

**SİLİSYUM TABANLI ORGANİK-İNORGANİK
DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU**

Dilek Duygu ORAL

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Ocak-2012

Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: F1005113

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Dilek Duygu Oral'ın “**Silisyum Tabanlı Organik-İnorganik Diyotların Elektriksel Karakterizasyonu**” başlıklı **Fizik** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 06/01/2012 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. Yasemin ÇAĞLAR	
Üye	: Yard. Doç. Dr. Mustafa OKUTAN	
Üye	: Doç. Dr. Saliha ILICAN	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü



ÖZET**Yüksek Lisans Tezi****SİLİSYUM TABANLI ORGANİK-İNORGANİK
DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU****Dilek Duygu ORAL****Anadolu Üniversitesi****Fen Bilimleri Enstitüsü****Fizik Anabilim Dalı****Danışman: Doç. Dr. Yasemin ÇAĞLAR****2012, 113 sayfa**

Bu çalışmada, sol jel spin kaplama yöntemi ve ısı buharlaştırma yöntemi ile omik kontaklı *n*-tipi ve *p*-tipi Silisyum alttaşlar üzerine organik (CuPc, C₆₀) ve inorganik (ZnO, CdO) filmleri üretilmiş ve bu filmler ile çoklueklem diyotları oluşturulmuştur. Elde edilen inorganik filmlerin XRD desenlerinden, polikristal yapıya sahip oldukları belirlenmiş ve bazı yapısal parametreleri (tanecik boyutu, örgü sabiti ve yapılanma katsayısı) hesaplanmıştır. Filmlerin FESEM görüntüleri incelenmiş ve tüm filmlerin alttaş yüzeyini tamamen kapladığı görülmüştür. FESEM görüntülerinden de filmlerin tanecik boyutları belirlenmiştir. Fabrikasyonu yapılan çoklueklem diyotların sıcaklığa bağlı *I-V* değişimleri ölçülerek elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. Bu ölçümlerden yararlanılarak diyotların akım-iletim mekanizmaları tayin edilmiştir. *I-V* ölçümlerinden; diyotların idealite faktörü (*n*), engel yüksekliği (ϕ_b), doyma akımı (*I*₀) ve seri direnç (*R*_s) değerleri bulunmuştur. Ayrıca oluşturulan diyotların ışığa duyarlılığını ölçmek için farklı aydınlatma şiddetlerinde *I-V* karakteristikleri de incelenmiştir. Diyotların fotodiyot ölçümleri yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: ZnO, CdO, Organik Yarıiletkenler, Sol Jel Spin Kaplama Yöntemi, Isıl Buharlaştırma Yöntemi, Çoklueklem Diyot

ABSTRACT
Master of Science Thesis
ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF SILICON BASED
ORGANIC-INORGANIC DIODES

Dilek Duygu ORAL
Anadolu University
Graduate School of Sciences
Departments of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR
2012, 113 pages

In this work, organic (CuPc, C₆₀) and inorganic (ZnO, CdO) films and heterojunction diodes were fabricated on *n*-Si and *p*-Si substrates with ohmic contacts, using sol gel spin coating method and thermal evaporation techniques. From the XRD patterns of the inorganic films, it was seen that films have polycrystalline nature. Structural parameters (grain size, lattice parameters, texture coefficients) have been calculated. The surface morphologies of the films have been investigated from FESEM images. It was seen that all the films completely covered the surface of substrates. Grain sizes of the films are calculated from the FESEM images. Temperature dependent *I-V* characteristics of fabricated heterojunction diodes have been investigated. From the calculations the current-conduction mechanisms of the films have been investigated. From the *I-V* results the ideality factor (*n*), barrier height (ϕ_b), saturation current (*I*₀) and series resistance (*R*_s) of diodes have been calculated. In addition, to investigate sensitivity to light of diodes, the *I-V* characteristics of diodes at different light intensities were investigated. The photodiode measurements of diodes have been carried out and the results have been investigated.

Keywords: ZnO, CdO, Organic Semiconductors, Sol gel Spin Coating, Thermal Evaporation, Heterojunction Diode

TEŞEKKÜR

Çalışmam sırasında bana yol gösteren, desteklerini esirgemeyen, bilimsel katkılarını benimle paylaşan ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Doç. Dr. Yasemin ÇAĞLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında yardım ve desteklerini gördüğüm Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyeleri Doç. Dr. Saliha ILICAN ve Doç. Dr. Müjdat ÇAĞLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımnda bana yardımcı olan, laboratuvar aşamalarını öğrenmemde büyük katkısı olan Arş. Gör. Seval AKSOY'a bitmeyen sabrı ve yardımları için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatımın her aşamasında bana destek olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam boyunca bana destek olan sevgili eşim Okan ORAL'a sabrı ve anlayışı için teşekkür ederim.

Dilek Duygu ORAL

Ocak 2012

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. TEORİK BİLGİLER	10
2.1 Giriş	10
2.2 Organik-İnorganik Yarıiletkenler ve Genel Özellikleri	11
2.2.1 C ₆₀	12
2.2.2 CuPc.....	13
2.2.3 ZnO	14
2.2.4 CdO.....	15
2.3 pn Eklem Diyotları	17
2.4 Metal-Yarıiletken (MY) Kontaklar	21
2.5 Doğrultucu ve Omik Kontaklar.....	21
2.4.1 p-Tipi yarıiletken/metal omik kontak	23
2.4.2 n-Tipi yarıiletken/metal omik kontak	24
2.6 Metal-Yarıiletken Kontakların Akım-Voltaj Karakteristikleri	26
2.7 Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları.....	28
2.8 Metal-Yarıiletken Fotodiyotlar	32
3. MATERYAL ve YÖNTEM	34
3.1. Giriş.....	34
3.2. Sol Jel Spin Kaplama Yöntemi.....	34

3.3. Vakumda Isıl Buharlaştırma Yöntemi.....	40
3.4. Organik-İnorganik Filmlerin Elde Edilmesi.....	41
3.4.1 Alttaşların kimyasal olarak temizlenmesi ve omik kontakların oluşturulması	41
3.4.2 Organik filmlerin elde edilmesi.....	43
3.4.3 İnorganik filmlerin elde edilmesi	44
3.5 Organik-İnorganik Diyotların Fabrikasyonu	45
 4. İNORGANİK FİLMLERİN X-IŞINI KIRINIMI DESENLERİ	48
4.1. Giriş.....	48
4.2. X-Işını Kırınımı	48
4.3. ZnO Filmlerinin X-Işını Kırınımı (XRD) Desenleri.....	51
4.4. CdO Filminin X-Işını Kırınımı (XRD) Desenleri.....	55
 5. ORGANİK-İNORGANİK FİLMLERİN TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU GÖRÜNTÜLERİ	58
5.1. Giriş.....	58
5.2. CuPc Filminin FESEM Görüntüleri.....	59
5.3. C ₆₀ Filminin FESEM Görüntüleri.....	61
5.4. ZnO Filmlerinin FESEM Görüntüleri.....	62
5.5. CdO Filminin FESEM Görüntüleri.....	64
 6. ORGANİK-İNORGANİK DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONLARI	66
6.1. Giriş.....	66
6.2. Elde Edilen Organik-İnorganik Diyotların Sıcaklığa Bağlı <i>I-V</i> Karakteristiği	66
6.2.1. Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun <i>I-V</i> karakteristikleri.....	66
6.2.2. Au/p-Si/n-C ₆₀ /Al diyotunun <i>I-V</i> karakteristikleri	71
6.2.3. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun <i>I-V</i> karakteristikleri	74
6.2.4. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun <i>I-V</i> karakteristikleri	80

6.2.5. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun <i>I-V</i> Karakteristikleri	86
6.3. Elde Edilen Diyotların Farklı Aydınlatma Şiddetlerinde <i>I-V</i> Karakteristiği	92
7. TARTIŞMA VE SONUÇ	99
KAYNAKLAR	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

2.1. (a) Fulleren molekülünün geometrik yapısı ve (b) Fulleren molekülü modeli.....	12
2.2. (a) Bakır ftalosiyanin molekülünün geometrik yapısı ve (b) Bakır ftalosiyanin molekülü modeli	14
2.3. ZnO bileşiğinin kristal yapısı.....	14
2.4. CdO bileşiğinin kristal yapısı	16
2.5. (a) İdeal diyotun sembolü ve (b) ideal diyotun karakteristiği.....	17
2.6. <i>pn</i> eklemının şematik gösterimi	18
2.7. $V=0$ 'da <i>pn</i> ekleminde kıtlık bölgesinin oluşumu	19
2.8. (a) İleri beslemeli ve (b) geri beslemeli <i>pn</i> eklemının enerji bant diyagramı.....	20
2.9. Metal-yarıiletken kontağın şematik yapısı	21
2.10. (a) Schottky kontağın ve (b) omik kontağın akım-gerilim karakteristiği	22
2.11. <i>p</i> -tipi yarıiletken/metal omik kontağın; (a) kontakdan önce, (b) kontakdan sonra ısı dengede ve (c) $V \neq 0$ durumundaki, enerji bant grafikleri	24
2.12. <i>n</i> -tipi yarıiletken/metal omik kontağın; (a) kontakdan önce, (b) kontakdan sonra ısı dengede ve (c) $V=0$ durumundaki, enerji bant grafikleri	25
2.13. Engel üzerinden geçen elektronların termiyonik emisyonunu gösteren enerji bant diyagramı.....	29
2.14. Fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki <i>I-V</i> karakteristikleri	33
3.1. Sol jel tekniği ile film kaplamanın şematik gösterimi.....	35
3.2. Spin kaplama cihazı (Spin Coater).....	37
3.3. Çözeltinin alttaşa damlatılması.....	38
3.4. Çözeltinin alttaşa homojen olarak yayılması.....	38

3.5. Çözeltilinin yüksek hızda döndürülmesi	39
3.6. Buharlaşma ve film oluşumu	39
3.7. Döndürme hızının ve kaplama süresinin film kalınlığı üzerine etkisi	40
3.8. Isıl Buharlaştırma Sistemi	41
3.9. Diyot üretiminde kullanılan kontak maskesi	45
3.10. Üretilen inorganik ve organik diyotların şematik gösterimi.....	46
3.11. (a) Keithley 2400 <i>I-V</i> kaynağı, (b) Lakeshore 331S sıcaklık kontrol ünitesi, (c) Janis Vpf 475 Cryostat (65-500K), ve (d) Sciencetech (Air Mass 1.5G) solar simulator	47
4.1. X-ışınlarının bir kristal tarafından kırınımı	49
4.2. X-ışınlarının numuneden kırınımı.....	50
4.3. Bruker Axs D8 Advance X-ışını kırınım cihazı	51
4.4. (a) 3000 rpm ve (b) 4000rpm döndürme hızlarında elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri	52
4.5. CdO filminin XRD deseni	56
5.1. Zeiss Ultraplus alan etkili taramalı elektron mikroskobu	59
5.2. CuPc filminin farklı büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri.....	60
5.3. C ₆₀ filminin farklı büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri	61
5.4. 3000 ve 4000 rpm döndürme hızlarında ve farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri.....	63
5.5. CdO filminin farklı büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri	65
6.1 Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun farklı sıcaklıklarda (a) lineer ve (b) yarı-logaritmik <i>I-V</i> değişimi.....	67
6.2. Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun ϕ_b ve <i>n</i> değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	70
6.3. Au/p-Si/n-C ₆₀ /Al diyotunun farklı sıcaklıklarda (a) lineer ve (b) yarı-logaritmik <i>I-V</i> değişimi.....	72
6.4. Au/p-Si/n-C ₆₀ /Al diyotunun ϕ_b ve <i>n</i> değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	73
6.5. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au (3000rpm, 30s) diyotunun farklı sıcaklıklarda (a) lineer ve (b) yarı-logaritmik <i>I-V</i> değişimi.....	76
6.6. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun ϕ_b ve <i>n</i> değerlerinin	

sıcaklığa bağlı değişimi	78
6.7. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au (4000rpm, 30s) diyotunun farklı sıcaklıklarda (a) lineer ve (b) yarı-logaritmik I - V değişimi.....	81
6.8. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun Φ_b ve n değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	83
6.9. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun I_0 vs. $1000/T$ grafiği.....	85
6.10. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun farklı sıcaklıklarda (a) lineer ve (b) yarı-logaritmik I - V değişimi.....	87
6.11. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun Φ_b ve n değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	89
6.12. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun 100K–240K sıcaklık değerlerindeki yarı-logaritmik I - V değişimi	91
6.13. Aydınlatma altında diyotun kısa devre akımı ve açık devre voltajı.....	93
6.14. Oda sıcaklığında, (a) Al/n-Si/p-CuPc/Au ve (b) Au/p-Si/n-C ₆₀ /Al diyotlarının karanlıkta ve 100mW/cm ² aydınlatma altında yarı-logaritmik I - V grafikleri.....	94
6.15. Oda sıcaklığında, (a) 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au ve (b) 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotlarının karanlıkta ve 100mW/cm ² aydınlatma altında yarı-logaritmik I - V grafikleri.....	96
6.16. Oda sıcaklığında, Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun karanlıkta ve 100mW/cm ² aydınlatma altında yarı-logaritmik I - V grafiği	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

2.1. MY kontakların iş fonksiyonuna göre doğrultucu ve omik kontaklar	22
3.1. Sol jel yönteminin avantajları ve dezavantajları.....	36
3.2. Diyot üretiminde kullanılan metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonları	42
3.3. ZnO filmlerinin üretimindeki döndürme hızı ve tavlama sıcaklığı parametreleri	44
4.1. 3000rpm döndürme hızında elde edilen ZnO filmlerinin 2θ , a , c ve d değerleri.....	53
4.2. 4000rpm döndürme hızında elde edilen ZnO filmlerinin 2θ , a , c ve d değerleri.....	53
4.3. Üretilen ZnO filmlerinin yapılanma katsayısı ve tanecik boyutları.....	55
4.4. CdO filminin (hkl), 2θ a ve d değerleri.....	56
6.1. Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve Φ_b değerleri.....	69
6.2. Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan $F(V_0)$ ve R_s değerleri	70
6.3. Au/p-Si/n-C ₆₀ /Al diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve Φ_b değerleri	71
6.4. Au/p-Si/n-C ₆₀ /Al diyotunun Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan $F(V_0)$ ve R_s değerleri	74
6.5. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve Φ_b değerleri	77
6.6. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan $F(V_0)$ ve R_s değerleri	79
6.7. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve Φ_b değerleri	82
6.8. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan $F(V_0)$ ve R_s değerleri	84

6.9. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve Φ_b değerleri	88
6.10. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan $F(V_0)$ ve R_s değerleri	90
6.11. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve Φ_b değerleri	92
6.12. Elde edilen diyotların 100mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altındaki V_{oc} ve I_{sc} değerleri	98

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A^*	: Richardson Sabiti
$\text{\AA}$	: Angström
a_{hex}	: Kristalografik örgü parametresi (hekzagonal)
a_{cub}	: Kristalografik örgü parametresi (kübik)
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrad derece
c_{hex}	: Kristalografik örgü parametresi (hekzagonal)
D	: Kristalin tanecik boyutu
d_{hkl}	: Kristal düzlemleri arası mesafe
eV	: Elektron volt
E_c	: İletim bandı minimum enerji seviyesi
E_v	: Valans bandı minimum enerji seviyesi
E_F	: Fermi enerjisi
h	: Planck sabiti
$I_{(hkl)}$	: (hkl) düzleminin ölçülen şiddeti
$I_{0(hkl)}$	: (hkl) düzleminin standart şiddeti
I	: Akım
I_0	: Doyma akımı
I_{sc}	: Kısa devre akımı
k	: Boltzman sabiti
K	: Kelvin
m^*	: Elektronun iletkenlik bandındaki etkin kütlesi
N	: Difraksiyon piki sayısı
n	: İdealite faktörü
q	: Elektron yükü
R_s	: Seri direnç
T	: Mutlak sıcaklık
$TC_{(hkl)}$	: Yapılanma katsayısı
V	: Uygulanan voltaj
V_d	: Difüzyon potansiyeli

V_{oc}	: Açık devre voltajı
λ	: X-ışını dalga boyu
β	: Yarı pik genişliği
θ	: Bragg kırılma açısı
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ϕ_b	: Bariyer yüksekliği
γ	: İdealiteden büyük ilk tamsayı

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Yarıiletkenlerin elektronikte kullanılması, katıhal fiziğinin 20. yüzyıl teknolojisine getirdiği en büyük katkı olarak sayılabilir. Yarıiletken teknolojisi, uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir konudur. 1874 yılında Braun [1] metal ve yarıiletken kontaklar arasındaki elektriksel iletkenliğin doğasını keşfetmiştir. Metal-yarıiletken kontaklar, Braun'un ilk çalışmalarından önce yapılmıştır ve bu devre elemanları ilk radyo deneylerinde dedektör olarak kullanılmıştır. 1906'da patentini almış olduğu, silisyum kullanarak nokta kontak dedektörü yapan Pickard'ın ardından 1907'de Pierce, bir tür yarıiletken üzerine metallerin püskürtülmesiyle elde edilen diyotların doğrultucu karakteristiklerini yayınlamıştır. 1920 yılının ilk dönemlerinde vakum ortamında daha kaliteli nokta kontaklı diyotlar elde edilmeye başlanmıştır. Bu dönemlerde nokta kontaklar; radyo ve düşük seviye mikrodalga dedektörü, frekans çevirici, ikinci dünya savaşında ise radar dedektörü olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönemlerden sonra ise bu aygıtlara olan ilgi artmış ve bu alanda geniş çaplı araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. 1935'ten beri silisyum nokta kontak ve selenyum Schottky diyotlar radyo dedektörleri olarak kullanılmaktadır. Radarların geliştirilmesiyle dedektör diyotlara olan ihtiyaç artmıştır. Bu aşamada yüksek saflıkta silisyum ve germanyum elde etme metotları geliştirilmiştir. 1960'lı yıllarda, nokta kontak diyottan yola çıkılarak Schottky engel diyotu üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Yarıiletken fiziğinin daha da gelişmesi ile beraber metal-yarıiletken kontakların yapısı anlaşılmaya başlanmıştır [1].

Üretilen bir devre elemanının istenilen devre yapısına ait bütün özelliklerinin bilinmesi, doğabilecek olumsuzlukların giderilmesini sağlar. Bu nedenle yarıiletken teknolojisinde, temel elektronik devre elemanlarının fiziksel ve elektriksel özelliklerini araştırmak büyük önem taşımaktadır. Yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini araştırmak için kullanılan metal-yarıiletken kontakların; metal-okisit ve oksit-yarıiletken ara yüzeylerindeki davranışlarının bilinmesi, devre elemanlarının performansında oldukça etkilidir. Bu sebepten ötürü bu kontakların fiziksel özelliklerinin incelenmesi, yeni devre elemanlarının gelişmesinde etkilidir. Metal-yarıiletken kontaklar elektronik ve optoelektronik

teknolojisinde aygıtların yapımında önemli bir rol oynamaktadır. Çoklueklem diyotlar, ışık yayan diyotlar (LEDs), lazer diyotları (LDs), UV fotodedektörler ve Schottky diyotları önemli metal yarıiletken kontaklar arasındadır.

Son zamanlarda birçok araştırma gurubunun geniş bant aralığına sahip yarıiletkenlere olan ilgileri, bu yarıiletkenlerin çoklueklem diyotlar, LEDs ve LDs gibi geniş uygulama alanlarına sahip olmaları nedeniyle artmıştır. Çinko oksit (ZnO), kadmiyum oksit (CdO), indiyum oksit (In_2O_3), kalay oksit (SnO) gibi saydam iletken oksitler (TCO), optoelektronikte geniş uygulama alanına sahiptirler. Özellikle ZnO ve CdO güneş pili uygulamalarında oldukça ilgi çeken yarıiletkenlerdir. Bunların yanında optik ve elektronik aygıt uygulamalarında da organik yarıiletkenler oldukça fazla ilgi çekmeye başlamıştır. Bu organik filmler arasında bakır ftalosiyanın (CuPc) ve fulleren (C_{60}) diyot ve transistör uygulamalarında kullanılan organiklerden bazılarıdır. Bu filmler, kolay üretilebilirliği ve geniş alan malzeme karakterizasyonundan dolayı avantajlara sahiptir.

Literatür incelendiğinde çeşitli üretim yöntemleriyle elde edilen C_{60} , CuPc gibi organik ve ZnO, CdO gibi inorganik yarıiletkenler kullanılarak oluşturulan diyotlar üzerine yapılan çalışmaların çok fazla olmadığı göze çarpmaktadır. Bu konu üzerine yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Chintakula [2] yüksek lisans tezinde, katodik elektrodpozisyon yöntemiyle Al/CuPc/PEDOT: PSS (1.tip) ve Al/CuPc/ITO (2.tip) olmak üzere iki çeşit Schottky diyot oluşturmuştur. Bu diyotların yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyonlarını incelemiştir. Farklı kalınlıklarda ürettiği bu diyotların, aydınlık ve karanlık ortamlardaki akım-voltaj (I - V) karakteristiklerini inceleyerek diyotların idealite faktörlerini (n) bulmuştur. 1.tip diyotun karanlıktaki idealite faktörünü 24,5; aydınlıktaki idealite faktörünü 23,3 bulmuştur. 2.tip diyotun karanlıktaki idealite faktörünü 13,4; aydınlıktaki idealite faktörünü 12,2 olarak bulmuştur. Ayrıca sıcaklığa bağlı I - V ölçümlerinden diyotların idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimini incelemiştir.

Pham ve arkadaşları [3] organik moleküler ışın depolama yöntemiyle ITO alttaş üzerine CuPc ince filmini elde etmişlerdir. Filmin I - V ve kapasitans-voltaj (C - V) ölçümlerinden elektriksel karakterizasyonlarını incelemiştir.

Organik tabakadaki tuzakların dolup boşalmasından dolayı I - V karakteristiğinin histerisiz tipi bir davranış sergilediğini görmüşlerdir.

Rajaputra ve arkadaşları [4] CuPc/Al Schottky diyot güneş pili üretmişlerdir. Diyottaki CuPc tabakasının kalınlığını 15nm ile 140nm arasında değiştirmişlerdir. Ürettikleri diyotun optik, yapısal ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Diyotun idealite faktörü, seri direnci (R_s) ve doyma akımı (I_0) değerlerini karanlıkta ve 1Sun (100mW/cm^2) aydınlatma altında hesaplamışlardır. Karanlıkta yapılan ölçümlerde diyotun kalınlığının artmasıyla n değerinin 7,7 ile 18,29, R_s değerinin $7,10\text{k}\Omega$ ile $9,41\text{k}\Omega$ ve I_0 değerinin ise $0,121\text{mA}$ ile $0,149\text{mA}$ aralığında değiştiğini hesaplamışlardır. Aydınlıkta yapılan ölçümlerde ise diyotun kalınlığının artmasıyla, n değerinin 7,66 ile 18,29, R_s değerinin $6,87\text{k}\Omega$ ile $9,11\text{k}\Omega$, I_0 değerinin ise $0,147\text{mA}$ ile $0,109\text{mA}$ aralığında değiştiğini hesaplamışlardır. 1 Sun aydınlatma altında diyotun kısa devre akım yoğunluğunun (J_{sc}) 0.042mA/cm^2 'den $0,125\text{mA/cm}^2$ 'ye ulaştığını, açık devre voltajının (V_{oc}) ise 220mV 'den 907mV 'ye yükseldiğini bulmuşlardır.

Reis ve arkadaşları [5] vakumda buharlaştırma yöntemiyle ITO/CuPc/Al diyotunu üretip, diyotun elektriksel karakterizasyonunu yapmışlardır. 100K – 308K sıcaklıkları arasında karanlıkta yaptıkları I - V ölçümlerinden ITO/CuPc/Al yapısının klasik diyot davranışı sergilemediğini görmüşlerdir.

Mohamad ve Allaf [6] C_{60} ince filmlerini farklı alttaşlar (silisyum, mikroskop camı, KBr disk) üzerinde elde edip elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri diyotların tipik bir pn ekleminin I - V karakteristiğine çok benzer sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. C_{60} kullanarak ürettikleri diyotların I - V karakteristiğinin farklı organik ince filmler (örneğin CuPc, PTCD) kullanarak ürettikleri diyotlara göre daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca buna p -tipi alttaşla üretilen diyotların I - V karakteristiğinin n -tipi alttaşla üretilen diyotların I - V karakteristiğinden daha iyi olduğunu da eklemişlerdir. Diyotun kuantum verimini hesaplamış ve 1'den büyük olduğunu bulmuşlardır.

Ohmori ve arkadaşları [7] titanyum oksit (TiO_2) filminin üzerine organik pn çokluekleme fotovoltaiik pil üretip fotovoltaiik özelliklerini incelemişlerdir. Organik olarak C_{60} , perylene derivative (BP-PTCDI), dichloromethane (DCM), tetrapirydiyl porphyrin (H_2TPyP) kullanıp farklı diyotlar elde etmişlerdir.

Diyotların I - V karakteristikleri incelediklerinde C_{60} ve BP-PTCDI içeren diyotların kısa devre akım yoğunluğunun diğerlerine göre daha büyük olduğunu bulmuşlardır. En büyük kısa devre akımını, C_{60} organik kullanılarak elde edilen diyotta gözlemişlerdir. Beyaz ışık altında, 120°C 'de büyütülen C_{60} (60nm)/CuPc diyot için I_{sc} ve V_{oc} değerlerini sırasıyla $0,49\text{VmA/cm}^2$ ve $0,25\text{V}$ olarak bulmuşlardır.

Ma ve arkadaşları [8] vakumda termal buharlaştırma yöntemiyle Cu/ C_{60} /Al diyotunu üretmişlerdir. C_{60} kullanılmasının sebebi olarak, bu organik materyalin kararlı bir elektron akseptörü olmasını ve yüksek taşıyıcı mobilitesine sahip olmasını göstermişlerdir. C_{60} 'ın yüksek mobilitesi sayesinde diyotun, megahertz mertebesindeki frekanslara tepki verdiğini belirtmişlerdir. Bunun yüksek performanslı organik elektronik aygıt üretimine zemin hazırlayabildiğini rapor etmişlerdir.

Vallurupalli [9] yüksek lisans tezinde, ITO ve TiO_2 alttaşları üzerine elde ettiği CuPc ve C_{60} organik filmleri kullanarak Schottky diyot güneş pili üretip, bunların elektriksel özelliklerini incelemiştir. I - V ölçümlerinden idealite faktörlerini hesaplamıştır. Farklı kalınlıklarda (60nm, 40nm) ürettiği C_{60} organik filmleri ile oluşturulan Schottky diyot güneş pillerinde en iyi açık devre voltajını (190mV) 40nm kalınlıkta elde etmiştir. CuPc/Al Schottky diyot güneş pillerinde yaptığı ölçümlerde kalınlık artışıyla (15nm'den 140nm'ye) açık devre voltajının 220mV'den 907mV'ye arttığını gözlemiştir. Ürettiği diyotlardan CuPc/Al Schottky diyot güneş pili için, kalınlık arttıkça (15nm'den 140nm'ye) karanlıkta idealite faktörünün 7,66'dan 16,08'e, aydınlıkta ise 7,7'den 18,29'a çıktığını belirtmiştir. C_{60} /Al Schottky diyot güneş pili için karanlıkta idealite faktörünü 5,73 (40nm) ve 13 (60nm), aydınlıkta ise 11,2 (40nm) ve 12,7 (60nm) olarak bulmuştur.

Yakuphanoglu ve arkadaşları [10] nanoyapılı ZnO/ p -Si diyotunu üretmiş, ürettikleri diyotun elektriksel ve fotovoltaiik özelliklerini incelemiştir. Öncelikle ZnO filmini omik kontaklı p -Si alttaş üzerine sol jel yöntemiyle üretmişlerdir. Daha sonra ZnO filminin üzerine vakumda termal buharlaştırma yöntemiyle alüminyum kontak yaparak çokluekle diyotu oluşturmuşlardır. I - V ölçümlerinden diyotun karanlıkta doğrultucu davranışa sahip olduğunu

belirlemişlerdir. Diyotun idealite faktörünü ve engel yüksekliğini sırasıyla 3,18 ve 0,78eV olarak hesaplamışlardır. Nanoyapılı n -ZnO/ p -Si diyotunun idealite faktörü değerinin, daha öncelerde üretilmiş olan literatürdeki ZnO nanorod ve ZnO nanodot/ p -Si heteroyapılı diyotların idealite faktöründen daha düşük olduğu için, bu diyotun diğer diyotlardan daha nitelikli olduğunu belirtmişlerdir. Çünkü bir diyotun ideal olabilmesi için n değerinin 1 olması gerekmektedir. Dolayısıyla üretilen bir diyotun idealite faktörü ne kadar 1'e yakın olursa, diyot o kadar ideale yakın olur. Ayrıca nanoyapılı ZnO'nun, n -ZnO/ p -Si diyotunun engel yüksekliğinde önemli bir etkiye sahip olduğunu not etmişlerdir. I - V karakteristiğinden hem ters hem de ileri beslemede, aydınlıkta bir artış olduğunu, ters akımın umulduğu gibi çok yüksek değerlerde olduğunu gözlemlemişlerdir. Farklı aydınlatma şiddetleri altında yapılan ölçümleri sonucu gözlenen I - V grafiğindeki kaymadan dolayı, nanoyapılı ZnO/ p -Si diyotunun bir fotodiyot gibi davrandığını rapor etmişlerdir. Diyotun, maksimum açık devre voltajını 0,26V ve kısa devre akımını $1,87 \times 10^{-8}$ A olarak bulmuşlar, bu sonuçlara göre diyotun fotovoltaiik özellik gösterdiğini belirtmişlerdir.

Bardan ve arkadaşları [11] termal buharlaştırma yöntemini kullanarak p -Si alttaş üzerine n -ZnO filmini elde ederek diyot üretmişlerdir. Ürettikleri diyotun oda sıcaklığında yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca, diyotun 298K-423K sıcaklıkları arasında I - V karakteristiğini de incelemişlerdir. Diyotun 2V gerilim altında doğrultucu özellik sergilediğini görülmüşlerdir. Diyotun direncinin sıcaklık yükseldikçe arttığı, daha yüksek sıcaklıklarda sabit bir karakteristiğe sahip olduğunu bulmuşlardır. Diyotun seri direncinin ise sıcaklık artışıyla birlikte arttığını gözlemişlerdir.

Choi ve arkadaşları [12] kimyasal aşındırma yöntemiyle p -Si/ZnO çoklueklem diyotu üretmişler ve ürettikleri diyotun I - V ve C - V karakteristiklerini incelemişlerdir. I - V karakteristiği, çoklueklem diyotun mükemmel bir doğrultucu olduğunu göstermiştir. İdealite faktörünü 4,5 ve doyma akımını 0,5nA olarak bulmuşlardır. n değerinin 1'den yüksek çıkmasına sebep olarak arayüzey durumlarını göstermişlerdir.

Dutta ve Basak [13] sol jel yöntemini kullanarak p -ZnO/ n -Si çoklueklem diyotunu üretmişlerdir. Çoklueklem diyotunun I - V karakteristiğini incelemiş,

fotokapasitans ve fotoakım spektrumu ölçümlemlerini yapmışlardır. p -ZnO/ n -Si çokluekleminin I - V karakteristiğini incelediklerinde diyotun doğrultucu bir özellik sergilediğini görmüşlerdir. p -ZnO/ n -Si çokluekleminin karanlıkta ve aydınlıkta alınan I - V karakteristiği ölçümleri daha önceki çalışmalarla zıt sonuçlar vermiştir. Farklı aydınlatma şiddetleri altında I - V karakteristiklerinden foto tepki ölçümlemlerini de yapmışlardır.

Klason ve arkadaşları [14] p -Si üzerine ZnO nanorod ve nanodot büyüterek p - n çoklueklemler elde etmişlerdir. Filmler üretilirken alttaşın üzerine spin kaplama yöntemiyle %10 ve %60 oranlarında yalıtkan bir katman (Poly methyl methacrylate, PMMA) ile kaplamışlardır. %10 yalıtkan katmana sahip olan çoklueklemler; A grubu, diğerleride; B grubu olarak isimlendirilmişlerdir. Elde edilen çoklueklemlerin elektrolüminesans (EL), fotolüminesans (PL) ve I - V karakteristiği ölçümlemlerini yapmışlardır. I - V ölçümlemlerinden çoklueklemler yapıların doğrultucu davranış sergilediğini görmüşlerdir. A grubu çoklueklemlerinin n ve I_0 değerlerini sırasıyla 3,91 ve $6,53 \times 10^{-8}$ A olarak bulmuşlardır. B grubu çoklueklemlerinin n ve I_0 değerlerini ise sırasıyla 5,47 ve $9,49 \times 10^{-6}$ A olarak bulmuşlardır. Elde ettikleri n değerlerinin 2'den yüksek çıkması nedeniyle diyotların idealden uzak olduğunu belirtmişlerdir. Buna sebep olarak arayüzey durumlarının varlığını ve Si alttaşların asıl temizleme prosedürü (RCA yöntemi veya HF çözeltisi ile temizleme) ile temizlenmemesini göstermişlerdir. Çoklueklemlerin engel yüksekliği değerlerini A ve B grubu için sırasıyla 0,77eV ve 0,65eV olarak bulmuşlardır. Buldukları bu değerleri literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslamışlar ve bu çalışmalara yakın sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir. Sonuç olarak yalıtkan tabakanın aygıtın verimini ve kararlılığını etkilediğini not etmişlerdir.

