

**NANO YAPILI METAL OKSİT YARIİLETKENLER  
KULLANILARAK FOTO DİYOTLARIN  
ÜRETİLMESİ**

**Mehmet ÇAVAŞ**

**Doktora Tezi**

**Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Niyazi ÖZDEMİR**

**Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU**

**TEMmuz-2011**

**T.C**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANO YAPILI METAL OKSİT YARIİLETKENLER KULLANILARAK FOTO**  
**DİYOTLARIN ÜRETİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mehmet ÇAVAŞ**

**08222201**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27 Temmuz 2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 9 Ağustos 2011**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Niyazi ÖZDEMİR (F.Ü)**

**Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU (F.Ü)**

**Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT (F.Ü)**

**Doç. Dr. Mustafa TAŞKIN (F.Ü)**

**Doç. Dr. M. Enver AYDIN (D.Ü)**

**TEMMUZ-2011**

## ÖNSÖZ

**“Nano Yapılı Metal Oksit Yarıiletkenler Kullanılarak Foto Diyotların Üretilmesi”** konulu doktora tezimin hazırlanmasında hiç bir konuda desteğini esirgemeyen Danışman Hocalarım Doç. Dr. Niyazi ÖZDEMİR ve Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU’na Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Niyazi BULUT’a Fen Fakültesi Fizik Bölümünü Nano Teknoloji Ve Elektronik Malzeme Araştırma Laboratuvarındaki çalışma arkadaşlarım Bayram GÜNDÜZ, Cihat AYDIN ve Yusuf ORMAN’a mesai arkadaşım Öğretim Görevlisi Orhan ŞAHİNDAS’a çalışmalarım sırasında her türlü fedakârlığı yaparak desteklerini esirgemeyen eşim ve çocuklarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel araştırma projeler (FÜBAP) birimi FÜBAP-TF.10.01 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ .....                                          | II        |
| İÇİNDEKİLER .....                                    | III       |
| ÖZET .....                                           | VI        |
| SUMMARY .....                                        | VII       |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                               | VIII      |
| TABLolar LİSTESİ .....                               | XIII      |
| SEMBOLLER LİSTESİ .....                              | XIV       |
| <br>                                                 |           |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                 | <b>1</b>  |
| <br>                                                 |           |
| <b>2. YARIİLETKEN MALZEMELER .....</b>               | <b>2</b>  |
| 2.1. Katkılı Yarıiletkenler.....                     | 7         |
| 2.2. n-Tipi Yarıiletkenler.....                      | 8         |
| 2.3. p-Tipi Yarıiletkenler.....                      | 9         |
| 2.4. Katkısız Yarıiletkenler.....                    | 10        |
| 2.5. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri .....  | 12        |
| 2.6. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri.....         | 15        |
| <br>                                                 |           |
| <b>3. FOTO DİYOTLAR .....</b>                        | <b>17</b> |
| 3.1. Metal Yarıiletken Foto Diyotlar .....           | 17        |
| 3.2. Heteroeklem Foto Diyotlar.....                  | 20        |
| 3.3. Foto Diyotların Akım-Voltaj Karakteristiği..... | 21        |
| 3.3.1. Fotovoltaik Etkiler.....                      | 23        |
| 3.3.2. Hacimsel Fotovoltaik Etkiler .....            | 24        |
| 3.3.3. Yüzeysel Fotovoltaik Etkiler .....            | 25        |
| 3.3.4. Fotovoltaik Parametreler .....                | 25        |
| 3.3.4.1. Açık-Devre Voltajı.....                     | 25        |
| 3.3.4.2. Kısa-Devre Akımı .....                      | 26        |
| 3.3.4.3. Spektral Cevap .....                        | 26        |



|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.4.4. Seri Direnç.....                                                      | 26        |
| 3.3.4.5. Şönt Direnci.....                                                     | 27        |
| 3.3.4.6. Kuantum Verimi .....                                                  | 27        |
| 3.3.4.7. Doldurma Faktörü .....                                                | 28        |
| 3.3.4.8. Foto Duyarlılık .....                                                 | 30        |
| <b>4. METAL OKSİT YARI İLETKENLER.....</b>                                     | <b>31</b> |
| 4.1. Çinko Oksit (ZnO) ve Özellikleri.....                                     | 31        |
| 4.2. ZnO'in Katkılanması.....                                                  | 33        |
| 4.2.1. n-Tipi Katkılama .....                                                  | 33        |
| 4.2.2. p-Tipi Katkılama .....                                                  | 33        |
| 4.3. ZnO'in Piezoelektrik Özelliği .....                                       | 34        |
| 4.4. ZnO'in Elektriksel Özellikler.....                                        | 34        |
| 4.5. ZnO'in Optik Özellikler .....                                             | 34        |
| 4.6. ZnO'in Manyetik Özelliği .....                                            | 35        |
| 4.7. ZnO'in Kimyasal Algılama Özelliği .....                                   | 35        |
| 4.8. CdO'in Özellikleri .....                                                  | 36        |
| 4.9. Sol Jel Yöntemi .....                                                     | 37        |
| 4.9.1. Sol Jel Kaplama Yöntemleri .....                                        | 38        |
| 4.9.2. Daldırarak Kaplama Yöntemi (Dip Coating) .....                          | 38        |
| 4.9.3. Spin Kaplama (Spin Coating) .....                                       | 39        |
| 4.9.4. Püskürterek Kaplama Yöntemi (Spray Pyrolysis) .....                     | 39        |
| <b>5. METERYAL VE METOT .....</b>                                              | <b>40</b> |
| 5.1. Deneysel İşlemler ve Ölçüm Sonuçları .....                                | 40        |
| 5.1.1. CdO ve ZnO Filmlerin Üretilmesi.....                                    | 40        |
| 5.1.2. CdO ve ZnO Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu .....                     | 42        |
| 5.1.3. ZnO ve CdO Filmlerinin Optik Sonuçları (UV) .....                       | 50        |
| 5.2. Foto Diyotların Hazırlanması.....                                         | 57        |
| 5.2.1. Al/p-Si/CdO/Al Foto Diyotların Hazırlanması .....                       | 57        |
| 5.2.2. Al/p-Si/ZnO/Al Foto Diyotların Hazırlanması.....                        | 59        |
| 5.3. Al/p-Si/CdO/Al Foto Diyotların Ölçüm Sonuçları .....                      | 61        |
| 5.3.1. Al/p-Si/CdO/Al Foto Diyotların Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri..... | 61        |

|           |                                                                                   |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.2.    | Al/p-Si/CdO/Al Foto Diyotların Kapasite-İletkenlik Voltaj Karakteristikleri.....  | 64         |
| 5.3.3.    | Al/p-Si/CdO/Al Foto Diyotların Fotovoltaik ve Fotoiletkenlik Karakteristikleri.   | 77         |
| 5.4.      | Al/p-Si/ZnO/Al Foto Diyotların Ölçüm Sonuçları.....                               | 84         |
| 5.4.1.    | Al/p-Si/ZnO/Al Foto Diyotların Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri .....          | 84         |
| 5.4.2.    | Al/p-Si/ZnO/Al Foto Diyotların Kapasite-İletkenlik Voltaj Karakteristikleri ..... | 87         |
| 5.4.3.    | Al/p-Si/ZnO/Al Diyotların Fotovoltaik ve Fotoiletkenlik Karakteristikleri .....   | 106        |
| <b>6.</b> | <b>SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>                                                 | <b>120</b> |
|           | <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                             | <b>124</b> |
|           | <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                             | <b>130</b> |

## ÖZET

Bu tezde katkısız ve katkılı CdO ve ZnO filmler sol jel yöntemi ile hazırlandı. CdO ve ZnO filmler spin coater metodu kullanılarak cam altlık üzerine oluşturuldu. Hazırlanan CdO ve ZnO filmlerin yasak enerji band aralığını belirlemek için absorbans, transmitans ve reflektansları ölçüldü. Filmlerin yapısal özellikleri XRD ve AFM tekniği ile araştırıldı. XRD sonuçları CdO ve ZnO filmlerin polikristal yapıya sahip olduğunu doğruladı.

Hazırlanan Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al diyotların akım-voltaj, fotoakım, kapasite-voltaj ve iletkenlik-voltaj elektriksel karakterizasyonu ölçümleri gerçekleştirildi. Diyotların arayüzey özellikleri ve elektriksel parametreleri Ni ve Al katkılara bağlı olarak değişti.

Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al diyotların doğrultma ve fotocevap özellikleri katkı miktarına bağlı olarak değişti. Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al diyotlarda en iyi foto duyarlılığı %0.1 Al ve Ni katkılar için gösterdi.

Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al diyotların fotocevap özelliklerinin farklı metal katkılar kullanılarak bu özelliklerin geliştirilebildiği bulundu.

**Anahtar Kelimeler:** Foto diyot, ZnO, CdO, Nano yapı, Optik yarıiletkenler

## SUMMARY

### Using Nano-Structured Metal Oxide Semiconductor Production of Photo Diodes

In this thesis, undoped and doped CdO and ZnO films were prepared by sol gel method to fabricate the metal oxide semiconductor based photodiodes. The CdO and ZnO films were grown on the glass substrates using spin coater method. The absorbance transmittance, reflectance of prepared ZnO and ZnO films were measured to determine their optical band gaps. The structural properties of the films were investigated by X-ray diffraction and atomic force microscopy techniques. The XRD results confirm that the ZnO and CdO films have the polycrystalline.

The electrical characterization of prepared Al/p-Si /CdO/Al and Al/p-Si/ZnO/Al diodes were performed by current-voltage characteristics, phototransient current measurements, and capacitance-voltage and conductance-voltage techniques. The electrical parameters and interface properties of the diodes were changed with the content of Al and Ni dopants.

The photoresponse and rectification properties of Al/p-Si/CdO/Al Al/p-Si/ZnO/Al photodiodes were changed by depending on the content of dopant. The Al/p-Si/CdO/Al and Al/p-Si/ZnO/Al diodes indicate the best photosensitivity for 0.1 % Al and Ni dopants.

It was found that the photoresponse properties of the Al/p-Si/CdO/Al Al/p-Si/ZnO/Al diode can be improved using various metal dopants.

**Keywords:** Photo diode, ZnO, CdO, Nanostructure, Optical semiconductors

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

|             |                                                                                                                                                                                                                              |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1.  | Çekirdekten uzaklıklarına göre elektron enerji seviyeleri.....                                                                                                                                                               | 4  |
| Şekil 2.2.  | a.Yariletkenlerin band yapısı, b. Yariletkenlerde elektron ve boşluk hareketi .....                                                                                                                                          | 5  |
| Şekil 2.3.  | Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu .....                                                                                                                                                                                         | 6  |
| Şekil 2.4.  | Yariletkenlerin E-k ve E konum grafiği .....                                                                                                                                                                                 | 7  |
| Şekil 2.5.  | a. A <sub>s</sub> katkılı silisyum Kristali. b.N-tipi yariletkenlerin bant yapısı .....                                                                                                                                      | 9  |
| Şekil 2.6.  | a. G <sub>a</sub> katkılı silisyum kristali, b. P-tipi yariletkenlerin bant yapısı .....                                                                                                                                     | 10 |
| Şekil 2.7.  | Katkısız yariletkenlerin farklı sıcaklıklardaki iletim ve valans bandı .....                                                                                                                                                 | 11 |
| Şekil 2.8.  | Si kristalinde elektron-hole oluşumu ve bir potansiyel fark ile sağlanan hareket .....                                                                                                                                       | 11 |
| Şekil 2.9.  | T=0 K sıcaklıkta iletim bandı ile valans bandındaki elektron doluluk durumları ve bandların enerji eksenine göre konumları .....                                                                                             | 12 |
| Şekil 2.10. | a. Fotonun enerjisi, $h\nu$ , yariletkenin enerjisinden büyük olmak şartıyla tek bir fotonun bir elektronu valans bandına uyarması, b. Bir elektron ile bir hole birleşerek enerjisi, $h\nu$ , olan bir foton üretmesi ..... | 16 |
| Şekil 3.1.  | Foto diyotun sembolü, yapısı ve karakteristik eğrisi.....                                                                                                                                                                    | 17 |
| Şekil 3.2.  | Aydınlatılan bir metal yariletken eklemine şematik diyagramı .....                                                                                                                                                           | 18 |
| Şekil 3.3.  | Foto diyotun Polarmalandırılması .....                                                                                                                                                                                       | 19 |
| Şekil 3.4.  | InP altlık üzerine oluşturulmuş heteroeklem foto diyotlar .....                                                                                                                                                              | 21 |
| Şekil 3.5.  | Foto diyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-voltaj karakteristikleri.....                                                                                                                                       | 22 |
| Şekil 3.6.  | Foto diyotun, a. $V=f(E)$ , $I=f(E)$ eğrileri, b. $I_K=f(V)$ eğrileri .....                                                                                                                                                  | 24 |
| Şekil 3.7.  | a. Seri ve şönt dirençleri kapsayan bir foto diyodun eşdeğer devresi, b. Bir foto diyodun tipik aydınlatma ve karanlık I-V karakteristikleri, c. ışık şiddetinin fonksiyonu olarak $V_{oc}$ ve $J_{sc}$ 'leri .....          | 28 |
| Şekil 3.8.  | $qV_{oc}$ 'nin fonksiyonu olarak $V_m/V_{oc}$ , $I_m/I_{sc}$ ve FF' nin değişimi .....                                                                                                                                       | 29 |
| Şekil 4.1.  | ZnO'in Hekzagonal Würtzite Yapısı .....                                                                                                                                                                                      | 32 |
| Şekil 4.2.  | CdO'in (fcc) Birim Hücre Tipindeki Kristal Örgüsü .....                                                                                                                                                                      | 36 |
| Şekil 5.1.  | Katkısız ve Al katkılı CdO numunelerin X - ışını kırınım deseni.....                                                                                                                                                         | 43 |

|             |                                                                                                       |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.2.  | Katkısız ve Ni katkılı ZnO numunelerin X - ışını kırınım desenleri.....                               | 44 |
| Şekil 5.3.  | Katkısız CdO filmin AFM görüntüsü.....                                                                | 45 |
| Şekil 5.4.  | %0.1 Al katkılı CdO filmin AFM görüntüsü .....                                                        | 46 |
| Şekil 5.5.  | %1 Al katkılı CdO filmin AFM görüntüsü .....                                                          | 46 |
| Şekil 5.6.  | Katkısız ZnO filmin AFM görüntüsü.....                                                                | 47 |
| Şekil 5.7.  | %0.1 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü.....                                                         | 47 |
| Şekil 5.8.  | %0.2 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü.....                                                         | 48 |
| Şekil 5.9.  | %0.5 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü.....                                                         | 48 |
| Şekil 5.10. | %1 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü.....                                                           | 49 |
| Şekil 5.11. | %2 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü.....                                                           | 49 |
| Şekil 5.12. | UV Spektrofotometresi .....                                                                           | 51 |
| Şekil 5.13. | Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerin soğrulma eğrileri.....                                           | 51 |
| Şekil 5.14. | Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerin geçirgenlik eğrileri.....                                        | 52 |
| Şekil 5.15. | Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerin yansıma eğrileri .....                                           | 52 |
| Şekil 5.16. | Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ eğrileri.....                           | 53 |
| Şekil 5.17. | Katkısız ve Al katkılı CdO filmlerin soğrulma eğrileri.....                                           | 54 |
| Şekil 5.18. | Katkısız ve Al katkılı CdO İnce filmlerin geçirgenlik eğrileri.....                                   | 55 |
| Şekil 5.19. | Katkısız ve Al katkılı CdO İnce filmlerin yansıma eğrileri .....                                      | 56 |
| Şekil 5.20. | Katkısız ve Al katkılı CdO filmlerin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ eğrileri .....                          | 57 |
| Şekil 5.21. | Al/p-Si/CdO/Al diyotları hazırlama aşamaları.....                                                     | 59 |
| Şekil 5.22. | Al/p-Si/ZnO/Al diyotları hazırlama aşamaları .....                                                    | 60 |
| Şekil 5.23. | VAKSİS PVD-HANDY/2S-TE çift resistif ısıtma kaynaklı buharlaştırma sistemi.....                       | 61 |
| Şekil 5.24. | Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al diyotların I-V ve C-V ölçümleri için kullanılan deney düzeneği ..... | 61 |
| Şekil 5.25. | Katkısız ve %0.1- %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların I-V eğrileri .....                          | 62 |
| Şekil 5.26. | Katkısız, %0.1, %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun log I-V grafiği.....                             | 64 |
| Şekil 5.27. | CdO katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 1 MHz C-V eğrileri .....                | 66 |
| Şekil 5.28. | Katkısız , %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 1 MHz $C_{adj}$ eğrileri .....             | 66 |
| Şekil 5.29. | CdO katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 100 kHz C-V eğrileri .....              | 67 |

|             |                                                                                                                                                                             |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.30. | Katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 100 kHz $C_{adj}$ eğrileri .....                                                                                  | 68 |
| Şekil 5.31. | a. Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyot b. %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot<br>c. %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların farklı frekanslardaki C-V eğrileri .....             | 70 |
| Şekil 5.32. | a. Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyot b. %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot<br>c. %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 1 MHz altındaki $C^{-2}$ -V grafikleri .....         | 72 |
| Şekil 5.33. | a. katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyot b. %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot<br>c. %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların farklı frekanslarda çizilen $C_{adj}$ eğrileri ..... | 73 |
| Şekil 5.34. | a. Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyot b. %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot<br>c. %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların farklı frekanslardaki $G_{adj}$ eğrileri .....       | 75 |
| Şekil 5.35. | a. Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyot b. %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot<br>c. %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların $D_{it}$ eğrileri.....                             | 77 |
| Şekil 5.36. | Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V eğrileri                                                                                               | 78 |
| Şekil 5.37. | %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V eğrileri .....                                                                                  | 78 |
| Şekil 5.38. | %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V grafiği .....                                                                                     | 79 |
| Şekil 5.39. | Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyotun $I_{ph}$ -P eğrisi .....                                                                                                                    | 80 |
| Şekil 5.40. | %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun $I_{ph}$ -P eğrisi .....                                                                                                             | 80 |
| Şekil 5.41. | %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun $I_{ph}$ -P eğrisi .....                                                                                                               | 81 |
| Şekil 5.42. | Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki $I_{ph}$ -t eğrisi ..                                                                                      | 82 |
| Şekil 5.43. | %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki $I_{ph}$ -t eğrisi .....                                                                            | 83 |
| Şekil 5.44. | %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki $I_{ph}$ -t eğrisi .....                                                                              | 84 |
| Şekil 5.45. | Katkısız, %0.1- %0.2 - %0.5 - %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların I-V karakteristikleri .....                                                                     | 85 |
| Şekil 5.46. | Katkısız, %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun log I-V eğrileri.....                                                                                | 86 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.47. | Katkısız ,%0.1- %0.2- %0.5- %1ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 1 MHz C-V eğrileri.....                                                                                                                                                                                         | 87  |
| Şekil 5.48. | Katkısız, %0.1- %0.2- %0.5- %1ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 1 MHz $C_{adj}$ eğrileri.....                                                                                                                                                                                   | 88  |
| Şekil 5.49. | Katkısız, %0.1- %0.2- %0.5- %1, %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 100 kHz C-V eğrileri.....                                                                                                                                                                                        | 89  |
| Şekil 5.50. | Katkısız %0.1- %0.2- %0.5- %1ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 100 kHz $C_{adj}$ eğrileri .....                                                                                                                                                                                 | 89  |
| Şekil 5.51. | a. Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyot b. %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot c. %0.2 Ni katkılı Al/p- Si/ZnO/Al diyot d. %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot e. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot f. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların farklı frekanslardaki C-V eğrileri .....      | 93  |
| Şekil 5.52. | a. Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyot b. %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot c. %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot d. %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot e. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot f. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 1 MHz altındaki $C^{-2}$ -V eğrileri.....      | 96  |
| Şekil 5.53. | a. Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyot b. %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot c. %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot d. %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot e. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot f. %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların farklı frekanslardaki $C_{adj}$ eğrileri ..... | 99  |
| Şekil 5.54. | a. Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyot b. %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot c. %0.2 Ni katkılı Al/pSi/ZnO/Al diyot d. %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot e. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot f. %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların farklı frekanslardaki $G_{adj}$ eğrileri .....  | 102 |
| Şekil 5.55. | a. Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyot b. %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot c. %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot d. %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot e. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot f. %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların $D_{it}$ eğrileri.....                         | 105 |
| Şekil 5.56. | Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristikleri.....                                                                                                                                                                                              | 106 |
| Şekil 5.57. | %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristiği.....                                                                                                                                                                                          | 107 |



|             |                                                                                                  |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.58. | %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristiği.....  | 107 |
| Şekil 5.59. | %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristiği.....  | 108 |
| Şekil 5.60. | %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristiği.....    | 109 |
| Şekil 5.61. | %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristiği.....    | 109 |
| Şekil 5.62. | Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi....                       | 110 |
| Şekil 5.63. | %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi .....              | 111 |
| Şekil 5.64. | %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi .....              | 111 |
| Şekil 5.65. | %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi .....              | 112 |
| Şekil 5.66. | %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi .....                | 112 |
| Şekil 5.67. | %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi .....                | 113 |
| Şekil 5.68. | Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki $I_{ph}$ -t eğrisi              | 114 |
| Şekil 5.69. | %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki $I_{ph}$ -t eğrisi.....  | 115 |
| Şekil 5.70. | %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki $I_{ph}$ -t eğrisi.....  | 116 |
| Şekil 5.71. | %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki $I_{ph}$ -t eğrisi.....  | 117 |
| Şekil 5.72. | %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki $I_{ph}$ -t eğrisi.....    | 118 |
| Şekil 5.73. | %2 Nikel katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki $I_{ph}$ -t eğrisi..... | 119 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa No

|             |                                                                                                                   |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 4.1.  | ZnO 'in temel fiziksel özellikleri .....                                                                          | 32  |
| Tablo 4.2.  | Kübik CdO'in Özellikleri.....                                                                                     | 37  |
| Tablo 5.1.  | CdO numunelerin kristal yapı parametreleri .....                                                                  | 43  |
| Tablo 5.2.  | ZnO numunelerinin kristal yapı parametreleri .....                                                                | 44  |
| Tablo 5.3.  | Katkılı ve katkısız CdO filmlerin AFM ölçüm sonuçları.....                                                        | 50  |
| Tablo 5.4.  | Katkılı ve katkısız ZnO filmlerin AFM ölçüm sonuçları.....                                                        | 50  |
| Tablo 5.5.  | Katkılı ve katkısız ZnO filmlerin yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) değerleri .....                                  | 54  |
| Tablo 5.6.  | Katkılı ve katkısız CdO filmlerin yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) değerleri .....                                  | 57  |
| Tablo 5.7.  | Al/p-Si/CdO/Al diyotlar için elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği<br>ve doğrultma oranı değerleri ..... | 63  |
| Tablo 5.8.  | Al/p-Si/CdO/Al diyotların I. ve II. bölge için $m$ değerleri.....                                                 | 64  |
| Tablo 5.9.  | Al/p-Si/CdO/Al diyotların elektronik parametreleri .....                                                          | 70  |
| Tablo 5.10. | Al/p-Si/CdO/Al diyotlar için elde edilen $m$ değerleri .....                                                      | 81  |
| Tablo 5.11. | Al/p-Si/ZnO/Al diyotların elektriksel parametreleri .....                                                         | 85  |
| Tablo 5.12. | Al/p-Si/ZnO/Al diyotların I ve II bölge için $m$ değerleri .....                                                  | 86  |
| Tablo 5.13. | Al/p-Si/ZnO/Al diyotların elektronik parametreleri .....                                                          | 93  |
| Tablo 5.14. | Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotlar için elde edilen $m$ değerleri .....                                                 | 113 |

## KISALTMALAR VE SİMGELER

| Simge                                   | Birim                  |
|-----------------------------------------|------------------------|
| $\rho$ : Özdirenç                       | (ohm-cm)               |
| $\sigma$ : Elektriksel iletkenlik       | (s/cm)                 |
| $E_g$ : Yasak enerji aralığı            | (eV)                   |
| $E_c$ : İletim bandı enerji seviyesi    | (eV)                   |
| $E_v$ : Valans bandı enerji seviyesi    | (eV)                   |
| $E_F$ : Fermi enerji seviyesi           | (eV)                   |
| $\eta$ : Enerji dönüşüm verimi          | -                      |
| $\mu$ : Elektronların mobilitesi        | (cm <sup>2</sup> /V.s) |
| $I$ : Akım                              | (A)                    |
| $J$ : Akım yoğunluğu                    | (A/cm <sup>2</sup> )   |
| $p$ : Boşluk konsantrasyonu             | (cm <sup>-3</sup> )    |
| $n$ : Elektron konsantrasyonu           | (cm <sup>-3</sup> )    |
| $T$ : Mutlak sıcaklık                   | (K)                    |
| $I_0$ : Ters besleme doyma akımı        | (A)                    |
| $n$ : İdealite faktörü                  | -                      |
| $h\nu$ : Foton enerjisi                 | (eV)                   |
| $R$ : Direnç                            | ( $\Omega$ )           |
| $R_s$ : Seri direnç                     | ( $\Omega$ )           |
| $R_{sh}$ : Şönt direnci                 | ( $\Omega$ )           |
| $P$ : Güç                               | (Watt)                 |
| $FF$ : Doldurma faktörü                 | (%)                    |
| $V_{oc}$ : Açık devre voltajı           | (V)                    |
| $I_{sc}$ : Kısa devre akımı             | (A)                    |
| $\phi_b$ : Engel yüksekliği             | (eV)                   |
| $e$ : Elektronun yükü                   | (C)                    |
| $E$ : Elektrik alan                     | (N/C)                  |
| $eV$ : Elektron volt                    | -                      |
| $f(E)$ : Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu |                        |
| $h$ : Planck sabiti                     | (J.s)                  |
| $\hbar$ : İndirgenmiş Planck sabiti     | (J.s)                  |

|                       |                              |                      |
|-----------------------|------------------------------|----------------------|
| $m_e^*$               | : Elektronun etkin kütlesi   | (g)                  |
| $m_h^*$               | : Holün etkin kütlesi        | (g)                  |
| $g(E)$                | :Elektron durum yoğunluğu    |                      |
| $k$                   | :Dalga vektörü               | -                    |
| $m$                   | : Eğim                       | -                    |
| $T$                   | : Sıcaklık                   | (K)                  |
| $V$                   | : Uygulanan voltaj           | (V)                  |
| $\lambda$             | : Dalga boyu                 | (nm)                 |
| $\nu, \omega$         | : Frekans                    | (Hz)                 |
| $c$                   | :Işık hızı                   | (m/sn)               |
| $\Delta E$            | : Aktivasyon enerjisi        | (eV)                 |
| $k_B$                 | : Boltzman sabiti            | (J/K)                |
| $RR$                  | :Doğrultma oranı             | -                    |
| $I_F$                 | :Doğru polarma akımı         | (A)                  |
| $I_R$                 | :Ters polarma akımı          | (A)                  |
| $C_{adj}$             | :Düzeltilmiş kapasite        | (F)                  |
| $G_{adj}$             | :Düzeltilmiş iletkenlik      | (S)                  |
| $D_{it}$              | :Arayüzey durum yoğunluğu    | ( $eV^{-1}cm^{-2}$ ) |
| $I_{ph}$              | :Fotoakım                    | (A)                  |
| $I_{açma}/I_{kapama}$ | :Fotoiletkenlik oranı        | -                    |
| Ni                    | :Nikel                       |                      |
| Al                    | :Alimünyum                   |                      |
| ZnO                   | :Çinko oksit                 |                      |
| CdO                   | :Kadmiyum oksit              |                      |
| $V_{bi}$              | :Difüzyon potansiyeli        |                      |
| SCLC                  | :Uzay yükü sınırlı iletkenli |                      |

## 1. GİRİŞ

Nano yapılı malzemeler, nano yapılı devrelerdeki mevcut uygulamaları elektronik, optik, opto elektronik vb. uygulamalarından dolayı bilimsel olarak geniş çapta çalışılmaktadır [62-65]. Çalışılan nano yapılı malzemeler arasında nano teknoloji için çalışılan en önemli elementlerden biri çinko oksittir (ZnO) [57].

ZnO, yüksek elektriksel iletkenliğe ve oda sıcaklığında yaklaşık 3,37 eV' luk doğrudan geçişli yasak enerji aralığına sahiptir [18,26]. Periyodik tabloda II-VI grup yarıiletken olup yüksek bir Eksiton enerjisine (60meV) sahiptir. ZnO yarıiletken ince filmler, elektronik ve optik aygıtlar için uygun yapıda malzemelerdir. Yarıiletkenlerde elektron taşınma mekanizması, düşük ve yüksek elektrik alanlarda farklılıklar gösterir. Düşük elektriksel alanda, ZnO'in sahip olduğu elektronların enerji dağılımı, fazla değişime uğramaz. Çünkü elektronlar, uygulanan elektrik alandan fazla enerji alamazlar [19,22]. Bu nedenle ZnO'in elektron mobilitesi sabit olacaktır. Buna bağlı olarak saçılma oranı, elektron mobilitesi ile belirlendiği için, saçılma oranında da fazla bir değişim olmayacaktır. Yüksek elektrik alanda, uygulanan elektrik alanından dolayı elektronların enerjileri kendi termal enerjileriyle karşılaştırılabilir ve elektron dağılım fonksiyonu, dengede sahip olduğu değerden daha uzak bir değere doğru sapacaktır [14,15]. Bu elektronlar, örgü sıcaklığında daha yüksek sıcaklığa sahip elektronlar olmaktadır. Elektron sürüklenme hızları, kararlı durumda sahip oldukları sürüklenme hızından büyüktür. Bu nedenle yüksek frekansa sahip devre elemanları yapmak olasıdır [20,21]. ZnO'in optik, elektronik ve mekanik özellikleri nano devreler için büyük önem arz etmektedir. ZnO, İnce film transistörleri (TTF) , piezoelektronik devreler, yüksek güçlü elektronik devreler, Led diyotlar, alan etkili transistörler, varistörler, sensörler, güneş pilleri, nano tüpler, nano çubuklar, nano fiberler vb. birçok elektronik devre elemanı yapımında kullanılmaktadır [57-70]. Literatürde son yıllarda yapılan çalışmalara bakıldığında, ZnO'in birçok element ile katkılanarak n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin elde edildiği görülmektedir. ZnO'te katkılanan elementler ile ZnO'in elektriksel, optik ve manyetik özellikleri değiştirilmektedir [62-65].

Birçok farklı metot kullanılarak yüksek kalitede ZnO ince filmler hazırlanabilir. Bu yöntemlerden bazıları manyetik püskürtme yöntemi, metal-organik kimyasal buharlaştırma (MOCVD) yöntemi, darbeli-lazer kaplama (PLD) yöntemi, moleküler ısı epitaksi (MBE) yöntemi ve sol jel yöntemidir [61,63].

II-VI grup yarıiletkenlerden biri de kadminyum oksittir (CdO). Bu yarıiletken oda sıcaklığında 2,2-2,8 eV'luk yasak enerji aralığına sahiptir. Katkısız CdO bileşiği n-tipi yarıiletken özelliği gösterir ve n-tipi yarıiletkenliğin kaynağı olarak oksijen boşlukları ile donör olarak davranan ara yer Cd atomları gösterilmektedir [70]. Kristal örgüde var olan ara yer Cd atomlarından dolayı stokiometrik olmayan bir durum söz konusudur. Katkısız CdO içine farklı elementler In, Sn, F vb. katkılanarak iletkenlik değeri artırılabilir [26,61]. CdO yarıiletken bileşiği görünür bölgede yüksek optiksel geçirgenliğe sahiptir. Mobilitesi  $64 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ve öz direnci  $4.87 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 'dir [1]. Yüksek elektriksel iletkenliği, elektron mobilitesine ( $\sim 200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ), yüksek taşıyıcı yoğunluğuna ve doğasında var olan non-stokiometri nedeniyle oluşmuş sığ donörlere bağlıdır [69-71]. Katkısız halde bile oldukça yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahiptir. Taşıyıcı yoğunluğu sıcaklığa duyarlıdır ve sıcaklık arttığında taşıyıcı yoğunluğu azalırken elektron mobilitesi  $\sim 1$ 'den  $\sim 220 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 'e çıkar [26,57-61]. CdO yarıiletken malzemesi aynı zamanda  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  gibi saydam iletken oksit (transparent conducting oxide, TCO) grubunda yer alır [34]. Çeşitli saydam iletken oksit ince filmler arasında CdO en az dikkat çekenidir. Bunun sebebi olarak, Cd atomlarının insan sağlığı için zararlı olması ve CdO'nin düşük yasak enerji aralığına sahip olmasıdır [33]. Diğer taraftan mevcut saydam yarıiletken oksitlerden 5-10 kat daha fazla elektron mobilitesine sahip olması ise CdO için önemli bir avantajdır. Ayrıca CdO, uygun elektriksel iletkenlik ve optiksel geçirgenlik özellikleri ile görünür bölgeden kırmızı ötesine kadar, geniş bir dalga boyu aralığında kullanım potansiyeli olan yarıiletken bir malzemedir. Spektrumunun görünür bölgesinde yüksek elektriksel iletkenlik ve optiksel geçirgenlik özelliklerinden dolayı CdO, yarıiletken opto elektronik devre uygulamalarında özellikle de gaz sensörleri, foto diyotlar, fotovoltaik güneş hücreleri vb. birçok uygulamada kullanılmaktadırlar [26,33,69]. CdO optik özelliğinden dolayı katkısız ve Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al foto diyotlarında kullanıldı.

Mevcut yöntemler arasında kolay ve maliyetinin düşük olması gibi bazı avantajlarından dolayı genellikle sol jel yöntemi tercih edilmektedir. Sol jel yöntemi ile elektronik devre uygulamaları için gerekli olan yüksek kalitede ince filmler, düşük maliyetli ve basit aparatlarla hazırlanabilir [57-70]. Bu nedenle bu çalışmada, katkısız ve Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotlar ile katkısız ve Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al foto diyotların üretimi için sol jel yöntemi kullanıldı.

## 2. YARIİLETKEN MALZEMELER

Katı malzemeler elektriksel iletkenlik özelliklerine göre üç gruba ayrılırlar. Bunlar;  $10^{-6} - 10^{-4} \Omega\text{m}$  arasında öz direnç değerlerine sahip olan “metaller”,  $10^{-4} - 10^{10} \Omega\text{m}$  arasında öz direnç değerlerine sahip “yariletkenler” ve öz dirençleri  $10^{10} \Omega\text{m}$  değerine eşit ya da büyük olan “yalıtkan”lardır [1,2]. Yariletken malzemelerin enerji bandlarının yapıları yalıtkan maddelere benzemesine rağmen aralarında önemli bir fark vardır. Yariletkenlerin elektronlarla tamamen dolu olan valans bandı ve boş olan iletkenlik bandı arasında kalan yasak enerji aralığı, yalıtkanlara göre daha küçüktür [4]. Yariletkenlerin elektriksel iletkenliği sıcaklıkla değişir, sıcaklık arttıkça iletkenliği de artar. Fakat mutlak sıfırda ( $T=0\text{K}$ ) elektriksel iletkenlik özelliği bakımından tıpkı bir yalıtkan gibi davranırlar. Yariletkenlerin yasak enerji aralığı 3,8 eV’tan küçük, yalıtkanların 4 eV’tan büyüktür [4,9].

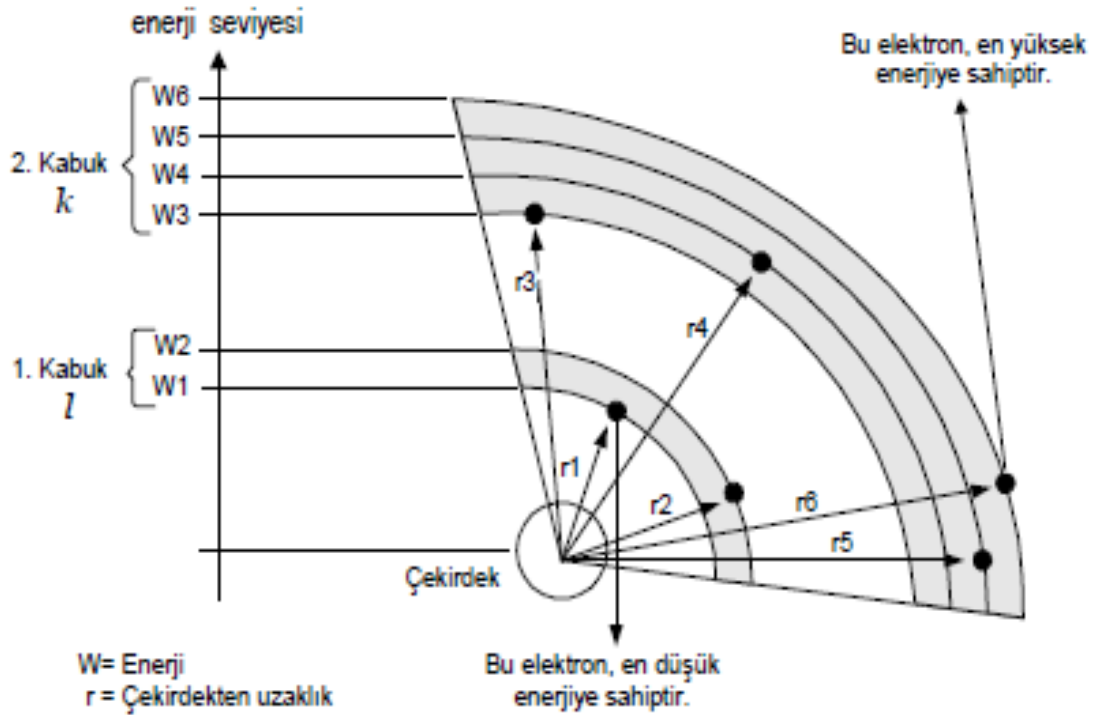
Günümüzde özellikleri en iyi bilinen ve en çok kullanılan yariletkenler IV. Grup elementleri olan Germanyum ve Silisyum elementleridir. Yariletkenlerin diğer önemli bir bölümünü de III-V grup bileşikler olan GaAs, InSb, GaP, InAs vb. oluşturur. Bu bileşikler periyodik tablonun üçüncü ve beşinci grup elementlerinin bileşik oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle oluşurlar [11,13]. Bu tip elementler kübik yapıda kristallenir ve bağ yapısı çoğunlukla kovalenttir. Yariletken özellik gösteren diğer bir grup ise II-VI grup bileşikler CdZnS, ZnS, ZnO, CdS, CdSe vb. dir. Bu bileşiklerin bağ kurma şekilleri iyonik veya kovalent bağ olup, kübik veya hekzagonal yapıda kristallenirler [10,14].

Yariletken malzemelerin elektriksel iletkenliği geçici veya kalıcı olarak geniş bir aralıkta kontrol edilebilir. Yariletken malzemeler farklı malzemelerle katılandırıldığında, elektriksel özellikleri önemli ölçüde değişmektedir.

Yeterli katkılama malzemesi ile yariletkenler neredeyse metaller kadar iletken yapılabilir [14]. Enjekte edilen katkı malzemenin türüne bağlı olarak yariletkenin katılanmış bölgesi daha fazla elektron veya boşluk içerebilir [16].

Elektronların ilettime daha çok katkı sağladığı yariletkenlere n-tipi yariletken, boşlukların ilettime daha çok katkı sağladığı yariletkenler ise p-tipi yariletken olarak isimlendirilir [1,4,5,10].

Katılarda olduğu gibi yarıiletkenlerde de elektronların çekirdeğe bağlı enerji seviyelerini bulundukları kabuk belirler (Şekil 2.1).

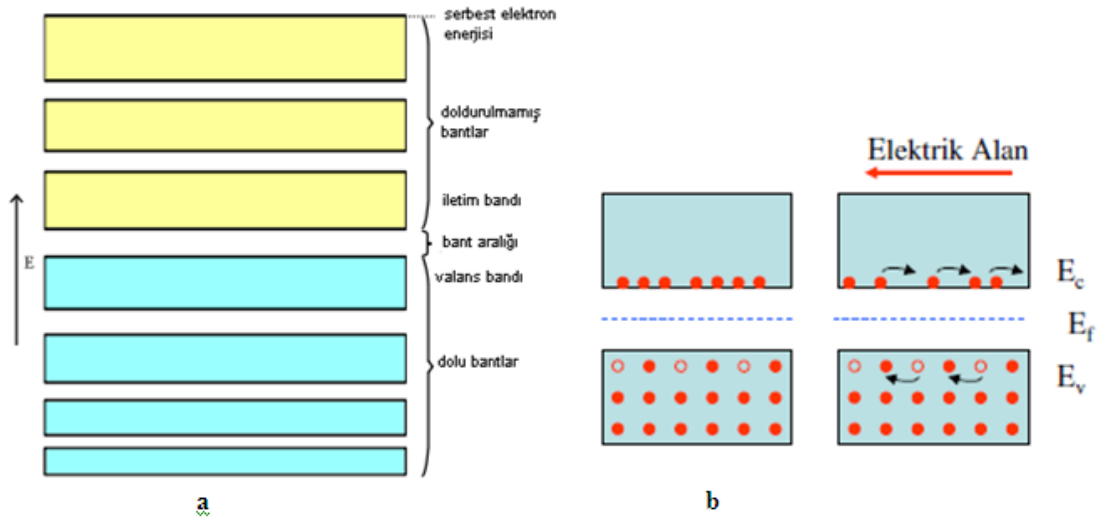


Şekil 2.1. Çekirdekten uzaklıklarına göre elektron enerji seviyeleri [76].

Enerji bandlarının her biri farklı kuantum durumları ile ilgilidir ve çekirdeğe yakın olan durumların çoğu doludur. Bu durumlara valans bandı denir. Yarıiletkenlerin ve yalıtkanların, metallere farklı olarak valans bandı neredeyse tamamen doludur. Yarıiletkenlerdeki elektronlar valans bandından iletim bandına band genişliğine bağlı olarak uyarılabilir [6,9]. Yalıtkanlar ile yarıiletkenler arasındaki bu fark band aralığının genişliğinden kaynaklanır. Bir yarıiletkenin sıcaklığı mutlak sıfırın üstüne çıkartıldığında elektronların bir kısmı valans bandından iletim bandına geçebilecek enerjiye ulaşırken, iletim bandına geçen elektronlar valans bandında işgal edilmemiş elektron boşlukları bırakırlar [9,13]. Hem iletim bandındaki elektronlar hem de valans bandındaki boşluklar elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar.

Boşluklar tek başlarına hareket etmezler ancak komşu elektronlar bu boşlukları doldurarak geride yeni bir boşluk oluştururlar [13,16].





**Şekil 2.2. a.** Yarıiletkenlerin band yapısı [4]. **b.** Yarıiletkenlerde elektron ve boşluk hareketi [16].

Bu şekilde valans banttaki elektronun iletim bandına doğru oluşmuş hareketi ile elektriksel iletkenlik sağlanmış olur [2].

Elektronların enerji seviyeleri hangi enerji durumlarının boş hangi enerji durumlarının dolu olduğu Fermi-Dirac istatistiği ile tanımlanır. Bu dağılım elektronların sıcaklık ve Fermi enerjisi veya Fermi düzeyi ile karakterize edilir [4]. Mutlak sıfırın altındaki şartlarda Fermi enerjisi elektronların işgal ettiği en üst enerji düzeyi olarak tanımlanabilir [5,13]. Daha yüksek sıcaklıklarda Fermi enerjisi bir durumun işgal edilme olasılığının 0,5 eV'a düştüğü enerji olarak tanımlanabilir [16]. Burada herhangi bir T sıcaklığındaki sistemde enerjisi E olan bir seviyenin bir elektron tarafından işgal edilme olasılığı Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu,

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/(k_B T)} + 1} \quad (2.1)$$

ile verilir. Burada  $E_F$  Fermi enerji seviyesi,  $k_B$  Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.  $f(E)$  fonksiyonun E enerjisine göre değişimi Şekil 2.3.'te görülmektedir. Bu fonksiyonun E enerjisine göre değişimi sıcaklığa bağlı olarak incelenirse [28,36];

$T \rightarrow 0$  K iken  $E < E_F$  için  $E - E_F / k_B T \rightarrow -\infty$  olur.  $E > E_F$  için  $E - E_F / k_B T \rightarrow \infty$  olur. Bu durumda  $f(E < E_F) = 1$  ve  $f(E > E_F) = 0$  olur. Buna göre  $E_F$ 'nin altındaki tüm enerji seviyeleri dolu ve  $E_F$ 'nin üstündeki tüm enerji seviyeleri ise boştur [35,36].

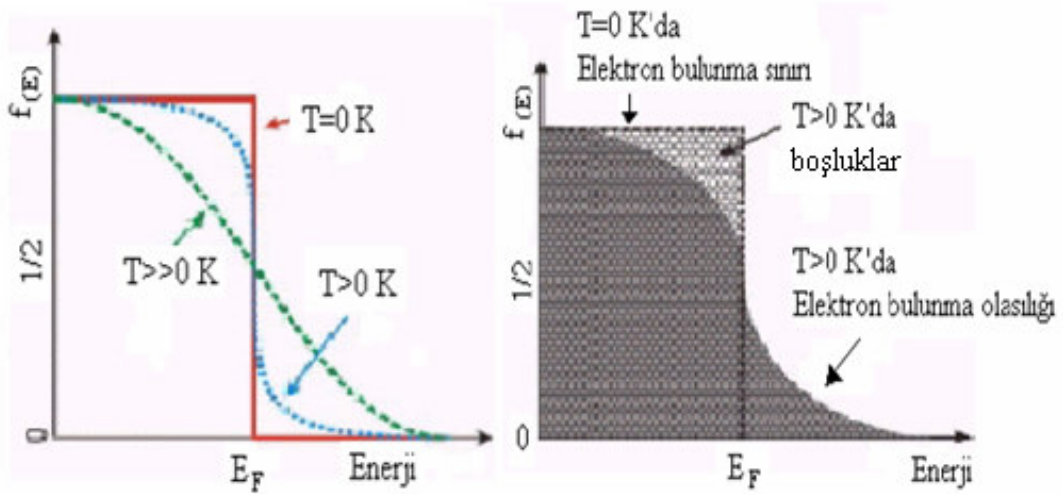
$T=0$  K ve  $E=E_F$  durumuna göre  $f(E)=1/2$  olur. Yani durumların dolu olma olasılığı yüzde ellidir.

$(E-E_F) \gg k_B T$  olması durumunda ise denklem 2.1'deki eşitlik Maxwell-Boltzman dağılım fonksiyonuna dönüşür ve bu fonksiyon,

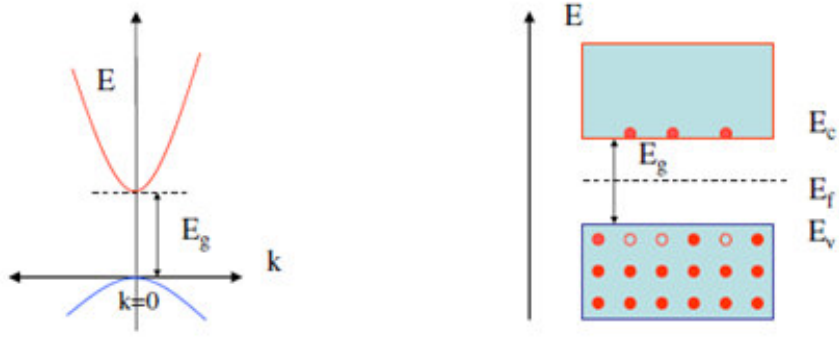
$$f(E) \cong e^{-\frac{(E-E_F)}{(k_B T)}} \quad (2.2)$$

şeklinde. Buna göre iletim bandındaki elektron konsantrasyonu hesaplanabilir. Bu durumda  $(E, E+E_F)$  enerji aralığı bölgesindeki durumların sayısı  $g(E)dE$ 'ye eşit olur ve  $g(E)$  elektron durum yoğunluğudur. Bu durumların her birinin işgal edilme olasılığı  $f(E)$  ise, bu enerji aralığı bölgesinde bulunan elektronların yoğunluğu  $f(E)g(E)dE$  olur [36].

Fakat sıcaklık ne olursa olsun  $E=E_F$  olması durumunda fermi enerji seviyesinin bir elektron tarafından işgal edilme ihtimali daima  $f(E)=1/2$  dir [28].



Şekil 2.3. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu [36].



Şekil 2.4. Yarıiletkenlerin E-k ve E konum grafiği [16].

Yarıiletkenlerde iletim bandının enerji seviyesi,

$$E_i = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (2.3)$$

ifadesi ile verilir [28]. Burada  $E_i$  iletim bandının enerji seviyesi,  $E_g$  yasak enerji aralığı,  $k$  dalga vektörü,  $m_e^*$  elektronların etkin kütlesidir. Aynı şekilde yarıiletkenlerde valans bandının enerji seviyesi ise,

$$E_v = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (2.4)$$

ifadesi ile verilir [28]. Burada  $E_v$  valans bandının enerji seviyesi,  $k$  dalga vektörü,  $m_h^*$  boşlukların etkin kütlesidir.

Yarıiletkenlerde yasak enerji aralığı sıcaklığa bağlı olarak değişmekte olup bu değişim çok büyük değildir. Bu değişimin temel nedeni ısıya bağlı olarak örgü sabitinin değişmesidir. Yasak enerji aralığı basınç ile de değiştirilebilir. Bu nedenle yarıiletkenlerin bazı özellikleri yüksek basınç altında incelenir [16,28].

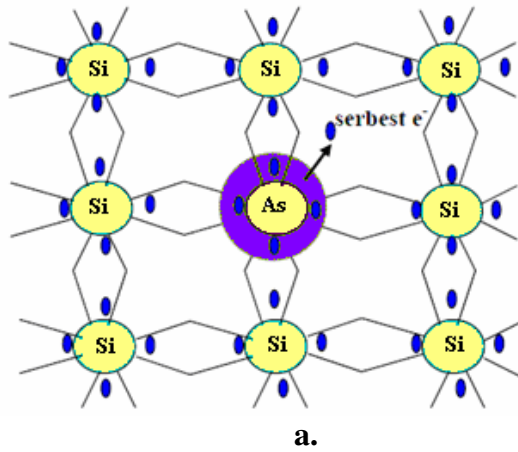
## 2.1. Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, katkısız elde edilme zorluklarından dolayı yarıiletken devre elemanlarının üretiminde katkılı yarıiletkenler kullanılmaktadır [8]. Katkılı yarıiletkenlerin elektriksel ve optik özellikleri kristal yapı içerisine katkılanırılan katkı maddesinin atomik yapısına bağlıdır [1,2]. Yarıiletken malzemenin içerisine katkılanırılan katkı maddesi

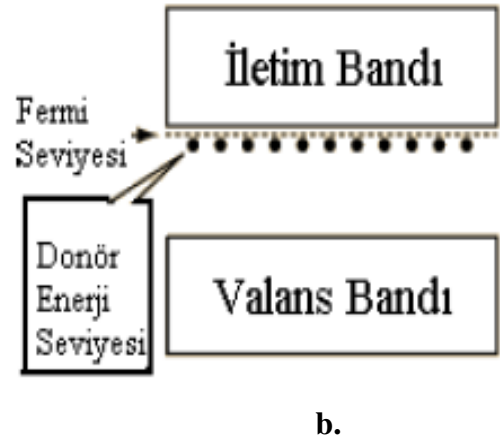
kendi doğal enerji band yapısını bozarak, yarıiletken içerisinde kendine özgü enerji seviyeleri oluşturur [4,5]. Buna göre yarıiletkenle enjekte edilen katkı maddesinin atomu, yarıiletkenle elektron vererek iyonlaşır (verici-donör) ve iletkenliğe katkıda bulunursa “n-tipi yarıiletken”, yarıiletkenle enjekte edilen katkı maddesinin atomu yarıiletkendeki elektron alarak iyonlaşır (alıcı-akseptör) ve iletkenliğe katkıda bulunursa “p-tipi yarıiletken” olarak adlandırılır ve yarıiletken elektronik devre elemanlarının üretiminde kullanılır [1,5,8,].

