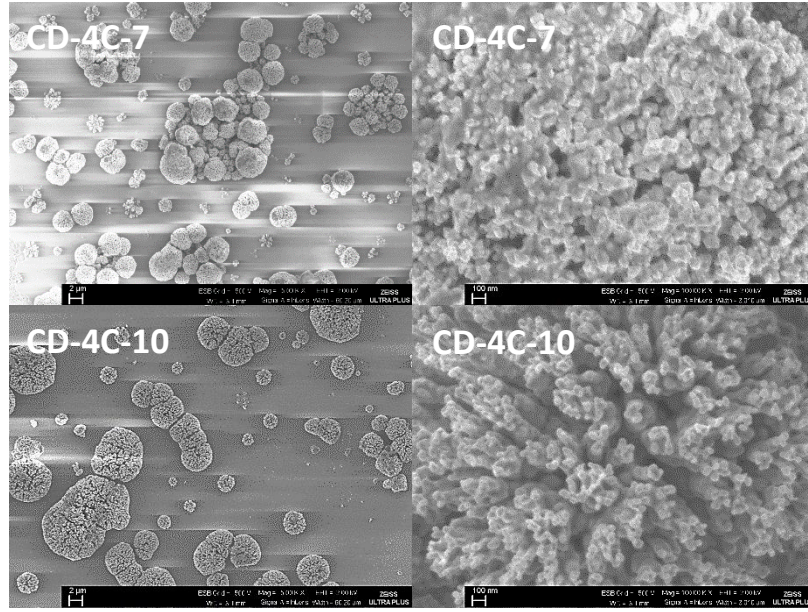
**Şekil 4.34.** Farklı döndürme hızlarında cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin 10.000 ve 100.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri

Şekil 4.35'te farklı döndürme hızlarında p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Filmlerin hepsi küresel yapılardan oluşmuştur. En düzgün ve homojen kaplamanın CD-4S-7 filmine ait olduğu görülmüştür. XRD spektrumları incelendiğinde, en iyi film oluşumunun CD-4S-7 filminde olduğu sonucuna varılmıştır.



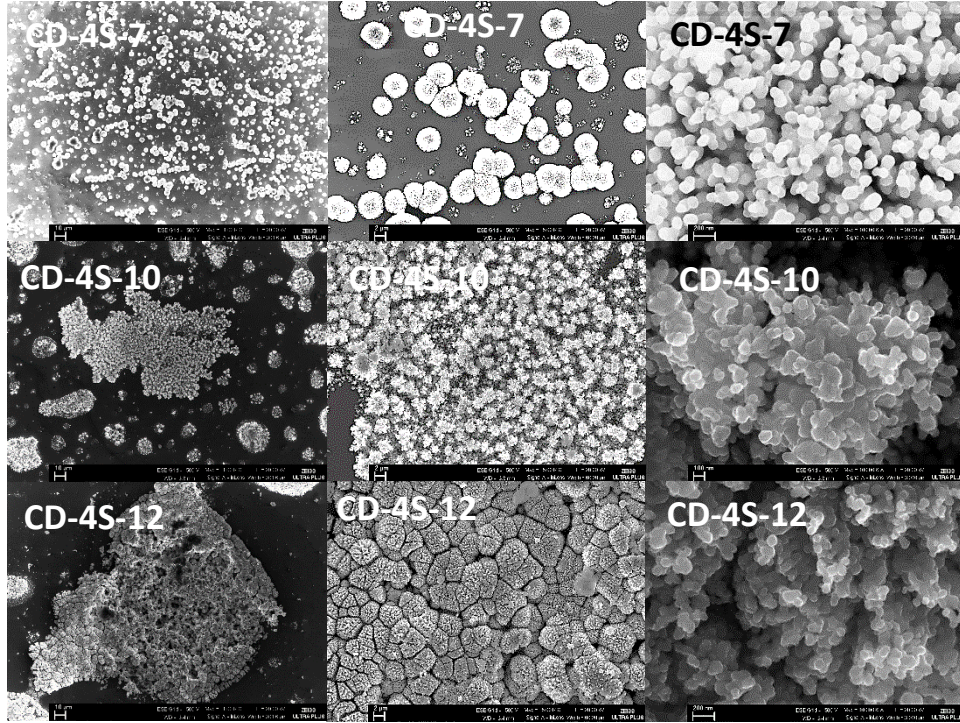
Şekil 4.35. Farklı döndürme hızlarında p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin 5.000 ve 100.000 büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri

Şekil 4.36’da farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinden bazılarının FESEM görüntüleri verilmiştir. XRD spektrumlarından da gözlendiği üzere, CD-4C-4, CD-4C-5 ve CD-4C-12 filmlerinin kaplamasının iyi olmamasından dolayı şarjlanma meydana gelmiş ve FESEM görüntüleri alınamamıştır. Diğer filmlerin FESEM görüntüleri incelendiğinde, alttaş üzerinde küresel yapıların oluştuğu gözlenmiştir. CD-4C-7 ve CD-4C-10 filmlerinin kaplamalarının ise hemen hemen birbirine benzer olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.36.** Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin 5.000 ve 100.000 büyütmeledeki FESEM görüntüleri

Şekil 4.37’de farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinden bazılarının FESEM görüntüleri verilmiştir. XRD spektrumlarından da gözlendiği üzere, CD-4C-4 ve CD-4C-5 filmlerinin kaplamasının iyi olmamasından dolayı şarjlanma meydana gelmiş ve FESEM görüntüleri alınamamıştır. Oluşan filmlerin FESEM görüntüleri incelendiğinde, alttaş üzerinde küresel yapıların oluştuğu gözlenmiştir. CD-4S-10 ve CD-4S-12 filmlerinin en düşük büyütmedeki görüntülerinden, kaplamaların öbekler halinde bölgeler oluşturduğu ve yüzeyin tamamında film oluşmadığı görülmüştür. Şekilden 4.37’den de görüldüğü gibi, CD-4S-7 filminin tüm yüzeyi hemen hemen tamamen kaplanmıştır.



**Şekil 4.37.** Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin 1.000, 5.000 ve 100.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri

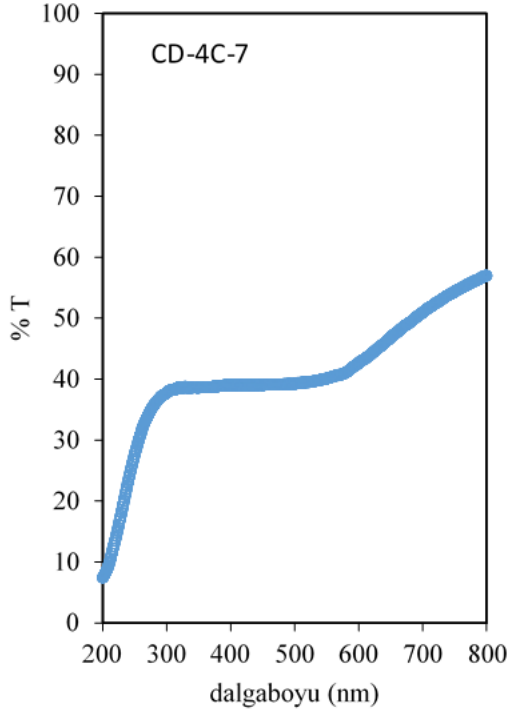
### 4.2.3 CdO filmlerinin optik özellikleri

Farklı parametrelerde cam alttaş üzerine elde edilen bazı CdO filmlerinin transmittans ve absorpsiyon spektrumlarından yararlanılarak filmlerin görünür bölgedeki ortalama  $\%T$  ve  $E_g$  değerleri belirlenmiştir (CD-4C-7 ve CD-2C-7). Diğer filmlerde, yüzey kaplaması homojen olmayıp, alttaş tamamen kaplanamadığı için yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen  $E_g$  değerleri ( $\sim 4$  eV), ölçümlerin filmde ziyade alttaşta daha çok veri toplanarak elde edildiğini göstermiştir.

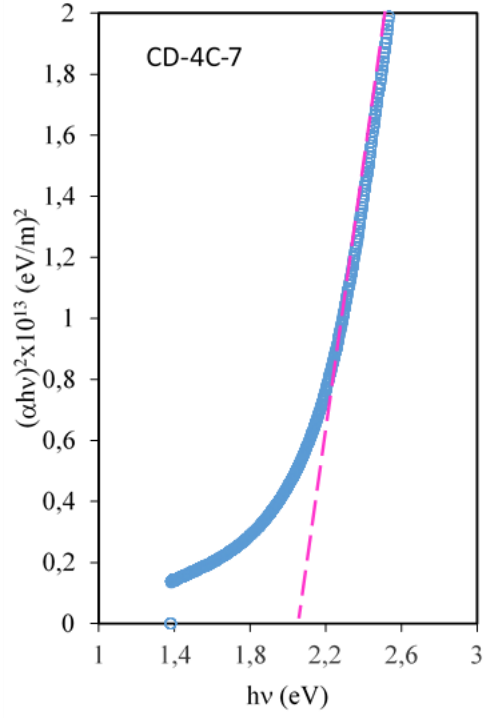
Şekil 4.38 (a)'da CD-4C-7 filminin  $\%T$  spektrumu verilmiştir. Spektrum incelendiğinde görünür bölgedeki ortalama  $\%T$  değeri  $\%54$  bulunmuştur. Şekil 4.38 (b)'de Aynı filmin  $E_g$  değeri 2,08 eV bulunmuştur. Şekil 4.39 (a)'da CD-2C-7 filminin  $\%T$  spektrumu verilmiştir. Spektrum incelendiğinde görünür bölgedeki ortalama  $\%T$  değeri  $\%32$  bulunmuştur. Şekil 4.39 (b)'de Aynı filmin  $E_g$  değeri 2,17 eV bulunmuştur.

Filmlerin görünür bölgedeki ortalama  $\%T$  değerleri oldukça düşüktür. Bu durum, bu bölgede ışık absorpsiyonunun oldukça yüksek oluşundan kaynaklanabilir. Film oluşumu esnasında isteyerek veya istemeyerek dahil olan yabancı atomlar ve/veya yapısal kusurların filmde mekanik stres oluşturması da bu tür davranışlara sebep olmuş olabilir. Ayrıca, Cd ara atomlarının ve oksijen boşluklarının varlığı da iletim bandının altında yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahip bir donör seviyesinin bulunmasına yol açabilir. Valans bandından bu donör seviyelerine geçişler, absorpsiyon sınırının daha uzun dalgaboyu tarafından optik absorpsiyonun artmasına neden olmuş olabilir.

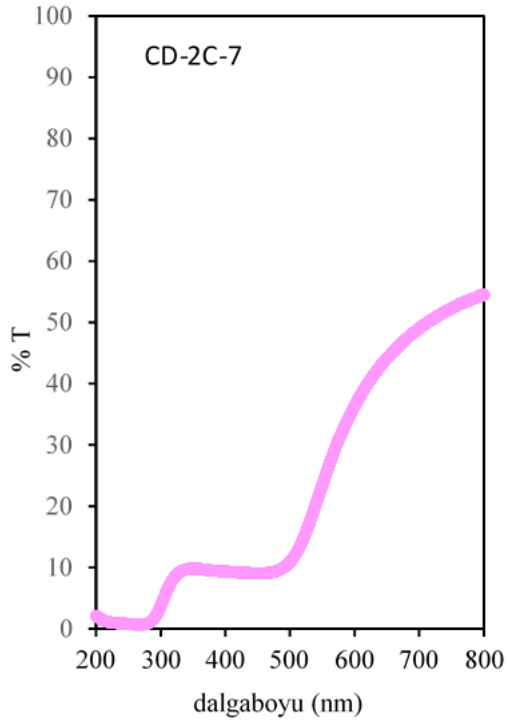
Literatür araştırması yapıldığında, farklı tekniklerle hazırlanmış olan doğrudan band geçişli CdO filmlerinin  $E_g$  değerlerinin 2,20–2,80 eV arasında olduğu görülmüştür. Literaturdeki sonuçlara göre daha küçük  $E_g$  değerleri bulunmasının nedeni olarak yukarıda bahsedildiği gibi, iletim bandının yakınında yer alan donör seviyesinin varlığından kaynaklanmış olabilir. Donör seviyesi nedeniyle, yasak banda uzanan band sarkmalarının yoğunluğuna bağlı olarak, band yapısı değişebilir. Bu durumun sonucu olarak da, yasak enerji aralığında daralma meydana gelmiş olabilir [86, 133].



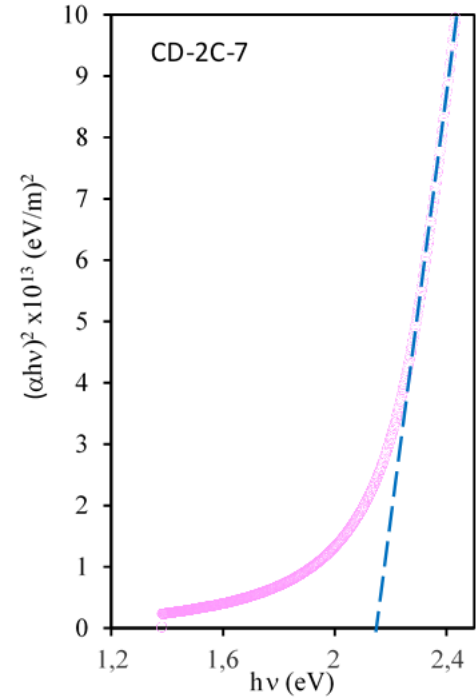
**Şekil 4.38 (a).** *CD-4C-7 filminin %T spektrumu*



**Şekil 4.38 (b).** *CD-4C-7 filminin  $hv - (\alpha hv)^2$  grafiği*



**Şekil 4.39 (a).** *CD-2C-7 filminin %T spektrumu*

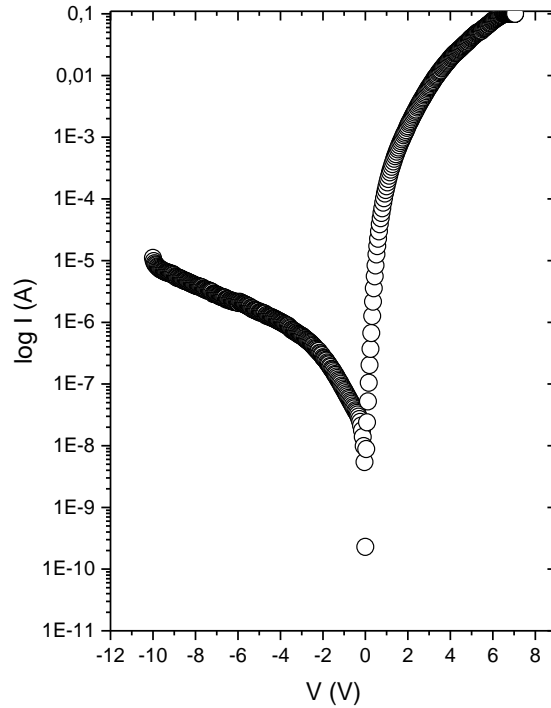


**Şekil 4.39 (b).** *CD-2C-7 filminin  $hv - (\alpha hv)^2$  grafiği*

#### 4.2.4. p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun elektriksel karakterizasyonu

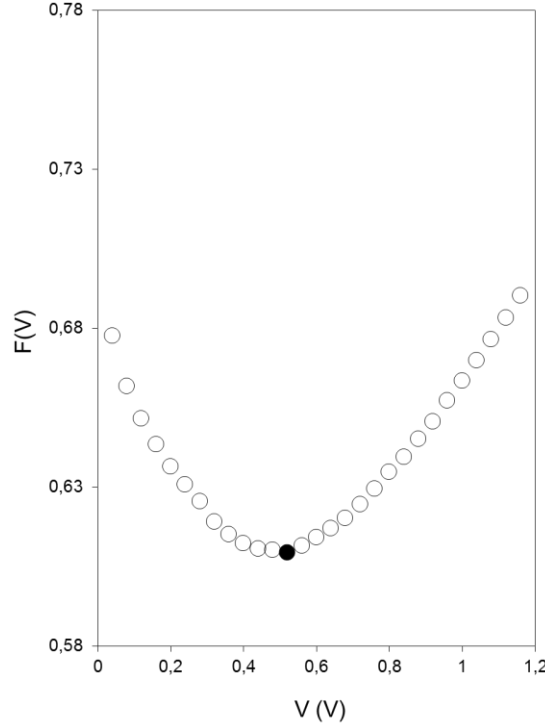
Elde edilen CdO filmleri arasında CD-2S-7 filmi kullanılarak fabrikasyonu yapılan nano yapılı p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun yarı logaritmik  $I - V$  grafiği Şekil 4.40'da verilmiştir. Karakterizasyon sonuçları gözününde bulundurularak bazı filmlerin deneme ölçümleri alınmış ve en iyi sonuçların CD-2S-7 filmi kullanılarak üretilen diyot için elde edildiği görülmüştür. Özellikle CD-4S-7 filminin daha iyi elektriksel sonuçlar vermesi beklenirken CD-2S-7 filminin daha iyi sonuçlar vermesinin sebebi olarak, tüm yüzey düşünüldüğünde kaplama oranının CD-2S-7 filminde daha fazla olmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

CD-2S-7 filmi kullanılarak elde edilen diyotun yarı logaritmik  $I - V$  grafiğinden, idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmıştır. Şekil 4.40'da görüldüğü gibi p-Si/n-CdO diyotu iyi doğrultma özelliği sergilemiştir. Diyotun idealite faktörü 3,02 olarak bulunmuştur. Elde edilen  $n$  değerinin 1'den büyük bir değer olmasının nedeninin; arayüzey durumları, seri direnç değeri ve doğal oksit tabakasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Diyotun oda sıcaklığında engel yüksekliği 0,64 eV bulunmuştur [134].



Şekil 4.40. p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun oda sıcaklığındaki yarı logaritmik  $I - V$  grafiği

Şekil 4.41’de p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun oda sıcaklığındaki  $F(V) - V$  grafiği verilmiştir. Diyotların seri direnç ve engel yüksekliğini hesaplamak için alternatif bir yöntem olan Norde metodu kullanılarak hesaplanmış olan  $\phi_b$  ve  $R_s$  değerleri sırasıyla 0,71 eV ve 7,135 k $\Omega$  dur.

