

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

**İKİ BİLEŞENLİ ZnCdO FOTODİYOTLARIN ÜRETİLMESİ VE
ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ahmet ŞEVİK**

**FİZİK ANABİLİM DALI
FİZİK PROGRAMI**

**Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Ü Burhan COŞKUN
Eş Danışman: Prof.Dr. Murat SOYLU**

Temmuz 2019

ÖN SÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarım sürecinde gösterdiği maddi, manevi destekleri ve sabrından dolayı çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Burhan COŞKUN' a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca yardımlarını benden esirgemeyen Bingöl Üniversitesi Fizik bölümü öğretim üyesi eş danışmanım sayın Prof. Dr. Murat SOYLU'ya, Kırklareli Üniversitesi Fizik bölümü hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Mümin Mehmet Koç, Dr. Berna AKGENÇ ve Dr. Hale KARAYER hocalarıma da teşekkür ederim.

Numunelerimin hazırlanması ve deneysel ölçümler aşamasında yardımlarını esirgemeyen Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölüm Öğretim Üyesi sayın Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU ve sayın Öğr. Gör. Dr. Ayşegül DERE hocalarıma sonsuz teşekkür ederim.

Her zaman benden yardımlarını esirgemeyen, bu tez çalışmamda da maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme de teşekkür ederim.

Bu çalışma, Kırklareli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi tarafından KLUBAP-178'Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Temmuz 2019

Ahmet ŞEVİK

İÇİNDEKİLER

ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	5
2.1. Yarıiletkenler.....	5
2.1.1. Bant Teorisi.....	7
2.1.2. Fermi-Dirac Fonksiyonu	10
2.1.3. Yarıiletken Türleri.....	12
2.1.3.1. Katkısız (intrinsic) Yarıiletken	13
2.1.3.2. Katkılı (extrinsic) Yarıiletkenler.....	14
2.1.3.2.1. n-tipi Yarıiletkenler.....	14
2.1.3.2.2. p-tipi Yarıiletkenler.....	15
2.1.4. Yarıiletkenlerin Özellikleri	16
2.1.4.1. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri.....	16
2.1.4.2. Yarıiletkenlerin Optiksel Özellikleri	17
2.1.5. Fotodiyotlar.....	18
2.1.5.1. Metal-Yarıiletken Fotodiyotlar	18
2.1.5.2. p-i-n Eklem Fotodiyotlar.....	20
2.1.5.3. Schottky Fotodiyot.....	20
2.1.5.4. Heteroeklem Fotodiyot	21
2.1.5.5. Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği	22
2.1.5.6. Fotodiyotların Kapasite-Voltaj Karakteristiği	23
2.2. ZnO ve CdO Bileşiklerinin Genel Özellikleri.....	23
2.2.1. ZnO Bileşiğinin Genel Özellikleri	23
2.2.2. CdO Bileşiğinin Genel Özellikleri	25
2.3. Sol-Jel Metodu	26
2.3.1. Sol-jel Yönteminin Avantajları.....	28

2.3.2. Sol-jel Yönteminin Dezavantajları.....	29
2.3.3. Sol-Jel Kaplama Yöntemleri	30
2.3.3.1. Daldırarak Kaplama (dip coating).....	30
2.3.3.2. Püskürterek Kaplama (Spray Pyrolysis)	31
2.3.3.3. Spin Kaplama (Spin Coating)	31
2.3.3.3.a. Birinci Adım	32
2.3.3.3.b. İkinci Adım	32
2.3.3.3.c. Üçüncü Adım.....	33
2.3.3.3.d. Dördüncü Adım.....	33
2.3.4. Sol-Jel Uygulamaları.....	34
3.MATERYAL VE METOT	37
3.1. Deneysel İşlemler	37
3.2. KatkıSIZ ZnO ve CdO Katkılı ZnO-CdO İnce Filmlerin Optik Özellik Analizi ..	38
3.3. KatkıSIZ ZnO ve CdO Katkılı ZnO İnce Filmlerin Elektriksel Özellik Analizi ..	38
3.4. KatkıSIZ ZnO ve CdO Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yüzey Özellik Analizi	39
4.ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	41
4.1. ZnO-CdO İnce Filmlerin Yüzey Özellikleri.....	41
4.2. ZnO-CdO İnce Filmlerin Optik Özellikleri	42
4.3. ZnO-CdO İnce Filmlerin Elektriksel Ölçüm Sonuçları.....	47
4.3.1. ZnO-CdO/n-Si Diyotlarının Foto Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri	47
4.3.2. ZnO-CdO/n-Si Diyotlarının Foto Akım-İletim (I-P) Karakteristikleri	49
4.3.3. ZnO-CdO/n-Si Diyotlarının Foto Akım-Zaman (I-t) Karakteristikleri.....	52
4.3.4. Al/ZnO-CdO/n-Si Diyotlarının Foto Kapasitans-Zaman (C-t) Karakteristikleri.....	54
4.3.5. Al/ZnO-CdO/n-Si Diyotlarının Foto Kapasitans-Voltaj (C-V) Karakteristikleri.....	56
4.3.6. ZnO-CdO/n-Si Foto diyotlarının Arayüzey Durum Özellikleri	60
5.SONUÇ VE YORUM.....	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	73

KISALTMALAR

Simge		Birim
I	: Akım	(A)
J	: Akım yoğunluğu	$(\frac{A}{cm^2})$
μ	: Mobilite	$(\frac{cm^2}{V.s})$
E_c	: İletim bandı minimum enerji seviyesi	(eV)
E_v	: Valans bandı maksimum enerji seviyesi	(eV)
E_f	: Fermi enerjisi	(eV)
E_g	: Yasak enerji aralığı	(eV)
p	: Boşluk konsantrasyonu	(cm^{-3})
σ	: İletkenlik	$(\Omega.m)^{-1}$
T	: Mutlak sıcaklık	(K)
I_0	: Ters doyma akımı	(A)
n	: 1 cm ³ te bulunan yük taşıyıcı sayısı	(taşıyıcılar/m ³)
$h\nu$: Foton enerjisi	(eV)
R	: Direnç	(Ω)
R_s	: Seri direnç	(Ω)
q	: Yük	(C)
P	: Güç	(Watt)
F_f	: Doldurma faktörü	(%)
V_{oc}	: Açık devre voltajı	(V)
I_{sc}	: Kısa devre akımı	(A)
ρ	: Özdirenç	($\Omega.m$)
k_B	: Boltzmann sabiti	($J.K^{-1}$)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin $T=0$ K de enerji band aralıkları .6	6
Şekil 2.2. Elektriksel özellikleri bakımından yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemeler7	7
Şekil 2.3. Yarıiletkenlerin band yapısı.....8	8
Şekil 2.4. Fermi-Dirac dağılımı9	9
Şekil 2.5. Fermi enerji seviyelerinin $T = 0$ K ve $T > 0$ K sıcaklıklarındaki konumları..10	10
Şekil 2.6. Fermi-dirac fonksiyonunun $f(E)$ enerji ile değişim grafiği.....11	11
Şekil 2.7. Katkılı ve katkısız yarıiletkenlerde $T = 0$ K'de fermi enerji seviyesi12	12
Şekil 2.8. Katkılı ve katkısız yarıiletkenlerde enerji seviyeleri12	12
Şekil 2.9. Katkısız yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonu13	13
Şekil 2.10. Katkısız yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonunun sıcaklıkla değişim grafikleri;.....13	13
Şekil 2.11. n-tipi yarıiletkenin oluşum şeması ve n-tipi yarıiletkenlerdeki enerji band seviyeleri15	15
Şekil 2.12. p-tipi yarıiletkenin oluşum şeması ve p-tipi yarıiletkenlerdeki enerji band seviyeleri [15].....16	16
Şekil 2.13. Fotonlarla uyararak (a) bantlar arası geçiş (b) safsızlık seviyesi ile iletim bandı arasındaki foto uyarma18	18
Şekil 2.14. Aydınlatılan bir metal-yarıiletken eklem şematik diyagramı19	19
Şekil 2.15. Sıfır beslemede Schottky fotodiyotta oluşan fotoakım.....20	20
Şekil 2.16. Schottky fotodiyotun yapısı21	21
Şekil 2.17. Fotodiyotun aydınlık ve karanlık durumlardaki akım-gerilim karakteristiği22	22
Şekil 2.18. ZnO'nun kristal yapısı24	24
Şekil 2.19. CdO 'nun kristal yapısı.....26	26
Şekil 2.20. So-Jel yönteminin şematik olarak gösterimi.....27	27
Şekil 2.21. Dip coating cihazı30	30
Şekil 2.22. Daldırarak kaplama yöntemi şematik gösterimi31	31
Şekil 2.23. Fytronix spin coater cihazı.....32	32
Şekil 2.24. Solüsyonun spin-coater üzerine damlatılması32	32
Şekil 2.25. Spin kaplamada çözeltinin düşük hızlarda döndürülmesi33	33
Şekil 2.26. Spin kaplamada çözeltinin yüksek hızlarda döndürülmesi.....33	33
Şekil 2.27. Spin kaplamada çözeltinin düşük hızlarda döndürülerek jelleşmenin sağlanması.....34	34
Şekil 3.1. Numunelerin hazırlandığı deney düzenekleri.....37	37
Şekil 3.2. Katkısız ZnO ve CdO-ZnO/p-Si diyotlarının U-V ölçümleri için kullanılan UV-VIS spektrofotometre cihazı38	38
Şekil 3.3. Katkısız CdO ve CdO/ZnO/p-Si diyotlarının I-V, C-V ve I-t ölçümleri için kullanılan deney düzeneği.....39	39
Şekil 3.4. Katkısız ZnO ve Cd/ZnO/n-Si diyotlarının yüzey ölçümleri için kullanılan AFM cihazı.....40	40
Şekil 4.1. ZnO: CdO kompozit ince filmlerin AFM görüntüleri42	42
Şekil 4.2. ZnO:CdO kompozit ince filmlerin geçirgenlik grafiği.....43	43
Şekil 4.3. ZnO:CdO kompozit ince filmlerin soğurma grafiği44	44

Şekil 4.4. ZnO: CdO kompozit ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ değişim grafiği	45
Şekil 4.5. ZnO: CdO kompozit ince filmlerin yansıma grafikleri	46
Şekil 4.6. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotların $I-V$ grafiği	48
Şekil 4.7. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotların $I-V$ grafiği	48
Şekil 4.8. 3/2 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotların $I-V$ grafiği	49
Şekil 4.9. Fotoakım (I_{ph}) ile aydınlatma şiddeti (P)'nin karşılaştırılması	52
Şekil 4.10. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $I-t$ grafiği	53
Şekil 4.11. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $I-t$ grafiği	53
Şekil 4.12. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $C-t$ grafiği	55
Şekil 4.13. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $C-t$ grafiği	55
Şekil 4.14. 3/2 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $C-t$ grafiği	56
Şekil 4.15. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $C-V$ grafiği	58
Şekil 4.16. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $C-V$ grafiği	59
Şekil 4.17. 3/2 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $C-V$ grafiği	59
Şekil 4.18. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $G-V$ grafiği	61
Şekil 4.19. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $G-V$ grafiği	61
Şekil 4.20. 3/2 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $G-V$ grafiği	62
Şekil 4.21. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $G_{adj}-V$ grafiği	62
Şekil 4.22. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $G_{adj}-V$ grafiği	63
Şekil 4.23. 3/2 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun $G_{adj}-V$ grafiği	63

İKİ BİLEŞENLİ ZnCdO FOTODİYOTLARIN ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada, ZnO:CdO'nun molar oranı ile foto kaynaklı yük üretimi arasındaki ilişki detaylı olarak ele alınmıştır. İki yarıiletkenin farklı molar oranıyla elde edilen ince filmlerin optik özellikleri, Absorbans, Geçirgenlik ve Yansıma ölçümleri kullanılarak analitik olarak incelenmiştir. Al / ZnO-CdO / p-Si / Al diyotlarının elektriksel özelliklerini araştırmak için Akım-Voltaj (I-V), Fotoakım-Zaman (I-t) ve Kapasitans-Zaman (C-t) teknikleri kullanılmıştır. Sonuçlar, 5/0, 4/1 ve 3/2 mol ZnO:CdO oranına sahip olan kompozitlerin, foto kaynaklı şarj aktivitesini gösterdiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar ayrıca diyotların elektronik parametrelerinin, ZnO:CdO değerinin molar oranına bağlı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: ZnO:CdO Kompozit, Molar Oran, Elektriksel Özellikler

FABRICATION AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF TWO-COMPONENT ZnCdO PHOTODIODES

SUMMARY

The molar ratio of ZnO:CdO has an important effect on the photo-induced charge activities of the composite/n-Si structures constructed. Thus, the relationship between the molar ratio of ZnO:CdO and the photo-induced charge generation was revealed in detail. The optical characteristics of thin films obtained by different molar ratio of two semiconductors were studied analytically by using absorbance, transmittance and reflectance measurements. The current-voltage (I - V), transient photocurrent (I - t) and transient photocapacitance (C - t) techniques were used to investigate the photoresponse properties of Al/ZnO:CdO/p-Si/Al diodes. The results reveal that the composites with 5/0, 4/1 and 3/2 molar ratio of ZnO:CdO display the photo-induced charge activity, the results further manifest that the electronic parameters of the diodes depend on the molar ratio of ZnO:CdO.

Keywords: ZnO:CdO Composite, Molar Ratio, Electrical Properties

1. GİRİŞ

Günümüzde yarıiletken malzemeler, teknolojide önemli bir yere sahiptir. Üstün elektriksel ve optik özelliklerinden dolayı bu malzemelerin, iletken ve yalıtkan malzemelerden ayrılan birçok yönü vardır. Çalışma alanı geniş olan yarıiletkenler, günümüzde kullanılan birçok teknolojik aletin temelini oluşturur. Bu alanda yapılan çalışmalar insan yaşamıyla doğrudan etkili olduğu için yarıiletkenler güncelliğini sürekli korumaktadır. Yarıiletken teknolojisini geliştirmek için yapılan araştırmalar yıllardır sürdürülmektedir.

Genelde kalınlığı 1 μm ' nin altındaki malzemelere ince film adı verilmektedir. İnce filmlerin çeşitli özellikleri göz önünde bulundurulduğunda farklı teknolojik uygulamalarda kullanıldığı görülmektedir. Bunlara örnekler verilecek olursa, elektriksel özelliklerin dolayı yarıiletken cihazlarda, iletim ve yalıtım kaplamalarında vb, optiksel özelliklerinden nedeniye yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan kaplamalarda, girişim filtrelerinde vb, manyetik özelliklerinden sayesinde hafıza disklerinde ve buna benzer birçok uygulamada ince film kullanılmaktadır [1]. Birim kalınlık başına potansiyel fark elektrik alan şiddeti olarak tanımlanır. Bu nedenle ince filmlerdeki elektrik alan şiddeti, düşük potansiyel farklarında dahi yüksek değerlere ulaşır. Ayrıca ince filmlerin boyutlarının diğer malzemelere nazaran çok daha küçük olmasından dolayı elektronik devre tasarımlarında büyük kolaylık sağlar. Bunlara benzer ince film teknolojisinin birçok avantajı vardır.

İnce film üretmek için fiziksel buhar depolama (PVD), kimyasal buhar depolama (CVD) [2], alkol bazlı çözeltilerle hazırlanan sol-jel, magnetron püskürtme [3], vakumda buharlaştırma, elektro kimyasal tortulaşma (ECD), yüzeye iyon bombalama, hızlı termik işleme (RTP) ve kimyasal kaplama [4,5], gibi birden fazla üretim yöntemi bulunur.

Metal oksit yarıiletken filmler, optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle son yıllarda çok iyi dikkat çekmektedir ve yaygın olarak çalışılmaktadır.

Yarıiletken metal oksitlerden birisi de Kadmiyum Oksit (CdO)'tir. Genel olarak katkısız ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olan CdO filmleri, donör olarak hareket eden oksijen boşlukları veya fazla Cd atomlarının bulunmasından dolayı n-tipi yarıiletken oksit

malzemedir. CdO filmleri 2.2 ve 2.7 eV değerleri arasında direk bant aralığı ile gözlemlenebilen spektral bölgelerde geğirgendir. Bu nedenle, güneş pilleri, akıllı pencereler, fototransistörler, ışık yayıcı diyotlar, gaz sensörleri, ince film transistörleri gibi optoelektronik uygulamalar için saf ve katkılı CdO materyali büyük öneme sahiptir [6,7]. Elektrik ve optik özelliklerini, sentezleme prosedürü ve katkı tipi değiştirebilir. CdO filmlerinin optik özellikleri gibi iletkenliğide, farklı iyonlarla katkılanarak gözlemlenebilir. CdO, In, Sn, Sc ve Y gibi Cd⁺²'den daha küçük iyonik yarıçapa sahip iyonlarla katkılıandığı zaman, elektriksel iletkenliği ve yasak enerji aralığı artar [7].

Çinko oksit (ZnO) ince filmler, optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle teknolojik olarak önemli malzemelerdir. ZnO gibi geniş bant aralığına sahip olan ve direk bant geçişli yarıiletkenler, elektromanyetik dalga spektrumunun mavi ve morötesi bölgesinde LED ve LD'ler gibi ultraviyole optik aygıt yapımına uygundur [8]. ZnO, aynı zamanda piezoelektrik özellik gösterip, görünür bölgede yüksek optik iletkenliğe (%80-%90) sahiptir. ZnO tavlansak veya uygun şekilde katkılanarak iletkenliği kontrol edilebilir. ZnO'nun piezoelektrik özellikleri, yüzey akustik dalga (SAW) aygıtları gibi ince film uygulamalarında kullanılır [9].

Metal oksit filmlerin üretilmesinde kullanılan sol-jel spin kaplama yöntemi ekonomik olması, vakum gerektirmemesi, oda şartlarında uygulanmasının kolay olması ve film kalınlığının kontrol edilebilmesinden dolayı diğer çözeltilerine bir alternatiftir. Sol-jel spin kaplama yöntemiyle elde edilen metal oksit filmler kullanılarak üretilen p-n heteroeklem diyotlar yarıiletken teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Heteroeklem yapılar, yasak enerji aralığı birbirinden farklı iki yarıiletken materyalin birleşmesiyle oluşur. Eklemdeki yapısal ani değişimlerin sebep olduğu örgü uyumsuzlukları, ısısak yayılım uyumsuzluğu gibi nedenlerden dolayı arayüzey enerji durumları meydana gelir. Heteroeklem yapının akım-voltaj mekanizmasının farkedilmesinde arayüzey yakınlarındaki enerji durumları çok önemlidir. Bu malzemelerin elektronik devrelerde kullanılması için uygun metal yarıiletken kontaklar oluşturulması, ve sonrasında elde edilen devre elemanlarının elektriksel karakteristikleri çok iyi yapılmalıdır. Üretilen devre elemanının istenildiği performansta çalışabilmesi, devre yapısına ait tüm özelliklerinin bilinmesi ve meydana gelebilecek tüm olumsuzlukların giderilmesine bağlıdır. Bu

nedenle metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ve metal-okisit-yarıiletken (MOS) yapıları araştırmak da çok büyük öneme sahiptir.

İlk yarı iletken devre elemanlarından biri olan diyot 1900'ü yılların başlarında kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, bu ilk yapım olan ince metal bir telin, yarı iletken yüzeyine temas ettirilmesi ile üretilen metal-yarı iletken diyotlar, mekanik olarak çok fazla güvenilir olmamışlardır. 1920 yılının ilk başlarında vakum ortamında daha kaliteli nokta kontaklı diyotlar üretilmeye başlanmıştır. Bu dönemlerde nokta kontaklar; radyo ve düşük seviye mikrodalga dedektörü, frekans çevirici, ikinci dünya savaşında ise radar dedektörü olarak kullanılmıştır. Metal-yarı iletken kontaklarla ilgili ciddi anlamda ilk çalışmalar, 1930 yılında Schottky tarafından yapılmış olmasından dolayı onun adına atfen metal-yarı iletken kontaklara Schottky engel diyotları denilmiştir. Bu diyotların yerini 1950'li yıllarda p-n eklem diyotlar almıştır. 1960'lı yıllarda, nokta kontak diyot ele alınarak Schottky engel diyotu üzerinde çalışmalara başlanmıştır. Yarıiletken fiziğinin daha da gelişmesi üzerine metal-yarıiletken kontakların yapısının anlaşılması kolaylaşmıştır.

Umar ve ark. (2006) tarafından yapılan bir çalışmada fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile Si taban malzemeler üzerine ZnO ince filmler büyütülmüş, çapları 60–100 nm arasında değişen ve uzunlukları ise 5–15 µm aralığında olan ZnO nano teller elde edilmiştir. Yapısal ve optik analizler sonucunda, üretilen filmlerin tek kristal, kusursuz hegzagonal yapılı ve oda sıcaklığında yüksek UV emisyonuna sahip oldukları belirtilmiştir. ZnO kristaline çeşitli elementler katkılanması yapılarak bunların özelliklerinin literatürde oldukça fazla verilmesine rağmen Ni katkılı ZnO ince filmlerin detaylıca çalışılmadığı belirtilmiştir.

A.Abdolazadeh Ziabari, F.E.Ghodsı (2011) tarafından yapılan bir çalışmada farklı Cd içeriğinde hazırlanan sol-jel türevli CdO:ZnO nano yapılı ince filmlerin yapısal, morfolojik, elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir. Filmlerin tane büyüklüğü ve yüzey pürüzlülüğü Cd içeriği ile arttırılmıştır. Numunelerin taşıyıcı konsantrasyonu ve taşıyıcı mobilitesi Cd oranı ile arttırılmış, aynı zamanda, filmlerin özdirenci azalmıştır. Doğrudan optik bant aralığı, filmdeki Cd içeriğinin artmasının bir sonucu olarak düşük enerjiye kaymıştır. Hem kırılma indisi hem de sönme katsayısı belirlenmiştir. Kırılma indisi ve sönme katsayısının, çalışılan tüm spektral aralık boyunca Cd içeriğinin

artmasıyla arttığı bulunmuştur. Wemple-Didomenico modelinden elde edilen tek osilatör parametre değerleri, Tauc modelinden ampirik bir ilişki ile belirlenen optik bant aralığı değerleri ile ilişkilidir: $E_0 \approx 2E_g$. Dielektrik sabiti incelenmiştir. Dielektrik sabitin gerçek ve hayali kısmı, kadmiyum oksit konsantrasyonunun artması nedeniyle artmıştır. CdO:ZnO ince filmlerin üçüncü dereceden doğrusal olmayan polarize edilebilirlik parametresi $\chi(3)$, Wemple-DiDomenico tek osilatör parametrelerine dayanan Miller kuralı kullanılarak belirlenmiştir. Cd içeriğindeki artış ile doğrusal olmayan optik duyarlılık $\chi(3)$ 'ünde arttığı görülmüştür.

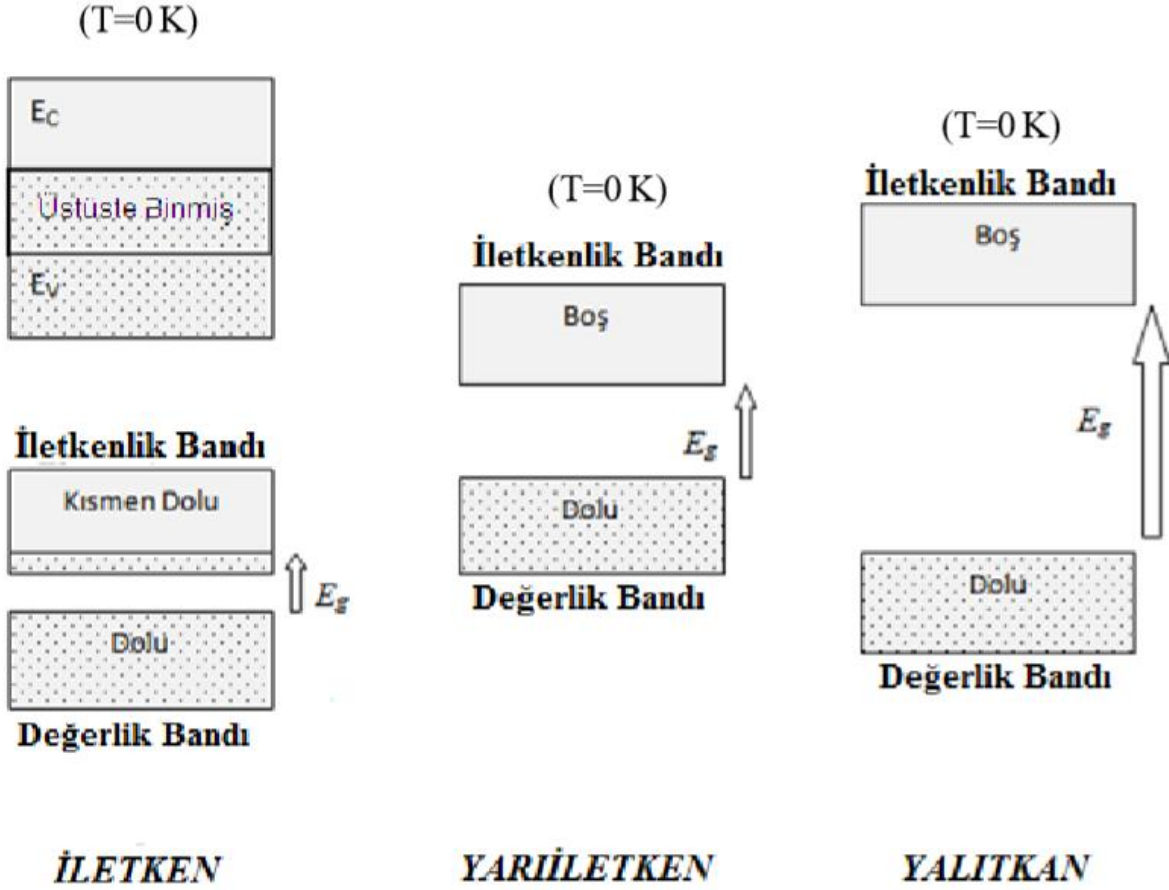
Trilok K.Pathak ve ark. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada farklı oranlarda Zn: Cd ince filmler içeren karışık oksitler sol-jel spin kaplama yöntemi kullanılarak sıradan cam alt tabakalar üzerinde başarıyla biriktirilmiştir. XRD kırınım sonuçları ZnO içeren CdO ince filmlerde ZnO'nun altıgen polikristal yapıda olduğunu göstermiştir. Bu yapının yüksek miktarda ZnO içeren CdO incefilmler için karakteristik bir yapı olduğu anlaşılmıştır. XPS sonuçları, filmlerdeki kusurların CdO konsantrasyonundaki bir artışla arttığını doğrulamıştır. Tüm ince filmler için küresel bir topaklanmış morfoloji elde edilmiştir. Yüzeyin pürüzlülüğü, en yüksek konsantrasyonlu CdO ince filmler için 12 nm'den 29 nm'ye yükselmiştir. SIMS tarafından elde edilen derinlik profili, Cd'nin tavlanmış filmler için substrat ara yüzüne ve film yüzeyine ayrıldığını göstermiştir. Numunenin geçirgenliği ve bant aralığı, CdO konsantrasyonunun artmasıyla azalmıştır. Karışık oksit ince filmlerin direnci, CdO oranı arttıkça azaldı. Bu yüksek iletken ve düşük optik bant aralığı ince filmler güneş pilleri ve optoelektronik cihazlardaki uygulamalar için uygun olabilir.