Lee ve arkadaşları [15] RF sputtering yöntemiyle 300, 480 ve 550°C alttaş sıcaklıklarında n -ZnO/ p -Si çoklueklemler fotodiyodunu üretmişlerdir. I - V ölçümlemlerinden, üretilen çoklueklemler diyotların doğrultucu davranış sergilediğini görmüşlerdir. 670nm dalgaboylu monokromatik kırmızı ışık altında, ileri beslemede, en iyi fotoakım değerini 480°C alttaş sıcaklığına sahip olan diyotta gözlemlemişlerdir. 300°C alttaş sıcaklığına sahip olan ZnO filminin, taşıyıcı yoğunluğu bakımından oldukça zayıf olduğu için n -ZnO/ p -Si diyot olarak

kullanıldığında iyi bir fotoelektrik performans göstermeyeceğini rapor etmişlerdir. 480°C altta sıcaklığına sahip diyotta en iyi film oluşumunu ve en iyi fotoelektrik özellikleri görmüşlerdir. Bu diyotun fotoakım değerlerine göre, diğer diyotların fotoakım değerlerinin oldukça küçük olduğunu ve 550°C altta sıcaklığına sahip olan diyottan daha yüksek kuantum verimine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Majumdar ve Banerji [16] darbeli lazer biriktirme (pulsed laser deposition, PLD) tekniğiyle p -ZnO/ n -Si ince film çoklueklemini üretmişlerdir. Çokluekleme termal buharlaştırma yöntemiyle 10^{-6} Torr basınçta alüminyum kontak yapıp 300°C’de tavlamışlardır. Ürettikleri çoklueklemin I - V karakteristiğini incelemiş ve pn çoklueklemin ideal olmayan diyot özelliği gösterdiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca neme bağlı I - V karakteristiği ölçümünü yapmışlardır. İleri beslemenin düşük voltaj değerlerinde akımın üstel olarak arttığını görmüşlerdir ki bu geniş bant aralığına sahip pn eklemelerinde gözlenen bir durumdur. Ve bu durum tünelleme mekanizmasının rekombinasyonu olarak belirtmişlerdir. Nemin varlığında çoklueklemin yapının iletkenlik özelliğinin azaldığını, düşük geri besleme voltajında, akımın üstel olarak arttığını görmüşlerdir.

Qi ve arkadaşları [17] PLD yöntemiyle farklı oksijen basınçlarında n -ZnO/ p -Si çoklueklemini elde etmişlerdir. Üretilen çoklueklemin kristallenmesine ve yüzey morfolojisine oksijen basıncının etkisini incelemişlerdir. Çoklueklemin yapının I - V karakteristiğini oksijenin kısmi basıncına göre iki kategoriye ayırmışlardır. Düşük basınçlarda (10^{-5} – 10^{-4} Torr), çoklueklemin I - V karakteristiğinin, herhangi bir pn eklemesinin I - V karakteristiği gibi sonuç verdiğini, ancak oksijen kısmi basıncı 10^{-3} Torr’a yükseldiğinde I - V karakteristiğinin değiştiğini görmüşlerdir. Oksijen kısmi basıncındaki artışın, tabaka direncinin yükselmesinin bir sonucu olarak filmin donör kirliliğini minimuma indirdiğini rapor etmişlerdir.

Yakuphanoglu ve arkadaşları [18] sol jel spin kaplama yöntemi kullanarak nanoyapılı n -CdO/ p -Si çoklueklemin diyotunu oluşturup yapısal, optik ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Filmin X-ışını kırınım (XRD) desenlerinden tercihli yöneliminin (111) düzleminde olduğunu bulmuşlardır. XRD desenlerindeki tüm pikler için yapılan katsayısını hesaplamışlardır. CdO

filminin tanecik boyutunu 26nm olarak hesaplamışlardır. CdO filminin optik bant aralığını 2,45eV olarak bulmuşlardır. *I-V* karakteristiği ölçümlerinden *n*-CdO/*p*-Si diyotunun doğrultucu özellik gösterdiğini belirtmişlerdir. Diyotun fotovoltaiik özellik karakterizasyonu için aydınlıkta ve karanlıkta *I-V* ölçümleri yapmışlardır. Yapılan ölçümlerden ışık şiddetiyle (100mWcm^{-2}) ters besleme akımının güçlü bir şekilde arttığını görmüşlerdir. Diyotun maksimum açık devre voltajını 0,12V ve kısa devre akımını $0,53 \times 10^{-6}\text{A}$ olarak bulmuşlardır. Bu değerlere göre, *n*-CdO/*p*-Si çoklueklem diyotunun fotovoltaiik davranış sergilediğini çünkü fotovoltaiik etkinin, ışık şiddetine maruz kalan *pn* heteroyapılı aygıtta bir gerilim ve akım üreteceğini rapor etmişlerdir. *n*-CdO/*p*-Si çoklueklem diyotunun açık devre voltajı düşük olduğu için bu cihazın güneş pilleri gibi optoelektronik aygıt uygulamalarında kullanılmak yerine fotodiyotlarda kullanılmaya daha uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Diyotun ideal olmayan davranış sergilediğini görmüşler ve idealite faktörünü 5,41 olarak bulmuşlardır.

Cağlar ve Yakuphanoglu [19] CdO/*p*-Si çoklueklem diyotunu sol jel spin kaplama yöntemiyle üretilip, 80K–400K sıcaklıkları aralığında elektriksel karakterizasyonunu yapmışlardır. Filmin SEM görüntülerini incelemişler ve filmin çiçeğe benzeyen yapılara sahip taneciklerden oluştuğunu belirtmişlerdir. Bu yapıların yarıçaplarının yaklaşık olarak 0,5–1 μm aralığında olduğunu belirtmişlerdir. CdO filminin optik bant aralığını 2,57 eV olarak bulmuşlardır. Oda sıcaklığında CdO filminin elektriksel iletkenliğini $2,75 \times 10^{-3}(\text{ohmcm})^{-1}$ olarak bulmuşlardır. Diyotun idealite faktörünün sıcaklık artışıyla 8,62'den 5,11'e düştüğünü gözlemişlerdir. Diyotun *I-V* ölçümlerinden, geri besleme akımının artan sıcaklıkla arttığını bulmuşlardır. CdO/*p*-Si çoklueklem yapının ideal olmayan kontak davranışı sergilediğini ve idealite faktörünün olması gereken değerden yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca diyotun düşük ve yüksek sıcaklıklarda akım mekanizmasının değiştiğini görmüşlerdir.

Ortega ve arkadaşları [20] kimyasal depozisyon yöntemiyle CdO/*p*-Si çoklueklem yapısını oluşturup elektriksel karakterizasyonunu yapmışlar ve hiçbir fotovoltaiik etki görülmemesine rağmen fotodedektör olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir. Aydınlık ve karanlıkta, 300°K'de aldıkları *I-V* ölçümlerinin

analizine göre, çoklueklem yapının tipik CdO/*p*-Si diyot özelliği gösterdiğini bulmuşlardır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, çalışmalarda kullanılan organik-inorganik yarıiletkenlerin diyot ve fotodiyot yapımına uygun oldukları görülmektedir. Buradan yola çıkılarak bu çalışmada daha iyi özelliklere sahip organik-inorganik çoklueklem diyotlar üretilmesi ve karakterize edilmesi planlanmıştır.

Bu tezin amacı, yüksek vakumda ısı buharlaştırma ve sol jel spin kaplama yöntemleri kullanılarak uygun Si alttaşlar üzerine C₆₀, CuPc, ZnO ve CdO yarıiletken filmleri elde edilerek, çoklueklem diyotları oluşturmak ve bu diyotların bazı yapısal ve elektriksel özelliklerini araştırmaktır. Bu amaç doğrultusunda C₆₀ ve CuPc organik yarıiletken filmleri, vakumda ısı buharlaştırma yöntemiyle, ZnO ve CdO inorganik yarıiletken filmleri, sol jel spin-kaplama yöntemiyle, arka yüzeyleri omik kontaklı Si (*p*-tipi, *n*-tipi) alttaşlar üzerinde elde edilmiştir. Elde edilen organik-inorganik filmlerin yapısal karakterizasyonu; XRD desenleri ile yüzeysel karakterizasyonu ise FESEM ile yapılmıştır. Daha sonra elde edilen bu çoklueklem yapıların elektriksel özelliklerini incelemek için altın ve alüminyum metalleri kullanılarak, filmin yüzeyine metal kontaklar buharlaştırılmıştır. Üretilen organik-inorganik diyotların farklı sıcaklık değerlerindeki *I*-*V* karakteristiklerinden yararlanılarak *n*, *I*₀, *Ø*_b ve *R*_s parametreleri tespit edilmiştir. Ayrıca oluşturulan organik/inorganik diyotların karanlık ortamda ve oda sıcaklığında, farklı aydınlatma şiddetleri altındaki fotodiyot özellikleri de araştırılmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Giriş

Yarıiletkenler, katıların en ilginç ve önemli sınıfını oluşturur. Bunlar, metallerden yalıtkanlara uzanan bölgeyi kapsayan geniş bir olaylar zinciri sergilerler ve geniş uygulama alanına sahiptirler. Öz dirençleri, iletkenlerle (10^{-6} ohm.cm) yalıtkanlar (10^{14} – 10^{20} ohm.cm) arasında kalan ve 10^{-2} – 10^{-9} ohm.cm aralığında olan yarıiletkenlerde, sıcaklık arttıkça iletkenlik arttığı halde, iletkenlerde sıcaklık arttıkça iletkenlik azalır. Mutlak sıfırda (0K'de) yarıiletkenler iyi bir yalıtkan haline gelirler [21]. Yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri katkılama, ısıtma işlemi, optik uyarma gibi çeşitli yöntemlerle değiştirilebilir. Dolayısıyla yarıiletkenler transistör, diyot, dedektör gibi birçok aygıtta kullanılır.

Katıların bant teorisi, yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik özelliklerini büyük bir başarı ile açıklar. Saflık derecesi yüksek olan bir yarıiletkende 0K'de valans bandındaki tüm yörüngeler dolu ve iletim bandındaki tüm yörüngeler boştur. Sıcaklık arttıkça elektronlar valans bandından iletim bandına ısısal uyarma yoluyla geçerler. Hem iletim bandındaki elektronlar hem de bunların valans bandında bıraktığı boşluklar elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar.

Asal yarıiletkenler ilginç materyallerdir, ancak yarıiletkenlerin gerçek gücü özel katkı veya kirlilik atomlarının küçük ve kontrollü bir miktarının ilave edilmesiyle anlaşılır. Yarıiletken içerisindeki bu katkılama işlemi ile yarıiletkenin elektriksel karakteristiği önemli ölçüde değiştirilebilir. Dolayısıyla yarıiletkenin istenilen özelliklere sahip olarak üretimi, yarıiletken içerisine belirli oranlarda safsızlık atomları katkılanarak da yapılabilir.

Safsızlık atomları, donör (elektron verici) ya da akseptör (elektron alıcı) olarak adlandırılır. Donör kirlilik atomlarıyla katkılanmış bir yarıiletkende elektron yoğunluğu fazla olur. Bu tip bir yarıiletkene *n*-tipi yarıiletken denir. Hole yoğunluğu fazla olan akseptör kirlilik atomlarıyla katkılanmış bir yarıiletken ise *p*-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Katkılanmış bir yarıiletken değişik devre elemanlarının fabrikasyonunda önemlidir.

2.2. Organik-İnorganik Yarıiletkenler ve Genel Özellikleri

Organik yarıiletkenler, 1940'lı yılların sonlarında yavaş yavaş tanınmaya başlanmıştır. 1980'lerin sonlarında üretilen bu TFT aygıtlarının düşük performansa sahip olmaları nedeniyle birkaç akademik çalışma grubu dışında bu çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu süre zarfında organik yarıiletkenlerle daha yüksek performanslı aygıt üretimi için çalışmalar devam etmiştir [22]. Düşük mobilitelere sahip olmaları sebebiyle ince film transistör (TFT) yapılarında sık kullanılmışlardır.

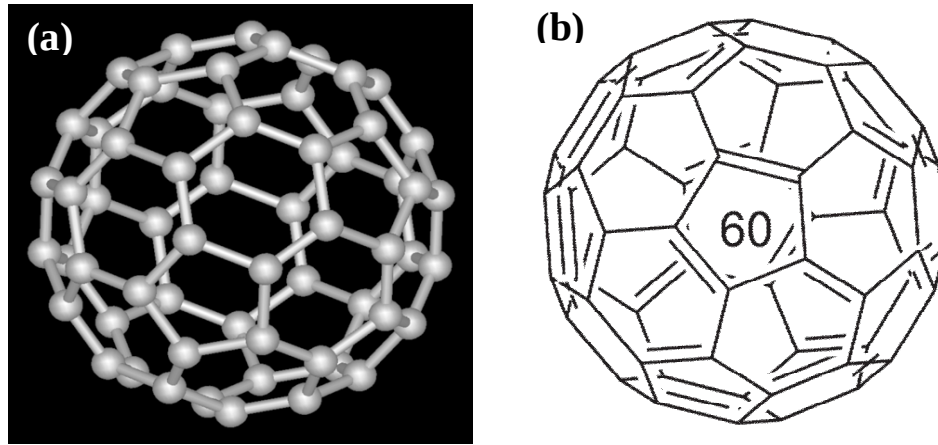
Organik yarıiletken malzemelere geleceğin malzemesi gözüyle bakılmaktadır. Bilgi ve teknolojik gelişmelere paralel olarak gelişen elektronüğün temel malzeme taşı olan silisyuma alternatif yeni malzeme arayışları, dikkatleri organik yarıiletken malzemeler üzerinde toplamış durumdadır [23].

Organik maddelerin molekül yapılarında, genellikle karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N), kükürt (S) ve fosfor (P) bulunur. Organik yarıiletkenler, yarıiletken özellikler taşıyan organik materyallerdir. İletim mekanizmaları inorganik yarıiletkenlere benzer özellikler göstermektedir. İnorganik yarıiletkenlerden farklı olarak organik yarıiletkenlerde elektronik geçişler HOMO (highest occupied molecular orbital) ve LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) ile karakterize edilir [22]. Bir organik yarıiletkende HOMO ile LUMO arasında bir enerji seviyesine sahip ve enerji açısından HOMO'ya daha yakın boş bir orbital sağlanırsa (*p*-tipi organik yarıiletken), bu durumda bu dışarıdan madde ilavesi ile sağlanmış boş orbitale yarıiletkenin HOMO seviyesinden elektron geçişi olur. Yarıiletkende oluşan bu boşluk (elektron eksikliği) elektrik akımının iletilmesine yardımcı olur. Eğer HOMO ile LUMO arasına sağlanan orbital enerji bakımından LUMO'ya daha yakın ve dolu bir orbital ise (*n*-tipi organik yarıiletken) bu durumda da dolu olan orbitalden LUMO seviyesine elektron geçişi olur ve yarıiletken üzerindeki elektron fazlası, elektrik akımı iletiminde yük taşıyıcı görevini üstlenir. Organik yarıiletkenlerde yük taşıyıcılarının geçişleri hopping mekanizmasıyla tanımlanır.

İnorganik yarıiletkenler gibi organik yarıiletkenlerde katkılanarak yapıları değiştirilebilir. Organik metal olarak bilinen PEDOT: PSS ve polyanilin organik yarıiletkenlerde katkılamaya uygun materyallerdir [22].

2.2.1. C₆₀

Doğal karbon birçok formda bulunabilir. Bunlardan en bilinenleri grafit, elmas ve fullerenerlerdir. Fullerenerler büyük karbon kafesler olarak da bilinir. Bunlardan biri de C₆₀'tır. Şekil 2.1'de fullerener molekülünün geometrik yapısı verilmiştir.



Şekil 2.1. (a) Fullerener molekülünün geometrik yapısı ve (b) Fullerener molekülü modeli

C₆₀ çok yüksek elektronegatifliğe sahiptir (yaklaşık 2.65eV) ve molekülleri arasında bir etkileşim olmadığı için, moleküllerin kendi arasında herhangi bir yük transferi söz konusu değildir [24]. Yapılan direnç ölçümlerinden C₆₀'ın yalıtkan olduğu gözlenmiştir. Ancak alkali metallerle katkılандığında iletken hale geçmektedir.

C₆₀ kristalleri kovalent ve iyonik bağlarla karşılaştırıldığında çok zayıf olan Van der Waals kuvvetiyle bağlı olduğu için kimyasal olarak çok kararsız ve kırılganlardır [25]. Bu nedenle pratik cihazlara uygulanması çok zordur. Buna karşılık, C₆₀ katkılı GaAs gibi oldukça istikrarlı olan C₆₀ katkılı malzemelerle ilgili şimdiye kadar bir kaç rapor yayınlanmıştır [26].

n-tipi bir organik olan C_{60} 'ın bant aralığı 1,5eV olarak hesaplanmıştır. Fakat bu aralık geçişleri yasak geçişlerdir. Bu nedenle optik soğurma spektrumu zayıftır [27].

C_{60} yüksek elektronegatifliği sayesinde güneş pillerinde enerji depolanması amacı ile kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca iletken polimerlerde bir elektron alıcısı olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir [28]. Yeni keşfedilen bir materyal olmasından dolayı pratik uygulama alanları henüz keşfedilmeye başlanmıştır. Buhar haline geçmiş C_{60} 'ın bir yüzeye elmas ve grafitten daha düzgün olarak kaplanabilmesi, koruyucu kaplama amaçlı kullanımında daha öne çıkmasını sağlamıştır.

Özet olarak sıra dışı yapılarından dolayı fullerenler son derece ilginç uygulama alanlarına sahiptir. Fizik, kimya ve mühendislik bilimlerinde, bu malzemelerin uygulama alanları hakkında detaylı araştırmalar devam etmekte ve her geçen gün yeni bir özelliği keşfedilmektedir.

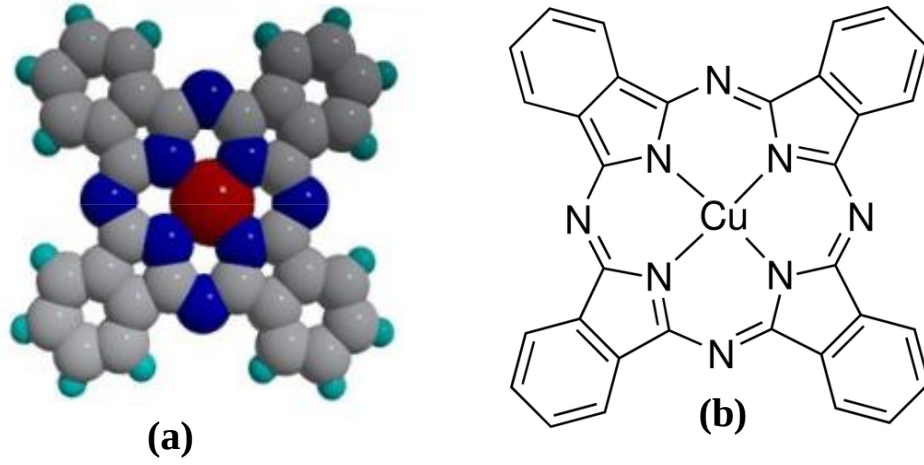
2.2.2. CuPc

Ftalosiyaninler, kimyasal ve termal kararlılıkları [29], ince filmlerinin kolay hazırlanabilmesi, yakın infrared (IR) bölgede yüksek soğurma bandına sahip olmaları [30] ve elektriksel özelliklerinin katkılama ile büyük oranda değiştirilmesi gibi nedenlerden dolayı, en çok çalışılan organik yarıiletken malzemelerdir [31,32].

Ftalosiyaninler vakum sisteminde kolayca süblimleşebilen maddeler olması nedeniyle, bu teknik ile yüksek saflıkta yapısal özellikleri ve kimyasal kararlılıkları açısından oldukça iyi olan ince filmler kolayca elde edilebilir. Optik lojik aygıtlarda, LED'lerde, elektrofotografide, gaz dedektörlerinde, güneş pillerinde, renk filtrelerinde kullanılmaktadır [33,34].

Bakır ftalosiyanin (CuPc) *p*-tipi bir yarıiletken olup ince filmleri ve metallerle olan eklemleri, fotovoltaiik uygulamalarda (güneş pilleri), LED'lerde ve alan etkili transistörlerde kullanılabilecek ilginç elektriksel özellikler göstermektedir [35,36]. CuPc, fotoiletkenlik karakteristiği ve fotovoltaiik etkileri

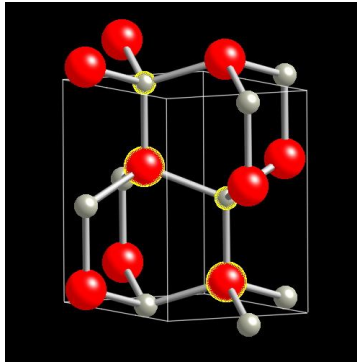
sayesinde organik güneş pillerinde soğurucu olarak kullanılmaktadır [37]. Şekil 2.2’de bakır ftalosiyanın molekül yapısı verilmiştir.



Şekil 2.2. (a) Bakır ftalosiyanın molekülünün geometrik yapısı ve (b) Bakır ftalosiyanın molekülü modeli

2.2.3. ZnO

ZnO hem mikroelettronik hem de optoelettronik aletlerde, pek çok uygulama için kullanılabilen, üzerinde birçok çalışma yapılan çok ilginç bir materyaldir. ZnO hekzagonal wurtzite yapıda kristalleşen *n*-tipi bir yarıiletkenidir. Şekil 2.3’te ZnO molekül yapısı verilmiştir



Şekil 2.3. ZnO bileşiğinin kristal yapısı

ZnO; beyaz renkli, oda sıcaklığında uyarılmış bağlanma enerjisi 60meV olan ve 3,3eV'luk direk bant geçişli optik bant aralığına sahip bir yarıiletkenidir. ZnO gibi geniş bant aralığına sahip ve direk bant geçişli yarıiletkenler, elektromanyetik dalga spektrumunun mavi ve morötesi bölgesinde LED ve LD'ler gibi ultraviyole optik aygıt yapımına uygundur [38]. Geniş bant aralığına sahip diğer malzemelere göre ZnO'nun eksiton bağlanma enerjisi yaklaşık üç kat büyüktür. Bu bakımdan ZnO optoelektronik ve fotonik devreler için oldukça uygun bir materyaldir [39,40].

ZnO, aynı zamanda piezoelektrik özellik gösterip, görünür bölgede yüksek optik iletkenliğe (%80-%90) sahiptir. Tavlanarak veya uygun şekilde katkılanarak iletkenliği kontrol edilebilir. ZnO'nun piezoelektrik özellikleri, yüzey akustik dalga (SAW) aygıtları gibi ince film uygulamalarında kullanılır [41].

ZnO, 10^{-3} – 10^{+2} Ωcm aralığında bir elektriksel dirence sahiptir. Serbest taşıyıcı yoğunluğu 5×10^{17} – $3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, mobilitesi $180 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ve kırılma indisi 1,95–2,1 arasında değişmektedir [42]. ZnO filmleri PLD [43], kimyasal buhar depolama (CVD) [44], moleküler demet epitaksi (MBE) [45], elektrokimyasal kaplama [46], püskürterek kaplama [47,48], sol jel [49] ve hidrotermal yöntem [50,51] gibi çeşitli yöntemlerle elde edilebilmektedir.

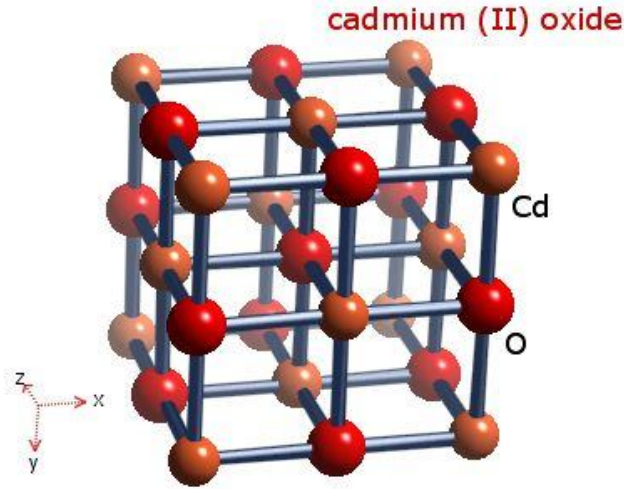
2.2.4. CdO

ZnO, In_2O_3 , CdO gibi TCO'lar yarıiletken özellik taşıyıp, aygıt teknolojisindeki kullanımları sayesinde son zamanlarda oldukça yaygın olarak incelenmektedir.

Bu TCO'lardan biri olan CdO; gaz sensörü uygulamaları, foto diyot, saydam elektrot, fototransistör ve fotovoltaiik güneş pilli uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [52].

CdO, NaCl (FCC) kristal yapısına ve 2,2–2,8eV direk bant geçişli optik bant aralığına sahip olan *n*-tipi bir yarıiletkenidir. Şekil 2.4'te CdO'nun örgü yapısı verilmiştir. [53]. CdO'nun optik bant aralığı diğer TCO'lar ile karşılaştırıldığında daha dar ve TCO'lardan beş ila on kat daha fazla yüksek elektron mobilitesine

sahiptir [54]. CdO, yüksek iletkenliğe ve görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahiptir. Oda sıcaklığında mobilitesi $64\text{cm}^2/\text{Vs}$, öz direnci $4,87 \times 10^{-4}\text{ohmcm}$ 'dir [53].



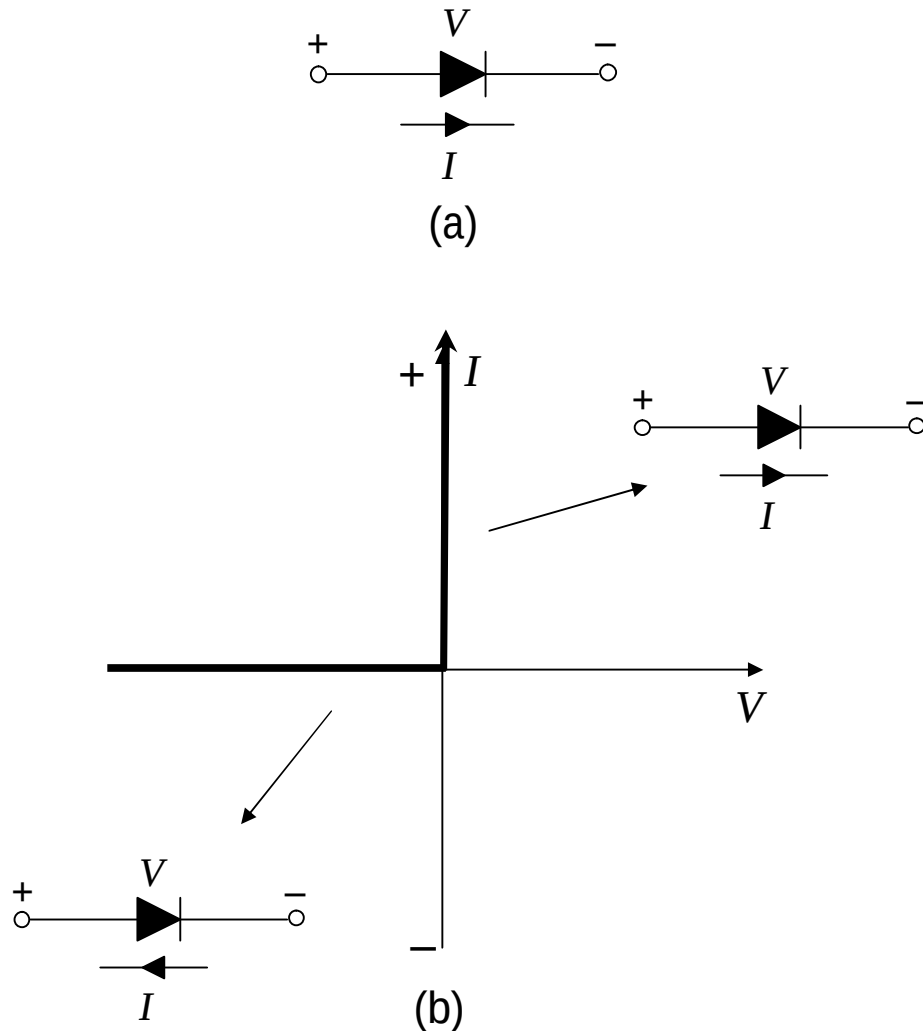
Şekil 2.4. CdO bileşiğinin kristal yapısı

CdO, katkılama olmaksızın sahip olduğu yüksek elektriksel iletkenliği, güneş ışımalarının spektral bölgesindeki optik geçirgenliği ve yüksek geçirgenliği sayesinde başta güneş pilleri olmak üzere fotodiyotlarda, fototransistörlerde, geçirgen elektrotlarda, sıvı kristal göstergelerde, IR dedektörlerde ve yansıma yapmayan kaplamalarda uygulanabilir olmuştur [55–57].

CdO filmleri kimyasal buhar depolama (CBD), saçırma [58], püskürtme [59], sol jel [60], radyo frekans (RF) saçırma [61] gibi tekniklerle elde edilebilir [62,63].

2.3. pn Eklem Diyotarı

Elektronik devre elemanı olarak üretilen ilk *pn* eklemi “*diyot*” adını almıştır. Diyot, üretilen en basit yarıiletken aygıt olmasıyla birlikte elektronik sistemlerde hayati rol oynamaktadır. Gerek çok basit, gerekse oldukça karmaşık uygulamalarda kullanılan bir aygıttır. İdeal bir diyotun sembolü ve karakteristiği Şekil 2.5’te gösterilmiştir.



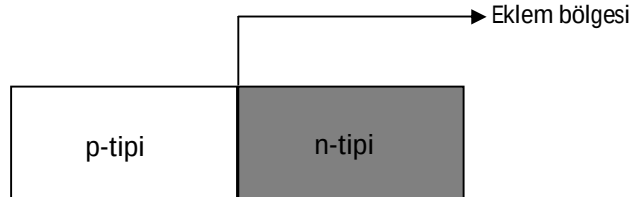
Şekil 2.5. (a) İdeal diyotun sembolü ve (b) ideal diyotun karakteristiği [64]

İdeal bir diyot; üzerinden geçen akımı tek yönlü ileten (sembolde oklar ile tanımlanan yönde) ve açık bir devre gibi davranan, ters yönde akım geçirmeyen bir devre elemanıdır.

Yarıiletken diyot ise n -tipi ve p -tipi yarıiletken malzemelerin basitçe bir araya getirilmesiyle elde edilen bir yapıdır.

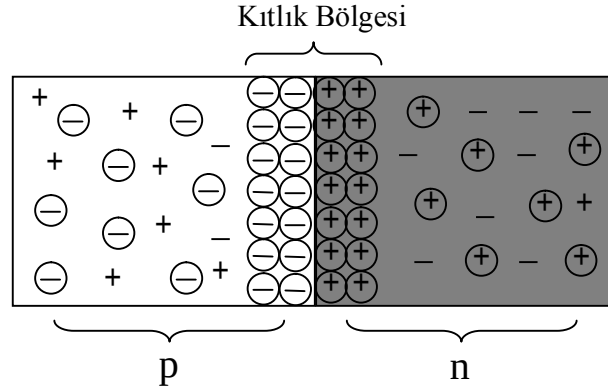
pn eklemleri, hem modern elektronik uygulamalarda hem de diğer yarıiletken aygıtları anlamada büyük bir öneme sahiptir. Yarıiletken aygıtların fiziğini anlamada pn eklemleri oldukça fazla bilgi vermektedir. pn eklemlerinin basit akım-voltaj karakteristik teorisi Shockley tarafından kurulmuştur [65]. Bu teori daha sonralarda Sah, Noyce, Shockley [66] ve Moll [67] tarafından geliştirilmiştir.

pn eklemi bir p -tipi ve bir n -tipi yarıiletkenin kontak edilmesiyle elde edilir. Eğer n -tipi ve p -tipi bölgeler aynı yarıiletken malzemeden elde edilirse (n -tipi silisyum ve p -tipi silisyum) bu tip ekleme “*homoekelem (tek-tür ekleme)*” adı verilir. Eğer yarıiletken malzemeler farklı ise (n -tipi silisyum ve p -tipi germaniyum), böyle eklemlere de “*çoklu ekleme (çoklu ekleme)*” adı verilir [68]. pn ekleminin şematik gösterimi Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6. pn ekleminin şematik gösterimi

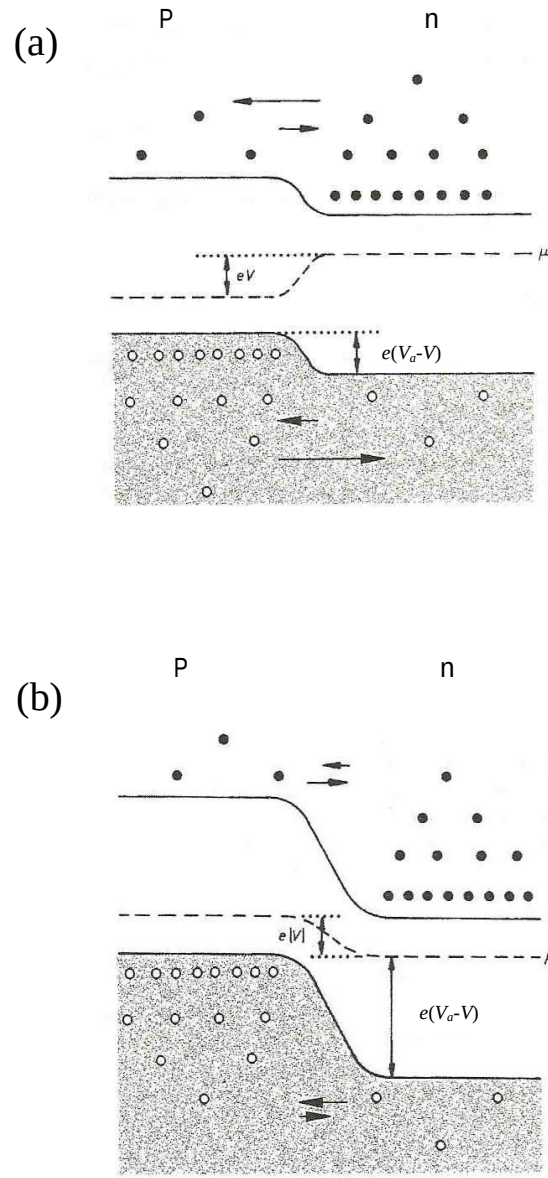
Bir p -tipi yarıiletkenle bir n -tipi yarıiletken bir araya getirildiğinde n bölgesinden p bölgesine elektron aktarımı ve p bölgesinden n bölgesine hol aktarımı meydana gelir. Elektronlar n bölgesinden p bölgesine difüzyona uğrarken gerilerinde pozitif yüklü holler bırakırlar. Bu hollerin bulunduğu bölgeye “*kıtlık bölgesi*” adı verilir. Çünkü bu bölge elektron yoğunluğu bakımından boştur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. $V=0$ 'da pn eklemde kıtlık bölgesinin oluşumu [69].

