



**DÖRT BİLEŞENLİ FONKSİYONEL YARIİLETKEN
İNFRARED FOTODEDEKTÖRLERİNİN
ÜRETİLMESİ VE ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

MUSTAFA İLHAN

Doktora Tezi

Fizik Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU

OCAK 2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRT BİLEŞENLİ FONKSİYONEL YARIİLETKEN İNFRARED
FOTODEDEKTÖRLERİNİN ÜRETİLMESİ VE ELEKTRONİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

F.Ü. Fen Fakültesi Fizik Bölümü

Mustafa İLHAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18.12.2018

Tezin Savunulduğu Tarih: 21.01.2019

Tez Danışman : Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU(F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sefa KAZANÇ(F.Ü)

Prof. Dr. Şükrü KARATAŞ(K.S.Ü)

Prof. Dr. Murat SOYLU(B.Ü)

Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN(F.Ü)

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince gerek çalışmalarında gerekse manevi destek ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU'na sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında yardımlarını ve desteğini esirgemeyen, bana vermiş olduğu moral ve motivasyon için değerli arkadaşım Uzm. Dr. Ayşegül DERE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Hoşgörüsü, sevgisi, fedakârlığı ve desteğiyle hep yanımda olan sevgili eşim Sebile İLHAN' a ve evin neşesi olan kızım Elif Yaren İLHAN'a gönülden teşekkür ederim.

Elazığ -2019

Mustafa İLHAN

Bu tez çalışması FF.16.39 nolu proje kapsamında Fırat Üniversitesi Bilimsel Projeler Araştırma Birimi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XII
SEMBOLLER LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ	1
2. YARIİLETKEN MALZEMELER.....	4
2.1. İnorganik Yarıiletkenler.....	6
2.2. Dört Bileşikli Yarıiletken Malzemeler	8
2.2.1. Bakır (II) Klorür (CuCl_2)	8
2.2.2. Kalay (II) Klorür (SnCl_2).....	9
2.2.3. Tiyoüre ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$).....	9
2.2.4. Nikel (II) Klorür (NiCl_2).....	10
2.2.5. Cobalt (II) Klorür (CoCl_2)	10
2.2.6. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ Dörtlü Bileşiği	10
2.2.7. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ Dörtlü Bileşiği.....	11
3. FOTODEDEKTÖRLER.....	12
3.1. Metal-Yarıiletken-Metal (MSM) Fotodedektörler	15
3.1.1. Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği	17
3.1.2. Fotoduyarlılık	17
3.2. Schottky Fotodedektörler.....	17
3.3. p-i-n Fotodedektörler	18
3.4. p-n Eklem Fotodedektörler	19
3.5. Fotoiletken Dedektörler	20

3.6.	Kızılötesi fotodedektörler	21
4.	DENEYSEL İŞLEMLER.....	22
4.1.	İnorganik Yarıiletken Malzemelerin Üretilmesi ve Hazırlanması.....	22
4.1.1.	$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ malzemelerinin üretilmesi	22
4.1.2.	$\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) malzemesinin üretimi.....	26
4.1.3.	$\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) filmlerin üretilmesi	26
4.1.4.	$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4, \text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ Foto Diyotlarının üretilmesi	27
4.2.	Kullanılan Cihazlar ve Karakterizasyon Teknikleri	28
4.2.1	X-Işını Difraksiyon Ölçümleri.....	28
4.2.2.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Gözlemleri.....	28
4.2.3.	Elektriksel Özelliklerini Belirleme Ölçümleri.....	28
4.2.4.	Optik Karakterizasyon Ölçümleri.....	29
5.	ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	30
5.1.	Numunelerin Kristal Yapılarının Belirlenmesi.....	30
5.1.1.	$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ numunesinin X-ışını Difraksiyon Sonuçları	30
5.1.2.	$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunesinin X-ışını Difraksiyon Sonuçları	31
5.2.	Numunelerin Yüzey Morfolojileri	32
5.2.1.	$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ 'nin SEM Sonuçları.....	32
5.2.2.	$\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) numunesinin SEM Sonuçları	35
5.3.	Numunelerin Optik Özellikleri	36
5.3.1.	$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nin Optik Spektroskopi Sonuçları.....	37
5.3.2.	$\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ince filmlerin Optik Spektroskopi Sonuçları	39
5.4.	$\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{CoSnS}_4/\text{Al}$, $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{NiSnS}_4/\text{Al}$ ve $\text{Al/n-Si/Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}/\text{Al}$ Foto Diyotlarının Elektriksel Ölçüm Sonuçları	44
5.4.1.	$\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{CoSnS}_4/\text{Al}$ ve $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{NiSnS}_4/\text{Al}$ Foto diyotların (I-V) Karakteristikleri	44
5.4.2.	$\text{Al/n-Si/ Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}/\text{Al}$ Foto diyotların (I-V) Karakteristikleri.....	45

5.4.3. Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al ve Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al Foto diyotların Kapasite-iletkenlik Voltaj Karakteristikleri	50
5.4.4. Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al Foto diyotların Kapasite-iletkenlik Voltaj Karakteristikleri	52
5.4.5. Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al ve Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al Foto diyotlarının Arayüzey Durum Özellikleri	54
5.4.6. Al/n-Si/ Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al Foto diyotlarının Arayüzey Durum Özellikleri	57
5.4.7. Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al ve Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al Foto Diyotlarının Foto Akım- Zaman Karakteristikleri	60
5.4.8. Al/n-Si/ Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al Foto Diyotlarının Foto Akım- Zaman Karakteristikleri ..	62
5.4.9. Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al ve Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al Foto Diyotlarının Foto Akım - İletim Mekanizması	64
5.4.10. Al/n-Si/ Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al Foto Diyotlarının Foto Akım -İletim Mekanizması	66
5.4.11. Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al ve Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al Diyotlarının Foto Duyarlılık - İletim Mekanizması	69
5.4.12. Al/n-Si/ Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al Foto Diyotlarının Foto Duyarlılık -İletim Mekanizması .	70
5.4.13. Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al ve Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al Diyotlarının Foto Tepki -İletim Mekanizması.....	73
5.4.14. Al/n-Si/ Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al Foto Diyotlarının Foto Tepki -İletim Mekanizması	74
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	76
7. KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Bu tez çalışmasında, $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x = 0.0, 0.01, 0.05, 0.10$) malzemeleri sırasıyla hidrotermal ve sol jel yöntemleriyle sentezlenmiştir. Cd katkılı TiO_2 filmler, cam substratlar üzerinde, spin kaplama yöntemi ile büyütülmüştür. Numunelerin yapısal özellikleri, XRD, SEM ve UV-Vis teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ /Al, Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ /Al ve Al/n-Si/ $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ /Al diyotlarının elektriksel özellikleri akım-voltaj, kapasite-voltaj ve akım-zaman elektriksel karakterizasyon teknikleri ile analiz edilmiştir. Güneş ve IR ışıkları altındaki diyotların fotoakımı, karanlık akımdan daha yüksektir. Diyotların ışığa duyarlılığı ve fototepki özellikleri analiz edilmiştir. TiO_2 esaslı diyotların fototepkileri Cd ilavesiyle değiştirildi. Güneş ışığı altında TiO_2 ve %10 Cd katkılı diyotun ışığa duyarlılık değerleri sırasıyla $0,103 \cdot 10^{-3} \text{ A/W}$ ve $0,139 \cdot 10^{-2} \text{ A/W}$ olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar hazırlanan fotodedektörlerin optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Diyot, Cd katkılı TiO_2 filmleri, infrared, nanoyapı

SUMMARY

Fabrication Of Quaternary Functional Semiconductor Infrared Photodetectors And Investigation Of Their Electronic Properties

In this thesis study, $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ and $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x = 0.0, 0.01, 0.05, 0.10$) materials have been respectively synthesized by hydrothermal and sol gel methods. Cd doped TiO_2 films have been grown on the glass substrates with a spin coating method. The structural properties of the samples have been analyzed using XRD, SEM and UV-Vis techniques. The electrical characteristics of $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{CoSnS}_4/\text{Al}$, $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{NiSnS}_4/\text{Al}$ and $\text{Al/n-Si/Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}/\text{Al}$ diodes have been analyzed by current-voltage, capacity-voltage and current-time electrical characterization techniques. The photocurrent of the diodes under solar and IR lights is higher than the dark current. The photosensitivity and photoresponse properties of the diodes have been analyzed. The photoresponse of TiO_2 based diodes has been changed with the addition of Cd. The photosensitivity values of TiO_2 and 10%Cd doped diode under sunlight have been found to be $0.103 \cdot 10^{-3} \text{ A/W}$ and $0.139 \cdot 10^{-2} \text{ A/W}$, respectively. The obtained results indicate that the prepared photodetectors can be used in optoelectronic applications.

Keywords: Diode, Cd doped TiO_2 films, infrared, nanostructures

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	(a) Enerji seviyelerinin dolmuş hali. (b) Mutlak sıfır sıcaklığında ve mutlak sıfırın üstünde Fermi-Dirac dağılımının değişimi	6
Şekil 2.2.	Valans bant, direk bant ve dolaylı bantın şematik olarak gösterimi	7
Şekil 2.3.	CuCl_2 'nin kristal yapısı	8
Şekil 2.4.	SnCl_2 nin kristal yapısı	9
Şekil 2.5.	Tiyoüre'nin yapısı	9
Şekil 2.6.	NiCl_2 nin yapısı	10
Şekil 2.7.	CoCl_2 nin yapısı	10
Şekil 2.8.	$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ 'ün yapısal modeli.....	11
Şekil 2.9.	$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ 'ün yapısal modeli	11
Şekil 3.1.	Planar difüzyon teknolojisi ile geliştirilmiş fotodiyodun yapısı	15
Şekil 3.2.	MSM fotodedektörün	16
Şekil 3.3.	Schottky fotodedektörün şematik gösterimi	18
Şekil 3.4.	p-i-n fotodedektörün	19
Şekil 3.5.	p-n eklem fotodedektörün şematik gösterimi	20
Şekil 3.6.	Fotoiletken dedektör	21
Şekil 3.7.	Yarıiletken optik uyarılma	21
Şekil 4.1.	a) $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ çözeltisi ve yapısal modeli b) $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ çözeltisi ve yapısal modeli	22
Şekil 4.2.	FYTRONİX FY 8000 nanomalzeme üretim sistemi	23
Şekil 4.3.	Santrifüj cihazı	23
Şekil 4.4.	$\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{CoSnS}_4/\text{Al}$, $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{NiSnS}_4/\text{Al}$ ve $\text{Al/p-Si/Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}/\text{Al}$ Foto diyotların blok diyagramı	28
Şekil 4.5.	a) FYTRONİX FY-INF1000 Infrared light characterization sistemi b) FYTRONIX FY-7000 electronic devices characterization sistemi	29
Şekil 5.1.	$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ nanotozun X-ışını difraksiyon deseni	30
Şekil 5.2.	$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nanotozun X-ışını difraksiyon deseni	31
Şekil 5.3.	$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ kompozitinin SEM resimleri	32
Şekil 5.4.	$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ kompozitinin SEM resimleri	33
Şekil 5.5.	$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ numunesinin EDX analizi	34
Şekil 5.6.	$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunesinin EDX analizi	34
Şekil 5.7.	$\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) kompozitinin SEM resimleri	35

Şekil 5.8.	$Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) kompozitinin EDX analizi.....	36
Şekil 5.9.	Cu_2CoSnS_4 ve Cu_2NiSnS_4 nin yansıma spektrumları	38
Şekil 5.10.	Cu_2CoSnS_4 ve Cu_2NiSnS_4 nin absorpsiyon spektrumları.....	38
Şekil 5.11.	Cu_2CoSnS_4 ve Cu_2NiSnS_4 nin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ spektrumları.....	39
Şekil 5.12.	$Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ince filmlerin soğurulma eğrileri.....	40
Şekil 5.13.	$Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ince filmlerin soğurulma eğrileri.....	41
Şekil 5.14.	$Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ince filmlerin yansıma eğrileri	42
Şekil 5.15.	$Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ kompozitlerinin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ spektrumları	43
Şekil 5.16.	Al/p-Si/ Cu_2CoSnS_4 /Al diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri	44
Şekil 5.17.	Al/p-Si/ Cu_2NiSnS_4 /Al diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri	45
Şekil 5.18.	Al/n-Si/ $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ /Al ($x=0.0$) diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri.....	46
Şekil 5.19.	Al/n-Si/ $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ /Al ($x=0.01$) diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri.....	46
Şekil 5.20.	Al/n-Si/ $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ /Al ($x=0.05$) diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri.....	47
Şekil 5.21.	Al/n-Si/ $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ /Al ($x=0.10$) diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri.....	47
Şekil 5.22.	Al/p-Si/ Cu_2CoSnS_4 /Al diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri	51
Şekil 5.23.	Al/p-Si/ Cu_2NiSnS_4 /Al diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri	51
Şekil 5.24.	Al/n-Si/ $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ /Al ($x=0.0$) diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri	53
Şekil 5.25.	Al/n-Si/ $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ /Al ($x=0.01$) diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri	53
Şekil 5.26.	Al/n-Si/ $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ /Al ($x=0.05$) diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri	54
Şekil 5.27.	Al/n-Si/ $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ /Al ($x=0.10$) diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri	54
Şekil 5.28.	Al/p-Si/ Cu_2CoSnS_4 /Al diyotunun farklı frekanslardaki C_{adj} -V eğrisi.....	55

Şekil 5.29.	Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al diyotunun farklı frekanslardaki C _{adj} -V eğrisi	55
Şekil 5.30.	Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al diyotunun farklı frekanslardaki G _{adj} -V eğrisi	56
Şekil 5.31.	Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al diyotunun farklı frekanslardaki G _{adj} -V eğrisi	56
Şekil 5.32.	a) Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al diyot b) Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al diyotların D _{it} eğrileri	57
Şekil 5.33.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al diyotunun farklı frekanslardaki C _{adj} -V eğrileri	58
Şekil 5.34.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al diyotunun farklı frekanslardaki G _{adj} -V eğrileri	59
Şekil 5.35.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al diyotlarının D _{it} eğrileri	60
Şekil 5.36.	Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)Infrared ışık altında I-t eğrileri.....	61
Şekil 5.37.	Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)infrared ışık altında I _{ph} -t eğrileri.	61
Şekil 5.38.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al foto diyotunun güneş ışığı altında I _{ph} -t eğrileri.....	63
Şekil 5.39.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al foto diyotunun 100mW/cm ² 'lik infrared ışığı altında I _{ph} -t eğrileri.	64
Şekil 5.40.	Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)Infrared ışık altında I _{ph} -P eğrileri.	65
Şekil 5.41.	Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)Infrared ışık altında I _{ph} -P eğrileri.	66
Şekil 5.42.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al foto diyotunun güneş ışığı altında I _{ph} -P eğrileri.	67
Şekil 5.43.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al foto diyotunun infrared ışığı altında I _{ph} -P eğrileri.	68
Şekil 5.44.	Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)Infrared ışık altında R-P eğrileri.	69
Şekil 5.45.	Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)Infrared ışık altında R-P eğrileri.	70
Şekil 5.46.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al foto diyotunun güneş ışığı altında R-P eğrileri	71
Şekil 5.47.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al foto diyotunun infrared ışığı altında R-P eğrileri	72
Şekil 5.48.	Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)Infrared ışık altında Fototepki-P eğrileri.....	73

Şekil 5.49.	Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)Infrared ışık altında Fototepki-P eğrileri.....	73
Şekil 5.50.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al foto diyotunun güneş ışığı altında Fototepki-P eğrileri	74
Şekil 5.51.	Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al foto diyotunun infrared ışığı altında Fototepki-P eğrileri	75



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 5.1. Güneş ışığı altındaki Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al, Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al, Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al diyotlar için elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği, ters besleme doyma akımı ve fotoduyarlılık değerleri.....	49
Tablo 5.2. İnfrared ışık altındaki Al/p-Si/Cu ₂ CoSnS ₄ /Al, Al/p-Si/Cu ₂ NiSnS ₄ /Al, Al/n-Si/Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O/Al diyotlar için elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği, ters besleme doyma akımı ve fotoduyarlılık değerleri.....	50
Tablo 5.3. Cu ₂ CoSnS ₄ ve Cu ₂ NiSnS ₄ fotodiyotların LDR değerleri	65
Tablo 5.4. Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O fotodiyotların LDR değerleri	66

SEMBOLLER LİSTESİ

Simge		Birim
c	: Işık hızı	(m/sn)
C_{adj}	: Düzeltilmiş kapasite	(F)
D_{it}	: Arayüzey durum yoğunluğu	($eV^{-1}cm^{-2}$)
E	: Elektrik alan	(N/C)
e	: Elektronun yükü	(C)
E_F	: Fermi enerji seviyesi	(eV)
E_g	: Yasak enerji aralığı	(eV)
eV	: Elektron volt	
E_v	: Valans bandı enerji seviyesi	(eV)
$f(E)$	: Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu	
$g(E)$	: Elektron durum yoğunluğu	
G_{adj}	: Düzeltilmiş iletkenlik	(S)
h	: Planck sabiti	(J.s)
$h\nu$	: Foton enerjisi	(eV)
I	: Akım	(A)
I_0	: Ters besleme doyma akımı	(A)
I_F	: Doğru besleme akımı	(A)
I_{ph}	: Fotoakım	(A)
I_R	: Ters besleme akımı	(A)
k_B	: Boltzman sabiti	(J/K)
n	: Elektron konsantrasyonu	(cm^{-3})
p	: Boşluk konsantrasyonu	(cm^{-3})
P	: Güç	(Watt)
R	: Fotoduyarlılık	(A/W)
T	: Mutlak sıcaklık	(K)

T	: Sıcaklık	(K)
V	: Uygulanan voltaj	(V)
α	: Absorbans	
η	: Spektral kuantum verimi	
λ	: Dalga boyu	(nm)
ν, ω	: Frekans	(Hz)
$\hbar$	: İndirgenmiş Planck sabiti	(J.s)
LDR	: Doğrusal dinamik aralık	(dB)



1.GİRİŞ

İnsanların hayatında güneşten yayımlanan ve elektromagnetik spektrumun görünür bölgesine düşen fotonların önemli bir yeri vardır. Fakat çoğumuz günlük yaşantımızda farkında olmadan çevremizden ve kendimizden yayımlanan kızılötesi fotonlarla da etkileşim içerisindeyiz. Gözle görülmeyen ve genellikle ısı formunda algılanan bu kızılötesi fotonları algılayan infrared dedektörler geliştirilmiştir.

Günümüzde infrared dedektör araştırmalarındaki çabalar, tek elemanlı cihazların, büyük elektronik olarak taranan dizilerin ve daha yüksek çalışma sıcaklığının performansını arttırmaya yöneliktir. Bir diğer önemli amaç, infrared dedektörlerini daha ucuz ve kullanımı daha uygun hale getirmektir. Günümüzde dedektörler teknolojiye pek çok yerde (spektroskopi, astronomi, otomotiv endüstrisi, tıp, haberleşme sistemleri, savunma sanayisi, ziraat ve diğerleri) kullanılmaktadır. Dedektörlerin kullanım alanlarının ve uygulamalarının çokluğu ve birçok uygulamalarda oldukça hassas ölçümler gerekmesi nedeniyle bu cihazlar, nanoölçek mertebesindeki çok küçük değişimleri algılayabilecek hassasiyetlerde üretilmektedirler. Son yıllarda, III-V grubu bileşik yarıiletkenler temelindeki heteroyapılar, 1,5 – 4,8 μm infrared bölgede çalışan optoelektronik cihazlar için gelecek vadeden materyaller olarak görüldüğünden dolayı araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu heteroyapılar, yüksek verimli ışık yayan diyotlar ve hızlı fotodiyotlar için oldukça kullanışlıdır [1]. Günümüzde modern katıhal fiziğini yarıiletken heteroyapılar olmadan düşünmek mümkün değildir. Yarıiletken heteroyapılar, özellikle de çift heteroyapılar, bugün yarıiletken fiziği çalışmalarının üçte ikisini oluşturmaktadır. Katılama ve yük taşıyıcı enjeksiyonu ile yarıiletken malzemenin iletkenlik tipinin kontrol edilebiliyor olmasının, gelişen yarıiletken teknolojisinin çekirdeğini oluşturduğunu söyleyebiliriz. Yarıiletken fiziğinin ve teknolojisinin gelişmesi günlük yaşamımızda olağanüstü gelişmelerle sonuçlanmaktadır. Artık hayatımızı çift heteroyapı temelindeki telekomünikasyon sistemleri, ışık yayan diyotlar (LED'ler) veya bipolar transistörler olmadan hayal etmek oldukça güçtür [2].

GaSb temelindeki yüksek verimli infrared fotodiyotlardan, yeni fiberoptik haberleşme sistemleri ve lazer mesafe ölçme sistemleri gibi güncel konularda yararlanılabilmektedir. Ayrıca H_2O , CO_2 , CO , CH_4 , H_2S , NH_3 , CH_3Cl , HCl , HBr , HO_2 , SO_2 , glikoz gibi pek çok önemli maddenin soğurma dalga boyları $1,6 - 5 \mu m$ bölgesinde bulunduğundan, bu bölgede çalışan fotodiyotlar ekolojik analiz ve tıp gibi çeşitli konular için oldukça ilgi çekicidir [3].

Bilindiği gibi kızılötesi dedektörler yapılan malzemelere, çalışma prensipleri ve dalga boylarına göre farklılıklar göstermektedir. Özellikle son yıllarda teknolojinin hızla ilerlemesi bu sensorlerin kullanım alanlarının da yaygınlaşmasına sebep olmuştur. Kızılötesi sensör teknolojisi kullanılarak vücut ısısındaki değişim algılanarak yer tespiti ve hastalıklı bölgenin sıcaklığının diğer bölgelere göre daha farklı bir durum sergilemesinden faydalanılarak farklı uygulamalar geliştirilmektedir [5]. Benzer şekilde enerji santrallerinin kurulacağı bölgelerin belirlenmesi, füze sistemleri, suç biliminde, ısısal yalıtım sistemlerinin geliştirilmesi ve korunmasında ve son olarak da sağlık sektöründe yerlerini almaya başlamıştır [6,7]. Özellikle sağlık alanında tümörlerin tespiti, hastalıklı bölgelerin belirlenmesi gibi yeni ve vücuda zararlı olmayan yöntemlerin geliştirilmesinde kızılötesi dedektörlerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır [4]. İnfrared dedektörlerin gelişimi, 1800 yılında Herschel tarafından infrared radyasyonun keşfi ile başladı ve sürekli olarak gelişerek devam etti. İkinci dünya savaşı yılları modern infrared teknolojinin başlangıcı olarak görülür. Bu dönemde infrared teknolojisi, yarıiletken malzeme bilimiyle birleşti. İnfrared dedektörlerde yarıiletken malzemelerin kullanılmasıyla birlikte değişik dedektör yapıları geliştirilmiştir. Bu dedektör yapıları, saf (doğal) infrared dedektörler, katkılı infrared dedektörler ve Schottky-bariyer dedektörlerdir [8]. Yapılan bu araştırmalar kapsamında, günümüzde infrared dedektörler, termal görüntüleme sistemlerinin kalbi durumunda oldukları için, termal görüntülemede kullanılacak dedektörün, kızılötesi (infrared) bölge içinde algılama yapan bir infrared dedektör olmasına karar verilmiştir. Günümüzde kızılötesi band içinde algılama yapan dedektörlerin üretiminde farklı ve oldukça özellikli malzemeler kullanılmaktadır.

Son yıllarda infrared fotededektörler üzerinde yapılan çalışmalarda DIME-PTCDI, DPP, ZnO-NP, InAs/InAsSb gibi organik ve inorganik yarıiletken malzemeler kullanılarak üretilen dedektörlerin ışığa karşı duyarlılıkların geliştirilmesi üzerinde durulmuştur. Üretilen cihazların $0,07mA/W - 40mA/W$ aralığında fotoduyarlılık değerleri bulunmuştur [5,6,40]. Bu çalışmada infrared ışığına karşı fotoduyarlılığı yüksek fotededektörler

retmek için dört bileikli $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve Cd katkılı TiO_2 esaslı düşük bant aralıklı yarıiletken kompozit malzemeler kullanılmıştır. TiO_2 esaslı fotodedektörün daha verimli olması için belirli oranlarda CdO katkılandırıldı. Üretilen yeni fotodedektörlerin karakteristiklerini katkı miktarına baēlı olarak özelliklerinin nasıl deēitiēi incelenmiştir. Hazırlanan $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{CoSnS}_4/\text{Al}$, $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{NiSnS}_4/\text{Al}$, $\text{Al/n-Si/Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}/\text{Al}$ dedektörlerin farklı yoēunlukta güneş-infrared ışık altında akım-voltaj, kapasite-voltaj ve akım-zaman elektriksel karakterizasyon ölçümleri yapılmıştır. Güneş ve infrared ışık altında ııēa karşı fotoduyarlılık, fototepki ve elektriksel özellikleri belirlenmiştir. Üretilen fotodedektörlerin optiksel, elektriksel performansları üretim parametrelerine ve kompozit malzemelerin kimyasal kompozisyonlarına baēlı olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla kıyas edilerek üretilen fotodedektörlerin optoelektronik cihaz teknolojisinde kullanıp kullanılmayacaēı araştırılmıştır.

2. YARIİLETKEN MALZEMELER

Katı malzemeler elektriksel iletkenlik özelliklerine göre üçe ayrılmaktadırlar. Bunlar; 10^{-6} - 10^{-4} ohm-m arasındaki öz direnç değerlerine sahip olan “metaller”, 10^{-4} - 10^{10} ohm-m arasında öz direnç değerlerine sahip “yarıiletkenler” ve öz dirençleri 10^{10} ohm-m değerine eşit yada büyük olan yalıtkanlardır [9,10]. Yarıiletken malzemelerin enerji bant yapıları yalıtkan maddelerin bant yapısına benzemesine rağmen aralarında önemli bir fark vardır. Yarıiletkenlerin elektronlar ile tamamen dolu olan valans bandı ve boş olan iletkenlik bandı arasında kalan yasak enerji aralığı, yalıtkanlara nazaran daha küçüktür [11]. Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik değeri sıcaklıkla değişir, sıcaklığın artması ile iletkenliği de artar. Fakat mutlak sıfırda ($T=0K$) elektriksel iletkenlik özelliği bakımından bir yalıtkan gibi davranış sergilerler [11,12].

Günümüzde en çok kullanılan ve özellikleri en iyi bilinen yarıiletkenler IV. Grup elementleri olan Germanyum ve Silisyum elementleridir. Yarıiletkenlerin diğer önemli bir bölümünü de III-V grup bileşikler GaAs, InSb, GaP, InAs vb. oluştururlar [13,14]. Bu tip elementler kübik yapıda kristallenirler ve bağ yapısı çoğunlukla kovalenttirler. Yarıiletken özellik gösteren diğer bir grup ise II-VI grup bileşikler CdZnS, ZnO, ZnS, CdSe, CdS vb. dir. Bu bileşiklerin bağ kurma şekilleri kovalent veya iyonik bağ olmakla beraber kübik veya hekzagonal yapıda kristallenirler [15]. Yarı iletken malzemelerin elektriksel iletkenliği geçici veya kalıcı olarak geniş bir aralıkta kontrol edilebilir. Ayrıca yarıiletken malzemeler farklı malzemelerle katılandırıldığında, elektriksel özellikleri önemli ölçüde değişim göstermektedirler [16].

Yeterli katkılama malzemesi ile yarıiletkenler neredeyse metaller kadar iletken yapılabilirler ve enjekte edilen katkı malzemenin türüne bağlı olarak yarıiletkenin katkılanmış bölgesi daha fazla elektron veya boşluk içerebilir [16,17]. Elektronların ilettime daha çok katkı sağladığı yarıiletkenlere n-tipi yarıiletken, boşlukların ilettime daha çok katkı sağladığı yarıiletkenler ise p-tipi yarıiletken olarak isimlendirilirler [9,11,15,18].

Enerji bandlarının her biri farklı kuantum durumları ile ilgili olup çekirdeğe yakın olan durumların çoğu doludur. Bu durumlara valans bandı denilir. Yarıiletkenlerin ve

yalıtkanların, metallerden farklı olarak valans bandı neredeyse tamamen doludur. Yarıiletkenlerde bulunan elektronlar valans bandından iletim bandına band genişliğine bağlı olarak uyarılabilir [12,19]. Yarıiletkenler ile yalıtkanlar arasındaki bu fark band aralığının genişliğinden kaynaklanmaktadır. Bir yarıiletkenin sıcaklığı mutlak sıfırın üstüne çıkartıldığında elektronların bir kısmı valans bandından iletim bandına geçebilecek enerjiye ulaşırken, bu elektronlar valans bandında işgal edilmemiş elektron boşlukları bırakırlar [12,14]. Hem iletim bandındaki elektronlar hem de valans bandındaki boşluklar elektriksel iletkenliğe büyük ölçüde katkıda bulunurlar. Boşluklar tek başlarına hareket etmezler fakat komşu elektronlar bu boşlukları doldurarak geride yeni bir boşluk oluştururlar [14,17].

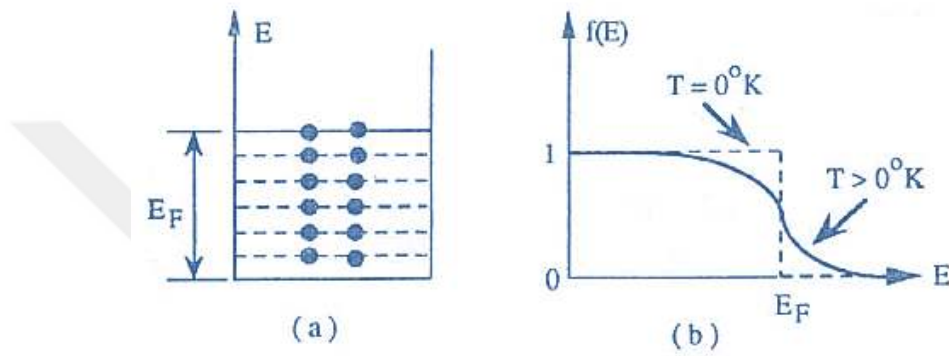
Elektronların enerji seviyeleri hangi enerji durumlarının boş, hangi enerji durumlarının dolu olduğu Fermi-Dirac istatistiği ile tanımlanır. Bu dağılım elektronların sıcaklık ve Fermi enerjisi veya Fermi düzeyi ile karakterize edilir [11]. Mutlak sıfırda (0K) Fermi enerjisi elektronların işgal ettiği en üst enerji düzeyi olarak tanımlanır [14,18]. Daha yüksek sıcaklık değerlerinde Fermi enerjisi bir durumun işgal edilme olasılığının 0,5 eV'a düştüğü enerji olarak da tanımlanır [17]. Burda herhangi bir T sıcaklığındaki sistemde enerjisi E olan bir seviyenin bir elektron tarafından işgal edilme olasılığının Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu,

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

bağıntısı ile verilir. Burada E_F Fermi enerji seviyesi, k_B Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. $f(E)$ fonksiyonun E enerjisine göre değişimi şekil 2.1'de görülmektedir. Bu fonksiyonun E enerjisine göre değişimi sıcaklığa bağlı olarak incelendiğinde [21,22]; $T \rightarrow 0$ K iken $E < E_F$ için $E-E_F/k_B T \rightarrow -\infty$ olur. $E > E_F$ için $E-E_F/k_B T \rightarrow \infty$ olur. Bu durumda $f(E < E_F) = 1$ ve $f(E > E_F) = 0$ olur. Buna göre E_F 'nin altındaki tüm enerji seviyeleri dolu ve E_F 'nin üstündeki tüm enerji seviyelerinin boş olduğu görülür [20,21]. $T = 0$ K ve $E = E_F$ durumuna göre $f(E) = 1/2$ olur. Yani durumların dolu olma olasılığı %50 dir. $(E-E_F) \gg k_B T$ olması durumunda ise denklem 2.1' deki eşitlik Maxwell-Boltzman dağılım fonksiyonuna dönüşür ve bu fonksiyon,

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

şeklindedir. Bu denkleme göre iletim bandındaki elektron konsantrasyonu hesaplanabilir. Bu durumda $(E, E+E_F)$ enerji aralığı bölgesindeki durumların sayısı $g(E)dE$ 'ye eşit olur ve $g(E)$ elektron durum yoğunluğudur. Bu durumların her birinin işgal edilme olasılığı $f(E)$ ise, bu enerji aralığı bölgesinde bulunan elektronların yoğunluğu $f(E)g(E)dE$ olur [21]. Fakat sıcaklık değeri ne olursa olsun $E=E_F$ olması durumunda fermi enerji seviyesinin bir elektron tarafından işgal edilme olasılığı daima $f(E)=1/2$ dir [22].

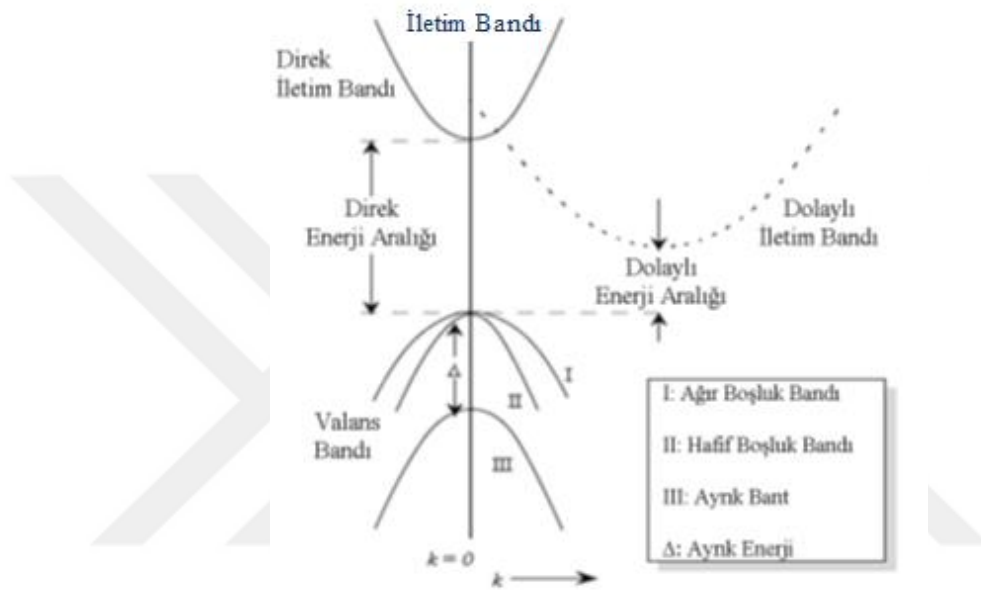


Şekil 2.1. (a) Enerji seviyelerinin dolmuş hali. (b) Mutlak sıfır sıcaklığında ve mutlak sıfırın üstünde Fermi-Dirac dağılımının değişimi [21].

2.1. İnorganik Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerde iletim bandının en alt noktası ile valans bandının en üst noktası arasındaki bölge, elektronların bulunamayacağı yasak enerji bandı olarak adlandırılmaktadır. Bu enerji aralığı, valans bandında bulunan bir elektronu iletim bandına uyararak için gerekli olan minimum enerjiye eşit değerdedir. Bu enerji voltaj, ısı veya ışık formatında yarıiletkeni uygulandığında valans bandındaki bir elektron iletim bandına uyarılacak ve valans bandında bir boşluk (hole) oluşturacaktır, yani yarıiletken iletkenlik özelliği kazanmış olacaktır. Boşluklar, pozitif yüklü tanecikler gibi davranıp elektrik alan altında elektronların tersi yönünde hareket ederler. Böylece yarıiletkenlerde, elektronlar ve boşluklar olmak üzere iki çeşit taşıyıcının varlığından bahsedilir. Yarıiletken, bünyesinde ne kadar çok taşıyıcı barındırıyorsa (iletim bandında elektron ve valans bandında boşluk) iletkenliği o kadar iyi olmaktadır. Elektronun dışarıdan bir etki sonucu iletkenlik özelliği kazanması geçici olur ve iletim bandında biraz zaman geçirdikten sonra (yaşam süresi) valans bandındaki bir boşluk ile tekrar birleşir ve enerji yayımlarlar.

Bazı yarıiletkenlerde iletim bandının en alt noktası $k=0$ noktasında olur. Bu tip yarıiletkenler optiksel olarak aktif olup direk bant aralıklı malzemeler olarak adlandırılmakta olup GaAs, InP, InGaAs direk bant aralıklı yarıiletkenlere örnek gösterilebilir. Diğer yarıiletkenlerde iletim bandının en alt noktası $k=0$ noktasında değildir. Bu yarıiletkenler (Si, Ge, Al, As vb.) dolaylı bant aralıklı yarıiletkenler olarak bilinirler. Bu malzemelerin ışık ile etkileşimi oldukça zayıf olup optik aygıtların yapımında kullanılmamaktadırlar.



Şekil 2.2. Valans bant, direk bant ve dolaylı bantın şematik olarak gösterimi [23].

Şekil 2.2’de direk ve dolaylı geçişlerin şematik gösteriminin yanı sıra valans ve iletim bantları da gösterilmiştir. Çoğu yarıiletkenlerde valans bant düzeylerinin karakteri yaklaşık olarak aynıdır ve valans bandının tepesinde ağır boşluk (heavy hole, HH), hafif boşluk (light hole, LH) bantları ile ayrık bant bulunmaktadır.

Yarıiletkenlerin önemi, elektronikte kullanım alanlarının çoğalması ile hızla artmakta olup günümüzde yarıiletken malzemeler birçok elektronik devrenin ve çeşitli düzeneklerin temel yapı elemanlarını oluşturarak, yaşantımız içinde önemli bir yer tutarlar. Birçok elektronik yapı tasarımında yarıiletkenler, hareketli yüklerin kaynağını sağlamak için kullanılırlar ve yüklerin aktığı, denetlendiği ortamı oluşturmaktadırlar. Yarıiletkenlerin teknolojiye yoğun rağbet ve ilgi görmesinin en önemli sebeplerinden birisi de elektriksel olarak nasıl davranacağını belirlelenebilmesidir. Örneğin, yarıiletkenler örgüye elektron ya da boşluk sağlayacak şekilde katkılanabilmektedirler. Katkı maddesi örgüde elektron fazlalığı oluşturuyorsa elektron verici (donor) olarak adlandırılır ve yarıiletken n- tipi

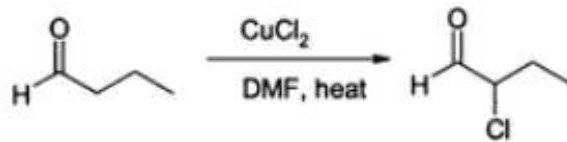
olarak bilinir. Eğer katkı maddesi örgüde boşluk (hole) oluşturuyorsa elektron alıcı (akseptör) olarak adlandırılır ve yarıiletken p- tipi olarak bilinir. Yarıiletkenler sahip olduğu bu olanak ile elektronikte büyük bir kullanım alanına sahiptirler (transistör yapımı, özellikle elektronik devrelerde anahtarlama ve yükseltmede kullanılmaktadırlar).

2.2. Dört Bileşikli Yarıiletken Malzemeler

2.2.1. Bakır (II) Klorür (CuCl_2)

Bakır (II) Klorür'ün susuz formu kahverengi-sarı monoklinik kristaller şeklindedir. Nemli havada ışığa maruz kaldığında dihidrat formuna dönüşür. Molekül ağırlığı 134,45 g/mol yoğunluğu $3,39 \text{ g/cm}^3$ ve erime noktası 498°C civarında olan bakır (II) klorür sulu çözeltilerde çözünebilir iyonik bir katıdır. Suda, etanolde ve asetonda çözünmektedir. Dihidrat formu ise yeşile yakın mavi ortorombik kristal olarak bulunmaktadır. Suda ve etanolde susuz formundan daha fazla olmak üzere çok iyi çözünmektedir. Asetonda da çözünmekte fakat eterde çözünmemektedir. Cu^{+2} 'ye klorun koordinasyonu kısmen meydana gelir. Bu demektir ki, yeşil renkli bakır (II) klorürün derişik çözeltilisinin, mavi renkli $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+2}$ kombinasyonu ile yeşil veya kırmızı renkli halojen kompleksleri oluşur. CuCl_2 lewis asidi olarak zayıftır [24].

