

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**NiO: ZNO / CdO KOMPOZİT FOTODİYOTLARIN SOL-JEL YÖNTEMİ
İLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

Ezgi GÜRGENÇ

Doktora Tezi

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yenilenebilir Enerji Bilim Dalı

HAZİRAN, 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

NiO: ZnO / CdO KOMPOZİT FOTODİYOTLARIN
SOL-JEL YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ
VE KARAKTERİZASYONU

Tez Yazarı
Ezgi GÜRGENÇ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Aydın DİKİCİ

İkinci Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Fehmi ASLAN

HAZİRAN, 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı: NiO: ZnO / CdO Kompozit Fotodiyotların Sol-Jel Yöntemi ile Üretilmesi
ve Karakterizasyonu

Yazarı: Ezgi GÜRGENÇ

İlk Teslim Tarihi: 22.04.2022

Savunma Tarihi: 01.06.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Aydın DİKİCİ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Canan Aksu CANBAY Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Ömer GÜLER Munzur Üniversitesi, Tunceli Meslek Yüksekokulu	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Emre TURGUT Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Gürkan KAVURAN Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “NiO: ZnO / CdO Kompozit Fotodiyotların Sol-Jel Yöntemi ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu” başlıklı doktora tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

01.06. 2022

Ezgi GÜRGENÇ



ÖNSÖZ

Fosil yakıtların gün geçtikçe tükenmesi ve küresel ısınmadan dolayı iklimde meydana değişiklikler toplumları alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Bu enerji kaynaklarından en önemlilerinden birisi güneş enerjisidir. Güneş enerjisi fotovoltaiik ve konsantre güneş enerjisi sistemleri ile elektriğe dönüştürülebilir. Bu sistemlerin düşük verimliliği sürekli eleştirilen bir durumdur ve verimliliği toplanan güneş enerjisinin miktarına bağlıdır. Güneş paneli takip sistemleri kullanılarak güneş enerjisi üretim verimliliğinin yanı sıra güneş enerjisinin toplanma süreleri de artırılabilir. Güneş paneli takip sistemlerinde ve elektronik endüstrisinde ışığın tespit edilebilmesi için kullanılan sensörlerin başında fotodiyotlar gelmektedir.

Bu tez çalışmasında, farklı metal oksit yarıiletkenler kullanılarak kompozit esaslı fotodiyotlar geliştirilmiştir. Farklı metal oksit yarıiletkenlerin kompozit bir filmde birleştirilerek fotodiyotların üretilmesi ve karakterize edilmesi ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlı olduğundan, farklı metal oksit yarıiletken kompozit esaslı fotodiyotlar araştırılması gereken konulardandır. Bu amaçla mevcut çalışmada, literatüre iki metal oksidin yüksek oranda katkısıyla oluşturulan Al/NiO: CdO/p-Si/Al ve Al/NiO: ZnO/p-Si/Al kompozit fotodiyotları kazandırılmıştır. Fototepki ve elektriksel özellikleri detaylıca araştırılmıştır. Yüksek fototepki ve fotoduyarlılığa sahip fotodiyotlar üretilmiştir.

Bu çalışmanın her safhasında bana yol gösteren ve yakın ilgisi ile büyük destek sağlayan danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Aydın DİKİCİ ve ikinci danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Fehmi ASLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamla ilgili bilgi birikimini benden esirgemeyen ve bana yol gösteren Tez izleme komitesi (TİK) başkanım Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Canan Aksu CANBAY'a, TİK üyesi Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Dr. Öğretim Üyesi Emre TURGUT'a teşekkür ederim. Fotodiyotlar ve nanomalzemeler konusunda engin bilgi ve tecrübesinden istifade ettiğim Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU'na özellikle teşekkür ederim. Ayrıca fotodiyot ölçümlerinde yardımcı olan Doç. Dr. Ayşegül DERE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bana hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem Nilgün KAYA, babam Dr. Öğr. Üyesi Hüsamettin KAYA, ablam Prof. Dr. Özge HANAY ve tezim boyunca manevi desteklerinden ötürü eşim Turan GÜRGENÇ'e ve son olarak varlığıyla bana güç veren değerli oğlum Atilla Aybars GÜRGENÇ'e de teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından FUBAP-TEKF.21.11 protokol numaralı proje ile desteklenmiştir. Yükseköğretim kuruluna (YÖK) Doktora eğitimim süresince verdiği 100/2000 Doktora burs desteğinden ötürü teşekkür ederim.

Ezgi GÜRGENÇ

ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiii
SİMGELER	xiv
KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	3
1.2. Tezin Amacı.....	11
1.3. Tezin Bölümleri	12
2. YARIİLETKENLER.....	14
2.1. Bant Oluşumu ve Bant Yapısı	14
2.2. Fermi-Dirac Dağılım Fonksiyonu	17
2.3. Yarıiletken Çeşitleri	18
2.3.1. Katkısız Yarıiletkenler.....	18
2.3.2. Katkılı Yarıiletkenler	18
2.3.3. Metal Oksit Yarıiletkenler	20
3. FOTODİYOTLAR.....	24
3.1. Fotodiyot Çeşitleri.....	25
3.1.1. Metal Yarıiletken Fotodiyotlar	25
3.1.2. P-n Eklem Fotodiyotlar	26
3.1.3. P-i-n Eklem Fotodiyotlar	27
3.1.4. Schottky Fotodiyot	28
3.1.5. Heteroeklem Fotodiyot	28
3.2. Fotodiyotların Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiği	29
3.3. Fotodiyotların Kapasite-Voltaj (C-V) Karakteristiği	30
3.4. Fotovoltaik Parametreler.....	31
3.4.1. Açık Devre Gerilimi	31

3.4.2. Kısa Devre Akımı.....	31
3.4.3. Spektral Cevap	32
3.4.4. Seri Direnç.....	32
3.4.5. Şönt Direnci.....	32
3.4.6. Kuantum Verimi	33
3.4.7. Doldurma Faktörü	33
3.4.8. Fotoduyarlılık	34
4. SOL-JEL İNCE FİLM KAPLAMA YÖNTEMİ.....	36
4.1. Sol-jel Kaplama Yöntemleri	37
4.1.1. Daldırma ile Kaplama.....	37
4.1.2. Püskürtme ile Kaplama.....	38
4.1.3. Döndürerek Kaplama.....	38
5. MATERYAL VE METOT.....	39
5.1. Silisyum Altlık Malzemenin Hazırlanması	39
5.2. NiO: CdO İnce Filmlerin Üretimi	39
5.3. NiO: ZnO İnce Filmlerin Üretimi	41
5.4. Fotodiyotların Üretimi	42
5.5. İnce Filmlerin Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu.....	43
5.6. Fotodiyotların Elektriksel ve Fototepki Karakterizasyonu.....	43
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
6.1. Üretilen İnce Filmlerin Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu.....	45
6.1.1. NiO: CdO İnce Filmlerin Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu.....	45
6.1.2. NiO: ZnO İnce Filmlerin Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu.....	48
6.2. Fotodiyotların I-V Karakteristikleri	51
6.2.1. Al/NiO: CdO/p-Si/Al Fotodiyotların I-V Karakteristikleri	51
6.2.2. Al/NiO: ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların I-V Karakteristikleri.....	57
6.3. Fotodiyotların Geçici Fotoakım, Fotokapasitans ve Fotoiletkenlik Özellikleri	61
6.3.1. Al/NiO: CdO/p-Si/Al Fotodiyotların Geçici Fotoakım, Fotokapasitans ve Fotoiletkenlik Özellikleri	61
6.3.2. Al/NiO: ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların Geçici Fotoakım, Fotokapasitans ve Fotoiletkenlik Özellikleri	65
6.4. Fotodiyotların C-V ve G-V Karakteristikleri	69
6.4.1. Al/NiO: CdO/p-Si/Al Fotodiyotların C-V ve G-V Karakteristikleri	69
6.4.2. Al/NiO: ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların C-V ve G-V Karakteristikleri	77
6.5. Al/NiO: CdO/p-Si/Al ve Al/NiO: ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların Fotodiyot Parametrelerinin Karşılaştırılması	84