## **2.2. n-Tipi Yarıiletkenler**

Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik elektronlar ile sağlanıyorsa bu tip yarıiletkenlere n-tipi yarıiletkenler denir. Bu durumda yarıiletken donör atomlarıyla katkılanmış [8,16]. Örneğin IV. grup elementlerinden silisyum kristaline V. grup elementlerinden P, As, Sb, vb. elementlerden biri katkılanarak n-tipi silisyum yarıiletken elde edilebilir [8,10]. Katkı maddesi olarak kullanılan V. grup elementlerinin son yörüngelerinde beş serbest elektronu vardır [14]. Silisyum kristali V. grup elementlerinden arsenik (As) ile katkıldığında; silisyumun son yörüngesinde dört serbest elektron var iken katkı maddesi olarak enjekte edilen As’ın beş serbest elektronu vardır [8,26]. Kristal yapı içerisinde As atomunun dört elektronu silisyum atomunun dört elektronu ile kovalent bağ oluştururken, As atomunun beşinci elektronu As atomuna zayıf bir elektriksel kuvvetle bağlanır [13,26]. Bundan dolayı küçük enerjilerle As atomu iyonlaşabilmekte ve bu elektron kristal yapı içerisinde As atomundan bağımsız hareket edebilmektedir [14,19]. As atomu silisyum kristaline bir elektron verdiği için As atomu donör atomudur. Donör atomu ile katkılanan silisyum kristali n-tipi yarıiletken özelliği gösterir ve n-tipi yarıiletkenlerde [2] elektron yoğunluğu fazla olduğundan dolayı elektronların elektriksel iletkenliğe katkısı boşluklardan daha fazladır [16,19].



Şekil 2.5. a. As katkılı silisyum kristali [26].

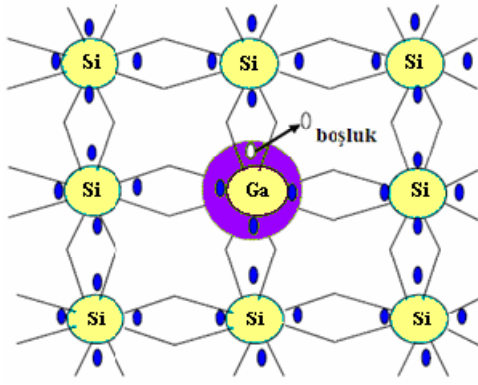


b. n-tipi yarıiletkenlerin band yapısı [12].

### 2.3. p-Tipi Yarıiletkenler

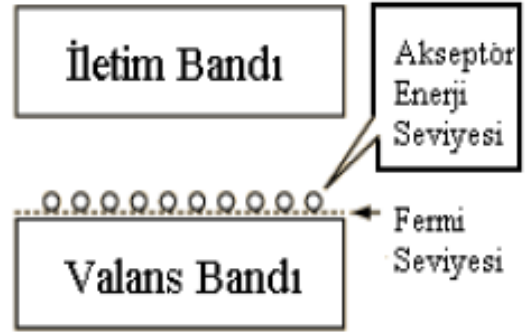
Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik holler ile sağlanıyorsa bu tip yarıiletkenlere p-tipi yarıiletken denir [8,13]. p-tipi yarıiletkenlerde boşluk yoğunluğu elektron yoğunluğundan fazladır [2]. Örneğin; silisyum Ga ile katkılıandığında, Ga'un son yörüngesinde üç serbest elektronu olmasından dolayı Ga atomu, silisyum atomu ile arasında kovalent bağ oluştururken silisyumun bir elektronu boşa kalır ve boşa kalan bu elektron silisyumun başka bir elektronunu yakalayarak bağ oluşturur [8-10]. Bu eksik elektronun valans bandından yani si-si kovalent bağından alınarak doldurulması için gerekli enerji seviyesi oldukça küçüktür (0,04 eV) [7,8]. Bu durumda Ga atomu elektron alan akseptördür ve dışarıdan elektron almış olması hollerin oluşmasını sağlar [9,16].

Bu şekilde valans bandında boşluk oluşurken iletim bandına elektron çıkmaz ve p-tipi yarıiletken oluşmuş olur [13,26]. p-tipi yarıiletkenlerde boşlukların elektriksel iletkenliğe katkısı elektronlardan daha fazladır [9,16].



a.

Şekil 2.6. a. Ga katkılı silisyum kristali [26].



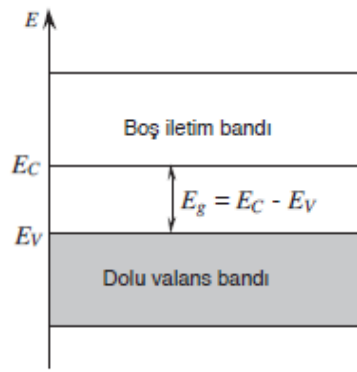
b.

b. p-tipi yarıiletkenlerin band yapısı [12].

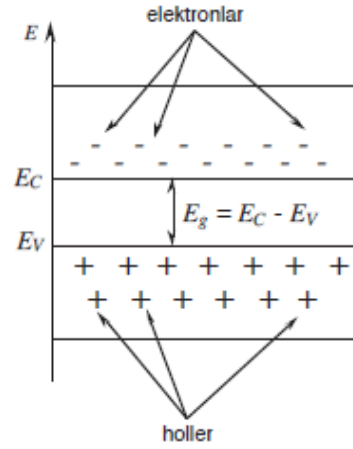
## 2.4. Katkısız Yarıiletkenler

Katkı veya örgü kusuru içermeyen yarıiletkenler, katkısız (saf) yarıiletken malzeme olarak tanımlanır. Böyle bir malzemenin valans bandı, mutlak sıfırda elektronlarla dolu iken, iletim bandında serbest elektron bulunmamaktadır [7]. Sıcaklık arttıkça kırılmış valans bağların sayısı artar ve bu nedenle serbest elektronların ve boşlukların konsantrasyonu da artar [1,19]. Katkısız yarıiletkenlerde iletkenlik bandındaki elektronların yoğunluğu, değerlik bandındaki boşlukların yoğunluğuna eşittir [4,9]. Çünkü bir elektron termal uyarma sonucu valans bandında bir boşluk bırakarak iletim bandına geçer [1,4,5].

Bu malzemelerde elektriksel veya termal enerji ile uyarılan elektronlar yasak enerji aralığını aşarak iletim bandına geçerler ve bu şekilde elektriksel iletkenlik sağlarlar [16,22,26]. Katkısız yarıiletkenlere örnek olarak Germanyum (Ge) ve Silisyum (Si) verilebilir. Yarıiletken enerji band diyagramı  $T=0$  K ve  $T>0$  K sıcaklıklarındaki durumları şekil 2.7.a'da görüldüğü gibi  $T=0$  K sıcaklıkta yarıiletkende herhangi bir taşıyıcı hareketi oluşmaz [10,16]. Ancak, şekil 2.7.b'de görüldüğü gibi sıcaklık  $T>0$  K yükseltildiğinde, yasak enerji aralığını aşacak seviyede bir enerjiyi alan elektronlar valans bandından iletim bandına geçerler. Bu şekilde oluşan elektron hareketi ile elektriksel iletkenlik sağlanır [8,9,13].



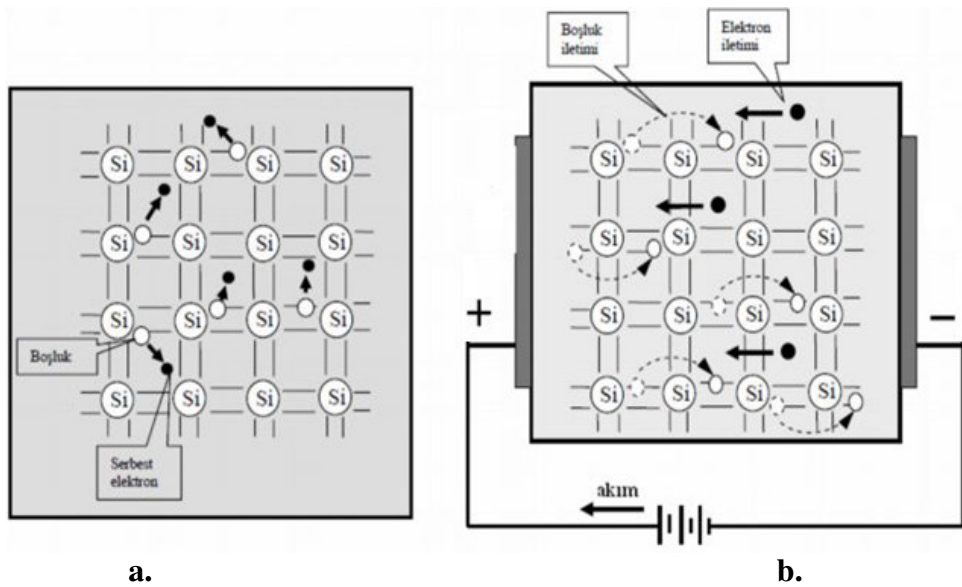
a.  $T=0$  K



b.  $T>0$  K

Şekil 2.7. Katkısız yarıiletkenlerin farklı sıcaklıklardaki iletim ve valans bandı [5].

Fakat valans bandındaki hareket boşluklarla sınırlı olacaktır. Çünkü valans bandından uyarılan bir elektron geride bir boşluk bırakacak ve tekrar başka bir boşluğa geçmesi durumunda bu sefer en son olduğu yerde de bir boşluk bırakmış olacaktır [8,19]. Bu olay, elektronlarla boşlukların yer değiştirmesi gibi düşünülebilir. Bu durum bize elektron hareketine zıt yönde hareket eden ve kütlesi elektron kütlesi gibi olan bir parçacığın tanımlanması imkânını verir ve buna boşluk (boşluk, deşik, boşluk) denir [10,26]. Valans bandındaki boşluk yoğunluğu ile iletim bandındaki elektron yoğunluğu birbirine eşit olduğundan bu malzeme katkısız yarıiletken olarak tanımlanır [9,26].



a.

b.

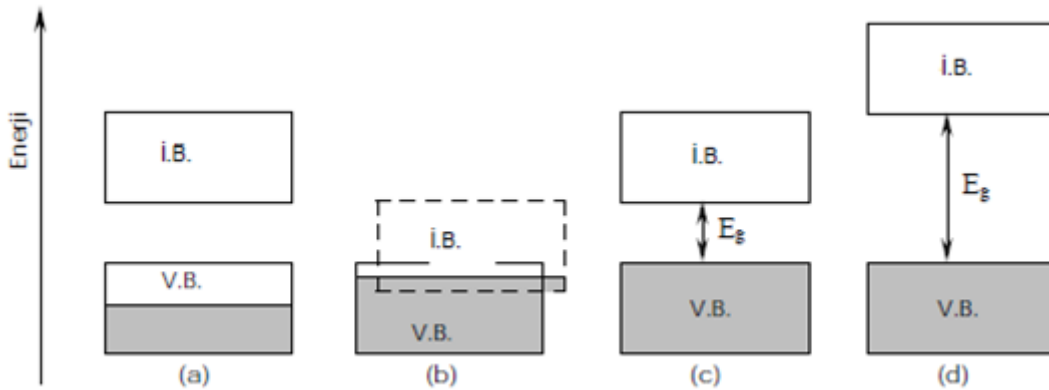
Şekil 2.8. Si kristalinde elektron-boşluk oluşumu ve bir potansiyel fark ile sağlanan hareket [26].

## 2.5. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri

Katılarda elektriksel iletkenliğin sağlanabilmesi için, elektrik yüklü parçacıkların (elektronların) hareket edebilmeleri ve onların gidebilecekleri enerji düzeyinin boş olması gerekir [1,5]. Aksi takdirde elektron hareketi gerçekleşmez [4,11]. Dolu bir banda voltaj uygulanırsa bile elektron hareketi oluşmaz. Bu durum, Şekil.2.9'da gösterilen valans ve iletim bandları çeşitli konumlarında ele alınarak açıklanmıştır [5,16].

Şekil 2.9.a. incelendiğinde, valans band tamamen dolu değildir ve elektronun gidebileceği bir enerji düzeyi bandda mevcuttur [2,16]. Bu durumda elektronun hareket etmesine bir engel yoktur ve çok küçük bir potansiyel farkta bile, sıcaklık ne olursa olsun elektriksel iletkenlik sağlanır. Bu katılar metallerdir ve bunların elektriksel iletimleri çok iyidir [2,5,18].

Şekil 2.9.b. incelendiğinde, bu tür katılarda valans bandın tamamen dolu ve iletim bandının da tamamen boş olması gerekir fakat durum öyle değildir. Elektronlar kendilerine ayrılan enerji düzeyinden daha aşağıda boş enerji düzeyleri varsa kural olarak oraya giderler [1,2]. Böyle bir yapıda da iletim bandının alt kısmı ile valans bandının üst kısmı örtüştüğünden dolu olmasını beklediğimiz valans bandın üst kısmındaki elektronlar, boş olan iletim bandının alt kısımlarına geçerler [18,22]. Bu durumda da elektronların hareket edebilmeleri mümkün olur ve elektriksel iletkenlik oluşur. Ancak geçiş yapan elektron miktarının az olmasından dolayı metaller kadar elektrik akımını iyi iletmezler ve yarı metal olarak adlandırılırlar [5].



Şekil 2.9. T=0 K sıcaklıkta iletim bandı ile valans bandındaki elektron doluluk durumları ve bandların enerji eksenine göre konumları [8].



Şekil 2.9.c. ve d incelendiğinde iki şekil arasındaki tek farkın, iletim bandı ile valans bandı arasındaki  $E_g$  ile gösterilen yasak enerji aralığının Şekil 2.9.c’de daha küçük, Şekil 2.9.d’de ise daha büyük olmasıdır [2,5,18].  $E_g$  için kesin bir sınır olmamakla beraber  $E_g$  değeri 3,8 eV’tan küçük olan katılara yarıiletken,  $E_g$  değeri 4 eV ve daha büyük olan katılara da yalıtkan denir [16]. Her iki katı için de, valans bandlarının tamamen dolu ve iletim bandlarının da tamamen boş olması sonucu elektriksel iletkenliğin sağlanamayacağı düşünülebilir, fakat bu durum yalıtkanlar için doğru olsa da, yarıiletkenlerin mutlak sıfır sıcaklıktaki durumu için geçerlidir [2,5,18].

Yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki (300K) durumu farklıdır. Oda sıcaklığında ortamdan  $E_g$  kadar enerjiyi alan valans bandındaki elektronlar iletim bandına geçebilirler. Bu durumda hem iletim bandında hem de valans bandında elektron hareketi gözlenir [13,16]. Yarıiletkenlerde gözlenebilen bu elektron hareketini, yalıtkanlarda gözlemlemek mümkün değildir. Bu şekilde katıların elektriksel iletkenliklerinde band yapılarının ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Band yapılarına bağlı olarak elektriksel iletkenlik temel ohm kanunu kullanılarak incelenir [2,5,13]. Ohm kanunu,

$$V = I.R \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlanır. İfadede R direnç, I akım ve V voltajdır. Herhangi bir malzemenin öz direnci ise,

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.6)$$

şeklinde verilir [2], ifadede  $\rho$  malzemenin öz direnci, L malzemenin uzunluğu, A malzemenin tesir kesit alanıdır. Denklem 2.5’te R yerine yazılır ve bazı düzenlemeler yapılırsa,

$$\frac{V}{l} = \frac{I}{A} \cdot \rho \quad (2.7)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $V/l$  elektrik alanı,  $I/A$  akım yoğunludur. Buna göre elektrik alanı,

$$E=J.\rho \quad (2.8)$$

ifadesi ile elde edilir [2,13]. Yarıiletken içerisindeki serbest elektron yükleri bir elektrik alanı içerisinde hareket ederek J akım yoğunluğunu oluşturur. Elektrik alanının, akım yoğunluğuna oranı o maddenin özdirencini tanımlar ve özdirenç,

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (2.9)$$

ifadesi elde edilir [2]. Burada bir malzemenin elektriksel iletkenliği, elektrik alanı başına düşen akım yoğunluğudur. Aynı zamanda bir malzemenin iletkenliği,

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.10)$$

şeklinde tanımlanır ve malzemenin özelliği,

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.11)$$

olarak verilir. Malzemenin uçlarına uygulanan voltaja bağlı olarak oluşan J akım yoğunluğunun büyüklüğü,

$$J=q.n.v \quad (2.12)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada q elektrik yükü, n birim hacimdeki iletim elektronlarının sayısı, v ise elektrik yükünün hızıdır. Sıcaklığın etkisi de dikkate alındığında elektriksel iletkenlik,

$$\sigma = \sigma_0 . e^{-\Delta E/k_B T} \quad (2.13)$$

bağıntısı ile ifade edilir [2]. Burada  $\sigma_0$  bir sabit,  $\sigma$  iletkenlik, T sıcaklık,  $k_B$  Boltzman sabiti,  $\Delta E$  elektriksel iletkenlik için aktivasyon enerjisidir.

## 2.6. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri

Valans bandında bulunan elektronların iletim bandına geçişi termal yollarla sağlanacağı gibi optik yollar ile elektronlar uyarılarak yasak enerji aralığını geçebilmelerini sağlamak mümkündür [11,16].

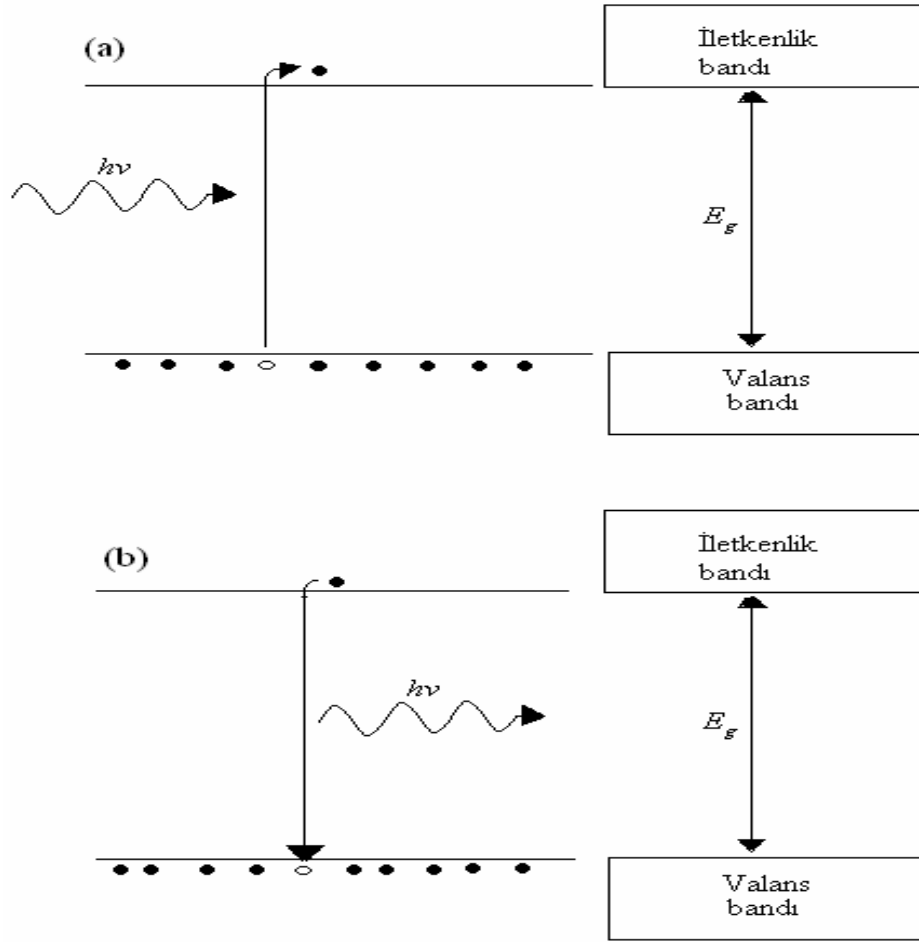
Şekil 2.10.a'da görüldüğü gibi foton enerjisi tamamen elektrona aktarılmış olup aktarılan bu foton enerjisi sayesinde elektron valans bandında bir boşluk oluşturarak iletim bandına geçmiştir [11]. Bu olay gerçekleştiğinde, fotonun malzeme tarafından tamamen soğrulduğunu söyleyebiliriz. Burada elektron hareketi oluşturacak foton enerjisinin en az yarıiletkenin yasak enerjisine eşit olması gerekir [7,16] ve foton enerjisi,

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilir.

Şekil 2.10.b'de görüldüğü gibi iletim bandındaki bir elektron valans bandındaki boşluk ile birleşerek sahip olduğu enerjiyi foton yayınıyla dışarı verir ve bu da ışık yayan diyotların (LED), yarıiletken lazerlerin temelini oluşturur [11].

Fakat bütün yarıiletkenler ışık üretme kapasitesine sahip değildir. Çünkü bu özellik tamamen yarıiletkenin, kristal yapısındaki elektron ve boşlukların özellikleri, E enerjisi ve k dalga vektörü ile belirlenir [16]. Bir elektron ve boşluk ancak bu iki büyüklük korunursa birleşirler.



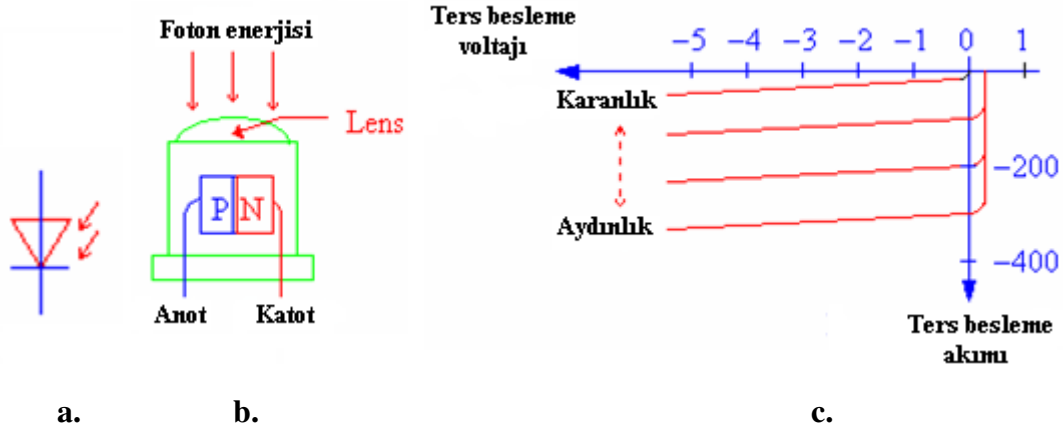
**Şekil 2.10.** a. Fotonun enerjisi,  $h\nu$ , yarıiletkenin enerjisinden büyük olmak şartıyla tek bir fotonun bir elektronu valans bandına uyarması  
b. Bir elektron ile bir boşluk birleşerek enerjisi  $h\nu$  olan bir foton üretmesi [11].

Uygun frekanstaki foton, enerjinin korunumunu sağladığı için uygun frekanstaki fotonun dalga vektörü ihmal edilebilir ve bu da elektronun dalga vektörünü etkilemez [11,16]. Bunun sonucunda, ışık yayılımı elektronun en düşük iletkenlik enerjisi halinde ve boşluk'un en yüksek valans enerjisi halinde olmasıyla gerçekleşir [3]. Bu özellikleri gösteren bazı yarıiletkenler, GaAs, InSb ve InAs vb.'dir. Bu malzemeler direk yasak enerjili malzemeler olarak adlandırılırlar. Silisyum ve Germanyum gibi yarıiletkenler bu şartı sağlamadıklarından dolayı ışık yaymazlar ve bu yüzden LED diyotlar, yarıiletken lazerler vb. devre elemanların yapımında kullanılmazlar [11].

### 3. FOTO DİYOTLAR

Foto diyotlar ters besleme altında çalışan ve besleme voltajı uygulandıktan sonra üzerine ışık düştüğünde ancak iletme geçebilen bir devre elemanıdır. Anot ve Katot olmak üzere iki elektriksel kontağı vardır [25]. Doğru beslemede normal diyot gibi çalışır. Foto diyot üzerine düşen ışık bir mercekle sayesinde p-n jonksiyonu üzerine odaklanır. Foton enerjisini alan valans banddaki elektronlar iletim bandına geçerek foto diyot üzerinden akımın geçmesini sağlar [24]. Foto diyot üzerinden geçen akım, ışık şiddeti ile doğru orantılı olarak değişir. Foto diyot üzerine düşen ışık şiddeti arttığında p-n yüzey birleşimindeki direnç azalır ve buna bağlı olarak foto diyot üzerinden geçen akım artarken, ışık şiddeti azalınca p-n yüzey birleşimindeki direnç artacağından foto diyot üzerinden geçen akım da azalır [24,25].

Foto diyotların ışığa karşı hassasiyetleri yüksek olduğundan ışığa bağlı çalışan lüksmetrelerde, elektronik alarm devrelerinde, optik sayıcılarda, bilgisayarlarda, fotoğraf makinelerinde, transistor, tristör gibi devre elemanlarının tetikleme devrelerinde, haberleşme sistemlerinde vb. kontrol ve kumanda devrelerinde kullanılır [29,30].



Şekil 3.1. Foto diyotun sembolü, yapısı ve karakteristik eğrisi [76].

#### 3.1. Metal Yarıiletken Foto Diyotlar

Bir foto diyot, elektronik işlemler esnasında optik sinyaller oluşturan bir sensör olup, yüksek bir elektrik alanı ile boşaltılmış yarıiletken bölgesinde serbest yük taşıyıcılarına sahiptir [31]. Tükenim bölgesinde oluşan foto taşıyıcılar, yüksek alanın

varlığından dolayı malzemenin uç kısmında toplanırlar. Şekil 3.2’de bir metal-yarıiletken eklemının tipik enerji-band diyagramını göstermektedir [3].

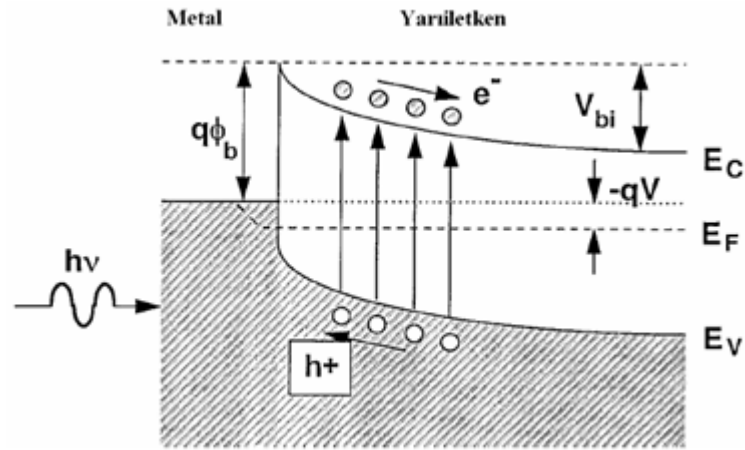
Bir metal-yarıiletken diyot, yüksek verimli foto detektörler için kullanılabilir. Foton enerjisine ve potansiyel farkı eğimine bağlı olarak değişik diyot çeşitleri düşünülebilir. Diyotun üç çalışma modu vardır [3,24,25]. Bu modlar,

1.  $E_g > h\nu > q\phi_b$  ve  $V < V_B$  için burada  $V_B$  engel aşma (çığ bozulma) voltajıdır ve metal içinde foto uyarımlı elektronlar engel potansiyelini aşabilir ve yarıiletken içinde toplanırlar. Bu işlem, metal yarıiletken diyotlarda engel yüksekliğini belirlemede ve metal filmde sıcak-elektron geçişinde kullanılır [3].

2.  $h\nu > E_g$  ve  $V < V_B$  için radyasyon, yarıiletkende boşluk-elektron çiftini üretir ve diyotun genel karakteristiği p-i-n foto diyotuna benzer şekilde olur [3].

3.  $h\nu > E_g$  ve  $V > V_B$  için diyot, foto diyot olarak çığ bozulma bölgesinde çalışabilir şekildedir.

Foto diyotun çalışması, diyot eklemi içinde foto taşıyıcıların yer değiştirmesine dayanır [3]. Doğrultucu eklem ışıık geldiği zaman, yeterli enerjiye ( $h\nu > E_g$ ) sahip olan fotonlar soğrulur [30]. Oluşan fazlalık elektronlar ve boşluklar difüzyon eklem alanı ile yayılır ve diyotun farklı taraflarında toplanırlar [29]. Eğer diyot, dış yüke bağlanırsa soğrulan fotonların ve oluşan taşıyıcıların sayısıyla orantılı olarak bir akım oluşur.



Şekil 3.2. Aydınlatılan bir metal yarıiletken eklemının şematik diyagramı [3].

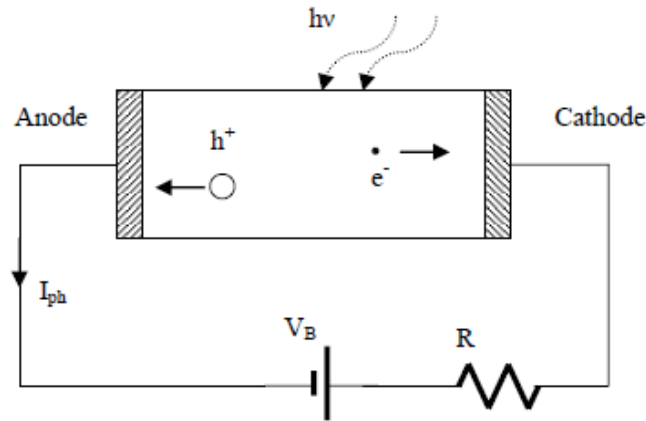
Foto diyotlar, diyotun yapısına ve kontakların tipine göre;

- a. p-n eklem diyotlar
- b. Schottky diyotlar
- c. p-i-n diyotlar
- d. heteroeklem diyotlar olarak dört gruba ayrılır [3,24].

Şekil 3.3'te bir foto diyotun polarmalandırılması görülmektedir [24]. Bir yarıiletkenin band aralığından daha yüksek enerji ile gelen fotonlar, yarıiletken tabakanın içinde soğrulabilmeleri için belirli bir olasılığa sahiptirler [3,24]. Böyle başarılı bir soğurma işlemi, serbest elektron-boşluk çiftinin oluşumundan kaynaklanmaktadır. Eğer kontaklara bir ters besleme voltajı uygulanırsa, yani anot, katottan daha düşük potansiyele sahip olursa, yarıiletken karşısında elektrik alanı oluşur [30]. Elektronlar ve boşluklar zıt yönlerde sürüklenirler, yani elektronlar katoda doğru boşluklarda anoda doğru sürüklenir [25]. Böyle bir taşıma işlemi dış devrede elektrik akımı meydana getirir ve bu akıma fotoakım denilmektedir. Sonuçta foto dedeksiyon olayı,

1. Yarıiletkende fotonların soğrulması ve taşıyıcıların oluşumu
2. Yerel elektrik alanı altında taşıyıcıların sürüklenmesi
3. Malzeme kontaklarında taşıyıcıların toplanması olarak özetlenebilir.

Foto diyotun üzerine düşen fotonların yarıiletken malzemenin içinde ilerlemesi, ışığın dalga boyuna bağlıdır [29]. Dalga boyu düşük olan ışınlar (ultraviyole) yüzeyde emilirken kızılötesi ışınlar ise yarıiletkenin derinliklerine kadar ilerler [3].



Şekil 3.3. Foto diyotun polarmalandırılması [25].

### 3.2. Heteroeklem Foto Diyotlar

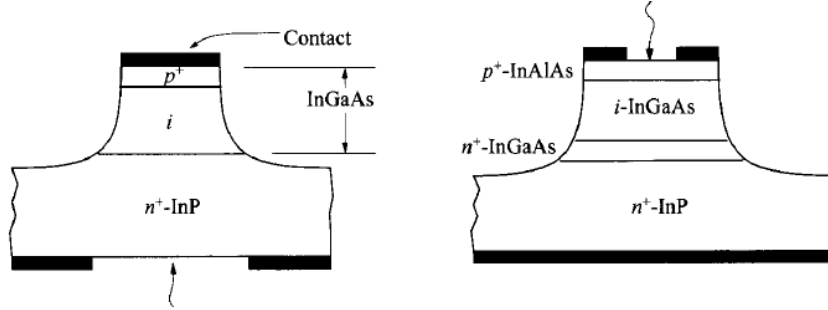
Heteroeklem yapılar gelişmiş yarıiletken cihazların birçoğunun temelinde yer almaktadır. Yüksek performanslı optik kaynaklar ve detektörler için vazgeçilmez önemli bir elemandır [31]. Yüksek hızlı ve yüksek frekanslı analog cihazların yapımında giderek artan bir uygulama alanına sahiptir. Heteroeklem yapılar farklı yasak enerji aralığına sahip iki yarıiletkenin birbiri üzerine büyütülmesiyle oluşur [23].

Bu yarıiletkenlerin enerji aralığındaki farklılık başka bir serbestlik derecesi sağlar. Heteroeklem yapıların belirgin özelliklerinden dolayı çeşitli devrelerde başarılı uygulamaları vardır [24]. Heteroeklem iletkenlikleri aynı veya farklı yarıiletkenlerle oluşturulabilir. İletkenlikleri aynı olan yarıiletkenlerle oluşturulan heteroeklem isotype heteroeklem olarak adlandırılırken, iletkenlikleri farklı olan iki yarıiletken ile oluşturulanlar ise anisotype heteroeklem olarak adlandırılmaktadır. Heteroeklem yapı özellikle Lazer, Led diyotlar, Foto diyotlar, güneş pilleri vb. birçok elektronik devre elemanı yapımında kullanılır [23,31].

Farklı band genişliklerine sahip iki yarıiletken arasında oluşturulan bir heteroeklem ile foto diyot oluşturulabilir. Bu foto diyotların önemli avantajlarından biri kuantum veriminin yüzeyden eklemenin mesafesine bağlı olmamasıdır. Çünkü malzemenin geniş bir band aralığı gelen optik enerjinin geçirgenliği için saydam bir pencere olarak kullanılabilir [24]. Buna ek olarak heteroeklem yapı cevap hızı ve kuantum verimi için eşsiz bir malzeme kombinasyonu sağlayabilir ve verilen bir optik sinyalin dalga boyu için optimize edilebilir. Diğer bir avantajı ise karanlık akımının düşük olmasıdır [24,25].

Heteroeklem ile düşük sızıntı akımı elde etmek için kullanılan iki yarıiletkenin örgü değişmezleri benzer ve uygun olmalıdır. Bu diyotlar InGaAs ve InAlAs'a uygun örgü ve bir InP altlık kullanılarak yapılmışlardır ( $E_g \approx 0.73\text{eV}$ ). Bu yapılar uzun dalga boylarında daha iyi bir performansa ve band genişliklerine sahip olmalarından dolayı Ge foto diyotlara göre daha iyi bir performansa sahip olmaları beklenir. Yapısal soğurmanın yanında geniş bir soğurma faktörü de verir. Yüksek cevap hızı vermek için en ince katkı boyutu kullanılabilir. Başka bir yaygın sistem GaAs altlık üzerine kullanılan AlGaAs'dır. Bu heteroeklemlerin dalga boyu aralığı 0.65-0.85  $\mu\text{m}$  arasında olup fotonik devrelerin üretilmesinde kullanılan önemli bir yapıdır [24].





Şekil 3.4. InP altlık üzerine oluşturulmuş heteroeklem foto diyotlar [24].

### 3.3. Foto Diyotların Akım-Voltaj Karakteristiği

Foto diyotların akım-voltaj (I-V) karakteristiği diyot eklemesindeki akım taşıma mekanizmaları ile belirlenir. Farklı akım taşıma mekanizmaları metal-yarıiletken eklemleri (Schottky, MSM foto diyotlar) ve p-n eklemlerine bağlı olarak meydana gelebilir [41]. Foto diyotun akım-voltaj karakteristiği şekil olarak normal bir diyotunkine benzemektedir. Şekil.3.5'te foto diyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-voltaj karakteristiğini göstermektedir. Foto diyotun duyarlı yüzeyine ışık düşmüyorsa foto diyot üzerinden akan akım, termal yoldan azınlık taşıyıcılarıyla oluşan akımdır. Bu akıma karanlık akımı denir [3]. Şekil 3.5'teki A eğrisi foto diyotun karanlık durumdaki, B ve C eğrileri ise foto diyotun ışık altındaki akım-voltaj karakteristiğini göstermektedir. Şekil de görüldüğü gibi foto diyotun karakteristiği dört bölgeden oluşmaktadır. Birinci (1) bölgede, akım ve voltaj değerleri pozitifdir. Bu bölgede foto diyot doğru polarmalandırılmıştır ve bu bölge foto diyot uygulamaları için uygun değildir, çünkü bu bölgede çalıştırılan foto diyot normal bir diyot gibi davranmaktadır. İkinci (2) bölgede foto diyotun cevabı yoktur. Üçüncü (3) bölgede sadece çok küçük bir  $I_s$  akımı akar [41-43]. Foto diyotun aktif alanı üzerine gelen ışığın şiddeti artırıldığında bu bölgedeki eğriler bütünüyle, negatif akım yönünde aşağıya doğru değişecektir.  $V=0$  ekseninde bu eğrilerin akım eksenini kestiği nokta kısa-devre akımı  $I_{sc}$ 'yi verir. Sıfır akım noktalarında eğrilerin voltaj eksenini kestiği noktalar ise açık-devre voltajı  $V_{oc}$ 'yi verir [3].

Çok yüksek ters polarma voltajlarında akım hızlıca artar ve diyotun bozulması söz konusu olabilir. Bu ters bozulma bölgesidir. Bu nedenle üçüncü (3) bölge, ters polarma voltajının uygulandığı bölge olup ışığı algılamak için uygun olan bölgedir [42]. Dördüncü (4) bölge ise foto diyotun foto voltaik bölgesidir.

Foto diyotlar üç ana karakteristiğe sahiptirler ki bunlar;

- Akım-voltaj karakteristiği
- Kuantum verimi karakteristiği
- Band genişliği (çalışma hızı) karakteristiği

Bir foto diyotun performansı bu üç karakterizasyon ile ölçülür. Düşük karanlık akımı ve yüksek bozulma voltajı, diyot eklem niteliğinin iki göstergesidir. Düşük karanlık akımı, daha yüksek duyarlılık anlamına gelir ve foto diyota ışık uygulanmaksızın ters polarma altında diyot içinde akan akımdır [3].

Bir foto diyota, yeterince yüksek ters polarma voltajı uygulandığında diyot çığ bozulma bölgesinde çalışır [3]. Bu ters polarma voltajının değeri bozulma voltajına karşılık gelir ve foto diyotun çalışması için uygulanabilen ters polarma voltajı sınırını belirler. Bu değerden sonra, kazanç ve çarpma mekanizmaları diyotun çalışmasını gerçekleştirmeye başlar [43].



Şekil 3.5. Foto diyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-voltaj karakteristikleri [3].

Foto diyot prensipte bir akım kaynağıdır ve yeterli miktarda ışık aldığıında çalışmaya başlar. Işık foto diyotun içinde zayıf bir akımın oluşmasına neden olmaktadır. Foto diyota voltajın uygulanması sonucunda, devrede bir yük direncinin bulunması nedeniyle fotoakım meydana gelir. Bu yük dış devre direncinin toplamıdır. Fotoakımın etkinliği küçük bir kısmı iç direnci üzerinde oluşurken, büyük bir kısmı da dış devre

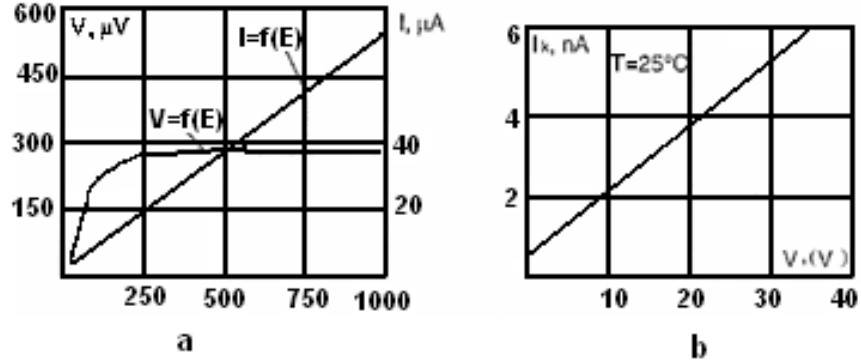
direnci üzerinde oluşmaktadır [41-46]. Dolayısıyla foto diyot, bir voltaj kaynağı (foto voltaik) veya bir akım kaynağı (iletkenlik bölgesi) olarak kullanılabilir.

Bir Schottky foto diyotunun doğru akımı analiz edilerek ters besleme doyma akımı, engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi diyot parametreleri belirlenebilir.  $I_0$  ve  $\phi_b$   $V=0$ 'da doğru besleme akımı fit edilerek bulunabilir. İdealite faktörü(n) doğru polarma I-V eğrisinin ( $dV/dI$ ) eğimi ile belirlenir [43-45].

### 3.3.1. Fotovoltaik Etkiler

Foto diyot, bir voltaj kaynağı veya bir akım kaynağı olarak kullanılabilir. Yani akım ve voltaj kaynağı olarak iki çeşit çalışma şekli vardır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, fotovoltaik durumda yani voltaj kaynağı çalışma şeklinde foto diyotun üzerinde elde edilen voltaj önce ışık şiddetiyle doğrusal ve daha sonra ise logaritmik olarak değişmektedir [3]. Burada foto diyota paralel bağlı yük direnci çok yüksek değerde seçilmiştir. Oysa yük direnci yaklaşık olarak diyotun dinamik iç direnci değerine eşit olacak şekilde küçük bir değerde seçildiğinde voltajın değişimi doğrusal olur. Normalde, bir foto diyot için ne tam logaritmik ne de tam doğrusal çalışabilir demek doğru bir yaklaşım olmasına rağmen, foto diyota düşen ışık şiddetine bağlı elde edilen voltaj tam doğrusal olarak değişmektedir. Benzer şekilde, Şekil 3.6.b'de görüldüğü gibi uygulanan voltajın artması ile diyotun akımı doğrusal bir değişim göstermektedir [45-50].

Çok küçük bir direncin bağlanmasıyla elde edilen foto diyot eğrisi oldukça doğrusal bir karakteristik göstermesine rağmen hassasiyet çok küçük değerlerde olabilir. Bunun içinde yük direncinin değerini artırmak gerekmektedir. Voltaj kaynağı olarak kullanılmasında çıkış voltajı ile ışık şiddeti aşağı yukarı logaritmik değişir [3]. Ancak bu durum, yük direnci değerinin  $10\text{ M}\Omega$  veya daha fazla olduğunda geçerlidir.  $10\text{ M}\Omega$ ' un altında artık logaritmik değişimden söz edilemez. Böylece eğer foto diyot voltaj kaynağı olarak devreye alınmışsa ve yüksek değerde bir yük direnci üzerinde çalışıyorsa ışık şiddetine göre voltajın değişimi logaritmik olacaktır. Bu durumda yük direncinin foto diyotun anot ve katoduna bağlandığını belirtmek gerekir [13].



Şekil 3.6. Foto diyotun, a.  $V=f(E)$ ,  $I=f(E)$  eğrileri [3]. b.  $I_k=f(V)$  eğrileri [3].

### 3.3.2. Hacimsel Fotovoltaik Etkiler

1931'in başlarına kadar Dember, bakır oksit materyalinin soğurma bölgesinin güçlü bir ışık ile aydınlatıldığı zaman, bakır oksit numunesine karşı oluşan bir potansiyelin olduğunu ileri sürdü ve daha sonra bu olay Dember etkisi olarak adlandırıldı. Bu durum daha sonra elmas, çinko sülfat, germanyum, silikon ve kadmiyum sülfat vb. elementlerde de gözlemlendi [45-49]. Kallmann ve Pope ilk olarak antrasen (anthracene) kristalinin ana soğurma bölgesinin  $\lambda=3650\text{\AA}$  dalga boylu güçlü bir ışık ile aydınlatıldığında 0,2 V'a kadar aydınlatılan yüzeyin negatif kutuplanması ile organik kristallerin oluştuğunu gösterdi [50]. Bu olay, aydınlatılan yüzeyden aydınlatılmayan yüzeye olan elektronlardan daha foto üretici boşlukların difüzyonuna atfedildi. Çünkü antrasen kristallerinde boşluk mobilitesi, elektron mobilitesinden daha büyüktür. O zamandan beri birçok araştırmacı organik kristallerdeki fotovoltaik etkilerini araştırmaktadır [51-52]. Vladimirov ve arkadaşları ile Vertsimakha ve arkadaşları, eğer antrasen kristali önemsiz soğurulmaya maruz kalması halinde yani  $\lambda>4000\text{\AA}$  dalga boylu ışık ile aydınlatıldığı durumda fotovoltaik üreticinin polaritesi Kallmann ve Pope tarafından ileri sürülene ters düştüğünü belirttiler [50]. Onlar bu olayı, kristaldeki tuzaklardan yük taşıyıcıların serbest bırakılan fotonlara ve aydınlatılan yüzeydeki band bükülmelerinin oluşumuna atfeder. Foto voltaj aralığının spektral dağılımının soğurma spektrumu ile yakın bir ilişkisinin olduğu ve ışık yoğunluğunun değişimi sadece foto voltaj ile değiştiğini ancak, bu ilişkinin çok da etkili olmadığını ve foto voltajın yüzey şartlarına duyarlı olduğu bilinmektedir [52-54].

### 3.3.3. Yüzeysel Fotovoltaik Etkiler

Foto diyotların yüzeysel fotovoltaik etkileri, yüksek elektrik alan uygulamasıyla yüzey potansiyel engelini azaltmak ve ışık yoğunluğunu artırarak numuneyi uyarmak için incelenir [3]. Yüzey foto voltajı özellikle yüzeydeki enerji bandının eğiliminden kaynaklanır. Foto voltajın büyüklüğü ve işareti numune yüzeyinin yüzey durumlarıyla birbirlerine güçlü bir şekilde bağlıdır [47-51].

Organik yarıiletken p-n eklemleri gibi n-tipi ve p-tipi organik yarıiletkenin bileşenleriyle bir fotovoltaik malzeme oluşturabilir. Organik fotovoltaik malzemelerde fotoakım  $10^{-9}$ - $10^{-8}$ A ve foto voltaj 200 mV'a kadar bulunmuştur. Işık yoğunluğunun artırılması ile fotoakım da artar ve eklemdaki elektronlar ışık aydınlatmasının yönünü hesaba katmaksızın p-tipi materyalden n-tipi materyale doğru hareket ederler [3].

### 3.3.4. Fotovoltaik Parametreler

Foto diyotların veya güneş pillerinin yük karakteristikleri çeşitli parametrelerin analizi ile yapılır. Bu parametreler; spektral kuantum verimi ( $\eta$ ), açık-devre voltajı ( $V_{oc}$ ), kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), doldurma faktörü (FF), maksimum güç noktasındaki voltaj ( $V_m$ ), maksimum güç noktasındaki akım ( $I_m$ ), maksimum çıkış gücü ( $P_m$ ), seri direnç ( $R_s$ ) ve şönt direnç ( $R_{sh}$ )'tir [3,54].

#### 3.3.4.1. Açık-Devre Voltajı

Aydınlatma altındaki diyotun akım-voltaj karakteristiğinde eğrinin voltaj eksenini kestiği değere açık-devre voltajı ( $V_{oc}$ ) denir ve akımın sıfır olduğu durumda belirlenir. Buda,

$$V_{oc} = \left( \frac{nkT}{q} \right) \ln \left[ \left( \frac{I_{sc}}{I_s} \right) + 1 \right] \quad (3.1)$$

ifadesi ile verilir [54]. Denklem 3.1'de anlaşılabacağı gibi n'nin yüksek değerleri ile yüksek açık-devre voltajları elde edilebilir fakat bu her zaman geçerli olan bir durum değildir. Çünkü yüksek n, genelde  $I_s$ 'nin yüksek değerleri ile mümkündür. p-n eklemleri için her

zaman  $n$ 'nin (1 e yakın) düşük değerleri için daha yüksektir. Aydınlatma iddeti ile  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$ 'nin değişimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir [52-55].

#### 3.3.4.2. Kısa Devre Akımı

Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ıkış akımı olup uygulanan voltaj ile ideal durumda ( $R_s$  ve  $R_{sh}$  dirençlerinin etkileri yok olduğu zaman) aydınlatma altında oluşmaya başlar. Bu akım gelen foton sayısı ve aydınlanma şiddeti ile orantılıdır [3].

#### 3.3.4.3. Spektral Cevap

Spektral cevap, belirli dalga boylarında yüzeye gelen fotonların sayısı ile bağlantılı olup her bir dalga boyundaki toplam fotoakım, bir malzemenin spektral cevabını belirler [3]. Bir i spektral cevap  $SR(\lambda)$  numuneye gelen fotonların sayısı ile ilgili kısa-devre şartları altında oluşan elektron-boşluk çiftinin sayısıdır ve,

$$SR(\lambda) = \frac{J_p(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} + \frac{J_n(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} + \frac{J_{dr}(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} \quad (3.2)$$

bağıntısı ile verilir [54]. Dış spektral cevap  $SR(\lambda)_{ext}$  ise, bir numunenin yüzeyinden daha düşük refleksiyon ile azalabilen bir i tepki cevabı olup,

$$SR(\lambda)_{ext} = SR(\lambda)[1 - R(\lambda)] \quad (3.3)$$

ifadesi ile verilir. Toplam fotoakım yoğunluğuna katkı sağlayan bu terimler,  $J_p(\lambda)$  boşluk difüzyon akım yoğunluğu,  $J_n(\lambda)$  elektron difüzyon akım yoğunluğu,  $J_{dr}$  sürüklenme akım yoğunluğudur [51-54].

#### 3.3.4.4. Seri Direnç

Bir foto diyotun seri direnci metal kontakların ve altlığın hacminin direnci devrede Şekil 3.7'de gösterildiği gibidir. Seri dirençler, fotovoltatik durumdaki foto diyotun doğrusallığını tanımlamak için kullanılır. Bir foto diyodun seri direnci,

$$R_s = \frac{(W_0 - W_d)\rho}{A_j} + R_c \quad (3.4)$$

bağıntısı ile hesaplanır [3]. İfade de  $W_0$  altlık kalınlığı,  $W_d$  tükenim bölgesinin genişliği,  $A_j$  eklem yarıldığı alan,  $\rho$  altlığın öz direnci ve  $R_c$  kontak direncidir. İdeal foto diyotların seri dirence sahip olmaması gerektiği halde 10-1000 ohm arasında değişen seri dirence sahip oldukları görülmüştür [47-50].

#### 3.3.4.5. Şönt Direnci

Bir foto diyotun şönt direnci bir akım kaynağı olarak gösterilebilir. Şönt direnç başlangıcı  $V=0$ 'da olan foto diyotun akım-voltaj eğrisinin eğimidir. İdeal bir foto diyot için şönt direnci sonsuz ( $R_{sh}=\infty$ ) ve seri direnci sıfır ( $R_s=0$ ) olmalıdır. Ancak gerçekte şönt direnç birkaç mega ohm ile giga ohm arasında değişen değerler alır. Şönt direnç foto diyota besleme voltajı uygulanmadığı durumlardaki gürültü akımını tanımlamak için kullanılır. Şönt direnç deneysel olarak foto diyota  $\pm 10$  mV uygulanarak foto diyotun etkin direnci hesaplanarak elde edilir. Bir foto diyot ne kadar yüksek bir şönt dirence sahip olursa o kadar ideal olur. Şönt direncin devredeki gösterimi Şekil 3.7.a'da görülmektedir [3].

#### 3.3.4.6. Kuantum Verimi

Bir foto diyotun kuantum verimi, fotoakımı sağlayan ve foto diyota gelen foton sayısının yüzdesidir. Yani foto diyotun gelen ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirme yeteneğine kuantum verimi denir ve yüzde (%) olarak ifade edilir. Kuantum verimi ile foto diyot duyarlılığı aşağıda verilen eşitlikle birbirine bağlıdır [41-45].

$$Q.E = \frac{R_{\lambda \dots \dots \dots gözlemlenen}}{R_{\lambda \dots \dots \dots ideal}} \times 100 \quad (3.5)$$

$$Q.E = R_{\lambda} \frac{hc}{\lambda q} \quad (3.6)$$

burada verilen ifadelerde,  $h$  Planck sabiti,  $c$  ışık hızı,  $q$  elektron yükü,  $R_{\lambda}$  foto duyarlılık ve  $\lambda$  dalga boyudur.