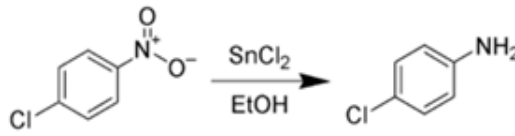
Bakır (II) klorür organik sentezlerde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir [32]. Aromatik hidrokarbonların klorlanması etkilidir. Bu işlem sıklıkla alüminyum oksidin varlığında yapılır. CuCl_2 karbonil bileşiklerinin alfa pozisyonlarında etkilidir [25]. Şekil 2.3'de CuCl_2 'nin kristal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.3. CuCl_2 'nin kristal yapısı [24].

2.2.2.Kalay (II) Klorür (SnCl₂)

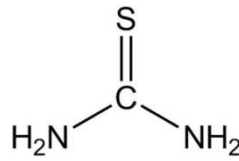
Molekül ağırlığı 189,6 g/mol, yoğunluğu 3,95 g/cm³ olup erime sıcaklığı 247°C ve kaynama sıcaklığı 623°C'dir. Kalay iki klorür'ün düşük uçuculuğu olmasına rağmen bazı araştırmacılar kalay oksit (SnO₂) filmi elde etmekte kullanmaktadırlar. SnCl₂ prekorsör ile yapılan kalay oksit kaplamalarda reaktör sıcaklığı 500°C civarında olmalıdır. Bu sıcaklıkta oksijen ve SnCl₂ reaktörün içine verilmelidir. Burada oluşan oksitlenme reaksiyonu düşük aktivasyon enerjisine (58 kJ/mol) sahiptir. ClSnCl bağının ayrışması için ise 320 kJ/mol enerji gerekmektedir. Şekil 2.4'de SnCl₂'nin kristal yapısı gösterilmiştir [26].



Şekil 2.4. SnCl₂ nin kristal yapısı [26].

2.2.3.Tiyoüre (CH₄N₂S)

Yapısında C, N, S atomları bulunduran ve CSN₂H₄ genel formülüyle gösterilen yapılara tiyoüre denmektedir. Molekül ağırlığı 76,12 g/mol, yoğunluğu 1,4 g/cm³ olup erime sıcaklığı 182°C'dir. Tiyoüre'nin yapısı şekil 2.5'de verilmiştir. Azot atomları üzerinde hidrojenin dışında çeşitli gruplar bulunduran tiyoürelerde C=S bağı uzunluğu 160 Å° dur. Yapılarında S ihtiva ettiğinden dolayı bir çok kalitatif ve kantitatif analiz için kullanılmaktadırlar [27].

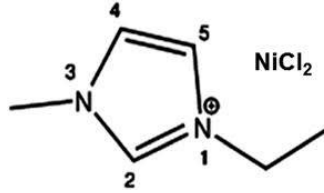


Şekil 2.5. Tiyoüre'nin yapısı [27].

Tiyoüreler yapılarındaki aktif S ve N atomundan dolayı üstün H bağı yapma özelliğine sahip moleküllerdir. Bu özelliği tiyoürenin çözücüler içerisinde ve özellikle de su içerisindeki davranışlarını etkilemektedir. Tiyoürelerin kendi içinde oluşturduğu hidrojen bağlarının yanı sıra, su ve karboksil grubu gibi yapısında elektronegatif atomlar bulunduran moleküller ile de etkileşime girerek protonlanma ve deprotonasyona uğrayarak reaksiyonlar üzerinde etkili olmaktadır [28,31].

2.2.4.Nikel (II) Klorür (NiCl₂)

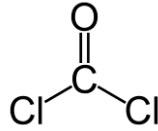
Molekül ağırlığı 237,69 g/mol, yoğunluğu 1,92 g/cm³ olup erime sıcaklığı 140°C'dir. En çok hekza hidrat hâlinde bulunur. 140°C'nin üstünde susuz hâl alır ki bu da sarı hekzagonal kristaller halindedir. Nikel metaliyle HCl'in reaksiyonundan elde edilir. Şekil 2.6'da NiCl₂'nin yapısı gösterilmiştir [29].



Şekil 2.6. NiCl₂ nin yapısı [29].

2.2.5.Cobalt (II) Klorür (CoCl₂)

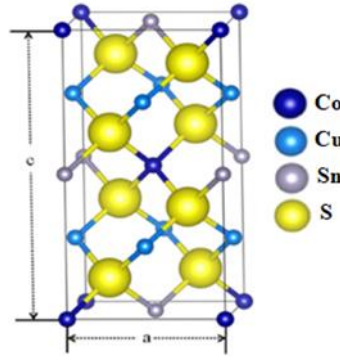
Molekül ağırlığı 129,839 g/mol, yoğunluğu 3,36 g/cm³ olup kaynama sıcaklığı 1.049 °C'dir. Şekil 2.7'de CoCl₂'nin yapısı gösterilmiştir. Özellikle su varlığında rengini değiştirmesi alışılmadık bir malzemedir. Susuz kobalt klorür CoCl₂, mavi renkli suyu emdiği için pembeye döner [30].



Şekil 2.7. CoCl₂ nin yapısı [30].

2.2.6. Cu₂CoSnS₄ Dörtlü Bileşiği

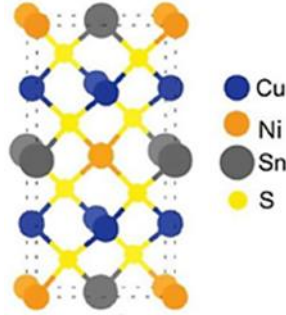
Cu₂CoSnS₄ yapısında bulunan elementler sırasıyla Cu, Co, Sn ve S'dir. Bu elementlerden oluşan ve tetragonal yapıya sahip olan Cu₂CoSnS₄ dörtlü kalkojenit bileşiğinin yapısal modeli Şekil 2.8'de verilmiştir. Karmaşık kristal yapı nedeniyle, bu bileşik oldukça düşük bir termal iletkenlik göstermektedir. Cu₂CoSnS₄ bileşiği, 1.2eV – 1.61eV enerji bant aralığı olan bir p-tipi yarıiletken soğurucu malzemedir. Dört bileşikli yarıiletken malzeme olan Cu₂CoSnS₄ düşük maliyetli olup yüksek verime sahiptir [33,52,54,64,72].



Şekil 2.8. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ 'ün yapısal modeli [52].

2.2.7. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ Dörtlü Bileşiği

$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ dörtlü bileşiğinin yapısında bulunan elementler sırasıyla Cu, Ni, Sn ve S'dir. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ dörtlü bileşiği, kalkojenit bileşikler grubuna ait olup p-tipi bir yarıiletkenidir. 1.1- 1.5 eV'lik doğrudan enerji bant aralığına ve yaklaşık (10^4 cm^{-1}) yüksek soğurma katsayısına sahiptir. CuInSe_2 (CIS), $\text{CuInGa}(\text{S}, \text{Se})_2$ (CIGS) ve CdTe malzemeleri ile karşılaştırıldığında, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ dörtlü bileşiği zehirli olmayan, toprakta bol miktarda bulunan bileşenler içerir [34,53,58,60,65]. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ dörtlü kalkojenit bileşiğinin yapısal modeli Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ 'ün yapısal modeli [53].

3. FOTODEDEKTÖRLER

Günümüz teknolojisinde çok önemli yer tutan optoelektronik aygıtlar; başta dedektörler, modülatörler, ışık kaynakları, gösterge aygıtları ve haberleşme sistemleridir [35]. Bu aygıtlar içerisinde olan optik dedektörleri ve foton dedektörleri olmak üzere iki kısma ayrılır. Unun yanısıra ısı dedektörlerinde ışığın soğurulması aygıtın sıcaklığını yükseltir. Böylece sıcaklığa bağlı olan parametrelerde bazı değişimler olur ve bu değişime örnek olarak elektriksel iletkenlik verilebilir. Isıl dedektörlerinin çıkışı, eğer soğurma veriminin bütün dalga boylarında eşit olduğu varsayılırsa, ışığın dalga boyuna bağlı olmayıp ve dedektör tarafından birim zamanda soğurulan enerji miktarıyla orantılı olur. Foton dedektörlerinde ise soğurma işlemi bir dizi kuantum olayıyla gerçekleşir ve bir yüzeyden elektronların salınması örnek olarak verilebilir. Foton dedektörlerinin çıkışı, ışık taneciklerinin soğurulma oranıyla doğrudan bağlantılı olmakla beraber ele alınan bütün foton işlemleri kendilerini başlatacak belirli bir minimum foton enerjisine ihtiyaç duyarlar. Fotonun enerjisi $E = hc / \lambda$ bağıntısı ile hesaplanır.

Kızıl ötesi çalışan fotodedektörlerde en sık karşılaşılan sorun, soğurulan foton enerjilerinin, dedektörün kendisinde bulunan atomların ortalama ısı enerjileriyle ($\cong k.T$) karşılaştırılabilir hale gelmesidir. Bu tip durumlarda meydana gelen elektron salınımları ışığın soğurulmasının yanında, ısı uyarmayla da üretim sağlanır. Bunun sonucunda ise bir gürültü sinyali oluşur ve bu gürültü sinyalinin azaltılması için en kolay yol dedektörün sıcaklığını azaltmaktır [36]. Termometrelerden sonra ısı dedektörlerde ilk gelişme termoelektrik etkinin avantajından faydalanan termopil olmuştur. İki farklı metalin birleşmesiyle oluşan termokupl'un iki ucu arasında sıcaklık farkı olduğunda bu farkla orantılı bir voltaj oluşur. Daha sonraları ise pyroelektrik dedektör, golay hücresi, bolometre gibi ısı dedektörler geliştirilmiştir. Pyroelektrik dedektör içerisindeki soğurucu materyalin dielektrik sabiti, sıcaklığın artması ya da azalması sonucunda değişim gösterir. Pyroelektrik materyal kutuplanmış kapasitör içinde bulunur ve materyalin dielektrik sabitinin değişimiyle orantılı olan akımı sağlar. Kapasitanstaki değişim elektrik sinyaline dönüştürülür. Golay hüresi az miktardaki gazın ince metal film teması ile oluşur. İnce metal film, ışığı soğurarak ısınır ve ısı gaza iletilmiş olur. Isınan gazın basıncı hücre içerisinde bulunan aynanın açısını değiştirip yansıtılan ışık optik yükseltece yöneltmiş

olur. Bolometreler ise sıcaklığın değişimi ile elektriksel direnci değişen kızılötesi ısı dedektörleridir. Kızılötesi ışıma soğurularak materyalin sıcaklığında değişim gösterir ve bu değişim ile bolometre içerisinde gecen akım değeri de değişir [37].

Bir fotodedektör, yasak enerji aralığından daha büyük enerjili fotonları soğurarak elektron deşik çiftleri meydana getirir ve bunun sonucunda ise dış devreden akımın akmasını sağlar [38]. Bir başka deyişle fotodedektör, optiksel enerjiyi soğurup bu enerjiyi elektriksel enerjiye dönüştüren optoelektronik bir aygıttır. Fotodedektörler optiksel spektrumun çok geniş bir alanına karşılık gelen optiksel sinyal algılaması yaparlar [39]. Fotodedektörler teknolojide oldukça geniş bir uygulama alanına sahip olmakla beraber optiksel iletişim sistemlerinde çok geniş çapta kullanılmaktadırlar. İyi bir fotodedektörün sahip olması gereken en önemli özellikler; düşük gürültü, yüksek duyarlılık, yüksek cevaplama hızı, yüksek güvenilirlik ve düşük maliyetli olmasıdır [40,41].

Fotodedektörün ışığa duyarlı yüzeyine bir ışık düşürüldüğünde oluşan fotoakım,

$$I_F = f(F, U_F, L, \theta) \quad (3.1)$$

bağıntıda görüldüğü F ışın şiddeti, L spektrum ile ilgili birim, U_F fotoalıcıya uygulanan gerilim ve θ ısı değerine bağlıdır. Optoelektronikte kullanılan fotodedektörler; fotodiyotlar, fotodirençler, fototransistörlerin yanında fototristörler ve fototriyaklardır. Fotodirençler, ışığın şiddeti ile dirençleri değişen optoelektronik devre elemanlarıdır.

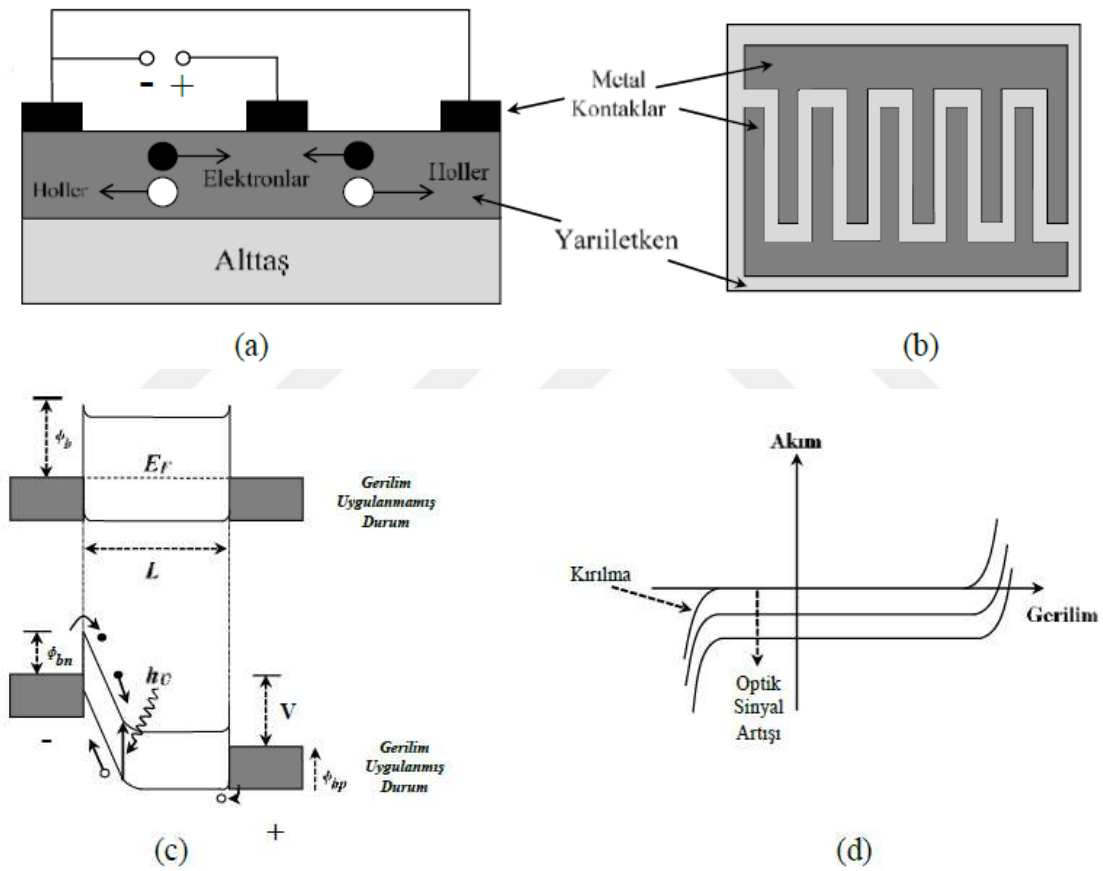
Fotodirencin üzerine ışık düşürüldüğünde ışığın seviyesine göre fotodirencin direnci ya da iletkenliği değişkenlik gösterir. Işığa duyarlı malzemelerin iletkenliği, sahip olduğu yüklü taşıyıcıların yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Fotodirencin üzerine ışık düşürüldüğünde, ışık ile gelen enerji kovalent bağların kopmasına sebebiyet verir. Kovalent bağların kopması ise elektron deşik çiftlerinin sayısının artmasına sebep olur. Sonuç olarak sayısı artan akım taşıyıcıları fotodirencin direnç değerinde azalışa neden olur. Yeterli miktarda enerjiye sahip olan foton, bir elektron deşik çifti meydana getirir ve bu olaya has uyarma denilir. Bir fotonun has uyarıyı yapabilmesi için, fotonun sahip olması gereken minimum enerjisi, yarıiletken malzemenin yasak enerji bant genişliği kadar olması gerekmektedir. Fotodirençler seçilen malzemeye göre görünür ışık ve kızılötesi ışığa duyarlı olarak üretilirler ve duyarlı olduğu spektrumun çok geniş olması fotodirençlerin kullanım alanını genişletip avantaj sağlamaktadır. Fotodirençler yüksek duyarlılıklarının yanında yüksek gerilimlerde bile çalışabilirler. Fotodirençlerin dezavantajı da sıcaklığa olan duyarlılıklarıdır [42].

Fotodiyotlar, yarıiletken bağlantısı bir optik mercek altına yerleştirilmiş veya ışığı geçiren bir muhafaza içine yerleştirilmiş normal bir silikon diyot olup ışığa duyarlı, p-n eklemine sahip yarıiletkenlerdir. Fotodiyodun görevi ışık şiddetini elektriksel işarete etkili ve hızlı bir şekilde çevirmektir. Fotodiyodun ışığa duyarlı yüzey kısmına ışık düşürülerek fotonların soğrulması sağlanır. Böylece serbest yük taşıyıcılar oluşur ve bu serbest yük taşıyıcıların sayesinde bir akım meydana gelir [42,43].

p-n eklemine n tipi yarıiletken bölgesinde elektronlar, p tipi yarıiletken bölgesinde ise deşikler fazladır. Elektronlar ile deşikler hareketli ve zıt yüklü olduklarından jonksiyonun birleşme bölgesinde birbirlerine doğru hareket ederek birbirlerini nötr hale getirirler. Birleşme bölgesinde taşıyıcı sayısı oldukça azalır. Bu bölgede zıt polariteli iyonlaşmış atomlar kalmış olup böylelikle bu iyonlaşmış atomlar, serbest taşıyıcıların bir bölgeden diğer bölgeye geçişini engellemiş olurlar, yani potansiyel bariyer (duvar) gerilimi meydana getirirler. Bariyer gerilimin büyüklüğü, fotodiyodun yapımında kullanılan yarıiletken malzemenin özelliğine göre değişkenlik gösterir. p-n eklemine doğru gerilim uygulandığında taşıyıcıların az olduğu bölge daralmış olur ve eklemine doğru gerilim uygulandığında taşıyıcıların az olduğu bölge ortadan kalkmış olur ve p-n eklemi iletme geçer. p-n eklemine ters yönde bir gerilim uygulandığında ise bu bölge genişler ve p-n eklemine doğru gerilim uygulandığında ise bu bölge daralmış olur. Ters yönde uygulanan gerilimde de yine bir miktar akım akışı olur. Bu akım, ortamın ısısından ya da diğer ışık kaynaklarından etkilenip oluşan serbest taşıyıcıların akımıdır. En çok kullanılan fotodiyotlar planar, çığ ve schottky fotodiyotlardır.

Fotodiyotların karakteristik özellikleri, fotodiyodun yapımında kullanılan yarıiletken malzemelerin cinsine ve özelliklerine göre belirlenir. Planar; difüzyon teknolojisi ile üretilmiş fotodiyotlar en çok kullanım alanına sahip diyotlardır [43].

uygun olup alan etkili transistör yapımı için gerekli olan işlem adımlarının hemen hemen aynısını kullanılarak üretilir [44]. Şekil 3.2’de gösterildiği üzere, MSM fotodedektörler temel olarak, bir çift arka arkaya bağlı Schottky diyottan oluşur ve bu ikili Schottky bariyer, tekli Schottky diyottan daha düşük karanlık akım sağlar. Diğer fotodedektörlerin prensiplerine benzer şekilde, soğurulan fotonlar yarıiletkende elektron-boşluk çifti oluştururlar. Elektronlar, uygulanan elektrik alanın etkisiyle, artı elektrota sürüklenirken, boşluklar ise eksi elektrota sürüklenirler. MSM fotodedektörlerin kuantum verimlilikleri ise metal elektrotların neden olduğu gölgelemeye bağlı olarak değişkenlik gösterirler.



Şekil 3.2. MSM fotodedektörün
 (a) yandan görünümü,
 (b) üstten görünümü,
 (c) enerji bant yapısı,
 (d) akım-gerilim karakteristikleri [45].

3.1.1. Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği

Bir fotodiyotun akım-voltaj (I-V) karakteristiği diyot eklemesindeki akım taşıma işlemleri ile belirlenmekte olup farklı akım taşıma mekanizmaları, metal-yarıiletken eklemleri (Schottky ve MSM fotodiyotları) ve p-n eklemlerine bağlı fotodiyotlarda meydana gelme olasılığı yüksektir [48]. Fotodiyodun akım-gerilim karakteristiği şekil olarak normal bir diyodunkine benzerdir. Fotodiyotun duyarlı olan yüzeyine ışık düşmüyorsa fotodiyot üzerinden gelen akım, termal yoldan sınırlı sayıdaki taşıyıcılarıyla oluşan akım olup buna karanlık akımı denir.

3.1.2. Fotoduyarlılık

Fotoduyarlılık (R), optik gücü oluşturan fotoakım ile ilgili bir parametredir. Bir fotodiyodun duyarlılığı, ışığa duyarlılığın bir ölçüsüdür. Fotoakımın (I_{ph}), verilen dalga boylarında fotodiyot yüzey üzerine düşen ışığın gücüne oranı olarak tanımlanır. Fotoduyarlılık, bir diğer ifadeyle ışık gücünün elektrik akıma dönüştürülme etkisinin bir ölçümü olup fotodiyot üzerine düşen ışığın dalga boyu ile bunun yanında sıcaklık ve uygulanan ters besleme voltajı ile değişmektedir. Fotodiyotlar için duyarlılık,

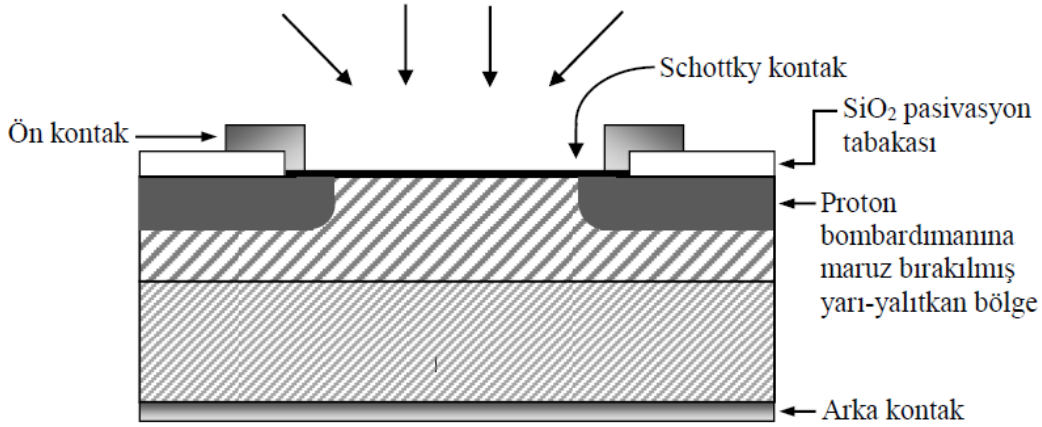
$$R = \frac{I_{ph}}{PA} \quad (3.2)$$

ifadesi ile verilir [48] burada P gelen ışığın şiddeti, A diyotun aydınlanma alanı'dır [48,106]. Fotoduyarlılığın birimi denklem (3.2)'den de anlaşılacağı gibi A/W'dir. Bir fotodiyodun duyarlılığını artırmak için, fotodiyot yüzeyine çarpan ışıkla yansıyan ışık arasındaki oran azaltılır.

3.2.Schottky Fotodedektörler

Şekil 3.3'de şematik olarak gösterilen Schottky fotodedektörler, katkılı yarıiletkenin üzerini kaplayan çok ince metalden oluşturulmuştur [46]. Yarıiletkenin bir metal ile temas etmesi sağlandığında yarıiletkenin fermi enerji düzeyi ile metalin fermi enerji düzeyi aynı hizaya gelir ve metal-yarıiletken yüzeyinde bir potansiyel bariyer meydana gelir. Dedektöre gönderilen ışımadan kaynaklı oluşan fotonlar metal katmanda soğurulur ve elektron delik çifti oluşmuş olur. Uyarılmış elektronlar, metal yarıiletken yüzeye ulaşınca kadar metal içerisinde rastgele taşınırlar ve sadece yeterli enerjiye sahip elektronlar bariyeri geçerek yarıiletkenine ulaşır. Böylece ışıma soğurulmuş olarak

elektriksel sinyale çevrilir. Schottky fotodedektörler, kullanılan metal kaplamaya bağlı olarak geniş duyarlılık spektrumuna sahiptir.

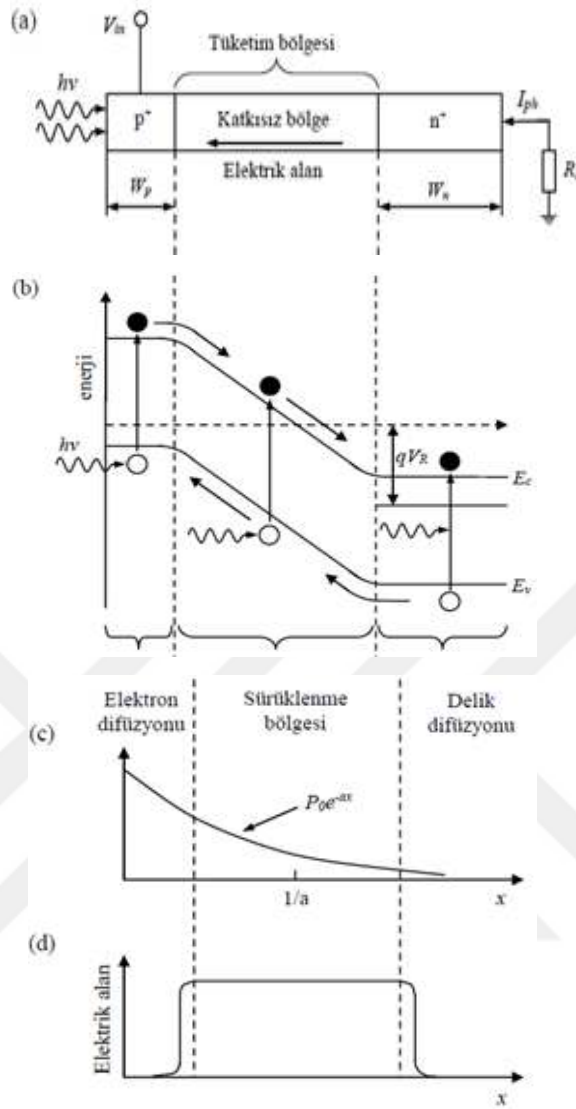


Şekil 3.3. Schottky fotodedektörün şematik gösterimi [45].

3.3.p-i-n Fotodedektörler

p-i-n fotodedektörler, optik iletişimde daha hızlı foto algılama özellikleri nedeniyle, p-n eklem fotodedektörlerden daha fazla tercih ediliyor. Şekil 3.4'de şematik temsili verilen p-i-n fotodedektörlerde, p-n eklem fotodedektörlerden farklı olarak, p ve n tipi katkılı yarıiletkenler arasına katkısız (i tipi) bir yarıiletken büyütülür. Katkısız yarıiletken bölgesinin çok düşük taşıyıcı yoğunluğuna ve yüksek dirence sahip olması nedeniyle, dedektöre uygulanan gerilim tamamen bu bölgeye düşer [45]. Bu nedenle tüketim bölgesi olan katkısız bölgenin kalınlığının iyi ayarlanması oldukça önemlidir. Tüketim bölgesinin kalınlığı, kızılötesi dedektörün hangi dalgaboyunda çalışacağını ve fotocevap durumunun belirlenmesinde önemli bir görev üstlenmektedir. Ancak, cevap hızı ve kuantum verimi arasında bir tercih yapmak gerekebilir. Çünkü yüksek cevap hızı için, tüketim bölgesinin kalınlığı düşük olması gerekir. Buna karşın, yüksek kuantum veriminin ve fotocevabın yüksek olması isteniyorsa, tüketim tabakasının kalınlığı daha fazla olması gerekmektedir. Literatürde kuantum verimini arttırmak amacıyla, harici mikro-kavite yaklaşımı sunulmuş olup [47,48] bu yaklaşımda, soğurma tabakası bir kavite içine konulmuştur. Böylece fotonların büyük bölümü küçük bir hacimde tuzaklanmıştır. Bunun yanı sıra, p-i-n fotodedektörün cevap hızı devre parametrelerine de bağlıdır.

Şekil 3.4'de p-i-n fotodedektörün, yapısı, enerji bant diyagramı, taşıyıcı oluşum özellikleri ve elektrik alan durumu verilmiştir.



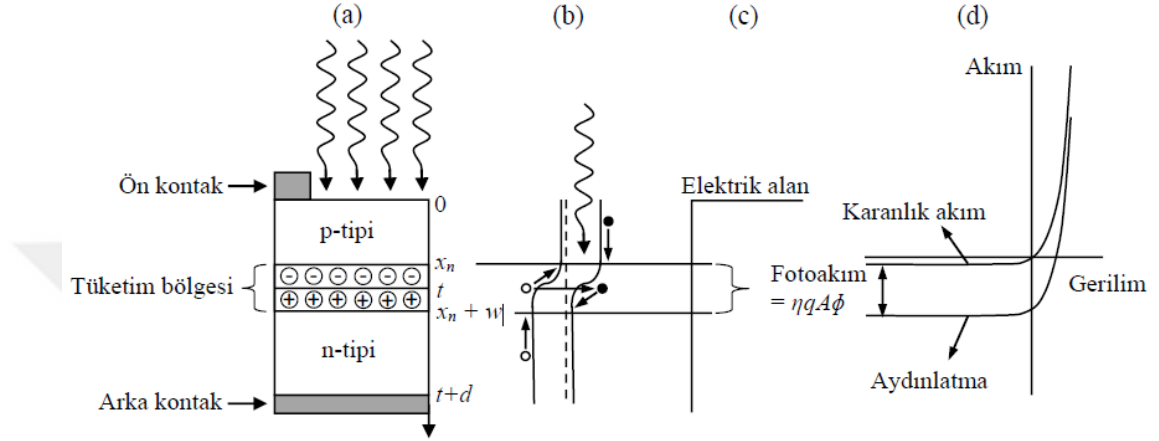
Şekil 3.4.p-i-n fotodedektörün (a) yapısı, (b) enerji bant diyagramı, (c) taşıyıcı oluşum özellikleri, (d) elektrik alan durumu [45].

3.4.p-n Eklem Fotodedektörler

Fotovoltaik dedektörlerin en yaygın kullanılanlarından birisi de, p-n eklem fotodiyot olarak da isimlendirilen p-n eklem fotodedektörlerdir. Yasak enerji aralığından daha büyük enerjiye sahip fotonlar, p-n eklem her iki tarafında da elektron-boşluk çiftleri oluştururlar ve bu elektron-boşluk çiftleri, güçlü elektrik alan vasıtasıyla birbirlerinden ayrılarak, uzay-yük bölgesinden difüzyon derinlikleri kadar uzaklaşır. Azınlık taşıyıcıları, p-n eklem diğer tarafında çoğunluk taşıyıcıları olacak şekilde kolayca hızlandırılır ve böylece, negatif veya ters akım boyunca, akım-gerilim özelliklerini değiştirecek biçimde fotoakım oluşur. Bu akımın miktarı Eş. 3.3 ile hesaplanabilir.

$$I_{foto} = \eta q A \Phi \quad (3.3)$$

Eşitlikte, η kuantum verimini, q elektronun yükünü, A fotodedektörün alanını ve Φ gelen foton akı yoğunluğunu göstermektedir [49]. p-n eklem fotodedektörün; p-n eklem yapısı, enerji-bant diyagramı, elektrik alanı ve akım-gerilim karakteristikleri şematik olarak Şekil 3.5’de gösterilmiştir.

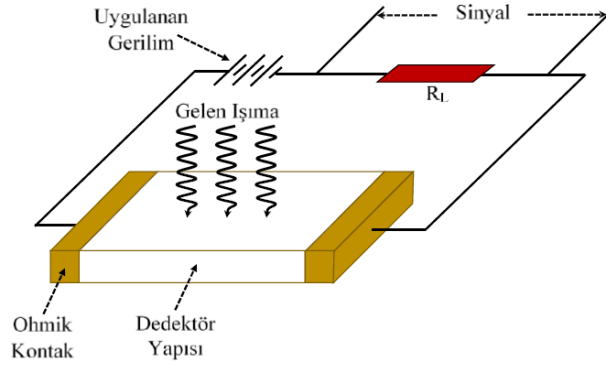


Şekil 3.5. p-n eklem fotodedektörün şematik gösterimi (a) p-n eklem yapısı, (b) enerji-bant diyagramı, (c) elektrik alanı, (d) akım-gerilim karakteristikleri [45].

3.5. Fotoiletken Dedektörler

Fotoiletken dedektörler, ışığa karşı duyarlılık gösteren rezistörlerdir. Şekil 3.6’da gösterilen fotoiletken dedektörüne, yasak enerji aralığından daha büyük enerjili fotonlar geldiğinde, fotonlar soğurularak, elektron-boşluk çifti oluştururlar. Soğurulma ile valans bandındaki elektronlar iletim bandına çıkmış olur ve böylelikle serbest taşıyıcı sayısında artış gözlenir. Bu artış fotoiletken dedektörün elektriksel iletkenliğini değiştirip bir dış devre yardımıyla, gelen ışığın şiddetinin bir ölçüsü olan iletkenlikteki değişim miktarı algılanmış olur.

Hemen hemen bütün dedektörlerde, iletkenlikteki değişim, örneğe bağlantısı yapılan elektrotlar aracılığıyla ölçülür. Yaklaşık 100 ohm’luk dirence sahip malzemelerde, fotoiletken dedektör genellikle Şekil 3.6’da görüldüğü gibi sabit akım devresi ile kontrol edilmektedir. Bu durumda dedektörün seri direnci yarıiletkenin seri direncinden daha büyük olur ve sinyal gerilimdeki değişiklik olarak algılanır. Yüksek dirence sahip fotoiletken dedektörlerde ise, sabit voltaj devresi tercih edilir ve sinyal akımdaki değişiklik olarak tespit edilir [45].

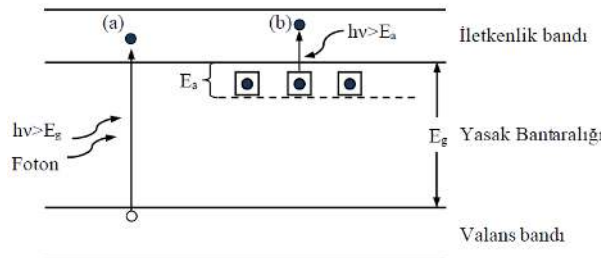


Şekil 3.6. Fotoiletken dedektör [45].

3.6.Kızılötesi fotodedektörler

Bazı kaynaklarda foton dedektörleri olarak da yer alan fotodedektörler, üzerlerine düşen ışımaya oldukça hassas olan cihazlardır. Soğurdukları ışımayı elektronik devreler aracılığıyla elektrik akımına dönüşümünü sağlarlar. Foton enerjisinin çok hızlı bir şekilde malzemenin elektronik düzeyine transfer edilmesinden dolayı fotodedektörler çok yüksek frekanslarda çalıştırılabilirler. Kızılötesi fotodedektörlerde, şekil 3.7’de gösterildiği gibi, kızılötesi ışıma; bantdan banda ve katkı seviyelerinden uyarılma olarak, iki farklı optiksel uyarılma işlemiyle soğurulur. Bir fotodedektörün spektral tepkisi, dedektörün üzerine düşen ışımının dalga boyuna ve gücüne bağlıdır. Yakın kızılötesi bölgede çalışan dedektörlerin dışında, yarıiletken fotodedektörlerin yük taşıyıcılarının termal olarak üretilmesini engellemek için soğutulması gerekmektedir. Çünkü termal uyarımla oluşan yük taşıyıcıları dedektörün önemli bir parametresi olan karanlık akım değerini yükseltmektedir.

Büyütülen yapıda oluşturulan potansiyel engelinin çevresinde foto-etki ile oluşturulan taşıyıcılar, fotovoltajik etkiyi meydana getirir. Bununla beraber elektrik alan, harici yük devresine bağlı olarak, yük taşıyıcılarının farklı yönlerde gitmesine neden olur [51].

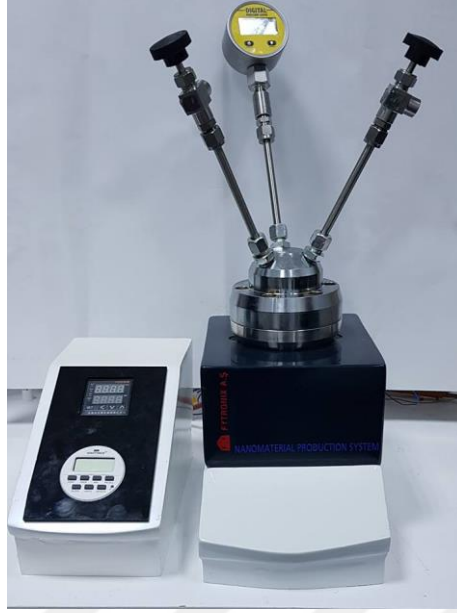


Şekil 3.7.Yarıiletkende optik uyarılma (a) Banttan banda uyarılma (intrinsic),(b) Katkı seviyesinden uyarılma (extrinsic) [50].

Bu bölüm, çalışmada kullanılan malzemeleri, karakterizasyon tekniklerini ve fotodedektörlerin elektriksel özellikleri tanımlamaktadır. Tez çalışmasında kimyasal sentez ile mevcut inorganik yarıiletken malzemelerin kompozitleri hidrotermal ve sol-jel metodu ile üretilmiştir. Bölüm 4.1 de kullanılan malzemeler hakkında bilgi, bölüm 4.2 de kullanılan cihazlar ve teknikler hakkında bilgi, bölüm 5 te tez çalışmasında elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bölüm 6 da ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

4.1.1. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ malzemelerinin üretilmesi

Hazırlanan çözeltiler temizlenen teflon kaplarına aktarılıp hidrotermal cihazına yerleştirildi ve 250 °C’de 24 saat bekletildi. Kullanılan FYTRONİX FY 8000 nanomalzeme üretim sistemi şekil 4.2’de gösterilmiştir.