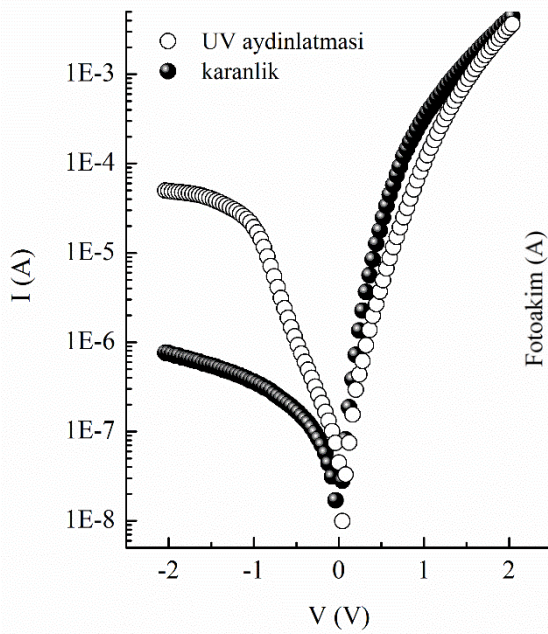


**Şekil 4.41.** *p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun oda sıcaklığındaki  $F(V)$ - $V$  grafiği*

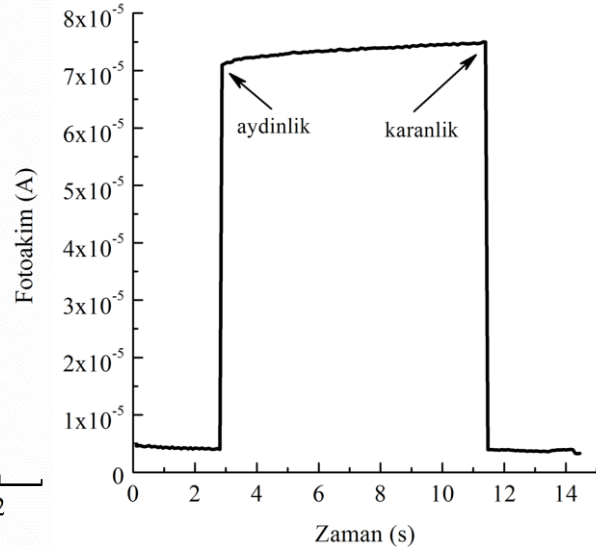
Şekil 4.42’de p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun karanlık ve UV aydınlatması altında yarı logaritmik  $I - V$  karakteristikleri verilmiştir. Şekil 4.42’de görüldüğü gibi, UV lamba ile aydınlatılan diyotun geri besleme akımında artış gözlenmiştir. Maksimum açık devre voltajı  $V_{oc} = 0,04$  V, kısa devre akımı  $I_{sc} = 9,92 \times 10^{-9}$  A olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar diyotun fotovoltaik davranış sergilediğini göstermiştir. Çünkü ışık şiddetine maruz kalmış olan  $pn$  heteroekleminde voltaj ve akım değerlerinin meydana gelmesi fotovoltaik etkinin varlığına işaret eder [134].

Şekil 4.43’te p-Si/n-CdO heteroeklem diyotun zamana bağlı fotoakım ölçümü verilmiştir. Ölçüm oda sıcaklığında,  $100 \text{ mWcm}^{-2}$  aydınlatma şiddeti altında alınmıştır. Fotoakım değerleri lambanın açık ve kapalı olduğu durumlardan sonra zamanla değişim göstermesi, diyotun iyi fotoiletken özellik sergilediğine işaret etmektedir. Diyot üzerine aydınlatma uygulandıktan sonra fotoakım değeri zamana bağlı olarak aniden artış

göstermiş ve fotoakım sabit bir değer almıştır. Diyotun fotoakım değerindeki bu artış p-Si ve n-CdO yarıiletkenlerinin elektron afiniteleri arasındaki farktan kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Lamba kapatıldıktan sonra akım ilk durumuna ulaşmıştır.

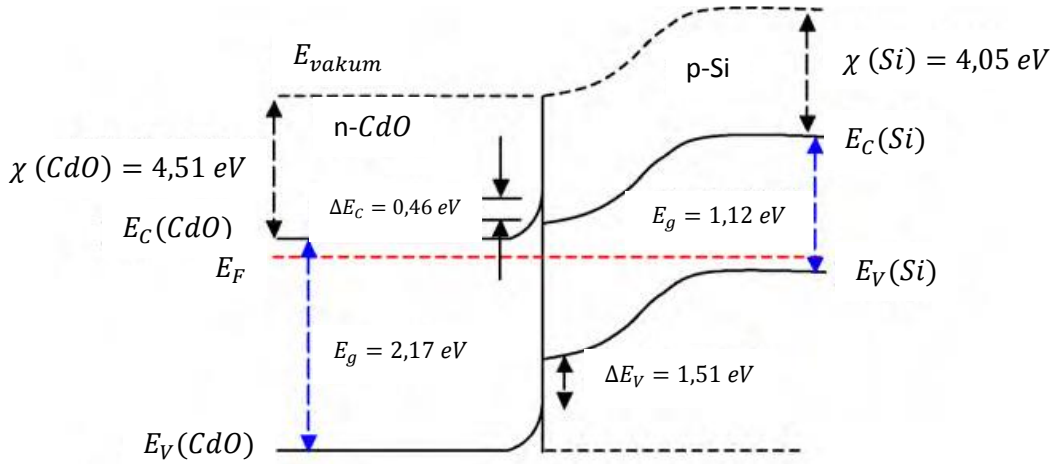


**Şekil 4.42.** *p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun karanlık ve UV aydınlatması altında yarı logaritmik I – V karakteristikleri*



**Şekil 4.43.** *p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun 100 mWcm<sup>-2</sup> aydınlatmada Fotoakım-Zaman grafiği*

Şekil 4.44'te p-Si/n-CdO heteroeklem diyotun ileri besleme durumundaki enerji-band diyagramı verilmiştir. Band yapısı çizilirken arayer atomlarının etkisi ihmal edilmiştir. n-CdO ve p-Si alttaş arasında oluşması ihtimal olan ultra ince silisyum oksit tabakası da ihmal edilmiştir. Diyagramda, yasak aralığı aralığı değerleri  $E_g(\text{CdO}) = 2,17$  eV ve  $E_g(\text{Si}) = 1,12$  eV olarak kullanılmıştır. CdO ve Si için elektron afiniteleri sırasıyla  $\chi(\text{CdO})=4,51$  eV ve  $\chi(\text{Si})=4,05$  eV olarak kullanılmıştır. Şekil 4.44'ten görüldüğü gibi iletim bandı  $\Delta E_C = \chi(\text{CdO}) - \chi(\text{Si}) = 0,46$  eV, valans bandı  $\Delta E_V = E_g(\text{CdO}) - E_g(\text{Si}) + \Delta E_C = 1,51$  eV bulunmuştur.  $\Delta E_V$  değeri  $\Delta E_C$  değerinden daha yüksektir. Bu durum, n-CdO'dan p-Si'ye elektronların geçişinin, p-Si'den n-CdO'ya hol geçişinden daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. İleri besleme durumunda, potansiyel engelin küçük olması nedeniyle elektronlar p-Si tarafına kolayca geçiş yapabilirler. Bu yüzden, ileri besleme akımı yüksek voltaj uygulanması durumunda hızlı bir şekilde artabilir [127].

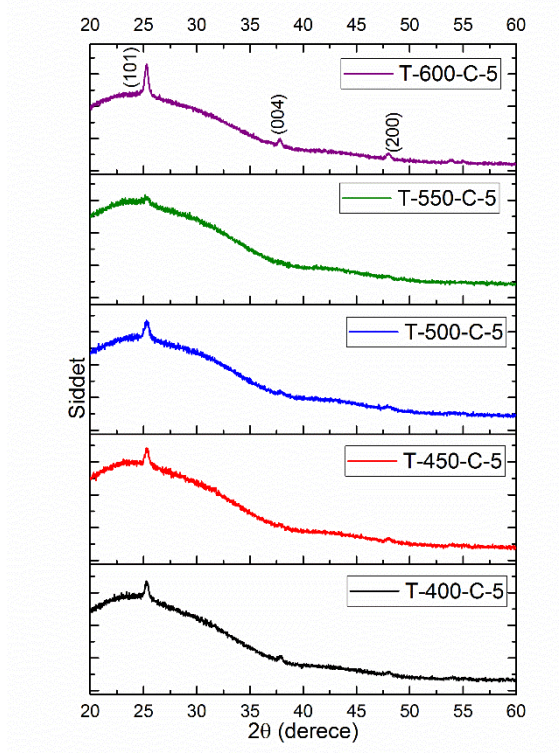


**Şekil 4.44.** Nano yapılı p-Si/n-CdO heteroeklem diyotun enerji-band diyagramı

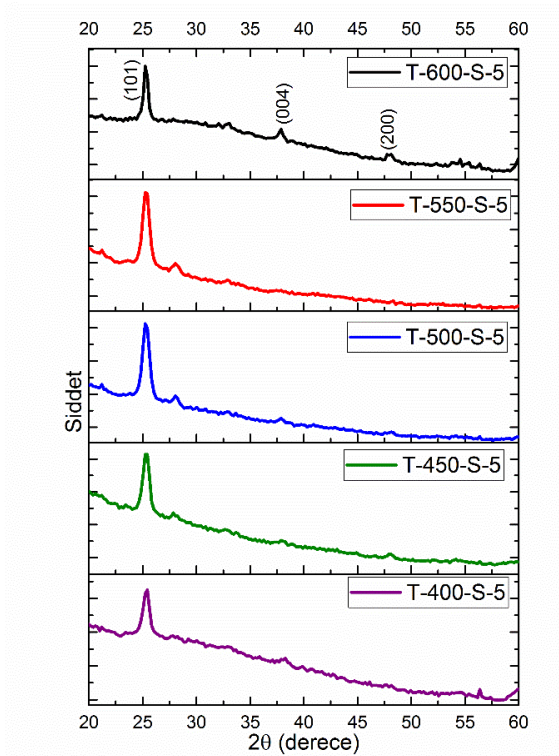
### 4.3. TiO<sub>2</sub>

#### 4.3.1. TiO<sub>2</sub> filmlerinin yapısal özellikleri

Şekil 4.45 ve Şekil 4.46’da farklı depolama sıcaklıklarında sırasıyla cam ve p-Si alttaşlar üzerine 5 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi tüm filmler polikristal ve anataz yapıda kristallenmiştir (JCPDS No:021–1272, TiO<sub>2</sub>). p-Si üzerine elde edilen filmlerin kristallenmelerinin, cam alttaş üzerine elde edilen filmlerden daha iyi olduğu görülmüştür. Bu sonucun p-Si alttaşın tek kristal ve cam alttaşa göre daha pürüzsüz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En belirgin yansıma düzlemlerinin (101), (004) ve (200) düzlemlerinde ki yansımaların olduğu görülmüştür. XRD spektrumları incelendiğinde, en iyi kristallenmelerin 600°C’de elde edilen T-600-C-5 ve T-600-S-5 filmlerine ait olduğu görülmüştür. Dolayısıyla yalnızca T-600-C-5 ve T-600-S-5 filmleri için örgü sabiti değerleri hesaplanabilmiş ve Çizelge 4.25’te verilmiştir. (101) yansıma düzlemi haricindeki piklerin şiddetlerinin düşük olması ve buna bağlı olarak da yarıpik genişliklerinin çok dar olması sebebiyle diğer filmlerin örgü sabitleri hesaplanamamıştır. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri nanometre mertebesinde olup, lineer bir değişim gözlenmemiştir.



**Şekil 4.45.** Farklı depolama sıcaklıklarında cam alttaş üzerine 5 kat elde edilen  $TiO_2$  filmlerinin XRD spektrumları

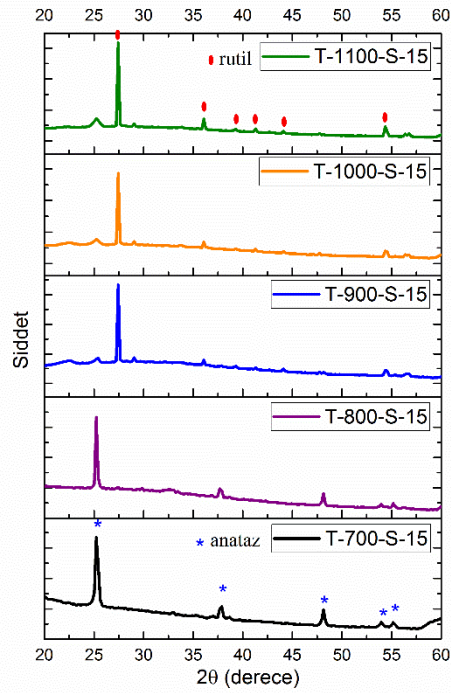


**Şekil 4.46.** Farklı depolama sıcaklıklarında p-Si alttaş üzerine 5 kat elde edilen  $TiO_2$  filmlerinin XRD spektrumları

**Çizelge 4.25.** Farklı depolama sıcaklıklarında cam ve p-Si alttaş üzerine 5 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin ortalama kristal boyutu ve örgü sabiti değerleri

Film kodu	(hkl)	2θ (derece)	FWHM (derece)	d (Å)	TC	D (Ortalama kristal boyutu) (nm)	Örgü sabitleri (Å)	
							a	c
T-400-C-5	101	21,54	0,395	3,51846		21,54	-	-
	004	-	-	-				
	200	-	-	-				
T-400-S-5	101	25,291	0,684	3,51871		12,44	-	-
	004	-	-	-				
	200	-	-	-				
T-450-C-5	101	25,315	0,453	3,51543		18,75	-	-
	004	-	-	-				
	200	-	-	-				
T-450-S-5	101	25,304	0,638	3,51687		13,34	-	-
	004	-	-	-				
	200	-	-	-				
T-500-C-5	101	25,306	0,496	3,51668		17,15	-	-
	004	-	-	-				
	200	-	-	-				
T-500-S-5	101	25,306	0,680	3,51666		12,51	-	-
	004	-	-	-				
	200	-	-	-				
T-550-C-5	101	25,240	0,325	3,52566		26,17	-	-
	004	-	-	-				
	200	-	-	-				
T-550-S-5	101	25,306	0,653	3,51658		13,03	-	-
	004	-	-	-				
	200	-	-	-				
T-600-C-5	101	25,259	0,353	3,52308	1,66	24,10	3,79034	9,52180
	004	37,761	0,453	2,38045	0,77			
	200	47,965	0,524	1,89200	0,58			
T-600-S-5	101	25,285	0,374	3,51953	1,66	22,75	3,78502	9,51508
	004	37,789	0,263	2,37880	0,82			
	200	48,036	0,312	1,89250	0,51			

Şekil 4.47’de farklı depolama sıcaklıklarında p-Si alttaş üzerine 15 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Spektrum incelendiğinde, depolama sıcaklığına bağlı olarak TiO<sub>2</sub> filminin faz değişimi açıkça görülmüştür. 700°C ve 800°C’de yalnızca anataz faz gözlenirken, daha yüksek sıcaklıklarda rutil faz gözlenmiştir (JCPDS No:04–0551, TiO<sub>2</sub>). Rutil faz ilk olarak 900°C’de açıkça görülmüştür. Depolama sıcaklığının artmasına bağlı olarak rutil faza ait piklerin şiddetleri daha da artmıştır. Çizelge 4.2’de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerine ait (hkl), 2θ, FWHM, d ve TC değerleri verilmiştir. Çizelge 4.26 incelendiğinde, en yüksek TC değerlerinin, T-700-S-15 ve T-800-S-15 filmleri için (101) düzlemine, diğer filmlerin ise (110) düzlemine ait olduğu açıkça görülmüştür. Ayrıca artan depolama sıcaklığına bağlı olarak rutil fazın TC değerinin arttığı dolayısıyla kristallenmenin de iyileştiği görülmüştür. Çizelge 4.27’de farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerine ait ortalama kristal boyutu değerleri ve tetragonal yapıya ait örgü sabiti değerleri verilmiştir. Depolama sıcaklığındaki artışın tane sınırlarında hareketliliği indüklemesi nedeniyle, artan depolama sıcaklığına bağlı olarak filmlerin ortalama kristal boyutu değerleri yaklaşık 37 nm’den 115 nm’ye artmıştır. Dolayısıyla, artan depolama sıcaklığı daha fazla tanenin birikmesine yol açmıştır.



**Şekil 4.47.** Farklı depolama sıcaklıklarında p-Si alttaş üzerine 15 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin XRD spektrumları

**Çizelge 4.26.** Farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen  $TiO_2$  filmlerinin ( $hkl$ ),  $2\theta$ ,  $FWHM$ ,  $d$ , ve  $TC$  değerleri

Film kodu	Faz	( $h k l$ )	$2\theta$ (derece)	$d$ (Å)	$FWHM$ (derece)	$I/I_0$	$TC$
T-700-S-15	Anataz	(101)	25,269	3,522	0,230	<b>100</b>	2,71
		(004)	37,776	2,380	0,256	30	0,81
		(200)	48,088	1,891	0,235	26	0,69
		(105)	53,921	3,520	0,274	15	0,41
		(211)	55,148	1,665	0,331	14	0,38
T-800-S-15	Anataz	(101)	25,259	3,523	0,124	<b>100</b>	2,18
		(110)	27,333	3,258	0,078	25,4	0,55
		(004)	37,737	2,382	0,138	30	0,65
		(200)	48,054	1,892	0,127	28	0,61
T-900-S-15	Rutil	(101)	25,320	3,515	0,117	28	1,02
		(110)	27,430	3,249	0,079	<b>100</b>	3,68
		(101)	36,073	2,488	0,104	21	0,78
		(200)	39,276	2,291	0,192	15	0,55
		(111)	41,248	2,186	0,123	15	0,54
		(210)	44,088	2,052	0,124	13	0,47
		(211)	54,362	1,686	0,216	13	0,46
T-1000-S-15	Rutil	(101)	25,306	3,517	0,592	21	0,79
		(110)	27,421	3,250	0,083	<b>100</b>	3,82
		(101)	36,100	2,486	0,103	22	0,86
		(200)	39,248	2,296	0,096	14	0,52
		(111)	41,259	2,187	0,103	15	0,57
		(210)	44,068	2,05	0,120	12	0,44
		(211)	54,352	1,686	0,138	13	0,51
T-1100-S-15	Rutil	(101)	25,225	3,528	0,701	16	0,69
		(110)	27,440	3,247	0,074	<b>100</b>	4,29
		(101)	36,091	2,487	0,087	20	0,85
		(200)	39,091	2,295	0,143	9	0,40
		(111)	41,255	2,187	0,083	12	0,52
		(210)	44,071	2,053	0,112	8	0,34
		(211)	54,368	1,687	0,124	13	0,57