7. SONUÇLAR	86
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

NiO: ZnO / CdO Kompozit Fotodiyotların Sol-Jel Yöntemi ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Ezgi GÜRGENÇ

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Haziran 2022, Sayfa xvii+95

Bu çalışmada, farklı molar oranlarda NiO:CdO ve NiO:ZnO ince filmler Alüminyum (Al) omik kontaklı p-Si üzerinde oluşturuldu. Kaplama yöntemi olarak sol-jel döndürerek kaplama yöntemi kullanıldı ve kaplama işlemi dinamik modda gerçekleştirildi. Fiziksel bir maske kullanılarak termal buharlaştırma yöntemi ile ince filmler üzerinde Al üst kontaklar meydana getirildi. Tüm bu işlemlerden sonra Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotlar üretilmiş oldu. Üretilen ince filmleri oluşturan fazların tayini için X-ışını kırınımı (XRD) analizi gerçekleştirildi. İnce filmleri oluşturan yapıların morfolojileri farklı büyütmelerde alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile araştırıldı. İnce filmleri meydana getiren elementler enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile belirlendi. Üretilen fotodiyotların fotodiyot parametreleri akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V), iletkenlik-gerilim (G-V), geçici fotoakım-zaman (I-t) ve geçici fotokapasite-zaman (C-t) ölçümleri ile araştırıldı. I-V analizleri karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında (20 - 100 mW/cm²) ve I-t analizleri ise sadece 20 - 100 mW/cm² arasında değişen ışık şiddetlerinde gerçekleştirildi. C-V, G-V ve C-t ölçümleri farklı frekans değerlerinde (10 kHz - 1 MHz) gerçekleştirildi.

NiO:CdO ve NiO:ZnO ince filmler başarıyla üretildi ve tüm ince filmlerin nanoyapılardan meydana geldiği görüldü. Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotların doğrultma davranışı gösterdiği tespit edildi. Fotoakım değerlerinin ışıktan etkilendiği ve ışık yoğunluğu arttıkça yükseldiği belirlendi. Üretilen tüm fotodiyotların ışığa karşı hassas oldukları tespit edildi. En yüksek fototepki değeri NiO:ZnO oranı 3:1 olan Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotta 3.12×10^3 olarak elde edildi. Üretilen fotodiyotların elektriksel ve fototepki özelliklerinin NiO:CdO-ZnO oranları ile değiştirilebileceği ve kontrol edilebileceği görüldü. Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotların seri direnç ve arayüz durum yoğunluklarının frekanstan ve NiO:CdO-ZnO oranından etkilendiği belirlendi. Yapılan tüm karakterizasyonlar neticesinde, üretilen cihazların optoelektronik sistemlerde fotokapasitör ve fotodiyot olarak kullanım alanı bulabileceği sonucuna varıldı.

Anahtar Kelimeler: Kompozit fotodiyot, Nanomalzeme, Yarıiletken, Fototepki, Güneş ışınımı.

ABSTRACT

Production and Characterization of NiO: ZnO / CdO Composite Photodiodes by Sol-Jel Method

Ezgi GÜRGENÇ

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy Systems Engineering
June 2022, xvii+95

In this study, NiO:CdO and NiO:ZnO thin films with different molar ratios were formed on p-Si with aluminum (Al) ohmic contacts. Sol-gel spin coating method was used as coating method and coating process was performed in dynamic mode. Al top contacts were formed on thin films by thermal evaporation method using a physical mask. After all these processes, Al/NiO:CdO/p-Si/Al and Al/NiO:ZnO/p-Si/Al composite based photodiodes were produced. X-ray diffraction (XRD) analysis was performed to determine the phases forming the produced thin films. The morphologies of the structures forming the thin films were investigated by field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) at different magnifications. The elements that compose the thin films were determined by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). Photodiode parameters of produced photodiodes were investigated by current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V), conductivity-voltage (G-V), transient photocurrent-time (I-t) and transient photocapacitance-time (C-t) measurements. I-V analyzes were performed in the dark and under different light intensities (20 - 100 mW/cm²), and I-t analyzes were performed only at light intensities varying between 20 - 100 mW/cm². C-V, G-V and C-t measurements were performed at different frequency values (10 kHz - 1 MHz).

NiO:CdO and NiO:ZnO thin films were produced successfully and it was seen that all thin films were composed of nanostructures. It was determined that Al/NiO:CdO/p-Si/Al and Al/NiO:ZnO/p-Si/Al composite based photodiodes showed rectification behavior. Photocurrent values were affected by light and it was determined that they increased as the light intensity increased. It was determined that all produced photodiodes were sensitive to light. The highest photoresponse value was obtained as 3.12×10^3 in Al/NiO:ZnO/p-Si/Al composite based photodiode, which NiO:ZnO ratio of 3:1. It has been seen that the electrical and photoresponse properties of the produced photodiodes can be changed and controlled by the NiO:CdO-ZnO ratios. It was determined that the series resistance and interface state densities of Al/NiO:CdO/p-Si/Al and Al/NiO:ZnO/p-Si/Al composite based photodiodes were affected by frequency and NiO:CdO-ZnO ratio. As a result of all the characterizations, it was concluded that the produced devices can be used as photocapacitors and photodiodes in optoelectronic systems.