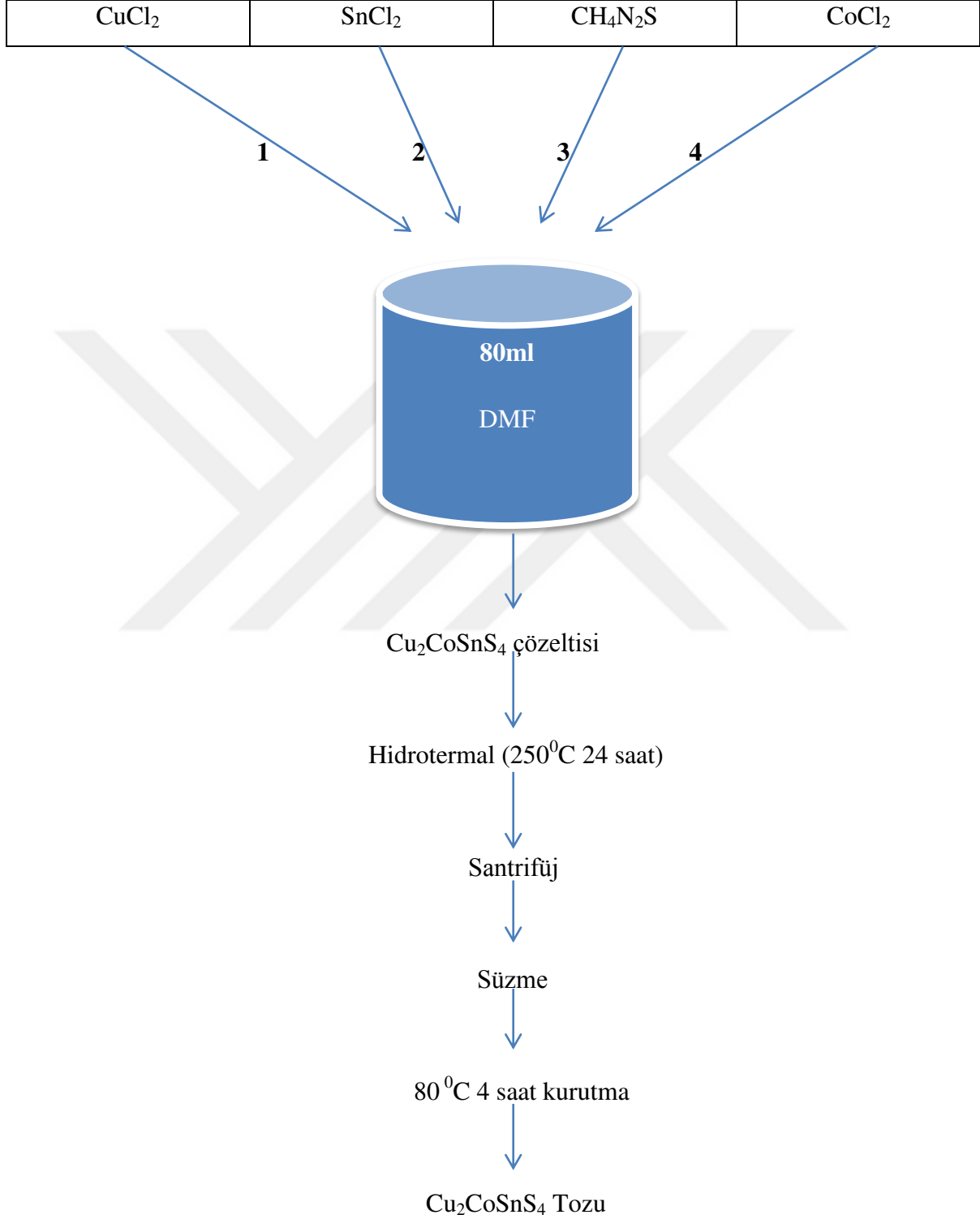
Şekil 4.2. FYTRONİX FY 8000 nanomalzeme üretim sistemi

Çözeltiler hidrotermal cihazından çıkartıldıktan sonra önce santrifüj yapıldı ve daha sonra de-iyonize su ile defalarca yıkanıp süzme işlemi tamamlandı. Süzülen numune petri kabına konulup hotplate'nin üzerine 80°C 'de 4 saat kurutmaya bırakıldı. Kurutulan numuneler havanda dövülüp toz haline getirildi. Deneyde kullanılan santrifüj cihazı şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Santrifüj cihazı

$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunelerinin hazırlanma süreçleri şematik olarak aşağıda gösterilmiştir.



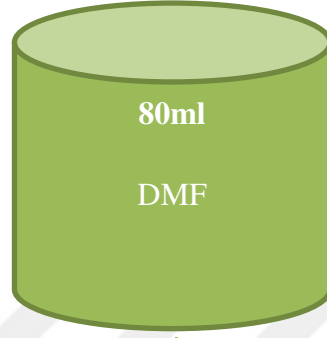
CuCl_2	SnCl_2	$\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$	NiCl_2
-----------------	-----------------	---------------------------------	-----------------

1

2

3

4



$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ çözeltisi

Hidrotermal (250°C 24 saat)

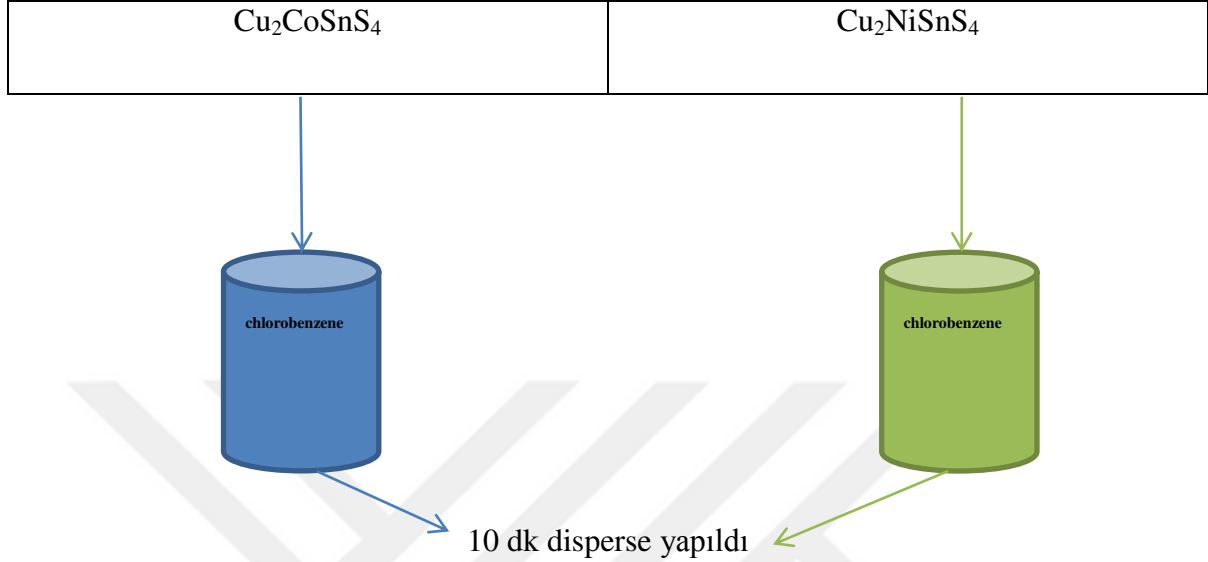
Santrifüj

Süzme

80°C 4 saat kurutma

$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ Tozu

Diyot üzerine kaplamak için elde edilen $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ tozlarından 0,01gram alınıp 5ml chlorobenzene de FYTRONIX FY100 ultrasonik pan cihazında dispers edildi. Hazırlanma aşamasının şematik olarak gösterimi aşağıda gösterilmiştir.



4.1.2. $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) malzemesinin üretimi

$\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) numunelerinin hazırlanmasında sol jel metodu kullanıldı. Titanium (IV) isopropoxide $\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$ ve Cadmium acetate dihydrate $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ malzemeleri kullanılarak çözeltiler hazırlandı. Temizlenmiş beher içerisine 10ml etil alkol konulup üzerine 0.5M Titanium(IV) isopropoxide eklenip manyetik karıştırıcının üzerinde belli bir süre karıştırıldı. Daha sonra üç beher daha alınıp her birine 10 ml etil alkol konuldu ve CdO %1,%5 ve %10 oranlarında TiO_2 ye katkılanıp çözelti çözünene kadar karıştırıldı. $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) oranlarında hazırlanan çözeltilere 2ml HCl eklendi ve 1 saat karıştırıldı. Böylelikle $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ jelleri ince film için hazır hale getirilmiştir.

4.1.3. $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) filmlerin üretilmesi

$\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) oranlarında sol jel metodu ile oluşturulan jellerin mikroskop camı üzerine filmi yapılmadan önce kimyasal temizleme işlemleri yapıldı. 1.5-2 cm ebatlarında kesilen camlar spin coating üzerinde 1500 rpm 30 s 3 kat film yapıldı. Her kat aralığında hotplate'nin üzerinde 150°C 'de bekletilip soğuması içinde oda sıcaklığında 2 dak dinlendirildi. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra dört filmde 450°C 1 saat ısıtma işlemi tabi tutuldu. Filmler ölçüm almaya hazır hale getirildi.

4.1.4. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ Foto Diyotlarının üretilmesi

Öncelikle p,n-Si tabakası üzerindeki organik ve diğer ağır metal kirliliklerini temizlemek ve kristal yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için p,n-Si tabakaya kimyasal temizleme işlemleri yapıldı.

Kimyasal temizleme işlemleri;

- ✚ Temizleme işlemi için ilk olarak kullanılacak beherlerin de-iyonize su ile ön temizliği yapıldı.
- ✚ Bütün kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içerisinde RCA yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Ultrasonik banyo tankı için saf su kullanıldı.
- ✚ p / n-Si aseton (30 ml) içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandıktan sonra, 30 ml de-iyonize suda ultrasonik banyoda tekrar 5 dakika yıkandı.
- ✚ p / n-Si etil alkol (30 ml) içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandıktan sonra, 30 ml de-iyonize suda ultrasonik banyoda tekrar 5 dakika yıkandı.
- ✚ p / n-Si $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:10ml) çözücüsü içerisine 30 saniye daldırılıp bekletildikten sonra, 30 ml de-iyonize suda ultrasonik banyoda yeniden 5 dakika yıkandı. Bu işlemler tamamlandıktan sonra p,n-Si numuneleri azot gazı ile kurutuldu.

Kimyasal temizleme işleminden sonra, p,n-Si üzerine omik kontak oluşturmak için Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü Nano Teknoloji 2 Laboratuvarındaki Nano Vak buharlaştırma sistemi ile Al p-Si yüzeyine ince film şeklinde buharlaştırılarak kaplandı. Buharlaştırma 2-4 Å/s hızında yapılarak p,n-Si'nin mat yüzeyine 100 nm kalınlığında omik kontak ince film şeklinde oluşturuldu. Bu işlemten sonra Al/p-Si yapısı 570 °C, Al/n-Si yapısı ise 450°C sıcaklıkta 5 dakika azot gazı ortamında ısıtılma tabi tutuldu. Daha sonra Al/p,n-Si yaklaşık 1-1.5cm ebatlarında olacak şekilde kesilen parçalar kullanılmak üzere de-iyonize su ile ultrasonik banyoda 3 dakika tekrar yıkandı ve azot gazı ile kurutuldu. Al/p-Si'lar üzerine her bir numunenin dispers edilen jeli belirli oranda (yaklaşık 2-3 damla) p-Si üzerine damlatılarak 50 °C sıcaklıkta hotplate üzerinde kurutuldu. Al/n-Si'lar üzerine ise spin coating metoduyla 4000 rpm 30 saniyede 2 kat film kaplanıp 80°C hotplatenin üzerinde kurutuldu ve 450°C'de 1 saat fırında bekletildi. $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ filmleri ve $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ - $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ jel ile ince filmleri oluşturulduktan sonra Fırat Üniversitesi Fizik Bölümünde bulunan Nano Vak buharlaştırma sistemi ile üst Al kontak oluşturuldu. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ /Al, Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ /Al ve Al/n-Si/ $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ /Al Foto diyotların blok diyagramı şekil 4.4'de gösterilmiştir.

4.2. Kullanılan Cihazlar ve Karakterizasyon Teknikleri

4.2.1 X-Işını Difraksiyon Ölçümleri

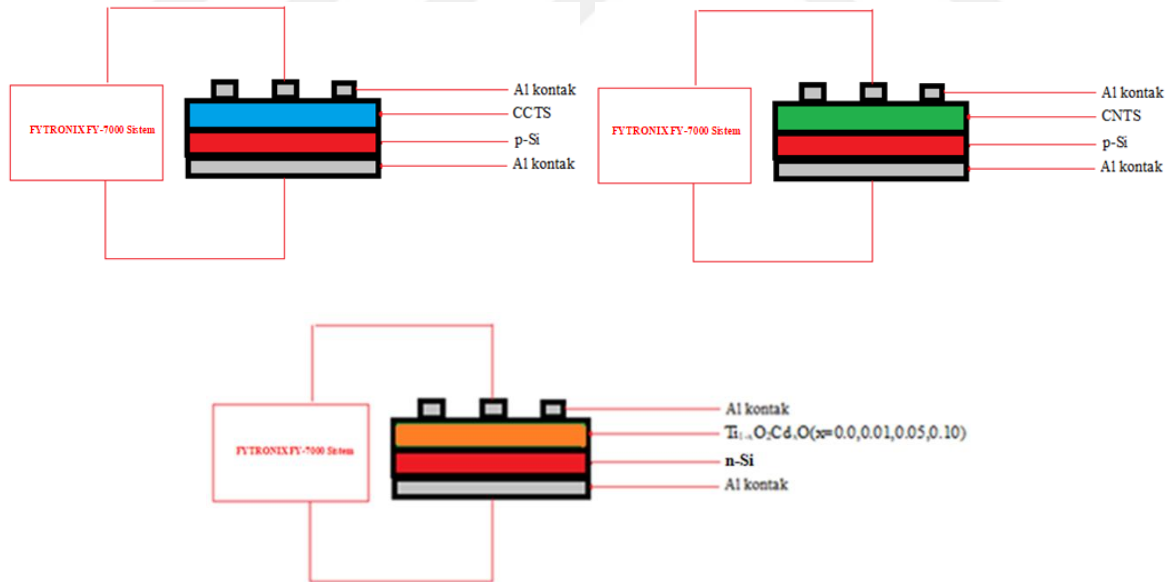
Toz halinde elde edilen numunelerin X-ışınları spektrumları, Fırat Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında bulunan Burker D8 Advanced difraksiyon cihazı kullanılarak alındı. Ölçümler $\text{CuK}\alpha 1$ radyasyonu ve $5^\circ/\text{dak.}$ tarama hızında alınmıştır.

4.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Gözlemleri

Numunelerin SEM analizleri, Fırat Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında bulunan Karlz Zeiss taramalı elektron mikroskobu ile yapıldı. Numunelerin farklı büyütme ölçeklerinde SEM resimleri alındı ve malzemelerin yüzey morfolojileri analiz edildi.

4.2.3. Elektriksel Özelliklerini Belirleme Ölçümleri

Şekil 4.4'deki diyot devreleri kullanılarak, $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{CoSnS}_4/\text{Al}$, $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{NiSnS}_4/\text{Al}$ ve $\text{Al/n-Si/Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}/\text{Al}$ ($x=0.0, 0.01, 0.05$ ve 0.10) diyotlarının I-V, C-V, I-t ölçümlerinin güneş ışığı ve infrared ışık altında karakterizasyonu yapılmış, bu karakterizasyonlar yardımıyla $G(S)\text{-V}$, $C(F)\text{-V}$, $I(\text{ph})\text{-P}$, $C_{\text{adj}}\text{-V}$, $G_{\text{adj}}\text{-V}$ grafikleri elde edilmiştir.



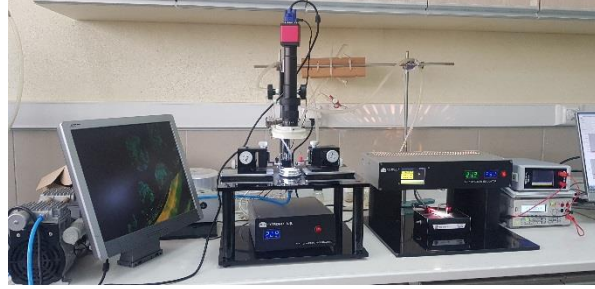
Şekil 4.4. $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{CoSnS}_4/\text{Al}$, $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{NiSnS}_4/\text{Al}$ ve $\text{Al/p-Si/Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}/\text{Al}$ Foto diyotların blok diyagramı

I-V, C-V, I-t güneş ışığı ve kızılötesi ışık altında ölçümleri Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoteknoloji 1 Laboratuvarındaki FYTRONIX FY-7000 electronic devices characterization sistemi ile alındı. FYTRONIX FY-INF1000 Infrared light characterization

sistemi ve FYTRONIX FY-7000 electronic devices characterization sistemi şekil 4.5’de verilmiştir.



-a-



-b-

Şekil 4.5. a) FYTRONIX FY-INF1000 Infrared light characterization sistemi b) FYTRONIX FY-7000 electronic devices characterization sistemi.

4.2.4. Optik Karakterizasyon Ölçümleri

Tez çalışmasında Optik Yansıma Spektroskopisi kullanıldı. Çünkü bu teknik düşük absorpsiyon seviyesine sahip malzemeler için son derece hassas ve doğruluğu yüksek bir metottur. Numunelerin yasak enerji aralıklarını belirlemek için bilgisayar kontrollü Shimadzu 3600 UV/VIS spektrometresi kullanıldı. Ölçümler, 5nm tarama hızında yapıldı. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numuneleri pelet halinde, $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05,0.10$) numuneleri ise sol jel metodu ile ince filmleri hazırlanarak ölçümleri alındı. Hazırlanan toz malzemelerin, yansıma spektrumları, ince filmlerin ise soğrulma, geçirgenlik ve yansıma spektrumları ölçüldü.

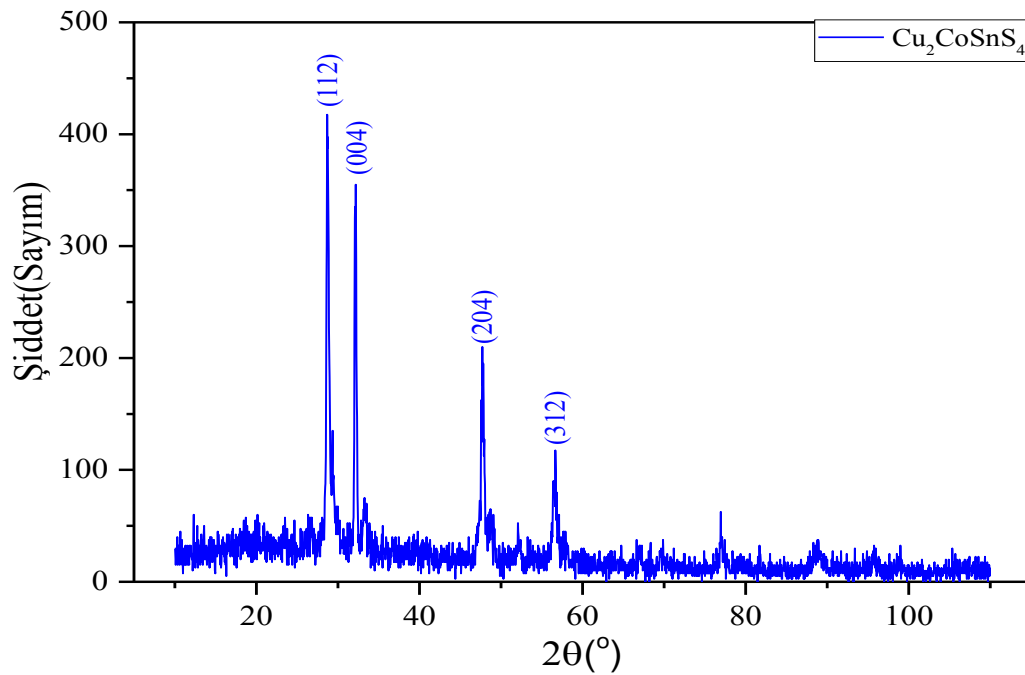
5. ÖLÇÜM SONUÇLARI

5.1. Numunelerin Kristal Yapılarının Belirlenmesi

Üretilen $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ malzemelerin XRD ölçümleri yapıldı. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunelerinin X-ışını desenleri şekil 5.1-5.2 de görüldüğü gibi kristal yapıya sahiptirler. Numunelerin kristal yapı analizleri deneme-yanılma (trial-error) metoduyla bir bilgisayar programı (POWD-Interactive Powder Diffraction Data) kullanılarak yapıldı.

5.1.1. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ numunesinin X-ışını Difraksiyon Sonuçları

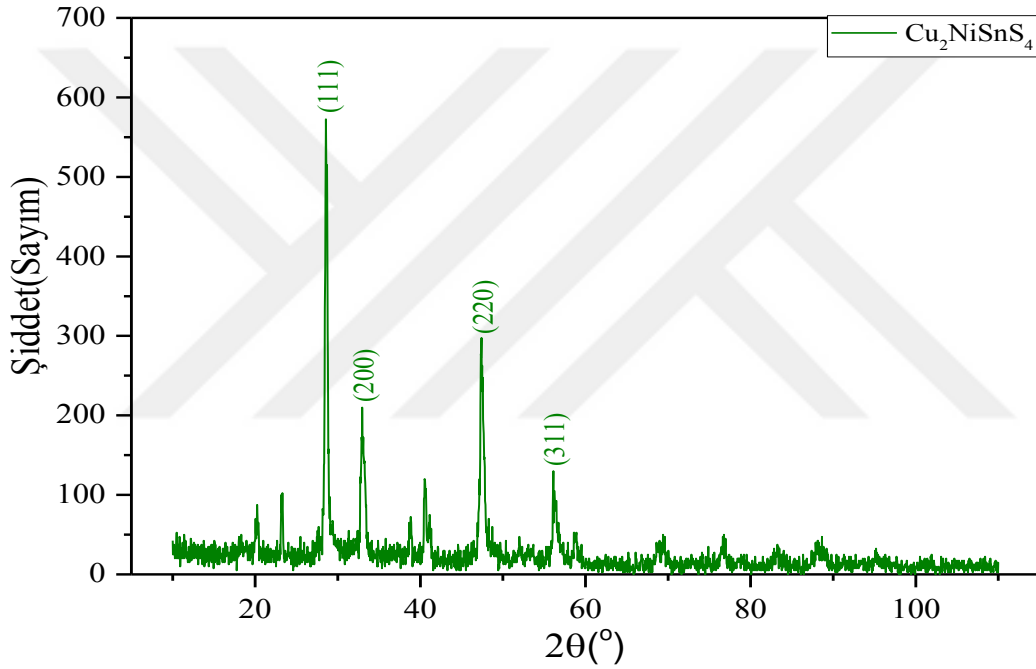
$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ nanotozun X-ışını difraksiyon deseni Şekil 5.1 de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ iyi bir kristalleşmeye sahiptir. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ için piklerin 2θ değerleri, 28.68° , 32.12° , 47.84° ve 56.68° olup sırasıyla (112), (004), (204), (312) düzlemlerine karşılık gelir. Pikler malzemenin kristal yapısını doğrulamakta ve elde edilen sonuç literatür ile uyum içerisindedir [54,55,56,57].



Şekil 5.1. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ nanotozun X-ışını difraksiyon deseni

5.1.2. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunesinin X-ışını Difraksiyon Sonuçları

$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nanotozun X-ışını difraksiyon deseni Şekil 5.2 de verilmiştir. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunesinde keskin ve şiddetli pikler görülmektedir. Bu piklerin varlığı numunenin iyi kristalleştiği göstermektedir. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ için piklerin 2θ değerleri, 28.64° , 32.96° , 47.68° , 56.12° değerlerinde gözlemlendi ve sırasıyla (111), (200), (220), (311) düzlemlerine karşılık gelir. 28.64° 'deki pik için en yüksek tepe yoğunluğu, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ 'ün bu yönde büyümeyi tercih ettiğini göstermektedir. Gözlenen bu pik değerleri $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ malzemesinin kristal yapısını doğrulamakta ve elde edilen sonuç literatür ile uyum içerisindedir [58,59,60,61].

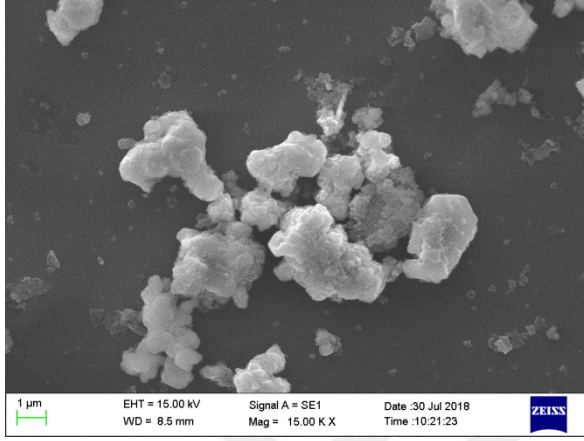


Şekil 5.2. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nanotozun X-ışını difraksiyon deseni

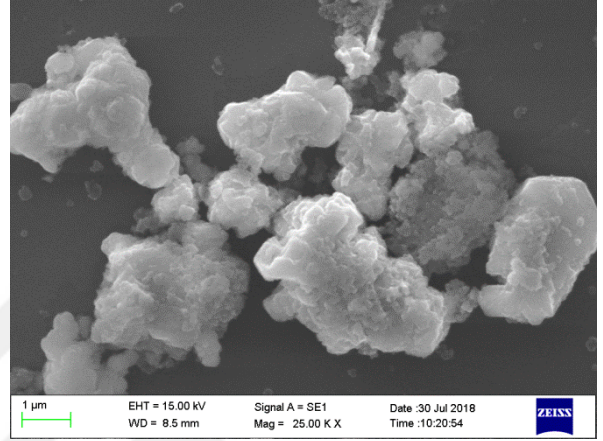
5.2. Numunelerin Yüzey Morfolojileri

5.2.1. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ 'nin SEM Sonuçları

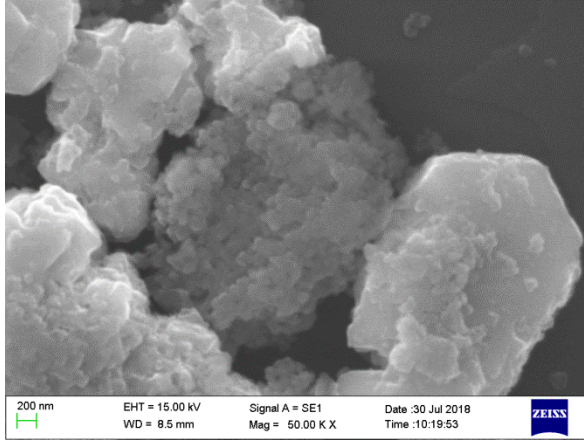
Şekil 5.3'de $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve Şekil.5.4'de $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunesinin SEM analiz sonuçları verilmiştir.



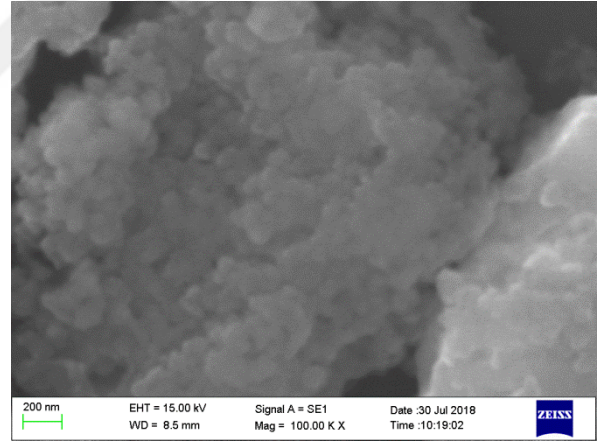
-a-



-b-

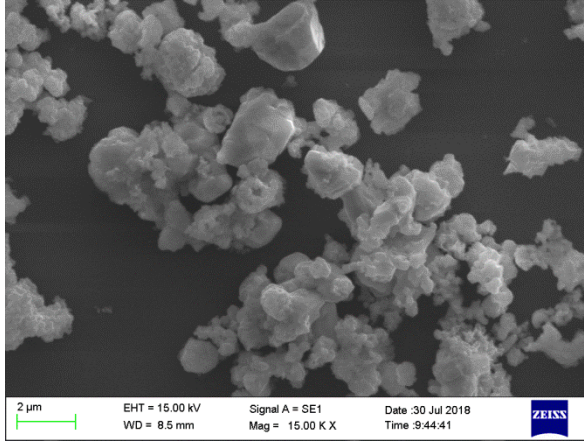


-c-

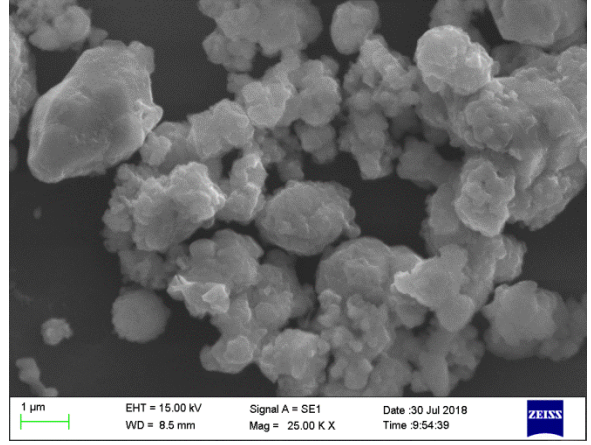


-d-

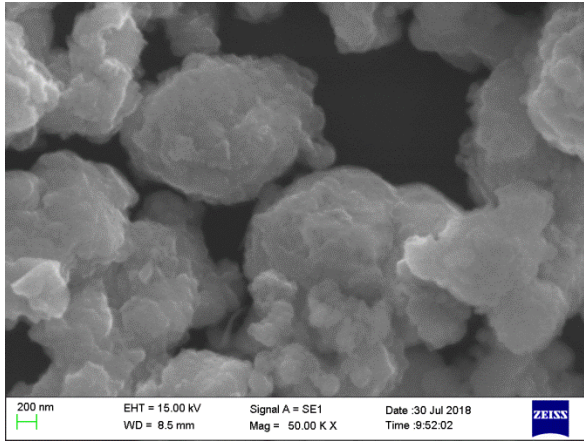
Şekil 5.3. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ kompozitinin SEM resimleri a)x15K büyütmeli b) x25K büyütmeli c) x50K büyütmeli d) x100K büyütmeli.



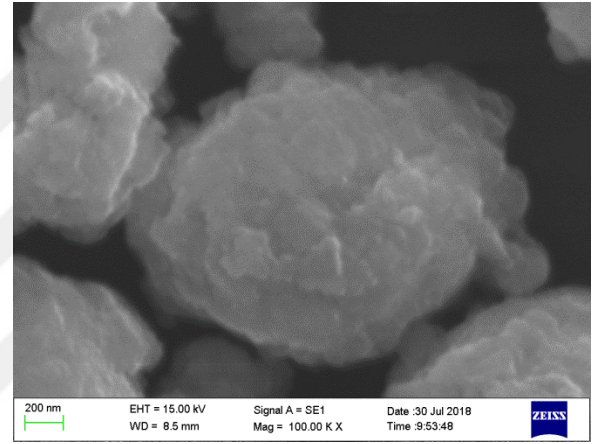
-a-



-b-



-c-

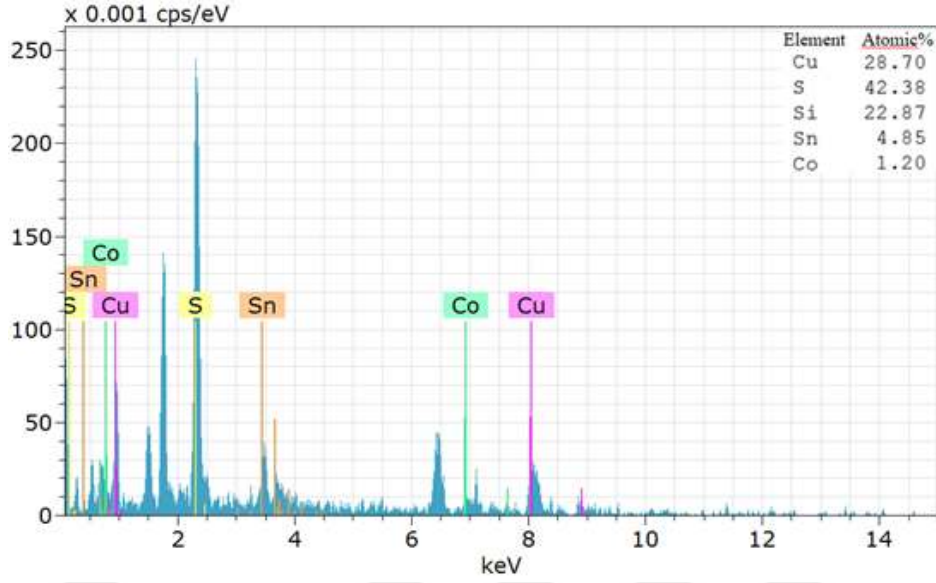


-d-

Şekil 5.4. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ kompozitinin SEM resimleri a) x15K büyütme b) x25K büyütme c) x50K büyütme d) x100K büyütme.

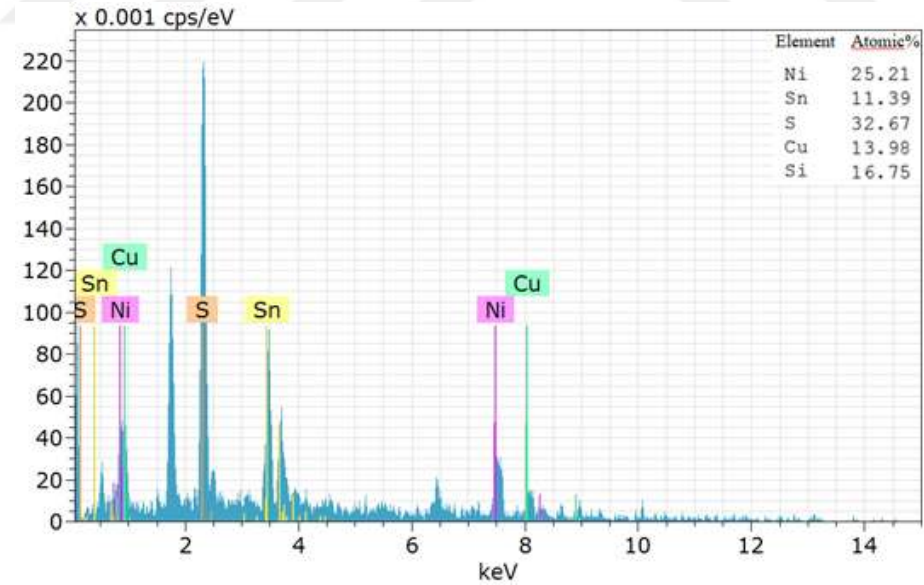
SEM görüntülerinden nano boyutta tanelerin olduğu görülmüştür. Morfolojik olarak incelendiğinde partiküllerin homojen olarak dağıldığı fakat topaklaşmaların da olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin havadaki nem ve nano boyutlu taneler arası çekim kuvvetinin yüksek olmasından ileri geldiği düşünülmektedir. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ 'nin nanoyapıda üretilmesinin sebebi, nanoyapı ile üretilen infrared fotodetektörün elektrik performansını geliştirmektir. Bilindiği gibi nanoyapıda, kuantum sınırlama etkisi ile malzemelerin elektriksel ve optik özellikleri değişmektedir [62,63].

Şekil.5.5'de $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve Şekil.5.6'da $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunesinin EDX analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.5. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ numunesinin EDX analizi

Hidrotermal yöntem ile sentezlenen $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ tozların EDX cihazında yapılan analizlerinde elementel olarak yüksek şiddette Co,Cu,S ve Sn pikleri elde edilmiştir. Ayrıca EDX analizinde başka herhangi bir yapıya rastlanmadığı ve üretilen $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ nanotozun atomik olarak literatür ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [54,64].

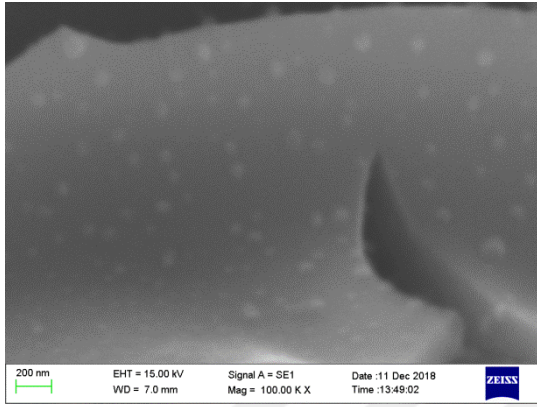


Şekil 5.6. $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunesinin EDX analizi

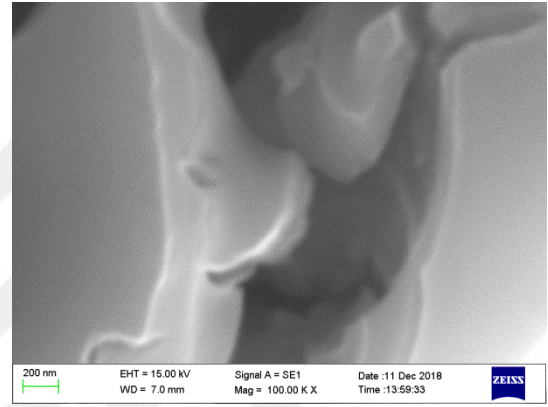
Hidrotermal yöntem ile sentezlenen $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ tozların EDX cihazında yapılan analizlerinde elementel olarak yüksek şiddette Ni,Cu,S ve Sn pikleri elde edilmiştir. Ayrıca EDX analizinde başka herhangi bir yapıya rastlanmadığı ve üretilen $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nanotozun atomik olarak literatür ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [65].

5.2.2. $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) numunesinin SEM Sonuçları

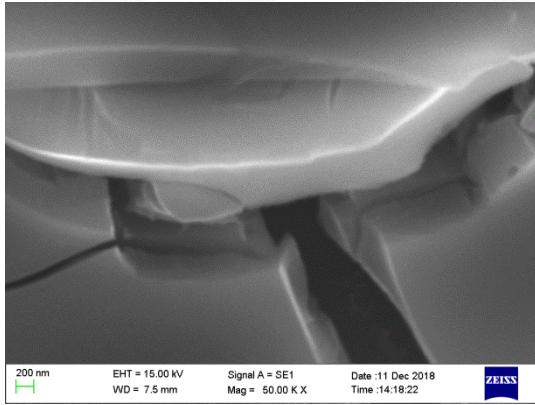
Şekil 5.7de $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ numunesinin SEM analiz sonuçları verilmiştir. Şekilde 5.7 a da, TiO_2 filminin nanoparçacıklardan oluştuğu ve parçacık dağılımının kısmen homojen olduğu görülmektedir. Şekil 5.7 b,c ve d’de saf TiO_2 ’e Cd katkılındığında oran arttıkça yüzey pürüzsüzlüğünün arttığı, tanecikler arası boşluğun azaldığı, tanecik boyutlarının büyüdüğü resimlerde görülmektedir.