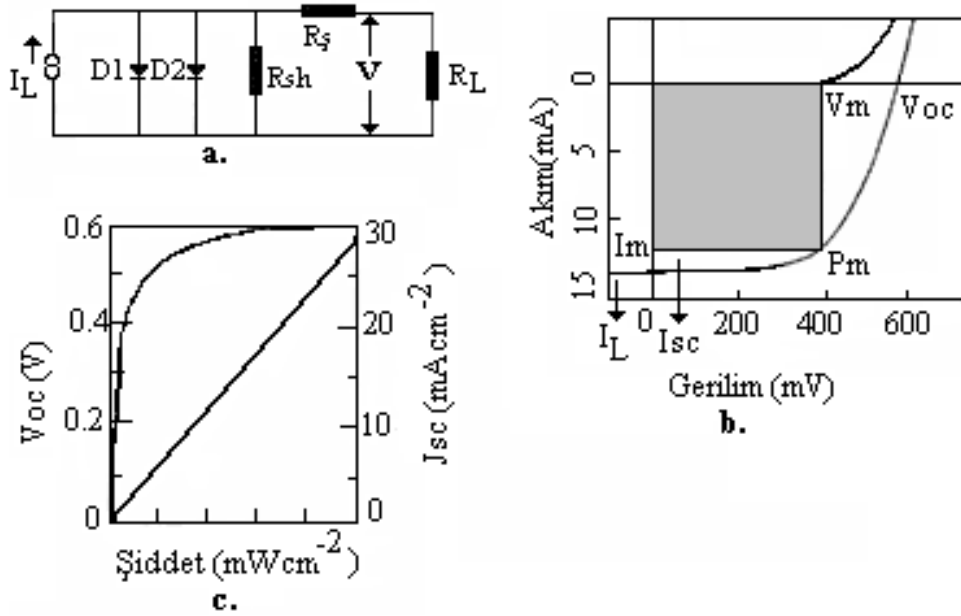
### 3.3.4.7. Doldurma Faktörü

Doldurma Faktörü (FF),

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3.7)$$

bağıntısı ile verilir. Şekil 3.7.c’de de görüldüğü gibi doldurma faktörü I-V eğrisiyle çizilen kare veya dikdörtgen ile ilgilidir.

Yüksek band aralıklı malzemelerin ve bu malzemelerin daha yüksek açık-devre voltajlarından dolayı yüksek doldurma faktörlerini oluştururlar. Normalize edilen  $V_{oc}$  ‘nin fonksiyonu olarak  $V_m/V_{oc}$ ,  $I_m/I_{sc}$  ve FF’ nin değişimleri Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Seri direnç ve şönt direnç ihmal edildiği zaman  $V_m/V_{oc}$ ,  $I_m/I_{sc}$  ve FF oranı Şekil 3.8’de gösterilen bütün alt değerlere kadar azalır [3].

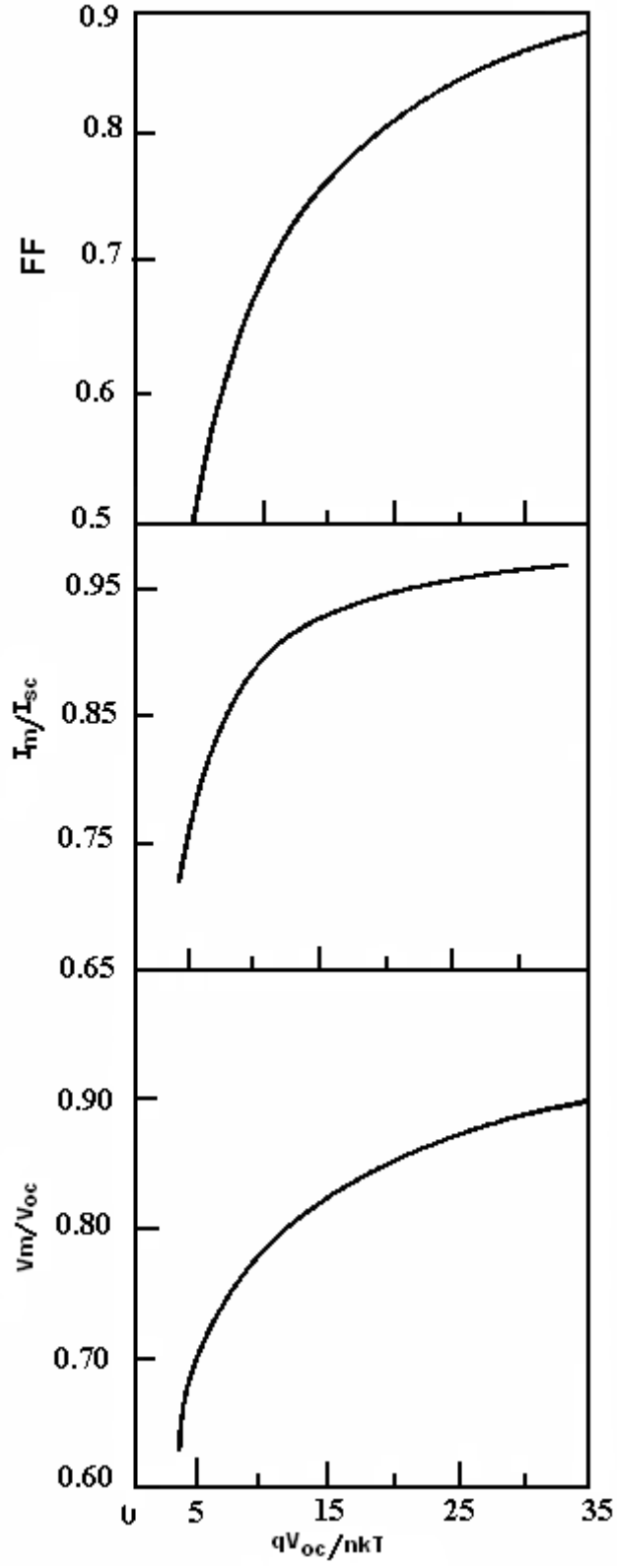


Şekil 3.7. a. Seri ve şönt dirençleri kapsayan bir foto diyodun eşdeğer devresi [3].

b. Bir foto diyodun tipik aydınlatma ve karanlık I-V karakteristikleri [3].

c. ışık şiddetinin fonksiyonu olarak  $V_{oc}$  ve  $J_{sc}$  'leri [3].





Şekil 3.8.  $qV_{oc}$ 'nin fonksiyonu olarak  $V_m/V_{oc}$ ,  $I_m/I_{sc}$  ve FF' nin değişimi [3].

### 3.3.4.8. Foto Duyarlılık

Foto duyarlılık başka bir ölçümün parametresi olup optik gücü oluşturan fotoakım ile ilgilidir. Foto diyotun duyarlılığı, ışığa duyarlılığın bir ölçüsü olup fotoakımın ( $I_{ph}$ ), verilen dalga boylarında foto diyotun yüzeyi üzerine düşen ışığın gücüne oranı olarak tanımlanır. Foto duyarlılık, başka bir ifadeyle ışık gücünün elektrik akıma dönüştürülme etkisinin bir oranıdır. Foto duyarlılık, foto diyotun üzerine düşen ışığın dalga boyu, sıcaklık ve foto diyota uygulanan ters polarma voltajı ile değişmektedir. Foto diyotlar için duyarlılık,

$$R_p = \frac{I_{ph}}{P} = \frac{\eta e}{h\nu} \quad (3.8)$$

ifadesi ile verilir [41]. Burada  $\eta$  spektral kuantum verimi,  $\lambda$  foto diyota gelen ışığın dalga boyudur. Foto duyarlılığın birimi denklem 3,8'de de anlaşılaçağı gibi, A/W'dir. Foto diyotların duyarlılığını artırmak için foto diyot yüzeyine çarpan ışık ile yansıyan ışık arasındaki oran azaltılır. Schottky foto diyotları için bu, ince metalik kontaklar kullanılarak sağlanabilir. Bu durum p-i-n foto diyotlar için yarıiletken-hava arayüzeyi arasındaki çarpan ve yansıyan ışık oranı uygun bir anti-yansıma işlemi ile azaltılabilir [41-45]. Üstelik Schottky kontak materyallerinde soğurma ve  $p^+$  veya  $n^+$  tabakalarındaki soğurma Schottky foto diyot ile p-i-n foto diyotları içinde ek kayıplar olarak hesaba katılabilmelidir [3].

## 4. METAL OKSİT YARIİLETKENLER

### 4.1. Çinko Oksit (ZnO) ve Özellikleri

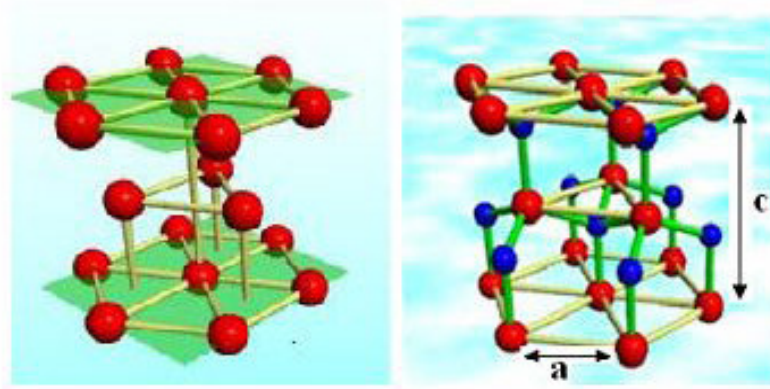
Çinko Oksit (ZnO) periyodik tabloda II-VI grup bir yarıiletken olup kararlı wurtzite yapıdadır. Örgü parametreleri  $a=0.325$  nm ve  $c=0.521$  nm'dir. ZnO, İnce film transistörleri, piezoelektrik cihazlar, kimyasal gaz sensörleri, vb. birçok alanda kullanılmaktadır [4,9,14].

Çinko oksit doğada “mineral zinkit” olarak bulunur. ZnO bileşiği hekzagonal yapıda kristalleşmekte ve örgü sabitleri  $a=3,24982$  Å,  $c=5,20661$  Å dur. ZnO birim hücresinin hekzagonal yapısında her Zn atomu birinci kabukta dört O atomu ve ikinci kabukta on iki Zn atomu ile çevrilmiştir [10]. II-IV bileşiklerinin çoğu ya kübik ya “zinc blende” ya da “hekzagonal wurtzite” yapısına sahiptir [14,19].

ZnO yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olup oda sıcaklığında yaklaşık 3,3 eV' luk yasak enerji aralığına sahiptir [18,26]. Yaklaşık 60 meV' luk eksiton enerjisine sahip olan ZnO yarıiletken ince filmler, elektronik ve optik aygıtlar için uygun yapıda bir malzemedir. Yarıiletkenlerdeki elektron geçiş performansı düşük ve yüksek elektrik alanlarda farklılıklar gösterir. Düşük elektriksel alanda ZnO'in sahip olduğu elektronların enerji dağılımı fazla değişime uğramaz. Çünkü elektronlar uygulanan elektrik alandan fazla enerji alamazlar [19,22]. Bu nedenle ZnO'in elektron mobilitesi sabit ve saçılma oranı elektron mobilitesi ile belirlendiği için saçılma oranında fazla bir değişim olmaz. Yüksek elektrik alanda uygulanan elektrik alanından dolayı elektronların enerjileri kendi termal enerjileriyle karşılaştırılabilir ve elektron dağılım fonksiyonu dengede, sahip olduğu değerden daha uzak bir değere doğru sapacaktır [14,15]. Bu elektronlar örgü sıcaklığından daha yüksek sıcaklığa sahip elektronlar olmaktadır. Elektron sürüklenme hızları kararlı durumda sahip oldukları sürüklenme hızından büyüktür. Bu nedenle yüksek frekansa sahip aygıtlar yapmak olasıdır [20,21].

Ayrıca, ZnO ferro elektrik olmayan bir bileşik olup oldukça büyük bir elektro-mekanik çiftlenim katsayısına sahiptir. Bu özelliğinden dolayı ZnO, delay line cihazları ve yüzey akustik dalga cihazları (SAW) için bir transduser olarak kullanılabilen ve iyi bilinen bir piezoelektrik malzemedir [4,27].

Çinkonun doğada bol miktarda bulunması ve ucuz olması ZnO ince filmlerin maliyetini düşürmektedir [15,27]. ZnO ince filmlerin görünür ışık bölgesinde saydam oluşu nedeniyle saydam iletken malzeme olarak çok büyük ilgi görmektedir. ZnO bileşiği görünür bölgede yaklaşık %80-%90 optik geçirgenliğe ve  $10^{-3} - 10^{+2} \Omega.cm$  bölgesinde bir elektriksel dirence sahiptir [18,21].



**Şekil 4.1.** ZnO'in hekzagonal würtzite yapısı [26].

**Tablo 4.1.** ZnO'in temel fiziksel özellikleri [4].

| Özellikler                 | Değerler                 |
|----------------------------|--------------------------|
| $a_0$                      | 0,32469 nm               |
| $c_0$                      | 0,52069 nm               |
| Yoğunluk                   | 5,606 g/cm <sup>3</sup>  |
| Erime noktası              | 2248 K                   |
| Dielektrik sabiti          | 8,66                     |
| Yasak enerji aralığı       | 3,4 eV                   |
| Öz taşıyıcı konsantrasyonu | $<10^6 \text{ cm}^{-3}$  |
| Eksiton bağlanma           | 60 meV                   |
| Etkin elektron kütlesi     | 0,24                     |
| Elektron mobilitesi (300K) | 200 cm <sup>2</sup> /Vs  |
| Etkin boşluk kütlesi       | 0,50                     |
| Boşluk mobilitesi (300K)   | 5-50 cm <sup>2</sup> /Vs |

## 4.2. ZnO'in Katkılanması

Katkılanmamış ZnO genellikle n tipi yarıiletken özelliği gösterir. Fakat yarıiletken devre elemanı yapımında kullanılacak ZnO katkılanarak istenilen özellikte hem n tipi yarıiletken hem de p tipi yarıiletken olarak elde edilebilir [20].

### 4.2.1. n-Tipi Katkılama

Katkısız ZnO sahip olduğu doğal kusurlardan dolayı n-tipi özellik gösterir. Bir varsayıma göre katkısız Zn enerjisi 30~50 meV olan baskın sığ seviyelere sahiptir. Diğer bir varsayıma göre ise baskın donörlerin iyonizasyon enerjisi 30 meV olan hidrojenen geldiğidir. Bu varsayım ZnO'in üretildiği hemen hemen bütün üretim tekniklerinde hidrojen bulunduğu varsayımı üzerine kurulmuştur. Bu nedenle, ZnO ince film içerisine hidrojen girmesi olasıdır. n-tipi ZnO Al, Ga, In vb. metallerle katkıldığında elektriksel iletkenlik bakımından yüksek iletkenliğe ulaşabilir [20].

### 4.2.2. p-Tipi Katkılama

Düşük enerjili doğal kusurlarından dolayı p-tipi ZnO üretmek zordur. Li, Cu, Ag ve Zn ZnO'e akseptörün olası adaylarıdır. Fakat bu elementler normalden derin akseptör seviyeleri oluştururlar dolayısıyla elektriksel ilettime çok fazla katkıları olmaz. p-tipi ZnO üretmek için iki yol vardır. Birinci yol Li, Na, K gibi I. grup elementleri Zn kenarlarının içerisinde kullanmak ikinci yol ise N, P, As gibi beşinci grup elementleri O kenarlarının içerisinde kullanmaktır. I. grup sığ akseptör seviyelerine ulaşmada IV. gruptan daha iyi olabilir. I. Grup metaller için geniş bağ uzunlukları gözlenirken bu metaller filmde boşluklar gibi doğal kusurlar oluştururlar. Bu boşluklar katkılama etkisini azaltır. Bu nedenle bu metallerle p-tipi ZnO üretmek zordur. N hariç IV. Grup elementlerinin çoğu benzer sebeplerden dolayı p-tipi ZnO üretmek için iyi birer aday değildir. Bu nedenle N p-tipi katkılama için en iyi aday olabilir [9,20].

#### 4.3. ZnO'nun Piezoelektrik Özelliği

ZnO'nun önemli özelliklerinden biri olan piezoelektrik özelliği, kuvvet algılamada, akustik dalga rezonatörü, akustik-optik modülatör vb. birçok çalışmanın konusu olmuştur.

Piezoelektrik özelliğinin temeli, oksijen ve çinko atomlarının tetrahedral yapıda bağlandığı kristal yapısına dayanır [9]. Böyle bir merkezi olmayan simetrik yapıda, pozitif yük ve negatif yük merkezi, örgü deformasyonuna neden olan dış basınç etkisiyle yer değiştirebilir. Bu yer değiştirme bölgesel dipol momenti ile sonuçlanır, böylece makroskobik dipol momentleri tüm kristal üzerinde belirir. Gerçekte tetrahedral yapıda bağlanmış yarıiletkenler arasında ZnO geniş bir elektromekanik çiftleşme sağlayan en yüksek piezoelektrik tensörüdür [4,10].

#### 4.4. ZnO'nun Elektriksel Özellikler

CVD (kimyasal buhar kaplama) ile elde edilmiş ZnO nano yapıları tek bir kristaldir ve polikristal ince filmde daha yüksek elektriksel özellik gösterir. ZnO ince film transistörlerinde  $7\text{cm}^2/\text{V.s'lik}$  bir elektron alan etki mobilitesi sık karşılaşılr. Tek kristallerinde ise ZnO nano kablolar  $80\text{cm}^2/\text{V.s}$  miktarına bir mobilite gösterir. Nano kabloları elektron saçılması ve yüzey tuzaklarını düşürmek için polimid ile kapladıktan sonra  $1000\text{cm}^2/\text{V.s'lik}$  elektron mobilitesi rapor etmişlerdir [20,22]. Bu sonuç ZnO nano yapı tabanlı cihazların kendi ince film türlerine göre daha hızlı çalışma sağlayabileceğini gösterir. ZnO'nun elektronik ve fotonikteki geniş uygulamalarına başlıca engel p-tipi katkılamının güçlüğüdür [4,9].

#### 4.5. ZnO'nun Optik Özellikler

ZnO iyi bir saydam yarıiletken malzemedir. ZnO nano yapıların kendine özgü optik özellikleri fotonik cihaz uygulamaları için yoğun bir şekilde çalışılmıştır. ZnO nano çubukların fotoluminans spektrumunda uyarımlı salınım gözlenmiştir. Yapılan çalışmalarda  $380\text{nm'de}$  banddan banda geçişten kaynaklanan güçlü emisyon piki ve oksijen boşlukları ile ilgili olan yeşil-sarı emisyon bandı gözlenmiştir [20,26]. Bu sonuçlar ZnO hacim yapısı ile tutarlıdır. Fotoluminans spektrumu ZnO nano kabloların UV emisyonu için umut verici bir materyal olduğunu göstermektedir. Bu nedenle ZnO'nun UV

lazer özelliği daha önemli bir araştırma konusu olmaktadır. Silindirimsi geometrisi ve büyük kırıcılık indisinden ( $\sim 2.0$ ) dolayı ZnO nano kablo/çubuk doğal bir optik dalga kılavuzu adaydır. ZnO nano kablo dizileri oda sıcaklığındaki UV lazerleri elde etmek için ümit verici bir materyaldir.  $40 \text{ kW/cm}^2 \sim 100 \text{ kW/cm}^2$  eşik gücünde lazerler rapor edilmiş ve daha yüksek kristal kalitesinin daha düşük eşik değerleri sağlayacağı belirtilmiştir. Son zamanlardaki araştırmalar ZnO nano yapıların entegre ve opto elektronik devrelerinin yapı taşları olarak kullanılabilecek bir potansiyele sahip olduğunu da göstermektedir [4,14].

#### **4.6. ZnO'in Manyetik Özelliği**

ZnO'in ferromanyetik özellik için umut verici bir materyal olduğu tespit edilmiştir. ZnO'te mangan (Mn) katkı maddesi olarak kullanılarak, oda sıcaklığında boşluk aracılığı ile ferromanyetik düzenlenme teorik olarak ortaya konulmuştur [18,20].

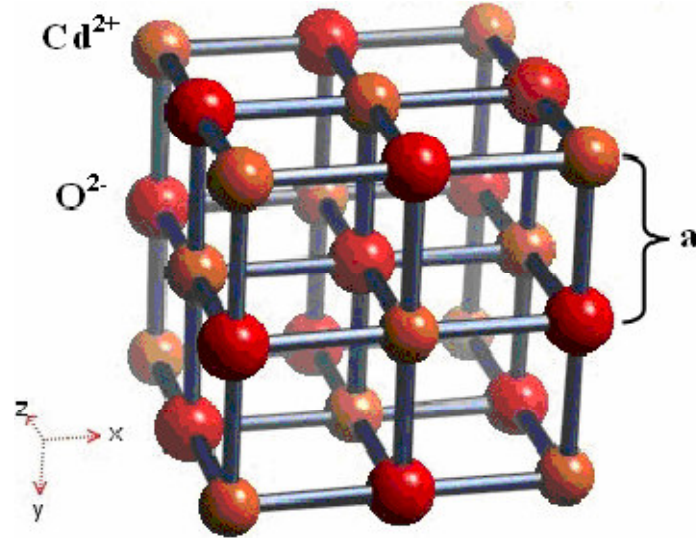
ZnO'e ferro manyetizma Co ve Fe katkı maddesi olarak kullanılarak da tespit edilmiştir. ZnO kısa dalga boylu manyeto-optik cihazlarda mükemmel bir materyal olarak göz önüne alınmaktadır. Bu tip çalışmalar manyetik ZnO nano kabloların nano boyutta spin tabanlı cihazlarda kullanımını mümkün kılacaktır [4].

#### **4.7. ZnO'in Kimyasal Algılama Özelliği**

Metal-oksit yüzeyindeki oksijen boşlukları elektriksel ve kimyasal olarak aktiftir. Bu boşluklar n-tipi vericiler gibi işlev görür ve genellikle oksidin iletkenliğini önemli ölçüde artırır.  $\text{NO}_2$  ve  $\text{O}_2$  gibi yük kabul eden moleküllerin boş sitelere absorplanmasıyla iletim bandındaki elektronlar önemli ölçüde boşalır ve n-tipi oksidin iletkenliğinde düşmeye sebep olurlar [15,19]. Öte yandan  $\text{CO}$  ve  $\text{H}_2$  gibi moleküller, yüzeyde tutunan oksijenle reaksiyona girerek yüzeyden sökülmesine neden olurlar. Bu süreç iletkenliğin artması ile sonuçlanır. Birçok metal-oksit gaz sensörü bu prensibe göre çalışır. Katı hal gaz sensörlerinin başında gelen ZnO bulk ve ince filmler yüksek sıcaklıklarda ( $\sim 400^\circ\text{C}$ )  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ , alkol ve  $\text{H}_2$  algılamada kullanılmaktadırlar [4,20].

#### 4.8. CdO'in Özellikleri

II-VI grup yarıiletkenlerden biri de kadminyum oksittir (CdO). Bu yarıiletken oda sıcaklığında 2,2-2,8 eV'luk bir enerji band aralığına sahiptir. Genellikle katkısız CdO bileşiği n-tipi yarıiletken özelliği gösterir. n-tipi iletkenliğin kaynağı olarak oksijen boşlukları ve donör olarak davranan ara yer Cd atomları gösterilir [57-60]. Kristal örgüde var olan ara yer Cd atomlarından dolayı stokiometrik ( $\text{Cd}_{(1+x)}\text{O}$ , non-stokiometrik) olmayan bir durum söz konusudur. Saf CdO içine In, Sn, F vb. elementlerin katkılanmasıyla iletkenlik değeri arttırılabilir [26]. CdO'in, oda sıcaklığındaki rengi koyu kahverengi iken, katkısız kadmium oksit oda sıcaklığından itibaren  $400^\circ\text{C}$ 'ye kadar ki sıcaklığa kadar kahverengi rengini korur. Ancak  $800^\circ\text{C}$ 'den itibaren uygulanan ısı işlemi dolayısı ile siyah renge dönüştüğü ancak kristal yapısında bir değişiklik olmadığı XRD ölçümleri ile belirlenmiştir. CdO, vakum ortamında  $350^\circ\text{C}$ 'de açık hava ortamında  $900^\circ\text{C}$ 'de termal parçalanmaya uğrar ve kristal yapı bozulur. CdO yarıiletken maddesi kaya tuzu NaCl tipi (fcc) kübik birim hücre tipine sahiptir ve birim hücre sabiti  $a = 4.66 \text{ \AA}$ 'dur. Şekil 4.2.'de (fcc) kübik birim hücre tipi gösterilmiştir [26,57-60].



Şekil 4.2. CdO'in (fcc) birim hücre tipindeki kristal örgüsü [26].

CdO yarıiletken bileşiği görünür bölgede yüksek optiksel geçirgenliğe sahiptir. Mobilitesi  $64 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  ve öz direnci  $4.87 \times 10^{-4} \Omega.\text{cm}$ 'dir [1,58]. Yüksek elektriksel iletkenliği elektron mobilitesine ( $\sim 200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ), yüksek taşıyıcı yoğunluğuna ve doğasında var olan non-stokiometri nedeniyle oluşmuş sığ donörlere bağlıdır.



Katkısız halde bile oldukça yüksek bir taşıyıcı yoğunluğuna sahiptir. Taşıyıcı yoğunluğu sıcaklığa duyarlıdır ve sıcaklık arttığında taşıyıcı yoğunluğu azalırken elektron mobilitesi  $\sim 1$ 'den  $\sim 220 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 'e çıkar [26]. CdO yarıiletken maddesi aynı zamanda  $\text{SnO}_2$ , ZnO gibi saydam iletken oksit (transparent conducting oxide, TCO) grubunda yer alır [34,58]. Çeşitli saydam iletken oksit ince filmler arasında CdO en az dikkat çekenidir. Bunun nedeni Cd atomlarının insan sağlığı için zararlı olması ve CdO'nin düşük yasak enerji aralığı gösterilebilir [33]. Ayrıca, şu an mevcut yarıiletken oksitlerden 5-10 kat daha fazla elektron mobilitesine sahip olması bu filmler için önemli bir avantajdır. CdO, uygun elektriksel iletkenlik ve optiksel geçirgenlik özellikleri ile görünür bölgeden kızıl ötesine kadar geniş bir dalga boyu aralığında kullanım potansiyeline sahip bir malzemedir. Spektrumunun görünür bölgesinde yüksek elektriksel iletkenlik ve optiksel geçirgenlik özelliklerinden dolayı güneş pili vb. uygulamalarda kullanılmaktadır [26,33].

**Tablo 4.2.** Kübik CdO'nin özellikleri [26].

| Özellik                           | CdO                           |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Molekül Ağırlığı                  | 128.41 (g/mol)                |
| Kristal Yapısı                    | Kaya tuzu NaCl ( <i>fcc</i> ) |
| Birim Hücre parametreleri         | 4.66 (Å)                      |
| Yoğunluk                          | 8.15 (g/cm <sup>3</sup> )     |
| Süblimasyon başlangıcı            | 900 (°C)                      |
| Band Aralığı Enerjisi (300 K)     | 2,2- 2,8 (eV)                 |
| Eksiton Bağlanma Enerjisi (300 K) | 60 (meV)                      |
| Elektron Etkin Kütlesi            | 0.24 (g)                      |
| Elektron Hareketi (300 K)         | 200 (cm <sup>2</sup> /Vs)     |
| Boşluk Etkin Kütlesi              | 0.59 (g)                      |
| Boşluk hareketi (300 K)           | 5- 50 (cm <sup>2</sup> /Vs)   |

#### 4.9. Sol Jel Yöntemi

Sol jel yöntemi, kimyasal bir yöntem olup başlangıç malzemesi olarak bir solüsyon içerdiği için ve bu solüsyon kullanılarak jel gibi bir yapı elde edildiğinden “sol-jel yöntemi” denilmektedir. Sol-jel yöntemi, geleneksel yöntemlere göre daha düşük

sıcaklıklarda (100-600 °C) yapılır ve özellikle organik olmayan (inorganik) ince film kaplamalarında kullanılır. Sol-Jel yöntemi, çözelti jel halindeyken daldırma yöntemi, döndürme yöntemi ve püskürtme yöntemi ile ince film hazırlanmasında ideal ve düşük maliyetli olması teknolojik olarak önemlidir [4,22].

Sol jel yöntemi; pürüzlü/pürüzsüz yüzeyleri, geniş alanlı altlıklara kolay ve düşük maliyet ile kaplama imkânı sağladığı için ince film oluşturmada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde altlıklara tek kaplama ile çok ince film kaplamaları veya çok kaplama ile daha kalın ince film kaplamaları yapılabilir [67,72].

Sol jel terimine ilk kez 1846 yılında rastlanılmaktadır. 1939'da sol gel yöntemi kullanılarak SiO<sub>2</sub> ile ilgili ikinci bir çalışma yapılmıştır. Bu yöntemin, 1953'ten sonra otomobil dikiz aynalarında kullanılmaya başlanması ile popülaritesi artırmış ve yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Sol jel yöntemi, elektro-kromik kaplamalar, ferro-elektrik tabakalar, koruyucu kaplamalar, opto-elektronik kaplamalar, optik hafızalar ve yüksek sıcaklık süper iletkenleri kaplama vb. geniş bir uygulama alanına sahiptir [72].

#### **4.9.1. Sol Jel Kaplama Yöntemleri**

Sol jel yöntemi ile oluşturulan jeller kullanılarak ince film kaplama yöntemleri,

- a. Daldırarak kaplama (dip coating),
- b. Spin-kaplama (spin-coating)
- c. Püskürterek kaplama (spray pyrolysis)

#### **4.9.2. Daldırarak Kaplama Yöntemi (Dip Coating)**

Bu yöntemde, ince film kaplanacak tabaka solüsyon içine daldırılır ve daha sonra tabaka yavaşça geri çekilerek ince filmin oluşturulduğu bir kaplama yöntemidir. Tabaka dışarı doğru çekilirken fazla solvent tabakadan ayrılır ve solventin buharlaşması ile ince film elde edilir. Genellikle daldırma birkaç kez tekrarlanarak istenilen kalınlıkta ince film elde edilebilir. Tek bir daldırma ile elde edilen ideal film kalınlığı 0,1–0,45 µm arasındadır. Film bundan daha kalın olursa çözelti kurutulduğunda filmdeki yapışma kuvveti filmin taban yüzeyine paralel yönde daralmayı zorlayarak filmin kırılmasına neden olabilir [4,67].

#### **4.9.3. Spin Kaplama (Spin Coating)**

Spin-kaplamada birkaç damla solüsyon taban üzerine damlatıldıktan sonra taban 500–4000 rpm'e kadar istenilen hızlarda döndürülür. Taban dönerken solüsyon tabakaya yayılır ve solvent buharlaşmaya başlar. Solventin büyük bir kısmı buharlaştıktan sonra ince film elde edilir. Film tabanında arta kalan solventi buharlaştırmak için ince film belirli bir süre (5-10 dk) düşük sıcaklıklarda (~100–200 °C) ısıtılmasına tabi tutulur. Bu işlem isteğe ve film kalınlığına bağlı olarak birkaç kez tekrar edilebilir. Elde edilen filmde kalan diğer organikleri buharlaştırmak için daha yüksek sıcaklıklarda (~300–600 °C) tavlansak ince film oluşturma işlemi tamamlanır [4].

#### **4.9.4. Püskürterek Kaplama Yöntemi (Spray Pyrolysis)**

Bu yöntemde solüsyon ısıtılmış tabakaya püskürtülerek sprey damlacıklarının tabakaya çarpması ile çözünen madde tabaka üzerinde yoğunlaşırken solvent buharlaşır. Bu şekilde bir süre sonra yüzeyde ince film oluşturma işlemi tamamlanır [4,22].

## 5. METERYAL VE METOT

Katkısız ve Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al foto diyotlar ile katkısız ve Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların üretimi için, katkısız ve Al katkılı CdO ince filmler ile katkısız ve Ni katkılı ZnO ince filmler kullanıldı. CdO ve ZnO ince filmler sol jel yöntemi kullanılarak elde edildi.

### 5.1. Deneysel İşlemler ve Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada [111] yönelimine sahip  $10^{-3}$ -40  $cm.\Omega$  öz dirençli ve fabrikasyon olarak parlatılmış p-tipi silisyum ince tabakası ile katkısız ve farklı oranlarda Al katkılı CdO, katkısız ve farklı oranlarda Ni katkılı ZnO kullanılarak sol jel yöntemi ile her bir numune için jeller hazırlandı. p-Si ince tabakaları oluşturulan jellerle kaplanmadan önce belirli sürelerde farklı kimyasal temizleme işlemlerine tabi tutularak temizlendi. p-Si temizleme işlemleri tamamlandıktan sonra, katkısız ve farklı miktarlarda Al katkılı CdO ile katkısız ve farklı miktarlarda Ni katkılı ZnO ile hazırlanan jeller kullanılarak foto diyotları hazırlama işlemlerine geçildi. Hazırlanan p-Si/CdO ve p-Si/ZnO foto diyotların opto elektronik karakterizasyonu için gerekli parametrelerin hesaplanabilmesi için diyotların akım-voltaj, kapasite-voltaj, fotoiletkenlik ölçümleri yapıldı.

#### 5.1.1. CdO ve ZnO Filmlerin Üretilmesi

Katkısız, %0,1 ve %1 Al katkılı CdO kullanılarak sol jel yöntemi ile elde edilen jellerin mikroskop camı üzerine döndürme yöntemi ile kaplama yapılarak CdO filmler elde edildi. Film oluşturulmadan önce mikroskop camları aşağıda belirtilen işlem sırasına göre kimyasal olarak temizlendi. Tüm kimyasal temizleme işlemleri belirli sürelerde ultrasonik banyo içerisinde gerçekleştirilirken, ultrasonik tankında saf su kullanıldı. Mikroskop camlarının temizleme işlemi;

a. Belirli ebatlarda kesilen mikroskop camları ayrı ayrı uygun beherlerin içerisine yerleştirildi. Her bir beherin içerisine yaklaşık 50 ml Metanol konularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

b. Beherlerdeki Metanol boşaltılarak beherlere yaklaşık 50 ml De-iyonize su doldurularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

c. Beherlerdeki De-iyonize su boşaltılarak beherlere yaklaşık 50 ml Aseton doldurularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

d. Beherlerdeki Aseton boşaltılarak beherlere yaklaşık 50 ml De-iyonize doldurularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

e. Ultrasonik karıştırıcıdaki kimyasal temizleme işlemleri tamamlandıktan sonra mikroskop camları Azot gazı ile kurutuldu.

Bu şekilde kimyasal temizleme işlemi tamamlandıktan sonra CdO filmlerin hazırlanmasına geçildi. Mikroskop camları her bir numune için ayrı ayrı spin coater üzerine yerleştirildi ve her numunenin jeli belirli oranda (yaklaşık 2-3 damla) mikroskop camının üzerine damlatılarak spin coater 1000 rpm’de 1 dakika süreyle çalıştırıldı. Bu süre tamamlandıktan sonra mikroskop camı 150 °C sıcaklıktaki sıcak tabla üzerine yerleştirilerek 10 dakika bekletildi. Aynı işlemler her numune için 5 kez tekrarlanarak CdO ince filmler oluşturuldu. Bütün numuneler için aynı işlemler tamamlandıktan sonra, numuneler 400 °C sıcaklıktaki fırının içerisinde 1 saat süreyle ısıtılarak katkısız, %0,1 ve %1 Al katkılı CdO filmlerin oluşturulması tamamlandı.

Katkısız, %0,1-%0,2-%0,5-%1 ve %2 Ni katkılı ZnO kullanılarak sol jel yöntemi ile elde edilen jellerin mikroskop camı üzerine döndürme yöntemi ile kaplama yapılarak ZnO filmler elde edildi. Filmler oluşturulmadan önce mikroskop camları kimyasal olarak temizlendi. Tüm kimyasal temizleme işlemleri belirli sürelerde ultrasonik banyo içerisinde gerçekleştirilirken, ultrasonik tankında saf su kullanıldı. Mikroskop camlarının temizleme işlemi;

a. Belirli ebatlarda kesilen mikroskop camları ayrı ayrı uygun beherlerin içerisine yerleştirildi. Her bir beherin içerisine yaklaşık 50 ml Metanol konularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

b. Beherlerdeki Metanol boşaltılarak beherlere yaklaşık 50 ml De-iyonize su doldurularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

c. Beherlerdeki De-iyonize su boşaltılarak beherlere yaklaşık 50 ml Aseton doldurularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

d. Beherlerdeki Aseton boşaltılarak beherlere yaklaşık 50 ml De-iyonize doldurularak ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı.

e. Ultrasonik karıştırıcıdaki kimyasal temizleme işlemleri tamamlandıktan sonra mikroskop camları Azot gazı ile kurutuldu.

Bu şekilde kimyasal temizleme işlemi tamamlandıktan sonra ZnO filmlerin hazırlanmasına geçildi. Her numune için hazırlanan mikroskop camları ayrı ayrı spin coater üzerine yerleştirilerek her numunenin jeli belirli oranda (yaklaşık 2-3 damla) mikroskop camının üzerine dökülerek spin coater 1000 rpm’de 1 dakika süreyle çalıştırıldı. Bu süre tamamlandıktan sonra mikroskop camı 150 °C sıcaklıktaki sıcak tablanın üzerine yerleştirilerek 10 dakika bekletildi. Mikroskop camı üzerine her bir numune için aynı işlemler 5 kez tekrarlanarak ZnO ince filmler oluşturuldu. Bütün numuneler için 5 kat kaplama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler 400 °C sıcaklıktaki fırında 1 saat süre ile ısıtılma işlemi tabi tutularak katkısız, %0,1-%0,2-%0,5-%1 ve %2 Ni katkılı ZnO ince filmlerin oluşturulması tamamlandı.

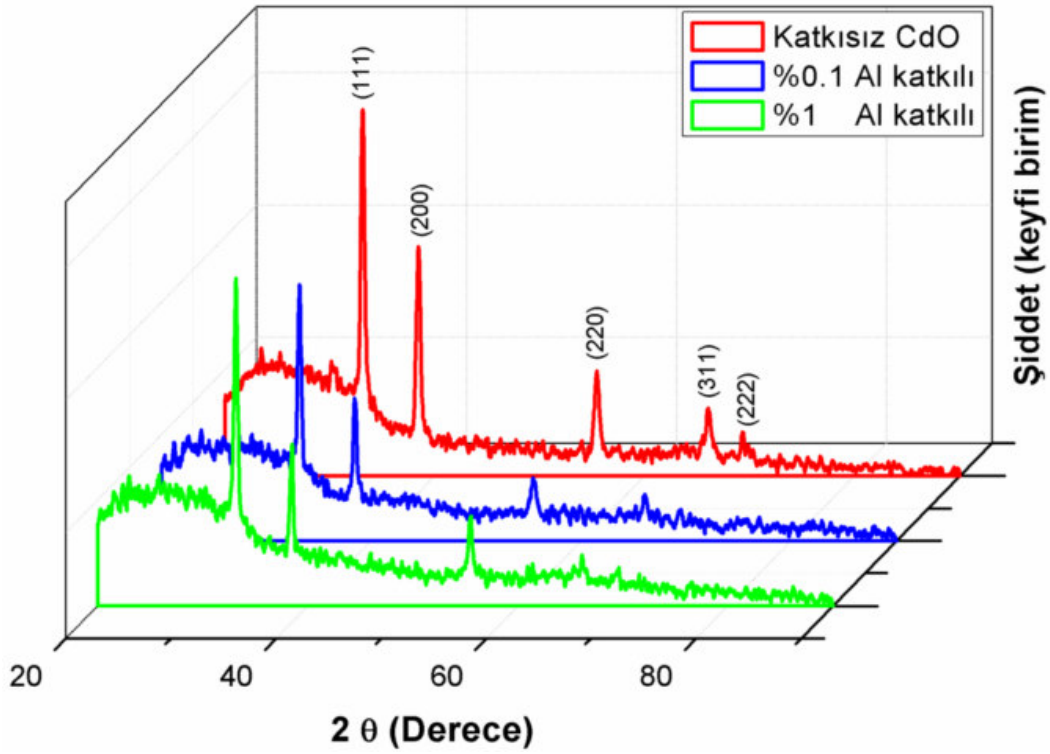
### 5.1.2. CdO ve ZnO Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu

Üretilen katkısız, Al katkılı CdO ve Ni katkılı ZnO ince film numunelerin X-ışını kırınım spektrumları Bruker marka D8 Advance model X-ışınları kırınım cihazında 1,5406 Å dalga boylu CuK $\alpha$  ışını kullanılarak  $20^{\circ} \leq 60^{\circ}$  sınır değerlerinde incelenmiştir.

Spektrum üzerindeki piklerin şiddetlerine ve yarı pik genişliklerine bakılarak malzemenin kristalleşmesi hakkında bilgi edinilmiştir. İyi bir kristalleşme seviyesine sahip malzemenin XRD spektrumu (X-ışını Kırınım Spektrumu), şiddeti minimum olan bir zemin üzerinde bulunan yüksek şiddetli ve yarı pik genişlikleri dar olan piklere sahiptir. Eğer yarı pik genişlikleri geniş ve pik şiddetleri düşük ise kristalleşme seviyesinin kötü olduğu söylenebilir. Spektrum üzerinde background şiddetinin yüksek olması düşük şiddete sahip pikleri görüntülenemeyecek hale getirir. Numunelerin kırınım spektrumları incelendiğinde pik şiddetleri ve genişlikleri arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Şiddetleri büyük ve genişlikleri dar olan piklerde kristalleşme iyi, şiddetleri küçük ve genişlikleri büyük olan piklerde kristalleşmenin iyi olmadığı anlamına gelmektedir. Bu çalışmada elde edilen numunelerin X-ışını kırınım spektrumları kullanılarak malzemelerin kristal yapıları belirlendi.

Şekil 5.1’de katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı CdO numunelerin X-ışını kırınım deseni görülmektedir. Kırınım deseninden CdO numunelerinin polikristal yapıda olduğu görülmüştür. Kristal yapıya ait pikler tespit edilmiştir. Tablo 5.1’de CdO ince film

numunelerinin kristal özelliklerine ait  $2\theta$  açıları, pik şiddetleri, kristal yapıları, düzlemlerin Miller İndisleri ve düzlemler arası mesafelerine ait değerler verilmiştir. Katkılı ve katkısız CdO numuneleri (111) tercihli yönelimine sahiptirler.

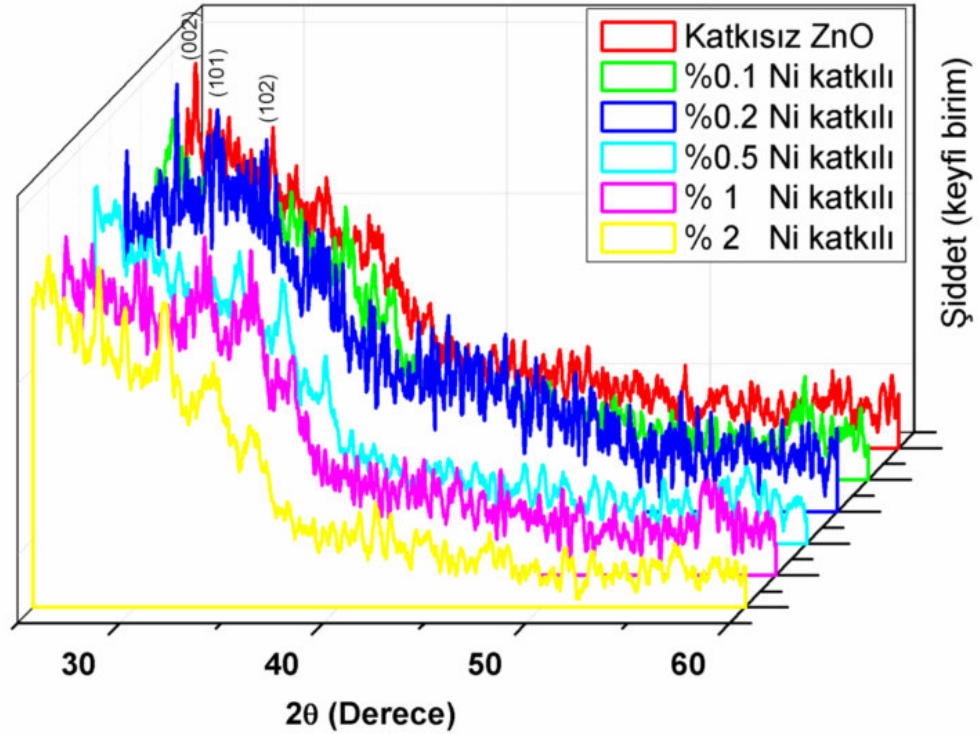


Şekil 5.1. Katkısız ve Al katkılı CdO numunelerin X - ışını kırınım deseni

Tablo 5.1. CdO numunelerin kristal yapı parametreleri

| $2\theta$ (°) | Pik Şiddeti | Kristal yapısı | h | k | l | d ( Å ) |
|---------------|-------------|----------------|---|---|---|---------|
| 32.995        | 28.4        | Kübik CdO      | 1 | 1 | 1 | 2.71258 |
| 38.292        | 17.7        | Kübik CdO      | 2 | 0 | 0 | 2.34862 |
| 55.26         | 8.3         | Kübik CdO      | 2 | 2 | 0 | 1.66099 |
| 65.921        | 5.64        | Kübik CdO      | 3 | 1 | 1 | 1.41583 |
| 69.293        | 5.23        | Kübik CdO      | 2 | 2 | 2 | 1.35495 |

Katkısız ve Al katkılı CdO film numunelerinin kristal boyutları Scherrer bağıntısı kullanılarak hesaplandı. Katkısız CdO numunenin boyutu 23.59 nm, %0.1 Al katkılı numunenin boyutu 27.83 nm ve %1 Al katkılı numunenin boyutu 25.09 nm olarak hesaplandı.



Şekil 5.2. Katkısız ve Ni katkılı ZnO numunelerin X - ışını kırınım desenleri

Şekil 5.2’de katkısız, %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 Ni katkılı ZnO numunelerin X-ışını kırınım deseni görülmektedir. Kırınım deseninden ZnO numunelerinin polikristal yapıda olduğu belirlenmiştir. Numunelerin kristal yapısı hekzagonaldır. Numuneler (002) tercihli yönelimine sahiptirler. ZnO ince film numunelerinin kristal özelliklerine ait 2θ açıları, pik şiddetleri, kristal yapıları, düzlemlerin Miller İndisleri ve düzlemler arası mesafelerine ait değerleri tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. ZnO numunelerinin kristal yapı parametreleri

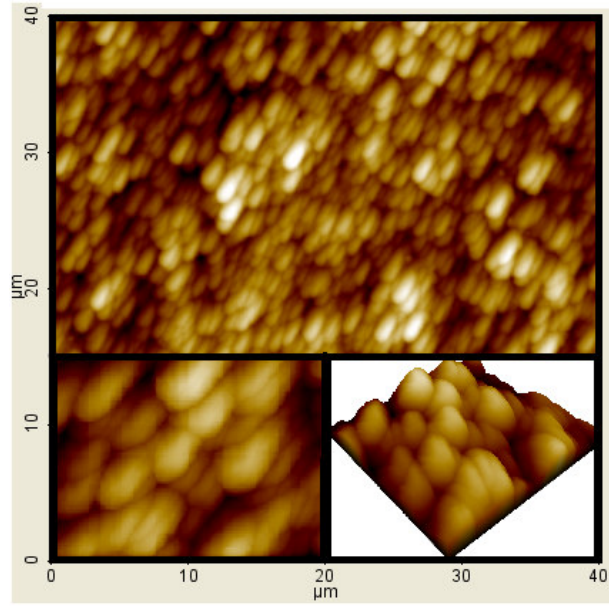
| 2θ (°) | Pik Şiddeti | Kristal yapısı | h | k | l | d ( Å ) |
|--------|-------------|----------------|---|---|---|---------|
| 34.436 | 33          | Hekzagonal ZnO | 0 | 0 | 2 | 2.81512 |
| 36.245 | 30          | Hekzagonal ZnO | 1 | 0 | 1 | 2.60229 |
| 47.534 | 11          | Hekzagonal ZnO | 1 | 0 | 2 | 2.47642 |

Katkısız ve Ni katkılı ZnO numunelerin kristal boyutları, katkısız ZnO numunenin boyutu 62.52 nm, %0.1 Ni katkılı numunenin boyutu 27.94 nm ve %0.2 Al katkılı



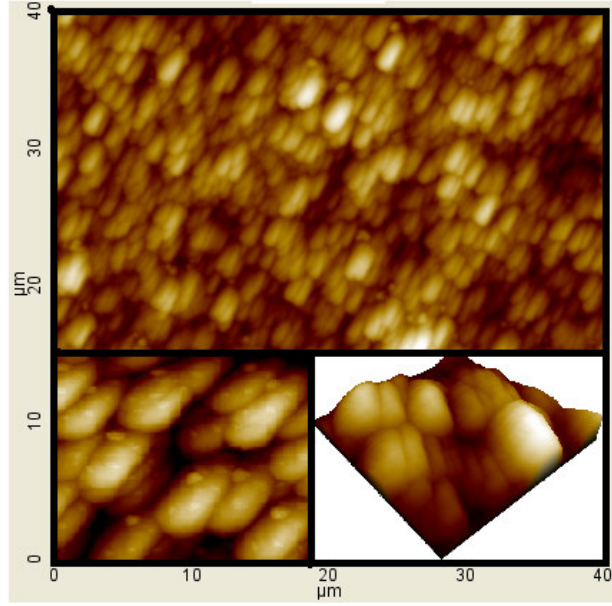
numunenin boyutu 33.94 nm, %0.5 Ni katkılı numunenin boyutu 50.23 nm ve %1 Ni katkılı numunenin boyutu 31.15 nm, %2 Ni katkılı numunenin boyutu 41.98 olarak hesaplandı.

Katkılı ve katkısız CdO ile ZnO ince filmlerin AFM görüntüleri PARK SYSTEM XE-100E AFM cihazı ile alındı.



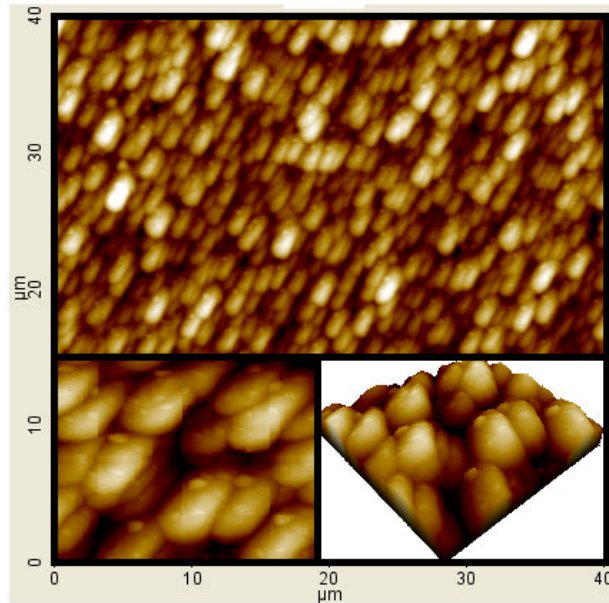
**Şekil 5.3.** Katkısız CdO filmin AFM görüntüsü

Şekil 5.3'te katkısız CdO filmin AFM görüntüsü verilmiştir. Şekilde çubuklu yapılar görülmektedir. Çubukların çapı 800-956 nm arasında, yüzey pürüzlülüğü ise 128.014 nm olarak ölçülmüştür.