Buna benzer şekilde hollerin p bölgesinden n bölgesine difüzyonu sonucu p bölgesinde de bir “kıtlık bölgesi” oluşur. Bu bölgedeki taşıyıcıların, bölge dışındaki yerlere göre az olması sebebiyle eklem bölgesinin direnci daha büyüktür. Bu da dışarıdan uygulanan voltajın büyük bir kısmının eklem bölgesinde gözlenmesine sebep olur [69].

Bir pn eklemine ek bir V potansiyel farkının uygulanması eklem üzerinden bir elektrik akımı geçmesine neden olur. Eğer potansiyelin pozitif tarafı p bölgesi ile birleştirilirse, eklem “ileri besleme” olduğu söylenir ve V pozitif alınır. Eğer pozitif taraf n bölgesi ile birleştirilirse, eklem “ters beslenmiştir” ve V negatiftir. Şekil 2.8’de pn eklemine ileri ve ters beslemedeki elektron ve hol durumları gösterilmiştir. İleri beslemede (Şekil 2.8a) çoğunluk taşıyıcılarının diğer tarafa geçmesine engel olan potansiyel engeli küçülmekte ve çoğunluk taşıyıcılarının geçişi artmaktadır. Bu durum devreden geçen akımın artmasına sebep olur. Ters beslemede ise (Şekil 2.8b) çoğunluk taşıyıcılarının geçmesine engel olan potansiyel engeli daha da artar. Ancak azınlık taşıyıcıları için böyle bir engel söz konusu olmadığından azınlık taşıyıcıları geçişlerine devam ederler. Azınlık taşıyıcılarının yoğunlukları çoğunluk taşıyıcılarına göre daha az olduğu için akım da çok küçük olur. Ters besleme durumunda diyot çok yüksek bir direnç göstermektedir [70].



Şekil 2.8. (a) İleri beslemeli ve (b) geri beslemeli pn ekleminin enerji bant diyagramı

2.4. Metal-Yarıiletken (MY) Kontaklar

MY kontaklar, yarıiletken devre elemanlarında kullanıldıkları için oldukça önemlidirler. Ara yüzey karakteristiğine bağlı olarak Schottky engeli veya omik kontak gibi davranırlar (Şekil 2.9). I - V karakteristiği lineerlikten uzaksa Schottky kontak, lineer ise omik kontak özelliği sergiler.



Şekil 2.9. Metal-yarıiletken kontak şematik yapısı

Metal ile yarıiletken birleştirildiğinde, MY ara yüzeyinde yüklerin ayrışmasından dolayı bir potansiyel engeli oluşur. Fermi seviyeleri arasındaki farkın dengelenmesi için bantlarda bükülme oluşur. Fermi enerji seviyeleri eşitlenene yani ısı denge durumuna gelinceye kadar hem metalden yarıiletkeneye hem de yarıiletkenenden metale doğru yük akışı (difüzyon) olur [71].

2.5. Schottky ve Omik Kontaklar

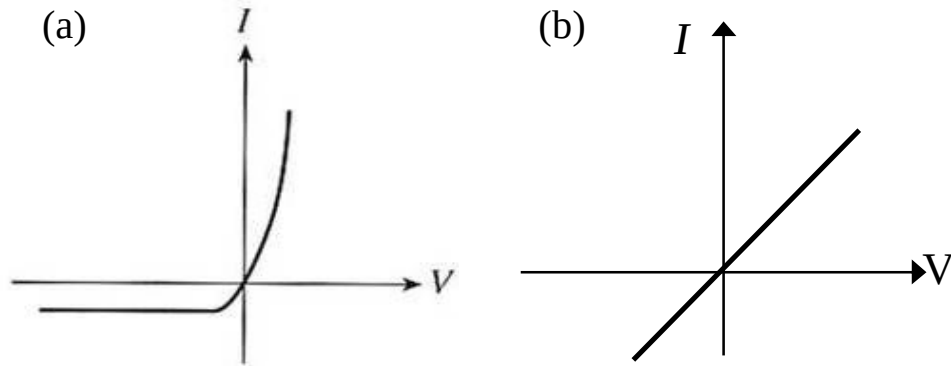
MY kontaklar, Schottky ve omik kontak olmak üzere ikiye ayrılırlar. Metal-yarıiletken kontaklarda iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları (holler ve elektronlar) bir yönden diğerine daha kolay iletiliyorsa bu tür kontakta Schottky kontak denir. Yani akım, doğru besleme ile çok iyi iletilirken, ters beslemede hemen hemen hiç iletilmemektedir. Omik kontaklarda ise taşıyıcılar her yönde kolay iletilir. Kontakın omik veya Schottky olmasını, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. İş fonksiyonu, bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine (sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi) çıkarmak için gereken minimum enerji miktarıdır. Ancak bu, yarıiletkenlerde değişken bir

niceliktir çünkü yarıiletkenlerin Fermi enerji seviyesi, katkılanan verici ya da alıcı atomlarının miktarına göre değişir. Metalin iş fonksiyonu ϕ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s olmak üzere, metal/*n*-tipi yarıiletken kontaklarda $\phi_m < \phi_s$ ise bu “omik kontak” $\phi_m > \phi_s$ ise bu “Schottky kontak”, olarak adlandırılır. Metal/*p*-tipi yarıiletkenlerde ise tam tersi bir durum bulunmaktadır. Çizelge 2.1’de metalin iş fonksiyonuna göre kontak yapısı özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. .MY kontaktarın iş fonksiyonuna göre Schottky ve omik kontaktar

<u>n-tipi</u>	<u>p-tipi</u>	<u>Kontak Tipi</u>
$\phi_m > \phi_s$	$\phi_m < \phi_s$	Schottky
$\phi_m < \phi_s$	$\phi_m > \phi_s$	Omik

MY ara yüzeyinde yüklerin ayrışmasından dolayı oluşan potansiyel engelin yüksekliği kabaca, o kantağın elektriksel olarak omik ya da Schottky karakterde olduğu ile ilgili önemli bilgiler verir. Literatürde, elde edilen bir kontakta, oda sıcaklığında, engel yüksekliği değeri 0.3eV tan daha düşükse kontak omik karaktere, bu değerdan daha büyükse kontak Schottky karaktere sahiptir denebilir. Şekil 2.10’da Schottky ve omik kantağın *I-V* karakteristiği verilmiştir [72].

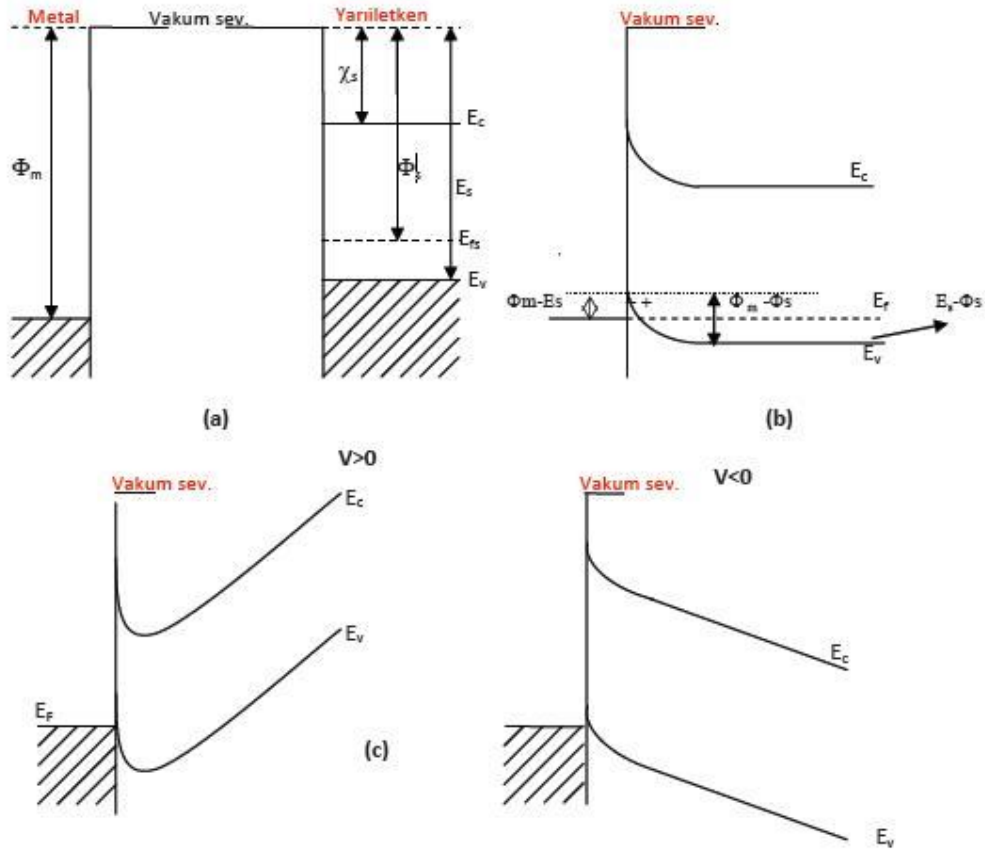


Şekil 2.10. (a) Schottky kantağın ve (b) omik kantağın akım-gerilim karakteristiği

2.5.1. p-tipi yarıiletken/metal omik kontak

Kontaktan önce metalin iş fonksiyonu ϕ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s olmak üzere, metalin Fermi seviyesi yarıiletkenin Fermi seviyesinden $\phi_m - \phi_s$ kadar farklıdır. Kontaktan sonra, elektronlar yarıiletkenden metalin içine geride pozitif bir yüzey yükü bırakarak geçer ve kontağın metal tarafında negatif bir yüzey yüküne sebep olur. Yük alış-verişi bittikten sonra, yarıiletken gövdedeki Fermi seviyesi $\phi_m - \phi_s$ kadar alçalarak metalin Fermi seviyesi ile aynı düzeye gelir. Hol yoğunluğunun artmasından dolayı yarıiletken yüzey daha fazla p-tipi olur. Böylece elektronlar metalden yarıiletken içerisindeki boş durumlara kolayca geçebilirler. Bu yük hareketi hollerin yarıiletkenden metale akışına karşılık gelir (Şekil 2.11). Metal tarafına geçen holler hemen nötr duruma gelirler [73].

Isıl dengeden sonra, kontağın her iki tarafında meydana gelen yüzey yüklerinden dolayı bir dipol tabakası oluşur. Böyle bir kontakta, taşıyıcılar metalden yarıiletkene, yarıiletkenden metale serbestçe geçer. Bir V gerilimi uygulanırsa bu potansiyel farkı sadece kontak bölgesinde değil bütün yarıiletken boyunca dağılacaktır.



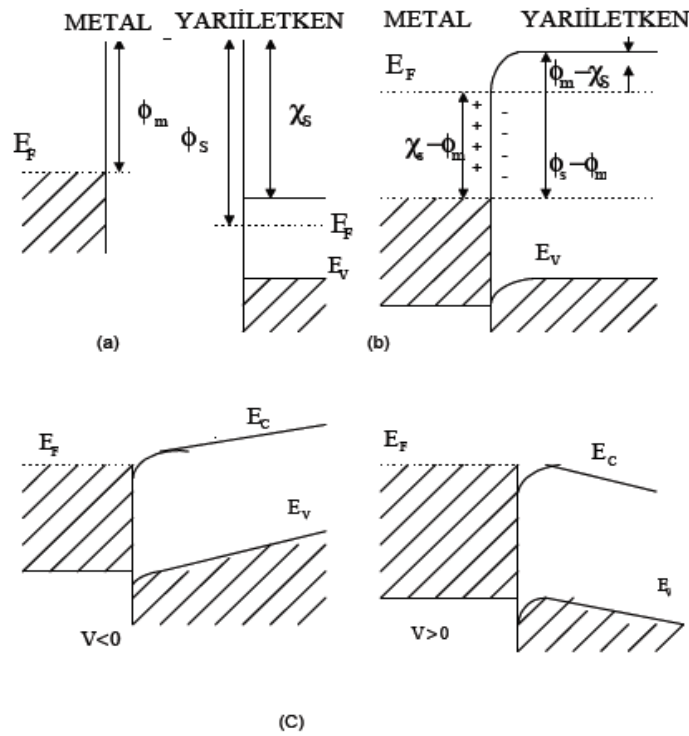
Şekil 2.11. *p*-tipi yarıiletken/metal omik kontağın; (a) kontakdan önce, (b) kontakdan sonra ısıt dengede ve (c) $V \neq 0$ durumundaki, enerji bant grafikleri

2.5.2. *n*-tipi yarıiletken/metal omik kontak

Kontaktan önce (Şekil 2.12a) yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontak oluştuğunda elektronlar metalden yarıiletkene doğru akarlar. Isıl denge sağlanıncaya kadar devam eden bu elektron akışı sonunda kontağın metal tarafında pozitif yüzey yükleri birikirken, yarıiletken tarafında negatif uzay yükleri birikir. Biriken bu zıt yükler bir dipol tabakası oluştururlar. Kontak haline getirilmiş ve dengedeki *n*-tipi yarıiletken/metal omik kontakta metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale kolayca yük akışı

meydana gelir. Kontakta sonraki enerji bant diyagramı Şekil 2.12b’de gösterilmiştir

Omik kontağa bir V voltajı uygulandığında bu potansiyel Schottky kontakta olduğu gibi sadece kontak bölgesinde değil bütün yarıiletken boyunca dağılacaktır. Omik kontak elde edebilmek için n -tipi yarıiletkenin yüzeyine metal buharlaştırılır ve yarıiletkenle alaşım haline gelmesi için belirli bir sıcaklıkta tavllanır. Böylece yarıiletkenin yüzeyinde bir n^+ tabakası oluşur. Bu tabaka yarıiletken ile karşılaştırıldığında elektron bakımından daha zengindir [74].



Şekil 2.12. n -tipi yarıiletken/metal omik kontağın; (a) kontakta önce, (b) kontakta sonra ısıt dengede ve (c) $V=0$ durumundaki, enerji bant grafikleri

2.6. Metal-Yarıiletken Kontakların Akım-Voltaj Karakteristikleri

MY yapı, metal ile yarıiletken arasındaki ara yüzey tabakası nedeniyle metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıya dönüşebilir. Oksit tabakasının kalınlığı ile bu yapıların I - V karakteristiği ile ilgili yapısal parametreleri ve arayüzey durumları büyük ölçüde etkilenir [75,76]. I - V ölçümleri ile diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanabilir. Termiyonik emisyon (TE) için akım gerilim ifadesi,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

olarak verilir. Ancak bu ifade ideal Schottky diyotları için geçerlidir. Schottky diyotlarda engel yüksekliği, kıtlık bölgesinde oluşan elektrik alana ve uygulanan voltaja bağlıdır. Bu sebeple bir idealite faktörü (n) tanımlanarak gerekli düzeltme yapılabilir [77,78]. Bu idealite faktörü, diyotun ideal oluşunun bir ölçüsüdür. Bu durumda karakteristik akım,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

ile verilir. Burada I diyottan geçen akım ve I_0 ,

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (2.3)$$

ifadesi ile verilen doyma akımıdır. Bu ifadede bulunan A diyotun alanı, ϕ_b Schottky engel yüksekliği ve A^* Richardson sabitidir. Bu sabit,

$$A^* = \frac{4\pi m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.4)$$

ile verilir [71]. Burada e elektron yükü, h Planck sabiti ve m_n^* elektronun iletim bandı içindeki etkin kütlesidir.

İdealite faktörü, bir diyotun termiyonik emisyon teorisine uyumunun bir ölçüsüdür. İdeal bir diyot için $n=1$ olmalıdır. Ancak, uygulamada idealite faktörü 1'den büyük olur. Bu durum, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey tabakasının varlığından, yarıiletken yüzey yük yoğunluğunun ya da arayüzey hallerinin uygulanan gerilimle değişiminden vb. sebeplerle ortaya çıkar [79–81]. MY yarıiletken ara yüzeyde akım iletimi sıcaklığa bağlıdır. Dolayısıyla, düşük

sıcaklıklarda elektronlar daha düşük bir engel ile karşılaştıklarından akım iletimi baskın olur ve idealite faktörü değeri artar [82]. Dolayısıyla diyotlar, (2.2) denklemini uygulamalarda tam olarak sağlamazlar ve bu denklem aşağıdaki gibi düzeltilir.

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.5)$$

Bu ifadedeki n idealite faktörüdür ve

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.6)$$

denklemi ile verilir. Bu ifadeye göre n sıcaklığa bağlı olabilir ve yaklaşık olarak voltajdan bağımsız olup 1'den büyük bir değere sahiptir.

Uygulanan gerilimin yüksek değerleri, akım gerilim karakteristiğinde bükülmeye sebep olur. Bu seri dirençtir ve R_s ile gösterilir. Seri direnç, engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi diyot parametrelerinin bulunabilmesi için birkaç yöntem vardır. Bunlardan bir Cheung tarafından türetilen Cheung fonksiyonlarıdır [83]. Cheung fonksiyonları;

$$\frac{dV}{d \ln(I)} = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad (2.7)$$

$$H(I) = V - n \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_0}{AA^* T^2}\right) \quad (2.8)$$

ve

$$H(I) = IR_s + n\phi_b \quad (2.9)$$

ile verilir. Denklem (2.7)'de $dV/d(\ln I)$ - I grafiği çizildiğinde elde edilen doğrunun eğimi seri direnci (R_s) verir. $I=0$ 'a karşılık düşey eksenin kestiği noktanın değerinin kT/q 'ya oranı ise idealite faktörünü (n) verir. Aynı şekilde (2.9) denkleminde $H(I)$ - I grafiği çizilerek elde edilen doğrunun eğimi (R_s) değerini, $I=0$ 'a karşılık düşey eksenin kestiği ise $n\phi_b$ değerini verir.

Diyot parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan diğer bir yöntem ise Norde metodu' dur [84]. Bu metot ile de seri direnç, engel yüksekliği ve idealite faktörü hesaplanabilir;

$$F(V) = \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{A^* AT^2} \right) \quad (2.10)$$

burada γ , n değerinden büyük ilk tamsayı değeridir. $I(V)$, I - V karakteristiğinden elde edilen akım değeridir. Engel yüksekliği; $F(V)$ - V grafiğinin minimum noktası bulunduğundan sonra hesaplanır. Engel yüksekliği,

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (2.11)$$

ile verilir. Burada $F(V_0)$, $F(V)$ değerinin minimum noktasıdır ve V_0 değeri bu minimum noktadaki voltaj değeridir. Seri direnç;

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_0} \quad (2.12)$$

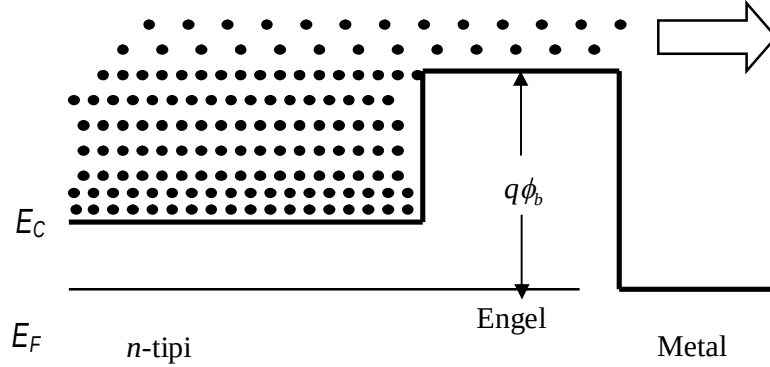
formülü ile bulunur. Burada I_0 , $F(V)$ değerinin minimum noktasındaki akım değeridir.

2.7. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları

MY kontaklarda bir dış gerilim altında akım iletimi; arayüzey durumları, seri direnç, metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabaka, gerilimin yönü, sıcaklık, yarıiletkenin tipi gibi faktörlerden oldukça etkilenir. Bu nedenle MY kontakların elektriksel karakteristiklerinin tam olarak anlaşılmasında, hangi durumda hangi akım-iletim mekanizmalarının etkili olduğunu belirlemek büyük önem taşımaktadır. MY arayüzeyinde gerçekleşen akım iletimi birden fazla mekanizma ile gerçekleşir. Metal-yarıiletken kontaklarda en muhtemel durum, termiyonik emisyonudur (TE). MY kontaklardaki diğer akım-iletim mekanizmaları, alan emisyonu (FE) ve termiyonik alan emisyonunu (TFE) içine alan engel boyunca tünelleme, difüzyon teorisi, Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED), deplasyon (uzay yük) bölgesinde rekombinasyon ve nötral bölgede rekombinasyon mekanizmalarıdır [85–88].

TE teorisi, akımın çoğunluk taşıyıcıları tarafından iletildiği kabul edilerek kurulmuş bir teodir. Bu teori, sıcak bir yüzeyden ısı enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınmasını, daha açık bir ifadeyle, yeterli ısı enerjisi kazanan taşıyıcıların potansiyel engel üzerinden yarıiletken metale veya metalden yarıiletkene geçmelerini ifade eder (Şekil 2.13) [89]. Bu olay, metal/ p -tipi

yarıiletken kontaklarda holler tarafından, metal/*n*-tipi yarıiletken kontaklarda elektronlar tarafından sağlanır [79,90].



Şekil 2.13. Engel üzerinden geçen elektronların termiyonik emisyonunu gösteren enerji bant diyagramı

TE teorisinde engel yüksekliği kT 'den çok büyük kabul edilir ($q\phi_b \gg kT$) ve kitlelik bölgesinde elektronların çarpışmaları ihmal edilir. Beethe, metal/yarıiletken kontaklarda akımın çoğunluk taşıyıcıları tarafından iletilmesini kabul etmiş ve TE varsayımları oluşturmuştur. Bu varsayımlara göre; potansiyel engel yüksekliği kT/q enerjisinden çok büyüktür, Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları yoktur. Yani taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky tabakasının kalınlığından daha büyüktür ve görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmektedir ve akım engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır.

MY kontaklarda önemli olan diğer bir akım iletim mekanizması da tünellemedir [79]. MY arayüzeyindeki tünelleme mekanizmasında, elektronlar kitlelik bölgesinin genişliğinin (engel genişliği) kalın olmadığı durumlarda engelin üzerinden atlamaksızın Schottky engeli boyunca tünellenebilirler [79].

Engel boyunca gerçekleşen elektron tünellemesi ya yarıiletkenin Fermi seviyesinden metale doğru (FE) elektron tünellemesiyle ya da yüksek enerjilere uyarılabilecek ve dar üçgen potansiyel boyunca tünellenebilecek olan elektronların termal enerjisi yardımıyla (TFE) akıma katkıda bulunur. FE'nin oluşumu, yarıiletkenin aşırı oranda katılandığı durumda Fermi seviyesinin iletim bandı ile çakışması sonucu ortaya çıkmaktadır. FE ve TFE için akım,

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \quad (2.13)$$

ile verilir. Kıtık bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyon etkileri termiyonik emisyon akım iletim mekanizması bileşenine paralel bir artış verir. Bu etki özellikle orta sıcaklık bölgesinde önemli bir mekanizmadır [79].

Schottky diyotlarda rekombinasyonun olduğu durumlardaki akım iletim mekanizması pn eklem diyotun akım iletim mekanizmasına benzemektedir. Sah ve arkadaşları [91] ileri beslemedeki küçük gerilim bölgesinde baskın olan rekombinasyon akım yoğunluğunun yaklaşık olarak

$$J_r = j_{r0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.14)$$

ile verilebileceğini bildirmişlerdir. Burada $J_{r0} = qn_i w / 2\tau_r$ olup bu ifadede yer alan n_i asal elektron konsantrasyonu, w deplasyon tabaka genişliğini ve τ_r elektronların bu bölgeyi geçmesi için gerekli zamanı ifade eder.

Rekombinasyon mekanizmasının tam tersi olan jenerasyon olayı ise kıtlık bölgesinde elektron-hol çiftlerinin meydana gelmesidir ve ters beslem durumunda ortaya çıkar. Jenerasyon mekanizmasıyla oluşan akım $J_g = qn_i w / 2\tau_r$ ile verilir. Kıtık bölgesinin genişliği uygulanan ters beslem gerilimi ile orantılı olduğu için jenerasyon akımı ters beslemde gerilim arttıkça artar. Düşük sıcaklıklarda etkisi daha fazladır. Çünkü TE bileşeninden daha düşük aktivasyon enerjisine sahiptir [92]. Schottky diyotlarda akım iletim mekanizması olan difüzyon teorisi aşağıdaki varsayımlara dayanır [93].

- * Potansiyel engel yüksekliği kT 'den büyüktür.
- * Kıtık bölgesindeki elektron çarpışmaları ihmal edilmiştir.
- * Kıtık bölgesinde taşıyıcı konsantrasyonları akımdan etkilenmez. Yani termal denge değerlerine sahiptir.
- * Yarıiletken taşıyıcı konsantrasyonu dejenere değildir.

Bu varsayımlardan yola çıkarak metal/ n -tipi yarıiletken Schottky kontaklarda difüzyon teorisine göre akım ifadesi;

$$J_n = J_{SD} \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.15)$$

olarak elde edilir. J_{SD} doyma akım yoğunludur. Difüzyon teorisinde doyma akım yoğunluğu gerilime, termiyonik emisyon teorisinde ise doyma akım yoğunluğu sıcaklığa bağlıdır [79,88,94].

Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi ise difüzyon teorisi ve termiyonik emisyon teorisinin birleştirilmesiyle oluşturulmuş bir modeldir. Schottky engeli tarafından elektronların kuantum mekaniksel yansımalarının elektron enerjisi dağılımına katkısı olduğu kabul edilmiştir [94]. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi metal-yarıiletken arayüzey kenarında tanımlanmış olan rekombinasyon (birleşme) hızı üzerine kurulmuş bir teoridir [93]. Bu teoriye göre elektronlar metal-yarıiletken arayüzeyinde optik fononlarla etkileşmeksizin potansiyel engel üzerinden salınma olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değeri göz önüne alınarak, A^* olarak belirtilen Richardson sabiti, A^{**} olarak değişir. Burada, A^{**} ; etkin Richardson sabitidir.

Saf termiyonik emisyon-difüzyon teorisine göre ideal bir Schottky diyotta n idealite faktörü 1 olarak alınır. İdealite faktörü 1'den uzaklaştıkça, engel yüksekliğinin voltaja bağlılığı artmaktadır. Bu durumda akım yoğunluğu aşağıdaki gibi verilir.

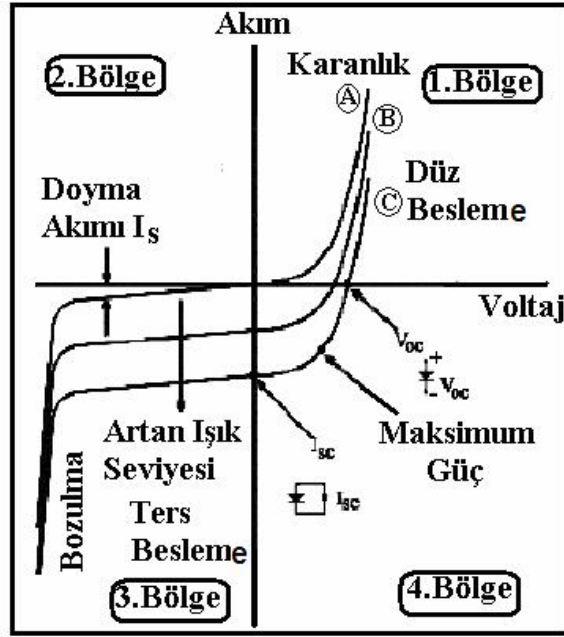
$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.16)$$

2.8. Metal-Yarıiletken Fotodiyotlar

Temel olarak fotodiyotun çalışması, diyot eklemi içinde foto taşıyıcıların yer değiştirmesine dayanır. Schottky ekleme ışık geldiği zaman, yeterli enerjiye sahip ($h\nu > E_g$) olan fotonlar soğrulur. Oluşan fazla elektron ve holler diyotun farklı taraflarında toplanırlar. Eğer diyota bir gerilim uygulanırsa, soğrulan fotonların ve oluşan taşıyıcıların sayısı ile orantılı olarak bir akım oluşur [95].

Bir fotodiyot, anot ve katot olmak üzere iki elektriksel kontak ile bir yarıiletkenle oluşur. Bir yarıiletkenin bant aralığından daha yüksek enerji ile gelen fotonlar, yarıiletken tabakanın içinde soğrulabilirler. Soğurma işlemi, serbest elektron-hol çiftinin oluşumundan kaynaklanmaktadır. Eğer kontaklara bir ters besleme voltajı uygulanırsa, yarıiletken karşısında elektrik alanı oluşur. Elektronlar ve holler zıt yönlerde sürüklenirler. Böyle bir taşıma işlemi dış devrede elektrik akımı meydana getirir, bu akıma “*fotoakım*” denilmektedir.

Fotodiyotun I - V karakteristiği şekil olarak normal bir diyotunkine benzemektedir. Fotodiyotun karanlık ve aydınlıktaki I - V karakteristiği şematik olarak Şekil 2.14’te gösterilmiştir. Şekil 2.14’te A eğrisi fotodiyotun karanlıktaki, B ve C eğrileri ise fotodiyotun aydınlıktaki I - V karakteristiklerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, karakteristik dört bölge bulunmaktadır. 1. bölgede, akım ve voltaj değerleri pozitifdir. Bu bölge, fotodiyot uygulamaları için uygun değildir, çünkü bu bölgede fotodiyot normal bir diyot gibi davranmaktadır. 2. bölgede, fotodiyot cevap vermemektedir. 3. bölgede, fotodiyotun üzerine gelen ışık şiddeti artırıldığında, bu bölgedeki eğriler, negatif akım yönünde yani aşağıya doğru kayacaktır. $V=0$ ekseninde bu eğrilerin akım eksenini kestiği nokta kısa-devre akımı I_{sc} ’yi verir. $I=0$ ’da ise eğrilerin voltaj eksenini kestiği noktalar açık-devre voltajı V_{oc} ’yi verir. Çok yüksek ters besleme voltajlarında, akım hızlıca artar ve diyotun bozulması söz konusu olabilir [96]. 4. bölge ise, fotodiyotun fotovoltajik bölgesidir.



Şekil 2.14. Fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki I - V karakteristikleri [96].

$$V_{oc} \text{ voltajı,}$$

$$V_{oc} = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left[\left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) + 1 \right] \quad (2.17)$$

ifadesi ile verilir [97]. Denklem (2.17)'den de anlaşılacağı gibi n değerinin yüksek değerleri ile yüksek V_{oc} değerleri elde edilir. Fakat bu her zaman geçerli olan bir durum değildir. Çünkü yüksek n , genelde I_s 'nin yüksek değerleri ile mümkündür.

I_{sc} ; çıkış akımı olup, uygulanan voltajda aydınlatma altında oluşmaya başlar. Bu akım, gelen foton sayısı ve aydınlanma şiddeti ile orantılıdır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Organik-inorganik filmlerin üretiminde kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlardan birkaçı; fiziksel buhar depolama (PVD), kimyasal buhar depolama (CVD), sol jel, magnetron püskürtme, vakumda buharlaştırma (VE) olarak verilebilir. Bu yöntemler arasında sol jel yöntemi; cam, seramik, metal ve plastik alttaşların kaplanarak yüzey özelliklerini iyileştirmek ve yeni özellikler kazandırmak (optik, elektronik, kimyasal ve mekanik gibi) amacıyla uygulanan bir kaplama tekniğidir.