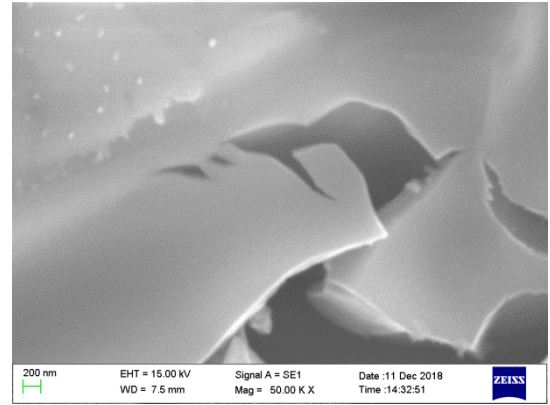
-a-



-b-



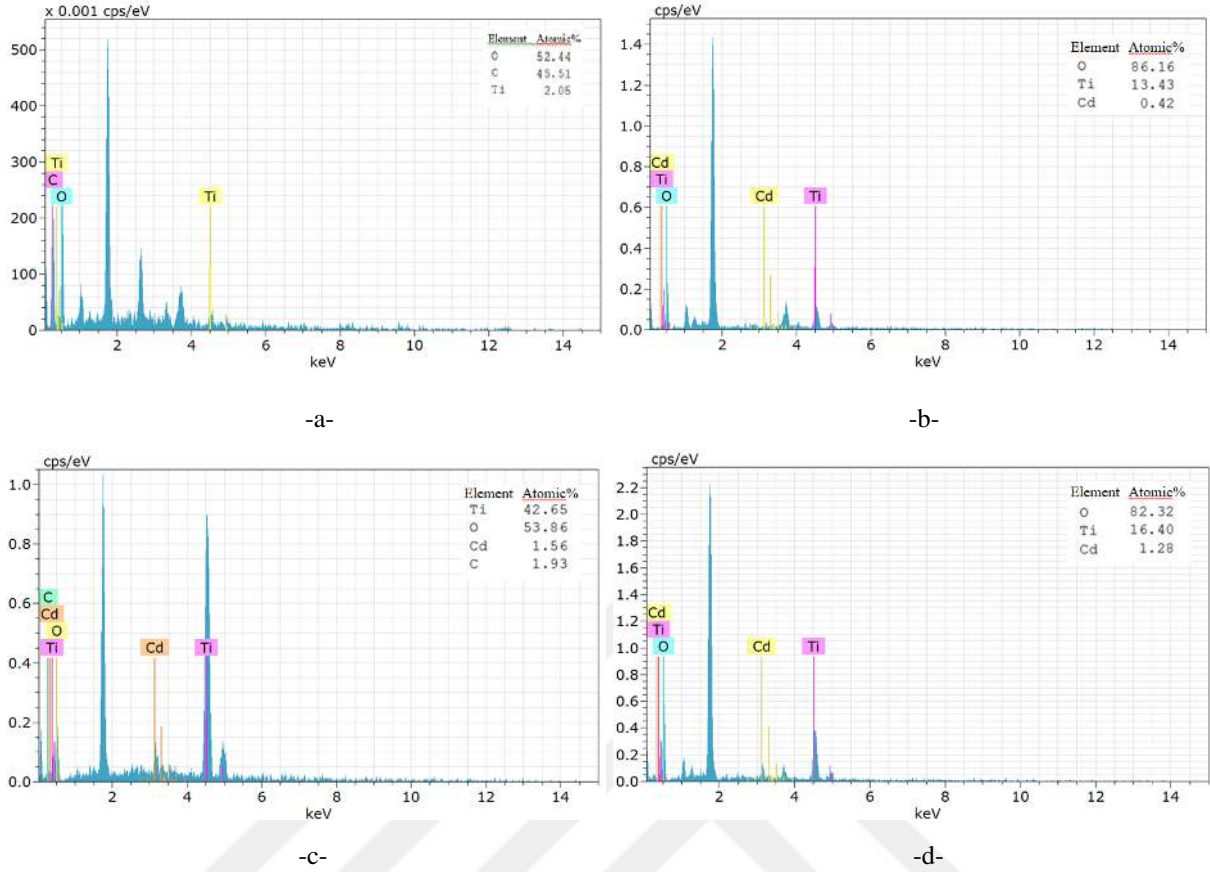
-c-



-d-

Şekil 5.7. $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) kompozitinin SEM resimleri a)x100K büyütme $x=0.0$ b) x100K büyütme $x=0.01$ c) x50K büyütme $x=0.05$ d) x50K büyütme $x=0.10$.

Şekil.5.8’de $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ($x=0.0,0.01,0.05$ ve 0.10) numunesinin EDX analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.8. $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ($x=0.0, 0.01, 0.05$ ve 0.10) kompozitinin EDX analizi a) $x=0.0$ b) $x=0.01$ c) $x=0.05$ d) $x=0.10$.

Soj jel yöntemi ile hazırlanan $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ($x=0.0, 0.01, 0.05$ ve 0.10) filmlerinin EDX cihazında yapılan analizlerinde elementel olarak yüksek şiddette Ti, O ve Cd pikleri elde edilmiştir. Ayrıca EDX analizinde başka herhangi bir yapıya rastlanmadığı ve üretilen filmlerin atomik olarak literatür ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [66].

5.3. Numunelerin Optik Özellikleri

Tez çalışmasında kullanılan malzemeler iyi çözünmediğinden dolayı, toz pelet halinde hazırlanarak, reflektans(yansıma) spektroskopisi yardımıyla optik özellikleri araştırıldı. Numuneler ışığı geçirmediğinden ve zayıf soğurma katsayısına sahip olduklarından dolayı transmittans metodu kullanılmayıp yerine difüz reflektans metodu kullanıldı. Zayıf soğurma katsayılı malzemeler için Kubelka-Munk tarafından geliştirilen teoride reflektans ve konsantrasyon arasında bir korelasyon yapıldı. Kubelka- Munk fonksiyonu [67,68,69];

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (5.1)$$

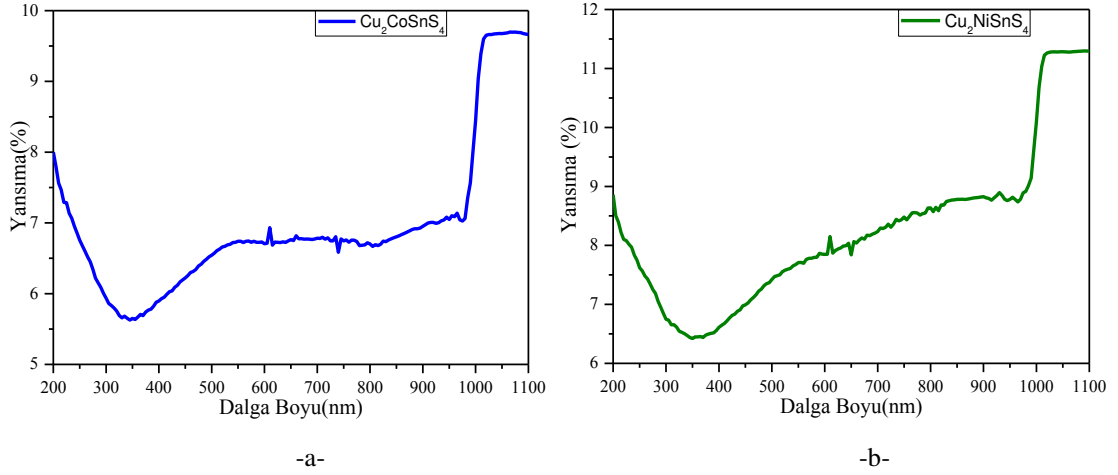
şeklinde gösterilir. Eşitlikte, $F(R)$ Kubelka-Munk fonksiyonu olup absorbansa karşılık gelir. R ise reflektans (yansıma) dır. Bu metot ta düşük absorbanlı malzemelerin reflektansları ölçülür ve daha sonra ölçülen reflektans Kubelka Munk formülü ile absorbansa dönüştürülür. Daha sonra düşük absorbanlı malzemelerin optik band aralıkları optik soğurma metodu ile hesaplanıp absorbans ve optik band aralığı arasındaki ilişki aşağıdaki ifade ile tanımlanır [70].

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (5.2)$$

ifadesinde $\alpha = F(R)/d$, d numune kalınlığı, A bir sabit ve E_g optik band aralığı, n ise bir sabit olup, optik geçişin tipini belirler. Dolaylı (İndirekt) geçişlerde, $n=1, 2, 3, \dots$, doğrudan (direkt) yasaklı geçiş, $n=1/2, 3/2, 5/2, \dots$ şeklindedir. Numunelerin optik band aralıkları yani yasak enerji aralıkları, numuneler için çizilecek olan $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiklerinden hesaplanır.

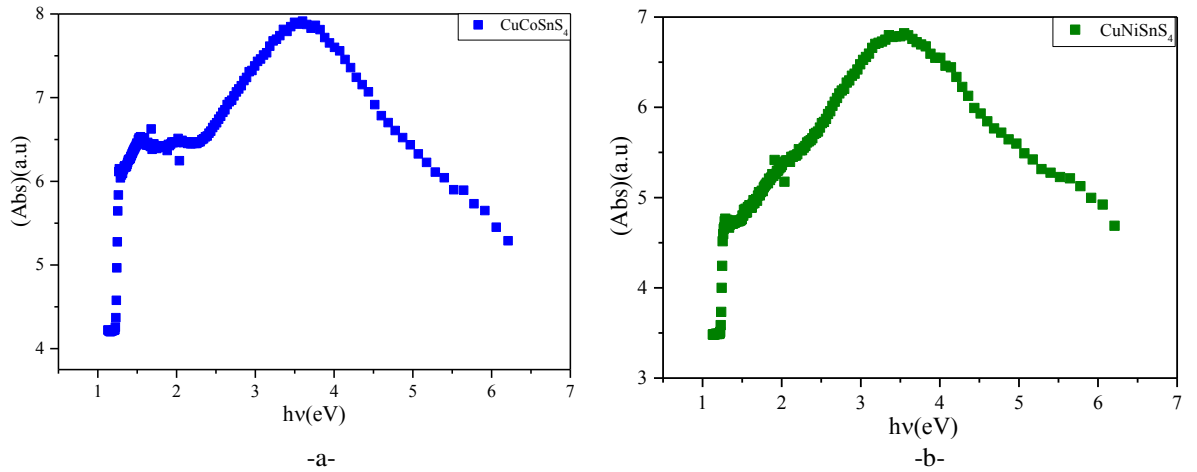
5.3.1. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nin Optik Spektroskopi Sonuçları

$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nin yansıma spektrumları Şekil. 5.9 a ve b de verildi. Şekilden görüldüğü gibi, $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nin yansıması dalgaboyuna bağlı olarak değişmektedir. Her iki numune yaklaşık 350 nm civarından bir yansıma sınırı göstermektedirler. Yansıma sınırı nano yapıya bağlı olarak daha yüksek dalgaboylarına kaymaktadır. Numunelerin yansımaları, yani reflektansları %8-8.5 civarındadır. Reflektanslarının düşük olmasının sebebi, soğurma özelliklerinin yüksek olmasındandır. Numuneler siyah renkli olmalarından dolayı, ışığın çoğunu soğurmaktadırlar. Yansıma spektrumlarında 350-1000 nm aralığında, reflektans giderek azalmaktadır. Yansımdaki bu azalış, valans bandından iletme bandına elektron tranferinden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 5.9. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nin yansımaya spektrumları a) $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ b) $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$

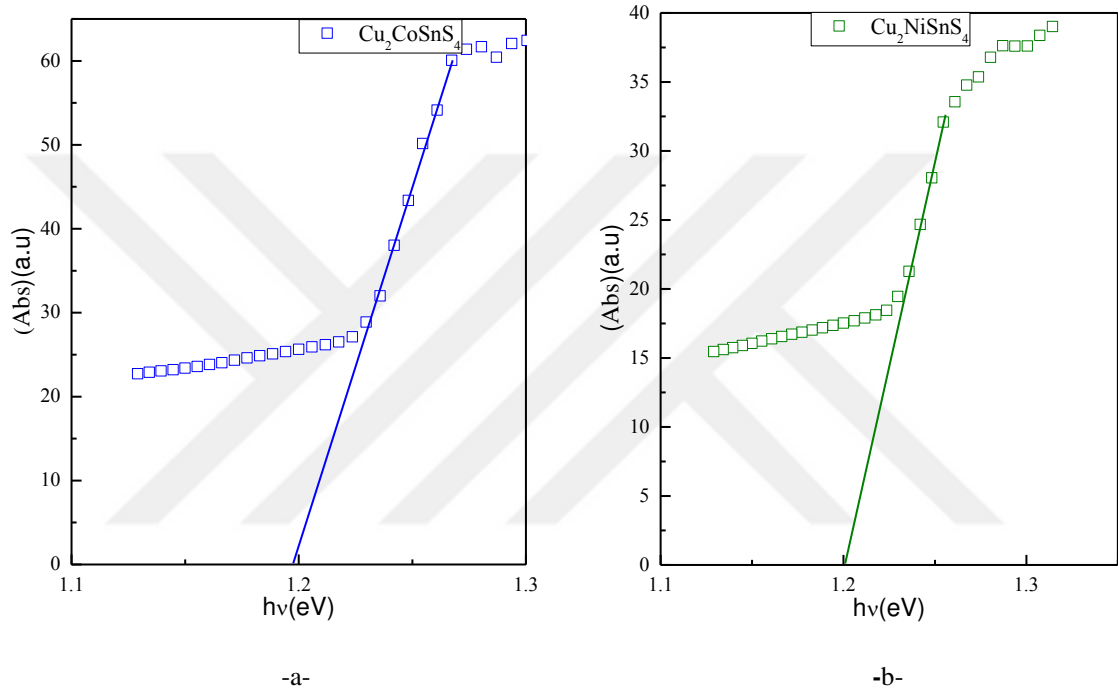
Numunelerin yansımaya spektrumları Kubelka Munk fonksiyonu ile absorbansa dönüştürülmüştür. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunelerinin absorbans spektrumları şekil 5.10 a ve b de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi numunelerin absorbans-dalgaboyu eğrileri benzer davranış sergilemişlerdir. Absorbans foton enerjisi ile artış gösterip maksimum bir değere ulaşmıştır. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ sırasıyla 1.23 eV ve 1.29 eV ta birer maksimum pik göstermiş ve bu pik değerleri malzemelerin soğurma sınırına karşılık gelmektedir [71]. Soğurma sınırındaki değişim numunelerin yasak enerji aralıklarındaki değişimi vermektedir.



Şekil 5.10. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nin absorbans spektrumları a) $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ b) $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$

$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nin yasak enerji aralıklarını hesaplamak için, numunelerin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ spektrumları çizildi ve Şekil 5.11 a ve b de verildi. Numunelerin

Eg değerleri $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ spektrumlarının lineer kısımlarından elde edildi. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nın Eg değerleri sırasıyla, 1.19 eV ve 1.20 eV olarak bulundu. Bulunan Eg değerleri daha önce yapılan farklı çalışmalar ile uyum içerisindedir [72,73]. Nanoyapılı yarıiletken malzemelerde kuantum sınırlama etkisi ile malzemenin yasak enerji aralığı değişim göstermektedir. Kuantum sınırlama etkisi nanoparçacık boyutu ile yasak enerji aralığının değişmesi anlamını taşır, yani artan nanoparçacık boyutu Eg nin azalması demektir.

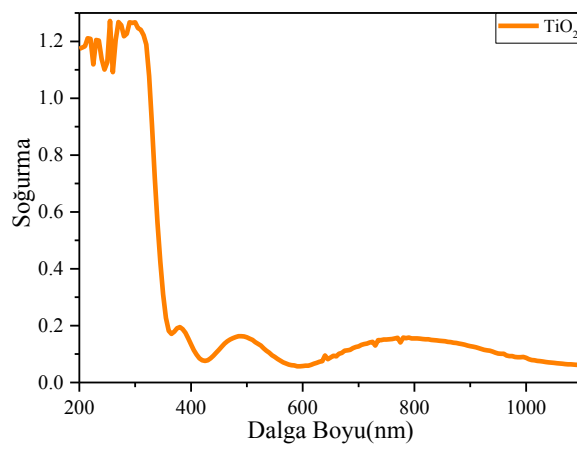


Şekil 5.11. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ spektrumları a) $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ b) $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$

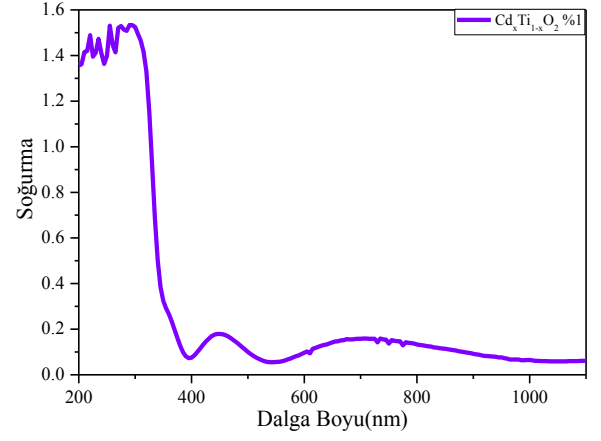
5.3.2. $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ince filmlerin Optik Spektroskopi Sonuçları

Sol Jel yöntemi ile CdO içerikli $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0, 0.01, 0.05$ ve 0.10) filmleri hazırlandı. Hazırlanan ince film numunelerinin UV ölçümleri UV3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR Spectrophometer cihazı ile yapıldı. UV ölçümleri alınarak elde edilen veriler kullanılıp ince filmlerin soğurma, geçirgenlik, yansımaya ve yasak enerji aralığı (Eg) grafikleri çizildi.

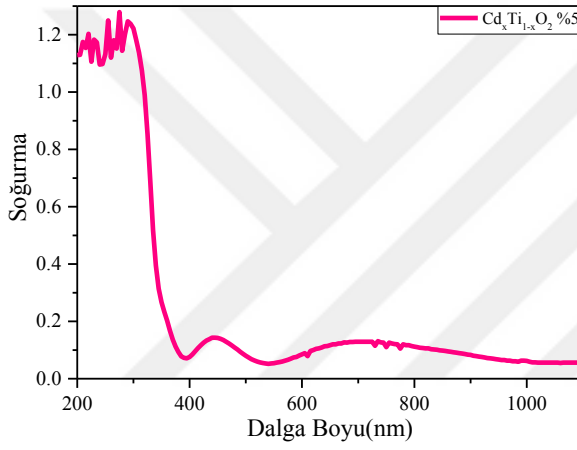
Şekil 5.12’de farklı CdO konsantrasyonlarındaki TiO_2 esaslı ince filmlerin 200-1100 nm dalga boyu aralığında kaydedilen soğurma spektrumu sergilenmektedir. Numunelerin yüksek şeffaflığa sahip olmasından kaynaklı görünür bölgedeki ortalama soğurulma, yaklaşık % 1.1 ile 1.5 aralığındadır [107].



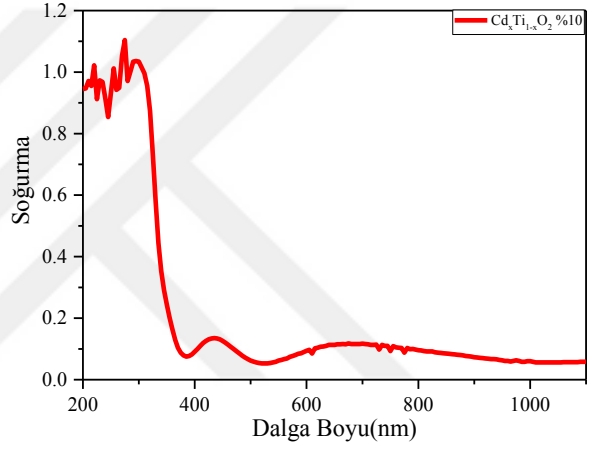
-a-



-b-



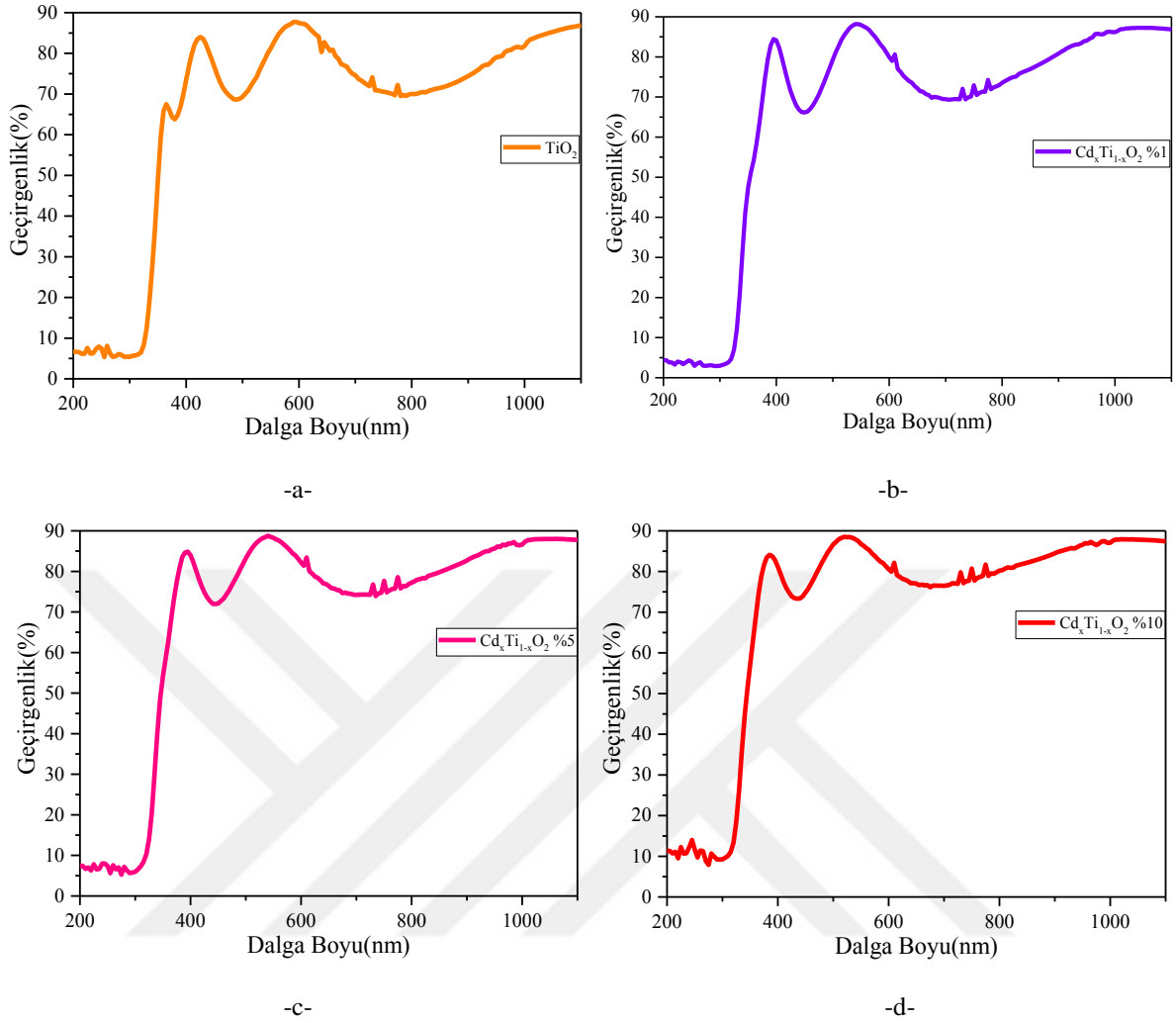
-c-



-d-

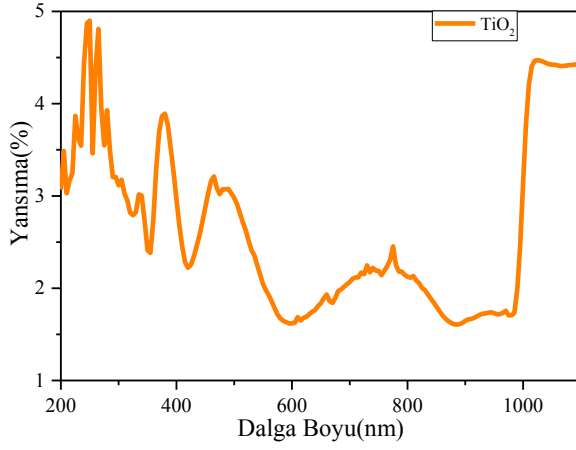
Şekil 5.12. $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ince filmlerin soğurma eğrileri a) $x=0.0$ b) $x=0.01$ c) $x=0.05$ d) $x=0.10$

Şekil 5.13 incelendiğinde görünür bölgede $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ($x=0.0, 0.01, 0.05$ ve 0.10) ince filmlerinin %88.9 luk ortalama yüksek geçirgenlik değerlerine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Numunelerin optik geçirgenliklerinin yüksek olması alttaş üzerine ince filmlerin homojen yani pürüzsüz bir şekilde büyütülmesine, büyütülen ince filmlerin yoğunluğunun ve yüzeylerinde gerçekleşen kayıp saçılmanın düşük olmasına bağlıdır [74,75,76,77]. Ayrıca, bu ince filmlerin yüzeyindeki kayıp saçılmanın çok düşük oranlarda gerçekleştiği belirtilebilir.

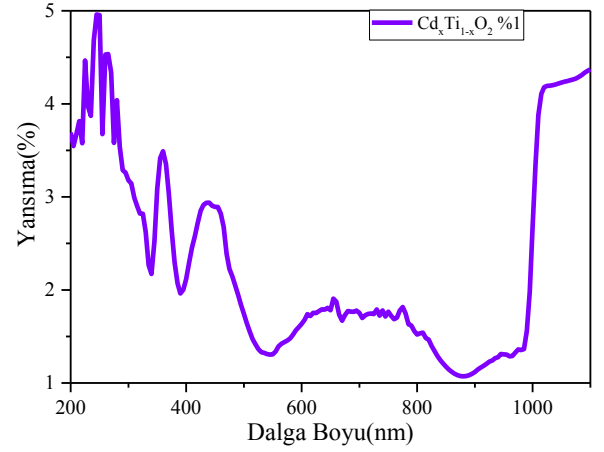


Şekil 5.13. $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ince filmlerin soğrulma eğrileri a) $x=0.0$ b) $x=0.01$ c) $x=0.05$ d) $x=0.10$

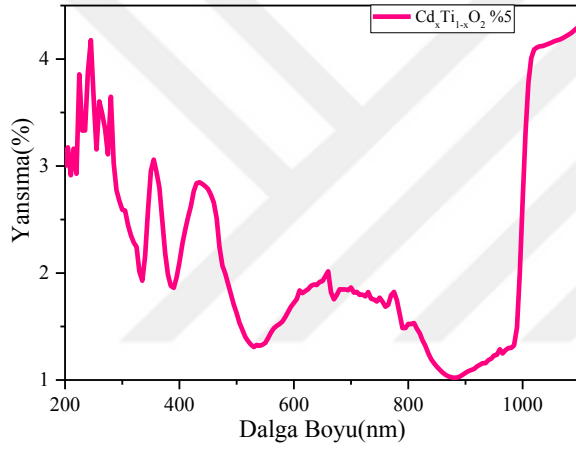
$\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ nano yapıları ince filmlere ait yansıma eğrileri şekil 5.14 de verilmiştir. Şekil 5.14 incelendiğinde, saf TiO_2 çözeltisiyle hazırlanan numunenin diğer üç numuneden daha yüksek yansıma spektrumu sergilediği görülmektedir. Ayrıca, yansıma grafiklerinden, CdO katkılı TiO_2 filmlerin tamamı için de yansıma spektrumlarının, 250-1000 nm dalga boyu aralığında yansıma değerini düşürdüğü ve yansıma oranlarında lineer olmayan değişikliklere sebep olduğu düşüncesine varılmaktadır. Tüm numuneler yaklaşık 880 nm civarından bir yansıma sınırı göstermektedirler. Yansıma sınırı nano yapıya bağlı olarak daha yüksek dalgaboylarına kaydığı sonucuna varılmaktadır. Yansıma spektrumlarında 880-1000 nm aralığında, reflektans giderek azalmaktadır [78,79].



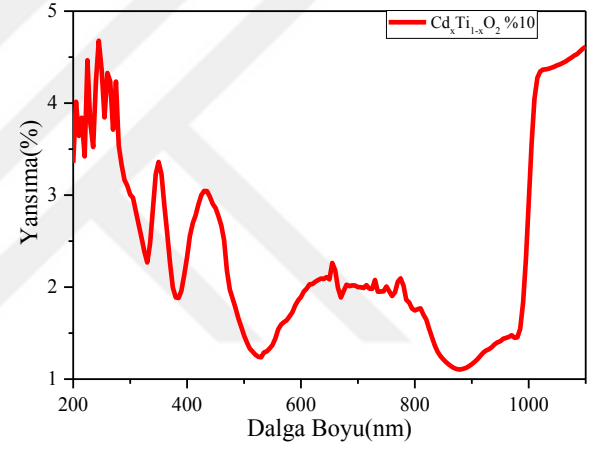
-a-



-b-



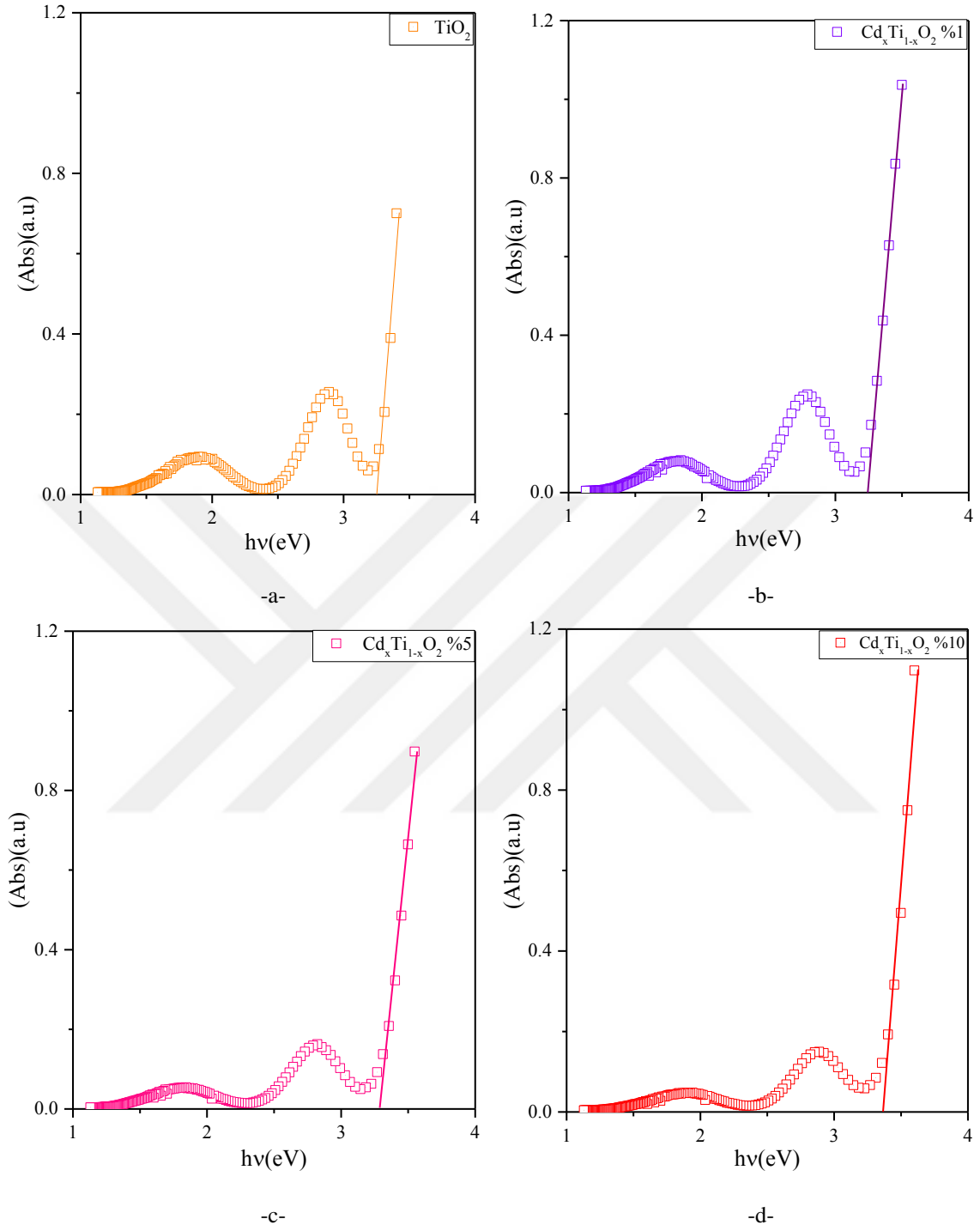
-c-



-d-

Şekil 5.14. $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ince filmlerin yansım eğrileri a) $x=0.0$ b) $x=0.01$ c) $x=0.05$ d) $x=0.10$

$Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ($x=0.0, 0.01, 0.05, 0.10$) numunelerinin yasak enerji aralığını hesaplamak için, $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri çizildi ve şekil 5.15’de verildi. $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ($x=0.0, 0.01, 0.05, 0.10$) numunelerinin yasak enerji aralıkları sırasıyla, 3.25, 3.26, 3.29 ve 3.36 eV olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi, E_g değeri artan Cd katkılanması ile artmaktadır. $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ numunesinin E_g değerleri yapılan çalışmalar ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür [80,81].

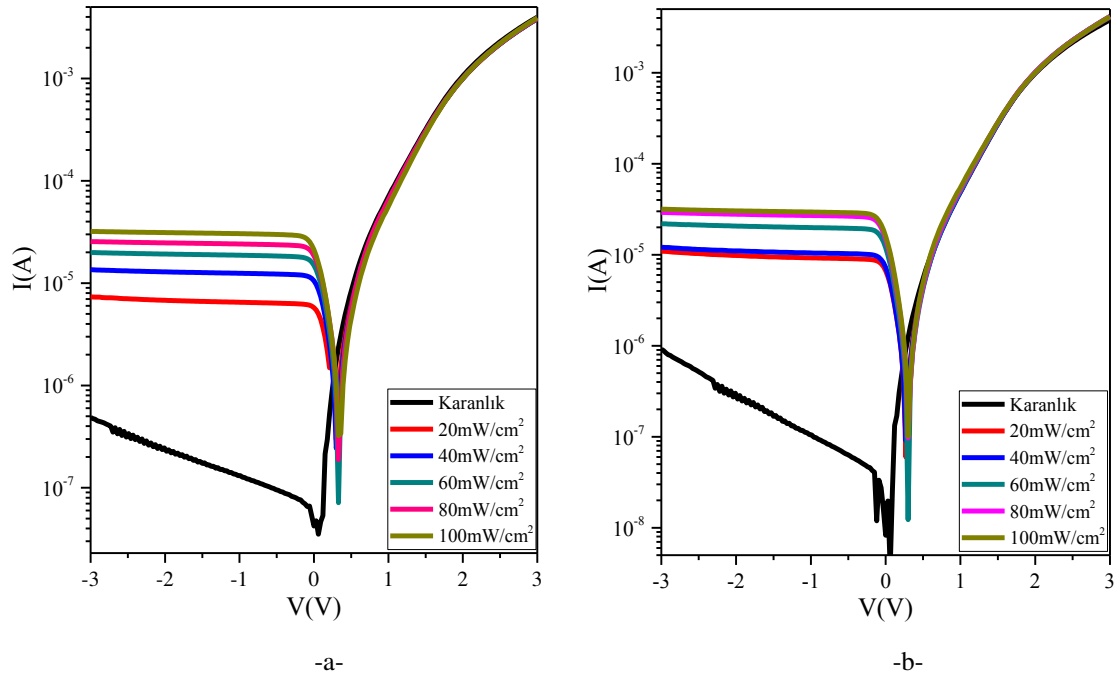


Şekil 5.15. $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ kompozitlerinin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ spektrumları a) $x=0.0$ b) $x=0.01$ c) $x=0.05$ d) $x=0.10$

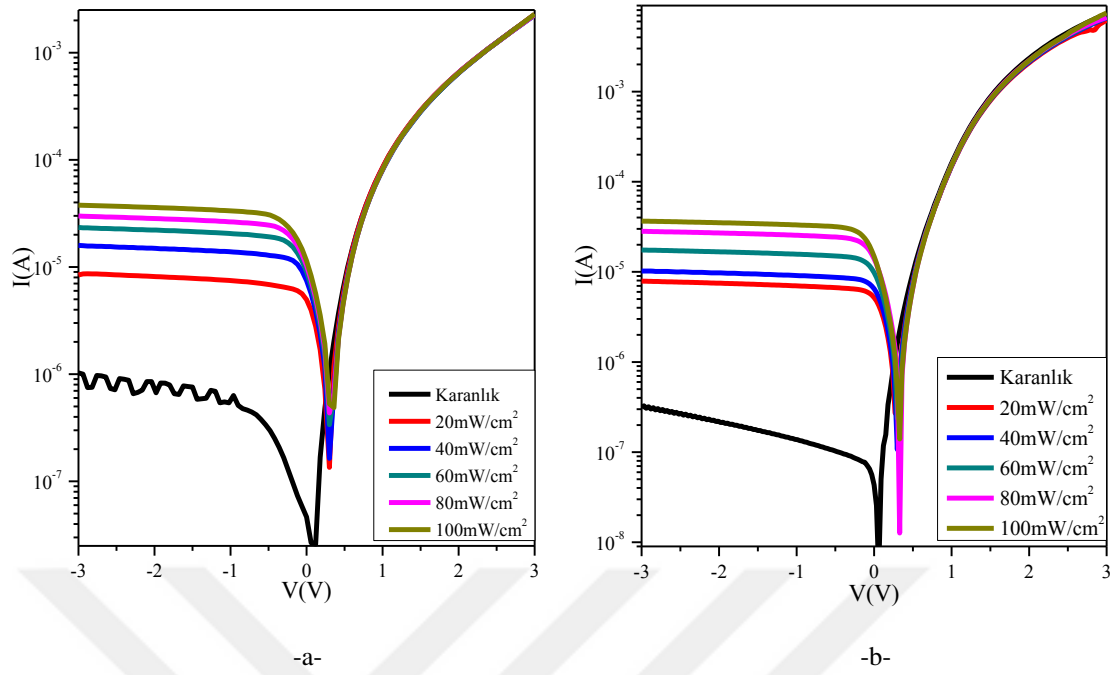
5.4. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al, Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al ve Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al Foto Diyotlarının Elektriksel Ölçüm Sonuçları

5.4.1. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al Foto diyotların (I-V) Karakteristikleri

Bu çalışmada hazırlanan Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al, Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al diyotların elektriksel karakterizasyonu için, akım-voltaj (I-V) ölçümleri infrared ve çeşitli aydınlanma şiddetleri altında incelendi. Akım-voltaj karakteristiklerinin belirlenmesi için I-V ölçümleri Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoteknoloji Laboratuvarındaki FYTRONIX FY-INF1000 Infrared light characterization sistemi ve FYTRONIX FY-7000 electronic devices characterization sistemi ile alındı. I-V özellikleri kullanılarak çeşitli eklem parametreleri bulundu. Silisyum altlığı üzerine yapılan fotodiyotlara -3 ile +3 V arasında gerilim uygulanarak ölçümler yapıldı. Şekil 5.16'da Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al diyotunun şekil 5.17'de ise Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al diyotunun I-V eğrileri verilmiştir. Gözlenebileceği gibi, fotodiyotun aydınlatma altında ters akımı, karanlıkta bulunan akımın ters akımından daha yüksektir. Ayrıca, ters akım artan aydınlatma yoğunluğu ile artar. Bu sonuçlar, hazırlanan fotodiyotun bir foto iletken davranış sergilediğini gösterdi [82].