Keywords: Composite photodiode, Nanomaterial, Semiconductor, Photoresponse, Solar radiation.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Karbon atomu için elektron durumlarının atomlar arası mesafeye bağlı enerji dağılımı.	15
Şekil 2.2.	Katkısız bir yarıiletken için 16	16
Şekil 2.3.	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu.	17
Şekil 2.4.	N-tipi yarıiletken a) Si’ a Sb katkılanması ve b) Donör atomlarının enerji seviyeleri.	19
Şekil 2.5.	P-tipi yarıiletken a) Si’ a B katkılanması ve b) Akseptör atomlarının enerji seviyeleri	20
Şekil 2.6.	CdO kübik birim hücre yapısı.	21
Şekil 2.7.	NiO kristal yapısı.	22
Şekil 2.8.	ZnO kristal yapısı.	22
Şekil 3.1.	Fotonlarla uyarım yapıldığında (a) bantlar arası geçiş (b) safsızlık seviyesi ile iletim bandı arasındaki fotouyarma.	24
Şekil 3.2.	Fotodiyotun şematik gösterilişi.	25
Şekil 3.3.	Aydınlatma altında metal-yarıiletken eklem şematik görüntüsü.	26
Şekil 3.4.	a) P-n eklem fotodiyot ve b) Yasak enerji aralığından yüksek enerjiye sahip olan bir foton için elektron-boşluk çifti üretimi şematik gösterimi.	27
Şekil 3.5.	Schottky fotodiyotta sıfır besleme geriliminde meydana gelen fotoakım.	28
Şekil 3.6.	Fotodiyotun karanlık ve aydınlık durumlarda I-V karakteristikleri.	29
Şekil 3.7.	Işık şiddetine göre V_{oc} ve I_{sc} değerleri.	31
Şekil 3.8.	R_s ve R_{sh} ’ dan oluşan fotodiyot için temsili eşdeğer devre modeli.	33
Şekil 3.9.	Fotodiyotun karanlık ve aydınlık durumlarda I-V karakteristiği.	34
Şekil 3.10.	qV_{oc}/nkT ’ nin fonksiyonu olarak FF , V_m/V_{oc} ve I_m/I_{sc} ’ nin değişimi.	34
Şekil 4.1.	Sol-jel kaplama yöntemi aşamaları.	36
Şekil 4.2.	Sol-jel daldırarak kaplama yöntemi.	37
Şekil 4.3.	Sol-jel döndürerek kaplama yöntemi.	38
Şekil 5.1.	NiO:CdO ince filmlerin üretilmesinde kullanılacak sol-jel çözeltileri.	40
Şekil 5.2.	Fytronix 8000 döndürerek kaplama cihazı.	41
Şekil 5.3.	Yüksek sıcaklık fırını.	41
Şekil 5.4.	NiO:ZnO ince filmlerin üretilmesinde kullanılacak sol-jel çözeltileri.	42
Şekil 5.5.	Üretilen fotodiyotların temsili resimleri.	43
Şekil 5.6.	Keithley 4200 yarıiletken karakterizasyon sistemi.	44
Şekil 5.7.	Fytronix 9200 solar simülatör.	44
Şekil 6.1.	NiO:CdO ince filmlerin XRD kırınım desenleri.	45
Şekil 6.2.	NiO:CdO ince filmlerin FE-SEM görüntüleri.	47
Şekil 6.3.	NiO:CdO ince filmlerin EDX analiz sonuçları.	48
Şekil 6.4.	NiO:ZnO ince filmlerin XRD kırınım desenleri.	49
Şekil 6.5.	Saf ZnO ve NiO:ZnO kompozit ince filmlerin FE-SEM görüntüleri.	50
Şekil 6.6.	Saf ZnO ve NiO:ZnO kompozit ince filmlerin EDX analiz sonuçları.	51

Şekil 6.7.	Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların I-V karakteristikleri	52
Şekil 6.8.	Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların ışık yoğunluğuna göre RR değerleri.	53
Şekil 6.9.	Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların ışık yoğunluğuna göre R değerleri.	55
Şekil 6.10.	Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların I_{ph} -P çizimleri.....	56
Şekil 6.11.	Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların I-V karakteristikleri	58
Şekil 6.12.	Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların ışık yoğunluğuna göre RR değerleri.....	59
Şekil 6.13.	Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların ışık yoğunluğuna göre R değerleri.	60
Şekil 6.14.	Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların I_{ph} -P çizimleri.....	61
Şekil 6.15.	Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların geçici fotoakım-zaman grafikleri.....	62
Şekil 6.16.	Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların geçici fotokapasitans - zaman grafikleri.....	64
Şekil 6.17.	Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların fotoiletkenlik - zaman grafikleri	65
Şekil 6.18.	Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların geçici fotoakım-zaman grafikleri.....	66
Şekil 6.19.	Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların geçici fotokapasitans - zaman grafikleri.....	68
Şekil 6.20.	Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotoiletkenlik - zaman grafikleri.	69
Şekil 6.21.	Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotları C-V karakteristikleri	70
Şekil 6.22.	Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların G-V karakteristikleri.	71
Şekil 6.23.	Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların C_{ADJ} -V karakteristikleri.	73
Şekil 6.24.	Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların G_{ADJ} -V karakteristikleri.	74
Şekil 6.25.	Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların R_s -V karakteristikleri.	75
Şekil 6.26.	Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların D_{it} -F grafikleri	77
Şekil 6.27.	Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların C-V karakteristikleri.	78
Şekil 6.28.	Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların G-V karakteristikleri	79
Şekil 6.29.	Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların C_{ADJ} -V karakteristikleri	80
Şekil 6.30.	Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların G_{ADJ} -V karakteristikleri	81

Şekil 6.31. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların R_s -V karakteristikleri	82
Şekil 6.32. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların D_{it} -F grafikleri	84



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 6.1. NiO: CdO ince filmlerin kırınım düzlemlerinin 2θ açıları.....	46
Tablo 6.2. NiO: ZnO ince filmlerin ZnO'ya ait kırınım düzlemlerinin 2θ açıları.....	49
Tablo 6.3. NiO: ZnO kompozit ince filmlerin NiO'ya ait kırınım düzlemlerinin 2θ açıları.	49
Tablo 6.4. Al/NiO: CdO/p-Si/Al fotodiyotların n ve ϕ_b değerleri.	54
Tablo 6.5. Al/NiO: ZnO/p-Si/Al fotodiyotların n ve ϕ_b değerleri.....	60
Tablo 6.6. Al/NiO: CdO/p-Si/Al ve Al/NiO: ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotodiyot parametreleri.....	85

SİMGELER

A	: Hesaplanan diyot alanı
A^*	: Richardson sabiti
Ag	: Gümüş
A_j	: Eklemin yayıldığı alan
Al	: Alüminyum
As	: Arsenik
c	: Işık hızı
C	: Kapasite
C_{ADJ}	: Düzeltilmiş kapasite
Cd	: Kadmiyum
CdO	: Kadmiyum oksit
CdS	: Kadmiyum sülfür
C_m	: Ölçülen kapasite
C_{ox}	: Ara katmanın kapasitesi
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
d	: Donör konsantrasyonu
D_{it}	: Arayüz durum yoğunluğu
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik geçirgenliği
ϵ_s	: Dielektrik sabiti
e	: Elektron yükü
E_A	: Boşluğu serbest bırakmak için gerekli olan enerji
E_c	: İletim bandı
E_D	: Bir elektronu donörden iletkenlik seviyesine çıkarmak için gerekli enerji
E_F	: Fermi enerji seviyesi
E_g	: Yasak enerji aralığı
Eu	: Evropiyum
E_v	: Valans bandı
$f(E)$	: Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
Fe	: Demir
ϕ_b	: Bariyer yüksekliği
G	: İletkenlik
Ga	: Galyum
G_{ADJ}	: Düzeltilmiş iletkenlik
Ge	: Germanyum
Gd	: Gadolinyum
G_m	: Ölçülen iletkenlik
G_{max}	: Ölçülen maksimum iletkenlik
GO	: Grafen oksit
h	: Plank sabiti
$h\nu$	: Foton enerjisi
I	: Akım
I_0	: Doyma akımı
I_F	: İleri yönlü akım