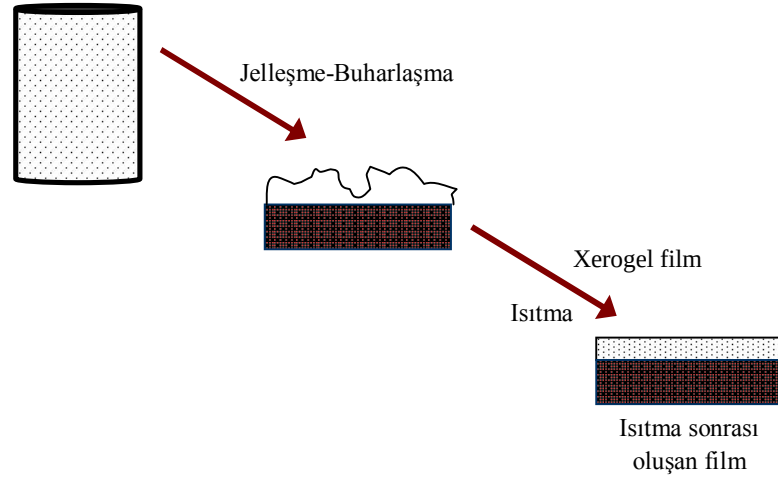
3.2. Sol Jel Spin Kaplama Yöntemi

Sol jel araştırmaları oksit-jellere dayanır. Bu süreçte bir veya birkaç bileşen “sol” yapıcı özelliğe sahip olmalıdır. Sol; sıvı içerisinde kolloidal katı taneciklerinin kararlı süspansiyonudur. Kolloid olarak tanımlanan tanecikler gözle görülemeyecek kadar küçük (500nm ve daha altındaki) boyutlara sahip taneciklerdir. Bu metotta metal alkoksit çözeltileri veya metal tozları, nitratlar, hidroksitler ve oksitler gibi inorganik bileşikler kullanılır. Bu bileşikler belirli oranlarda su ve asitle birleştirilerek bir solüsyon hazırlanır.

Bu solüsyonun belirli sıcaklıklarda karıştırılması ile solüsyon içerisinde birbirini izleyen bir dizi kimyasal reaksiyon oluşur. Taneciklerin sahip olduğu yüzey yüklerinin elektrokimyasal etkileşimleri ile “jel” adı verilen bir ağ meydana gelir. Jel; kolloidal parçacıkların çöktürülmesiyle elde edilen ve bol miktarda su içeren çökeleklerdir. Jel, katı ve sıvı fazlar arasındaki ara fazdır. Jeli oluşturan moleküller birbirine zayıf veya kuvvetli bağlarla bağlanarak, aralarındaki boşluklarda sıvı bulunan iskelet şeklinde dokular oluştururlar. Jel oluşumunun en önemli adımı, bu jelin çatlak oluşumuna imkân vermeden kurutulmasıdır. Bunun için de çok yavaş kurutma yapılarak, meydana gelecek gerilmeler giderilebilir. Jellerde kurutma, çözücünün (alkol, su) fazlalığının giderilmesi anlamına

gelmektedir. Kurutmada jel büzülür ve meydana gelen katı yüksek miktarda gözeneklilik içerir. Bu katıya “xerogel” denir.

Film oluşturma aşamasında, hazırlanan sol; daldırmalı kaplama (dip coating), püskürtme kaplama (spray coating), akış kaplama (flow coating), laminar kaplama, merdaneli kaplama (roll coating), spin kaplama (spin coating), baskı kaplama (printing) gibi çeşitli yöntemlerden biriyle alttaş üzerine kaplanır. Sol jel yöntemiyle film kaplamanın şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Sol jel tekniği ile film kaplamanın şematik gösterimi [98]

Sol jel yönteminin diğer yöntemlere göre basit ve ekonomik oluşu, yöntemin kimyasal yönünün kontrol edilebilirliği, hammaddelere kıyasla daha iyi homojenlik sağlanması, kaplanan yüzeylerin kimyasal, elektriksel ve optik özelliklerinin iyileştirilmesini sağlaması ve bunun gibi birçok avantajı, bu yöntemin yaygın kullanılan bir teknik haline gelmesini sağlamıştır. Sol jel yönteminin avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Teknikte kullanılan metal alkoksit çözeltileri genel olarak $M(OR)_x$ formülüyle gösterilir. M; kaplanacak malzemeyi, R; CH_3 (metil), C_2H_5 (etil) gibi alkil grubunu, x; metalin değerine göre değişen değerliğini (valans durumunu) gösterir. Metal alkoksitlerin, içerdikleri yüksek elektro negatif OR grubu sebebiyle, reaksiyona katılımları yüksektir. Metal alkoksiti çözmek için alkol kullanılır. Çözücü, alkoksitin özelliğine göre seçilir. Bir alkil (R) ya da başka bir moleküle OH grubu ekleyerek oluşturulan moleküllerdir. Örneğin; metil alkol

(CH_3OH ; metanol), etil alkol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$; etanol), propil alkol ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$; propanol), butil alkol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$; butanol) gibi. Alkoller, sol jel yönteminde genelde başlangıç malzemesi olarak kullanılır ve metal oksitler ile tepkimeye girerler. Bunların yanı sıra reaksiyonları hızlandırıcı olarak katalizörler de kullanılabilir.

Çizelge 3.1. Sol jel yönteminin avantajları ve dezavantajları

Avantajı	Dezavantajı
Yöntemin kullanılması için gerekli cihazlar ucuzdur.	Ham maddelerin maliyeti yüksek olabilir.
Uygulaması kolay bir yöntemdir.	İşlem sırasında malzeme kaybı fazla olabilir.
Yöntemin kimyasal yönü kolayca kontrol edilebilir.	Yöntemin uygulama süreci uzundur.
Hammaddelere kıyasla daha iyi homojenlik sağlanabilir.	Kullanılan malzemeler (organik çözeltiler) sağlığa zararlı olabilir.
Kaplanacak malzemenin şekli önemli değildir.	Filmlerde karbon çökeltisi kalabilir.
Düşük ısılarda hazırlanabilir.	Film yüzeyinde ince gözenekler oluşabilir.
Kaplanan yüzeylerin kimyasal ve elektriksel özelliklerini iyileştirmeyi sağlar.	Kurutma sırasında yüzey üzerinde büzölmeler oluşabilir.
Buharlaştırmadan meydana gelen kayıpları minimuma indirir.	

Sol jel yönteminin kullanıldığı başlıca uygulama alanları şu şekilde sıralanabilir;

- ❖ Aşınmaya dayanıklı kaplamaların yapılması
- ❖ Optik amaçlı kaplamalar (yansıtma özelliği olmayan $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ kaplamalarında, lenslerde ve benzeri uygulamalarda)
- ❖ Fiber optikler
- ❖ Yüksek mukavemetli fiber üretimi ($\text{Na}_2\text{O-ZrO}_2\text{-SiO}_2$ fiberleri gibi)
- ❖ Elektronik ve manyetik malzemelerin üretimi (Fe_2O_3 gibi)
- ❖ Mikro devre üretimi
- ❖ Manyetik disk kaplamaları
- ❖ DVD, CD ROM, vb. diskler
- ❖ Televizyon tüpü fosforu kaplama

- ❖ Kimyasal veya ısı koruyucu katmanlar
- ❖ Sol jel cam elde etme
- ❖ İnce seramik tozları elde etme

Spin kaplama süreci; ince alttaşların veya ince tabaka ile kaplanan malzemelerin kaplanması çalışmalarında kullanılmaktadır. Örneğin pek çok katot ışın tüpü üreticisi mat ve yansıtıcı olmayan kaplama elde etmek üzere bu tekniği kullanmaktadır.

Spin kaplama yönteminde solüsyon alttaş üzerine damlatılır. Alttaş tercih edilen hızda döndürülür. Alttaş dönerken solüsyon alttaş yüzeyine yayılır ve bu sırada çözücü buharlaşmaya başlar. Döndürme işlemi bitince alttaş üzerinde bir film tabakası elde edilir. Sol jel spin kaplama yönteminde kullanılan cihaz Şekil 3.2’de verilmiştir.

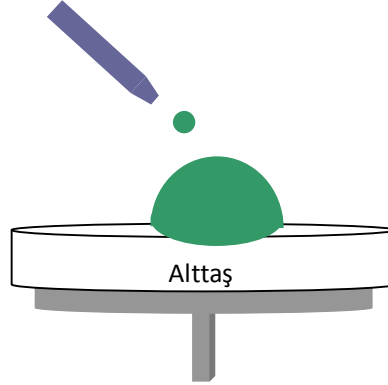
Film, düşük sıcaklıklarda alttaş üzerinde kalan çözücüyu buharlaştırmak için ısıtılır. Bu işlem birkaç kez tekrar edilebilir. Elde edilen film kalan organiklerin buharlaştırılması ve kristalizasyon için daha yüksek sıcaklıklarda tavllanır. Spin kaplama işlemini ayrıntılı incelemek için işlemi dört basamağa ayırabiliriz.



Şekil 3.2. Spin kaplama cihazı (Spin Coater)

a. Birinci Basamak

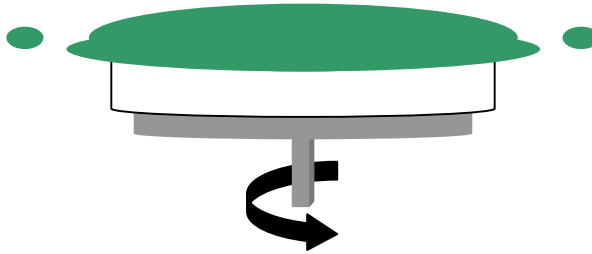
Bu basamakta solüsyon alttaş üzerine mikro pipet yardımıyla damlatılır (Şekil 3.3). Bu aşamada çözeltinin tamamen çözünmüş olmasına, içinde büyük parçacıkların olmamasına ve yüzeye tutunabilir özellikte olmasına dikkat edilmesi gerekir.



Şekil 3.3. Çözeltinin alttaşa damlatılması

b. İkinci Basamak

Çözeltinin tüm alttaşa homojen olarak yayılması ve fazla çözeltinin uzaklaştırılması için alttaş belirli bir hızda ve belirli bir süre (örneğin 4000rpm hızla 30s) döndürülür.

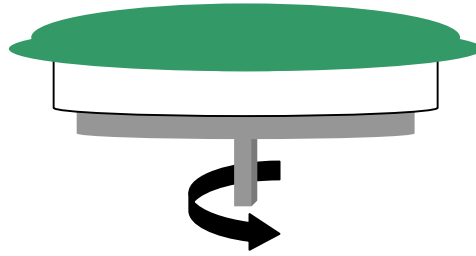


Şekil 3.4. Çözeltinin alttaşa homojen olarak yayılması

Dönüş sırasında fazla çözeltinin uzaklaşmasıyla film kalınlığı azalır (Şekil 3.4). Film kalınlığı azaldıkça yüzeydeki sıvının taşınma oranı yavaşlar. Bunun nedeni, film kalınlığı azaldıkça akışkanlığa karşı gösterilen direncin büyümesidir [99].

c. Üçüncü Basamak

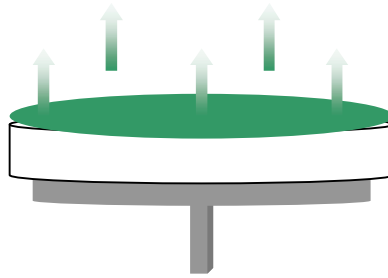
Bu basamakta alttaş sabit hızla döndüğü için alttaş üzerindeki sıvı daha fazla incelmez (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Çözeltinin yüksek hızda döndürülmesi

d. Dördüncü Basamak

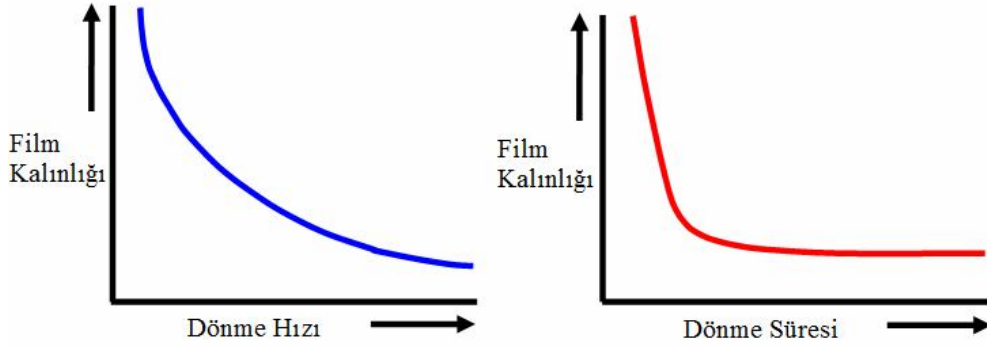
Film inceldikten sonra buharlaşma başlar (Şekil 3.6). Buharlaşmayla birlikte jel oluşumu başlar. Döndürme hızı ne kadar yüksek olursa, film homojenliği o kadar yüksek olur. Dolayısıyla homojen bir film elde etmek için ~2000 rpm' den yüksek hızlarda kaplama işlemi yapılmalıdır.



Şekil 3.6. Buharlaşma ve film oluşumu

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi film kalınlığı, merkezkaç kuvvetiyle buharlaşma sonucundaki direnç değerinin dengelendiği durumda sabit kalır. Buharlaşma sonucunda viskozitenin artması, malzemenin alttaş üzerinde merkezkaç kuvveti yardımıyla hareket ettirilemeyecek duruma gelmesine sebep

olur. Kritik noktaya kadar geçen zamanla birlikte film kalınlığı düşer. Bu aşamadan itibaren artan açısal hızın ya da zamanın, film kalınlığı üzerine herhangi bir etkisi yoktur.



Şekil 3.7. Döndürme hızının ve kaplama süresinin film kalınlığı üzerine etkisi

3.3. Vakumda Isıl Buharlaştırma Yöntemi

MY kontaklar bir metalin, bir yarıiletkenin yüzeyine metal buharlaştırma veya saçırma gibi yöntemlerle kaplanması ile elde edilir (Şekil 3.8).

Bu metot genel olarak bir malzeme üzerine bir metali kaplamada ya da bir vakum ortamında temiz bir yüzey elde etmede kullanılır. Buharlaştırma ile elde edilen kontakların büyük çoğunluğu 10^{-5} torr civarında basınç sağlayan vakum sistemi içinde yapılırlar. Bu teknikte alüminyum (Al) ve altın (Au) gibi düşük erime sıcaklığına sahip metaller bir filaman şeklindeki rezistansın ısıtılmasıyla kolaylıkla buharlaştırılabilir [100].

Bu yöntemle ayrıca organik moleküller de ısı olarak buharlaştırılabilir. Organik malzemeler uygun sıcaklıkta ısıtılarak, buharlaştırılır ve alttaş üzerinde ince filmler olarak yoğunlaşması sağlanır. Bu çalışmada kullanılan C_{60} ve CuPc organiklerinin de bu şekilde buharlaştırılmasıyla film üretimi sağlanmıştır.



Şekil 3.8. Isıl Buharlaştırma Sistemi

3.4. Organik-İnorganik Filmlerin Elde Edilmesi

3.4.1. Altaşların kimyasal olarak temizlenmesi ve omik kontakların oluşturulması

Bu çalışmada altaş olarak bir tarafı mat diğer tarafı parlak *p*-Si ve *n*-Si kristalleri kullanılmıştır. Elde edilecek filmin homojen ve düzgün olabilmesi, elektriksel, optik ve morfolojik özelliklerinin iyi olması için kaplanacak olan altaşların temiz olması gereklidir. Ayrıca omik kontakların yapılacağı bu yüzeyler, meydana gelebilecek ara yüzey hal oluşumunu minimuma indirmek için organik kirlerden, ağır metal kirliliklerinden ve oksit tabakasından arınmış olmalıdır. Çünkü diyotun performansı ve deneysel ölçüm sonuçları çok büyük ölçüde yüzey temizliğine bağlıdır.

Si altaşların temizliği için; amonyum hidroksit ve deiyonize su karıştırılarak 70°C'de 15dk ısıtılmıştır. Daha sonra karışım ısıtıcı üzerinden alınıp üzerine hidrojen peroksit eklenip 1-2dk beklenmiştir. Amonyum hidroksit, hidrojen peroksit ve deiyonize su; 1:1:5 oranında karıştırılmıştır. Karışım hazırlandıktan sonra Si altaşlar karışımın içine yerleştirilmiş ve 15dk bekletildikten sonra deiyonize su ile durulanıp önceden hazırlanmış olan

seyreltilmiş HF çözeltisine koyulmuştur (HF çözeltisi; %5 hidroflorik asit (HF) içeren, 50ml'lik HF ve deiyonize sudan oluşmaktadır). 1-2dk bu çözelti içinde bekletilen Si alttaşlar soğuk deiyonize su ile durulanıp N₂ ile kurutulduktan sonra kontak için hazır hale getirilmiştir.

n-Si ve *p*-Si alttaşlar üzerine filmler elde edilmeden önce alttaşların mat yüzeylerine Al ve Au buharlaştırılarak omik kontak yapılmıştır. Omik kantağın hangi metaller kullanılarak yapılacağına karar verilirken metallerin iş fonksiyonları göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan metallerin ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Diyot üretiminde kullanılan metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonları

	Al	Au	p-Si ve n-Si	n-ZnO	n-CdO	p-CuPc	n-C ₆₀
Ø _b (eV)	4.6	5.1	4.8	4.7	4.8	4.7	3.8

Metal buharlaştırma işlemi için VAKSİS PVD Handy-MT/101T model metal buharlaştırma ve OLED sistemi kullanılmıştır. Vakum sistem içerisinde bulunan basket pota üzerine %99.99 saflıktaki Al teller konulmuştur. 5x10⁻⁵torr basınçta potadan akım geçirilmeye başlanmıştır. Sistemdeki potadan akım geçerken pota yüksek ısı değerlerine ulaşmış ve sıcaklık yeterli değere geldiğinde alüminyum önce erimeye, daha sonra buharlaşmaya başlamış, buharlaşan alüminyum yarıiletken numunenin yüzeyine yapışarak 125nm kalınlıkta ince film tabakasını oluşturmuştur. Metal buharlaştırma cihazından çıkarılan numuneler son olarak azot ortamında 570°C'de 3dk tavlannmıştır. *p*-Si alttaşlardan bir tanesinin mat yüzeyine 50nm kalınlığında EMS550X marka altın kaplama cihazı ile Au metali buharlaştırılmıştır.

3.4.2. Organik filmlerin elde edilmesi

CuPc ve C₆₀ organikleri, uygun alttaşlar üzerine VAKSİS PVD Handy-MT/101T model metal buharlaştırma ve OLED sistemi kullanılarak kaplanmıştır.

i) *CuPc Filmi:* CuPc filmi *n*-Si alttaş üzerine 5x10⁻⁵torr basınçta, film kalınlığı 150nm olacak şekilde ısıtılarak buharlaştırılmıştır. Vakum sistemi içerisinde bulunan ve organik buharlaştırmak için kullanılan Al₂O₃ pota içine toz CuPc (SIGMA ALDRİCH, %99) organikinden bir miktar konulmuştur. Sistemin iç basıncı 5x10⁻⁵torr seviyesine ulaştığında potadan akım geçirilmeye başlanmıştır. Akım geçen pota ısınmaya başlamış ve dolayısıyla üzerindeki CuPc organikini de ısıtmaya başlamıştır. Sistemdeki potadan akım geçerken pota yüksek ısı değerlerine ulaşmış ve sıcaklık 380°C–390°C’ye geldiğinde CuPc buharlaşmaya başlamıştır. Buharlaşan CuPc yarıiletken numunenin yüzeyine yapışarak film tabakasını oluşturmuştur. Bu aşamadan sonra üretilen film cihaz içerisinde çıkarılıp oda sıcaklığında soğutulmuştur.

ii) *C₆₀ Filmi:* C₆₀ filmi *p*-Si alttaş üzerine vakumda ısıtılarak buharlaştırma yöntemiyle elde edilmiştir. 5x10⁻⁵torr basınçta, film kalınlığı 75nm olacak şekilde C₆₀ ısıtılarak buharlaştırılmıştır. Vakum sistem içerisinde bulunan ve organik buharlaştırmak için kullanılan Al₂O₃ pota içine toz C₆₀ organikinden (SIGMA ALDRİCH, %98) bir miktar konulmuştur. Sistemin iç basıncı 5x10⁻⁵torr seviyesine geldiğinde potadan akım geçirilerek buharlaştırma işlemine başlanmıştır. Akım geçen pota ısınmaya başlamış ve üzerindeki C₆₀ organikini de ısıtmaya başlamıştır. Potanın sıcaklığı 500°C–520°C’ye ulaştığında C₆₀ buharlaşmaya başlamıştır. Buharlaşan C₆₀, yarıiletken numunenin yüzeyine yapışarak film tabakasını oluşturmuştur. Elde edilen C₆₀ filmi soğutulmak üzere cihazdan çıkartılıp oda sıcaklığında bırakılmıştır.

3.4.3. İnorganik filmlerin elde edilmesi

ZnO ve CdO filmleri uygun alttaşlar üzerine sol jel spin kaplama yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

i) ZnO filmleri *p*-Si alttaşlar üzerine sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilmiştir. ZnO filmlerini elde etmek için kullanılan çözeltinin molaritesi 0,5M olarak seçilmiştir. Başlangıç çözeltisi olarak 1,09745g (5×10^{-3} mol) çinko asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ZnAc), çözücü olarak 5ml 2-metoksietanol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$) ve sabitleyici olarak da 0,301ml monoetanolamin ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$, MEA) kullanılmıştır. ZnAc ve MEA molar oranları 1:1 olarak ayarlanmıştır. Hazırlanan bu çözelti 1 saat karıştırıcıda karıştırılarak çözülmesi sağlanmıştır. Daha sonra bu çözeltiye, 2-metoksietanol eklenerek toplam 10ml çözelti elde edilmiştir. Elde edilen çözelti 60°C’de 2 saat karıştırılmıştır.

Çözelti hazırlandıktan sonra, *p*-Si alttaşlar spin kaplama cihazının numune tutucusunun üzerine yerleştirilmiştir. Film üretimi için 8 adet *p*-Si alttaş kullanılmıştır. Numune tutucuya yerleştirilen alttaşların üzerine çözelti damlatılmıştır. Alttaşların 4 tanesi 3000rpm, 4 tanesi de 4000rpm döndürme hızında 30s döndürülmüştür. Daha sonra filmler 300°C’de 10dk kurutulmuştur. Bu süreç 10 kez tekrarlanmıştır. Filmler en son, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C’de 1’er saat tavlansmıştır. ZnO filmlerinin üretimindeki parametreler ve numune kodları Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. ZnO filmlerinin üretimindeki döndürme hızı ve tavlama sıcaklığı parametreleri

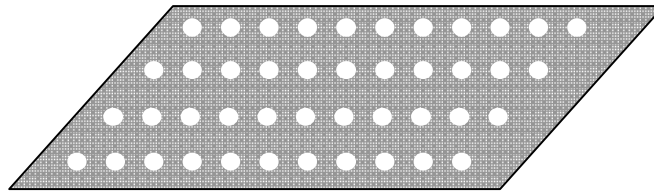
Tavlama Sıcaklığı (°C)	Döndürme Hızı (rpm)	
	3000	4000
600°C	DZ3-6	DZ4-6
700°C	DZ3-7	DZ4-7
800°C	DZ3-8	DZ4-8
900°C	DZ3-9	DZ4-9

i) CdO filmi *p*-Si alttaş üzerine sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilmiştir. CdO filmlerini elde etmek için kullanılan çözeltinin molaritesi 0,5M olarak seçilmiştir. Sol için başlangıç çözeltisi olarak 1,3326g (5×10^{-3} mol) kadmiyum asetat dihidrat ($\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. Çözücü olarak 5ml 2- metoksietanol ve sabitleyici olarak 0,301ml MEA kullanılmıştır. Hazırlanan bu çözelti 1 saat karıştırıcıda karıştırılarak çözülmesi sağlanmıştır. Daha sonra bu çözeltiye, 2- metoksietanol eklenerek toplam 10ml çözelti elde edilmiştir. Elde edilen çözelti 60°C’de 2 saat karıştırılmıştır. Elde edilen çözelti, spin kaplama cihazının numune tutucusu üzerine yerleştirilen *p*-Si alttaş üzerine damlatılmış ve 2000rpm’de 30s döndürülmüştür. Çözelti alttaş yüzeyine yayıldıktan sonra film oluşumu için 10dk 300°C’de kurutulmuştur. 10 kez tekrarlanan bu süreçten sonra film 500°C’de 1 saat tavlanmıştır.

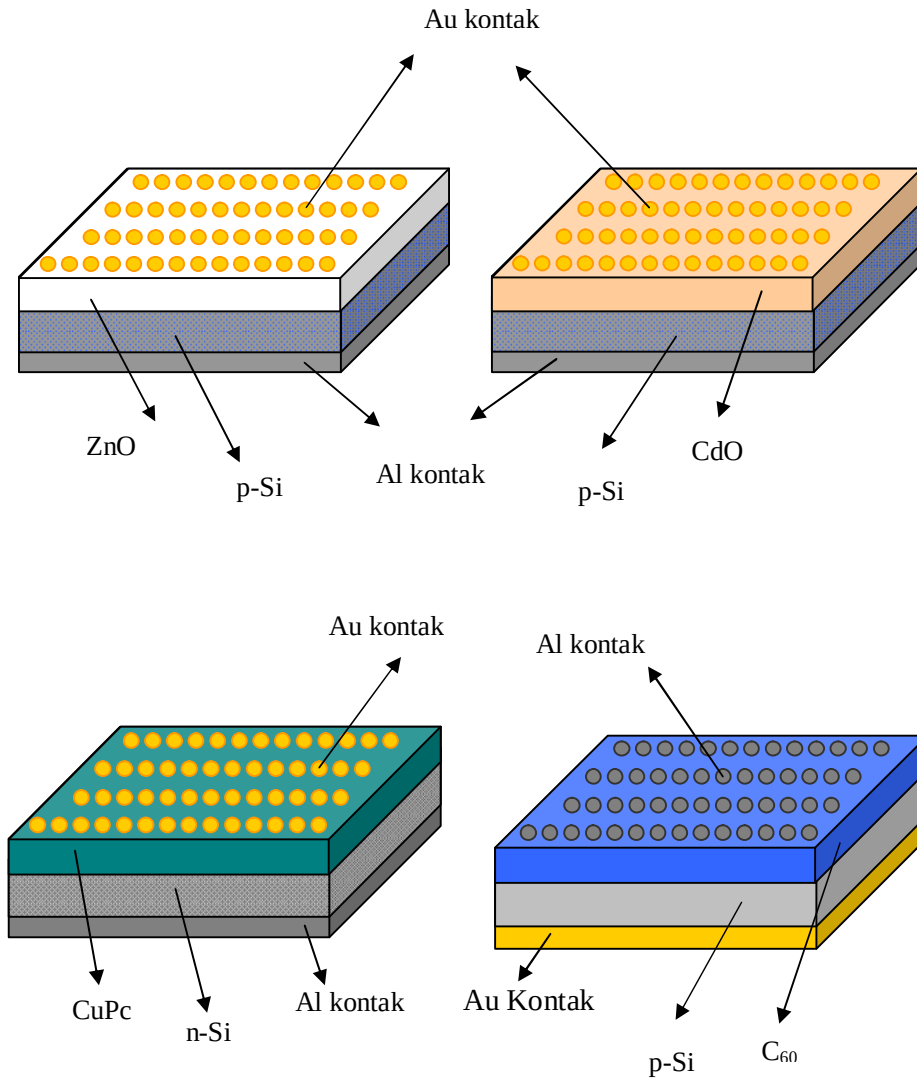
3.5. Organik-İnorganik Diyotların Fabrikasyonu

Elde edilen tüm filmlerin yapısal ve morfolojik özellikleri incelendikten sonra inceleme sonuçlarına göre hangi filmlerin diyot uygulamasında kullanılacağına karar verilmiş ve uygun filmlerin diyot fabrikasyonu yapılmıştır.

Çoklu eklem diyotların üretilmesi için uygun filmler seçildikten sonra filmlerin üzerine Şekil 3.9’da gösterilen maskeler kullanılarak, VAKSİS PVD Handy-MT/101T model Metal Buharlaştırma ve OLED sistemi ile 5×10^{-5} torr basınçta 100nm kalınlığında Al ve 110nm kalınlığında Au kontaklar yapılmıştır. Elde edilen diyotların şematik gösterimi Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Diyot üretiminde kullanılan kontak maskesi



Şekil 3.10. Üretilen inorganik ve organik diyotların şematik gösterimi

Üretilen diyotların I - V karakteristikleri Keithley 2400 I - V kaynağı (Şekil 3.11a) ile incelenmiştir. Diyotların (100-300K) düşük sıcaklıklardaki I - V karakteristikleri Şekil 3.11b’de gösterilen Lakeshore 331S Sıcaklık Kontrol ünitesi ve Şekil 3.11c’de gösterilen Janis Vpf 475 Cryostat (65-500K) ile incelenmiştir. Diyotların aydınlatma altında fotovoltaiik karakteristiklerini incelemek için Sciencetech (Air Mass 1.5G) marka solar simulator (Şekil 3.11d) kullanılmıştır.



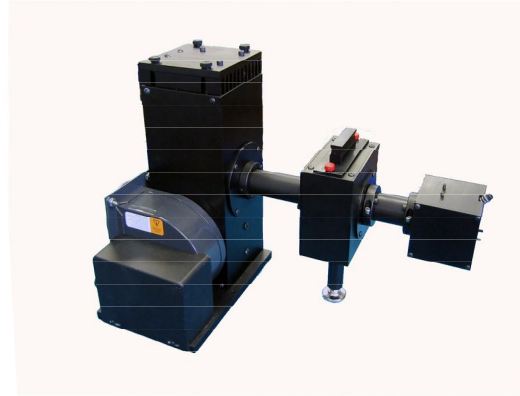
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.11. (a) Keithley 2400 I - V kaynağı, (b) Lakeshore 331S sıcaklık kontrol ünitesi, (c) Janis Vpf 475 Cryostat (65-500K), ve (d) Sciencetech (Air Mass 1.5G) solar simulator

4. İNORGANİK FİLMLERİN X-IŞINI KIRINIMI DESENLERİ

4.1. Giriş

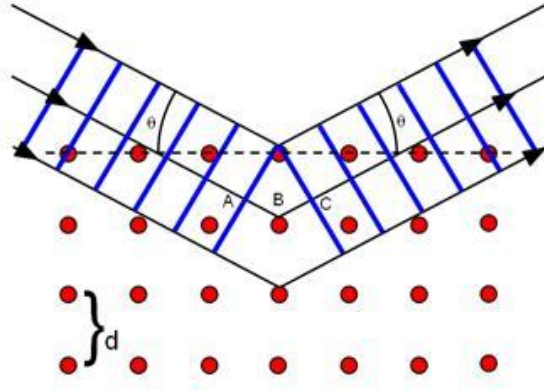
X-ışınları ya da diğer adıyla Röntgen ışınları, bilim ve teknolojinin birçok dalında örneğin hasarsız muayenede, kristal yapı çözümlemesinde, sağlık alanında ve daha birçok alanda kullanılmaktadır.

X-ışınları, 1895 yılında Alman fizikçisi Wilhelm Röntgen tarafından keşfedilmiştir. Bu ışınlar kısa dalgaboylu ve yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar. X-ışınlarının dalgaboyu $0.1\text{\AA}$ ile $100\text{\AA}$ aralığındadır ve gamma ışınları ile ultraviyole (mor ötesi) bölge arasında kalırlar. Kırınım, girişim, kutuplanma gibi özelliklerinin yanında fotoğraf plağına etkime, gazları iyonlaştırma, floresans ve fotoelektrik etki oluşturma gibi tanecik özelliği de gösterirler. Kristal yapı tayininde kullanılacak elektromanyetik dalganın dalga boyu kristal atomları arasındaki mesafeyle kıyaslanabilmelidir. X-ışınlarının dalga boyu kristal içindeki boşluklarla aynı boyutta olduğu için kristalin yapısı hakkında bilgi edinmede X-ışınlarından yararlanılır. Alman fizikçi von Laue 1912 yılında X-ışını kırınımını (XRD) gerçekleştirerek, malzemenin yapısı hakkında bilgi edinilebileceğini kanıtlamıştır [101].

4.2. X-Işını Kırınımı

XRD yöntemi malzeme karakterizasyonunda önemli bir yere sahiptir. Bu yöntem sayesinde malzemenin kristal yapısı hakkında bilgi edinilir. Malzemenin kristal dizilişi, taneciklerin ortalama boyutu, tanecikler arası boşluklar, kristal kusurları, kristalin tercihli yönelimleri X-ışını kırınımı yöntemiyle tayin edilir.

Kristal yapılar için X-ışını kırınımı Bragg Yasası ile açıklanır. W.L. Bragg, kristallerin paralel atom düzlemlerinden oluştuğunu göz önüne almıştır. Gelen dalgalar her bir düzlemden ayrı ayrı yansımaya uğrarlar. X-ışınlarının kristal tarafından difraksiyonu Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Birbiri üzerine dizili pek çok “aynadan” yansımaya uğrayan ışık, girişim desenleri oluşturur (Gelen açı yansıma açısına eşittir).



Şekil 4.1. X-ışınlarının bir kristal tarafından kırınımı

Kristaldeki d aralıklı paralel örgü düzlemlerine θ açısıyla gelen ve dalgaboyu λ olan X-ışınları örgü düzlemlerine çarpıp saçıldıklarında, komşu iki düzlem arasındaki yol farkı $2d\sin\theta$ olur. Bragg yasası aşağıdaki gibi ifade edilir.