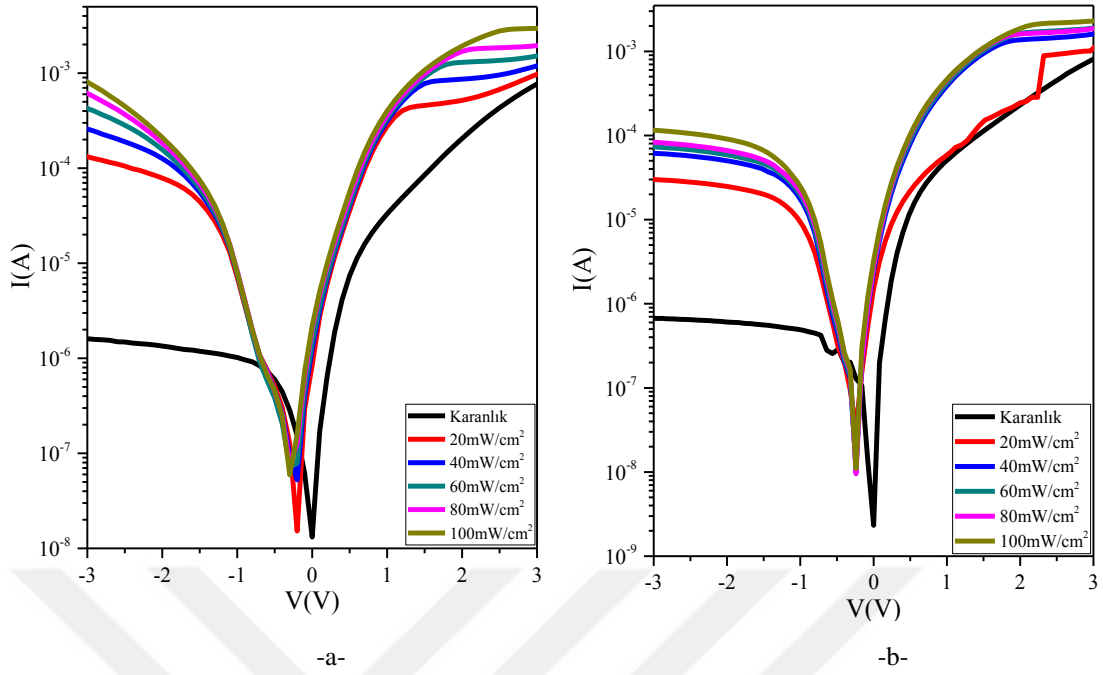
Şekil 5.16. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri a) Güneş ışığı altında eğrisi b) İnfrared ışık altında eğrisi



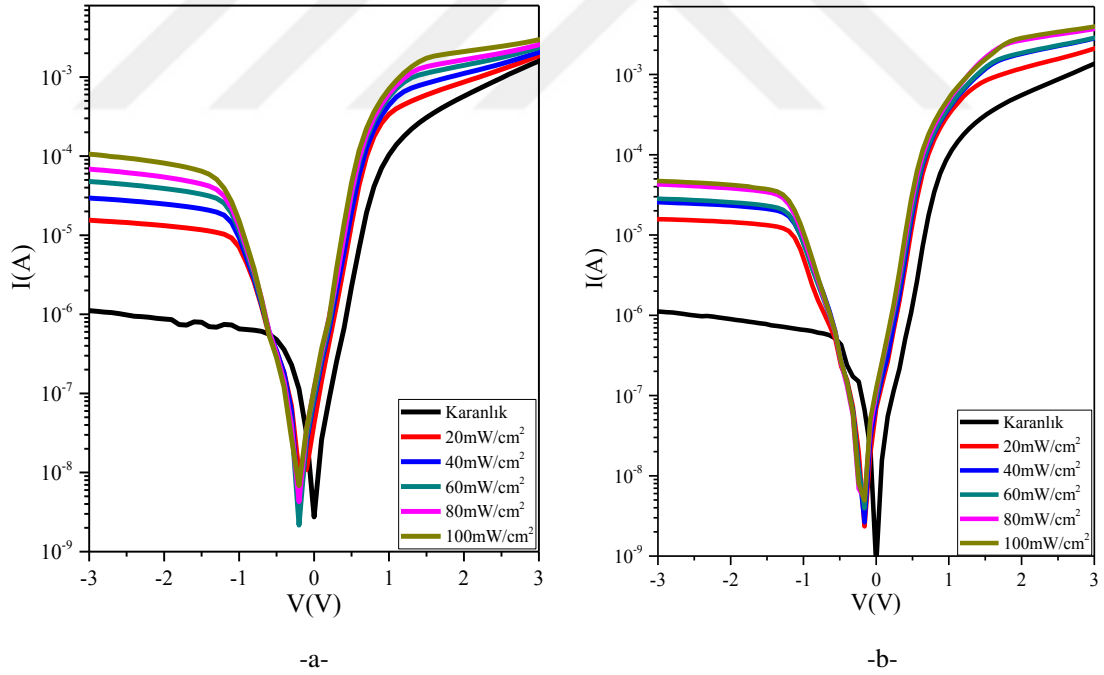
Şekil 5.17. Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri a) Güneş ışığı altında eğrisi b) İnfrared ışık altında eğrisi

5.4.2. Al/n-Si/ Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al Foto diyotların (I-V) Karakteristikleri

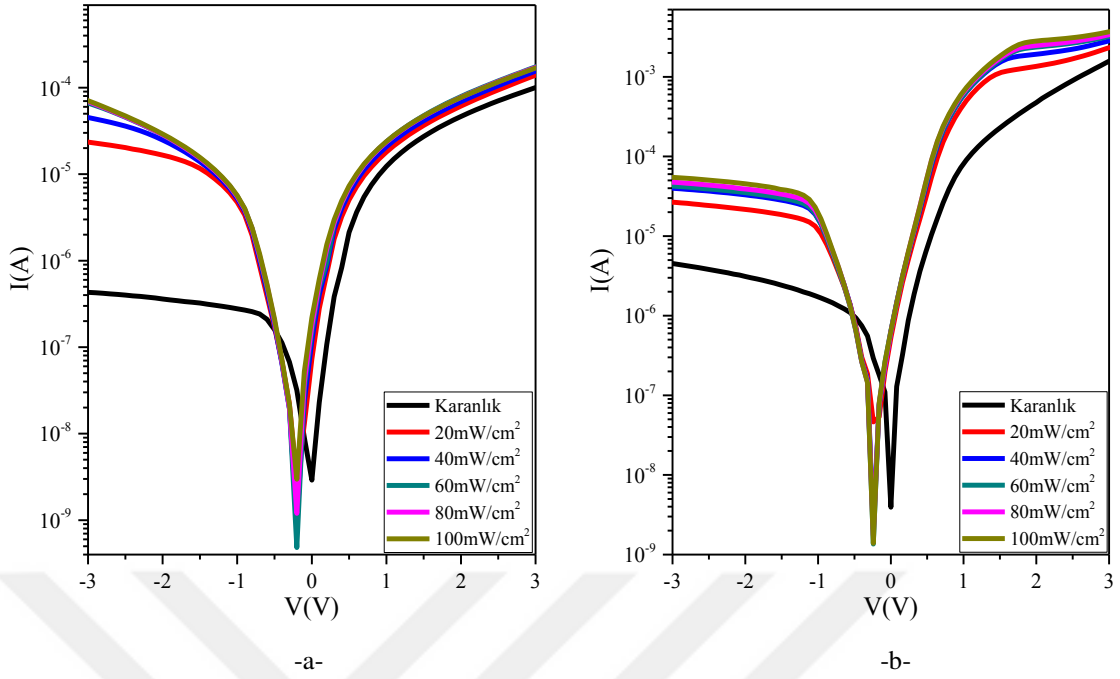
Bu çalışmada hazırlanan Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.0,0.01,0.05,0.10) diyotların elektriksel karakterizasyonu için, akım-voltaj (I-V) ölçümleri infrared ve çeşitli aydınlanma şiddetleri altında incelendi. Silisyum altlığı üzerine yapılan fotodiyotlara -3 ile +3 V arasında gerilim uygulanarak ölçümler yapıldı.



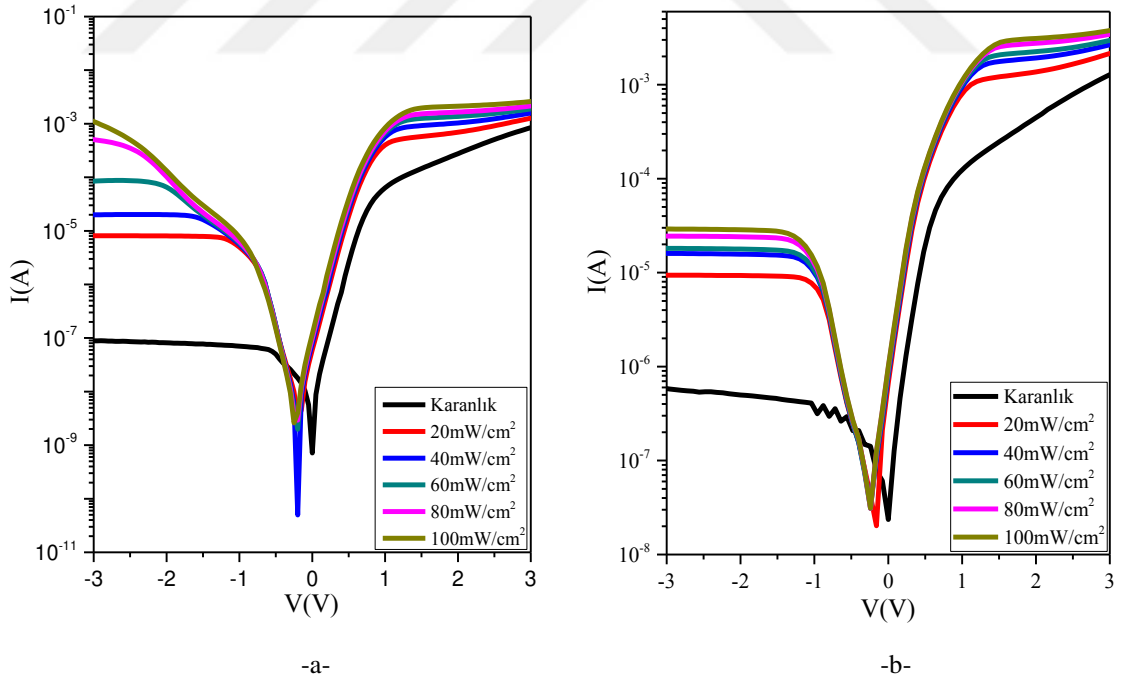
Şekil 5.18. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.0) diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri a) Güneş ışığı altında eğrisi b) İnfrared ışık altında eğrisi



Şekil 5.19. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.01) diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri a) Güneş ışığı altında eğrisi b) İnfrared ışık altında eğrisi



Şekil 5.20. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.05) diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri a) Güneş ışığı altında eğrisi b) İnfrared ışık altında eğrisi



Şekil 5.21. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.10) diyotunun güneş ve infrared ışık altında I-V eğrileri a) Güneş ışığı altında eğrisi b) İnfrared ışık altında eğrisi

Diyotların ters akımı CdO içeriği ile azaldığı ve güneş ışığı altındaki akım değerlerinin infrared ışık altındaki akım değerinden yüksek olduğu şekil 5.18-19-20-21’de görülmektedir. Ters akımdaki azalma, CdO konsantrasyonundaki değişiklikten kaynaklandığı düşünülmektedir [83,84,85].

Fotodiyotların elektriksel özellikleri, I-V karakteristikleri termiyonik emisyon teorisi ile analiz edildi. Bariyer yüksekliği ve idealite faktörü gibi elektronik parametrelerin belirlenmesi için bu teori denklem (5.3)’deki gibi formüle edilebilir [136,137].

$$I=I_o\left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right)-1\right] \quad (5.3)$$

burada n idealite faktörü, q elektronun yükü, k Boltzman sabiti, T mutlak sıcaklık, I_o ters besleme doyma akımı, V uygulanan voltaj ve R_s seri dirençtir. I_o değeri denklem (5.4) ile elde edilir.

$$I_o= AA^*T^2\exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (5.4)$$

Burada A diyot alanını, A* literatürde verilen p-tipi Si yarı iletken için 32 A/cm²K², n-tipi Si yarıiletken için 112 A/ cm²K² olarak bilinen Richardson sabitini ve ϕ_b bariyer yüksekliğini verir. Bariyer yüksekliği denklem (5.5)’deki eşitlik kullanılarak bulunur.

$$\phi_b=kT\ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \quad (5.5)$$

Diyot tabanlı cihazlar için önemli bir parametre olan idealite faktörünü bulmak için denklem (5.6) kullanılır.

$$n=\frac{q}{kT}\left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) \quad (5.6)$$

Üretilen fotodiyotların güneş ve infrared ışık altında ölçülen akım-voltaj grafiklerinden ters besleme doyma akımı, idealite faktörü, engel yüksekliği, fotoduyarlılık

gibi diyot parametreleri hesaplandı Tablo 5.1-5.2’de verildi. Diyotlar için idealite faktörü değerleri, her bir diyotun karanlık durumundaki $\ln I-V$ grafiğinin lineer kısmının eğiminden ve kesim noktasından hesaplandı.

Termiyonik emisyon teorisine göre, ideal bir diyot için idealite faktörü değeri 1’e eşittir. Hesaplanan idealite faktörü değerleri incelendiğinde, hem güneş ışığı altında hemde infrared ışık altında 1’den büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, bariyer yüksekliğinin homojen olmayışı, seri direnç etkisi, yüksek rekombinasyon oluşturma oranı ve arayüz durumları nedeniyle olabilir [138,139]. TiO_2 esaslı diyotlarda Cd katkılmasıyla idealite faktöründe önce artış sonrada azalış gözlenmektedir. Güneş ışığı altında Cu_2NiSnS_4 diyotunun idealite faktörü ile infrared ışık altında Cu_2CoSnS_4 diyotunun idealite faktörü diğer diyotlarınkinden daha düşük bulunmuştur.

Tablo 5.1. Güneş ışığı altındaki $Al/p-Si/Cu_2CoSnS_4/Al$, $Al/p-Si/Cu_2NiSnS_4/Al$, $Al/n-Si/Ti_{1-x}O_2Cd_xO/Al$ diyotlar için elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği, ters besleme doyma akımı ve fotoduyarlılık değerleri.

Fotodiyot	n	$\phi_b(eV)$	$I_0(A)$	$R(A/W)$
Cu_2CoSnS_4	5.31	0.461	3.81×10^{-4}	4.2×10^{-5}
Cu_2NiSnS_4	5.23	0.469	2.29×10^{-4}	4.81×10^{-5}
$Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ (x= 0.0)	7.45	0.478	6.98×10^{-4}	1.03×10^{-3}
$Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ (x=0.01)	7.86	0.499	2.29×10^{-4}	1.36×10^{-4}
$Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ (x=0.05)	5.75	0.505	3.12×10^{-4}	8.89×10^{-5}
$Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ (x=0.10)	7.05	0.504	2.58×10^{-4}	1.39×10^{-3}

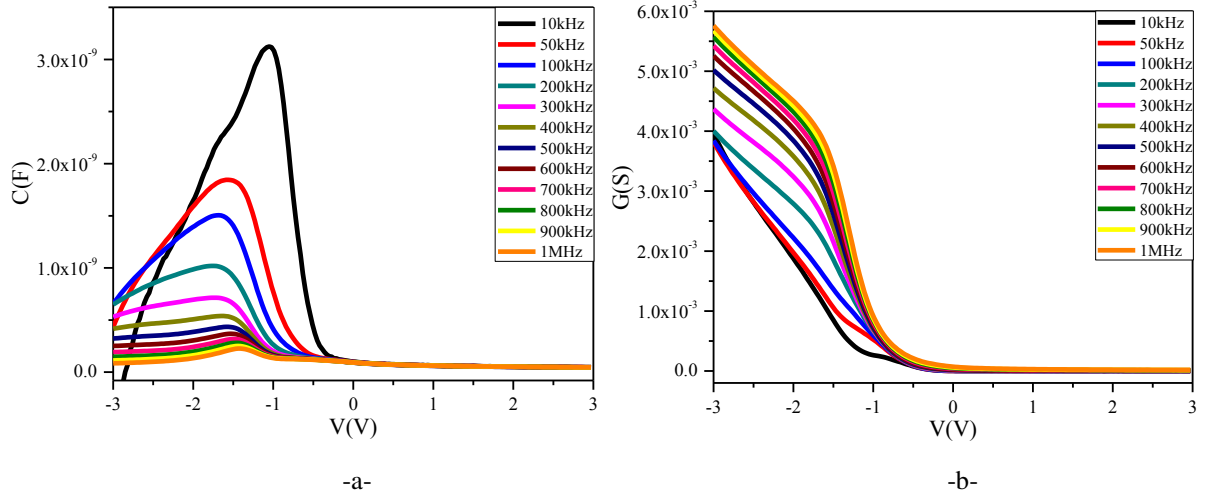
Güneş ve infrared ışık altında Cd katkılı TiO_2 diyotlarının n ve ϕ_b değerlerinde meydana gelen değişimler aynı eğilimi göstermişlerdir. Buda, hazırlanan diyotların bariyer yüksekliği ve idealite faktörünün Cd içeriği ile kontrol edildiğini göstermektedir [109]. A.Mekki ve arkadaşları [93] tarafından daha önce rapor edilen grafen kontrollü fotodedektörler çalışmasında idealite faktörü değerleri ortalama 3.97-9.52, bariyer yüksekliği ortalama 0.48-0.53 eV arasında bulunmuş olup bu tez çalışmasında hesaplanan idealite faktörü ile bariyer yüksekliği değerleriyle paralellik göstermektedir.

Tablo 5.2. infrared ışıık altındaki Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al, Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al, Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al diyotlar için elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği, ters besleme doyma akımı ve fotoduyarlılık değerleri.

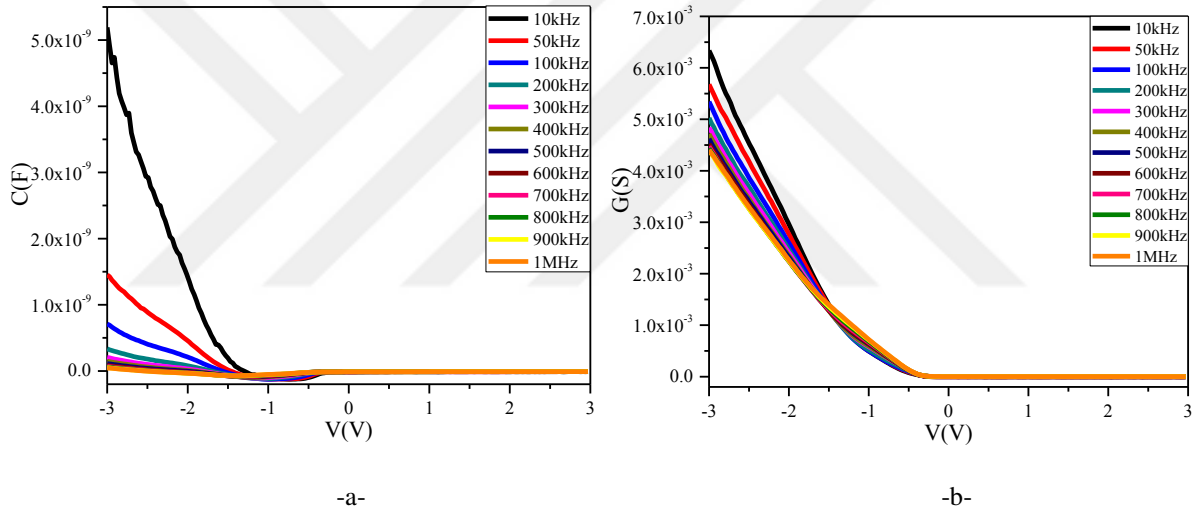
Fotodiyot	n	ϕ_b (eV)	I ₀ (A)	R(A/W)
Cu ₂ CoSnS ₄	3.97	0.475	2.32x10 ⁻⁴	6.2x10 ⁻⁵
Cu ₂ NiSnS ₄	5.16	0.466	3.25x10 ⁻⁴	4.90x10 ⁻⁵
Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O (x= 0.0)	6.40	0.476	7.67x10 ⁻⁴	1.94x10 ⁻⁴
Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O (x=0.01)	5.69	0.506	2.36x10 ⁻⁴	9.29x10 ⁻⁵
Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O (x=0.05)	7.46	0.479	6.68x10 ⁻⁴	1.4x10 ⁻⁴
Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O (x=0.10)	6.63	0.478	6.61x10 ⁻⁴	5.6x10 ⁻⁵

5.4.3. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al Foto diyotların Kapasite-iletkenlik Voltaj Karakteristikleri

Üretilen Cu₂CoSnS₄ ile hazırlanan fotodiyodun C-V ve G-V karakteristikleri şekil 5.22 a ve b’de, Cu₂NiSnS₄ ile hazırlanan fotodiyodun C-V ve G-V karakteristikleri ise şekil 5.23 a ve b’de verilmiştir. Diyotların pozitif voltaj bölgesinde kapasiteleri değişmezken, negatif voltaj bölgesinde kapasiteleri değişmektedir. Diyotların C-V grafiği, ara yüzey durum yoğunluğu, silikon üzerindeki oksit tabaka ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir [108]. C-V eğrileri bir pik gösterip pikin konumu frekans ile değişmekte ve pikin genişliği frekansın azalması ile artmaktadır. C-V grafiklerindeki pikin varlığı seri direncin etkisi ve arayüzey durumların moleküler yapılanması ve diziliminden kaynaklanabilir [109]. Şekil 5.22 ve 5.23`da verilen iletkenlik-voltaj grafiğinde voltaja ve frekansa bağlı olarak iletkenliğin değiştiiği saptanmıştır. Frekansın artmasıyla iletkenliğin arttığı gözlenmiştir.



Şekil 5.22. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri



Şekil 5.23. Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri

Diyotların C-V grafiği, ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir. Bundan dolayı C-V ve G-V eğrileri,

$$C_{adj} = \frac{[G_m^2 + (wC_m)^2]C_m}{a^2 + (wC_m)^2} \quad (5.7)$$

ve

$$G_{adj} = \frac{[G_m^2 + (wC_m)^2]a}{a^2 + (wC_m)^2} \quad (5.8)$$

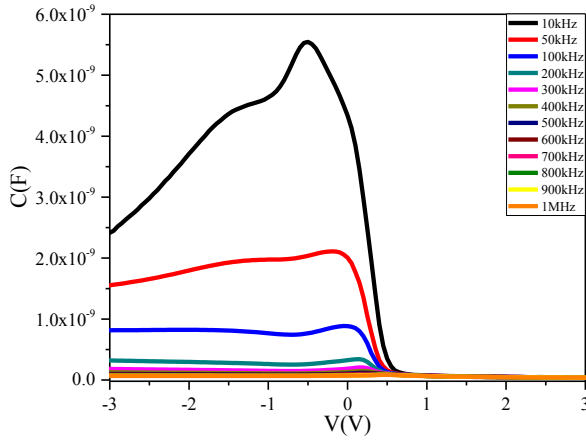
ifadeleri ile yeniden hesaplandı. İfadelerde G_m ve C_m ölçülen iletkenlik ve kapasite değerleri, ω açısal frekans, a ise G_m ve C_m 'ye bağlı bir parametredir [86]. Elde edilen C_{adj} - V ve G_{adj} - V grafikleri şekil 5.28,5.29,5.30,5.31'de verildi.

C_{adj} grafiklerinde oluşan pik değerleri diyotların ara yüzey durum yoğunluğunun olduğunu göstermektedir. Çizilen C-V grafiklerinde, diyotların kapasitesi pozitif voltaj bölgesinde değişmezken negatif voltaj bölgesinde değişmektedir. Bu durum p-Si kullanımından kaynaklanmaktadır [110]. C-V,G-V grafikleri ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösterememektedir. Bu durumu düzeltmek için denklem 5.7-5.8 kullanılarak C_{adj} ve G_{adj} grafikleri çizildi.

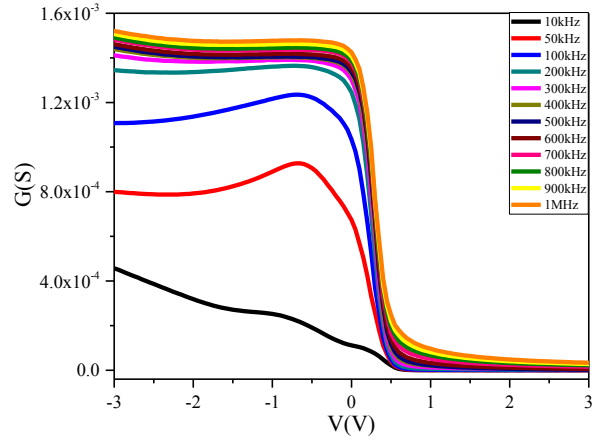
5.4.4. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al Foto diyotların Kapasite-iletkenlik Voltaj Karakteristikleri

Üretilen Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al ($x=0.0,0.01,0.05,0.10$) ile hazırlanan fotodiyotların C-V ve G-V karakteristikleri ise Şekil 5.24-25-26-27'de verilmiştir. Şekil 5.24-5.25-5.26 ve 5.27'de görüldüğü gibi, imal edilmiş tüm cihazlar için fotodiyotun kapasitansı, pozitif voltajdaki frekansla değişmez. Bununla birlikte, kapasitans uygulanan voltaj ve negatif voltajdaki frekans ile değişir. Açıkça görülüyor ki, düşük frekanslarda yapılan C – V ölçümleri yüksek kapasitansa sahip olma eğilimindeyken, diğer yandan, yeterince yüksek frekanslarda, arayüzdeki serbest yükler AC sinyali takip etmemektedir, böylece düşük kapasitansa yol açmaktadır [87,88].

Diyotların iletkenliği, frekans ve voltaja bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Diyotun iletkenliğinin, artan frekanslarla arttığı da görülür. İletkenlikteki gözlenen artış ve frekanstaki artış ile kapasitanstaki azalma, arayüz durumlarının varlığını gösterir [89].

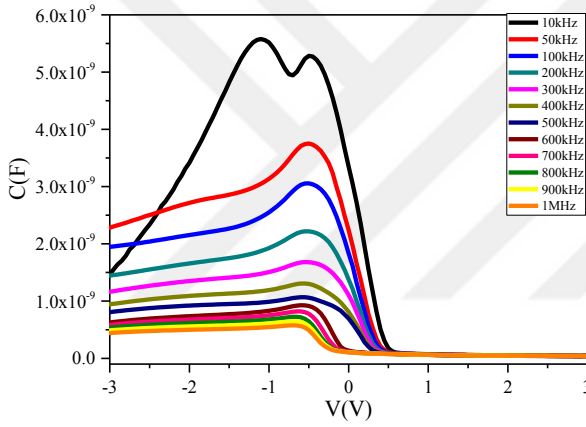


-a-

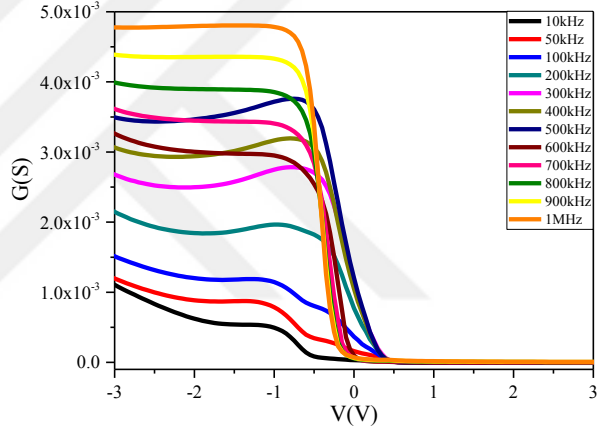


-b-

Şekil 5.24. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.0) diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri

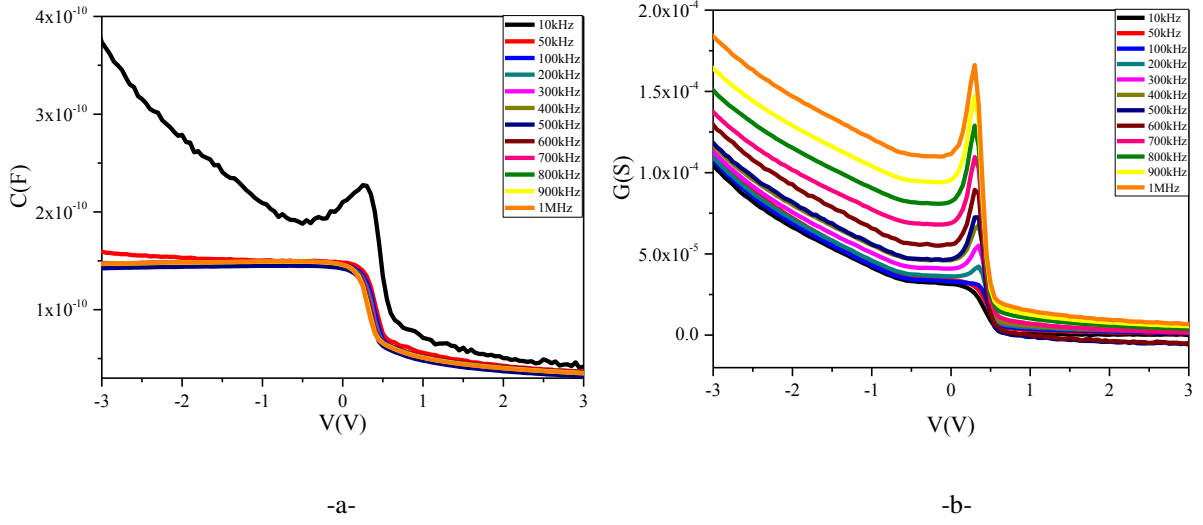


-a-

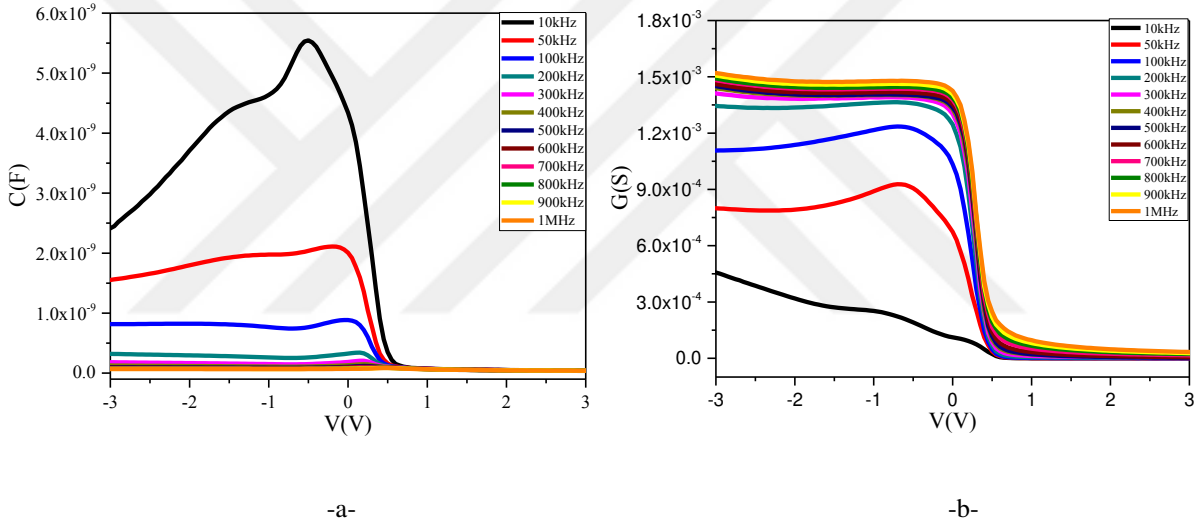


-b-

Şekil 5.25. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.01) diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri



Şekil 5.26. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.05) diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri

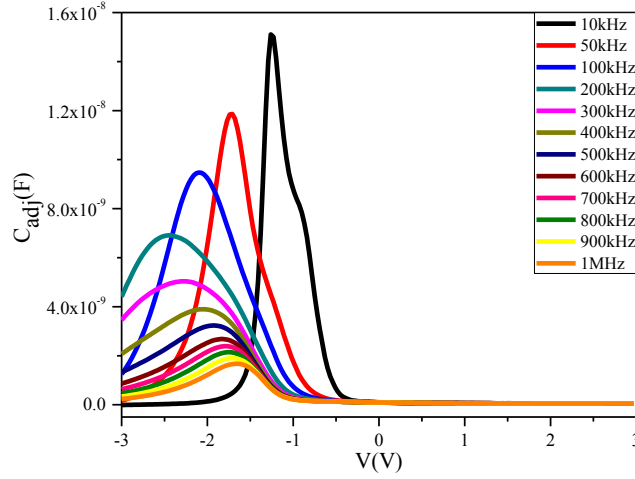


Şekil 5.27. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.10) diyotunun farklı frekanslardaki a) C-V b) G-V eğrileri

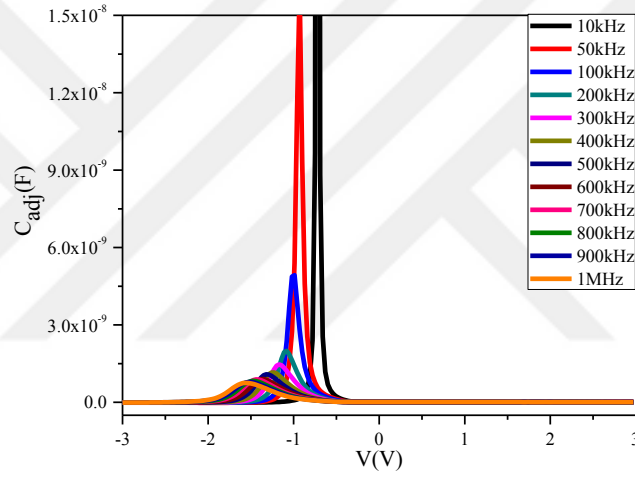
5.4.5. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al Foto diyotlarının Arayüzey

Durum Özellikleri

C_{adj} ve G_{adj} sırasıyla düzeltilmiş kapasitans ve iletkenliktir. $C_{adj}(F)$ -V grafiklerinde kapasitansın frekans ve voltaj'a bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Elde edilen grafiklerden görüldüğü gibi frekansa bağlı olarak düzeltilmiş kapasitansın (C_{adj}) azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.28-5.29'da C_{adj} grafiklerinde bir pik gözlenmiştir. Uygulanan frekans ile pikin pozisyonu kayar. Bunun nedeni seri direnç ve arayüz durum yoğunluğundan kaynaklanıyor olabilir.

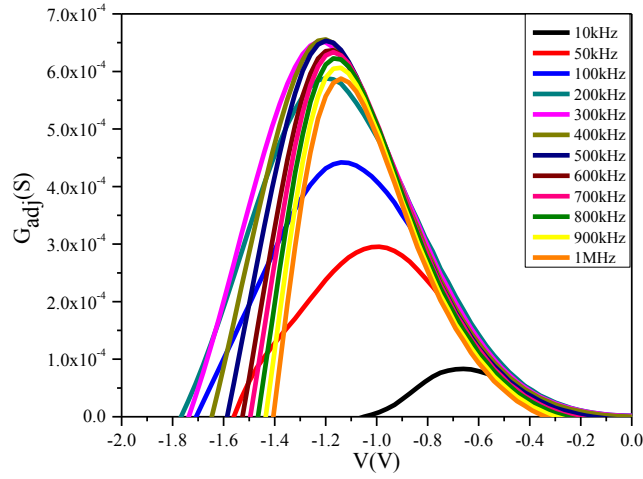


Şekil 5.28. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al diyotunun farklı frekanslardaki C_{adj} -V eğrisi

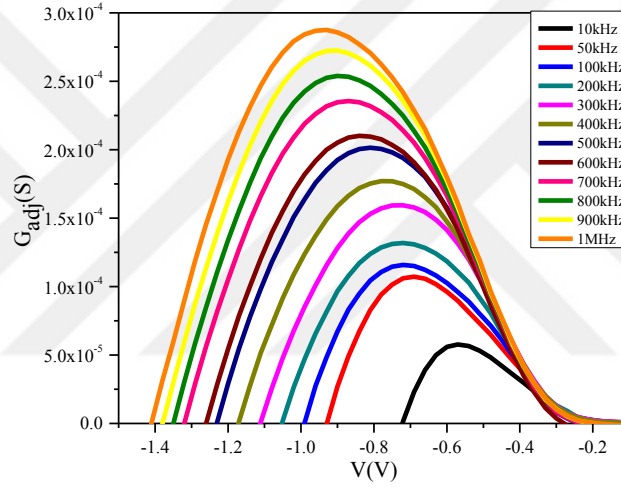


Şekil 5.29. Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al diyotunun farklı frekanslardaki C_{adj} -V eğrisi

$G_{adj}(S)$ -V grafiklerinde iletkenliğin frekans ve voltaj'a bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Elde edilen grafiklerden de görüldüğü üzere frekansa bağlı olarak düzeltilmiş iletkenliğin (G_{adj}) arttığı gözlemlenmiştir. Uygulanan frekansa bağlı olarak pik'in maksimum noktası kayar. Şekil 5.30-5.31'de Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al diyotların farklı frekanslar için çizilen G_{adj} -V grafikleri verilmiştir. Negatif bölgede eğrilerde oluşan pik değerleri diyotun ara yüzey durumlarını göstermektedir.



Şekil 5.30. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al diyotunun farklı frekanslardaki G_{adj} -V eğrisi



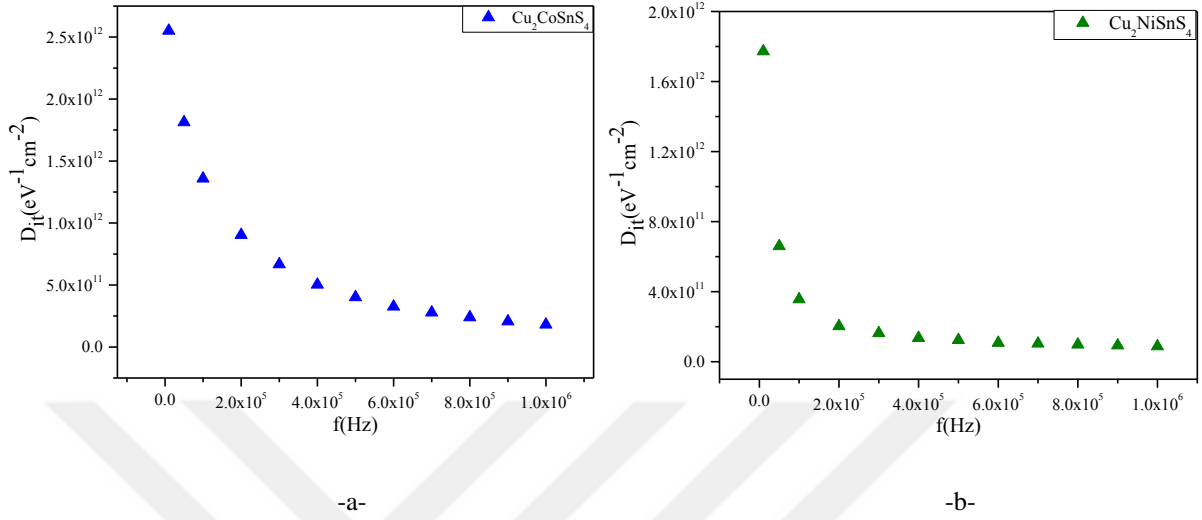
Şekil 5.31. Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al diyotunun farklı frekanslardaki G_{adj} -V eğrisi

Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al diyotların farklı frekanslar için çizilen G_{adj} grafiklerinin negatif bölgesinde oluşan pik değerleri diyotların ara yüzey durum yoğunluğunun olduğunu doğrulamaktadır. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al diyotlar için ara yüzey durum yoğunluğu;

$$D_{it} = \left(\frac{2}{qA} \right) \left[\frac{(G_{max}/w)}{[(G_{max}/wC_{ox})^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2]} \right] \quad (5.9)$$

ifadesi ile hesaplanır. İfadede C_m ölçülen kapasite, (G_{max}/w) ölçülen iletkenlik, C_{ox} oksit tabakanın kapasitesi, A diyotun kontak alanı ve w açısal frekanstır [90-91-92-93]. Şekil 5.32’de Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al diyotların D_{it} grafikleri verilmiştir. Cu₂CoSnS₄ ve Cu₂NiSnS₄ diyotların D_{it} grafikleri G_{adj} verileri kullanılarak

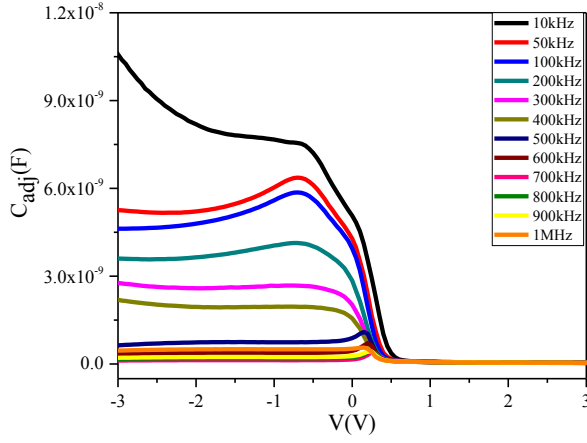
izildi. Grafiklerde de görüldüğü gibi D_{it} değerleri frekansa bağlı olarak değişmektedir. Artan frekans değeri D_{it} değerlerini azaltmaktadır.