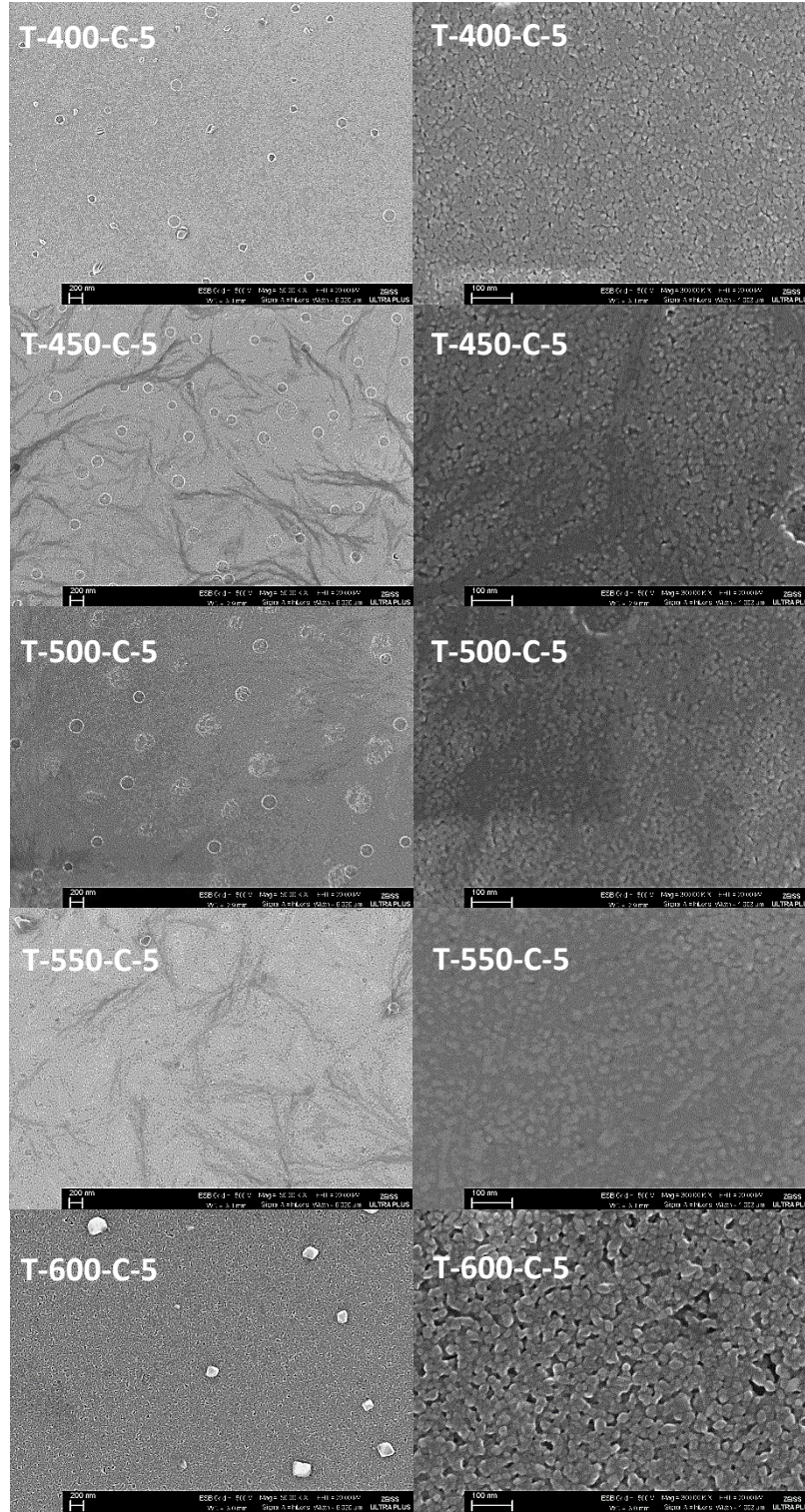
**Çizelge 4.27.** Farklı depolama sıcaklıklarında elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin ortalama kristal boyutu ve örgü sabiti değerleri

Film kodu	D (Ortalama kristal boyutu) (nm)	Örgü sabitleri (Å)	
		a	c
T-700-S-15	36,99	3,78120	9,51800
T-800-S-15	68,61	3,78372	9,52572
T-900-S-15	108,16	4,59472	2,95921
T-1000-S-15	102,95	4,59611	2,95585
T-1100-S-15	115,48	4,59198	2,95793

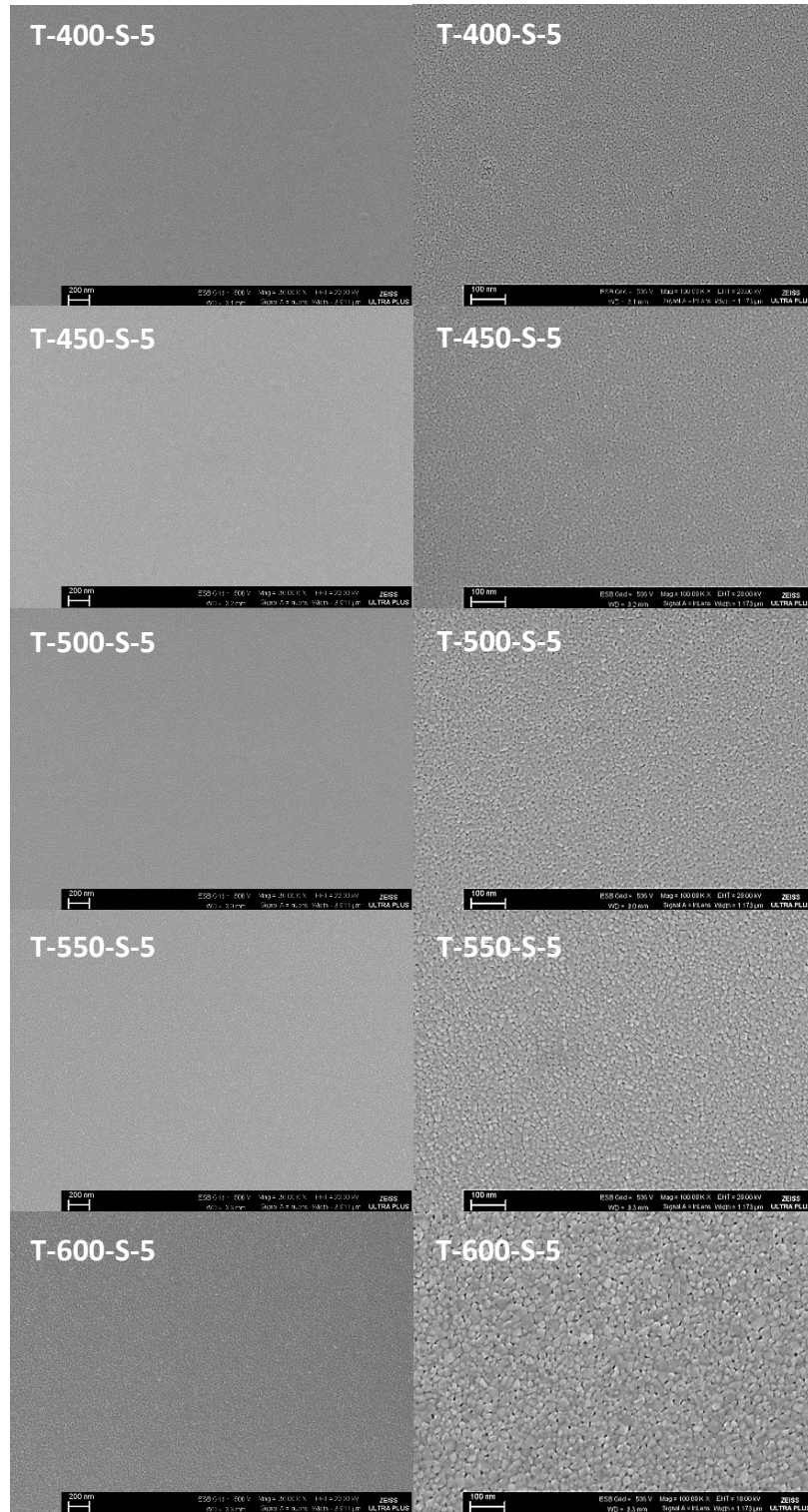
#### 4.3.2. TiO<sub>2</sub> filmlerinin morfolojik özellikleri

Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’da farklı depolama sıcaklıklarında sırasıyla cam ve p-Si alttaşlar üzerine 5 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen filmlerden p-Si alttaş üzerine elde edilenlerin cam alttaşa göre yüzeylerinin daha homojen olarak kaplandıkları, pürüzsüz bir yüzeye sahip oldukları görülmüştür. Hem cam hem de p-Si alttaş üzerine elde edilen filmlere bakıldığında, depolama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak tane boyutlarında artış gözlenmiştir ve nano boyuttaki tanelerden meydana geldikleri görülmüştür. Gözlenen sonuçların XRD sonuçlarından elde edilenler ile uyumlu olduğu görülmüştür.

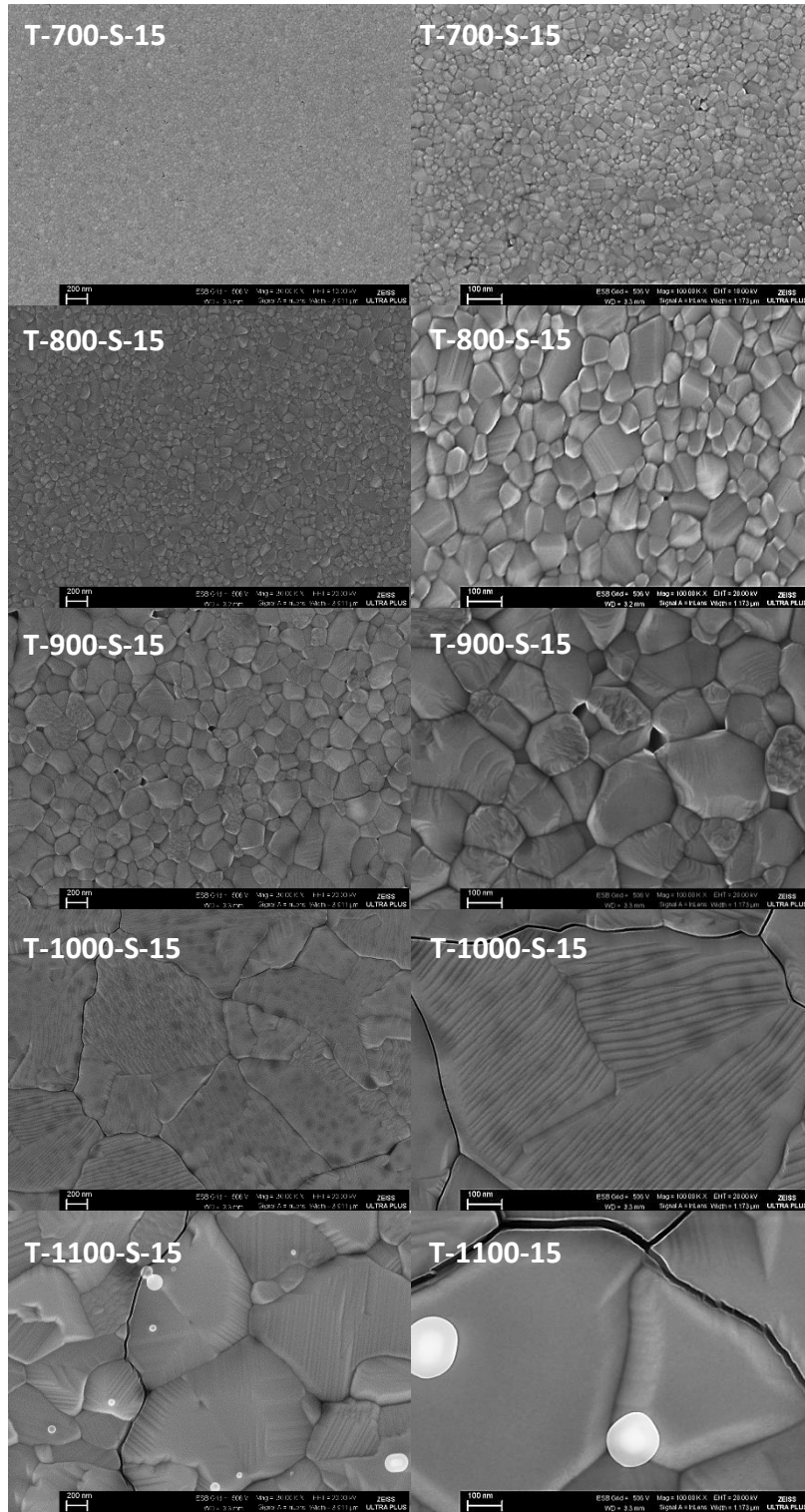
Şekil 4.50’da farklı depolama sıcaklıklarında p-Si alttaşlar üzerine 15 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, depolama sıcaklığının artışına bağlı olarak kristal boyutunda artışın olduğu açıkça görülmüştür. Aynı eğilim XRD spektrumları incelendiğinde görülmüştür. Anataz fazdan rutil faza geçişte büyük bir artış görülmüştür. Depolama sıcaklığının 700°C’den 900°C’ye artışıyla kristal boyutundaki artışla birlikte tane kenarlarındaki keskinlikte artmıştır. 1000°C ve 1100°C’de film yüzeyinde kırıklar görülmüştür. Kristal büyümeyi hızlandıran tüm bu sonuçlar termal etkiden kaynaklanmıştır [115].



**Şekil 4.48.** Farklı depolama sıcaklıklarında cam alttaşlar üzerine 5 kat elde edilen  $TiO_2$  filmlerinin 50.000 ve 300.000 büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri



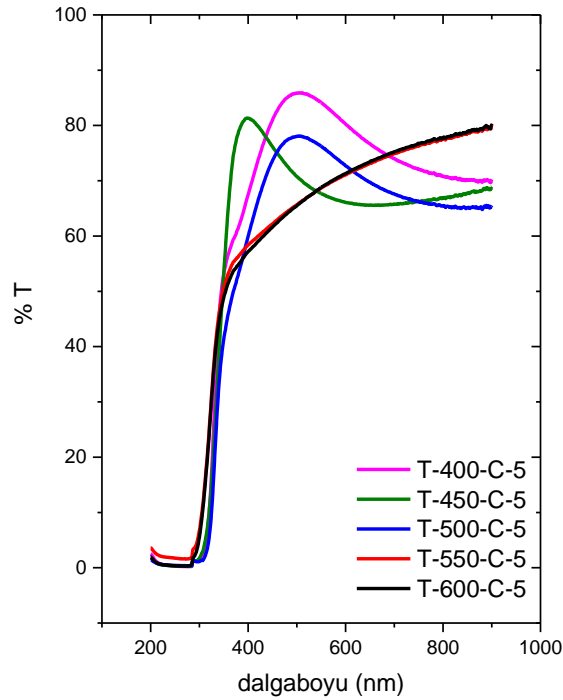
**Şekil 4.49.** Farklı depolama sıcaklıklarında p-Si alttaşlar üzerine 5 kat elde edilen  $TiO_2$  filmlerinin 30.000 ve 100.000 büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri



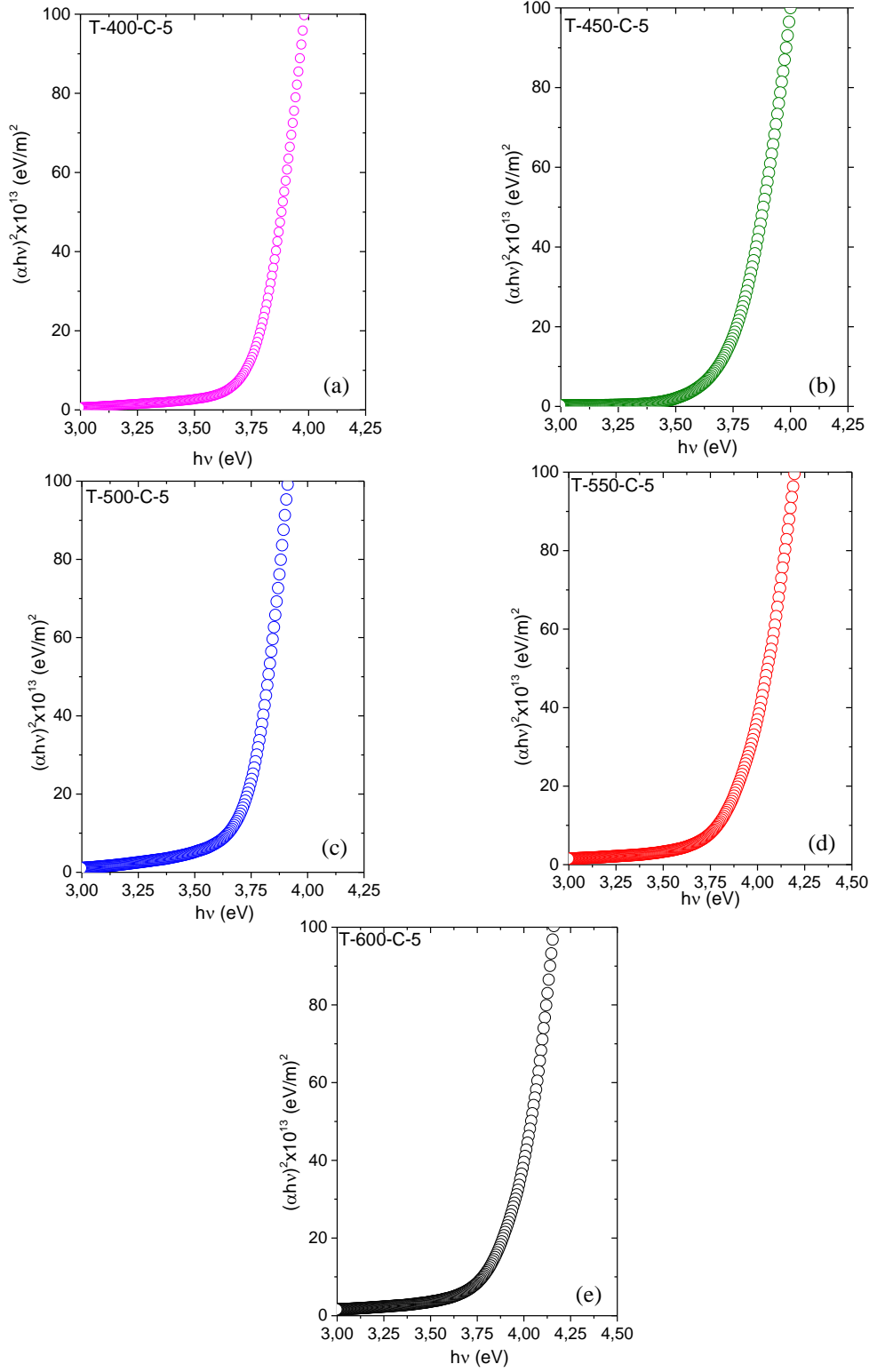
**Şekil 4.50.** Farklı depolama sıcaklıklarında p-Si alttaşlar üzerine 15 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin 30.000 ve 100.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri

### 4.3.3. TiO<sub>2</sub> filmlerinin optik özellikleri

Cam alttaşlar üzerine elde edilen filmlerin %T spektrumları ve  $h\nu - (ah\nu)^2$  grafikleri sırasıyla Şekil 4.51 ve Şekil 4.52’de verilmiştir. Çizelge 4.28’de filmlerin görünür bölgedeki ortalama %T değerleri ile  $E_g$  değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlar filmlerin %T ve  $E_g$  değerlerinin artan depolama sıcaklığı ile azalma eğiliminde olduğunu göstermiştir. %T değerleri incelendiğinde, ayrıca tüm filmlerin yüksek geçirgenliğe sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuç, filmlerin homojen olmasına ve yüzey pürüzlülüğünün düşük olmasına işaret etmektedir.  $E_g$  değerleri incelendiğinde ise, depolama sıcaklığının artışı ile azalma eğiliminde olduğu görülmüştür.  $E_g$  değerindeki bu azalmanın, artan depolama sıcaklığına bağlı olarak oksijen boşluklarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [135, 136].