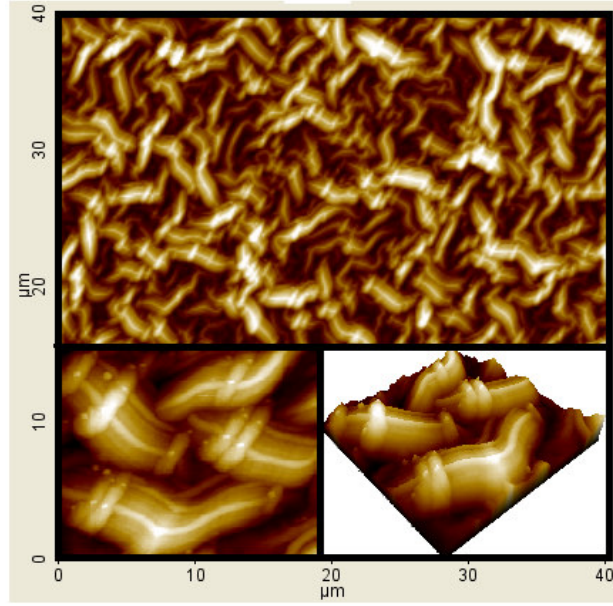
**Şekil 5.4.** %0.1 Al katkılı CdO filmin AFM görüntüsü

Şekil 5.4'te %0.1 Al katkılı CdO filmin AFM görüntüsü verilmiştir. Şekilde çubuklu yapılar görülmektedir. Çubukların çapı ve filmin yüzey pürüzlülüğü sırasıyla 850-1211 nm ve 128.572 nm olarak ölçülmüştür.



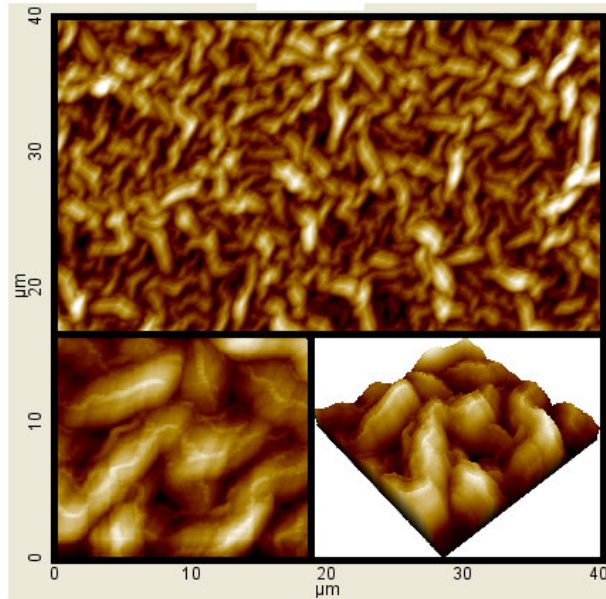
**Şekil 5.5.** %1 Al katkılı CdO filmin AFM görüntüsü

Şekil 5.5'te %1 Al katkılı CdO filmin AFM görüntüsü verilmiştir. Şekilde çubuklu yapılar görülmektedir. Çubukların çapı 1029-1263 nm arasında, yüzey pürüzlülüğü ise 118.121 nm olarak ölçülmüştür.



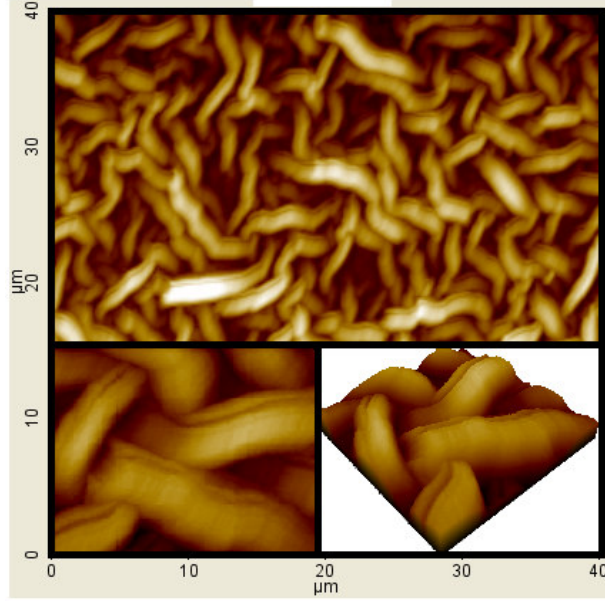
Şekil 5.6. Katkısız ZnO filmin AFM görüntüsü

Şekil 5.6'da katkısız ZnO filmin AFM görüntüsü verilmiştir. Şekilde fiberli yapılar görülmektedir. Fiberlerin çapı 195-404 nm, yüzey pürüzlülüğü 51.754 nm olarak ölçülmüştür.



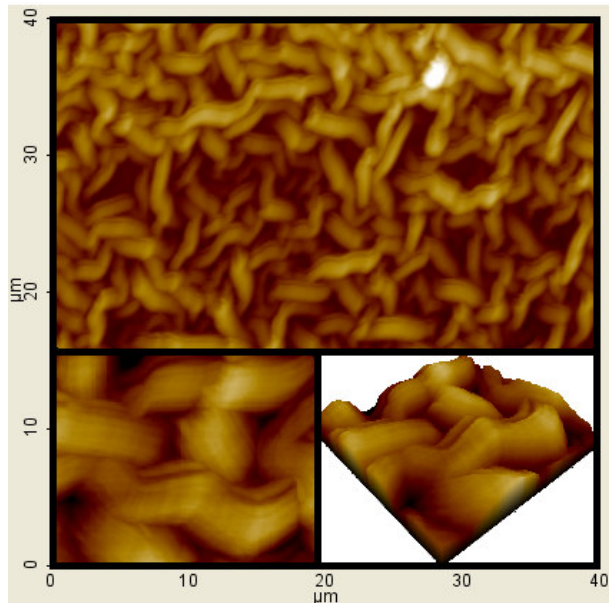
Şekil 5.7. %0.1 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü

Şekil 5.7’de %0.1 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü verilmiştir. Şekilde fiberli yapılar görülmektedir. Fiberlerin çapı 104-182 nm, yüzey pürüzlülüğü ise 55.358 nm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5.8.** %0.2 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü

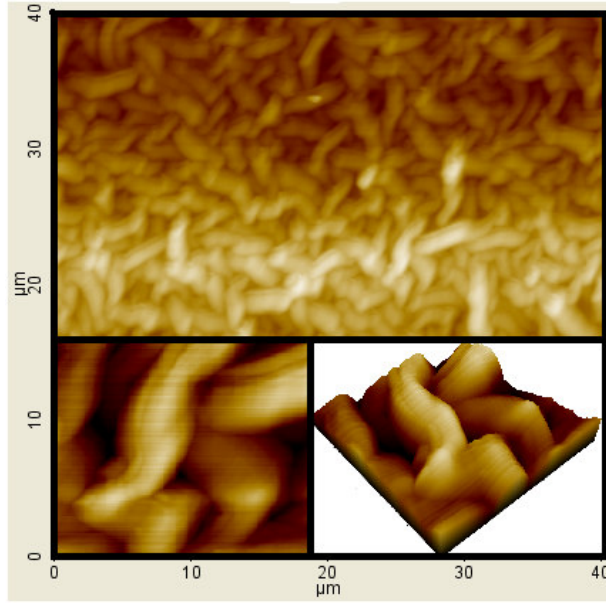
Şekil 5.8’de %0.2 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü verilmiştir. Şekilde fiberli yapılar görülmektedir. Fiberlerin çapı 352-508 nm ve yüzey pürüzlülüğü ise 66.618 nm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5.9.** %0.5 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü

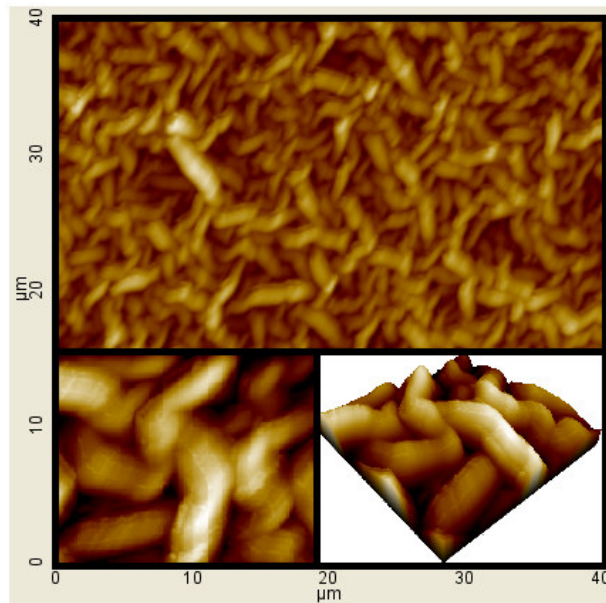


Şekil 5.9’da %0.5 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü verilmiştir. Şekilde fiberli yapılar görülmektedir. Fiberlerin çapı 169-221 nm ve yüzey pürüzlülüğü ise 75.411 nm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5.10.** %1 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü

Şekil 5.10’da %1 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü verilmiştir. Şekilde fiberli yapılar görülmektedir. Fiberlerin çapı 977-1719 nm ve yüzey pürüzlülüğü ise 135.893 nm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5.11.** %2 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü

Şekil 5.11’da %2 Ni katkılı ZnO filmin AFM görüntüsü verilmiştir. Şekilde fiberli yapılar görülmektedir. Fiberlerin çapı 938-1107 nm ve yüzey pürüzlülüğü ise 49.551 nm olarak ölçülmüştür.

**Tablo 5.3.** Katkılı ve katkısız CdO filmlerin AFM ölçüm sonuçları

| Katkı Oranı         | Parçacık çapı (nm) | Yüzey Pürüzlülüğü (nm) |
|---------------------|--------------------|------------------------|
| CdO katkısız        | 800 - 956          | 128.014                |
| %0.1 Al katkılı CdO | 850 - 1211         | 128.572                |
| % 1 Al katkılı CdO  | 1029 - 1263        | 118.121                |

**Tablo 5.4.** Katkılı ve katkısız ZnO filmlerin AFM ölçüm sonuçları

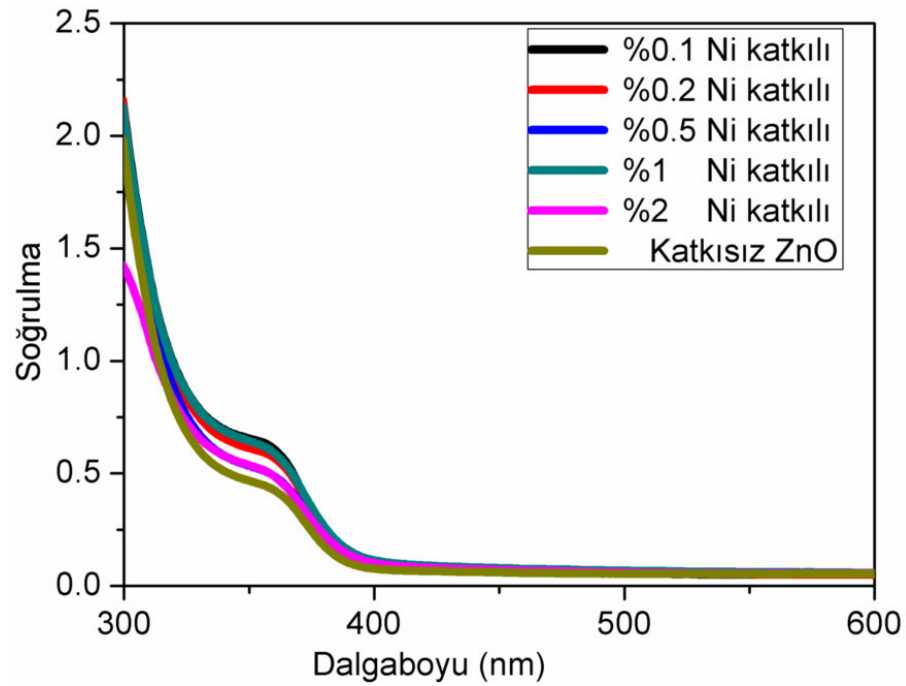
| Katkı Oranı         | Fiber çapı (nm) | Yüzey Pürüzlülüğü (nm) |
|---------------------|-----------------|------------------------|
| ZnO katkısız        | 195 - 404       | 51.754                 |
| %0.1 Ni katkılı ZnO | 104 - 182       | 55.358                 |
| %0.2 Ni katkılı ZnO | 352 - 508       | 66.618                 |
| %0.5 Ni katkılı ZnO | 169 - 221       | 75.411                 |
| % 1 Ni katkılı ZnO  | 977 - 1719      | 135.893                |
| % 2 Ni katkılı ZnO  | 938 - 1107      | 49.551                 |

### 5.1.3. ZnO ve CdO Filmlerinin Optik Sonuçları (UV)

Sol Jel yöntemi ile katkısız ve %0.1-%0.2-%0.5-%1 ve %2 Ni katkılı ZnO ince filmler hazırlandı. Hazırlanan ince film numunelerinin UV ölçümleri UV3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR Spectrophometer cihazı ile yapıldı. UV ölçümleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak ince filmlerin soğrulma, geçirgenlik, yansıma ve yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) grafikleri çizildi.

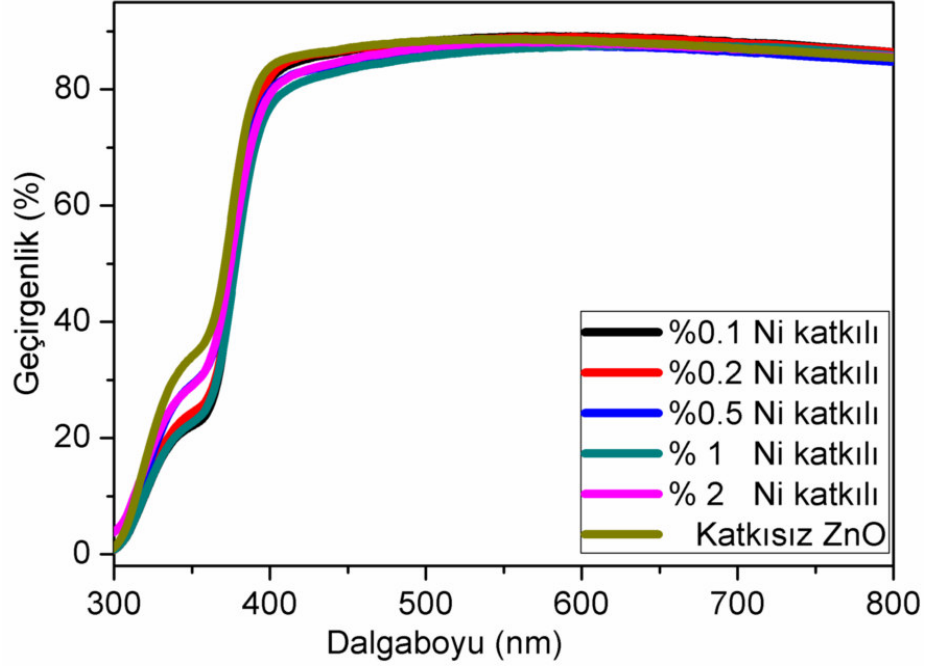


Şekil 5.12. UV Spektrofotometresi



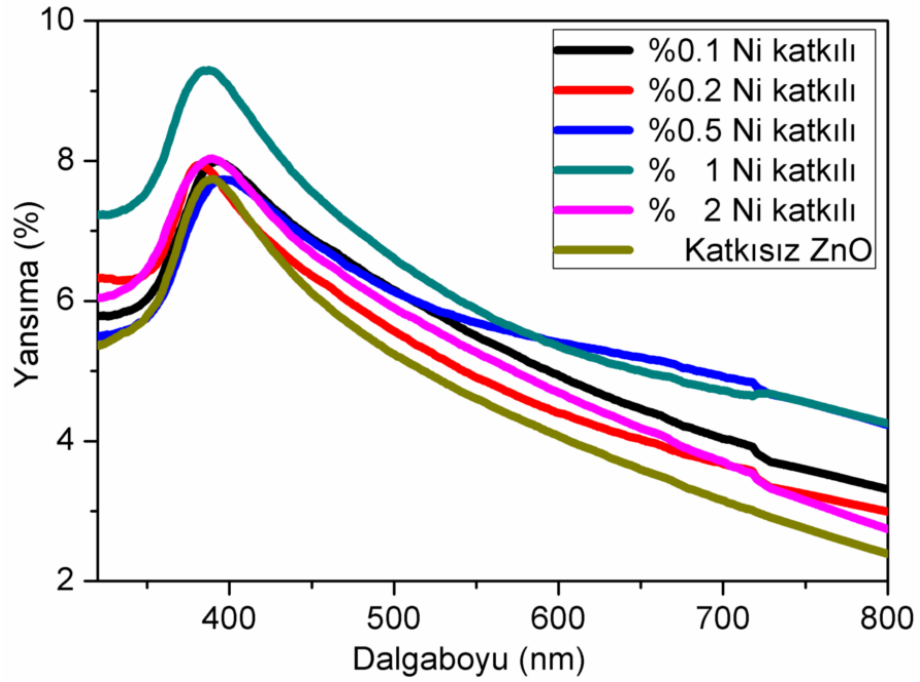
Şekil 5.13. Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerin soğrulma eğrileri

Şekil 5.13'tede görüldüğü gibi ZnO filmler 400 nm düşük dalgaboylarında bir absorpsiyon sınırı göstermektedirler. Absorpsiyon sınırı Ni katkılama ile değişmektedir.



Şekil 5.14. Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerin geçirgenlik eğrileri

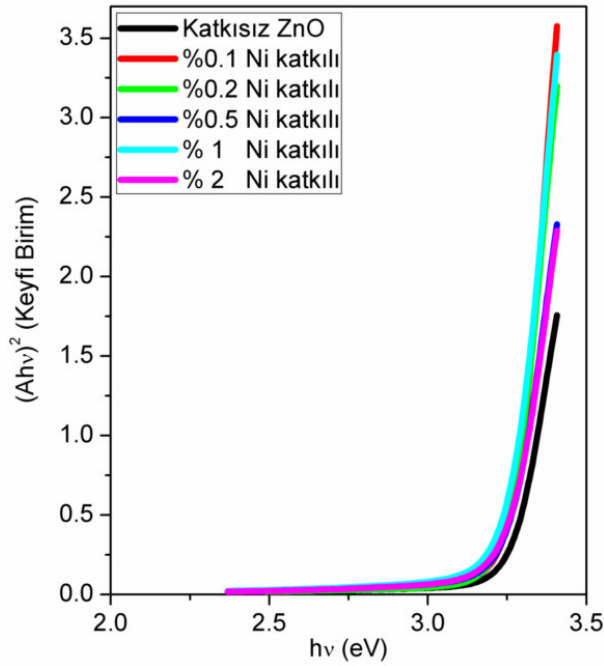
Şekil 5.14'te katkısız ve Ni katkılı ZnO filmler 400-600 nm dalgaboyu bölgesinde filmler oldukça transparenttirler ve transparent değeri % 80-85 arasında değişmektedirler.



Şekil 5.15. Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerin yansımaya eğrileri



Şekil 5.15'te katkısız ve Ni katkılı ZnO numunelerin yansıma spektrumları verilmiştir. Şekil de görüldüğü gibi yansıma Ni katkı miktarı ile değişmektedir. Numunelerin yansıma eğrileri 380-400 nm dalgaboyu aralığında bir pik göstermektedir. Pikin pozisyonu Ni katkılama ile değişmektedir. Bu da filmlerin yasak enerji aralıklarının Ni katkı ile değiştiğini doğrulamaktadır.



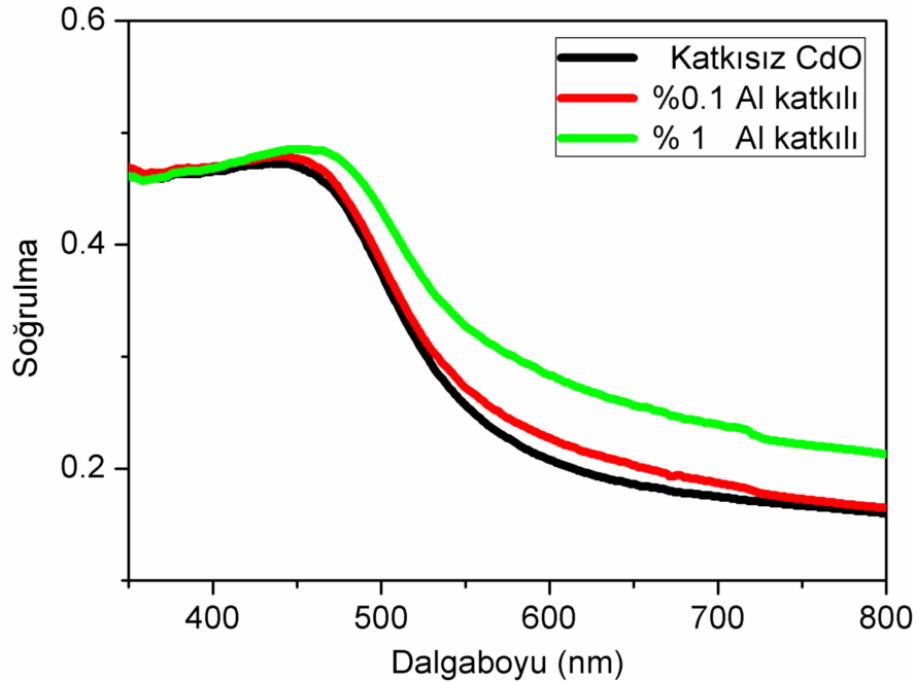
Şekil 5.16. Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerin  $(\alpha hv)^2 - hv$  eğrileri

Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerinin grafikleri  $(\alpha hv)^2 - hv$  (şekil 5.16) kesim noktalarından faydalanılarak yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) hesaplandı [62,64]. Yapılan literatür taramasında Yakuphanoglu F. ve arkadaşları, Suwanboon S. ve arkadaşları, Mekhnache M. ve arkadaşları, Xue-Yong Li ve arkadaşları, Farag A.A ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri  $E_g$  değerleri, katkısız ZnO için 3.25 eV ile 3.37 eV arasında değişirken, katkılı ZnO için  $E_g$  değerleri 3.23 eV ile 3.77 eV arasında değişmektedir [62-66]. Bu çalışmada katkısız ve Ni katkılı ZnO için elde edilen  $E_g$  değerleri literatürde verilen değerler ile uyumludur. Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerin  $E_g$  değerleri Tablo 5.5'te verilmiştir.

**Tablo 5.5.** Katkılı ve katkısız ZnO filmlerin yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) değerleri

| Katkı Oranı         | $E_g$ (eV) |
|---------------------|------------|
| ZnO katkısız        | 3.261      |
| %0.1 Ni katkılı ZnO | 3.272      |
| %0.2 Ni katkılı ZnO | 3.258      |
| %0.5 Ni katkılı ZnO | 3.255      |
| % 1 Ni katkılı ZnO  | 3.257      |
| % 2 Ni katkılı ZnO  | 3.249      |

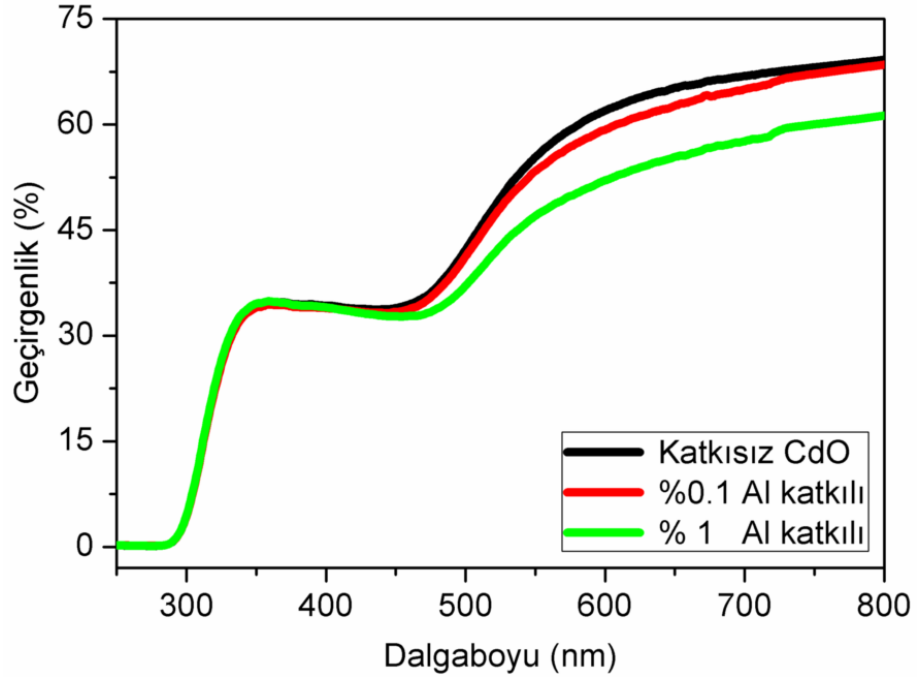
Sol Jel yöntemi kullanılarak Al/p-Si/CdO/Al diyotlar için hazırlanan katkısız, %0.1, ve %1 Al katkılı jeller kullanılarak CdO ince filmler hazırlandı. UV ölçümleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak CdO filmlerin soğrulma, geçirgenlik, yansıma ve yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) grafikleri çizildi.



**Şekil 5.17.** Katkısız ve Al katkılı CdO filmlerin soğrulma eğrileri

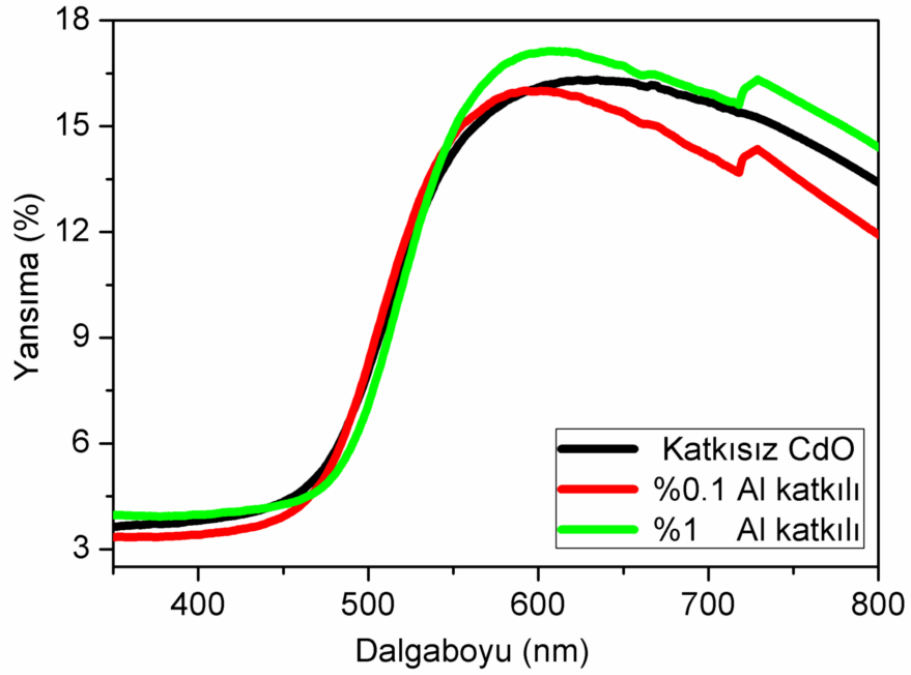
Şekil 5.17’de katkısız ve Al katkılı CdO filmlerin soğrulma grafikleri verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi CdO numuneleri 550 nm civarında bir soğrulma sınırı

göstermektedir. Soğrulma sınırı Al katkı ile değişmektedir. Buda CdO filmlerin yasak enerji aralıklarının Al katkısı ile değiştiğini göstermektedir.



**Şekil 5.18.** Katkısız ve Al katkılı CdO İnce filmlerin geçirgenlik eğrileri

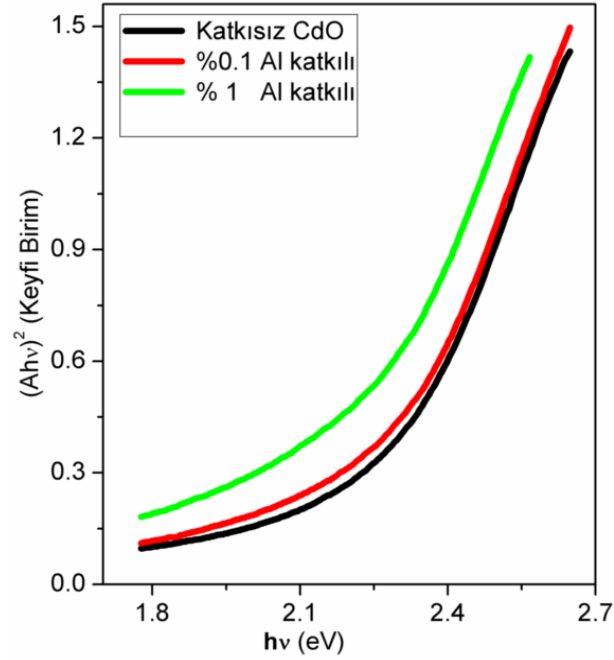
Katkılı ve katkısız CdO numunelerin geçirgenlik grafikleri şekil 5.18’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi numunelerin transparentliği Al katkı ile değişmektedir. Numunelerin transparentliği 500-800 nm dalgaboyu bölgesinde transparent değeri % 60-70 arasında değişmektedirler



**Şekil 5.19.** Katkısız ve Al katkılı CdO İnce filmlerin yansımaya eğrileri

Katkısız ve Al katkılı CdO filmlerin yansımaya spektrumları şekil 5.19 da görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi numunelerin yansımaya eğrileri Al katkı ile değişmektedir. Numunelerin yansımaları 550 nm civarında aniden düşmektedir.

Şekil 5.20’de verilen CdO filmlerin  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafiklerinin kesim noktalarından faydalanılarak yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) hesaplandı [62,64]. Yapılan literatür taramasında Yakuphanoglu F. ve arkadaşları, Köse S. ve arkadaşları, Dakhel A.A yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri  $E_g$  değerleri, katkısız CdO için 2.25 eV ile 3.28 eV arasında değişirken, katkılı CdO için ise 1.97 eV ile 3.39 eV arasında değişmektedir [57-61]. Bu çalışmada katkısız ve Al katkılı CdO için elde edilen  $E_g$  değerleri literatürde verilen değerler ile uyumludur. Katkısız ve Al katkılı CdO filmlerin  $E_g$  değerleri tablo 5.6’da verilmiştir. Tablo da görüldüğü gibi numune yasak enerji aralıkları Al katkı ile artmaktadır.



**Şekil 5.20.** Katkısız ve Al katkılı CdO filmlerin  $(ahv)^2 - hv$  eğrileri

**Tablo 5.6.** Katkılı ve katkısız CdO filmlerin yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) değerleri

| Katkı Oranı         | $E_g$ (eV) |
|---------------------|------------|
| CdO katkısız        | 2.15       |
| %0.1 Al katkılı CdO | 2.231      |
| % 1 Al katkılı CdO  | 2.245      |

## 5.2. Foto Diyotların Hazırlanması

### 5.2.1. Al/p-Si/CdO/Al Foto Diyotların Hazırlanması

Bu çalışmada foto diyotlar için [111] yönelimine sahip  $10^{-3}$ - $40 \text{ cm}.\Omega$  öz dirençli ve fabrikasyon olarak parlatılmış p-Si ince tabakası kullanıldı. p-Si tabakası Sigma-Aldrich firmasından satın alındı. p-Si tabakası üzerindeki organik ve diğer ağır metal kirliliklerini temizlemek, kristal yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için kimyasal temizleme işlemleri yapıldı. Kimyasal temizleme işlemleri;

- Temizleme işleminde kullanılacak beherler De-iyonize su ile ön temizliği yapıldıktan sonra  $250^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki fırında kurutuldu.

b. Bütün kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içerisinde RCA yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Ultrasonik tankında saf su kullanıldı.

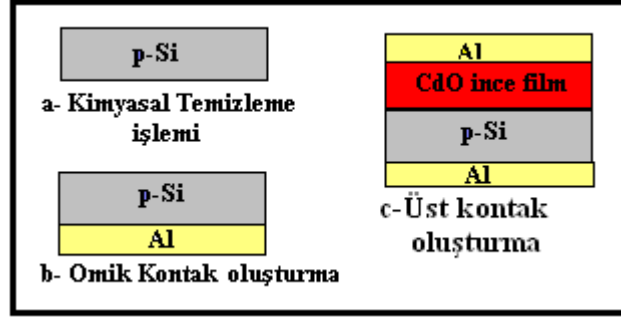
c. p-Si eşit miktarda alınan aseton (50 ml) içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandıktan sonra, 50 ml De-iyonize suda ultrasonik banyoda tekrar 5 dakika yıkandı.

d. p-Si eşit miktarda alınan etil alkol (50 ml) içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandıktan sonra, 50 ml De-iyonize suda ultrasonik banyoda tekrar 5 dakika yıkandı.

e. p-Si HF:H<sub>2</sub>O (1:10ml) çözücüsü içerisine 30 saniye daldırılıp bekletildikten sonra, 50 ml De-iyonize suda ultrasonik banyoda yeniden 5 dakika yıkandı. Bu işlemler tamamlandıktan sonra p-Si numuneleri azot gazı ile kurutuldu.

Kimyasal temizleme işleminden sonra, p-Si üzerine omik kontak oluşturmak için p-Si VAKSİS PVD-HANDY/2S-TE çift resistif ısıtma kaynaklı buharlaştırma sistemi ile  $3 \times 10^{-5}$  Torr basınç altında vakumlandı. Vakum bu basınca ulaştığında %99.999 saflıkta olan Al p-Si yüzeyine ince film şeklinde buharlaştırılarak kaplandı. Buharlaştırma yapılırken buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal yüzeyine yapışmasını önlemek için başlangıçta kesici kapak (metal perde) kapalı tutuldu ve püskürtme başladıktan kısa bir süre sonra kapak açılarak kaplama yapıldı. Buharlaştırma 2-4 Å/s hızında yapılarak p-Si'nin mat yüzeyine 100 nm kalınlığında omik kontak ince film şeklinde oluşturuldu. Bu işlemde her bir numune için p-Si'ler ayrı ayrı spin coater üzerine yerleştirilerek her bir numunenin jeli belirli oranda (yaklaşık 2-3 damla) p-Si üzerine dökülerek spin coater 1000 rpm de 30 saniye süreyle çalıştırıldı. Bu süre tamamlandıktan sonra p-Si'ler 150 °C sıcaklıktaki sıcak tablanın üzerine yerleştirilerek 5 dakika bekletildi. Bu şekilde 1 kat film kaplama yapıldıktan sonra numuneler 400 °C sıcaklıktaki fırına atılarak 1 saat ısıl işleme tabi tutuldular.

Omik kontak ve CdO jel ile ince film oluşturulduktan sonra, VAKSİS PVD-HANDY/2S-TE çift resistif ısıtma kaynaklı buharlaştırma sistemi ile üst kontak oluşturuldu. Vakum  $3.5 \times 10^{-5}$  Torr basınca ulaştığında %99.999 saflığa sahip Al p-Si parlak yüzeyi üzerine kaplanan CdO ince film tabakası üzerine 3-5 Å/s hızında ve 100 nm kalınlığında kontak oluşturularak Al/p-Si/CdO/Al diyotların üretimi tamamlandı. Al/p-Si/CdO/Al diyotların üretim aşamaları şekil 5.21'de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. Al/p-Si/CdO/Al diyotları hazırlama aşamaları

### 5.2.2. Al/p-Si/ZnO/Al Foto Diyotların Hazırlanması

Bu çalışmada oluşturulacak Al/p-Si/ZnO/Al diyotlar için [111] yönelimine sahip  $10^{-3}$ -40  $cm.\Omega$  öz dirençli ve fabrikasyon olarak parlatılmış p-Si ince tabakası kullanıldı. p-Si tabakası Sigma-Aldrich firmasından satın alındı. p-Si tabakası üzerindeki organik ve diğer ağır metal kirliliklerini temizlemek ve kristal yüzeydeki pürüzlülükleri ortadan kaldırmak için kimyasal temizleme işlemleri yapıldı. Kimyasal temizleme işlemleri,

a. Temizleme işleminde kullanılacak beherler De-iyonize su ile ön temizliği yapıldıktan sonra 250 °C sıcaklıktaki fırında kurutuldu.

b. Bütün kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içerisinde RCA yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Ultrasonik tankında saf su kullanıldı.

c. p-Si eşit miktarda alınan aseton (50 ml) içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandıktan sonra, 50 ml De-iyonize suda ultrasonik banyoda tekrar 5 dakika yıkandı.

d. p-Si eşit miktarda alınan etil alkol (50 ml) içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandıktan sonra, 50 ml De-iyonize suda ultrasonik banyoda yeniden 5 dakika yıkandı.

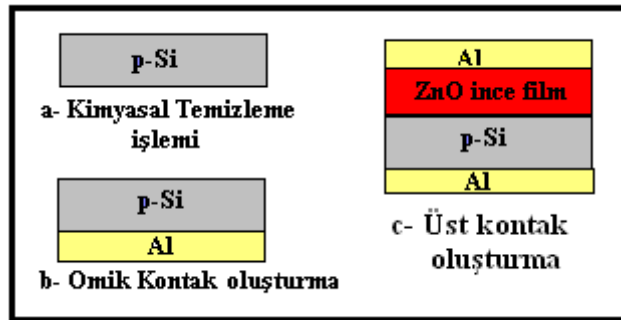
e. p-Si HF:H<sub>2</sub>O (1:10ml) çözücüsü içerisinde 30 saniye bekletildikten sonra, 50 ml De-iyonize suda ultrasonik banyoda tekrar 5 dakika yıkandı. Bu işlemlerden sonra p-Si numuneleri azot gazı ile kurutuldu.

Kimyasal temizleme işlemleri tamamlandıktan sonra, p-Si üzerine omik kontak oluşturmak için p-Si VAKSİS PVD-HANDY/2S-TE çift resistif ısıtma kaynaklı buharlaştırma sistemi  $3.5 \times 10^{-5}$  Torr basınç altında vakumlandı. Vakum bu basınca ulaştığında %99.999 saflıktaki Al p-Si yüzeyi üzerine ince film şeklinde kaplandı. Buharlaştırma yapılırken buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal yüzeyine yapışmasını önlemek için başlangıçta kesici kapak (metal perde) kapalı tutuldu ve

püskürtme başladıktan kısa bir süre sonra kapak açılarak kaplama işlemi tamamlandı. Buharlaştırma 3-5 Å/s hızında yapılarak p-Si'nin mat yüzeyine 100 nm kalınlığında omik kontak oluşturuldu. Bu işlem tamamlandıktan sonra Al/p-Si yapısı 570 °C sıcaklıkta 3 dakika ısıtılma işlemine tabi tutuldu.

Omik kontak ve ısıtılma işleminden sonra p-Si üzerine ZnO ince filmler oluşturuldu. Bu işlemde her bir numune için p-Si'ler ayrı ayrı spin coater üzerine yerleştirilerek her bir numunenin jeli belirli oranda (yaklaşık 1-2 damla) p-Si üzerine dökülerek spin coater 1000 rpm de 30 saniye süreyle çalıştırıldı. Bu süre tamamlandıktan sonra p-Si'ler 150 °C sıcaklıktaki sıcak tabla üzerine yerleştirilerek 5 dakika bekletildi. Bu şekilde 1 kat film kaplama yapıldıktan sonra numuneler 400 °C sıcaklıktaki fırına atılarak 1 saat ısıtılma işlemine tabi tutuldu.

Omik kontak ve ZnO ince film oluşturulduktan sonra, VAKSİS PVD-HANDY/2S-TE çift resistif ısıtma kaynaklı buharlaştırma sistemi ile üst kontak oluşturuldu. Vakum  $3.5 \times 10^{-5}$  Torr basınca ulaştığında %99.999 saflığa sahip Al metali p-Si parlak yüzeyi üzerine kaplanan ZnO ince film tabakası üzerine 2-4 Å/s hızında ve 100 nm kalınlığında kontak oluşturularak Al/p-Si/ZnO/Al diyotların üretimi tamamlandı. Al/p-Si/ZnO/Al diyotların üretim aşamaları şekil 5.22'de gösterilmiştir.



Şekil 5.22. Al/p-Si/ZnO/Al diyotları hazırlama aşamaları



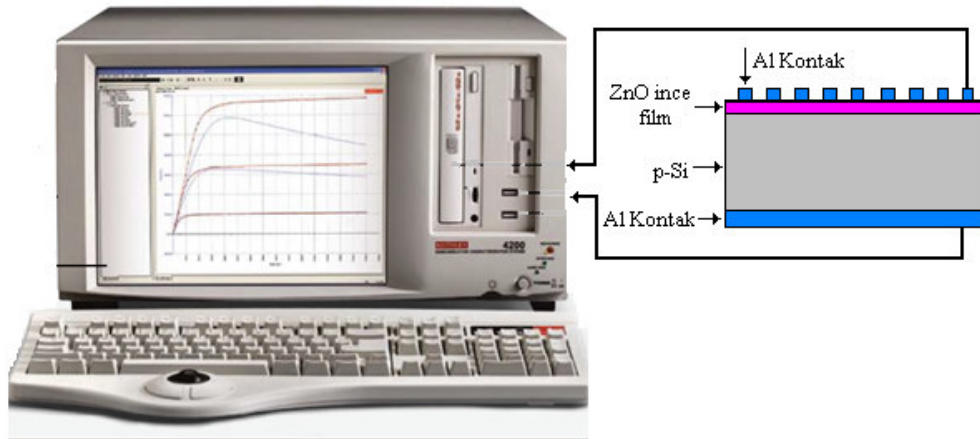


**Şekil 5.23.** VAKSIS PVD-HANDY/2S-TE çift resistif ısıtma kaynaklı buharlaştırma sistemi

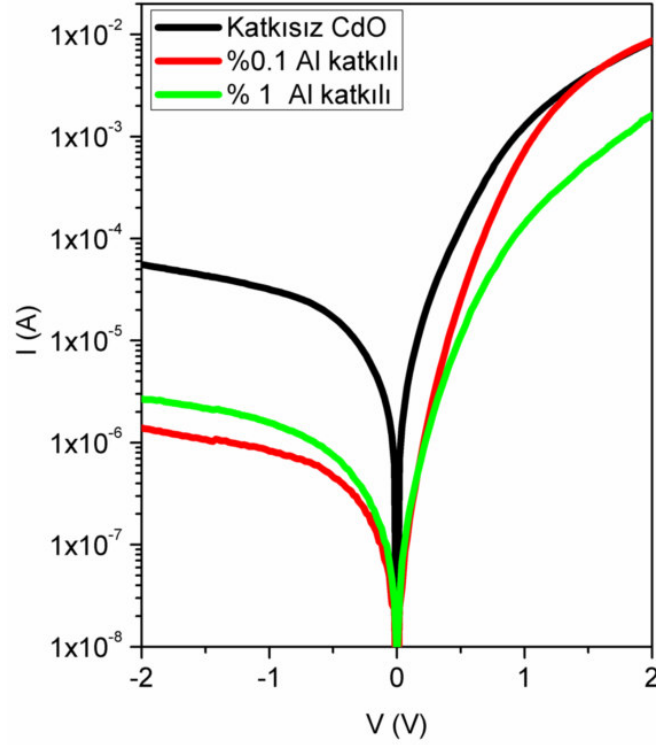
### 5.3. Al/p-Si/CdO/Al Foto Diyotların Ölçüm Sonuçları

#### 5.3.1. Al/p-Si/CdO/Al Foto diyotların Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Bu çalışmada hazırlanan Al/p-Si/CdO/Al diyotların elektriksel karakterizasyonu için, akım-voltaj (I-V) ölçümleri farklı aydınlanma şiddetleri altındaki farklı aydınlatmalarda yapıldı. Akım-voltaj karakteristiklerinin belirlenmesi için I-V ölçümleri KEITHLEY 4200 SCS akım-voltaj kaynağı ile alındı. Silisyum altlığı üzerine oluşturulan Al/p-Si/CdO/Al foto diyotlara  $\pm 2$  V voltaj uygulanarak elektriksel ölçümler yapıldı. I-V, C-V ve I-t ölçümleri için kullanılan deney düzeneği şekil 5.24'te verilmiştir.



**Şekil 5.24.** Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al diyotların I-V ve C-V ölçümleri için kullanılan deney düzeneği



Şekil 5.25. Katkısız ve %0.1- %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların I-V eğrileri

Katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı CdO filmlerle hazırlanan diyotların I-V eğrileri şekil 5.25'te verilmiştir. Düşük voltajlarda, diyotların akımı voltaj ile üssel olarak arttığından dolayı diyotların I-V karakteristikleri termiyonik emisyon teorisi ile analiz edilebilir. Termiyonik emisyon teorisi;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{q(V-IR_s)}{kT}\right)\right] \quad (5.1)$$

ile ifade edilir. Burada V uygulanan voltaj, q elektron yükü, n idealite faktörü,  $k_B$  Boltzman sabiti, T sıcaklık,  $R_s$  seri direnç,  $I_0$  ters besleme doyma akımıdır [73-79].

Al/p-Si/CdO/Al diyotların akım-voltaj grafiklerinden ters besleme doyma akımı, idealite faktörü, engel yüksekliği gibi diyot parametreleri hesaplandı. Al/p-Si/CdO/Al diyotlar için idealite faktörü değerleri, her bir diyotun karanlık durumundaki  $\ln I$ -V grafiğinin lineer kısmının eğiminden ve kesim noktasından hesaplandı. Hesaplanan idealite faktörü değerleri ve engel yüksekliği değerleri Tablo 5.7'de verilmiştir. Al/p-Si/CdO/Al diyotların idealite faktörlerinin 1'den büyük olduğu görüldü. Bu durum, ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten kaynaklanmaktadır. Yapılan hesaplamalarda %0.1 Al katkılı

Al/p-Si/CdO/Al diyotun idealite faktörü değeri diğer diyotlarınkinden daha küçüktür. p-Si/CdO diyotların herhangi bir voltaj değerindeki doğrultma oranı ise,

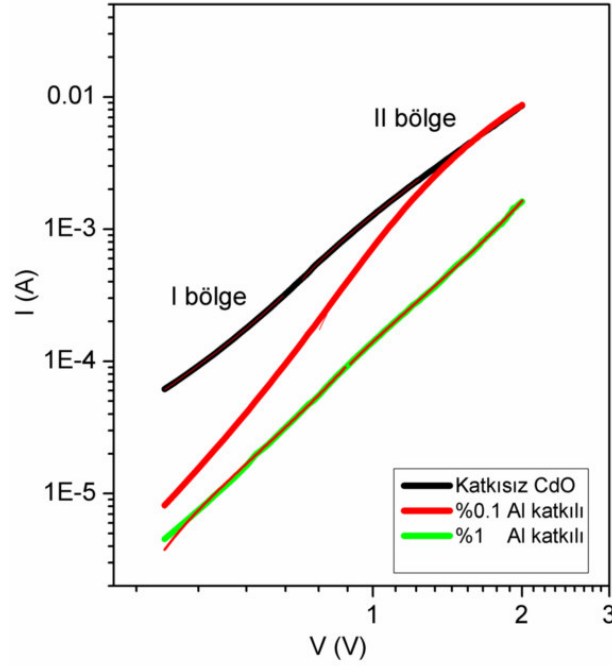
$$RR = \frac{I_F}{I_R} \quad (5.2)$$

ile ifade edilir. Burada RR doğrultma oranı,  $I_F$  doğru besleme akımı,  $I_R$  ters besleme akımıdır. Katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı CdO/p-Si diyotların  $\pm 2$  V'ta hesaplanan doğrultma oranı değerleri tablo 5.7'de verilmiştir.

**Tablo 5.7.** Al/p-Si/CdO/Al diyotlar için elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve doğrultma oranı değerleri

| Foto Diyot     | Katkı oranı     | n    | $\phi_b$ (eV) | RR                 |
|----------------|-----------------|------|---------------|--------------------|
| Al/p-Si/CdO/Al | CdO katkısız    | 4.27 | 0.623         | $1.55 \times 10^2$ |
| Al/p-Si/CdO/Al | %0.1 Al katkılı | 3.21 | 0.714         | $6.2 \times 10^3$  |
| Al/p-Si/CdO/Al | %1 Al katkılı   | 3.55 | 0.708         | $5.99 \times 10^2$ |

CdO/p-Si diyotların, yüksek elektrik alanların diyotların I-V karanlıktaki etkisini incelemek için akım ve voltaj karakteristikleri  $I - \alpha V^m$  bağıntısı ile analiz edildi. Bunun için  $\ln I - \ln V$  formunda çizilen grafikler şekil 5.26'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi grafik eğrileri iki farklı bölgeden oluşmaktadır. I. ve II. bölgede katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı CdO/p-Si diyotların bulunan m değerleri Tablo 5.8'de verilmiştir. CdO/p-Si diyotların I bölge için bulunan m değerleri 2.379 ile 3.359 arasında değişirken II. bölge için bulunan m değerleri ise 2.687 ile 3.772 arasında değişmektedir. Bu da, yüksek elektrik alanların katkısız CdO/p-Si diyotun I-V karakteristiğine daha fazla katkı yaptığını gösterir. II. bölge için elde edilen m değerleri %1 Al katkılı diyot için  $m > 3$  olduğundan dolayı tuzaklama seviyelerinin dağılımı exponansiyel bir dağılım ile karakterize edildiği bir SCLC mekanizması olur [70-79].



Şekil 5.26. Katkısız, %0.1, %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun log I-V grafiği

Tablo 5.8. Al/p-Si/CdO/Al diyotların I. ve II. bölge için m değerleri

| Foto Diyot     | Katkı oranı     | I. bölge | II. bölge |
|----------------|-----------------|----------|-----------|
| Al/p-Si/CdO/Al | CdO katkısız    | 2.38     | 2.69      |
| Al/p-Si/CdO/Al | %0.1 Al katkılı | 3.36     | 2.83      |
| Al/p-Si/CdO/Al | %1 Al katkılı   | 2.63     | 3.77      |

### 5.3.2. Al/p-Si/CdO/Al Foto diyotların Kapasite-İletkenlik Voltaj Karakteristikleri

Şekil 5.31’de CdO/p-Si diyotların C-V grafikleri verilmiştir. Diyotların pozitif voltaj bölgesinde kapasiteleri değişmezken, negatif voltaj bölgesinde kapasiteleri değişmektedir. Diyotların C-V grafiği, ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir. Bundan dolayı C-V ve G-V eğrileri,

$$C_{adj} = \frac{(G_m^2 + (wC_m)^2)C_m}{a^2 + (wC_m)^2} \quad (5.3)$$

ve

$$G_{adj} = \frac{(G_m^2 + (wC_m)^2)a}{a^2 + (wC_m)^2} \quad (5.4)$$

ifadeleri ile yeniden hesaplandı. İfadelerde  $G_m$  ve  $C_m$  ölçülen iletkenlik ve kapasite değerleri,  $\omega$  açısal frekans,  $a$  ise  $G_m$ ,  $C_m$  ve  $R_s$  'ye bağlı bir parametredir [63,73]. Elde edilen  $C_{adj}$ -V grafikleri şekil 5.33'te verildi.  $C_{adj}$  grafiklerde oluşan pik değerleri diyotların ara yüzey durum yoğunluğunun olduğunu göstermektedir.