$I_{\text{karanlık}}$	: Karanlıktaki akım
I_m	: Maksimum güç noktasındaki akım
I_{ph}	: Fotoakım
I_R	: Ters yönlü akım
I_{SC}	: Kısa devre akımı
In	: İndiyum
J	: Akım yoğunluğu
$J_{\text{dr}}(\lambda)$	: Sürüklenme akım yoğunluğu
$J_n(\lambda)$	: Elektron difüzyon akım yoğunluğu
$J_p(\lambda)$	: Boşluk difüzyon akım yoğunluğu
k	: Boltzmann sabiti
La	: Lantan
λ	: Dalga boyu
Li	: Lityum
m	: Işık yoğunluğu katsayısı
MgO	: Magnezyum oksit
Mn	: Mangan
n	: İdealite faktörü
n-Si	: N tipi silisyum
Ni	: Nikel
NiO	: Nikel oksit
η	: Spektral kuantum verimi
O	: Oksijen
ω	: Açısal frekans
P	: Aydınlatma gücü
P_m	: Maksimum çıkış gücü
p-Si	: P tipi silisyum
q	: Elektron yükü
R_c	: Kontak direnci
R_λ	: Fotodiyot duyarlılığı
R_s	: Seri direnç
R_{sh}	: Şönt direnci
ρ	: Altılığın öz direnci
Ru	: Rutenyum
Sb	: Antimon
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
SnO_2	: Kalay oksit
$\text{SR}(\lambda)$	: İç spektral cevap
t	: Zaman
T	: Mutlak sıcaklık
θ	: Kırınım açısı
Ti	: Titanyum
TiO_2	: Titanyum dioksit
W_d	: Tükenim bölgesinin genişliği
W_0	: Altlık kalınlığı
V	: Gerilim

V_B	: Engeli aşma gerilimi
V_{bi}	: Difüzyon voltajı
V_m	: Maksimum güç noktasındaki voltaj
V_{OC}	: Açık devre voltajı
Zn	: Çinko
ZnO	: Çinko oksit



KISALTMALAR

AC	: Alternatif akım
CSP	: konsantre güneş enerjisi
DC	: Doğru akım
EDX	: Enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi
FE-SEM	: Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu
FF	: Doldurma faktörü
FTO	: Flor katkılı kalay oksit
FV	: Fotovoltaik
HF	: Hidroflorik asit
ITO	: İndiyum kalay oksit
LED	: Işık yayan diyot
PCBM	: Fenil C61-butirik asit metil ester
PEDOT:PSS	: Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polyesterine sülfonat
PR	: Fotoduyarlılık
R	: Fototepki
RR	: Doğrultma oranı
RF	: Radyo frekansı
XRD	: X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Beşeri ve ekonomik faaliyetlerin büyük ölçüde fosil yakıtlara bağlı olması, küresel iklimde yoğun değişikliklere sebep olmuştur. Bu nedenle son yıllarda yeşil enerji teknolojisinin gelişimi oldukça acil bir konu haline gelmiştir [1]. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlilerinden biri dünyanın yüksek ve sürekli artan enerji ihtiyacını karşılamada inanılmaz vaatlerde bulunan güneş enerjisidir. Güneş enerjisinin elektriğe dönüşümü hem düz fotovoltaiik (FV) hem de konsantre güneş enerjisi (CSP) sistemleri tarafından gerçekleştirilir. Böylelikle temiz ve ucuz bir enerji elde edilmiş olur. Bu cihazlar tarafından üretilen çıkış gücü yararlanılabilen güneş enerjisi miktarına bağlıdır. Güneş enerjisi dönüşüm sistemlerinin düşük enerji üretim verimliliği insanlar tarafından sıklıkla eleştirilmektedir [1-3]. Güneş enerjisi üretim verimliliğinin yanı sıra güneş enerjisinin toplanma süresini artırmak için en etkili yöntemlerden biri ise güneş paneli takip sistemleri kullanmaktır [1, 2]. Bu sistemle güneş panelleri, üzerindeki güneş radyasyonunu en üst düzeye çıkarmak için ufuktan ekvatora doğru optimum eğim açılarıyla yönlendirilirler. Ayrıca gün içerisinde güneş ışınlarına dikey olarak optimum bir pozisyonda tutulan panellerin güneş ışığından daha fazla faydalanarak enerji dönüşüm verimlilikleri artırılır [4, 5]. Güneş enerjisi kolektörleri ve panellerinin enerji üretim verimlerini artırmak için güneş paneli takip sistemlerinde ve elektronik endüstrisinde ışığın doğrudan tespiti için sıklıkla kullanılan sensörlerden biri ışığa duyarlı olan fotodiyotlardır [6, 7]. Fotodiyotlar optik bir sinyali kabul ederek bunu bir elektriksel çıkışa dönüştüren devre elemanlarıdır. Işığa çok iyi tepki verebilmek için düşük bir ters voltaj gerektiren fotodiyotlar elektronik devre elemanları arasında önemli bir yere sahiptirler [8, 9]. Gelişen teknoloji ile birlikte son yıllarda Schottky, p-i-n, p-n ve heteroeklem fotodiyotlar gibi yarı iletken tabanlı cihazlar, elektro-optik iletişim için ve optoelektronik sistemlerde umut verici cihazlar haline gelmiştir [7, 10].

Uzun yıllardan beri metal-yarıiletken yapılar, transistörler, radyo frekansı detektörleri, fotodiyotlar ve güneş pilleri yarıiletken cihazların önemli bir parçasını oluşturmaktadır [11]. Elektronik cihaz üretiminde umut vadeden malzemelerin başında silikon (Si) ve metal oksit yarıiletken malzemelerin geldiği bilinmektedir. İlgi çekici elektronik davranışlarından dolayı Si ve metal oksit malzemeler, yeni tip fotodiyotları üretmek için kullanılmaktadırlar [10]. Fotodiyotlarda titanyum dioksit (TiO_2), çinko oksit (ZnO), kadmiyum oksit (CdO), kalay oksit (SnO_2) ve nikel oksit (NiO) gibi yarıiletkenler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu metal oksit yarıiletkenler arasında ZnO (n-tipi) doğrudan ve geniş (~ 3.3 eV) enerji bant aralığına sahip olması, katkılanarak optik ve elektriksel özelliklerinin yönlendirilebilmesi, yüksek eksiton bağlama enerjisi, nispeten düşük toksisite ve nispeten düşük işlem sıcaklığı gibi özellikleri nedeniyle oldukça ilgi çekicidir. Bu özelliklerinden dolayı birçok elektrik ve optoelektronik uygulamada kullanım alanı bulmaktadır [12-22]. Bu yarıiletkenlerden biri olan NiO 'da geniş bant aralığına (3.6 - 4.0 eV) sahip olması, p-

tipi iletkenliği, büyük eksiton bağlama enerjisi, yüksek delik hareketliliği, düşük malzeme maliyeti, ümit verici iyon depolaması, optik özellikleri ve farklı yöntemlerle üretilebilmesi nedeniyle oldukça ilgi çekicidir. Bu özelliklerinden dolayı NiO, lityum iyon piller, güneş pilleri, süperkapasitörler, kimyasal sensörler, fotodiyotlar ve elektrokromik kaplamalarda kendisine uygulama alanı bulmuştur. Bunların yanında CdO'da fotovoltaiik güneş pilleri, optoelektronik cihazlar, sıvı kristal ekranlar, güneş pilleri, lazer ve fotodiyotlarda düşük elektrik direncine sahip bir bant aralığına (2.15 eV - 2.7 eV) sahip olması, yüksek taşıyıcı konsantrasyonu, Cd ara boşlukları, oksijen boşluklarının doğal kusurları, düşük direnci, yakın ultraviyole bölgedeki hassasiyeti ve yüksek şeffaflığa sahip olması nedeniyle tercih edilmektedir [9, 23-26]. Si'da görünür ve UV foto algılama uygulamaları için 1.1 eV'lık dar bir bant aralığına sahip olmasından dolayı oldukça uygun bir malzemedir [9].