**Şekil 4.51.** Farklı depolama sıcaklıklarında cam alttaşlar üzerine elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin %T spektrumları



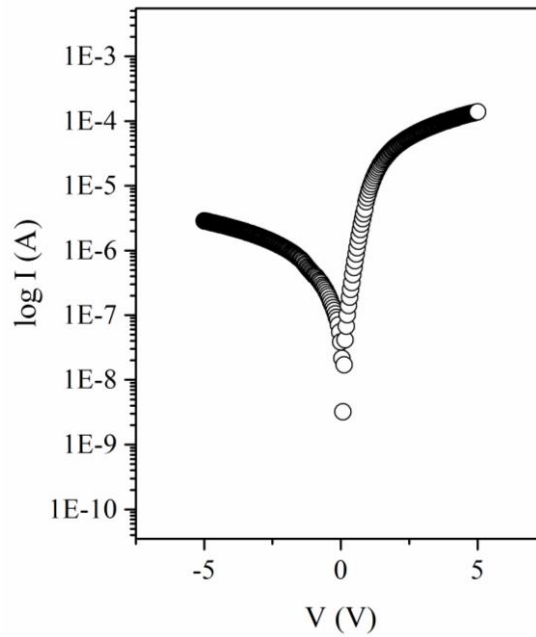
Şekil 4.52 (a-e). Farklı depolama sıcaklıklarında cam alttaşılar üzerine elde edilen  $\text{TiO}_2$  filmlerinin  $h\nu - (\alpha h\nu)^2$  grafikleri

**Çizelge 4.28.** Farklı depolama sıcaklıklarında cam alttaşlar üzerine elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerinin görünür bölgedeki ortalama %T ve E<sub>g</sub> değerleri

Film kodu	% T	E <sub>g</sub> (eV)
T-400-C-5	78	3,76
T-450-C-5	69	3,52
T-500-C-5	71	3,53
T-550-C-5	70	3,38
T-600-C-5	70	3,49

#### 4.3.4. p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun elektriksel karakterizasyonu

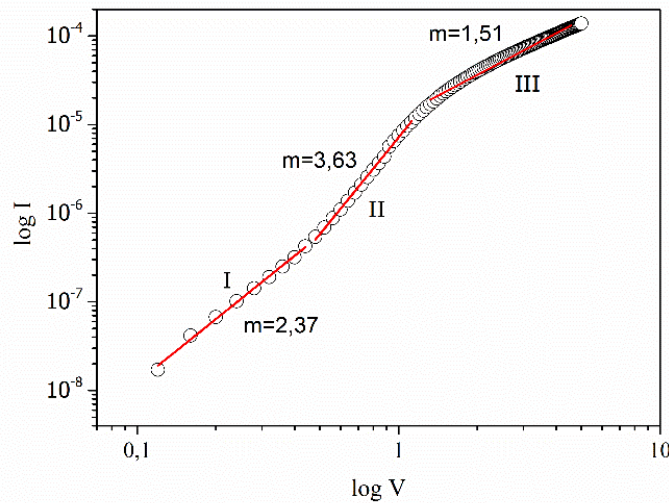
Şekil 4.53'te oda sıcaklığında nano yapılı p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun  $I - V$  grafiği verilmiştir. Karakterizasyon sonuçları gözününde bulundurularak bazı filmlerin deneme ölçümleri alınmış ve en iyi sonuçların T-700-S-15 filmi kullanılarak üretilen diyot için elde edildiği görülmüştür. Şekil 4.53'ten diyotun doğrultma özelliğine sahip olduğu görülmüştür. Yarı logaritmik  $I - V$  grafiği yardımıyla diyot parametreleri belirlenmiştir. Nano yapılı p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyot için  $n$  ve  $\phi_b$  değerleri sırasıyla 5,39 ve 0,58 eV olarak bulunmuştur. İdaealite faktörünün büyük çıkmasına diyotun eklemine yer alan ara yüzey durumlarının varlığının neden olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4.53.** Nano yapılı p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun oda sıcaklığındaki yarı logaritmik  $I - V$  grafiği

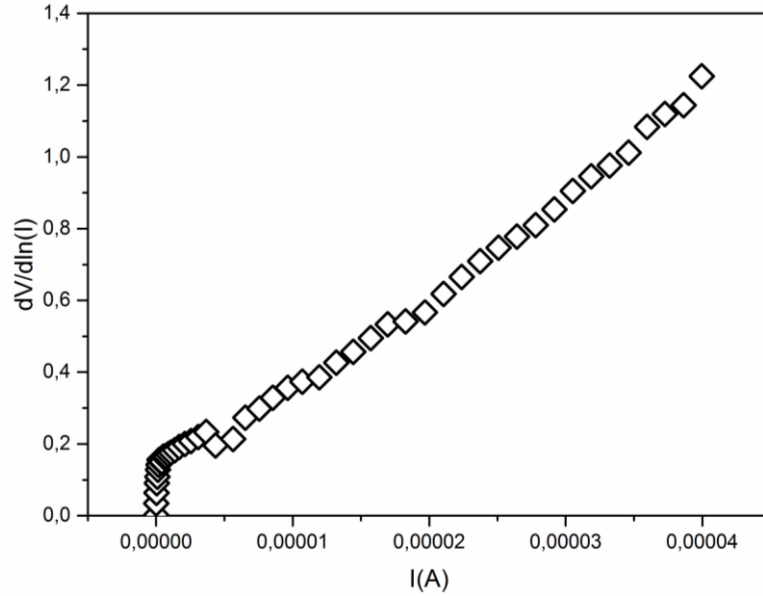
Aynı zamanda p-Si yüzeyindeki oksit tabakanın varlığı ve seri direnç değerinin büyük olması da idealite faktörünün değerini etkilemiştir [137].

Daha önce de bahsedildiği gibi  $n$  değerinin büyük çıkmasının nedeni arayüzey durumları ve tuzaklardır. Bu nedenle heteroeklem diyotun davranışını kontrol eden iletim mekanizmasını değerlendirmek için  $\log I - \log V$  grafiğinden yararlanılmıştır. Şekil 4.54'te nano yapılı p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun  $\log I - \log V$  grafiği verilmiştir. Şekil 4.54'ten görüldüğü gibi, eğri üç lineer bölgeden oluşmuştur. Her bir bölgenin farklı eğim ( $m$ ) değerine sahip olan farklı iletim mekanizmalarına karşılık gelmektedir. Akım taşınım mekanizması arayüzeydeki iç tuzakların varlığına göre değişim göstermektedir. I. bölgede ( $0,12 \leq V \leq 0,44$ ),  $m$  değeri 2,37 olarak bulunmuştur. Bu değer heteroeklem diyotun iletim mekanizmasının bu voltaj aralığında SCLC mekanizması tarafından kontrol edildiğini göstermiştir. Çünkü SCLC mekanizmasının baskın olduğu durumlarda  $m \sim 2$ 'dir [137, 138]. II. bölgede ( $0,48 \leq V \leq 1,2$ ),  $m$  değeri 3,63 olarak bulunmuştur. Bu değer, diyotun iletim mekanizmasının bu voltaj aralığında TCLC mekanizması tarafından kontrol edildiğini göstermiştir. Bu mekanizmada, yasak band içerisindeki tuzak seviyesinin enerji dağılımından dolayı  $m$  değeri 2 den büyük değerler alır [139]. III. bölgede ( $1,8 \leq V \leq 5$ ),  $m=1,51$  olarak bulunmuştur. Bu değer, bu voltaj aralığında SCLC mekanizmasının baskın olduğuna işaret etmiştir. Bu bölgede, tüm tuzaklar doldurulduğundan, akım alan sınırlı (space-limited) bölgeye yaklaşır ve serbest taşıyıcıların elektrik alana etkileri baskındır [138].



Şekil 4.54. Nano yapılı p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun  $\log I - \log V$  grafiği

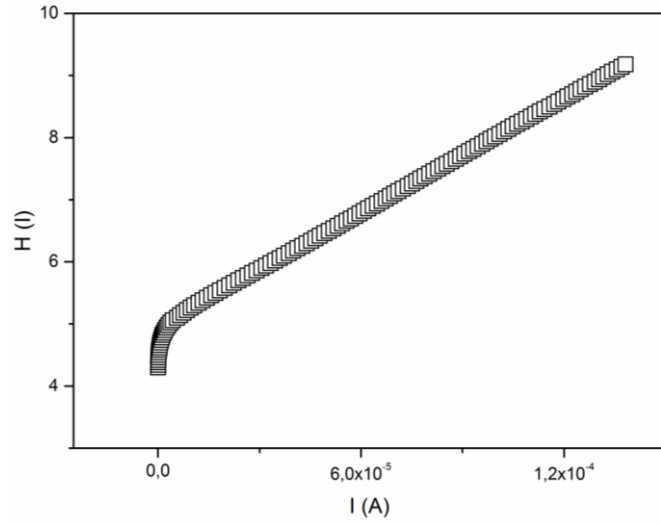
Seri direncin ( $R_s$ ) değerini belirleyebilmek için Cheung metodundan faydalanılmıştır. Şekil 4.55'te  $dV/d\ln(I) - I$  grafiği verilmiştir. Grafiğin eğimi ve y-eksenini kestiği noktadaki değer sırasıyla  $n$  ve  $R_s$  değerini vermektedir.  $n$  ve  $R_s$  değerleri sırasıyla 5,03 ve 33,5 k $\Omega$  olarak bulunmuştur.  $n$  değeri  $\ln I - V$  grafiği yardımıyla bulunan değerden biraz farklı çıkmıştır. Bu farklılığın seri dirençten ve ara yüzey durumlarından kaynaklandığı düşünülmektedir [139].



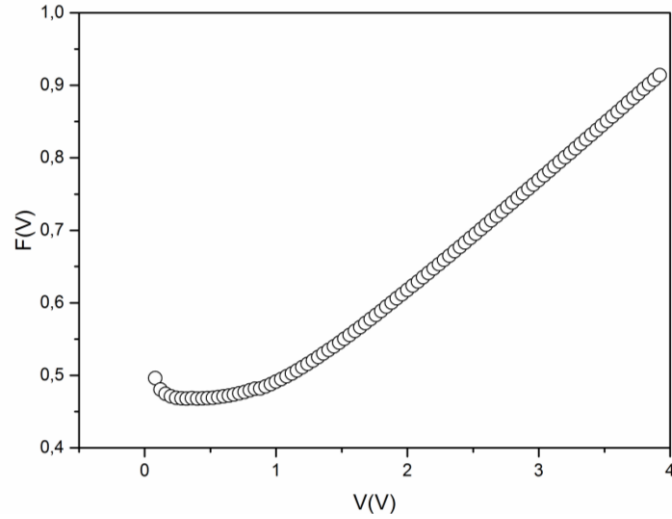
**Şekil 4.55.** Nano yapılı  $p\text{-Si}/n\text{-TiO}_2$  heteroeklem diyotun ileri besleme bölgesinde  $\frac{dV}{d(\ln V)} - I$  grafiği

Şekil 4.56'da  $H(I) - I$  grafiği verilmiştir. Grafikteki eğrinin y-eksenini kestiği nokta  $n\phi_b$  değerini vermektedir. Bu eğrinin eğimi  $R_s$  değerini vermektedir. Bu  $R_s$  değeri, Cheung metodu kullanılarak bulunan  $R_s$  değerinin tutarlılığını kontrol etmek için kullanılmıştır. Şekil 4.56'dan heteroeklem diyotun  $\phi_b$  ve  $R_s$  değerleri sırasıyla 0,68 eV ve 30,8 k $\Omega$  bulunmuştur.  $dV/d\ln(I) - I$  ve  $H(I) - I$  grafikleri yardımıyla bulunan  $R_s$  değerleri birbirine çok yakın bulunmuştur.

$R_s$  değerini kontrol etmek için bir başka yöntem ise Norde metodudur. Şekil 4.57'de  $F(V) - V(V)$  grafiği verilmiştir. Bu metot kullanılarak, Şekil 4.57 yardımıyla heteroeklem diyotun  $\phi_b$  ve  $R_s$  değerleri sırasıyla 0,51 eV ve 49,0 k $\Omega$  bulunmuştur. Cheung ve Norde metotları ile bulunan  $R_s$  değerlerinde farklılık görülmüştür. Bu farkın sebebi olarak, Cheung modelinin yüksek voltaj bölgesinde, Norde modelinin tüm voltaj bölgesinde uygulanmış olmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür [140].



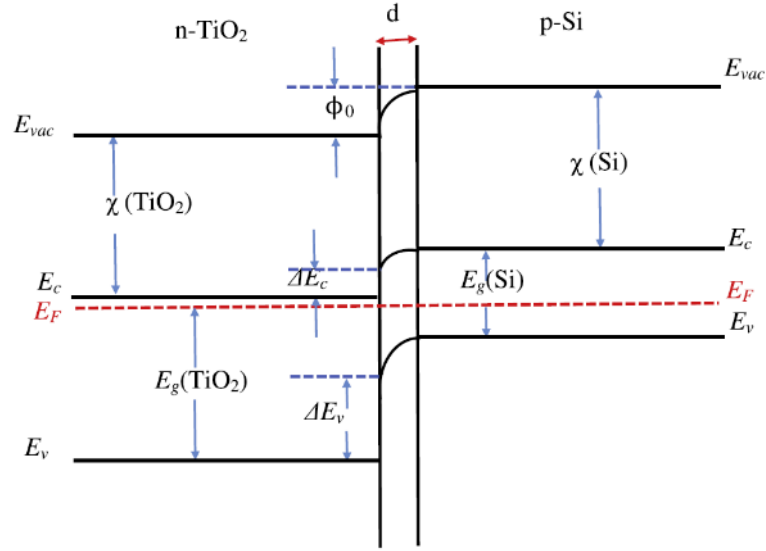
**Şekil 4.56.** Nano yapılı p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun  $H(I) - I$  grafiği



**Şekil 4.57.** Nano yapılı p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun  $F(V) - V$  grafiği

Şekil 4.58’de nano yapılı p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun ideal enerji-band diyagramı verilmiştir. Band diyagramını oluştururken TiO<sub>2</sub> ve p-Si’nin elektron afiniteleri ( $\chi$ ) sırasıyla 4,30 eV ve 4,05 eV alınmıştır.  $E_g$  değerleri ise TiO<sub>2</sub> ve p-Si için sırasıyla 3,15 eV ve 1,12 eV olarak alınmıştır. Elektron için engel enerjisi  $\Delta E_c = \chi(TiO_2) - \chi(Si) = 4,30 - 4,05 = 0,25 \text{ eV}$  ve hol için engel enerjisi  $\Delta E_v = E_g(TiO_2) + \Delta E_c - E_g(Si) = 3,15 + 0,25 - 1,12 = 2,28 \text{ eV}$  bulunmuştur. Valans bandındaki band süreksizliğinin (band discontinuity), iletim bandındakinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle heteroeklem diyotun ileri besleme  $I - V$  grafiğine bakıldığında, elektron iletimin daha baskın olduğu söylenebilir. Bu sonuç, heteroeklem

diyotun ileri besleme durumunda çok yüksek akım geçirmesi, ters besleme durumunda ise çok düşük akım geçirmesi anlamına gelmektedir.

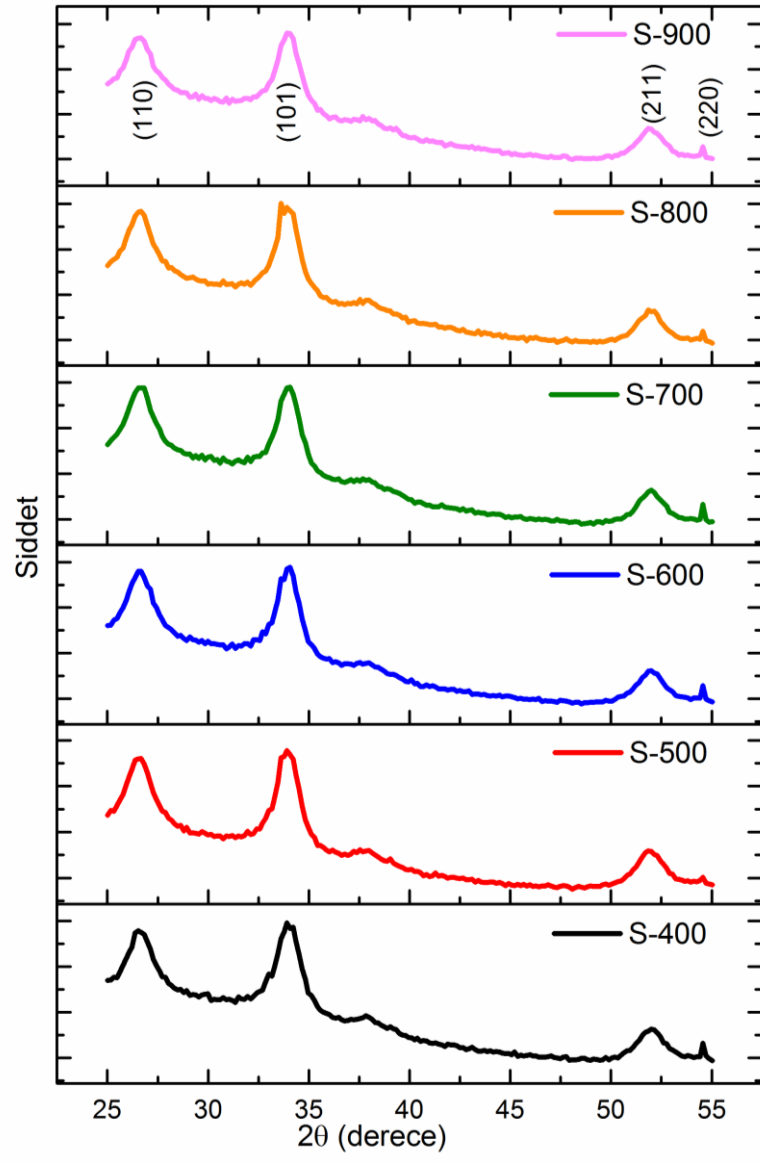


Şekil 4.58. Nano yapılı p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun ideal enerji-band diyagramı

#### 4.4. SnO<sub>2</sub>

##### 4.4.1. SnO<sub>2</sub> filmlerinin yapısal özellikleri

Şekil 4.59’da farklı tavlama sıcaklıklarında p-Si alttaş üzerine elde edilen SnO<sub>2</sub> filmlerinin XRD spektrumları verilmiştir. Tüm filmler polikristal yapıya sahip olup, tetragonal yapıda (JCPDS kart no: 041–1445, SnO<sub>2</sub>) kristallenmişlerdir. Filmlerin (110), (101), (211) ve (220) yansıma düzlemlerine sahip olduğu görülmüştür. Çizelge 4.29’da filmlere ait  $2\theta$ ,  $FWHM$ ,  $d$ ,  $TC$ , örgü sabitleri ve ortalama kristal boyutu değerleri verilmiştir. Hesaplanan ortalama kristal boyutu değerleri nanometre mertebesinde olup, artan tavlama sıcaklığı ile lineer bir değişim gözlenmemiş ancak artış eğiliminde olduğu görülmüştür. En yüksek  $TC$  değerinin (101) düzleminde olduğu görülmüştür. En iyi  $TC$  değeri S-600 filminde elde edilmiştir.