Heteroeklem diyotlar için C-V karakteristikleri için,

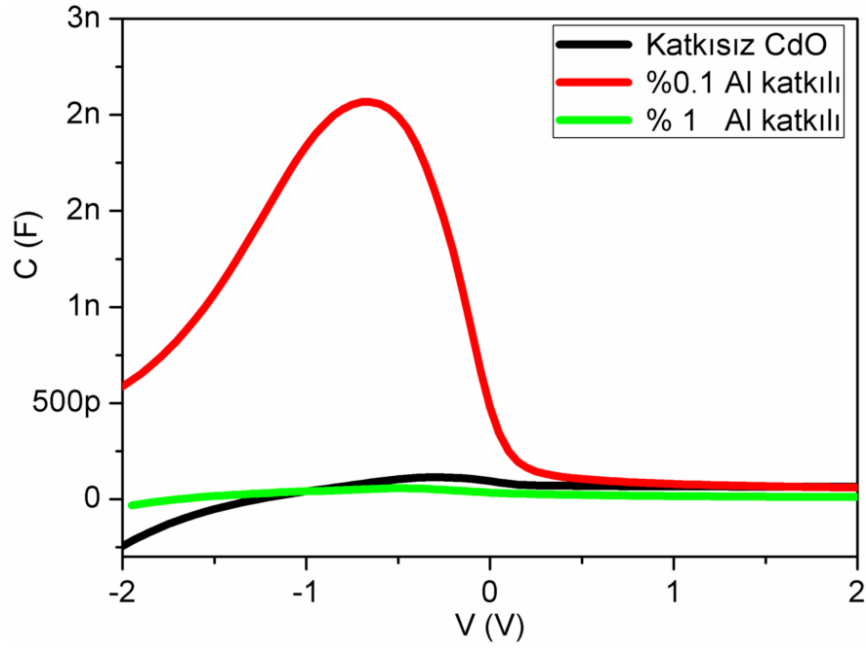
$$C^2 = \frac{qN_dN_a\epsilon_1\epsilon_2}{2(\epsilon_1N_d + \epsilon_2\epsilon_2N_a)(V_{bi} - V)} \quad (5.5)$$

ifadesi kullanıldı. Burada  $N_d$  ve  $N_a$  sırasıyla ZnO'tin donör ve akseptör taşıyıcı konsantrasyonları,  $\epsilon_1$  ve  $\epsilon_2$  sırasıyla ZnO ve p-Si'nin dielektrik sabitidir [73].  $V \gg kT/q$  ters besleme voltajı için ve  $N_a \gg N_d$  olduğundan C-V ifadesi,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} + V)}{A^2\epsilon_s q N_d} \quad (5.6)$$

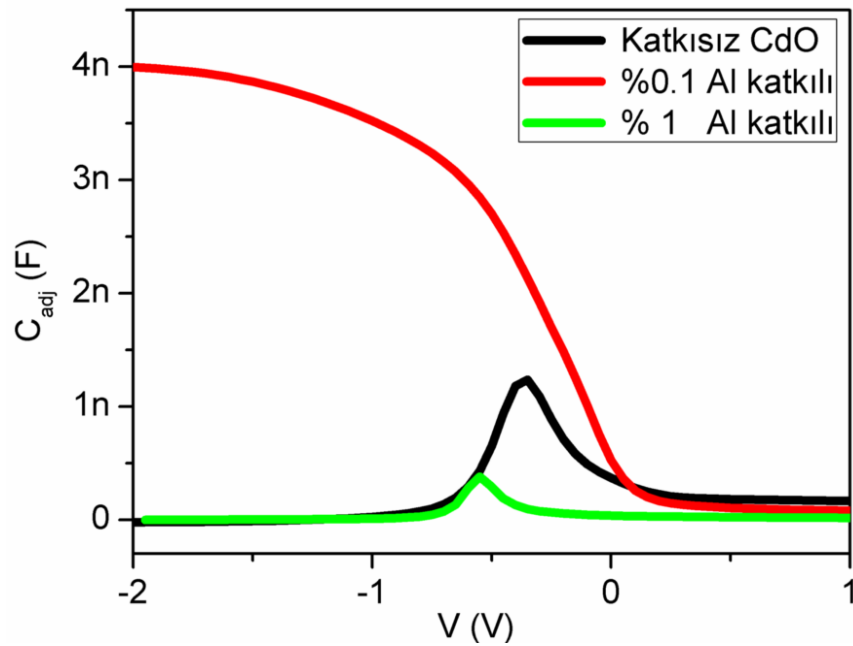
şeklinde yazılır. İfadede  $V_{bi}$  difüzyon potansiyeli,  $A$  diyotun kontak alanı ve  $\epsilon$  dielektrik sabitidir [73].

Şekil 5.27'de katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 1 MHz de çizilen C-V grafiğinde, diyotların kapasitesi pozitif voltaj bölgesinde değişmezken negatif voltaj bölgesinde değişmektedir. 1MHz de çizilen C-V grafiği ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir. Bu durumu düzeltmek için denklem 5.3 kullanılarak  $C_{adj}$  grafikleri çizildi.



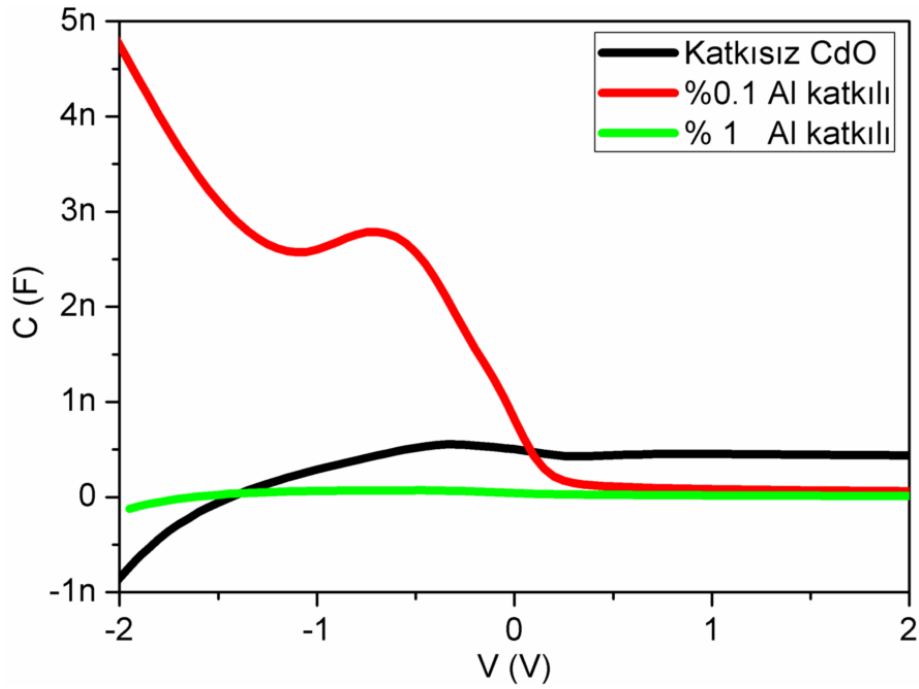
Şekil 5.27. CdO katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 1 MHz C-V eğrileri

Şekil 5.28’de katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 1 MHz de çizilen  $C_{adj}$  grafiğinin, negatif bölgede oluşan pik değerleri diyotların arayüzey durumların varlığını göstermektedir. Burada en yüksek pik değeri %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotta oluşmuştur.



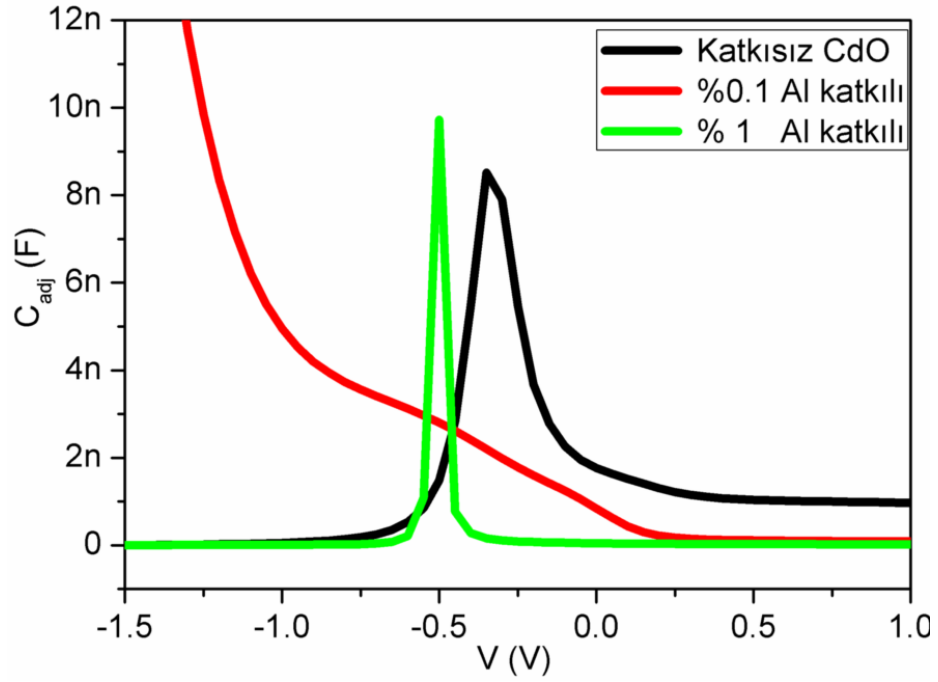
Şekil 5.28. Katkısız , %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 1 MHz  $C_{adj}$  eğrileri

Şekil 5.29’da katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 100 kHz de çizilen C-V grafiğinde, diyotların kapasitesi pozitif voltaj bölgesinde değişmezken negatif voltaj bölgesinde değişmektedir. 100 kHz de çizilen C-V grafiği, arayüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir. Bu durumu düzeltmek için denklem 5.3 kullanılarak  $C_{adj}$  grafikleri çizildi. 100 kHz’deki kapasite değişimi en fazla %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotta oluşmuştur.



Şekil 5.29. CdO katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 100 kHz C-V eğrileri

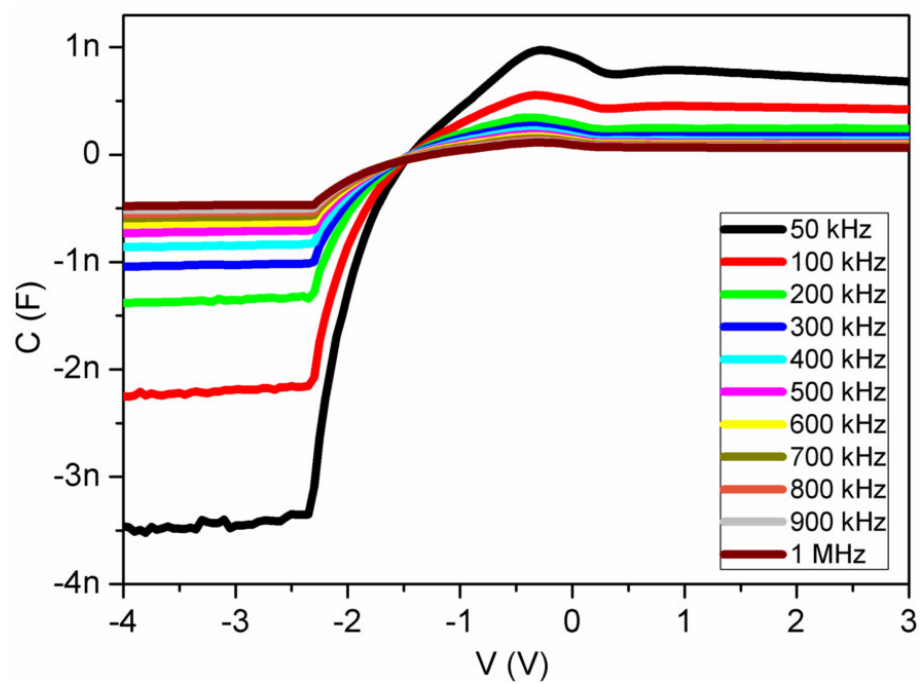
Şekil 5.30’da katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 100 kHz de çizilen  $C_{adj}$  grafiğinin, negatif bölgede oluşan pik değerleri diyotların arayüzey durumlarını göstermektedir. Burada en yüksek pik değeri %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot için gözlenmiştir.



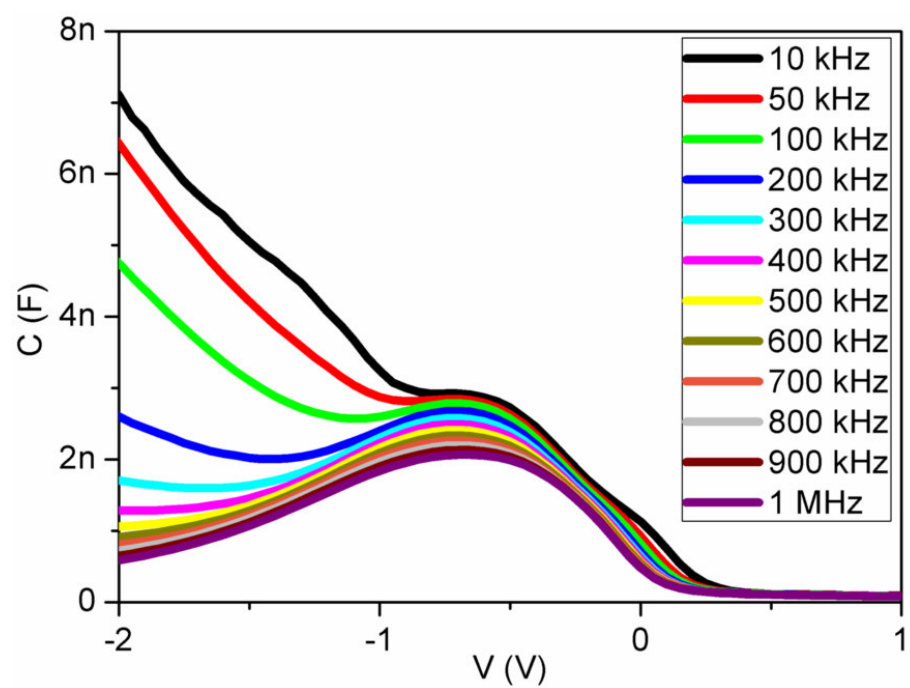
**Şekil 5.30.** Katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 100 kHz  $C_{adj}$  eğrileri

Şekil 5.31’de p-Si/CdO diyotların farklı frekanslarda çizilen C-V grafikleri verilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü gibi diyotların kapasitesi negatif voltaj ile değişirken pozitif voltaj ile değişmemektedir. Bu durum, uygulanan voltajla tükenim tabakasının genişliğinin değiştiğini göstermektedir. C-V eğrileri bir pik gösterip pikin konumu frekans ile değişmekte ve pikin genişliği frekansın azalması ile artmaktadır. C-V grafiklerindeki pikin varlığı seri direncin etkisi ve arayüzey durumların moleküler yapılanması ve diziliminden kaynaklanabilir. Çünkü arayüzey durumları alternatif akım sinyallerini izler. Frekans ile C-V eğrilerindeki pikin genişliği arayüzeydeki tuzak yüklerin sayısı ile ilgilidir.

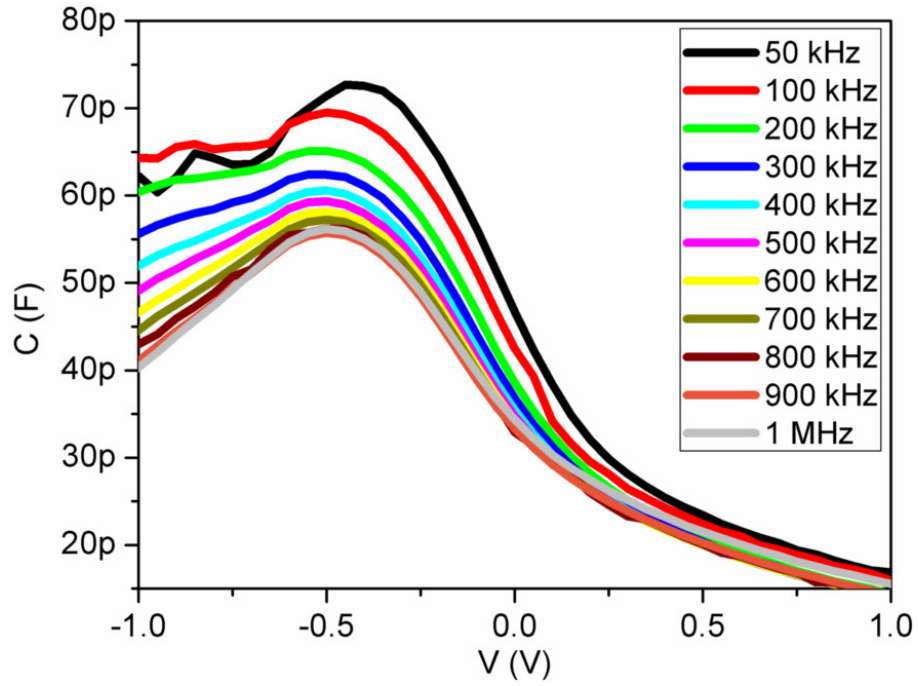




**a**



**b**



c

**Şekil 5.31.** a. Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyot b. %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot c. %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların farklı frekanslardaki C-V eğrileri

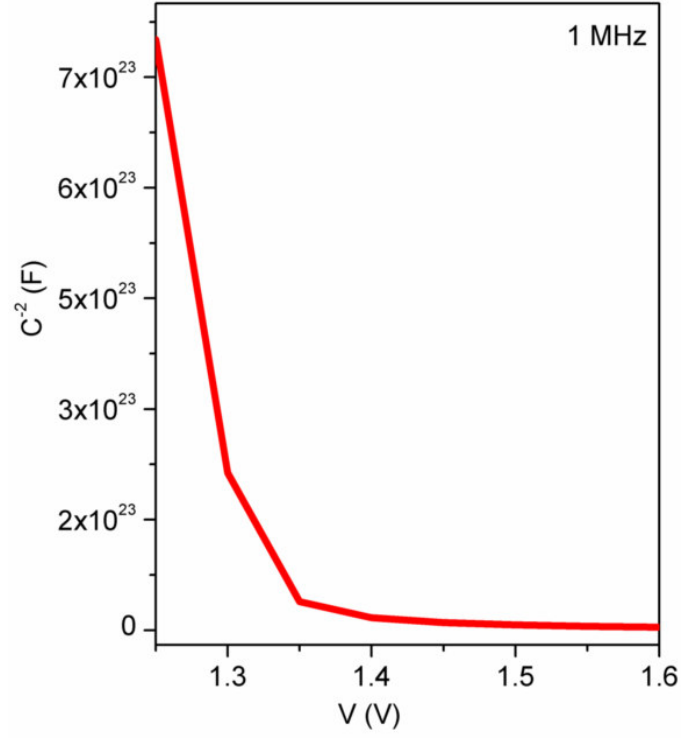
Al/p-Si/CdO/Al diyotların C-V verilerine göre hesaplanan elektronik parametreleri tablo 5.9'da verilmiştir.

**Tablo 5.9.** Al/p-Si/CdO/Al diyotların elektronik parametreleri

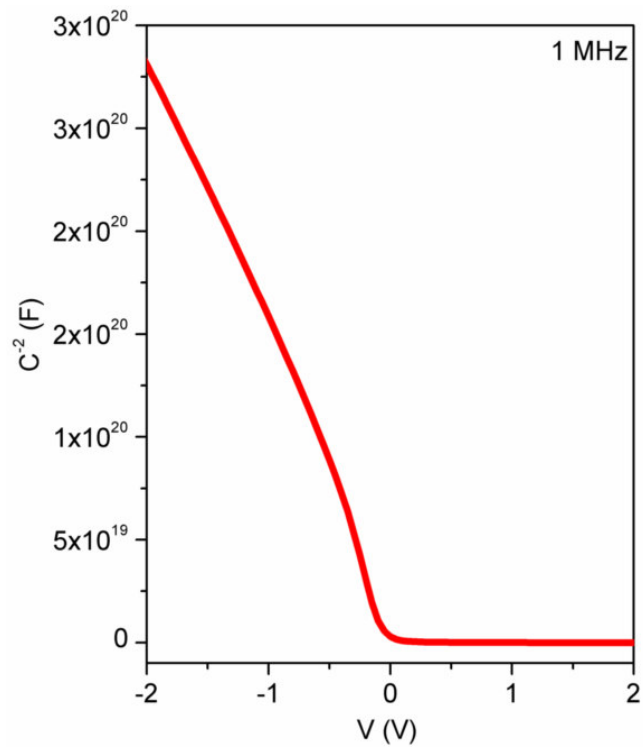
| Foto Diyot     | Katkı oranı     | $V_{bi}$ (V) | $N_d$ (cm <sup>-3</sup> ) | $\phi_b$ (eV) |
|----------------|-----------------|--------------|---------------------------|---------------|
| Al/p-Si/CdO/Al | CdO katkısız    | 1.318        | $6.48 \times 10^{19}$     | 0.490         |
| Al/p-Si/CdO/Al | %0.1 Al katkılı | 0.305        | $6.48 \times 10^{19}$     | 0.428         |
| Al/p-Si/CdO/Al | %1 Al katkılı   | 1.75         | $9.46 \times 10^{20}$     | 0.658         |

Diyotların elektriksel parametrelerini hesaplamak için Al/p-Si/CdO/Al diyotların 1MHz altındaki  $C^{-2}$ -V eğrileri şekil 5.32'da verilmiştir. Taşıyıcı konsantrasyonu ( $N_d$ ) ve difüzyon potansiyel ( $V_{bi}$ ) değerleri  $C^{-2}$ -V grafiklerinden hesaplandı [73]. p-Si'daki taşıyıcı konsantrasyonu CdO'inkinden büyük olduğundan dolayı ölçülen kapasitans CdO'in

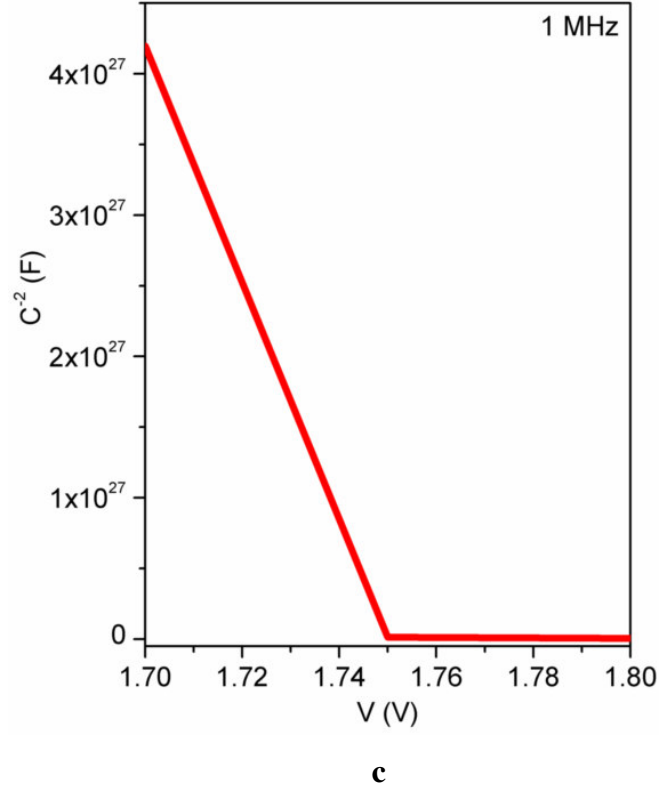
tükenim bölgesinin kapasitansı olur. Bundan dolayı CdO için taşıyıcı konsantrasyon ve difüzyon potansiyel değerleri denklem 5.6 ile hesaplandı.



**a**

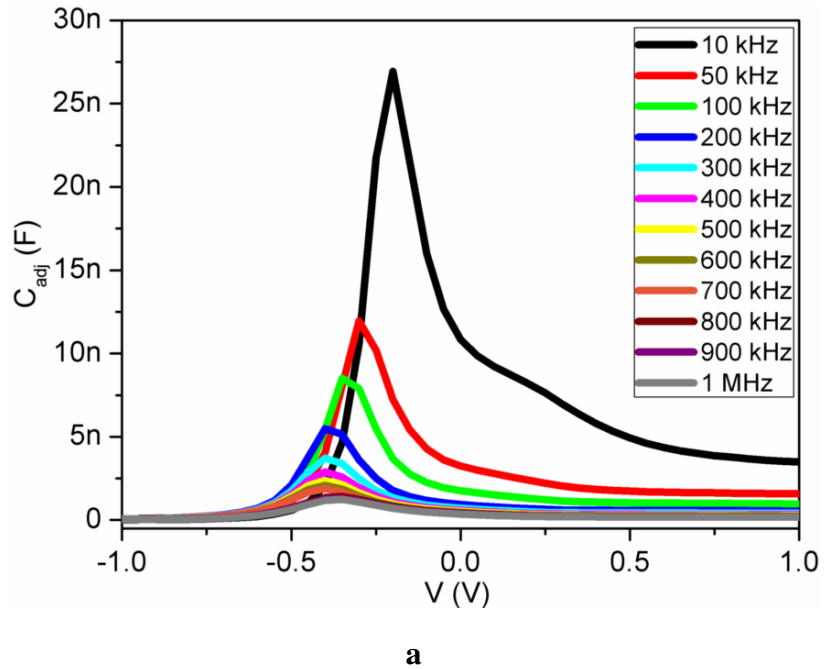


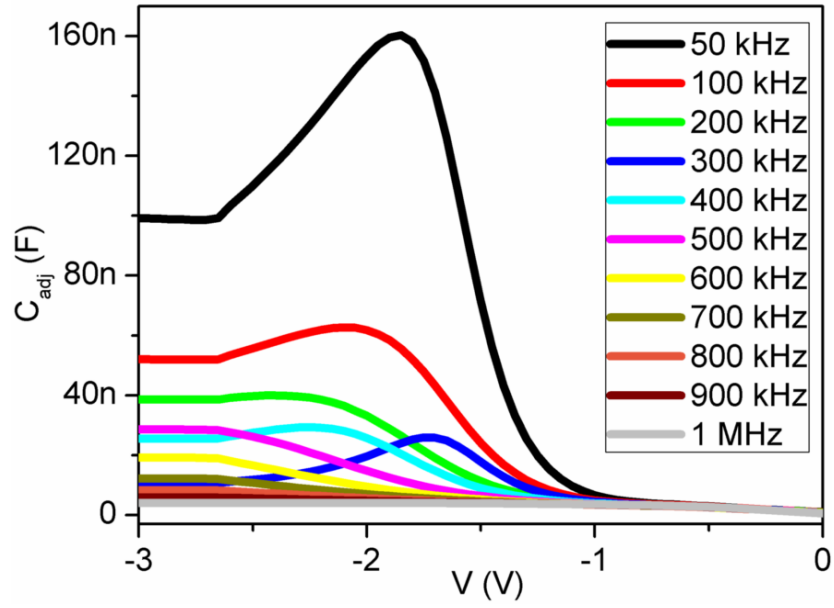
**b**



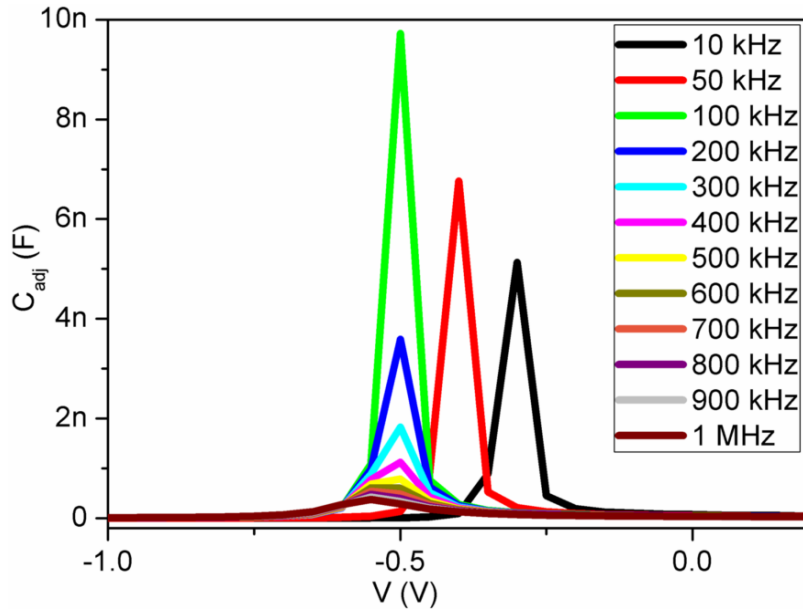
**Şekil 5.32. a.** Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyot **b.** %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot **c.** %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 1 MHz altındaki  $C^2$ -V grafikleri

Şekil 5.33'te katkısız ve Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların farklı frekanslar da çizilen  $C_{adj}$  grafikleri verilmiştir. Grafiklerdeki pik değeri arayüzey durumların varlığını göstermektedir. Eğrilerin pik değeri frekansın artışı ile azalmaktadır.





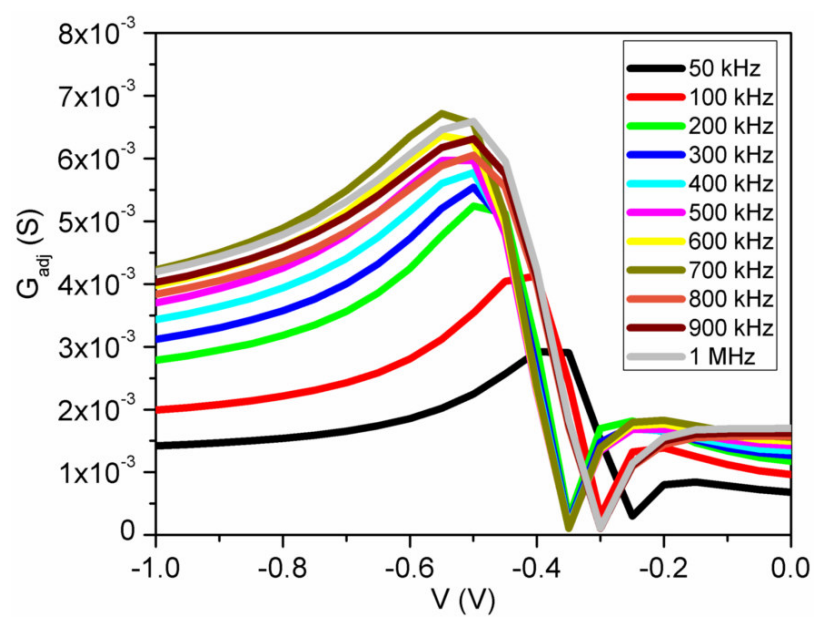
**b**



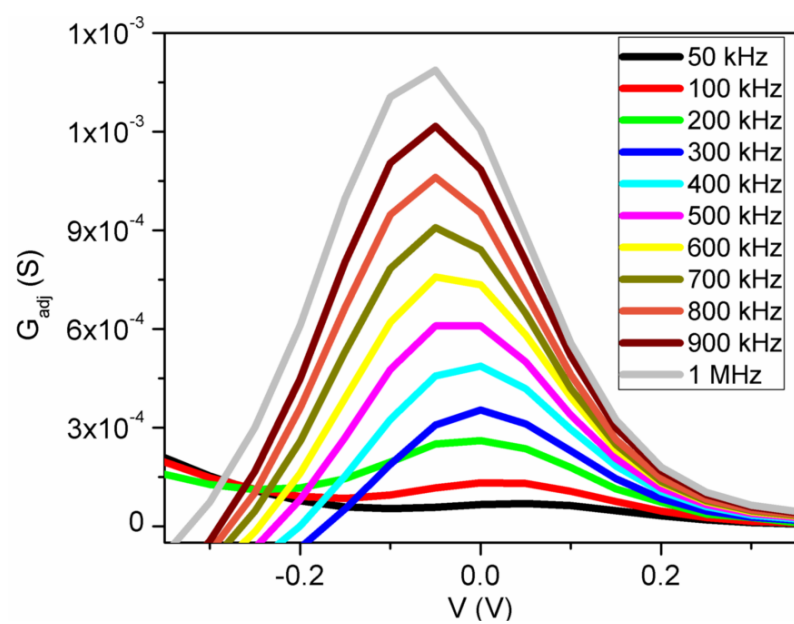
**c**

**Şekil 5.33. a.** katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyot **b.** %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot **c.** %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların farklı frekanslarda çizilen  $C_{adj}$  eğrileri

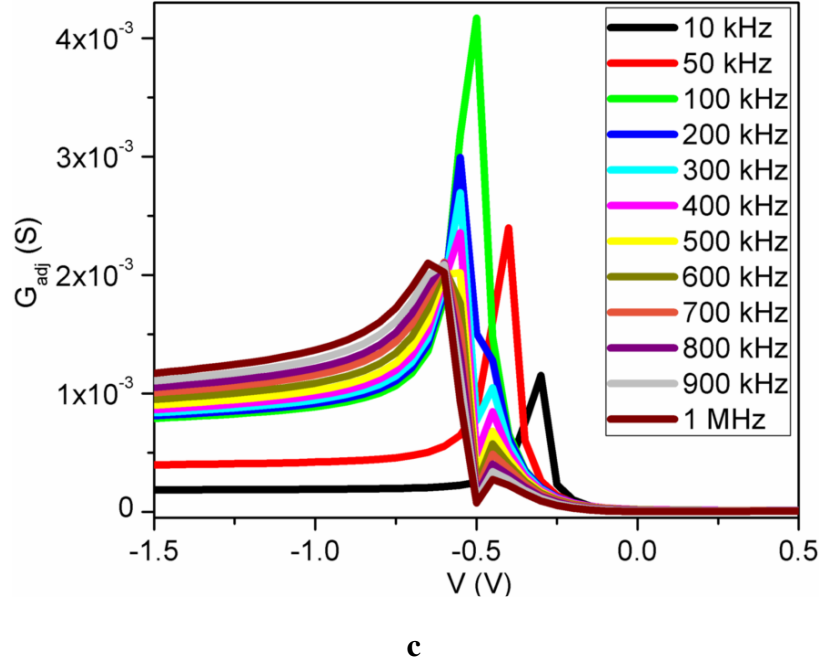
Şekil 5.34'te katkısız ve Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların farklı frekanslar için çizilen  $G_{adj}$  grafikleri verilmiştir. Negatif bölgede eğrilerde oluşan pik değerleri diyotun ara yüzey durumlarını göstermektedir.



**a**



**b**



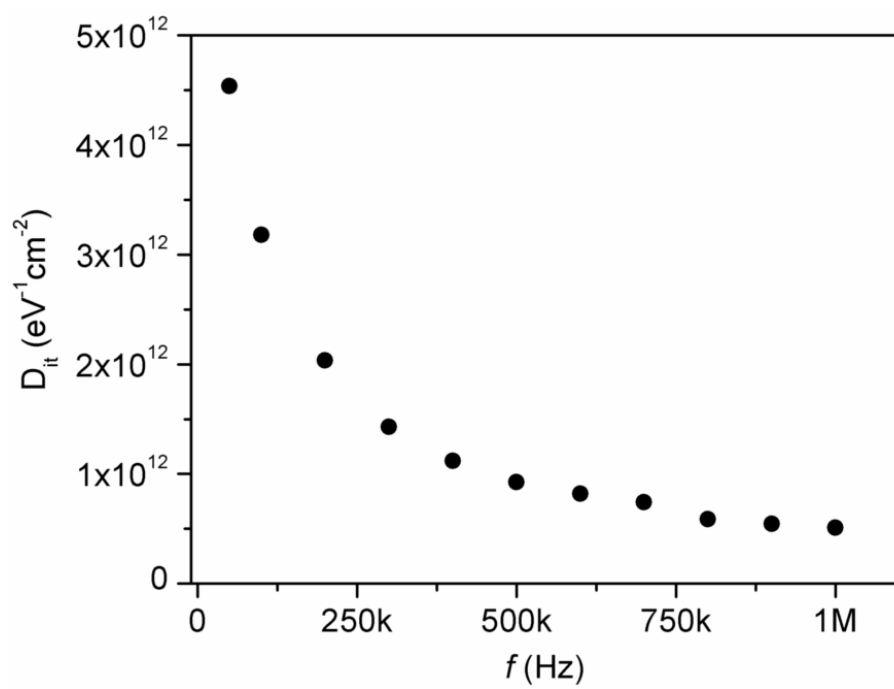
**Şekil 5.34. a.** Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyot **b.** %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot **c.** %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların farklı frekanslardaki  $G_{adj}$  eğrileri

p-Si/CdO diyotların farklı frekanslar için çizilen  $G_{adj}$  grafiklerinin negatif bölgesinde oluşan pik değerleri diyotların ara yüzey durum yoğunluğunun olduğunu doğrulamaktadır. p-Si/CdO diyotlar için ara yüzey durum yoğunluğu,

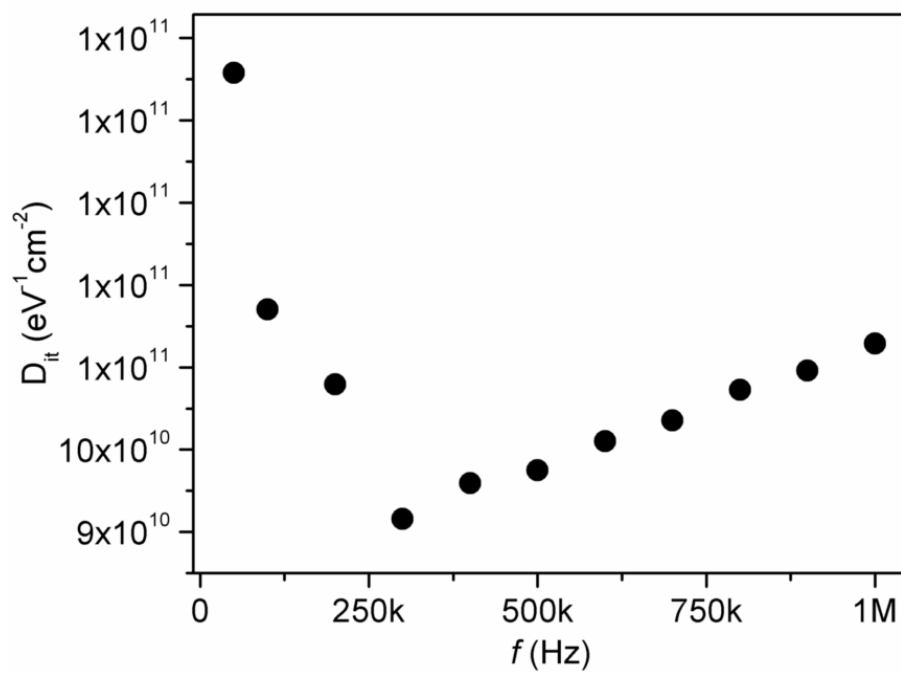
$$D_{it} = \frac{2}{qA} \frac{(G_{adj}/\omega)_{max}}{[(G_{max}/\omega C_{ox})^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2]} \quad (5.7)$$

ifadesi ile hesaplanır. İfadede  $C_m$  ölçülen kapasite,  $(G_{adj}/\omega)_{max}$  ölçülen iletkenlik,  $C_{ox}$  oksit tabakanın kapasitesi, A diyotun kontak alanı ve  $\omega$  açısal frekanstır [63,73,74].

Şekil 5.35'te katkısız ve Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların  $D_{it}$  grafikleri verilmiştir. p-Si/CdO diyotların  $D_{it}$  grafikleri diyotların  $G_{adj}$  verileri kullanılarak çizildi. Grafiklerde de görüldüğü gibi  $D_{it}$  değerleri frekansa bağlı olarak değişmektedir. Artan frekans değeri  $D_{it}$  değerlerini azaltmaktadır.

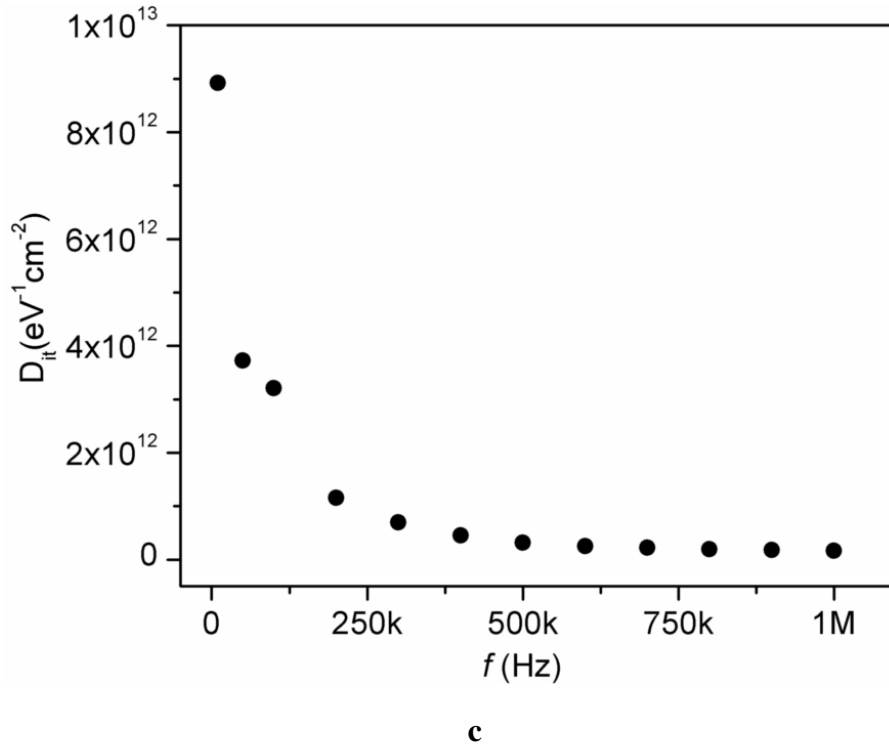


**a**



**b**



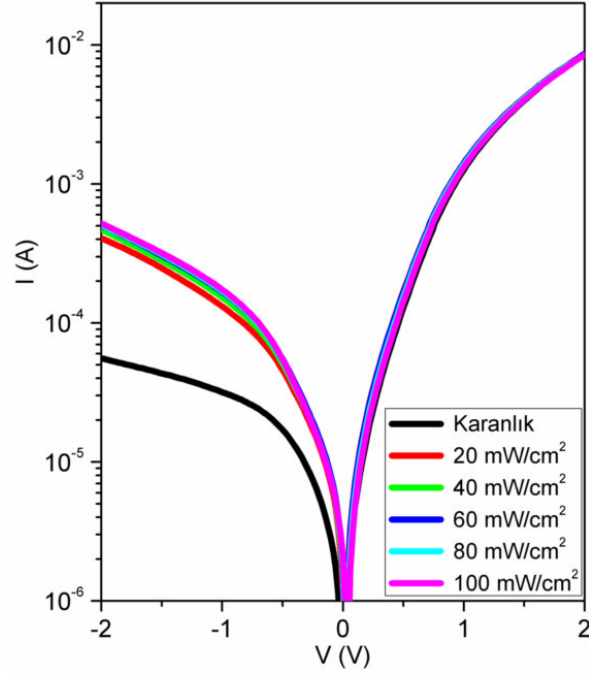


**Şekil 5.35. a.** Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyot **b.** %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot **c.** %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların  $D_{it}$  eğrileri

### 5.3.3. Al/p-Si/CdO/Al Foto Diyotların Fotovoltaik ve Fotoiletkenlik Karakteristikleri

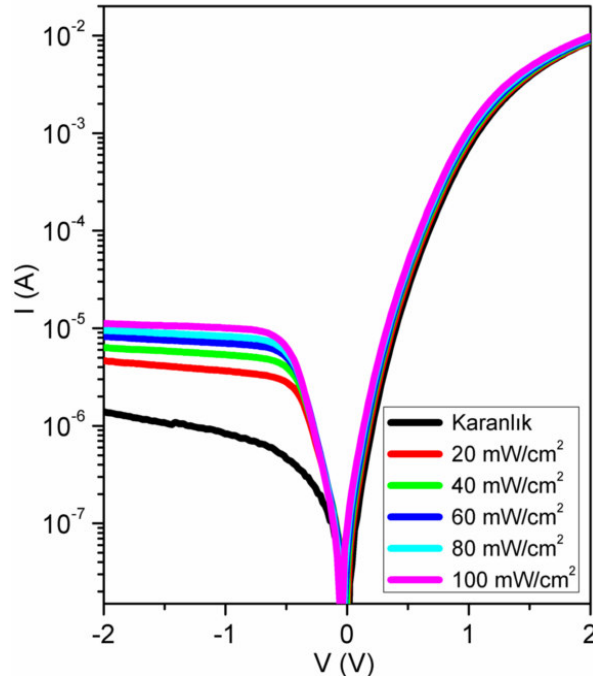
Hazırlanan katkısız, %0.1 ve %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların farklı aydınlanma şiddetleri altındaki akım-voltaj karakteristiklerinin ölçümü yapıldı.

Şekil 5.36'da katkısız Al/p-Si/CdO/Al foto diyotun farklı aydınlanma şiddetleri altındaki I-V grafikleri verildi. Şekilde görüldüğü gibi ışık şiddeti arttıkça diyotun ters besleme akımı artmaktadır. Diyotun karanlıktaki akım değeri  $5.83 \times 10^{-5}$  A. iken 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık altında ölçülen akım değeri  $5.4 \times 10^{-4}$  A.'dir.



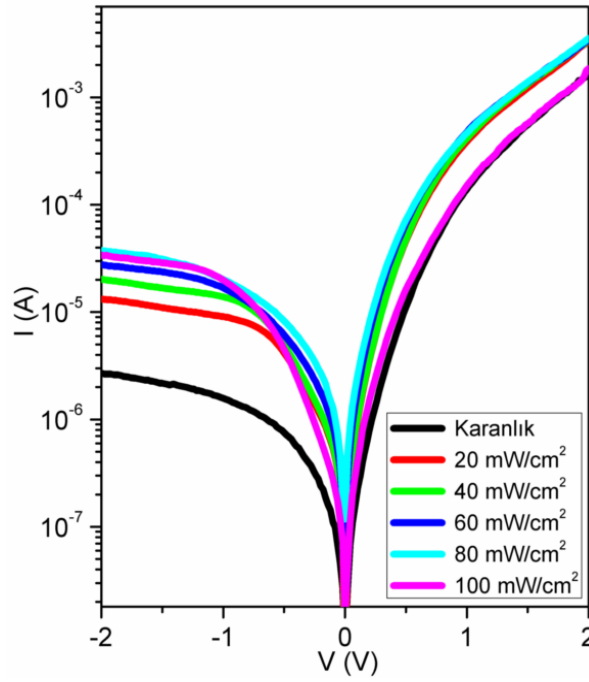
**Şekil 5.36.** Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V eğrileri

Şekil 5.37’de %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al foto diyotun farklı aydınlanma şiddetleri altındaki I-V eğrileri verildi. Eğrilerden de görüldüğü gibi ışık şiddetinin artışına bağlı olarak ters besleme akımı da artmıştır. Diyotun karanlıktaki akım değeri  $1.32 \times 10^{-6}$  A iken  $100 \text{ mW/cm}^2$  ışık altında ölçülen akım değeri  $1.2 \times 10^{-5}$  A’dir.



**Şekil 5.37.** %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V eğrileri

Şekil 5.38’de %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı aydınlanma şiddeti altındaki I-V eğrileri verilmiştir. Grafik eğrilerinde de görüldüğü gibi ışık şiddetinin artmasına bağlı olarak ters besleme akımı da artmıştır. Karanlıktaki akım değeri  $2.7 \times 10^{-6}$  A iken  $100 \text{ mW/cm}^2$  ışık altında ölçülen akım değeri  $3.9 \times 10^{-5}$  A’dir.



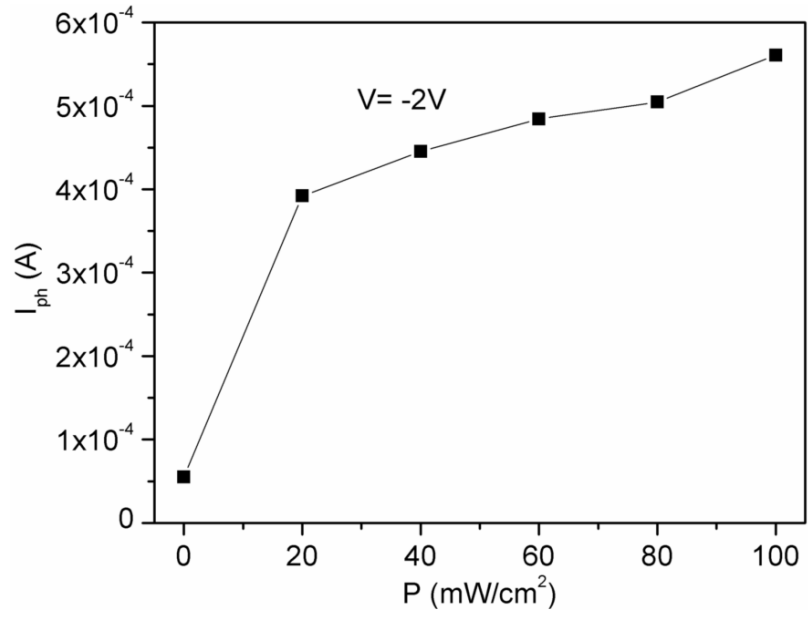
Şekil 5.38. %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V grafiği

Al/p-Si/CdO/Al diyotların fotoakım mekanizması,

$$I_{ph} = B \cdot P^m \quad (5.8)$$

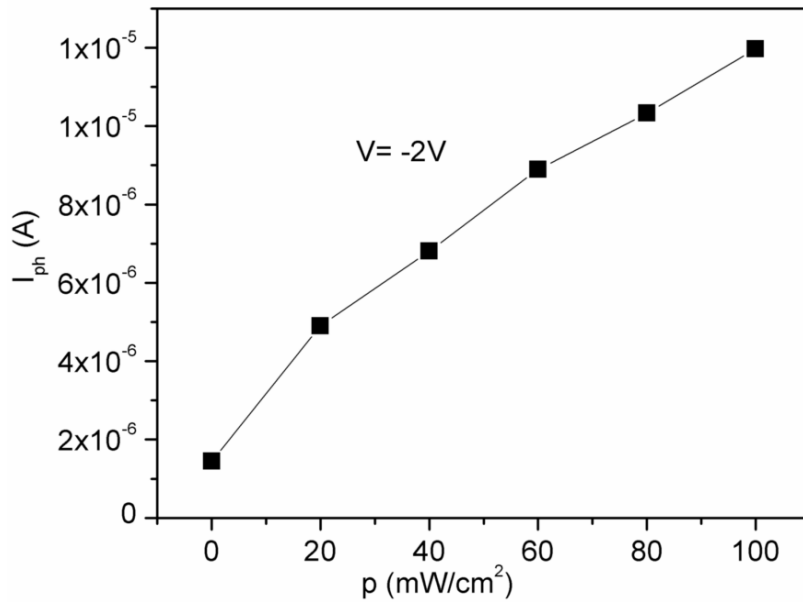
ile analiz edildi. Bağintıda  $I_{ph}$  fotoakım,  $P$  gelen ışığın şiddeti,  $B$  ve  $m$  ise bir sabittir. Diyotlar için elde edilen  $I_{ph}$ - $P$  grafikleri şekil 5.39-5.41’de verildi. Diyotların  $m$  değerleri şekil 5.39-5.41 grafiklerinin eğiminden hesaplandı ve Tablo 5.10’da verildi.

Şekil 5.39’da katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyotun sabit voltaj altında bulunan fotoakım değerleri grafikte görülmektedir. Diyot için  $m$  değeri 0.208 olarak bulundu.

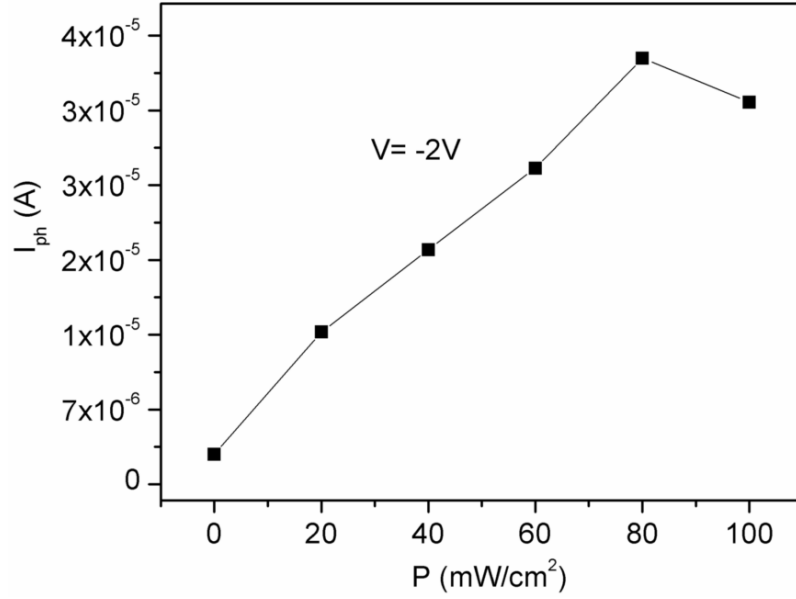


Şekil 5.39. Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyotun I<sub>ph</sub>-P eğrisi

%0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyot m değeri 0.556 bulundu.



