



**SILAR YÖNTEMİ İLE Al/Cd:ZnO/p-Si/Al FOTODİYOT ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Yasemin ŞAHİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yasemin ŞAHİN

30/06/2022

SILAR YÖNTEMİ İLE Al/Cd:ZnO/p-Si/Al FOTODİYOT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Yasemin ŞAHİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Bu çalışmada, katkısız ve %1, %3, %5 kadmiyum katkılı çinko oksit ince filmler, oda sıcaklığında p-tipi Si üzerine ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) tekniği ile oluşturuldu. Katkısız ve farklı oranlarda Cd katkılı olmak üzere üretilen filmlerin yapısal ve elektriksel özellikleri incelendi. Üretilen numunelerin yüzey analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirildi. SEM analizinde numunelerin yüzey morfolojisinin değiştiği görüldü. Yapısal özellikleri X-ışını kırınımı (XRD) ile araştırıldı. XRD sonuçları doğrultusunda üretilen ince filmlerde Cd katkısı arttıkça kristal boyutunun azaldığı görüldü. Çalışmada katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyot yapılar oluşturularak numunelerin elektriksel özellikleri incelendi ve akım-voltaj ($I-V$), akım-zaman ($I-t$) ölçümleri karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetlerinde yapıldı. $I-V$ grafiklerinden yararlanılarak malzemelerin idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b), doyma akımı (I_0) değerleri hesaplandı. Aydınlatma şiddetinin artmasıyla ters beslemde fotoakımın arttığı, numunelerin aydınlatmaya duyarlı olduğu ve fotodiyot özellik gösterdiği tespit edildi. Üretilen diyotların fotoyanıt özelliğini incelemek için $I-t$ ölçümleri değerlendirildi ve aydınlatma şiddeti arttıkça akımın arttığı gözlemlendi. Katkısız ve Cd katkılı ZnO diyotların Norde yöntemi ile seri direnç (R_s) değerleri hesaplandı ve seri direnç değerlerinin Ω mertebesinde olduğu belirlendi. Elde edilen veriler doğrultusunda Cd katkı miktarının değiştirilmesiyle üretilen ZnO diyot yapısının elektriksel özelliklerinin değiştirilebileceği ve Cd katkılı ZnO diyotların optoelektronik uygulamalarda fotodiyot olarak kullanılabileceği görüldü.

Bilim Kodu : 20227
Anahtar Kelimeler : ZnO, ince film, diyotlar, fotodiyot, Norde yöntemi
Sayfa Adedi : 81
Danışman : Prof. Dr. Şükrü ÇAVDAR

CHARACTERIZATION OF Al/ZnO/p-Si/Al PHOTODIODE FABRICATED BY SILAR METHOD

(M. Sc. Thesis)

Yasemin ŞAHİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

In this study, undoped and 1%, 3%, 5% cadmium doped zinc oxide thin films were produced on p-type Si at room temperature by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) technique. The structural and electrical properties of the films produced undoped and with different amounts of Cd were investigated. Surface analysis of the produced samples was carried out by scanning electron microscope (SEM). In SEM analysis, it was observed that the surface morphology of the samples changed. Their structural properties were investigated by X-ray diffraction (XRD). It was observed that the crystal size decreased as the Cd contribution increased in the thin films produced in accordance with the XRD results. In the study, the electrical properties of the samples were examined by forming diode structures with undoped Al/ZnO/p-Si/Al and 1%, 3%, 5% Cd doped Al/Cd:ZnO/p-Si/Al and current-voltage (I - V), current-time (I - t) measurements were made in the dark and at different illumination intensities. The ideality factor (n), barrier height (Φ_b) and saturation current (I_0) values of the materials were calculated by using I - V graphs. It was determined that the photocurrent increased with the increase of illumination intensity, the samples were sensitive to illumination and showed photodiode properties. I - t measurements were evaluated to examine the photoresponse feature of the diodes produced and it was observed that the current increased as the illumination intensity increased. Series resistance (R_s) values of undoped and Cd-doped ZnO diodes were calculated using the Norde method and it was determined that the series resistance values were in the Ω range. In the line with the data obtained, it was seen that the electrical properties of ZnO diode structure produced can be changed by changing the amount of Cd doping, and that Cd-doped ZnO diodes can be used as photo diodes in optoelectronic applications.

Science Code : 20227

Key Words : ZnO, thin film, diodes, photodiode, Norde method

Page Number : 81

Supervisor : Prof. Dr. Şükrü ÇAVDAR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında kıymetli katkıları, yol göstericiliği, engin bilgi ve deneyimi ile desteğini, yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Şükrü ÇAVDAR' a;

Tez çalışmam sırasında engin bilgi ve tecrübelerini paylaşarak her türlü fedakârlık ve yardımı gösteren çok değerli hocalarım Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU, Prof. Dr. Haluk KORALAY ve Öğr. Gör. Dr. Neslihan TURAN' a;

İnce film büyütme ve ölçümler sırasında yardımlarını esirgemeyen laboratuvar arkadaşlarıma;

Tüm eğitim hayatım süresince hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, her koşulda yanımda olan ve yüksek lisans tez çalışmam süresince de çocuklarımla ilgilenen kıymetli, fedakâr annem Hatice LEVENT ve babam Remzi LEVENT' e;

Tez çalışmamı tamamlayabilmem için sabır gösteren, beni hiç üzmeyen, mutluluk ve huzur kaynağım can kızlarım Azra Hüma ŞAHİN ve Elif Meva ŞAHİN' e;

Son olarak, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, beni her zaman cesaretlendiren, varlığıyla güç veren kıymetli eşim, yoldaşım Muhammed Önder ŞAHİN' e;

En içten duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. YARIİLETKENLER.....	3
2.1. Katkısız Yarıiletkenler	6
2.2. Katkılı Yarıiletkenler.....	7
2.2.1. n-tipi yarıiletkenler	7
2.2.2. p-tipi yarıiletkenler	8
2.3. Fotodiyotlar	9
2.4. Metal Yarıiletken Fotodiyotlar	10
2.5. p-n Eklem Diyotlar	12
2.6. Heteroeklem Diyotlar	14
2.7. Metal Yarıiletken Kontaklar.....	14
2.8. Metal p-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar	16
2.9. Metal p-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar.....	18
2.10. Termiyonik Emisyon Teorisi	19
2.11. Fotodiyotlarda Akım Voltaj Karakteristiği.....	21

	Sayfa
2.12. Norde Yöntemi	24
2.13. ZnO Özellikleri.....	26
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	31
3.1. SILAR Tekniği	31
3.2. Fiziksel Buhar Biriktirme	32
3.3. X- Işını Kırınımı	33
3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu	34
3.5. Katkısız ve Cd Katkılı ZnO İnce Filmlerin Hazırlanması	35
3.5.1. Taban malzemelerinin temizlenmesi	36
3.5.2. Çözeltilerin hazırlanması	37
3.5.3. Numunelerin büyütülmesi.....	37
3.5.4. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların oluşturulması	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	41
4.1. SEM Analizi	41
4.2. XRD Analizi.....	43
4.3. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al Diyotların Ölçüm Sonuçları	46
4.3.1. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların akım voltaj karakteristikleri.....	46
4.3.2. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al fotoiletkenlik karakteristikleri.....	58
4.3.3. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO /p-Si/Al diyotlarının fotoakım- zaman karakteristikleri.....	63
4.3.4. Norde yöntemiyle engel yüksekliği ve seri direnç hesaplaması.....	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ.....	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yarıiletkenler	3
Çizelge 2.2. ZnO özellikleri.....	28
Çizelge 4.1. ZnO ve %1, %3, %5 Cd:ZnO ince filmlerin kristal yapı parametreleri	45
Çizelge 4.2. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd Katkılı ZnO diyotların karanlıktaki idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyma akımı, doğrultma oranı değerleri.....	49
Çizelge 4.3. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların 100 mW/cm ² aydınlatma şiddetinde hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyma akımı, doğrultma oranı değerleri	51
Çizelge 4.4. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotun karanlık ve farklı ışık şiddeti altında hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyma akımı değerleri.....	55
Çizelge 4.5. %1 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun karanlık ve farklı ışık şiddeti altında hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyma akımı değerleri	55
Çizelge 4.6. %3 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun karanlık ve farklı ışık şiddeti altında hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyma akımı değerleri	56
Çizelge 4.7. %5 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun karanlık ve farklı ışık şiddeti altında hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyma akımı değerleri	56
Çizelge 4.8. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotlar için elde edilen m değerleri.....	61
Çizelge 4.9. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al I _{açma} /I _{kapama} oranları	66
Çizelge 4.10. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında hesaplanan engel yüksekliği seri direnç değerleri.....	70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yarıiletken bant yapısı.....	4
Şekil 2.2. Bantlardaki elektron dağılımı	5
Şekil 2.3. Yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemelerin bant durumlarının şematik gösterimi	5
Şekil 2.4. $T=0$ ve $T>0$ sıcaklıklarında doğal yarıiletkenlerin iletim ve valans bantlarının şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.5. n tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu ve safsızlık enerji düzeyi.....	8
Şekil 2.6. p tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu ve safsızlık enerji düzeyi.....	8
Şekil 2.7. Fotodiyotun fotonla uyarılması a) elektronun bantlar arası geçişi b) safsızlık enerji seviyesinden iletim bandına geçiş	9
Şekil 2.8. Fotodiyot şematik gösterimi	10
Şekil 2.9. Metal ve yarıiletken eklemine aydınlatma altındaki şematik görünümü	11
Şekil 2.10. Tükenim bölgesindeki elektrik alanın oluşumu.....	11
Şekil 2.11. p-n eklem diyotunun şematik gösterimi	13
Şekil 2.12. Doğrultucu ve omik kontaklar	15
Şekil 2.13. a)Kontak yapılmadan önce, b) kontak yapıldıktan sonra c) $V \neq 0$ durumları için metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın enerji-bant diyagramları.....	17
Şekil 2.14. a)Kontak yapılmadan önce, b) kontak yapıldıktan sonra c) $V \neq 0$ durumları için metal/p-tipi yarıiletken omik kontakın enerji-bant diyagramları.....	19
Şekil 2.15. Bir fotodiyotun aydınlık ve karanlık durumları için I-V karakteristikleri....	22
Şekil 2.16. ZnO'in çeşitli uygulama alanları	27
Şekil 2.17. Hekzagonal Wurtzite yapıdaki ZnO'in kristal şekli	28
Şekil 3.1. İnce film üretim teknikleri	31
Şekil 3.2. Buhar biriktirme tekniğinin şematik gösterimi.....	32

Şekil	Sayfa
Şekil 3.3. Kristaldeki X-ışınları kırınımı	33
Şekil 3.4. SEM'in temel bileşenlerinin şematik diyagramı	35
Şekil 3.5. Bir SILAR döngüsünün şematik görüntüsü a) 20s çözeltide b) 7s 90 ⁰ C sıcaklıktaki deiyonize suda c) 60s havada d) 30s deiyonize suda	38
Şekil 3.6. Al/ZnO/p-Si/Al ve Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların şematik görüntüsü	40
Şekil 4.1. ZnO ve sırasıyla %1, %3, %5 Cd:ZnO ince filmlerin XRD desenleri	44
Şekil 4.2. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların ölçüm düzeneğinin şematik görüntüsü.....	47
Şekil 4.3. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/ Cd:ZnO /p-Si/Al diyotların karanlıktaki I-V eğrileri	49
Şekil 4.4. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların 100mW/cm ² 'deki I-V eğrileri	50
Şekil 4.5. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki I-V eğrileri	52
Şekil 4.6. %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki I-V eğrileri	53
Şekil 4.7. %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki I-V eğrileri	53
Şekil 4.8. %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki I-V eğrileri	54
Şekil 4.9. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotun log I-P eğrisi.....	59
Şekil 4.10. %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun log I-P eğrisi.....	59
Şekil 4.11. %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun log I-P eğrisi.....	60
Şekil 4.12. %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun log I-P eğrisi.....	60
Şekil 4.13. Katkısız, %1, %3, %5 Cd katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun log I-P eğrisi.....	61
Şekil 4.14. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-t karakteristikleri	64
Şekil 4.15. %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-t karakteristikleri	64

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-t karakteristikleri	65
Şekil 4.17. %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-t karakteristikleri	65
Şekil 4.18. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki F(V)-V eğrileri	67
Şekil 4.19. %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki F(V)-V eğrileri	68
Şekil 4.20. %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki F(V)-V eğrileri	68
Şekil 4.21. %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki F(V)-V eğrileri	69

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Si kristallerinin ultrasonik banyo cihazındaki görüntüsü.....	36
Resim 3.2. a) Toz malzemelerin tartılması b) 75 ml deiyonize su eklenmesi c) manyetik karıştırıcıda 7,5ml NH ₃ eklenmesi.....	37
Resim 3.3. SILAR büyütme işlemi deney düzeneği.....	39
Resim 3.4. Numunelerin tavlama için kullanılan tüp fırına ait görüntü.....	39
Resim 4.1. ZnO'nun SEM görüntüleri.....	41
Resim 4.2. %1 Cd:ZnO'nun SEM görüntüleri	42
Resim 4.3. %3 Cd:ZnO'nun SEM görüntüleri	42
Resim 4.4. %5 Cd:ZnO'nun SEM görüntüleri	43

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A^*	Richardson sabiti
E	Elektrik alan
E_c	İletim bandı enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_v	İletim bandı enerji seviyesi
eV	Elektron volt
$F(V)$	Norde fonksiyonu
$F(V_0)$	Minimum Norde fonksiyonu
h	Planck sabiti
$h\nu$	Foton enerjisi
I	Akım
$I_{açma}/I_{kapama}$	Fotoiletkenlik oranı
I_0	Doyma akımı
I_{ph}	Fotoakım
J_{ms}	Metalden yarıiletkenle doğru oluşan akım yoğunluğu
J_n	Doyma akımı yoğunluğu
J_0	Akım yoğunluğu
J_{sm}	Yarıiletkenden metale doğru oluşan akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
m^*	Taşıyıcıların etkin kütlesi
m_e^*	Elektronların etkin kütlesi
m_h^*	Deşiklerin etkin kütlesi
n	İdealite faktörü
P	Işık şiddeti
q	Elektron yükü
R_s	Seri direnç

Simgeler**Açıklamalar**

T	Kelvin cinsinden sıcaklık
t	Zaman
V	Uygulanan voltaj
V_o	Norde fonksiyonu için minimum voltaj
Φ_b	Engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ϵ_0	Boşluğun elektriksel geçirgenliği
γ	Norde fonksiyonu için bir tam sayı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SILAR	Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu
XRD	X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Metal oksitler, benzersiz yarıiletken özellikler sergileyen iki ya da daha fazla elementten oluşan, büyük bir bileşik yarıiletken grubunu oluştururlar. Metal oksit yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği, optik şeffaflığı ve kimyasal özellikleri genellikle yapısal özelliklerine, oksijen eksikliklerine, safsızlıklarına ve konsantrasyonlarına bağlıdır [1]. Elektronik ve optik cihazlar için yarıiletken uygulamaları, genellikle kristal kafes yapısında kusurların oluşturulması ve bu kusurların kontrolüyle gerçekleştirilir. Kafes kusurları malzemenin taşıyıcı tipini ve konsantrasyonunu belirlemek için alıcı ve verici atomlarla katılanması gerekir. Katkılamayla taşıyıcı hareketliliği de kontrol edilebilmektedir. Genel olarak, çeşitli safsızlıklar eklenerek oluşturulan p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler, lazerler, ışıık yayan diyotlar, fotoçoğaltıcılar ve radyasyon dedektörleri gibi uygulamalar için yarıiletken alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2].

Şeffaf iletken oksitler (TCO), 2 boyutlu ve 3 boyutlu görüntüleme cihazları ve ince film güneş pilleri de dahil olmak üzere çok sayıda cihazda optik şeffaflık ve elektriksel iletkenlik sergileyen yarıiletkenlerdir. TCO malzemeleri arasında, mükemmel optik ve elektriksel özellikleri, toprak bolluğu ve kimyasal kararlılığı nedeniyle genellikle optoelektronik cihaz uygulamaları için en çekici TCO'lardan biri ZnO'tir. ZnO optoelektronik, piezoelektrik, kimyasal algılama, biyomedikal teşhis ve fotokataliz gibi uygulama alanlarında kapsamlı bir şekilde araştırılan, çevre dostu, biyoyouumlu ve geniş bant aralıklı bir yarıiletken malzemedir [3]. ZnO'in başlıca avantajları, yüksek eksiton enerjisi (60meV), oda sıcaklığında 3.37 eV'lik geniş bant aralığı, gelişmiş bulk yapı ve epitaksiyel büyüme süreçleridir [1,4].

Kadmiyum oksit, kaya tuzunun termodinamik olarak kararlı fazına sahip, doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkendir. ZnO' ten daha dar bir bant aralığına (~2.3 eV) sahiptir. CdO, TCO ailesinin ilk keşfedilen örneklerinden biridir. Oldukça toksik olmasına rağmen CdO, birçok teknolojik alanda; kimyasal sensörler, güneş pili, pil üretimi, çeliklerde korozyon koruması, optoelektronik cihazlar, renklendirici pigmentler, fotodiyot gibi uygulamalarda kendine yer bulmuştur [5].

ZnO ve CdO n-tipi yarıiletkenlerdir. ZnO ince film, düşük elektrik iletkenliğine sahiptir ve görünür bölgede yüksek şeffaf yarıiletkendir. CdO ince film ise yüksek elektrik iletkenliğe sahip ve görünür bölgede düşük şeffaflığa sahip bir yarıiletkendir. ZnO' in elektriksel ve optik özellikleri çeşitli katkı maddeleri ile değiştirilebilmektedir [6].

ZnO ince filmleri büyütmek için çok sayıda fiziksel ve kimyasal yöntem kullanılmıştır. Fiziksel yöntemler; RF püskürtme, darbeli-lazer kaplama (PLD), kimyasal yöntemler; kimyasal buhar biriktirme, sprey piroliz, döndürmeli kaplama gibi yöntemlerdir. Bu yöntemler iyi kalitede hatasız filmler verebilir fakat bunların birçoğu karmaşık ekipman ve biriktirme esnasında vakum ya da yüksek sıcaklıklar gerektirebilir. Tüm bunlar da üretim maliyetini doğrudan etkiler. Bu durumu düzeltmek için, basit ve daha uygun maliyetli bir biriktirme yöntemi tercih edilebilir. SILAR yöntemi bu açıdan alternatif bir yöntemdir. Diğer yöntemlerden farklı olarak SILAR, biriktirme ya da ayrıntılı numune hazırlamanın herhangi bir aşamasında karmaşık ekipman, vakum ya da yüksek sıcaklık gerektirmez [7].

Bu tez çalışmasının amacı, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların elektriksel ve fotoiletkenlik özelliklerinin ve davranışlarının kadmiyum katkısıyla değişimini incelemektir. ZnO ve CdO yarıiletken malzemelerin üstün optik ve elektriksel özelliklerinin bir araya getirilmesiyle yeni üstün özellikli diyotlar üretilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı ZnO ince filmler SILAR tekniği kullanılarak p-tipi Si üzerine büyütüldü ve Al/ZnO/p-Si/Al ve Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyot yapıları oluşturuldu. Diyotların yapısal ve morfolojik özellikleri XRD ve SEM ile incelendi. Çalışmada katkısız ve farklı oranlarda Cd katkılı diyot yapıların akım-gerilim, akım-zaman ölçümleri, karanlıkta ve 20, 40, 60, 80, 100 mW/cm² ışık şiddeti altında yapılp diyotların, engel yüksekliği, doyma akımı, idealite faktörü ve seri dirençleri hesaplanarak elektriksel özellikleri analiz edildi. Bu tez çalışmasında, Cd katkısının ZnO diyot yapılarındaki elektriksel özelliklerinde değişime neden olduğu ve Cd katkılı ZnO diyotların optoelektronik uygulamalarda optik sensör ya da fotodiyot olarak kullanılabileceği görüldü.

2. YARIİLETKENLER

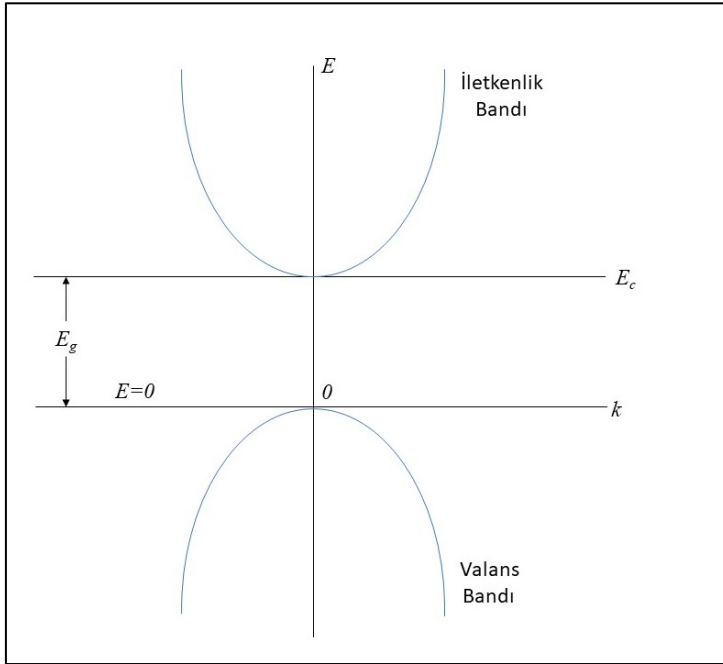
Elektriksel özelliklerine göre malzemeler, iletken, yarıiletken ve yalıtkan olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Bu malzemeler öz direnç değerlerine göre, 10^{-6} - $10^{-4} \Omega\text{m}$ metaller, 10^{-4} - $10^{10} \Omega\text{m}$ yarıiletkenler ve $10^{10} \Omega\text{m}$ değerindeki yalıtkanlardır [8]. Yarıiletkenlerin iletkenlikleri metallerden daha düşük ve yalıtkanlardan daha yüksektir. Aynı zamanda yarıiletkenlerin iletkenlikleri, sıcaklık ve kimyasal saflık gibi malzeme kalitesine metallerden çok daha fazla bağlıdır [9]. Yarıiletkenler, element halinde ya da bileşik halde bulunabilir. Tek tür atomdan oluşan yarıiletkenler, Si ve Ge elementleridir. Bunlardan silisyum, entegre devrelerde en çok kullanılan yarıiletken malzemedir [10].

Çizelge 2.1. Yarıiletkenler

Genel Sınıflandırma	Yarıiletken Sembol	Genel Sınıflandırma	Yarıiletken Sembol
Element	Si		
	Ge		
İkili Bileşikler			
IV-IV	SiC	II-VI	ZnO
III-V	AlP		ZnS
	AlAs		ZnSe
	AlAb		ZnTe
	GaP		CdS
	GaN		CdSe
	GaAs		CdTe
	GaSb		HgS
	InP	IV-VI	PbS
	InAs		PbSe
	InPSb		PbTe
Üçlü Bileşikler			
	Al _x Ga _{1-x} As		
	Al _x In _{1-x} As		
	GaAs _{1-x} P _x		
	Ga _x In _{1-x} As		
	Ga _x In _{1-x} P		
Dörtlü Bileşikler	Al _x Ga _{1-x} As _y Sb _{1-y}		
	Ga _x In _{1-x} As _{1-y} Py		

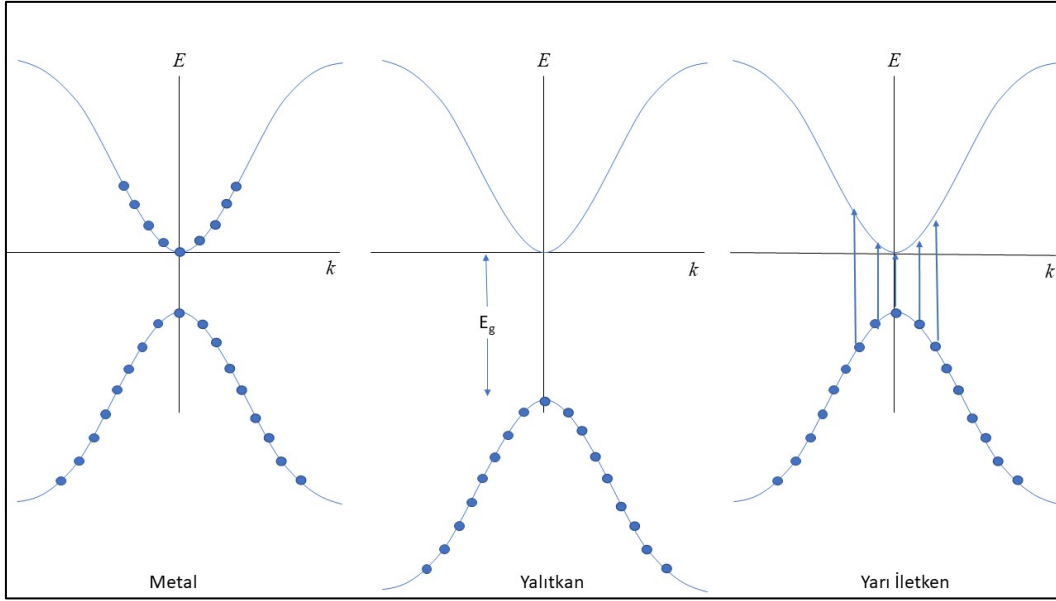
Bileşik yarıiletkenlerden GaAs, InSb, GaP, InAs gibi III-V. grup bileşiklerin kristal yapısı kübik ve bağ yapısı da genellikle kovalenttir. ZnO, CdZnS, ZnS gibi II-VI grup bileşikleri de yarıiletken özellik gösterir ve bu bileşiklerin bağ yapısı kovalent ya da iyonik, kristal yapısı ise hekzagonal ya da kübik yapıda olabilmektedir [11].

Bir metal elektrik alan altında bir elektrik akımı üretir. Aksine, bir elektrik alanın uygulanması, bir yalıtkanda akım üretmez. Bu malzemeler arasındaki farkı enerji bant teorisi açıklamaktadır. Tamamen dolu bir bant, bir elektrik alan varlığında bile elektrik akımı üretmez. Bu nedenle, bir katının, yalnızca bazı bantlar dolu olduğunda bir metal davranışı sergilediği sonucu ortaya çıkar [13]. Şekil 2.1.'de bir yarıiletken bant yapısı görülmektedir.



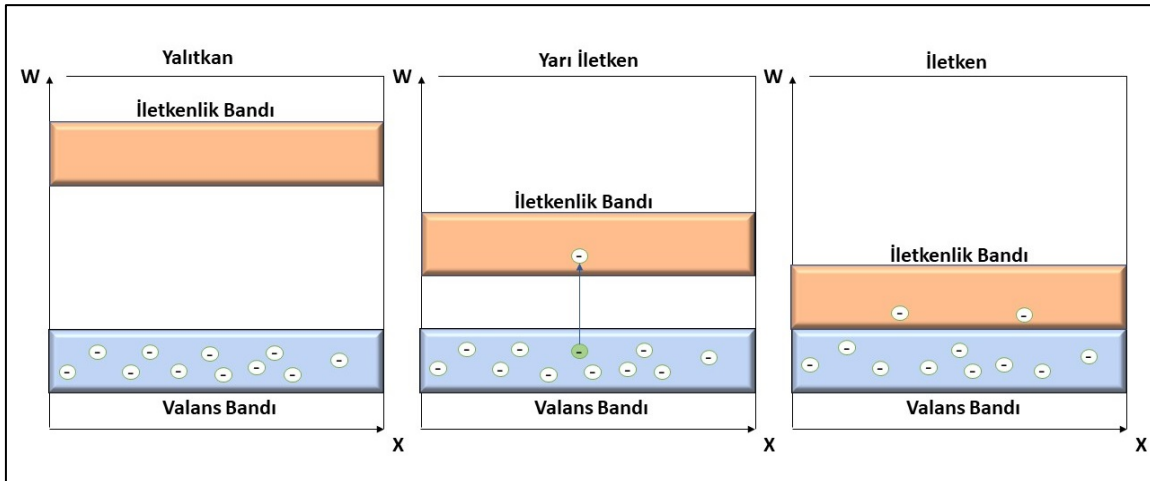
Şekil 2.1. Yarıiletken bant yapısı

Bantlar arasındaki aralık, yasak enerji aralığıdır. Bu aralığın üstündeki bant iletkenlik bandı, altındaki bant ise valans bandı olarak adlandırılmaktadır. Yasak enerji aralığı metallerde yok denecek derecede azdır. Yalıtkanlarda ise bu aralık oldukça büyüktür. Yarıiletkenler bu iki malzeme arasında bir yasak enerji aralığına sahiptir. Yasak enerji değerleri kıyaslandığında 3,8 eV' dan küçük değerdekiler yarıiletken, 4eV'dan büyük değerdekiler yalıtkandır. Yasak enerji aralığı $E_g \cong 2\text{eV}$ değerinde ya da daha küçük olanlar önemli yarıiletkenlerdir [12,14]. Şekil 2.2.'de bantlardaki elektron dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.2. Bantlardaki elektron dağılımı

Malzemedeki elektronlar sıcaklık, ışık, basınç gibi dış etkenlerle uyarıldığında, valans bandından iletim bandına geçer. Bu sayede valans bandının üst kısmı boşluklarla, iletim bandının alt kısmı da elektronlarla dolar. Böylelikle her iki bant kısmen dolu olur ve bir elektrik alan altında elektrik akımı taşır. Elektronlar ve holler yarıiletkenler için iki farklı yük taşıyıcısıdır [13,14]. Şekil 2.3.'te yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemelerin bant durumlarının şematik gösterimi görülmektedir.

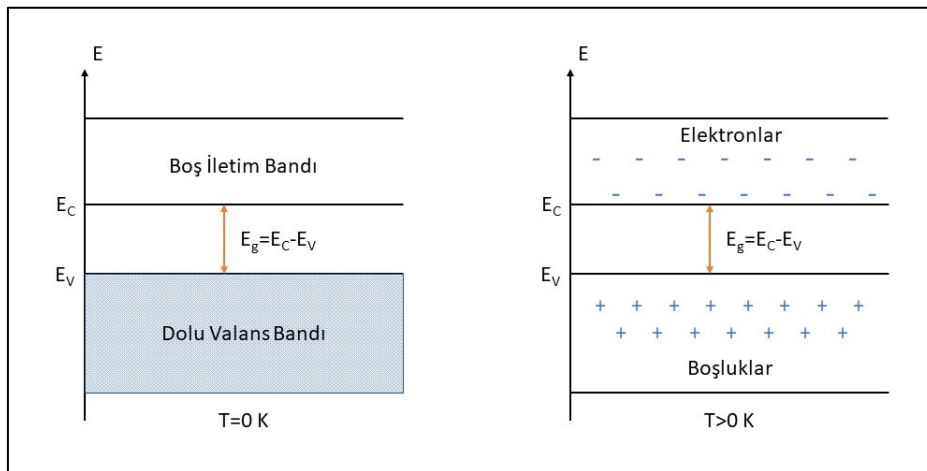


Şekil 2.3. Yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemelerin bant durumlarının şematik gösterimi

Yarıiletkenlerin sıcaklık arttıkça elektriksel iletkenlikleri artmaktadır. Mutlak sıcaklık değerinde ($T=0K$) ise yarıiletkenler, yalıtkan gibi davranırlar. Farklı malzemelerle katkılanan yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliklerinde değişimler gözlenmektedir. Elektriksel iletkenlik katkılama sayesinde kontrol edilebilmektedir. Doğru katkı oranlarıyla yarıiletkenler metaller kadar iletken olabilmektedirler. Yarıiletkenlerde, katkı malzemesine göre katkı bölgesinde, daha fazla boşluk ya da daha fazla elektron oluşmaktadır. Yarıiletkenin n tipi ya da p tipi olduğu yük taşıyıcılarına göre belirlenir. Katkılı yarıiletkenlerde yük taşıyıcısı elektronlar ise n tipi, yük taşıyıcıları boşluklar ise p tipi yarıiletken olarak adlandırılmaktadır [12].