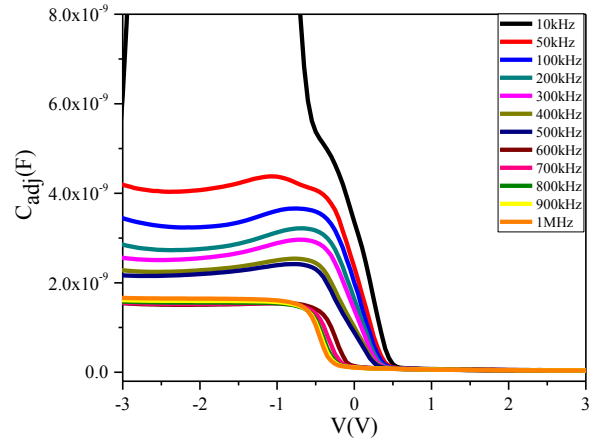
şekil 5.32. a) Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ /Al diyot b) Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ /Al diyotların D_{it} eğrileri

5.4.6. Al/n-Si/ $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ /Al Foto diyotlarının Arayüzey Durum zellikleri

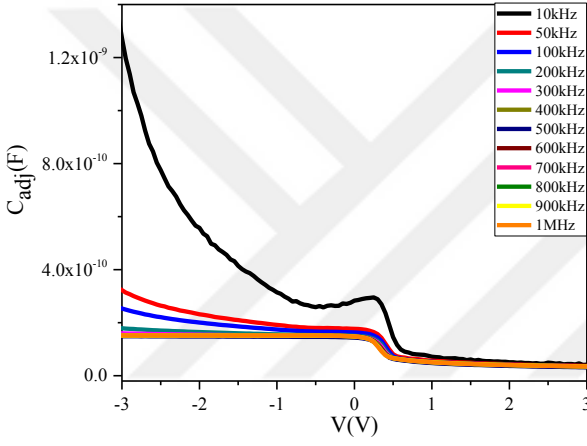
Al/n-Si/ $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ /Al ($x=0.0, 0.01, 0.05, 0.10$) diyotlarının farklı frekanslardaki C_{adj} -V ve G_{adj} -V eğrileri şekil 5.33-34'de verilmiştir. Frekansın C_{adj} -V ve G_{adj} -V grafikleri üzerindeki etkileri sırasıyla şekil 5.33 ve 34'de gösterilmektedir. C_{adj} ve G_{adj} piklerinin artan frekansla azaldığı gözlenmiştir. G_{adj} -V grafiklerinde negatif bölgede eğrilerde oluşan pik değerleri diyotun ara yüzey durumlarını göstermektedir.



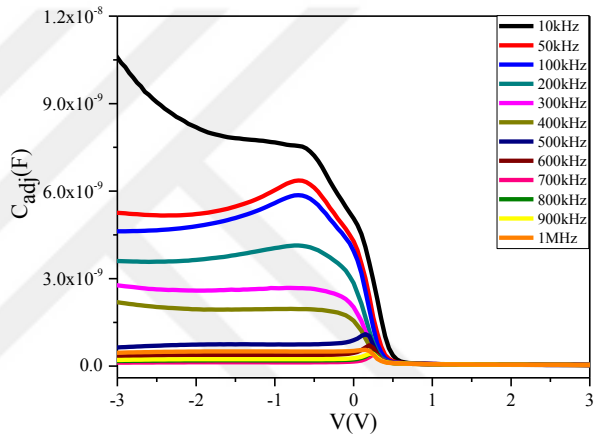
-a-



-b-

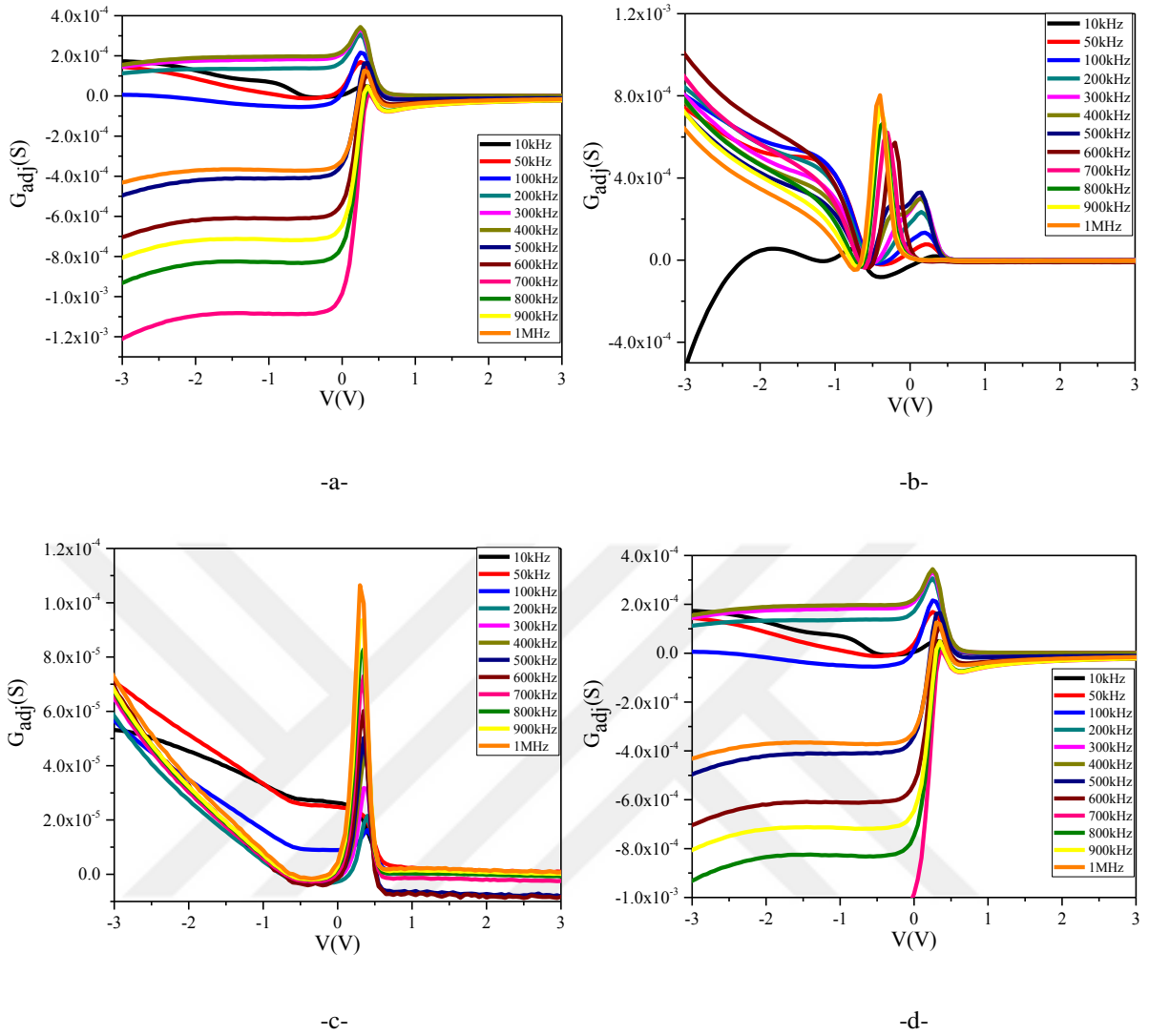


-c-



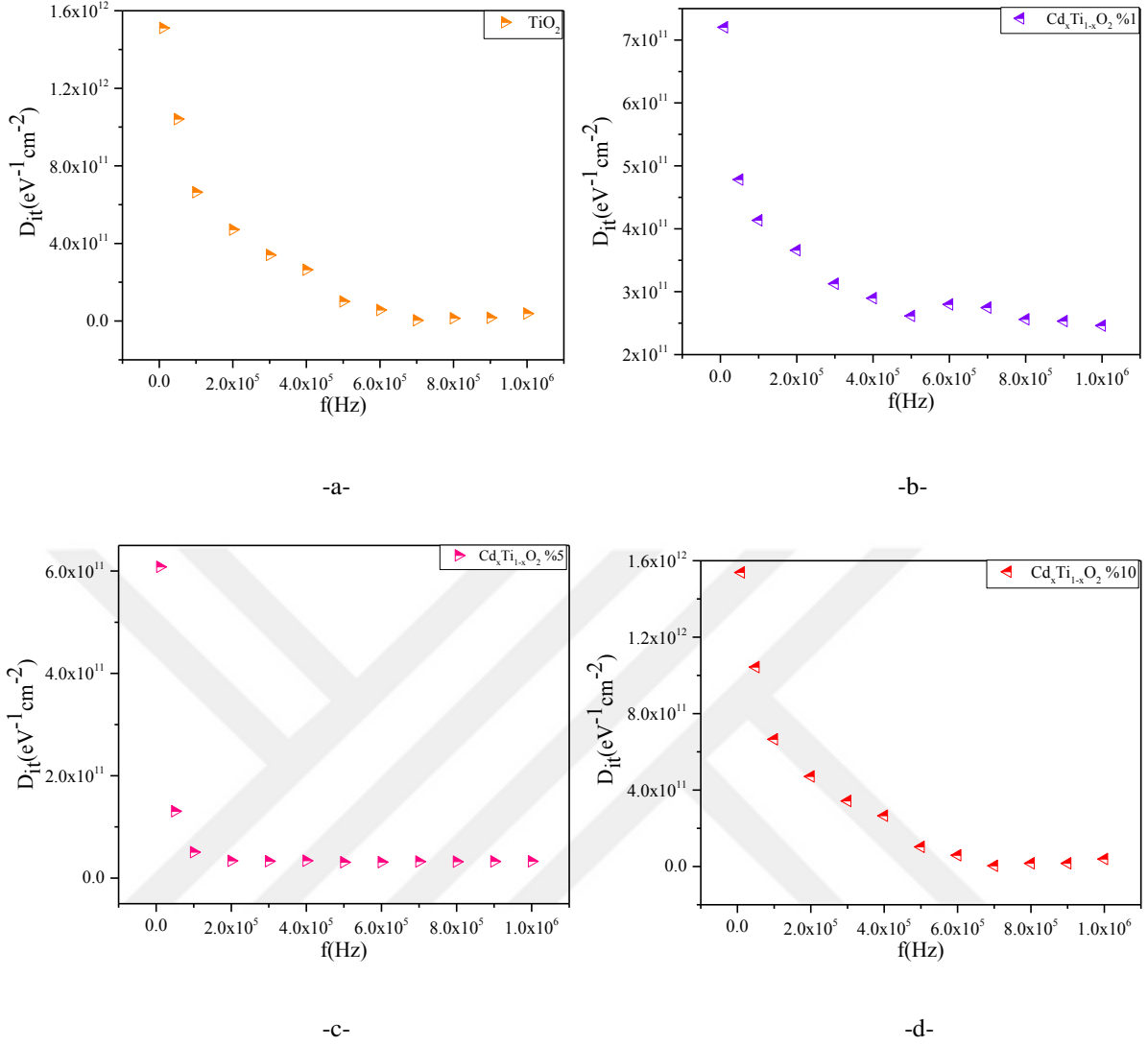
-d-

Şekil 5.33. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al diyotunun farklı frekanslardaki C_{adj}-V eğrileri a) x=0.0 b) x=0.01 c) x=0.05 d) x=0.10



Şekil 5.34. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al diyotunun farklı frekanslardaki G_{adj} -V eğrileri a) $x=0.0$ b) $x=0.01$ c) $x=0.05$ d) $x=0.10$

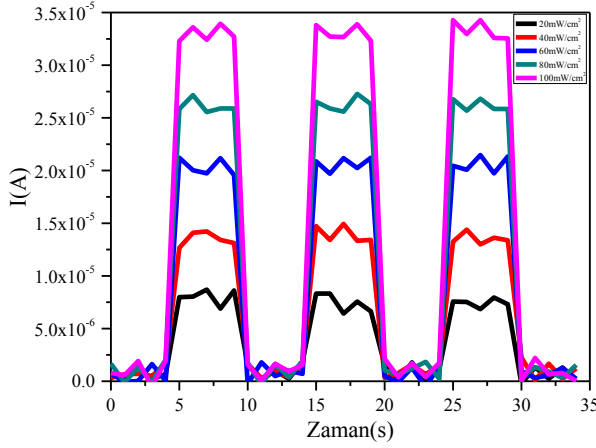
Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al ($x=0.0, 0.01, 0.05, 0.10$) diyotlarının D_{it} grafikleri şekil 5.35’de verilmiştir. D_{it} grafikleri Ti_{1-x}O₂Cd_xO diyotların G_{adj} verileri kullanılarak çizildi. Şekil 5.35’de görüldüğü gibi, D_{it} değeri artan frekansla azalır ve bir sabite ulaşır. Yüksek D_{it} değerleri, diyotların I-V ve C-V özelliklerinin ideal olmayan davranışlarından kaynaklıdır ve düşük frekanslarda arayüzey yoğunluğunun frekansa bağlı olduğunu belirtir [93]. Ayrıca, arayüzey durumlarının varlığı ideal olmayan diyot karakteristikleri için önemli bir nedendir [111]. A.Karabulut ve arkadaşları [132] tarafından daha önce rapor edilen Ru esaslı fotodedektör çalışmasında D_{it} değeri $1,0 \cdot 10^{12}$ ’den itibaren frekansın artması ile azalışa geçmiştir.



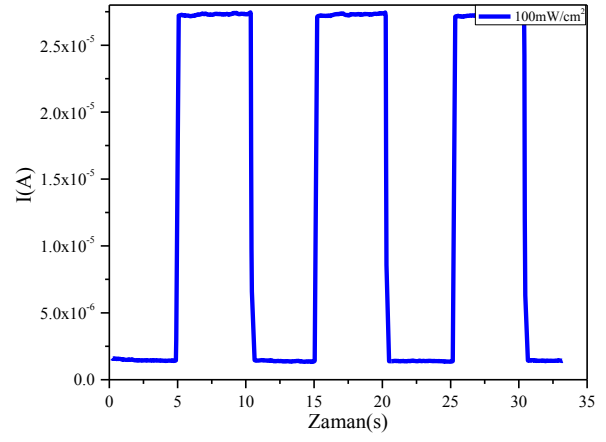
Şekil 5.35. Al/n-Si/ $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ /Al diyotlarının D_{it} eğrileri a) $x=0.0$ b) $x=0.01$ c) $x=0.05$ d) $x=0.10$

5.4.7. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ /Al ve Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ /Al Foto Diyotlarının Foto Akım-Zaman Karakteristikleri

Şekil 5.36 a ve b’de Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ /Al foto diyotunun Şekil 5.37 a ve b’de Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ /Al fotodiyotunun farklı aydınlatma altında ve 100 mW/cm^2 infrared ışık altında I-t grafikleri verilmektedir. I-t grafikleri ışık yoğunluğunun hazırlanan cihaz iletkenliği üzerindeki etkisini gösterir. Fotodiyodun akımının ışık olayından geçtiği ve ışığın ilk değerine ulaşana kadar sabit kalacağı görülebilir. Bu, bant boşluğu içinde lokalize hallerde tutulan yük taşıyıcılarının varlığına bağlıdır [93]. Kapanmış yük taşıyıcıları, aydınlatma gücü yoğunluğunu artırarak optik boşluğun üstesinden gelmektedir. Şekil 5.36 a ve Şekil 5.37 a’da görüldüğü gibi akım artan ışık şiddeti ile artmaktadır [112,113].



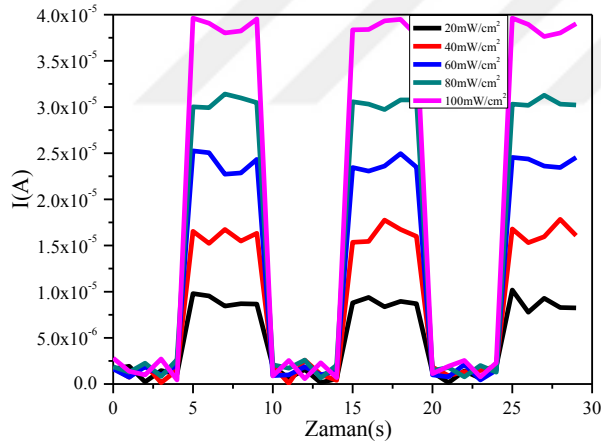
-a-



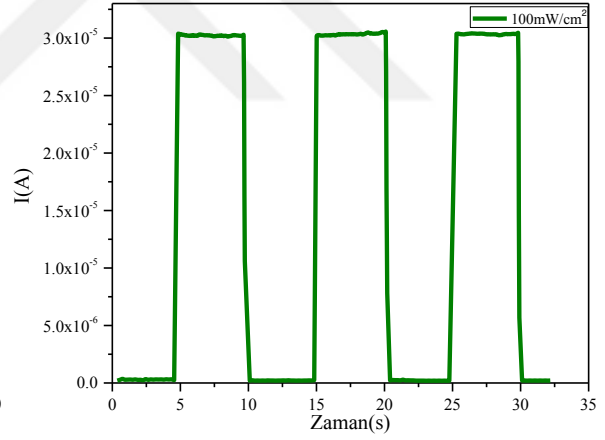
-b-

Şekil 5.36. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)İnfrared ışık altında I-t eğrileri.

Cu₂CoSnS₄ fotodiyotunun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki $I_{açma}/I_{kapama}$; Güneş ışığı altında 14.7, infrared ışık altında 17.6 olarak bulunmuştur.



-a-



-b-

Şekil 5.37. Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)infrared ışık altında I_{ph} -t eğrileri.

Cu₂NiSnS₄ fotodiyotunun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki $I_{açma}/I_{kapama}$; Güneş ışığı altında 13.8, infrared ışık altında 26.1 olarak bulunmuştur.

Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al foto diyotların geçici fotoakım ölçümleri Şekil 5.36-5.37'de gösterilmiştir. Geçici fotoakım herhangi bir fotodiyotun iletim mekanizmasını incelemek için bilinen iyi tekniktir. Şekillerde de görüldüğü gibi 5'er

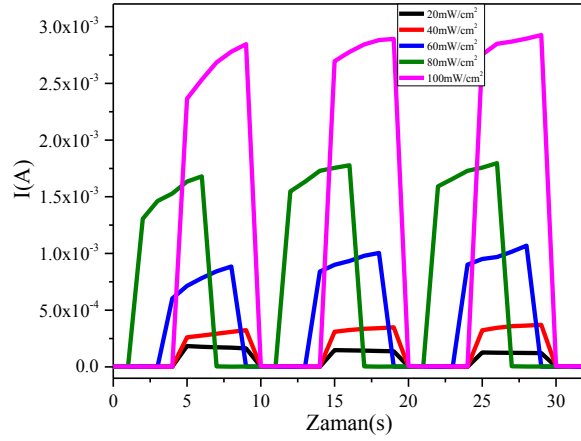
sn aralıklarla açma/kapama yapılan diyotun, fotoakımı aydınlatma altında artar ve sabit bir değere ulaşır. Işık ilk kapatıldığı andan itibaren ise azalır, akım ilk değerine ulaşır.

I_{ph} -t grafiklerinden yararlanılarak, 100 mW/cm^2 lik aydınlatma altında diyotların fotoduyarlılığı (R) denklem (3.2) yardımıyla hesaplandı. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al foto diyotların fotoduyarlılığı şekil 5.44-5.45’de verilmiştir.

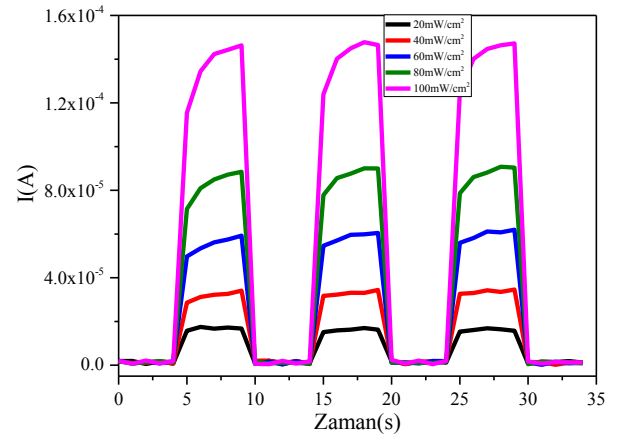
5.4.8. Al/n-Si/ Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al Foto Diyotlarının Foto Akım- Zaman Karakteristikleri

Şekil 5.38’de Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.0,0.01,0.05,0.10) foto diyotların farklı aydınlatma altında I-t grafikleri ve şekil 5.39’da 100 mW/cm^2 infrared ışık altında I-t grafikleri verilmektedir. Ti_{1-x}O₂Cd_xO diyotların geçici fotoakım ölçümleri, çeşitli aydınlatma yoğunlukları altında gerçekleştirildi.

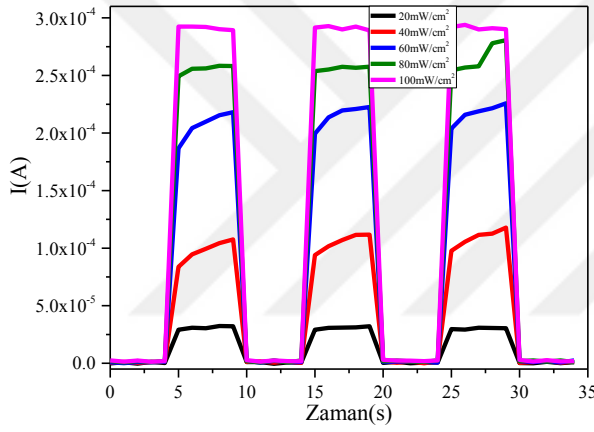
Şekil 5.38’de görüldüğü gibi, diyotlar, ışık aydınlatması açıldığında ve kapatıldığında, yüksek ve düşük iletkenlik arasında geri dönüşümlü bir geçiş göstermektedir. Aydınlatma açıldığında, fotoakım başlangıçta belirli bir seviyeye kadar hızla artar. Bu artış, akıma katkıda bulunan serbest yük taşıyıcıların sayısındaki artıştan kaynaklanabilir. Aydınlatma kapatıldıktan sonra fotoakımın bozulması, yük taşıyıcılarının alt seviyelerde tutulması ile açıklanır. Buda, diyotların bir foto iletken davranış sergilediğini göstermektedir [94,95]. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.0,0.01,0.05,0.10) fotodiyotlarının 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altındaki $I_{açma}/I_{kapama}$; Güneş ışığı altında sırasıyla 123.6-79.7-147.6 ve 594 olarak bulunmuştur. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al diyotların $I_{açma}/I_{kapama}$ degerleri diyotların optik duyarlılıklarının yüksek olduğunu göstermektedir.



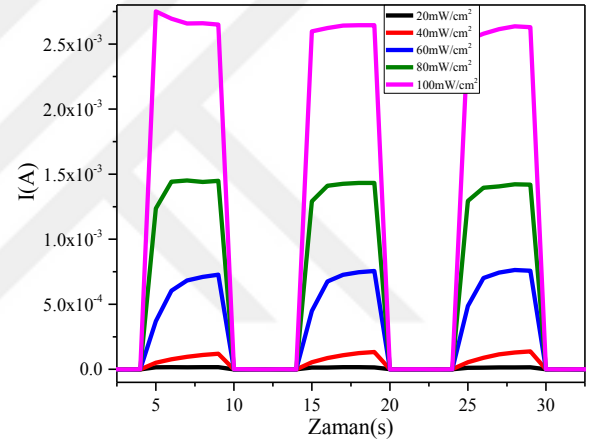
-a-



-b-



-c-

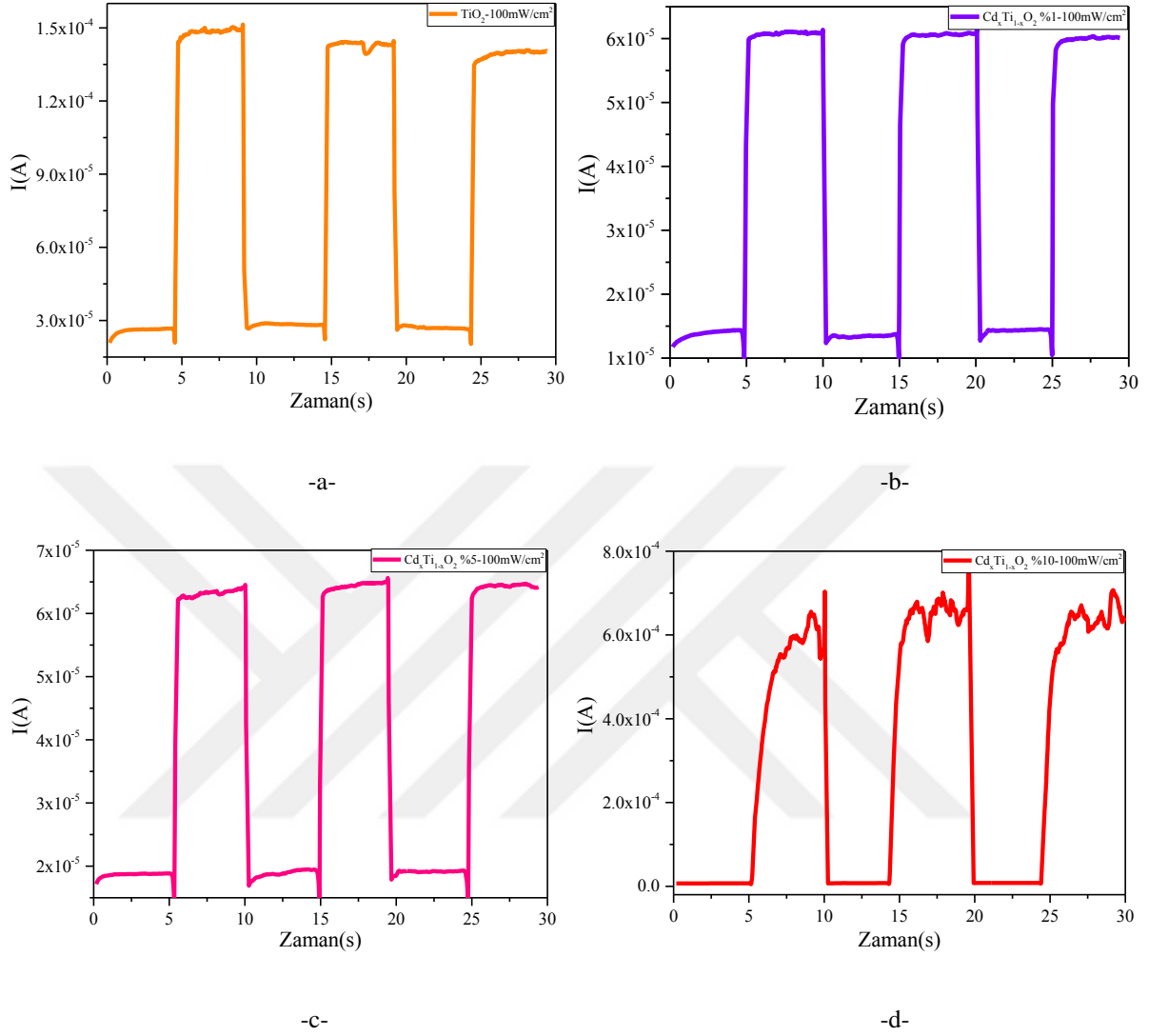


-d-

Şekil 5.38. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al foto diyotunun güneş ışığı altında I_{ph}-t eğrileri a) x=0.0 b) x=0.01 c) x=0.05 d) x=0.10.

Şekil 5.39’da 100 mW/cm² infrared aydınlatma yoğunluğunda Ti_{1-x}O₂Cd_xO diyotların geçici fotoakım ölçümleri verilmiştir. %1,%5,%10 oranlarında katkılanan CdO, kompozitin taşıyıcı konsantrasyonunu değiştirdiği için oran arttıkça geçici fotoakım değerinde artış olduğu görülmektedir.

Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.0,0.01,0.05,0.10) fotodiyotlarının 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki I_{açma}/ I_{kapama}; infrared ışık altında sırasıyla 5.6-4.2-3.4 ve 87 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.39. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al foto diyotunun 100mW/cm²’lik infrared ışığı altında I_{ph}-t eğrileri a) x=0.0 b) x=0.01 c) x=0.05 d) x=0.10.

5.4.9. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al Foto Diyotlarının Foto Akım - İletim Mekanizması

Heteroeklem diyotun foto duyarlılığını belirlemek amacıyla fotoakım, ışık şiddetinin bir fonksiyonu olarak şekil 5.40-5.41’de gösterilmektedir. Işık yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak fotoakım değerleri aşağıdaki ilişkiyle verilir [96,114,115].

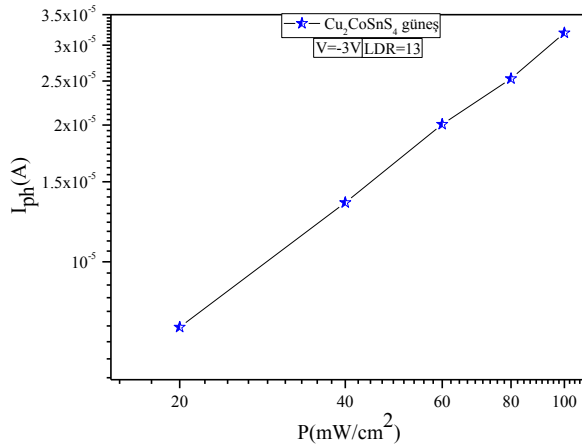
$$I_{PH} = KP^m \quad (5.10)$$

Burada P, gelen ışığın şiddeti ve m bir sabittir. Işık şiddetinin artışıyla fotoakım değerinin düzenli bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Aydınlatma şiddeti ile fotoakımın doğrusal uyumunu göstermektedir. Işık yoğunluğu fotoakımı artırır [81].

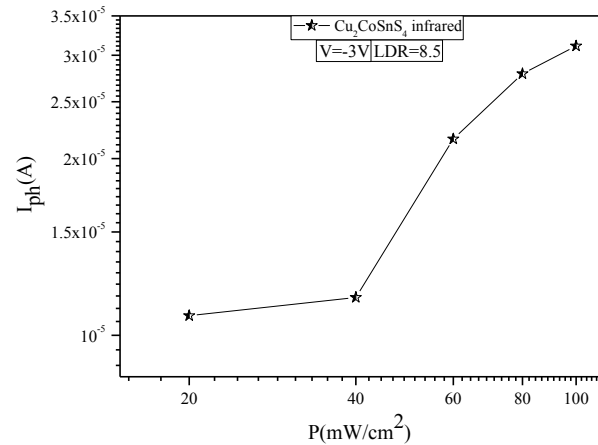
Şekil 5.40'da güneş ışığı ve infrared ışık altında $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ cihazının, 100 mW/cm^2 aydınlatma gücü yoğunluğu için fotoakım değerleri sırasıyla $3,18 \cdot 10^{-5} \text{ A}$ ve $3,12 \cdot 10^{-5} \text{ A}$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.41'de güneş ışığı ve infrared ışık altında $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ cihazının, 100 mW/cm^2 aydınlatma gücü yoğunluğu için fotoakım değerleri sırasıyla $3,8 \cdot 10^{-5} \text{ A}$ ve $3,7 \cdot 10^{-5} \text{ A}$ olarak hesaplanmıştır. Bu fotodiyotların optoelektronik cihaz uygulamalarında kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Güneş ışığı altında alınan ölçümle çizilen $I_{\text{ph}}\text{-P}$ grafiğinin lineer olan kısmı $20\text{-}100 \text{ mW/cm}^2$ aralığı, infrared ışık altında lineer olan $40\text{-}100 \text{ mW/cm}^2$ aralığından faydalanıp doğrusal dinamik aralığı hesaplandı ve tablo 5.1 de verildi.

Tablo 5.3. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ fotodiyotların LDR değerleri.

Fotodiyot	Güneş ışığı	Infrared ışık
$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ (LDR)	13dB	8.5dB
$\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ (LDR)	12.9dB	11.2dB

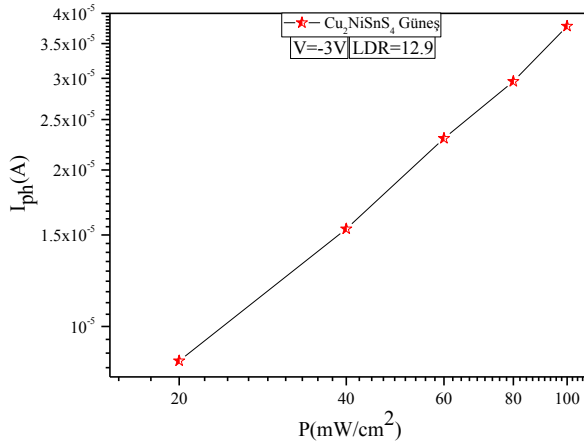


-a-

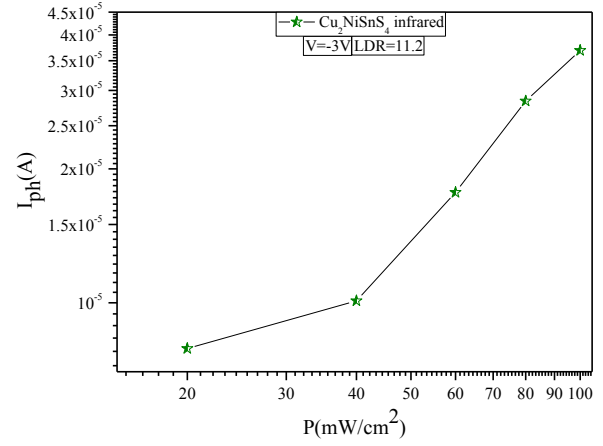


-b-

Şekil 5.40. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ /Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)Infrared ışık altında $I_{\text{ph}}\text{-P}$ eğrileri.



-a-



-b-

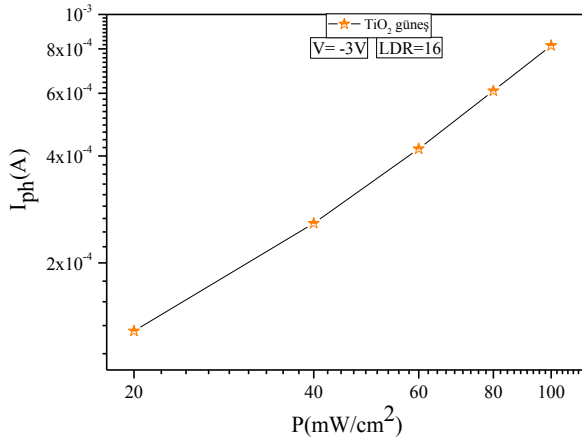
Şekil 5.41. Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)Infrared ışık altında I_{ph}-P eğrileri.

5.4.10. Al/n-Si/ Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al Foto Diyotlarının Foto Akım -İletim Mekanizması

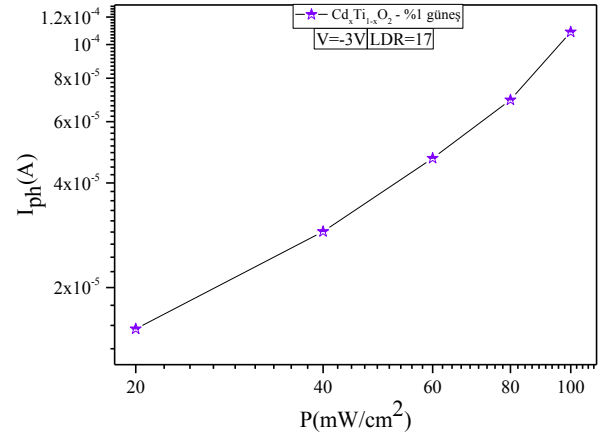
Şekil 5.42’de Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.0,0.01,0.05,0.10) foto diyotların farklı aydınlatma altında I_{ph}-P grafikleri ve şekil 5.43’de infrared ışık altında I_{ph}-P grafikleri verilmektedir. Işık şiddetinin artışıyla fotoakım değerinin arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 5.42,5.43 aydınlatma yoğunluğuna sahip olan foto-akımın doğrusal uyumunu göstermektedir. Güneş ve infrared ışık altında alınan ölçümle çizilen I_{ph}-P grafiğinin lineer olan kısmı 20-100mW/cm² aralığından faydalanıp doğrusal dinamik aralığı hesaplandı ve tablo 5.2’de verildi.

Tablo 5.4. Ti_{1-x}O₂Cd_xO fotodiyotların LDR değerleri.

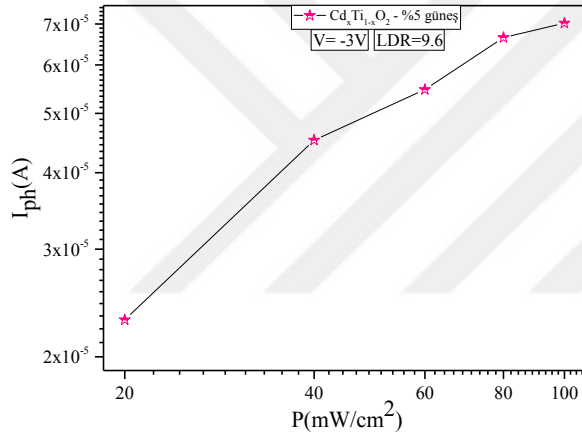
Fotodiyot	Güneş ışığı	Infrared ışık
Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O(x=0.0)(LDR)	16dB	11.6dB
Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O(x=0.01)(LDR)	17dB	9.5dB
Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O(x=0.05)(LDR)	9.6dB	6.2dB
Ti _{1-x} O ₂ Cd _x O(x=0.10)(LDR)	34dB	9.8dB



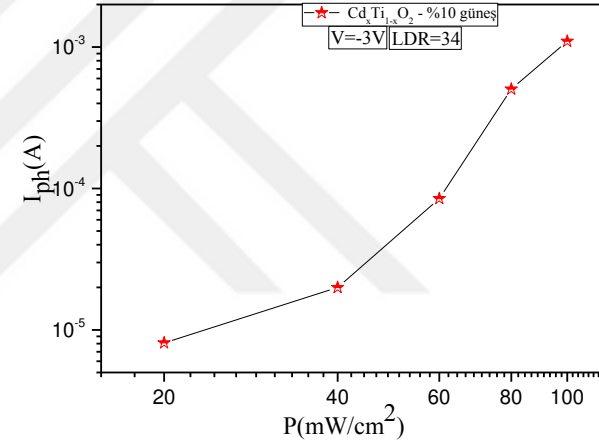
-a-



-b-



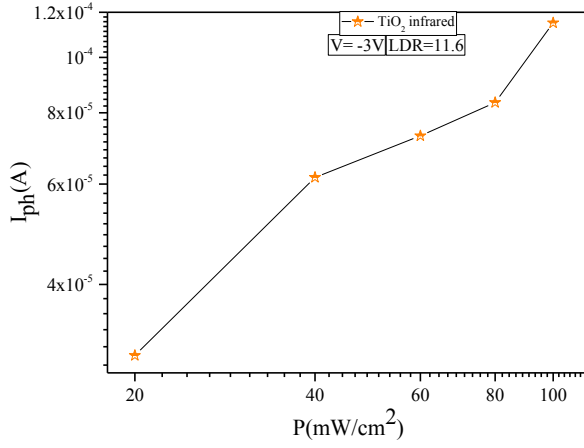
-c-



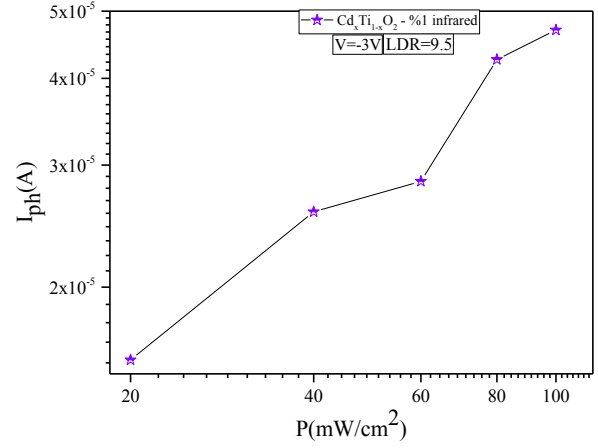
-d-

Şekil 5.42. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al foto diyotunun güneş ışığı altında I_{ph}-P eğrileri a) x=0.0 b) x=0.01 c) x=0.05 d) x=0.10.