Şekil 5.40. %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun I<sub>ph</sub>-P eğrisi



**Şekil 5.41.** %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun  $I_{ph}$ -P eğrisi

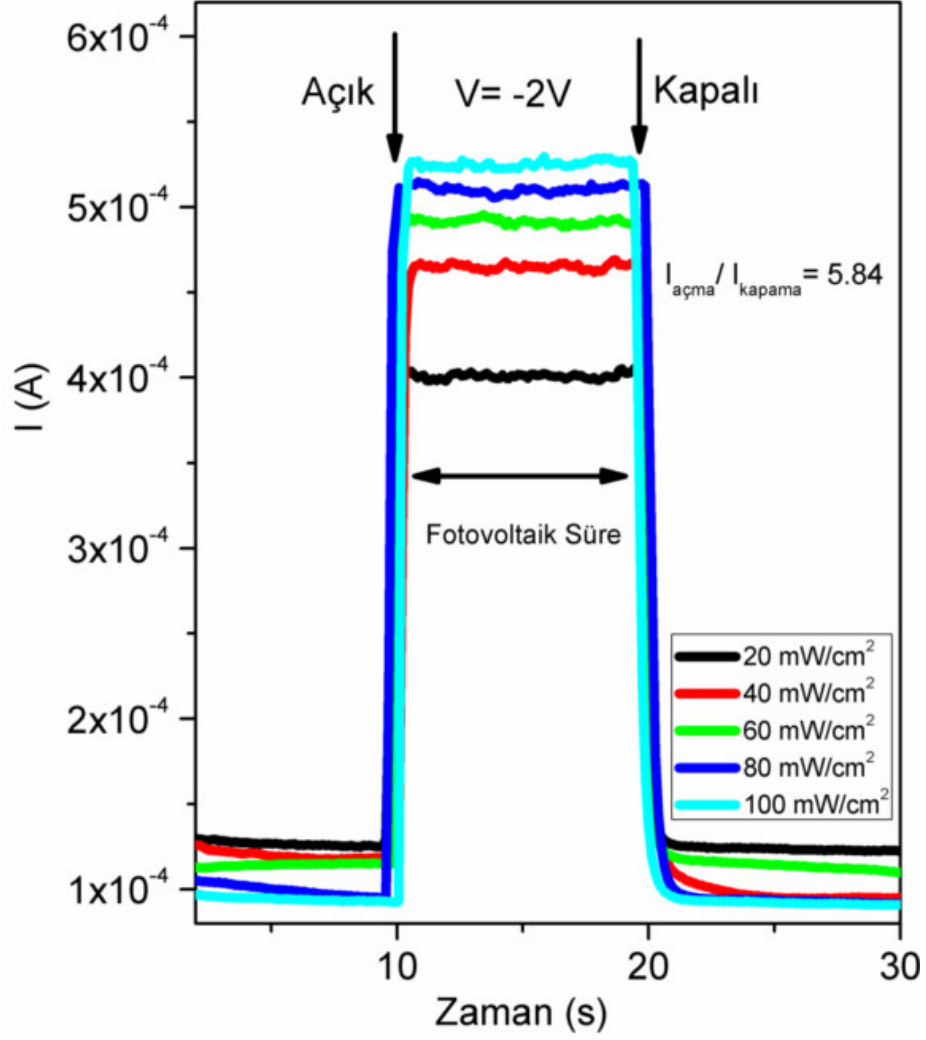
%1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun  $m$  değeri 0.637 olarak hesaplandı.

**Tablo 5.10.** Al/p-Si/CdO/Al diyotlar için elde edilen  $m$  değerleri

| Foto Diyot     | Katkı oranı     | $m$ değerleri |
|----------------|-----------------|---------------|
| Al/p-Si/CdO/Al | CdO katkısız    | 0.208         |
| Al/p-Si/CdO/Al | %0.1 Al katkılı | 0.556         |
| Al/p-Si/CdO/Al | %1 Al katkılı   | 0.637         |

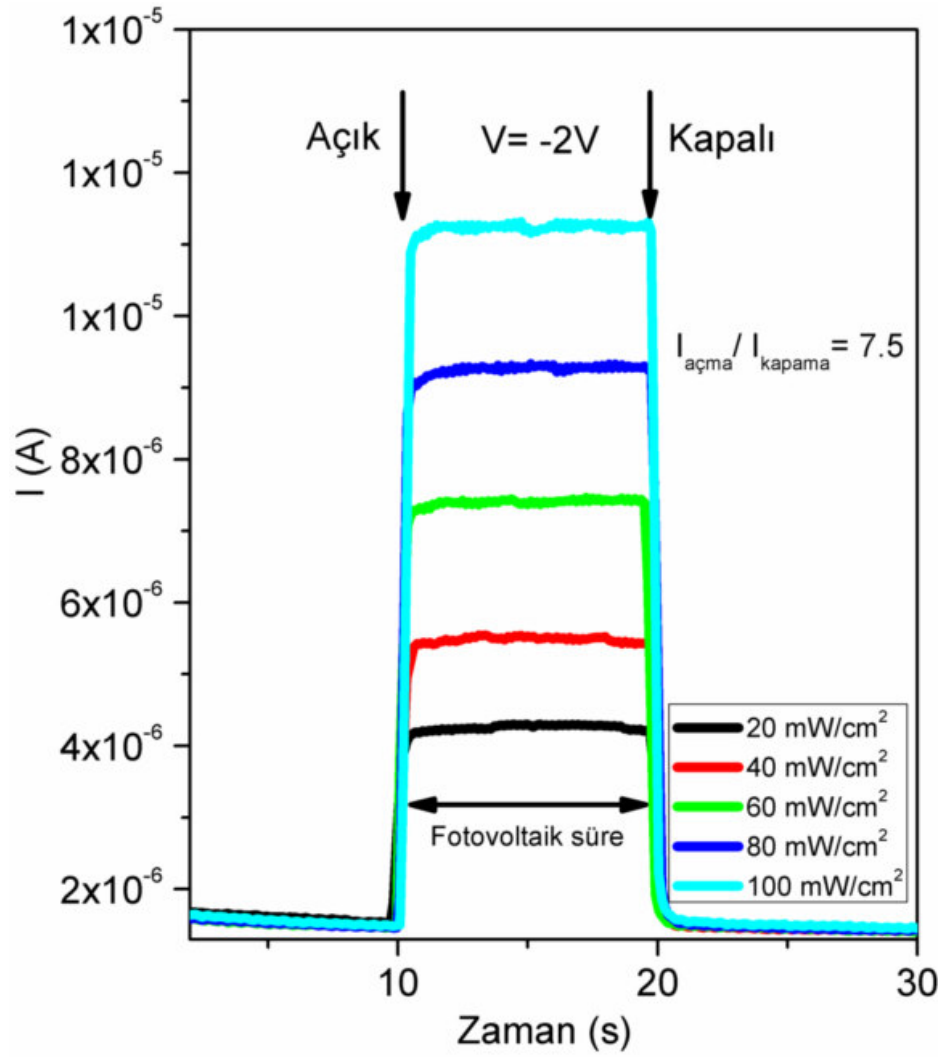
Al/p-Si/CdO/Al foto diyotların fototransient akım ölçümleri farklı aydınlatma şiddetleri altında akım-zaman grafikleri şekil 5.42-5.44 'te verildi. Şekillerde de görüldüğü gibi ışığın açılması ile akım aniden artmakta ve sabit bir değere ulaşmaktadır. Işık kapatıldığında ise akım ilk değerine ulaşmaktadır.

Şekil 5.42'de katkısız Al/p-Si/CdO/Al foto diyotun farklı aydınlatma  $I_{ph}$ -t grafiği verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi ışığın açılması ile akım aniden artmakta ve sabit bir değere ulaşmaktadır. Işık kapatıldığında ise akım ilk değerine ulaşmaktadır. Diyotun 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddeti altındaki  $I_{açma}/I_{kapama}$  değeri 5.84 olarak bulundu.



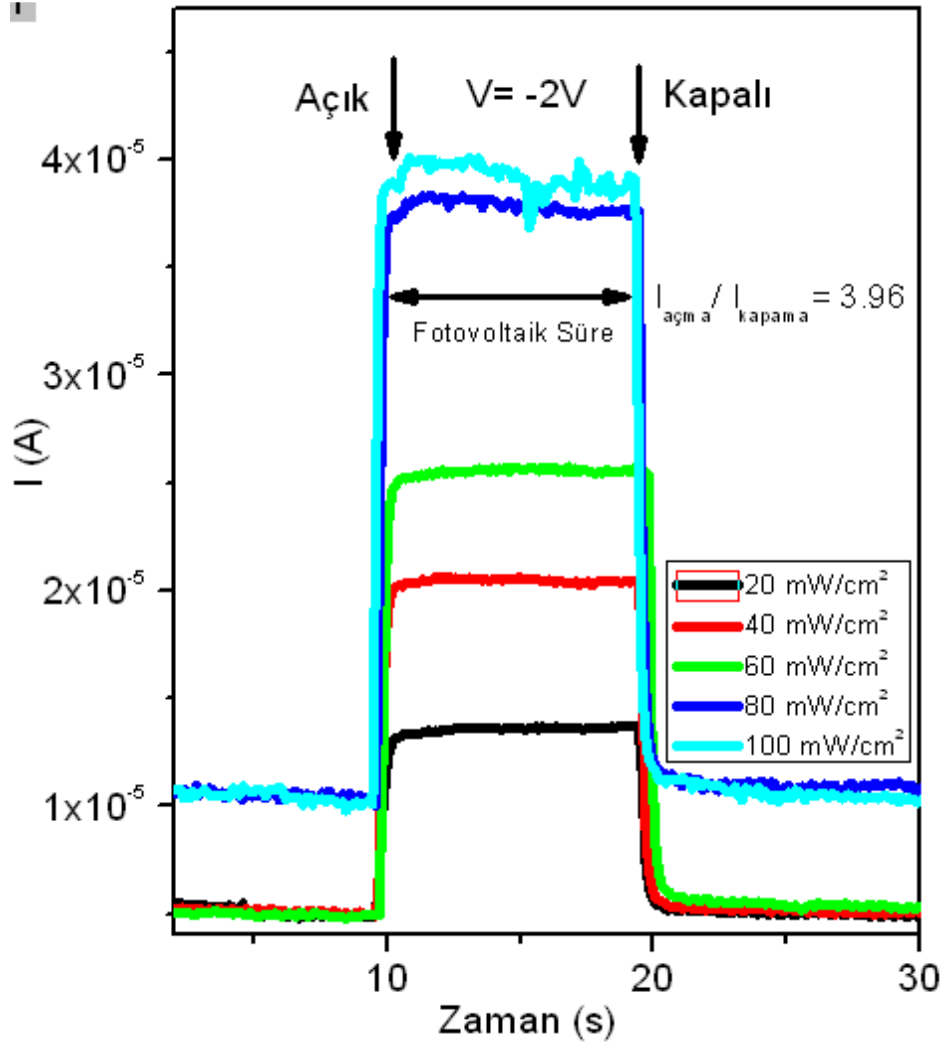
**Şekil 5.42.** Katkısız Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki  $I_{ph}$ -t eğrisi

Şekil 5.43'da %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al foto diyotun farklı aydınlatma  $I_{ph}$ -t grafiği verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi akım artan ışık şiddeti ile artmaktadır. Diyotun 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddeti altındaki  $I_{açma} / I_{kapama}$  oranı 7.5 olarak bulundu.



**Şekil 5.43.** %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki  $I_{ph}$ -t eğrisi

Benzer şekilde %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun  $I_{açma}/I_{tepe}$  değeri 3.96 olarak hesaplandı. Elde edilen sonuçlara bakıldığında %0.1 Al katkılı CdO ile hazırlanan diyot maksimum  $I_{açma}/I_{tepe}$  değerine sahiptir.



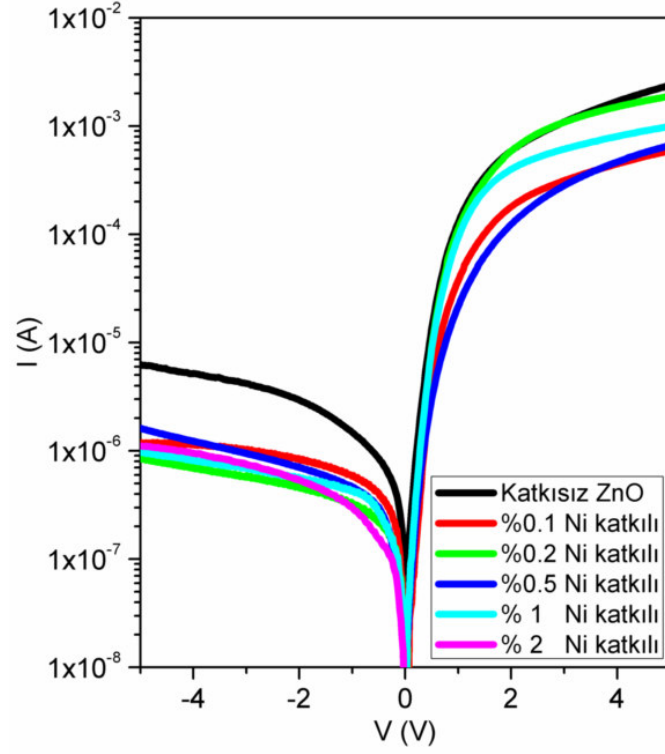
Şekil 5.44. %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki  $I_{ph}$ -t eğrisi

#### 5.4. Al/p-Si/ZnO/Al Foto Diyotların Ölçüm Sonuçları

##### 5.4.1. Al/p-Si/ZnO/Al Foto Diyotların Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Katkısız, %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların I-V karakteristikleri şekil 5.45'te verildi. Düşük voltajlarda diyotların akımı voltaj ile üssel olarak arttığından dolayı diyotların I-V karakteristikleri denklem 5.1 ile analiz edildi. Diyotların idealite faktörü, engel yüksekliği ve doğrultma oranı değerleri Tablo 5.11'de verildi. Al/p-Si/ZnO/Al diyotların idealite faktörlerinin 1'den büyük olduğu görüldü. Bu durum, arayüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten kaynaklanmaktadır. %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot en düşük idealite faktörüne sahiptir.





**Şekil 5.45.** Katkısız, %0.1- %0.2 - %0.5 - %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların I-V karakteristikleri

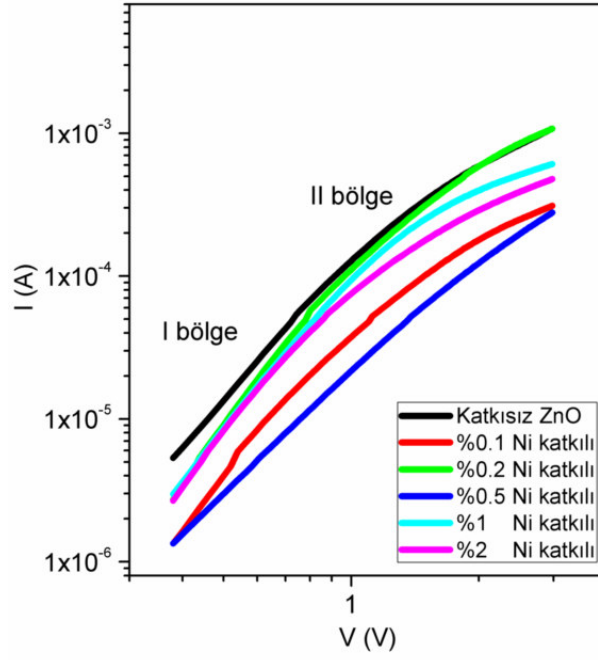
Yüksek elektrik alanların diyotların I-V karakteristiklerine etkisini analiz etmek için diyotların I-V karakteristikleri  $I \propto V^m$  ifadesi ile analiz edildi.

**Tablo 5.11.** Al/p-Si/ZnO/Al diyotların elektriksel parametreleri

| Foto Diyot     | Katkı oranı     | n    | $\phi_B$ (eV) | RR                 |
|----------------|-----------------|------|---------------|--------------------|
| Al/p-Si/ZnO/Al | ZnO katkısız    | 3.44 | 0.709         | $3.78 \times 10^2$ |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.1 Ni katkılı | 3.05 | 0.762         | $5.07 \times 10^2$ |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.2 Ni katkılı | 3    | 0.744         | $2.18 \times 10^3$ |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.5 Ni katkılı | 3.56 | 0.740         | $4.09 \times 10^2$ |
| Al/p-Si/ZnO/Al | % 1 Ni katkılı  | 3.11 | 0.736         | $1.02 \times 10^3$ |
| Al/p-Si/ZnO/Al | % 2 Ni katkılı  | 2.42 | 0.768         | $7.39 \times 10^2$ |

Bunun için  $\ln I - \ln V$  formunda çizilen grafikler şekil 5.46'da verildi. Şekilde görüldüğü gibi eğriler iki farklı bölgeden oluşmaktadır. I. ve II. bölgede katkısız, %0.1,

%0.2, %0.5, %1 ve %2 Ni katkılı ZnO/p-Si diyotların bulunan  $m$  değerleri Tablo 5.12’de verilmiştir. ZnO/p-Si diyotların I. bölge için bulunan  $m$  değerleri 3.076 ile 3.627 arasında değişirken II. bölge için bulunan  $m$  değerleri ise 1.167 ile 1.579 arasında değişmektedir.



Şekil 5.46. Katkısız, %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun log I-V eğrileri

I. bölge için elde edilen  $m$  değerleri bölgede tuzaklı uzay yükü sınırlandırılmış çıkarım mekanizmasının meydana geldiğini gösterir.

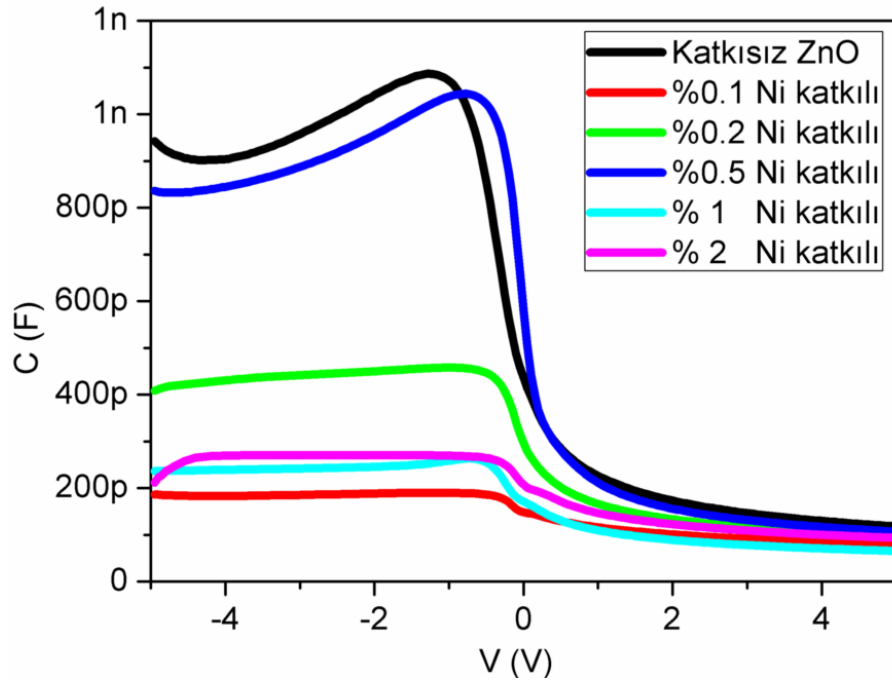
Tablo 5.12. Al/p-Si/ZnO/Al diyotların I ve II bölge için  $m$  değerleri

| Foto Diyot     | Katkı oranı     | I. bölge | II. bölge |
|----------------|-----------------|----------|-----------|
| Al/p-Si/ZnO/Al | ZnO katkısız    | 3.387    | 1.538     |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.1 Ni katkılı | 3.216    | 1.233     |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.2 Ni katkılı | 3.340    | 1.254     |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.5 Ni katkılı | 3.076    | 1.579     |
| Al/p-Si/ZnO/Al | % 1 Ni katkılı  | 3.206    | 1.214     |
| Al/p-Si/ZnO/Al | % 2 Ni katkılı  | 3.627    | 1.167     |

#### 5.4.2. Al/p-Si/ZnO/Al Foto Diyotların Kapasite-İletkenlik Voltaj Karakteristikleri

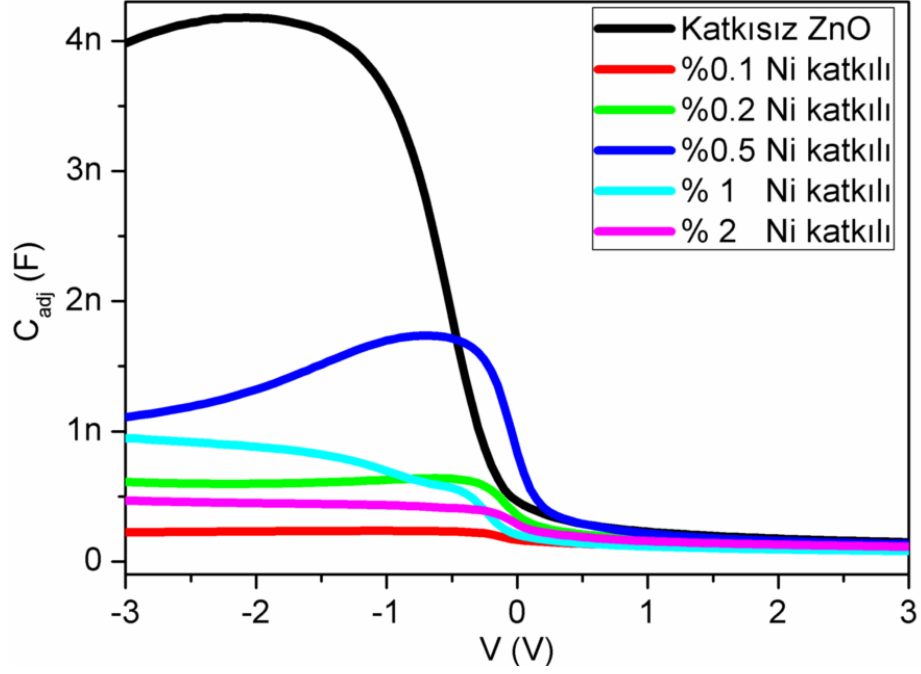
Şekil 5.51’de ZnO/p-Si diyotların C-V grafikleri verilmiştir. Diyotların pozitif voltaj bölgesinde kapasiteleri değişmezken negatif voltaj bölgesinde kapasiteleri değişmektedir. Diyotların C-V grafiği ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir. Diyotların arayüzey durum yoğunluğunu hesaplamak için C-V grafikleri denklem 5.3 ve 5.4 kullanılarak  $C_{adj}$  ve  $G_{adj}$  grafikleri çizildi. Çizilen  $C_{adj}$  grafiklerin oluşan pik değerleri diyotların ara yüzey durum yoğunluğunun olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.47’de katkısız, %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/CdO/Al diyotların 1 MHz de çizilen C-V grafiğinde, diyotların kapasitesi pozitif voltaj bölgesinde değişmezken negatif voltaj bölgesinde değişmektedir.



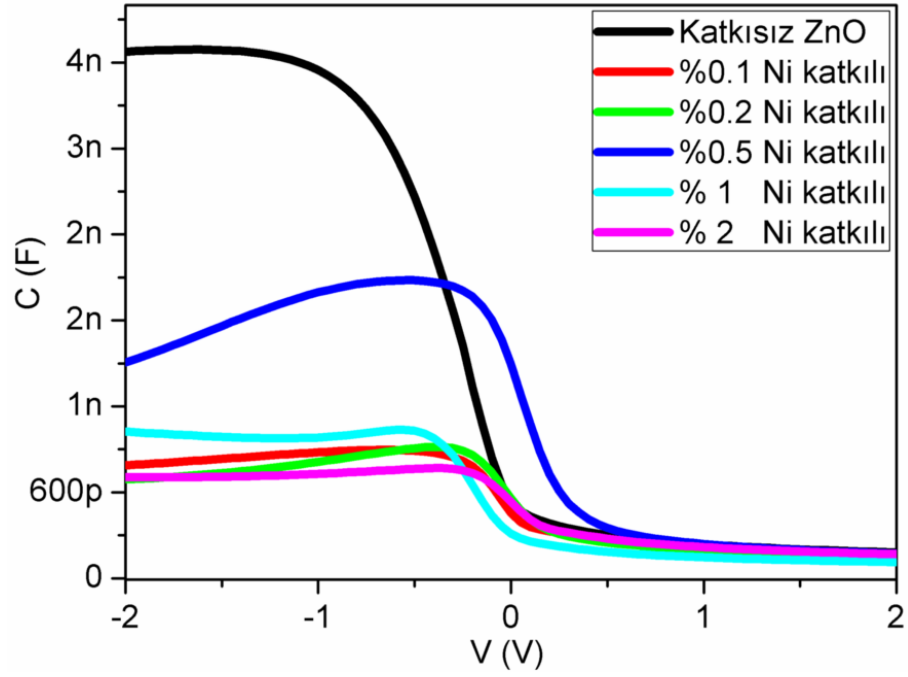
Şekil 5.47. Katkısız, %0.1- %0.2- %0.5- %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 1 MHz C-V eğrileri

Şekil 5.48’de katkısız, %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 1 MHz de çizilen  $C_{adj}$  eğrilerinde negatif bölgede oluşan pik diyotlara ara yüzey durumların varlığını göstermektedir.



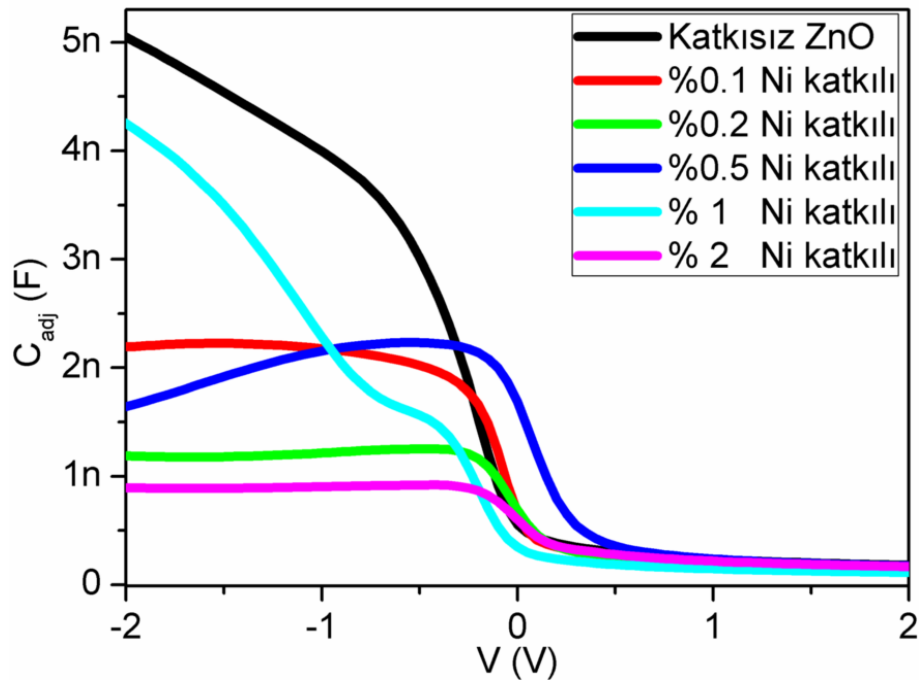
**Şekil 5.48.** Katkısız, %0.1- %0.2- %0.5- %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 1 MHz  $C_{adj}$  eğrileri

Şekil 5.49’de katkısız, %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 100 kHz’de çizilen C-V eğrilerinde görüldüğü gibi, diyotların kapasitesi pozitif voltaj bölgesinde değişmezken negatif voltaj bölgesinde değişmektedir. 100 kHz de çizilen C-V grafiği arayüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir. Bu durumu düzeltmek için denklem 5.3 kullanılarak  $C_{adj}$  grafikleri çizildi.



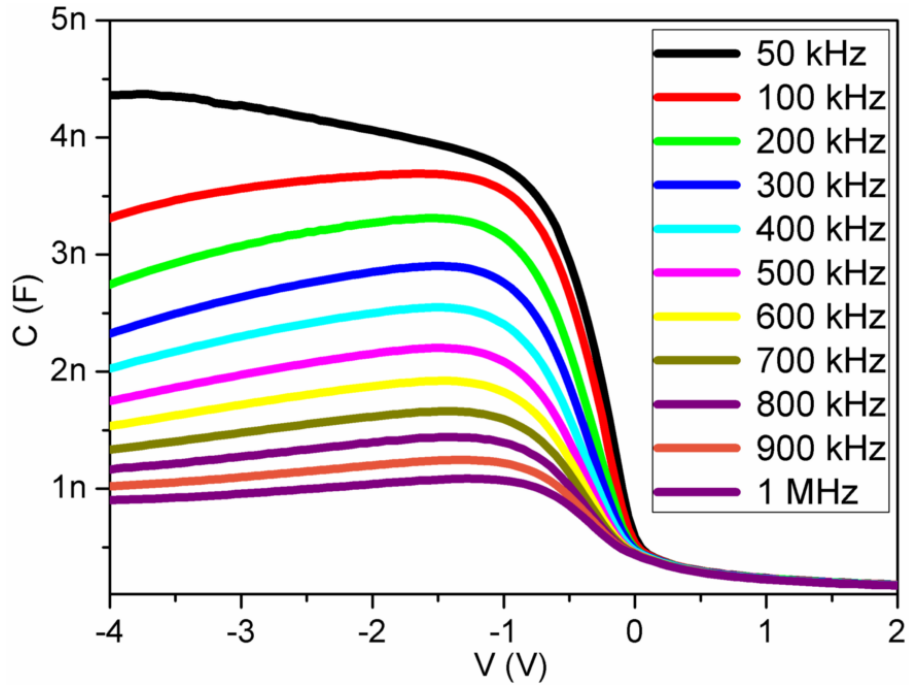
**Şekil 5.49.** Katkısız, %0.1- %0.2- %0.5- %1, %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 100 kHz C-V eğrileri

Şekil 5.50’de katkısız, %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 100 kHz de çizilen  $C_{adj}$  grafiğinin negatif bölgede oluşan pik değerleri diyotların arayüzey durumların varlığını göstermektedir.

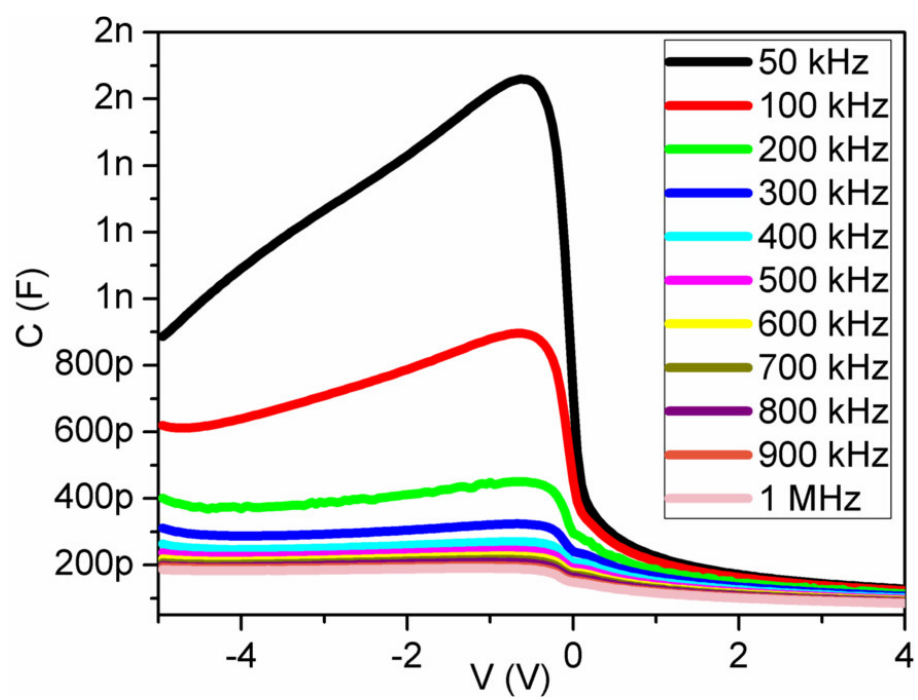


**Şekil 5.50.** Katkısız %0.1- %0.2- %0.5- %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 100 kHz  $C_{adj}$  eğrileri

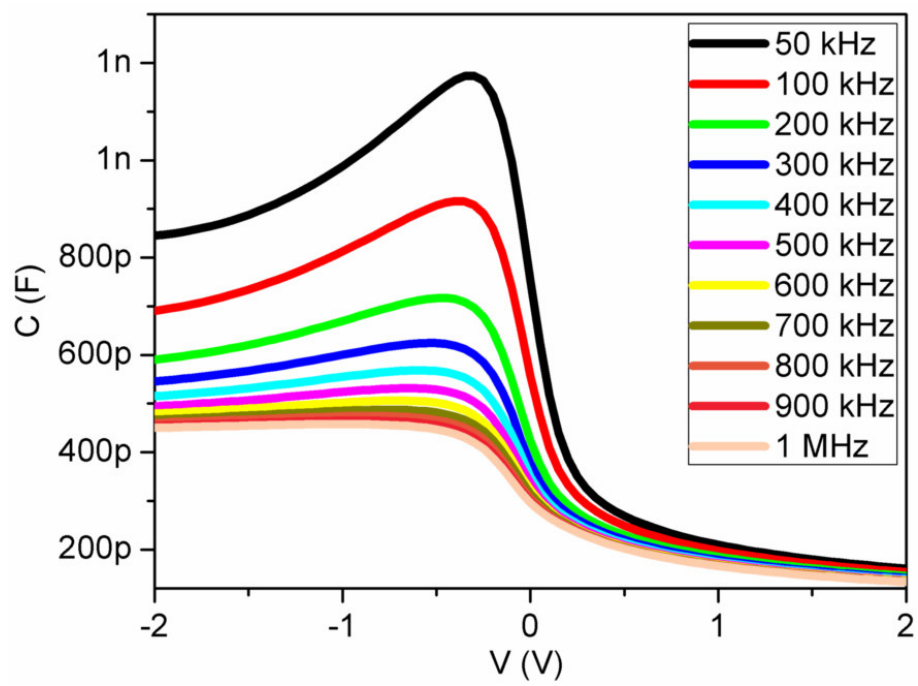
Şekil 5.51'de ZnO/p-Si diyotların farklı frekanslarda çizilen C-V grafikleri verilmiştir. Grafik eğrilerinde görüldüğü gibi diyotların kapasitesi negatif voltaj ile değişirken pozitif voltaj ile değişmemiştir. Bu durum, uygulanan voltajla tüketim tabakasının genişliğinin değiştiğini göstermektedir. C-V eğrileri bir pik gösterip pikin konumu frekans ile değişmekte ve pikin genişliği frekansın azalması ile artmaktadır. C-V grafiklerindeki pikin varlığı seri direncin etkisi ve arayüzey durumların moleküler yapılanması ve diziliminden kaynaklanabilir. C-V eğrilerindeki pikin genişliği ise arayüzeydeki tuzaklı taşıyıcı yüklerin sayısı ile ilgilidir.



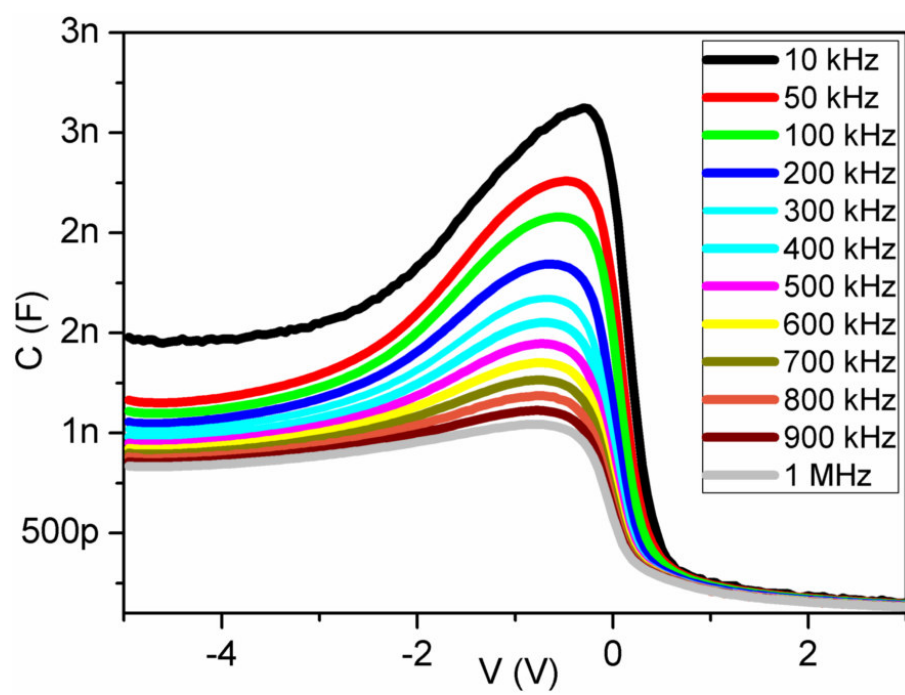
**a**



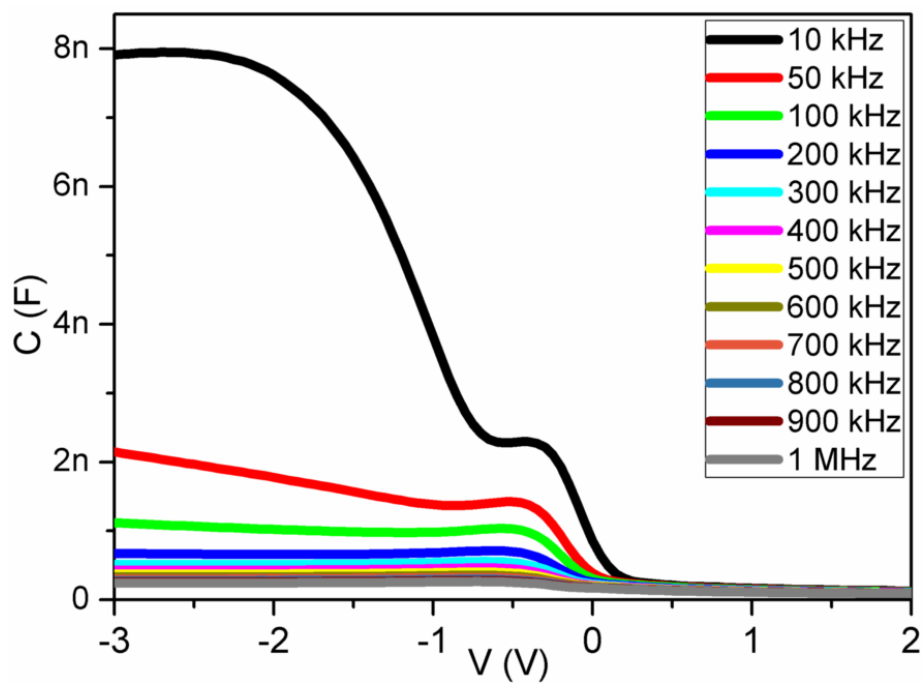
**b**



**c**

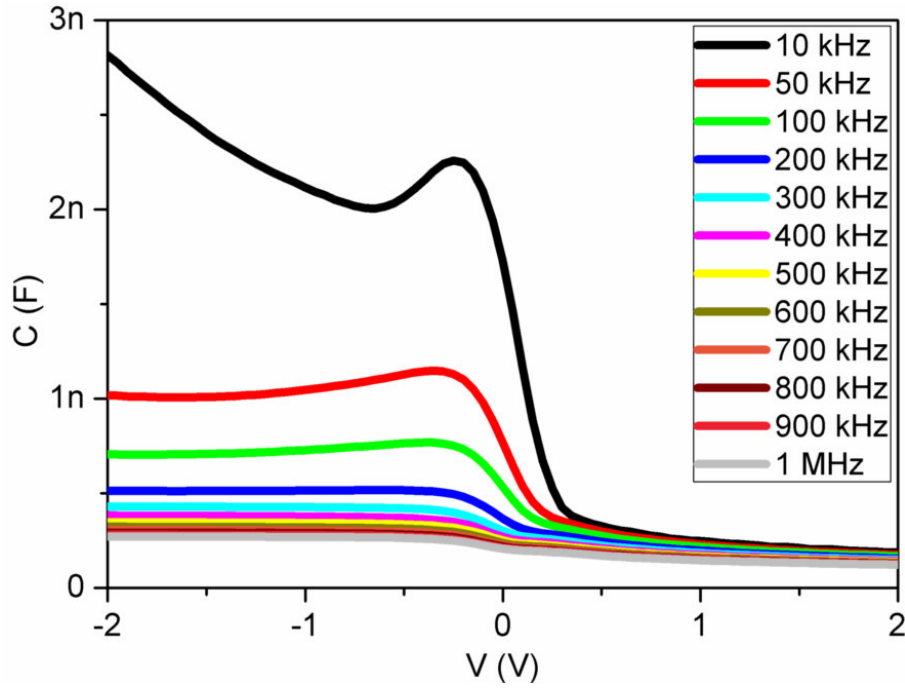


d



e





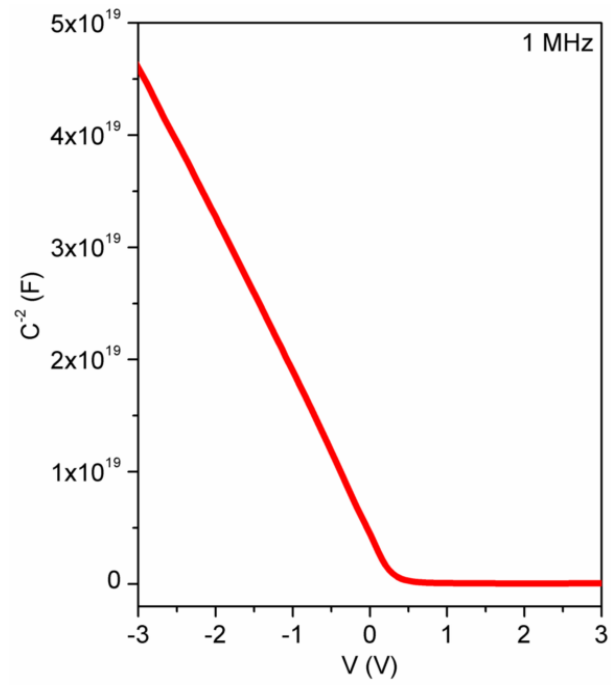
f

**Şekil 5.51.** a. Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyot b. %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot c. %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot d. %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot e. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot f. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların farklı frekanslardaki C-V eğrileri

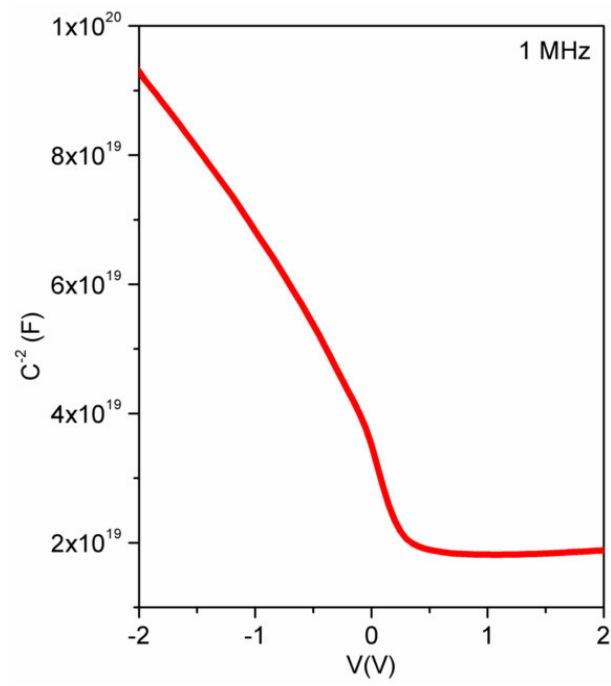
**Tablo 5.13.** Al/p-Si/ZnO/Al diyotların elektronik parametreleri

| Foto Diyot     | Katkı oranı     | $V_{bi}(V)$ | $N_d (cm^{-3})$ | $\phi_b (eV)$ |
|----------------|-----------------|-------------|-----------------|---------------|
| Al/p-Si/ZnO/Al | ZnO katkısız    | 0.304       | 1.150E15        | 0.536         |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.1 Ni katkılı | 0.606       | 2.699E14        | 0.881         |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.2 Ni katkılı | 0.640       | 4.811E14        | 0.895         |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.5 Ni katkılı | 0.618       | 6.801E14        | 0.886         |
| Al/p-Si/ZnO/Al | % 1 Ni katkılı  | 0.682       | 2.627E14        | 0.953         |
| Al/p-Si/ZnO/Al | % 2 Ni katkılı  | 0.584       | 4.163E14        | 0.846         |

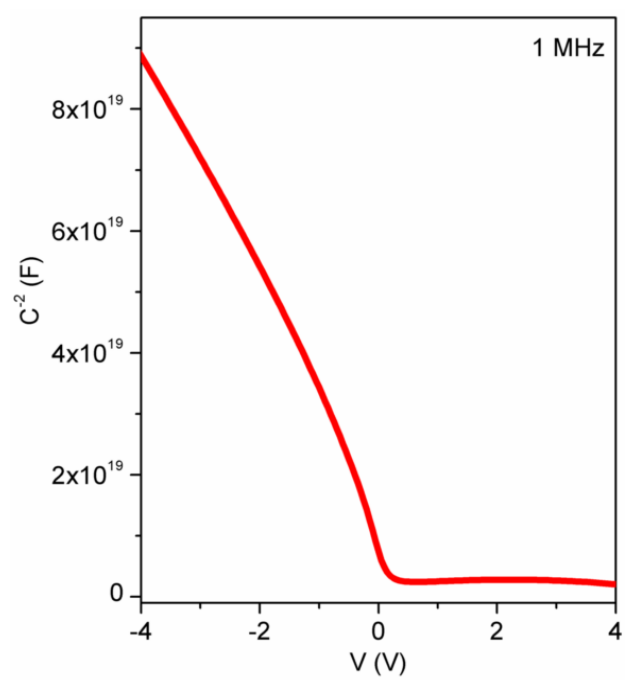
Diyotların elektriksel parametrelerini hesaplamak için Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 1MHz altındaki  $C^{-2}$ -V eğrileri şekil 5.52’de verilmiştir. Taşıyıcı konsantrasyonu ( $N_d$ ) ve difüzyon potansiyel ( $V_{bi}$ ) değerleri  $C^{-2}$ -V grafiklerinden hesaplandı. p-Si’deki taşıyıcı konsantrasyonu, ZnO konsantrasyonundan büyük olduğundan dolayı ölçülen kapasitans ZnO’in tükenim bölgesinin kapasitansı olur. Bundan dolayı ZnO için taşıyıcı konsantrasyon ve difüzyon potansiyel değerleri denklem 5.6 ile hesaplandı.