Bu tez çalışmasında, sol-jel yöntemiyle biriktirilen katkısız ZnO ve ZnO: CdO/5:0, 4:1, 3:2, oranlarında Cd katkılı ZnO yarıiletken ince filmler p-tipi Si alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Büyütülen ince filmlerin yüzeysel (AFM), optiksel (UV) ve elektriksel özellikleri (I-V, C-V, I-t) incelenmiştir.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Yarıiletkenler

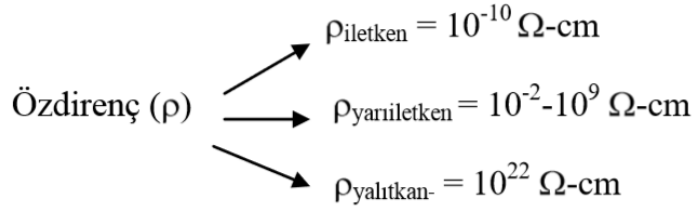
Katı cisimler elektriksel özelliklerine göre üç gruba ayrılırlar. Bunlar; yalıtkanlar, iletkenler ve yarıiletkenlerdir. Bu üç grubun enerji-band yapıları arasında temel farklılıklar vardır. Valans bandı tamamen dolu ve iletim bandı tamamen boş olan katılara “yalıtkan” adı verilir. Yalıtkanlarda yasak enerji aralığı geniştir ve oda sıcaklığında elektronlar valans bandından iletim bandına geçemezler. Bu nedenle elektrik iletkenlikleri yoktur. Valans bandı ve iletim bandı üst üste binmesi ile yani yasak enerji aralığı oluşmayan katılara “iletken” denir. İletken maddeler elektriği iyi iletirler [10]. Yarıiletkenlerde yasak enerji aralığı öyle bir değerdedir ki, ısı uyarılma ile erime noktalarının altındaki sıcaklıklarda dahi elektriksel özellik gösterirler. Bu yüzden oda sıcaklığında yarıiletkenlerdeki elektronlar valans bandından iletim bandına geçerek iletim sağlayabilirler. Yarıiletkenlerde sıcaklık artışı meydana geldikçe valans bandındaki elektronlar iletim bandına ısıl olarak uyarılacaklardır. Sonuç olarak, iletim bandındaki elektronlar ile valans bandındaki elektronlar tarafından geride kalan yüklü boşlukların iletkenliğe katkısı olmaz [11,12].



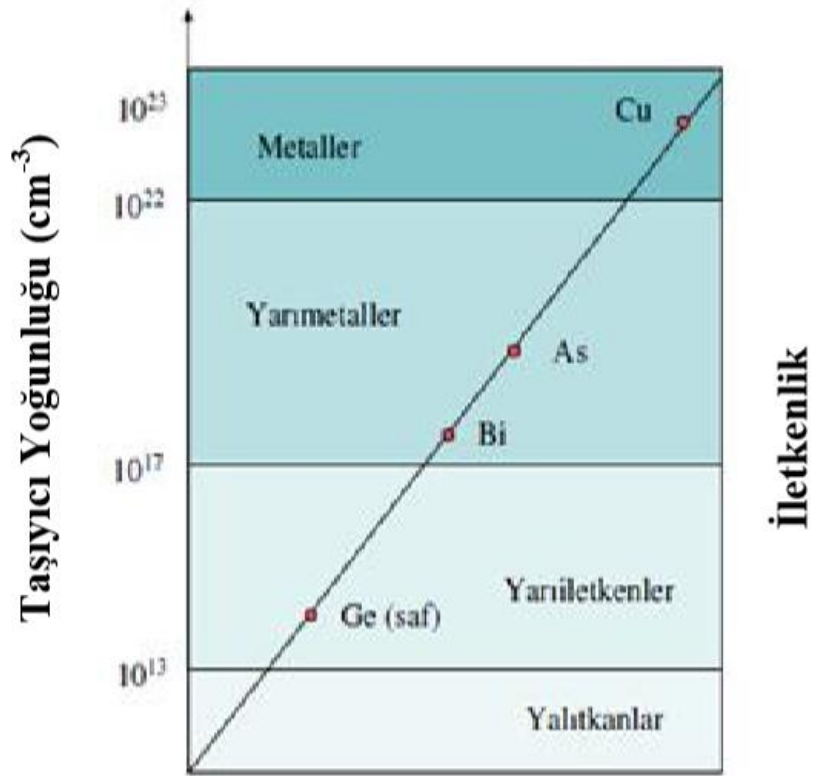
Şekil 2.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin T=0 K de enerji band aralıkları

(E_g)[16]

Yarıiletkenlerde, sıcaklık ve yabancı madde yoğunluğu arttıkça elektriksel öz direnç azalır. Bu en belirgin özelliği olup, iletkenlerdeki durumun tamamen tersidir. Yarıiletken maddelerde sıcaklık arttıkça iletkenlik artış gösterirken, iletken maddelerde sıcaklık arttıkça iletkenlik azalmaktadır. Bu durum yarıiletkenlerin iletkenler üzerinde ayırt edici en önemli özelliğidir. Ayrıca yarıiletkenler, mutlak sıfır sıcaklığında yani $T = 0 K$ 'de iyi bir yalıtkanlardır. Oda sıcaklığında iletkenlerin, yarıiletkenlerin ve yalıtkanların öz dirençleri şu şekildedir;



Bu 3 malzeme elektriksel özellikleri (özdirençleri) bakımından birbirinden ayrılır (Şekil 2.2.);



Şekil 2.2. Elektriksel özellikleri bakımından yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemeler [15]

2.1.1. Bant Teorisi

Bir atom kesikli enerji düzeylerine sahiptir. İki atom bir araya geldiğinde tüm enerji düzeyleri daha yüksek ve daha düşük enerji seviyelerine ayrılarak orbitalleri meydana getirirler. Bir kristaldeki gibi atom sayısı çok yükseldiğinde enerji düzeyleri artarak band yapısı meydana gelir. Yarıiletkenler birçok banttandır. Eğer en yüksek işgal edilmiş

durum ile en düşük işgal edilmemiş durum arasında büyük bir enerji farkı oluşursa bir band genişliği meydana gelir [13].



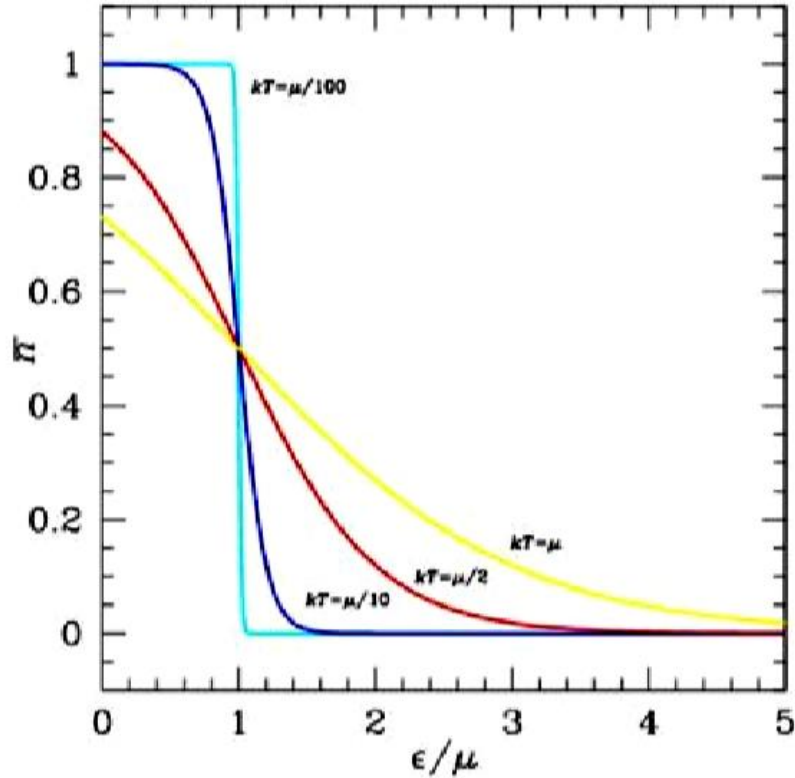
Şekil 2.3. Yarıiletkenlerin band yapısı

Diğer katılarda olduğu gibi yarıiletkenlerde de elektronlar sadece belirli bantlardaki enerjilere sahiptirler. Enerji bantlarının her biri farklı kuantum durumları ile ilgili olduğundan düşük enerjili (çekirdeğe yakın olan) durumların çoğu doludur. Bu durumları valans bandı olarak adlandırırız. Yalıtkanlarda ve yarıiletkenlerde, metallerden farklı olarak genel durumda valans bandı tamamen dolu gibidir [13].

Yarıiletkenlerdeki elektronlar valans bandından iletim bandına band genişliğine bağlı olarak uyarılabilir. Yarıiletkenler ile yalıtkanlar arasındaki fark, band aralığı genişliğinden kaynaklanır. Bir yarıiletkenin sıcaklığı mutlak sıfırın üstüne çıktığında elektronlardan bazıları valans bandından iletim bandına geçecek enerjiye sahip olurlar [13].

Elektronlar iletim bandına geçtiklerinde valans bandında işgal edilmemiş elektron boşlukları (holler) bırakırlar. İletim bandındaki elektronlar ile valans bandındaki holler

elektriksel iletkenliğe katkı sağlarlar. Holler tek başlarına hareket edemezler fakat komşu elektronlar bu holleri doldurarak geride yeni bir hol meydana getirirler. Bu durumda holler pozitif yüklü parçacıklar gibi davranırlar. Katılarda komşu iki atom arasında bulunan kovalent bağ, tek bir elektron ile atom arasında bulunan bağdan on kat daha güçlüdür. Bu yüzden serbest elektronlar katıların kristal yapısına zarar vermez. Elektronlardaki enerji dağılımı enerji durumlarının hangilerinin boş ve dolu olduğunu tanımlar. Bu dağılım Fermi-Dirac istatistiği ile tanımlanarak; elektronların sıcaklık ve Fermi enerjisi veya Fermi düzeyi ile karakterize edilir. Fermi enerjisi Mutlak sıfırın altındaki şartlarda elektronların işgal ettiği en üst enerji düzeyi olarak tanımlanabilir. Fermi enerjisi daha yüksek sıcaklıklarda ise bir durumun işgal edilme olasılığının 0.5'e düştüğü enerji olarak tanımlanabilir. Yarıiletkenlerin iletkenliklerinin neden sıcaklığa sıkı bir şekilde bağlı olduğu, elektron enerji dağılımının sıcaklığa bağlılığı ile açıklanabilir [13].



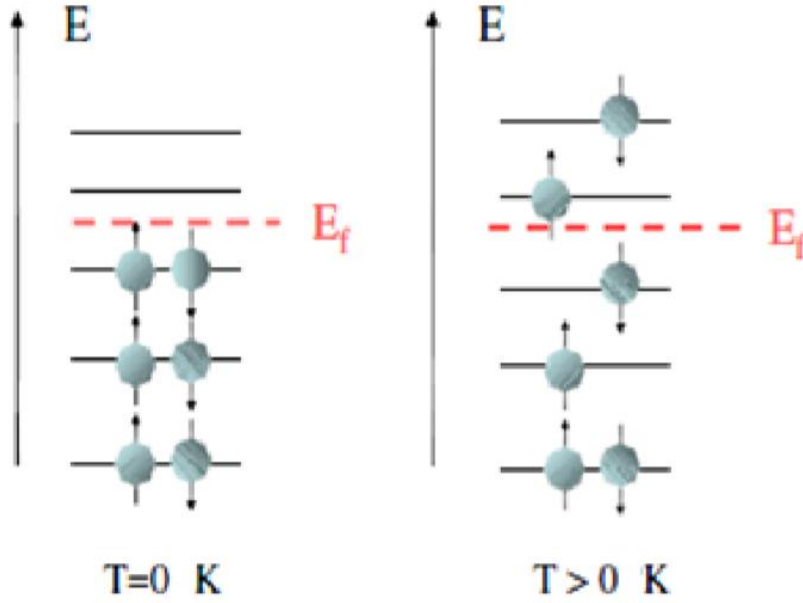
Şekil 2.4. Fermi-Dirac dağılımı

2.1.2. Fermi-Dirac Fonksiyonu

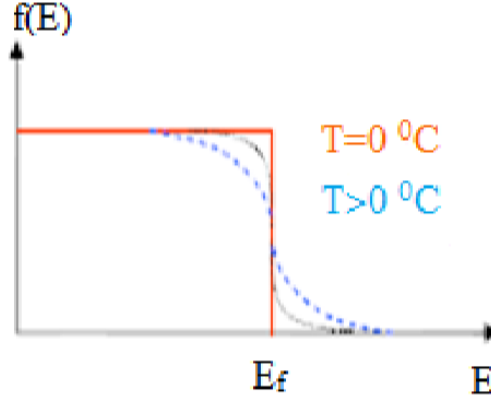
Fermi-Dirac olasılık yoğunluk fonksiyonu enerji seviyesinin bir fermiyon tarafından işgal edilme olasılığını verir. Spini $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$ ve $\frac{5}{2}$ gibi buçuk içeren parçacıklar (fermionlar) Fermi-Dirac istatistiğine uymaktadır. Fermiyonlar hem elektronun hemde boşluğun spini $\frac{1}{2}$ dir. Aynı zamanda fermiyonlar Pauli dışarlama ilkesine uyan parçacıklardır. Mutlak sıfır sıcaklığında (0 K'de) elektronların sahip olduğu en yüksek enerji seviyesi değerine Fermi Enerjisi denir. Yani Fermi seviyesinin üzerindeki hiçbir enerji seviyesinde elektron bulunmaz. Sıcaklık arttıkça dolu enerji seviyelerinden boş enerji seviyelerine elektron geçişleri meydana gelir. Bu davranışı gösteren Fermi fonksiyonu,

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

bağıntısı ile verilir. Burada, k Boltzmann sabiti olup $f(e)$ T sıcaklığında E enerjisine sahip durumların işgal ihtimalidir.



Şekil 2.5. Fermi enerji seviyelerinin $T = 0 K$ ve $T > 0 K$ sıcaklıklarındaki konumları [15]



Şekil 2.6. Fermi-dirac fonksiyonunun $f(E)$ enerji ile değişim grafiği [15]

➤ $T = 0$ (2.2)

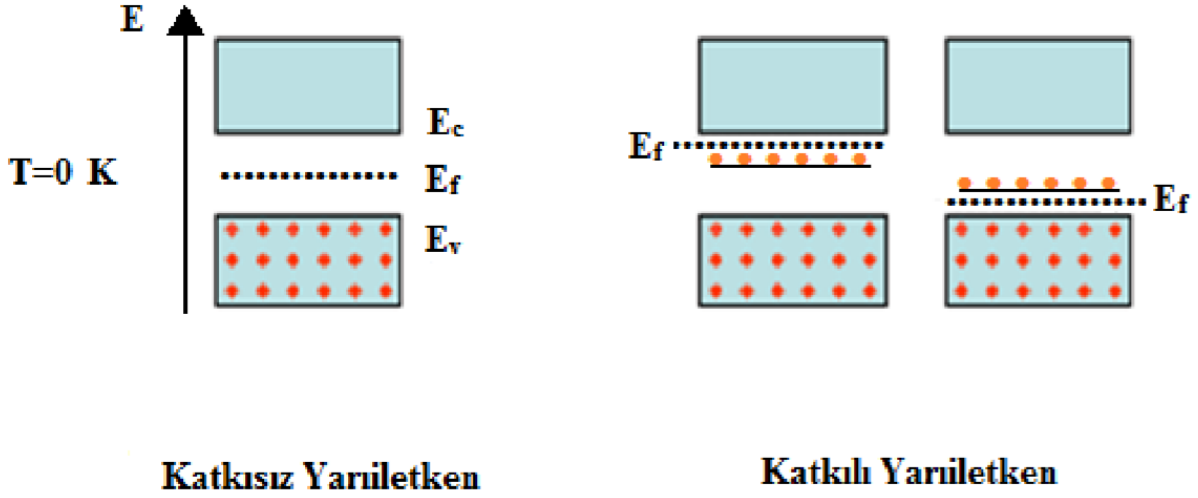
$E < E_f$ ise $f(E < E_f) = 1$

$E > E_f$ ise $f(E > E_f) = 0$

➤ $T > 0$ K (2.3)

$E = E_f$ ise $f(E_f) = \frac{1}{2}$

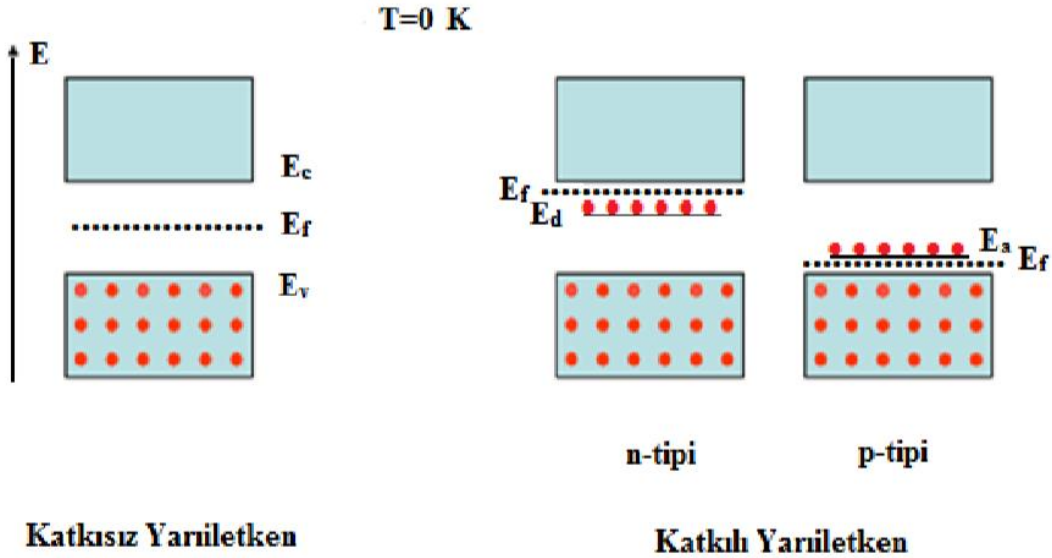
$T = 0$ K'de katkısız bir yarıiletkenle değerlik bandındaki tüm enerji durumları elektronlarla dolu ve iletkenlik bandındaki tüm enerji seviyeleri boştur. Bu yüzden Fermi enerjisi E_c ile E_v 'nin tam ortasındadır. Katkılı yarıiletkenlerden n tipi yarıiletkenlerde iletkenlik bandına yani E_c 'ye, p tipi yarıiletkenlerde ise değerlik bandına yani E_v 'ye daha yakındır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Katkılı ve katkısız yarıiletkenlerde $T = 0 K$ 'de fermi enerji seviyesi [15]

2.1.3. Yarıiletken Türleri

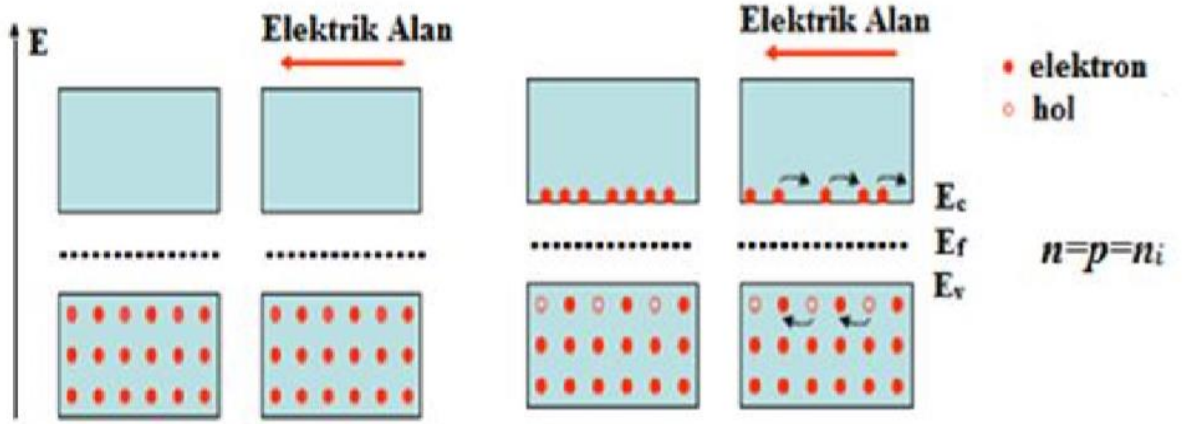
Yarıiletkenlerde elektriksel iletim, valans bandındaki holler ve iletim bandındaki elektronlar ile gerçekleşir. İletim bandındaki elektron yoğunluğu, valans bandındaki hol yoğunluğuna eşit olan yarıiletkenlere “saf yarıiletkenler” denir. İletim bandındaki elektron yoğunluğu, valans bandındaki hol yoğunluğuna eşit olmayan yarıiletkenlere de “katkılı yarıiletkenler” adı verilir [10].



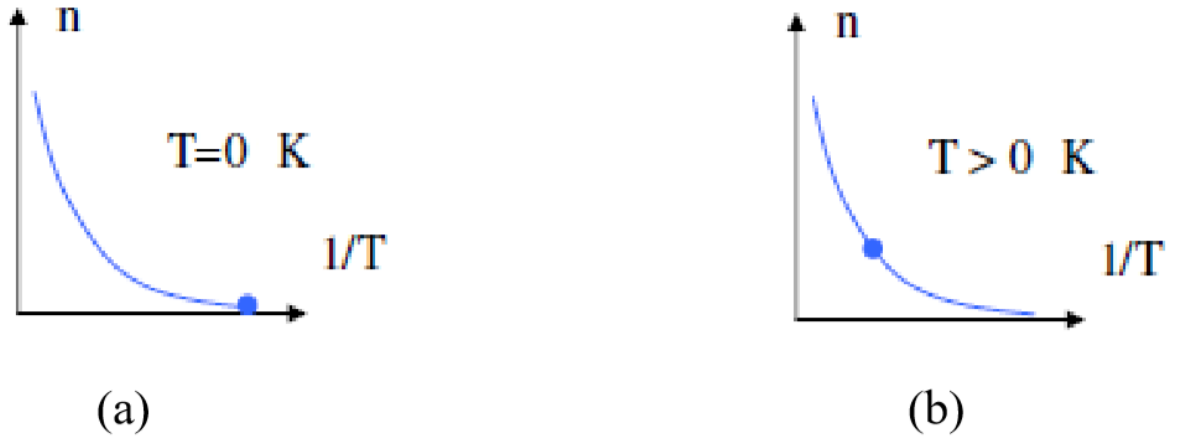
Şekil 2.8. Katkılı ve katkısız yarıiletkenlerde enerji seviyeleri [15]

2.1.3.1. Katkısız (intrinsic) Yarıiletken

Kovalent bağlı bir yarıiletkene, elektrik alan uygulandığında yeterli enerji alan elektron, kovalent bağdan koparak üstte boş iletim bandına geçer. Boş iletim bandına geçiş yapan elektron, geride kovalent bağda bir hol (elektron boşluğu) bırakır [14].