Si ve metal oksit tabanlı fotodiyotların fototepki özellikleri farklı bir element katkılama ile değiştirilebilir ve geliştirilebilir. Fotodiyotların özelliklerini değiştirmekte ve geliştirmekte kullanılan yöntemlerden biride katkılamanın yanında, metal oksit yarıiletkenleri farklı oranlarda karıştırarak yeni bir kompozit yapı elde etmektir [23-25, 27]. İkinci metal oksit fotodiyot üretiminde kullanılan aktif tabakanın elektriksel ve optik özelliklerini değiştirmektedir [10]. Bu nedenle kompozit fotodiyotlar temiz güneş enerjisinden yararlanma beklentilerine büyük oranda cevap verebilmektedir [28]. Bunun yanında p-n tipi metal oksit yarıiletkenlerden oluşan heteroeklem ince filmlerden meydana gelen cihazlar optoelektronik ve fotovoltaiik uygulamalar için son yıllarda umut vadeden alternatiflerden biri haline gelmiştir ve halen araştırılması gereken bir konudur [29].

Si ve metal oksit tabanlı fotodiyotlar doğru akım (DC) ve radyo frekansı (RF) sıçratma, darbeli lazer biriktirme, elektrokimyasal biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, sol-jel ve püskürtme pirolizi gibi farklı ince film kaplama yöntemleri kullanılarak üretilebilirler. Tüm bu tekniklerin kendilerine has avantaj ve dezavantajları olmakla birlikte sol-jel döndürerek kaplama yönteminin düşük sıcaklıkta üretim, düşük maliyet, geniş bir kaplama, düşük öncü hacimli vakumsuz bir teknik olması ve kolay teknoloji gibi birçok avantajı vardır [9, 28, 30].

Farklı araştırmacılar tarafından ZnO-TiO₂ [31], CdO-TiO₂ [32], ZnO-CdO [8, 27, 33], ZnO-NiO [29, 33, 34] ve ZnO-MgO [10], kompozit fotodiyotlar farklı metal oksit oranlarında üretilmiş, elektriksel ve fototepki özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada, Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlar dinamik sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretilmiştir. İnce filmleri oluşturan yapılar X-ışını kırınımı (XRD) ile belirlenmiştir. Alan emisyon taramalı elektron mikroskopu (FE-SEM) kullanılarak üretilen ince filmleri oluşturan yapıların morfolojileri araştırılmıştır. İnce filmleri meydana getiren elementler ise enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile tespit edilmiştir. Üretilen kompozit esaslı fotodiyotların elektriksel ve fototepki

özellikleri KEITHLEY 4200 yarıiletken karakterizasyon sistemi ve FYTRONIX 9200 solar simülatör cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

1.1. Literatür Özeti

Bu bölümde tez çalışması için seçilen yarıiletken metal oksitler (CdO, NiO ve ZnO) kullanılarak saf ve farklı element katkılarıyla üretilen fotodiyotlarla ilgili yapılan çalışmalar kısaca özetlenmiştir. Ayrıca tezin ana konusu olan farklı metal oksit yarıiletkenlerle üretilen kompozit fotodiyotlarla ilgili farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalardan da bahsedilmiştir.

Dugan vd. çalışmalarında [35], saf ve farklı mol oranlarda (% 0.2, % 6 ve % 10) Mangan (Mn) katkılı fotodiyotları sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretmişlerdir. Altlık olarak p-Si kullanmışlardır. Ürettikleri fotodiyotların yüzey özelliklerini atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile karakterize etmişlerdir. Fotodiyotların optoelektronik ve elektriksel özelliklerini I-V ve I-t ölçümleri ile belirlemişlerdir. Tüm fotodiyotların doğrultma özelliğinin olduğu ve Mn katkısının fotovoltajik özellikleri bir miktar geliştirerek fotoakım değerini 10^{-3} A aralığından 10^{-2} A aralığına yükselttiğini tespit etmişlerdir. En yüksek fotoakım değeri Mn katkılı fotodiyotta 3.7×10^{-3} A olarak ölçülmüştür. Çalışmalarında, ürettikleri fotodiyotların artan aydınlatma yoğunlukları için artan fotoakım elde edildiğini, diyetotların iyi fotovoltajik özellikler gösterdiğini, artan AC sinyal frekansı için azalan kapasite gözlemlendiğini ve özellikle Mn katkılı CdO diyetotlar için belirli voltaj aralığında (0 V ile -1 V arasında) belirli frekans derecelerinde belirgin pikler gözlemlendiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca Mn katkısının arayüzey durumlarının yoğunluğunu biraz arttırdığı ve arayüz durumlarından dolayı piklerin meydana geldiği sonucuna varmışlardır.

Gozeh vd. çalışmalarında [9], saf ve farklı oranlarda (at.% 0.1, 0.5, 2 ve 4) Zn katkılı CdO ince filmleri p-Si üzerine sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile kaplamışlar ve Al/Zn-CdO/p-Si/Al fotodiyotları elde etmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların morfolojik, elektriksel ve optik özelliklerini belirlemişlerdir. Üretilen fotodiyotların doğrultma özelliklerinin olduğu ve CdO'ya at.% 0.1 Zn katkılıandığında doğrultma davranışının daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Ürettikleri tüm fotodiyotların ışığa karşı hassas olduğunu görmüşler ve en yüksek fotoduyarlılık değerini at.% 0.1 Zn katkılı fotodiyotta 1.41×10^{-5} A/W olarak belirlemişlerdir. Çalışmalarında, üretilen fotodiyotların elektriksel özelliklerinin gerilim ve frekansa büyük ölçüde bağımlı olduğu ve Zn katkılı CdO cihazların optoelektronik uygulamalarda özellikle sensör ve fotodiyot teknolojisinde kullanılabileceği sonuçlarına varmışlardır.

Ravikumar vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada [36], Evropiyum (Eu) katkılı CdO fotodiyotlar (Al/Eu-CdO/p-Si/Al) parfüm atomizer tabanlı sprej tekniği ile üretilmiştir. Ürettikleri fotodiyotların yapısal, morfolojik, optiksel ve I-V özelliklerini belirlemişlerdir. Parfüm atomizer tabanlı sprej tekniği ile Eu katkılı CdO fotodiyotların başarıyla üretildiğini ve kübik yapıyla birlikte

neredeyse küresel tanelere sahip iyi örtülü ince filmlerin üretildiğini tespit etmişlerdir. Ürettikleri tüm fotodiyotlar doğrultma davranışı ve ışığa karşı hassasiyet göstermiştir. En yüksek fotoduyarlılık değerini ağırlık % 3 Eu katkılı numunede 279 mA/W olarak elde etmişlerdir. Al/Eu-CdO/p-Si/Al heteroeklem diyotun fotosensör ve diğer optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Raj vd. çalışmalarında [37], CdO/p-Si fotodiyotların yapısal, optiksel ve fotodiyot özelliklerine tavlama sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Fotodiyotları sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretmişlerdir. Tavlama işlemini 550 °C, 650 °C ve 750 °C sıcaklıklarda gerçekleştirmişlerdir. İnce filmlerin kübik yapılardan oluştuğunu ve tavlama sıcaklığı arttıkça kristal kalitelerinin arttığını tespit etmişlerdir. Diyotların idealite faktörünün CdO'nun sinterleme sıcaklıkları ile 5.2'den 4.2'ye düştüğünü bulmuşlardır. 750 °C'de sinterlenmiş CdO numunesi kullanılarak oluşturulan fotodiyotun sırasıyla 0.34 A/W ve % 109'luk en yüksek fotoduyarlılık ve harici kuantum verim değerlerini sergilediğini tespit etmişlerdir. Fotoakım ölçümlerinden, CdO/p-Si heteroeklemli fotodiyotların optoelektronik cihazlar için iyi adaylar olduğu sonucuna varmışlardır.