2.1. Katkısız Yarıiletkenler

Katkısız bir yarıiletkende her iki yük taşıyıcısı, elektronlar ve boşluklar, birbirine eşit sayıdadır. Bununla birlikte, birçok uygulamada, sadece bir tür taşıyıcıya sahip olan malzemelere ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda yarıiletkeni uygun malzemelerle katkılararak, elektron ya da boşluk içeren malzemeler elde edilmektedir [13]. Katkısız yarıiletkenler ısıyla uyarıldıklarında valans bandından iletim bandına bir elektron geçişi olur. Bu elektrona karşılık valans bandında da tek bir boşluk oluşur. Bu boşlukların yeri valans bandındaki diğer elektronlarla yer değiştirerek değişir ve böylece boşluklar hareket halinde olur. Boşlukların ve elektronların serbest hareketi sayesinde elektriksel iletkenlik sağlanmış olur [12,16]. Şekil 2.4.'te katkısız yarıiletkenin sıcaklık değişimiyle iletim ve valans bantlarındaki değişim görülmektedir.



Şekil 2.4. $T=0$ ve $T>0$ sıcaklıklarında doğal yarıiletkenlerin iletim ve valans bantlarının şematik gösterimi

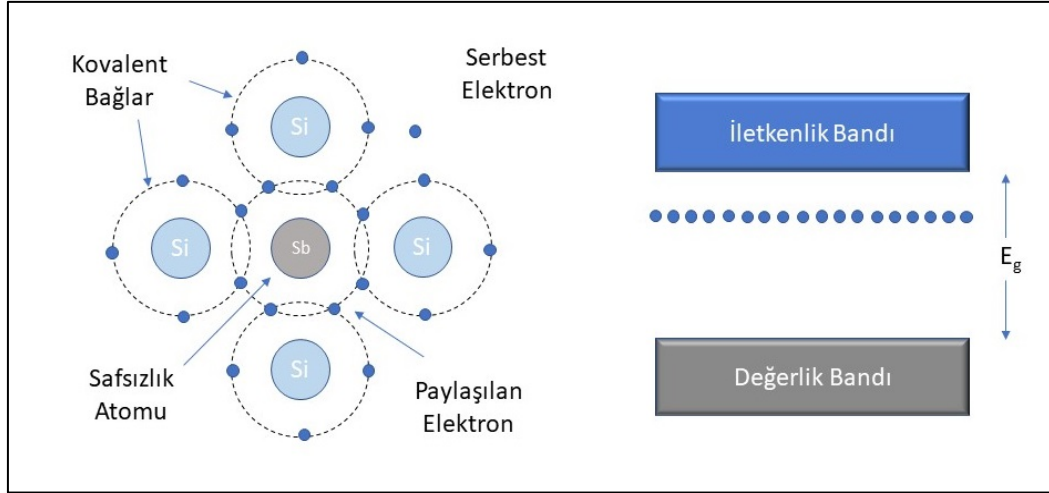
2.2. Katkılı Yarıiletkenler

Katkısız yarıiletkenlerde valans bandının tamamen dolu olması, iletkenlik bandında elektronun olmaması, mutlak sıcaklığın sıfır olması durumunda malzeme iletken değildir. Katkısız yarıiletkenlerde termal uyarımla valans bandından elektronlar iletim bandına yükseltilir ve eşit sayıda yük taşıyıcıları oluşur. Katkılı yarıiletkenlerde ise yük taşıyıcıların sayısı birbirinden farklıdır. Yarıiletkenlerin iletkenlikleri uygun katkılama ile değişmektedir ve yarıiletkenlerin en özgün özelliklerinden biri de budur. Çok az miktarda uygun katkı maddesinin uygun yöntemlerle eklenmesiyle yarıiletkenlerin iletkenlikleri birçok büyüklük mertebesinde değiştirilebilmektedir [17].

Yarıiletkenlerde istenilen doğrultuda yapılan katkılama işleminde safsızlık atomları, donör yani elektron verici ya da akseptör yani elektron alıcı olmak üzere işlev görmektedir. Safsızlık atomlarının elektron alıcı ya da elektron verici olması bakımından yarıiletkenler n-tipi ya da p-tipi olarak adlandırılırlar ve farklı özellikler gösterirler [16].

2.2.1. n-tipi yarıiletkenler

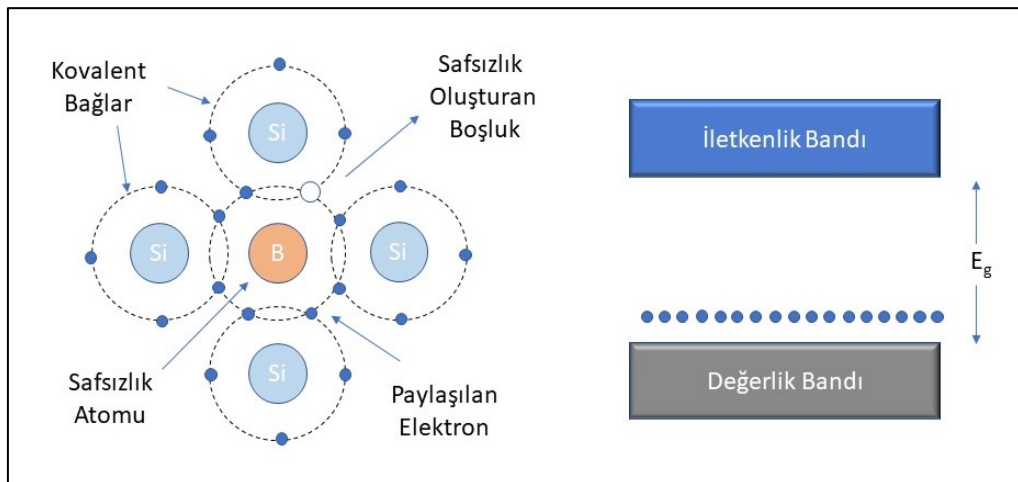
n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcılar elektronlardır ve safsızlık atomları donör yani elektron verici atomdur. Element yarıiletkenlerden ve periyodik cetvelin IV. grup elementlerinden olan Si, Ge kristallerine farklı yöntemlerle periyodik cetvelin V. grup P, Sb, As, N elementlerinden birinin çeşitli yöntemlerle katkılanması sayesinde n-tipi yarıiletkenler oluşturulur [16]. Si ve Ge atomlarına beş değerlikli safsızlık atomları eklendiğinde Si ve Ge atomunun dört elektronu ile safsızlık atomunun dört elektronu birleşerek kovalent bağ oluşturur. Bağ yapamayan beşinci elektron da safsızlık atomuyla güçsüz bir bağ kurar. Güçsüz bağlanan elektronlar yasak enerji aralığında donör enerji seviyeleri oluştururlar. Bu enerji seviyesindeki atomlar küçük bir enerjiyle uyarılmaları sonucunda iletim bandına geçebilirler ve valans bandında boşluk oluşmaz. Buna ek olarak valans bandındaki elektronlardan da geçiş olabilir ve orada elektron geçişi kadar boşluk oluşur. Fakat iletkenlik bandına donör enerji seviyesinden ve valans bandından geçen elektronların sayısı, valans bandında oluşan boşluklardan fazladır. Böylece elektronlar, n tipi yarıiletkenler için çoğunluk taşıyıcıları olmaktadır [12]. Şekil 2.5.'te n tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu ve safsızlık enerji düzeyi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.5. n tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu ve safsızlık enerji düzeyi

2.2.2. p-tipi yarıiletkenler

p-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcılar boşluklardır ve safsızlık atomları akseptör yani elektron alıcı atomlardır. Periyodik cetvelin III. grup elementlerinden olan B, İn, Al gibi elementler IV. gruptaki Si ve Ge elementlerine katıldığında, Si ya da Ge elementlerinin dört değerlik elektronlarıyla safsızlık atomunun üç değerlik elektronu kovalent bağ yapar. Si ya da Ge dördüncü kovalent bağda elektron katkısını tek başına sağlar. Safsızlık atomundan bu bağa elektron gelmez. Böylece dördüncü kovalent bağda bir boşluk oluşur. Holl adı verilen bu boşluklar için safsızlık atomları bir elektron alır hale gelir. Bu safsızlık atomları, elektron alıcı atomlar olarak adlandırılır.



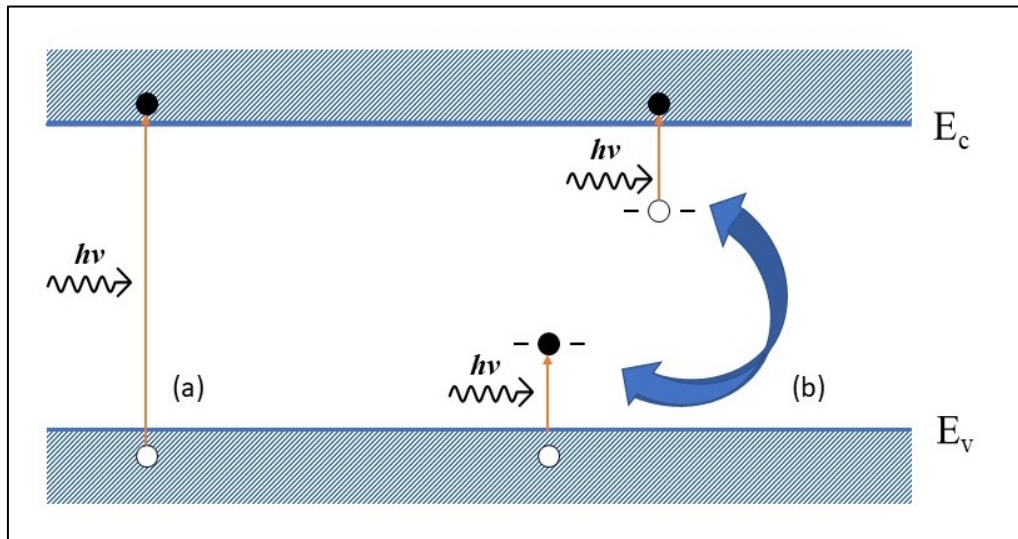
Şekil 2.6. p tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu ve safsızlık enerji düzeyi

Uygulanan voltajla p-tipi yarıiletkende hollerle elektronların yer değişimi hareketi nedeniyle bir iletim söz konusu olur ve p-tipi yarıiletkenlerde holler çoğunluk yük taşıyıcıları olarak tanımlanır [18]. Şekil 2.6.'da p tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu ve safsızlık enerji düzeyi şematik olarak görülmektedir.

2.3. Fotodiyotlar

Teknolojideki uygulama alanı oldukça geniş olan fotodiyotlar, ters besleme voltajı altında üzerine ışık düşmesiyle elektriksel bir iletim sağlayan devre elemanlarıdır. Üzerine ışık düşen fotodiyotta, fotonun enerjisi valans bandında bulunan elektronları uyarır ve iletim bandına geçen elektronlar sayesinde diyottan akım geçmesi sağlanır. Fotodiyotlar doğru beslemede tıpkı bir diyet davranışı sergilerler. Bir devrede fotodiyotlar, devreye ters bağlanır ve ters yönde oluşan sızıntı akımının artmasıyla devrede kontrolü yapmaktadırlar. Fotodiyotların içerisinde oluşan elektron boşluk çiftlerinin uyarılma etkisiyle hareketleri sonucunda bu kontrol sağlanmaktadır. Fotodiyotlardan geçen akım, gelen ışık şiddetiyle doğru orantılı bir şekilde değişmektedir [11, 15, 22].

Fotodiyotlar, kontaklarla ince filmlerin bir araya getirilmesi ve birbiriyle etkileşimiyle oluşturulmaktadır. Fotodiyotların ışığa olan yüksek duyarlılığı, yüksek cevap hızı, güvenilirliği ve az maliyetli bir devre elemanı olmaları önemli özelliklerindendir ve optik sistemlerinde tercih edilmektedirler [15, 19].

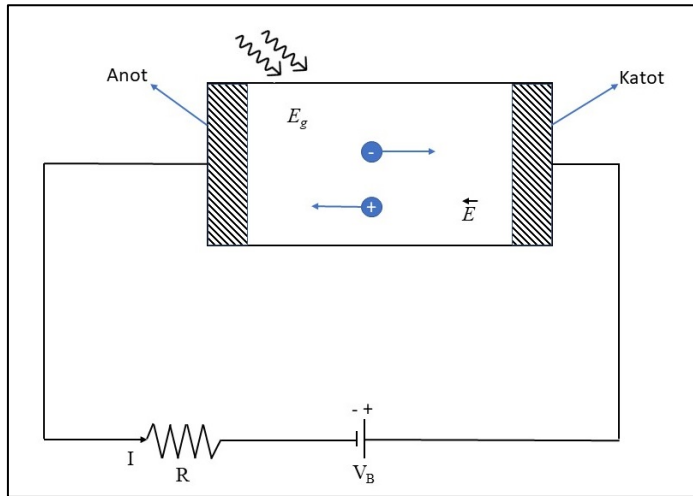


Şekil 2.7. Fotodiyotun fotonla uyarılması a) elektronun bantlar arası geçişi b) safsızlık enerji seviyesinden iletim bandına geçiş

Foton enerjisinin fotodiyottaki yükleri uyarmasıyla bantlar arasında gerçekleşen geçiş, Şekil 2.7’de görülmektedir. Burada gelen foton enerjisinin taşıyıcı yüklere etki etmesiyle elektriksel iletim gerçekleşmektedir [20].

Ters beslemde fotodiyotta fotoakım için, gelen fotonun enerjisinin engel yüksekliğinden büyük olması gerekmektedir. Soğrulan fotonun enerjisiyle elektron ve boşluk çiftleri hareket eder. Ters beslemde anota uygulanan anottan daha küçük bir ters besleme gerilimi yarıiletkenin yapısında bir elektrik alan oluşturur. Elektrik alanın etkisiyle anotta pozitif, katotta negatif yükler oluşur ve böylece devrede bir fotoakım oluşur. Şekil 2.8.’de bir fotodiyotun şematik gösterimi görülmektedir. Fotoakımın oluşma adımları şu şekilde sıralanabilir:

- Gelen fotonun malzeme tarafından soğurulması ve yük taşıyıcılarının oluşması.
- Elektrik alan altında yük taşıyıcılarının hareketi.
- Anot ve katot kontaklarında yük taşıyıcılarının bir araya gelmesidir [21, 15].

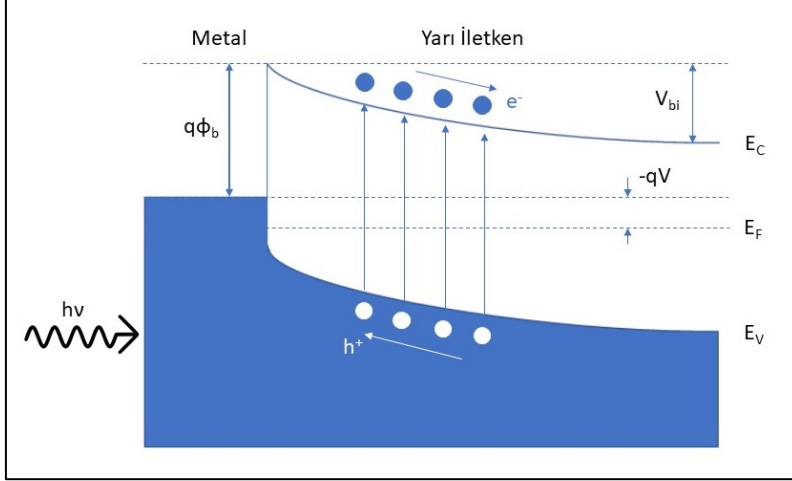


Şekil 2.8. Fotodiyot şematik gösterim

2.4. Metal Yarıiletken Fotodiyotlar

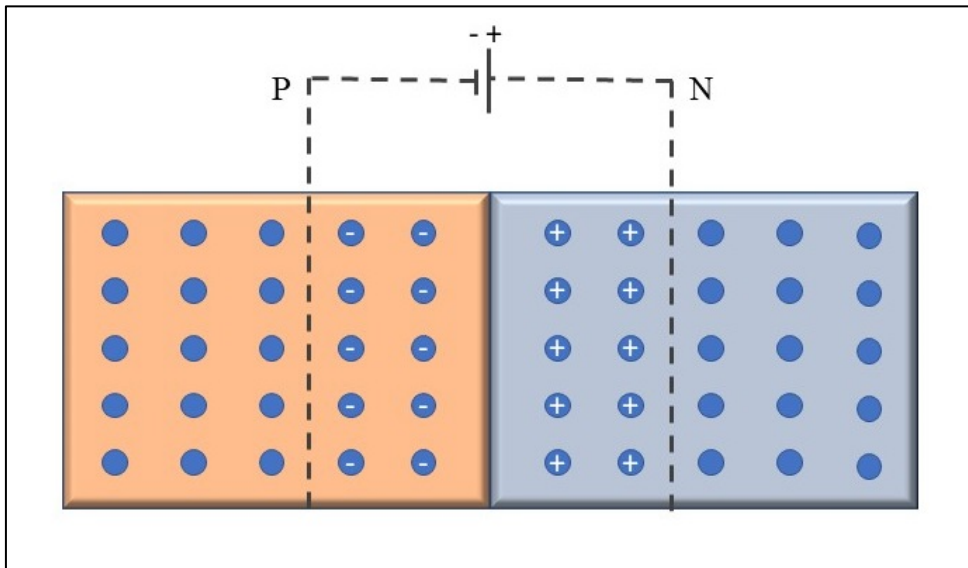
Bir yarıiletken ve bir metalin kontak oluşturularak bir araya getirilmesi sayesinde metal yarıiletken (MS) fotodiyotlar oluşur. Metal ve yarıiletkenin birleştirilmesiyle oluşan metal yarıiletken eklemine ait enerji bant diyagramı Şekil 2.9’ da verilmiştir. Metalin ve yarıiletkenin enerji bant diyagramları farklıdır ve bu iki malzemenin kontaklarla

birleştirilmeleri sonucunda aralarında yük geçişleri oluşmaktadır. Bu yük geçişleri fotodiyotun ısıl dengeye ulaşmasına kadar devam eder. Oluşan metal yarıiletken fotodiyotundaki metal ve yarıiletkenin Fermi enerji düzeyi ısıl denge sağlandığında aynı seviyededir [21].



Şekil 2.9. Metal ve yarıiletken eklemesinin aydınlatma altındaki şematik görünümü

Bir fotodiyotun tükenim bölgesindeki elektrik alanının oluşumunun şematik görüntüsü Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Fotodiyotta optik uyarılmayla tükenim bölgesinde yük taşıyıcıları oluşmakta ve yüksek bir elektrik alan oluşmaktadır. Bu elektrik alanın etkisiyle taşıyıcı yükler malzeme içerisinde hareket eder ve uç kısımda toplanırlar [20].



Şekil 2.10. Tükenim bölgesindeki elektrik alanının oluşumu

Diyotların çalışması için üç farklı çalışma modu:

- $E_g > h\nu > q\phi_b$ ve $V < V_B$ durumu için V_B engel geçme voltajı için tanımlanmıştır. Fotonla uyarılan fotodiyottaki metal elektronları, engel gerilimini aşabilir. Engeli geçen elektronlar yarıiletkende toplanırlar. Bu sayede metal yarıiletkende fotodiyotlarda engel yüksekliği belirlenebilmektedir. Aynı zamanda bu durum metaldeki sıcak elektron geçişinde kullanılmaktadır.
- $h\nu > E_g$ ve $V < V_B$ durumu için fotodiyot tarafından soğurulan foton enerjisi yarıiletkende elektron ve boşluk çiftleri oluşturur. Bu modda diyotun genel yapısı p-i-n fotodiyotuna benzemektedir.
- $h\nu > E_g$ ve $V > V_B$ durumu için fotodiyot çıkış bozulma bölgesinde çalışabilmektedir [11,15,20].

Bir diyotun kontak şekillerine ve yapısına göre fotodiyotlar:

- p-n eklem diyotlar
- Schottky diyotlar
- p-i-n diyotlar
- Heteroeklem diyotlar

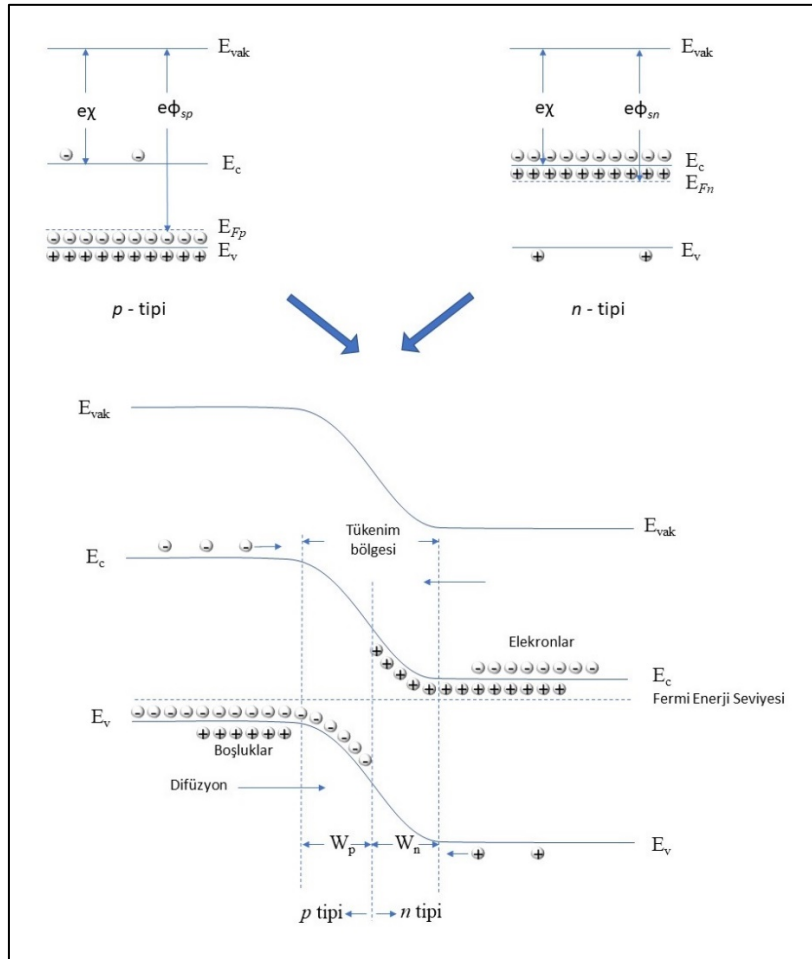
olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır [21].

2.5. p-n Eklem Diyotlar

p-n eklem diyotlar değişken kapasitörlerde, lazerlerde, dedektör olarak, transistörlerde sinyal üretiminde, dijital teknolojiye açma kapama anahtarları olarak kullanılmaktadır. Bu yarıiletkende cihazlar, yarıiletkenlerin optik ve iletkenliklerinin kolay ve hızlı bir şekilde değiştirilmesi prensibine göre çalışırlar. Bu da farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle sağlanır. p-n bağlantısının çalışma prensibini anlamak için malzemedeki elektronların ve boşlukların taşıyıcı dağılımını, yapıdaki akım geçişinden sorumlu fiziksel durumları bilinmelidir [23].

p-n eklemine gelen foton, yasak enerjiden büyük bir enerjiye sahip olduğunda diyot tarafından soğurulur ve diyotta elektron boşluk çiftleri oluşur. Elektrik alanının etkisiyle bu çiftler tükenim bölgesine sürüklenir, böylece bir akım oluşur. p tipi bir yarıiletken için bu durum doğru besleme için geçerlidir. Ters beslemde taşıyıcılar tükenim bölgesine uzak olduklarından akıma katkı sağlamazlar ve bu durumda diyottan küçük bir akım geçer [8,15].

p-tipi ve n-tipi yarıiletkenin pn eklemi oluşturmada önceki ve pn eklem oluşumundaki enerji bant diyagramları şekil 2.11’de görülmektedir. p-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi valans bandına yakın bir yerde iken n-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi iletim bandına yakın bir yerdedir. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenin, pn eklem oluşumu sırasında Fermi enerji seviyeleri birbirine eşitlenir. Eklem bölgesinde valans ve iletim bandlarında bir bükülme gerçekleşir [23].



Şekil 2.11. p-n eklem diyotunun şematik gösterimi

p-n diyotların farklı bir şekli de p-i-n diyotlardır. Bu diyotlar da hızlı cevap, kuantum verimliliği, tükenim bölgesinin kalınlığı gibi özelliklerinden dolayı fotodiyotlarda ve güneş pillerinde tercih edilebilmektedir [15].

2.6. Heteroeklem Diyotlar

Aynı yarıiletkenlerin p ve n tipinin meydana getirdiği eklem diyotlara homoeklem diyotlar denmektedir. Homoeklem için yük taşıma mekanizması, nötr kütledeki yük taşıyıcıların difüzyonudur. Heteroeklem diyotlarda yük taşınması yığın içinde ve ara yüzeyde engellerin ve kusur durumlarının varlığı, yük taşıma (akım akışı) mekanizmasını basit bir p-n homoekleminden daha karmaşık hale getirir [25]. Heteroeklem diyotlar, Si ve ZnO ya da Si ve ZnS gibi farklı yarıiletkenlerin bir araya gelmesiyle oluşan yapılardır. Bu diyotlardaki malzemelerin yasak enerji aralıkları, iletim ve valans bant kenarları, fermi enerji seviyeleri, durum yoğunlukları gibi değerleri birbirinden farklıdır [9].

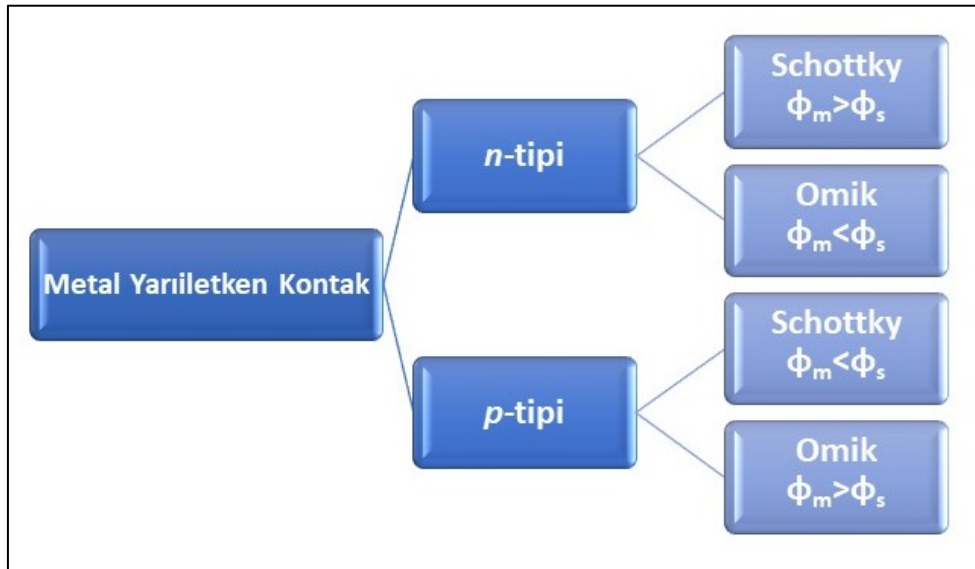
Heteroeklem yapıda iletkenlikleri aynı yarıiletkenler bir araya getirilmişse izotop, farklı iletkenliklere sahip yarıiletkenler bir araya getirilmişse anizotop heteroeklem olarak tanımlanmaktadır. Heteroeklem diyotların farklı cihazlarda önemli uygulamalarının bulunması, neredeyse hiç ara yüzey tuzakları olmadan izotop ya da anizotop heteroeklemler oluşturmak için epitaksiyel teknolojiden kaynaklanmaktadır. Heteroeklemlerin güneş pilleri, yarıiletken lazerler ve fotodedektörler olmak üzere önemli uygulama alanları vardır [21, 11].

Yarıiletken heteroeklemde akım akışını belirlemek için çeşitli modeller türetilmiştir. Anderson modeli, bunlar içinden heteroeklem yapısını anlamak için temel niteliğindedir. İlk denemede Ge-GaAs hetero yapısı için geliştirilen bu model, iletim ya da valans bant bariyerleri üzerine taşıyıcıların enjeksiyonuyla heteroeklemdeki akım akışını inceler. Heteroeklemdeki akım akışı yalnızca enjeksiyon değil, buna ek olarak ara yüzey rekombinasyonları ve tünellemenin bir toplamıdır [25].

2.7. Metal Yarıiletken Kontaklar

Metaller ve yarıiletkenler en az dirençle kontak edilerek kristallerin diyot parametreleri incelenebilmektedir. Farklı malzemelerle ve çeşitli tekniklerle üretilen diyotların diyot

karakteristiklerinin anlaşılabilmesi ve incelenebilmesi için uygun koşullarda kontak edilmesi gerekmektedir. İdeal kontak durumu sıfır dirençle kontaklıdır. Bunun için malzeme yüzeyi pürüzsüz ve iyi temizlenmiş olmalıdır. Bu durum kontakın ideal olma durumunu doğrudan etkilemektedir. Kontak edilen malzemelerin Fermi enerji düzeylerindeki fark nedeniyle metal ve yarıiletkenin enerji bantlarında bükülme meydana gelir. Malzemelerden birindeki elektronların Fermi enerji seviyesi diğerinden daha yüksektir ve yüksek enerjili elektronlar diğer malzemeye geçme eğilimindedir. Metal yarıiletken malzemelerde kontak oluşumu malzemelerin iş fonksiyonuna bağlıdır. İş fonksiyonuna göre iki farklı türde kontak oluşur. Bu kontaklar doğrultucu (Schottky) ve omik kontaklar olmak üzere tanımlanır [28,29,30,31].



Şekil 2.12. Doğrultucu ve omik kontaklar

Doğrultucu ve omik kontakların metalin n-tipi ya da p-tipi yarıiletkenle kontak ettirilmesiyle metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının durumu birbirinden farklılaşmaktadır. Şekil 2.12’de doğrultucu ve omik kontakların metal ve yarıiletken iş fonksiyonunun yarıiletkenin tipine göre durumları gösterilmiştir. Metal n-tipi bir yarıiletkenle kontak edildiğinde metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu durumda doğrultucu kontak, küçük olduğu durumda omik kontak olarak adlandırılır. p-tipi yarıiletkende ise metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu durumda omik kontak, küçük olduğu durumda ise doğrultucu kontak oluşur. Omik kontaklarda akım taşıyıcılarının malzemeler arasındaki geçişleri rahat hareket edebilir şekildedir, doğrultucu kontaklarda ise kontak yapıldıktan sonra oluşan engel

nedeniyle akım taşıyıcılar tek bir doğrultuda yani metalden yarıiletken ya da yarıiletken metale doğru zıt yönde rahat ilerleyebilmektedir [28,29,30,31].

2.8. Metal p-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Walter Hans Schottky'nin bariyer oluşumu için tanımladığı modelden sonra metal yarıiletken doğrultucu kontaklar Schottky bariyer olarak adlandırılmıştır. Aslında yarıiletken diyotlarla ilgili bilgi daha eskiye dayanmaktadır. 1874'te F. Braun demir, bakır, kurşun sülfür kristallerinin metalik kontak yapılarını tanımlamıştır. O tarihten itibaren birçok teorik ve deneysel çalışma yapılmasına karşın metal yarıiletken eklemeler hakkında bilgi tamamlanmış değildir. Bu da aslında diyotların çalışma verimlerinin sürece bağlı olmasıyla ilişkilidir [26].