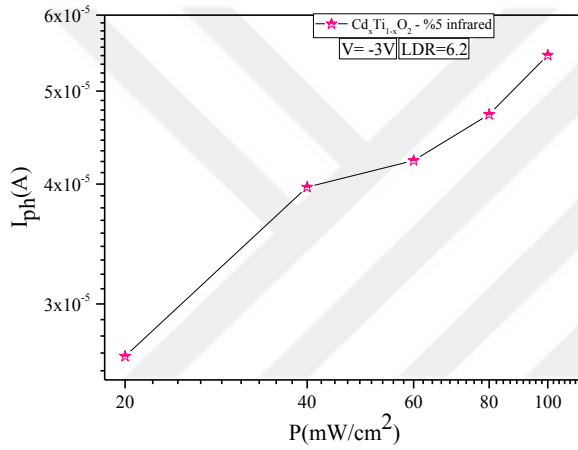
Şekil 5.42’de güneş ışığı altında Ti_{1-x}O₂Cd_xO (x=0.0,0.01,0.05,0.10) cihazlarının, 100 mW/cm² aydınlatma gücü yoğunluğu için fotoakım değerleri sırasıyla 8,10.10⁻⁴A-1,08.10⁻⁴A-7,01.10⁻⁵A ve 1,1.10⁻³ A olarak hesaplanmıştır.



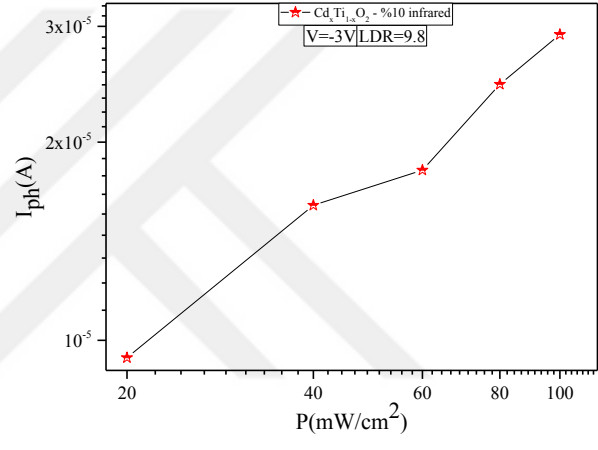
-a-



-b-



-c-



-d-

Şekil 5.43. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al foto diyotunun infrared ışığı altında I_{ph} -P eğrileri a) x=0.0 b) x=0.01 c) x=0.05 d) x=0.10.

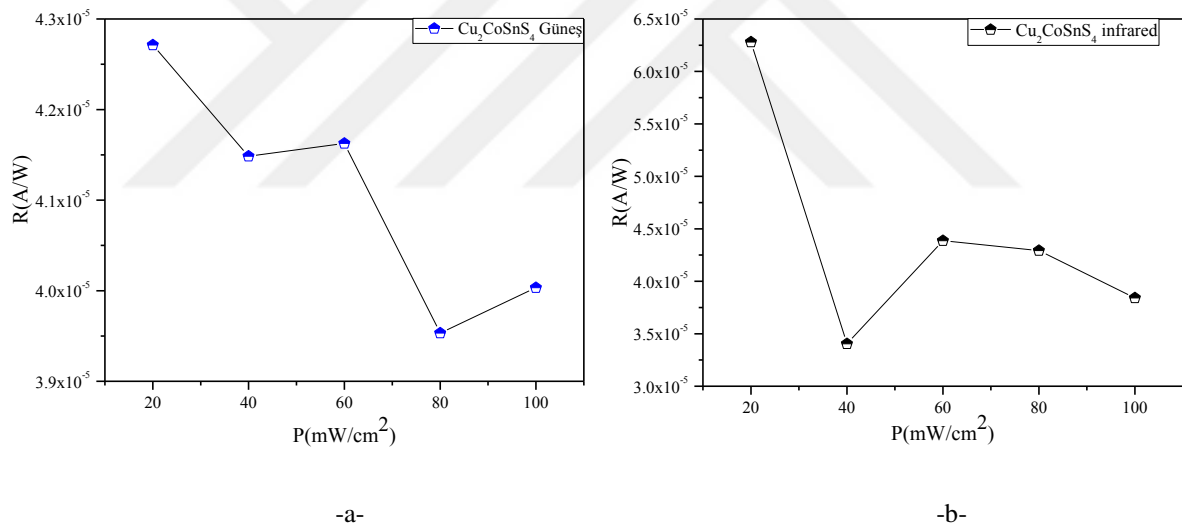
Şekil 5.43’de infrared ışık altında Ti_{1-x}O₂Cd_xO (x=0.0,0.01,0.05,0.10) cihazlarının, 100 mW/cm² aydınlatma gücü yoğunluğu için fotoakım değerleri sırasıyla $1,15 \cdot 10^{-4}$ A- $4,7 \cdot 10^{-5}$ A- $5,45 \cdot 10^{-5}$ A ve $2,91 \cdot 10^{-5}$ A olarak hesaplanmıştır. Güneş ve infrared ışık altında ışık şiddetinin artışıyla fotoakım değerinin en çok arttığı cihaz %10 Cd katkılı TiO₂ olduğu gözlemlenmektedir.

5.4.11. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al Diyotlarının Foto Duyarlılık - İletim Mekanizması

I_{ph} -t grafiklerinden yararlanılarak Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al foto diyotların fotoduyarlılığı (R) denklem 5.11 kullanılarak analiz edildi, hesaplandı [97,98] ve şekil 5.44-5.45’de verildi.

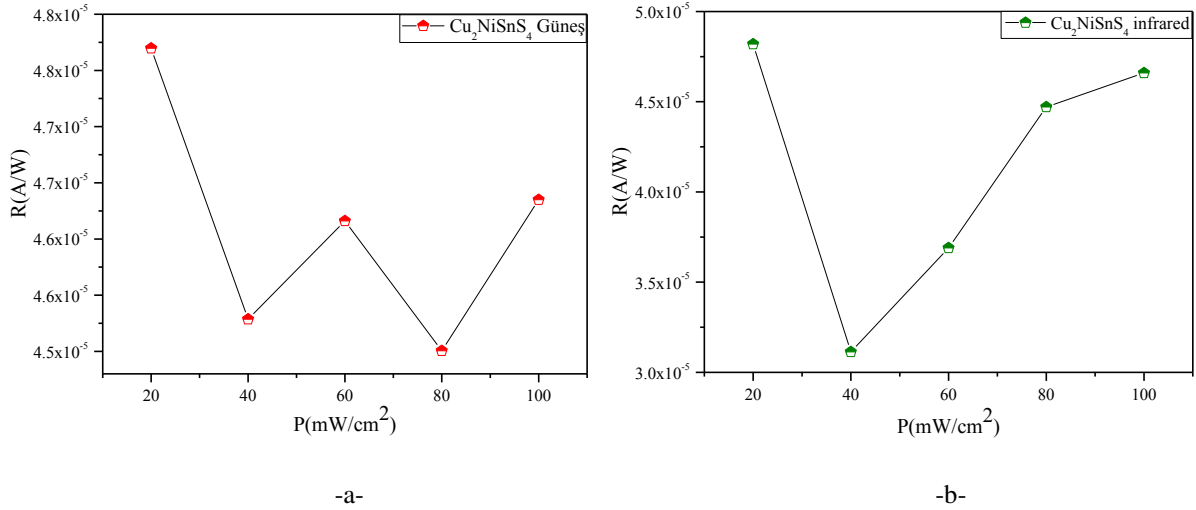
$$R = \frac{(I_p - I_d)}{PA} \quad (5.11)$$

Burada I_p , I_d , P ve A sırasıyla fotoakım, karanlık akım, güç ve alandır. Fotoduyarlılık, foto akıntı ve aydınlatma şiddeti arasındaki orandır. Cu₂CoSnS₄ cihazının güneş ışığı ve infrared ışık altında maximum duyarlılık değerleri 20 mW/cm² ışık yoğunluğunda sırasıyla 4,2.10⁻⁵-6,2.10⁻⁵ A/W olarak bulunmuştur.



Şekil 5.44. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al foto diyotunun a)Güneş ışığı b)Infrared ışık altında R-P eğrileri.

Cu₂NiSnS₄ cihazının güneş ışığı ve infrared ışık altında maximum duyarlılık değerleri 20mW/cm² ışık yoğunluğunda sırasıyla 4,81.10⁻⁵-4,90.10⁻⁵ A/W olarak bulunmuştur. Şekil 5.44-45’de görüldüğü gibi infrared ışık ile aydınlatılan cihazlar güneş ışığı ile aydınlatılan cihazlardan daha yüksek bir duyarlılığa sahiptir.

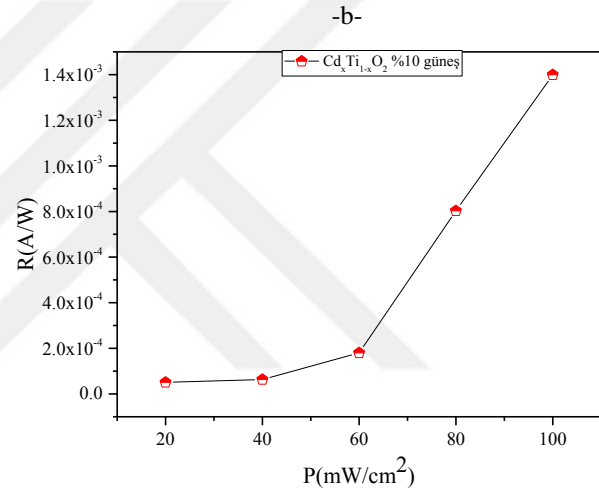
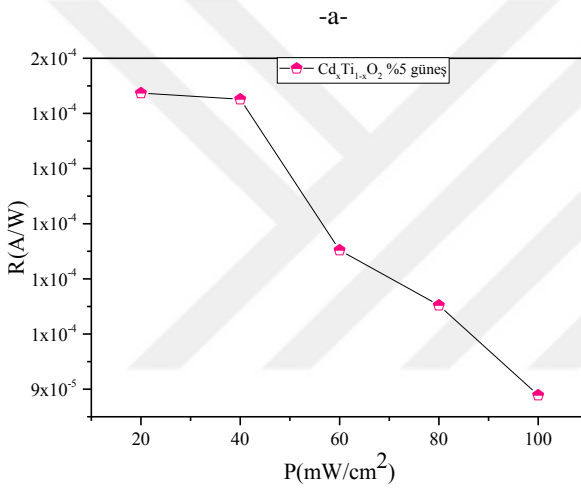
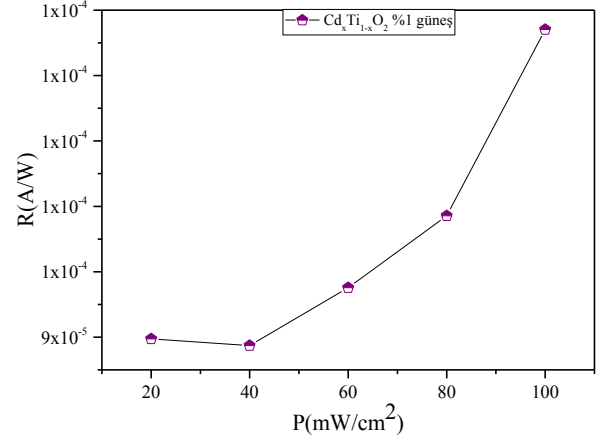
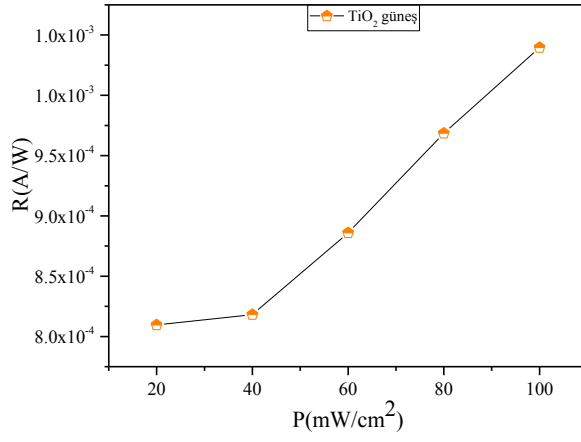


Şekil 5.45. Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al foto diyotunun a) Güneş ışığı b) Infrared ışık altında R-P eğrileri.

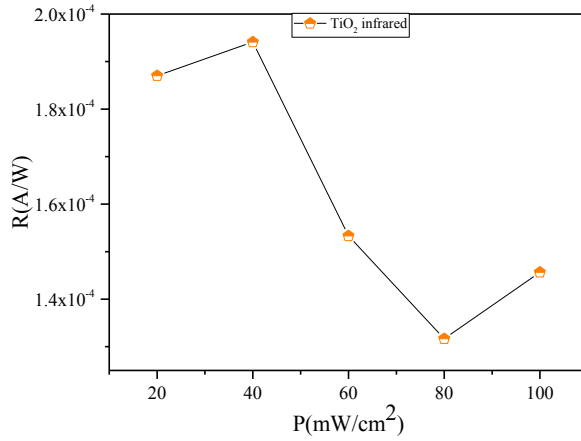
5.4.12. Al/n-Si/ Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al Foto Diyotlarının Foto Duyarlılık İletim Mekanizması

I_{ph} -t grafiklerinden yararlanılarak Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al ($x=0.0, 0.01, 0.05, 0.10$) foto diyotların farklı aydınlatma altında ve infrared ışık altında fotoduyarlılığı (R) hesaplanıp şekil 5.46-5.47'de verildi.

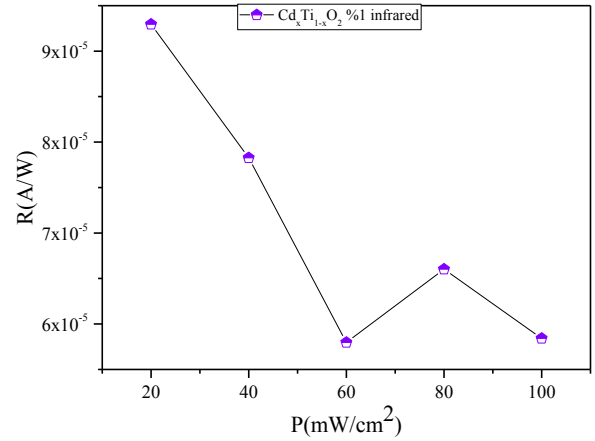
Şekil 5.46'da Ti_{1-x}O₂Cd_xO ($x=0.0, 0.01, 0.05, 0.10$) cihazları, 100 mW/cm² aydınlatma gücü yoğunluğu için sırasıyla $1,03 \cdot 10^{-3}$ - $1,36 \cdot 10^{-4}$ - $8,89 \cdot 10^{-5}$ - $1,39 \cdot 10^{-3}$ A/W'lık bir fotoduyarlılık sergiler. %10 Cd katkılı TiO₂ cihazı güneş ışığı altında en yüksek fotoduyarlılık değerine sahiptir. Sarkar ve arkadaşları [140], indiyum katkılı TiO₂ heteroeklem fotodiyotun duyarlılık değerlerini $17,2 - 2,5 \cdot 10^{-6}$ A/W aralığında bulmuşlardır.



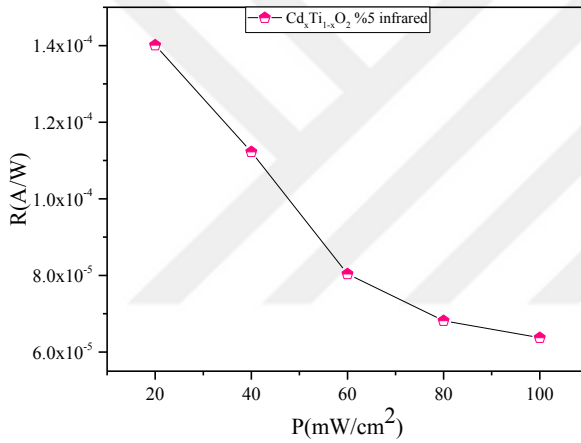
Şekil 5.46. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al foto diyotunun güneş ışığı altında R-P eğrileri a) x=0.0 b) x=0.01 c) x=0.05 d) x=0.10.



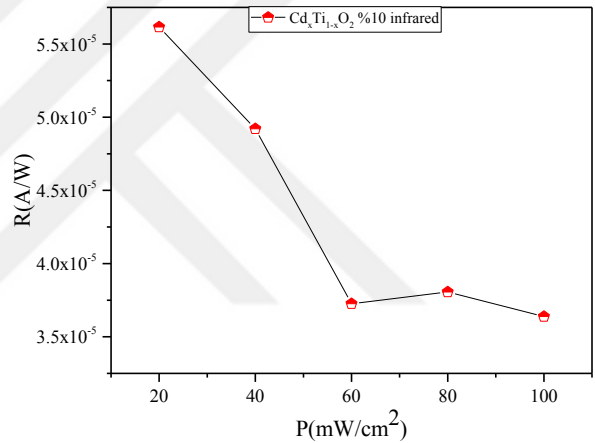
-a-



-b-



-c-



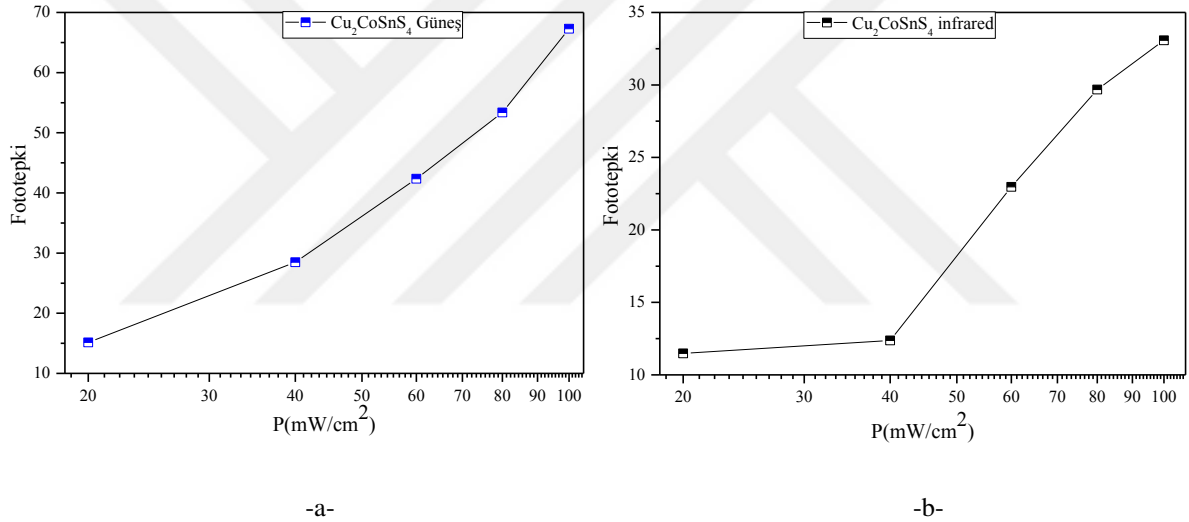
-d-

Şekil 5.47. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al foto diyotunun infrared ışığı altında R-P eğrileri a) x=0.0 b) x=0.01 c) x=0.05 d) x=0.10.

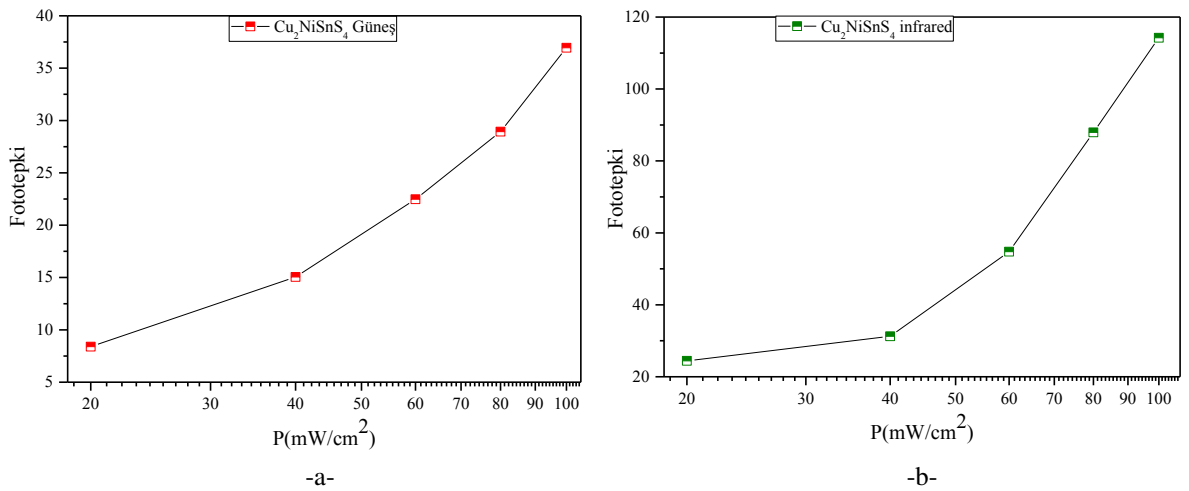
Şekil 5.47’de gelen ışığın gücü 20 mW/cm²’den 100 mW/cm²’ye yükseldikçe cihazın duyarlılığı üssel olarak azalır. Üretilen tüm cihazlar için, ters eğilim voltajı arttıkça, duyarlılık değerlerinde hafif bir artış vardır. Her ne kadar fotoduyarlılık, ticari fotovoltaik cihazlarınkiyle karşılaştırılabilir bir değer olmasa da, iyileştirilebilir [99,100]. Ti_{1-x}O₂Cd_xO (x=0.0,0.01,0.05,0.10) cihazları, 20 mW/cm² aydınlatma gücü yoğunluğu altında sırasıyla 1,94.10⁻⁴-9,29.10⁻⁵-1,4.10⁻⁴-5,6.10⁻⁵ A/W’lik bir fotoduyarlılık sergiler ve artan güç yoğunluğu ile monoton bir azalma gösterir [101]. TiO₂ cihazı infrared ışık altında en yüksek fotoduyarlılık değerine sahiptir.

5.4.13. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al Diyotlarının Foto Tepki -İletim Mekanizması

I-V grafiklerinden yararlanılarak Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al ve Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al foto diyotların fototepki değerleri (I_{foto}/I_{dark}) hesaplanıp şekil 5.48-5.49'da grafik üzerinde verildi. Şekillerde de görüldüğü gibi ışığın şiddeti arttıkça yüksek değerler sergilemektedirler. Şekil 5.48 a ve b'de Cu₂CoSnS₄ fotodedektörün 100 mW/cm²'lik güneş ışığı altında 0,67.10², 100 mW/cm²'lik infrared ışık altında 0,33.10²'lik bir yüksek ışığa duyarlılık değerine sahiptir. Şekil 5.49 a ve b'de Cu₂NiSnS₄ fotodedektörün 100 mW/cm²'lik güneş ışığı altında 0,36.10², 100 mW/cm²'lik infrared ışık altında 1,14.10²'lik bir yüksek ışığa duyarlılık değerine sahiptir. Güneş ışığı altında ışığa karşı Cu₂CoSnS₄, infrared ışık altında ise ışığa karşı Cu₂NiSnS₄ daha iyi tepki verdiği görüldü.



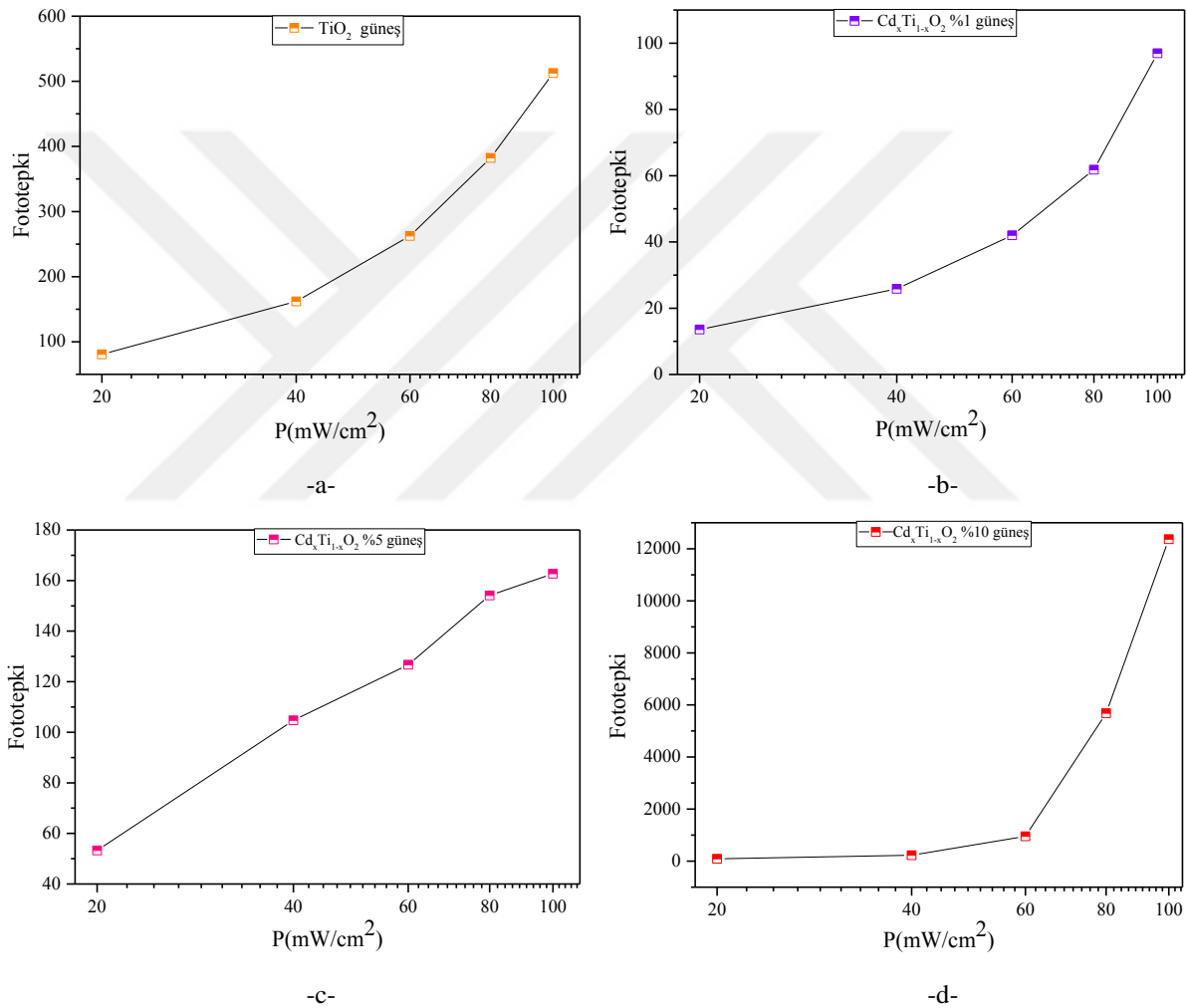
Şekil 5.48. Al/p-Si/Cu₂CoSnS₄/Al foto diyotunun a) Güneş ışığı b) Infrared ışık altında Fototepki-P eğrileri.



Şekil 5.49. Al/p-Si/Cu₂NiSnS₄/Al foto diyotunun a) Güneş ışığı b) Infrared ışık altında Fototepki-P eğrileri.

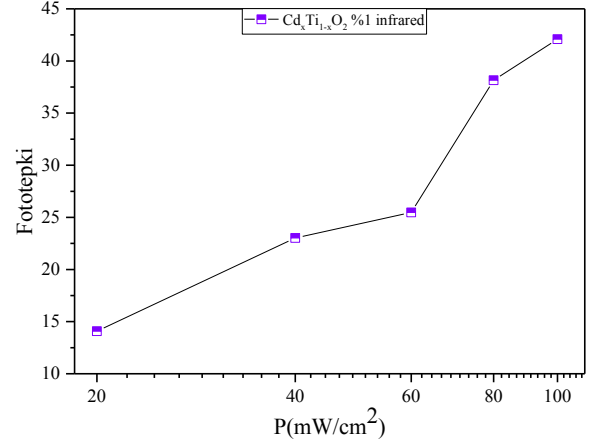
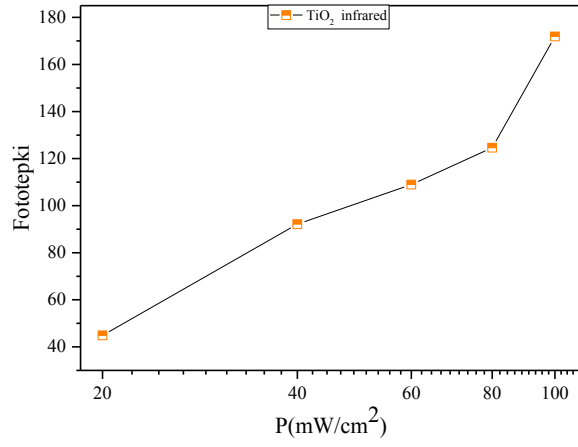
5.4.14. Al/n-Si/ Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al Foto Diyotlarının Foto Tepki -İletim Mekanizması

I-V grafiklerinden yararlanılarak Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al (x=0.0,0.01,0.05,0.10) foto diyotların fototepki değerleri (I_{foto}/I_{dark}) hesaplanıp şekil 5.50-5.51'de grafik üzerinde verildi. Şekil 5.50 a,b,c ve d'de görüldüğü gibi sırasıyla, diyotlar 100 mW/cm²'lik güneş ışığı altında 5,12.10²- 0,9.10²-1,62.10²-1,2.10⁴'lük bir yüksek ışığa duyarlılık değerine sahiptirler. Bu diyotların optoelektronik cihaz uygulamalarında kullanılabileceği değerlendirildi [102].



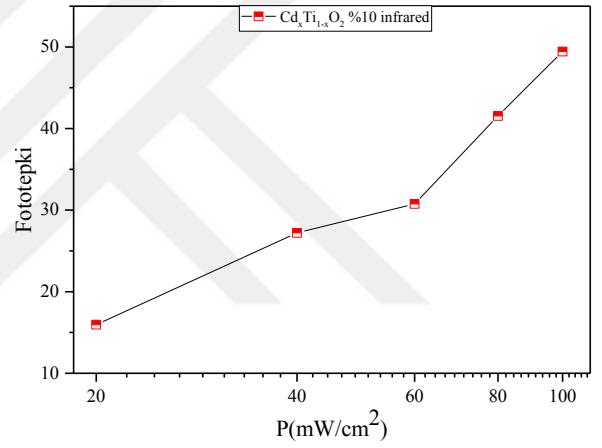
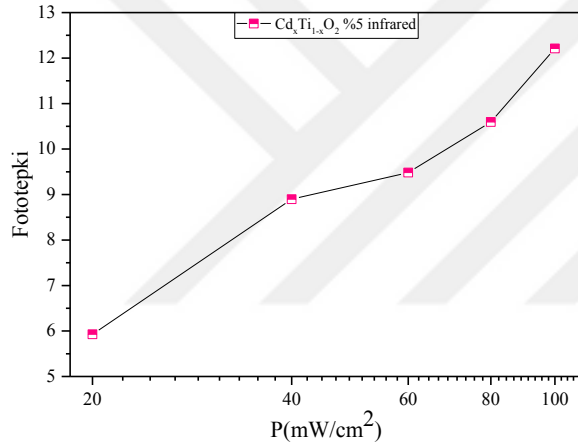
Şekil 5.50. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al foto diyotunun güneş ışığı altında Fototepki-P eğrileri a) x=0.0 b) x=0.01 c) x=0.05 d) x=0.10.

Şekil 5.51 a,b,c ve d'de görüldüğü gibi sırasıyla, diyotlar 100 mW/cm²'lik infrared ışık altında 1,71.10²-0,42.10²-0,12.10²-0,49.10²'lük bir yüksek ışığa duyarlılık değerine sahiptirler.



-a-

-b-



-c-

-d-

Şekil 5.51. Al/n-Si/Ti_{1-x}O₂Cd_xO/Al foto diyotunun infrared ışığı altında Fototepki-P eğrileri a) x=0.0 b) x=0.01 c) x=0.05 d) x=0.10.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasında infrared fotodedektörleri yapılarının tasarımı yapıldı. Hidrotermal metodu ile $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numuneleri üretilip p-tipi yarıiletken malzeme üzerine diyotları yapıldı. Sol jel metodu kullanılarak $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05,0.10$) numuneleri üretilip mikroskop camı üzerine ince filmi ve n-tipi yarıiletken malzeme üzerine diyotları yapıldı. Hazırlanan diyotların yapısal ve elektriksel özelliklerinin güneş ışığı ve infrared ışık altındaki farklılıkları incelendi. Üretilen malzemelerin optik özellikleri UV-Vis, yapısal özellikleri SEM, XRD gibi tekniklerle analiz edilmiştir.

$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ 'nin kristal yapısı, XRD spektrumları ile analiz edildi. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunelerinin XRD spektrumları karşılaştırıldığında, her iki numunenin XRD spektrumunda daha keskin ve şiddetli pikler gözlenmektedir. Piklerin şiddetli ve dar olması, numunelerin daha iyi kristalleştiğini göstermiştir. Numunelerin iyi kristalleşme göstermesinin sebebi nanoyapıda olmalarıdır. Nanoyapıda elektronların hareketliliği fazla olup elektriksel iletkenliklerinin iyi olduğunu gösterir [103,104,105].

SEM görüntülerinden nano boyutta tanelerin olduğu görülmüştür. Ortalama tanecik boyutları $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ için 42.8nm ile 257.1nm arası $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numunesi için 41.4nm ile 284.23nm arasında değiştiği görülmüştür. Morfolojik olarak incelendiğinde partiküllerin homojen olarak dağıldığı fakat topaklaşmaların da olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin havadaki nem ve nano boyutlu taneler arası çekim kuvvetinin yüksek olmasından ileri geldiği düşünülmektedir. SEM'de elde edilen görüntülerin EDX analizi sonucunda yapıda herhangi farklı bir elementin olmadığı görülmüştür. EDX analizinde $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ atomik oranların literatür ile uyumlu olduğu gözlenmiştir [54,65]. Cd içerikli $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ numunesinin SEM görüntülerinde nanoboyutta tanelerin olduğu ve CdO'nun katkı oranı arttıkça daha yüksek yüzey pürüzsüzlüğüne sahip olduğunu göstermektedir. TiO_2 yüzeyine katkılanan CdO'nun kısmen TiO_2 oyuklarını kapladığını gösterdi. EDX analizinde başka herhangi bir yapıya rastlanmadığı ve üretilen filmlerin atomik olarak literatür ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [66].

Hidrotermal metodu ile üretilen $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ 'nin optik özellikleri reflektans spektrumları ile incelenmiştir. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ numuneleri düşük reflektansa sahip olduğu bulunmuştur. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ 'nin reflektansı (yansıma), 350-1000 nm aralığında bir azalma göstermiştir. Reflektans spektrumlarındaki bu azalış valans bandından iletim bandına elektron transferinden dolayıdır. Reflektans spektrumları ile numunelerin yasak enerji aralığı (E_g) araştırıldı. Yasak enerji aralığı optik band analizi için optik soğurma metodu kullanılmıştır[81]. Optik band soğurma spektrumları çizilerek $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ ve $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ malzemelerinin optik band aralıkları sırasıyla 1.19-1.20 eV olarak bulunmuştur. Literatürde $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ - $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nin optik band aralığı $E_g=1.1-1.5$ eV arasında değişmektedir [70,119].Yasak enerji aralıklarının düşük olması malzemelerin elektriksel iletkenliğinin arttığını gösterir. Sol jel metodu ile üretilen $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05,0.10$) filmlerinin optik özellikleri soğrulma, geçirgenlik ve yansıma spektrumları ile incelenmiştir. İnce filmlerin yüksek şeffaflığa sahip olmasından kaynaklı görünür bölgedeki ortalama soğrulma, yaklaşık % 1.1 ile %1.5 aralığındadır. Filmlerin ortalama %88.9 luk yüksek geçirgenlik değerlerine sahip olduğu çizilen grafiklerde açıkça görülmektedir. Tüm numuneler için yansıma sınırı yaklaşık 880 nm civarında olup 880-1000 nm aralığında, reflektans giderek azalmaktadır [78]. Soğrulma spektrumları ile numunelerin yasak enerji aralığı (E_g) araştırıldı. Optik band analizi için optik soğurma metodu kullanılmıştır [116]. Optik band soğurma spektrumları çizilerek, $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ ($x=0.0,0.01,0.05,0.10$) numunelerinin optik band aralıkları sırasıyla 3.25, 3.26, 3.29 ve 3.36 eV olarak bulunmuştur. Cd katkılması ile TiO_2 'nin optik band aralığı artmıştır. Literatürdeki sonuçlarla uyum içerisindedir [80,81].

$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ foto diyotlarının elektriksel karakterizasyonu için akım-voltaj (I-V) ölçümleri farklı ışık şiddetleri (güneş ışığı ve infrared ışık) altındaki aydınlatmalarda yapıldı. Silisyum altlığı üzerine yapılan fotodiyotlara -3 ile +3 V arasında gerilim uygulanarak ölçümler yapıldı. Gözlenebileceği gibi, fotodiyotun aydınlatma altında ters akımı, karanlıkta bulunan akımın ters akımından daha yüksektir. Ayrıca, ters akım artan aydınlatma yoğunluğu ile artar. Yapılan ölçümlerden alınan veriler ile çizilen akım-voltaj karakteristik grafikleri, foto diyotların fotoiletken olduğunu göstermektedir.

$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ foto diyotların doğru akımı analiz edilerek, ters beslem doyma akımı, idealite faktörü, engel yüksekliği gibi diyot parametreleri hesaplandı. Fotodiyotların idealite faktörü değerleri, her bir foto diyotun karanlık

durumdaki $\ln I-V$ grafiğinin lineer kısmının eğiminden hesaplandı. Güneş ve infrared ışık altında hesaplanan idealite faktörü değerleri üretilen bütün diyotlarda 1'den büyük çıktı. Bu durumun nedeni ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten kaynaklanmaktadır. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ fotodiyotların akımı voltaj ile üssel olarak arttığından dolayı diyotların $I-V$ karakteristikleri termiyonik emisyon teorisi ile analiz edildi.

$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ fotodiyotların idealite faktörleri güneş ışığı altında 5.23 ile 7.86 arasında değişmekle birlikte en düşük idealite faktörü değeri $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ fotodiyotun 5.23 olarak hesaplandı. İnfrared ışık altında ise fotodiyotların idealite faktörleri 3.97 ile 7.46 arasında değişmiş olup en düşük idealite faktörü değeri $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ fotodiyotun 3.97 olarak hesaplandı.

Fotodiyotların güneş ışığı altında engel yüksekliği değerleri 0.461 eV ile 0.505 eV arasında değişirken en büyük engel yüksekliği değeri %5 Cd katkılı TiO_2 fotodiyotun 0.505 eV olarak hesaplandı. İnfrared ışık altında engel yüksekliği değerleri 0.466 eV ile 0.506 eV arasında değişirken en büyük engel yüksekliği değeri %1 Cd katkılı TiO_2 fotodiyotun 0.506 eV olarak hesaplandı. Güneş ve infrared ışık altında en yüksek ters beslem doyma akımı değeri TiO_2 fotodiyotun sırasıyla $6,98 \cdot 10^{-4}$ – $7,67 \cdot 10^{-4}$ A olarak hesaplandı.