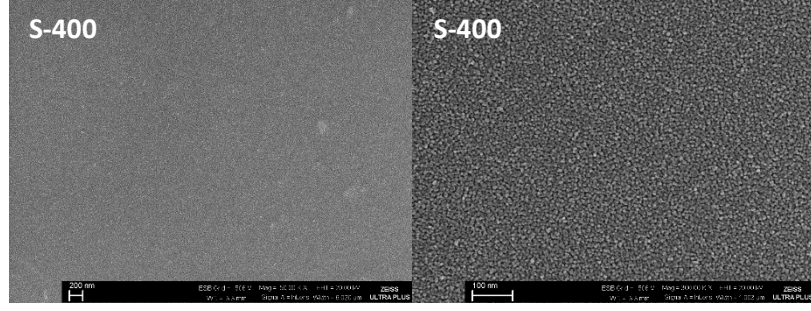
Şekil 4.59. Elde edilen SnO<sub>2</sub> filmlerinin XRD spektrumları

**Çizelge 4.29.** Farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen SnO<sub>2</sub> filmlerinin (*hkl*),  $2\theta$ , *FWHM*, *d*, *TC*, örgü parametreleri ve ortalama kristal boyutu değerleri

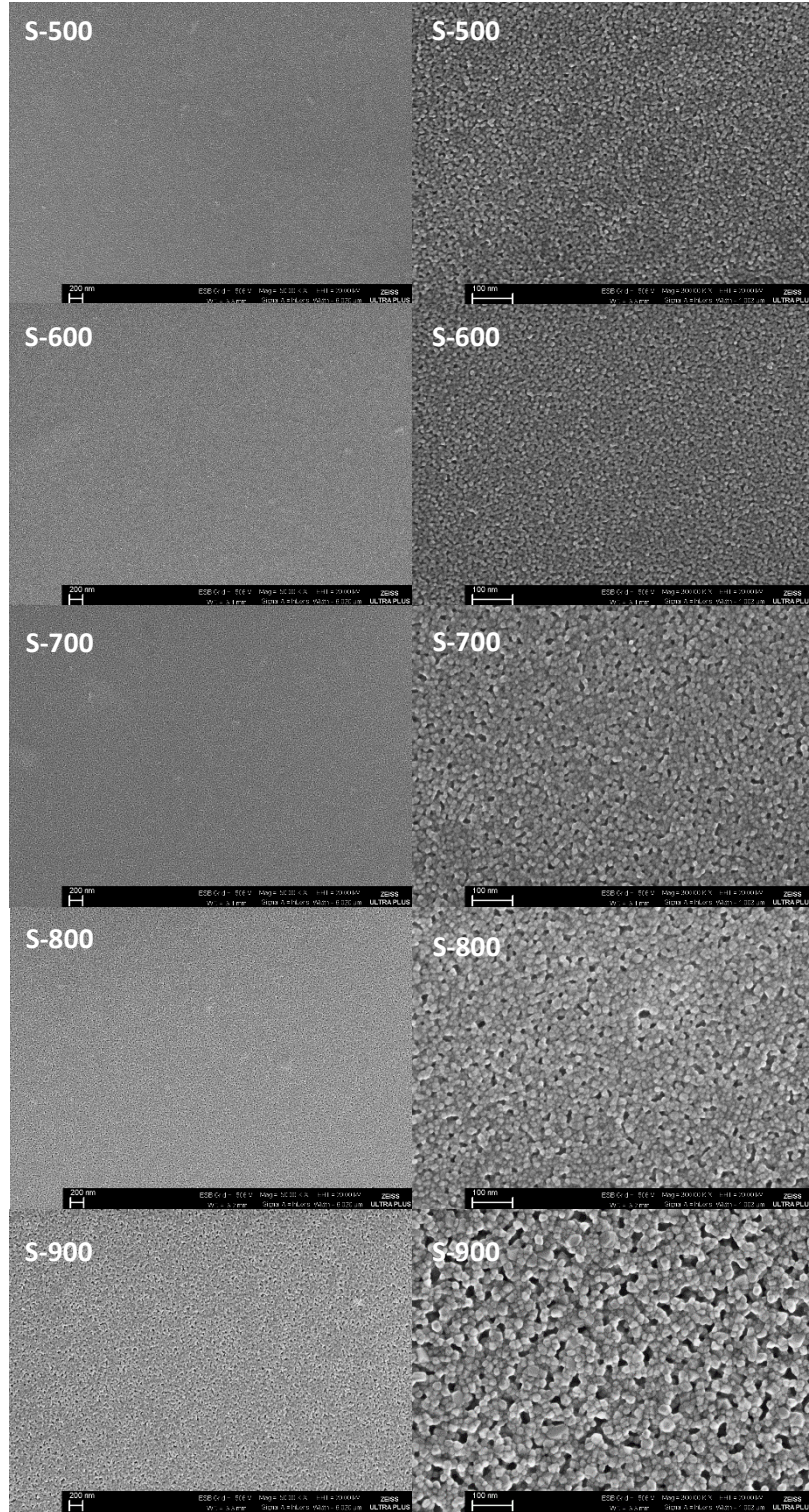
Film kodu	( <i>hkl</i> )	$2\theta$ (derece)	<i>FWHM</i> (derece)	<i>d</i> (Å)	<i>TC</i>	<i>a</i> (Å)	<i>c</i> (Å)	<i>D</i> (Ortalama kristal boyutu) (nm)
S-400	110	26,730	1,409	3,33	0,98	4,73761	3,19694	7,37
	101	33,632	1,177	2,66	<b>1,31</b>			
	211	51,793	-	1,76	0,71			
S-500	110	26,279	1,408	3,39	0,97	4,75173	3,19263	6,34
	101	33,606	1,368	2,66	<b>1,30</b>			
	211	51,739	1,171	1,76	0,73			
S-600	110	26,136	1,348	3,40	0,95	4,75175	3,21001	8,15
	101	33,427	1,065	2,68	<b>1,33</b>			
	211	51,757	1,282	1,76	0,73			
S-700	110	26,570	1,209	3,35	1,00	4,74053	3,18299	9,12
	101	33,895	0,952	2,64	<b>1,26</b>			
	211	51,918	1,302	1,76	0,74			
S-800	110	26,545	1,202	3,36	0,99	4,74503	3,18338	8,51
	101	33,882	1,020	2,64	<b>1,29</b>			
	211	51,884	1,295	1,76	0,72			
S-900	110	26,561	1,185	3,35	0,98	4,74220	3,18053	8,19
	101	3,910	1,060	2,64	<b>1,29</b>			
	211	51,917	1,307	1,76	0,74			

#### 4.4.2. SnO<sub>2</sub> filmlerinin morfolojik özellikleri

Şekil 4.60'da 400°C depolama sıcaklığında elde edilen SnO<sub>2</sub> filminin farklı büyütmelerdeki FESEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden filmin homojen kaplandığı görülmüştür. Şekil 4.61'de ise farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen SnO<sub>2</sub> filmlerinin FESEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerden de anlaşıldığı gibi artan tavlama sıcaklığı ile izotermal büyüme gerçekleşmiş ve bu durum filmlerin ortalama kristal boyutlarında artışa sebep olmuştur. Sıcaklığın daha da arttırılmasıyla taneler arası boşluklar oluşmaya başlamıştır.



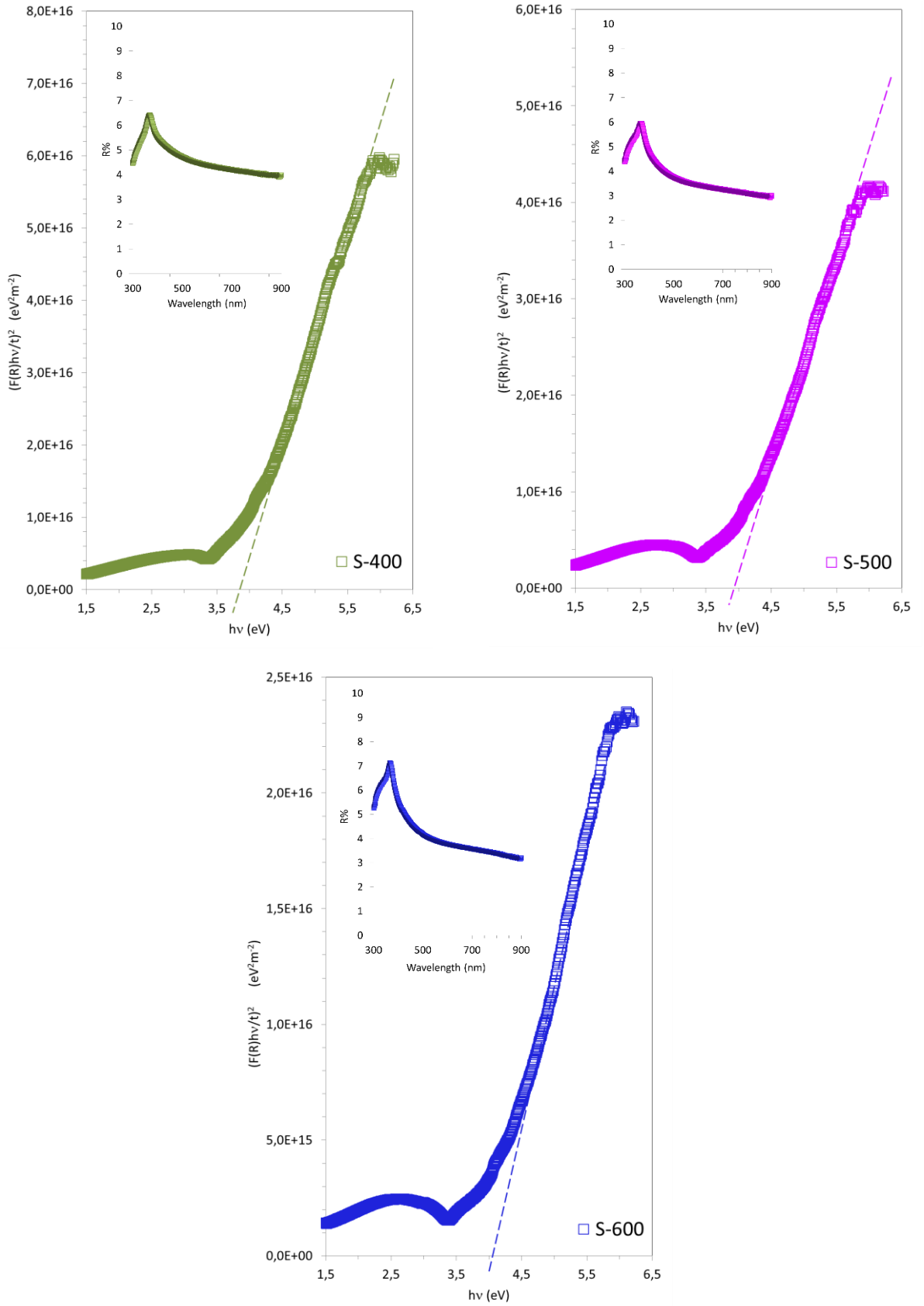
**Şekil 4.60.** *400°C depolama sıcaklığında elde edilen SnO<sub>2</sub> filminin 50.000 ve 300.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri*



**Şekil 4.61.** Farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen  $\text{SnO}_2$  filmlerinin 50.000 ve 300.000 büyütmelerdeki FESEM görüntüleri

#### 4.4.3. SnO<sub>2</sub> filmlerinin optik özellikleri

SnO<sub>2</sub> filmlerinin  $E_g$  değerlerini belirleyebilmek için difüz reflektans spektrumlarından yararlanılmıştır. Şekil 4.62’de içte S-400, S-500 ve S-600 filmlerine ait difüz reflektans spektrumları verilmiştir. Filmlerin  $E_g$  değerlerini belirleyebilmek için difüz reflektans değerleri Kubelka-Munk fonksiyonu yardımıyla absorpsiyon değerlerine dönüştürülmüştür. Aynı filmler için  $hv - (F(R)hv/t)^2$  grafikleri Şekil 4.62’de verilmiştir. S-400, S-500 ve S-600 filmleri için  $E_g$  değerleri sırasıyla 3,70; 3,86 ve 4,06 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, artan tavlama sıcaklığı ile birlikte  $E_g$  değerlerinin arttığını göstermiştir. Tavlama sıcaklığının SnO<sub>2</sub> filmlerinin  $E_g$  değerlerinde önemli rolü vardır. Genel olarak saf olmayan  $OH^-$  iyonlarının varlığı bant aralığının düşmesine neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda  $OH^-$  iyonlarının buharlaşması, yasak enerji aralığında artışa neden olabileceği düşünülmektedir [141]. Diğer filmlerin  $E_g$  değerlerinin hesaplamalarının yapılabilmesi için gerekli olan difüz reflektans spektrumları alınamamıştır. Bu durumun, tavlama sıcaklığına bağlı olarak film kalınlığının azalmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

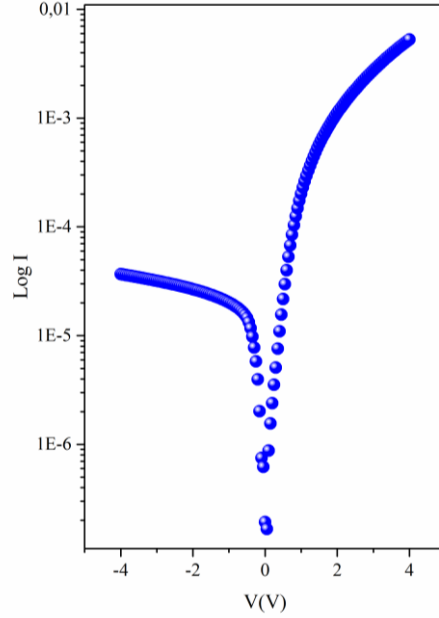


Şekil 4.62. Farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen SnO<sub>2</sub> filmlerinin reflektans spektrumları ve  $h\nu-(F(R)h\nu/t)^2$  grafikleri

#### 4.4.4. p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun elektriksel özellikleri

Elde edilen SnO<sub>2</sub> filmleri arasından S-600 kodlu film ile fabrikasyonu yapılan nano yapılı p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun yarı logaritmik  $I - V$  grafiği Şekil 4.63'te verilmiştir. Karakterizasyon sonuçları gözününde bulundurularak diğer filmlerin deneme ölçümleri de alınmış fakat en iyi doğrultma S-600 filmi kullanılarak üretilen diyot için bulunmuştur.

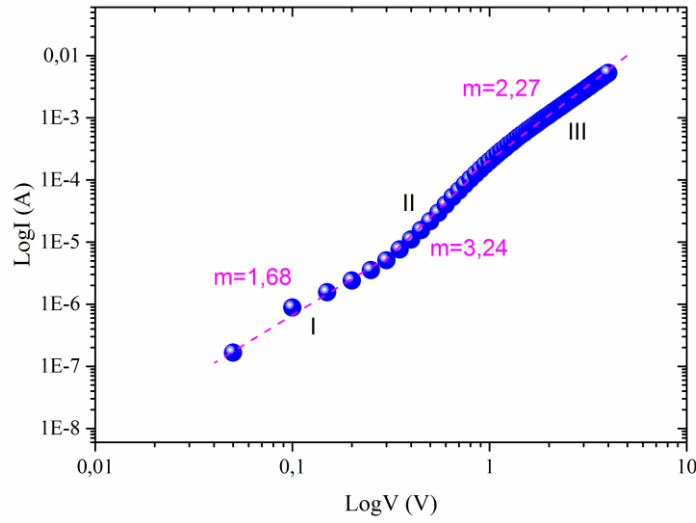
S-600 filmi kullanılarak elde edilen diyotun yarı logaritmik  $I - V$  grafiğinden, idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmıştır. Diyotun idealite faktörü 5,22 olarak bulunmuştur. Diyotun oda sıcaklığında engel yüksekliği ise 0,49 eV olarak bulunmuştur. Elde edilen  $n$  değerinin 1'den büyük bir değer olmasının nedeninin arayüzey durumları, seri direnç değeri ve doğal oksit tabakasından kaynaklandığı düşünülmüştür.



**Şekil 4.63.** p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun oda sıcaklığındaki yarı logaritmik  $I - V$  grafiği

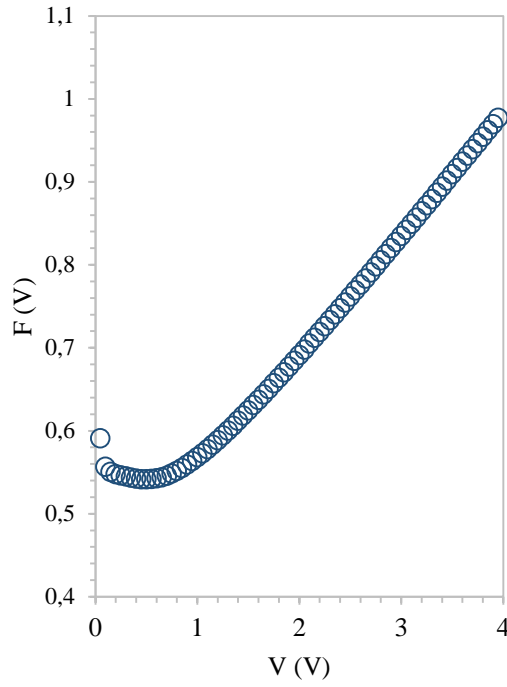
İletim mekanizmalarını belirlemek için Şekil 4.64'te p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun ileri besleme  $\log I - \log V$  eğrileri verilmiştir.  $\log I - \log V$  eğrisinin ileri besleme voltajına karşılık gelen kısmı farklı iletim mekanizmalarına işaret eden farklı bölgelerle karakterize edilmiştir. Şekil 4.64'te görüldüğü gibi ileri besleme karakteristikleri üç farklı lineer bölgeden oluşmuştur. Bu bölgelerin farklı eğimlere sahip olduğu görülmüştür. Düşük voltaj aralığındaki I. bölgede, yaklaşık 1,68 eğim değeriyle SCLC mekanizmasının baskın olduğu görülmüştür. II. bölgede, geniş band aralıklı

heteroeklem diyotlarda gözlenen  $I \sim \exp(\alpha V)$  ilişkisi gereği akım değeri eksponansiyel olarak artış göstermiştir. Uygulanan voltaj değerindeki artışa bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğundaki artışın, akım değerindeki bu hızlı artışın sebebi olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, arayüzey durumları da heteroeklem diyotun elektrofiziksel davranışında önemli rol oynamaktadır. Böyle bir yapıda, arayüzey durumları donör veya akseptör gibi davranabilir. III. Bölgede ise, SCLC mekanizmasının baskın olduğu görülmüştür. Yüksek voltaj değerlerinde, enjeksiyon seviyesi yüksek olduğu zaman aygıt doluluk sınırına yaklaştığı için eğrinin eğimi artma eğilimindedir [100].