Bir metal ve belli bir tipteki yarıiletken malzeme kontak edildiğinde, fermi enerji seviyesinin sürekliliğine göre bu iki malzemenin fermi enerji seviyelerinde çakışma olur. Örneğin n-tipi bir yarıiletken için metaldeki negatif yüklerle yarıiletkendeki pozitif yükler arasında malzemelerin fermi seviyelerindeki değişime neticesinde yük dipolü oluşacaktır. Pozitif yükler, n tipi yarıiletken, yüzeyden ayrılan elektronlardan dolayıdır ve ara yüzeyde telafi edilmemiş büyük bir donör uzay yükü yoğunluğu oluşturur. Donör iyonların yoğunluğu metaldeki elektronlardan çok küçük olduğundan, bu dengeleyici yükler tükenme bölgesindeki yarıiletken tabakasında yer almakta ve neticede yarıiletken enerji bantlarının yukarı doğru bükülmesine neden olmaktadır. Metal yarıiletken ara yüzeyinde oluşan bu bariyere Schottky bariyer denilmektedir [27].

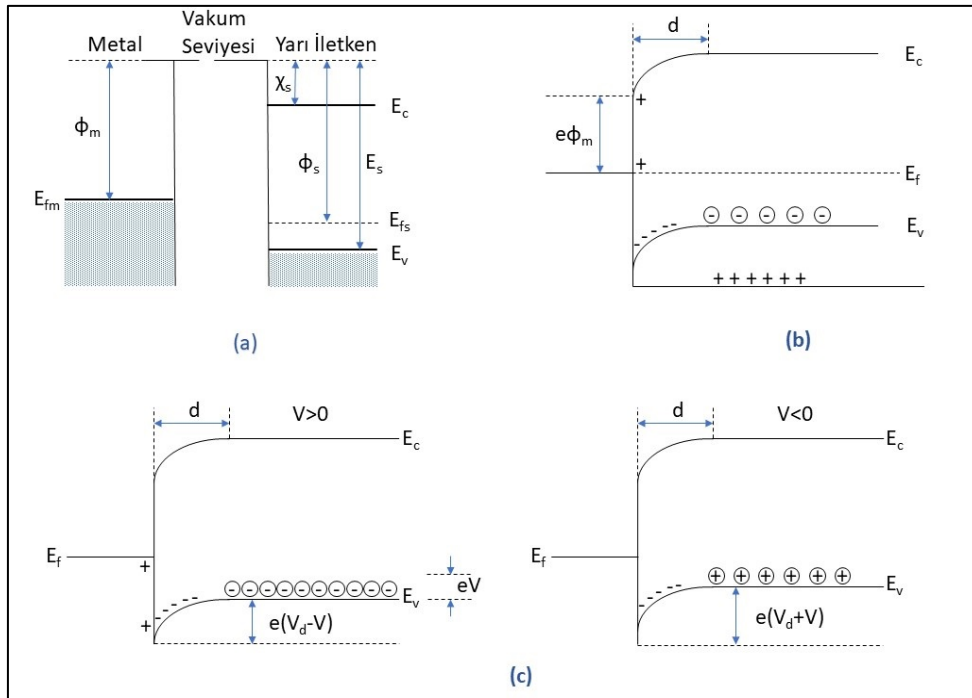
Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları incelendiğinde metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olması ($\Phi_m < \Phi_s$) durumunda p-tipi doğrultucu kontak oluşmaktadır. Metalle yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri arasında $\Phi_s - \Phi_m$ kadar fark vardır. İki malzeme için de denge durumu söz konusu olana kadar metalden yarıiletken elektronlar hareket eder. Yarıiletkende bulunan holler gelen elektronlarla iyonlaşırlar ve yarıiletkende negatif yükler oluşur. Yarıiletkendeki negatif yüzey tabakasında iyonize edilmiş alıcılar vardır. Bu tabakadaki alıcılar d kalınlığında uzay yükü tabakasında dağılırlar. Yarıiletken malzemede $\Phi_s - \Phi_m$ kadar farktan dolayı enerji seviyeleri yükseldiğinden yarıiletkendeki hollerin yüzey engeli;

$$eV_{dif} = \Phi_s - \Phi_m \quad (2.1)$$

Eş. 2.1’de verilmektedir. Holler için kontağın metal kısmındaki potansiyel engeli;

$$e\Phi_b = e(E_s - \Phi_m) \quad (2.2)$$

Eş. 2.2’de verilmektedir. Malzemenin termal uyarılmasıyla yarıiletkende bulunan bazı holler potansiyel engelin üzerinde bir enerji kazanıp metale geçebilmektedir. Aynı durum metal için de geçerlidir. Metaldeki holler de potansiyel engelin üzerinde bir enerjiye sahip olarak engeli aşabilir ve yarıiletkene geçebilir. Bu davranış nedeniyle engel üzerinden akan eşit ama zıt yönlü I_0 akımları oluşmaktadır. Bu durumda yarıiletkene uygulanan bir V gerilimiyle metalden yarıiletkene geçen akım değişmezken yarıiletkenden metale geçen holl akımında $\exp(eV/kT)$ çarpan kadar bir değişim gerçekleşmektedir. Şekil 2.13’te görüldüğü gibi uygulanan voltaja bağlı olarak ($V>0$ ve $V<0$) enerji bant diyagramları değişmektedir. $V>0$ durumunda p-tipi yarıiletken malzemede hollerin engel yüksekliğinde eV miktarında azalma gerçekleşir. $V<0$ durumunda yani ters voltaj uygulandığında holler için engel yüksekliği eV kadar artar. Metaldeki hollerin engel yüksekliğinde değişme olmamaktadır.



Şekil 2.13. a) Kontak yapılmadan önce, b) kontak yapıldıktan sonra c) $V \neq 0$ durumları için metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramları

Yarıiletkenden metale geçen hollerin akımının doğrultusu pozitif alınacak olursa akım-gerilim ifadesi;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

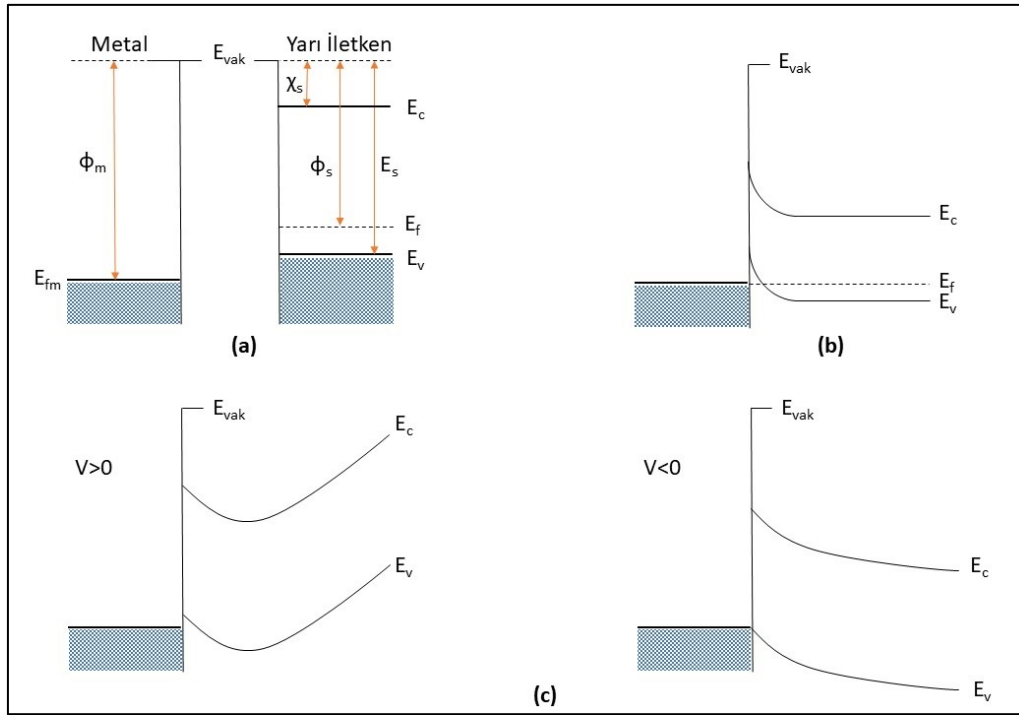
Eş. 2.3'te belirtilmektedir. Akımın bir yönden diğerine kıyasla daha büyük olduğu durum doğrultucu kontak durumunu ifade eder. Bu nedenle bu bir doğrultucu kontak olarak tanımlanmaktadır. Buradaki ifadede, I_0 doyma akımı, V uygulanan gerilim, k Boltzman sabiti ve T mutlak sıcaklık olarak belirtilmektedir [34, 35, 36]. Şekil 2.13.'te metal ve p-tipi yarıiletken doğrultucu kantağın enerji bant diyagramları verilmiştir.

2.9. Metal p-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Orta derecede katkılı yarıiletkenin üzerindeki metal kontaklar genellikle doğrultucu kontaklardır. Bu davranış neredeyse tüm yarıiletkenlerin bölümlerinin temel bant boşlukları içinde yer almasından kaynaklanmaktadır. Yeterince büyük engel yüksekliğindeki mevcut taşıma sonrası engel üzerinde termiyonik emisyon tarafından yönetilmektedir. Bununla birlikte engel yüksekliği 0,3 eV'un altına düştüğünde akım gerilim karakteristikleri omik hâle gelecektir. Yarıiletkenin katkı seviyesi arttıkça bunun sonucu olarak tükenme katmanının daralması, tünelleme ya da engel boyunca alan emisyonu daha önemli hâle gelmektedir. Buna bağlı olarak yüksek miktarda katkılı yarıiletkenler üzerindeki metal kontakların akım gerilim özellikleri omik davranış sergiler. Bununla birlikte bazı metal yarıiletken kontaklar omik davranış gösterirler. Bant kenarlarından birine yakın olan ya da bulk yapıdaki bantlardan biriyle sapma noktalarına sahip yarıiletkenler, yarıiletken alt tabakanın katkı tipine göre metal kontaklar doğal omiktir [32].

Omik kontak, p tipi, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu kıyaslandığında metalin iş fonksiyonunun yarıiletkeninkinden büyük ($\Phi_m > \Phi_s$) olduğu durumdur. Doğrultucu kontaklarda ters yönde elektronlar, oluşan potansiyel engelden dolayı hareket edemezken, omik kontaklarda gerilimin yönüne bağlı olmaksızın iki malzeme arasında her yönde elektron akışı mevcuttur. Şekil 2.14.a'da yarıiletken ve metal kontak edilmeden önce yarıiletkenin E_F metalinkinden $\Phi_m - \Phi_s$ farkı kadar yukarıdadır. Şekil 2.14.b'de

görüldüğü gibi p-tipi yarı iletkenin ayrılıp metale geçen elektronlar, yarı iletkenin elektron sayısında azalmaya neden olur. Yarı iletkenin Fermi enerji düzeyi, bu nedenden dolayı $\Phi_m - \Phi_s$ miktarı kadar aşağıya iner. Şekil 2.14.c’de görüldüğü gibi $V > 0$ durumunda yarıiletkenin hollerin metale ve metalden de yarıiletkenine elektronların geçişi olur. $V < 0$ olduğu durumda yani ters voltaj uygulandığında metalin iletkenlik bandında bulunan holler yarıiletkenine kolayca geçerek hollerin sayısını artırır [33].



Şekil 2.14. a) Kontak yapılmadan önce, b) kontak yapıldıktan sonra c) $V \neq 0$ durumları için metal/p-tipi yarıiletken omik kontak için enerji-bant diyagramları

2.10. Termiyonik Emisyon Teorisi

Hans Bethe tarafından 1942’de geliştirilen termiyonik emisyon teorisi, bir yarıiletken ve metalin birleştirilmesinden oluşan bağlantı yoluyla elektronların taşınmasını doğru bir şekilde ifade eden yarı klasik bir yaklaşımdır. Bu teoride dikkate alınan parametreler sıcaklık, enerji, bariyeri yüksekliği, yarıiletken ve metalin uzak uçları arasındaki gerilimdir [37].

Bethe’nin termiyonik emisyon teorisinde metal ve yarıiletken arasındaki ara yüzey boyunca akımı sınırlayan sürecin, elektronların fiili transferi olduğu varsayımı yapılır [38].

Metalden yarıiletken ya da yarıiletkenden metale geçen taşıyıcılar, termal enerjinin etkisiyle potansiyel engeli (Φ_b) aşarak ilerler. Termiyonik emisyon teorisi akımın çoğunluk taşıyıcıları sayesinde iletildiğini kabul eder ve bu doğrultuda belli yaklaşımları vardır. Doğrultucu kontağın potansiyeline ait enerjinin, kT ya da kT/q 'dan daha büyük olduğu kabul edilmektedir [39,40]. Termiyonik emisyon teorisindeki varsayımlar sıralanacak olursa:

- Engel yüksekliğinin değeri kT/q enerjisinden çok büyüktür.
- Tüketim bölgesi yani engeldeki taşıyıcı çarpışmalarının olmadığı kabul edilir.
- Engelin biçimi önem arz etmemekle birlikte görüntü kuvvetlerinin etkisi de ihmal edilmektedir.

Teoriye göre akım yoğunluğu metalden yarıiletken J_{ms} , yarıiletkenden metale doğru da J_{sm} olmak üzere ifade edilir. Varsayılan engel yüksekliğini geçerek metale ulaşmaya çalışan elektronların akım yoğunluğu:

$$J_{sm} = \int_{E_c}^{\infty} qV_x d_n \quad (2.4)$$

Eş. 2.4 şeklinde ifade edilmektedir. Burada q yükü, E_c elektronların metale geçmek için gerekli minimum enerjiyi verir. V_x elektronların pozitif x yönündeki yani taşınma yönündeki hızını vermektedir. Küçük bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu d_n ile ifade edilmektedir.

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left[\frac{-q\Phi_b}{kT}\right] \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.5)$$

Eş. 2.5'teki ifadede yer alan T mutlak sıcaklık, k Boltzman sabiti, Φ_b engel yüksekliği, A^* ise Richardson sabitidir.

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.6)$$

Eş. 2.6.'da ifade edilir. Bu denklemde h Plank sabiti, m^* ise taşıyıcının etkin kütlesini vermektedir.

Metalden yarıiletkeneye geçen akımın akım yoğunluğunda gerilim etkisi yoktur ve;

$$J_{ms} = -A^*T^2 \exp \left[\frac{-q\Phi_b}{kT} \right] \quad (2.7)$$

Eş. 2.7 şeklinde ifade edilir. Metalden yarıiletkeneye ya da yarıiletkenden metale olan akım yoğunluklarının net ifadesine ulaşabilmek için iki bölgenin akım yoğunlukları toplandığında net akım yoğunluğu:

$$J_n = A^*T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{bn}}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

Eş 2.8 şeklinde olacaktır. Bu denklemde köşeli paranteze kadar olan kısım doyma akım yoğunluğunu ifade etmektedir. Ters beslem doyma akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_0 = A^*T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{bn}}{kT} \right) \quad (2.9)$$

Eş 2.9'da görülmektedir. Bu durumda toplam akım yoğunluğu;

$$J = J_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

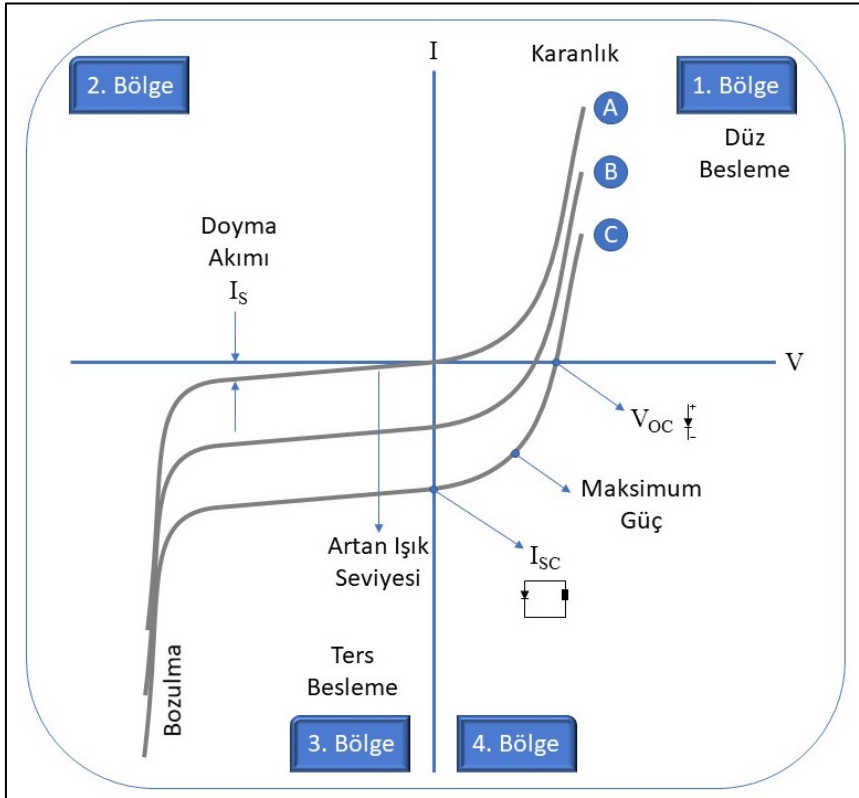
Eş 2.10' da ifade edilmektedir [39, 40, 41]

2.11. Fotodiyotlarda Akım Voltaj Karakteristiği

Fotodiyotlar için akım voltaj karakteristikleri eklem üzerinden geçen akım mekanizmalarıyla tanımlanır. Bir fotodiyotun çalışma prensibi normal diyotun çalışmasına benzemektedir. Fotodiyotlar yeterli miktarda ışık aldığı anda ters beslemde çalışmaya başlar. Gelen ışık fotodiyotta zayıf bir akım oluşturur. Fotodiyota uygulanan voltajla birlikte devrede oluşan yük direncinin de etkisiyle bir fotoakım oluşur. Fotodiyot üzerine ışık düşmediğinde, akan akıma karanlık akım denilmektedir. Karanlık akım termal etkiyle

gerçekleşen akımdır ve bir fotodiyot için karanlık akımın az olması fotodiyotun yüksek duyarlılığa sahip olduğunu göstermektedir [14, 11].

Bir fotodiyotun doğru akımı incelendiğinde diyot için önemli olan engel yüksekliği, ters besleme doyma akımı, idealite faktörü ve seri direnç gibi parametreler doğru besleme bölgesinde yapılan hesaplamalarla bulunabilir. Gerilimin sıfır olduğu duruma karşılık gelen akım ters besleme doyma akımıdır. Engel yüksekliği de bu durumda hesaplanabilmektedir. İdealite faktörü de $\ln I-V$ eğrisinde doğru beslemdeki lineerliğin eğimi alınarak hesaplanmaktadır [11].



Şekil 2.15. Bir fotodiyotun aydınlık ve karanlık durumları için I-V karakteristikleri

Bir fotodiyot için, akım voltaj karakteristiği, bant genişliği karakteristiği, kuantum verimi karakteristiği olmak üzere üç farklı karakteristik tanımlanır ve bu karakterizasyonlar diyotun performansını değerlendirmede etkilidir. Şekil 2.15.'de fotodiyotun aydınlık ve karanlık durumlarındaki akım gerilim karakteristiği gösterilmektedir. C, B eğrileri aydınlık durumları, A eğrisi de karanlık durumdaki akım gerilim karakteristiğini vermektedir. Birinci bölge doğru beslem bölgesi olduğundan normal diyot gibi tepki vereceğinden fotodiyot uygulamalarında uygun değildir. İkinci bölge için fotodiyotların uygulamalarında

bir cevap bulunmamaktadır. Üçüncü bölgede fotodiyot için küçük bir doyma akımı I_s mevcuttur. Işığın artmasıyla üçüncü bölgede akım artar. Ters gerilimin olduğu bu bölge ışığı algılamak için uygundur. Dördüncü bölge de fotovoltaiik bölgedir [47].

Diyotun termiyonik emisyon teorisiyle idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanabilmektedir. Bunun için I - V ölçümlerinden ve bu ölçümlerle çizilmiş $\ln I$ - V grafiğinden yararlanılmaktadır.

İdeal bir diyot için idealite faktörü 1 olarak tanımlanmaktadır. Diyotların ideallik özelliklerinin değerlendirilmesinde bu parametreden yararlanılır. Seri direncin etkisiyle de idealite faktörünün değeri 1'den büyük olabilmektedir. Termiyonik emisyon teorisine göre akım ve uygulanan gerilim arasındaki bağıntı $V \geq 3kT/q$ olduğu durumda;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_d}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.11)$$

şeklindedir. V_d diyota uygulanan gerilim, n idealite faktörü, k Boltzman sabiti, T kelvin cinsinden sıcaklık, q elektronun yükü ve I_0 'da doyma akımıdır. Eş.2.11'in her iki tarafının da $\ln$ 'i alınır. Daha sonrasında Eş.2.11'in V 'ye göre diferansiyeli alınıp gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (2.12)$$

idealite faktörü için Eş.2.12 elde edilir. $\ln I$ - V grafiğinin doğru beslemdeki eğrinin lineer kısmının fit edilmesiyle oluşturulan doğrunun eğiminden idealite faktörü ve doğrunun düşey ekseninde kestiği akım değerinden faydalanılarak da engel yüksekliği hesaplanmaktadır.

Doğru beslemdeki gerilimin sıfır olduğu durumda düşey ekseninde doğrunun kestiği nokta doyma akım değeri olarak tanımlanan I_0 değerini vermektedir. I_0 doyma akımı Eş.2.13'te;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_b}{kT} \right) \quad (2.13)$$

tanımlanmaktadır. Φ_b sıfır gerilimdeki engel yüksekliği, A diyot alanı olarak tanımlanır. Eş.2.13'ün her iki tarafının $\ln$ 'i alınıp Φ_b 'ye göre düzenlemeler yapıldığında;

$$\Phi_{b_0} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{AA^*T^2}{I_0} \right] \quad (2.14)$$

Eş.2.14 engel yüksekliği ifadesi tanımlanmaktadır [45, 46].

2.12. Norde Yöntemi

Bir Schottky diyot için akım gerilim ilişkisi, en genel olarak termiyonik emisyon teorisine göre tanımlanmaktadır. $n=1$ için;

$$I = I_0 [\exp(\beta V_d) - 1] \quad (2.15)$$

Eş 2.15.'te $\beta=q/kT$ ve V_d bağlantı noktasının voltajıdır [42].

$$I_0 = AA^*T^2 \exp(-\beta \Phi_b) \quad (2.16)$$

Eş.2.16'da A diyot alanı, A^* Richardsson sabiti, Φ_b bariyer yüksekliği ve T mutlak sıcaklıktır. Φ_b engel yüksekliği $\ln I-V$ grafiğinden tanımlanabilmektedir. Grafikte kT/q değerinden daha büyük voltaj değerlerinde lineer bir çizgi görülecektir. Sıfır voltaja karşılık gelen akım değeri de I_0 verir. Eş 2.14'te I_0 yerine yazıldığında Φ_b hesaplanabilir.

Diyotların seri direnç ve engel yüksekliği değerlerinin n değeri 1 olduğu durum için Norde yöntemi, $F(V)$ fonksiyonundan faydalanarak bulmayı hedefler. Parametre değerlerinin elde edilmesinde $F(V)-V$ grafiğinin minimum noktasından yararlanılmaktadır. Norde yönteminde parametreler sıcaklık değişiminden bağımsız olarak değerlendirildiğinden tek bir sıcaklık değerindeki $I-V$ grafiği engel yüksekliği ve seri direnç hesaplaması için yeterli olmaktadır. Termiyonik emisyon teorisindeki akım eşitliği;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

Eş 2.17. şeklinde olur. V geriliminin bir kısmının seri dirence gitmesi nedeniyle;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V - IR)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.18)$$

Eş 2.18. şeklinde ifade edilir [44]. Bununla birlikte malzeme diyota yüksek bir seri direnç gösterirse;

$$\frac{kT}{q} \ll V \ll IR \quad (2.19)$$

Eş 2.19.'daki R çok büyükse bu aralık güvenilir I_0 değerini vermek için çok küçük olacaktır. Ayrıca, V 'nin küçük olduğu bir aralık kullanmaya zorlandığından, diyottaki rekombinasyon akımı toplam akımın önemli bir parçası olabilir, bu durum da tahmin edilen I_0 değerini daha da güvenilirmez hâle getirir. Norde, seri dirençle ilgili problemin çoğu durumda fonksiyonun bir grafiği kullanılarak çözülebilir olduğunu ifade etmiştir [43].

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.20)$$

Eş. 2.17' nin iki tarafının da $\ln$ 'i alınarak Eş. 2.20' de yerine yazıldığında;

$$F(V) = \left(\frac{n-2}{2n}\right)V + \frac{IR}{n} + \Phi_b \quad (2.21)$$

Eş. 2.21 elde edilir. Bu denklemde $R=0$ durumunda $F(V)$ - V grafiğinin eğimi $(n-2)/2n$ olmaktadır. Bununla birlikte engel yüksekliği, $F(V)$ lineer doğrusunun gerilim eksenini sıfırda kestiği noktadır. Eğer seri direnç değeri sıfırdan farklıysa $F(V)$ fonksiyonunun bir minimumu vardır. Buradan çeşitli türev işlemleri yapıldığında seri direnç ve engel yüksekliği;

$$R_s = \frac{(2-n)kT}{Iq} \quad (2.22)$$

$$\Phi_b = F(V)_{min} + \left(\frac{2-n}{2n} \right) \frac{V_0}{2} - \frac{kT}{q} \quad (2.23)$$

Eş. 2.22 ve Eş. 2.23 şeklinde olmaktadır [44]. İdealite faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda Norde fonksiyonu yeniden düzenlendiğinde $V/2$ ifadesinin yerine V/γ ifadesi kullanılmıştır. Bu ifadede γ değeri idealite faktörü değerinden büyük ilk tam sayı olarak seçilmektedir. Norde fonksiyonunun idealite faktörü büyük olan diyotlar için düzenlenmesiyle engel yüksekliği ve seri direnç değerleri daha doğru değerlerle belirlenmesi sağlanmaktadır. Düzenlenmiş Norde fonksiyonu;

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (2.24)$$

Eş. 2.17'nin $\ln$ 'i alınıp Eş. 2.24'de yerine yazıldığında;

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V + \Phi_{bn} + \frac{IR}{n} \quad (2.25)$$

Eş. 2.25 şeklinde tanımlanır. Eş. 2.25 V 'ye göre türev alınıp düzenlendiğinde;

$$\Phi_b = F(V_0, \gamma) - \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V_0 - \frac{(\gamma - n)}{\beta n} \quad (2.26)$$

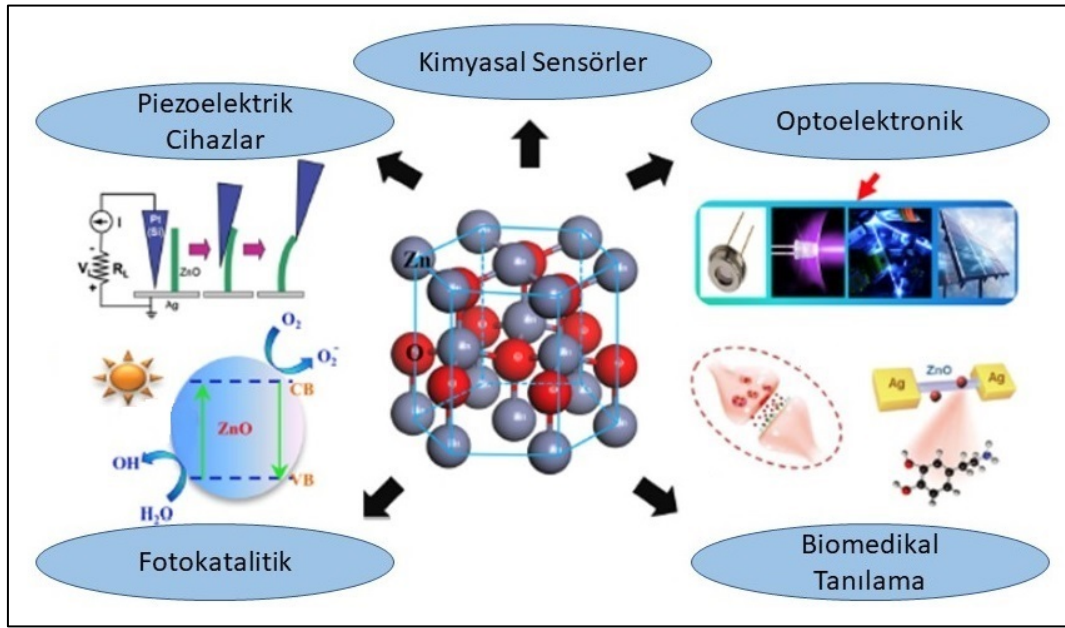
$$R_s = \left(\frac{\gamma - n}{\beta I_0} \right) \quad (2.27)$$

Eş. 2.26 ve Eş. 2.27'deki engel yüksekliği ve seri direnç ifadeleri elde edilir.

2.13. ZnO Özellikleri

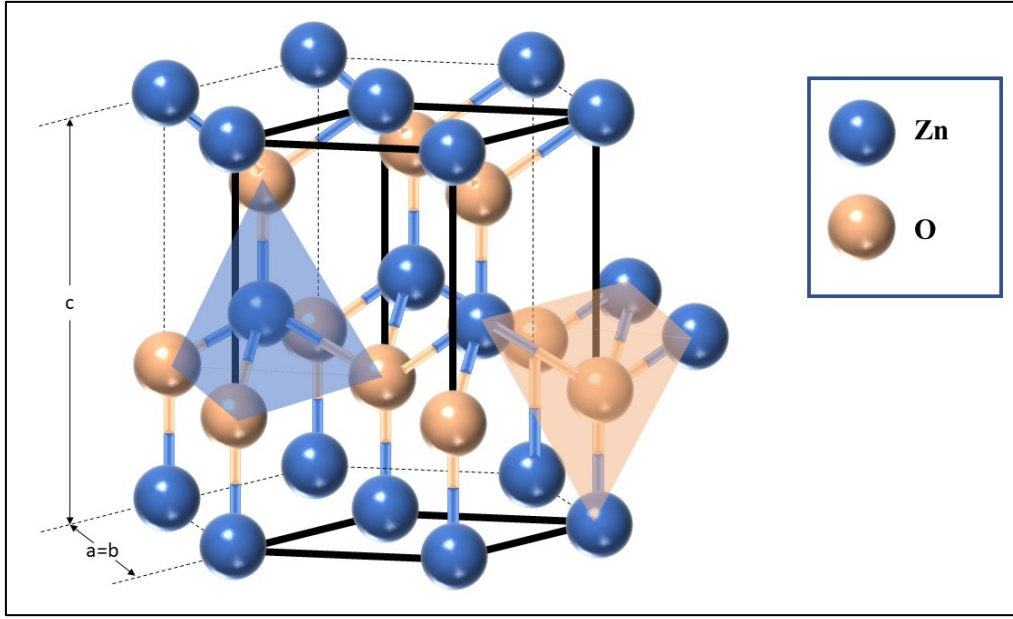
Periyodik cetvelin II-VI grubu yarıiletkenlerinden olan ve geniş bant aralığına sahip (3,3 eV) çinko oksit; kimyasal kararlılık, biyouyumluluk, görünür bölgede optik şeffaflık, doğrusal olmayan yüksek voltaj akımı, piezoelektrik gibi üstün ve farklı özelliklerinden dolayı malzemeler içinde benzersiz bir konuma sahiptir. Eksiton enerjisinin yüksek olması (ZnO $E_{ex} = 60$ meV; GaN, $E_{ex} = 26$ meV) nedeniyle de GaN malzemesinden daha parlak

bir emitördür. Örgü parametreleri $a=0,325$ nm ve $c=0,521$ nm olarak tanımlanır [48]. Diğer yarıiletken malzemelerle karşılaştırıldığında düşük maliyetli oluşu endüstriyel uygulamalar için oldukça avantaj sağlamakta ve iyi bir aday olmaktadır. Çeşitli fiziksel ve kimyasal tekniklerle mikro ya da nano yapıları ZnO malzemeler elde edilmektedir. ZnO yapıları malzemeler optoelektronik cihazlar, piezoelektrik aygıtlar, kimyasal sensörler, biyomedikal tanı araçları gibi birçok farklı alanda kullanabilmektedir [51]. ZnO 'in çeşitli uygulama alanları için şematik gösterim Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16. ZnO'nun çeşitli uygulama alanları [3]

Herhangi bir katkılama olmadan ZnO filmleri, yapıdaki çinko ara boşlukları ve oksijen boşlukları gibi doğal kusurların yanında donör gibi davranan hidrojen formundaki safsızlıkların varlığından dolayı n-tipi yapı göstermektedir. ZnO kristalindeki kırınım tepelerinin varlığı, hekzagonal wurtzite tipi bir polikristal yapıda olduğunu ve amorf faz tespit edilmediğini göstermektedir. ZnO kristal yapısının (100), (002), (101), (102) ve (110) yönelimlerine sahip olduğu ortaya çıkar [56, 49].