$\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ foto diyotların farklı frekanslarda $C-V$ grafikleri çizildi. Grafiklerde $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ foto diyotların pozitif voltaj bölgesinde kapasitelerinin değişmediği fakat negatif voltaj bölgesinde kapasitelerin değiştiği görüldü. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ foto diyotların $C-V$ grafikleri ara yüzey durum yoğunluğu ve seri dirençten dolayı lineer bir davranış gösteremediği tespit edildi. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için paralel model kapasite oluşturularak C_{adj} grafikleri çizildi. Çizilen C_{adj} grafiklerinde oluşan pik değerleri diyotların ara yüzey durum yoğunluğuna sahip olduklarını gösterdi. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ foto diyotların farklı frekanslar için G_{adj} grafikleri çizildi. G_{adj} grafiklerinin negatif bölgesinde oluşan pik değerleri $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ foto diyotların ara yüzey durum yoğunluğunun varlığını doğrulamaktadır. Daha önce yapılan benzer çalışmalar ile uyushmaktadır [119,120,121,125]. $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ ve $\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{Cd}_x\text{O}$ diyotların D_{it} grafikleri diyotların G_{adj} verileri kullanılarak çizildi. Artan frekans değeri D_{it} değerlerini azaltmaktadır. Bu, uygulanan elektrik alan frekansını takip etmeyen

arabirim yük taşıyıcılarının sayısındaki azalmayı göstermektedir [118]. D_{it} değerleri literatürde daha önce yapılan benzer çalışmalar ile uyushmaktadır [109,117].

Cu_2CoSnS_4 , Cu_2NiSnS_4 ve $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ foto diyotlarının farklı ışık şiddetleri (güneş ışığı ve infrared ışık) altındaki aydınlatmalarda optik cevap analizi yapılarak I-t grafikleri çizildi. I-t grafikleri ışığın açık olduğu durumda akımın bazı diyotlarda hızlı bir şekilde bazı diyotlarda ise kademeli olarak maximum değere çıktığı ve ışık kapatıldığında akımın tekrar başlangıçtaki değere düştüğü görüldü. Aydınlatma açıldığında, fotoakım başlangıçta belirli bir seviyeye kadar hızla artar. Bu artış, akıma katkıda bulunan serbest yük taşıyıcıların sayısındaki artıştan kaynaklanabilir. Aydınlatma kapatıldıktan sonra fotoakımın bozulması, yük taşıyıcılarının alt seviyelerde tutulması ile açıklanır [64,122,123,126,127,128].

Cu_2CoSnS_4 foto diyotun güneş ışığı ve infrared ışık ile $100mW/cm^2$ aydınlanma altındaki $I_{açma}/I_{kapama}$ değerleri sırasıyla 14.78 - 17.68 olurken Cu_2NiSnS_4 foto diyotu için $I_{açma}/I_{kapama}$ değerleri sırasıyla 13.87-26.14 olarak hesaplandı. Cu_2CoSnS_4 ve Cu_2NiSnS_4 foto diyotların $I_{açma}/I_{kapama}$ değerleri diyotların optik duyarlılıklarının iyi olduğunu göstermektedir. Infrared fotodiyotunun duyarlılığı değerlerden de anlaşılacağı gibi daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ foto diyotun güneş ışığı ve infrared ışık ile $100mW/cm^2$ aydınlanma altındaki $I_{açma}/I_{kapama}$ değerleri sırasıyla 79.7-594, 3.4-87 arasında değişkenlik göstermişlerdir. Güneş ve infrared ışık altında en yüksek $I_{açma}/I_{kapama}$ değeri %10 Cd katkılı $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ cihazının olup sırasıyla 594 ve 87 olarak bulunmuştur.

Cu_2CoSnS_4 , Cu_2NiSnS_4 ve $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ foto diyotların farklı ışık şiddetleri (güneş ışığı ve infrared ışık) altındaki ters polarma bölgesinde sabit bir voltaja karşılık gelen fotoakım değerleri, I-V ölçümlerinde alınan verilerle çizilen grafiklerden bulundu. Sabit voltaj altında her bir foto diyot için bulunan fotoakım değerleri ile $I_{ph}-P$ grafikleri çizildi. Işık şiddetinin artışıyla fotoakım değerinin düzenli bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Aydınlatma şiddeti ile fotoakımın doğrusal uyumunu göstermektedir. Işık yoğunluğu foto akımı artırır [81,124]. Bu diyodun optoelektronik cihaz uygulamalarında kullanılabileceği değerlendirilmektedir. $I_{ph}-P$ grafiklerin lineer bölgesinin eğimi kullanılarak diyotların LDR (gürültü) değerleri hesaplandı. Cu_2CoSnS_4 - Cu_2NiSnS_4 cihazlarının LDR değerleri güneş ışığı ve infrared ışık altında sırasıyla 13-12.9 dB, 8.5-11.2 dB olarak hesaplanmıştır. $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ ($x=0.0,0.01,0.05,0.10$) cihazlarında ise güneş ışığı altında sırasıyla 16-17-9.6-34 dB, infrared ışık altında sırasıyla 11.6-9.5-6.2-9.8 dB olarak hesaplanmıştır. Cu_2CoSnS_4 , Cu_2NiSnS_4 ve $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ cihazların infrared ışık altındaki LDR değerlerinin

güneş ışığı altındaki LDR değerlerinden daha düşük çıktığı yapılan hesaplamalar neticesinde görülmüştür. Bu değerler daha önce yapılan benzer çalışmalarda hesaplanan LDR değerlerinden daha düşük çıkmıştır [129,130,131].

I_{ph} -t grafiklerinden yararlanılarak Cu_2CoSnS_4 , Cu_2NiSnS_4 ve $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ cihazların fotoduyarlılığı (R) hesaplandı. Cu_2CoSnS_4 cihazının güneş ışığı altında max duyarlılığı $4,2.10^{-5}A/W$ infrared ışık altında max duyarlılığı $6,2.10^{-5}A/W$, Cu_2NiSnS_4 cihazının güneş ışığı altında max duyarlılığı $4,81.10^{-5}A/W$ infrared ışık altında max duyarlılığı $4,90.10^{-5}A/W$ olarak hesaplanmıştır. Her iki durumda da infrared foto dedektörün duyarlılığı daha fazla çıkmıştır. $Ti_{1-x}O_2Cd_xO$ cihazları, güneş ışığına karşı 100 mW/cm^2 aydınlatma gücü yoğunluğu altında ortalama $1,37.10^{-4}$ - $1,39.10^{-3}\text{ A/W}$, infrared ışığına karşı 20 mW/cm^2 aydınlatma gücü yoğunluğu altında ortalama $9,5.10^{-5}$ - $1,9.10^{-4}\text{ A/W}$ lik bir fotoduyarlılık sergiler. Bu ölçümler, hazırlanan cihazların ışığa duyarlı olduklarını ve değişken CdO içeriği ile ayarlanabilir elektriksel tepkileri olduğunu göstermektedir. Güneş ışığına verilen en yüksek fototepki değeri %10 Cd katkılı TiO_2 cihazı olmuştur, infrared ışığına verilen en yüksek fototepki değeri de saf TiO_2 cihazı olmuştur. Cihazların yüksek oranda yanıt veren davranış sergiledikleri söylenebilir. Cihazlar, yüksek fotoakım değerleri, düşük kısa devre akımı ve düşük açık devre voltajı ile foto tepki özelliklerini gösterir [132].Literatürde daha önce yapılan çalışmalar ile uyum içerisinde [100,133,134,135].

7.KAYNAKLAR

- [1]. Ahmetoglu (Afrailov), M.A., Andreev, I.A., Kunitsyna, E.V., Mikhailova, M.P., Yakovlev, Yu.P. 2007. Electrical Properties of Isotype N+-GaSb/n⁰-GaInAsSb/ N+-GaAlAsSb Type-II Heterojunctions. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, 41(2): 154-159.
- [2]. Alferov, Z.I. 2001. Nobel Lecture: The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics, and technology. *Reviews of modern physics*, 73(3): 767-782.
- [3]. Kunitsyna, E.V., Andreev, I.A., Sherstnev, V.V., L'vova, T.V., Mikhailova, M.P., Yakovlev, Yu.P., Ahmetoglu (Afrailov), M., Kaynak, G., Gurler, O. 2010. Narrow gap III–V materials for infrared photodiodes and thermophotovoltaic cells. *Optical Materials*, 32(12): 1573-1577.
- [4]. Emine ALTIN, Serkan DEMİREL.,’’ Applications of infrared sensors in field of health kızılötesi sensörlerin sağlık alanındaki uygulamaları’’. T.C.İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi Cilt 4 Sayı 2-2016.
- [5]. Mateusz Bednorz, Gebhard J. Matt, Eric D. Głowacki, Thomas Fromherz, Christoph J. Brabec, Markus C. Scharber, Helmut Sitter, N. Serdar Sariciftci.,’’ Silicon/organic hybrid heterojunction infrared photodetector operating in the telecom regime’’. *Organic Electronics* 14 (2013) 1344–1350.
- [6]. Lei Ye, Peng Wang, Wenjin Luo, Fan Gong, Lei Liao, Tiande Liu, Lei Tong, Jianfeng Zang, Jianbin Xu, Weida Hu.,’’ Highly polarization sensitive infrared photodetector based on black phosphorus-on-WSe₂ photogate vertical heterostructure’’. *Nano Energy* 37 (2017) 53–60.
- [7]. Hossein Lotfi, Lu Li, Hao Ye, Robert T.Hinkey, Lin Lei, Rui Q.Yang, Joel C.Keay, Tetsuya D.Mishima, Michael B.Santos, Matthew B.Johnson.,’’ Interband cascade infrared photodetectors with long and very-long cutoff wavelengths’’. *Infrared Physics & Technology* Volume 70, May 2015, Pages 162-167.

- [8]. F. Liu, S. Zheng, X. He, A. Chaturvedi, J. He, W. Chow, H. Fan, *Adv. Funct. Mater.* 26 (2016) 1169–1177.
- [9]. Asar, T., Sarıkavak, B., Öztürk, M. K., Mammadov, T., Özçelik, S., “Effects of annealing on the structural properties of GaAs-based quantum well solar cells”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 11 (11): 1627–1631 (2009).
- [10]. Yakuphanoglu, F., 2009. *Organik Yarıiletkenler Fizigi*, ders notları, Fırat Üniv. Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Elazığ.
- [11]. Bilgen, Y., 2008. Sol-gel yöntemi ile üretilen nano kristal ZnO:Ga ince filmlerinin optik ve mikro yapısal özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- [12]. Eren, O., 2006. Alüminyum katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [13]. Besler, B., 2007. Elektrokimyasal büyüme ile üretilen ZnO’nun katodik potansiyel değişimine bağlı olarak kristalografik ve optik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [14]. Borazan, H., 2007. Yarıiletkenlerde kinetik olayların deneysel araştırma yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- [15]. Aksoy, S., 2006. Kalay katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [16]. Demirci, B., 2006. İndiyum katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [17]. Sarı, H., 2008. Yarıiletken Fizigi: Elektronik ve optik özellikler, ders notları, Ankara Üniv. Fizik Mühendisliği, Ankara.
- [18]. Cafer, T., 2000. Katıhal Elektroniği. Yıldızteknik Üniversitesi Basım-Yayım Merkezi, 234 s, İstanbul.
- [19]. Guseinov, I.I., ve Mamedov, B.A., B., 2009. Unified Treatment for Accurate and Fast Evaluation of the Fermi-Dirac Function. *Chin. Phys. B.*, 19 (5), 1-6.
- [20]. Tosun, H., 2008. Ultrasonik spray pyrolysis yöntemiyle elde edilen CdO yarıiletken materyalinin flor katkısına bağlı olarak yapısal özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [21]. Dikici, M., 1993. Katıhal Fizigine Giriş, Samsun.

- [22]. Tobias Winchen, Stijn Buitink., “ Energy spectrum of fast second order Fermi accelerators as sources of ultra-high-energy cosmic rays’’. *Astroparticle Physics* Volume 102, November 2018, Pages 25-31.
- [23]. Fox M. 2001, *Optical Properties of Solids*, Oxford University Press, Newyork, 305 s.
- [24]. Greenwood N.N.; Earnshaw A., 1997, “*Chemistry of the Elements*”, 2nd. Edition, Oxford, Butterword-Heineman.
- [25]. March J., 1992, “*Advanced Organic Chemistry*”, 4 th, Wiley, New York, pp. 723.
- [26]. Mol, A.M.B. V., *Chemical vapour deposition of tin oxide thin films / by Antonius M.B. van Mol. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2003. Proefschrift. – ISBN 90-386-2715-7 NUR 913.*
- [27]. Li, J., 2004. *Reaction Kinetics of Gold Dissolution in Acid Thiourea Solution*, University of Utah, Phd Thesis United State.
- [28]. Weiqun, Z., Wen, Y., Lihua, Q., 2005. Structure and stability of thiourea with water, DFT and MP2 calculations *Journal of Molecular Structure, Theochem* 730:131–139.
- [29]. Ullmann’s *Encyclopedia of Industrial Chemistry* 5th Edition, 1990, Vol A13, 446.
- [30]. Orvis, Jeffery A. *Journal of Chemical Education* 2003;80, 803-805.
- [31]. Anış, P.; Poliester Pamuk Karışımlarının Boyanması Uygulamalar ve Yeni Yaklaşımlar”. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 8, Sayı1 (2003).
- [32]. Patnaik, Pradyot, 2002, “*Handbook of Inorganic Chemicals*”, McGraw-Hill, Two Penn Plaza, New York, pp. 262-263.
- [33]. Krishnaiah Mokurala, Sudhanshu Mallick, Parag Bhargava., Alternative quaternary chalcopyrite sulfides (Cu₂FeSnS₄ and Cu₂CoSnS₄) as electrocatalyst materials for counter electrodes in dyesensitized solar cells. *Journal of Power Sources* 305 (2016) 134-143.
- [34]. Akshay Jariwala, Tapas K. Chaudhuri, Sanjay Patel, Aditi Toshniwal, Vipul Kheraj, Abhijit Ray., Direct-coated copper nickel tin sulphide (Cu₂NiSnS₄) thin films from molecular ink. *Materials Letters* 215 (2018) 118-120.
- [35]. Mahmut Kus, Tugbahan Yilmaz Alic, Cisem Kirbiyik, Canan Baslak, Koray Kara, Duygu AkinKara.,” Chapter 24 - Synthesis of Nanoparticles’’. *Micro and Nano Technologies* 2018, Pages 392-429

- [36]. Wilson, J., Havkes, J. F. B., “Optoelektronik”, Çeviri: Dr. İbrahim Okur, Değişim yayınları, Adapazarı, 282-325 (2000).
- [37]. Kartal, D., “Kuantum kuyulu kızılötesi fotodedektörler (QWIP)”, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas (2006).
- [38]. Anderson, B. L., Anderson R. L., “Fundamentals of semiconductor devices” Mc Graw Hill, New York, 675-676 (2005).
- [39]. Cao, X. A., Syed, A. A., Piao, H., “Investigation of the electronic properties of nitrogen vacancies in AlGaIn”, Journal of Applied Physics, 105: 063707 (2009).
- [40]. Ruiting Hao, Yang Ren, Sijia Liu, Jie Guo, Guowei Wang, Yingqiang Xu, Zhichuan Niu.,” Fabrication and characterization of high lattice matched InAs/InAsSb superlattice infrared photodetector. Journal of Crystal Growth 470 (2017) 33–36.
- [41]. D. Kufer, I. Nikitskiy, T. Lasanta, G. Navickaite, F.H.L. Koppens, G. Konstantatos., “Hybrid 2D-0D MoS₂ -PbS quantum dot photodetectors”. Adv. Mater. 26 (2014) 176–180.
- [42]. Heemin Kang, Kunyu Zhang, Dexter Siu Hong Wong, Fengxuan Han, Bin Li, Liming Bian.,” Near-infrared light-controlled regulation of intracellular calcium to modulate macrophage polarization”. Biomaterials Volume 178, September 2018, Pages 681-696.
- [43]. Konstantin Shcherbin, Igor Gvozдовskyy, Dean R.Evans., “ Liquid crystal light valve with a semiconductor substrate for dynamic holography in the infrared”. Journal of Molecular Liquids Volume 267, 1 October 2018, Pages 61-66.
- [44]. A. Aissat, M.El Besseghi, D.Decoster., “ Optimization of photoswitch constituted of a coplanar line introducing an interdigitated MSM photodetector”. Superlattices and Microstructures Volume 72, August 2014, Pages 245-252
- [45]. Rogalski, A., “Infrared Detectors”, Second Edition, CRC Press, 87-641 (2011).
- [46]. Sung-Ho Park, Joondong Kim., “ The properties of transparent TiO₂ films for Schottky photodetector”. Data in Brief Volume 13, August 2017, Pages 171-174
- [47]. A.J.Bennett, D.C.Unitt, P.Atkinson, D.A.Ritchie, A.J.Shields., “ High-efficiency single-photon sources based on InAs/GaAs quantum dots in pillar microcavities”. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures Volume 26, Issues 1–4, February 2005, Pages 391-394
- [48]. Hyoungh Kim, Sang-Hwan Cho, Jeong Rok Oh, Yong-Hee Lee, Jun-Ho Lee, Jae-Gab Lee, Soo-Kang Kim, Young-Il Park, Jong-Wook Park, Young Rag Do., “ Deep

- blue, efficient, moderate microcavity organic light-emitting diodes''. Organic Electronics Volume 11, Issue 1, January 2010, Pages 137-145
- [49]. Pengpeng Zhao, Shaohui Cui., " An improved weak light detector used for infrared Imaging guidance system''. Optik .Volume 127, Issue 4, February 2016, Pages 2316-2318.
- [50]. Hansson, C., "Comparative study of infrared photodetectors based on kuantum wells (QWIPs) and quantum dots (QDIPs)", Doktora tezi, Halmstad University, İsviçre, 5-10 (2006).
- [51]. David Z.-Y.Ting, Yia-ChungChang, Sir B.Rafol, John K.Liu, Cory J.Hill, Sam A.Keo, Jason Mumolo, Sarath D.Gunapala, Sumith V.Bandara.,'' The sub-monolayer quantum dot infrared photodetector revisited''. Infrared Physics & Technology Volume 70, May 2015, Pages 20-24.
- [52]. P.S. Maldar, M.A. Gaikwad, A.A. Mane, S.S. Nikam, S.P. Desai, S.D. Giri, A. Sarkar, A.V. Moholkar.,'' Fabrication of $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ thin films by a facile spray pyrolysis for photovoltaic application'', Solar Energy 158: 89–99 (2017).
- [53]. C.L. Yang , Y.H.Chen, M.Lin, S.L.Wu, L.Li , W.C.Liu , X.S.Wu, F.M.Zhang.,'' Structural,optical and magnetic properties of $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ thin films deposited byfacileone- step electro deposition'',Materials Letters 166: 101–104 (2016).
- [54]. Jiasong Zhong , Qingyao Wang , Wen Cai.,'' Rapid synthesis of flower- like $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ microspheres with nano plates using a biomolecule-assisted method'', Materials Letters 150:69–72 (2015).
- [55]. C. Huang, Y. Chan, F. Liu, D. Tang, J. Yang, Y. Lai, J. Lia, Y. Liu, J. Mater. Chem. A 1 (2013) 5402–5407.
- [56]. Chane-Ching JY, Gillorin A, Zaberca O, Balocchi A, Marie X. Chem Commun 2011;47:5229.
- [57]. Zaberca O, Gillorin A, Durand B, Chane-Ching JY. J Mater Chem 2011;21:6483.
- [58]. SamratSarkar , BiswajitDas , PriyankaR.Midya , G.C.Das , K.K.Chattopadhyay., "Opticalandthermoelectricpropertiesofchalcogenidebased $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nanoparticles synthesizedbyanovelhydrothermalroute''. Materials Letters 152 (2015) 155–158.
- [59]. Wang TX, Li YG, Liu HR, Li H, Chen SX.,Mater Lett 2014;124:148–50.
- [60]. Hui-Ju Chen, Sheng-Wen Fu, Tsung-Chieh Tsai, Chuan-Feng Shih.,'' Quaternary $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ thin films as a solar material prepared through electrodeposition''. Materials Letters 166 (2016) 215–218.

- [61]. S. Podsiadlo, M.Bialoglowski, M.Fadaghi, W.Gebicki, C.Jastrzebski, E.Zero, et al., *Cryst. Res. Technol.* (2015) 1–5.
- [62]. T. Prabhakar, N. Jampana, *Sol. Energy Mat. Sol. Cells* 95 (2011) 1001e1004.
- [63]. J.C. Gonzalez, P.A. Fernandes, G.M. Ribeiro, A. Abelenda, E.R. Viana, P.M.P. Salome, A.F. da Cunha, *Sol. Energy. Mat. Sol. Cells* 123 (2014) 58–64.
- [64]. Dan Zhang, Junyou Yang, Qinghui Jiang, Zhiwei Zhou, Xin Li, Jiwu Xin, Abdul Basit, Yangyang Ren, Xu He.,” Multi-cations compound $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$: DFT calculating, band engineering and thermoelectric performance regulation”. *Nano Energy* 36 (2017) 156–165.
- [65]. Tian-Xing Wang, Yan-Guo Li, Hai-Rui Liu, Hui Li, Si-Xiang Chen.,” Flower-like $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ nanoparticles synthesized by a facile solvothermal method”, *Materials Letters* 124: 148–150 (2014).
- [66]. A. Ranjitha, N. Muthukumarasamy, M. Thambidurai, Dhayalan Velauthapillai, A. Madhan Kumar, Zuhair M. Gasem.,” Inverted organic solar cells based on Cd-doped TiO_2 as an electron extraction layer”. *Superlattices and Microstructures* 74 (2014) 114–122.
- [67]. Run Wu, Jun Wu, Changsheng Xie, Jie Zhang, Aihua Wang, *Mat. Sci. and Eng.* A328 (2002), 196–200.
- [68]. Jing Shen, Ya Li, Ji-Huan He.,” On the Kubelka–Munk absorption coefficient”. *Dyes and Pigments* Volume 127, April 2016, Pages 187–188
- [69]. Sarah S.Mikhail, Shereen S.Azer, William M.Johnston.,” Accuracy of Kubelka–Munk reflectance theory for dental resin composite material”. *Dental Materials* Volume 28, Issue 7, July 2012, Pages 729–735.
- [70]. Yakuphanoglu F., Mehrotra R., Gupta A., Munoz M. (2009). “Nanofiber organic semiconductors: The effects of nanosize on the electrical charge transport and optical properties of bulk polyanilines” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.114, pp.794–799.
- [71]. Hui-Ju Chen, Sheng-Wen Fu, Tsung-Chieh Tsai, Chuan-Feng Shih.,” Quaternary $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ thin films as a solar material prepared through electrodeposition”. *Materials Letters* 166 (2016) 215–218.
- [72]. Faruk Ozel, Emre Aslan, Bilal Istanbulu, Ozge Akay, Imren Hatay Patir.,” Photocatalytic hydrogen evolution based on $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ and $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ nanocrystals” *Applied Catalysis B: Environmental* 198: 67–73 (2016).

- [73] S. Dridi, N. Bitri , M. Abaab.,’’ Synthesis of quaternary $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$ thin films as a solar energy material prepared through «spray» technique’’Materials Letters 204: 61–64 (2017).
- [74]. Mardare, D. and Rusu, G.I., 2002, The Influence of Heat Treatment on the Optical Properties of Titanium Oxide Thin Films, Materials Letters, 56, 210-214.
- [75]. Mahanty, S., Roy, S. and Sen, S., 2004, Effect of Sn doping on the Structural and Optical Properties of Sol-Gel TiO_2 Thin Films, Journal of Crystal Growth, 261, 77-81.
- [76]. Subramanian, M., Vijayalakshmi, S., Venkataraj, S. and Jayavel, R., 2008, Effect of Cobalt Doping on the Structural and Optical Properties of TiO_2 Films Prepared by Sol-Gel Process, Thin Solid Films, 516, 3776-3782.
- [77]. Y.M. Xiao, G.Y. Han, Y.Z. Chang, H.H. Zhou, M.Y. Li, Y.P. Li, An all-solid-state perovskite-sensitized solar cell based on the dual function polyaniline as the sensitizer and p-type hole-transporting material, J. Power Sources 267 (2014) 1.
- [78]. Kim, N.J., La, H.Y., Im, H.S. ve Ryu, K.B., 2010, Optical and Structural Properties of Fe- TiO_2 Thin Films Prepared by Sol-Gel Dip Coating, Thin Solid Films, 518, 156-160.
- [79]. A. Ranjitha ., N. Muthukumarasamy ., M. Thambidurai ., Dhayalan Velauthapillai ., A. Madhan Kumar ., Zuhair M. Gasem ., ‘’Inverted organic solar cells based on Cd-doped TiO_2 as an electron extraction layer’’. Superlattices and Microstructures 74 (2014) 114–122.
- [80]. S. Ito, S.M. Zakeeruddin, R. Humphry-Baker, P. Liska, R. Charvet, P. Comte, M.K. Nazeeruddin, P. Pechy, M. Takata, H. Miura, S. Uchida, M. Gratzel, High-efficiency organic-dye-sensitized solar cells controlled by nanocrystalline- TiO_2 electrode thickness, Adv. Mater. 18 (2006) 1202.
- [81]. Yanmei Li., Yi Guo., Yanhong Li., Xingfu Zhou., ‘’Fabrication of Cd-Doped TiO_2 Nanorod Arrays and Photovoltaic Property in Perovskite Solar Cell’’. Electrochimica Acta 200 (2016) 29–36.
- [82]. A. Dere, A. Tataroğlu, Abdullah G. Al-Sehemi, Ahmed A. Al-Ghamdi, F. Farid El-Tantawy, W.A. Farooq, F. Yakuphanoglu.,’’ A functional material based photodiode for solar tracking systems’’ Physica B 520: 76–81 (2017).
- [83]. H.B. Kim, H.S. Lee, Thin Solid Films 550 (2014) 504-508.

- [84]. F. Yakuphanoglu, B. Gunduz, Ahmed A. Al-Ghamdi, W.A. Farooq, Farid El-Tantawy, *Sens. Actuators A* 234 (2015) 212-222.
- [85]. A. Tataroglu., Abdullah G. Al-Sehemi., M. Ilhan., Ahmed A. Al-Ghamdi., F. Yakuphanoglu.,” Optical, Electrical and Photoresponse Properties of Si-based Diodes with NiO-doped TiO₂ Film Prepared by Sol-gel Method” *Silicon* (2018) 10:913–920.
- [86]. A.A. Hendi, F. Yakuphanoglu.,” Graphene doped TiO₂/p-silicon heterojunction photodiode”. *Journal of Alloys and Compounds* 665: 418-427 (2016).
- [87]. R.O. Ocaya., Ahmed Al-Ghamdi., Kwadwo Mensah-Darkwa., R.K. Gupta., W. Farooq., F. Yakuphanoglu.,” Organic photodetector with coumarin-adjustable photocurrent”. *Synthetic Metals* 213 (2016) 65–72
- [88]. H. Kanbur, Ş. Altındal, A. Tataroğlu, The effect of interface states: excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes, *Appl. Surf. Sci.* 252 (5) (2005) 1732–1738.
- [89]. M. Çakar, Y. Onganer, A. Türüt, The nonpolymeric organic compound (pyronine-B)/p-type silicon/Sn contact barrier devices, *Synth. Met.* 126 (2-3) (2002) 213–218.
- [90]. Yakuphanoglu, F., Çağlar, Y., Çağlar, M., Ilican, S., 2010. ZnO/p-Si heterojunction photodiode by sol–gel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13, 137–140.
- [91]. Yakuphanoglu, F., Farooq, W.A., 2011. Photoresponse and Electrical characterization of photodiode based nanofibers ZnO and Si, *Materials Science in Semiconductor Processing*.
- [92]. Yakuphanoglu, F., 2011. Controlling of electrical and interface state density properties of ZnO:Co/p-silicon diode structures by compositional fraction of cobalt dopant, *Microelectronics Reliability*.
- [93]. A. Mekki, A. Dere, Kwadwo Mensah-Darkwa, Ahmed Al-Ghamdi, R.K. Gupta, K. Harrabi, W.A. Farooq, Farid El-Tantawy, F. Yakuphanoglu.,” Graphene controlled organic photodetectors” *Synthetic Metals* 217: 43–56 (2016).
- [94]. H. Huang, S.X. Lu, W.K. Zhang, Y.P. Gan, C.T. Wang, L.Yu, X.Y. Tao, *J. Phys. Chem. Solids* 70 (2009) 745-749.
- [95]. N.M. Khusayfan, A.A. Al-Ghamdi, F. Yakuphanoglu, *J. Alloys Compd.* 663 (2016) 796-807.

- [96]. M. El-Kemary, et al., Photoinduced interaction of CdSe quantumdotwith coumarins, *J. Lumin.* 159 (2015) 26–31.
- [97]. L. Dou, Y. (Micheal) Yang, J. You, Z. Hong, W.-H. Chang, G. Li, Y. Yang, Solutionprocessed hybrid perovskite photodetectors with high detectivity, *Nat. Commun.* 5 (2014) 5404.
- [98]. W. Chandra, L.K. Ang, K.L. Pey, Two-dimensional analytical Mott-Gurney law for a trap-filled solid, *Appl. Phys. Lett.* 90 (15) (2007) 153505.
- [99]. H. Ohta, M. Hirano, K. Nakahara, H. Maruta, T. Tanabe, M. Kamiya, T. Kamiya, H. Hosono, *Appl. Phys. Lett.* 83 (5) (2003) 1029–1031.
- [100]. A. Dere, M. Soyly, F. Yakuphanoglu.,” Solar light sensitive photodiode produced using a coumarin doped bismuth oxide composite”. *Materials Science in Semiconductor Processing* 90 (2019) 129–142.
- [101]. Shibin Krishna, Alka Sharma, Neha Aggarwal, Sudhir Husale, Govind Guptaç,” Ultrafast photoresponse and enhanced photoresponsivity of Indium Nitride based broad band photodetector”. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 172 (2017) 376–383.
- [102]. R.K. Gupta, M. Cavas, Ahmed A. Al-Ghamdi, Z.H. Gafer, F. El-Tantawy, F. Yakuphanoglu.,” Electrical and photoresponse properties of Al/p-CuFeO₂/p-Si/Al MTCOS photodiode”. *Solar Energy* 92 (2013) 1–6.
- [103]. Sachin Rondiya, Nitin Wadnerkar, Yogesh Jadhav, Sandesh Jadkar, Santosh Haram, and Mukul Kabir.,” Structural, Electronic, and Optical Properties of Cu₂NiSnS₄: A Combined Experimental and Theoretical Study toward Photovoltaic Applications”. *Chem. Mater.* 2017, 29, 3133–3142
- [104]. Wang, T.-X.; Li, Y.-G.; Liu, H.-R.; Li, H.; Chen, S.-X. Flowerlike Cu₂NiSnS₄ nanoparticles synthesized by a facile solvothermal method. *Mater. Lett.* 2014, 124, 148–150.
- [105]. Sarkar, S.; Das, B.; Midya, P. R.; Das, G.; Chattopadhyay, K. Optical and thermoelectric properties of chalcogenide based Cu₂NiSnS₄ nanoparticles synthesized by a novel hydrothermal route. *Mater. Lett.* 2015, 152, 155–158.
- [106]. X.-W. Fu, Z.-M. Liao, Y.-B. Zhou, H.-C. Wu, Y.-Q. Bie, J. Xu, D.-P. Yu, Graphene/ZnO nanowire/graphene vertical structure based fast-response ultraviolet photodetector, *Appl. Phys. Lett.* 100 (2012) 223114.

- [107]. Leila Elsellami, Hinda Lachheb, Ammar Houas.,'' Synthesis, characterization and photocatalytic activity of Li-,Cd-,and La-doped TiO_2 '' . Materials Science in Semiconductor Processing 36 (2015) 103–114.
- [108]. A. Tataroğlu, S. . Altındal, Microelectron. Eng. 85 (2008) 2256.
- [109]. Faten Al-Hazmi, F. Yakuphanoglu.,'' $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$:graphene oxide nanocomposites based photoresponse Devices'' . Journal of Alloys and Compounds 653 (2015) 561-569.
- [110]. F. Yakuphanoglu, Analysis of interface states of metal-insulator-semiconductor photodiode with n-type silicon by conductance technique, Sens. Actuators A Phys. 147 (2008) 104–109.
- [111]. Y. Aoki, Photovoltaic performance of Organic Photovoltaics for indoor energy harvester, Org. Electron. 48 (2017) 194–197.
- [112]. B. Anwer, A. Karabulut, A. Yildiz, F. Yakuphanoglu, Solar light responsive ZnO nanoparticles adjusted using Cd and La Co-dopant photodetector, J. Alloy. Compd. 732 (2018) 16–24.
- [113]. A. Tataroğlu, C. Ahmedova, G. Barim, A.G. Al-Sehemi, A. Karabulut, A.A. Al-Ghamdi, W.A. Farooq, F. Yakuphanoglu, Electronic and optoelectronic properties of Al/coumarin doped $\text{Pr}_2\text{Se}_3\text{--Ti}_2\text{Se}$ /p-Si devices, J. Mater. Sci. Mater. Electron. 29 (2018) 12561–12572.
- [114]. K. Mensah-Darkwa, R. Ocaya, A. Dere, A.G. Al-Sehemi, A.A. Al-Ghamdi, M. Soylu, R.K. Gupta, F. Yakuphanoglu, Dye based photodiodes for solar energy applications, Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. 123 (2017) 1–13.
- [115]. W.A. Ameen, B.A.H. Yildiz, A. Farooq, F. Yakuphanoglu, Solar light photodetectors based on nanocrystalline zinc oxide cadmium doped/p-Si heterojunctions, Silicon (2017) 1–9.
- [116]. A.A.M.Farag, M.Fadel, Optics & Laser Technology, 45 (2013) 356-363.
- [117]. F. Yakuphanoglu, Photovoltaic properties of the organic–inorganic photodiode based on polymer and fullerene blend for optical sensors, Sens. Actuators A: Phys. 141 (2) (2008) 383–389.
- [118]. B. Coşkun, K. Mensah-Darkwa, M. Soylu, Abdullah G. Al-Sehemi, A. Dere, Ahmed Al-Ghamdi, R.K. Gupta, F. Yakuphanoglu.,'' Optoelectrical properties of Al/p-Si/Fe:N doped ZnO/Al diodes'' . Thin Solid Films 653 (2018) 236–248.

- [119]. Faruk Ozel, Adem Yar, Emre Aslan, Emre Arkan, Abdalaziz Aljabour, Mustafa Can, Imren Hatay Patir, Mahmut Kus and Mustafa Ersoz., "Earth-Abundant $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$ Nanofibers for Highly Efficient H_2 Evolution at Soft Interfaces". *ChemNanoMat* 2015, 1, 477 – 481.
- [120]. S. Karataş, F. Yakuphanoglu, F.M. Amanullah, Capacitance–voltage and conductance– voltage characteristics of Ag/n-CdO/p-Si MIS structure prepared by sol gel method, *J. Phys. Chem. Solids* 73 (1) (2012) 46–51.
- [121]. M. Nath, A. Roy, Interface and electrical properties of ultra-thin HfO_2 film grown by radio frequency sputtering, *Phys. B Condens. Matter* 482 (2016) 43–50.
- [122]. S. Kazım, V. Ali, M. Zulfeqar, M. Mazharul Haq, M. Husain, *Physica B* 393 (2007) 310–315.
- [123]. D.-T. Phan, R.K. Gupta, G.-S. Chung, A.A. Al-Ghamdi, O.A. Al-Hartomy, F. El-Tantawy, F. Yakuphanoglu, *Sol. Energy* 86 (2012) 2961–2966.
- [124]. C. Brabec, U. Scherf, V. Dyakonov, *Organic Photovoltaics: Materials Device Physics, and Manufacturing Technologies*, Wiley, 2011.
- [125]. Najla M. Khusayfan, Ahmed A. Al-Ghamdi, F. Yakuphanoglu., "Solar light photodetectors based on nanocrystalline copper indium oxide/p-Si heterojunctions". *Journal of Alloys and Compounds* 663 (2016) 796e807.
- [126]. C.-Y. Tsay, W.-T. Hsu., "Comparative Studies on Ultraviolet-Light-Derived Photoresponse Properties of ZnO, AZO, and GZO Transparent Semiconductor Thin Films". *Materials*, 10 (2017), p. 1379.
- [127]. B. Varghese, B. Mukherjee, K.R.G. Karthik, K.B. Jinesh, S.G. Mhaisalkar, E.S. Tok, C. H. Sow., "Electrical and photoresponse properties of Co_3O_4 nanowires". *J. Appl. Phys.*, 111 (2012), Article 104306.
- [128]. J.C. Moore, C.V. Thompson., "A Phenomenological Model for the Photocurrent Transient Relaxation Observed in ZnO-Based Photodetector Devices". *Sensors* 2013, 13(8), 9921-9940.
- [129]. Tiening Wang, Yue Wang, Lijie Zhu, Longfeng Lv, Yufeng Hu, Zhenbo Deng, Qiuhong Cui, Zhidong Lou, Yanbing Hou, Feng Teng., "High sensitivity and fast response sol-gel ZnO electrode buffer layer based organic photodetectors with large linear dynamic range at low operating voltage". *Organic Electronics* 56 (2018) 51–58.

- [130]. A. Dere.,'' A novel quaternary chalcogenide KBiCu_2S_3 based linear-dynamic-range optoelectronic device for optic communications systems''. *Physica B: Condensed Matter* 545 (2018) 30–33.
- [131]. Yue Wang, Lijie Zhu, Tiening Wang, Yufeng Hu, Zhenbo Deng, Qiuhong Cui, Zhidong Lou, Yanbing Hou, Feng Teng.,'' Fast and sensitive polymer photodetectors with extra high external quantum efficiency and large linear dynamic range at low working voltage bias''. *Organic Electronics* 62 (2018) 448–453.
- [132]. Abdulkarim Karabulut, A. Dere, Osman Dayan, Abdullah G. Al-Sehemi, Z. Serbetci, Ahmed A. Al-Ghamdi, F. Yakuphanoglu.,'' Silicon based photodetector with Ru(II) complexes organic interlayer''. *Materials Science in Semiconductor Processing* 91 (2019) 422–430.
- [133]. Zahra Moradi, Hamidreza Fallah, Morteza Hajimahmoodzadeh.,'' Nanocomposite perovskite based optical sensor with broadbandabsorption spectrum''. *Sensors and Actuators A* 280 (2018) 47–51.
- [134]. K.S. Ahn, Y. Yan, S. Shet, T. Deutsch, J. Turner, M. Al-Jassim, Enhanced photoelectrochemical responses of ZnO films through Ga and N codoping, *Appl. Phys. Lett.* 91 (2007) 231909.
- [135]. Yaonan Hou , Zengxia Mei, Zhanglong Liu, Huili Liang, Changzhi Gu, Xiaolong Du.,'' MgZnO based ultraviolet photodetector with high photoresponsivity achieved by fluorine doping''. *Thin Solid Films* 634 (2017) 165–168.
- [136] M. Ilhan, Electrical characterization of Al / fluorescein sodium salt organic semiconductor / Au diode by current-voltage and capacitance-voltage methods, *J. mater. electron. device* 1 (2017) 15-20.
- [137]. A.Turut, A. Karabulut, K. Ejderha, N. Bıyıklı, Capacitance-conductance-current-voltage characteristics of atomic layer deposited $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaAs}$ MIS structures, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 39 (2015) 400-407.
- [138]. K. Ejderha, A. Karabulut, N. Turkan, A. Turut, The characteristic parameters of Ni/n-6H-SiC devices over a wide measurement temperature range, *Silicon* (2016) 395-401,
- [139]. F. Yakuphanoglu, Transparent metal oxide films based sensors for solar tracking applications, *Compos. Part B* (2016).

- [140]. M.B. Sarkar, B. Choudhuri, P. Bhattacharya, R.N. Barman, A. Ghosh, S.M.M.D. Dwivedi, S. Chakrabartty, A. Mondal, J. Nanosci. Nanotechnol. 18 (2018) 4898-4903.



ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Adıyaman Çelikhan İlçesinde doğdu. 2001-2005 yılları arasında Kafkas Üniversitesi Fizik Bölümünden mezun oldu. 2012-2014 yılları arasında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'ndan Yüksek Lisansını tamamladı. 2014 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Doktora Eğitimine başladı.