Şekil 2.9. Katkısız yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonu



Şekil 2.10. Katkısız yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonunun sıcaklıkla değişim grafikleri;

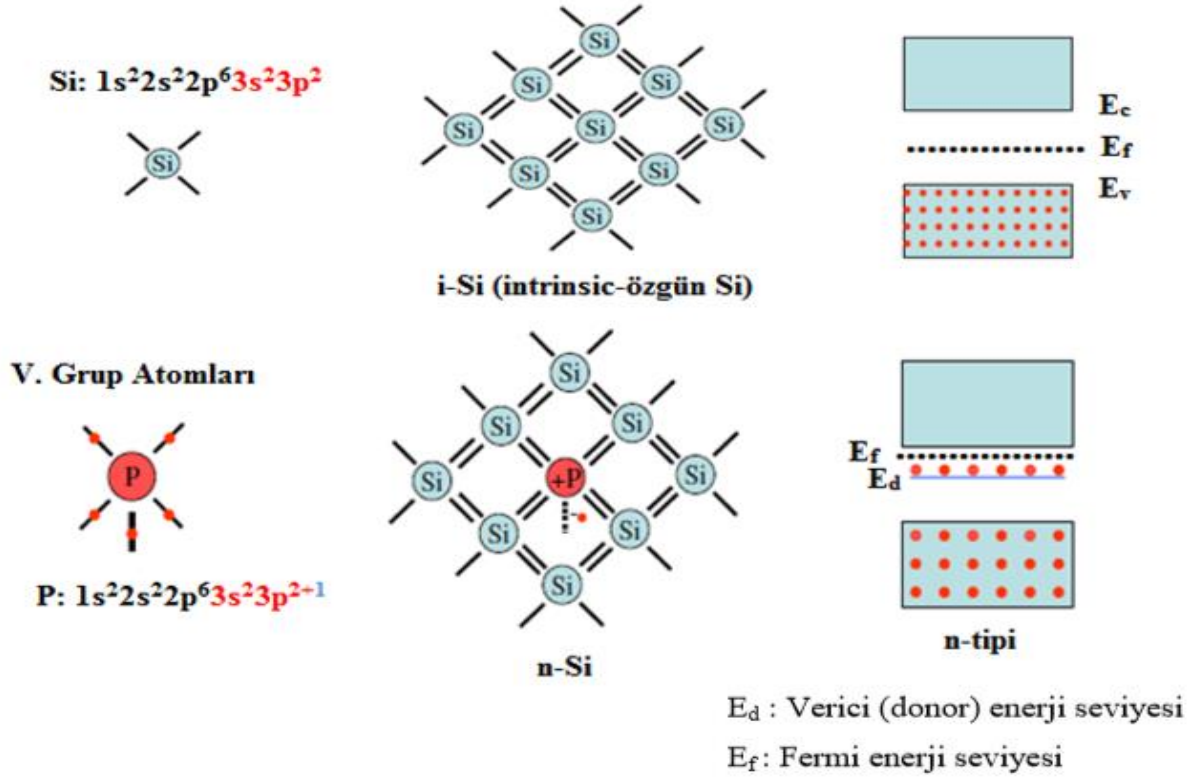
a) $T = 0 \text{ K}$, b) $T > 0 \text{ K}$ [15]

2.1.3.2. Katkılı (extrinsic) Yarıiletkenler

Yarıiletkenler içerisine katılan uygun katkı atomları (impurity) ile elektriksel özellikleri büyük ölçüde değişim göstermesidir. Bu en önemli özelliklerinden biridir. Uygun katkı atomları bir yarıiletkene katıldığında, çoğunluk taşıyıcıları ya elektronlardır ya da hollerdir. Bu şekilde yarıiletkene katılan atomlara safsızlık (impurity) atomları denir. Arzu edilen özelliğe ve kullanım alanına bağlı olarak katkı oranı değişim göstermektedir. Safsızlık atomları yarıiletken kristale katıldığında ya elektron verici (donör) ya da elektron alıcı (akseptör) olarak görev yaparlar. Bu katkılama işlemi sonucunda yarıiletkenler, p-tipi veya n-tipi özellik göstermektedirler [10].

2.1.3.2.1. n-tipi Yarıiletkenler

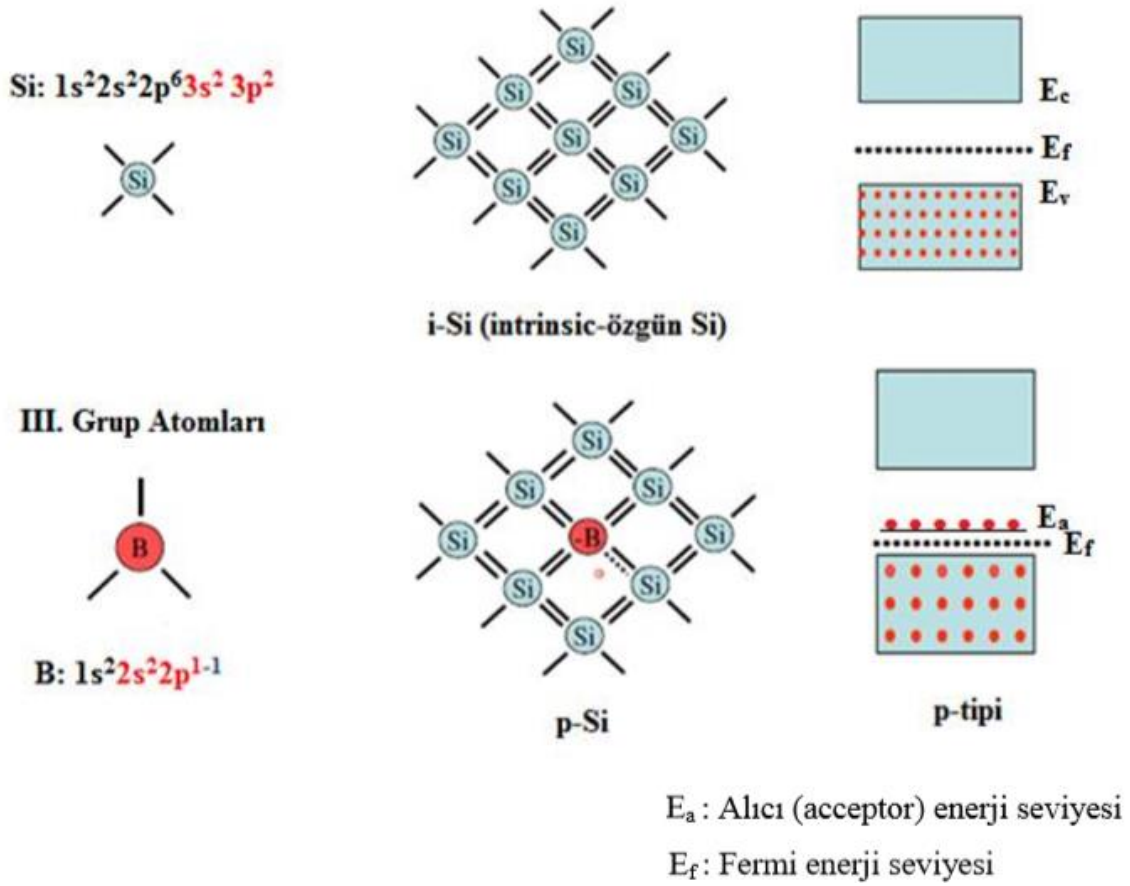
Periyodik tablonun IV A grubunda yer alan 4 değerlikli Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) yarıiletkenlerine, V A grubu 5 değerlikli atomlarından (N, P, As, Sb, Bi) biri örnek olarak fosfat (P) katılırsa atomun dört elektronu kovalent bağ yapar, beşinci elektron zayıf bir bağla safsızlık atomuna bağlı kalır. Bu şekilde fazlalık olan 1 elektronunu kristale verir. Kristale fazlalık olan 1 elektronunu verdiği için bu türden atomlara verici (donor) atomlar denir. Her verici atom kristale fazlalık olan 1 elektronunu kattığı için kristalde (-) yüklü taşıyıcı yoğunluğu artmış olur. Bu şekilde katılanmış olan yarıiletkenlere n-tipi katkılı yarıiletken denir. İletim bu yarıiletkenlerde elektronlar ile gerçekleşir. Fermi enerji seviyesi ise iletkenlik bandına daha yakın olur [15].



Şekil 2.11. n-tipi yarıiletkenin oluşum şeması ve n-tipi yarıiletkenlerdeki enerji band seviyeleri

2.1.3.2.2. p-tipi Yarıiletkenler

Periyodik tablonun IV A grubunda bulunan 4 değerlikli Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) yarıiletkenlerine bu defa III A grubu 3 değerlikli atomlarından (B, Al, Ga, In) biri örneğin Alüminyum (Al) katkılanırsa, Alüminyum atomu 4 değerlik elektronuna sahip Si veya Ge atomları ile kovalent bağ yapmak için kristalden 1 elektron alır. Kristalden elektron alan bu tür atomlara alıcı (acceptor) atomlar denir. Alıcı atomların tümü kristalden 1 elektron aldığı için kristalde (+) yüklü hollerin yoğunluğu artış gösterir. Bu şekilde katkılanmış yarıiletkenlere p-tipi katkılı yarıiletken denir. Bu yarıiletkenlerde iletim holler ile gerçekleşir. Bu kez Fermi enerji seviyesi değerlik bandına daha yakın olur [16].



Şekil 2.12. p-tipi yarıiletkenin oluşum şeması ve p-tipi yarıiletkenlerdeki enerji band seviyeleri [15]

2.1.4. Yarıiletkenlerin Özellikleri

2.1.4.1. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri

Ohm kanununa göre iletkenlik;

$$j_1 = E_1 \cdot \sigma_1, \quad (2.4)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{\rho} = n \frac{e^2}{m_e} \tau = n \mu e \quad (2.5)$$

şeklindedir. Elektronların iletkenliğe katkısı;

$$\sigma_n = n_n \mu_n e \quad (2.6)$$

ile verilirken hollerin (deşiklerin) katkısı;

$$\sigma_p = n_p \mu_p e \quad (2.7)$$

eşitliği ile verilir. Saf olan yarıiletkende elektron ve boşluk sayısı birbirine eşittir. Çünkü değerlik bandındaki her bir boşluk sadece bir elektronun iletkenlik bandına uyarılmasıyla meydana gelebilir. Yani,

$n_n = n_p$ olduğundan toplam iletkenlik;

$$\sigma = n_n(\mu_n + \mu_p)e \quad (2.8)$$

denklemini ile verilir.

Katkılı yarıiletkenlerde ise elektron ve boşluk sayısı birbirine eşit olmadığından elektriksel iletkenlik,

$$\sigma = (n_n\mu_n + n_p\mu_p)e \quad (2.9)$$

şeklindedir.

n_n : Aktif elektron yoğunluğu

μ_n : Eksi yük taşıyıcı mobilitesi

n_p : Deşik yoğunluğu

μ_p : Artı yük taşıyıcı mobilitesi

2.1.4.2. Yarıiletkenlerin Optiksel Özellikleri

Yarıiletken üzerine foton gönderildiğinde; atomların elektronları ile fotonların etkileşmesi sonucu soğurma, geçirgenlik, yansıma ve kırılma gibi bazı optik olaylar gerçekleşebilir. Fotonun enerjisinin en az yarıiletkenin yasak enerjisine eşit olması şartıyla değerlik bandında ki elektronlar iletkenlik bandına termal yollarla uyarılabilirdiği gibi optik yollarla da uyarılabilir.

Fotonun frekansı ν ve dalga boyu λ olduğuna göre fotonun enerjisi,

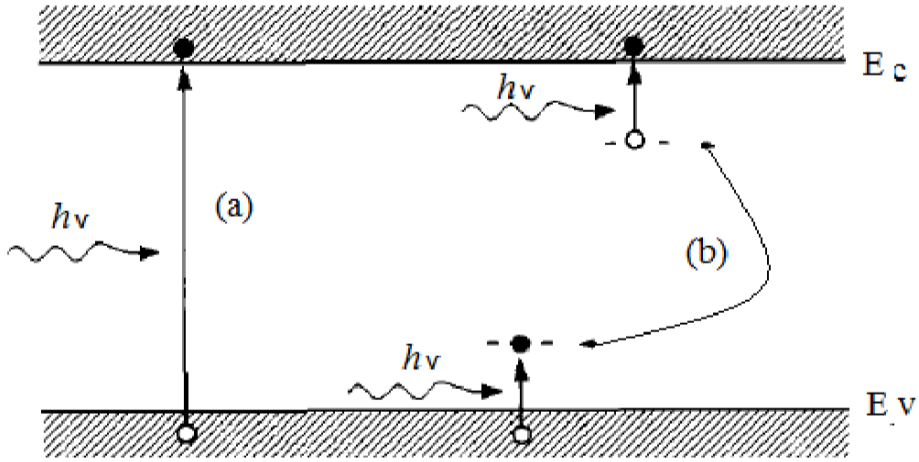
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir. Bu işlem fotoiletkenlik olarak bilinmektedir, çünkü uygun dalga boyundaki ışık demeti birçok iletkenlik elektronu ve boşluk oluşturur, böylece dikkate alınacak miktarda iletkenliği artış gösterir. Bunun tersi işlemde oluşabilir. Yani, iletkenlik bandındaki elektron değerlik bandındaki boşlukla birleşerek, sahip olduğu enerjisi foton

yayınımla dışarı verir. Bu işlem ışık yayan diyotların (LED, light-emitting diods) ve yarıiletken lazerlerin temelini oluşturur [17].

2.1.5. Fotodiyotlar

Fotoiletkenlik bir maddenin morötesi ışık, gamma ışınları veya görünür ışık gibi elektromanyetik ışınımları soğurarak elektrik iletkenliğinin değişkenlik göstermesine verilen isimdir. Fotoiletken olan yarıiletkenler serbest elektronlar ve delikler içerirler. Yarı iletken tarafından soğurulan ışık delikler ve serbest elektronların dağılımını değiştirir ve elektrik iletkenliğini artırır. Bir fotoiletken, yarıiletkenlerin ince film veya kalın şekilde kontaklarla karşılıklı şekilde yapıştırılarak meydana getirilir. Şekil 2.13'deki gibi fotoiletkenin üzerine ışık düştüğünde yükler yasak enerji aralığının üstüne geçerek veya bantlar arası geçiş yaparak iletkenliğin artmasına sebep olur [18].

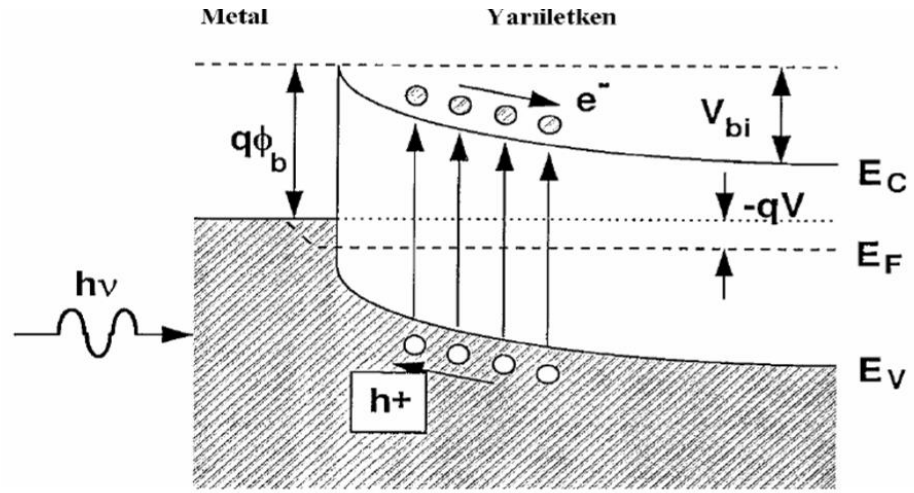


Şekil 2.13. Fotonlarla uyararak (a) bantlar arası geçiş (b) safsızlık seviyesi ile iletim bantı arasındaki foto uyarma [18]

2.1.5.1. Metal-Yarıiletken Fotodiyotlar

Bir fotodiyot, tükenim bölgesinde serbest yük taşıyıcıları ve yüksek bir elektrik alana sahiptir. Tükenim bölgesinde meydana gelen foto taşıyıcılar, yüksek alanın varlığından dolayı malzemenin uç kısmında toplanır. Metal-yarıiletken (Schottky) eklemesinin tipik enerji-bant diyagramı şekil 2.13' de gösterilmiştir. Diyotta üç farklı çalışma modu bulunmaktadır;

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.
2. $h\nu > E_g$ ve $V < V_B$ için ışık, yarıiletkende boşluk-elektron çiftini üretir ve diyotun genel karakteristiği p-i-n foto diyotuna benzer şekilde olur.
3. $h\nu > E_g$ ve $V > V_B$ için diyot, fotodiyot olarak çığ bozulma bölgesinde çalışabilir [18,19,20].



Şekil 2.14. Aydınlatılan bir metal-yarıiletken eklemesinin şematik diyagramı [18,19,20]

Enerjisi yasak enerji aralığından büyük olan fotonlar eklemeye ışık geldiği zaman soğrulur. Oluşan elektronlar katoda, boşluklar ise anoda olmak üzere ters yönde yayılarak diyotun farklı bölgelerinde toplanıp fotoakım meydana getirirler. Bu akım;

- 1) Yarıiletkende fotonların soğrulması ve taşıyıcıların oluşumu,
- 2) Yerel elektrik alanı altında taşıyıcıların sürüklenmesi,
- 3) Malzeme kontaklarında taşıyıcıların toplanması olarak özetlenir [19,20,21].

Fotonların yarıiletken malzemenin içinde ilerlemesi, fotodiyotun üzerine düşen ışığın dalga boyuna bağlıdır [18]. Dalga boyu büyük olan ışınlar yüzeyde emilirken, dalga boyu küçük olan ışınlar yarıiletkenin derinliklerine kadar ilerler [19]. Fotodiyotlar, diyotun yapısına ve kontakların tipine göre;

- a) p-n eklem diyotlar

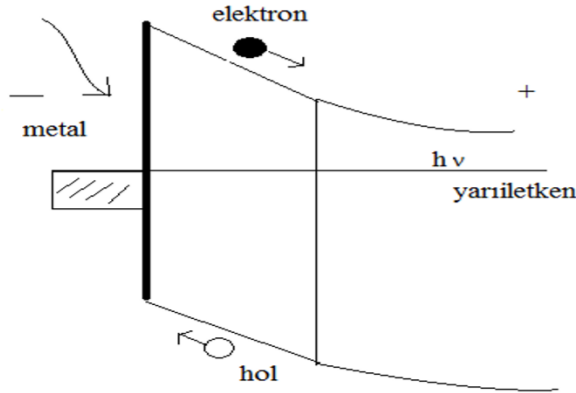
- b) Schottky diyotlar
- c) p-i-n diyotlar
- d) heteroeklem diyotlar olarak dört gruba ayrılır [20,21].

2.1.5.2. p-i-n Eklem Fotodiyotlar

p-n eklem diyotların özel bir şekli p-i-n fotodiyotlarıdır. Fotodedektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. p-i-n yapıların sahip oldukları tükenim kalınlığı, frekans cevabı ve kuantum verimliliği gibi özellikleri sebebiyle fotodiyotlarda çoğunlukla tercih edilirler. Işık soğurulduğunda yarıiletkende elektron ve boşluk çiftleri oluşur. p-i-n fotodiyotlar, p-n eklem diyotların p ve n bölgeleri arasındaki arındırılmış bölge uzunluğu içine asal bir yarıiletken yerleştirildiğinde p-i-n fotodiyot olarak isimlendirilir [22]. Çiftler tükenim bölgesi veya difüzyon uzunluğu içinde meydana gelen elektrik alan sebebiyle ayrılırlar, taşıyıcılar tükenim bölgesinde hareket ederek bir dış devre akımı oluştururlar [18]. Verimi arttırmak için fotodiyot ve güneş pillerinde p-i-n eklemler kullanılabilir.

2.1.5.3. Schottky Fotodiyot

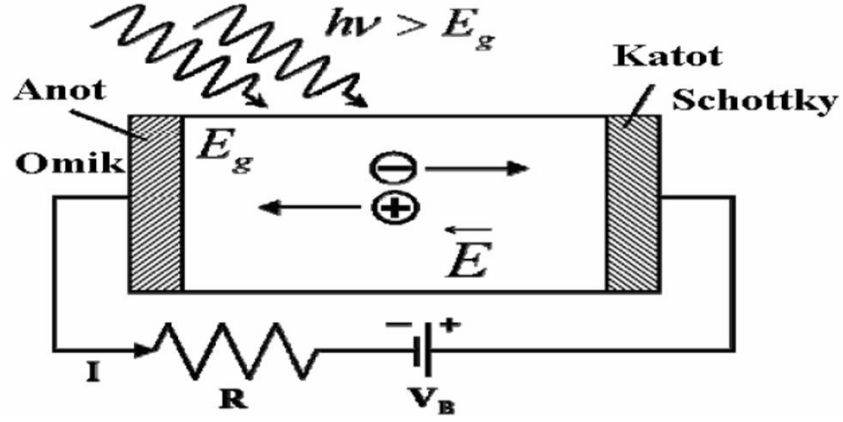
Schottky fotodiyotlarda, yarıiletkenin üst yüzeyinde iki veya daha fazla kontak oluşturulabilir. Dışardan voltaj uygulayarak iki elektrot arasında geçiş sağlanabilmektedir Şekil (2.15). Yüksek hıza optik güç kaybı en aza indirilerek ulaşabilir [23].



Şekil 2.15. Sıfır beslemede Schottky fotodiyotta oluşan fotoakım [23]

Schottky fotodiyotları, çoğunluk taşıyıcı malzemeleri olarak bilinmektedir. Bu özellik, yüksek hız deteksiyonunun ihtiyaç duyulduğu uygulamalar için Schottky fotodiyotlarına olan ilgiyi artırır. Katkılama sayesinde tek kutuplu Schottky ve MSM (metal-yarıiletken-

metal) fotodiyotları kolayca geliştirilebilir [19]. Şekil 2.16’da bir Schottky fotodiyotun yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Schottky fotodiyotun yapısı [19]

2.1.5.4. Heteroeklem Fotodiyot

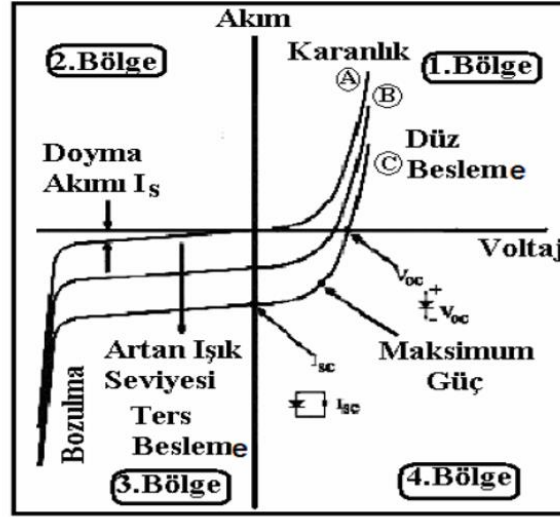
Bir fotodiyot yasak enerji aralıkları farklı iki yarıiletkenin birleştirilmesi ile heteroeklem haline getirilebilir. Kuantum veriminin eklem mesafesine bağlı olmaması heteroeklem yapıların önemli avantajlarından biridir. Çünkü optik gücün iletimi için oluşan geniş bant aralığı kullanılmaktadır. [18]. Diğer avantajlarından biriside karanlık akımın küçük olmasıdır [18,19]

Heteroeklemler, bir materyalden diğerine geçiş uzunluklarına bağlı olarak ani ve kademeli olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Ani heteroeklemde bu geçiş birkaç atomik uzaklıkta ($\leq 1\mu m$) gerçekleşir iken, kademeli heteroeklemde bu geçiş birkaç difüzyon uzunluğunun üzerinde gerçekleşir. Heteroeklemler her iki tarafındaki iletkenlik türüne göre de ikiye ayrılmaktadırlar. İki yarıiletken benzer tip iletkenlik içeriyorsa izotip, farklı tip iletkenlik içeriyorsa anizotip heteroeklem olarak adlandırılır. Yasak enerji bant aralıklarının büyüklüklerine göre heteroeklemler p-n veya n-p olarak adlandırılmaktadırlar. Yasak enerji bant aralığı küçük olan malzemenin tipi önce, büyük olan malzemenin tipi ise sonra söylenmektedir. Yasak enerji aralığı küçük olan yarıiletken p-tipi, büyük olan yarıiletken n-tipidir. O halde bu iki yarıiletken bir araya geldiğinde meydana gelen eklem p-n eklem; yasak enerji aralığı küçük olan yarıiletken n-tipi büyük olan yarıiletken p-tipi ise bu iki yarıiletken bir araya geldiğinde meydana gelen eklem ise n-p heteroeklem denir [24].

2.1.5.5. Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği

Fotodiyotlar üç ana karakteristiğe sahiptir. Bu karakteristikler; akım-voltaj karakteristiği, kuantum verimi karakteristiği ve bant genişliği (çalışma hızı) karakteristiği özellikleridir. Bu üç karakterizasyon fotodiyotun performansı ölçmede kullanılır. Diyot eklem niteliğinin iki göstergesi düşük karanlık akımı ve yüksek bozulma voltajıdır. Düşük karanlık akımı fotodiyota ışık uygulanmaksızın ters polarma altında diyot içinde akan akımdır ve daha yüksek duyarlılık anlamına gelir. [19,20,25]

Bir Schottky fotodiyotunun doğru akımı analiz yapılarak ters besleme doyma akımı, engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi diyot parametreleri belirlenebilir. I_0 ve Φ_b $V = 0$ 'da fit edilerek doğru besleme akımı bulunur. İdealite faktörü (n) doğru polarma I-V eğrisinin (dV/dI) eğimi ile belirlenir [19,25,26]. Şekil 2.17'de bir fotodiyotun akım-gerilim karakteristiği verilmiştir.



Şekil 2.17. Fotodiyotun aydınlık ve karanlık durumlardaki akım-gerilim karakteristiği [19,25,26,27]

Birinci bölgede, akım ve voltaj değerleri pozitifdir. Bu bölge fotodiyot uygulamaları için uygun olmayıp, fotodiyot doğru polarlanmıştır. Çünkü bu bölgede çalıştırılan fotodiyot normal bir diyot gibi davranmaktadır. İkinci bölgede fotodiyotun cevabı bulunmamaktadır. Üçüncü bölgede çok küçük bir I_s akımı akar [19,20,25,27,28].

Bu bölgedeki eğrilerin bütünüyle, negatif akım yönünde aşağıya doğru değişmesi, fotodiyotun aktif alanı üzerine gelen ışığın şiddetinin artırılmasıyla meydana gelir. $V = 0$

ekseninde bu eğrilerin akım eksenini kestiği nokta kısa devre akım I_{sc} 'yi vermektedir. Sıfır akım noktalarında eğrilerin voltaj eksenini kestiği noktalar ise açık devre voltajı V_{oc} 'yi verir [19]. Çok yüksek olan ters polarma voltajlarında akım hızlıca artacağından, diyotun bozulma ihtimali bulunabilir. Bu ters bozulma bölgesidir. Bu nedenle üçüncü bölge ışığı algılamak için uygun olan bölgedir. Çünkü ters polarma voltajının uygulandığı bölge üçüncü bölgedir [27]. Foto diyotun fotovoltajik bölgesi dördüncü bölgedir.