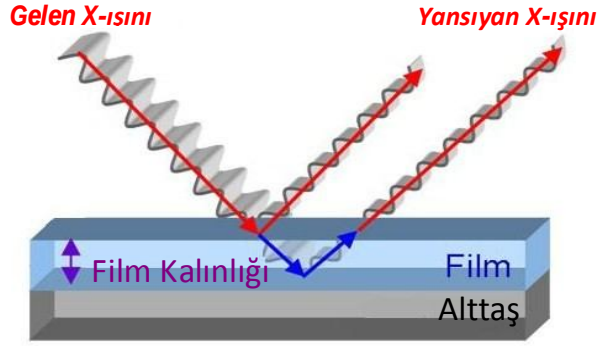
$$n'\lambda = 2d \sin \theta \quad (4.1)$$

Burada d düzlemler arası mesafe, n' kırınımın mertebesidir. Bragg yansıması sadece

$$n'\lambda \leq 2d \quad (4.2)$$

dalgaboyu şartı sağlandığı zaman meydana gelir. Buna Bragg Kırınım Yasası denir. Bu koşulu sağlamak görünür ışığın dalgaboyu ile mümkün olmadığından X-ışınları kullanılmaktadır [102].

Numunelerin analizi aşamasında monokromatik X-ışını numuneye gönderilir ve numuneden yansıyan ışınların şiddeti dedektör tarafından kaydedilir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. X-ışınlarının numuneden kırınımı

Kırınımına uğrayan ışınların θ açıları ve şiddeti bilgisayar yardımı ile çizdirilir. θ açıları ölçülüp $d_{(hkl)}$ değerleri hesaplanır ve piklerin karşılık geldiği elementlerin analizi yapılır.

Kristalin tercihli yönelimini belirlemek için yapılanma katsayısı TC (texture coefficient) kullanılır. TC ; tercihli yönelimin hangi düzlemde olduğu hakkında bilgi verir. Yapılanma katsayısı $TC(hkl)$,

$$TC(hkl) = \frac{I(hkl)/I_0(hkl)}{N^{-1} \sum_N I(hkl)/I_0(hkl)} \quad (4.3)$$

denklemleri yardımıyla hesaplanır. Burada $I(hkl)$, (hkl) düzleminin ölçülen şiddeti, $I_0(hkl)$, JCPDS (Joint Committee for Powder Diffraction Standards) kartlarındaki (hkl) düzleminin standart şiddeti ve N , difraksiyon piklerinin sayısıdır [103–105]. Hesaplanan TC değeri, filmin maksimum tercihli yöneliminin değerini verir. Tercihli yönelimdeki artış düzlemdeki taneciklerin sayısındaki artış ile ilgilidir.

Üretilen filmlerin ortalama kristal boyutları, aşağıda verilen Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanır [102].

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.4)$$

Burada D kristalin tanecik boyutu, k sabit bir değer (0,9), λ X-ışını dalga boyu ve β yarı pik genişliğidir (FWHM).

Bu çalışmada üretilen inorganik filmlerin XRD analizleri, Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesinde bulunan, BRUKER AXS D8 Advance marka X-ışını kırınım cihazında yapılmıştır. Tüm ölçümler monokromatik Cu/K_{α} ($\lambda=1,54059\text{\AA}$) ışını ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3).

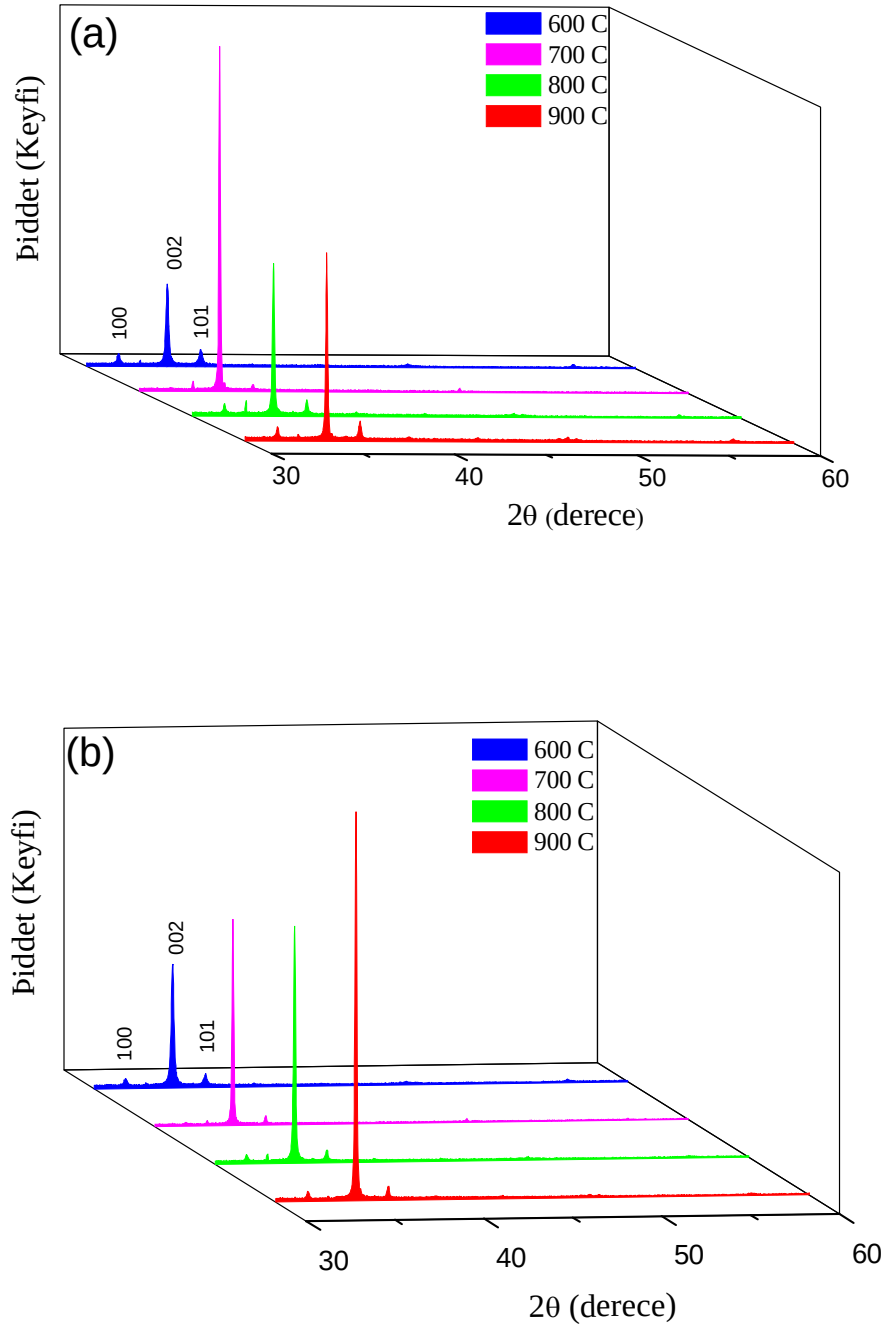


Şekil 4.3. Bruker Axs D8 Advance X-ışını kırınım cihazı

4.3. ZnO Filmlerinin X-Işını Kırınımı (XRD) Desenleri

Elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Filmlerin kırınım desenleri incelendiğinde pik şiddetleri ve genişlikleri filmler arasında farklılıkları ortaya çıkarmaktadır. Şiddetleri büyük ve genişlikleri dar olan pikler kristalleşmenin iyi, şiddetleri küçük ve genişlikleri büyük olan pikler ise kristalleşmenin iyi olmadığı anlamına gelmektedir. Bu çalışmada farklı döndürme hızlarına ve farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin kırınım desenlerinde, piklerin üzerinde ilgili düzlemlerin miller indisleri belirtilmiştir.

SD3-6, SD3-7, SD3-8, SD3-9 filmlerinin oda sıcaklığında X-ışını kırınım desenleri incelendiğinde tüm filmlerin polikristal oldukları ve hekzagonal wurtzite yapıda kristallendikleri gözlenmiştir. Tüm filmlerde, (100), (002), (101) olmak üzere üç farklı yönelimde pik bulunmaktadır (Şekil 4.4a). SD4-6, SD4-7, SD4-8, SD4-9 filmlerinin X-ışını desenleri incelendiğinde de yine aynı sonuçlar elde edilmiştir. Hekzagonal wurtzite yapıda kristallenen bu dört filmde de (100), (002),



Şekil 4.4. (a) 3000 rpm ve (b) 4000rpm döndürme hızında elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri.

(101) düzlemlerinde pik gözlenmiştir (Şekil 4.4b). Ancak farklı tavlama sıcaklıklarına göre filmlerin XRD desenleri incelendiğinde sıcaklık değişiminin

pik şiddetini etkilediği görülmüştür. Tüm filmlerin tercihli yöneliminin (002) düzleminde olduğu görülmüştür.

Elde edilen ZnO filmlerinin kırınım açısı, düzlemler arası mesafe ve örgü sabitleri, (002) tercihli yönelimi için hesaplanmış ve Çizelge 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Örgü sabitleri (a_{hex} ve c_{hex}) analitik metot kullanılarak aşağıdaki denklemden hesaplanmıştır [102],

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a_{hex}^2} \right) + \frac{l^2}{c_{hex}^2} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)’ten hesaplanan örgü sabiti değerleri, ZnO ya ait JCPDS kartındaki (JCPDS no:036–1451, $a=3,24982$, $c=5,20661$) değerler ile uyum içindedir.

Çizelge 4.1. 3000rpm döndürme hızında elde edilen ZnO filmlerinin 2θ , a , c ve d değerleri

Film Kodu	2θ	$a(\text{\AA})$	$c(\text{\AA})$	$d(\text{\AA})$
SD3-6	36,268	3,24839	5,20458	2,474
SD3-7	36,192	3,25336	5,21212	2,479
SD3-8	36,253	3,24982	5,20608	2,475
SD3-9	36,274	3,24935	5,20410	2,474

Çizelge 4.2. 4000rpm döndürme hızında elde edilen ZnO filmlerinin 2θ , a , c ve d değerleri

Film Kodu	2θ	$a(\text{\AA})$	$c(\text{\AA})$	$d(\text{\AA})$
SD4-6	36,227	3,25126	5,20894	2,477
SD4-7	36,235	3,25295	5,21368	2,477
SD4-8	36,262	3,25051	5,20068	2,475
SD4-9	36,324	3,24643	5,19484	2,471

Literatür incelendiğinde benzer sonuçların olduğu çalışmalar göze çarpmıştır. Çağlar ve arkadaşları [106] yaptıkları çalışmada farklı tavlama sıcaklıklarında (550°C, 650°C ve 750°C) elde edilen ZnO filmlerinin yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Filmlerin XRD desenlerini incelediklerinde bütün filmlerin tercihli yönelimlerinin (002) düzleminde olduğunu görmüşlerdir. Pik şiddetlerinin tavlama sıcaklığıyla arttığını, yarı pik genişliğinin ise azaldığını rapor etmişlerdir. Filmlerin yapılanma katsayılarının sıcaklık artışıyla birlikte arttığını ve en yüksek değerin 750°C’de tavlanan ZnO filmine ait olduğunu belirtmişlerdir. Filmlerin kristal yapısının tavlama sıcaklığıyla birlikte daha da iyileştiğini belirtmişlerdir. Bunun yanında tavlama sıcaklığının artışıyla filmlerin optik özelliklerinin de iyileştiğini rapor etmişlerdir.

Filmlerin TC değerleri, Denklem (4.3)’den hesaplanmış ve Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Filmlerin kristal boyutları Denklem (4.4)’te verilen Scherrer formülü ile hesaplanmıştır. Çizelge 4.3’te verilen kristal boyutlarına bakıldığında, 3000rpm döndürme hızına sahip filmlerde en yüksek kristal boyutu değerinin (82nm) 700°C de tavlanan ZnO filmine ait olduğu görülmektedir. 4000rpm döndürme hızına sahip olan filmlerde kristal boyutu değerlerine bakıldığında yine en yüksek değerin (70nm) 700°C de tavlanan ZnO filmine ait olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3. Üretilen ZnO filmlerinin yapılanma katsayısı ve tanecik boyutları

Film Kodu	<i>D (tanecik boyutu) (nm)</i>	<i>TC</i>
SD3-6	47	3,4293
SD3-7	82	3,8277
SD3-8	64	4,3923
SD3-9	67	4,6475
SD4-6	44	4,0783
SD4-7	70	5,3619
SD4-8	58	4,3706
SD4-9	66	3,7418

4.4. CdO Filminin X-Işını Kırınımı (XRD) Desenleri

CdO filminin oda sıcaklığında XRD desenleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, CdO filminin (111), (200) ve (220) olmak üzere üç karakteristik piki gözlenmiştir. Tercihli yönelimin (111) düzleminde olduğu CdO filminin XRD desenleri filmin polikristal ve kübik yapıda kristallendiğini göstermiştir. CdO filminin 2θ , hkl , a_{cub} , d değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. CdO filminin örgü sabiti [102]

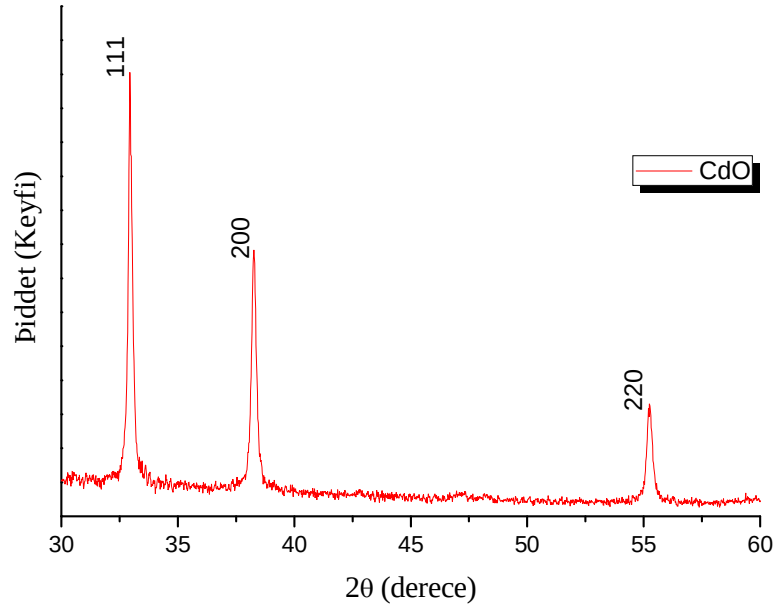
$$d^2 = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a_{cub}^2} \quad (4.6)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Denklem (4.6)'dan elde edilen örgü sabiti değeri, CdO'nun JCPDS kartındaki (JCPDS no:005-0640, $a=4,69530$) değeri ile uyum içindedir.

Çizelge 4.4. CdO filminin (*hkl*), 2θ , *a* ve *d* değerleri

Film Kodu	(<i>hkl</i>)	2θ	<i>a</i> (Å)	<i>d</i> (Å)
DC	111	32,956	4,70367	2,715
	200	38,263	4,70076	2,350
	220	55,249	4,69880	1,661

CdO filminin yapılanma katsayısı Denklem (4.3) kullanılarak üç düzlem için de hesaplanmış ve $TC_{(111)} \cong 1,5728$, $TC_{(200)} \cong 0,9902$, $TC_{(220)} \cong 0,4368$ olarak bulunmuştur. Denklem (4.4)'teki Scherrer eşitliğinden hesaplanan CdO filminin tanecik boyutu ise tercihli yönelimin (111) olduğu en şiddetli pik için $D=43\text{nm}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. CdO filminin XRD deseni.

Üretilen CuPc filminin oda sıcaklığında XRD desenleri $5^{\circ} \leq 2\theta \leq 40^{\circ}$ sınır değerlerinde incelenmiştir. CuPc filminin XRD analizlerinden filme ait karakteristik X-ışını piki ($2\theta=6,85^{\circ}$) gözlenememiştir. Ancak literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde CuPc filminin bu aralıklarda kırınım piki verdiği rapor edilmiştir. [9,76].

Üretilen C₆₀ filminin oda sıcaklığında XRD desenleri $5^{\circ} \leq 2\theta \leq 35^{\circ}$ sınır değerlerinde incelenmiştir. Filmin XRD desenlerinde beklenen karakteristik C₆₀ pikleri ($2\theta=10,1^{\circ}, 22^{\circ}, 34^{\circ}$) görülmemiştir. Ancak literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde C₆₀ filminin $5^{\circ} \leq 2\theta \leq 35^{\circ}$ aralıklarında kırınım piki verdiği rapor edilmiştir [9].

5. ORGANİK-İNORGANİK FİLMLERİN TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU GÖRÜNTÜLERİ

5.1. Giriş

1927 yılında C.J. Davison ve L.H. Germer, elektronun dalga doğasını deneysel olarak doğrulamış ve yüksek enerjili bir elektronun düşük enerjili bir elektrondan daha küçük bir dalga boyuna sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmadan sonra geometrik elektron optiği gelişmiştir. 1931 yılında E. Ruska ve M. Kroll tarafından ilk elektron mikroskobu icat edilmiş ve o zamandan beri birçok elektron mikroskobu geliştirilmiştir. Geliştirilen mikroskoplar arasında en önemlilerinden biri taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM)'dur.

SEM; Manfred von Ardenne öncülüğünde 1930'lu yıllarda geliştirilmiştir. SEM, materyalleri görüntülemek için ışık yerine elektronları kullanan, yüksek çözünürlükte resimler elde etmeye olanak veren bir mikroskoptur. Bu özelliği sayesinde numunelerin birçok özelliği yüksek büyütme oranı sayesinde analiz edilebilmektedir

SEM, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması ve bu elektron demetiyle numune yüzeyinin taranması prensibiyle çalışır. Bu sırada elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkiler uygun algılayıcılarda toplanır ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılır. Son olarak bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilir [107,108].

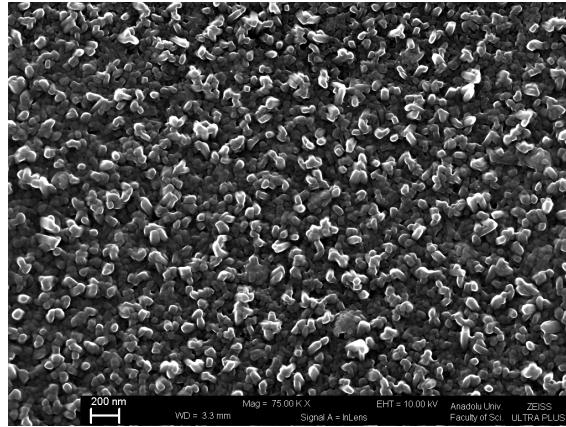
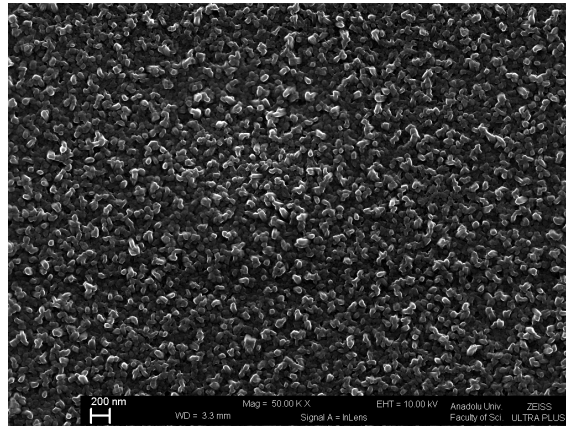
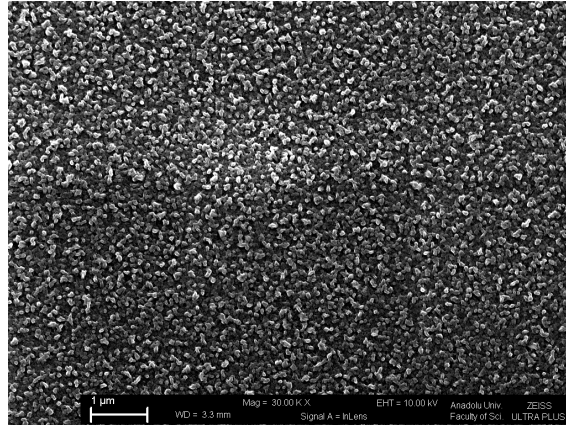
Bu çalışmada üretilen organik-inorganik filmlerin yüzey morfolojisi hakkında bilgi edinmek için ZEISS Ultraplus model, alan etkili taramalı elektron mikroskobu (Field Emission Scanning Electron Microscopy, FESEM) kullanılmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Zeiss Ultraplus alan etkili taramalı elektron mikroskobu

5.2. CuPc Filminin FESEM Görüntüleri

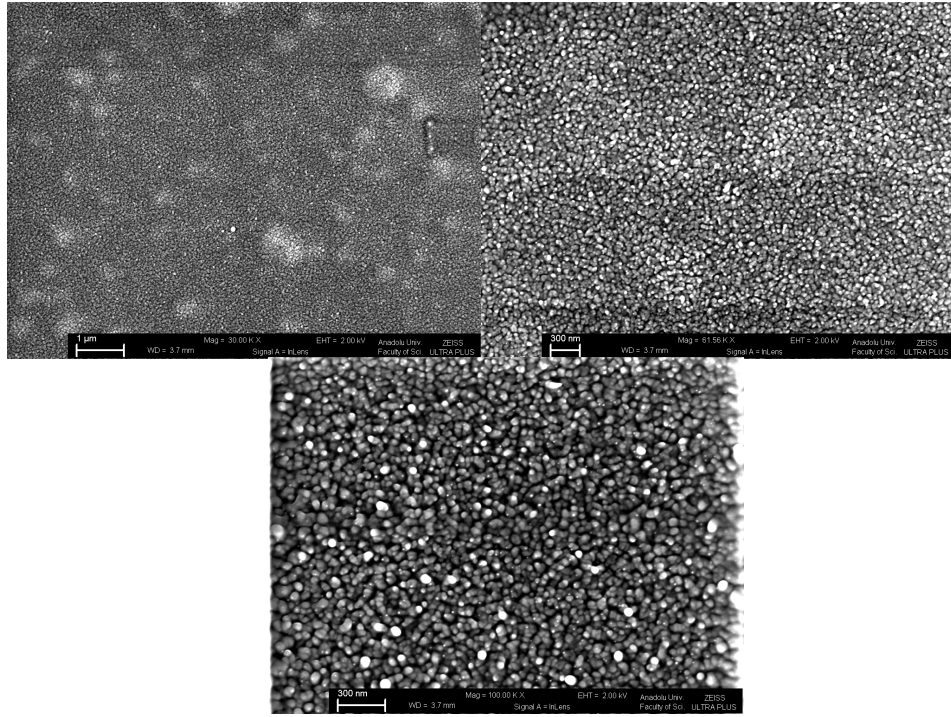
Şekil 5.2’de CuPc filminin farklı büyütmelerdeki FESEM görüntüleri yer almaktadır. Görüntüler incelendiğinde CuPc filminin tanecikli bir yapısı olduğu görülmektedir. Bu görüntülerden tanecik boyutunun yaklaşık 100nm civarında olduğu görülmektedir. Film alttaş üzerine düzgün olarak yayılmıştır.



Şekil 5.2. CuPc filminin farklı büyütmelerdeki FESEM görüntüleri

5.3. C₆₀ Filminin FESEM Görüntüleri

Şekil 5.3'te verilen C₆₀ filminin farklı büyütmelelerdeki FESEM görüntülerinden Altaş yüzeyinde C₆₀ filmine ait taneciklerin oluştuğu görülmüştür. Bu taneciklerin boyutunun yaklaşık 100nm civarında olduğu görülmektedir. C₆₀ filminin altaş üzerine düzgün olarak dağıldığı ve homojen olduğu görülmektedir.



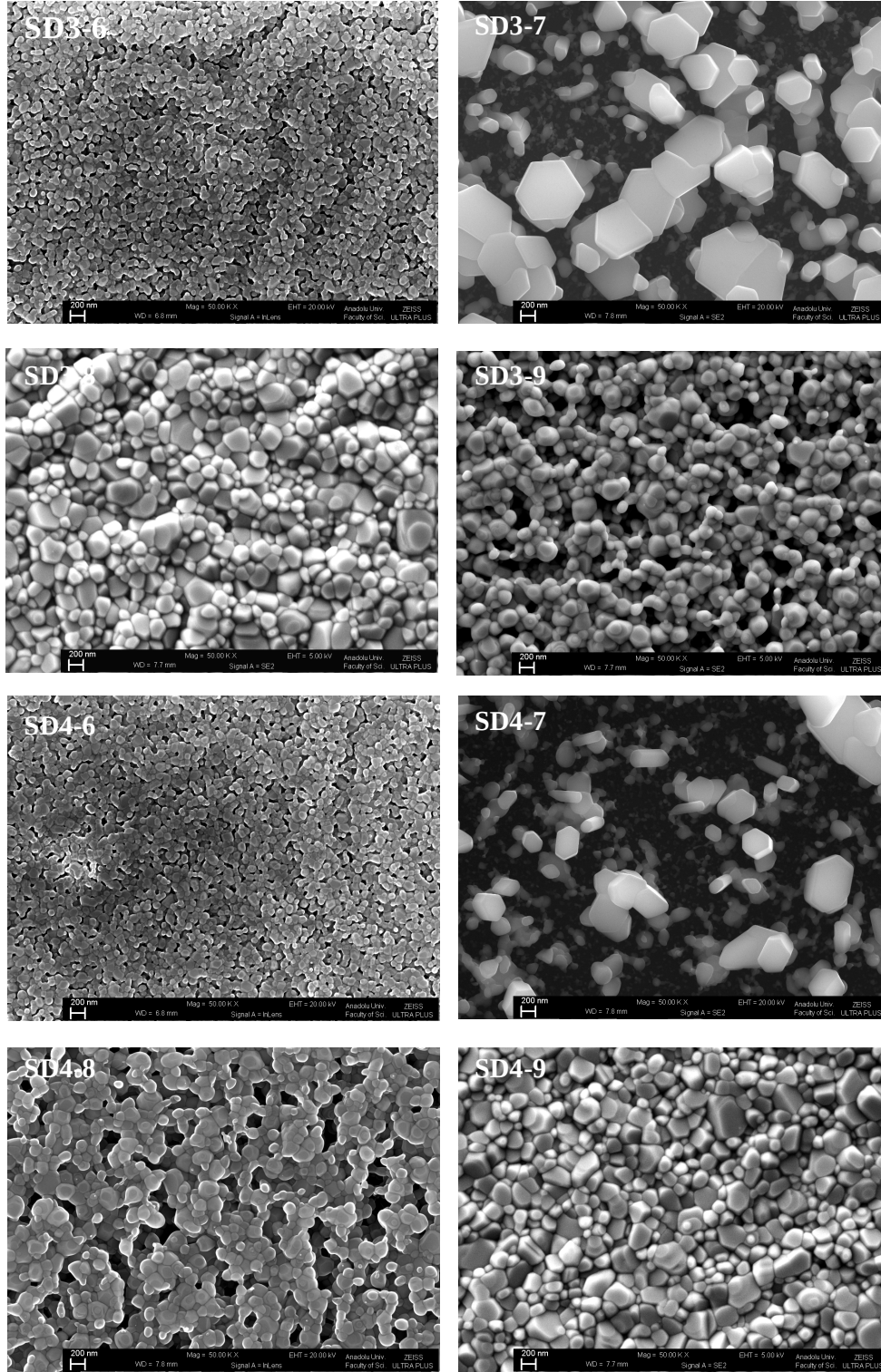
Şekil.5.3. C₆₀ filminin farklı büyütmelelerdeki FESEM görüntüleri

5.4. ZnO Filmlerinin FESEM Görüntüleri

Filmlerin yüzey morfolojileri ve mikroyapılarını incelemek amacıyla FESEM görüntüleri çekilmiştir (Şekil 5.4). Farklı döndürme hızlarında ve farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin FESEM fotoğrafları incelendiğinde bütün filmlerin polikristal yapıda olduğu görülmektedir.

SD3-6 filminin FESEM görüntüsünde taneciklerin sınırlarının belli olmadığı görülmektedir. Tanecikler birbiri içine geçmiş gibi görünmekte ve aralarında boşluk bulunmamaktadır. Film yüzeyi genel olarak dalgalı bir yapıya sahiptir. Tanecik boyutu 40-50nm civarındadır. SD3-7 filminin FESEM görüntüsünde ise tanecik boyutları oldukça büyümüştür. Taneciklerin sınırları tamamen belirgin olmakla birlikte hegzagonal yapılar çok net bir şekilde görülmektedir. Tanecikler yapı olarak plaka şeklini almışlardır. Ancak tanecikler arasında boşluklar oluşmuştur. Filmin tanecik boyutu yaklaşık 90nm civarındadır. SD3-8 filminin FESEM görüntüsüne bakıldığında tanecikler arası boşlukların tekrar kapandığı görülmektedir. Tanecik sınırları yine keskin olarak görülmekte fakat boyutları SD3-7 filmine göre daha küçülmüştür. Yüzey yine dalgalı yapıya sahiptir. Tanecik boyutu 60-70nm aralığındadır. SD3-9 filminin FESEM görüntüsünden tanecik sınırlarının yine az bir miktar belirsizleşmeye başladığı görülmektedir. Tanecik boyutu 60-70nm aralığındadır. Bu FESEM görüntülerinden de en büyük tanecik boyutunun SD3-7 filmine ait olduğu görülmektedir ki bu da yapılan X-ışını analizlerini desteklemektedir.

SD4-6 ve SD4-8 filmlerinin FESEM görüntüleri incelendiğinde tanecik sınırlarının tam belirgin olmadığı görülmekte ve buna ek olarak SD4-8 filmde tanecikler arası boşluklar olduğu görülmektedir. İki filmin de tanecik boyutları yaklaşık 50 ve 70nm civarındadır. SD4-7 filmde tanecik sınırları oldukça keskin görülmektedir. SD3-7 filmde gözlenen plaka şeklindeki tanecik yapıları bu filmde de görülmüştür. Film yüzeyinde nanorodların olduğu gözlenmektedir. Tanecik boyutları diğer 3 filmin tanecik boyutlarıyla karşılaştırıldığında oldukça büyüktür (70nm) ancak aynı zamanda aralarında en fazla boşluklu yapıya sahip olan filmidir. SD4-9 filminin FESEM görüntüsünde belirgin sınırları olan tanecikler görülmektedir. Tanecikler birbirine yaklaşmış ve boşluklar yok

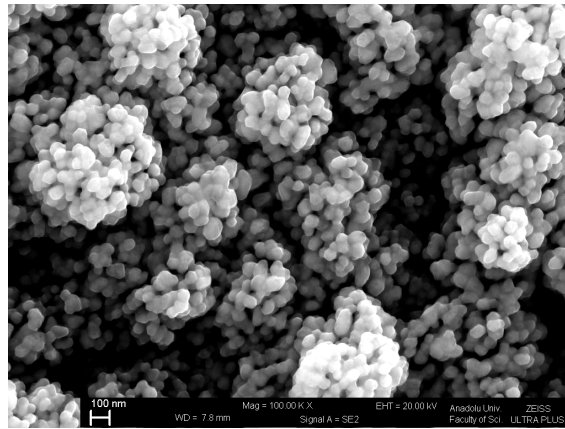
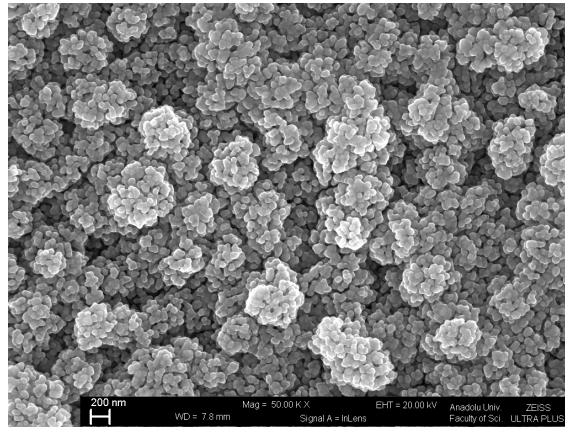
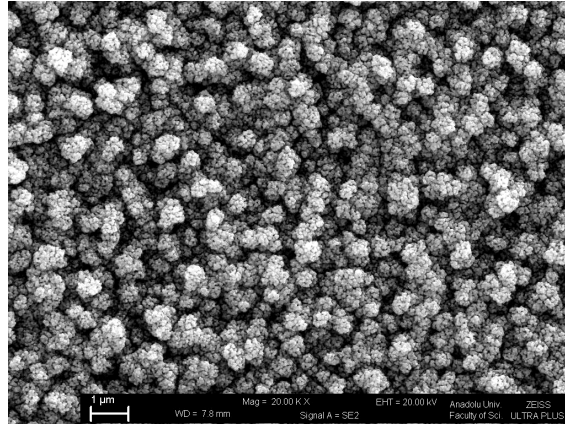


Şekil 5.4. 3000 ve 4000 rpm döndürme hızlarında ve farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri

olmuştur. Film yüzeyi dalgalı bir yapıya sahiptir. Tanecik boyutu yaklaşık 60nm civarındadır. Ho ve arkadaşları [109], cam alttaş üzerine ürettikleri ZnO filmlerini 400°C–500°C ve 600°C’de tavlamislar ve FESEM görüntülerini incelediklerinde parçacık boyutlarının tavlama sıcaklığıyla orantılı olarak arttığı görülmüştür. Filmlerin artan tavlama sıcaklığıyla daha da düzeldiğini belirtmişlerdir. Lv ve arkadaşları [110] 400–600–800°C’de tavladıkları ZnO filminin FESEM görüntülerini incelemişler, tavlama sıcaklığının artmasıyla tanecik boyutunun ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını görmüşlerdir. Çağlar ve arkadaşları [106] 450–550–650 ve 750°C’de tavlayarak Si üzerine ZnO filmlerini üretmişlerdir. Filmlerin FESEM görüntülerinden tanecik boyutunun tavlama sıcaklığıyla orantılı olarak arttığını ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığını gözlemişlerdir. Sıcaklık artışıyla oksijen ve çinko atomlarının örgüye yerleşmesine yardımcı olan yüzey atomlarının hareketlendiğini ve yüzey pürüzlülüğünün bu nedenle azaldığını belirtmişlerdir. Robbins ve arkadaşları [111] pürüzlülüğün azalmasının, *pn* cihazlarında ani eklemlerin oluşmasını sağladığını ve bu durumun güneş pilleri, OLED’ler için yararlı bir sonuç doğurduğunu belirtmektedir.