Şekil 2.17. Hekzagonal Wurtzite yapıdaki ZnO'nin kristal şekli.

ZnO wurtzite yapısı, kristal örgü parametreleri a ve c olan altıgen bir birim hücreye sahiptir. Şekil 2.17'de ZnO'nin hekzagonal wurtzite yapısı görülmektedir. ZnO, yarıiletken endüstrisinde önceliği hak eden birçok üstün özelliğe sahiptir. Çizelge 2.2'de ZnO'nin özelliklerinden bazıları görülmektedir. Geniş bant aralığı, büyük eksiton bağlanma enerjisi ve radyasyon hasarına karşı yüksek direnç ZnO'nin önemli özelliklerindendir. ZnO 1975 °C'lık bir erime noktasına sahiptir. Suda ve alkolde çözünmez, ancak seyreltik asitlerde çözülebilir [56].

Çizelge 2.2. ZnO özellikleri [3, 56]

Özellikleri	
Kristal Yapı	Hekzagonal wurtzite
Elektron bant aralığı (eV)	3,3
Eksiton bağlanma enerjisi (meV)	60
Örgü Parametreleri [$a=b$, c] (Å)	3,25 - 5,21
Yoğunluk (g/cm^3)	6,15
Geçiş tipi	Direkt
Bağıl Dielektrik sabiti	8,3
Elektron mobilitesi ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	200-300
Holl mobilitesi ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	≤ 50
Termal iletkenlik ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	~ 100

ZnO'in katı yapısında elektron mobilitesi 200-300 cm²/Vs aralığındadır. Ancak ZnO, ince film durumundayken arayüzey pürüzlülüğü ve tane sınır saçılmaları nedeniyle 1-100 cm²/Vs aralığındadır. ZnO tabanlı bipolar cihazların üretilmesinde yüksek kalitede, tekrarlanabilir ve güvenilir p-tipi ZnO elde etmenin zorluğu önemli bir engeldir. ZnO'te p-tipi katkılama, Zn bölgelerinin grup I elementleri ya da oksijen bölgelerinin grup V elementleri ile katkı edilmesiyle mümkündür. Nitrojen (N), V. grup elementleri arasında, oksijene kıyasla benzer atomik boyutundan dolayı p-tipi ZnO ince filmler oluşturmak için en uygundur. Fakat araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, fosfor (P), arsenik (As) ve antimon (Sb) gibi diğer V. grup elementleri tarafından başarılı bir p-tipi ZnO de belirtilmiştir [56].

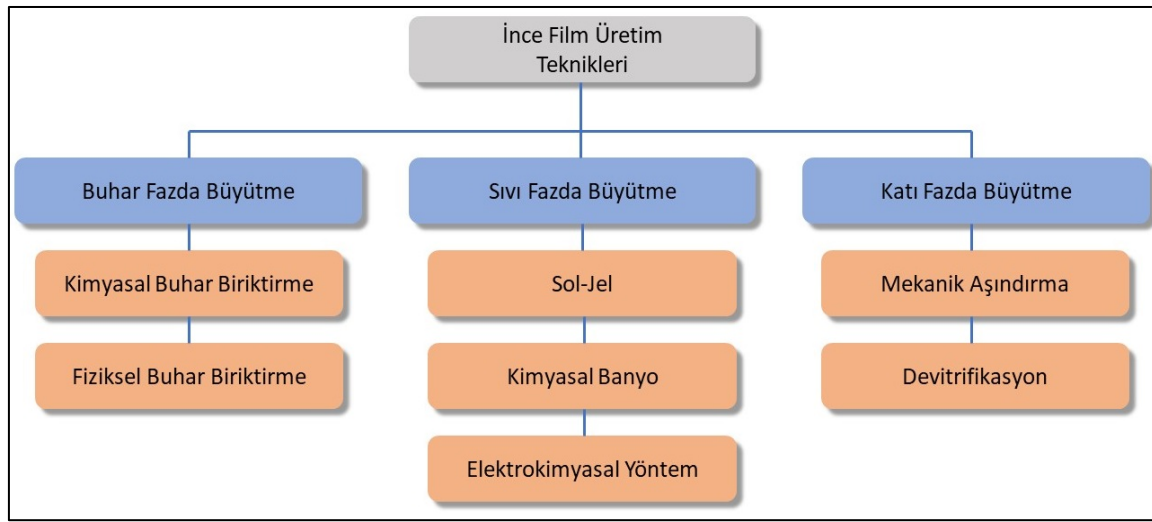
Saydam bir yarıiletken olan ZnO malzemesinin kendine has optik özelliklerinden dolayı optik aygıtlarda, fotonik uygulamalarda yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. ZnO nano çubuklar ve nano kabloların doğal olarak optik dalga klavuzu olarak kullanılabilmesi kırıcılık indisinin büyük olması ve silindimsi geometrisi sayesinde gerçekleşir [59].

Bir yarıiletken için iç ve dış etkiler, yarıiletkenin optik özelliklerini güçlü bir şekilde etkiler. İletim bandındaki elektronlar ile değerlik bandındaki holler arasında içsel geçişler meydana gelir. Bunlar aynı zamanda Coulomb etkileşiminden kaynaklanan eksitonik geçişi de içerir. Dışsal geçişler, bant aralığında ayrı elektronik durumlar oluşturan kusurlar ve katkılarla ilgilidir. ZnO yapısına daha geniş bir bant aralığına sahip başka bir malzemenin katkılanması, ZnO'in yasak bant aralığını daha da genişletebilir. Bu da ZnO malzemelerinin ışık verimini büyük ölçüde artırabilir. Örneğin, yapılan bir araştırmada Mg katkılanan ZnO yapısında Mg katkı miktarı arttıkça bant aralığının kademeli olarak arttığı görülmüştür [56,57].

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. SILAR Tekniği

İnce film üretme yöntemleri malzeme yüzeylerinde fiziksel, kimyasal değişimlerle yapılan kaplamaya ve kaplanacak yüzeylerin mekanik durumlarına bağlı olarak çeşitli alt gruplardan oluşmaktadır. Şekil 3.1.'de ince film üretim teknikleri verilmiştir. Buhar, sıvı ve katı faz olmak üzere üç ayrı fazda ince film üretilmektedir.



Şekil 3.1. İnce film üretim teknikleri

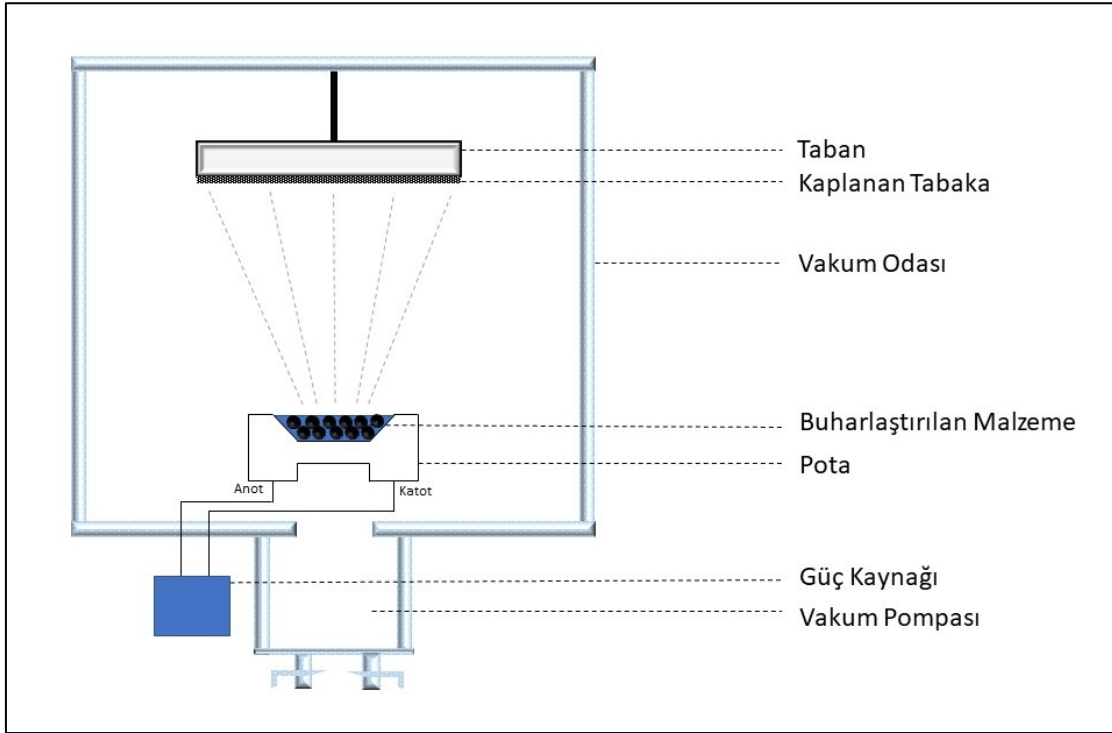
Bu tekniklerinden SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction), daha çevreci, daha kolay, daha ucuz olması ve uygun sıcaklık koşullarıyla endüstriyel uygulamalar için ayırt edici ve kullanışlı bir tekniktir. SILAR tekniğinde ince film tabakası, iyonik tabaka biriktirme ve reaksiyonları sayesinde oluşturulur. İnce film oluşturma sırasında herhangi bir çökme olmaması için belli aralıklarda malzeme deiyonize suyla durulanır. Biriktirme işlemi iki fazın bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Film, çözelti içine daldırılan alttaşı üzerinde alttaş ve çözelti içindeki iyonlar arasında gerçekleşen van-der waals kuvvetlerinin etkisiyle oluşur. Üretim aşamasında sıcaklık, döngü sayısı, basınç, yüzey alanı, alttaş özelliği ya da çözelti yoğunluğu gibi birçok faktör malzeme kalitesini etkilemektedir. Yöntemin oda sıcaklığında yapılabilmesi polyeater, yalıtkan ya da yarıiletken gibi farklı türden alttaş kullanımı için olanak sağlamaktadır. Bu durum alttaşın oksidasyon ya da korozyona uğramasını sağlar [51].

Katkısız ve katkılı ZnO ince filmler farklı tekniklerle alttaş üzerine büyütülmektedir. Bu çalışmada SILAR tekniği kullanılarak ZnO ince filmler, p-tipi Si üzerine büyütüldü. SILAR tekniği diğer tekniklerden bazı üstünlüklere sahiptir.

- Diğer yöntemlere göre daha kolay bir katkılama işlemi vardır.
- Alttaşın ya da vakum ortamının yüksek kalitede olması gerekmez.
- Film kalınlığı ve büyüme oranı, SILAR döngü sayısı ile kontrol edilebilmektedir.
- Büyütülen malzemeye zarar verebilecek bir ısınmaya neden olmaz.
- Alttaş, boyut ya da yüzeyler için bir sınırlama mevcut değildir.
- Geniş alanda, kolay ve ucuz üretim sağlamaktadır [50].

3.2. Fiziksel Buhar Biriktirme

Fiziksel buhar biriktirme tekniği 19. yüzyıldan beri bilinmesine karşın yarıiletken endüstrisinin de gelişmesiyle kendine yer bulabilmiş ve mikroelektronik, tıp, korozyon ve oksidasyona dirençli yapıların uygulamalarında kullanılmaktadır.



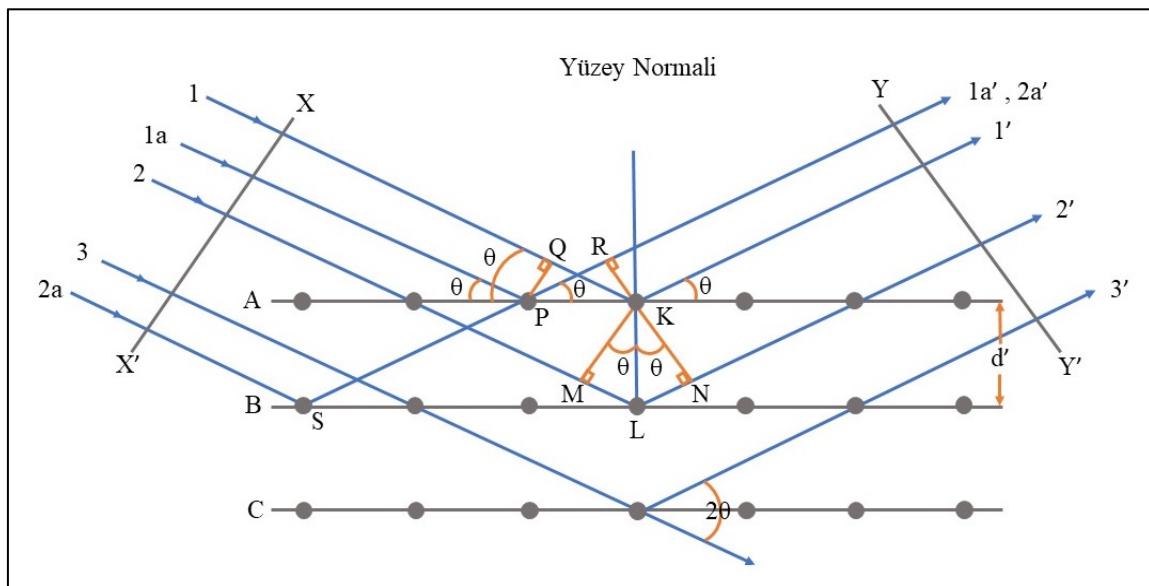
Şekil 3.2. Buhar biriktirme tekniğinin şematik gösterimi

Şekil 3.2.'de şematik gösterimi verilen buhar biriktirme tekniği, kaplayıcı malzemenin vakum ortamında ısıtılarak buharlaştırılmasıyla yüzeyden koparılan kaplayıcı malzemenin atomlarının alttaşın yüzeyinde biriktirilmesi prensibine dayanmaktadır. Maddelerin farklı kaynama, buharlaşma ve erime noktaları vardır. Kaplama yapılacak olan malzeme buharlaşma sıcaklığına kadar vakum ortamında ısıtılır ve daha soğuk olan alttaş üzerinde yoğunlaşarak yüzey üzerinde ince film tabakası oluşturur [52]. Bu çalışmada Al kontaklar fiziksel buhar biriktirme tekniği ile oluşturuldu.

3.3. X- Işını Kırınımı

1912'de Max von Laue ve 1913'te WL Bragg ve W.H. Bragg tarafından keşfedilen X-ışını kırınım kristalografisi toz numunelerdeki kristalin, tanecik yapısı, boyutu, yönelimi örgü sabiti, kimyasal yönelimi gibi yapısal karakterizasyonlarının belirlenmesinde oldukça önemli bir tekniktir. Özellikle rastgele yönetime sahip polikristallerin karakterizasyonunda kullanışlı bir yöntem olmaktadır [53, 54]. Bu çalışmada ZnO ince filmlerin yapısal analizi XRD ile yapıldı.

Şekil 3.3'de bir kristale gelen X-ışınlarının kırınımı şematik olarak görülmektedir. XRD ile dalga boyu sabit farklı açılardaki X-ışınlarını numune üzerine gönderilerek malzemede kırınıma uğrayan ışınlar dedekte edilmektedir.



Şekil 3.3. Kristaldeki X-ışınları kırınımı

Bilinen yöntem, Bragg açısını içeren Bragg yasası tarafından verilmektedir. Bragg yasası için geçerli iki geometrik ilişki;

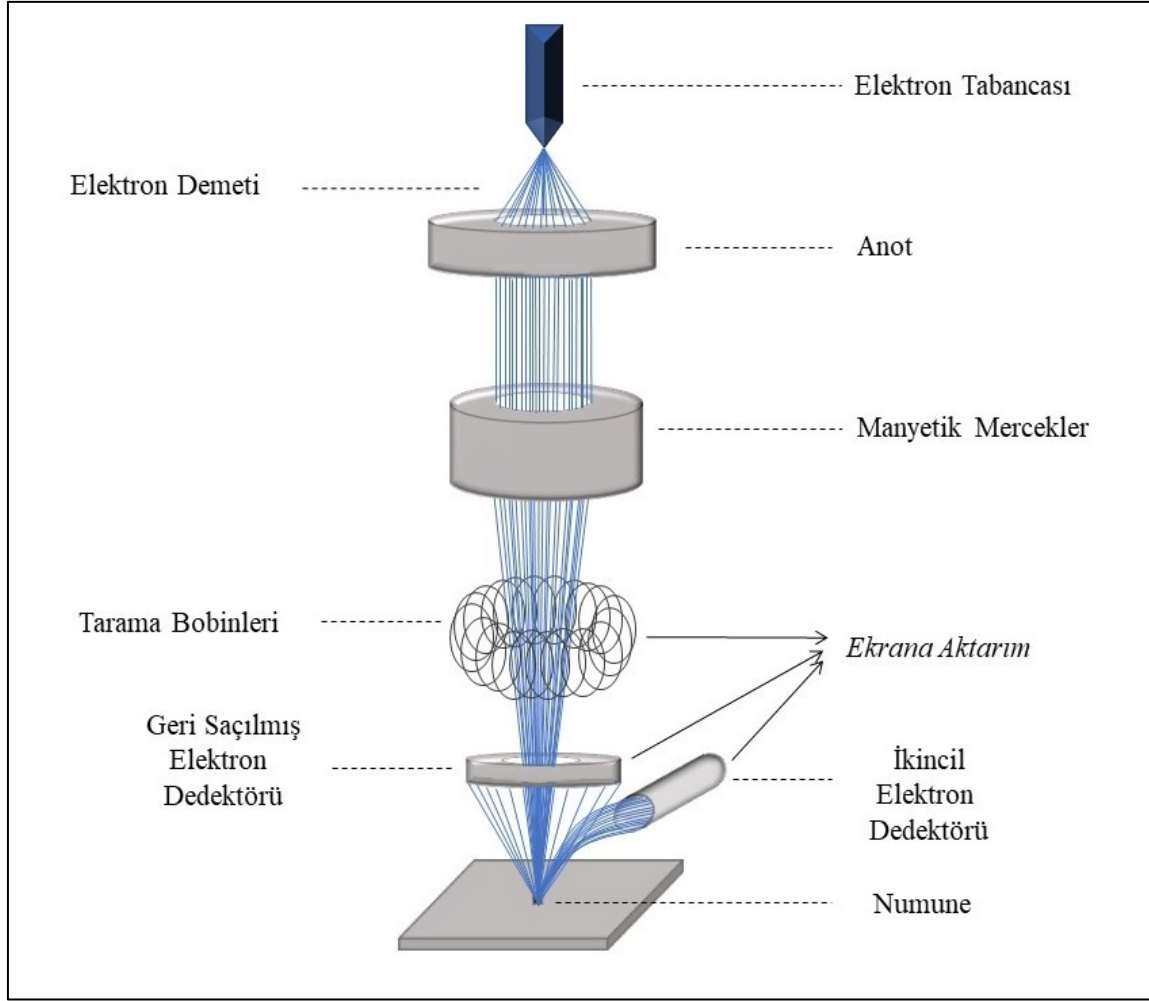
- Gelen X-ışını ile düzlem normali arasındaki açı, normalle kırılan X-ışını arasındaki açıya eşittir. Gelen X-ışını ve kırılan X-ışını eş düzlemlidir.
- Kırılan X-ışını ve iletilen X-ışını arasındaki açı her zaman 2θ 'dır ve bu açıya “kırınım açısı” denir [54].

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (n = 1,2,3,4) \quad (3.1)$$

Bragg yasası olarak bilinen Eş. 3.1.'de atom düzlemleri arasındaki mesafe d , kristale gelme açısı θ , x-ışını dalga boyu λ olarak ifade edilmektedir [55].

3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu

Knoll (1935)'un ilk taramalı elektron mikroskobu ve 30'larda von Ardenne tarafından gerçekleştirilen teorik gelişmelerden bu yana, bu görüntüleme tekniği, maddeyi karakterize etmek için tüm bilimsel alanlardaki araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektron mikroskobu sayesinde elde edilen bilgiler, maddenin tanımı ya da madde dönüşümünün anlaşılması için gerekli olsa da elektron mikroskobu ile ilgili temel kısıtlamalar, vakum altında çalışması ve görüntülemeden önce numunenin hazırlanması gerekliliğidir. SEM'de kullanılan temel elektron sinyalleri geri saçılan elektronlar ve ikincil elektronlardır. Malzeme bileşimindeki ve yüzey topografyasındaki farklılıklar, bu sinyallerin üretim aktarımını ve kaçışını etkiler. SEM'de oluşturulan görüntüler, elektron ışınının taranan alan içinde kısa bir süre kalmasıyla her noktada toplanan elektron sinyal yoğunluğundaki değişikliklerden kaynaklanır. Elektronların madde ile güçlü etkileşimlerine ek olarak, kütleleri ve yükleri onları istenilen yere yönlendirmeyi kolaylaştırır. Elektromanyetik alanlar mercekle gibi davranırlar ve ışık mikroskobunda cam mercekler gibi aynalar kullanılır [60].



Şekil 3.4. SEM'in temel bileşenlerinin şematik diyagramı

Şekil 3.4'te SEM'in temel bileşenlerinin şematik diyagramı görülmektedir. Temel bir taramalı elektron mikroskobu, elektron ışınlarını üreten bir elektron tabancasından oluşur. Elektromanyetik mercekler ışını yönlendirir ve odaklar. Dedektörler, numuneden gelen elektronları (doğrudan saçılma veya numuneden yayılan) toplar ve tespit edilen elektronun enerjisi, yoğunluğu ve emisyonun yeri ile birlikte görüntüyü bir araya getirmek için kullanılır. Günümüzde SEM ayrıca, gelen elektronların numunenin atomları ile etkileşimleri nedeniyle numuneden yayılan X-ışınlarının analizini sağlayan enerji dağılımlı foton dedektörleri de sunmaktadır [61].

3.5. Katkısız ve Cd Katkılı ZnO İnce Filmlerin Hazırlanması

Bu çalışmada SILAR yöntemi ile katkısız ZnO ve farklı oranlarda Cd katkılı ZnO yarıiletken yapılar büyütüldü. Bu yapıların oluşturulması için taban malzemesi olarak p-

tipi Si yarıiletkeni kullanıldı. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyot yapılarının oluşturulması amacı ile çeşitli aşamalar gerçekleştirildi.

3.5.1. Taban malzemelerinin temizlenmesi

Diyotlar için kullanılacak taban malzemesi olarak, 2inç (5,08cm) çapında [111] yöneline sahip p-tipi Si kristallerinden 2x2 cm boyutlarında kesilerek dört adet Si parçalar oluşturuldu. İnce film büyütme işlemi öncesinde taban malzemesi olarak kullanılacak kristaller, istenmeyen oksit ya da safsızlıklardan arındırılmak için sırasıyla kloroform, deiyonize su, aseton, deiyonize su, etil alkol, deiyonize su ile 5'er dakika ultrasonik banyoda yıkandı. Resim 3.1'de Si kristallerinin ultrasonik banyo cihazındaki görüntüsü verilmiştir. Sonrasında kristaller 1:10 oranında hazırlanan HF:H₂O çözeltisi içinde 30s bekletildi ve 2-3 litre deiyonize su ile durulandı. Durulanan numuneler azot gazıyla kurutuldu.



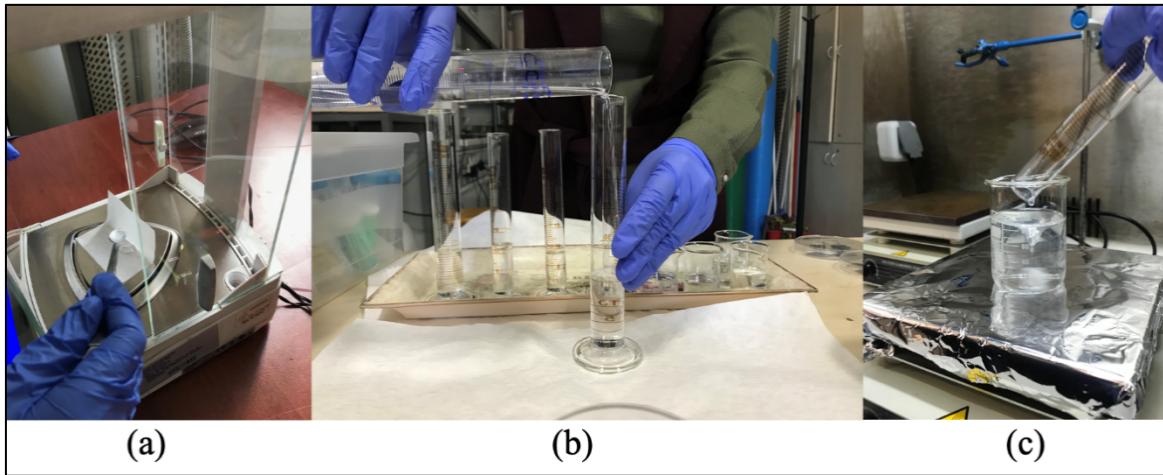
Resim 3.1. Si kristallerinin ultrasonik banyo cihazındaki görüntüsü

Temizleme işleminden sonra omik kontaklar oluşturmak amacıyla, kristalin mat yüzeyi vakum cihazına belli bir yükseklikte yerleştirildi. Si kristalinin mat yüzeyine $10^6 - 10^{10}$ torr basınç altında yaklaşık 150 nm Alüminyum (Al) metali buharlaştırıldı. Böylece Al metali p-tipi Si yüzeyine ince film olarak kaplandı. Mat yüzeyi Al ile kaplanan kristaller, tungsten üzerine yerleştirildi ve çöktürme işlemiyle omik kontaklar oluşturuldu.

3.5.2. Çözeltilerin hazırlanması

Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı ZnO diyotlar oluşturabilmek için dört farklı çözelti hazırlandı. Çözeltiler, katkısız ve kadmiyum ağırlıkça %1, %3, %5 konsantrasyonlarda olacak şekilde oluşturuldu. Bu çözeltileri hazırlamak için ZnCl_2 ve $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ tozları kullanıldı. Katkısız ZnO çözeltisini hazırlamak için 1,023gr ZnCl_2 'ün içerisine 75ml deiyonize su eklenip oda sıcaklığında manyetik karıştırıcıda karıştırıldı ve karıştırılma esnasında üzerine 7,5ml NH_3 eklenerek %25'lik berrak bir çözelti elde edildi.

Farklı konsantrasyonlarda Cd katkılı çözeltiler hazırlamak için ZnCl_2 içerisine ağırlıkça %1, %3, %5 olacak şekilde $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ eklendi. Karışıma deiyonize su ve NH_3 eklenerek farklı oranlarda Cd katkılı berrak çözeltiler elde edildi. Çözeltilerin hazırlanma aşamaları Resim 3.2'de görülmektedir.



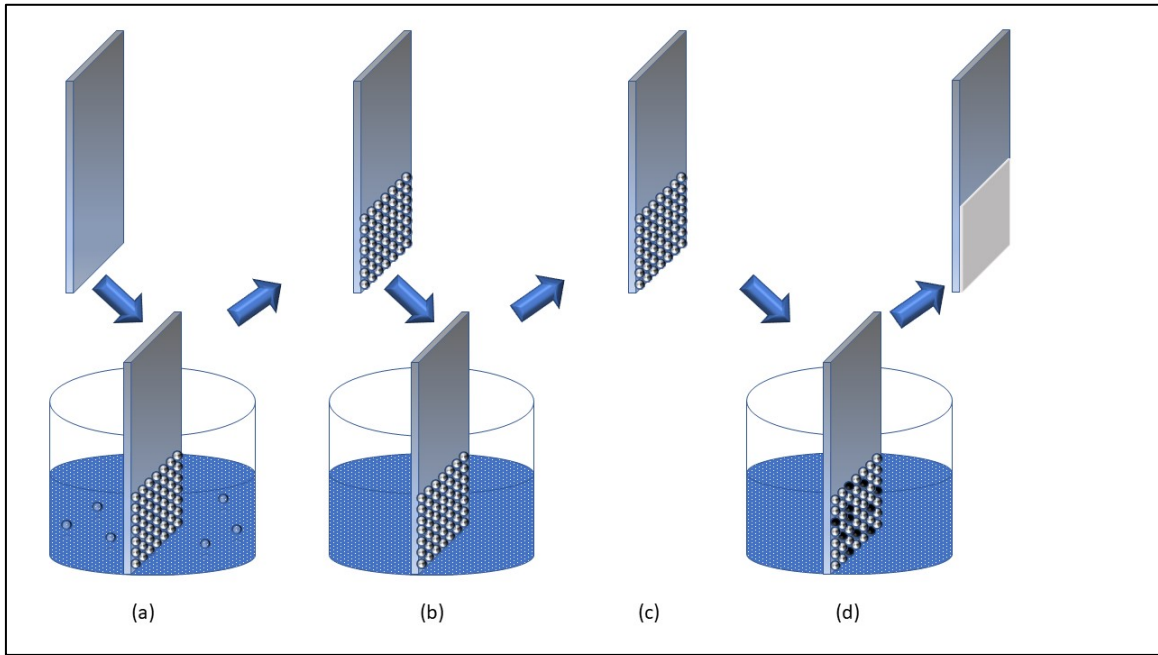
Resim 3.2. a) Toz malzemelerin tartılması b) 75 ml deiyonize su eklenmesi c) manyetik karıştırıcıda 7,5ml NH_3 eklenmesi

3.5.3. Numunelerin büyütülmesi

SILAR yöntemi ile p-tipi Si üzerine yapılacak büyütme işlemi, katkısız ZnO ve %1, %3, %5 Cd katkılı ZnO ince filmler olacak şekilde yapıldı. Büyütme işlemine başlamadan önce ısıtıcı üzerine 100ml'lik bir beher içinde deiyonize su konuldu. Termometre yardımıyla suyun sıcaklığı 90°C 'ye sabitlendi. 50ml'lik başka bir behere deiyonize su konuldu. Çözelti de 25ml'lik behere konularak deney düzeneği tamamlandı. Omik yüzeyi ısıya

dayanıklı bantla kaplı p-tipi Si kristallerinin ince film büyütme işlemi SILAR tekniği kullanılarak yapıldı.