2.1.5.6. Fotodiyotların Kapasite-Voltaj Karakteristiği

Fotodiyotların kapasitans ve voltaj arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntı ile bulunur;

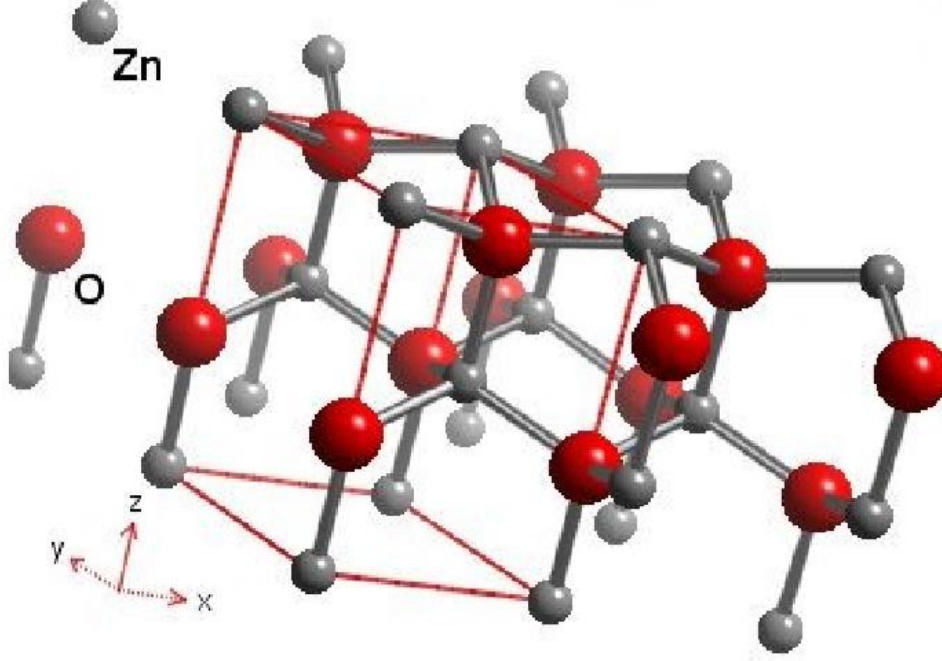
$$\frac{1}{c^2} = \left[\frac{2}{\epsilon_0 \epsilon_s q N_d A^2} \right] \left[V_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right] \quad (2.11)$$

V_{bi} Difüzyon voltajıdır [25].

2.2. ZnO ve CdO Bileşiklerinin Genel Özellikleri

2.2.1. ZnO Bileşiğinin Genel Özellikleri

Optik ve elektriksel özelliklerinden nedeniyle metal oksit yarıiletkenler son yıllarda oldukça yoğun bir şekilde çalışılmakta ve fazlasıyla ilgi çekmektedir. Çinko oksit, doğada “mineral zinkit” olarak bulunmaktadır. ZnO bileşiği, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi hegzagonal yapıda kristalleşmektedir. Örgü sabitleri $a=3,24982 \text{ \AA}$, $c=5,20661 \text{ \AA}$ dur. ZnO birim hücrenin hegzagonal yapısında her Zn atomu, birinci kabukta dört O atomu ve ikinci kabukta on iki Zn atomu ile çevrilmiştir. II-IV bileşiklerinin çoğu ya kübik, ya “zinc blende” ya da “hegzagonal wurtzite” yapıda bulunmaktadır. ZnO bileşiği de II-IV grubuna ait bir yarıiletken maddedir. Sınırdaki iyonizitesi, kovalent ve iyonik yarıiletkenler arasındadır [29].



Şekil 2.18. ZnO'nun kristal yapısı

Yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olan ZnO, oda sıcaklığında yaklaşık $3,3 eV'$ luk direkt band geçişli yasak enerji aralığı bulunmaktadır. ZnO yaklaşık olarak $60 meV'$ luk geniş band aralığına sahip yarıiletken ince filmler, optik ve elektronik aygıtlar için uygun malzemelerdir. Yüksek kırılma voltajına ve düşük gürültüye sahip olan aygıtlar, geniş band aralığına sahip bir materyal kullanılarak üretilirler. Ayrıca bu aygıtlar yüksek sıcaklıklarda ve yüksek güçlerde çalıştırılabilirler [29].

Düşük ve yüksek elektrik alanda ki farklılıklar yarıiletkenlerdeki elektron geçiş performanslarına bağlıdır. Düşük elektriksel alanda, ZnO'in sahip olduğu elektronların enerji dağılımında, fazla değişim meydana gelmez. Çünkü elektronlar uygulanan elektrik alandan fazla enerji alamazlar. Bu nedenle elektron mobiliteleri sabit olacaktır. Saçılma oranı, elektron mobilitesi ile belirlendiğinden, fazla değişime uğramayacaktır. Yüksek elektrik alanda, uygulanan elektrik alandan dolayı elektronların enerjileri kendi termal enerjileriyle karşılaştırılabilir. Elektron dağılım fonksiyonu dengede sahip olduğu değerden daha uzak bir değere doğru sapacaktır. Bu elektronlar, örgü sıcaklığından daha yüksek sıcaklığa sahip sıcak elektronlar olmaktadır [29]. Elektron sürüklenme hızları, kararlı durumda sahip oldukları sürüklenme hızından büyüktür. Bu nedenle yüksek frekansa sahip aygıtlar yapmak olasıdır.

ZnO, ferroelektrik olmayan bir bileşiktir ve oldukça büyük bir elektro mekanik çiftlenim katsayısına sahiptir. Bundan dolayı ZnO, delay line cihazları ve yüzey akustik dalga cihazları (SAW) için bir transduser olarak kullanılan ve iyi bilinen bir piezoelektrik malzemedir. Çinkonun doğada bol miktarda bulunması ve ucuz bir malzeme oluşu çinko oksitin maliyetini düşürmektedir. Çinko oksit görünür ışık bölgesinde saydam oluşu nedeniyle saydam iletken malzeme olarak çok büyük ilgi görmektedir. ZnO bileşiği görünür bölgede yaklaşık %80 – %90 optik geçirgenliğe ve $10^{-3} - 10^{+2} \Omega\text{cm}$ bölgesinde bir elektriksel dirence sahiptir [29].

ZnO kendi doğasından dolayı n-tipi yapıya sahiptir. n-tipi iletkenlik, stokiyometriden sapmasından dolayı oluşur. Araya sıkışmış oksijen ve çinko eksiklikleri, olası akseptör düzeyleri yaratabilmesine karşılık, serbest yük taşıyıcılar, oksijen boşlukları ve interstitiyal çinko ile bağlantılı olarak donör düzeylerden kaynaklanır. Katkılanmamış ZnO, kararsız elektriksel özelliklere sahiptir.

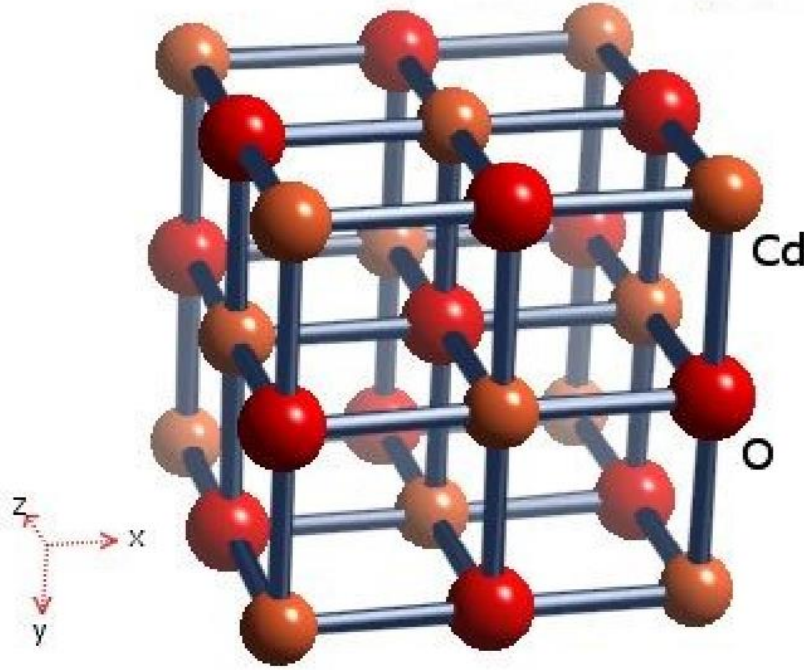
p-tipi ZnO elde etmek için n-tipi ZnO materyalleri katkılanması gerekir. p-tipi ZnO elektriksel aygıtlar için yapılan uygulamalar açısından oldukça önem taşımaktadırlar. Güvenilir bir p-tipi ZnO ince filmin üretilmesi ZnO optoelektronik aygıtların gelişimini oldukça hızlandıracaktır.

Amfoterik bir bileşik olan çinko oksit organik ve inorganik asitlerle reaksiyona girer. Çinko oksit, amonyak çözeltisi içerisinde de çözünerek çinko asetat oluşturur. Beyaz renkli olan çinko oksit, 300 °C sıcaklıkta sarı renge döner [29].

2.2.2. CdO Bileşiğinin Genel Özellikleri

Kadmiyum oksit (CdO) yarıiletken bileşiği periyodik tablonun II. Grup elementlerinden olan Cd ile VI. Grup elementlerinden olan O' den oluşan II-VI grup bileşiğidir.

CdO n-tipi yarıiletken olup kristal yapısı NaCl (FCC) yapısına benzemektedir. Ayrıca 2,2–2,8 eV direkt geçişli yasak enerji aralığına sahiptir. Diğer geçirgen iletken oksitler ile karşılaştırıldığında CdO'nun yasak enerji aralığı daha dardır ve diğer geçirgen iletken oksitlerden beş ile on kat daha fazla yüksek elektron mobilitesine sahiptir.



Şekil 2.19. CdO 'nun kristal yapısı

CdO yarıiletken bileşiği yüksek iletkenliğe ve görünür bölgede yüksek optiksel geçirgenliğe sahiptir. Özdirenci $4,87 \times 10^{-4} \text{ ohm}^{-\text{cm}}$ dir.

Son yıllarda CdO yarıiletken bileşiği, güneş pillerinde, transparan elektrotlarda, fototransistörlerde, fotodiyotlarda, gaz sensörlerde, fotovoltaik ve optoelektronik devrelerde, sıvı kristal göstergelerde, IR dedektörlerde, yansıma yapmayan kaplamalarda kullanılmaktadır. CdO bu uygulamalarda çok sık kullanılan bir yarıiletken bileşiktir [10,30].

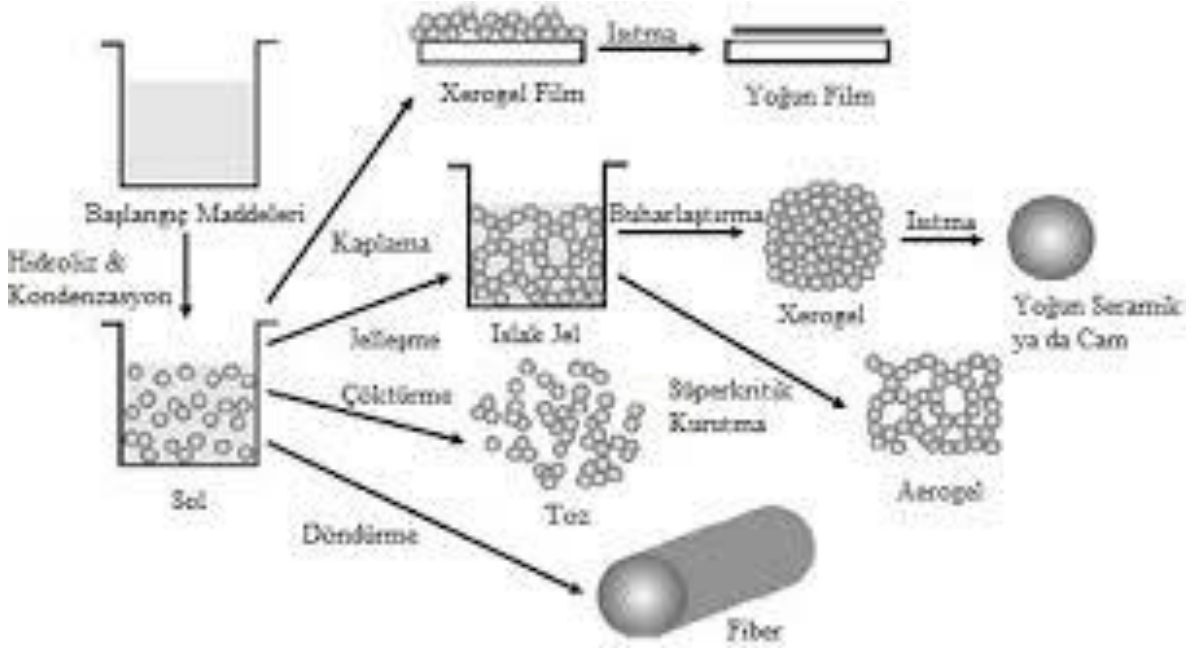
2.3. Sol-Jel Metodu

Sol-jel üretim metodu, laboratuvar koşullarında iyi uygulanabilen bir metot olmasının yanında, büyük ölçekli üretimler için de kullanımı giderek artan bir yöntemdir.

Sol-jel yöntemi, başlangıç malzemesi olarak metal bazlı hammaddeler; çoğunlukla da alkoksit çözeltileri kullanılarak metal oksitlerin hazırlanması için uygulanan bir metot olarak bilinir [31].

Sol, çok küçük katı parçacıkların sıvı içerisinde asılı kalarak homojen bir dağılım gösterdiği denge durumudur. Sıvı içerisindeki parçacıkların boyutu $1 \mu\text{m}$ den daha

küçüktür. Sollar parçacıkların etkileşimine göre tanımlanırlar. Eğer parçacık çözücü etkileşimi zayıf ise liyofobik sol, değilse yani kuvvetli ise liyofilik sol olarak adlandırılır. Jel, sıvı bileşen içeren içyapısı yüksek yoğunlukta sıvı ve katı dağılımına sahip durumdur. Bütün sollar jel olmayabilir. Jel için önemli ölçüt en küçük çözücü parçacıkları ile çözünen parçacıklar arasında bağ kurulmasıdır [32].



Şekil 2.20. So-Jel yönteminin şematik olarak gösterimi

Sol-jel yönteminde, saf bileşikler içeren inorganik veya metal organik bileşikler kullanılır. Bu bileşiklerin sulu çözeltileri veya organik çözücüleri M-O-M (metal-oksijen-metal) bağları içeren inorganik polimer formuna hidroliz edilir.

Bazı metal oksitleri elde etmek güç olduğundan dolayı bunların tuzlarını reaksiyonlarda kullanmak daha avantajlıdır. Örneğin I ve II. grup elementlerinin uçuculuğu az ve çözünürlükleri iyi değildir. Bu nedenle onların tuzları kullanılır ve bu grup elementlerinin metal tuzları ısıtılarak veya oksitlenme yoluyla kolay bir biçimde dönüştüklerinden dolayı bu reaksiyonlarda daha çok tercih edilirler. Organik asit tuzları olarak, asetatlar, nitratlar, formatlar ve sitratlar kullanılır. Nitratlar daha yaygın olarak kullanılır fakat başlangıç maddesi olarak asetatlar daha uygundur. Çünkü asetatlar daha iyi çözünür ve bazik olduklarından dolayı jelleşme daha hızlı meydana gelir. Sol-Jel çözeltilisini tuz kullanarak

hazırlamak için önce alkoksit bileşiklerin çözeltisi elde edilir veya birkaç tuzun bileşiği alkol içerisindeki çözeltileri ilk çözelti ile karıştırılarak jel elde edilir [32].

Sol-jel Metodu sade bir biçimde üç kimyasal reaksiyondan meydana gelir. Bunlar kompleks üretme, hidroliz ve polikondensasyon (kondensasyon iki atomun birleşerek bağ oluşturması ve beraber serbest hareket etmeleri) reaksiyonlarıdır. İlk aşamada oksit karışımını meydana getirecek olan kimyasal bileşiklerin başlangıç maddeleri ile bir karışım hazırlanır, ardından karışımda meydana gelen hidroliz ve polikondensasyon reaksiyonları sonucunda elde edilen ürüne termal işlem uygulanarak oksit meydana getirilir. İki çeşit sol-jel yöntemi vardır; Birincisi metal tuz çözeltisi kullanarak hazırlanan sıvı bazlı, ikincisi ise metal oksit kullanarak hazırlanan alkol bazlı sistemdir. Bu sistem inorganik ve metal organik bileşiklerin organik çözücüler içinde metal-oksijen-metal bağlarından oluşan inorganik polimerlerin meydana gelmesiyle gerçekleşir.

Bu işlemlerde en çok kullanılan metal organik bileşiği metal oksittir. Alkoksit, alkol içerisinde çözünerek, baz yada asit içerisinde çözünerek hidroliz olur. Alkoksit çözeltinin hidrolizi ve yoğunlaşması sayesinde sıvı fazdan daha yoğun sıvı faza geçişi yani jel oluşumu meydana gelir. Bu metotla hazırlanan ürünler homojen ve saf olmaktadır [32].

Bu metodun avantajları ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

2.3.1. Sol-jel Yönteminin Avantajları

- Kimyasal yönü kontrol edilebilir.
- Ham maddelere kıyasla daha homojen numuneler üretilebilir.
- Üretilen toz boyutu mikronun altındadır.
- Malzeme üretimi için düşük sıcaklıklar yeterlidir.
- Önce film yapımı için de elverişlidir.
- İstenilen yapı ve kalınlık elde edilebilir.
- Diğer üretim teknikleri ile karşılaştırıldığında daha ucuz bir yöntemdir.
- Çok çeşitli elementlerin katılımıyla yeni ve değişik türde bileşikler elde edilebilir.

- Ürünler yüksek saflıkta elde edilir. Ortamdan gelen safsızlıklar ve reaksiyon kabıyla etkileşim oldukça düşüktür. Bu özellikten dolayı optik ürünlerde önemli avantajlar sağlar.
- Polimerizasyon sırasında jel içinde değişik zincir uzunluğunda polimer moleküllerinin bulunması ve işlem sırasında bunların kısmen faz ayrımına uğramaları nedeniyle yapıda bileşim farklılığı göstermeden yapısal değişiklikler gösteren bölgelerin oluşabilmesi mümkündür.
- İşlem için gerekli ısı işlem sıcaklıkları genellikle 1000 °C' nin altında olduğundan önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanır.
- Eritme işleminde buharlaşmadan kaynaklanan kayıplar bu yöntemde en aza indirilir [32,33].

2.3.2. Sol-jel Yönteminin Dezavantajları

- Hammadde fiyatları yüksek olduğundan uygulamalar bazı özel seramikler ve kaplama üretimi ile sınırlı kalabilir.
- İşlem süresi uzundur.
- İşlem süresinin uzunluğu üretim miktarını kısıtlayıcı bir faktördür. Seri olarak malzeme üretmek ve kaplama yapmak çok zordur.
- Kullanılan organik hammaddelerin sağlığa zararlı olmaları uygulamalarda özel koruyucu tedbirler alınmasına neden olduğundan maliyet artar.
- Jel içinde kalan gözenekler, hidroksil iyonları ve karbon atomları bazı özel amaçlı ürünlerde hataya neden olur.
- Üretilen tozların maliyeti yüksektir.
- Yapım esnasında büzülme miktarı çoktur.
- Yapıda çatlaklar yer alabilir.
- Yapıda OH (hidroksil) veya C grubu bulunabilir [32,33,34].

2.3.3. Sol-Jel Kaplama Yöntemleri

SOL-JEL kaplama yöntemleri üç tanedir. Bunlar; daldırarak kaplama (dip coating), spin kaplama (spin coating) ve püskürterek kaplama (Spray Pyrolysis) yöntemleridir.

2.3.3.1. Daldırarak Kaplama (dip coating)

Daldırarak kaplama temel olarak bir tabakayı solüsyon içine daldırma ve daha sonra solüsyonu yavaşça geri çekerek yapılan bir yöntemdir. Tabaka dışarı doğru çekilirken fazla solvent tabakadan ayrılır. Daha sonra solvent buharlaşarak ince film elde edilir. Genellikle daldırma birkaç kez tekrarlanarak daha kalın bir film elde edilir. 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 daralmaya zorlayarak filmin kırılmasına neden olabilir. Daldırarak kaplamada film kalınlığı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.



Şekil 2.21. Dip coating cihazı

$$d = c_1(\eta U/\rho g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

d=kalınlık

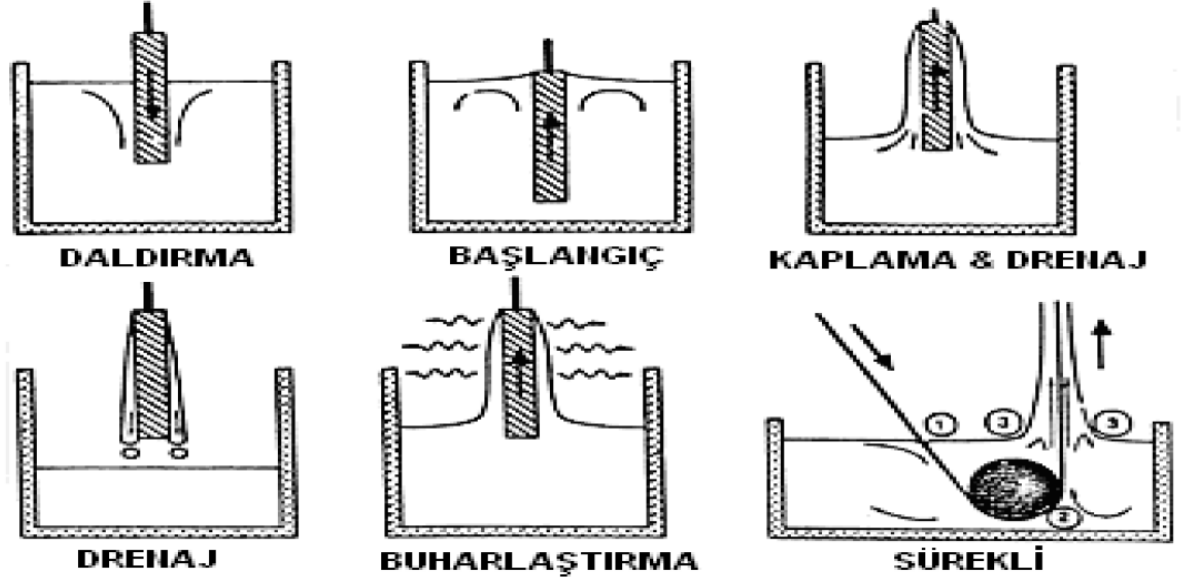
c_1 =sabit

U =geri çekme hızı

η =viskozite

ρ =yoğunluk

g =yerçekimi ivmesidir.



Şekil 2.22. Daldırarak kaplama yöntemi şematik gösterimi

2.3.3.2. Püskürterek Kaplama (Spray Pyrolysis)

Bu yöntemde solüsyon ısıtılmış tabakaya püskürtülür. Sprey damlacıkları tabakaya çarptığında çözünen madde tabaka üzerinde yoğunlaşırken solvent buharlaşır. Bir süre sonra yüzeyde ince film oluşur.

2.3.3.3. Spin Kaplama (Spin Coating)

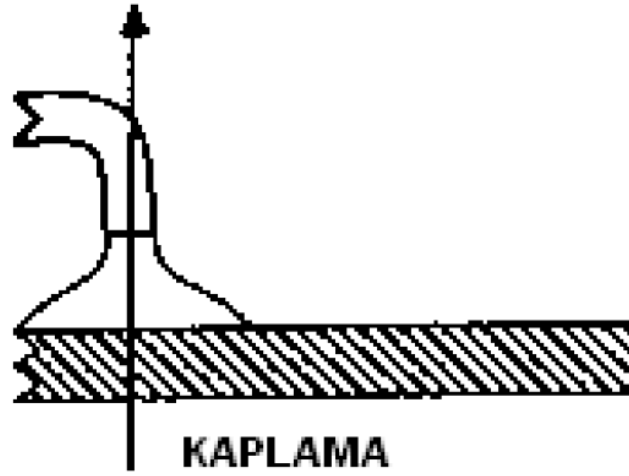
Spin-kaplama birkaç damla solüsyon taban üzerine damlatılır. Taban 3000–4000 rpm'e varan hızlarda döndürülür. Taban dönerken solüsyon tabakaya yayılır ve solvent buharlaşmaya başlar. Solventin büyük bir kısmı buharlaştıktan sonra ince film elde edilir. Tabanda kalan solventi buharlaştırmak için düşük sıcaklıklarda (~100– 200°C) taban ısıtılır. Bu işlem birkaç kez tekrar edilir. Elde edilen film kalan organikleri buharlaştırmak için yüksek sıcaklıklarda (~300– 600°C) fırınlanır. Spin kaplama yöntemi aşağıdaki şekilde adım adım incelenebilir.



Şekil 2.23. Fytronix spin coater cihazı

2.3.3.3.a. Birinci Adım

Solüsyonun bir taban üzerine damlatılmasıdır. Bu adımda önemli olan solüsyonun büyük partiküllerden arındırılmış olması ve yüzeye yapışabilir bir özellik göstermesidir.



Şekil 2.24. Solüsyonun spin-coater üzerine damlatılması

2.3.3.3.b. İkinci Adım

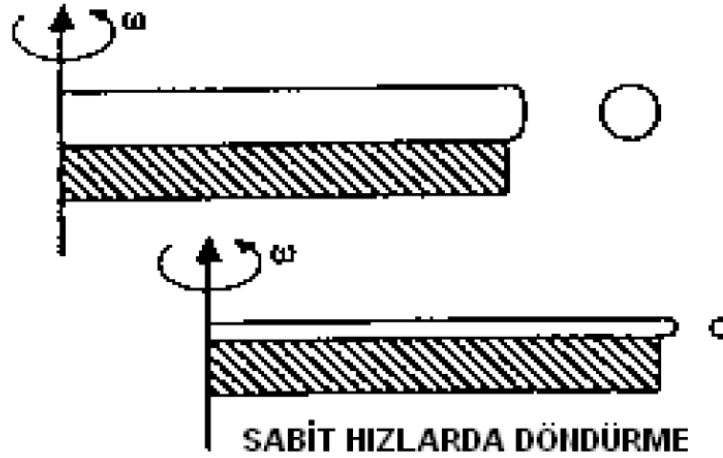
Solüsyonun tabana yayılması ve fazla solüsyonun atılarak ince filmin oluşması için tabanın ivmelendirilmesidir. Bu aşamada hız <500 rpm'dir.