5.5. CdO Filminin FESEM Görüntüleri

CdO filminin farklı büyütme ölçeklerinde FESEM görüntüleri incelenmiştir (Şekil 5.5). SEM görüntülerinden, CdO filminin Si alttaş üzerine homojen olarak yayıldığı görülmektedir. Film, kümelenmiş haldeki taneciklerden oluşmuştur. Kümeler, nano parçacıklardan oluşmuştur. Bu nano parçacıkların yaklaşık boyutu 400nm civarındadır. Literatür incelendiğinde, benzer sonuçlar elde eden çalışmalarla karşılaştırılmıştır [18,112].



Şekil 5.5. CdO filminin farklı büyütmelerdeki FESEM görüntüleri

6. ORGANİK-İNORGANİK DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONLARI

6.1. Giriş

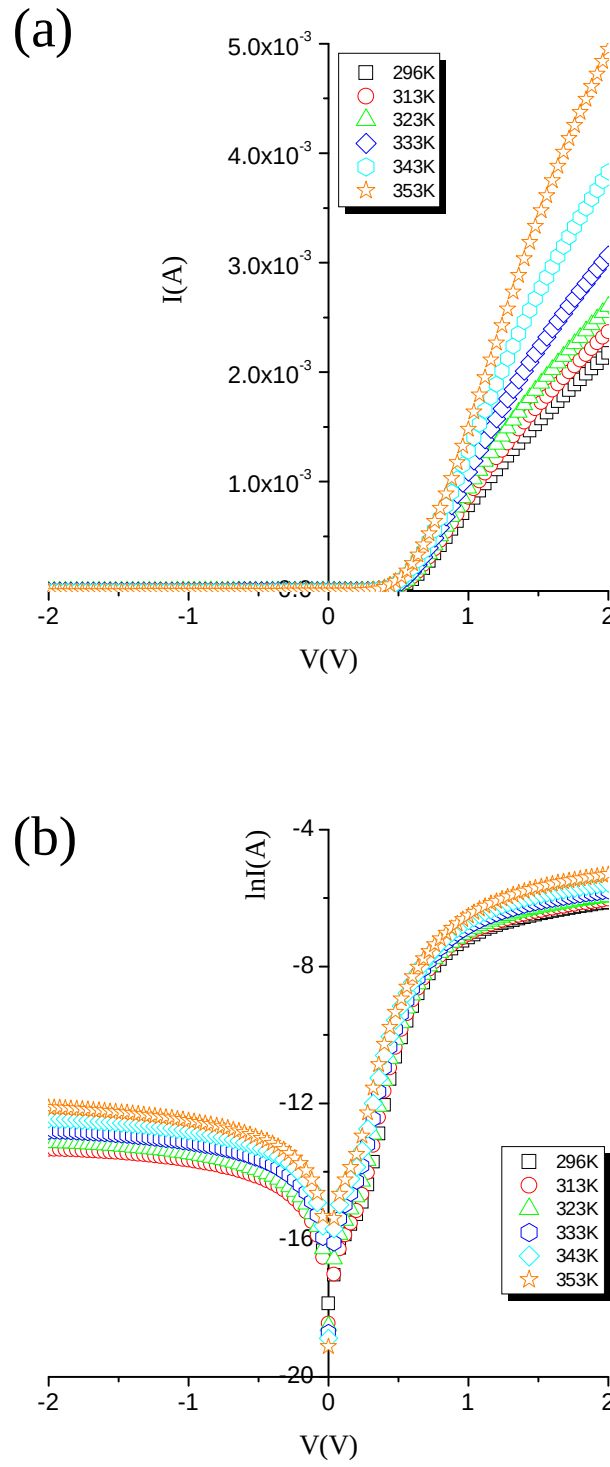
Bu bölümde, elde edilen organik-inorganik diyotların elektriksel karakterizasyonları yapılmış, diyotların akım-gerilim (I - V) karakterizasyonları değerlendirilmiş ve fotovoltaiik özellikleri incelenmiştir.

6.2. Elde Edilen Organik-İnorganik Diyotların Sıcaklığa Bağlı I - V Karakteristikleri

Farklı döndürme hızı ve farklı tavlama sıcaklıklarında üretilen ZnO filmlerinin XRD ve FESEM görüntüleri incelendikten sonra SD3-7 ve SD4-7 filmlerinde en iyi kristallenmenin hekzagonal yapılı yüzey görüntüsü bu filmlere ait olduğu için bu filmler kullanılarak oluşturulan diyotların elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. SD3-7 filminden elde edilen diyot 1. tip, SD4-7 filminden elde edilen diyot 2. tip olarak adlandırılmıştır. Bu filmlerin seçilmesinin sebebi kristal yapılarının ve yüzey morfolojilerinin diğer filmlere göre daha iyi olmasıdır.

6.2.1. Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun I - V karakteristikleri

Şekil 6.1’de Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgeleri için çizilen I - V karakteristiği verilmiştir. Diyotun 296K–353K sıcaklık aralığındaki I - V ölçümleri yapılmış, diyotun elektriksel özelliklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiği incelenmiştir. Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun 296K–353K arası sıcaklık bölgesinde idealite faktörü değerleri; yarı-logaritmik I - V grafiğinden elde edilmiştir. Bu grafikten hesaplanan I_0 ve ϕ_b gibi diyot parametreleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Bu çizelgeden, sıcaklık arttıkça n ’nin azaldığı ve 3,07–2,01 arasında değerler aldığı görülmektedir. Artan sıcaklıkla ϕ_b ’nin 0,64eV’den 0,75eV’ye, I_0 ’ın ise $1,72 \times 10^{-8}$ A’dan $5,11 \times 10^{-8}$ A’ya çıktığı görülmektedir. İdealite faktörünün 1’den büyük değerler alması metal ile yarıiletken arasındaki ara yüzey tabaka kalınlığının sonucu olarak açıklanabilir. Kanbur [113] doktora tezinde;



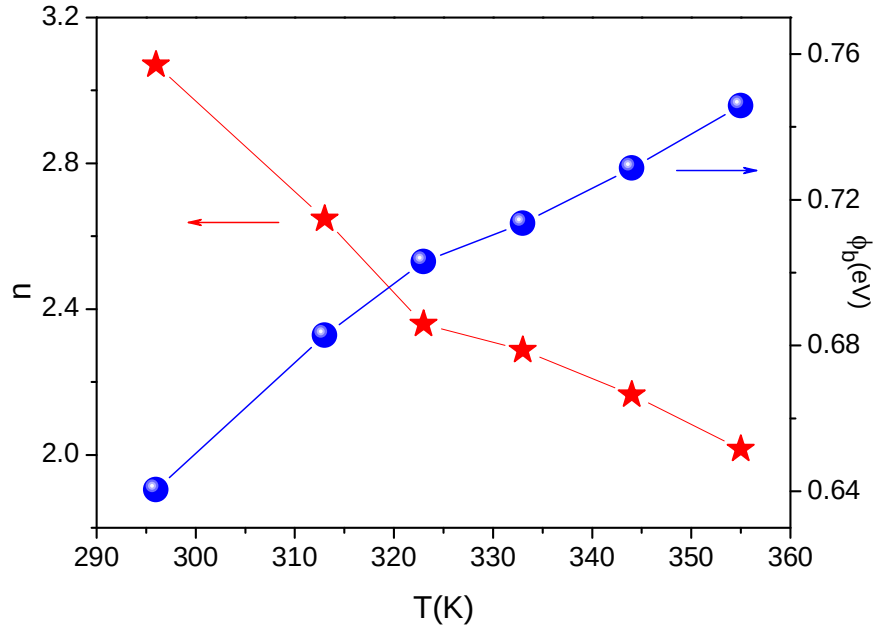
Şekil 6.1. Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun farklı sıcaklıklarda (a) lineer ve (b) yarı-logaritmik I - V değişimi

pratikte $n=1$ olan ideal duruma literatürde hemen hemen hiç rastlanmadığını çünkü uygulanan gerilimin engel yüksekliğini bir miktar etkilediğini belirtmiştir. Bu etkiye sebep olarak, ideale en yakın Schottky diyotlarda dahi MY arayüzeyinde en az $5\text{\AA}$ – $20\text{\AA}$ kalınlığında ince bir oksit tabakanın doğal olarak oluşmasını göstermiştir. Yakuphanoglu [114] Al/p-Si/n-CuPc/Au diyotunu üretip diyotun elektriksel ve fotovoltaiik özelliklerini incelemiştir. Diyotun akım mekanizması için termiyonik emisyonun ana mekanizma olduğunu belirtmiştir. Diyotun n değerini 2,38, ϕ_b değerini ise 0,71eV olarak bulmuştur. Organik ve inorganik yarıiletken arasında oluşmuş bir arayüzey tabakası sebebiyle engel yüksekliği değerinin fazla çıktığını belirtmiştir. Bu tabakanın oluşumuna sebep olarak p-Si'nin ön tarafının kaplanmadan önce havayla temas etmesini göstermiştir. Gupta ve arkadaşları [115] ZnO/CuPc eklemi yapmışlardır. Aynı koşullarda 12 aygıt üretmişler ve bu yapıların elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Aygıtların ϕ_b değerlerinin 0,62–0,64eV aralığında değiştiğini ve n değerlerinin 3,8–4,2 aralığında değiştiğini bulmuşlardır. Yüksek idealite faktörü nedeniyle aygıtların taşınım mekanizmalarının TE ile tanımlanamayacağını açıklamışlardır. Arayüzey durumlarının varlığı ve kıtlık bölgesindeki elektron ve hollerin hızlı rekombinasyonu gibi durumların idealite faktörünün değerinin yüksek çıkmasına sebep olabileceğini belirtmişlerdir.

Çizelge 6.1. Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve ϕ_b değerleri

$T(K)$	n	$I_0(A)$	$\phi_b(eV)$
296	3,07	$1,72 \times 10^{-8}$	0,64
313	2,65	$1,56 \times 10^{-8}$	0,67
323	2,35	$1,76 \times 10^{-8}$	0,70
333	2,28	$2,77 \times 10^{-8}$	0,71
343	2,16	$3,92 \times 10^{-8}$	0,73
353	2,01	$5,11 \times 10^{-8}$	0,75

Şekil 6.2’de Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun idealite faktörünün ve potansiyel engelinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi artan sıcaklıkla potansiyel ϕ_b artarken n azalmaktadır. Oda sıcaklığında ϕ_b değeri 0,64eV olarak bulunmuştur. Diyotun R_s değerleri Norde metodu kullanılarak çizilen $F(V)$ - V grafiğindeki eğrinin minimum noktasına karşılık gelen $F(V_0)$ değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 6.2’de verilmiştir. Vallurupalli [9] doktora tezinde farklı kalınlıklarda (15nm, 60nm, 80nm, 100nm, 120nm, 140nm) CuPc Schottky diyot üretmiş ve ürettiği diyotların elektriksel özelliklerini incelemiştir. Yaptığı çalışmada diyotların R_s değerlerinin kalınlıkla birlikte 7,10k Ω ’dan 9,41k Ω ’a arttığını görmüştür. R_s değerinin yüksek çıkmasına sebep olarak CuPc filminin ve PEDOT:PSS yüzeyinin düşük elektriksel iletkenliğini göstermiştir.



Şekil 6.2. Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun ϕ_b ve n değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Çizelge 6.2. Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan $F(V_0)$ ve R_s değerleri

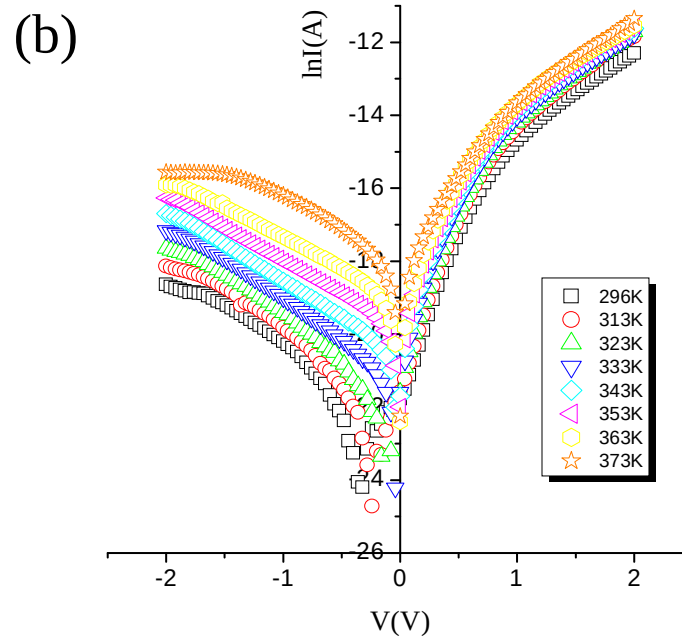
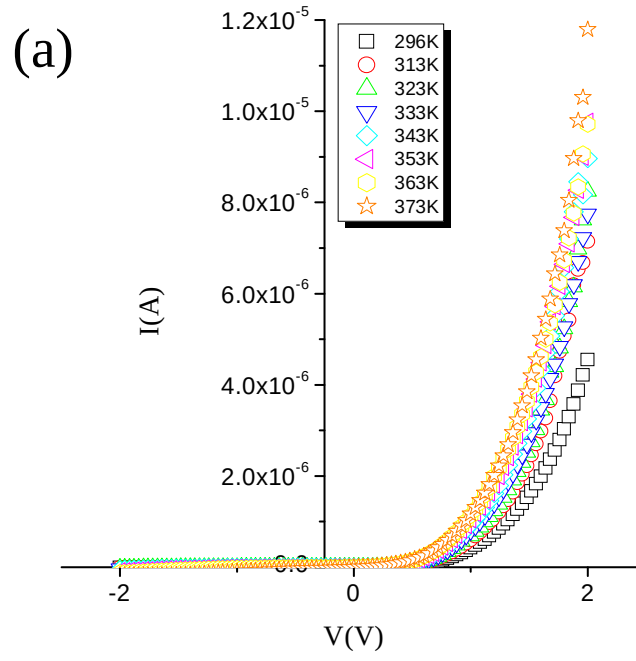
$T(K)$	$F(V_0) \times 10^{-1}$	$R_s(k\Omega)$
296	6,07	0,23
313	6,51	0,17
323	6,46	0,42
333	6,41	0,35
343	6,34	0,50
353	6,28	0,74

6.2.2. Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotunun *I-V* karakteristikleri

Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotunun 296K–373K aralığında *I-V* karakteristikleri ölçülmüş ve Şekil 6.3'te bu ölçümlere ait *I-V* grafikleri (Şekil 6.3a lineer, Şekil 6.3b yarı-logaritmik) verilmiştir. Sıcaklık arttırıldıkça diyotun hem geri hem de ileri besleme akımında bir artış gözlenmiştir. En yüksek akım değerine 373K sıcaklık değerinde ulaşılmıştır. Her bir sıcaklık değeri için diyotun *n*, *I₀*, *Ø_b* parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 6.3'te verilmiştir. Diyotun *n* değerinin sıcaklık artışıyla birlikte 5,50'den 3,45'e düştüğü görülmüştür. *I₀* ve *Ø_b* değerlerinin ise sıcaklık artışıyla birlikte sırasıyla 7,85x10⁻¹⁰A'dan 2,91x10⁻⁹A'ya ve 0,72eV'den 0,88eV'ye çıktığı grafikten de görülmektedir.

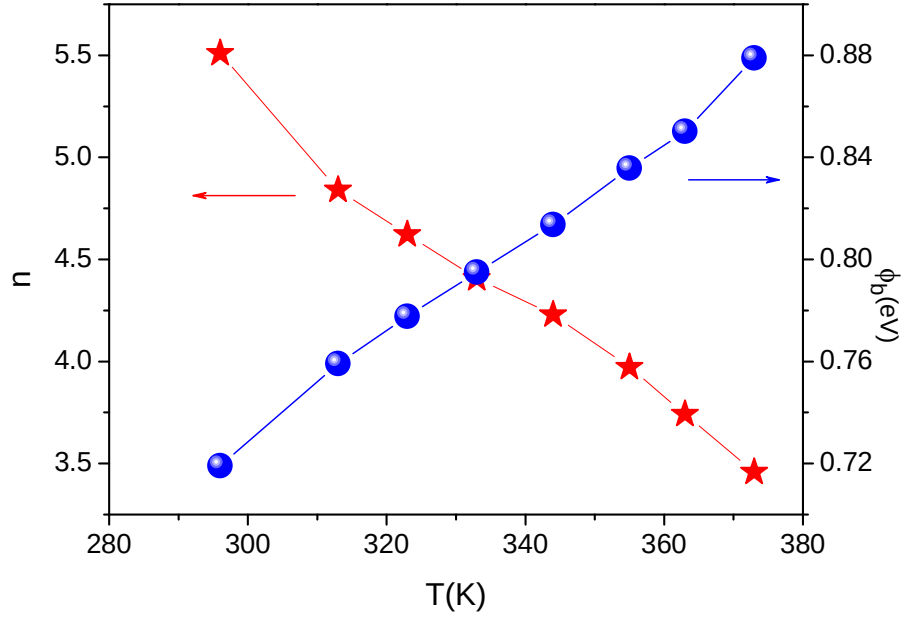
Çizelge 6.3. Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki *I-V* ölçümlerinden hesaplanan *n*, *I₀* ve *Ø_b* değerleri

<i>T(K)</i>	<i>n</i>	<i>I₀(A)</i>	<i>Ø_b(eV)</i>
296	5,50	7,85x10 ⁻¹⁰	0,72
313	4,84	9,19x10 ⁻¹⁰	0,76
323	4,62	1,20x10 ⁻⁹	0,78
333	4,40	1,62x10 ⁻⁹	0,80
343	4,22	2,23x10 ⁻⁹	0,81
353	3,97	2,71x10 ⁻⁹	0,84
363	3,74	3,25x10 ⁻⁹	0,85
373	3,45	2,91x10 ⁻⁹	0,88



Şekil 6.3. Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotunun farklı sıcaklıklarda (a) lineer ve (b) yarı- logaritmik I - V değişimi

Şekil 6.4'te Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotunun idealite faktörünün ve potansiyel engelinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği verilmiştir. Diyotun R_s değerleri Norde metodu kullanılarak çizilen $F(V)$ - V grafiğindeki eğrinin minimum noktasına karşılık gelen $F(V_0)$ değeri kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.4. Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotunun ϕ_b ve n değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Yakuphanoglu [116] p-Si/n-C₆₀ pn eklemi yapmış ve elektriksel özelliklerini incelemiştir. Ürettiği p-Si/n-C₆₀ yapısının n değerini oda sıcaklığında 2,40 olarak bulmuştur. Cheung modelini kullanarak diyotun R_s değerini $7,39 \times 10^6 \Omega$ olarak bulmuştur. Üretilen Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotunun Norde metodu kullanılarak elde edilen oda sıcaklığındaki R_s değerine bakıldığında, bu çalışmadakilere göre daha düşük sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.4. Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotunun Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan $F(V_0)$ ve R_s değerleri

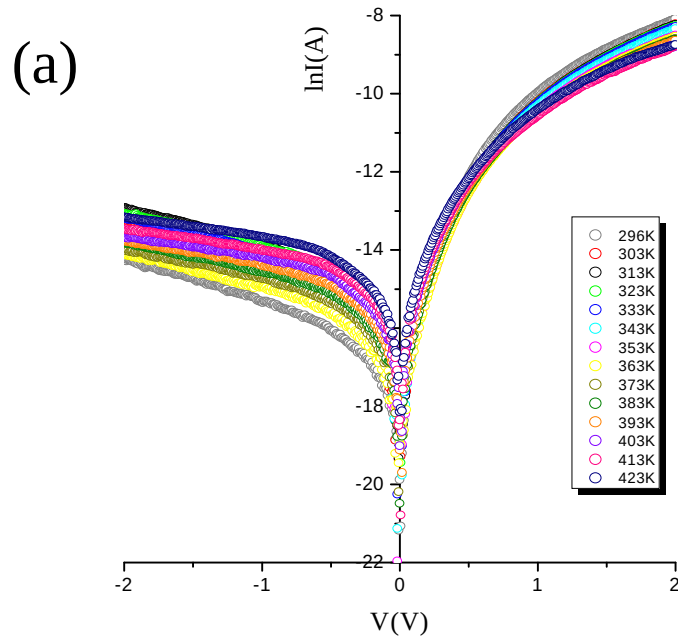
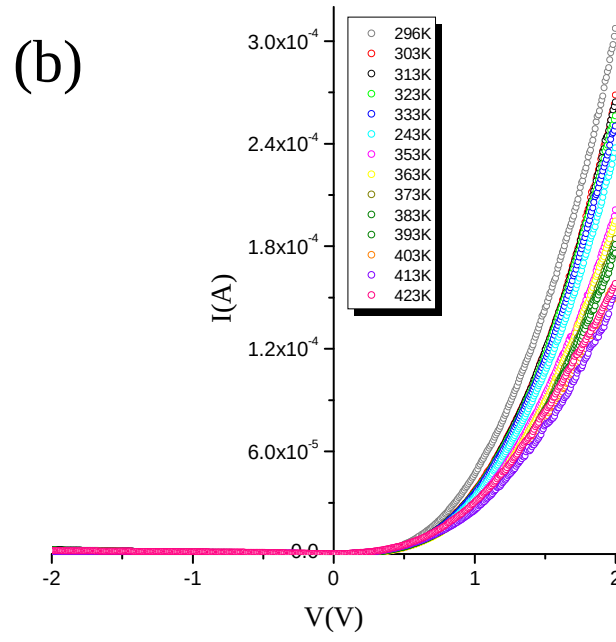
$T(K)$	$F(V_0) \times 10^{-1}$	$R_s(k\Omega)$
296	5,19	0,05
313	5,41	0,02
323	5,40	0,05
333	5,37	0,09
343	5,34	0,09
353	5,58	0,01
363	5,56	0,07
373	5,55	0,13

6.2.3. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun I - V karakteristikleri

Şekil 6.5’de 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun 296K-423K sıcaklık değerleri arasında lineer (Şekil 6.5a) ve yarı-logaritmik (Şekil 6.5b) I - V grafiği verilmiştir. Diyotun iyi bir Schottky davranış sergilediği görülmektedir. Artan sıcaklıkla akım değerleri de artmış ve grafikten görüldüğü gibi en yüksek akım değerine 423K’de ulaşılmıştır. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun 296K–423K sıcaklık bölgesinde idealite faktörü, yarı-logaritmik I - V grafiğinden hesaplanmıştır. Grafiğin ileri beslemesinin lineer bölgesinden eğim hesaplanarak bulunan idealite faktörü n , I_0 ve ϕ_b gibi diyot parametreleri Çizelge 6.5’te verilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde, sıcaklık arttıkça idealite faktörünün azaldığı ve 4,64–3,78 arasında değerler aldığı görülmektedir. İdealite faktörünün 1’den yüksek çıkması arayüzey durumlarının varlığı, doğal olarak oluşan oksit tabakası ve seri dirençten kaynaklanabilmektedir. Elde edilen n değerleri diyotun yük transport mekanizmasında rekombinasyon akımının baskın olduğunu

göstermektedir. Değişen sıcaklıklar için hesaplanan engel yükseklikleri 0,60–0,86eV aralığında lineer olarak artmaktadır. Doyma akımı değerleri ise $8,29 \times 10^{-8} \text{A}$ – $1,75 \times 10^{-7} \text{A}$ arasında değişmektedir.

Literatürde karşılaşılan p-Si/n-ZnO çoklueklem çalışmalarında doyma akımı değerlerinin oda sıcaklığında $2 \times 10^{-5} \text{A}$ [117] ve $0,17 \times 10^{-9} \text{A}$ [118] aralığında olduğu görülmüştür. Zebbar [119], Klason [14], Mridha ve ark. [120] buna ek olarak diyotların idealite faktörü değerlerini de hesaplamışlar ve sırasıyla 4, 3,91–5,47, 4,15 olarak rapor etmişlerdir. Chaabouni ve ark. [121] p-Si'nin Fermi seviyesi 4,97eV ve n-ZnO'nun Fermi seviyesini 4,25eV olarak rapor etmişler ve buradan yola çıkarak buldukları Φ_b değerinin bu yarıiletkenlerin iş fonksiyonları arasındaki enerji farkı (0,72eV) ile tutarlı olduğu yorumunu yapmışlardır. Bu yorum dikkate alındığında, 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotu için hesaplanan Φ_b değerlerinin de bu enerji farkı ile tutarlı olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca Çizelge 6.5'ten görüldüğü gibi doyum akımı sıcaklığa bağlı olarak artmaktadır. Özellikle 383K'den yüksek sıcaklıklarda hızlı bir artış göstermektedir. Bu durumun yüksek sıcaklıklarda arayüzey durumlarının daha etkin oluşundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 6.5'den görüldüğü gibi ileri besleme akımı da üstel olarak artmaktadır. Bu akım davranışı sıklıkla geniş bant aralıklı *p-n* eklemlerinde görülmektedir. Bu durumlarda akım; rekombinasyon-tünelleme mekanizmasıyla kontrol edilir [119,122–124].



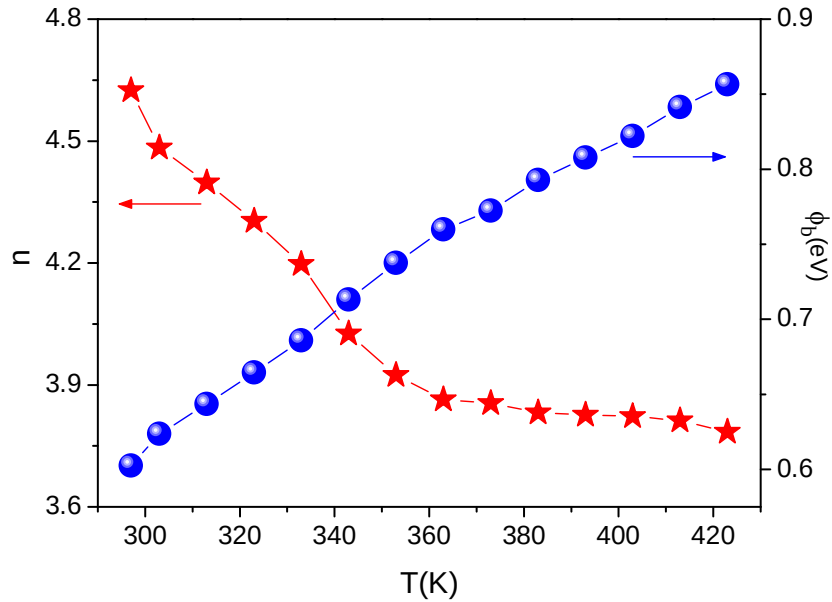
Şekil 6.5. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au (3000rpm, 30s) diyotunun farklı sıcaklıklarda (a) lineer ve (b) yarı-logaritmik I - V değişimi

Çizelge 6.5. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve ϕ_b değerleri

$T(K)$	n	$I_0(A)$	$\phi_b(eV)$
296	4,64	$8,29 \times 10^{-8}$	0,60
303	4,48	$6,09 \times 10^{-8}$	0,62
313	4,39	$6,69 \times 10^{-8}$	0,63
323	4,31	$7,03 \times 10^{-8}$	0,66
333	4,19	$7,26 \times 10^{-8}$	0,68
343	4,03	$6,14 \times 10^{-8}$	0,71
353	3,92	$5,77 \times 10^{-8}$	0,73
363	3,86	$5,54 \times 10^{-8}$	0,75
373	3,85	$8,01 \times 10^{-8}$	0,77
383	3,83	$8,52 \times 10^{-8}$	0,79
393	3,83	$1,06 \times 10^{-7}$	0,80
403	3,82	$1,34 \times 10^{-7}$	0,82
413	3,81	$1,45 \times 10^{-7}$	0,84
423	3,78	$1,75 \times 10^{-7}$	0,86

Şekil 6.6'da 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun n ve ϕ_b değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi ϕ_b artan sıcaklıkla artış göstermekte ve buna karşılık n artan sıcaklıkla azalmaktadır. ϕ_b , eklemelin elektriksel davranışını belirlediği için çok önemli bir parametredir ve oda sıcaklığında ϕ_b değeri 0,60eV olarak bulunmuştur. Bu sonuç, farklı araştırmacılar tarafından elde edilen değerlerle uyumludur. Yapılan çalışmalarda ϕ_b değerinin 0,65-0,82eV aralığında değişmekte olduğu görülmüştür [14,119-121]. İdealite faktörünün yüksek sıcaklıktaki değerleri düşük sıcaklıktaki değerlerine göre daha düşüktür. Bu durumda Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotu yüksek sıcaklıklarda ideale daha yakın bir davranış sergilemektedir.

Diyotun R_s değerleri Norde metodu kullanılarak çizilen $F(V)$ - V grafiğindeki eğrinin minimum noktasına karşılık gelen $F(V_0)$ değeri kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.6. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun ϕ_b ve n değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

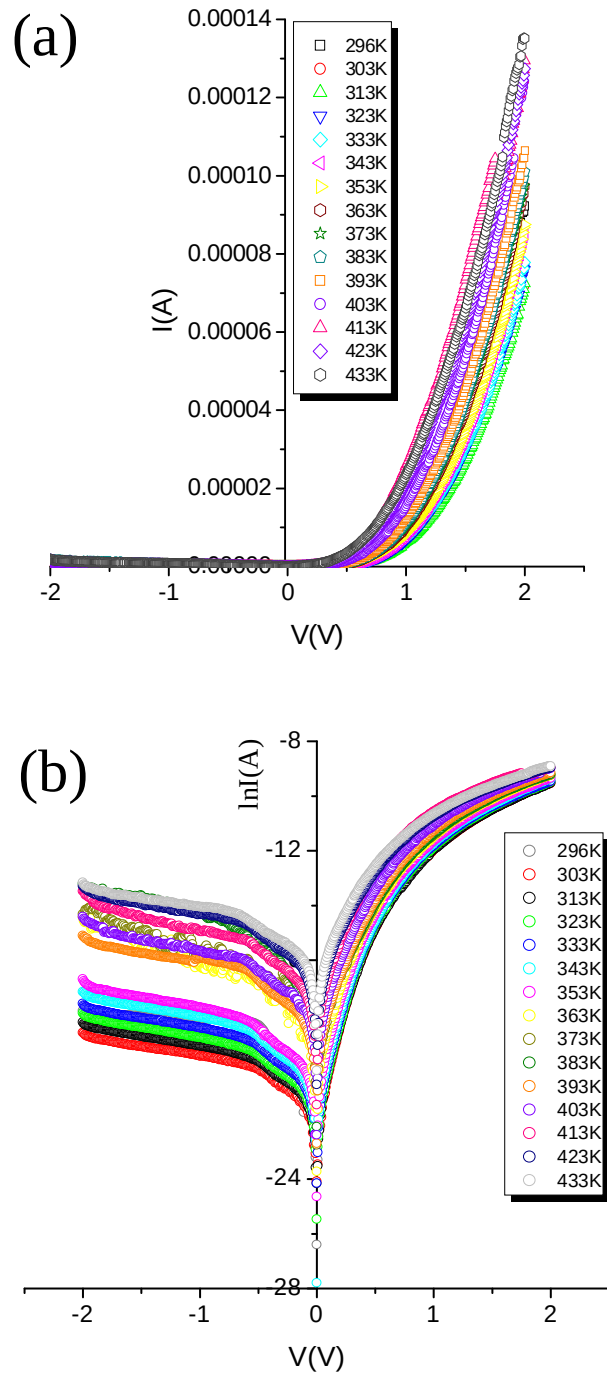
Çizelge 6.6. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan $F(V_0)$ ve R_s değerleri

$T(K)$	$F(V_0) \times 10^{-1}$	$R_s(k\Omega)$
296	6,01	2,51
303	6,08	5,43
313	6,07	8,23
323	6,06	7,69
333	6,05	11,85
343	6,07	12,67
353	6,10	1,40
363	6,10	2,17
373	6,05	2,95
383	6,05	2,44
393	6,01	3,38
403	5,97	3,55
413	5,96	4,04
423	5,88	5,38

6.2.4. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun I - V karakteristikleri

Şekil 6.7’de 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun 296K–433K arası sıcaklık ölçümleri için lineer (Şekil 6.7a) ve yarı-logaritmik (Şekil 6.7b) akım-gerilim değişimi grafiği verilmiştir. Grafiklerden diyotun iyi bir doğrultucu davranış sergilediği görülmektedir. Sıcaklık arttıkça akım değerleri de artmış ve en yüksek akım değerine 433K sıcaklığında ulaşılmıştır. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun 296K–433K arası sıcaklıkları için idealite faktörü, yarı-logaritmik I - V grafiğinden elde edilmiştir. Bu sıcaklıklar için hesaplanan n , I_0 ve ϕ_b değerleri Çizelge 6.7’de verilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde, sıcaklık arttıkça n ’nin azaldığı; 3,70–3,30 arasında değerler aldığı görülmektedir. Farklı sıcaklıklar için hesaplanan ϕ_b değerleri ise 0,68eV–0,91eV aralığında lineer olarak değişmektedir. I_0 değerleri ise $2,66 \times 10^{-9}$ A– $8,19 \times 10^{-8}$ A arasında değişmektedir. Elde edilen sonuçların, literatürdeki diğer çalışmalarla uyum içinde olduğu görülmüştür [10,14,119,120]. Yapılan çalışmalarda engel yüksekliği değerinin 0,65–0,82eV aralığında değişmekte olduğu görülmüştür.