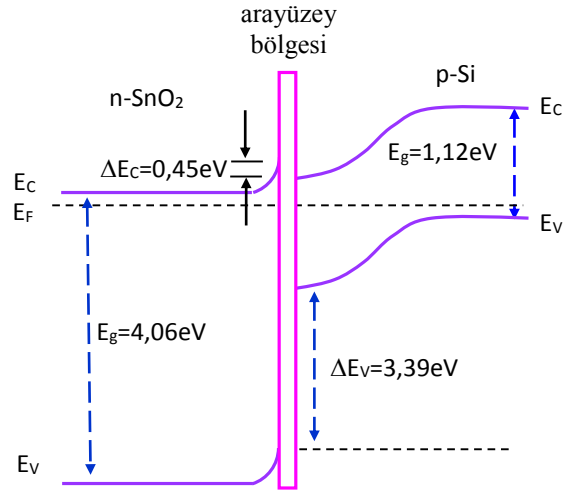
**Şekil 4.64.** *p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun oda sıcaklıklarındaki ileri besleme  $\log I - \log V$  eğrisi*

Şekil 4.65'te p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun oda sıcaklığındaki  $F(V)$ - $V$  grafiği verilmiştir. Diyotların seri direnç ve engel yüksekliğini hesaplamak için alternatif bir yöntem olan Norde metodu kullanılarak hesaplanmış olan  $\phi_b$  ve  $R_s$  değerleri sırasıyla 0,60 eV ve 0,92 k $\Omega$  dur. Norde metodu yardımıyla hesaplanan  $\phi_b$  değerinin,  $I - V$  karakteristiği yardımıyla hesaplanmış olan değere yakın olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.65.** *p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun oda sıcaklığındaki F(V)-V grafiği*

Şekil 4.66’da nano yapılı p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun enerji-band diyagramı verilmiştir.  $E_C$  iletim bandı sınırı,  $E_F$  Fermi seviyesi,  $E_V$  valans bandı sınırı,  $\Delta E_{C,V}$  band kesiklilikleridir. Diyagramda, yasak enerji aralığı değerleri  $E_g(\text{SnO}_2) = 4,06$  eV ve  $E_g(\text{Si}) = 1,12$  eV olarak kullanılmıştır. SnO<sub>2</sub> ve Si için elektron afiniteleri sırasıyla  $\chi(\text{SnO}_2)=4,50$  eV ve  $\chi(\text{Si})=4,05$  eV olarak kullanılmıştır. Şekil 4.66’dan görüldüğü gibi iletim bandı  $\Delta E_C = \chi(\text{SnO}_2) - \chi(\text{Si}) = 0,45$  eV, valans bandı  $\Delta E_V = E_g(\text{SnO}_2) - E_g(\text{Si}) + E_C = 3,39$  eV bulunmuştur.  $\Delta E_V$  değeri  $\Delta E_C$  değerinden daha yüksektir. Bu durum, p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun ileri beslenmesi durumunda çok yüksek akım geçirirken, ters beslenmesi durumunda çok düşük akım geçireceği şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 4.66. *p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun enerji-band diyagramı*

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada sol jel spin kaplama yöntemi kullanılarak farklı alttaşlar üzerine (cam, ITO ve p-Si) ZnO, CdO, TiO<sub>2</sub> ve SnO<sub>2</sub> filmleri elde edilmiştir. Depolama ve çözelti parametrelerinin filmlerin fiziksel özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Karakterizasyon sonuçları incelenerek seçilen filmler kullanılarak, heteroeklem diyotlar üretilmiş ve elektriksel karakterizasyonları incelenmiştir.

ZnO filmler farklı döndürme hızlarında, farklı molaritelerde ve farklı depolama sıcaklıklarında farklı alttaşlar üzerine elde edilmişlerdir. Artan döndürme hızı ile birlikte alttaş üzerinde kalan çözelti miktarının azalması nedeniyle, film kalınlığı azalmıştır. Artan molarite değerine bağlı olarak da çözelti içerisindeki ZnAc miktarı artmış yani çözünen parçacıklar arasındaki elektrostatik etkileşme artmıştır. Bunlara bağlı olarak çözünen maddelerin bir araya toplanma ihtimalinin artmasıyla film kalınlığı artmıştır.

Farklı alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinden 4000 rpm, 0,5 M, 500°C depolama sıcaklığında elde edilen filmlerin en iyi kristallenmeye sahip olduğu belirlenmiştir. Daha sonra p-Si alttaş üzerine elde edilen filmlerin depolama sıcaklığı artırılarak, filmin kalitesi üzerine sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. En iyi kristallenmenin 800°C depolama sıcaklığında elde edilen filme ait olduğu belirlenmiştir. Elde edilen tüm filmlerin polikristal yapıya sahip olduğu ve hegzagonal yapıda kristallendiği belirlenmiştir. Tüm filmlerde en yüksek *TC* değerinin (002) düzleminde olduğu görülmüştür. Filmlerin tane boyutlarında artan depolama sıcaklığı ile birlikte bir tane sınırından diğerine atomların geçişi ile kristal boyutlarında izotermal büyüme gerçekleşmiştir.

Elde edilen ZnO filmlerin FESEM görüntüleri incelendiğinde, döndürme hızının lineer bir etkisi gözlenmezken, farklı molaritelerde elde edilen filmlerin artan çözelti molaritesine bağlı olarak ortalama kristal boyutlarının büyüme eğiliminde olduğu görülmüştür. p-Si alttaş üzerine elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri incelendiğinde, artan depolama sıcaklığı ile birlikte, hegzagonal yapıya sahip taneciklerin sayısında artış gözlenmiştir. Yani sıcaklık artışı ile birlikte, izotermal büyüme gerçekleşmiş ve kristal boyutlarının arttığı görülmüştür.

Cam ve ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerin %T spektrumları, artan döndürme hızı ile film kalınlığının azalmasından dolayı filmlerin geçirgenlik değerlerinin artma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Bu filmlerin  $E_g$  değerlerinin artan döndürme hızıyla birlikte azalma eğiliminde olduğu ve bu durumun kuantum boyut etkisinden

kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Cam ve ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerin görünür bölgedeki % $T$  spektrumları, artan molarite değeri ile film kalınlığının artmasından dolayı filmlerin geçirgenlik değerlerinin azaldığını göstermiştir. Bu filmlerin  $E_g$  değerlerinde molaritenin çok fazla etkisi olmadığı görülmüştür. Cam ve ITO alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerin görünür bölgedeki % $T$  spektrumları, artan depolama sıcaklığı ile film kalınlığının azalmasından dolayı filmlerin geçirgenlik değerlerinin arttığını göstermiştir. Bu filmlerin  $E_g$  değerlerinde ise depolama sıcaklığının çok fazla etkisi olmadığı görülmüştür. Döndürme hızının ve molaritenin filmlerin kalitesi üzerine etkisi ve filmlerin kusur durumları PL ölçümleri yardımıyla araştırılmıştır.

0,5 M, 4000 rpm ve 600°C depolama sıcaklığında elde edilen Z9-S kodlu film kullanılarak üretilen nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun, farklı ortam sıcaklıklarında  $I - V$  ölçümleri alınmıştır. İleri besleme karakteristiğinden  $I_0$  değerleri belirlenmiş ve artan ortam sıcaklığı ile eksponansiyel olarak arttığı görülmüştür. Artan ortam sıcaklığına bağlı olarak  $n$  değerinin azaldığı ve  $\phi_b$  değerinin arttığı görülmüştür. Ortam sıcaklığı arttığı zaman daha fazla elektron engel yüksekliğini aşmak için gerekli enerjiye sahip olduğundan dolayı,  $\phi_b$  değeri artan ortam sıcaklığına bağlı olarak artmıştır. Norde metodu kullanılarak nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun farklı ortam sıcaklıklarında  $R_s$  ve  $\phi_b$  değerleri hesaplanmış ve artan ortam sıcaklığı ile hem  $\phi_b$  hem de  $R_s$  değerinin artış eğiliminde olduğu görülmüştür.  $R_s$  değerlerinin oldukça yüksek bulunmasının, oksit tabakalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. İletim mekanizmalarının belirlenebilmesi için farklı ortam sıcaklıklarındaki ileri besleme  $\log I - \log V$  eğrileri çizilmiştir. 296 K ve 323 K'de alınan ölçümler ileri besleme karakteristiklerinin üç farklı lineer bölgeden oluştuğunu göstermiştir. I. bölgede omik özelliğin baskın olduğu, II. bölgede  $I \sim \exp(\alpha V)$  ilişkisi gereği akım değerinin eksponansiyel olarak arttığı ve III. bölgede ise SCLC mekanizmasının baskın olduğu görülmüştür. 383 K'de alınan ölçüm sonucu ileri besleme karakteristiğinin iki lineer bölgeden oluştuğu görülmüştür. I. bölgenin omik bölge, II. bölgenin ise SCLC mekanizmasının baskın olduğu bölge olduğu belirtilmiştir. Nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun fotovoltaiik davranışını karakterize etmek için karanlık ve UV aydınlatması altında  $I - V$  ölçümleri alınmıştır. Geri besleme bölgesinde akım, aydınlatma şiddetine bağlı olarak artış göstermiştir.  $V_{oc}$  değeri 0,19 V,  $I_{sc}$  değeri  $8,03 \times 10^{-8}$  A bulunmuştur. Elde edilen bu değerler nano yapılı p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun fotovoltaiik davranış sergilediğini göstermiştir. Nano yapılı n-ZnO/p-Si heteroeklem

diyotun 296 K'de zamana bağlı fotoakım ölçümü alınmıştır. Diyot üzerine aydınlatma uygulandıktan sonra, yani lamba açıldıktan sonra, fotoakım değeri zamana bağlı olarak aniden artış göstermiş ve fotoakım sabit bir değer almıştır. Diyotun fotoakım değerindeki bu artış p-Si ve n-ZnO yarıiletkenlerinin elektron afiniteleri arasındaki farktan kaynaklanmıştır. Lamba kapatıldıktan sonra akım ilk değerlerine ulaşmıştır. Fotoakım değerleri diyotun iyi fotoiletken özellik sergilediğine işaret etmiştir.

CdO filmler farklı döndürme hızlarında ve farklı pH değerlerinde cam ve p-Si alttaşlar üzerine elde edilmişlerdir.

Farklı döndürme hızlarında elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları incelendiğinde, en iyi film oluşumunun 2000 rpm'de pH=7 olan çözeltili kullanılarak cam ve p-Si alttaşlar üzerine elde edilen filmlere ait olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm filmlerin kübik ve polikristal yapıda kristallendiği belirlenmiştir. En yüksek *TC* değerinin (111) düzleminde olduğu görölmüştür. En büyük ortalama kristal boyutu değerinin en düşük döndürme hızında elde edildiği belirlenmiştir. Farklı pH değerlerinde elde edilen CdO filmlerinin XRD spektrumları incelendiğinde, en iyi film oluşumunun 4000 rpm'de pH=7 olan çözeltili kullanılarak cam ve p-Si alttaşlar üzerine elde edilen filmlere ait olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm filmlerin kübik ve polikristal yapıda kristallendiği belirlenmiştir. En yüksek *TC* değerinin (111) düzleminde olduğu görölmüştür. Aynı parametrelerde sırasıyla cam ve p-Si alttaşlar üzerine elde edilen filmlerden, p-Si tek kristal alttaş üzerine elde edilen filmlerin daha iyi kristallendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Farklı döndürme hızlarında cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin FESEM görüntüleri incelendiğinde, filmlerin hepsinin küresel yapılardan oluştuğu, artan döndürme hızı ile film kalitesinin bozulduğu ve en homojen kaplamanın 2000 rpm döndürme hızında, pH=7 olan çözeltili kullanılarak cam alttaş üzerine elde edilen filme ait olduğu görölmüştür. Farklı döndürme hızlarında p-Si alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin FESEM görüntüleri incelendiğinde, filmlerin hepsinin küresel yapılardan oluştuğu, artan döndürme hızı ile film kalitesinin iyileştiği ve en homojen kaplamanın 2000 rpm döndürme hızında, pH=7 olan çözeltili kullanılarak p-Si alttaş üzerine elde edilen filme ait olduğu görölmüştür. Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak cam alttaşlar üzerine elde edilen CdO filmlerinin FESEM görüntüleri incelendiğinde, filmlerin hepsinin küresel yapılardan oluştuğu ve en iyi kaplamanın pH=7 ve pH=10 olan çözeltiler kullanılarak, 4000 rpm'de cam alttaşlar üzerine elde edilen filmlere ait olduğu görölmüştür. Farklı pH değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar

üzerine elde edilen CdO filmlerinin FESEM görüntüleri incelendiğinde, filmlerin hepsinin küresel yapılardan oluştuğu ve pH=7 olan çözelti kullanılarak 4000 rpm'de p-Si alttaş üzerine elde edilen filmde tüm yüzeyin hemen hemen tamamının kaplandığı görülmüştür.

Homojen kaplamanın yapılabildiği pH=7 olan çözelti kullanılarak 4000 rpm ve 2000 rpm'de cam alttaş üzerine elde edilen filmlerin görünür bölgedeki ortalama % $T$  ve  $E_g$  değerleri belirlenmiştir. pH=7 olan çözelti kullanılarak 4000 rpm'de cam alttaş üzerine elde edilen filmin görünür bölgedeki ortalama % $T$  değeri %54,  $E_g$  değeri 2,08 eV olarak bulunmuştur. pH=7 olan çözelti kullanılarak 2000 rpm'de cam alttaş üzerine elde edilen filmin görünür bölgedeki ortalama % $T$  değeri %32,  $E_g$  değeri 2,17 eV olarak bulunmuştur. Filmlerin görünür bölgedeki ortalama % $T$  değerleri oldukça düşüktür.

2000 rpm döndürme hızında ve pH=7 olan çözelti kullanılarak elde edilen film kullanılarak üretilen p-Si/n-CdO heteroeklem diyotunun oda sıcaklığında  $I - V$  ölçümü yapılmıştır. Diyotun  $I - V$  grafiğinden,  $n$  ve  $\phi_b$  değerleri sırasıyla 3,02 ve 0,64 eV olarak bulunmuştur. Norde metodu kullanılarak p-Si/n-CdO heteroeklem diyotun  $R_s$  ve  $\phi_b$  değerleri sırasıyla 7,135 k $\Omega$  ve 0,71 eV olarak bulunmuştur. p-Si/n-CdO heteroeklem diyotun fotovoltaiik davranışını karakterize etmek için karanlık ve UV aydınlatması altında  $I - V$  ölçümleri yapılmıştır. UV lamba ile aydınlatılan diyotun geri besleme akımında artış gözlenmiştir.  $V_{oc}$  ve  $I_{sc}$  değerleri sırasıyla 0,04 V ve  $9,92 \times 10^{-9}$  A olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar diyotun fotovoltaiik davranış sergilediğini göstermiştir.

p-Si/n-CdO heteroeklem diyotun zamana bağlı fotoakım ölçümü yapılmıştır. Fotoakım değerleri diyotun iyi fotoiletken özellik sergilediğine işaret etmektedir. Diyot üzerine aydınlatma uygulandıktan sonra fotoakım değeri zamana bağlı olarak aniden artış göstermiş ve fotoakım sabit bir değer almıştır. Diyotun fotoakım değerindeki bu artış p-Si ve n-CdO yarıiletkenlerinin elektron afiniteleri arasındaki farktan kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır.

TiO<sub>2</sub> filmler farklı depolama sıcaklıklarında (400–600°C) sırasıyla cam ve p-Si alttaşlar üzerine 5 kat, ardından da yalnızca p-Si alttaş üzerine daha yüksek depolama sıcaklıklarında (700–1100°C) 15 kat olarak elde edilmişlerdir.

400–600°C arasındaki depolama sıcaklıklarında cam ve p-Si alttaşlar üzerine 5 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerin XRD analizi sonuçlarından, filmlerin tümünün polikristal ve anataz yapıda kristallendiği görülmüştür. Ayrıca, p-Si üzerine elde edilen filmlerin

kristallenmelerinin, cam alttaş üzerine elde edilen filmlerden daha iyi olduğu görülmüştür. Bu sonucun p-Si alttaşın tek kristal ve cam alttaşa göre daha pürüzsüz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. XRD spektrumları incelendiğinde, en iyi kristallenmelerin 600°C’de elde edilen T-600-C-5 ve T-600-S-5 filmlerine ait olduğu görülmüştür. 700–1100°C arasındaki depolama sıcaklıklarında p-Si alttaş üzerine 15 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerin XRD analizi sonuçları, depolama sıcaklığına bağlı olarak TiO<sub>2</sub> filminin faz değiştirdiği görülmüştür. 700°C ve 800°C’de yalnızca anataz faz gözlenirken daha yüksek sıcaklıklarda rutil faza ait pikler gözlenmiştir. Depolama sıcaklığının artmasına bağlı olarak rutil faza ait piklerin şiddetleri daha da artmıştır. Depolama sıcaklığındaki artışın tane sınırlarında hareketliliği indüklemesi nedeniyle, filmlerin ortalama kristal boyutu değerleri 37 nm’den 115 nm’ye artmıştır.