Şekil 2.25. Spin kaplamada çözeltinin düşük hızlarda döndürülmesi

2.3.3.3.c. Üçüncü Adım

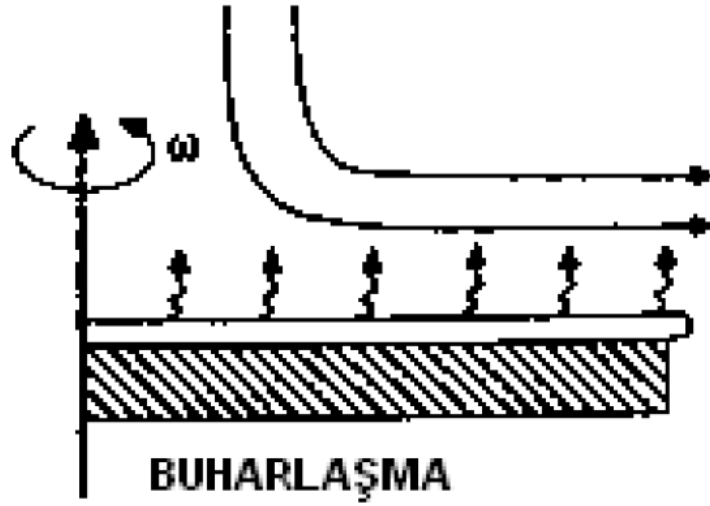
Bu adımda taban sabit bir hızla döner ve solüsyondaki viskoz kuvvetleri akışkanın daha çok incelmesine engel olur. Hız $\sim 2000-4000$ rpm'dir.



Şekil 2.26. Spin kaplamada çözeltinin yüksek hızlarda döndürülmesi

2.3.3.3.d. Dördüncü Adım

Bu adımda film incelendiğinden viskoz kuvvetlerinin etkisinin yerini buharlaşma alır ve jel oluşumu gerçekleşir. Hız ~ 500 rpm'dir.



Şekil 2.27. Spin kaplamada çözeltinin düşük hızlarda döndürülerek jelleşmenin sağlanması

Spin kaplamada genelde spin hızının yükseltilmesi filmin homojen kaplanmasını artırır. ~2000 rpm'den düşük hızlarda homojen film oluşmamaktadır. Oluşan filmin kalınlığı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir.

$$d = \frac{d_0}{\sqrt{1 + \frac{4\rho\omega^2 d_0^2 t}{3\eta}}} \quad (2.13)$$

Burada;

d: filmin kalınlığı

d₀: filmin başlangıç kalınlığı

ρ: yoğunluk

ω: açısal hız

t: zaman

η: denge durumundaki viskozite'yi göstermektedir.

2.3.4. Sol-Jel Uygulamaları

Sol jel yönteminin kullanıldığı bazı uygulamalar aşağıdaki gibi verilebilir.

- Mikro devre üretiminde fotoresistleri kaplamada.
- Magnetik disk kaplamalarında.
- Düz ekran display kaplamalarında- Antireflection kaplamalarında.
- Kompak Disklerde-DVD, CD ROM, v.b.
- Televizyon tüpü fosforu kaplamada.
- Kimyasal veya termal koruyucu katmanlarda.
- Optik amaçlı filtre kaplamalarında.
- Sol-Jel cam elde etmede.
- İnce seramik tozları elde etmede.

3.MATERYAL VE METOT

3.1. Deneysel İşlemler

Katkısız ZnO ve CdO katkılı ZnO ince filmleri ve diyotları üretmek için çözeltiler hazırlandı. Bu çözeltiler sol-jel yöntemiyle hazırlanarak spin döndürme metoduyla p-Si altlıklar ve mikroskop camı üzerine kaplanmıştır.

0.5 M Çinko oksit (ZnO) 10 ml 2 metoksietanol ($C_3H_8O_2$) alkolde çözüldü. ZnO:CdO/5:0, 4:1, 3:2 oranlarında Kadmiyum (Cd) eklenip manyetik balıkla birlikte 500 rpm'e ayarlanan manyetik karıştırıcının üzerinde çözünene kadar karıştırıldı. Stabilizatör olarak etanolamin eklendi ve çözelti 1 saat oda sıcaklığında karıştırılmıştır.



Şekil 3.1. Numunelerin hazırlandığı deney düzenekleri

İlk olarak p-Si ile mikroskop camı 4 parça kesilerek yıkamak için hazırlanmıştır. p-Si tabakası üzerindeki organik ve diğer ağır metal kirliliklerini temizlemek ve kristal yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için p-Si tabakaya kimyasal temizleme işlemleri yapıldı. Mikroskop camına 5 dk alkolde ve 5 dk saf suda olmak üzere ultrasonik banyo yaptırıldı. p-Si altlığa ise 5 dk saf suda ultrasonik banyo yaptırılmıştır. Daha sonra azot gazı yardımıyla kurutulmuştur. Hazırlanan katkısız ve Cd katkılı kompozit çözeltiler p-Si tabakalar 30(s) 3000 devir/dk de döndürülerek kaplama yöntemiyle kaplanmışlardır. Tabakalar üzerinde kalan etanol'ün buharlaşması için 150 °C 5 dk kurutulmuştur. Son olarak fırında 450 °C de 1 saat tavlama işlemi uygulanmıştır.

3.2. Katkısız ZnO ve CdO Katkılı ZnO-CdO İnce Filmlerin Optik Özellik Analizi

Sol-jel yöntemi ile hazırlanmış olan katkısız ZnO ve ZnO:CdO/5:0, 4:1, 3:2 oranlarında kompozitleri mikroskop camı üzerine spin kaplama yöntemiyle kaplanarak ince filmler hazırlanmış ve hazırlanan ince film numunelerinin UV ölçümleri UV3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR Spektrometre cihazı ile yapılmıştır. UV ölçümleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak ince filmlerin Absorbans, Geçirgenlik, Yansıma ve Yasak Enerji Aralığı (Eg) grafikleri çizilmiştir.

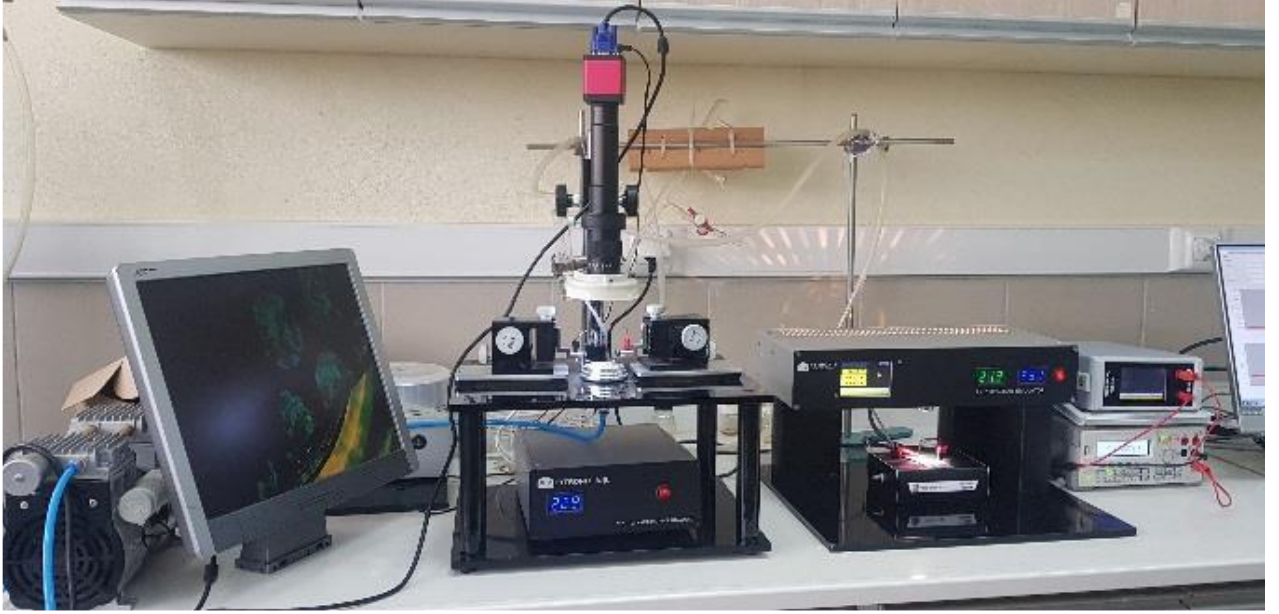


Şekil 3.2. Katkısız ZnO ve CdO-ZnO/p-Si diyotlarının U-V ölçümleri için kullanılan UV-VIS spektrofotometre cihazı

3.3. Katkısız ZnO ve CdO Katkılı ZnO İnce Filmlerin Elektriksel Özellik Analizi

Bu çalışmada hazırlanan katkısız ve ZnO:CdO/5:0, 4:1, 3:2 oranlarında hazırlanan Al/p-Si/ZnO:Cd/Al diyotlarının Akım-Voltaj (I-V), Kapasitans- Voltaj (C-V) ve Akım-Zaman (I-t) karakterizasyonları oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Al/p-Si/ZnO:Cd/Al

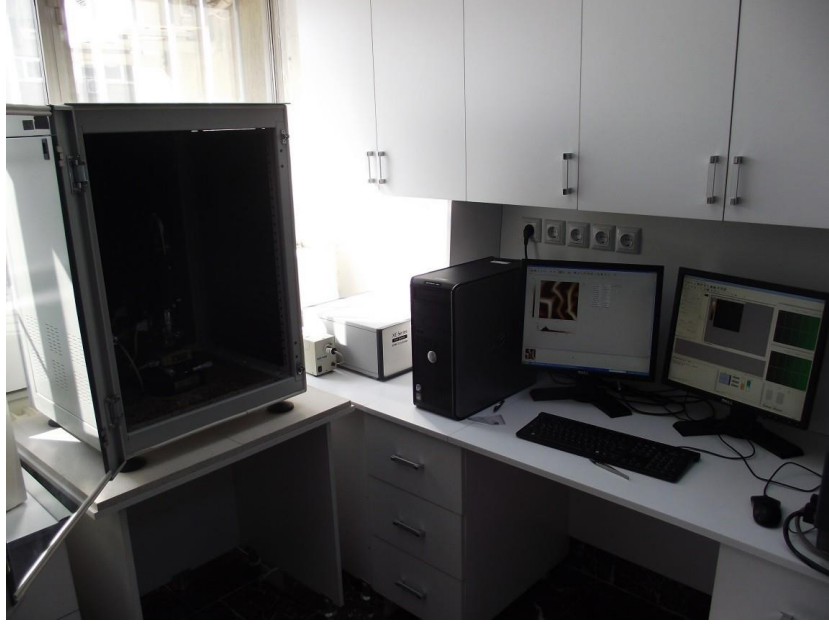
diyotları I-V analizleri karanlık altında ve farklı aydınlatma şiddetlerinde ($20 \frac{mW}{cm^2}$, $40 \frac{mW}{cm^2}$, $60 \frac{mW}{cm^2}$, $80 \frac{mW}{cm^2}$, $100 \frac{mW}{cm^2}$), I-t analizleri sadece farklı aydınlatma şiddetlerinde ve C-V analizleri farklı frekans (1 kHz - 1 MHz) aralıklarında analiz edilmiştir. Bu ölçümler Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoteknoloji Laboratuvarındaki FYTRONIX FY-7000 elektriksel cihaz karakterizasyon sistemiyle deney düzeneğinde yapılmıştır.



Şekil 3.3. Katkısız CdO ve CdO/ZnO/p-Si diyotlarının I-V, C-V ve I-t ölçümleri için kullanılan deney düzeneği

3.4. Katkısız ZnO ve CdO Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yüzey Özellik Analizi

p-tipi Silisyum alttaş üzerine Sol-jel yöntemi ile biriktirilen katkısız ve Cd katkılı ZnO ince film numunelerinin yüzey özelliklerini araştırmak amacıyla, yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri "PARK SYSTEM marka XE-100E model Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)" ile alınmıştır.

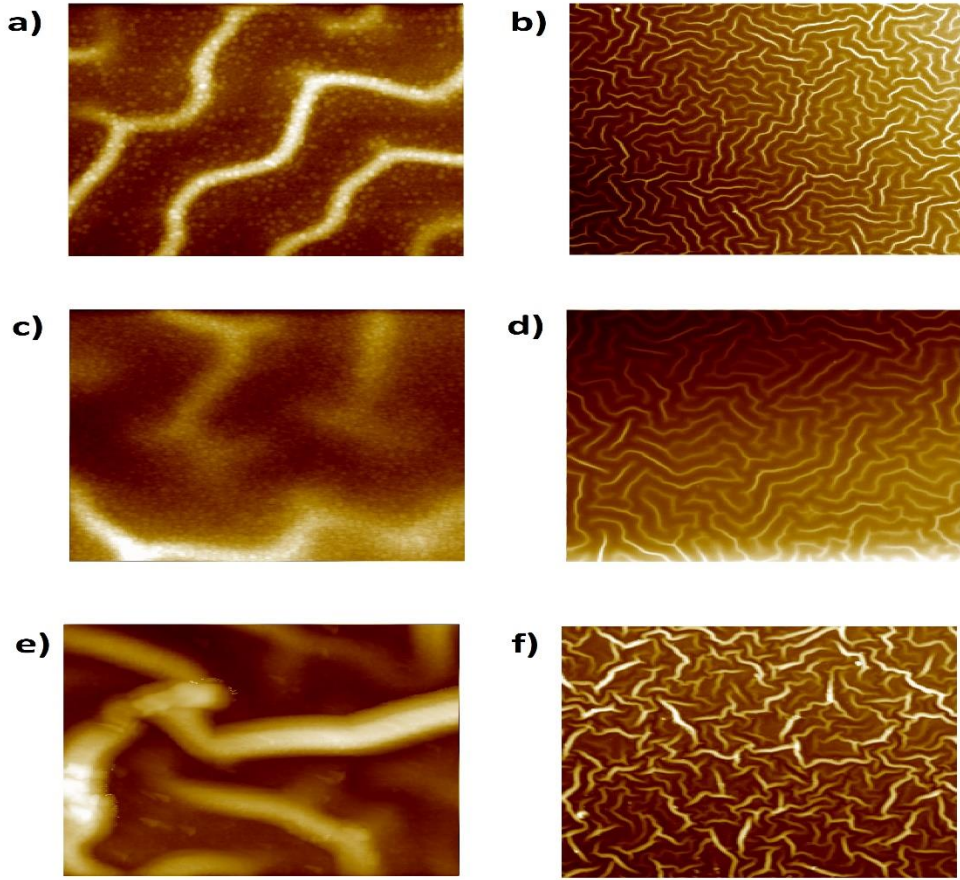


Şekil 3.4. Katkısız ZnO ve Cd/ZnO/n-Si diyotlarının yüzey ölçümleri için kullanılan AFM cihazı

4.ÖLÇÜM SONUÇLARI

4.1. ZnO-CdO İnce Filmlerin Yüzey Özellikleri

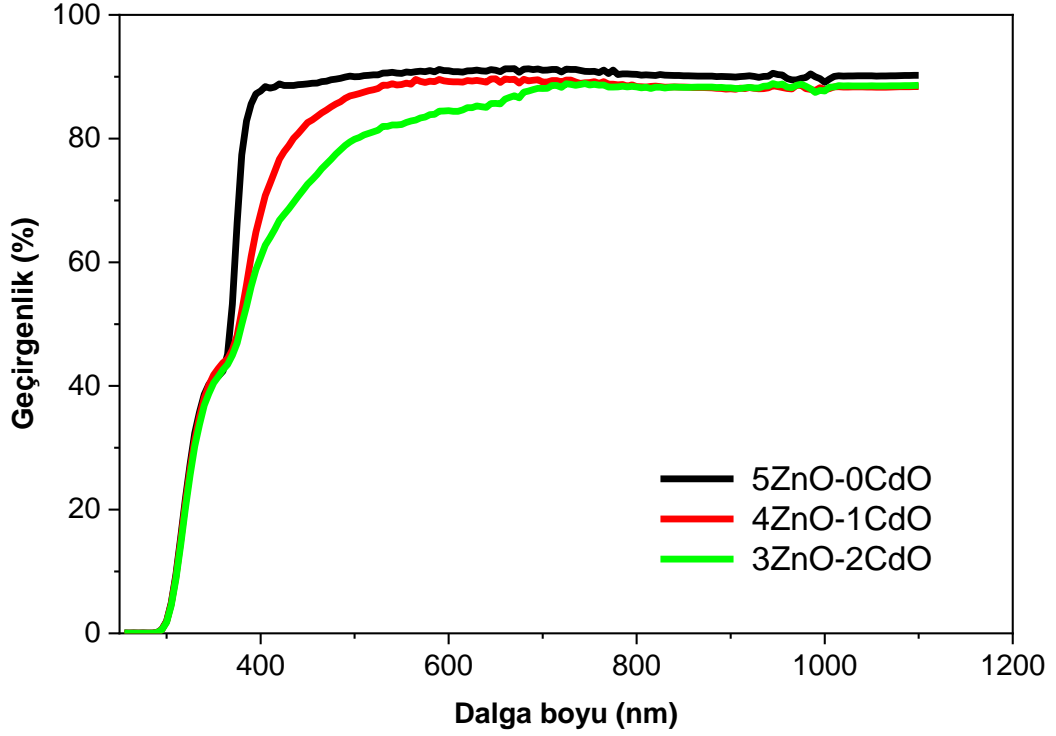
Atomik Kuvvet Mikroskopisi (AFM) görüntüleri, nano yapıda sol-jel biriktirme tekniği kullanılarak n-tipi Si üzerinde biriken ZnO: CdO kompozit filmlerinin oluşturulduğunu ortaya koymuştur. Nanofiberlerin alt katman üzerinde homojen bir şekilde büyüdüğü görülmüştür. AFM görüntülerinin görsel olarak incelenmesi nanofiberlerin yatay olarak büyüme ve dallara benzer şekillerde oluşma eğiliminde olduklarını göstermektedir. Nanofiberlerin arasındaki mesafe, numune hazırlama parametrelerine bağlı olarak her AFM görüntüsünde homojen bulunmuştur. ZnO: CdO kompozitlerin oranı 5:0 olan numuneler için nanotel çapının 400 nm ile 700 nm arasında olduğu görülmüştür. Burada nanotellerin uzunluğu 5-8 μm arasında ölçülmüştür (Şekil 4.1 a ve b). ZnO: CdO kompozit oranı 4:1 olan örnekler için nanotel çapının 350 nm ile 600 nm arasında olduğu görülmüştür. Burada nanotellerin uzunluğu 9 ile 14 μm arasında ölçülmüştür (Şekil 4.1 c ve d). ZnO: CdO oranı 3: 2 olan numuneler için nanotel çapının 200 nm ile 350 nm arasında olduğu görülmüştür. Burada nanotellerin uzunluğu 8 ile 18 μm arasında ölçülmüştür (Şekil 4.1. e ve f). Teller arasındaki mesafe, 700 nm'den 1300 nm'ye çıkarılarak hesaplanmıştır. Artan ZnO konsantrasyonunun, nanofiber uzunluğunun azaldığı nanofiber çapında artışa neden olduğu görülmektedir. Ayrıca, AFM görüntülerinin değerlendirilmesi, ZnO konsantrasyonunun azalmasının, teller arasındaki boşlukta bir artışa yol açtığını göstermektedir. CdO oranı arttıkça, nano fiberlerin kalınlığında bir azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 4.1. ZnO: CdO kompozit ince filmlerin AFM görüntüleri. 3:2 ZnO:CdO (a ve b), 4:1 ZnO:CdO ve 5:0 ZnO:CdO ince filmlerinde hazırlanan filmler (a, c ve e, 5x5 µm'de ve b, d, ve f 40x40 µm'de ölçeklendirilmiştir)

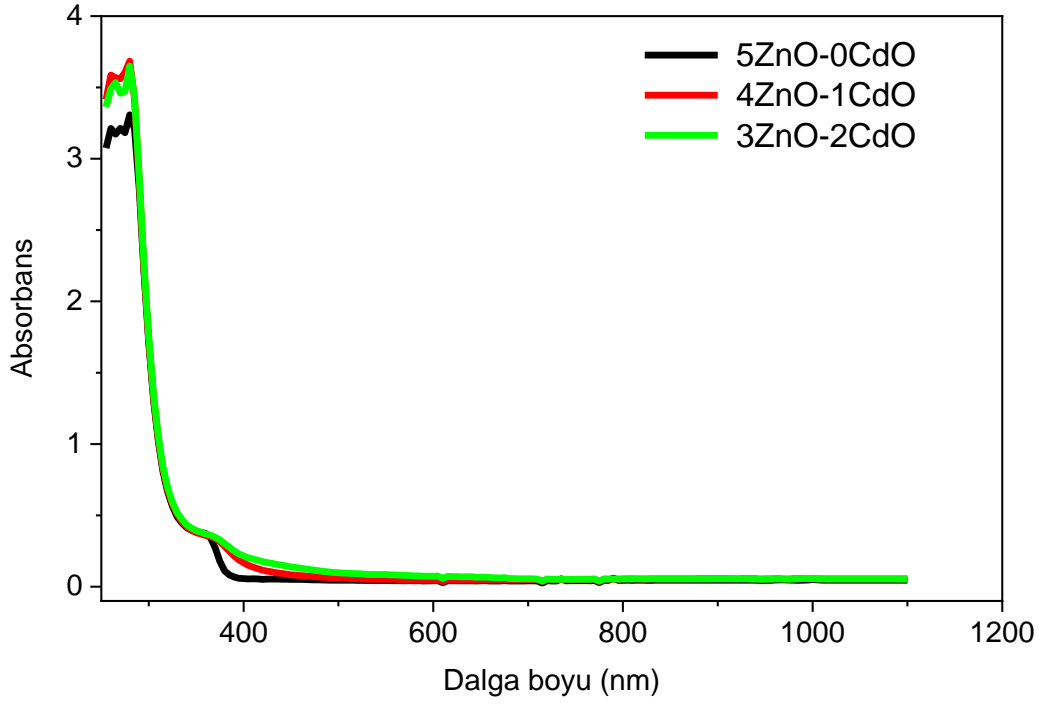
4.2. ZnO-CdO İnce Filmlerin Optik Özellikleri

Şekil 4.2.,4.3.,4.4. çeşitli molar oranlarda elde edilen mikroskop camı üzerine biriktirilmiş ZnO:CdO kompozit ince filmlerin optik geçirgenliğini, soğurmalarını ve yansıtma spektrumlarını göstermektedir. Bütün numuneler için 450–1000 nm aralığındaki geçirgenliğin neredeyse % 90 olduğu ve 5/0 M oranındaki ZnO/CdO bileşiği için en yüksek geçirgenliği gösterdiği görülmektedir. Bu durum, sentezlenen filmlerin bir fotovoltaik uygulamalarda sensör olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Şeffaflık seviyesi, filmin kristallliği ve iyi yapısal homojenliği ile ilişkilendirilir. İletimin yüksek olduğu bölgede dalgalanmalar vardır.



Şekil 4.2. ZnO:CdO kompozit ince filmlerin geçirgenlik grafiği

Şekil 4.3, numuneler için Soğurma spektrumlarını göstermektedir. Soğurma, görünür bölgede önemli bir değişiklik göstermez. Soğurma, 3/2 M oranındaki ZnO:CdO kompozit için yüksektir. ZnO:CdO nano-kompozitinin soğurma kenarı iki farklı geçişe sahip gibi görünmektedir (ZnO için 280 nm ve CdO için 360 nm). Bu, ZnO ile birleştirilmiş CdO parçacıklarını ifade eder [35,36]. Ek olarak, 390 nm'den sonra soğurma eğrilerinde bir azalma gözlenir, bu da safsızlıklardan kaynaklanan enerji seviyesi geçişinin ortadan kaldırıldığını gösterir [37].