Şekil 3.5’ de görüldüğü gibi kristaller sırasıyla 20s çözeltide, 7s sıcak deiyonize suda, 60s havada ve 30s deiyonize suda bekletildi. Böylece bir SILAR döngüsü tamamlandı. Bir SILAR döngüsünün 40 defa tekrarlanmasıyla p-tipi Si üzerinde ince film büyütme işlemi gerçekleştirildi. Bu yöntemle katkısız ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Cd:ZnO/p-Si/Al olmak üzere dört farklı numune hazırlandı.



Şekil 3.5. Bir SILAR döngüsünün şematik görüntüsü a) 20s çözeltide b) 7s 90 °C sıcaklıktaki deiyonize suda c) 60s havada d) 30s deiyonize suda

Katkısız ZnO ve %1, %3, %5 Cd katkılı ZnO ince filmleri oluşturmak için kurulan deney düzeneği Resim 3.3’de görülmektedir.



Resim 3.3. SILAR büyüme işlemi deney düzeneği

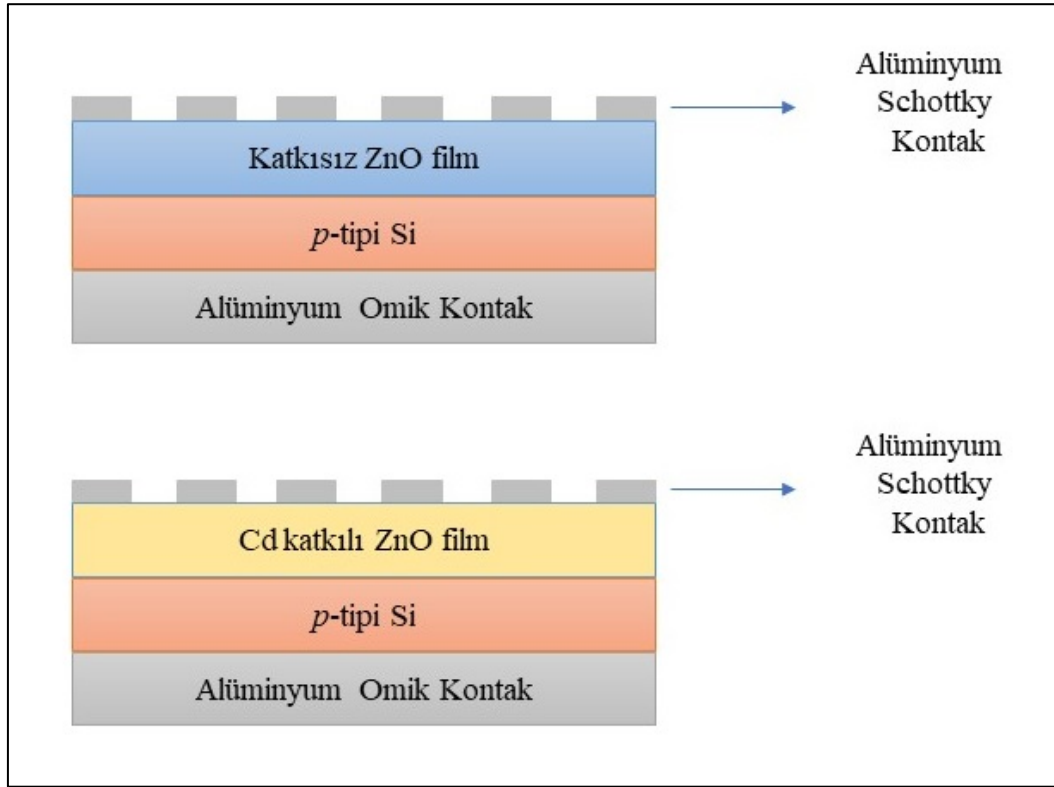
Büyütme işlemi tamamlanan malzemeler azot gazı ortamında 300°C' ye gelene kadar 40 dk, 300°C'de de 13 dk tavlandı. Resim 3.4'te malzemelerin tavlama yapıldığı cihaz görülmektedir.



Resim 3.4. Numunelerin tavllanması için kullanılan tüp fırına ait görüntü

3.5.4. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların oluşturulması

Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotları oluşturmak için p-tipi Si kristalinin parlak yüzeyine SILAR tekniğiyle katkılı ve katkısız ZnO ince filmlerin büyütme işlemi yapıldı. İnce film büyütme işleminden sonra kristaller vakum cihazında belli bir yüksekliğe konularak ince film büyütülen yüzey üzerine yaklaşık 2 mm çapında maskeler kullanılarak 10^{-5} torr basınç altında yaklaşık 150 nm Al metali buharlaştırılarak Schottky kontaklar oluşturuldu. Sonuç olarak katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al ZnO diyotlar olmak üzere dört farklı diyot elde edildi. Üretilen katkısız ve Cd katkılı diyotların şematik yapısı Şekil 3.6'de görülmektedir.



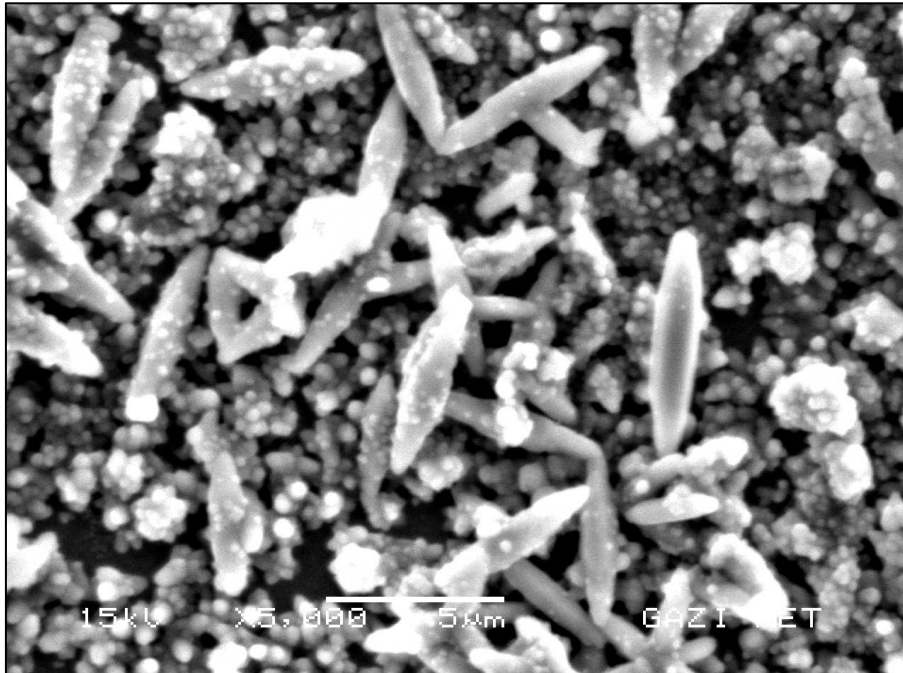
Şekil 3.6. Al/ZnO/p-Si/Al ve Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların şematik görüntüsü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

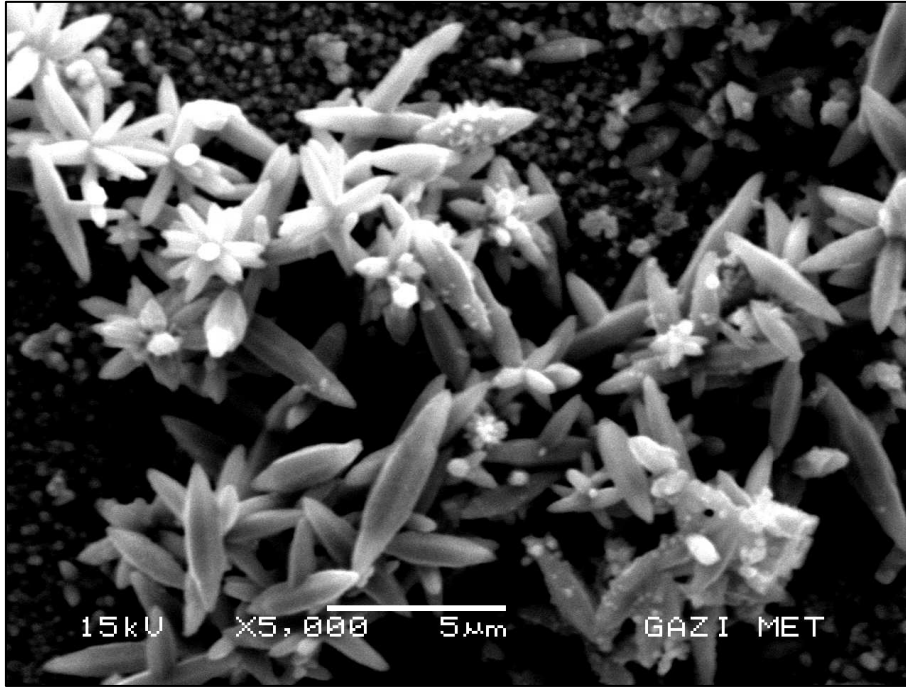
4.1. SEM Analizi

Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı ZnO ince filmlerin SEM analizleri Jeol (JSM-6060LV) marka SEM cihazıyla yapıldı. SEM sonuçları, üretilen filmler için sırasıyla Resim 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. İnce filmlerin SEM ölçümleri 15 kV gerilimde 5000 büyütme yapılarak alınmıştır.

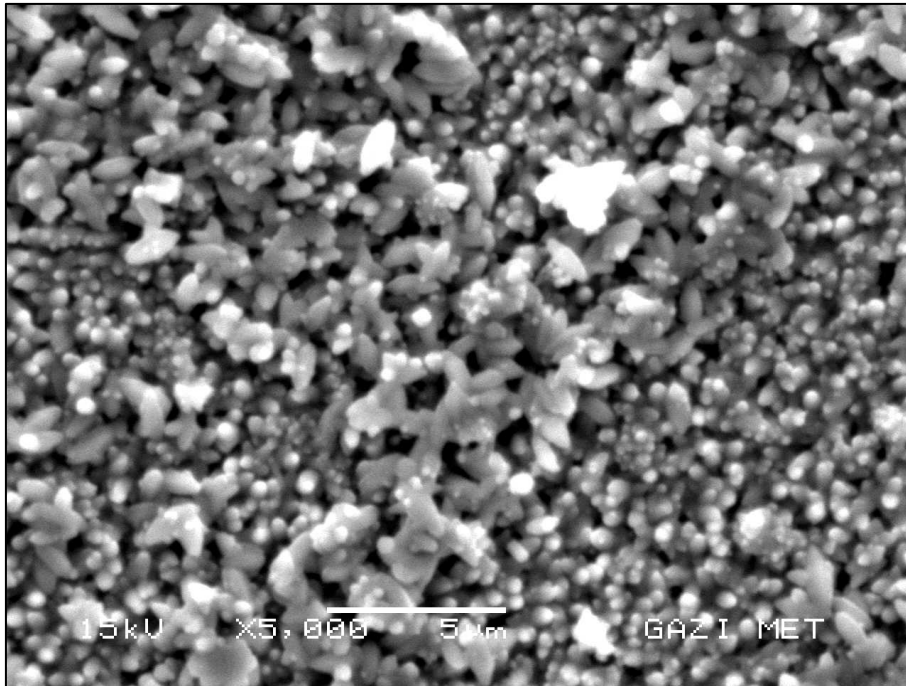
Katkısız ZnO ve Cd katkılı ZnO ince film yapılarının SEM analizleri yapılarak ince filmlerin yüzey morfolojisi incelendi. SEM analiz sonuçlarına göre katkısız ZnO ince film yapısıyla Cd katkılı ZnO ince filmlerin morfolojisinde farklılıklar olduğu gözlemlendi. Resim 4.1'de katkısız ZnO ince film yapısının topaksı yapıların yanında çubuksu yapıların ağırlıkta olduğu gözlemlendi. Resim 4.2'de %1 Cd katkılı ZnO ince film yapısının Cd katkısıyla topaksı ve çubuksu yapıların yanında muntazam çiçek benzeri bir morfolojiye dönüştüğü gözlemlendi. Resim 4.3'teki %3 Cd katkılı ZnO ince film yapısının katkılama miktarı arttıkça gözenekli ve topaksı yapılara dönüştüğü görüldü. Resim 4.4'te %5 Cd katkılı ince film yapısında taneciklerin boyutunun değiştiği ve dairesel yapılara dönüştüğü gözlemlendi.



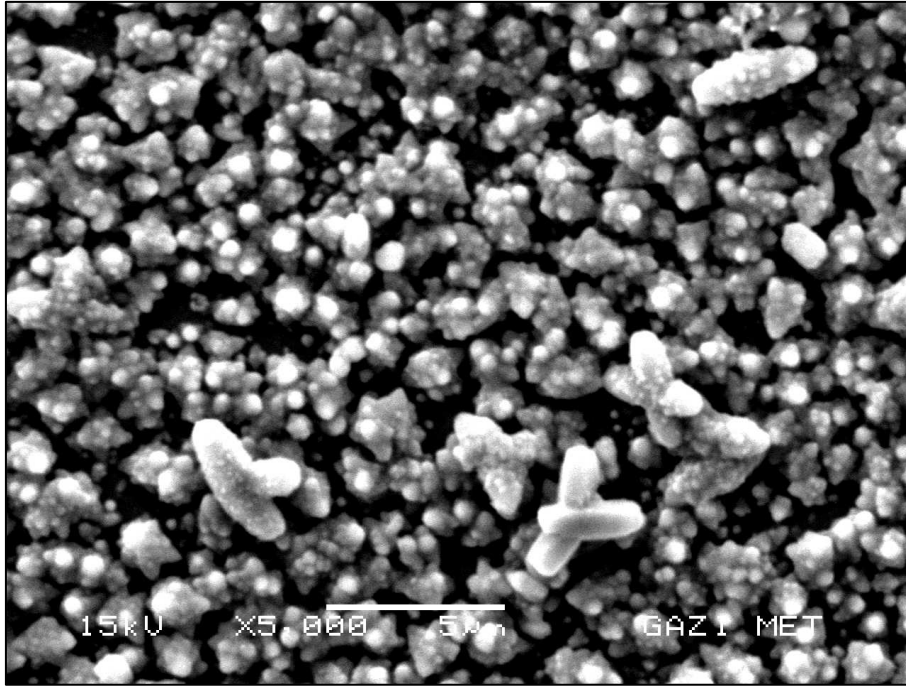
Resim 4.1. ZnO'nin SEM görüntüleri



Resim 4.2. %1 Cd:ZnO'in SEM görüntüleri



Resim 4.3. %3 Cd:ZnO'in SEM görüntüleri



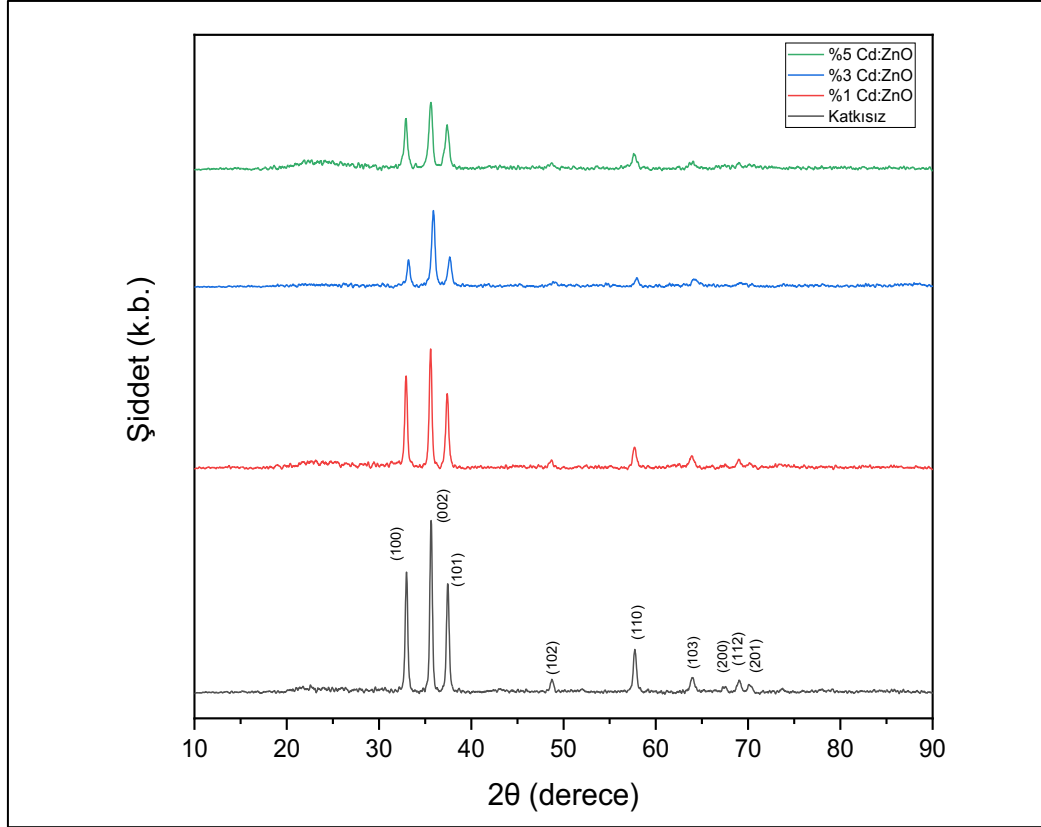
Resim 4.4. %5 Cd:ZnO'nin SEM görüntüleri

Zhai ve diğerleri (2014) tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda Cd katkılı ZnO nanoçiçek yapılar elde edilmiş ve SEM analizi yapılmıştır. SEM sonuçlarında nanoçiçek yapılar görülmüş, Cd katkısının artmasıyla yüzey morfolojisi değişmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda Cd katkısının artmasıyla ZnO kristal yapısının değişime uğradığı görülmüştür [62]. Altun ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda Cd katkılı ZnO yapılar üretilmiş, yapısal ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. XRD sonucunda ZnO yapısının hekzagonal wurtzite yapıda olduğu ve Cd katkısıyla kristal boyutunun değiştiği görülmüştür. SEM analizleri sonucunda çubuk ve küre oluşumları gözlemlenmiştir [75].

4.2. XRD Analizi

Katkısız ve Cd katkılı ZnO ince filmlerin XRD desenleri, 2θ ; 10^0 - 90^0 aralığında $\text{Cu/K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak elde edildi. Şekil 4.1'de katkısız ve Cd katkılı ince filmlerin XRD desenleri görülmektedir. İnce filmlerin XRD desenlerine bakıldığında (100), (002) ve (101) piklerinde ZnO piklerinin her malzemede baskın olduğu gözlemlendi. Tüm piklerin JPCDS Kart No:36-1451 karttaki ZnO pikleriyle eşlendiği görüldü ve hazırlanan ince filmlerin hekzagonal wurtzite yapıda kristalleştiği bulundu. ZnO yapısına yapılan Cd katkısıyla baskın ZnO piklerinin değişmediği fakat bununla

birlikte (100), (002) ve (101) piklerinin şiddetlerinde azalma görüldü. Aynı zamanda katkılama arttıkça tepe şiddetlerinin azaldığı gözlemlendi. Bu değişimler, Cd katkısıyla ZnO yapısının kristalleşmesinin azaldığını göstermektedir. Bu çalışmadaki sonuçlarla, literatürdeki ZnO ince filmlerin sonuçlarının uyumlu olduğu görüldü [63].



Şekil 4.1. ZnO ve sırasıyla %1, %3, %5 Cd:ZnO ince filmlerin XRD desenleri

Hekzagonal wurtzite yapısına göre örgü parametreleri;

$$\frac{1}{d} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.1)$$

Eş. 4.1'den yararlanılarak hesaplandı. Burada d düzlemler arası mesafe, h , k , l Miller indisleridir. Bu çalışmada en yüksek pik olan (002) pikinden c örgü parametresi, (100) pikinden de a parametresi hesaplandı. Malzemelerin hesaplanan örgü parametreleri Çizelge 4.1'de görülmektedir. a ve c örgü parametrelerinin katkı ile değiştiği ve değerlerin literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [63].

Malzemelerin kristal boyutu Debye Scherrer eşitliğiyle hesaplandı. Scherrer eşitliği kullanılarak kristal boyutu;

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.2)$$

Bu eşitlikte K bir sabittir ve değeri 0,90 olarak alınır. λ Cu/K α 'nın dalga boyu ($\lambda = 1.5406$ Å), θ Bragg açısı, β (002)'deki pik için en yüksek yarı pik genişliği değeri olarak alınmıştır [64].

Çizelge 4.1. ZnO ve %1, %3, %5 Cd:ZnO ince filmlerin kristal yapı parametreleri

Hekzagonal wurtzite yapısı	Örgü Parametreleri a=b (Å)	Örgü Parametresi c (Å)	Kırılma Açısı θ (°)	Yarı pik genişliği β (°)	Kristal Boyutu D (nm)
ZnO	3,1337	5,0333	17,8232	0,3073	26,9
%1 Cd:ZnO	3,1380	5,0409	17,7956	0,3302	24,9
%3 Cd:ZnO	3,1131	5,0007	17,9435	0,4132	19,9
%5 Cd:ZnO	3,1397	5,0385	17,8043	0,4531	18,2

Bu sonuçlar doğrultusunda Çizelge 4.1'de katkı miktarı arttıkça kristal boyutunun 26,9 nm'den 18,2 nm'ye azaldığı görülmektedir. Bunun da yapılan önceki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür [74]. Mondal ve diğerleri (2011) tarafından yapılan Cd katkılı ZnO ince filmlerin XRD analizleri yapılmış ve Cd katkısının artmasıyla kristal boyutunun azaldığı görülmüştür [65].

Acharya ve diğerleri (2012) tarafından yapılan çalışmada kimyasal püskürtme tekniği ile hazırlanan cam altlık üzerinde farklı oranlarda (0, 1, 3, 5, 10 ve 25%) Cd katkılı ZnO (Cd:ZnO) ince filmlerin optik ve elektriksel özellikleri karakterize edilmiştir. Malzemenin yapısal özellikleri XRD ile incelenmiştir. XRD sonuçlarına göre katkısız ve farklı oranlarda Cd katkılı ince filmlerinin tercihli yönelimi için (002) düzlemi boyunca olduğu görülmüştür. (100), (101), (102) boyunca diğer pikler elde edilmiş, (110), (103) boyunca daha az yoğun pikler görüldüğü kaydedilmiştir. Tüm ZnO filmlerin polikristalin hekzagonal wurtzite tipi kristal yapıya sahip olduğunu ve kadmiyum, çinko ya da bunların

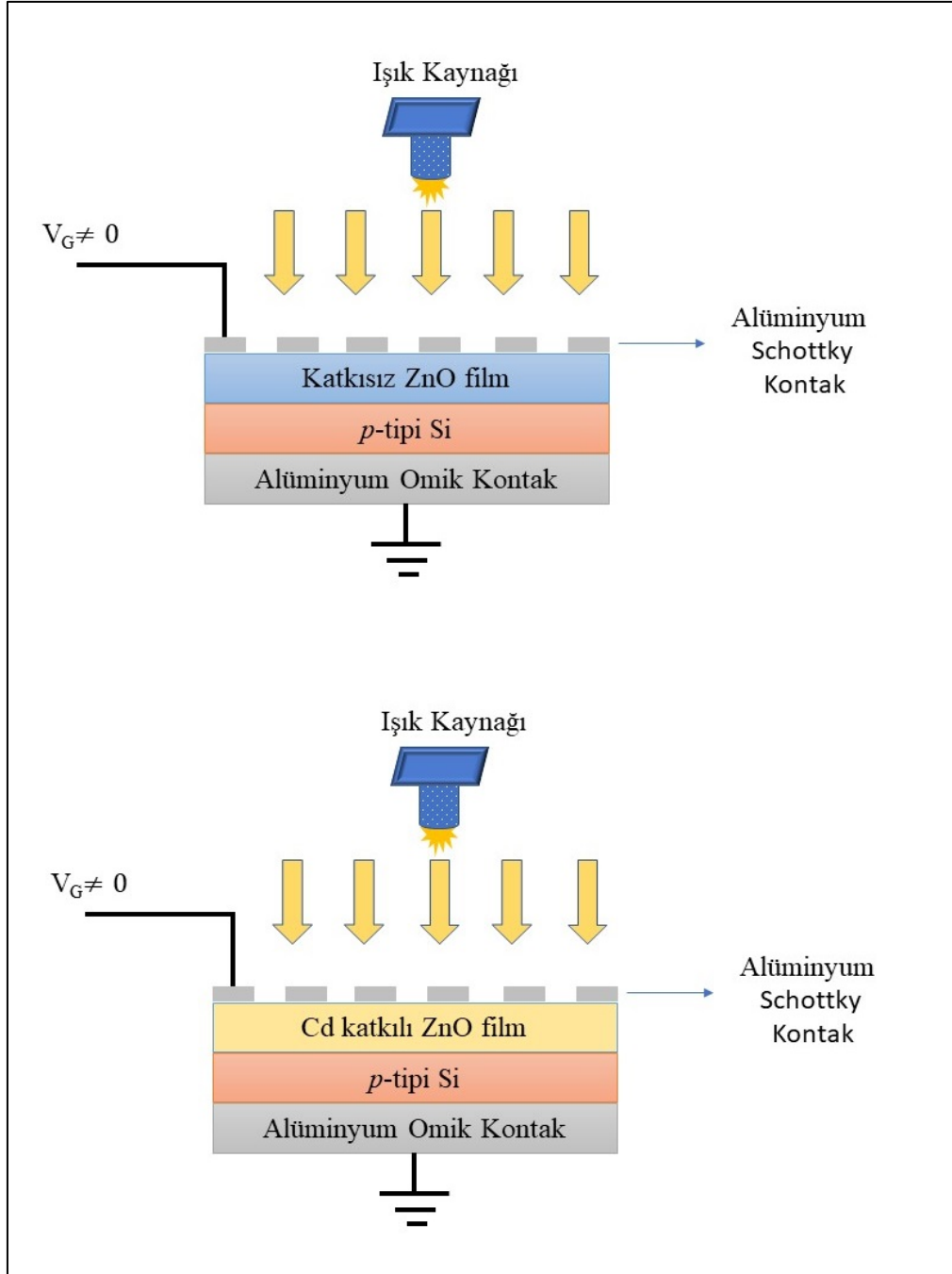
kompleks oksitlerine karşılık gelen hiçbir tepe noktasının tespit edilmediği ortaya konulmuştur. Bu, filmlerin herhangi bir faz ayırımına sahip olmadığını göstermektedir. Çalışmada Cd oranının artmasıyla kristal boyutunun azaldığı gözlemlenmiştir. ZnO yapısına daha yüksek Cd katkısı nedeniyle kristal kalitesinin düştüğü görülmüştür [4].

Dhivya Angelin ve diğerleri (2022) tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda Cd katkılı ZnO yapılar üretilmiş ve yapısal analizi XRD ile yapılmıştır. Kırınım düzlemleri sırasıyla (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) ve (201)'e karşılık geldiği görülmüştür. ZnO için bu sonuçlar, 36-1451 numaralı JCPDS kartından alınan standart kırınım verileriyle iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Başka herhangi bir kirlilik izi bulunmamıştır. ZnO ile ağırlıkça %3, 6 ve 9 Cd katkılı ZnO arasındaki XRD spektrumlarındaki benzerlik, katkı maddesinin düşük oranı nedeniyle ana bileşiğin yapısal fazını değiştirmediğini göstermektedir. Bununla birlikte Cd katkısının artmasıyla piklerde azalma görülmüştür. Katkı olarak artan Cd konsantrasyonu ile tüm piklerin yoğunluğunun azaldığı ve genişlediği açıkça görülmüş ve bunun da kristalin büzüldüğünü göstermekte olduğu yorumu yapılmıştır [73].

4.3. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al Diyotların Ölçüm Sonuçları

4.3.1. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların akım voltaj karakteristikleri

Üretilen katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/ Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların elektriksel karakterizasyonu I-V ölçümlerinden yararlanılarak yapıldı. Bunun için diyotların akım ve voltaj karakteristikleri farklı aydınlatma şiddetlerinin değişimine bağlı olarak incelendi. *I-V* verileri KEITHLEY 2430 akım-voltaj cihazından yararlanılarak ölçüldü. FYTRONIX 7000 cihazıyla ışık şiddetleri değiştirilerek *I-V* ve *I-t* ölçümleri yapıldı. Voltaj aralığı ± 2 V olarak belirlendi ve diyotlar için elektriksel ölçümler bu voltaj aralığında yapıldı. Şekil 4.2'de Al/ZnO/p-Si/Al ve Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların ölçüm düzeneğinin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.2. Katkısız Al/ZnO/*p*-Si/Al ve Cd katkılı Al/Cd:ZnO/*p*-Si/Al diyotların ölçüm düzeneğinin şematik görüntüsü

Ölçülen akım gerilim verilerinin analizi Termiyonik Emisyon teorisine göre yapıldı. Bu teoriye göre akım - gerilim eşitliği [76, 71];

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{nkT}\right)\right] \quad (4.3)$$

şeklinde verilir. Bu eşitlikte I_0 doyma akımı;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (4.4)$$

eşitliğiyle tanımlanır. İdealite faktörü ve engel yüksekliği Eş. 4.5 ve Eş 4.6 ile belirlenir.

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

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.6)$$

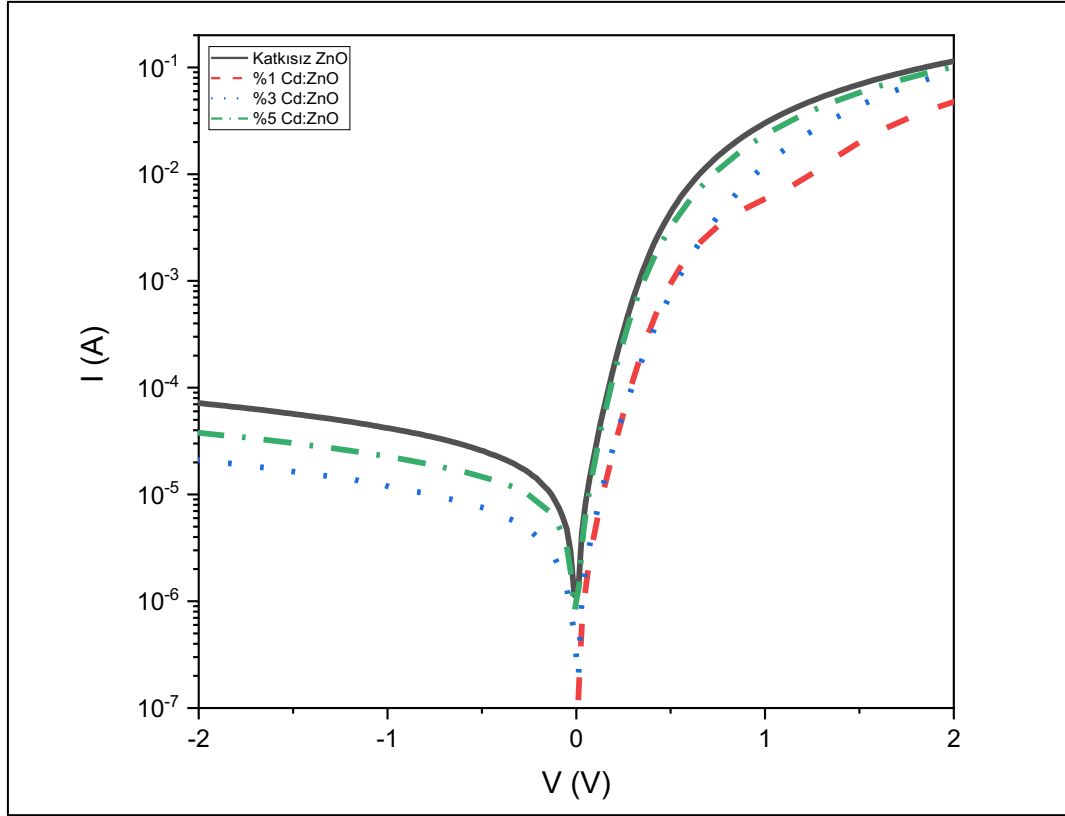
Tüm bu eşitliklerden yararlanılarak $\ln I$ - V grafiğinin düz beslemdeki $3kT/q$ 'luk gerilim bölgesinin üzerindeki lineer bölgenin eğiminden ($dV/d(\ln I)$) yararlanarak idealite faktörü, düşey eksen kestiği noktadan doyma akımı ve engel yüksekliği hesaplandı. Hesaplamalarda Richardson sabiti p-tipi Si için $32 \text{ AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ olarak alındı.

Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO /p-Si/Al diyotların doğrultma oranları;

$$RR = \frac{I_F}{I_R} \quad (4.7)$$

Eş. 4.7 ile ifade edilir. Bu eşitlikte RR doğrultma oranı, I_R ters besleme akımı ve I_F de düz besleme akımı olarak tanımlanmaktadır.

Katkısız ve %1, %3 ve %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların karanlıktaki I - V eğrileri Şekil 4.3'te gösterildi. Bu eğriler Eş. 4.3'ü karakterize eden eğrilerdir. Termiyonik emisyon teorisine göre $3kT/q$ 'luk gerilim bölgesinin üzerindeki bölgede diyot parametreleri hesaplanmıştır. Eğrilerin eğiminden idealite faktörü, kesme noktasından doyma akımı ve engel yüksekliği değerleri bulunmuştur. Hesaplanan parametreler Çizelge 4.2'de verilmiştir.



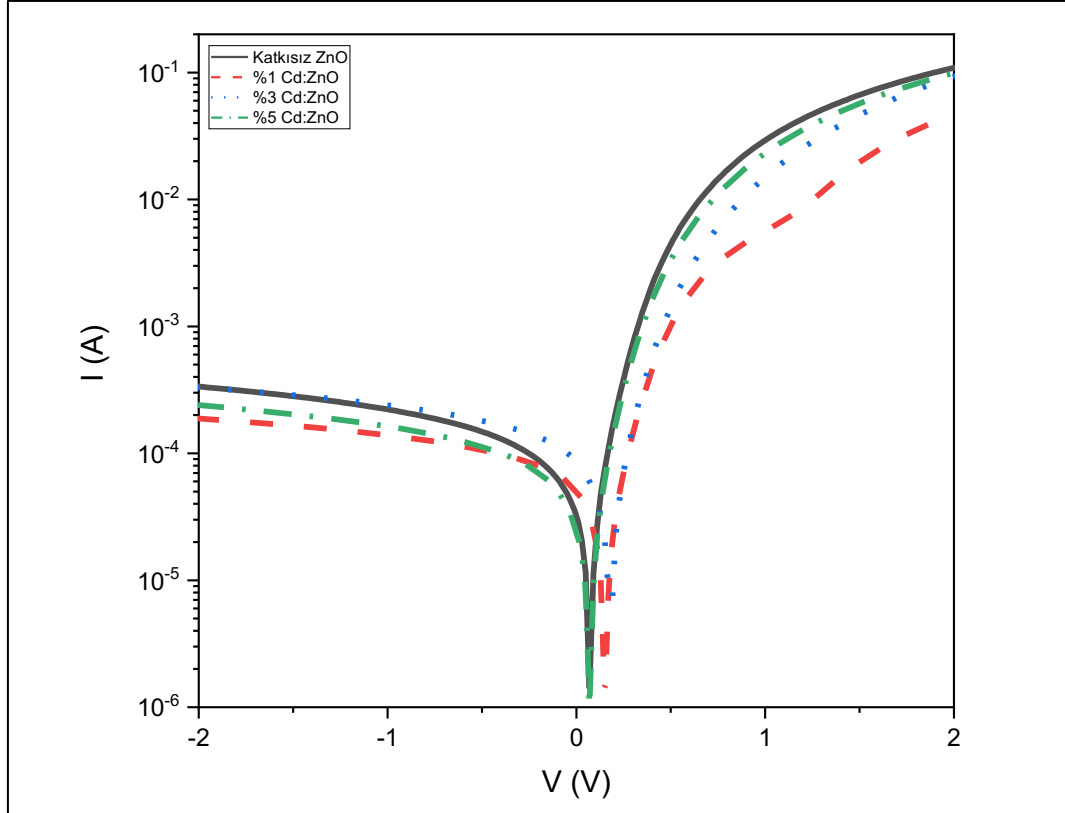
Şekil 4.3. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların karanlıktaki I-V eğrileri

Çizelge 4.2. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların karanlıktaki idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyuma akımı, doğrultma oranı değerleri

Fotodiyot Katkı Oranı	$I_0(A)$	n	$\Phi_b (eV)$	RR
ZnO	$5,43 \times 10^{-6}$	2,33	0,617	$1,6 \times 10^3$
%1 Cd:ZnO	$9,83 \times 10^{-7}$	2,37	0,661	$4,13 \times 10^3$
%3 Cd:ZnO	$1,43 \times 10^{-6}$	2,62	0,651	$4,45 \times 10^3$
%5 Cd:ZnO	$4,55 \times 10^{-6}$	2,35	0,628	$2,70 \times 10^3$

Çizelge 4.2’de katkısız ve %1, %3, %5 Cd Katkılı ZnO Al/ZnO/p-Si/Al ve Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotlarının karanlıkta hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyuma akımı, doğrultma oranı değerleri görülmektedir. Karanlıktaki diyotların, katkı oranı arttıkça RR ve n değerlerinin %3 katkılamaya kadar arttığı ve sonrasında %5’te yeniden azaldığı sonucu ortaya çıkmıştır. Karanlıktaki diyotların, katkı oranı arttıkça Φ_b değerlerinin %1 katkılamada arttığı, %3’ten sonra yeniden azaldığı gözlemlenmiştir. I_0

değeri %1 katkı oranında azaldığı %3 ve %5'te yeniden arttığı Çizelge 4.2'de görülmektedir. Karanlıkta katkı miktarı arttıkça doğrultma oranlarının da arttığı ve %5 Cd katkılı diyotta yeniden bir azalma olduğu gözlemlendi. Yüksek doğrultma değerleri sonucu doğrultusunda her bir diyotun iyi bir diyot davranış sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.4. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların 100mW/cm^2 'deki I-V eğrileri

Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların 100mW/cm^2 'deki I-V eğrileri Şekil 4.4'de verilmiştir. Ters beslemde 100mW/cm^2 ışık şiddeti altında katkı oranının değişmesiyle akımın da değiştiği gözlemlenmiştir. 100mW/cm^2 ışık şiddetinde %3 Cd katkılı diyotun en yüksek akım değerine ulaştığı görülmüştür.

Çizelge 4.3. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların 100 mW/cm² aydınlatma şiddetinde hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyma akımı, doğrultma oranı değerleri

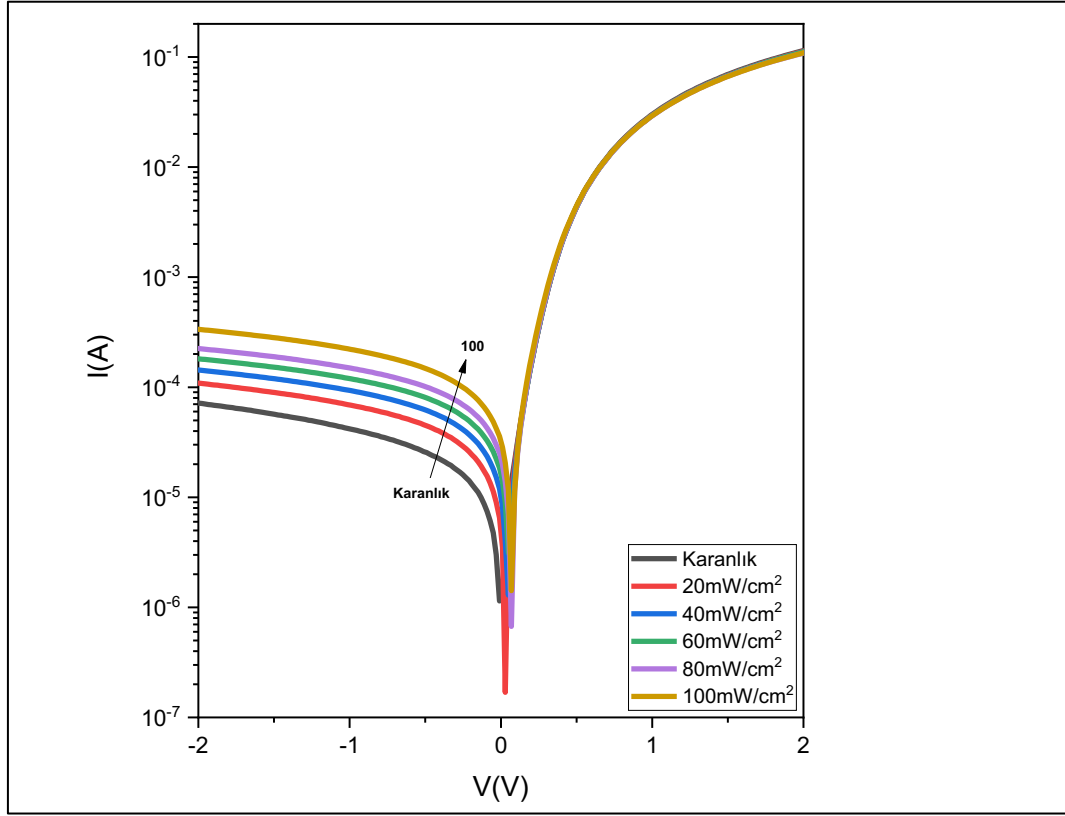
Fotodiyot Katkı Oranı	$I_0(A)$	n	$\Phi_b (eV)$	RR
ZnO	$5,83 \times 10^{-6}$	2,334	0,615	$3,27 \times 10^2$
%1 Cd:ZnO	$1,78 \times 10^{-6}$	2,699	0,646	$2,54 \times 10^2$
%3 Cd:ZnO	$2,35 \times 10^{-6}$	2,793	0,638	$2,85 \times 10^2$
%5 Cd:ZnO	$5,05 \times 10^{-6}$	2,373	0,625	$4,18 \times 10^2$

Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların ± 2 V ve 100mW/cm²' de hesaplanan idealite faktörü, ters besleme doyma akımı, engel yüksekliği ve doğrultma değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

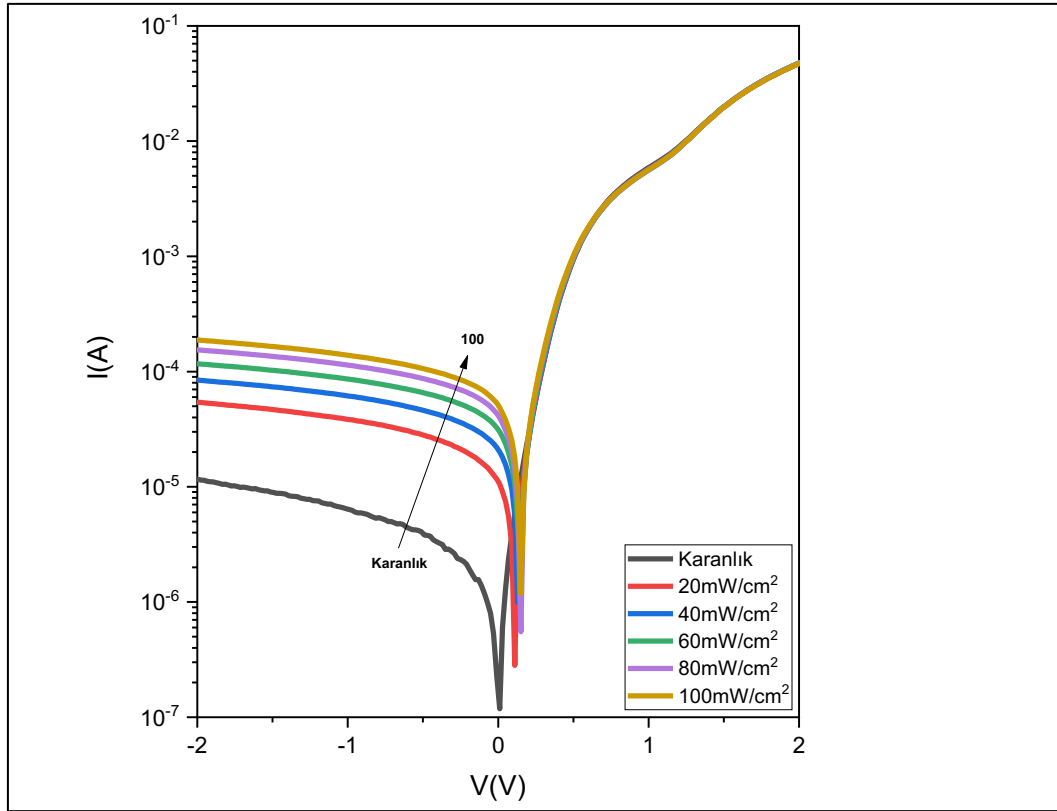
Çizelge 4.3'deki 100 mW/cm²'deki ışık şiddetinde yapılan sonuçlar değerlendirildiğinde idealite faktörünün, engel yüksekliğinin ve ters beslem doyma akımının katkı miktarının değişmesiyle birlikte değiştiği görülmüştür. Katkılanmış diyotlar arasında bir karşılaştırma yapıldığında %5 Cd katkılı diyotun, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri diğer katkılı diyotlara göre en küçük olduğu görüldü. Tüm diyotlar karşılaştırıldığında ise katkısız diyotun idealite faktörü değerinin en düşük (2,33) olduğu görüldü. Tüm diyotlar içinde engel yüksekliği en yüksek olan diyotun 0,646 değeriyle %1 Cd katkılı diyot olduğu görüldü. Engel yüksekliğinin yüksek olması taşıyıcıların kontrol edilmesini sağlamakta ve diyotların yüksek gerilimli çalışmalarda tercih edilebilir kılmaktadır. Çizelge 4.3'de görüldüğü gibi diyotların 100 mW/cm²'daki doğrultma değerleri 10² mertebesinde. En yüksek doğrultma değeri %5 Cd katkılı diyotta $4,18 \times 10^2$ olarak hesaplandı.

Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3 ve %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların 20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm² aydınlatma şiddetlerindeki I-V ölçümleri alındı ve Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'de sırasıyla verildi. Bütün numuneler incelendiğinde, ters beslemde ışık şiddetinin artması ile akım değerlerinde bir artış gözlemlendi. Başka bir ifadeyle ışık şiddetine bağlı olarak bir fotoakım oluştuğu gözlemlendi. Bu sonuçla bütün numunelerin fotodiyot olarak değerlendirilebileceği görüldü. %1 ve %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların I-V eğrilerinde sıfırdan bir kayma gözlemlendi. Bu durum, diyotların fotovoltaiik davranış sergilediğini göstermektedir. Tüm numuneler için ışığa bağlı olarak grafikler ayrı

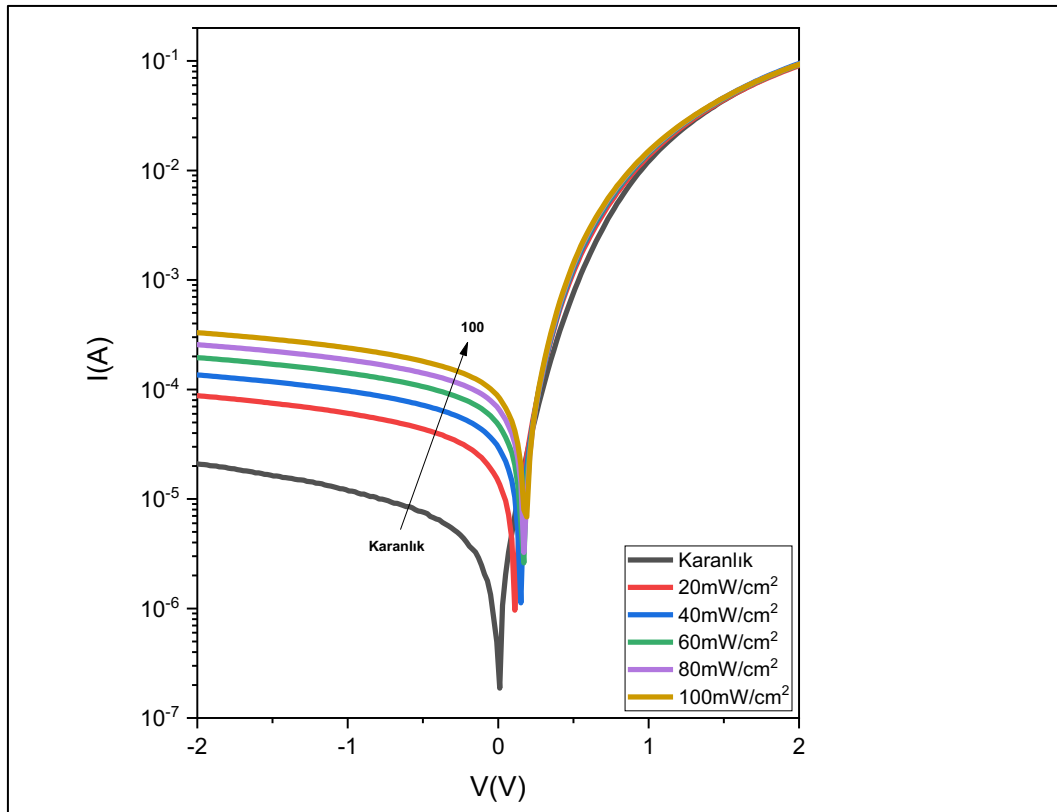
ayrı incelendiğinde ters beslemde farklı ışık şiddetlerine bağlı olarak ışık şiddeti arttıkça fotoakımın arttığı gözlemlendi. Bu durum literatürde taşıyıcıların ters beslemde geniş bir alana yayılmasıyla açıklanmaktadır [66].



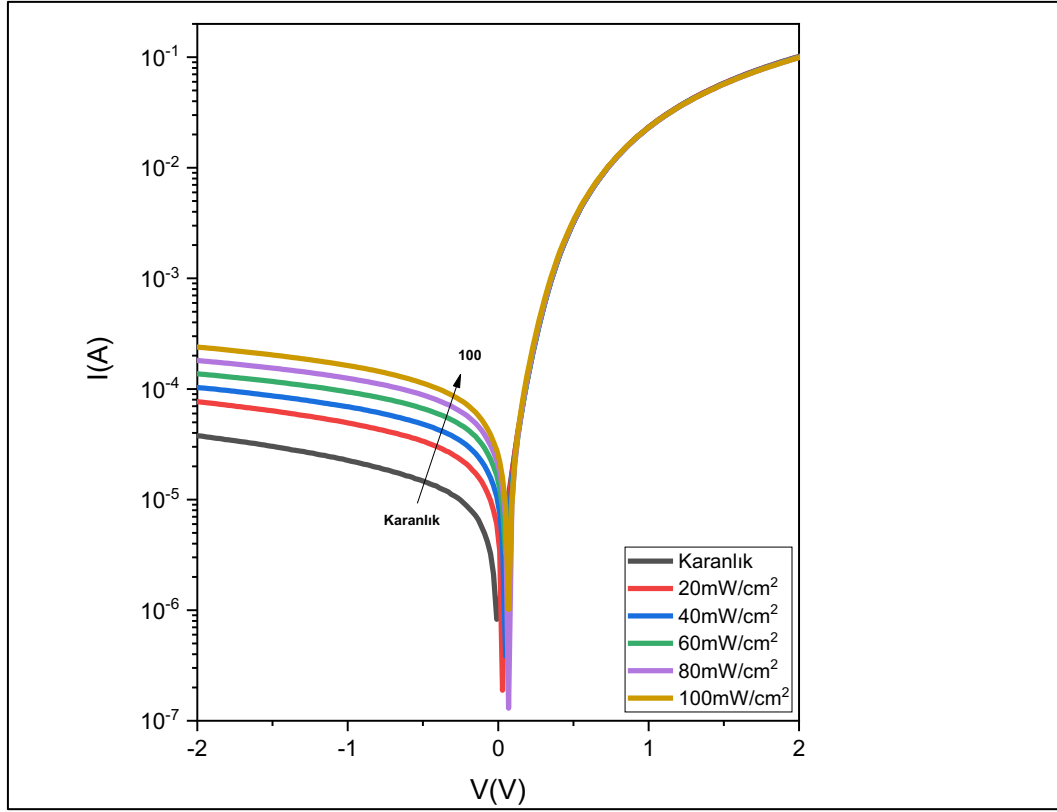
Şekil 4.5. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki I-V eğrileri



Şekil 4.6. %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki I-V eğrileri



Şekil 4.7. %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki I-V eğrileri



Şekil 4.8. %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki I-V eğrileri

Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3 ve %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların akım voltaj grafiklerinden idealite faktörü, engel yüksekliği ve ters besleme doyma akımı diyot parametreleri, uygulanan farklı ışık şiddetlerine göre hesaplandı. Bu hesaplamalar $\ln I-V$ grafiğinde, grafiğin lineer bölgesinin eğimi ve kesme noktasından yararlanılarak belirlendi. Her bir ışık şiddeti ve her bir diyot için hesaplanan ters besleme doyma akımı, engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri Çizelge 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotun karanlık ve farklı ışık şiddeti altında hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyuma akımı değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	I ₀ (A)	n	Φ _b (eV)
0	5,43x10 ⁻⁶	2,335	0,617
20	5,00x10 ⁻⁶	2,283	0,619
40	4,50x10 ⁻⁶	2,219	0,622
60	3,79x10 ⁻⁶	2,134	0,626
80	5,12x10 ⁻⁶	2,310	0,618
100	5,83x10 ⁻⁶	2,334	0,615

Çizelge 4.5. %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun karanlık ve farklı ışık şiddeti altında hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyuma akımı değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	I ₀ (A)	n	Φ _b (eV)
0	9,83x10 ⁻⁷	2,370	0,661
20	8,59x10 ⁻⁷	2,371	0,664
40	1,01x10 ⁻⁶	2,460	0,660
60	1,51x10 ⁻⁶	2,669	0,650
80	1,74x10 ⁻⁶	2,709	0,646
100	1,78x10 ⁻⁶	2,699	0,646

Çizelge 4.6. %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun karanlık ve farklı ışık şiddeti altında hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyma akımı değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	I_0 (A)	n	Φ_b (eV)
0	$1,44 \times 10^{-6}$	2,620	0,651
20	$9,42 \times 10^{-7}$	2,302	0,662
40	$1,35 \times 10^{-6}$	2,519	0,653
60	$1,72 \times 10^{-6}$	2,648	0,646
80	$2,34 \times 10^{-6}$	2,817	0,638
100	$2,35 \times 10^{-6}$	2,793	0,638

Çizelge 4.7. %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun karanlık ve farklı ışık şiddeti altında hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği, ters beslem doyma akımı değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	I_0 (A)	n	Φ_b (eV)
0	$4,55 \times 10^{-6}$	2,354	0,628
20	$4,48 \times 10^{-6}$	2,325	0,628
40	$3,70 \times 10^{-6}$	2,226	0,633
60	$4,59 \times 10^{-6}$	2,376	0,627
80	$4,50 \times 10^{-6}$	2,348	0,628
100	$5,05 \times 10^{-6}$	2,373	0,625

Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların aydınlatma yoğunluğuna tepkisini incelemek için aydınlatma yoğunlukları 0-100 mW/cm² aralığında değiştirildi ve sonuçlar incelendi. Çizelge 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7’de diyotların ışık şiddetinin değişmesiyle katkısız ve katkılı diyotların her birinde diyot parametrelerinin değiştiği görülmektedir. Çizelge 4.4’ te I_0 ve n değerleri 60 mW/cm²’ye kadar azalırken Φ_b değerinin arttığı, 80 mW/cm²’den sonra I_0 ve n değerleri yeniden artarken Φ_b nin azaldığı gözlemlenmiştir. Çizelge 4.5’ te I_0 değeri 20 mW/cm² de azalırken sonrasında arttığı, n

değerinin 80 mW/cm^2 'ye kadar arttığı sonrasında azaldığı, Φ_b değerinin 20 mW/cm^2 'de arttığı sonrasında azaldığı gözlemlenmiştir. Çizelge 4.6' da I_o değeri 20 mW/cm^2 'ye kadar azalırken sonrasında arttığı, n değerinin 20 mW/cm^2 'de azaldığı sonrasında arttığı, Φ_b değerinin 20 mW/cm^2 'de arttığı sonrasında azaldığı gözlemlenmiştir. Çizelge 4.7' de I_o değeri 40 mW/cm^2 'ye kadar azalırken 100 mW/cm^2 'de arttığı, n değerinin 40 mW/cm^2 ye kadar azaldığı 100 mW/cm^2 'de arttığı, Φ_b değerinin 40 mW/cm^2 'ye kadar arttığı sonrasında yeniden azaldığı gözlemlenmiştir.

$I-V$ grafikleri ve ışık şiddetine göre hesaplanan diyot parametrelerinin sonuçları incelendiğinde tüm diyotların doğrultma davranışı göstermiştir. Bununla birlikte %1 ve %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotovoltaiik davranış sergilediği bulunmuştur. Diyotların ters beslemde aydınlatma şiddetlerine göre tepki vermesi ve değişkenlik göstermesi üretilen diyotların ışığa duyarlı cihazlarda ve optoelektronik uygulamalarda kullanılma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Literatürde yapılan benzer çalışmalar incelendiğinde, Aslan ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmada kumarin katkılı ZnO/p-Si fotodiyotunun elektriksel özellikleri incelenmiş, karanlıkta ve farklı ışık şiddetlerindeki akım voltaj değişimlerine bakılmıştır. Bu çalışma doğrultusunda ışık şiddetinin artmasıyla fotoakımın da arttığı gözlemlenmiş ve üretilen fotodiyotun fotovoltaiik davranış sergilediği görülmüştür. Malzemenin elektriksel özellikleri incelenerek engel yüksekliği, idealite faktörü hesaplanmış ve katkının artmasıyla bu parametrelerin de değiştiği görülmüştür [66].

İlhan ve diğerleri (2021) tarafından yapılan çalışmada Cd katkılı TiO_2 fotodiyotlar üretilmiş, farklı oranda katkılanan malzemelerin fotodiyot özellikleri değişen ışık şiddetlerine göre değerlendirilmiş ve ışığın değişmesiyle fotoakımın da değiştiği gözlemlenmiştir. Fotodiyotların $I-V$ karakteristikleri de incelenerek diyotların doğrultucu özellikte ve aydınlatmaya duyarlı olduğu görülmüştür [67].

Gozeh ve diğerleri (2021)'nin yaptığı başka bir çalışmada katkısız ve farklı oranlarda Zn katkılı CdO fotodiyotlar p-tipi Si üzerine büyütülerek üretilmiş, diyotların morfolojileri, elektriksel ve optik özelliklerine bakılmıştır. Diyotların akım voltaj karakteristikleri analiz edildiğinde diyotların $I-V$ grafiklerinde ters beslem bölgesinde ışık değişimi ile fotoakımın da değiştiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte diyot parametreleri de hesaplandığında

diyotların fotoelektrik ve fotovoltatik davranış sergilediği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlarla diyotların optoelektronik uygulamalarda, sensör ve fotodiyot teknolojilerinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [68].

Benhaliliba (2021) tarafından yapılan çalışmada p-tipi Si üzerine katkısız ZnO diyot yapısı üretilmiş, diyotun elektriksel özelliklerine bakılmış ve diyot parametreleri hesaplanmıştır. Diyotların karanlık ve değişen aydınlatma yoğunluklarına göre ($60\text{--}150\text{ mW/cm}^2$) elektriksel parametreleri belirlenmiştir. İdealite faktörü karanlıkta ve aydınlıkta sırasıyla 3,5-1,6 değişmiş, bariyer yüksekliği karanlıkta ve aydınlıkta 0,74-0,89V şeklinde bir değişim göstermiştir. Aydınlatma şiddeti arttıkça idealite faktörünün küçüldüğü ve bu durumun ideal diyot durumuna yakınlaştığı görülmüştür. Diyotun engel yüksekliğinin aydınlatma şiddetiyle büyüdüğü görülmüştür. Diyotun ışığa karşı duyarlılığı ters beslemde fotoakım gözlenmesi, fotovoltatik parametreler ve diyot parametrelerinden elde edilen veriler ve grafikler neticesinde diyotun fotodiyot, güneş pilleri ve LED uygulamalarında kullanılabılır olduğu düşünülmektedir [72].

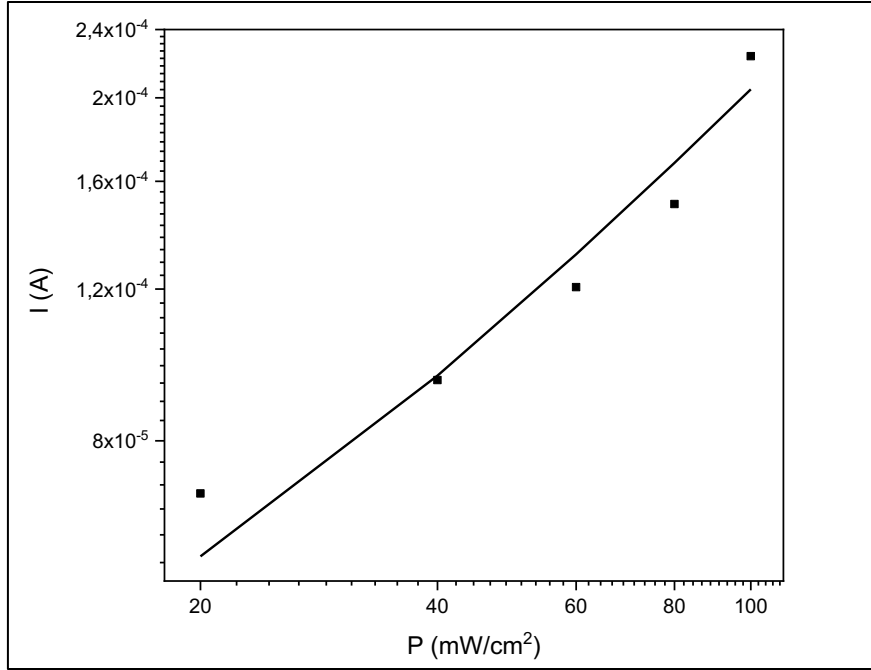
Karanlıkta ve ışık altında yapılan $I\text{-}V$ ölçümleri ve hesaplamalar doğrultusunda diyotların idealite faktörleri değerlerinin 1'den büyük olduğu görüldü. Bu da malzemelerin ideal olmayan bir davranış sergilediğini gösterdi. Literatür araştırmaları neticesinde, idealite faktörünün 1'den büyük olması durumunun, seri dirençlerin, homojen olmayan engelin ve ara yüzey durumlarının etkisinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Işık şiddeti arttıkça akımın artması tuzak seviyelerindeki taşıyıcıların uyarılması ve iletme katılması olarak açıklanmaktadır. Çizelge 4.2'de verilen 10^3 mertebesindeki yüksek doğrultma değerleri sonucu doğrultusunda her bir diyotun iyi bir diyot davranış sergilediği görülmektedir. Diyotların ters beslemde aydınlatma şiddetlerine göre tepki vermesi ve değişkenlik göstermesi üretilen diyotların ışığa duyarlı cihazlarda ve optoelektronik uygulamalarda kullanılma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. [66, 29].