400–600°C arası depolama sıcaklığında cam ve p-Si alttaşlar üzerine 5 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerin FESEM görüntüleri, p-Si alttaş üzerine elde edilenlerin cam alttaşa göre daha homojen kaplandıklarını, pürüzsüz bir yüzeye sahip olduklarını göstermiştir. Depolama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak tane boyutlarında artış gözlenmiştir. 700–1100°C arası depolama sıcaklığında p-Si alttaş üzerine 15 kat elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerin FESEM görüntüleri depolama sıcaklığının artışına bağlı olarak kristal boyutunda artışın olduğunu göstermiştir. Anataz fazdan rutil faza geçişte kristal boyutunda büyük bir artış görülmüştür. Depolama sıcaklığının 700°C’den 900°C’ye artışıyla, kristal boyutları ve tane kenarlarındaki keskinlikler artmıştır. 1000°C ve 1100°C’de film yüzeyinde kırıklar görülmüştür. Kristal büyümeyi hızlandıran tüm bu sonuçlar termal etkiden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Cam alttaşlar üzerine elde edilen TiO<sub>2</sub> filmlerin %*T* değerleri incelendiğinde, tüm filmlerin yüksek geçirgenliğe sahip olduğu ve artan depolama sıcaklığı ile azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. *E<sub>g</sub>* değerleri incelendiğinde ise, en düşük *E<sub>g</sub>* değerinin en yüksek depolama sıcaklığında elde edildiği görülmüştür. *E<sub>g</sub>* değerlerinin artan depolama sıcaklığı ile azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. *E<sub>g</sub>* değerindeki bu azalmanın, artan depolama sıcaklığına bağlı olarak oksijen boşluklarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

700°C depolama sıcaklığında p-Si alttaş üzerine 15 kat elde edilen elde edilen TiO<sub>2</sub> filmi kullanılarak üretilen p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun oda sıcaklığında *I – V* lm yapılmıştır. Diyotun *I – V* grafiğinden, *n* ve  $\phi$  değerleri sırasıyla 5,39 ve 0,58 eV olarak bulunmuştur. İdaelitate faktörünün büyük çıkmasına diyotun eklemesinde yer alan

ara yüzey durumlarının varlığının neden olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda p-Si yüzeyindeki oksit tabakanın varlığı ve seri direnç değerinin büyük olması da idealite faktörünün değerini etkilemiştir. p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun davranışını kontrol eden iletim mekanizmasını araştırabilmek için  $\log I - \log V$  grafiğinden yararlanılmıştır. Çizilen eğri üç lineer bölgeden oluşmuştur. I. bölgede ( $0,12 \leq V \leq 0,44$ ) hesaplanan eğim değeri bu voltaj aralığında diyotun iletim mekanizmasının SCLC mekanizması tarafından kontrol edildiğini göstermiştir. II. bölgede ( $0,48 \leq V \leq 1,2$ ) hesaplanan eğim değeri bu voltaj aralığında diyotun iletim mekanizmasının TCLC mekanizması tarafından kontrol edildiğini göstermiştir. III. bölgede ( $1,8 \leq V \leq 5$ ) hesaplanan eğim değeri ise bu voltaj aralığında diyotun iletim mekanizmasının SCLC mekanizması tarafından kontrol edildiğini göstermiştir. p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun  $R_s$  değerini belirleyebilmek için Cheung metodundan faydalanılmıştır.  $dV/d\ln(I) - I$  grafiğinin eğimi ve y-eksenini kestiği noktadaki değer kullanılarak hesaplanan  $n$  ve  $R_s$  değeri sırasıyla 5,03 ve 33,5 k $\Omega$  olarak bulunmuştur.  $n$  değeri  $I - V$  grafiği yardımıyla bulunan değerden biraz farklı çıkmıştır. Bu farklılığın seri dirençten ve ara yüzey durumlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.  $H(I) - I$  grafiği kullanılarak p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun  $\phi_b$  ve  $R_s$  değerleri sırasıyla 0,68 eV ve 30,8 k $\Omega$  bulunmuştur.  $dV/d\ln(I) - I$  ve  $H(I) - I$  grafikleri yardımıyla bulunan  $R_s$  değerleri birbirine çok yakın bulunmuştur. Norde metodu kullanılarak p-Si/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem diyotun  $\phi_b$  ve  $R_s$  değerleri sırasıyla 0,51 eV ve 49,0 k $\Omega$  bulunmuştur. Cheung ve Norde metotları ile bulunan  $R_s$  değerlerinde farklılık görülmüştür. Bu farkın sebebi olarak, Cheung modelinin yüksek voltaj bölgesinde, Norde modelinin tüm voltaj bölgesinde uygulanmış olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

SnO<sub>2</sub> filmleri farklı tavlama sıcaklıklarında p-Si alttaşlar üzerine elde edilmişlerdir.

Farklı tavlama sıcaklıklarında p-Si alttaş üzerine elde edilen SnO<sub>2</sub> filmlerinin XRD spektrumları tüm filmlerin polikristal yapıya sahip olduğunu ve tetragonal yapıda kristallendiğini göstermiştir. Artan tavlama sıcaklığı ile ortalama kristal boyutu değerlerinin lineer değişmediği ancak artış eğiliminde olduğu görülmüştür. En yüksek  $TC$  değerinin (101) düzleminde olduğu görülmüştür. En yüksek  $TC$  değeri S-600 filmi için elde edilmiştir.

400°C depolama sıcaklığında elde edilen SnO<sub>2</sub> filminin farklı büyütmelerdeki FESEM görüntüleri filmin homojen kaplandığını göstermiştir. Artan tavlama sıcaklığı (500–900°C) ile izotermal büyüme gerçekleşmiş ve bu durum filmlerin ortalama kristal

boyutlarında artışa sebep olmuştur. Sıcaklığın daha da arttırılmasıyla taneler arası boşluklar oluşmaya başlamıştır.

SnO<sub>2</sub> filmlerinden bazılarının  $E_g$  değerleri, difüz reflektans değerlerinin Kubelka-Munk fonksiyonu yardımıyla absorpsiyon değerlerine dönüştürülmesi ile belirlenmiştir. S-400, S-500 ve S-600 filmleri için  $E_g$  değerleri sırasıyla 3,70; 3,86 ve 4,06 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, artan tavlama sıcaklığı ile birlikte  $E_g$  değerlerinin arttığını göstermiştir. Tavlama sıcaklığının SnO<sub>2</sub> filmlerinin  $E_g$  değerleri üzerinde önemli rolü vardır. Genel olarak saf olmayan OH<sup>-</sup> iyonlarının varlığı bant aralığının düşmesine neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda OH<sup>-</sup> iyonlarının buharlaşması, yasak enerji aralığında artışa neden olabileceği düşünülmektedir.

600°C tavlama sıcaklığında p-Si alttaş üzerine 600°C tavlama sıcaklığında elde edilen film kullanılarak üretilen p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun oda sıcaklığında  $I - V$  ölçümü yapılmıştır. Diyotun  $I - V$  grafiğinden,  $n$  ve  $\phi$  değerleri sırasıyla 5,22 ve 0,49 eV olarak bulunmuştur. İletim mekanizmalarını belirlemek için p-Si/n-SnO<sub>2</sub> heteroeklem diyotunun ileri besleme  $\log I - \log V$  eğrileri çizilmiştir. İleri besleme karakteristiği üç farklı lineer bölgeden oluşmuştur. Bu bölgelerin farklı eğimlere sahip olduğu görülmüştür. Düşük voltaj aralığındaki I. bölgede SCLC mekanizmasının baskın olduğu görülmüştür. II. bölgede geniş band aralıklı heteroeklem diyotlarda gözlenen  $I \sim \exp(\alpha V)$  ilişkisi gereği akım değeri eksponansiyel olarak artış göstermiştir. III. Bölgede ise, SCLC mekanizmasının baskın olduğu görülmüştür. Norde metodu kullanılarak  $\Phi_b$  ve  $R_s$  değerleri hesaplanmış ve sırasıyla 0,60 eV ve 0,92 k $\Omega$  olarak bulunmuştur. Norde metodu yardımıyla hesaplanan  $\Phi_b$  değerinin,  $I - V$  karakteristiği yardımıyla hesaplanmış olan değere yakın olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmalar, sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilen metal oksit filmlerinin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin filmlerin elde edilme parametrelerinden oldukça fazla etkilendiğini göstermiştir. Depolama ve çözelti parametrelerinin değişimi ile film özelliklerinin istenilen doğrultuda değiştirilebileceği saptanmıştır. Uygun parametrelerde elde edilen ZnO, CdO, TiO<sub>2</sub> ve SnO<sub>2</sub> filmlerinin heteroeklem diyot üretimi için kullanıma uygun oldukları görülmüştür.

## KAYNAKÇA

- [1] Park, M. G., Sung, G. K., Sung, N. E., Kim, J. H., Park, C. M. (2016). Partially reversible Li<sub>2</sub>O formation in ZnO: A critical finding supporting realization of highly reversible metal oxide electrodes. *J. Power Sources.*, 328, 607-614.
- [2] Ruzgar, S., Ozkan A. E., Caglar M., Aksoy S., Ilican S., Caglar Y., Yakuphanoglu F. (2014). Effect of the Deposition Temperature on the Device Performance of the Nanostructured ZnO Thin Film Transistor by Sol Gel Method, *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, 9 (5), 693-697.
- [3] Huotari, J., Kekkonen, V., Haapalainen, T., Leidinger, M., Sauerwald, T., Puustinen, J., Liimatainen, J., Lappalainen, J. (2016). Pulsed laser deposition of metal oxide nanostructures for highly sensitive gas sensor applications. *Sensors Actuators B Chem.*, 236, 978-987.
- [4] Elumalai, N. K., Vijila, C., Jose, R., Uddin, A., Ramakrishna, S. (2015). Metal oxide semiconducting interfacial layers for photovoltaic and photocatalytic applications. *Mater. Renew. Sustain. Energy*, 4 (3), 1–25.
- [5] Serairi, L., Yu, D., Leprince-Wang, Y. (2016). Numerical modeling and simulation of ZnO nanowire devices for energy harvesting. *Phys. Status Solid*, 5 (7), 1-5.
- [6] Norton, D. P., Heo, Y. W., Ivill, M. P., Ip, K., Pearnton, S. J., Chisholm, M. F., Steiner, T. (2004). “ZnO: growth, doping & processing. *Mater. Today*, 7 (6), 34-40.
- [7] Papageorgiou, P. P. ve Chu, A. C. (2000). Chloroxylenol and zinc oxide containing cream (Nels cream®) vs. 5% benzoyl peroxide cream in the treatment of acne vulgaris. A double-blind, randomized, controlled trial. *Clin. Exp. Dermatol*, 25 (1), 16-20.
- [8] Lu, P. J., Huang, S. C., Chen, Y. P., Chiueh, L. C., Shih, D. Y. C. (2015). Analysis of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles in cosmetics. *J. Food Drug Anal.*, 23 (3), 587-594.
- [9] Newman, M. D., Stotland, M., ve Ellis, J. I. (2009). The safety of nanosized particles in titanium dioxide– and zinc oxide–based sunscreens. *J. Am. Acad. Dermatol.*, 61 (4), 685–692.
- [10] Ghampson, I. T., Pecchi, G. J., Fierro, L. G., Videla, A. (2017). Escalona N. Catalytic hydrodeoxygenation of anisole over Re-MoO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> and Re-VO<sub>x</sub>/ TiO<sub>2</sub> catalysts. *Appl. Catal. B Environ.*, 208, 60-74.

- [11] Overcash, J. W. (2013) *Microstructured materials synthesis via salt-assisted ultrasonic spray pyrolysis*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Urbana-Champaign: University of Illinois.
- [12] Levinson, L. M. ve Philipp, H. R. (1977). ZnO Varistors for Transient Protection. *IEEE Trans. Parts, Hybrids, Packag.*, 13 (4), 338-343.
- [13] Park S. H., Park J. B., Song P. K. (2010). Characteristics of Al-doped, Ga-doped and In-doped zinc-oxide films as transparent conducting electrodes in organic light-emitting diodes. *Curr. Appl. Phys.*, 10 (3) 488–490.
- [14] Pearton, S. ve Jagadish, C. (2006). *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures: Processing, Properties, and Applications*. Elsevier Science.
- [15] Morkoç, H. ve Özgür, Ü. (2009). *Zinc Oxide Fundamentals, Materials and Device Technology*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [16] Caglar, M., Ilican, S., Caglar, Y., Yakuphanoglu, F. (2009). Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film. *Appl. Surf. Sci.*, 255 (8), 4491-4496.
- [17] Yakuphanoglu, F., Ilican, S., Caglar, M., and Caglar, Y. (2007). The determination of the optical band and optical constants of non-crystalline and crystalline ZnO thin films deposited by spray pyrolysis. *J. of Optoelectronics Adv.*, 9 (7), 2180-2185.
- [18] Ting, S. Y., Chen, P. J., Wang, H. C., Liao, C. H., Chang, W. M., Hsieh, Y. P., Yang, C. C. (2012) Crystallinity improvement of ZnO thin film on different buffer layers grown by MBE. *J. Nanomater.*, 2012, 1-7.
- [19] Al-Assiri, M. S., Mostafa, M. M. Ali, M. A., El-Desoky, M. M. (2014). Synthesis, structural and electrical properties of annealed ZnO thin films deposited by pulsed laser deposition (PLD). *Superlattices Microstruct.*, 75, 127-135.
- [20] Thiandoume, C., Barjon, J., Ka, O., Lusson, A., Galtier, P., Sallet, V. (2009). Morphology transition of one-dimensional ZnO grown by metal organic vapour phase epitaxy on (0 0 0 1)-ZnO substrate. *J. Cryst. Growth.*, 311 (18), 4311-4316.
- [21] Caglar, M., Caglar, Y., Aksoy, S., and Ilican, S. (2010). Temperature dependence of the optical band gap and electrical conductivity of sol–gel derived undoped and Li-doped ZnO films. *Appl. Surf. Sci.*, 256 (16), 4966-4971.
- [22] Santos Cruz, J., Torres Delgado, G., Castanedo Perez, R., Jimenez Sandoval, S., Jimenez Sandoval, O., Zuiga Romero, C. I., Manriquez Marin, J., Zelaya Angel O.

- (2005). Dependence of electrical and optical properties of sol-gel prepared undoped cadmium oxide thin films on annealing temperature. *Thin Solid Films*, 493 (1), 83-87.
- [23] Chandiramouli, R. ve Jeyaprakash, B. G. (2013). Review of CdO thin films. *Solid State Sci.* 16, 102-110.
- [24] Hashimoto, K., Irie, H., Fujishima, A. (2007). TiO<sub>2</sub> Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects This. *AAPPS Bull.*, 17 (6) 12-28.
- [25] Welte, A., Waldauf, C., Brabec, C., Wellmann, P. J. (2008). Application of optical absorbance for the investigation of electronic and structural properties of sol-gel processed TiO<sub>2</sub> films. *Thin Solid Films*, 516 (20), 7256-7259.
- [26] Singh, J. (2006). *Optical properties of condensed matter and applications.*, England: WILEY.
- [27] Nowotny, M. K., Bak, T., Nowotny, J. (2006). Electrical Properties and Defect Chemistry of TiO<sub>2</sub> Single Crystal. I. Electrical Conductivity, *J. Phys. Chem. B*, 16270-16282.
- [28] Moellmann, J., Ehrlich, S., Tonner, R., Grimme, S. (2012). A DFT-D study of structural and energetic properties of TiO<sub>2</sub> modifications. *J. Phys. Condens. Matter*, 24 (42), 424206.
- [29] Ginley, D. S. (2010). *Handbook of transparent conductors*, London: Springer New York Heidelberg Dordrecht.
- [30] Konenkamp, A. ve Wahi, R. (1996). Electronic doping in porous nano-crystalline ZnO films. *Microporous and Macroporous Materials*, 431, 467-472.
- [31] Nishio, K., Miyake, S., Sei, T., Watanabe, Y., Tsuchiya, T. (1996). Preparation of highly oriented thin film exhibiting transparent conduction by the sol-gel process. *J. Mater. Sci.*, 31 (14), 3651-3656.
- [32] Baik, D. G. ve Cho, S. M. (1999). Application of sol-gel derived films for ZnO/n-Si junction solar cells. *Thin Solid Films*, 354 (1), 227-231.
- [33] Natsume, Y. ve Sakata, H. (2003). Electrical and optical properties of zinc oxide films post-annealed in H<sub>2</sub> after fabrication by sol-gel proces. *Mater. Chem. Phys.*, 78 (1), 170-176.
- [34] Lu, C. Z., Cho, J. Y., Chang, H. J., Joo, S. W., Wang, Y. S. (2004). Structural, optical and electrical properties of ZnO films by sol-gel method. *Materials Science Forum Designing, Processing and Properties of Advanced.* 1009-1012.

- [35] Cao, Y., Miao, L., Tanemura, S., Tanemura, M., Kuno, Y., (2006). Hayashi, Y., Low resistivity p-ZnO films fabricated by sol-gel spin coating. *Appl. Phys. Lett.*, 88 (25), 25-28.
- [36] Sagar, P., Shishodia, P. K., Mehra, R. M. (2007). Influence of pH value on the quality of sol-gel derived ZnO films. *Appl. Surf. Sci.*, 253 (12), 5419-5424.
- [37] Ilican, S., Caglar, Y., Caglar, M. (2008). Preparation and characterization of ZnO thin films deposited by sol-gel spin coating method. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 10 (10), 2578-2583.
- [38] Mamat, M. H., Sahdan, M. Z., Amizam, S., Rifaie, H. A., Khusaimi, Z., Rusop M. (2009). Electrical and photoluminescence properties of Intrinsic zinc oxide thin films prepared at different molar concentrations. *AIP Conf. Proc.*, 1136, 596-600.
- [39] Sahoo, T., Kim, M., Lee, M. H., Jang, L. W., Jeon, J. W., Kwak, J. S., Ko, I. Y., Lee, I. H. (2010). Nanocrystalline ZnO thin films by spin coating-pyrolysis method. *J. Alloys Compd.*, 491 (1–2), 308–313.
- [40] Aksoy, S., Caglar, Y., Ilican, S., Caglar, M. (2011). Sol-gel derived zinc oxide films: Effect of deposition parameters on structure, microstructure and photoluminescence properties. *Superlattices Microstruct.*, 50 (5), 470-479.
- [41] Aksoy, S. ve Caglar, Y. (2012). Effect of ambient temperature on electrical properties of nanostructure n-ZnO/p-Si heterojunction diode. *Superlattices Microstruct.*, 51 (5), 613–625.
- [42] Ilican, S., Caglar, Y., Caglar, M. Kundakci, M., and Ates, (2009). A. Photovoltaic solar cell properties of  $Cd_xZn_{1-x}O$  films prepared by sol-gel method. *Int. J. Hydrogen Energy*, 34 (12), 5201-5207.
- [43] Caglar, M. ve Yakuphanoglu, F. (2009). Fabrication and electrical characterization of flower-like CdO/p-Si heterojunction diode. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 42 (4), 45102.
- [44] Aksoy, S., Caglar, Y., Ilican, S., and Caglar, M. (2009). Effect of heat treatment on physical properties of CdO films deposited by sol-gel method. *Int. J. Hydrogen Energy*, 34(12), 5191-5195.
- [45] Ilican, S., Caglar, M., Caglar, Y., Yakuphanoglu, F. (2009). CdO:Al films deposited by sol-gel process: A study on their structural and optical properties. *Optoelectron. Adv. Mater. Rapid Commun.*, 3 (2), 135-140.
- [46] Dhankhar, S., Kundu, R. S., Kishore, N., Punia, R., Srivastava A. K., Kumar J.

- (2010). Structural and optical properties of spin coated  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$  thin films. 4, (7), 955-959.
- [47] Cheon, J., Kim M. J., Nam, S., Yim, G., Kim, K.G., Leem, M.S. (2011). The Structural and Optical Properties with Composition Variation of  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$  Thin Films Prepared by Sol-Gel Method, *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials* 49 (7), 583–588.
- [48] Yakuphanoglu, F. (2011). Preparation of nanostructure Ni doped CdO thin films by sol gel spin coating method. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 59 (3), 569-573.
- [49] Gupta, R. K., Yakuphanoglu, F., Amanullah, F. M. (2011). Band gap engineering of nanostructure Cu doped CdO films. *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, 43 (9), 1666–1668.
- [50] Aksoy, S. ve Caglar, Y. (2011). Electrical Properties of n-CdO / p-Si Heterojunction Diode Fabricated by Sol Gel. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*, 5 (11), 1473-1476.
- [51] Ozer, N. ve Demiryont, H. (1991). Optical properties of sol-gel spin-coated  $\text{TiO}_2$  films and comparison of the properties with ion-beam-sputtered films. *Appl Opt.*, 30 (25), 3661-3666.
- [52] Atashbar, W. ve Wlodarski, M. Z. (1997). Design and fabrication doped  $\text{TiO}_2$ -coated surface acoustic wave oxygen sensor. *Conference on Smart Materials, Structures, and Integrated Systems*, 3241, 486-492.
- [53] Li, D., Hagen, Y., X. Haarer, J. (1997).  $\text{TiO}_2$  films derived from Sol-Gel process for photovoltaic cells. 5th European Conference on Advanced Materials and Processes and Applications (EUROMAT 97), 3, 181–184.
- [54] Kaliwot, N., Zhang, J. Y., Boyd, I. W. (2000). Titanium dioxide films prepared by photo-induced sol-gel processing using 172 nm excimer lamps, *Surf. Coatings Technol.*, 125 (1–3), 424–427.
- [55] Attia, S. M., Jue, W., Jun, S., Wu, G. M., Zhang, Q. Y., Lai, Z. Q., Yang, T. H. (2000). Study of the influence of some physical parameters on sol-gel derived  $\text{TiO}_2$  thin films. *4th International Conference on Thin Film Physics and Applications*, 4086, 815–818.
- [56] Li, C., Fryxell, X. S., Birnbaum, G. E., Wang, J. C. (2004). Effects of template and precursor chemistry on structure and properties of mesoporous  $\text{TiO}_2$  thin films.