Şekil 4.3. ZnO:CdO kompozit ince filmlerin soğurma grafiği

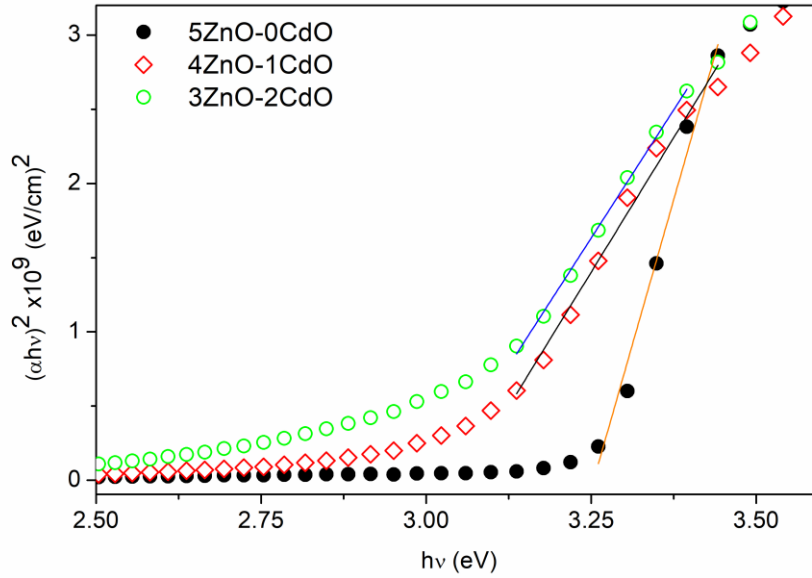
Filmin soğurma katsayısı (α), ifade [38] ile hesaplanmıştır:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (4.1)$$

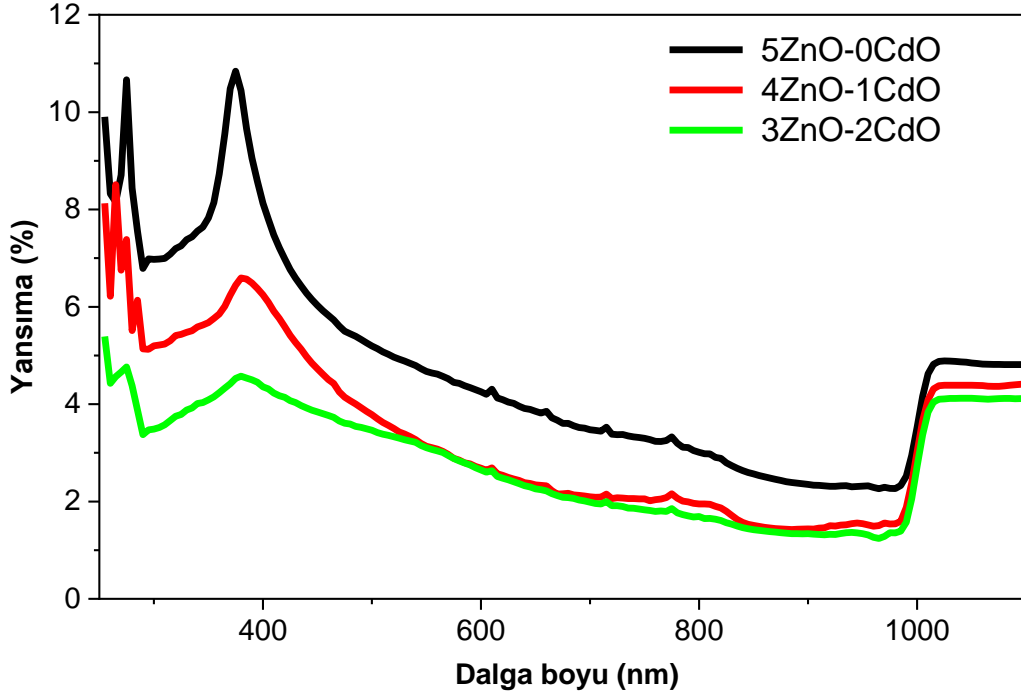
Burada T ve d sırasıyla geçirgenlik ve film kalınlığıdır. Enerji boşluğu, ZnO ince filmlerin geçirgenliğinden (T) hesaplanabilen soğurma katsayısından (α) belirlenir. Bu durum soğurumdaki ani bir artışın ardından değişmektedir. Soğurma ve fotoaktivite arasında bir ilişki vardır. ZnO:CdO kompoziti için molar oranın etkisi, optik absorbans ve iletim spektrumları için belirli dalga boyu aralıklarında görülürken, yansıtma spektrumları hemen hemen tüm ölçülen dalga boylarında değişmektedir. Düşük yansıma, 3/2 M oranındaki ZnO:CdO kompozitlerde görülür. Bu yöntem, ince filmler için optik bant aralığının tahmin edilmesinde kullanılır. Bant aralığı (E_g) aşağıdaki gibidir [39]:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (4.2)$$

Burada A sabittir ve $h\nu$ foton enerjisidir. Bant aralığı, $(\alpha h\nu)^2$ ve $h\nu$ 'nin karşılaştırılmasından (Şekil 4.4) tahmin edilebilir. Bant aralığı, 5/0 M ZnO: CdO oranındaki kompozit için 3.23 eV olup, 3/2 M oranındaki ZnO: CdO kompozit için 2.99 eV olmuştur. E_g 'in ZnO: CdO oranıyla değişimi, % 1 hassasiyetle değerlendirilerek Tablo 4.1'de verilmiştir. Kompozit içerisindeki CdO miktarı arttıkça, bant boşluğunun azaldığı görülmektedir. Bu, ZnO'dan daha düşük bir bant aralığı olan CdO'nun bant aralığı ile ilgilidir. Kaba malzemenin (3.37 eV) bant aralığına kıyasla 5/0 M oranındaki ZnO/ CdO kompozitin daha küçük bant aralığı kuantum hapsedme etkisine yöneltilir [40]. Rahal ve diğerleri [41], cam alt katmanlar üzerinde farklı Cd konsantrasyonlarına sahip ZnO: CdO nanokompozit ince filmler hazırlamış ve daldırma kaplamaya dayanan kolloidal rota tekniği kullanmışlardır. Saf ZnO bant aralığı için buldukları değer, 5/0 M oranındaki ZnO: CdO kompozit için elde ettiğimiz değerle aynıdır. Bant aralığının Cd oranı arttıkça azaldığını söylemişlerdir. Bu sonuçlar çalışmadaki bulgular ile uyumludur. İletim bandı Fermi seviyesine yaklaşmakta ve bant boşluğu daralmaktadır. Bu nedenle E_g , optoelektronikteki uygulamalar için ayarlanabilir bir parametredir.



Şekil 4.4. ZnO: CdO kompozit ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ değişim grafiği



Şekil 4.5. ZnO:CdO kompozit ince filmlerin yansıtma grafikleri

Şekil 4.5., yansıtma spektrumlarının (R) ile λ karşılaştırması (molar orana bağımlılık olarak) spektral değişmelerini göstermektedir. Yansıtma spektrumları, artan CdO oranı ile bir düşüş göstermektedir. ~400 nm'de geniş bir tepe görülmektedir. Bu, optik bant boşluğunda meydana gelen yüzey ve optik geçişlerden dolayı artan yansıtma ile ilgilidir [42]. Kırılma indisi değeri, optik performans izlemeyi tanımlayan parametreleri içerir. Karmaşık kırılma indisi aşağıdaki denklemde verilmiştir:

$$n^*(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda) \quad (4.3)$$

Burada k sönümlenme katsayısı ve n kırılma indisidir. n ve k değerleri arasındaki ilişki şu şekilde verilmiştir [43]:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (4.4)$$

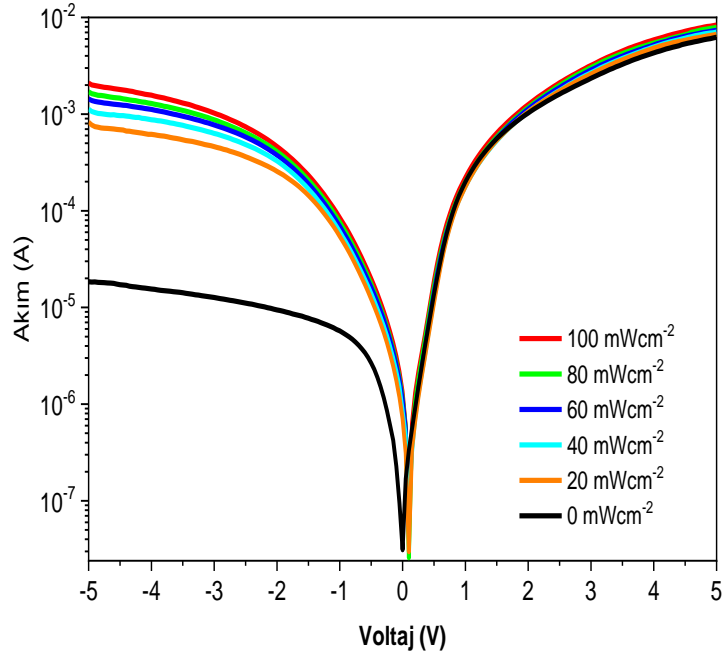
$$n = \left(\frac{1+R}{1-R} \right) + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \quad (4.5)$$

5/0 M oranındaki ZnO:CdO kompozit numune, $102 < \lambda < 407$ nm spektral aralığında en yüksek kırılma indisini sergiler. n 'nin yüksek değeri, ZnO:CdO ince filminin ana bant boşluğu soğurması ve kristalliği ile ilgilidir. Bu gözlem, dalga boyunda artışla birlikte ışık ve soğurma kaybını belirlemede kullanılır [44].

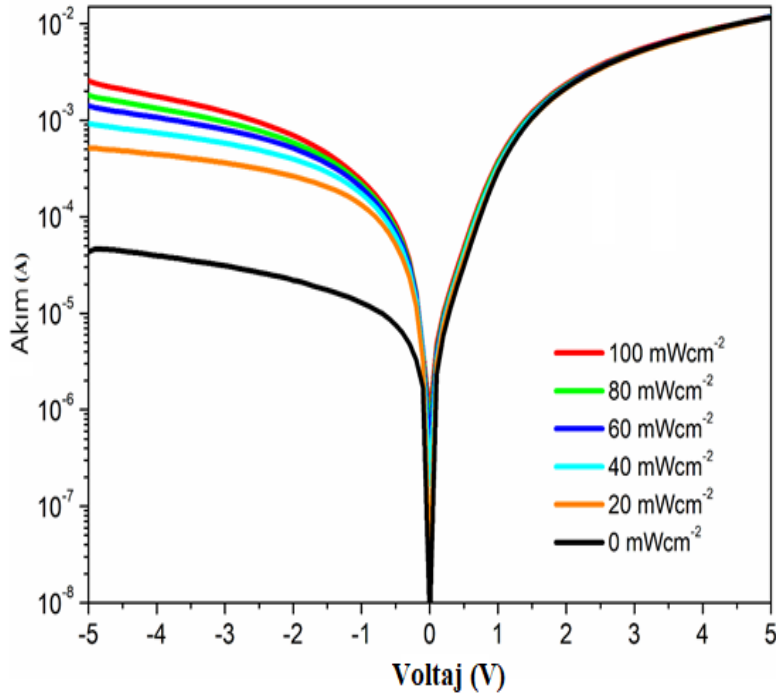
4.3. ZnO-CdO İnce Filmlerin Elektriksel Ölçüm Sonuçları

4.3.1. ZnO-CdO/n-Si Diyotlarının Foto Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

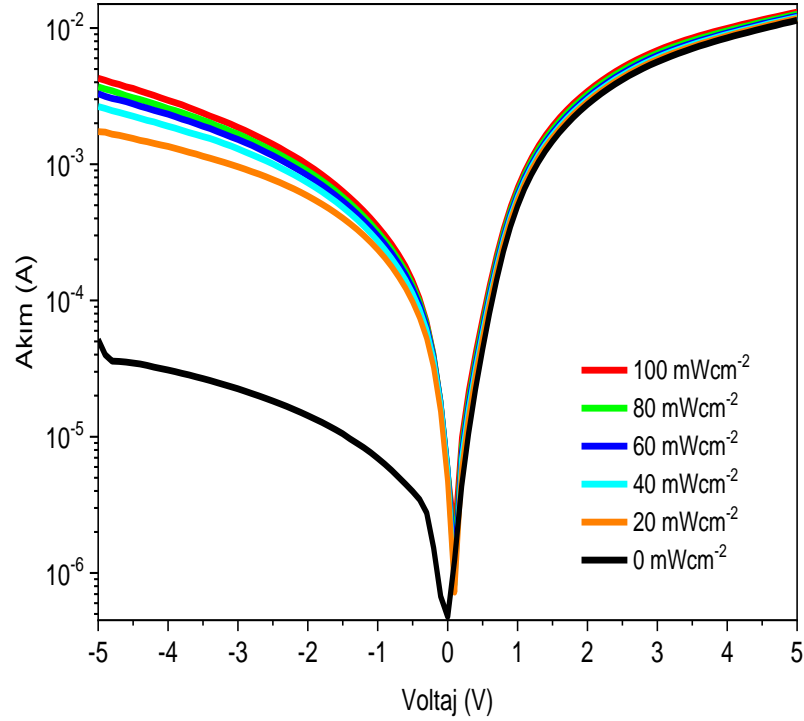
Al/ZnO-CdO/n-Si diyotları için akım-gerilim (I-V) grafikleri, Şekil 4.6-4.8'de görülmektedir. Tüm numuneler doğrultucu davranış sergiler. İleri yönde yaklaşık 0,65 V'luk sapmalara kadar olan akım, katlanarak artmıştır. Daha sonra, mevcut eğri, seri direncine bağlanan bir eğime sahip olur. Başlangıçta, ters yönde artan akım, artan voltaj ile doygunluğa ulaşır. Doyma akımı (I_0), karanlık $I-V$ eğrisinden gelen doğrusal rejime uyan 10^8 mA/cm²'dir. Ortalama kaçak akım yoğunluğunun, ZnO:CdO molar oranı ile değiştiği bulunmuştur. En düşük kaçak akım yoğunluğu, 5/0 M oranındaki ZnO:CdO numune için belirlenmiştir.



Şekil 4.6. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO:CdO/Al diyotların $I-V$ grafiği



Şekil 4.7. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO:CdO/Al diyotların $I-V$ grafiği



Şekil 4.8. 3/2 oranındaki Al/n-Si/ZnO:CdO/Al diyotların $I-V$ grafiği

4.3.2. ZnO-CdO/n-Si Diyotlarının Foto Akım-İletim (I-P) Karakteristikleri

İyi bilinen termiyonik emisyon denklemleri, ZnO-CdO/n-Si diyot parametrelerini tahmin etmek için kullanıldı [19]. $J-V$ özellikleri aşağıdaki denklem ile değerlendirilir:

$$J = J_0 \exp\left(\frac{q(V - JR_s A)}{nkT}\right) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{q(V - JR_s A)}{kT}\right) \right\} \quad (4.6)$$

Doyma akım yoğunluğu J_0 aşağıdaki gibidir:

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (4.7)$$

Burada k , n , Φ_{b0} , T , q , A , A^* , J_0 ve V sırasıyla Boltzman sabiti, idealite faktörü, bariyer yüksekliği, elektronik şarj, temas alanı, Richardson sabiti, doyma akım yoğunluğu ve voltajdır. A^* , n tipi silikondaki elektronlar için $112 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ teorik değerine sahiptir [45]. $V-JR_s A$ terimi, diyottaki ileri voltaj düşüşü ile ilgilidir. Diyot için görünen bariyer yüksekliği (BH) ve idealite faktörü, sırasıyla, lineer bölgenin kesişimi ve eğiminden,

$\ln[J/\{1-\exp(q(V-JR_sA)/kT)\}]$ 'nin kesiminin V ile karşılaştırılmasından tahmin edilebilir. İlişki aşağıdaki gibidir:

$$n = \frac{q}{kT} \left[\frac{dV}{d \ln(I)} \right] \quad (4.8)$$

$$\Phi_{b0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4.9)$$

Diyot parametreleri olarak tanımlanan bariyer yüksekliği ve idealite faktörü sırasıyla 0,75 eV-0,82 eV ve 1,67-3,50 arasında değişmektedir (Tablo 4.1). İdeallik faktörü, ZnO-CdO kompozit bazlı silikon heterojonksiyon diyotlarının ideal olmayan davranışına atfedilen birlikten daha büyüktür. ZnO-CdO ince film katmanlarının varlığı, diyotun ideal olmayan rejimde çalıştığı bir faktör olarak kabul edilir. Bariyer yüksekliği, ZnO/CdO'nun artan CdO molar oranı ile birlikte değişir. Taşıyıcıların saçılması ve yakalanması, Zn/Cd-O molekülü etrafındaki tane sınırları boyunca meydana gelir. Böylece, tane sınırı homojen olmayan Schottky bariyerinin kaynağını oluşturur. ZnO-CdO/n-Si diyot için bariyer yüksekliği, n tipi Si (0.66 eV) 'ye dayanan metal yarı iletken diyotlara göre daha yüksektir [46-49].

Numune Adı (ZnO/CdO)	ϕ_b (eV)	n	E_r (eV)	RR (Rect. Ratio)	Kazanç (20 mWcm ⁻²)	γ	D_n (cm ² eV ⁻¹)
5ZnO-0CdO	0.84	2.44	3.23	338	43.80	0.57	3.7x10 ¹²
4ZnO-1CdO	0.85	1.67	3.07	269	10.91	1.01	4.4x10 ¹²
3ZnO-2CdO	0.78	3.50	2.99	220	32.60	0.56	2.1x10 ¹²

Tablo 4.1. ZnO-CdO/n-Si diyotlarının ve ZnO/CdO kompozit ince filmlerinin bazı hesaplanan parametreleri

ZnO / CdO kompozitinin her molar oranı için bariyer yüksekliğinin çeşitli aydınlatma yoğunluklarında tespit edildiği görülmüştür. İlişki aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

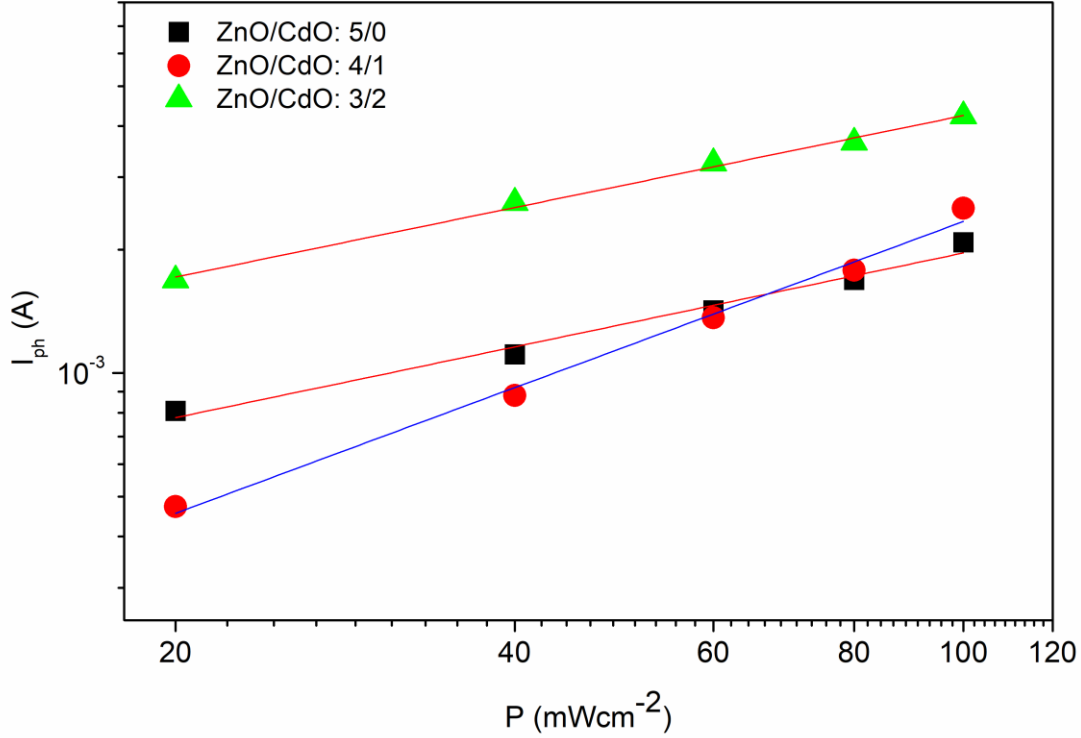
$$\Phi_{b0}(P) = \Phi_{b0} - \alpha P \quad (4.10)$$

Burada α ve P sırasıyla aydınlatma katsayısı ve aydınlatma yoğunluğudur. α katsayısı, 4/1 M oranındaki ZnO/CdO ara yüzey tabakası olan Al/p-Si heterojonksiyon diyotu için -3.56×10^{-4} eV/W olarak bulunmuştur. Bu, -4.73×10^{-4} eV/K olarak bildirilen Si bant aralığının sıcaklık katsayısı ile yapılan bir anlaşmadır. Yük taşıyıcı iletim için kapsamlı araştırmalar, bir doğrusal fonksiyon ilişkisi göz önüne alındığında, bariyer yüksekliğinin aydınlatma katsayısı ve bant aralığının sıcaklık katsayısı arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılabilir [50,51]. Fotoiletkenlik spektrumu, elektron deliği çiftleri gibi fotojenerasyon yük taşıyıcılarının sayısından meydana gelen kazanç faktörünü içerir [52]. Mevcut kazanç aşağıdaki gibidir:

$$Gain = \frac{I_{ph}}{I_d} \quad (4.11)$$

Kazanç değeri, 5/0 M oranındaki ZnO/CdO arayüzey tabakası içeren Al/p-Si heterojonksiyon diyotu için 5 V'da 20 mWcm^{-2} aydınlatma yoğunluğu altında en yüksek değeri veren 43.80 olarak bulundu.

Şek. 5, ışık yoğunluğu (P) ile foto akımı (I_{ph})'nı karşılaştırmaktadır. I_{ph} artan aydınlatma yoğunluğu ile artmaktadır ($I_{ph} \propto P^\gamma$) [53]. γ kuvvet (üs) iken P ise gelen ışığın yoğunluğudur. ZnO/CdO oranı 5/0 M, 4/1 M, 3/2 M olan örnekler için Kuvvet değerleri sırasıyla 0.57, 1.01 ve 0.56 olarak belirlenmiştir. Hareketlilik aralığındaki durumların yoğunluğu, γ [54]'nin kuvantumlamasıyla tanımlanmaktadır. γ değerleri, bazı bölgelerdeki daha az hata oranı ve yakalama merkezlerinin düşük yoğunluk arasında bir ilişki olduğu bildirilmiştir [55,56].



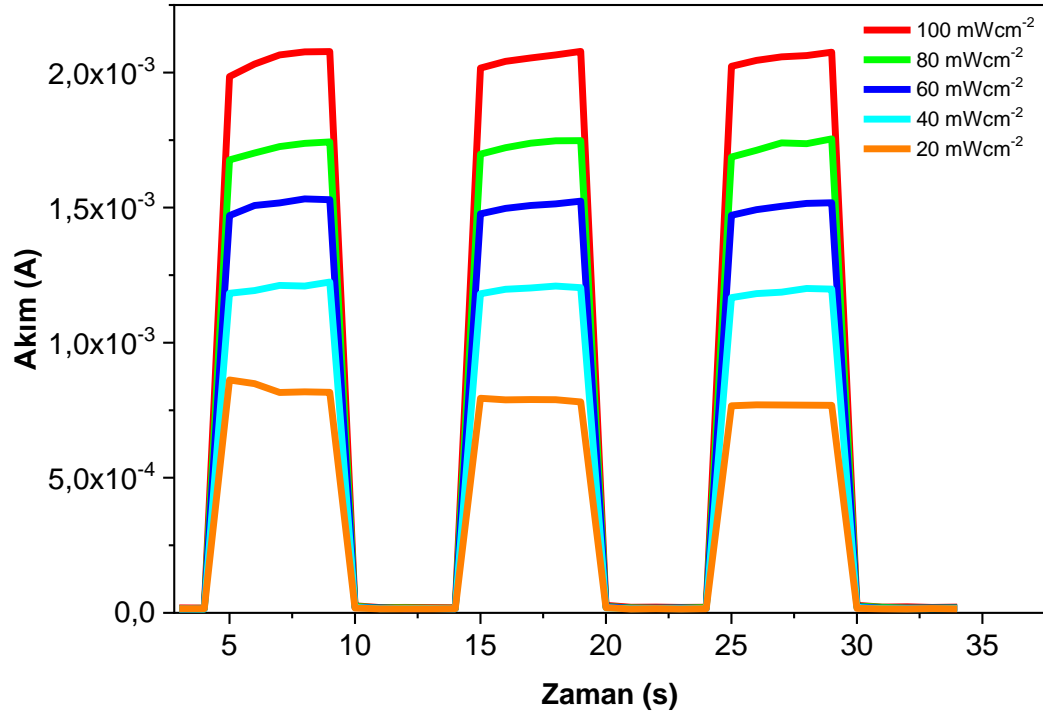
Şekil 4.9. Fotoakım (I_{ph}) ile aydınlatma şiddeti (P)'nin karşılaştırılması

Foto-yanıt özelliklerinde, kazanç ($G=N_{electron}/N_{photon}$) olarak verilmiştir. Bu birim zamanda çekilen fotonlar için kazanılan elektron sayısıdır ve aşağıdaki şekilde verilmiştir [57]:

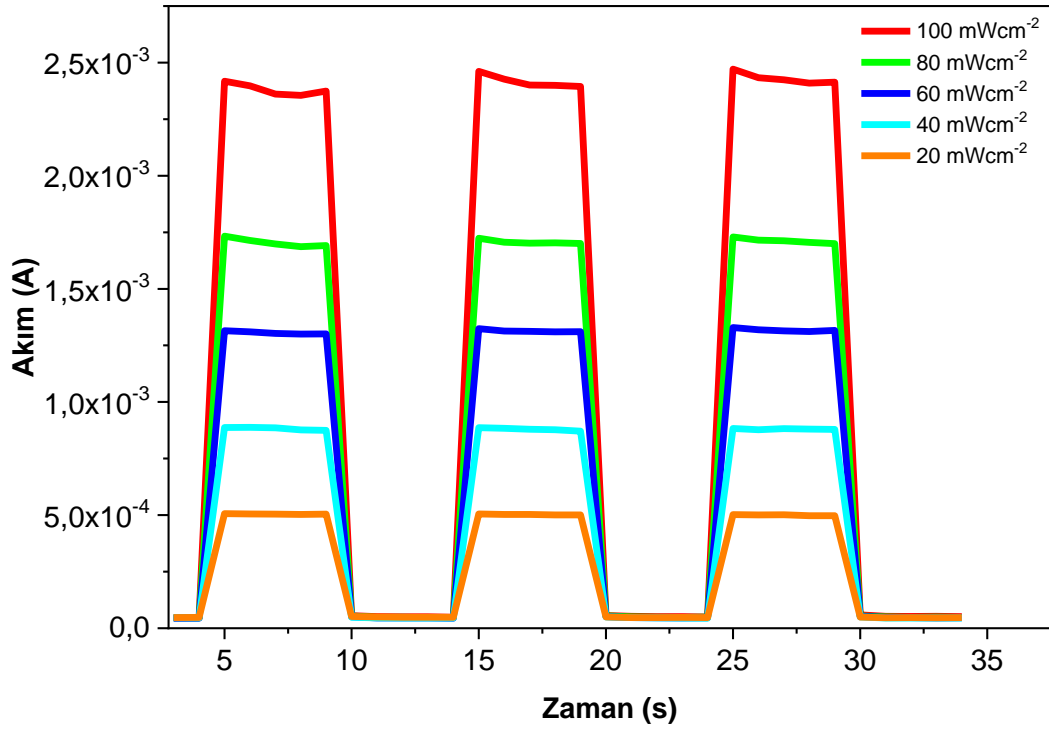
4.3.3. ZnO-CdO/n-Si Diyotlarının Foto Akım-Zaman (I-t) Karakteristikleri

$$G = \left(\frac{I_{photo} - I_{dark}}{PA_{abs}} \right) \times \left(\frac{hv}{q} \right) \quad (4.12)$$

Şekil (4.10,4.11), geçici fotoakım ($I-t$) ölçümlerini göstermektedir. Fotoakım, 4/1 M oranındaki ZnO/CdO arayüzey katmanı ile birlikte Al/p-Si diyotu için 2.41×10^{-3} A'dır. Bu oran, kompozitteki CdO molar oranındaki artışla önemli ölçüde değişmiştir. Fototransient ölçümleri, artan aydınlatma yoğunluğuyla birlikte bir artış sergiler. Akımdaki doyma ışık emiliminin sınırlandırılması ile açıklanabilir. $I-t$ ölçümleri, taşıyıcı mobilitesine ve rekombinasyon oranına bağlı olarak, sıkışmış taşıyıcı durumları tarafından baskındır [58]. Taşıyıcı durumlar, yarı iletkenlerin boşalma katmanındaki yük değişimini düzenler. Aynı zamanda, geçiş sırasında meydana gelen zıt sinyaller boşluk durumlarına bağlanır.