Üretilen ve karakterizasyonları yapılan bu iki p-Si/n-ZnO diyotları birbiriyle karşılaştırıldığında, 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun oda sıcaklığındaki n değeri, 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun oda sıcaklığındaki n değerinden daha düşük çıkmıştır. Bu da döndürme hızı ve tavlama sıcaklığının diyotun elektriksel özelliklerini etkilediğini göstermektedir. Ayrıca polikristal filmlerin elektriksel transport özelliklerinin, bu filmlerin yapılarına ve elde edilme koşullarına büyük ölçüde bağlı olduğu belirtilmektedir [125].

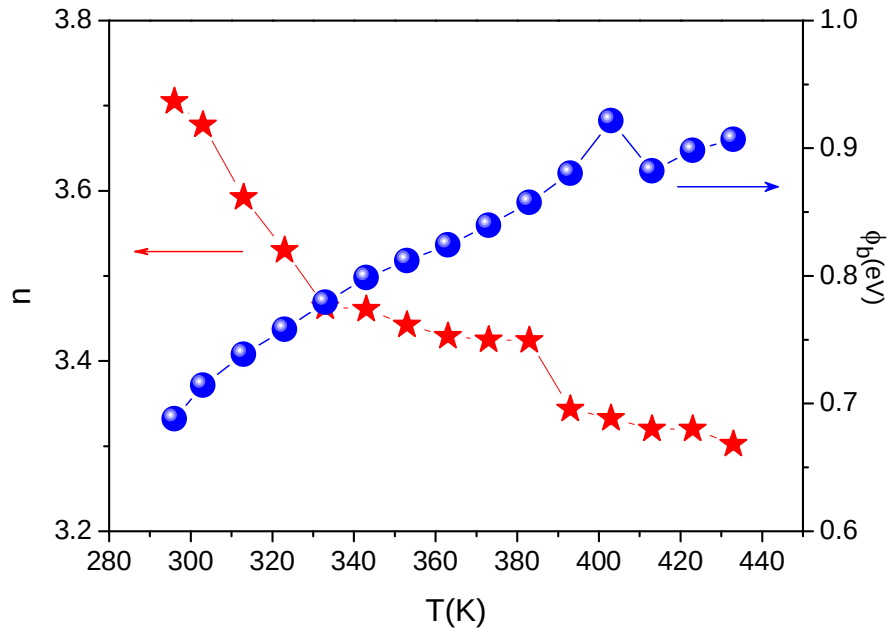


Şekil 6.7. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au (4000rpm, 30s) diyotunun farklı sıcaklıklarda (a) lineer ve (b) yarı-logaritmik I - V değişimi

Çizelge 6.7. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve ϕ_b değerleri

$T(K)$	n	$I_0(A)$	$\phi_b(eV)$
296	3,70	$2,66 \times 10^{-9}$	0,68
303	3,67	$1,89 \times 10^{-9}$	0,71
313	3,59	$1,97 \times 10^{-9}$	0,74
323	3,53	$2,4 \times 10^{-9}$	0,75
333	3,46	$2,79 \times 10^{-9}$	0,77
343	3,46	$3,40 \times 10^{-9}$	0,79
353	3,44	$4,99 \times 10^{-9}$	0,81
363	3,42	$7,45 \times 10^{-9}$	0,82
373	3,42	$9,88 \times 10^{-9}$	0,84
383	3,42	$1,19 \times 10^{-8}$	0,85
393	3,34	$1,24 \times 10^{-8}$	0,88
403	3,33	$7,60 \times 10^{-9}$	0,92
413	3,32	$4,59 \times 10^{-8}$	0,88
423	3,31	$5,58 \times 10^{-8}$	0,89
433	3,30	$8,19 \times 10^{-8}$	0,91

Şekil 6.8’de 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun engel yüksekliğinin (Φ_b) ve idealitesinin (n) sıcaklığa bağlı değişim grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde potansiyel engel yüksekliğinin artan sıcaklıkla birlikte arttığı ve idealite faktörü değerinin ise artan sıcaklıkla azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.8. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun Φ_b ve n değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Norde fonksiyonları kullanılarak diyotun farklı sıcaklıklardaki R_s seri dirençleri hesaplanmıştır. R_s değerleri çizilen $F(V)$ - V grafiğindeki eğrinin minimum noktasına karşılık gelen $F(V)$ değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 6.8’de bu $F(V)$ ve R_s parametrelerinin sıcaklığa bağlı değerleri verilmiştir.

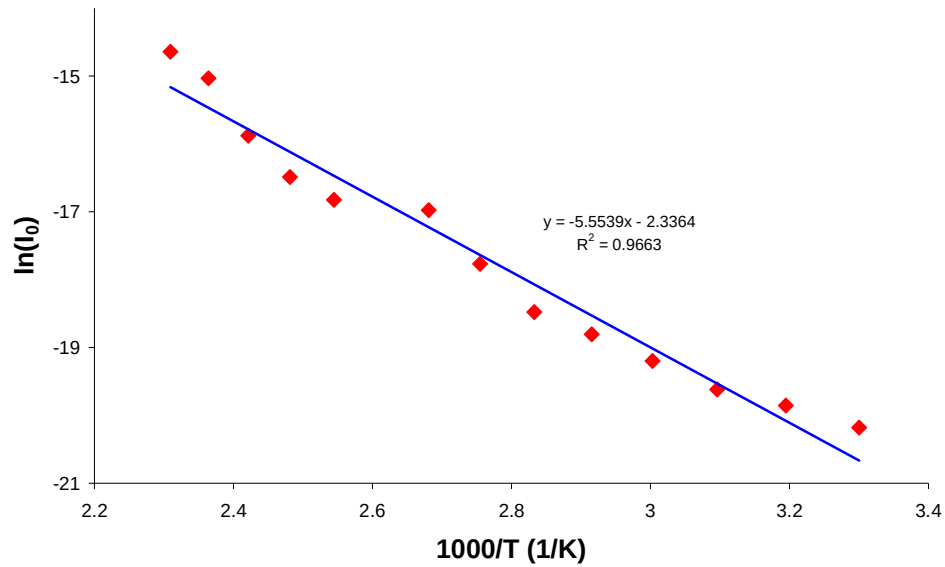
Çizelge 6.8. 2. tip Al/p-Si/ZnO/Au diyotunun Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan $F(V_0)$ ve R_s değerleri

$T(K)$	$F(V_0) \times 10^{-1}$	$R_s(k\Omega)$
296	6,01	2,06
303	6,25	14,97
313	6,25	19,20
323	6,26	23,37
333	6,28	20,96
343	6,32	19,99
353	6,36	15,66
363	6,38	19,07
373	6,32	25,03
383	6,34	23,19
393	6,30	20,13
403	6,26	22,54
413	6,25	28,38
423	6,21	26,95
433	6,19	30,74

2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun doyma akımının artan sıcaklıkla birlikte arttığı Çizelge 6.8'den kolaylıkla görülmektedir. Sıcaklığa bağlı geri besleme akımı,

$$I_0 = I_s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (11)$$

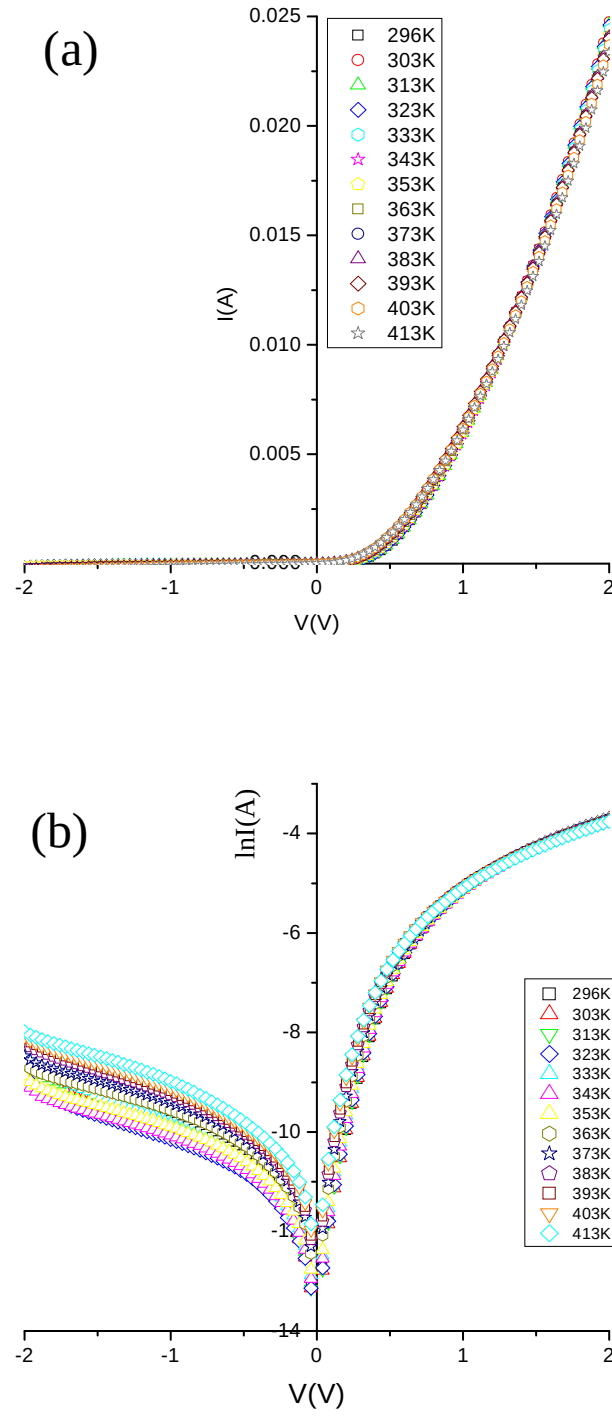
denklemleri ile verilir. Burada I_s üstel faktör ve E aktivasyon enerjisidir. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun aktivasyon enerjisini belirlemek için I_0-1000/T grafiği çizilmiştir (Şekil 6.9). Grafik incelendiğinde bir lineer bölge görülmektedir. Yani eğri bir aktivasyon enerjisi vermektedir. Diyotun aktivasyon enerjisi Denklem (11) kullanılarak 478,5meV olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca göre yüksek sıcaklıklarda diyotun akım mekanizması rekombinasyon akımlarıyla kontrol edilmektedir [19].



Şekil 6.9. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun I_0 vs. $1000/T$ grafiği

6.2.5. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun *I-V* Karakteristikleri

Şekil 6.10'da Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun 296K–413K arası sıcaklık ölçümleri için alınan lineer (Şekil 6.10a) ve yarı-logaritmik (Şekil 6.10b) *I-V* eğrisi verilmiştir. Diyotun iyi bir doğrultucu özellik gösterdiği görülmektedir. Yakuphanoglu [126] yaptığı çalışmada düşük voltajlarda termiyonik emisyonun en baskın mekanizma olduğunu ve bu nedenle diyotun çokluekleme diyot gibi davrandığını rapor etmiştir. Bu da yük taşıma mekanizmasının termiyonik emisyonla kontrol edildiği anlamına gelmektedir. Grafiğin hem ileri hem ters beslemesinin artan sıcaklıkla arttığı görülmektedir. Sıcaklıkla artan doyma akımının en yüksek değerine 413K'de ulaşılmıştır. 296K–413K sıcaklıkları için hesaplanan n , I_0 ve ϕ_b gibi parametreler Çizelge 6.9'da verilmiştir. Diyotun idealite faktörünün artan sıcaklıkla azaldığı ve 4,47'den 2,47'ye düştüğü görülmektedir. Yüksek n değerleri ideal olmayan kontak davranışı ve tünellemenin sonucu olarak ortaya çıkabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda akım mekanizması tünelleme mekanizmasına karşılık gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ise akım mekanizması rekombinasyon akımlarıyla kontrol edilir [19]. Her bir sıcaklık değeri için hesaplanan $\phi_b(eV)$ değerlerinin ise 0,47–0,67eV aralığında arttığı görülmektedir. Çizelgeden görüldüğü gibi I_0 değerleri artan sıcaklıkla artmaktadır. Bu sonuca göre diyotun düşük voltajlardaki ileri beslemi multi-tünelleme ile kontrol edilmektedir [19,127,128].

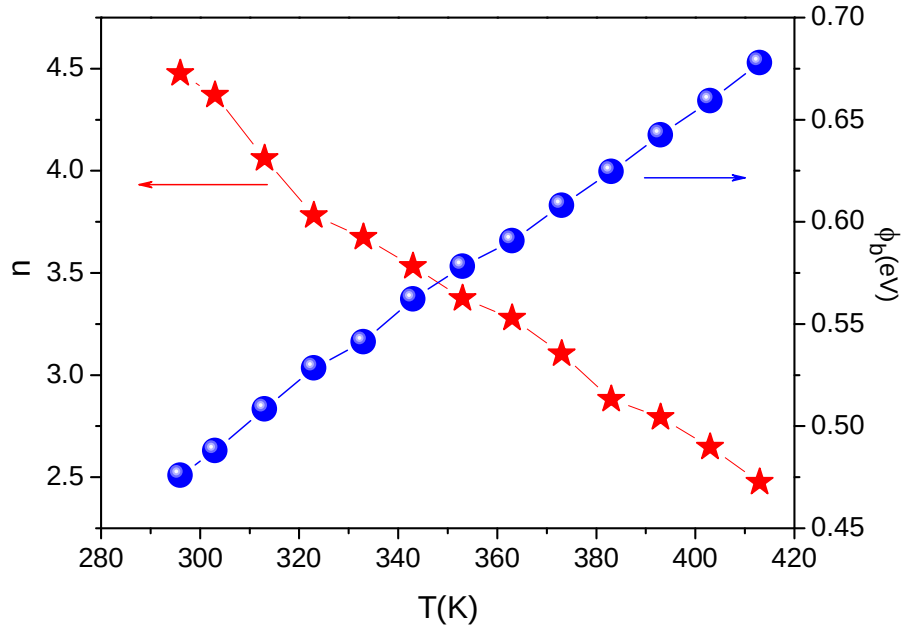


Şekil 6.10. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun farklı sıcaklıklarda (a) lineer ve (b) yarı-logaritmik I - V değişimi

Çizelge 6.9. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve ϕ_b değerleri

$T(K)$	n	$I_0(A)$	$\phi_b(eV)$
296	4,47	$1,08 \times 10^{-5}$	0,47
303	4,37	$1,10 \times 10^{-5}$	0,48
313	4,06	$1,00 \times 10^{-5}$	0,51
323	3,78	$9,32 \times 10^{-5}$	0,53
333	3,67	$1,12 \times 10^{-5}$	0,54
343	3,53	$1,01 \times 10^{-5}$	0,56
353	3,37	$1,09 \times 10^{-5}$	0,57
363	3,27	$1,30 \times 10^{-5}$	0,59
373	3,10	$1,33 \times 10^{-5}$	0,61
383	2,88	$1,38 \times 10^{-5}$	0,62
393	2,79	$1,39 \times 10^{-5}$	0,64
403	2,64	$1,45 \times 10^{-5}$	0,66
413	2,47	$1,43 \times 10^{-5}$	0,67

Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun ϕ_b ve n değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği Şekil 6.11’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde potansiyel engel yüksekliğinin artan sıcaklıkla birlikte arttığı ve idealiten faktörünün artan sıcaklıkla azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.11. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun ϕ_b ve n değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

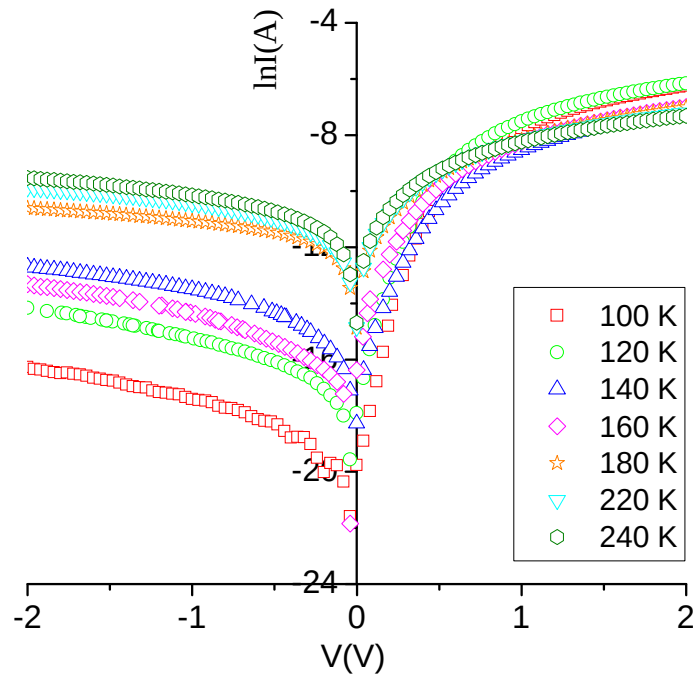
Diyotun R_s değerleri Norde metodu kullanılarak çizilen $F(V)$ - V grafiğindeki eğrinin minimum noktasına karşılık gelen $F(V_0)$ değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 6.10’da bu $F(V_0)$ ve R_s parametrelerinin sıcaklığa bağlı değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.10. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan $F(V_0)$ ve R_s değerleri

$T(K)$	$F(V_0) \times 10^{-1}$	$R_s(k\Omega)$
296	4,68	0,02
303	4,68	0,03
313	4,69	0,04
323	4,90	0,02
333	4,87	0,03
343	4,90	0,05
353	4,89	0,06
363	4,87	0,09
373	4,86	0,10
383	5,03	0,03
393	5,02	0,04
403	5,01	0,07
413	5,00	0,16

Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun düşük sıcaklıklardaki (100–240K) I - V karakteristiği de ayrıca incelenmiş ve yarı-logaritmik I - V grafiği Şekil 6.12’de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi diyotun hem ileri hem de geri beslem akımları artan sıcaklıkla artmaktadır.

Diyotun her düşük sıcaklık değeri için idealite faktörü değerleri hesaplanmıştır. 100K’dan 240K’e çıkıldıkça idealite faktörü 7,59’dan 5,06’ya düşmüştür. Bu sıcaklıklar için hesaplanan n , I_0 ve Φ_b değerleri Çizelge 6.11’de verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun I_0 ve Φ_b değerleri artan sıcaklıkla birlikte artmaktadır. Çağlar ve Yakuphanoglu [19] yaptıkları çalışmada benzer sonuçlar elde etmiş ve düşük sıcaklıklarda diyotun transport mekanizmasında tünelleme akımlarının baskın olduğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 6.12. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun 100K–240K sıcaklık değerlerindeki yarı-logaritmik I - V değişimi

Çizelge 6.11. Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun farklı sıcaklık bölgelerindeki I - V ölçümlerinden hesaplanan n , I_0 ve ϕ_b değerleri

$T(K)$	n	$I_0(A)$	$\phi_b(eV)$
100	7,59	$2,79 \times 10^{-8}$	0,19
120	7,55	$1,86 \times 10^{-7}$	0,22
140	7,03	$1,19 \times 10^{-7}$	0,26
160	6,68	$5,23 \times 10^{-7}$	0,28
180	6,05	$2,09 \times 10^{-6}$	0,29
220	5,26	$1,72 \times 10^{-6}$	0,34
240	5,06	$3,74 \times 10^{-6}$	0,39

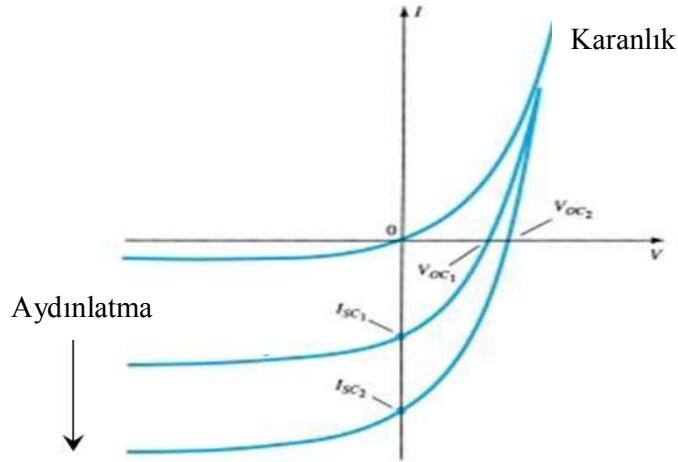
6.3. Elde Edilen Diyotların Farklı Aydınlatma Şiddetlerinde I - V Karakteristiği

Üretilen tüm diyotların tüm I - V ölçümleri alındıktan sonra fotodiyot özellikleri incelenmiştir. Oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde diyotların karanlıkta ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altındaki I - V karakteristikleri incelenmiştir.

Eklem bölgesine gelen fotonlar serbest elektron ve boşluk çifti oluşumuna sebep olurlar. Bu durum pn eklemine iki tarafında da gözlenir. p bölgesinde yeni üretilen elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır ve eklem bölgesinden diğer tarafa geçebilme konusunda normal bir pn eklemineki ($V=0$) elektronlardan daha rahat hareket ederler. Bu durum boşlukların meydana geldiği n bölgesinde de aynıdır.

Sonuç olarak eklem bölgesinde azınlık taşıyıcılarının akım miktarında aydınlatma ile bir artış olur. Bu akım pn eklemineki ileri beslem akımına ters yöndedir (Şekil 6.13). Dolayısıyla karanlıkta I - V karakteristiği incelenen bir

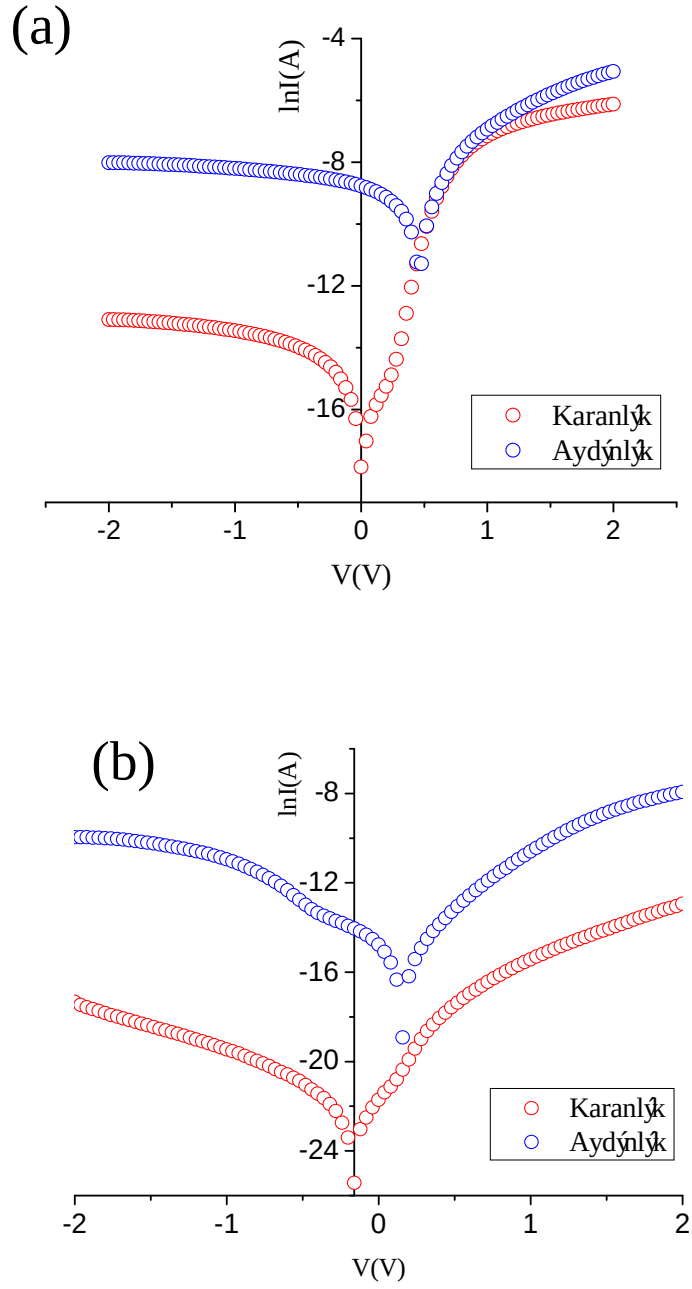
diyotun aydınlatma altında I - V karakteristiği incelendiğinde, geri beslem akımında bir artış gözlenir [129].



Şekil 6.13. Aydınlatma altında diyotun kısa devre akımı ve açık devre voltajı [24]

Şekil 6.14a'da Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun ve Şekil 6.14b'de Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotunun, oda sıcaklığında, karanlıkta ve 100mW/cm² aydınlatma altındaki I - V karakteristiği verilmiştir. Au/p-Si/n-CuPc/Al diyotunun I_{sc} değeri $1,54 \times 10^{-4}$ A ve V_{oc} değeri 0,440V olarak bulunmuştur. Rajaputra ve arkadaşları [4] yaptıkları bir çalışmada en yüksek V_{oc} değerini elde etmişlerdir. Bu çalışmada yapısında CuPc ve PTBCI bulunan güneş pili için V_{oc} değerini 1,25V olarak hesaplamışlardır. Yaptıkları başka bir çalışmada ise farklı kalınlıklardaki (15nm-140nm) CuPc diyotları için 100mW/cm² aydınlatma altında V_{oc} değerinin 0,22V'tan 0,907V'a çıktığını, I_{sc} değerinin ise $0,42 \times 10^{-6}$ A'dan $1,25 \times 10^{-6}$ A'ya çıktığını rapor etmişlerdir.

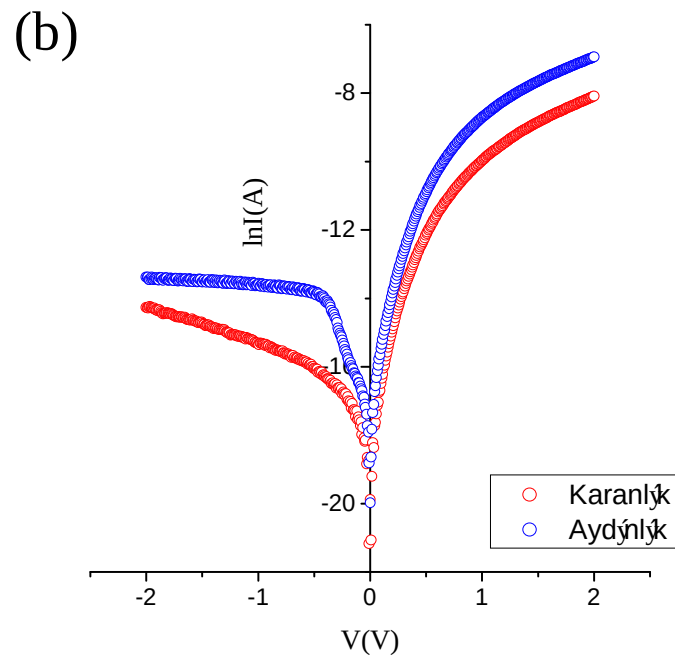
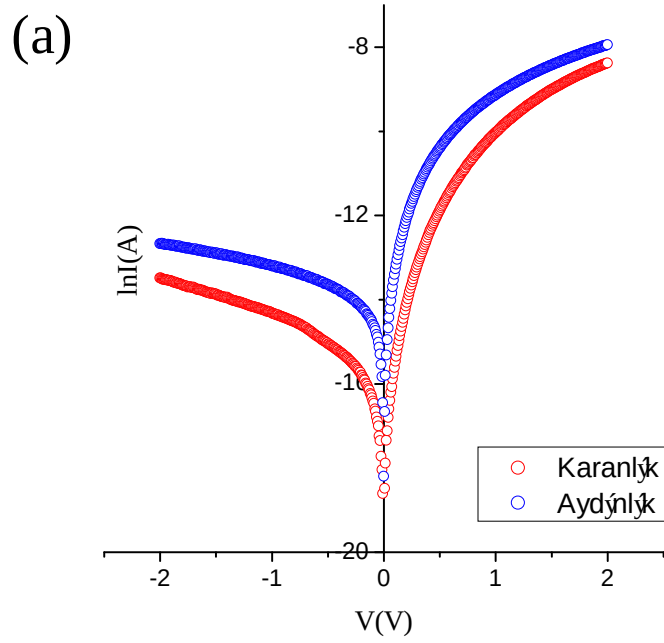
Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotunun I_{sc} değeri $1,72 \times 10^{-7}$ A ve V_{oc} değeri 0,159V olarak bulunmuştur. Mohammad ve arkadaşları [6] ürettikleri Al/p-Si/n-C₆₀/Au diyotunun aydınlıktaki karakteristiğini incelediklerinde aygıtın V_{oc} değerini 0,2V ve I_{sc} değerini $5,97 \times 10^{-9}$ A ve olarak bulmuşlardır.



Şekil 6.14. Oda sıcaklığında, (a) Al/n-Si/p-CuPc/Au ve (b) Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotlarının karanlıkta ve 100mW/cm² aydınlatma altında yarı-logaritmik *I*-*V* grafikleri

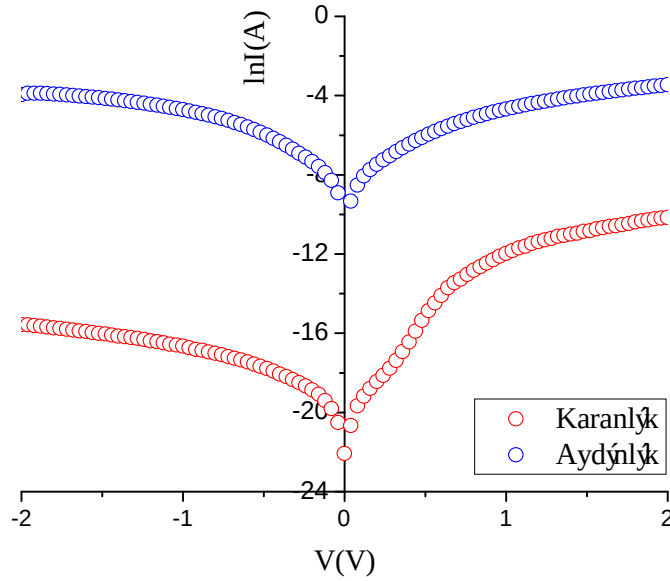
Aydınlatma altında diyotların geri beslem akımında azınlık taşıyıcılarının yoğunluğunun artmasıyla birlikte bir artış olacaktır. Hem Al/n-Si/p-CuPc/Au hem de Au/p-Si/n-C₆₀/Al diyotlarında gözlenen kaymalar bu şekilde açıklanabilir. İki diyotun da 100mW/cm² aydınlatma altındaki *I-V* karakteristikleri incelendiğinde V_{oc} değerlerinin birden arttığı, dolayısıyla grafiklerde bir kayma olduğu söylenebilir.

Şekil 6.15a'da 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun, Şekil 6.15b'de 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun, oda sıcaklığında, karanlıkta ve 100mW/cm² aydınlatma altındaki *I-V* karakteristikleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde 100mW/cm² aydınlatma altında diyotların hem ileri hem de geri besleme akımları artmıştır. 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun I_{sc} ve V_{oc} değerleri sırasıyla $1,25 \times 10^{-8}$ A ve 0,008V olarak bulunmuştur. 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotunun I_{sc} ve V_{oc} değerleri sırasıyla $2,09 \times 10^{-9}$ A ve 0,12V olarak bulunmuştur. Yakuphanoglu ve arkadaşları [10] yaptıkları çalışmada 100mW//cm² aydınlatma altında ürettikleri diyotun hem ileri hem de geri belseminin arttığını ve diyotun fotovoltaiik özellik gösterdiğini belirtmişlerdir. I_{sc} değerini $1,87 \times 10^{-8}$ A ve V_{oc} değerini 0,26V olarak bulmuşlardır. Buradan, elde edilen değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 6.15. Oda sıcaklığında, (a) 1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au ve (b) 2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au diyotlarının karanlıkta ve 100mW/cm^2 aydınlatma altında yarı logaritmik I - V grafikleri

Şekil 6.16’da Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun oda sıcaklığında karanlıkta ve 100mW/cm^2 aydınlatma altındaki I - V karakteristiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde geri belsem akımının aydınlatmayla birlikte şiddetli bir şekilde arttığı görülmektedir. Diyotun I_{sc} değeri $2,56 \times 10^{-10}\text{A}$ ve V_{oc} değeri $0,801\text{V}$ olarak hesaplanmıştır. Yakuphanoğlu ve arkadaşları [116] ürettikleri CdO/p-Si diyotunun 100mW/cm^2 aydınlatma altında I_{sc} değerini $0,53 \times 10^{-6}\text{A}$ ve V_{oc} değerini $0,12\text{V}$ olarak hesaplamışlardır. V_{oc} değeri çok düşük olduğu için diyotun güneş pili yerine fotodiyot olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 6.16. Oda sıcaklığında, Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunun karanlıkta ve 100mW/cm^2 aydınlatma altında yarı-logaritmik I - V grafiği

Üretilen tüm diyotların 100mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altındaki V_{oc} ve I_{sc} değerleri Çizelge 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.12. Elde edilen diyotların 100mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altındaki V_{oc} ve I_{sc} değerleri

Üretilen Diyot	$V_{oc}(\text{V})$	$I_{sc}(\text{A})$
Al/n-Si/p-CuPc/Au	0,440	$1,54 \times 10^{-4}$
Au/p-Si/n-C₆₀/Al	0,159	$1,72 \times 10^{-7}$
1. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au	0,008	$1,25 \times 10^{-8}$
2. tip Al/p-Si/n-ZnO/Au	0,120	$2,09 \times 10^{-9}$
Al/p-Si/n-CdO/Au	0,801	$2,56 \times 10^{-10}$

7. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada *p*-Si ve *n*-Si alttaşlar üzerine organik/inorganik (CuPc, C₆₀, ZnO, CdO) yarıiletken filmleri üretilmiştir. Üretilen filmlerin yapısal ve morfolojik özellikleri XRD ve FESEM yardımıyla incelenmiştir. Elde edilen filmlerin üzerine uygun kontaklar yapılarak (Al ve Au) diyot fabrikasyonu yapılmış ve bu diyotların elektriksel karakterizasyonu incelenmiştir.