- Am. Chem. Soc.*, 20 (21), 9095-9102.
- [57] Liu, Z., Guo, W., Fu, D., Chen, (2006). W. p-n Heterojunction diodes made by assembly of ITO/nano-crystalline TiO<sub>2</sub>/polyaniline/ITO. *Synth. Met.*, 156 (5–6), 414-416.
- [58] Senthil, T. S., Muthukumarasamy, N., Agilan, S., Thambidurai, M., Balasundaraprabhu, R. (2010). Preparation and characterization of nanocrystalline TiO<sub>2</sub> thin films. *Mater. Sci. Eng. B*, 174 (10), 102-104.
- [59] Arıer, Ü. Ö. A. ve Tepehan, F. Z. (2011). Influence of heat treatment on the particle size of nanobrookite TiO<sub>2</sub> thin films produced by sol–gel method. *Surf. Coatings Technol.*, 206, 37–42.
- [60] El-Nahass, M. M., Ali M. H., El-Denglawey, A. (2012). Structural and optical properties of nano-spin coated sol-gel porous TiO<sub>2</sub> films. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22 (12), 3003-3011.
- [61] Nadzirah, S. ve Hashim, U. (2013). Annealing effects on titanium dioxide films by Sol-Gel spin coating method. *RSM 2013 IEEE Reg. Symp. Micro Nanoelectron.*, 159-162.
- [62] Aksoy, S. ve Caglar, Y. (2014). Structural transformations of TiO<sub>2</sub> films with deposition temperature and electrical properties of nanostructure n- TiO<sub>2</sub>/p-Si heterojunction diode. *J. Alloys Compd.*, 613, 330-337.
- [63] Yoo, N., Tamaki, D. J., Park, J., Miura, S. J., Yamazoe, N., (1996). Suppression of grain growth in sol-gel-derived tin dioxide ultrathin films,” *J. Am. Ceram. Soc.*, 79 (8), 2201-2204.
- [64] Lin, Y. ve Wu, C. (1996). The Properties of antimony-doped tin oxide thin films from the sol-gel process. *Surf. Coatings Te*, (88), 239–247.
- [65] Goebbert, H., Aegerter, C., Burgard, M. A., Nass, D., Schmidt, R. (1998). Conducting membranes and coatings made from redispersable nanoscaled crystalline SnO<sub>2</sub> : Sb particles. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 520, 293-304.
- [66] Vuong, D. D., Sakai, G., Shimanoe, K., Yamazoe, N. (2004). Preparation of grain size-controlled tin oxide sols by hydrothermal treatment for thin film sensor application. *Sensors Actuators, B Chem.*, 103 (1–2) 386-391.
- [67] Kim, S. S., Choi, S. Y., Park, C. G., Jin, H. W. (1999). Transparent conductive ITO thin films through the sol-gel process using metal salts. *Thin Solid Films*, 347 (1–2), 155-160.

- [68] Roberson, L. B., Poggi, M. A., Kowalik, J., Smestad G. P., Bottomley, L. A., Tolbert, L. M. (2004). Correlation of morphology and device performance in inorganic-organic TiO<sub>2</sub>-polythiophene hybrid solid-state solar cells. *Coord. Chem. Rev.*, 248, (13–14), 1491-1499.
- [69] Savarimuthu, E., Sankarasubramanian, N., Subramanian, B., Jayachandran, M., Sanjeeviraja, C., Ramamurthy, S. (2006). Preparation and characterisation of nanostructured tin oxide (SnO<sub>2</sub>) films by sol–gel spin coating technique. *Surf. Eng.*, 22 (4), 268-276.
- [70] Caglar, Y., Caglar, M., Ilıcan, S., Yakuphanoglu, F. (2009). Determination of the electronic parameters of nanostructure SnO<sub>2</sub>/p-Si diode. *Microelectron. Eng.*, 86 (10), 2072-2077.
- [71] Gui, Z. L., Min, L. F., Wu, Z. W., Peng, D., Gang, C. L., Cang, Z. C. (2011). Preparation and structure and optical-electrical properties of the Nb/ SnO<sub>2</sub> composite thin film. *Acta Phys.Sin*, 60 (3), 38203.
- [72] Jeng, J. S. (2013). The influence of annealing atmosphere on the formation and characteristics of microvoid WO<sub>3</sub>-Sb films. *J. Alloys Compd.*, 548 (16), 27–32.
- [73] Sakhare, R. D., Khuspe, G. D., Navale, S. T., Mulik, R. N., Chougule, M. A., Pawar, R. C., Lee, C. S., Sen, S., Patil, V. B. (2013). Nanocrystalline SnO<sub>2</sub> thin films: Structural, morphological, electrical transport and optical studies. *J. Alloys Compd.*, 563, 300-306.
- [74] Rana, M. P. S., Negi, S.; Rawat, M., Gautam, S. K., Singh, F., Singh, R. G., Ramola, R. C. (2014). Thermal Annealing Induced Anomalous Band Gap Modifications in Nanocrystalline Antimony Doped Tin Oxide Thin Films. *Natl. Conf. Nanotechnol. Renew. Energy*, 20 (7–9), 1410-1413.
- [75] Uysal, B. Ö. ve Arier, Ü. Ö. A. (2015). Structural and optical properties of SnO<sub>2</sub> nano films by spin-coating method. *Appl. Surf. Sci.*, 350, 74-78.
- [76] Aksoy, S., Caglar, Y., Caglar, M., Ilıcan, S. (2015). Influence of Annealing Temperature on the Structural and Optical Characteristics of Nanostructure SnO<sub>2</sub> Films and Their Applications in Heterojunction Diode. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 11 (1), 1-7.
- [77] Vigil, O., Vaillant, L., Cruz, F., Santana, G., Morales-Acevedo, A., Contreras-Puente, G. (2000). Spray pyrolysis deposition of cadmium–zinc oxide thin films. *Thin Solid Films*, 361-362, 53-55.

- [78] Cullity, B. D. (1956). *Elements of X-Ray Diffraction*. United States of America: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- [79] Barrett, C. S. ve Massalski, T. B. (1980). *Structure of Metals*. (3. Baskı). New York: Pergamon Yayınevi.
- [80] Jaya, P. N., Jayakrishnan, R., Nandu, B. C., Pandey, R. K. (1998). In situ Sb-doped CdTe films. *Semicond. Sci. Technol.*, 13, 340-344.
- [81] Kittel, C. (2005). *Introduction to solid state physics*. (8. Baskı). United States of America: John Wiley and Sons, Inc.
- [82] Kaelble E. (1967). *Handbook of X-rays for diffraction, emission, absorption and microscopy*. (6. Baskı). New York: McGraw-Hill.
- [83] <http://www.purdue.edu/epps/rem/rs/sem.htm> (Erişim tarihi:24.05.2017)
- [84] Barış, H. B. (2007). ZnO :Cu Kaplanmış Amorf Camların Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi.
- [85] <https://www.mse.iastate.edu/research/laboratories/sem/microscopy/how-does-the-sem-work/> (Erişim tarihi: 24.05.2017)
- [86] Pankove, J. I. (1971). *Optical Process in Semiconductors*. New York: Dover Publications, Inc.
- [87] Schroder, D. K., (1990). *Semiconductor Materials and Device Characterizations*. New York: J. Wiley.
- [88] Escobedo Morales, A., Sánchez Mora, E., Pal, U. (2007). Use of diffuse reflectance spectroscopy for optical characterization of un-supported nanostructures. *Rev. Mex. Física S*, 53 (5), 18-22.
- [89] Senthilkumar, V., Vickraman, P., Ravikumar, R., (2010). Synthesis of fluorine doped tin oxide nanoparticles by sol-gel technique and their characterization. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 53 (2), 316–321.
- [90] Silva, R. F. ve Zaniquelli, M. E. D. (1999). Aluminium doped zinc oxide films: formation process and optical properties. *J. Non. Cryst. Solids*. 247 (1-3), 248–253.
- [91] Akat, E. (2012). *Katıhal Fiziği Temelleri*. İstanbul: Papatya Yayıncılık.
- [92] Morkoç, H. ve Özgür, Ü. (2007). *Zinc Oxide Fundamentals, Materials and Device Technology*. Weinheim: Wiley-VCH Publishers.
- [93] H., Rhoderick E. H. ve Williams R. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford. Clarendon Press ; New York : Oxford University Press.
- [94] Aydoğan, Ş. (2014). *Katıhal Fiziği*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

- [95] Sze, S. M. *Physics of Semiconductor Devices*. (2. Basım). United States of America: John Wiley and Sons Publishers.
- [96] Önal, B. (2009). *GaP Yarıiletkeni ile Hazırlanan Metal Yarıiletken Kontakların Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- [97] Stratton, R. (1962). Theory of field emission from semiconductors. *Phys. Rev.*, 125, 67-82.
- [98] Padovani, F.A. and Stratton, R. (1966). Field and thermionic–field emission in Schottky barriers,” *Solid. State. Electron.*, 9 (7), 695-707.
- [99] Lampert, M. A. and Mark, P. (1970). *Current injection in solids*. New-York: Academic Press.
- [100] Lhermitte C., Carles D., Vautier, C. (1975). *Conduction a l’obscurite dans les couches minces de CdTe, type N. 28* (2), 269–277.
- [101] Das, S., Datta, S.K., Saha, H. (1993). Reversible switching under forward bias in CdS/CdTe heterojunctions. *Phys. Stat. Sol.*, 136, 251–259.
- [102] Guessasma, M., Chahdi, S. (2004). The Study of the density of localised gap states in amorphous silicon material using Space Charge Limited Currents technique. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 7, (4–6), 411–417.
- [103] Neamen, D. A. (2006). *Semiconductor physics and devices*. (3. Baskı). New York: McGraw-Hill Companies.
- [104] Asıl, H. (2010). *Geniş Bant Aralıklı ZnO’nun, Elektrokimyasal Olarak Büyütülmesi, Karakterizasyonu ve Mümkün Elektronik Uygulamalarının Araştırılması*. Yayımlanmamış Doktora Tezi. Erzurum: Atatürk Üniversitesi.
- [105] Cheung, S. K. ve Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 49 (2), 85–87.
- [106] Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *J. Appl. Phys.*, 50 (7), 5052-5053.
- [107] Pascoe, K. J. (1978). *Properties of Materials for Electrical Engineers*. Toronto: John Willey and Sons.
- [108] Toygun Ş., Köneçoğlu G., Kalpaklı Y. (2013). General Principles of Sol-Gel. *J. Eng. Nat. Sci. Mühendislik ve Fen Bilim. Derg.*, 31, 456-476.
- [109] Pierre, A. C. (1998). *Introduction to Sol-Gel Processing*. London: Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht.

- [110] Brinker, C. ve Scherer, G. (1990). *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. New York: Academic Press.
- [111] Li, W., Fries, D. P., Malik, A. (2004). Sol-gel stationary phases for capillary electrochromatography. *J. Chromatogr. A*, 1044 (1), 23-52.
- [112] Wright, J. D. ve Sommerdijk, N.A.J.M. (2001). *Sol-gel materials: chemistry and applications*. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers.
- [113] Aurobind, S. V., Amirthalingam, K. P., Gomathi, H. (2006). Sol-gel based surface modification of electrodes for electro analysis. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 121 (1-3) 1-7.
- [114] Smirnov, M., Baban, C., Rusu, G. I. (2010). Structural and optical characteristics of spin-coated ZnO thin films. *Appl. Surf. Sci.*, 256 (8), 2405-2408.
- [115] Caglar, Y., Ilican, S., Caglar, M., Yakuphanoglu, F., Wu, J., Gao, K., Lu, P., Xue D. (2009). Influence of heat treatment on the nanocrystalline structure of ZnO film deposited on p-Si. *J. Alloys Compd.*, 481 (1-2), 885-889.
- [116] Danish, M., Ambreen, S., Chauhan, A., Pandey, A. (2015). Optimization and comparative evaluation of optical and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub> thin films prepared via sol-gel method. *J. Saudi Chem. Soc.*, 19 (5), 2-7.
- [117] Suh, D. I., Byeon, C. C., Lee, C. L. (2010). Synthesis and optical characterization of vertically grown ZnO nanowires in high crystallinity through vapor-liquid-solid growth mechanism. *Appl. Surf. Sci.*, 257 (5), 1454-1456.
- [118] Vishwas, M., Narasimha Rao, K., Arjuna Gowda, K. V., Chakradhar, R. P. S. (2010). Effect of sintering on optical, structural and photoluminescence properties of ZnO thin films prepared by sol-gel process *Spectrochim. Acta A*, 77, 330-333.
- [119] Altindal, Ş., Dökme, I., Bülbül, M. M., Yalçın, N., Serin, T. (2006). The role of the interface insulator layer and interface states on the current-transport mechanism of Schottky diodes in wide temperature range. *Microelectron. Eng.*, 83 (3), 499-505.
- [120] Yahia, I. S., Farag, A. A. M., Yakuphanoglu, F., Farooq, W. A. (2011). Temperature dependence of electronic parameters of organic Schottky diode based on fluorescein sodium salt. *Synth. Met.*, 161 (9-10), 881-887.
- [121] Badran, R., Umar, I., A., Al-Heniti, S., Al-Hajry, A., Al-Harbi, T., (2010). Synthesis and characterization of zinc oxide nanorods on silicon for the fabrication of p-Si/n-ZnO heterojunction diode. *J. Alloys Compd.*, 508 (2), 375-379.

- [122] Zhang, Y., Xu, J., Lin, B., Fu, Z., Zhong, S., Liu, C., Zhang, Z. (2006). Fabrication and electrical characterization of nanocrystalline ZnO/Si heterojunctions. *Appl. Surf. Sci.*, 252 (10), 3449-3453.
- [123] Song, D., Neuhaus, D. H., Xia, J., Aberle, A. G. (2002). Structure and characteristics of ZnO:Al/n-Si heterojunctions prepared by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 422 (1–2), 180-185.
- [124] Niraula, M., Aoki, T., Nakanishi, Y., Hatanaka, Y. (1998). Radical assisted metalorganic chemical vapor deposition of CdTe on GaAs and carrier transport mechanism in CdTe/n-GaAs heterojunction. *J. Appl. Phys.*, 83 (5), 2656–2661.
- [125] Pintilie, L., Pentia, E., Pintilie, I., Petre, D. (1997). Growth and properties of CdS thin films deposited from aqueous solutions, using different cadmium salts. *Mater. Sci. Eng. B*, 44 (1–3), 403–406.
- [126] Pradhan, B., Sharma, A. K., Ray, A. K. (2007). Conduction studies on chemical bath-deposited nanocrystalline CdS thin films. *J. Cryst. Growth*, 304 (2), 388-392.
- [127] Yakuphanoglu, F., Caglar, M., Caglar, Y., Ilican, S. (2010). Electrical characterization of nanocluster n-CdO/p-Si heterojunction diode. *J. Alloys Compd.*, 506 (1), 188-193.
- [128] Ghosh, R. ve Basak, D. (2007). Electrical and ultraviolet photoresponse properties of quasisaligned ZnO nanowires/ p-Si heterojunction. *Appl. Phys. Lett.*, 90 (24), 1-4.
- [129] Dutta M. ve Basak D. (2008). P-ZnO/n-Si heterojunction: Sol-gel fabrication, photoresponse properties, and transport mechanism. *Appl. Phys. Lett.*, 92 (21), 1-4.
- [130] Zebbar, N., Kheireddine, Y., Mokeddem, K., Hafdallah, A., Kechouane, M., Aida, M. S., (2011). Structural, optical and electrical properties of n-ZnO/p-Si heterojunction prepared by ultrasonic spray. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 14, (3-4), 229–234.
- [131] Vural, Ö., Şafak, Y., Altindal, Ş., Türüt, A. (2010). Current-voltage characteristics of Al/Rhodamine-101/n-GaAs structures in the wide temperature range. *Curr. Appl. Phys.*, 10 (3), 761-765.
- [132] Yakuphanoglu, F., Caglar, Y., Caglar, M., Ilican, S. (2010). ZnO/p-Si heterojunction photodiode by solgel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 13 (3), 137-140.

- [133] Dantus, C., Rusu, G. G., Dobromir, M., Rusu, M. (2008). Preparation and characterization of CdO thin films obtained by thermal oxidation of evaporated Cd thin films. *Appl. Surf. Sci.*, 255 (5), 2665-2670.
- [134] Aksoy, S. ve Caglar, Y. (2011). Electrical Properties of n-CdO/p-Si Heterojunction Diode Fabricated by Sol Gel. *Int. J. Math. Comp. Phys. Elec. and Comp. Eng.*, 5 (11), 1473-1476.
- [135] Muaz, A. K. M., Hashim, U., Ibrahim, F., Thong, K. L., Mohktar, M. S., Liu, W. W. (2015). Effect of annealing temperatures on the morphology, optical and electrical properties of TiO<sub>2</sub> thin films synthesized by the sol-gel method and deposited on Al/ TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/p-Si. *Microsyst. Technol.*, 22, 871–881.
- [136] Pjević, D., Marinković, T., Savić, J., Bundaleski, N., Obradović, M., Milosavljević, M., Kulik, M. (2015). Influence of substrate temperature and annealing on structural and optical properties of TiO<sub>2</sub> films deposited by reactive e-beam evaporation. *Thin Solid Films*, 591, 224–229.
- [137] Cultrera, A., Boarino, L., Amato, G., Lamberti, C. (2014). Band-gap states in unfilled mesoporous nc-TiO<sub>2</sub>: measurement protocol for electrical characterization. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 47 (1), 15102.
- [138] Sakr, G. B., Fouad, S. S., Yahia, I. S., Abdel Basset, D. M., Yakuphanoglu, F. (2013). Nano-crystalline p-ZnGa<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>/n-Si as a new heterojunction diode. *Mater. Res. Bull.*, 48 (2), 752-759.
- [139] Lampert, M. A. ve Mark, P. (1970). *Current Injection in Solids*. New York: Academic Press.
- [140] Gupta R. K., Yakuphanoglu F., Ghosh K., Kahol, P. K. (2011). Fabrication and characterization of p-n junctions based on ZnO and CuPc. *Microelectron. Eng.*, 88 (10), 3067-3069.
- [141] Sanjeev, S. ve Kekuda, D. (2015). Effect of annealing temperature on the structural and optical properties of zinc oxide (ZnO) nanocrystals prepared by sol gel. *Int. Conf. Mater. Sci. Technol.*, 73 (4), 12149.