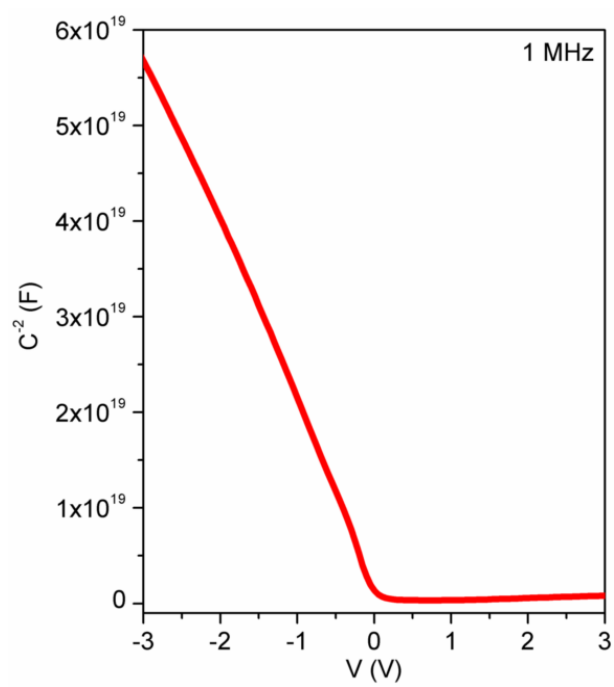
**a**



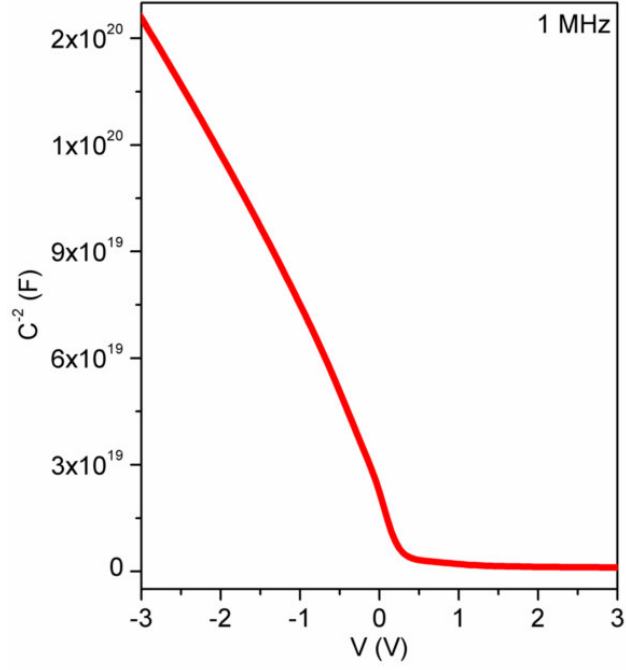
**b**



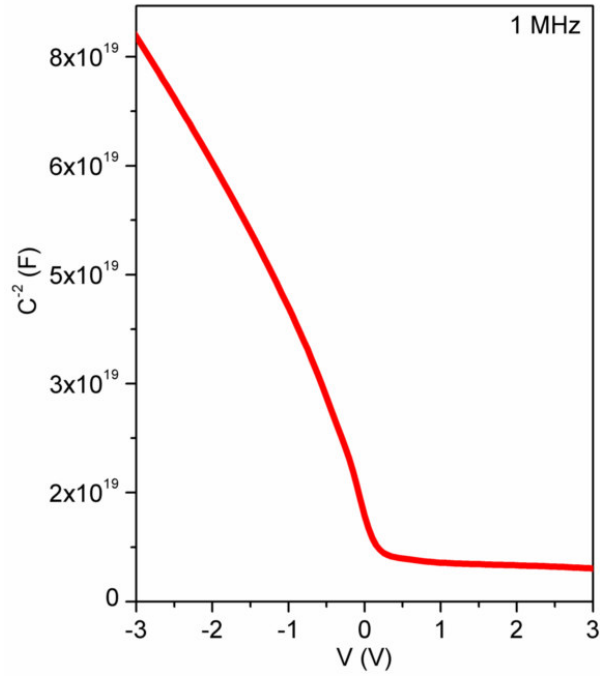
**c**



**d**



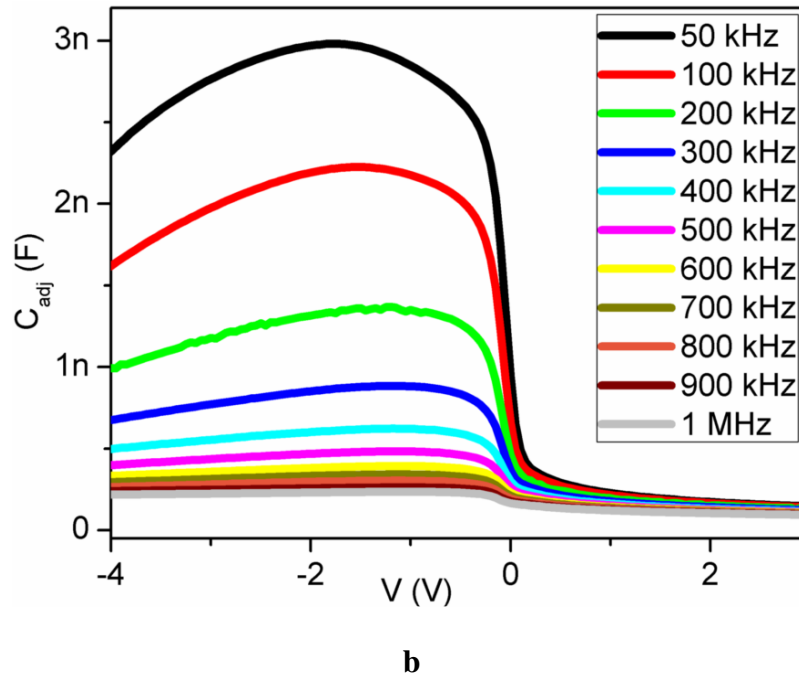
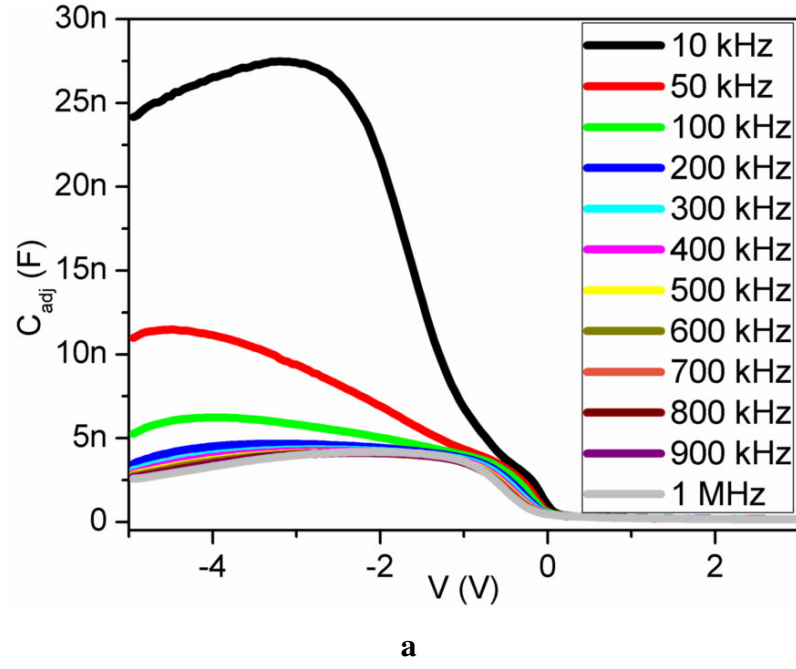
**e**

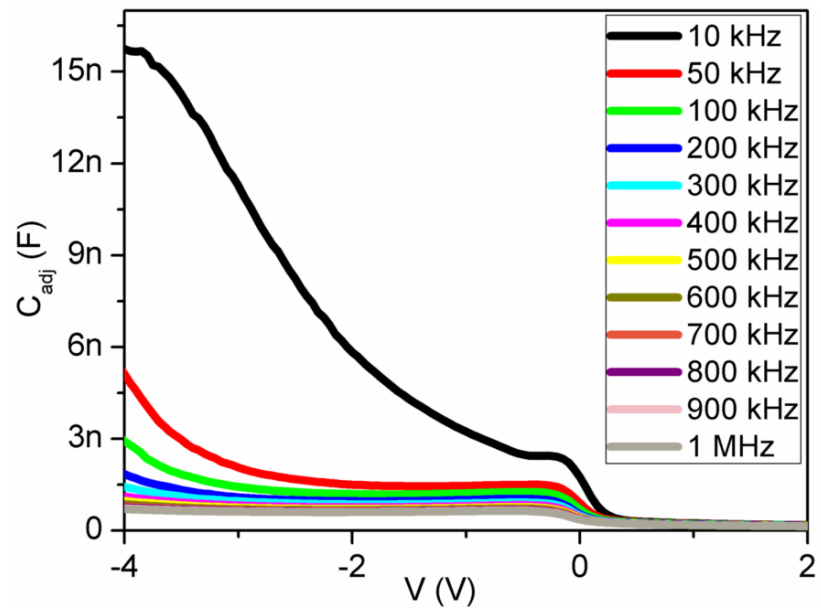


**f**

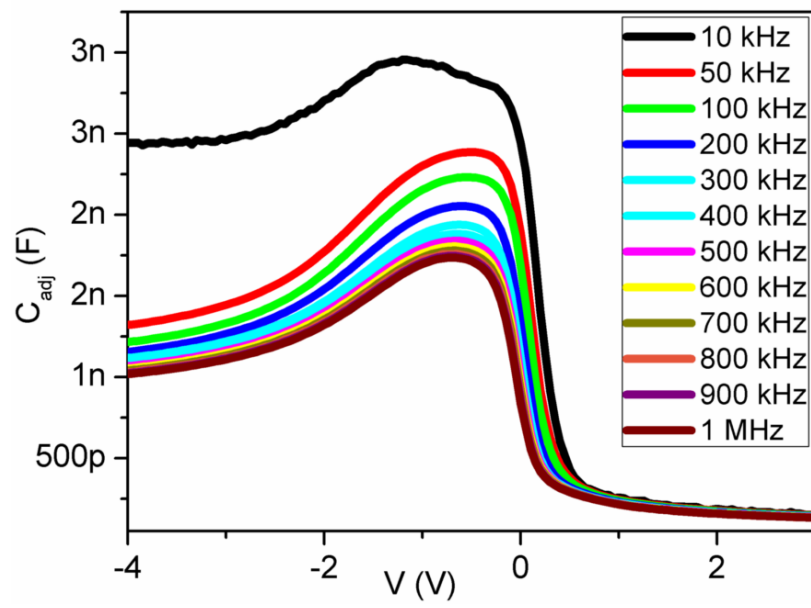
**Şekil 5.52.** **a.** Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyot **b.** %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot **c.** %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot **d.** %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot **e.** %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot **f.** %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların 1 MHz altındaki  $C^2$ -V eğrileri

Şekil 5.53'te Katkısız ve Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların farklı frekanslar da çizilen  $C_{adj}$  grafikleri verilmiştir. Grafiklerdeki pikler arayüzey durumların varlığını göstermektedir. Grafikte de görüldüğü gibi eğrilerin pik değeri artan frekans ile azalmaktadır.

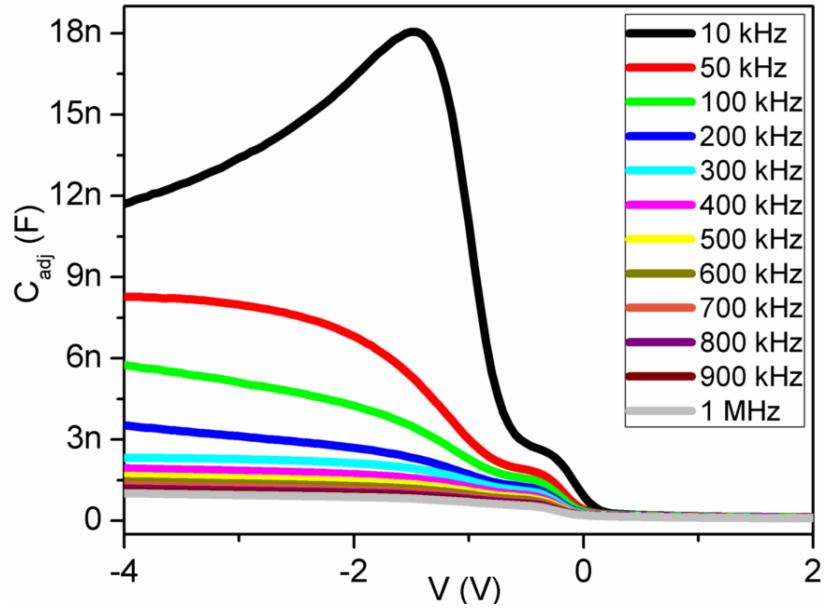




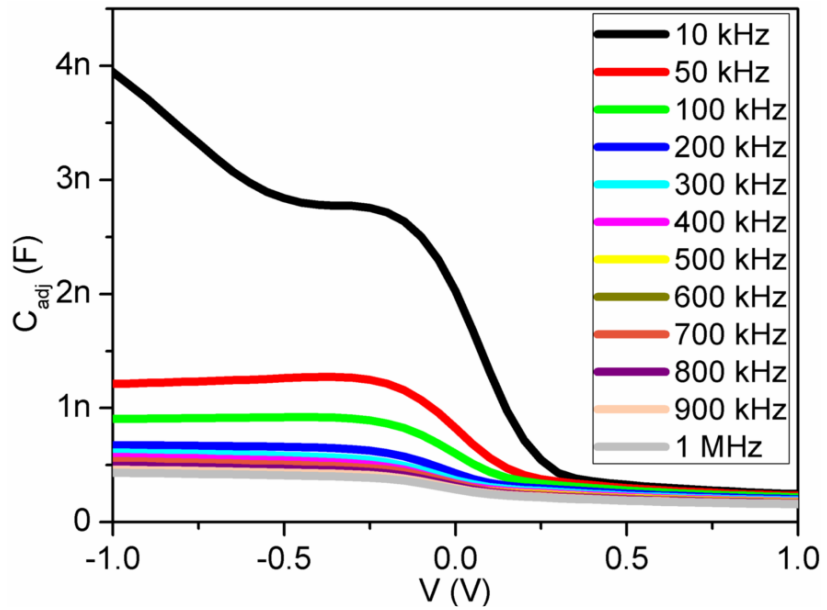
c



d



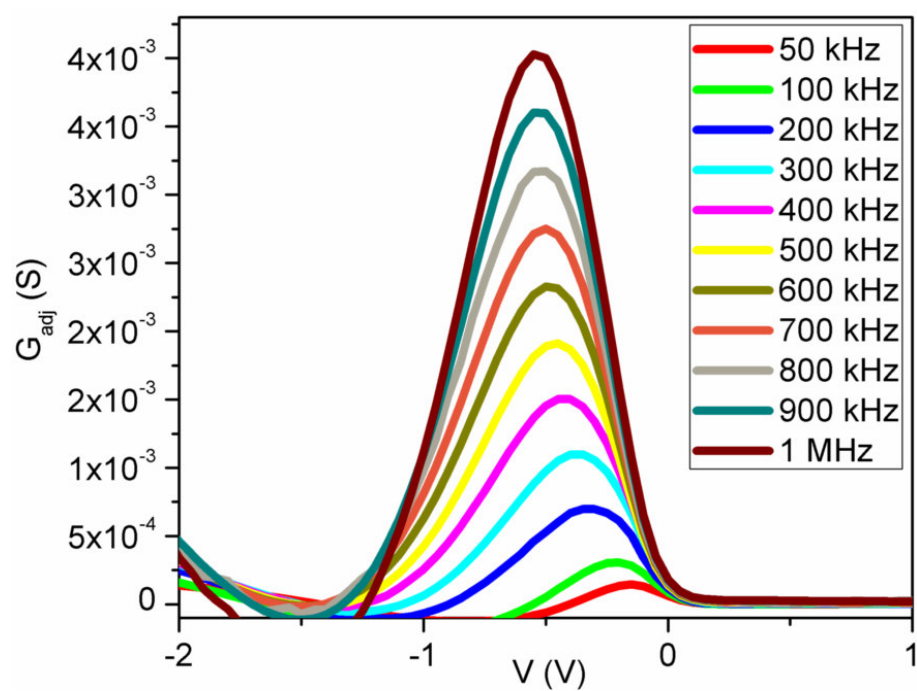
e



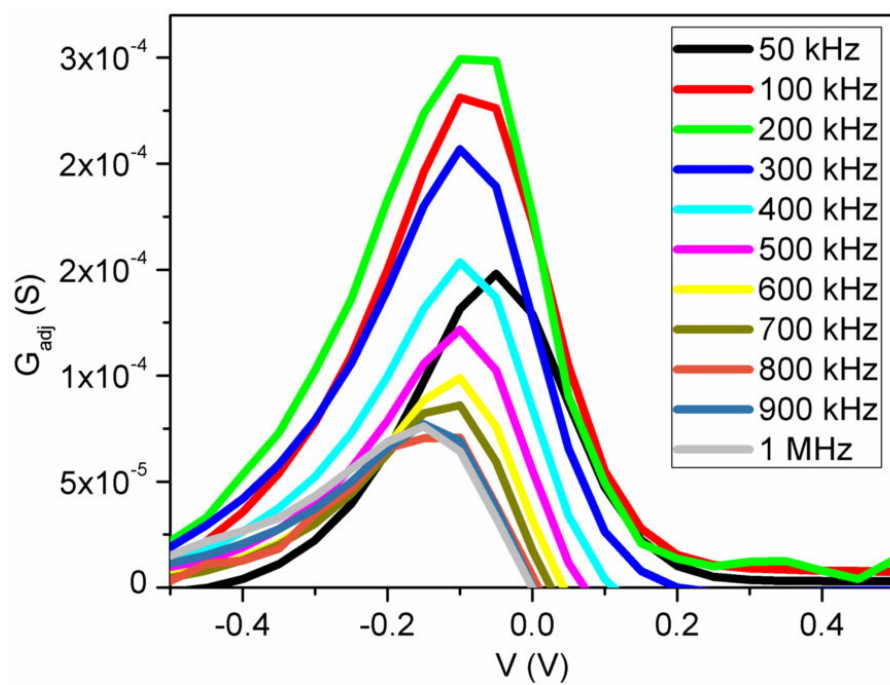
f

**Şekil 5.53. a.** Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyot **b.** %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot **c.** %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot **d.** %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot **e.** %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot **f.** %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların farklı frekanslardaki  $C_{adj}$  eğrileri

Şekil 5.54'te katkısız ve Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların farklı frekanslar için çizilen  $G_{adj}$  grafikleri verilmiştir. Negatif bölgede eğriler bir pik göstermekte ve pikin şiddeti artan frekans ile artmaktadır.

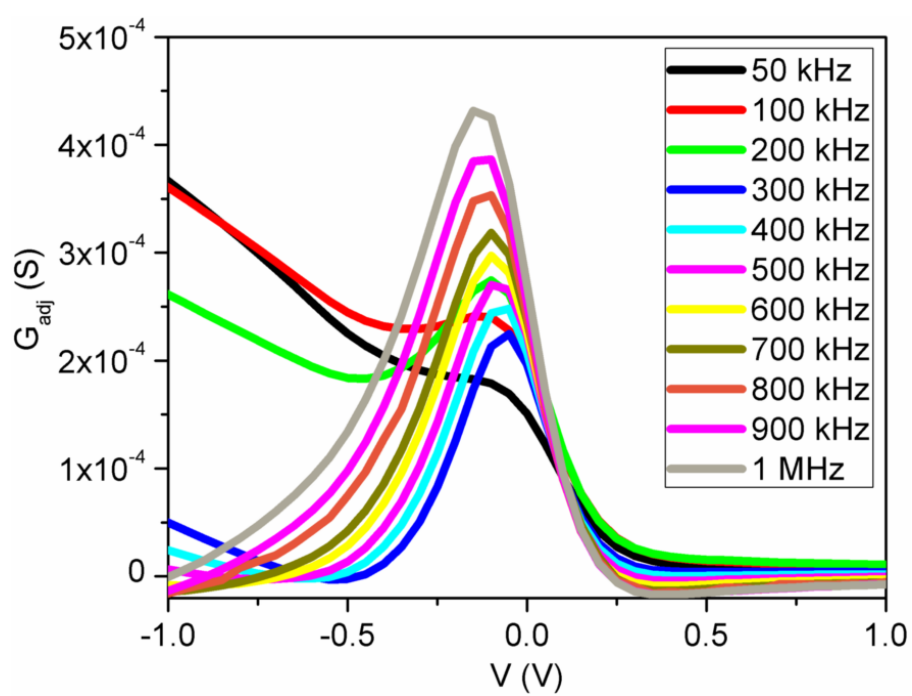


**a**

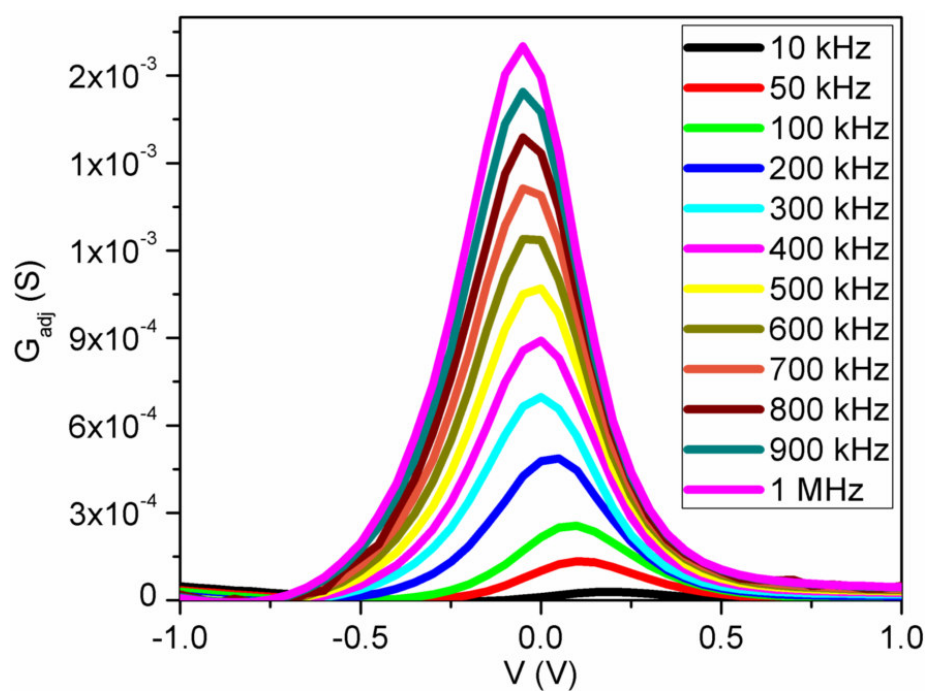


**b**

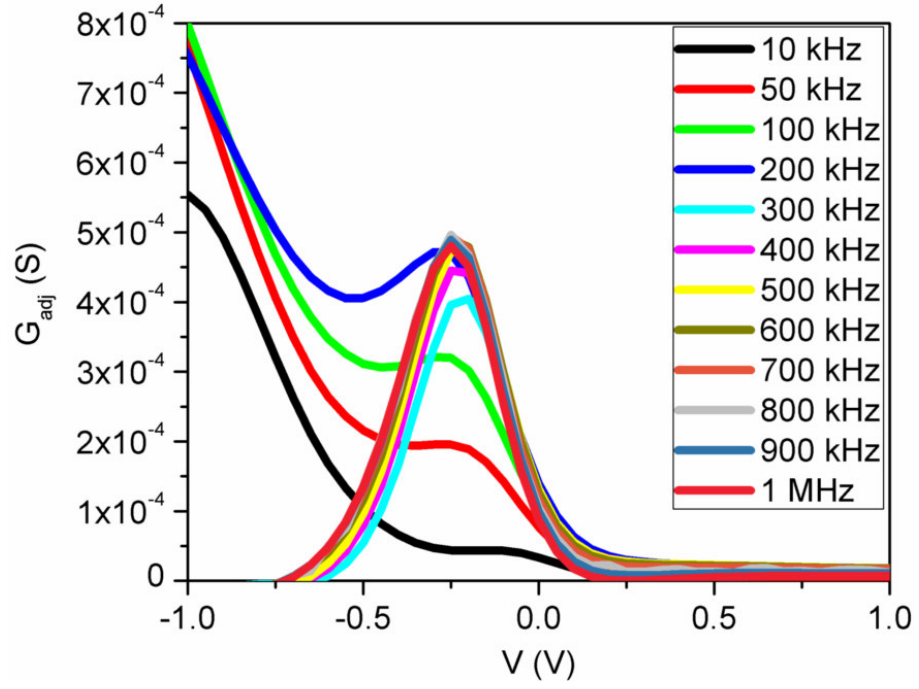




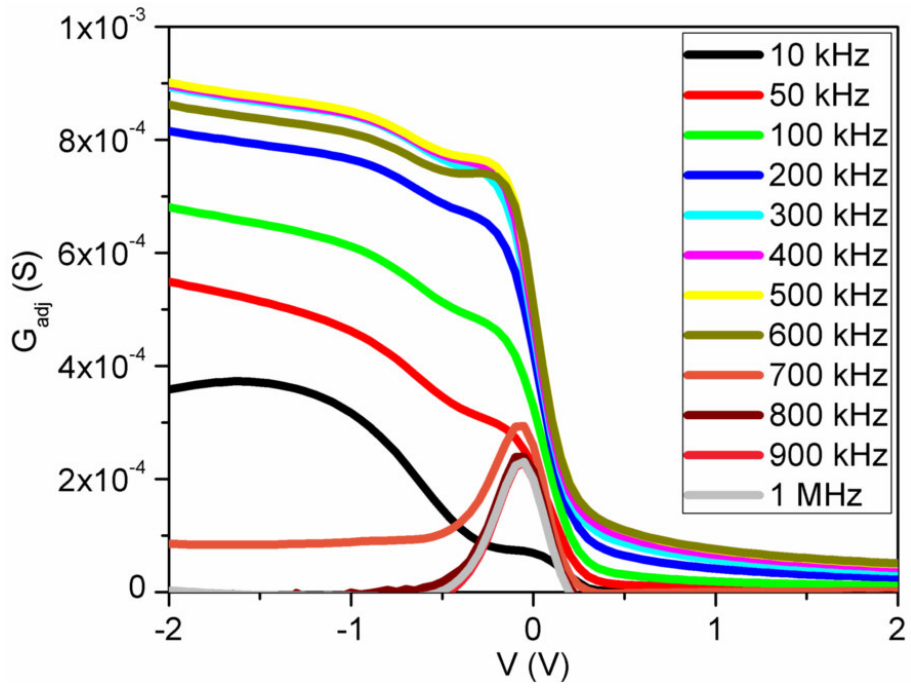
c



d



e

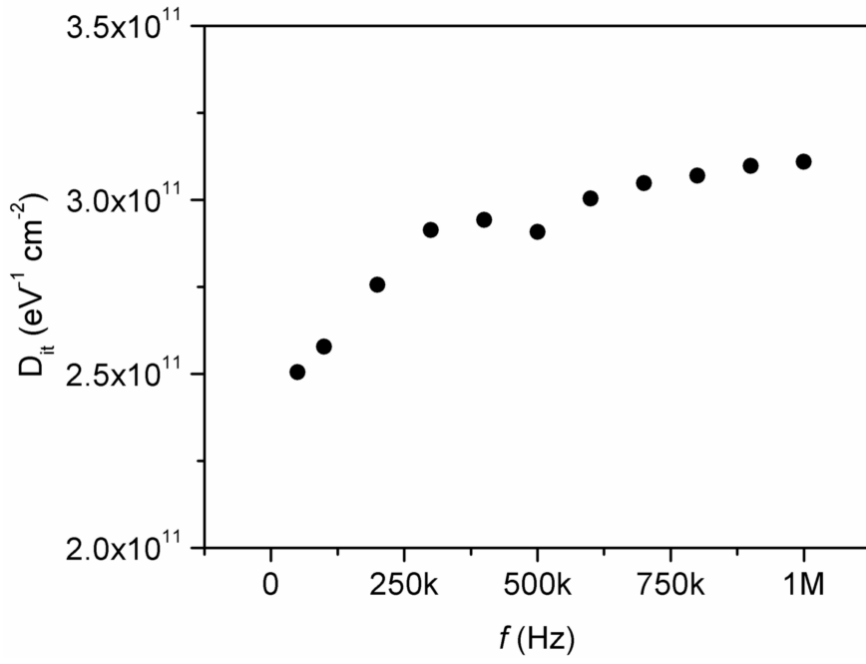


f

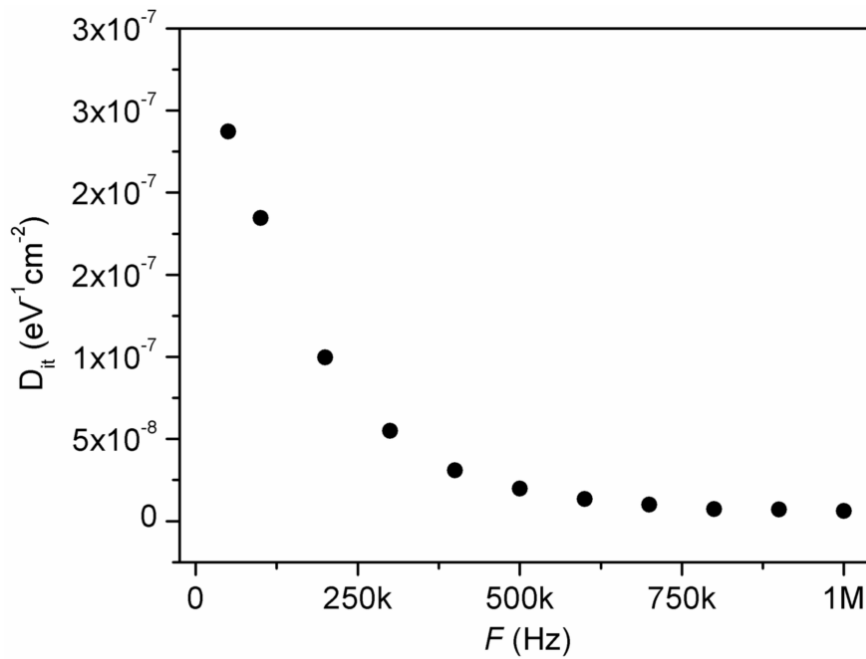
**Şekil 5.54.** a. Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyot b. %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot c. %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot d. %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot e. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot f. %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların farklı frekanslardaki  $G_{adj}$  eğrileri

p-Si/ZnO diyotların farklı frekanslarda çizilen  $G_{adj}$  grafiklerinin negatif bölgesinde oluşan piklerin değerleri kullanılarak arayüzey durum yoğunluğu  $D_{it}$  hesaplandı.

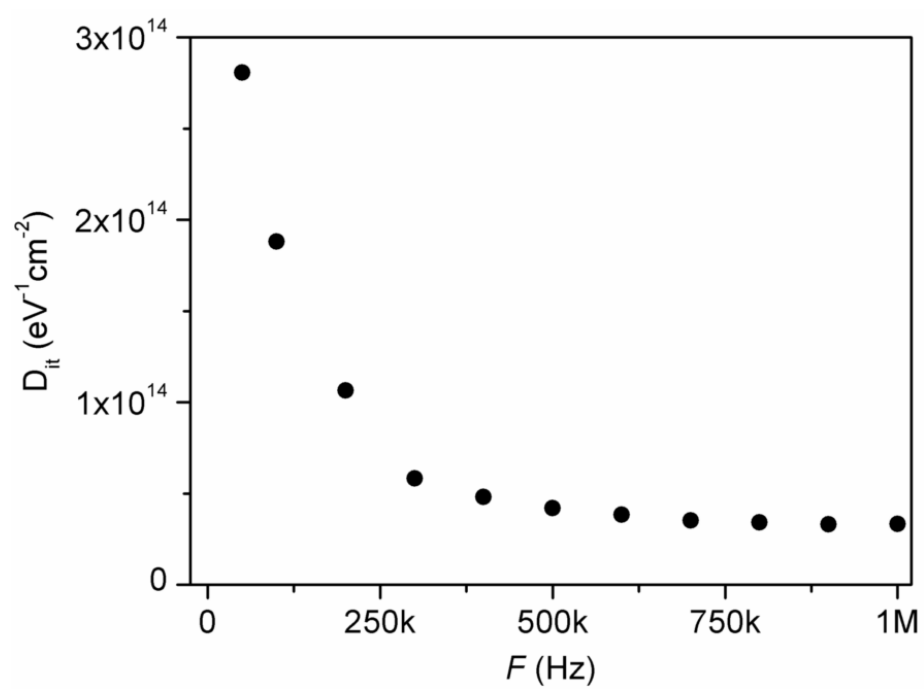
Şekil 5.55’de katkısız ve Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların  $D_{it}$  grafikleri verildi. Grafiklerde de görüldüğü gibi  $D_{it}$  değerleri frekansa bağlı olarak değişmektedir. Frekans arttıkça  $D_{it}$  değerleri azalmaktadır. Fakat her nasılsa katkısız ZnO diyot için artmaktadır.



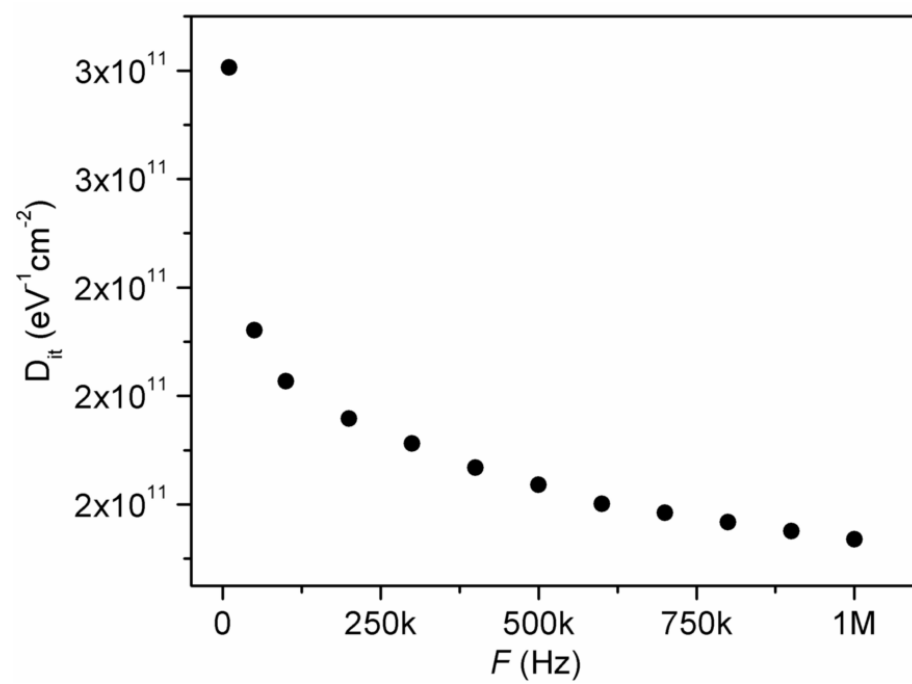
**a**



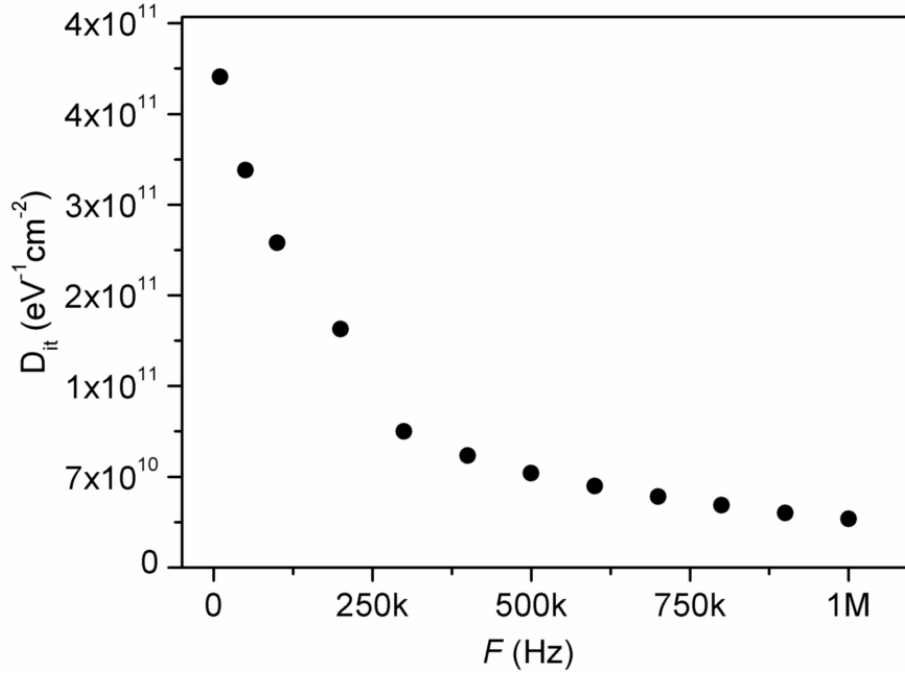
**b**



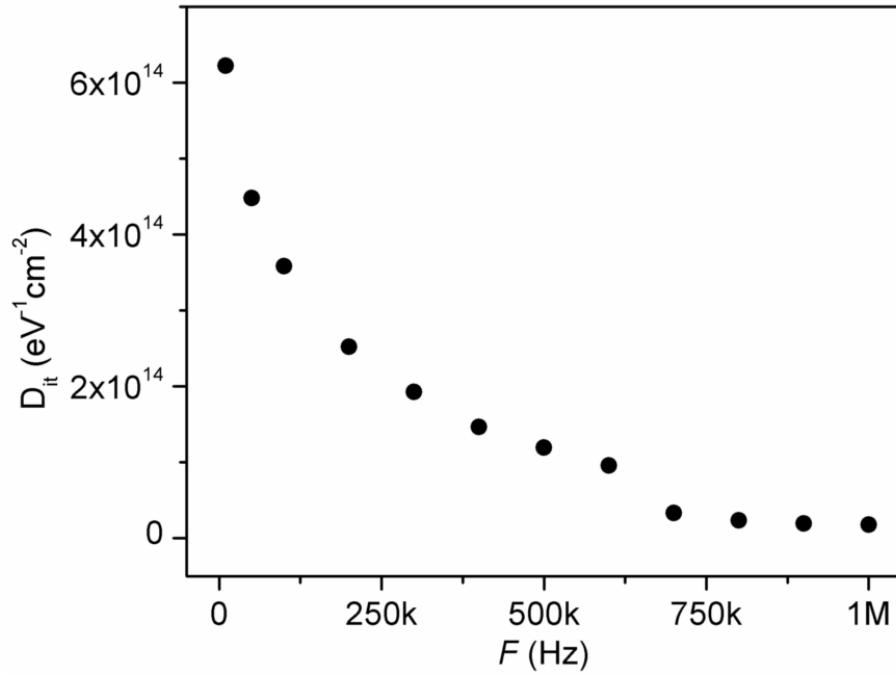
c



d



e



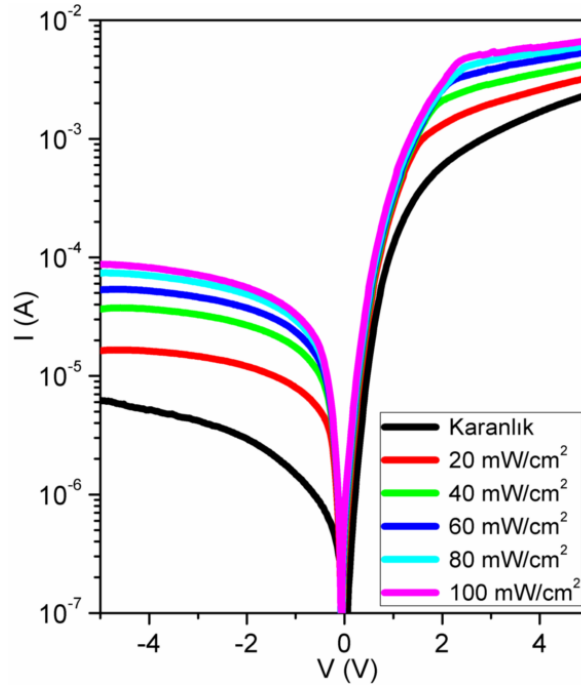
f

**Şekil 5.55.** a. Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyot b. %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot c. %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot d. %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot e. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyot f. %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların  $D_{it}$  eğrileri

### 5.4.3. Al/p-Si/ZnO/Al Diyotların Fotovoltaik ve Fotoiletkenlik Karakteristikleri

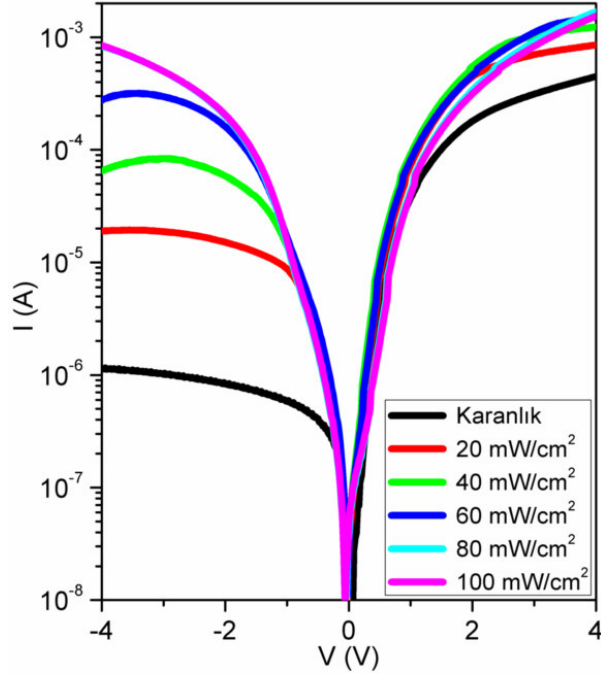
Katkısız, %0.1, %0.2, %0.5, %1 ve %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotların farklı aydınlanma şiddetleri altında I-V karakteristikleri şekil 5.56’ da verildi. Şekilde görüldüğü gibi aydınlanma şiddeti ile diyotun ters besleme akımı artmaktadır. Bu durum Al/p-Si/ZnO/Al diyotların fotoiletken davranış sergilediğini gösterir.

Diyotun karanlıktaki akım değeri  $6.52 \times 10^{-6}$  A. iken  $100 \text{ mW/cm}^2$  ışık altında ölçülen akım değeri  $9.3 \times 10^{-5}$  A.’dir.



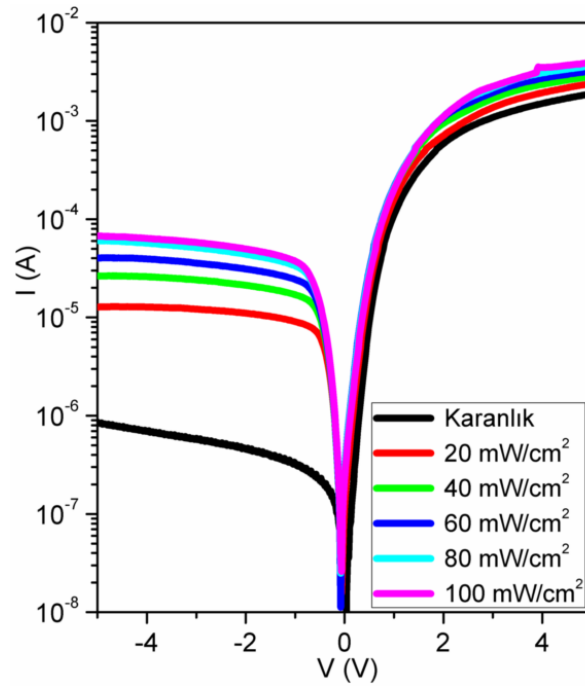
**Şekil 5.56.** Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristikleri

%0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı aydınlanma şiddetleri altındaki I-V karakteristiği şekil 5.57’de verildi. Şekilde görüldüğü gibi diyotun ters besleme akımı artan ışık şiddeti ile artmaktadır. Bu da diyotun fotoiletken davranış sergilediğini gösterir.



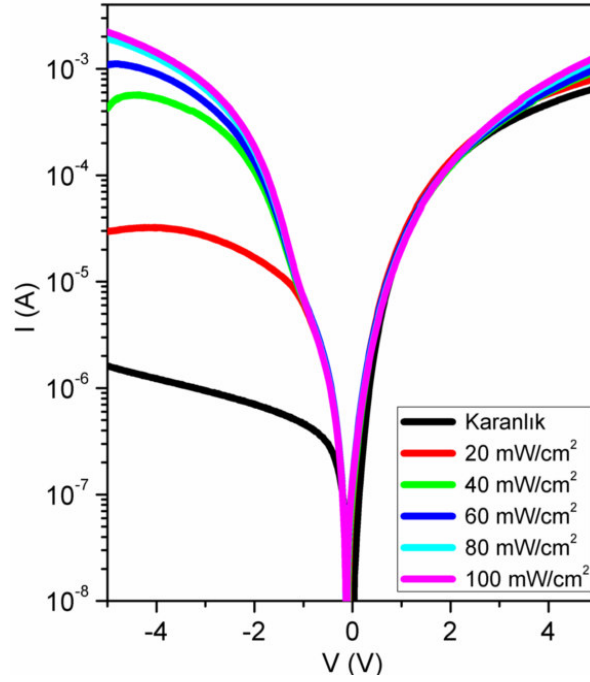
Şekil 5.57. %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristiği

Şekil 5.58’de %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı aydınlanma şiddetleri altındaki I-V karakteristiği verildi. Şekilde görüldüğü gibi diyotun ters besleme akımı artan ışık şiddeti ile artmaktadır. Bu da diyotun fotoiletken olduğunu gösterir.



Şekil 5.58. %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristiği

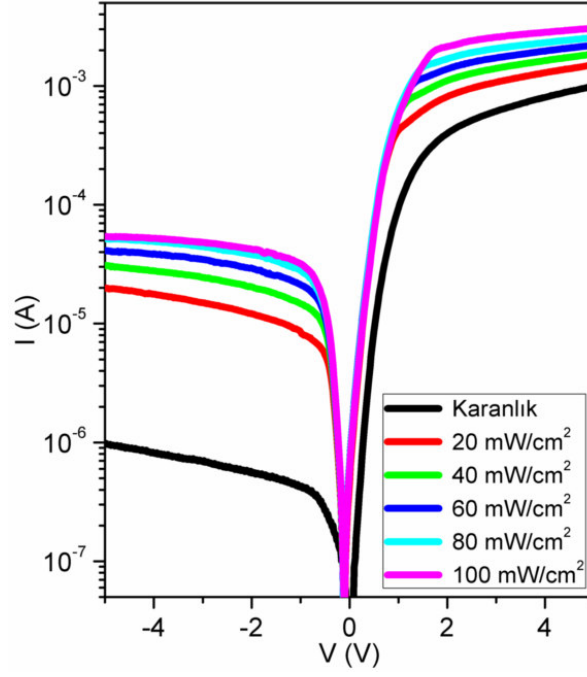
%0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı aydınlanma şiddetleri altındaki I-V karakteristiği şekil 5.59’da verildi. Şekilde görüldüğü gibi diyotun ters besleme akımı artan ışık şiddeti ile artmaktadır. Bu durum diyotun fotoiletken davranış sergilediğini gösterir.



**Şekil 5.59.** %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristiği

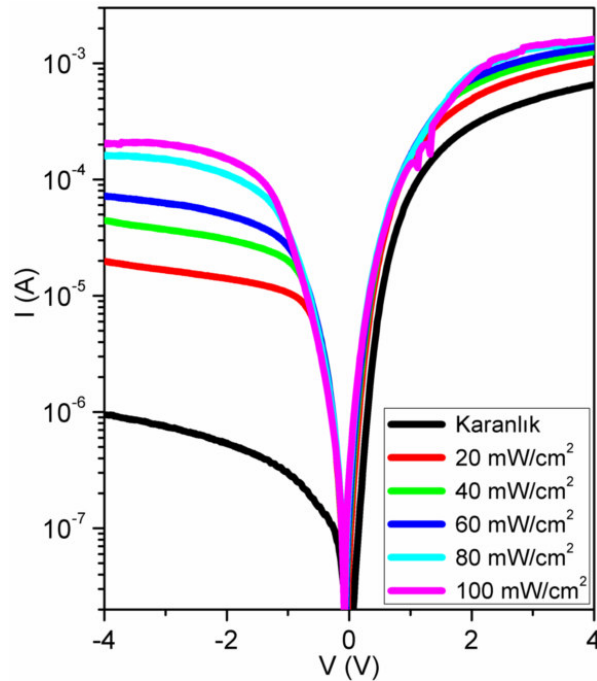
Şekil 5.60’ta %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı aydınlanma şiddetleri altındaki I-V karakteristiği verildi. Şekilde görüldüğü gibi diyotun ters besleme akımı artan ışık şiddeti ile artmaktadır. Bu da diyotun fotoiletken olduğunu gösterir.





**Şekil 5.60.** %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristiği

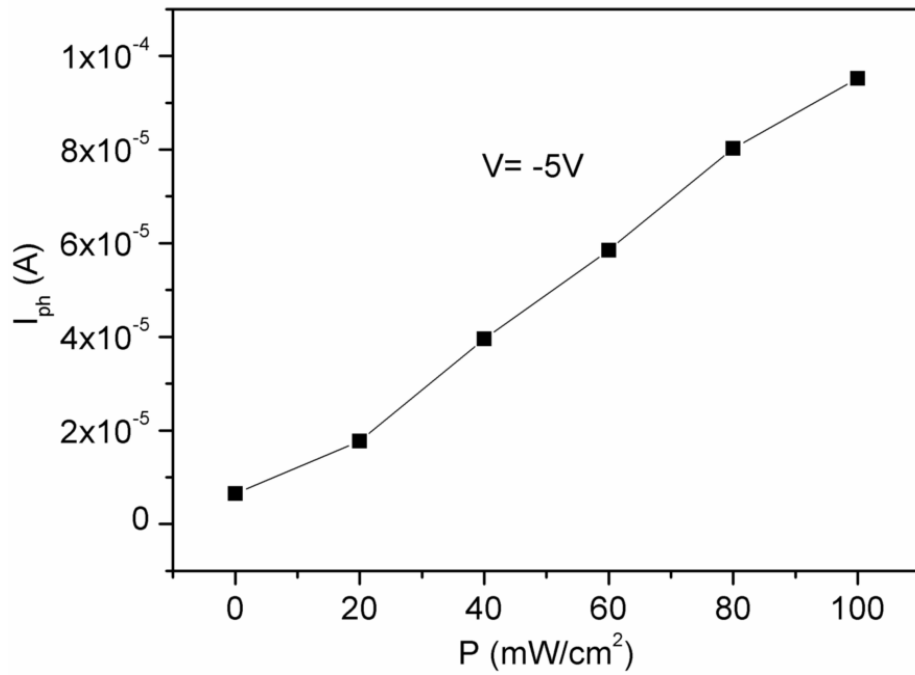
%2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı aydınlanma şiddetleri altındaki I-V karakteristiği şekil 5.61’de verilmiştir. Karakteristik eğride görüldüğü gibi diyotun ters besleme akımı artan ışık şiddeti ile artmaktadır. Bu durum diyotun fotoiletken davranış sergilediğini gösterir.



**Şekil 5.61.** %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V karakteristiği

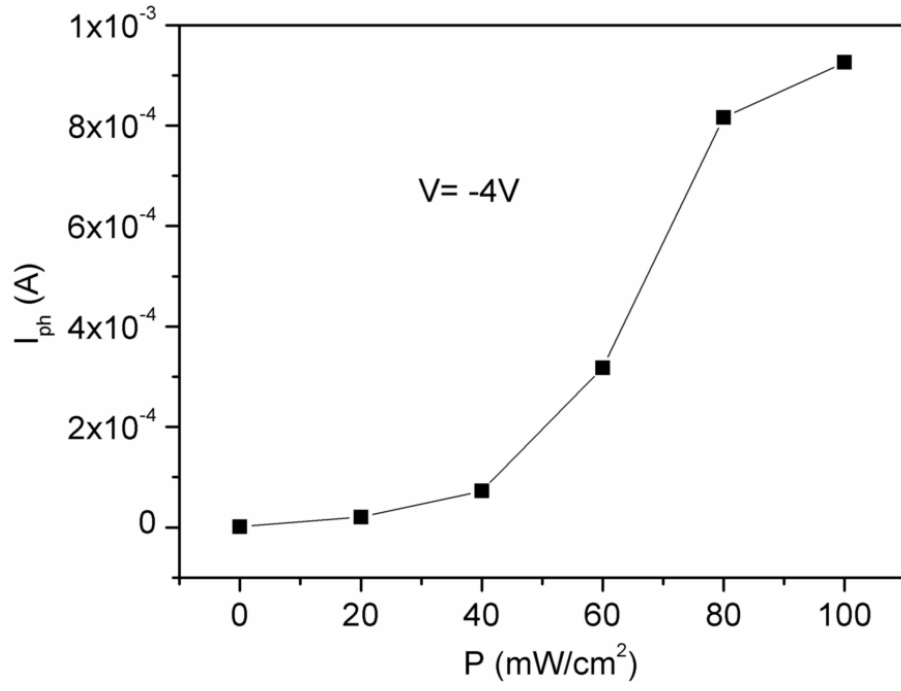
Al/p-Si/ZnO/Al diyotların fotoakım mekanizması denklem 5.8 ile analiz edildi. Diyotlar için elde edilen  $I_{ph}$ -P grafikleri şekil 5.62-5.67’de verildi. Diyotlar için  $m$  değerleri şekil 5.62-5.67 grafiklerinin eğiminden hesaplandı ve bu değerler Tablo 5.14’te verildi.

Şekil 5.62’de katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyotun sabit voltaj altında bulunan fotoakım değerleri grafikte görülmektedir. Diyot için  $m$  değeri 1.05 olarak bulundu.



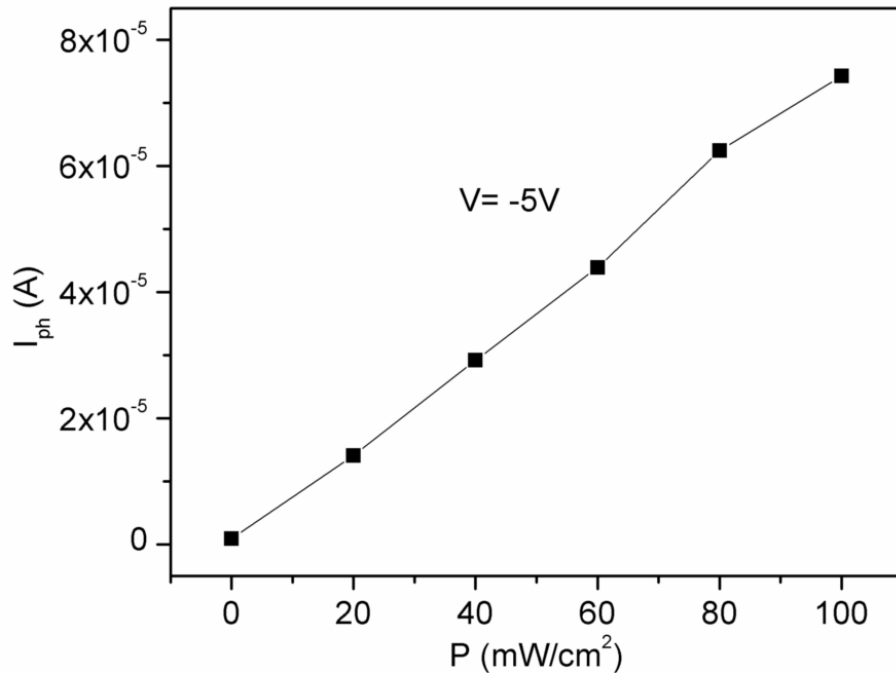
**Şekil 5.62.** Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi

Şekil 5.63’de %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun  $m$  değeri 2.54 bulundu.



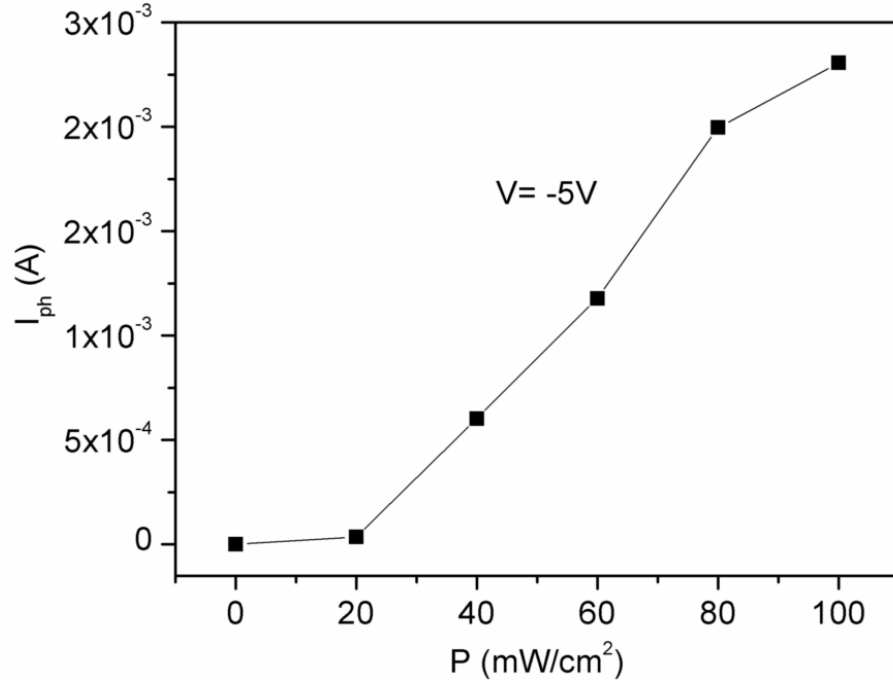
**Şekil 5.63.** %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi

%0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun m değeri 1.047 olarak hesaplandı.