Çözelti hazırlama ve film üretme koşullarının elde edilen filmlerin fiziksel ve elektriksel özellikleri üzerine etkisi oldukça fazladır. ZnO filmleri farklı döndürme hızlarında ve farklı tavlama koşullarında hazırlandıktan sonra filmlerin XRD ve FESEM analizleri yapılmıştır. Filmlerin XRD desenlerinde pik şiddetlerinin, tanecik boyutlarının, yapılanma katsayılarının bu koşullarla birlikte değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlar filmlerin FESEM görüntülerinden de desteklemiştir. En büyük tanecik boyutu 3000rpm–700°C ve 4000rpm–800°C’de hazırlanan ZnO filmlerinde bulunmuştur. Üretilen CdO filminin de XRD ve FESEM analizleri yapılmış, tanecik boyutu, yapılanma katsayısı gibi değerleri hesaplanmıştır. CuPc ve C₆₀ organiklerinin XRD görüntüleri elde edilememiş, ancak tanecik boyutları hakkında filmlerin FESEM görüntülerinden bilgi edinilmiştir.

Elde edilen filmlerin diyot fabrikasyonu gerçekleştirilmiş ve bu diyotların elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Diyotların farklı sıcaklıklardaki *I*-*V* karakteristiği incelenmiş; idealite faktörü, engel yüksekliği, doyma akımı ve seri direnç gibi diyot parametreleri hesaplanmıştır.

Diyotların idealite faktörleri yarı-logaritmik *I*-*V* grafiklerinden elde edilmiştir. Grafiğin ileri besleminin lineer bölgesinden eğim alınarak hesaplanan idealite faktörü değerlerinin hepsi 1’den büyük çıkmıştır. Termiyonik emisyon teorisine göre ideal bir diyotun idealite faktörü değeri 1 olmalıdır. Üretilen diyotların idealite faktörlerinin 1’den yüksek çıkması diyotların ideal olmadığını göstermektedir. Arayüzey durumlarının varlığının ve üretim koşullarının bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca seri direnç de diyotun idealite faktörü değerini etkilemektedir. Dolayısıyla diyot parametrelerinin belirlenmesinde seri direncin etkisi de

incelenmiştir. Bunun için Cheung ve Norde metodları kullanılmaktadır. Cheung modeli yüksek voltaj değerlerinde daha uygun olan bir modeldir. Ancak Norde metodu her voltaj değerinde uygulanabilen bir metottur. Yapılan çalışmalarda seri direnç hesaplamaları için Norde metodu kullanılmıştır.

Norde metodu kullanılarak tüm diyotların seri direnç değerleri bulunmuştur. Değerler incelendiğinde en düşük seri direnç değeri ($0,02k\Omega$) Al/p-Si/n-CdO/Au diyotunda görülmüştür. Seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değiştiği verilen tablolarda görülmüştür. Daha yüksek idealite faktörlerinde seri direnç değeri daha da yüksek değerler alabilmektedir. Dolayısıyla üretilen diyotlarda seri direncin, akımı sınırlayıcı bir etkiye sahip olabileceği belirtilmelidir.

Grafikler ve çizelgeler incelendiğinde üretilen diyotlar arasında Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotunun oda sıcaklığında en düşük idealite faktörü değerine (3,07) sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre üretilen diyotlar arasında ideale en yakın olan Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotudur. Dolayısıyla tekrar üretilip daha iyi sonuçlar elde etme şansı bulunmaktadır.

Tüm diyotların sıcaklığa bağlı *I-V* karakterizasyonları yapılmıştır. Sıcaklık artışıyla birlikte diyotların idealite faktörü değerlerinin düştüğü görülmüştür. Buna göre yüksek sıcaklıklarda elektronların daha yüksek bir engel ile karşılaştıklarından akım iletiminin zorlaştığını ve idealite faktörü değerinin düştüğünü söyleyebiliriz. Elde edilen sonuçlarda da tüm diyotlarda potansiyel engelinin artan sıcaklıkla birlikte arttığı görülmektedir.

Dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda seri direncin etkisinin azaldığı ve diyotların ideale yaklaştığı söylenebilir. Yüksek idealite faktörü nedeniyle diyotların akım-iletim mekanizmaları termiyonik emisyonla tanımlanamamaktadır. Bu aşamada diyotların akım-iletim mekanizmaları tünelleme, kıtlık bölgesinde rekombinasyon akımları ile açıklanabilmektedir.

Üretilen diyotların $100mW/cm^2$ aydınlatma altında fotodiyot özellikleri incelenmiştir. Diyotların açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerleri hesaplanmıştır. Üretilen tüm diyotlar, ışığa duyarlı davranış sergilemiştir. Sonuçlar incelendiğinde en iyi değerler Al/p-Si/n-CdO/Au ve Al/n-Si/p-CuPc/Au diyotlarında görülmüştür. Elde edilen değerlere göre bu diyotların fotodiyot olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Braun, F., “Über die stromleitung durch schwefelmetalle,” *Ann. Phys. Chem.*, **229**, 556-563, 1874.
- [2] Chintakula, G., *Schottky Diodes on Copper Phthalocyanine Nanowire Arrays Embedded in Porous Alumina Templates*, Master Thesis, University of Kentucky, Science in Electrical Engineering, Kentucky, 2008.
- [3] Pham, G., Kampen, T.U., Thurzo, I., Friedrich, M. ve Zahn, D.R.T., “Peculiar features in the electrical characteristics of CuPc based diodes,” *Appl. Surf. Sci.*, **212–213**, 542–546, 2003.
- [4] Rajaputra, S., Vallurupalli, S. ve Singh, V.P., “Copper phthalocyanine based Schottky diode solar cells,” *J. Mater. Sci.-Mater. El.*, **18**, 1147–1150, 2007.
- [5] Reis, F.T., Mencaraglia, D., Ould, S.S., Seguy, I., Oukachmih, M., Jolinat, P., ve Destruel, P., “Electrical characterization of ITO/CuPc/Al diodes using temperature dependent capacitance spectroscopy and I–V measurements,” *J. Non-Cryst. Solids.*, **338–340**, 599–602, 2004.
- [6] Mohamad, A.A. ve Allaf, A.W., “Fullerene-60 thin films for electronic applications,” *Synthetic. Met.*, **104**, 39–44, 1999.
- [7] Ohmori, Y., Itoh, E. ve Miyairi, K., “Photovoltaic properties of phthalocyanine based p–n diode evaporated onto titanium dioxide,” *Thin Solid Films*, **499**, 369–373, 2006.
- [8] Ma, L., Ouyang, J. ve Yang, Y., “High-speed and high-current density C60 diodes,” *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 4786-4788, 2004,
- [9] Vallurupalli, S.C.C., *Fabrication and Characterization of Schottky diode and Heterojunction Solar cells based on Copper Phthalocyanine (CuPc), Buckminster Fullerene (C60) and Titanium Dioxide (TiO2)*, Master Thesis, University of Kentucky, Science in Electrical Engineering, Kentucky, 2005.
- [10] Yakuphanoglu, F., Caglar, Y., Caglar, M. ve Ilican, S., “ZnO/p-Si heterojunction photodiode by sol–gel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate,” *Mat. Sci. Semicon. Proc.*, **13**, 137–140, 2010.

- [11] Bardan, R.I., Umar, A., Al-Heniti, S., Al-Hajry, A. ve Al-Harbi, T., "Synthesis and characterization of zinc oxide nanorods on silicon for the fabrication of p-Si/n-ZnO heterojunction diode," *J. Alloy. Compd.*, **508**, 375–379, 2010.
- [12] Choi, J.H., Das, S.N., Moon, K.J., Kar, J.P. ve Myoung, J.M., "Fabrication and characterization of p-Si nanowires/ZnO film heterojunction diode," *Solid. State. Electron.*, **54**, 1582–1585, 2010.
- [13] Dutta, M. ve Basak, D., "p-ZnO/n-Si heterojunction: Sol-gel fabrication, photoresponse properties, and transport mechanism," *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 212112, 2008.
- [14] Klason, P., Rahman, M.M., Hu, Q.H., Nur, O., Turan, R. ve Willander, M., "Fabrication and characterization of p-Si/n-ZnO heterostructured junctions," *Microelectron. J.*, **40**, 706–710, 2009.
- [15] Lee, J.Y., Choi, Y.S., Choi, W.H., Yeom, H.W., Yoon, Y.K., Kim, J.H. ve Im, S., "Characterization of films and interfaces in n-ZnO/p-Si photodiodes," *Thin Solid Films*, **420–421**, 112–116, 2002.
- [16] Majumdar, S. ve Banerji, P., "Moisture sensitivity of p-ZnO/n-Si heterostructure," *Sensor. Actuat. B-Chem.*, **140**, 134–138, 2009.
- [17] Qi, H., Li, Q., Wang, C., Zhang, L. ve Lv, L., "Effects of oxygen pressure on n-ZnO/p-Si heterojunctions fabricated using pulsed laser deposition," *Vacuum*, **81**, 943–946, 2007.
- [18] Yakuphanoglu, F., Caglar, M., Caglar, Y. ve Ilcan, S., "Electrical characterization of nanocluster n-CdO/p-Si heterojunction diode," *J. Alloy. Compd.*, **506**, 188–193, 2010.
- [19] Caglar, M., ve Yakuphanoglu, F., "Fabrication and electrical characterization of flower-like CdO/p-Si heterojunction diode," *J. Phys. D Appl. Phys.*, **42**, 045102, 2009.
- [20] Ortega, M., Santana, G. ve Acevedo, A.M., "Optoelectronic properties of CdO/Si photodetectors," *Solid. State. Electron.*, **44**, 1765-1769, 2000.
- [21] Kittel, C., "Yarıiletken Kristaller," *Katıhal Fiziğine Giriş*, (Çev. Karaoğlu, B.), Güven, İstanbul, 139, 1996.

- [22] Klauk, H., “*Organic Transistors*,” Organic Electronics Materials Manufacturing and Applications, Wiley-Vch Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 4, 2006.
- [23] Aktaş, Y., *Ftalosiyanin İnce Filmlerin Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [24] Köysal, O., *Azo Boya ve Fulleren (C₆₀) Katkılı Nematik Sıvı Kristallerin Elektro-Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2007.
- [25] Saito, S. ve Oshiyama, A., “Cohesive Mechanism and Energy Bands of Solid C₆₀,” *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 2637-2640, 1991.
- [26] Nishinaga, J., Takada, T., Hayashi, T. ve Horikoshi, Y., “Crystalline and electrical characteristics of C₆₀-doped GaAs films,” *J. Cryst. Growth.*, **311**, 2232–2235, 2009.
- [27] Huffman, D. R., “Solid C₆₀,” *Phys. Today.*, **44**, 22-29, 1991.
- [28] Lv, Z., Deng, Z., Xu, D., Li, X. ve Jia, Y., “Efficient organic light-emitting diodes with C₆₀ buffer layer,” *Displays*, **30**, 23–26, 2009.
- [29] Mukhopadinday, S., Ray, A.K., Cook, M.J., Simmons, J.M. ve Hogarth, C.A., “Experimental Studies on substituted copper phthalocyanine Langmuir-Blodgett films,” *J. Mater. Sci-Mater. El.*, **3**, 139-143, 1992.
- [30] Ishikawa, N. ve Kaizu, Y., “Electronic structure of the one-electron oxidation product of triple-decker lutetium phthalocyanine trimer,” *Chem. Phys. Lett.*, **236**, 50-56, 1995.
- [31] Sadaoka, Y., Matsuguchi, M., Sakai, Y. Mori, Y. ve Göpel, W., “Effect of Crystal Form on the conductance in oxidative gases of Metal free and some Metal Phtalocyanines,” *Sensor. Actuat. B-Chem.*, **4**, 495-498, 1991.
- [32] Shilbub, S.I. ve Gould, R.D., “Frequency dependence of electronic conduction parameters in evopared thin films of cobalt phtalocyanine,” *Thin Solid Films*, **254**, 187–193, 1995.
- [33] Sullivan, P., Heutz, S., Schultes, S.M., Jones ve T.S., “Influence of codeposition on the performance of CuPc–C₆₀ heterojunction photovoltaic devices,” *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1210-1212, 2004.

- [34] Drechsel, J., Mannig, B., Kozłowski, F., Gebeyehu, D., Werner, A., Koch, M., Leo, K. ve Pfeiffer, M., “High efficiency organic solar cells based on single or multiple PIN structures,” *Thin Solid Films*, **451–452**, 515–517, 2004.
- [35] Drechsel, J., Mannig, B., Gebeyehu, D., Pfeiffer, M., Leo, K. ve Hoppe, H., “MIP-type organic solar cells incorporating phthalocyanine/fullerene mixed layers and doped wide-gap transport layers,” *Org. Electron.*, **5**, 175–186, 2004.
- [36] Nüesch, F., Carrara, M., Schaer, M., Romero, D.B. ve Zuppiroli, L., “The Role of Copper phthalocyanine for charge injection into organic light emitting devices,” *Chem. Phys. Lett.*, **347**, 311–317, 2001.
- [37] Peumans, P., Yakimov, A. ve Forrest, S.R., “Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells,” *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 3693–3723, 2003.
- [38] Fan, X.M., Lian, J.S., Guo, Z.X. ve Lu, H.J., “Microstructure and photoluminescence properties of ZnO thin films grown by PLD on Si(111) substrates,” *Appl. Surf. Sci.*, **239**, 176–181, 2005.
- [39] Polat, E.G., *Sol-Jel Yöntemi İle Bakır ve Kalay Katkılı ZnO İnce Filmlerin Üretilmesi, Optik ve Mikroyapısal Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2009.
- [40] Pan, C.J., Tu, C.W., Song, J.J., Cantwell, G., Lee, C.C., Pong, B.J. ve Chi, G.C., “Photoluminescence of ZnO films grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy,” *J. Cryst. Growth.*, **282**, 112–116, 2005.
- [41] Sanchez-Juarez, A., Tiburcio-Silver, A., Ortiz, A., Zironi, E.P. ve Rickards, J., “Electrical and optical properties of fluorine-doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis,” *Thin Solid Films*, **333**, 196–202, 1998.
- [42] Aksoy, S., *Kalay Katkılı ZnO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.

- [43] Jian, S.R., Teng, I.J., Yang, P.F., Lai, Y.S., Lu, J.M., Chang, J.G. ve Ju, S.P., "Surface Morphological and Nanomechanical Properties of PLD-Derived ZnO Thin Films," *Nanoscale Res. Lett.*, **3**, 186-193, 2008.
- [44] Phan, L., Yu, S.C., Vincent, R., Dan, N.H. ve Shi, W.S., "Photoluminescence properties of various CVD-grown ZnO nanostructures," *J. Lumin.*, **130**, 1142-1146, 2010.
- [45] Su, C., Lu, Y.M., Zhang, Z.Z., Shan, C.X., Yao, B., Li, B.H., Shen, D.Z., Zhang, J.Y., Zhao, D.X. ve Fan, X.W., "The optical properties of ZnO/ZnMgO single quantum well grown by P-MBE," *Appl. Surf. Sci.*, **254**, 7303-7305, 2008.
- [46] Dimova-Malnovska, A.P., Sendova-Vassileva, M., Nichev, H. ve Starbova, K., "Preparation of ZnO nanowires by electrochemical deposition," *Energy Procedia*, **2**, 55-58, 2010.
- [47] Caglar, M., Caglar, Y. ve Ilican, S., "The determination of the thickness and optical constants of the ZnO crystalline thin film by using envelope method," *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **8**, 1410-1413, 2006.
- [48] Caglar, Y., Caglar, M., Ilican, S. ve Yakuphanoglu, F., "Thermally stimulated current and space charge limited current mechanism in film of the gold/zinc oxide/gold type," *Physica. B.*, **392**, 99-103, 2007.
- [49] Caglar, Y., Yakuphanoglu, F., Ilican, S. ve Caglar, M., "Electrical characterization of ZnO/organic semiconductor diode," *J. Optoelectron. Adv. M.*, **10**, 2584-2587, 2008.
- [50] C., Liu, J., Liu, F., Wu, J., Gao, K. ve Xue, D., "Tube Formation in Nanoscale Materials," *Nanoscale Res. Lett.*, **3**, 473-480, 2008.
- [51] Yan, C., Xue, D. ve Zou, L., "A solution-phase approach to the chemical synthesis of ZnO nanostructures via a low-temperature route," *J. Alloys Compd.*, **453**, 87-92, 2008.
- [52] Aksoy, S., Caglar, Y., Ilican, S. ve Caglar, M., "Effect of heat treatment on physical properties of CdO films deposited by sol-gel method," *Int. J. Hydrogen Energ.*, **34**, 5191-5195, 2009.

- [53] Ma, D., Ye Z., Wang, L., Huang, J. ve Zhao, B., "Deposition and characteristics of CdO films with absolutely (200)-preferred orientation," *Mater. Lett.*, **58**, 128- 131, 2003.
- [54] Li, X., Gessert, T., DeHart, C., Barnes, T., Moutinho, H., Yan, Y., Young, D., Young, M., Perkins, J. ve Coutts, T., "A comparison of composite transparent conducting oxides based on the binary compound CdO and SnO₂," NCPV Program Review Meeting, Conference Paper, National Renewable Energy Laboratory, Colarado, USA, 14-17, 2001.
- [55] Ferro, R. ve Rodriguez, J.A., "Some physical properties of F-doped CdO thin films deposited by spray pyrolysis," *Thin Solid Films*, **347**, 295-298, 1999.
- [56] Ferro, R. ve Rodriguez, J.A., "Infuence of F-doping on the transmittance and electron effinity of CdO thin films suitable for solar cells technology," *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **64**, 363-370, 2000.
- [57] Lokhande, B.J. ve Uplane, M.D., "Effect of deposition temperature on spray deposited cadmium oxide films," *Mater. Res. Bull.*, **36**, 439-447, 2001.
- [58] Subramanyam, T.K., Uthanna, S. ve Naidu, B.S., "Preparation and characterization of CdO films deposited by dc magnetron reactive sputtering," *Mater. Lett.*, **35**, 214-220, 1998.
- [59] Vigil, O., Cruz, F., Morales-Acevedo, A., Contreras-Puente, G., Vaillant, L. ve Santana, G., "Structural and optical properties of annealed CdO thin films prepared by spray pyrolysis," *Mater. Chem. Phys.*, **68**, 249-252, 2001.
- [60] Santos-Cruz, J., Torres-Delgado, G., Castanedo-Perez, R., Jimenes-Sandoval, S., Jimenes-Sandoval, O., Zuniga-Romero, C.I., Marquez-Marin, J. ve Zelaya-Angel, O., "Dependence of electrical and optical properties of sol-gel prepared undoped cadmium oxide thin films on annealing temperature," *Thin Solid Films*, **493**, 83-87, 2005.
- [61] Ueda, N., Meada, H., Hosono, H. ve Kawazoe, H., "Band-gap widening of CdO thin films," *J. Appl. Phys.*, **84**, 6174-6178, 1998.

- [62] Tosun, H., *Ultrasonik Pyrolysis Yöntemiyle Elde Edilen CdO Yarıiletken Materyalinin Flor Katkısına Bağlı Olarak Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2008.
- [63] Ketenci, E., *CdO:F Filmlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.
- [64] Boylestad, R. ve Nashelsky, L., “*Semiconductor Diodes*,” Electronic Devices and Circuit Theory, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey Colombus, Ohio, 1, 1998.
- [65] Shockley, W., “Introductory Theory of Conductivity and Hall Effect” *Electrons and Holes in Semiconductors*, D. Van Nostrand Co. Inc., Princeton, New Jersey, 112, 1950.
- [66] Ebers, J.J., “Four-Terminal p-n-p-n Transistors,” *Proc. IRE*, **40**, 1361–1364, 1952.
- [67] Moll, J.L., Tanenbaum, M., Goldey, J.M. ve Holonyak, N., “p-n-p-n Transistor Switches,” *Proc. IRE*, **44**, 1174–1182, 1956.
- [68] Colinge, J.P., ve Colinge, C.A., “*The PN Junction Diode*,” Physics of Semiconductor Devices, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 95, 2002.
- [69] Boylestad, R. ve Nashelsky, L., “*Semiconductor Diodes*,” Electronic Devices and Circuit Theory, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey Colombus, Ohio, 11, 1998.
- [70] Hook, J.R., ve Hall, H.E., “*Yarıiletken Cihazlar*”, Katıhal Fiziği, (Çev. Köksal F., Altunbaş, M., Dinçer, M. ve Başaran, E.), Literatür Yayıncılık, İstanbul, 175-177, 1999.
- [71] Rhoderick, E.H. ve Williams, R.H., “Experimental Studies of Metals on Semiconductors” *Metal-Semiconductor Contacts*, Clarendon Press, Oxford, 1-100, 1988.
- [72] Eun, J. ve Cooper, J.A., *High Temperature Ohmic Contact Technology to N-Type GaAs*, PhD Thesis, Purdue University, School of Electrical Engineering, India, 1993.

- [73] Aydın, S.G., *Al/PNpClPhPPy/ptipi-Si Konağın Elektronik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2010.
- [74] Sze, S.M., ve Kwong K., “Physics and Properties of Semiconductors,” *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, New York, 187-191, 2007.
- [75] Özdemir, S. ve Altındal, Ş., “Temperature dependent electrical characteristics of Al-SiO_x-p-Si solar cells,” *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **32**, 115-127, 1994.
- [76] Akkal, B., Benamara, Z., Boudissa, A., Bouiadjra, B.N., Amrani, M., Bideux, L. ve Gruzza, B., “Modelization and characterization of Au/InSb/InP Schottky systems as a function of temperature,” *Mater. Sci. Eng. B*, **55**, 162–168, 1998.
- [77] Saxena, A.N., “Forward Current-Voltage Characteristics of Schottky Barrier on n-Type Silicon,” *Surf. Sci.*, **13**, 151-171, 1969.
- [78] Nicollian, E.H. ve Brews, J.R., “MOS(Metal-Oxide-Semiconductor) Physics and Technology,” John Willey and Sons, New York, 286-288, 1982.
- [79] Rhoderick, E.H. ve Williams, R.H., “Current-Transport Mechanisms” *Metal-Semiconductor Contacts*, Clarendon Press, Oxford, 256, 1988.
- [80] Çetinkara, H.A., Türüt, A., Zengin, D.M. ve Erel, Ş., “The energy distribution of the interface state density of Pb/p-Si Schottky contacts exposed to clean room air,” *Appl. Sur. Sci.*, **207**, 190-199, 2003.
- [81] Werner, J.H., “Schottky Barrier and pn-Junction I/V Plots-Small Signal Evaluation,” *Appl. Phys. A-Mater.*, **47**, 291-300, 1988.
- [82] Sullivan, J.P., Tung, R.T., Pinto, M.R. ve Graham, W.R., “Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers,” *J. Appl. Phys.*, **70**, 7403-7407, 1991.
- [83] Cheung, S.K. ve Cheung, N.W., “Extraction of Schottky diode parameters from forward current- voltage characteristics,” *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 85-87, 1986.

- [84] Norde, H., "A modified forward I - V plot for Schottky diodes with high series resistance," *J. Appl. Phys.*, **50**, 5052-5054, 1979.
- [85] Sze, S.M. ve Ng, K.K., "Metal-Semiconductor Contacts," *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons Inc., New York, 245–300, 2007.
- [86] Sze, S.M. ve Ng, K.K., "Metal-Semiconductor Contacts," *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 250–270, 1981.
- [87] Mead, C.A., "Metal-Semiconductor Surface Barriers," *Sol. St. Electronics*, **9**, 1023–1033, 1966.
- [88] Schroder, D.K., "Contact Resistance and Schottky Barriers," *Semiconductor Material and Device Characterization*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 130-131, 2006.
- [89] Bethe, H.A., 'Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers,' *Mass. Inst. Technol. Radiat. Lab. Rep.*, 43, 1942.
- [90] Ziel, A.V., "P-N Junctions, Equilibrium conditions, Forward bias, Reverse bias, Zener breakdown, Metal-semiconductor junctions," *Solid State Physical Electronics*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 245-250, 1968.
- [91] Sah, C., Noyce, R.N., Shockley, W., "Carrier generation and recombination in p-n junction and p-n junction characteristics," *Proc. Inst. Radio Eng.*, **45**, 1228-1243, 1957.
- [92] Güllü, Ö., *H₂ Öntavlamalı Au/n-GaAs Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Schottky Metal Kalınlığı ve Sıcaklığa Bağlı Değişiminin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2008.
- [93] Özaydın, R., *Au/PVA/n-Si MIS Yapıların Akım-Voltaj (I-V) Ölçümlerinin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [94] Baykal, S., *Yeni tip gama dedektörleri ve iz sürme tekniği*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.

- [95] Bıyıklı, N., *Design, Fabrication and Characterization of High Performance Resonant Cavity Enhanced Photodetectors*, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi, Ankara, 1998.
- [96] Johnson, Mark., "Photodiode Equivalent Circuit," *Photodetection and Measurement*, McGraw-Hill Professional Publishing, USA, 14-15, 2003.
- [97] Schroder, D.K., "Solar Cells", *Semiconductor Material and Device Characterization*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 195-196, 2006.
- [98] Şener, D., *Sol-Gel Yöntemiyle Hazırlanan Metal Oksit İnce Filmlerin Elektriksel, Yapısal Ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [99] Özbey, P., *Sol-Gel Yöntemiyle Hazırlanan SiO₂-TiO₂ Esaslı Yansıtıcı Kaplamalar*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2004.
- [100] Yıldırım, N., *Saçtırma Yöntemiyle Hazırlanan Ni/n-GaAs Schottky Engel Diyotların Karakteristik Parametrelerinin Tavlama ve Numune Sıcaklığına Bağlı Değişimleri*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2009.
- [101] Laue, M., "Die Interferenzerscheinungen an Röntgenstrahlen hervorgerufen durch das Raumgitter der Kristalle," *Jahrb. Radioakt. Elektron.*, **11**, 308-345, 1914.
- [102] Cullity, B.D., "Difraksiyon Demetlerinin Doğrultuları" *X-Işınları Difraksiyonu*, (Çev: Sümer, A.), İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 87 1966.
- [103] Moon, W.S., Whoo, S.I. ve Park, S.B., "Preparation and characterization of lead zirconate titanate thin films by liquid source misted chemical deposition," *Thin Solid Films*, **359**, 77-81, 2000.
- [104] Nasser, S.A., Afify, H.H., El-Hakim, S.A., ve Zayed, M.K., "Structural and physical properties of sprayed copper-zinc oxide films," *Thin Solid Films*, **315**, 327-335, 1998.
- [105] Kaneko, S., Yagi, I., Murakami, K. ve Okuya, M., "Thermal decomposition of di-n-butyltin (IV) diacetate as a precursor for the Spray

- pyrolysis deposition of oriented SnO₂ thin films,” *Solid State Ionics*, **141-142**, 463-470, 2001.
- [106] Caglar, Y., Ilican, S., Caglar, M., Yakuphanoglu, F., Wuc, J., Gaoc, K., Luc, P. ve Xue, D., “Influence of heat treatment on the nanocrystalline structure of ZnO film deposited on p-Si,” *J. Alloy. Compd.*, **481**, 885–889, 2009.
- [107] Gül, A., *ZnO ince filmlerinin hazırlanması ve karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2002.
- [108] Bilgen, Y., *Sol-Gel Yöntemiyle Üretilen Nanokristal ZnO:Ga İnce Filmlerinin Optik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2008.
- [109] Ho, Y.S. ve Lee, K.Y., “Fabrication of highly oriented (002) ZnO film on glass by sol-gel method,” *Thin Solid Films*, **519**, 1431–1434, 2010.
- [110] Lv, J., Gong, W., Huang, K., Zhu, J., Meng, F., Song, X. ve Sun, Z., “Effect of annealing temperature on photocatalytic activity of ZnO thin films prepared by sol-gel method,” *Superlattice. Microst.*, **50**, 98–106, 2011.
- [111] Robbins, J.J., Harvey, J., Leaf, J., Fry, C. ve Wolden, C.A., "Transport phenomena in high performance nanocrystalline ZnO:Ga films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition," *Thin Solid Films*, **473**, 35-40, 2005.
- [112] Caglar, Y., Caglar, M., Ilican, S., ve Ates, A., “Morphological, optical and electrical properties of CdZnO films prepared by sol-gel method,” *J. Phys. D Appl. Phys.*, **42**, 065421, 2009.
- [113] Kanbur, H., *Yalıtkan Tabakalı Al/p-Si Schottky Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [114] Yakuphanoglu, F., “Electronic and photovoltaic properties of Al/p-Si/copper phthalocyanine photodiode junction barrier,” *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **91**, 1182–1186, 2007.

- [115] Gupta, R.K., Yakuphanoglu, F., Ghosh, K. ve Kahol, P.K., "Fabrication and characterization of p-n junctions based on ZnO and CuPc," *Microelectron. Eng.*, **88**, 3067–3069, 2011.
- [116] Yakuphanoglu, F. ve Farooq, W.A., "Electrical characterization of p-Si/fullerene-C60 heterojunction photodiode," *Optoelectron. Adv. Mat.*, **5**, 153–156, 2011.
- [117] Ye, Z.Z., Lu, J.G., Zhang, Y.Z., Zeng, Y.J., Chen, L.L., Zhuge, F., Yuan, G.D., He, H.P., Zhu, L.P., Huang, J.Y. ve Zhao, B.H., "ZnO light-emitting diodes fabricated on Si substrates with homobuffer layers," *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 113503, 2007.
- [118] Ghosh, R. ve Basak, D., "Electrical and ultraviolet photoresponse properties of quasialigned ZnO nanowires/p-Si heterojunction," *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 243106, 2007.
- [119] Zebbar, N., Kheireddine, Y., Mokeddem, K., Hafdallah, A., Kechouane, M. ve Aida, M.S., "Structural,optical and electrical properties of n-ZnO/p-Si heterojunction prepared by ultrasonic spray," *Mat. Sci. Semicon. Proc.*, **14**, 229-234, 2011.
- [120] Mridha, S., ve Basak, D., "Ultraviolet and visible photoresponse properties of nZnO/pSi Heterojunction," *J. Appl. Phys.*, **101**, 083102, 2007.
- [121] Chaabouni, F., Abaab, M. ve Rezig, B., "Characterization of n-ZnO/p-Si films grown by magnetron sputtering," *Superlattice. Microst.*, **39**, 171–178, 2006.
- [122] Riben, A.R. ve Feucht, D.L., "n-Ge/p-GaAs Heterojunctions," *Solid-State Electron.*, **9**, 1055-1065, 1966.
- [123] Vatavu, S. ve Gasin, P., "The analysis of current flow mechanism in CdS/CdTe heterojunction," *Thin Solid Films*, **515**, 6179-6183, 2007.
- [124] Fedison, J.B., Chow, T.P., Lu, H. ve Bhat, I.B., "Electrical characteristics of magnesium-doped gallium nitride junction diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2841-2843, 1998.
- [125] Dantus, C, Rusu, G.G., Dobromir, M. ve Rusu, M., "Preparation and characterization of CdO thin films obtained by thermal oxidation of evaporated Cd thin films," *Appl. Surf. Sci.*, **255**, 2665-2670, 2008.

- [126] Yakuphanoglu, F., “Nanocluster n-CdO thin film by sol–gel for solar cell applications,” *Appl. Sur. Sci.*, **257**, 1413–1419, 2010.
- [127] Mimura, H. ve Hatanaka, Y., “The current transport mechanism of p-type a-Si:H/n-type c-Si heterojunctions and their application to an imaging device,” *Appl. Surf. Sci.*, **48-49**, 472-477, 1991.
- [128] Aguir, K., Fennouth, A., Carchano, H., Seguin, J.L., Elhadadi, B. ve Lalande, F, “Electrical properties of a-GaAs/c-Si (p) heterojunctions,” *Thin Solid Films*, **257**, 98–103, 1995.
- [129] Boylestad, R. ve Nashelsky, L., “*Other two terminal devices*,” *Electronic Devices and Circuit Theory*, Prentice Hall, Ohio, 833-834, 1998.