4.3.2. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al fotoiletkenlik karakteristikleri

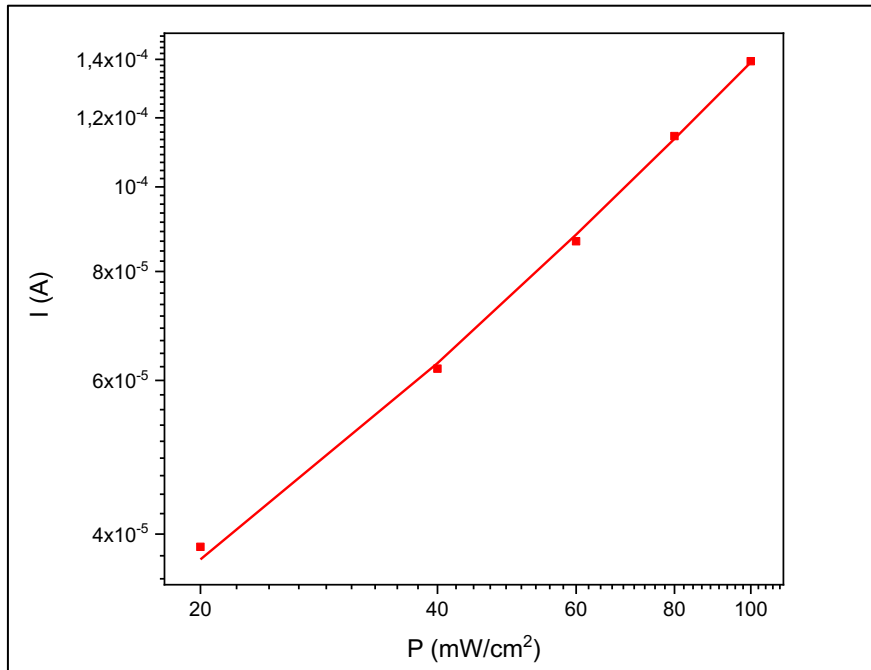
Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların her biri için fotoakımın aydınlatma yoğunluğuna bağlı $\log I\text{-}\log P$ grafikleri çizildi. Şekil 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13 aydınlatma yoğunluğuna bağlı fotoakım değişimini göstermektedir. Diyotun fotoakım mekanizması Eş.4.8 bağıntısı ile analiz edilmiştir;

$$I_{PH} = AP^m \quad (4.8)$$

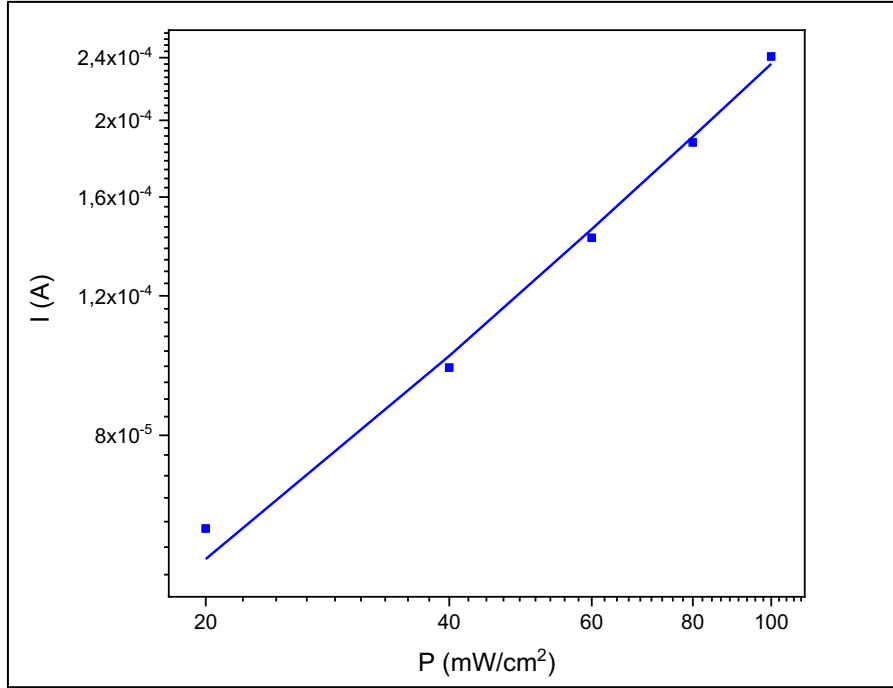
Eş.4.8’te A bir sabittir. I_{PH} fotoakım, m bir üs ve P de aydınlatma yoğunluğudur. m değeri $\log I$ - $\log P$ grafiğinin eğiminden hesaplandı.



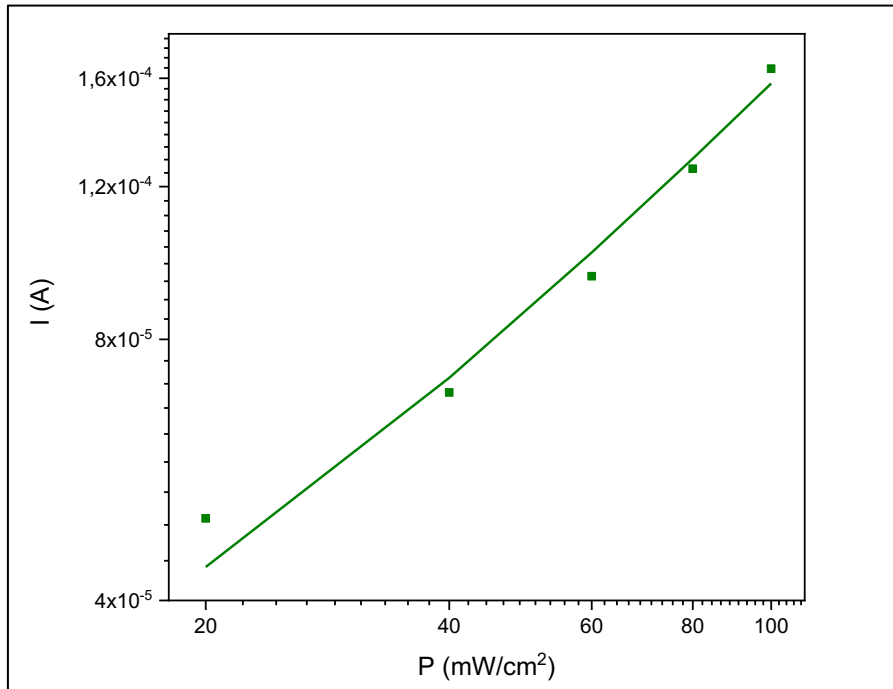
Şekil 4.9. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotun log I-P eğrisi



Şekil 4.10. %1 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun log I-P eğrisi

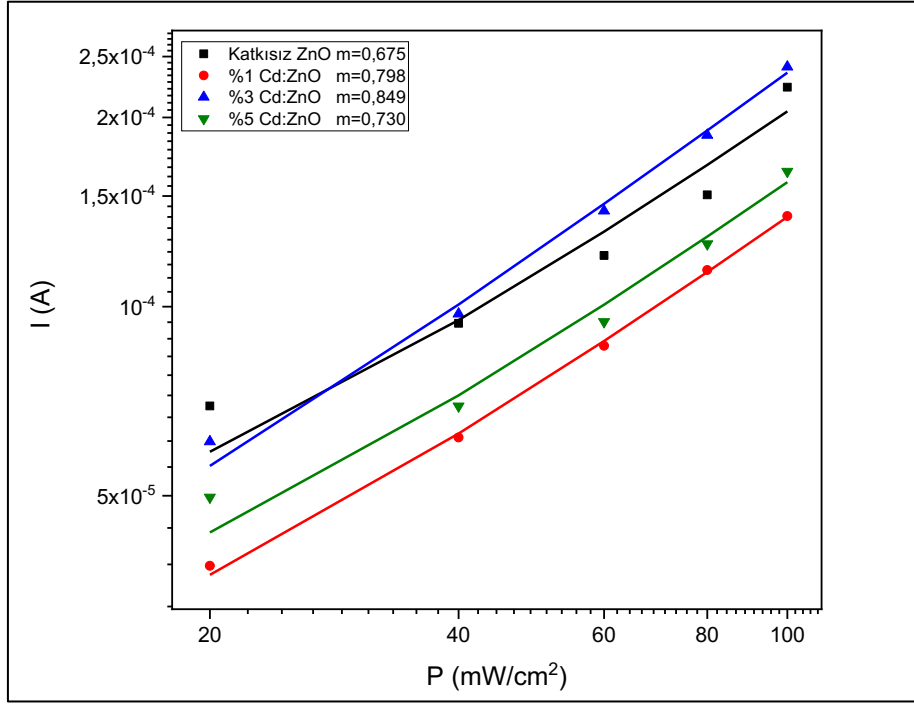


Şekil 4.11. %3 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun log I-P eğrisi



Şekil 4.12. %5 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun log I-P eğrisi

Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı diyotlar için $\log I-P$ eğrileri Şekil 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13 görülmektedir. Diyotların m değerleri sabit voltaj değerinde (-1V) belirlendi. Çizilen grafiklerin eğiminden m değerleri hesaplandı ve Çizelge 4.7’de verildi.



Şekil 4.13. Katkısız, %1, %3, %5 Cd katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun log I-P eğrisi

Çizelge 4.8. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotlar için elde edilen m değerleri

Fotodiyot Katkı Oranı	m
ZnO	0,675
%1 Cd:ZnO	0,798
%3 Cd:ZnO	0,849
%5 Cd:ZnO	0,730

Şekil 4.9’da katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyot için grafiğin eğiminden m değeri 0,67 olarak hesaplandı. Şekil 4.10’da %1 katkılı Al/Cd:ZnO /p-Si/Al diyotu için m değeri 0,79, Şekil 4.11’de %3 katkılı ZnO diyotu için m değeri 0,84 ve Şekil 4.12’de %5 katkılı ZnO diyotu için m değeri 0,72 bulundu. Bu sonuçların literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu görüldü [69].

-1V'daki akım değerlerinin aydınlatma yoğunluğuna bağlı değişim grafiklerinin eğim değerleri (m) Çizelge 4.8'de gösterilmektedir. Bulunan m değerlerinin 0,5 ile 1 aralığında elde edilmesi, tuzak seviyelerinin sürekli dağılımının varlığını göstermektedir [69].

Literatür incelendiğinde, Tataroğlu ve diğerleri (2014) tarafından yapılan çalışmada Cd katkılı ZnO fotodiyotlar p-tipi Si üzerine sol-gel yöntemiyle büyütülmüş ve diyotun elektriksel özellikleri ve fotoiletken davranışları araştırılmıştır. Diyot parametreleri termiyonik emisyon teorisine göre hesaplanmış ve $I-V$ grafikleri çizilmiştir. $I-V$ grafiklerinde diyotun ters besleme bölgesinde ışığa duyarlı olduğu görülmüştür. Fotoakımın ışığa duyarlılığını incelemek için $\log I-P$ grafiği çizilmiş ve grafiğin eğiminden m değeri 0,90 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerin 0,5 ile 1 aralığında elde edilmesi, tuzak seviyelerinin sürekli dağılımının varlığını göstermekte olduğu yorumu yapılmıştır [69]. Çizelge 4.8'de verilen m değerlerinin literatürde verilen değer ile uyumlu olduğu görülmüştür.

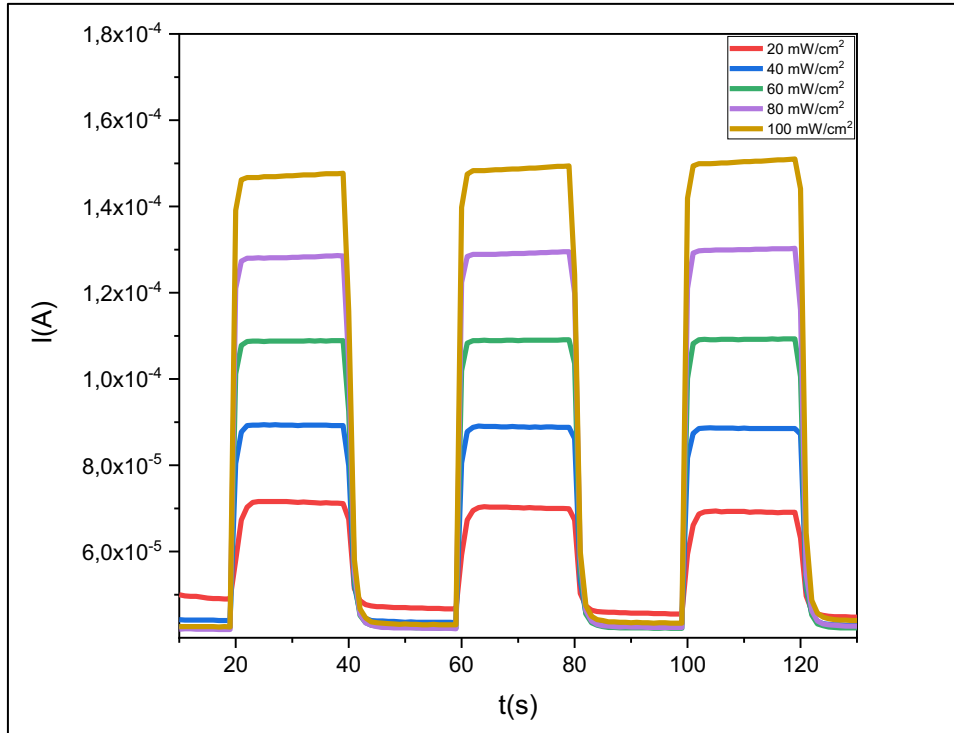
Ameen ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmada, katkısız ve farklı oranlarda (%0,1; %0,5; %2; %4) Cd katkılı ZnO p-tipi Si üzerine sol-gel spin kaplama metodu ile hazırlanan diyotların fotoelektriksel ve optik özellikleri farklı ışık şiddetleri altında incelenmiştir. Numunelerin elektriksel özellikleri incelenerek malzemenin fotovoltaiik davranış sergilediği görülmüştür. Malzemenin yapısal özellikleri incelenerek SEM sonuçlarına göre Cd katkısı arttıkça grain boyutunun da arttığı görülmüştür. Elektriksel karakterizasyon için FYTRONIX 5000 karakterizasyon sistemi kullanılmış ve $I-V$ karakteristikleri incelenmiştir. Katkısız ve Cd katkılı diyotlarda ters ve düz beslemde doğrultma davranışı görülmüş, örneğin %0,1 Cd katkılı diyot için doğrultma oranı 6.62×10^4 olarak bulunmuş ve diyotun Schottky diyot davranışına sahip olduğu görülmüştür. Termiyonik emisyon teorisinden diyot parametreleri hesaplanmış, idealite faktörü 1,7 olarak bulunmuştur. İdealite faktörünün 1'den büyük olması durumu metal-yarıiletken bariyer yüksekliğinin ve oksit tabakasının seri direnci ve homojen olmaması gibi çeşitli etkilerin varlığından kaynaklanabileceği ifade edilmiştir. Ters beslemde ışık şiddetinin artmasıyla akımın arttığı gözlenmiş ve bu da malzemenin fotovoltaiik modda çalıştığını yani diyotun hem fotovoltaj hem de fotoakımı olduğunu göstermektedir. Diyotların fotovoltaiik mekanizmaları $\log I-\log P$ grafiğiyle analiz edilmiş ve m değerleri 1,02-1,32 değerleri arasında bulunmuştur. Bu da diyotların sublineer fotoiletken yük aktarımı temelinde bir fotovoltaiik mekanizma sergilediğini gösterdiği ifade edilmiştir.

Diyotun fototepki analizini yapabilmek için farklı ışık şiddetlerinde (20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm²) diyotun geçici fotoakım ölçümleri yapılmış, ışığın açılmasıyla fotoakımın hızla arttığı, kapanmasıyla da fotoakımın aniden ilk durumuna döndüğü görülmüştür. Işığın artmasıyla daha fazla yük taşıyıcısı üretildiği ve yük taşıyıcısının sayısındaki artışın da fotoakımdaki artışa neden olduğu sonucuna varılmıştır. Diyot için $I_{açma}/I_{kapama}$ oranı 6411 olarak bulunmuş, elde edilen değerin yüksek bir fotoyanıt değeri sergilediği gösterilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar doğrultusunda incelen diyotun fotoelektrik özelliklerinin Cd katkı maddesi tarafından kontrol edildiği görülmektedir. İncelenen diyotların güneş paneli takip sistemleri için uygun elektronik cihazlar olduğu görülmüştür [6].

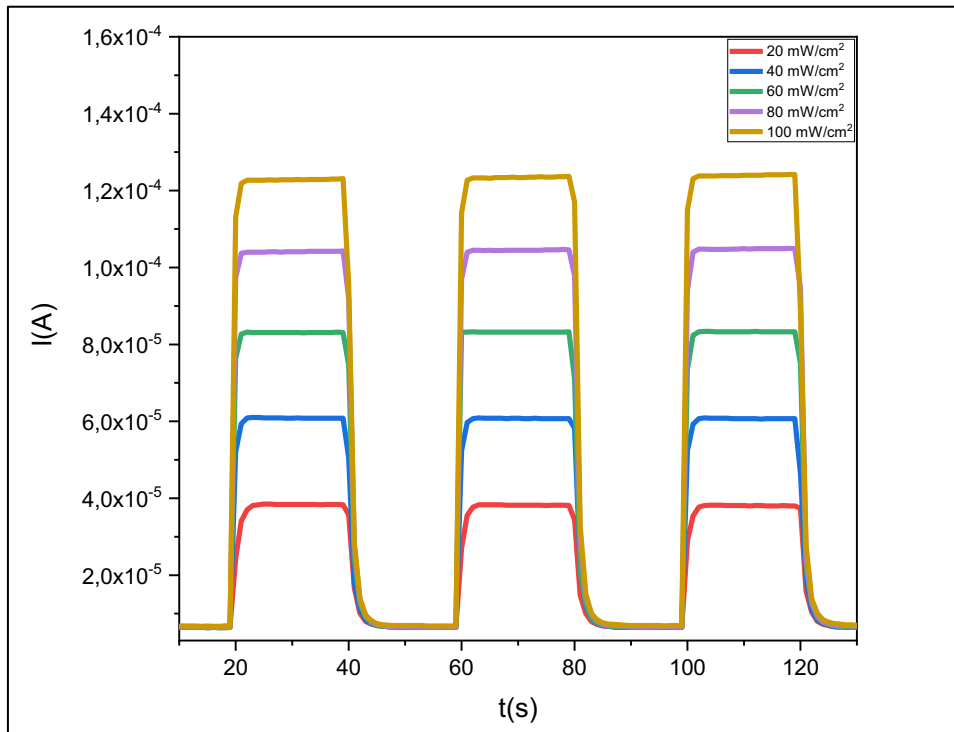
4.3.3. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotlarının fotoakım- zaman karakteristikleri

Zamana bağlı fotoakım ölçümleri, fotodiyotun taşıma mekanizmasını anlamak için kullanılan bir yöntemdir. Diyotların fotoakım ölçümleri farklı ışık şiddetleri için -1V'da 20s aralıklarla ışığın açılıp kapatılması şeklinde yapılmıştır.

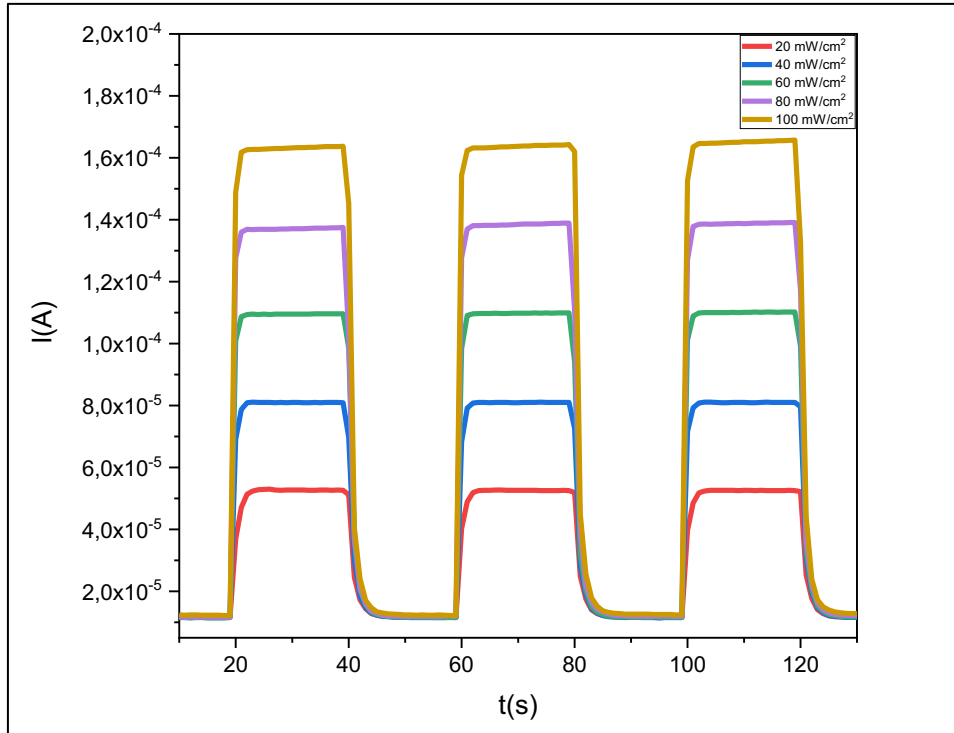
Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların fotoakım ölçümleri farklı aydınlatma şiddetlerinde 20s'lik aralıklarda 20-120s aralığında yapıldı. Bu süre içinde akımda değişim gözlenmedi. Şekil 4.14, 4.15, 4.16, 4.17'de Al/ZnO/p-Si/Al ve Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların fotoakım zaman değişimleri görülmektedir. Diyotlara ışık verildiğinde bir fotoakımın oluştuğu ışığın kapatılmasıyla fotoakımın da ilk durumuna geri döndüğü görüldü. Aynı zamanda artan ışık şiddetiyle fotoakımın da arttığı gözlemlendi. Bu sonuçların literatürle de uyumlu olduğu görüldü. Işık açık olduğu durumda diyotların fotoakımı, belirli bir seviyeye kadar aniden artar ve maksimum değere ulaştığında bu değerde hafif değişimlerle akım devam eder. Işık kapatıldıktan sonra fotoakım ilk durumuna geri döner. Fotodiyotun bu davranışı üretilen diyotun bir fotoiletken davranış sergilediğini göstermektedir. Fotoakımdaki ilk artış, diyotun aydınlatılmasıyla daha fazla serbest yük taşıyıcısının üretildiğini gösterir. Literatür incelendiğinde ışık şiddetinin artmasıyla gerçekleşen bu artışa diyotlardaki kusurların ve tuzak seviyelerinde sıkışıp kalan yük taşıyıcılarının etkili olduğu ifade edilmektedir [69].



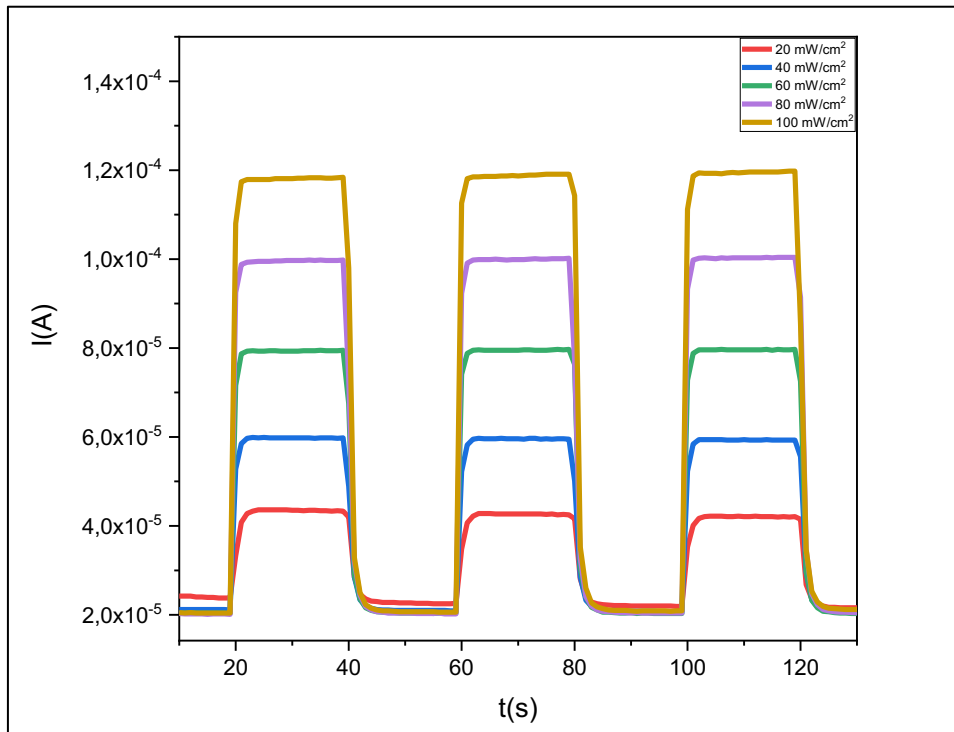
Şekil 4.14. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-t karakteristikleri



Şekil 4.15. %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-t karakteristikleri



Şekil 4.16. %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-t karakteristikleri



Şekil 4.17. %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-t karakteristikleri

Çizelge 4.9’da katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların $I_{açma}/I_{kapama}$ oranlarının farklı ışık şiddetleri altında değiştiği ve ışık şiddetinin artmasıyla $I_{açma}/I_{kapama}$ oranlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Fotodiyotlar için bu sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür [70].

Çizelge 4.9. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların $I_{açma}/I_{kapama}$ oranları

	ZnO	%1 Cd:ZnO	%3 Cd:ZnO	%5 Cd:ZnO
Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	$I_{açma}/I_{kapama}$	$I_{açma}/I_{kapama}$	$I_{açma}/I_{kapama}$	$I_{açma}/I_{kapama}$
20	1,52	5,73	4,53	1,92
40	2,05	9,50	6,98	2,86
60	2,58	12,97	9,49	3,90
80	3,06	15,77	11,57	4,92
100	3,47	18,33	13,20	5,72

4.3.4. Norde yöntemiyle engel yüksekliği ve seri direnç hesaplaması

Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd Katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların Norde fonksiyonu kullanılarak engel yüksekliği ve seri dirençleri hesaplandı [43].

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (4.9)$$

Eş. 4.9’da γ değeri idealite faktörü değerinden büyük ilk tam sayı olarak seçilmektedir. $I(V)$ ifadesi I - V ölçümünden elde edilen akım değeridir. Engel yüksekliği için;

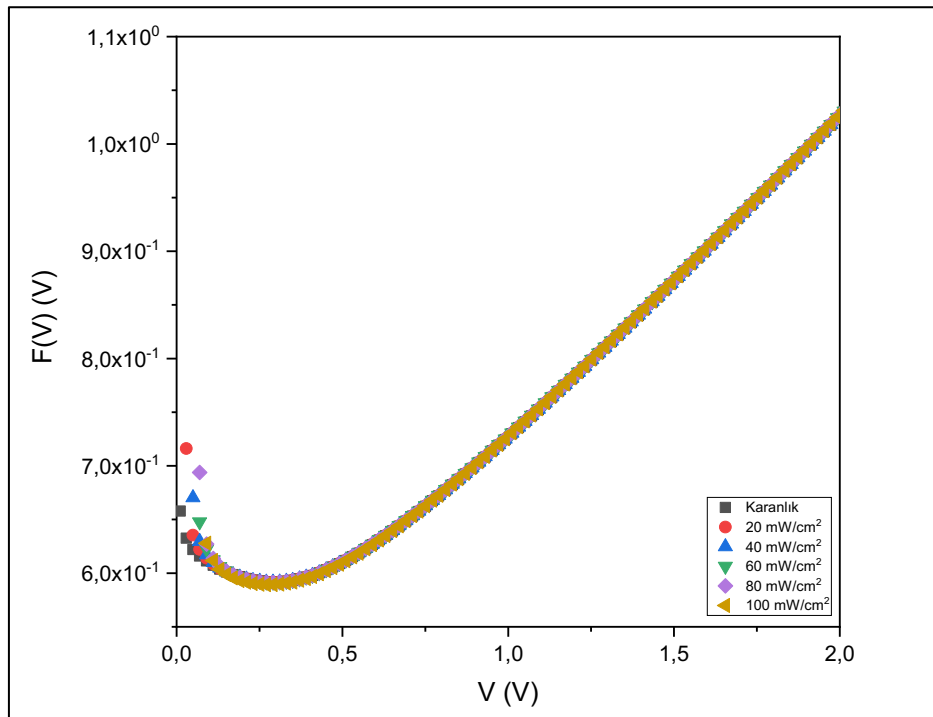
$$\Phi_B = F(V_0, \gamma) - \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V_0 - \frac{(\gamma - n)}{\beta n} \quad (4.10)$$

Eş. 4.10 tanımlanmaktadır. Bu denklemde, $\beta=q/kT$, $F(V_o)$ ifadesi $F(V)$ - V grafiğinin minimum $F(V)$ değeri olarak alınmaktadır. V_o ise bu değere karşılık gelen V değeridir.

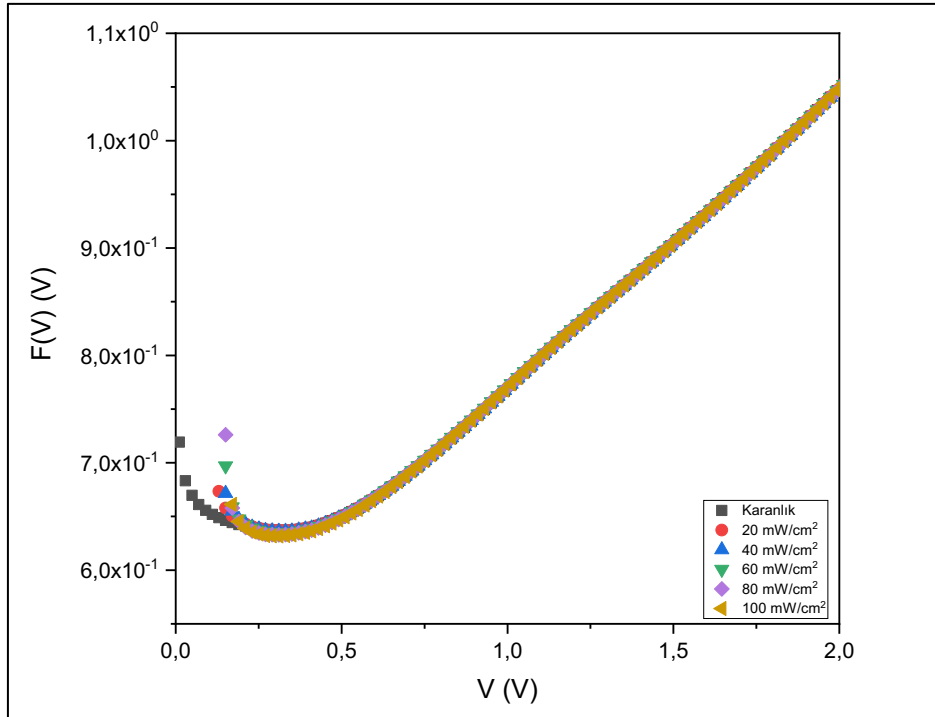
Seri direnç için;

$$R_s = \frac{(\gamma - n)}{\beta I_0} \quad (4.11)$$

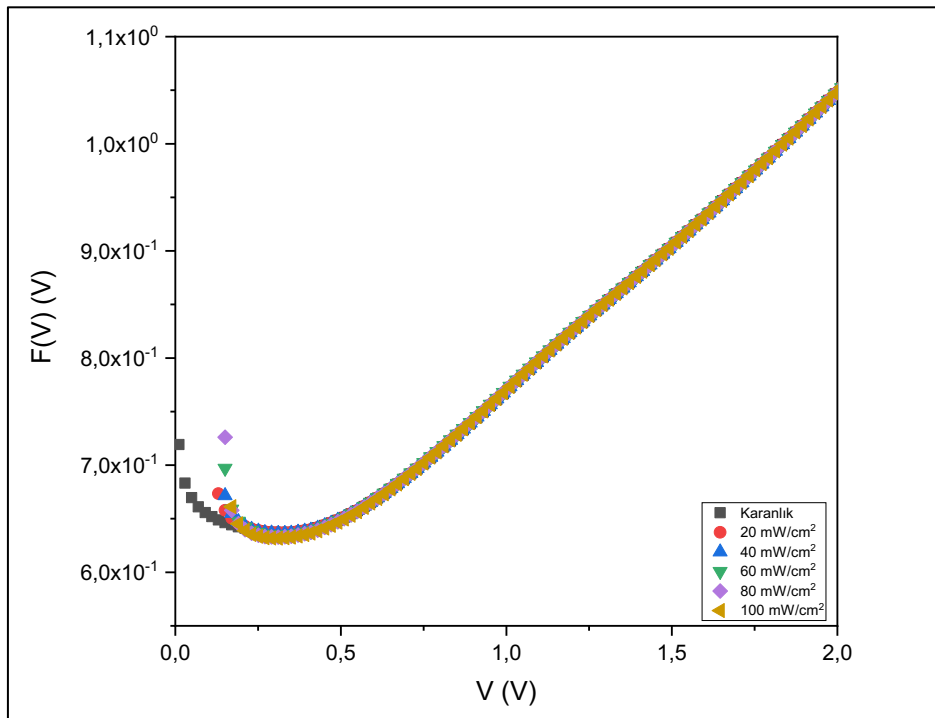
Şekil 4.18, 4.19, 4.20, 4.21’de $F(V)$ - V grafikleri görülmektedir. Bu grafiklerden yararlanılarak minimum $F(V)$ değerine karşılık gelen V_o değeri bulunmuştur ve Eş. 4.10’dan engel yüksekliği hesaplanmıştır. Grafiklerden V_o ’a karşılık gelen I_0 değeri bulunmuş ve Eş. 4.11’den R_s değerleri hesaplanmıştır.