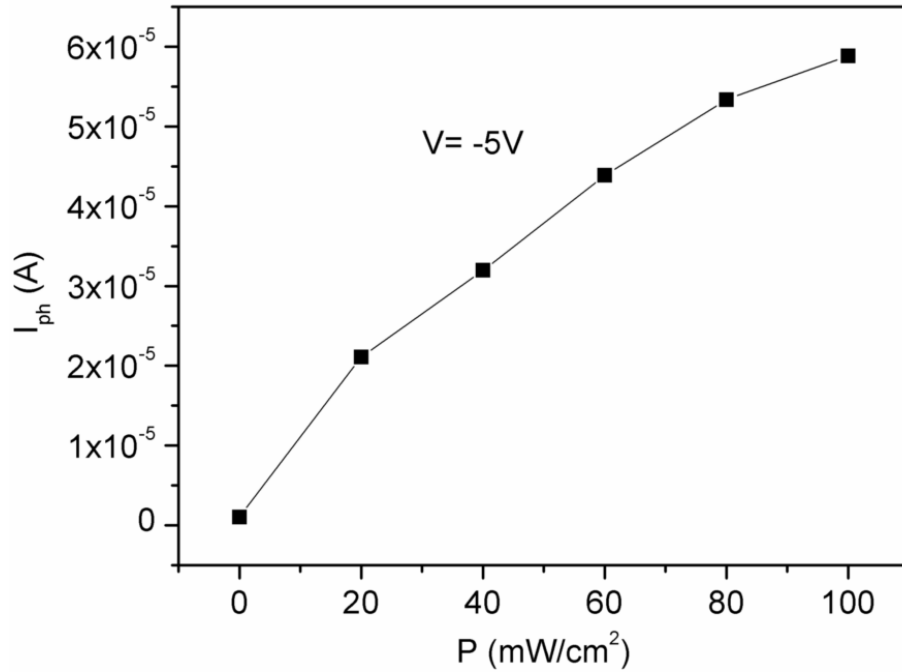
**Şekil 5.64.** %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi

Şekil 5.65 %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun m değeri 2.6 olarak bulundu.



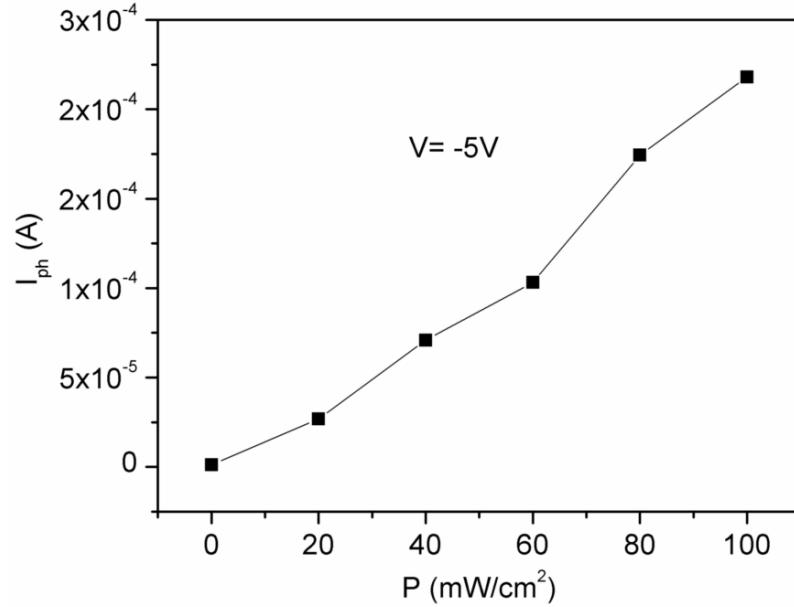
Şekil 5.65. %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi

%1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun  $m$  değeri 0.656 olarak bulundu.



Şekil 5.66. %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi

%2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun  $m$  değeri 1.3 olarak hesaplandı.



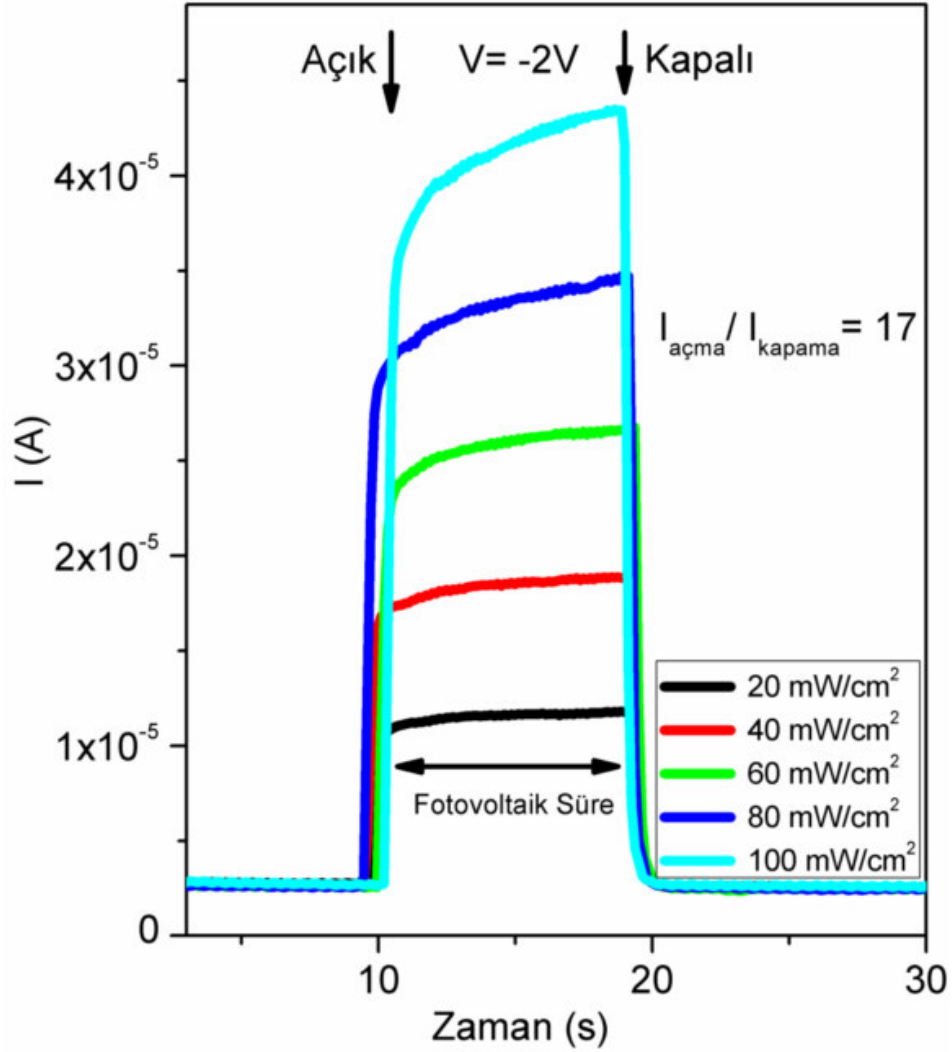
Şekil 5.67. %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi

Tablo 5.14. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotlar için elde edilen m değerleri

| Foto Diyot     | Katkı oranı     | m değerleri |
|----------------|-----------------|-------------|
| Al/p-Si/ZnO/Al | ZnO katkısız    | 1.05        |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.1 Ni katkılı | 2.54        |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.2 Ni katkılı | 1.047       |
| Al/p-Si/ZnO/Al | %0.5 Ni katkılı | 2.60        |
| Al/p-Si/ZnO/Al | % 1 Ni katkılı  | 0.656       |
| Al/p-Si/ZnO/Al | % 2 Ni katkılı  | 1.3         |

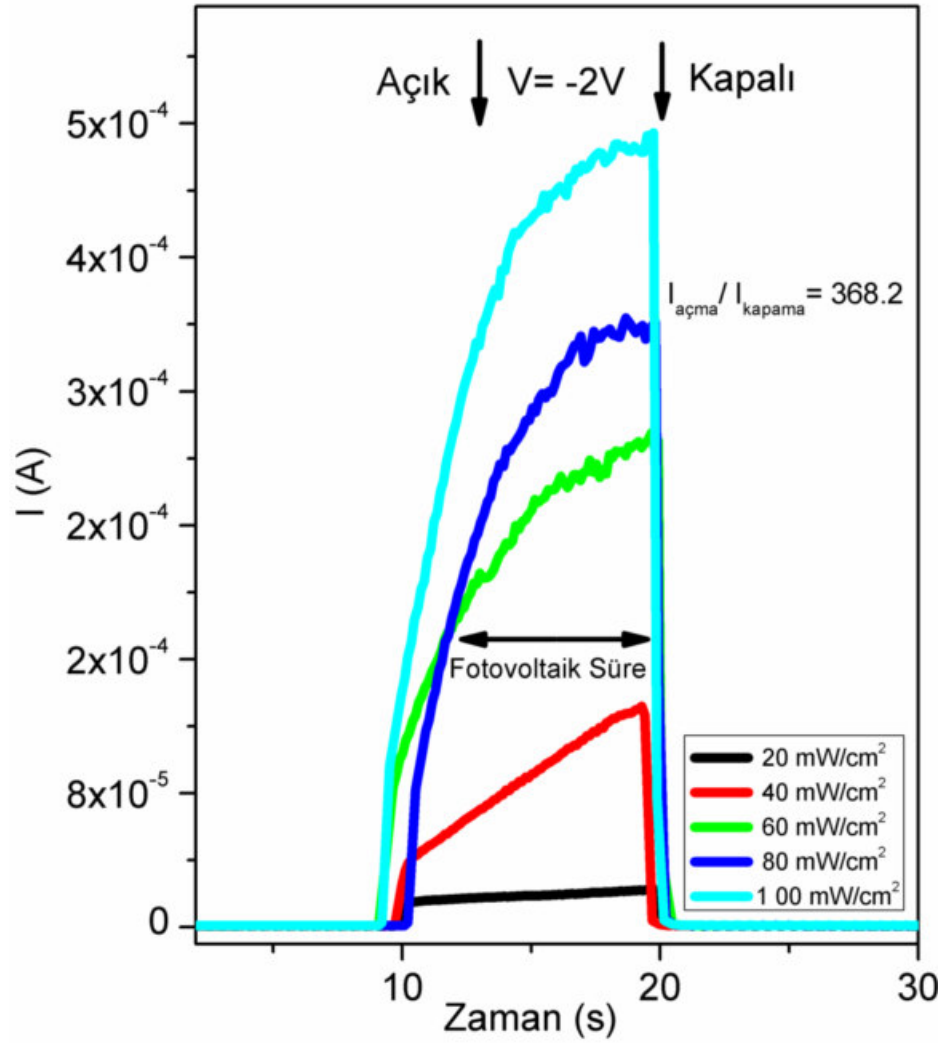
Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların fototransient akım ölçümleri farklı aydınlanma şiddetleri altında yapılarak akım-zaman grafikleri şekil 5.68-5.73 'te verildi. Şekillerde de görüldüğü gibi ışığın açılması ile akım başlangıçta aniden artmakta ve daha sonra kademeli olarak sabit bir değere ulaşmaktadır. Işık kapatıldığında ise akım ilk değerine ulaşmaktadır.

Şekil 5.68'de katkısız Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun farklı aydınlatma I<sub>ph</sub>-t grafiği verildi. Şekilde görüldüğü gibi ışığın açılması ile akım aniden artmakta ve daha sonra kademeli olarak sabit bir değere ulaşmaktadır. Işık kapatıldığında ise akım ilk değerine ulaşmaktadır. Diyotun 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddeti altındaki I<sub>açma</sub>/ I<sub>kapama</sub> değeri 17 olarak hesaplandı.



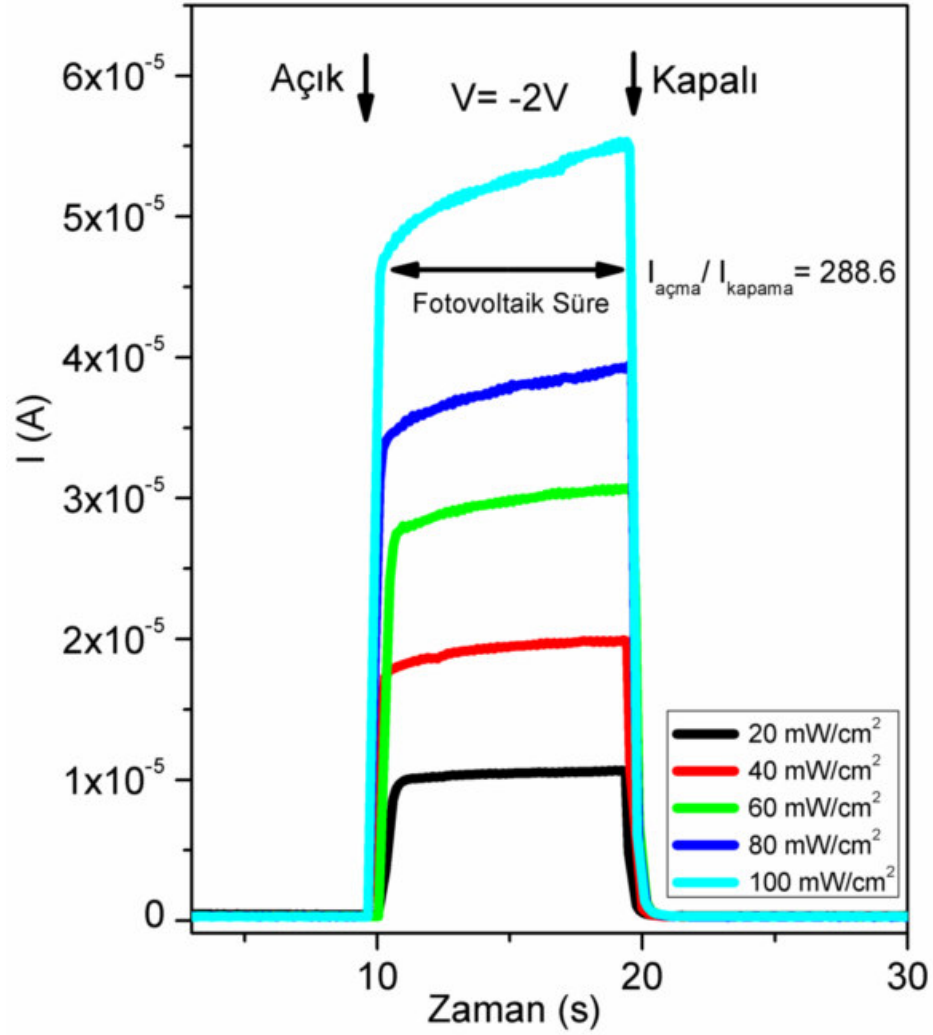
**Şekil 5.68.** Katkısız Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki  $I_{ph}$ -t eğrisi

Şekil 5.69'da %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun farklı aydınlatma şiddetleri altında çizilen  $I_{ph}$ -t grafiği verildi. Şekilde görüldüğü gibi ışığın açılması ile akım aniden artmakta ve daha sonra kademeli olarak sabit bir değere ulaşmaktadır. Işık kapatıldığında ise akım ilk değerine ulaşmaktadır. Diyotun 100  $mW/cm^2$  aydınlatma şiddeti altındaki  $I_{açma} / I_{kapama}$  değeri 368.2 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 5.69.** %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki  $I_{ph}$ -t eğrisi

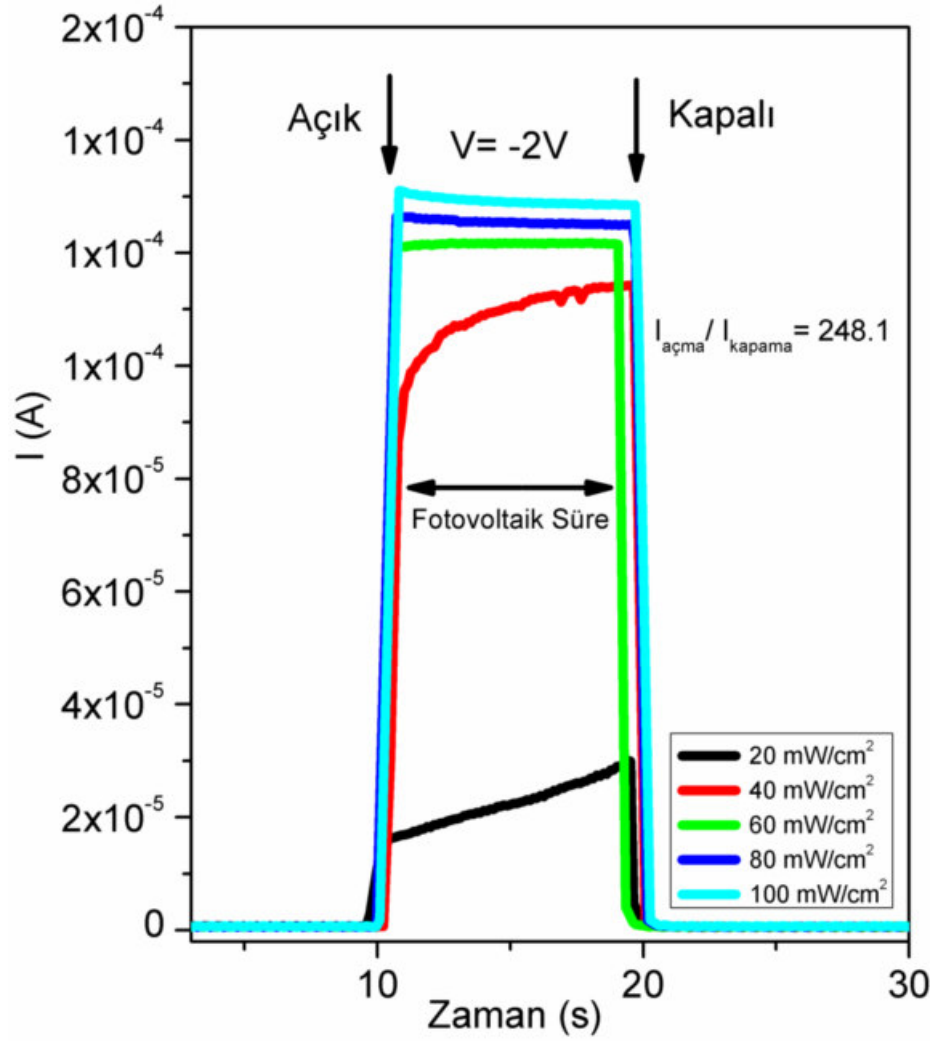
Şekil 5.70'te %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki  $I_{ph}$ -t grafiği verildi. Şekilde görüldüğü gibi ışığın açılması ile akım aniden artarak sabit bir değere ulaşmaktadır. Işık kapatıldığında ise akım ilk değerine ulaşmaktadır. Diyotun  $100 \text{ mW/cm}^2$  aydınlatmadaki  $I_{açma} / I_{kapama}$  değeri 288.6 olarak hesaplandı.



**Şekil 5.70.** %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki  $I_{\text{ph}}$ -t eğrisi

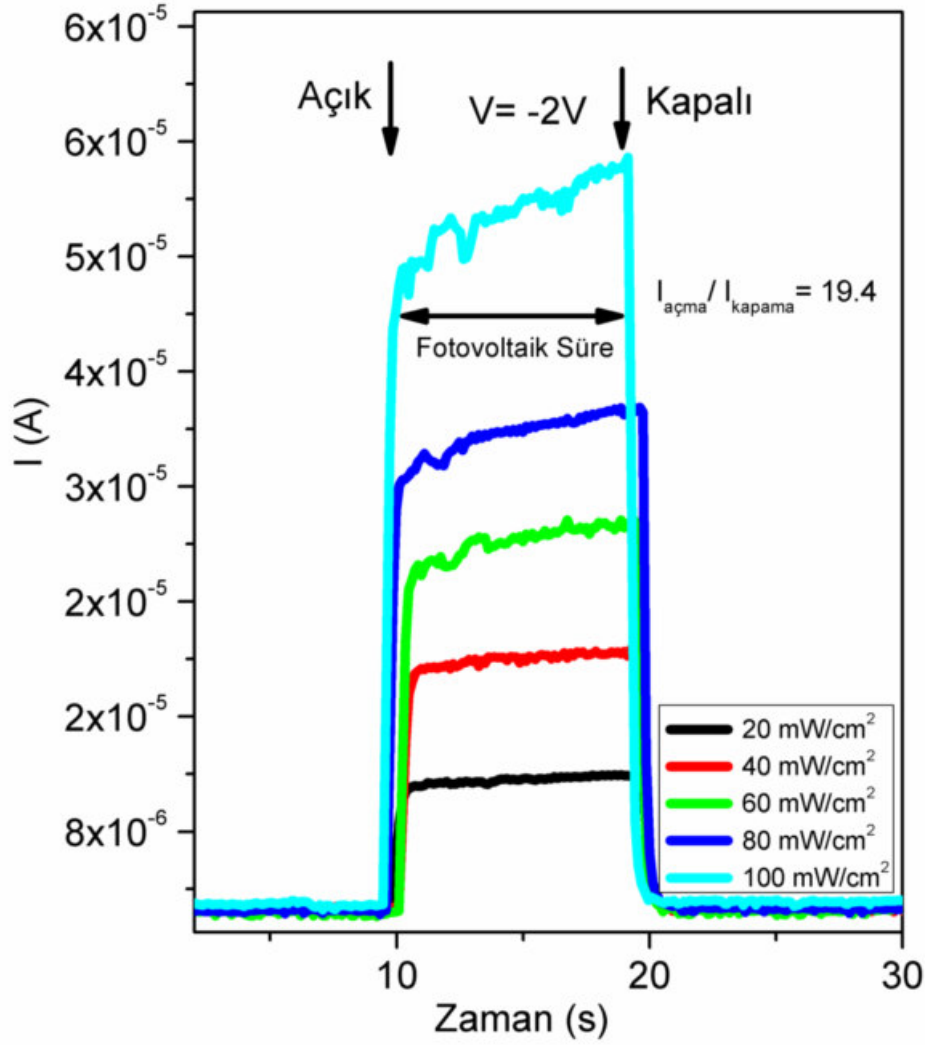
Şekil 5.71’de %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun farklı aydınlatma şiddeti altındaki  $I_{\text{ph}}$ -t grafiği verildi. Şekilde görüldüğü gibi ışığın açılması ile akım aniden artarak sabit bir değere ulaşmaktadır. Işık kapatıldığında ise akım ilk değerine ulaşmaktadır. Diyotun  $100 \text{ mW/cm}^2$  aydınlatmadaki  $I_{\text{açma}} / I_{\text{kapama}}$  değeri 248.1 olarak bulundu.





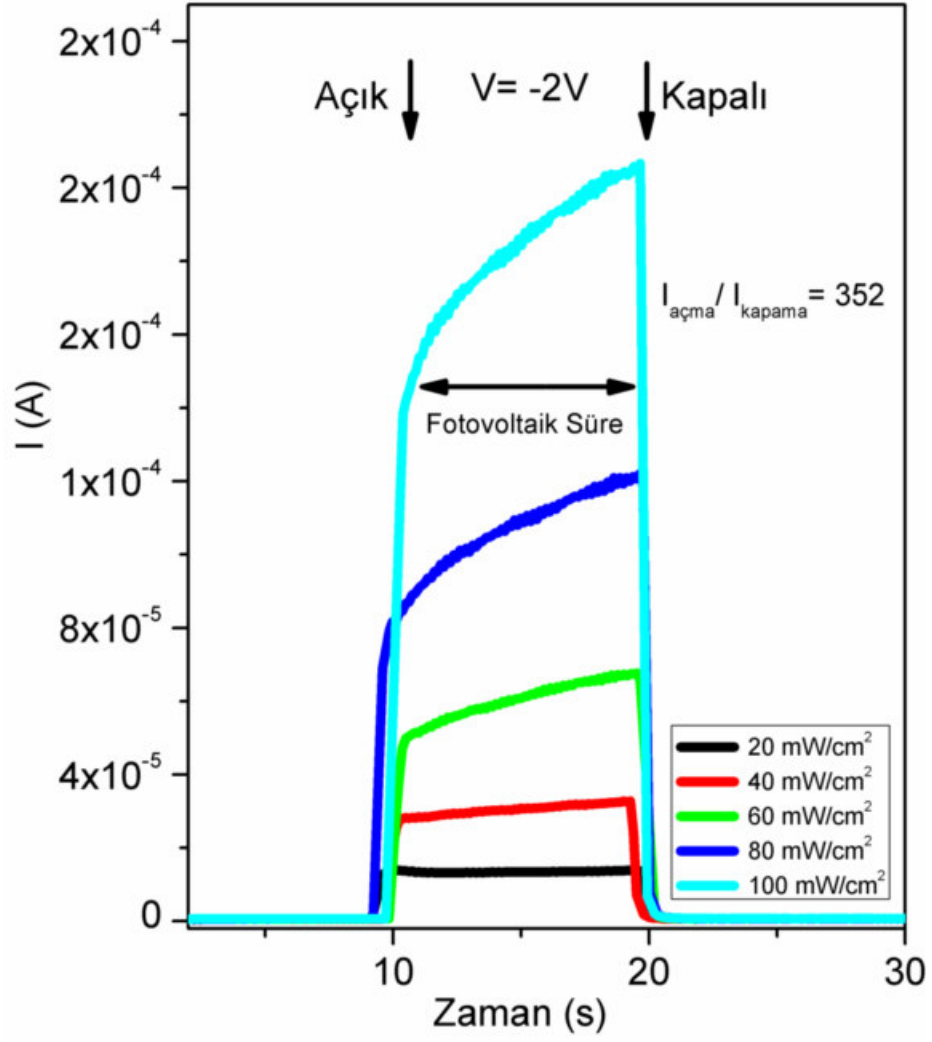
**Şekil 5.71.** %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki  $I_{ph}$ -t eğrisi

Şekil 5.72’de %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki  $I_{ph}$ -t grafiği verildi. Şekilde görüldüğü gibi ışığın açılması ile akım aniden artmakta ve daha sonra kademeli olarak sabit bir değere ulaşmaktadır. Işık kapatıldığında ise akım ilk değerine ulaşmaktadır. Diyotun  $100 \text{ mW/cm}^2$  aydınlatmadaki  $I_{açma} / I_{kapama}$  değeri 19.4 olarak hesaplandı.



**Şekil 5.72.** %1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki  $I_{ph}$ -t eğrisi

Şekil 5.73'te %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun farklı aydınlatma şiddeti altındaki  $I_{ph}$ -t grafiği verildi. Şekilde görüldüğü gibi ışığın açılması ile akım aniden artmakta ve daha sonra kademeli olarak sabit bir değere ulaşmaktadır. Işık kapatıldığında ise akım ilk değerine ulaşmaktadır. Diyotun 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatmadaki  $I_{açma} / I_{kapama}$  değeri 352 olarak bulundu.



Şekil 5.73. %2 Nikel katkılı Al/p-Si/ZnO/Al diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki  $I_{ph}$ -t eğrisi

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında katkılı ve katkısız CdO ve ZnO filmler ile p-Si/CdO ve p-Si/ZnO diyotları hazırlanmıştır. CdO ve ZnO filmler sol jel metodu ile üretildi. CdO ve ZnO filmlerin AFM resimlerinden faydalanılarak filmlerin yüzey özellikleri belirlendi.

CdO filmlerin yüzey pürüzlülüğü 118.21 nm ile 128.014 nm arasında değişirken çubuk çaplarının 800 nm ile 1263 nm arasında değiştiği görüldü. CdO filmlerde en büyük çubuk çapı 1029-1263 nm ve en düşük yüzey pürüzlülüğü 118.121 nm ile %1 Al katkılı CdO filmde ölçüldü buda çubuk çapının katkı ile büyüdüğünü göstermektedir.

Katkısız ve Al katkılı CdO filmlerin X-ışını kırınım spektrumu ölçümlerine göre numunelerin kristal boyutları Scherrer bağıntısı kullanılarak hesaplandı. Katkısız CdO numunenin kristal boyutu 23.59 nm, %0.1 Al katkılı numunenin boyutu 27.83 nm ve %1 Al katkılı numunenin boyutu 25.09 nm olarak bulundu.

ZnO filmlerin yüzey pürüzlülüğü 49.551 nm ile 135.893 nm arasında değişirken fiber çaplarının 104 nm ile 1719 nm arasında değiştiği görüldü. ZnO filmlerde en büyük fiber çapı 977-1719 nm ile %1 Ni katkılı ZnO filmde ölçülürken en düşük yüzey pürüzlülüğü 49.551 nm ile %2 Ni katkılı ZnO filmde görüldü.

Katkısız ve Ni katkılı ZnO filmlerin X-ışını kırınım ölçümlerine göre kristal boyutları hesaplandı. Katkısız ZnO numunenin kristal boyutu 62.52 nm, %0.1 Ni katkılı numunenin boyutu 27.94 nm ve %0.2 Al katkılı numunenin boyutu 33.94 nm, %0.5 Ni katkılı numunenin boyutu 50.23 nm ve %1 Ni katkılı numunenin boyutu 31.15 nm, %2 Ni katkılı numunenin boyutu 41.98 nm olarak bulundu.

Hazırlanan CdO ve ZnO filmlerin UV ölçümleri yapılarak soğrulma, geçirgenlik, yansıma ve yasak enerji aralığı grafikleri çizildi. Çizilen grafiklerden faydalanılarak yasak enerji aralıkları ( $E_g$ ) hesaplandı. Hesaplanan  $E_g$  değerleri literatürde verilen değerler ile karşılaştırıldı. Katkısız ve Al katkılı CdO ile Ni katkılı ZnO filmlerin  $E_g$  aralıkları literatürde [57-79] verilen  $E_g$  değerleri ile uyumlu olduğu görüldü. Katkısız CdO filmin  $E_g$  değeri ile Al katkılı CdO filmlerin  $E_g$  değerleri arasında ve katkısız ZnO filmin  $E_g$  değeri ile Ni katkılı ZnO filmlerin  $E_g$  değerleri arasında çok küçük sapmaların olduğu ve bu sapmaların foto diyotların performansını etkilediği gözlemlendi. Yapılan literatür taramasında sol jel yönteminin dışındaki diğer yöntemlerle hazırlanan CdO filmlerin  $E_g$  aralığı; Sputter metotta 2.4 eV ile 2.54 eV, Sprey pyrolysis metotta 2.3 eV ile 2.5 eV, kimyasal daldırma

metodunda ise 2.3 eV ile 2.63 eV olarak [63] bulunduğu görüldü. Sol jel yöntemi ile bulduğumuz CdO ve ZnO ince filmlerin  $E_g$  değerleri diğer yöntemler ile yapılan çalışmalarda elde edilen  $E_g$  değerleri ile de uyumlu olduğu görüldü.

Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların elektriksel karakterizasyonu için akım-voltaj (I-V) ölçümleri farklı ışık şiddetleri altındaki aydınlatmalarda yapıldı. Silisyum altlığı üzerine oluşturulan Al/p-Si/CdO/Al foto diyotlara  $\pm 2V$  ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotlara  $\pm 5V$  voltaj uygulanarak elektriksel ölçümleri yapıldı. Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların karanlıkta yapılan ölçümlerinde alınan veriler ile çizilen akım-voltaj karakteristik grafikleri, foto diyotların fotoiletken olduğunu göstermektedir. Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların doğru akımı analiz edilerek, ters polarma doyma akımı, idealite faktörü, engel yüksekliği gibi diyot parametreleri hesaplandı. Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların idealite faktörü değerleri, her bir foto diyotun karanlık durumdaki  $\ln I-V$  grafiğinin lineer kısmının eğiminden hesaplandı. Hesaplanan idealite faktörü değerleri, hem Al/p-Si/CdO/Al diyotlarda hem de Al/p-Si/ZnO/Al diyotlarda 1'den büyüktür. Bu durumun nedeni ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten kaynaklanmaktadır. Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al diyotların akımı voltaj ile üssel olarak arttığından dolayı diyotların I-V karakteristikleri termiyonik emisyon teorisi ile analiz edildi.

Al/p-Si/CdO/Al foto diyotların idealite faktörleri 3.21 ile 4.27 arasında değişmekle birlikte en düşük idealite faktörü değeri %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al foto diyotun 3.21 olarak hesaplandı. Al/p-Si/CdO/Al foto diyotların engel yüksekliği değerleri 0.623 eV ile 0.714 eV arasında değişirken en yüksek engel yüksekliği değeri %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al foto diyotun 0.714 eV olarak hesaplandı. Al/p-Si/CdO/Al foto diyotların doğrultma oranları  $1.55 \times 10^2$  ile  $6.2 \times 10^3$  arasında değişmekle birlikte en iyi doğrultma oranını  $6.2 \times 10^3$  değeri ile %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al foto diyot gösterdi.

Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların idealite faktörü değerleri 2.42 ile 3.56 arasında değişmekle birlikte en küçük idealite faktörü değeri %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun 2.42 olarak hesaplandı. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların engel yüksekliği değerleri 0.709 eV ile 0.768 eV arasında değişirken en yüksek engel yüksekliği değeri %2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun 0.768 eV olarak hesaplandı. Engel yüksekliği değerlerine bakıldığında Ni katkının engel yüksekliğini arttırdığı görülmektedir. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların doğrultma oranları  $3.78 \times 10^2$  ile  $2.18 \times 10^3$  arasında değişmekte olup en iyi doğrultma oranını  $2.18 \times 10^3$  değeri ile %0.2 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyot gösterdi.

Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların farklı frekanslarda C-V grafikleri çizildi. Grafiklerde Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların pozitif voltaj bölgesinde kapasitelerinin değişmediği fakat negatif voltaj bölgesinde kapasitelerin değiştiği görüldü. Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların C-V grafikleri ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösteremediği tespit edildi. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için paralel model kapasite oluşturularak  $C_{adj}$  grafikleri çizildi. Çizilen  $C_{adj}$  grafiklerinde oluşan pik değerleri diyotların arayüzey durum yoğunluğuna sahip olduklarını gösterdi. Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların farklı frekanslar için  $G_{adj}$  grafikleri çizildi.  $G_{adj}$  grafiklerinin negatif bölgesinde oluşan pik değerleri Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların arayüzey durum yoğunluğunun varlığını doğrulamaktadır.

Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların farklı ışık şiddetleri altındaki ters polarma bölgesinde sabit bir voltaja karşılık gelen fotoakım değerleri, I-V ölçümlerinde alınan verilerle çizilen grafiklerden bulundu. Sabit voltaj altında her bir foto diyot için bulunan fotoakım değerleri ile  $I_{ph}-P$  grafikleri çizildi.  $I_{ph}-P$  grafiklerin lineer bölgesinin eğimi kullanılarak diyotların  $m$  değerleri hesaplandı. Al/p-Si/CdO/Al foto diyotların  $m$  değerleri 0.208 ile 0.637 arasında değişirken, en yüksek  $m$  değeri %1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al foto diyotun 0.637 olarak hesaplandı. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların  $m$  değerleri 0.656 ile 2.60 arasında değişirken, en yüksek  $m$  değeri %0.5 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun 2.60 olarak hesaplandı.

Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların farklı ışık şiddetleri altındaki aydınlatmalarda optik cevap analizi yapılarak  $I_{ph}-t$  grafikleri çizildi.  $I_{ph}-t$  grafikleri ışığın açık olduğu durumda akımın bazı diyotlarda hızlı bir şekilde bazı diyotlarda ise kademeli olarak max değere yükseldiği ve ışık kapatıldığında akımın tekrar başlangıçtaki değere düştüğü görüldü. Al/p-Si/CdO/Al foto diyotların karanlık ile  $100\text{mW/cm}^2$  aydınlanma altındaki  $I_{açma}/I_{kapama}$  değerleri 3.96 ile 7.5 arasında değişirken, en yüksek  $I_{açma}/I_{kapama}$  değeri %0.1 Al katkılı Al/p-Si/CdO/Al foto diyotun 7.5 olarak hesaplandı. Al/p-Si/CdO/Al diyotların  $I_{açma}/I_{kapama}$  değerleri diyotların optik duyarlılıklarının iyi olduğunu göstermektedir. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotların karanlık ile  $100\text{mW/cm}^2$  aydınlanma altındaki  $I_{açma}/I_{kapama}$  değerleri 17 ile 368.2 arasında değişirken birlikte en yüksek  $I_{açma}/I_{kapama}$  değeri %0.1 Ni katkılı Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun 368.2 olarak hesaplandı. Al/p-Si/ZnO/Al diyotların  $I_{açma}/I_{kapama}$  değerleri diyotların optik duyarlılıklarının yüksek olduğunu göstermektedir.

Diyotların arayüzey özellikleri ve elektriksel parametreleri Ni ve Al katkılara bağlı olarak değiştiği görüldü. Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al diyotların doğrultma ve fotocevap özellikleri katkı miktarına bağlı olarak değiştiği tespit edildi. Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al diyotlarda en iyi foto duyarlılığın %0.1 Al ve Ni katkılıda olduğunu gösterdi. Al/p-Si/CdO/Al ve Al/p-Si/ZnO/Al diyotların fotocevap özelliklerine bakıldığında farklı metal katkılar kullanılarak bu özelliklerin geliştirilebildiği bulundu.

## KAYNAKLAR

- [1] **Yazıcı, D.**, 2007. Fosfin metal komplekslerinin fiziksel özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [2] **Yakuphanoglu, F.**, 2009. Organik Yarıiletkenler Fiziği, *ders notları*, Fırat Üniv. Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Elazığ.
- [3] **Gündüz, B.**, 2007. Organik yarıiletken foto diyotların hazırlanması ve opto Elektronik özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [4] **Bilgen, Y.**, 2008. Sol-gel yöntemi ile üretilen nano kristal ZnO:Ga ince filmlerinin optik ve mikro yapısal özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- [5] URL-1, <http://www.aof.anadolu.edu.tr/kitap/IOLTP/2279/unite06.pdf>.20 Mayıs 2010.
- [6] URL-2,[http://www.teknolojikarastirmalar.com/pdf/tr/01\\_040307\\_01\\_selver\\_tr.pdf](http://www.teknolojikarastirmalar.com/pdf/tr/01_040307_01_selver_tr.pdf). 15 Mayıs 2010.
- [7] **Kırmızıgül, F.**, 2008 CdO İnce filmlerin püskürtme yöntemi ile hazırlanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [8] **Sarioğlu, E.**, 2008. Bor katkılı silisyumun optik özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Dumlupınar Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [9] **Eren, O.**, 2006. Alüminyum katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [10] **Aksoy, S.**, 2006. Kalay katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [11] **Besler, B.**, 2007. Elektrokimyasal büyüme ile üretilen ZnO'nun katodik potansiyel değişimine bağlı olarak kristalografik ve optik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [12] **Ceylan, N.**, 2008. Gözenekli silisyumun optik ve elektriksel özelliklerine metalizasyon katkısının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [13] **Borazan, H.**, 2007. Yarıiletkenlerde kinetik olayların deneysel araştırma yöntemleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Yüzüncü Yıl Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.



- [14] **Demirci, B.**, 2006. İndiyum katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [15] **Kavasoğlu, N.**, 2006. Kimyasal püskürtme yönteminde osilatör frekansının ZnO ve alaşımlarının elektro optiksel özelliklerine etkisi, *Doktora Tezi*, Hacettepe Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [16] **Sarı, H.**, 2008. Yarıiletken Fiziği: Elektronik ve optik özellikler, *ders notları*, Ankara Üniv. Fizik Mühendisliği, Ankara.
- [17] **Cağlar M., Ilican S., Cağlar Y., Yakuphanoglu F.**, 2009. Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film, *Applied Surface Science*, 255, 4491–4496.
- [18] **Özkendir, Murat O.**, 2006. MnS, ZnO ve SnO<sub>2</sub> İnce filmlerin elektronik yapısının X-ışını soğurma spektroskopisi ile incelenmesi, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [19] **Demirci, B.**, 2006. İndiyum Katkılı ZnO İnce filmlerin bazı fiziksel özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [20] **Özbayraktar Nükhet, L.**, 2006. Atmalı plazma katodik ark yöntemi ile elde edilmiş ZnO ince filmlerde foto iletkenlik, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [21] **Aygün, H.**, 2007. ZnO:Al kaplanmış amorf camların optik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans tezi*, Sakarya Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [22] **Aksoy, S.**, 2006. Kalay katkılı ZnO ince filmlerin bazı fiziksel özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [23] **Kılıç, L.**, 2006. Seçici katkılı In<sub>0.48</sub>Al<sub>0.52</sub>As/In<sub>0.57</sub>Ga<sub>0.43</sub>As Heteroeklemlı yapılar da Saçılma mekanizmaları, *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [24] **S.M.,Sze, Kwok K. Ng.**, 2007. Physics of Semiconductor Device, Wiley Interscience, New Jersey.
- [25] **Bütün, S.**, 2006. The Growth fabrication and characterization of high performance Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N metal-semiconductor-metal photodiodes, *Yüksek Lisans Tezi*, Bilkent Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [26] **Çolak, H.**, 2010. Değişik metal katkılı II-VI tipi yarıiletkenlerin sentezlenmesi, karakterizasyonu ve elektriksel iletkenliklerinin ölçülmesi, *Doktora Tezi*, Erciyes Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

- [27] **Karakız, M.**, 2008. ZnO ince filmlerin yapısal ve optik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [28] **Dikici, M.**, 1993. Katıhal Fiziğine Giriş, Samsun.
- [29] **Boylestad, R., Nashelsky, L.**, 1994 Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi, Ankara.
- [30] **Gürdal, O.**, 2000. Algılayıcılar ve Dönüştürücüler, Ankara.
- [31] **Cafer, T.**, 2000. Katı Hal Elektroniği, İstanbul.
- [32] **Jagadish C., Peraton S.**, 2006. Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures, Elsevier.
- [33] **Ellis D. M., Irvine J. C.**, 2004. MOCVD of Highly Conductive CdO Thin Films, *Mater in Elect.*, 15, 369-372.
- [34] **Zhao Z., Morel D. L., Ferekides C. S.**, 2002. Electrical and Optical Properties of Tin-Doped CdO Films Deposited by Atmospheric Metalorganic Chemical Vapor Deposition, *Thin Solid Films*, 413, 203-211.
- [35] **Tosun, H.**, 2008. Ultrasonik spray pyrolysis yöntemiyle elde edilen CdO yarıiletken materyalinin flor katkısına bağlı olarak yapısal özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [36] **Dinek, T.**, 2006. CdO yarıiletken bileşiğinin spray pyrolysis yöntemi ile elde edilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [37] **Irmak, S.**, 2006. Flor katkılı CdO yarıiletken bileşiğinin spray pyrolysis yöntemi ile elde edilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [38] **Akyüz, İ.**, 2005. CdO filmlerinin bazı fiziksel özellikleri üzerine Al katkılama ve tavlama işlemlerinin etkileri, *Doktora Tezi*, Osmangazi Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [39] **Yakuphanoglu, F., Caglar, Y., Caglar, M., Ilican, S.**, 2010. ZnO/p-Si heterojunction photodiode by sol-gel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate, *Materials Science In Semiconductor Processing* 13 ,137–140.
- [40] **Ferreira,M.P., Gomes R.C., G,J., Petraglia, A.**, 2010. Current mode read-out circuit for InGaAs photodiode applications, *Microelectronics Journal* 41, 388–394.
- [41] **Bıyıklı, N.**, 2004. High-Performance  $Al_x Ga_{1-x}$  N-Based UV Photodetectors for Visible/Solar-Blind Applications, *Doktora Tezi*, Bilkent Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [42] **Johnson, Mark.,** 2003. Photodetection and Measurement. Blacklick, OH, USA: McGraw-Hill Professiona Publishing, p. 14, 15.
- [43] **Sze, S.M., Gibbons, G.,** 1966. Avalanche breakdown voltages of abrupt and linearly graded p-n junctions in Ge, Si, GaAs and GaP, *Appl. Phys. Lett.* 8, 111.
- [44] **Yakuphanoglu, F., Faroog Aslam, W.** 2011. Organic-inorganic photosensor controlled by frequency based on nanostructure 1,4-diaminoanthraquinone and p-silicon, *Synthetic metals*, 161, 324-329.
- [45] **Roberts, R., Fox, J.J., and Martin, A.M.,** 1932. Photo-Conductivity of diamonds, *Nature*, 129, 579.
- [46] **Moss, T.S., Pincherle, L. and Wood Ward, A.M.,** 1953. Photoelectromagnetic and Photodiffusion effects in germanium, *Proc. Phys. Soc. (Lond.)*, 66B, 743-52.
- [47] **Yakuphanoglu, F.,** 2007. Electronic and photovoltaic properties of Al/p-Si/copper/phthalocyanine photodiode junction barrier, *Solar energy aterials&Solar Cells*, 91, 1182-1186.
- [48] **Tauc, J.,** 1959. Generation of an e.m.f. in semiconductors with-equilibrium Current Carrier Concentrations, *Rev. Mod. Phys.*, 29, 308-24.
- [49] **Kallmann, H., Kramer, B., Shain, J. and Spruch, G.M.,** 1960. Photovoltaic effects in CdS crystals, *Phys. Rec.*, 117, 1482-1486.
- [50] **Kallmann, H. and Pope, M.,** 1959. Photovoltaic effect in organic crystals, *J. Chem. Phys.*, 30, 585-6.
- [51] **Geacintov, N.E., Pope, M. and Kallmann, H.,** 1966. Photogeneration of charge carriers in tetracene, *J. Chem. Phys.*, 45, 2639-49.
- [52] **Verstimakha, YA. I., Kurik, M.V., Lopatrin, Yu, M. and Tsikora, L.N.,** 1973, hotoconductivity of pentanene crystals, *Soviet Phys., Solid State*, 15, 666.
- [53] **Meier, H.,** 1974. Organic Semiconductors-Dark and photoconduvtivity of organic Solids, *Verlag-Chemie*, Germany.
- [54] **Durak, M.,** 2002. Silikon Foto diyotların Optik Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi* ,Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- [55] **Hovel, H. J.,** 1975. Solar Cells, Semiconductors and Semimetals, Vol. 11 (*Eds., R.K. Willardson ve A.C. Beer*), *Academic Press*, New York.
- [56] **Dökme, İ.,** 2002. Al/p-Si ve Au/n-Si Schottky Diyotlarda I-V ve C-V Karakteristiklerinin Geniş Bir Sıcaklık Aralığında Analizi, *Doktora Tezi*, Gazi Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [57] **Köse, S., Atay, F., Bilgin, V., Akyüz, İ.,** 2009. In doped CdO films: Electrical, optical, structural and surface properties, *international journal of hydrogen energy*, 34, 5260 – 5266.
- [58] **Dakhel, A.A.,** 2011. Effect of thermal annealing in different gas atmospheres on the structural, optical, and electrical properties of Li-doped CdO nanocrystalline films, *Solid State Sciences*, 13, 1000-1005.
- [59] **Dakhel, A.A.,** 2010. Effect of tellurium doping on the structural, optical, and Electrical properties of CdO, *Solar Energy*, 84, 1433–1438.
- [60] **Dakhel, A.A.,** 2010. Electrical and optical properties of iron-doped CdO, *Thin Solid Films*, 518, 1712–1715.
- [61] **Yakuphanoglu, F.,** 2010. Nanocluster n-CdO thin film by sol–gel for solar cell applications, *Applied Surface Science*, 257, 1413–1419.
- [62] **Farag, A.A.M., Çavaş, M., Yakuphanoglu, F., Amanullahd, F.M.,** 2011. Photoluminescence and optical properties of nanostructure Ni doped ZnO thin films prepared by sol–gel spin coating technique, *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 7900– 7908.
- [63] **Yakuphanoglu, F., Çağlar, Y., Çağlar, M., İlcan, S.,** 2010. ZnO/p-Si heterojunction photodiode by sol–gel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13, 137–140.
- [64] **Mekhnache, M., Drici, A., Saad Hamideche, L., Benzarouk, H., Amara, A., Cattin, L., C. Bernede, J., Guerioune, M.,** 2011. Properties of ZnO thin films deposited on (glass, ITO and ZnO:Al) substrates, *Superlattices and Microstructures*, 49,510–518.
- [65] **Shan, F.K., Yu, Y.S.,** 2004. Band gap energy of pure and Al-doped ZnO thin films, Makale, *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 1869–1872.
- [66] **Ilcan, S., Yakuphanoglu, F., Çağlar, M., Çağlar, Y.,** 2011. The role of pH and boron doping on the characteristics of sol gel derived ZnO films, *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 5290–5294.
- [67] **Hasançebi, Ö.,**2006. Sol-Gel Yöntemiyle Hazırlanan Bakır Oksit İnce Filmlerin Elektriksel, Yapısal Ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [68] **Şener, D.**, 2006. Sol-Gel Yöntemiyle Hazırlanan Metal Oksit İnce Filmleri Elektriksel, Yapısal Ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [69] **Aksoy, S., Çağlar, Y., Ilican, S., Çağlar, M.**, 2009. Effect of heat treatment on physical properties of CdO films deposited by sol–gel method, *international journal of hydrogen energy*, 34, 5191–5195.
- [70] **Gulino, A., Tabbi, G.**, 2005. CdO thin films: a study of their electronic structure by electron spin resonance spectroscopy, *Applied Surface Science*, 245, 322– 327.
- [71] **Fan, D.H.**, 2009. Catalyst-free growth and crystal structures of CdO nanowires and nanotubes, *Journal of Crystal Growth*, 311, 2300–2304.
- [72] **E. Pınar Özbey**, 2004. Sol-Gel Yöntemiyle Hazırlanan SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> Esaslı Yansıtımayıcı Kaplamalar, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [73] **Yakuphanoglu, F., Farooq, W.A.**, 2011. Photoresponse and Electrical characterization of photodiode based nanofibers ZnO and Si, *Materials Science in Semiconductor Processing*, baskıda
- [74] **Yakuphanoglu, F.**, 2011. Controlling of electrical and interface state density properties of ZnO:Co/p-silicon diode structures by compositional fraction of cobalt dopant, *Microelectronics Reliability*, baskıda
- [75] **Yakuphanoglu, F., Ocak, Y.S., Kılıcoglu, T., Farooq, W.A.**, 2011. Interface control and photovoltaic properties of n-type silicon/metal junction by organic dye, *Microelectronics Reliability*, baskıda
- [76] URL-3, <http://megep.meb.gov.tr/indextr.html>, 2010.
- [77] **Farag, A.A.M, Farooq, W.A. , Yakuphanoglu, F.**, 2011. Characterization and performance of Schottky diode based on wide band gap semiconductor ZnO using a low-cost and simplified sol–gel spin coating technique, *Microelectronic Engineering*, baskıda.
- [78] **Suwanboon, S., Amornpitoksuk, P., Muensit, M.**, 2011. Dependence of photocatalytic activity on structural and optical properties of nanocrystalline ZnO powders, *Ceramics International*, baskıda
- [79] **Yakuphanoglu, F., Farooq, W.A.**, 2011. Organic–inorganic photosensor onttrolled by frequency based on nanostructure 1,4- diaminoanthraquinone and p-silicon, *Synthetic Metals*, 161, 324-329.

## ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Elazığ Baskil ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Baskil Yatılı İlköğretim Bölge Okulunda tamamladı. Lise öğrenimini Malatya Şehit Kemal Özalper Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Bölümünde tamamladı. 1997 Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Bölümünden mezun oldu. 2004 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü Kontrol Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamladı. 2008 güz döneminde Fırat üniversitesi Metalurji Eğitimi Anabilim dalında doktora öğrenimine başladı. Halen Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Elbistan Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.