Mohanraj vd. çalışmalarında [38], mikrodalga ışınlama tekniği ile saf ve farklı oranlarda (ağırlık % 5, 10 ve 15) Ti katkılı CdO nanoparçacıkları sentezlemişlerdir. Sentezledikleri bu nanoparçacıkları p-Si üzerine spreyle kaplama ile kaplamışlar ve böylelikle fotodiyotları üretmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların yapısal, morfolojik ve optoelektrik karakterizasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Tüm fotodiyotlar doğrultma davranışı göstermiştir ve Ti oranı arttıkça doğrultma oranı 5.16'dan 7.10'a kadar yükselmiştir. Tüm fotodiyotların ışığa karşı hassas olduklarını ve en yüksek fotoduyarlılığa sahip fotodiyotun yüksek Ti oranı katkılanan fotodiyot olduğunu (38.95 mA/W) tespit etmişlerdir. Ti katkılanmanın fotodiyot özelliklerini geliştirdiği ve en iyi özelliklere sahip fotodiyotun ağırlık % 15 Ti katkılı CdO fotodiyot olduğunu belirlemişlerdir. Çalışmalarında, n-TiCdO/p-Si diyotların fotoiletken aktivitelere sahip olduğu ve fotodedektör olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Rajini vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada [39], ağırlık % 0, 1, 3 ve 5 Demir (Fe) katkılı CdO p-Si üzerine parfüm atomizer tekniği ile kaplanmış ve fotodiyotlar üretilmiştir. Üretilen fotodiyotların yapısal, morfolojik, optiksel, elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. En iyi özellikleri ağırlık % 3 Fe katkılı numunenin gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu numunenin en düşük öz direnç değerine ($4.02 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$), yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna ($22.92 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) ve yüksek hareketliliğe ($6.78 \text{ cmV}^{-1} \text{ s}^{-1}$) sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu numunenin en yüksek fotoakıma ($1.62 \times 10^{-2} \text{ A}$) ve fotoduyarlılığa (0.15 A/W) sahip fotodiyot olduğunu tespit etmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotlardan özellikle ağırlık % 3 Fe katkılı fotodiyotun fotodiyot uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Ravikumar vd. çalışmalarında [40], p-Si üzerine % 0, 1, 3 ve 5 Gadolinyum (Gd) katkılı CdO ince filmleri parfüm atomizer tekniği ile kaplamışlar ve fotodiyotları üretmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. En iyi fotodiyot özelliklerini % 3 Ga katkılı fotodiyot göstermiştir. Tüm fotodiyotların ışığa karşı hassas olduklarını ve en yüksek fotoduyarlılık değerine sahip fotodiyotun yaklaşık 365 mA/W ile % 3 Gd katkılı fotodiyot olduğunu tespit etmişlerdir. Ürettikleri cihazların optoelektronik cihazlarda fotodiyot olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Mohanraj vd. çalışmalarında [41], Rutenyum (Ru) katkılı CdO nanoparçacıkları mikrodalga ışınlama tekniği ile üretmişler ve bu nanoparçacıkları fotodiyot üretiminde kullanmışlardır. Katkılama ağırlık % 0, 1, 3 ve 5 Ru oranlarında gerçekleştirilmiş ve p-Si üzerine Ru katkılı CdO jet nebulizatör yöntemi ile kaplanmıştır. Nanoparçacıkların yapısal, morfolojik, optiksel ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca üretilen diyotların diyot parametrelerinin tespiti için akım yoğunluğu-gerilim (J-V) analizi gerçekleştirmişlerdir. Tüm fotodiyotların doğrultma davranışı gösterdiği ve ışığa karşı hassas olduğunu tespit etmişlerdir. Ürettikleri n-RuCdO/p-Si diyotun iyi bir fotoiletken tepkiye sahip olduğu ve fotodedektör uygulamaları için potansiyel bir aday olduğu sonucuna varmışlardır.

Khusayfan gerçekleştirdiği çalışmada [25], p-Si üzerine farklı molar oranlarda (GO:NiO = 0, 0.01 ve 0.03) elde ettiği nanokompozit tozları damla döküm yöntemi ile p-Si üzerine kaplamıştır ve Al/grafen oksit katkılı (GO)-NiO nanokompozit/p-Si/Al fotodiyotları üretmiştir. Üretilen fotodiyotların I-V, C-V, geçici fotoakım, fotokapasitans ve fotoiletkenlik özelliklerini araştırmıştır. Üretilen tüm fotodiyotların doğrultma özelliği gösterdiğini ve ışığa karşı hassas olduğunu tespit etmiştir. Fotoduyarlılığı ve fotoakım değeri en yüksek olan numunenin 0.01 GO katkılı numune olduğunu belirtmiştir. GO katkılı NiO arayüz tabakasına sahip diyotun optoelektronik uygulamalarda fotodiyot veya fotokapasitör olarak kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Soylu vd. çalışmalarında [26], saf, tavlanmamış Karbon katkılı NiO nanotel parçacıkları ve 400 °C'de 6 saat tavlanmış karbon katkılı NiO nanotel parçacıkları sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile p-Si üzerine kaplamışlar ve fotodiyotları üretmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların yapısal, morfolojik ve fotodiyot özelliklerini araştırmışlardır. Tüm fotodiyotların iyi doğrultma davranışı gösterdiğini ve ışığa karşı hassas olduklarını tespit etmişlerdir. Karanlık durumda, fotodiyotların geçici fotoakım değerleri, büyütülmüş, karbonatlanmış ve 400 °C'de tavlanmış numuneler için sırasıyla 10^{-8} A, 10^{-7} A ve 10^{-9} A olarak ölçülmüştür. NiO/p-Si cihazı 10 kHz de maksimum 2.417×10^{-9} kapasite değerine sahipken, NiO'ya karbon katılmasıyla bu değer 3.585×10^{-9} 'a yükselmiştir. Tavlanmış numunede ise düzensiz bir rejim meydana gelmiştir. Üretilen fotodiyotların optoelektronik uygulamalarda fotodiyot olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Gupta vd. çalışmalarında [30], p-Si üzerine saf ve at.% 0.1, 0.2, 1.0 ve 2.0 oranlarında Bakır (Cu) katkılı NiO ince filmleri sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile kaplamışlar ve Al/Cu–NiO/p-Si/Al fotodiyotları üretmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların optiksel, elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. Tüm fotodiyotların doğrultma davranışı gösterdiğini ve ışığa karşı hassas olduklarını belirtmişlerdir. En yüksek fotoduyarlılığa sahip fotodiyotun at.% 0.2 Cu katkılı fotodiyot olduğunu tespit etmişlerdir. Kapasite ve frekansla iletkenlikteki değişimin arayüz durumlarından kaynaklandığı ve üretilen cihazların fotosensör olarak kullanılabileceği sonuçlarına varmışlardır.