Şekil4.10. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun I-t grafiği



Şekil 4.11. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun I-t grafiği

$$I_{pc} = I_0 + \alpha \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + \beta \left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (4.13)$$

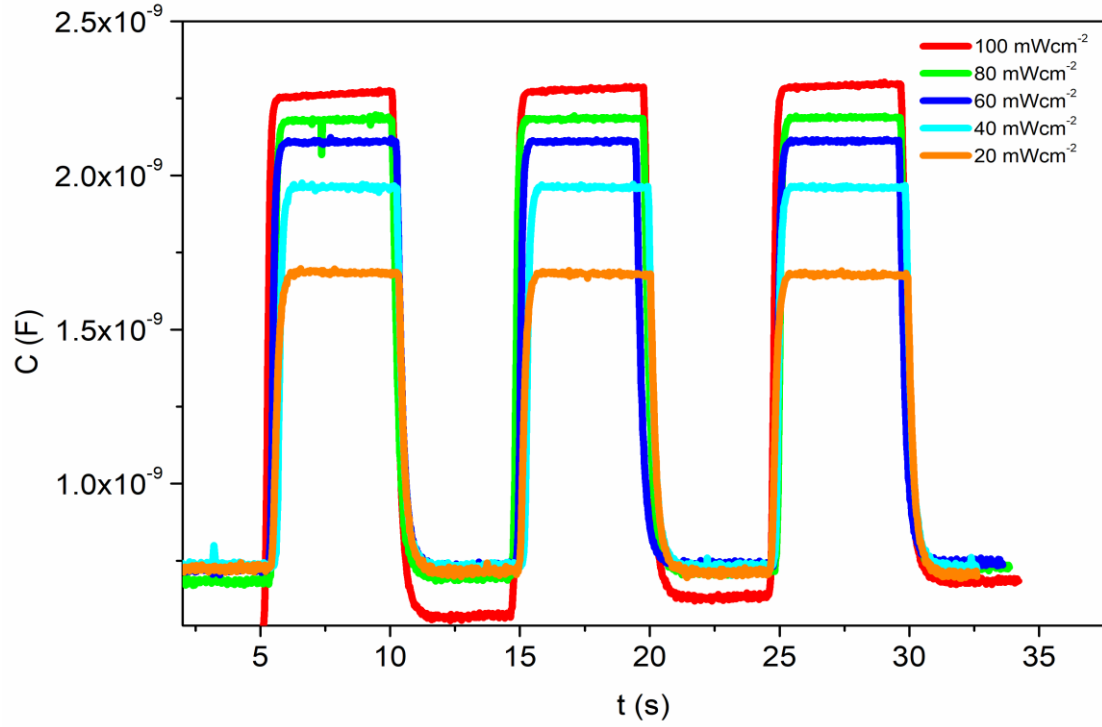
Burada I_{pc} , fotoakımıdır. α ve β , foto ile ilişkili her işlemin nispi katkısına bağlıdır. τ_1 ve τ_2 , zaman sabitleridir.

4.3.4. Al/ZnO-CdO/n-Si Diyotlarının Foto Kapasitans-Zaman (C-t)

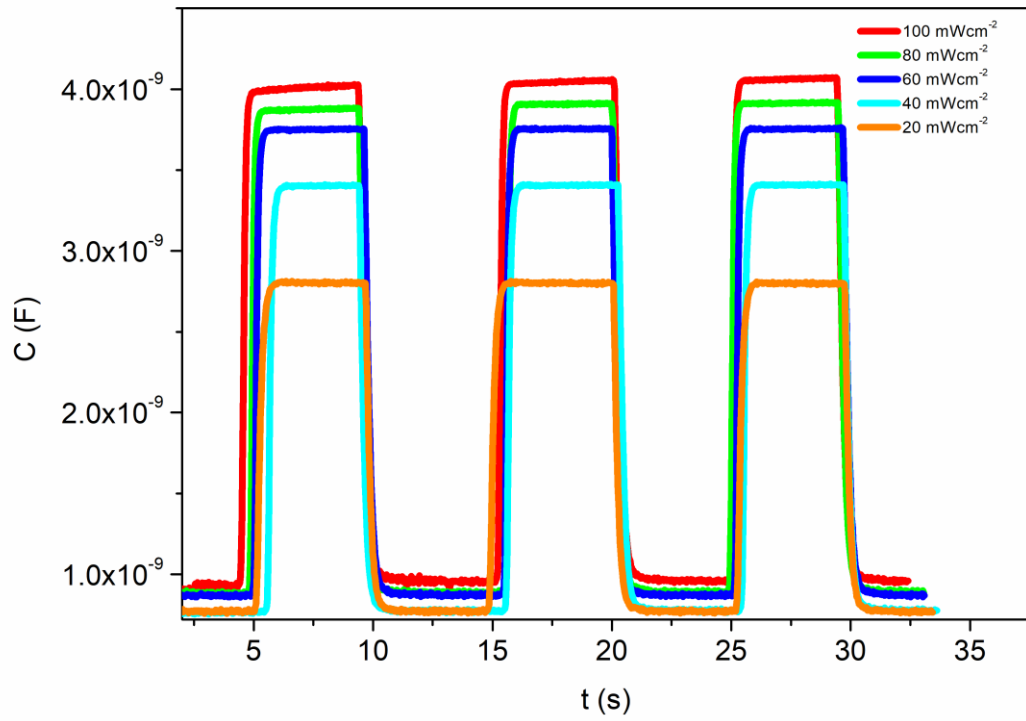
Karakteristikleri

Metal-yarı iletken kontak durumunda, ışığın emildiği katman e^-h^+ çiftlerinin oluşumuna neden olur [59]. Hata durum dağılımları, bir aralık yükü transferinde geçici fotokapasitans (C_{ph}) ölçüleriyle incelenebilir. (C_{ph}), derin seviyelerin ışınımlı iyonlaşmasının ve tükenme bölgesinde foto-kaynaklı taşıyıcıların yoğunluğunun analizi için güçlü bir araçtır. Ayrıca, CdTe'deki [60] kusur seviyelerini araştırmak için kullanılmıştır. Şekil 4.13-4.15, çeşitli aydınlatmalar altındaki ve (4.13) 5/0 M, (4.14) 4/1 M ve (4.15) 3/2 M oranında ZnO/CdO kompozit katmanlı Al/n-Si diyotlarının fotokapasitans geçişlerini gösterir.

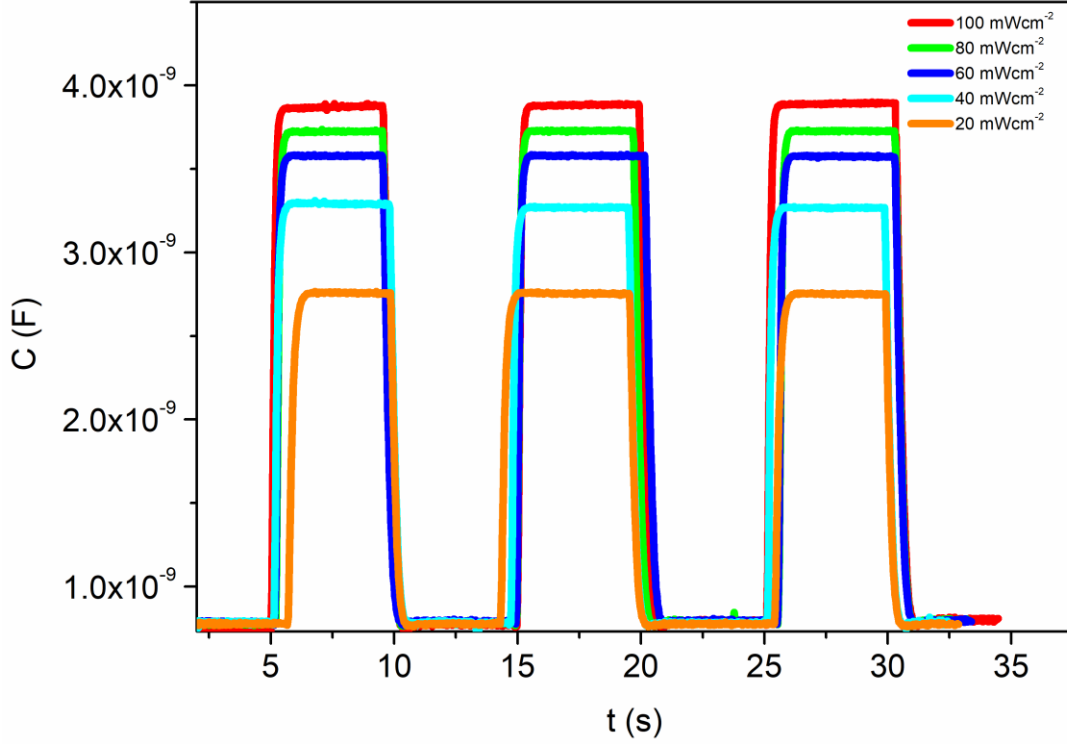
Geçici fotokapasitans, Al/ZnO-CdO/n-Si diyotuna uygulanan fotokapasitans pozitif olarak bağlanır. Işık vurduktan sonra iç katmanda oluşan yük taşıyıcılar ve kıtlık bölgesinin olduğu katmandaki daralma geçici fotokapasitans karakteristiğine bağlıdır. Aydınlatma devam etse bile kapasite sabit kalmaktadır. Aydınlanma yoğunluğu arttıkça, kapasitansın doygunluğa daha yüksek değerlerde ulaştığı görülmektedir. Kapasitenin doygunluğa ulaştığı nokta ile ışık yoğunluğu arasında bir ilişki vardır. Kapasitans değeri, temel değerine keskin bir şekilde geri döner ve aydınlatma kesildiğinde herhangi bir bozulma göstermez. Al/ZnO-CdO/n-Si cihazı için CdO molar oranı arttıkça, kapasitansın doygunluğa daha yüksek değerlerde ulaştığı görülmektedir. Kapasite, aydınlatma yoğunluğu 100 mW/cm^2 olduğunda, yaklaşık 4.01 nF olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun C-t grafiği



Şekil 4.13. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun C-t grafiği



Şekil 4.14. 3/2 oranındaki Al/n-Si/ZnO:CdO/Al diyotunun C-t grafiği

4.3.5. Al/ZnO-CdO/n-Si Diyotlarının Foto Kapasitans-Voltaj (C-V)

Karakteristikleri

Fotokapasitans ve geçici kısım karakteristik zamanı (τ_T) aşağıdaki gibi ifade edilir [61]:

$$C_{ph} = -\frac{d\sigma_{ph}}{dV} = -d/2 \frac{d\rho_{ph}}{dV} \quad (4.14)$$

$$\tau_T = \frac{d^2}{2\mu V} = \frac{\rho_{ph}d}{J_{ph}} \quad (4.15)$$

Burada μ hareketlilik, d tükenme genişliği, J_{ph} fotoakım yoğunluğu ve ρ_{ph} foto-şarj yoğunluğudur. İletim bandında lokalize olan durumlar, yakalanan elektronla ilgili fotokapasitans ile ortaya çıkmaktadır. Bir fotodiyotun kapasitesi, jonksiyon kapasitansı ile değerlendirilir. Foto kaynaklı aktivasyon, tükenme kapasitansında bir artışa neden olur. 5/0 M, 4/1 M ve 3/2 M oranında ZnO:CdO alaşımli Al/n-Si diyotlarının fotokapasitans değerleri 100 mWcm⁻²'de sırasıyla 2.27 nF, 4.02 nF, 3.88 nF olarak belirlenmiştir. Fotokapasitansın, Al/ZnO-CdO/n-Si için artan CdO molar oranı ile arttığı görülmektedir.

Bu artış kısmen CdO'nun molar oranının artmasıyla geriler. Fotokapasitans verileri, uygulanan sinyali takip eden arayüz yükleri nedeniyle düşük frekans bileşenini gösterir. Arayüz yüklerinin yeniden dağıtılması, düşük frekanslarda cihaza uygulanan elektrik alanına dayanır. Birleşim kapasitansının tükenme katmanına olan bağımlılığı aşağıdaki şekilde [62] yazılabilir:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{X_d} \quad (4.16)$$

Burada A , diyot alanıdır, ϵ_r , C/C_0 , C_0 serbest alan kondansatörünün kapasitansı olarak verilen dielektrik sabiti, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm ve X_d , tükenme tabakasının genişliği olup aşağıdaki gibidir:

$$X_d = \left[\frac{2\epsilon_{si}}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (V_{bi} - V_r) \right]^{1/2} \quad (4.17)$$

Burada N_D ve N_A sırasıyla verici ve alıcı yoğunluğudur. Boşalma genişliği, Al/ZnO: CdO/n-Si heterojonksiyon diyotları için 10^{-6} m'dir. Ayrıca, birim alandaki jonksiyon kapasitesi:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} + V_r - kT/q)}{q\epsilon_r\epsilon_0 A^2 N_i} \quad (4.18)$$

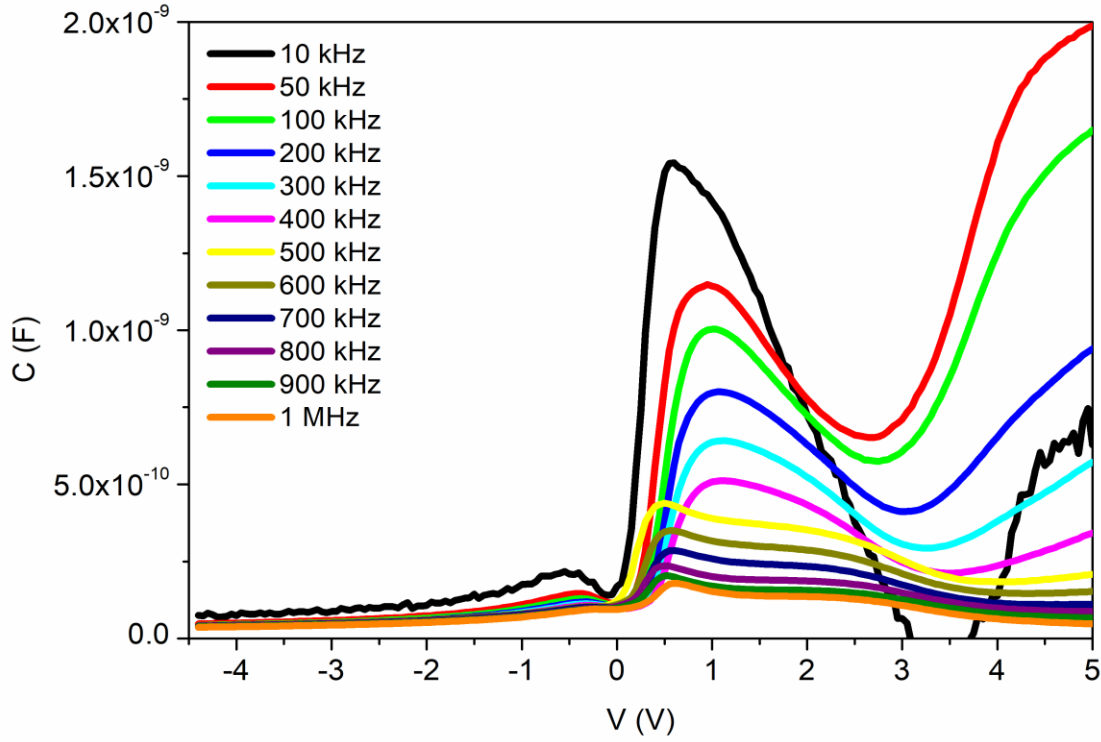
Burada V_{bi} , dâhili voltaj(built-in voltage), V_r ters yanlı voltaj ve N_i iyonlaştırılmış alıcıların yoğunluğudur. Kapasitansın değişimi, tükenme genişliğinin ayarlanmasını sağlamaktadır. Tükenme tabakasının kontrol edilebilirliği aşağıdaki şekilde verilmektedir [63]:

$$T(\%) = \frac{\epsilon_{rv} - \epsilon_{r0}}{\epsilon_{r0}} \times 100 \quad (4.19)$$

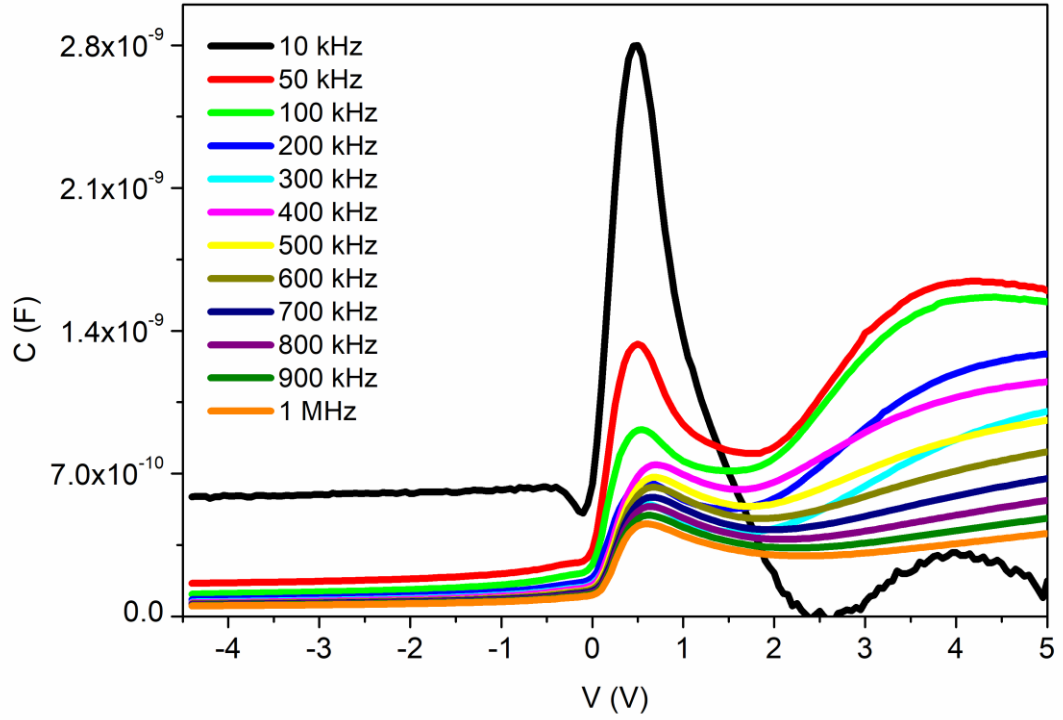
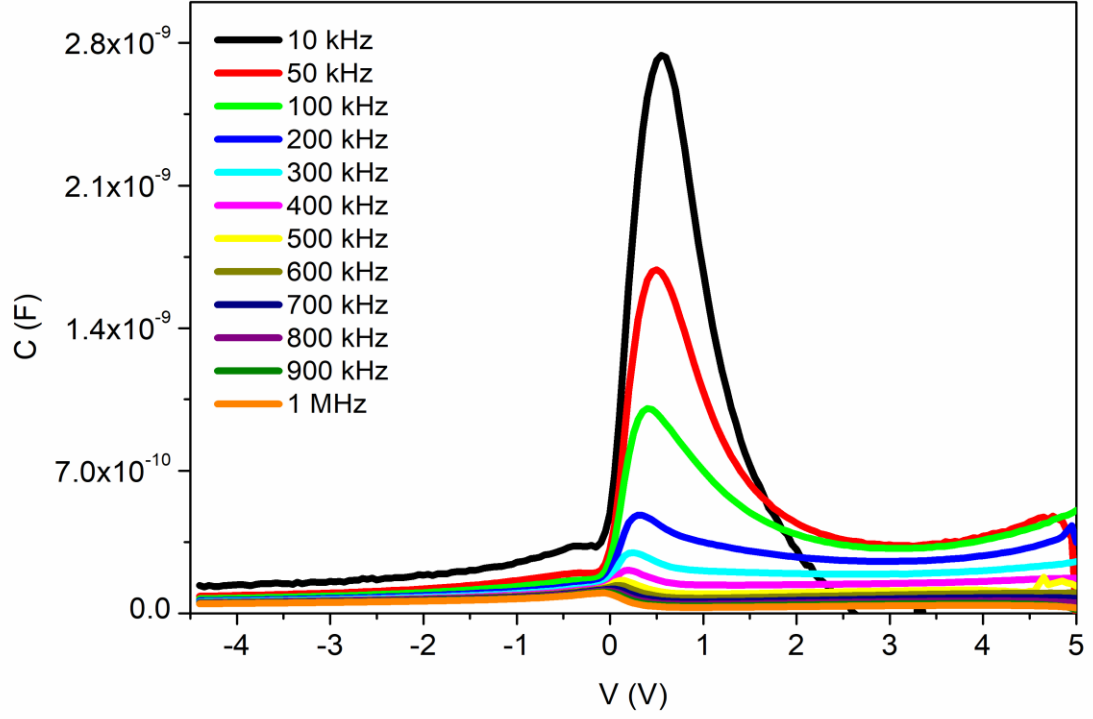
Burada ϵ_{rv} , belirli bir ters polarlama geriliminde dielektrik sabiti ve ϵ_{r0} , sıfır polarlama gerilimindeki dielektrik sabitidir.

Şekil 4.16., 4.17., 4.18. çeşitli frekanslardaki ve 5/0 M, 4/1 M ve 3/2 M oranında ZnO: CdO kompozit katmanlı Al/n-Si diyotlarının kapasitans-voltaj ($C-V$) grafiklerini göstermektedir. Frekans azaldıkça kapasitenin ileri taraflı polarlamada arttığı, ters

polarlamada ise neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Bu, değişken sinyale yanıt veren (a.c.) arayüz durumlarının varlığı ile desteklenir. Kapasitansın ana bileşenleri yarı iletken kapasitansı (C_s) ve arayüz kapan kapasitansını (C_{ss}) içerir [63]. Frekansa bağlı değişimin, ileri polarlama bölgesinde tepe yaptığı gözlenir. Frekans düştükçe pikler giderek artar. Aynı zamanda, kapasitans, ZnO:CdO kompozitinin artan CdO molar oranıyla da artmaktadır. Özellikle 50 kHz'deki 5 V'a kadar olan ve 5/0 M ve 3/2 M oranında ZnO:CdO kompozit katmanlı Al/n-Si diyotları için kapasitede, ileri polarlamada değişen bir dalgalanma gözlemlenir. Kapasitansın, ZnO:CdO kompozit Al/n-Si yapısının CdO molar oranı ile ayarlanabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.15. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO:CdO/Al diyotunun C-V grafiği



4.3.6. ZnO-CdO/n-Si Foto diyotlarının Arayüzey Durum Özellikleri

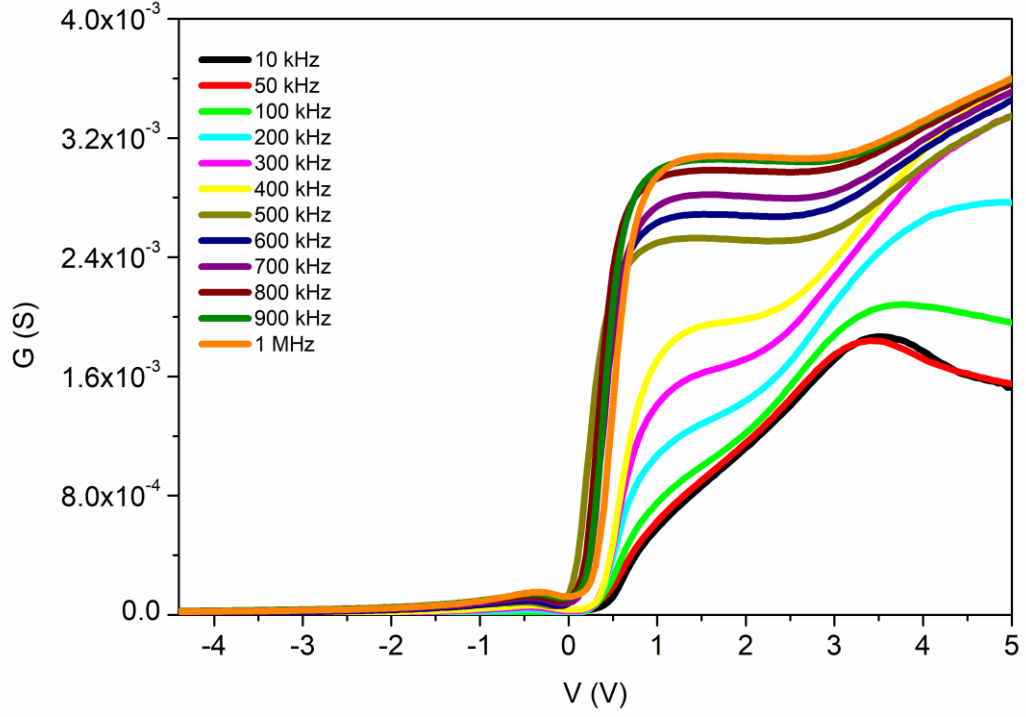
Şekil 4.18., 4.19., 4.20. çeşitli frekanslardaki ve 5/0 M, 4/1 M ve 3/2 M oranında ZnO:CdO kompozit tabakası olan Al/n-Si diyotlarındaki Kapasitans-Voltaj (C-V) grafiği göstermektedir. Ölçümler, frekansın bir fonksiyonu olarak 10 kHz-1 MHz aralığında yapılmıştır. İletkenlik, ZnO:CdO kompozitinin artan CdO molar oranına bağlı olarak değişmekte olup, 3/2 M oranındaki ZnO:CdO kompozit tabakası en yüksek iletkenlik değerini vermektedir. Kapasitans ve iletkenliğin seri dirençten etkilenmesi kaçınılmazdır. Seri direncin etkisi teorik olarak elimine edilebilir veya düzeltilebilir. Düzeltilmiş kapasitans (C_{ADJ}) ve düzeltilmiş iletkenlik (G_{ADJ}) aşağıdaki şekilde ifade edilir [64]:

$$C_{ADJ} = \frac{[G_m^2 + (2\pi f C_m)^2] C_m}{a_R^2 + (2\pi f C_m)^2} \quad G_{ADJ} = \frac{[G_m^2 + (2\pi f C_m)^2] a}{a_R^2 + (2\pi f C_m)^2} \quad (4.20)$$