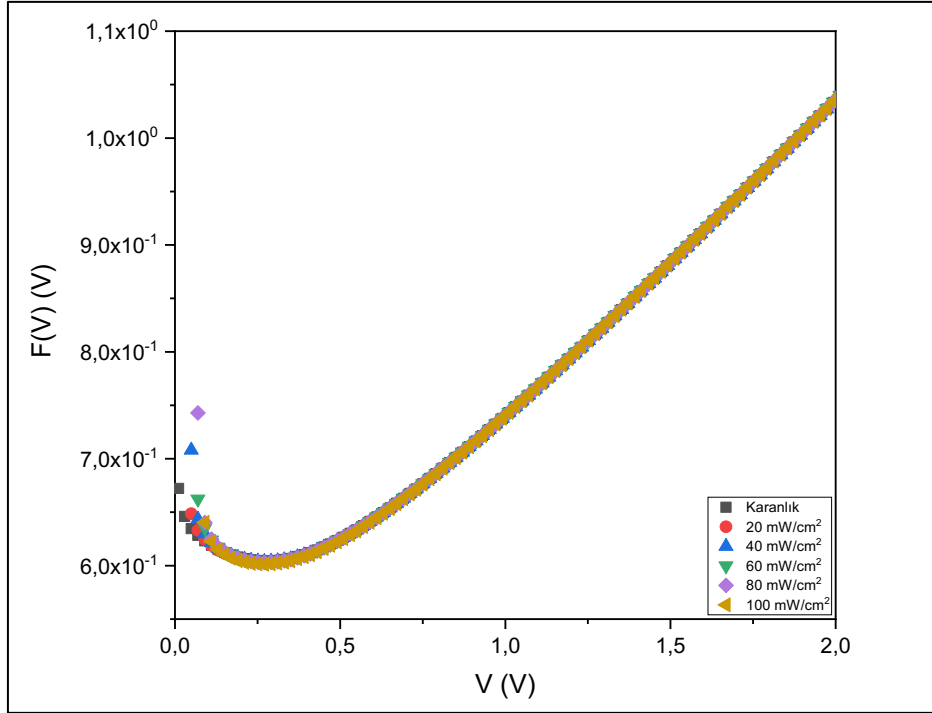
Şekil 4.18. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki $F(V)$ - V eğrileri



Şekil 4.19. %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki $F(V)$ - V eğrileri



Şekil 4.20. %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki $F(V)$ - V eğrileri



Şekil 4.21. %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun farklı ışık şiddetlerindeki F(V)-V eğrileri

Çizelge 4.10'da katkısız ve %1, %3, %5 Cd Katkılı ZnO diyotların ışık şiddetlerinin değişimine göre Eş. 4.10'dan hesaplanan engel yüksekliği ve Eş. 4.11'den hesaplanan seri direnç değerleri verilmiştir. Çizelge 4.10'a göre ışık şiddeti arttıkça katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotu için R_s değeri Ω mertebesinde artmaktadır, engel yüksekliği değerinin azaldığı görülmektedir. %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotu için ışık şiddeti arttıkça engel yüksekliği 0,66 ile 0,64 arasında değişim göstermekte, seri direnç değerleri 93,43 ile 46,80 Ω arasında değişmekte ve azalmaktadır. %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotu için ışık şiddeti arttıkça engel yüksekliği 0,65 ile 0,63 arasında değişim göstermekte, seri direnç değerleri 131,73 ile 16,43 Ω arasında değişmekte ve azalmaktadır. %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotu için ışık şiddeti arttıkça engel yüksekliği yaklaşık 0,62 değerini göstermekte, seri direnç değerleri 45,56 ile 39,34 Ω arasında değişmekte ve azalmaktadır. Işık şiddeti arttıkça tüm diyotlardaki seri direnç değerlerinin azaldığı görülmektedir. Katkılamaya miktarı arttıkça diyotların karanlıktaki R_s değerlerinin arttığı ve %5 Cd katkılı diyotta yeniden bir azalma olduğu görülmektedir. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda 100mW/cm² için en düşük seri direnç değeri 16,43 Ω değeriyle %3 Cd katkılı diyottur.

Katkılamaya bağlı olarak %1 katkılamada engel yüksekliği artmakta ve katkılamaya arttıkça da azalmakta olduğu görülmektedir. Karanlıkta katkılamaya bağlı olarak seri direnç

değerleri Ω mertebesinde artmakta %1, %3 ve %5 Cd katkılı numuneler için sırasıyla 93,43 Ω , 131,73 Ω , 45,56 Ω olduğu görülmektedir. Katkıya bağlı olarak R_s değeri en düşük %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotta 45,56 Ω olduğu hesaplandı.

Işık altında katkılı numunelerde engel yüksekliği azalmaktadır. Fakat katkısız numunenin aksine katkılı numunelerde ışık şiddetinin artmasıyla seri direnç değerlerinin azaldığı görüldü. 100mW/cm²'de katkılamaya bağlı olarak seri direnç değerleri Ω mertebesinde değişmekte %1, %3 ve %5 Cd katkılı numuneler için sırasıyla 46,80 Ω , 16,43 Ω , 39,34 Ω değerleri hesaplandı. Işık altında en düşük R_s değerin %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotta olduğu hesaplandı.

Çizelge 4.10. Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında hesaplanan engel yüksekliği, seri direnç değerleri

	ZnO		%1 Cd:ZnO		%3 Cd:ZnO		%5 Cd:ZnO	
Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)
0	0,63	7,82	0,66	93,43	0,65	131,73	0,62	45,56
20	0,61	30,86	0,66	282,92	0,66	105,36	0,62	46,31
40	0,62	33,26	0,65	99,98	0,65	55,09	0,63	53,65
60	0,62	36,96	0,64	57,89	0,64	38,88	0,62	43,11
80	0,61	29,04	0,64	47,25	0,64	15,29	0,62	43,76
100	0,61	33,71	0,64	46,80	0,63	16,43	0,62	39,34

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı ZnO ince filmler p-Si üzerine SILAR tekniği ile büyütüldü. Üretilen ince filmler yapısal ve morfolojik olarak incelendi. Omik ve Schottky kontaklar yapılarak katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al ZnO diyotlar oluşturuldu. Diyotların $I-V$ ve $I-t$ ölçümleri farklı ışık şiddetleri altında ölçümleri alındı ve diyot parametreleri hesaplandı. Üretilen diyotların diyot parametreleri Termiyonik emisyon teorisi ve Norde yöntemi kullanılarak hesaplandı. Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların akım iletim mekanizmalarının tanımlanabilmesi için $I-V$, $I-t$, $\log I-\log P$ ve $F(V)-V$ grafikleri çizilerek diyotların engel yüksekliği, idealite faktörü, ters doyma akımı, m değerleri ve seri direnç gibi diyot parametreleri hesaplandı. Elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla kıyaslanması ile üretilen diyotların, optik sensör ve fotodiyot uygulamaları için uygunluk durumları araştırıldı ve değerlendirildi.

Numunelerin yüzey analizi SEM ile yapıldı. İnce film yüzeyindeki tanecik şekillerinin katkılama ile değiştiği bulundu. Katkısız ZnO ince film yapısının topaksı yapıların yanında çubuksu yapıların ağırlıkta olduğu, %1 Cd katkılı ZnO ince film yapısının Cd katkısıyla topaksı ve çubuksu yapıların yanında çiçek benzeri bir morfolojiye dönüştüğü, %3 Cd katkılı ZnO ince film yapısının katkılama miktarı arttıkça gözenekli ve topaksı yapılara dönüştüğü, %5 Cd katkılı ince film yapısında taneciklerin boyutunun değiştiği ve dairesel yapılara dönüştüğü gözlemlendi.

Katkısız ve %1, %3, %5 Cd katkılı ZnO ince filmlerin yapısal analizi XRD ile yapıldı. XRD desenlerinden hazırlanan ince filmlerin hekzagonal wurtzite yapıda olduğu ve piklerin ZnO kristal pikleriyle eşlendiği görüldü. X-ışını kırınım ölçümlerinden yararlanılarak kristalin örgü parametreleri ve Debye Scherrer eşitliği kullanılarak kristal boyutu hesaplandı. Katkısız ZnO diyotun kristal boyutu 26,85 nm, %1 Cd katkılı ZnO diyotun kristal boyutu 24,99 nm, %3 Cd katkılı ZnO diyotun kristal boyutu 19,98 nm, %5 Cd katkılı ZnO diyotun kristal boyutu 18,21 nm olarak bulundu. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda örgü parametrelerinin literatürle uyumlu olduğu, ZnO piklerinin ve kristal boyutunun katkılama arttıkça azaldığı görüldü.

Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al ZnO diyotların elektriksel karakterizasyonu için farklı ışık şiddetleri altında akım-voltaj (I-V) ve akım-zaman (I-t) ölçümleri yapıldı. Diyotların elektriksel ölçümleri $\pm 2V$ voltaj aralığında alındı.

Al/ZnO/p-Si/Al ve Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların karanlıkta yapılan ölçümleri doğrultusunda çizilen akım voltaj grafiğinde ters beslemde fotoakımın gözlenmesi diyotların fotoiletken özellikte olduğunu gösterdi. Diyotların akım zaman karakteristikleri akımın voltaj ile üssel artmasından dolayı Termiyonik emisyon teorisi ile analiz edildi. Katkısız ve Cd katkılı ZnO diyotların akım zaman grafiğinin düz beslemdeki akımı analiz edilerek idealite faktörü, ters beslem doyma akımı ve engel yüksekliği gibi diyotların diyot parametreleri hesaplandı. Al/ZnO/p-Si/Al ve Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların $\ln I-V$ grafiğinin $3kT/q$ 'luk gerilim bölgesinin üzerindeki lineer bölgenin eğiminden yararlanılarak idealite faktörü hesaplandı. Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların karanlıktaki idealite faktörleri sırasıyla 2,33; 2,37; 2,62; 2,35 olarak bulundu. Tüm diyotların idealite faktörünün 1'den büyük olduğu ve idealite faktörünün katkılama arttıkça arttığı %5'lik katkılama yeniden azaldığı görüldü. Diyotların karanlıktaki engel yüksekliği değerleri sırasıyla 0,62 eV, 0,66 eV, 0,65 eV, 0,63 eV olarak bulundu. En yüksek engel yüksekliği 0,66 eV ile %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotta olduğu görüldü. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların doğrultma oranları hesaplandı ve karanlıktaki doğrultma oranları sırasıyla $1,6 \times 10^3$, $4,13 \times 10^3$, $4,45 \times 10^3$, $2,70 \times 10^3$ olarak bulundu. Karanlıkta katkı oranı arttıkça doğrultma oranlarının da arttığı ve %5 Cd katkılı diyotta yeniden bir azalma olduğu bulundu. Doğrultma oranları sonuçları incelendiğinde tüm diyotların doğrultma davranışı gösterdiği doğrulandı.

Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3 ve %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların 20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm² aydınlatma şiddetlerindeki $I-V$ ölçümleri alındı. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ışık şiddetinin artmasıyla ters beslemde tüm numuneler için akım değerinde bir artış gözlemlendi ve başka bir ifadeyle ışık şiddetine bağlı bir fotoakım oluştuğu gözlemlendi. Bu sonuçlar doğrultusunda diyotların fotodiyot olarak kullanılabileceği görüldü. Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3 ve %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların, 0, 20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm² aydınlatma şiddetleri altında idealite faktörü, ters beslem doyma akımı ve engel yüksekliği hesaplandı. Işık şiddetinin değişmesiyle diyot parametrelerinin de değiştiği bulundu. Diyotların ters beslemde aydınlatma şiddetlerine

göre tepki vermesi ve değişkenlik göstermesi üretilen diyotların ışığa duyarlı cihazlarda ve optoelektronik uygulamalarda kullanılma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3 ve %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların 100mW/cm² ışık şiddetinde $\ln I-V$ grafiği çizildi. Diyotlara uygulanan 100mW/cm² ışık şiddeti altında ters beslem akım değerlerinde bir artış gözlemlendi. Al/ZnO/p-Si/Al, Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların her biri için katkı oranına bağlı olarak 100mW/cm² ışık şiddetindeki durum için idealite faktörü, ters beslem doyma akımı, engel yüksekliği ve doğrultma değerleri hesaplandı. Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların 100mW/cm² ışık şiddetindeki idealite faktörleri sırasıyla 2,33; 2,70; 2,79; 2,37 olarak bulundu. Tüm diyotların idealite faktörünün 1'den büyük olduğu ve idealite faktörünün katkılama arttıkça arttığı %5'lik katkılama yeniden azaldığı görüldü. Diyotların engel yüksekliği değerleri sırasıyla 0,61 eV, 0,65 eV, 0,63 eV, 0,62 eV olarak bulundu. En yüksek engel yüksekliğin %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotta olduğu görüldü.

Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların her biri için fotoakımın aydınlatma yoğunluğuna bağlı $\log I-\log P$ grafikleri çizildi. m değerleri sabit voltaj altında (-1V) $\log I-\log P$ grafiklerinin eğiminden hesaplandı. Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların m değerleri sırasıyla 0,675; 0,798; 0,849; 0,730 olarak bulundu. Diyotların m değerlerinin katkının artmasıyla arttığı %5 Cd katkısında yeniden azaldığı görüldü. En yüksek m değerinin 0,849 ile %3 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotta olduğu görüldü.

Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların fotoakım ölçümleri farklı ışık şiddetlerinde, ışığa tepki analizi -1V'da 20s'lik aralıklarda 20-120s aralığında yapıldı ve diyotların her biri için $I-t$ grafikleri çizildi. Diyotların fotoakımının ışık açıldığında belirli bir seviyeye kadar aniden arttığı ve maksimum değere ulaştığında bu değerde hafif değişimlerle akımın devam ettiği, ışık kapatıldıktan sonra fotoakımın başlangıçtaki ilk değerine geri döndüğü görüldü. Fotodiyotun bu davranışı üretilen diyotun bir fotoiletken davranış sergilediğini göstermektedir. Fotoakımdaki ilk artış, diyotun aydınlatılma ile daha fazla serbest yük taşıyıcısının üretildiğini göstermektedir. Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların 100 mW/cm² ışık şiddetindeki aydınlatmada $I_{açma}/I_{kapama}$ değerleri sırasıyla 3,47 ile 5,72

arasında değişmekte ve en yüksek $I_{açma}/I_{kapama}$ değeri %1 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotun 18,33 olduğu görüldü. $I_{açma}/I_{kapama}$ değeri ile diyotların optik duyarlılıklarının iyi olduğu gözlemlendi.

Katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların Norde fonksiyonu kullanılarak engel yüksekliği ve seri dirençleri hesaplandı. Katkısız ve farklı oranlarda Cd katkılı diyotların karanlık ve 20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm² aydınlatma şiddetleri altında engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı. Işık şiddeti arttıkça katkısız Al/ZnO/p-Si/Al diyotu için R_s değeri artmakta, engel yüksekliği değeri azalmaktadır. %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların ışık şiddeti arttıkça engel yüksekliği azalmakta ve seri direnç değerleri artıp azalma değişimleri göstermektedir. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda 100mW/cm² için en düşük seri direnç değeri 16,43 Ω değeriyle %3 Cd katkılı diyotta olduğu görüldü.

Bu çalışma neticesinde katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların optik ve elektriksel özelliklerinin Cd katkısıyla değiştiği gözlemlendi. Cd katkı oranının değiştirilmesiyle ZnO diyotların diyot parametrelerinin değiştirilebileceği gözlemlendi. Elde edilen veriler doğrultusunda katkısız Al/ZnO/p-Si/Al ve %1, %3, %5 Cd katkılı Al/Cd:ZnO/p-Si/Al diyotların iyi birer doğrultucu olduğu ve optoelektronik uygulamalarında fotodiyot olarak kullanılabileceği görüldü.

KAYNAKLAR

1. Guan, S., Zhan, T., Hao, L., Kurosu, S., Ukai, T., Zhao, X., Itoi, T., & Lu, Y. (2022). Understanding the role of potassium incorporation in realizing transparent p-type ZnO thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 904, 164070.
2. Weber, E. R. (2003). Understanding defects in semiconductors as key to advancing device technology. *Physica B: Condensed Matter*, 340–342, 1–14.
3. Zhang, T., Li, M., Chen, J., Wang, Y., Miao, L., Lu, Y., & He, Y. (2022). Multi-component ZnO alloys: Bandgap engineering, hetero-structures, and optoelectronic devices. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 147, 100661.
4. Acharya, A. D., Moghe, S., Panda, R., Shrivastava, S. B., Gangrade, M., Shripathi, T., Phase, D. M., & Ganesan, V. (2012). Effect of Cd dopant on electrical and optical properties of ZnO thin films prepared by spray pyrolysis route. *Thin Solid Films*, 525, 49–55.
5. Soylu, M. (2020). Solution molarity dependent structural and optical properties of CdO nanostructured thin films. *Optik*, 216, 164865.
6. Ameen, B. A. H., Yildiz, A., Farooq, W. A., & Yakuphanoglu, F. (2019). Solar Light Photodetectors Based on Nanocrystalline Zinc Oxide Cadmium Doped/p-Si Heterojunctions. *Silicon*, 11(1), 563–571.
7. Pujar, S., and Rao, K. G. (2022). Annealing induced strong NBE emission of SILAR deposited ZnO thin films. *Materials Today: Proceedings*, 55, 56–61.
8. İlhan, M. (2019). *Dört bileşenli fonksiyonel yarıiletken infrared fotodedektörlerinin üretilmesi ve elektronik özelliklerinin belirlenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
9. Enderlerin R. and Horing N. J. M. (1997). *Fundamentals of Semiconductor Physics and Devices*. Singapore: World Scientific Publishing Co, 1.
10. Neamen D. A. (2003). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles* (Third Edition), New York: McGraw-Hill, 1-2.
11. Çavaş, M. (2011). *Nano yapılı metal oksit yarıiletkenler kullanılarak fotodiyotların üretilmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
12. Dugan, S. (2019). *CdO p-Si heteroeklem fotodedektörlerin üretilmesi ve elektriksel karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli.
13. Omar, M.A. (1993). *Elementary Solid State Physics: Principles and Applications*, California: Addison-Wesley Publishing Company Inc, 210-213.

14. Aslan, F., Esen, H. ve Yakuphanoglu, F. (2020). Çeşitli Metal Oksitlere Katkılama Yapılarak Üretilmiş Fotodiyotların Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi: Bir Araştırma, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 4 (2), 41-54.
15. Aslan, F. (2019), *Organik-inorganik hibrit yarıiletken fotodiyotların geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
16. Taner, A. (2010). *SILAR yöntemi ile ZnO yarıiletken filminin elde edilmesi ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
17. Jacoboni, C. (2010), *Theory of Electron Transport in Semiconductors: A Pathway from Elementary Physics to Nonequilibrium Green Functions*. Springer Series in Solid-State Sciences: Heidelberg Dordrecht London New York, 108.
18. Batmaz, T. (2020), *Elektrodepozisyon yoluyla elde edilmiş olan ni/n-GaAs schottky diyotlarının elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
19. Demirbilek, N. (2019). *Çinko oksit arayüzeyli yarıiletken-yarıiletken UV fotodedektörler*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
20. Özmen, D. (2015). *YMnO₃ ve YCoO₃ ferroelektrik malzeme esaslı Si tabanlı fotodiyotların elektriksel özellikleri*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
21. Dere, A. (2014). *Grafen esaslı fotodedektörlerin üretilmesi ve elektriksel özelliklerinin karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
22. Göktaş, Ö. F. (2018). *Al katkılı n-ZnO p-Si heterojonksiyon fotodiyotun ışığa duyarlılık performansının incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
23. Mishra, U. K. and Singh J. (2008). *Semiconductor Device Physics and Design*. Dordrecht: Springer, 146-147.
24. Sze, S.M. and Ng K. K. (2007). *Physics of Semiconductor Device* (Third Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 124.
25. Eygi, Z. D. (2011). *Production of amorphous silicon p-type crystalline silicon heterojunction solar cells by sputtering and PECVD methods*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
26. Sharma, B. L. (Edited by). (1984). *Metal-Setniconductor Schottlcy Barrier Junctions and Their Applications* Solid. New York and London: Plenum Press, 1.

27. Ghobadi, A., Khan, T., Celik, O., Biyikli, N., Okyay, A., & Topalli, K. (2017). A performance-enhanced planar Schottky diode for Terahertz applications: An electromagnetic modeling approach. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(10), 1905-1913.
28. Ertuğrul, G. (2015). *Metal Al_{0.2}Ga_{0.8}N Schottky diyotun akım-gerilim ölçümlerinden engel yüksekliğinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
29. Uslu, M. M. (2021). *Al SiO₂ p-Si MIS tipi fotodiyotların elektriksel özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
30. Zerdali, B. (2019). *Al/p-Si (MS) VE Al/TiO₂/p-Si (MIS) yapıların hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin karanlık ve ışık altında incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
31. Göksu, T. (2013). *Schottky metal kalınlığına bağlı olarak hazırlanan Ti n-GaAs Schottky kontakların Sıcaklık bağımlı karakteristiklerinin belirlenmesi*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
32. Monch, W. (2004). Electronic Properties of Semiconductor Interfaces. Ertl, G., Liith H. and Mills, D.L. (Eds). *Springer Series in Surface Sciences*, Verlag, Berlin, Heidelberg: Springer, 227.
33. Çalışkan, F. (2015). *Al rubrene n-GaAsS schottky diyodların sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
34. Çekinmez, A. (2015). *Metil mavisi ve metil yeşili organik bileşenli Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
35. Özkartal, A. (2015). *Kimyasal yüzey temizleme işleminin Sn/p-Si/Al Schottky tipi fotovoltaiik karakteristikleri üzerine etkileri*, Doktora Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
36. Bayram, A. (2010). *Al/p-Si/Al Schottky diyotlarında I-V C-f C-V karakteristiklerinden diyod parametrelerinin hesaplanması*, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
37. Razeghi, M. (2019). *Fundamentals of Solid State Engineering* (Fourth Edition). Cham: Springer, 672-674.
38. Rhoderick, E.H. and Williams, R.H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts* (Second Edition). New York: Oxford Science Publication, 94-95.
39. Moraki, K. (2015). *Au C₂₀H₁₂ n -Si Schottky engel diyotların (SBDs) elektriksel karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

40. Akgül, F. D. (2021). *Au SnO₂ n-Si Au schottky diyotlarda akım-gerilim karakteristikleri üzerine gama radyasyonunun etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun.
41. Karagöz, E. (2018). *Farklı fonksiyonel grup bulunduran naftalimit bileşiği ile schottky diyot yapımı ve diyotun elektriksel özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
42. Bohlin, K. E. (1986). Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60(3), 1223-1224.
43. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50, 5052-5053.
44. Bengin Akgül, K. (2015). *Aynı şartlar altında ürtetilen özdeş Au n-Si (100) Schottky diyotlarda karakteristik parametrelerin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
45. Akın, B. (2015). *Au ZnO n-GaAs MIS Schottky engel diyotların (SBDs) elektriksel karakteristiklerinin frekans ve voltaja bağlı incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
46. Yıldırım, N., & Durumlu, E. (2017). Ag Azure A n-Si Schottky Diyodun elektriksel ve fotovoltaiik özelliklerinin araştırılması. *Turkish Journal Of Nature And Science*, 6(1), 1–6.
47. Gündüz, B. (2007). *Organik yarıiletken fotodiyotların hazırlanması ve optoelektronik özelliklerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
48. Yakuphanoglu, F., Ilican, S., Caglar, M. and Caglar, Y. (2010). Microstructure and electro-optical properties of sol–gel derived Cd-doped ZnO films. *Superlattices and Microstructures*, 47(6), 732-743.
49. Ashour, A., Kaid M.A., El-Sayed N.Z. and Ibrahim A.A. (2006). Physical properties of ZnO thin films deposited by spray pyrolysis technique. *Applied Surface Science* 252,7844–7848.
50. İskenderoglu, D. & Güney, H. (2019). CdO: Ag İnce Filmlerinin SILAR Tekniği İle Büyütülmesi ve Karakterizasyonu. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 128-135.
51. Erdem, E. (2021). *SILAR yöntemi kullanılarak PbO ince filminin üretimi ve Pb PbO p-Si MIS kontaklarının elektronik ve arayüzey özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
52. Sönmezoğlu, S., Koç, M. & Akın, S. (2012). İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28 (5), 389-404.

53. Turgut, E. (2017). *NiO NiCr2O4 ve α -Fe2O3 ince filmlerinin büyütilmesi karakterizasyonu ve NiO ince filmlerinin gaz sensörü özelliğinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
54. Waseda Y., Matsubara E., Shinoda K. (2011). *X-Ray Diffraction Crystallography Introduction Examples and Solved Problems*. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer, 73-75.
55. Köç, P. (2016). *Rf-magnetron sıçratma yöntemi ile cam alttaşlar üzerine ZrO2 ince filmlerin oluşturulması ve elde edilen ince filmlerin karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
56. Nagar S., Chakrabarti S. (2017). *Optimisation of ZnO Thin Films Implants, Properties, and Device Fabrication*. Singapore: Springer, 1-6.
57. Huang J., Han X., Peng Y. (2021). Tuning the electronic structure and optical properties of ZnO doped with different concentrations of Mg atom: The first principles study, *Chemical Physics Letters*, 780, 138922.
58. Çetinkaya, S., Çetinkara, H. A., Kahraman, S., & Bayansal, F. (2013). Characterization of Al/n-ZnO/p-Si/Al structure with low-cost solution-grown ZnO layer. *Philosophical Magazine Letters*, 93(9), 550–559.
59. Bilgen, Y. (2008). *Sol-gel yöntemiyle üretilen nanokristal ZnO Ga ince filmlerinin optik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
60. Stokes D. J. (2008). *Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy (VP-ESEM)*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 1-2.
61. Kazmiruk V. (editor). (2012). *Scanning Electron Microscopy*. London: IntechOpen, 2.
62. Zhai Y.J., Li J.H., Fang X., Chen X.Y., Fang F., Chu X.Y., Wei Z.P. and Wang X.H. (2014). Preparation of cadmium-doped zinc oxide nanoflowers with enhanced photocatalytic activity, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26, 225-230.
63. Al-Rasheidi M., Khan F., Al-Ahmed A., Rehman S., Al-Sulaiman F. (2022). Cd-doped ZnO-based electron transport layer for organic-inorganic hybrid perovskite cells: Experimental and numerical study. *Optical Materials*, 126, 112-144.
64. Oruc P., Turan N., Demirölmez Y., Seçkin A., Çavdar Ş., Koralay H., and Tuğluoğlu N. (2021) AC conductivity, dielectric and electrical modulus studies of bulk Zn0.95Co0.05O ceramic, *J Mater Sci: Mater Electron*, 32:15837–15850.
65. Mondal S. and Mitra P. (2012). Preparation of cadmium-doped ZnO thin films by SILAR and their characterization, *Bull. Mater. Sci.*, 35(5), 751–757.
66. Aslan, F., Esen, H., & Yakuphanoglu, F. (2019). Electrical and fotoconducting characterization of Al/coumarin: ZnO/Al novel organic-inorganic hybrid photodiodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 789, 595–606.

67. İlhan, M., Koç, M. M., Coşkun, B., Erkovan, M., & Yakuphanoglu, F. (2021). Cd dopant effect on structural and optoelectronic properties of TiO₂ solar detectors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(2), 2346–2365.
68. Gozeh, B. A., Karabulut, A., Ismael, C. B., Saleh, S. I., & Yakuphanoglu, F. (2021). Zn-doped CdO effects on the optical, electrical and photoresponse properties of heterojunctions-based photodiodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 872, 159624.
69. Tataroglu, A., Aydın, H., Al-Ghamdi, A. A., El-Tantawy, F., Farooq, W. A., & Yakuphanoglu, F. (2014). Photoconducting properties of Cd_{0.4}Zn_{0.6}/p-Si photodiode by sol gel method. *Journal of Electroceramics*, 32(4), 369–375.
70. Karabulut, A., Dere, A., Al-Sehemi, A. G., Al-Ghamdi, A. A., & Yakuphanoglu, F. (2021). Zinc oxide based 3-components semiconductor oxide photodiodes by dynamic spin coating method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 134, 106034.
71. Tugluoglu, N., & Karadeniz, S. (2012). Analysis of current–voltage and capacitance–voltage characteristics of perylene-monoimide/n-Si Schottky contacts. *Current Applied Physics*, 12(6), 1529–1535.
72. Benhaliliba, M. (2021). A rectifying Al/ZnO/pSi/Al heterojunction as a photodiode. *Superlattices and Microstructures*, 107140.
73. Angelin, M. D., Rajkumar, S., Ravichandran, A. T., & Merlin, J. P. (2022). Systematic investigation on the electrochemical performance of Cd-doped ZnO as electrode material for energy storage devices. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 161, 110486.
74. Li, G. R., Zhao, W. X., Bu, Q., & Tong, Y. X. (2009). A novel electrochemical deposition route for the preparation of Zn_{1-x}Cd_xO nanorods with controllable optical properties. *Electrochemistry Communications*, 11(2), 282–285.
75. Altun, B., Ajjaq, A., Çağırtekin, A. O., Er, I. K., Sarf, F., & Acar, S. (2021). Influence of isovalent Cd doping concentration and temperature on electric and dielectric properties of ZnO films. *Ceramics International*, 47(19), 27251–27266.
76. Sze, S.M. and Ng K. K. (2007). *Physics of Semiconductor Device* (Third Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 362-390.



GAZİ GELECEKTİR..