Pehlivanoglu tarafından gerçekleştirilen çalışmada [42], p-Si/n-NiO:Zn fotodiyotlar sol-jel döndürerek kaplama yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Saf NiO ve % 0.5, % 1 ve % 3 Zn katkılı NiO olmak üzere 4 numunenin fototepki ve elektriksel özelliklerini araştırmıştır. Ürettiği tüm fotodiyotların doğrultma davranışı gösterdiğini ve ışığa karşı hassas olduğunu tespit etmiştir. En yüksek fototepki gösteren numunenin % 0.5 Cu katkılı numune olduğunu tespit etmiştir. En yüksek fotoduyarlılığa sahip fotodiyotun ise katkısız olan olduğu ve bu fotodiyotta fotoduyarlılığın yaklaşık 10^{-2} A/W olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında, Zn katkısının NiO filminin elektro-optik özelliklerini değiştirdiğini ve fotodiyotların fotoiletken davranış sergilediğini gösterdiğini görmüştür. Özellikle farklı ışık şiddetleri altında yapılan I-V ölçümlerinden tüm fotodiyotların ışığa karşı hassas olduğu ve fotodiyot olarak kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Gullu vd. çalışmalarında [43], p-Si üzerine döndürerek kaplama yöntemi ile Fenil C61-butirik asit metil ester (PCBM) katkılı ZnO ile kaplamışlar ve Al/PCBM:ZnO/p-Si fotodiyotu üretmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotun yapısal, fototepki ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Ürettikleri fotodiyotun ışığa karşı hassas olduğunu ve doğrultma davranışı gösterdiğini tespit etmişlerdir. İdealite faktörünün ışık şiddeti arttıkça arttığı, bariyer yüksekliğinin ise ışık şiddeti arttıkça azaldığını görmüşlerdir. Geçici tepkilerden, diyetlerin fotoiletken ve fotokapasitif davranışlar sergilediğini gösterdiği ve birkaç optoelektronik uygulamada bu diyetun potansiyeli olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca hesaplanan seri direnç (R_s) değerlerinin, frekans ve voltajdaki değişime güçlü bir bağımlılık gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Rasool vd. gerçekleştirdikleri çalışmada [44], spreyl piroliz yöntemi ile farklı altlık sıcaklıklarında (350 °C, 375 °C, 400 °C ve 425 °C) ZnO'yu ITO cam üzerine kaplamışlardır. Bu işlemten sonra ZnO tabakasının üstüne döndürerek kaplama yöntemi ile Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polyesterine sülfonat (PEDOT:PSS) biriktirmişlerdir. Böylelikle ITO/n-ZnO/Ag fotodetektörü ve ITO/ZnO/PEDOT:PSS/Ag fotodiyotları olmak üzere iki çeşit cihaz meydana getirmişlerdir. Üretilen cihazların yapısal, morfolojik, elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. Ürettikleri tüm cihazların ışığa karşı uyarlı olduklarını ve iyi doğrultma özelliği gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ürettikleri (425 °C altlık sıcaklığında) ITO/n-ZnO/Ag fotodetektörü ve ITO/ZnO/PEDOT:PSS/Ag fotodiyotlarının fotoduyarlılıklarını sırasıyla

0.14 A/W ve 0.25 A/W olarak hesaplamışlardır. Çalışmalarında, ZnO tabanlı fotodiyotların daha hızlı fotoyanıt ve yüksek fotoduyarlılık gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Arya vd. çalışmalarında [45], ilk olarak Cu katkılı kadmiyum sülfür (CdS) nanoparçacıkları sol-jel yöntemi ile üretmişlerdir. Daha sonra ITO cam üzerine ilk olarak sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile ZnO kaplamışlar ve daha sonra bu tabakanın üzerine döndürerek kaplama yöntemi ile Cu katkılı CdS kaplamışlardır. Sonuç olarak cam/ITO/n-ZnO/p-CdS/Al fotodiyotunu üretmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotun elektriksel ve fototepki özelliklerini belirlemişlerdir. Üretilen fotodiyotun ışığa karşı hassas olduğunu belirtmişler ve fotoduyarlılığı 1.6 A/W olarak hesaplamışlardır. Çalışmalarında, ürettikleri cihazın fotonik uygulamalar için potansiyel bir fotodedektör olarak kullanılabileceği ve Cu katkılı CdS nanoparçacıklarının, optoelektronik cihazlar için kullanışlı bir p-tipi malzeme olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Yıldırım ve Adem Kocyigit çalışmalarında [46], % 0, % 0.1, % 0.5 ve % 1.0 İndiyum (In) katkılı ZnO'yu p-Si üzerine sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile kaplamışlar ve Al/In:ZnO/p-Si fotodiyotları üretmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların optiksel, elektriksel ve fototepki özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri tüm fotodiyotlar doğrultma özelliği göstermekle beraber In katkısı ile doğrultma özelliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. En yüksek fototepkiye sahip fotodiyotun 100 mW/cm² ışık şiddeti altında %1 In katkılı fotodiyot olduğunu belirlemişlerdir. In katkısının artmasıyla fotoduyarlılığın arttığı, kapasitenin ve iletkenlik değerlerinin, gerilim ve frekansın güçlü fonksiyonu olduğu ve üretilen cihazların fotodiyot uygulamalarında kullanılabileceği sonuçlarına varmışlardır.

Karthick vd. çalışmalarında [47], ZnO nanoparçacıkları ultra hızlı tek adımlı direkt enjeksiyonlu alev sentezi yöntemi ile üretmişler ve bu nanoparçacıkları damla döküm yöntemi ile p-Si üzerine kaplayarak fotodiyotu üretmişlerdir. Ürettikleri nanoparçacıkların yapısal ve morfolojik özelliklerini belirlemişlerdir. Üretilen fotodiyotun elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. Ürettikleri fotodiyotun ışığa karşı hassas olduğunu tespit etmişlerdir. Üretilen p-Si/n-ZnO fotodiyot 2.73'lük bir idealite faktörüne, 0.7 eV'lik bariyer yüksekliğine, 2.36 mA/W'lik fotoduyarlılığa ve 4.04×10^9 jones'luk dedektifliğe sahiptir. Çalışmalarında, ürettikleri fotodiyotun mavi ışık yayan diyot (LED) cihazlarla birlikte fotodedektörler olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Ruzgar ve Caglar çalışmalarında [48], saf ve % 1, % 5 ve % 10 hacim oranlarında Kalay (Sn) katkılı ZnO ince filmleri p-Si üzerinde sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile oluşturmuşlar ve Al/Sn:ZnO/p-Si fotodiyotları elde etmişlerdir. Üretilen fotodiyotların yapısal, morfolojik, fototepki ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Tüm fotodiyotların doğrultma özelliği gösterdiği ve ışığa karşı hassas olduğunu tespit etmişlerdir. En yüksek doğrultma oranı % 10 Sn katkılı fotodiyotta ± 4 V'da 4.38×10^4 olarak ölçülmüştür. Sn oranı arttıkça fotoduyarlılığın arttığını ve % 10 Sn katkılı fotodiyotun fotoduyarlılık değerinin 1.68 A/W olduğunu belirtmişlerdir. Sn

katkılanmanın ZnO tabanlı diyotun elektriksel ve optoelektrik özelliklerini iyileştirdiği, ayrıca üretilen cihazın fotosensör olarak kullanılabileceği sonuçlarına varmışlardır.