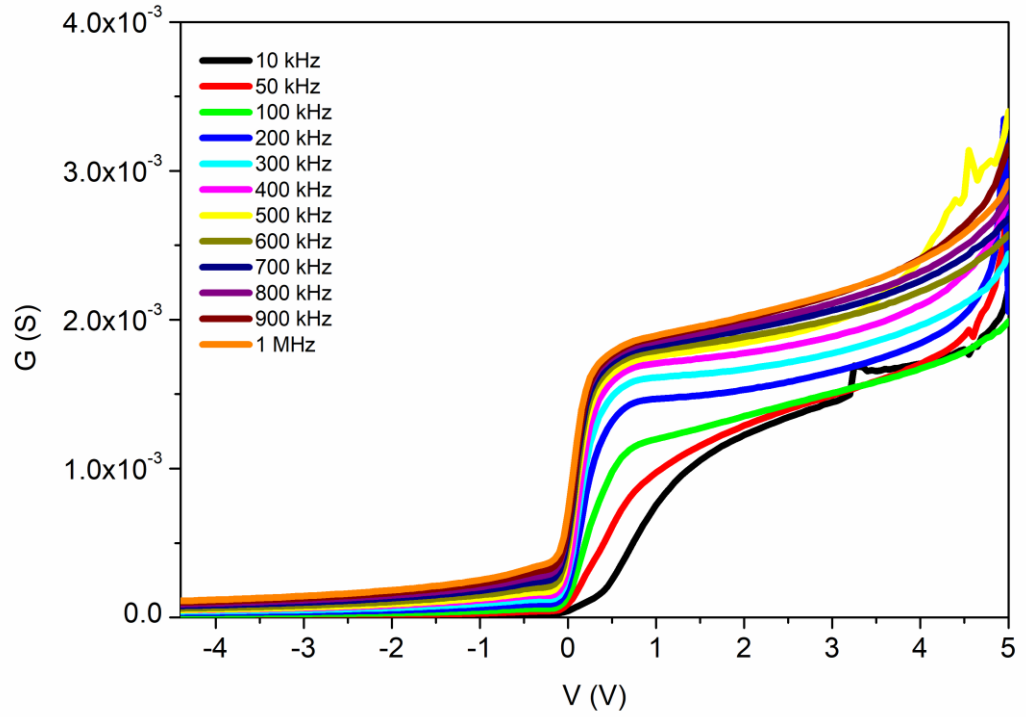
$$a_R = G_m - (G_m^2 - (2\pi f C_m)^2) R_s \quad (4.21)$$

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (2\pi f)^2 C_m^2} \quad (4.22)$$

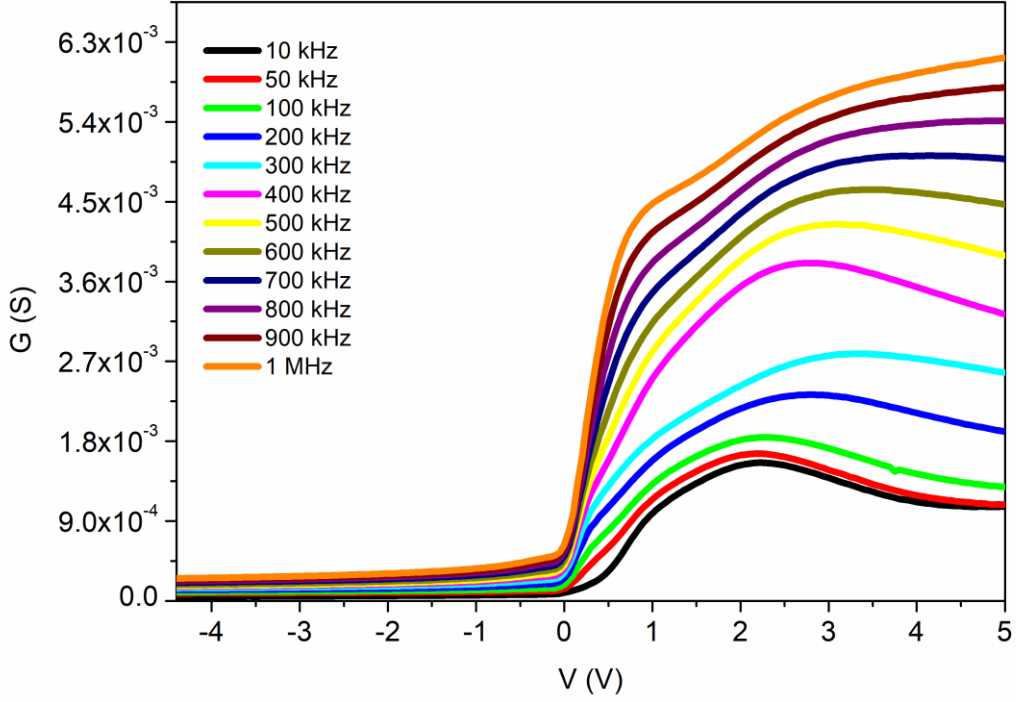
Burada C_m ölçülen kapasitans, R_s seri direnç, G_m ölçülen iletkenlik ve f frekanstır. İletkenlik özellikleri, tükenmeye, birikmeye ve çevrilmeye ait bileşenler sunmaktadır. Azınlık taşıyıcıları çoğunlukla inversiyon tabakasında bulunur. Tükenen bölgenin artması, çoğunlukta taşıyıcı yoğunluğunu artırır. Arayüz yakalamalarının yakınında biriken iletkenliğe katkıda buldukları sonucuna varılmıştır [65,66].



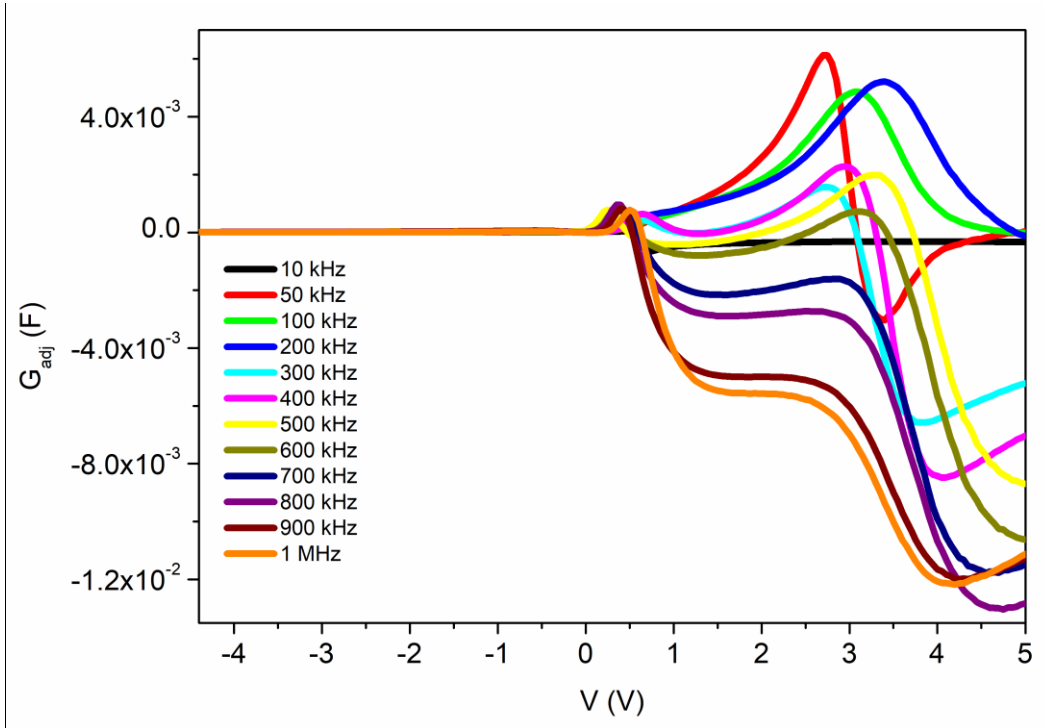
Şekil 4.18. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO:CdO/Al diyotunun G-V grafiği



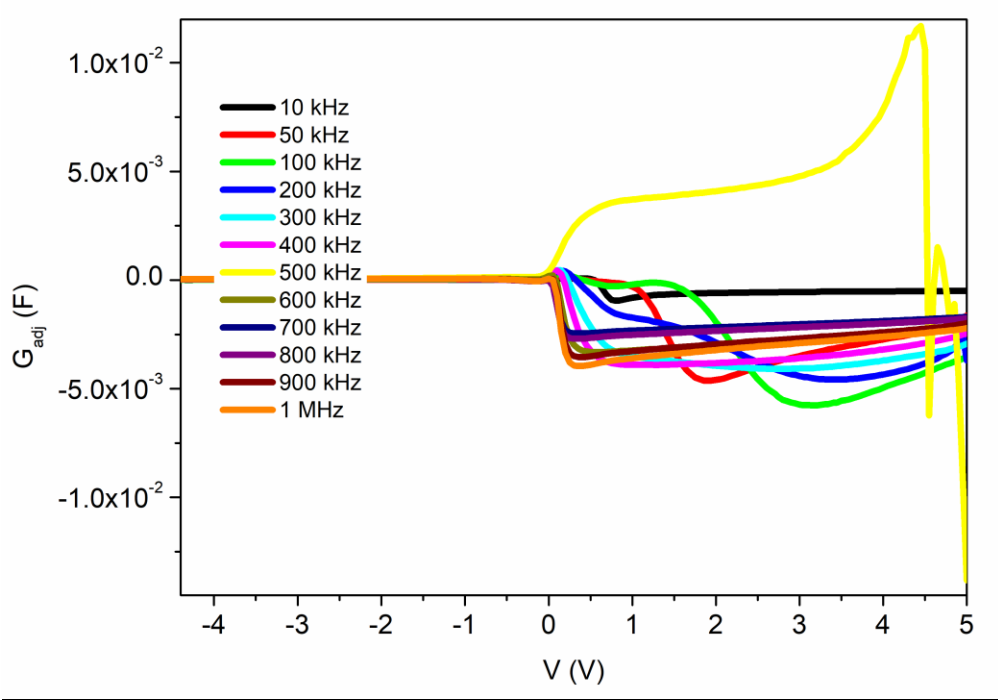
Şekil 4.19. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO:CdO/Al diyotunun G-V grafiği



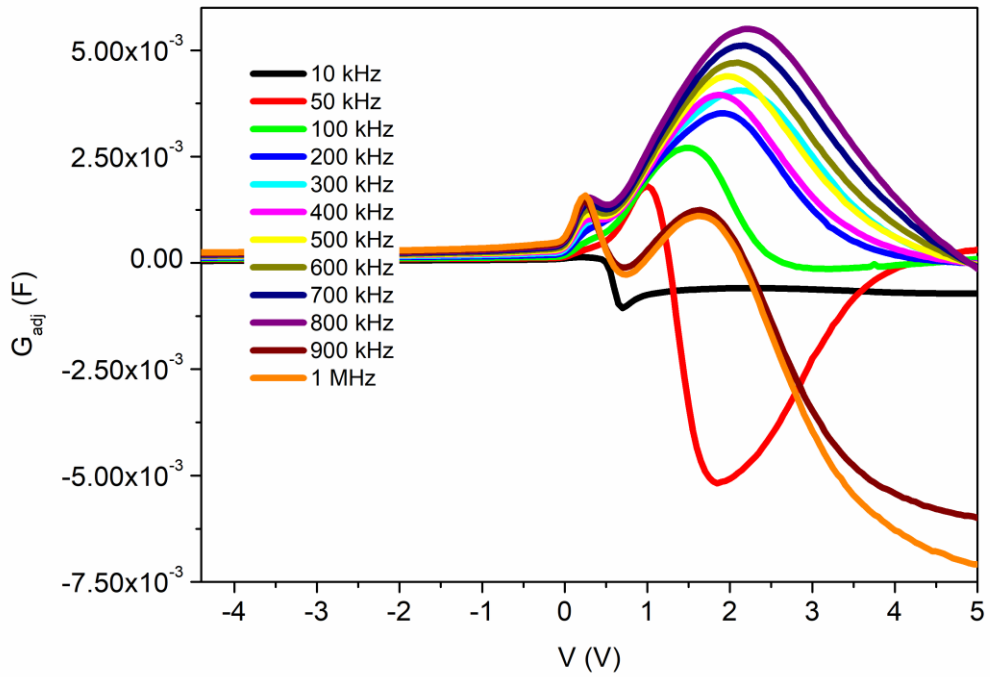
Şekil 4.20. 3/2 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun G-V grafiği



Şekil 4.21. 5/0 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun G_{adj} -V grafiği



Şekil 4.22. 4/1 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun G_{adj} - V grafiği



Şekil 4.23. 3/2 oranındaki Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotunun G_{adj} - V grafiği

5.SONUÇ VE YORUM

ZnO: CdO kompozitinin çeşitli molar oranlarında ZnO: CdO/n-Si ve mikroskop camı üzerine sol-jel yöntemiyle kaplanmıştır. Atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) görüntüleri, nano yapıda sol-jel spin kaplama tekniği kullanılarak üretilen n-tipi Si üzerinde biriken ZnO: CdO filmlerinin oluştuğunu ortaya koymuştur. Nanofiberlerin alt katman üzerinde homojen bir şekilde büyüdüğü görülmüştür. AFM görüntülerinin görsel olarak incelenmesi nanotellerin yatay olarak büyüme ve dallara benzer şekillerde oluşma eğiliminde olduklarını göstermektedir. İki yarı iletkenin farklı molar oranı ile elde edilen ZnO-CdO kompozitinin Optik Özellikleri, Soğurma, Geçirgenlik ve Yansıma ölçümleri kullanılarak analitik olarak incelenmiştir. Tüm numuneler için 450–1000 nm aralığındaki geçirgenliğin neredeyse % 90 olduğu ve 5:0 M oranındaki ZnO: CdO bileşiği için en yüksek geçirgenliği gösterdiği görülmüştür. Bu durum, sentezlenen filmlerin bir pencere tabakası ve tandem güneş pilleri için malzeme olarak kullanılabilmesini göstermektedir. Şeffaflık seviyesi, filmin kristallliği ve iyi yapısal homojenliği ile ilişkilendirilir. İletimin yüksek olduğu bölgede dalgalanmalar vardır. Geçirgenlik, elde edilen emme katsayısından optik bant boşluğunun bulunmasını sağlar. Al/ZnO: CdO/p-Si/Al diyotlarının foto-tepki özelliklerini araştırmak için akım-gerilim ($I-V$), geçici fotoakım ($I-t$) ve geçici fotokapasitans ($C-t$) tekniği kullanılmıştır. Sonuçlar, 5/0, 4/1 ve 3/2 molar ZnO: CdO oranına sahip olan kompozitlerin, foto-indüklenmiş yük aktivitesi gösterdiğini ve Al/n-Si/ZnO: CdO/Al optoelektronik uygulamalarda fotodiyot olarak kullanılabilmesini göstermiştir. Al/n-Si/ZnO: CdO/Al diyotlarının elektriksel özelliklerinin, ZnO: CdO kompozitinin çeşitli molar oranlarına göre değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. ($C-V$) grafiklerinde görülen pikin varlığı, arayüzey-durum varlığını göstermektedir. Pikin yüksekliği arayüzey durumunun yoğun olduğunu belirtmektedir. Artan frekans ile pik, arayüzey-durum yoğunluğunun değişti görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Horzum, Ş. 2005. Kimyasal olarak kaplanmış Cu₂O ince filmlerin Yapısal, Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] Ottoson, M. and Carlsson, J. 1996. chemical Vapor Deposition of Cu₂O and CuO from CuI and O₂ or N₂O. *Surface and Coating Technology*, 78; 263-273.
- [4] Risto, M. and Sinadinovski, Gj. 1985. Chemical Deposition of Cu₂O Thin Films. *Thin Solid Films*, 123;63-67.
- [3] Pierson, J.F., Tohbor, A. and Billard, A. 2003. Cuprite, Paramelaconite and Tenorite Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering. *Applied Surface Science*, 210; 359-367.
- [5] Nair, M.T.S., Guerro, L., Arenas, O.L. and Nair, P.K. 1999. Chemically Deposited Copper Oxide Thin Films: Structural, Optical and electrical Characteristics. *Applied surface Science*, 150; 143-151.
- [6] Liu, Z-Q., Guo, R., Li, G-R., Bu, Q., Zhao, W-X., Tong, Y-X., 2012, Facile electrodeposition of large-area CdO and Cd_{1-x}CoxO curved nanowires, *Electrochimica Acta* 59, 449-454.
- [7] Dakhel, A. A., 2009, Influence of dysprosium doping on the electrical and optical properties of CdO thin films, *Solar Energy*, 83, 934–939.
- [9] Sanchez-Juarez, A., Tiburcio-Silver, A., Ortiz, A., Zironi, E.P. ve Rickards, J., “Electrical and optical properties of fluorine-doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis,” *Thin Solid Films*, 333, 196-202, 1998.
- [8] Fan, X.M., Lian, J.S., Guo, Z.X. ve Lu, H.J., “Microstructure and photoluminescence properties of ZnO thin films grown by PLD on Si(111) substrates,” *Appl. Surf. Sci.*, 239, 176–181, 2005.
- [10] Dinek, T., 2006. CdO yarıiletken bileşiğinin spray pyrolysis yöntemi ile elde edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

- [11] Beiser, A. (1997), *Modern Fiziğin Kavramları*, (çev. G. ÖNENGÜT), Akademi Yayınları, İstanbul, Türkiye.
- [12] Demir, M., 2005. SnO₂ filmlerinin bazı fiziksel özellikleri üzerine taban sıcaklığının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [13] Bilgen, Y., 2008. Sol-gel yöntemiyle üretilen nanokristal ZnO:Ga ince filmlerinin optik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [14] Şener, D., 2006. Sol-gel yöntemiyle hazırlanan metal oksit ince filmlerin elektriksel, yapısal ve optiksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [15] Sarı, H., 2008. “Yarıiletken Fiziği Elektronik ve Optik Özellikler” ders notları.
- [16] Streetman B.G., ve Banerjee S.K., 2010. “Solid State Electronic Devices”.
- [17] Turton, R. (2005). *Katıların Fiziği*. (Çev. Prof. Dr. Yahya Kemal Yoğurtçu), Aktif Yayınevi.
- [18] Sze, S.M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.*, Willey, New York.
- [19] Gündüz, B., 2007. Organik yarıiletken fotodiyotların hazırlanması ve optoelektronik özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [20] Çavaş, M., 2011. Nano yapılı metal oksit yarıiletkenler kullanılarak foto diyotların üretilmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [21] Sze, S. M., and Kwok K. Ng, 2007. “Metal-Semiconductor Contacts”, *Physics of semiconductor Devices, 3rd ed.*, John Wiley & Sons, New York, 245-300.
- [22] Erol, A., Balkan, N., 2015. *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*, 2. Baskı, Seçkin Yayıncılık.
- [23] www.ee.sc.edu/personal/faculty/photodiodes.pdf.
- [24] Özyurt Kuş, F., 2010. Bakır oksit/çinko oksit heteroeklem yapıların elektriksel ve Optiksel özelliklerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Ankara Üniversitesi, Ankara.

- [25] Dere,A., 2014. Grafen esaslı fotodedektörlerin üretilmesi ve elektriksel özelliklerinin karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Elâzığ.
- [26] Roberts, R., Fox, J.J., Martin, A.M., 1932. Photo-Conductivity of diamonds, *Nature*, 129, 579.
- [27] Johnson, Mark., 2003. Photodetection and Measurement. Blacklick, OH, USA: *McGraw-Hill Professiona Publishing*, p. 14, 15.
- [28] Bıyıklı, N., 2004. High-Performance Al_xGa_{1-x} N-Based UV Photodetectors for Visible/Solar-Blind Applications, *Doktora Tezi*, Bilkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [29] Karakız, M., 2008. Farklı çözeltiler kullanılarak üretilen ZnO ince filmlerinin yapısal ve optik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [30] Irmak, S., 2006. Flor katkılı CdO yarıiletken bileğinin spray pyrolysis yöntemi ile elde edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [31] Kaya, T., 2006. Sol-gel yöntemi ile ZrO₂-Al₂O₃seramik kompozit oksit üretim karakterizasyonu ve ZrO₂'nin parametrik etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [32] Akyüz, H., 2008. Sol-gel yöntemiyle hazırlanan seramik ince filmlerin dielektrik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, şanlıurfa.
- [33] Palalı, E., 2005. Sol-gel yöntemiyle indiyum kalay oksit (ITO) ince film üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- [34] C. Tan, D. Sun, D. Xu, X. Tian, Y. Huang, *Ceramics International* 42 (2016) 10997–11002.
- [35] Ch Venkata Reddy, B. Babu, Jaesool Shim, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 112 (2018) 20–28.
- [36] Satish P. Meshram, Jalindar D. Ambekar, Imtiaz S. Mulla, Dinesh P. Amalnerkar, Parag V. Adhyapak, *J. Nanoeng. Nanomanuf.* 4 (2014) 127–134.

- [37] P. Senthil Kumar, M. Selvakumar, Purabi Bhagabati, B. Bharathi, S. Karuthapandian, S. Balakumar, CdO/ZnO nano hybrids: facile synthesis and morphologically enhanced photocatalytic performance, *RSC Adv.* 4 (2014) 32977–32986.].
- [38] Shanmuganathan G, Shameem IB, Krishnan S, Ranganathan B. Influence of K-doping on the optical properties of ZnO thin films grown by chemical bath deposition method. *J. Alloys Compd.* 2013; 562:187-193.
- [39] M. Soylu, O. Savas, *Materials Science in Semiconductor Processing* 29 (2015) 76.
- [40] Yanlu Li, Xian Zhao, and Weiliu Fan, *J. Phys. Chem. C* 115 (2011) 3552–3557.
- [41] Badis Rahal, Boubekour Boudine, Ahmed Redha Khantoul, Miloud Sebais, Ouahiba Halimi, *Optik* 127 (2016) 6943–6951.
- [42] R. Saleh, S.P. Prakoso, A. Fishli *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 324 (2012) 665.
- [43] A. El-Korashy, H. El-Zahed, M. Radwan, *Physica B* 334 (2003) 75.
- [44] A.M. El Sayed, S. Taha, G. Said, F. Yakuphanoglu, *Superlattices and Microstructures* 65 (2014) 35.
- [45] H.C. Card, E.H. Rhoderick, *J. Phys. D* 4 (1971) 1589.
- [46] P. Durmus, M. Yıldırım, *Mater. Sci. Semiconductor Process.* 27 (2014) 145.]
- [47] Ö.T. Özmen, E. Yaghlouglu, *Mater. Sci. Semiconductor Process.* 26 (2014) 448.
- [48] F. Yakuphanoglu, *Microelectron. Eng.* 87 (2010) 1884.
- [49] S. Altındal, T. Tunç, H. Tecimer, I. Yücedag, *Materials Science in Semiconductor Processing* 28 (2014) 48.
- [50] E. Budianu, R. Muller, M. Purica, L. Eftime, R. Skarvelakis, G. Kiriakidis, *Thin Solid Films* 518 (2009)1057.
- [51] K. Ali, M. Hafezi, *Superlattices and Microstructures* 54 (2013) 1.
- [52] N.K. Hassan, M.R. Hashim, N.K. Allam, *Sens. Actuators A* 192 (2013) 124.
- [53] S. Kazim, V. Ali, M. Zulfequar, M.M. Haq, M. Husain, *Physica B* 393 (2007) 310.

- [54] A. Rose, Concepts in Photoconductivity, (Interscience, New York, 1963).
- [55] R.K. Gupta, F. Yakuphanoglu, Solar Energy 86 (2012) 1539.
- [56] N. Camaioni, G. Casalbore-Miceli, G. Beggiato, M. Cristani, C. Summonte, Thin Solid Films 366 (2000) 211.
- [57] C. Soci, A. Zhang, B. Xiang, S.A. Dayeh, D.P.R. Aplin, J. Park, X.Y. Bao, Y.H. Lo, D. Wong, NanoLett. 7 (2007) 1003.
- [58] R.C.I. MacKenzie, C.G. Shuttle, G.F. Dibb, N. Treat, E. von Hauff et al. J. Phys. Chem. C 117 (2013) 12407.
- [59] M.M. Khan, S.A. Ansari, D. Pradhan, M.O. Ansari, D.H Han, Journal of Materials Chemistry A 2 (2014) 637.
- [60] S. Duke, et al., J. Cryst. Growth 159 (1996) 916.
- [61] I. Nurdjaja, E.A. Schiff, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 467 (1997) 723.
- [62] A. Vander Ziel, Solid state physical electronics. 2nd ed. (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall; 1968).
- [63] U.C. Chung, C. Elissalde, M. Maglione, Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 042902.
- [64] E.H. Nicollian, J.R. Brews, MOS Physics and Technology, (Wiley, New York, 1982).
- [65] E.H. Nicollian, J.R. Brews, Bell Syst. Tech. J. 46 (1976) 1055.
- [66] R. Castange, A. Vapaille, Surf. Sci. 28(1) (1971) 157.
- [67] W.A. Hill and C.C. Coleman Solid-State Electron. 23 (1980) 987.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Ahmet ŞEVİK

Doğum Yeri ve Tarihi : Edirne 07.05.1990

E-Posta : ahmetsevik111@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü
- **Yükseklisans** : 2019, Kırklareli Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, Katı Hal Fiziği