Yadav vd. gerçekleştirdikleri çalışmada [49], n-Si üzerine ZnO ince filmi sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile oluşturmuşlar ve Pd/n-ZnO/n-Si fotodiyotu elde etmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotun yapısal, morfolojik, elektriksel ve fototepki özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri fotodiyotun ışığa karşı hassas olduğunu ve yaklaşık 8.39 A/W fotoduyarlılık değerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotun UV detektörü olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Huang vd. çalışmalarında [50], farklı konsantrasyonlarda (0, 0.01, 0.02 ve 0.03 M) Lityum (Li) katkılı ZnO nanoçubukları hidrotermal metotla ITO cam üzerinde oluşturmuşlar ve fotodiyotları üretmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların yapısal, morfolojik, elektriksel ve fototepki özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların iyi doğrultma özelliği gösterdiğini ve ışığa karşı hassas olduklarını tespit etmişlerdir. 0.01, 0.02 ve 0.03 M Li katkılı fotodiyotların fotoduyarlılıklarını sırasıyla 21.34 A/W, 27.94 A/W ve 34.87 A/W olarak hesaplamışlardır. Ürettikleri fotodiyotların fotovoltmik ve fotoduyarlılık özelliklerinin olduğu sonucuna varmışlardır.

Hendi çalışmasında [51], p-Si ve n-Si üzerine ayrı ayrı farklı oranlarda GO katkılı (GO:ZnO = 0.01:0.03:0.1) ZnO ince filmleri oluşturmuştur ve ZnO-GO/p-Si ve ZnO-GO/n-Si fotodiyotları elde etmiştir. Elde ettiği fotodiyotların elektriksel ve fototepki özelliklerini incelemiştir. Tüm fotodiyotların doğrultma özelliği gösterdiği ve doğrultma özelliğinin GO katkısından etkilendiğini tespit etmiştir. Üretilen tüm fotodiyotların ışığa karşı hassas olduklarını belirtmiştir. En yüksek fotoduyarlılığı 100 mW/cm² ışık altında 0.03 M GO:ZnO oranına sahip ZnO-GO/p-Si fotodiyotta 0.5 A/W olarak hesaplamıştır. ZnO-GO/p-Si fotodiyotların fototepki özelliklerinin ZnO-GO/n-Si diyotlardan daha iyi olduğu ve üretilen fotodiyotların optoelektronik uygulamalar için fotosensör olarak kullanılabileceği sonuçlarına varmıştır.

Tursucu vd. çalışmalarında [52], p-Si üzerine saf ve Krom (Cr) katkılı ZnO ince filmleri kimyasal spreyl piroliz yöntemi ile kaplamışlar ve Au/Cr:ZnO/p-Si fotodiyotları elde etmişlerdir. Elde ettikleri fotodiyotların elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. Ürettikleri fotodiyotlar doğrultma özelliği göstermiştir ve ışığa karşı hassastır. Cr katkılı numunenin doğrultma oranının daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Cr katkılı fotodiyot en yüksek fotoduyarlılığı göstermiştir ve fotoduyarlılık değeri 100 mW/cm² ışık altında 1.57 A/W olarak hesaplanmıştır. Cr katkılı fotodiyotun fototepki ve elektriksel özelliklerinin daha iyi olduğu ve bu fotodiyotun optoelektronik uygulamalarda daha uygun olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Echresh vd. çalışmalarında [53], saf ve % 6 Ag, % 6 Cd ve % 6 Ni katkılı ZnO ince filmleri FTO cam üzerinde hidrotermal yöntemle oluşturmuşlardır. Daha sonra bu filmler üzerine termal buharlaştırma ile Ni kaplamış ve tavlayarak oksitleri meydana getirmişlerdir. Böylelikle p-NiO/n-Zn_{0.94}M(M = Ag, Cd ve Ni)_{0.06}O fotodiyotları elde etmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların yapısal,

morfolojik, fototepki ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Tüm fotodiyotların doğrultma davranışı gösterdiğini ve fotoduyarlı olduklarını tespit etmişlerdir. En iyi fotodiyot özelliklerini p-NiO/n-Zn_{0.94}Ag_{0.06}O fotodiyotun gösterdiğini belirtmişler ve en yüksek fotoduyarlılığı bu numunede yaklaşık 4.48×10^3 A/W olarak hesaplamışlardır. Ayrıca en yüksek fototepki değeri de yine bu numunede yaklaşık 13.56 olarak elde edilmiştir. Ag elementi katkısının p-NiO/n-ZnO fotodiyotların fototepki özelliklerini geliştireceği sonucuna varmışlardır.

Buyuk ve Ilcan p-Si üzerini % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve % 1.0 Lantan (La) katkılı ZnO ince filmleri sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile kaplamışlar ve p-Si/n-ZnO:La fotodiyotları elde etmişlerdir [54]. Ürettikleri fotodiyotların elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. Tüm fotodiyotların doğrultma davranışı gösterdiğini ve ışığa karşı hassas olduklarını tespit etmişlerdir. En yüksek fototepki gösteren numunenin % 0.8 La katkılı numune olduğunu belirtmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların bir iyi fotoiletken davranış gösterdiği ve bu diyetotların fotodiyot sensörü gibi optoelektronik cihaz uygulamaları olarak kullanılabileceği sonuçlarına varmışlardır.

Gozeh vd. çalışmalarında [55], p-Si üzerine Cd ve La katkılı ZnO ince filmleri sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile kaplamışlar ve Al/p-Si/M(M = Cd ve La):ZnO/Al fotodiyotları üretmişlerdir. Üretim işleminde Cd oranı ağırlık % 0.1 olarak sabit tutulmuş ve La oranı ağırlık % 0.1, 0.5, 2 ve 4 olarak seçilmiştir. Ürettikleri fotodiyotların yapısal, morfolojik, optiksel, elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen tüm fotodiyotların doğrultma özelliği gösterdiği ve ışığa karşı hassas olduklarını belirlemişlerdir. En yüksek fototepki değerini 2263 olarak ağırlık % 0.1 Cd ve ağırlık % 0.1 La katkılı ZnO fotodiyotta elde etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlardan, Cd-La/ ortak katkılı ZnO/p-Si diyetotlarının geliştirilebileceğini ve fotodedektörler gibi optoelektronik cihazlarda potansiyel uygulamasının önünü açabileceğini gösterdiğini belirtmişlerdir.

Soylu vd. çalışmalarında [33], ZnO:CdO ve ZnO:NiO kompozit fotodiyotları sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretmişlerdir. ZnO:CdO ve ZnO:NiO oranlarını hacimsel olarak 2:1 ve 2.5:0.5 olarak seçmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların optiksel, elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. Tüm fotodiyotlar doğrultma davranışı göstermiş ve en yüksek doğrultma oranı 2.5ZnO-0.5NiO kompozit fotodiyotta 752 olarak hesaplanmıştır. Tüm fotodiyotların ışığa karşı hassas olduğunu tespit etmişler ve en yüksek fotoduyarlılığı 2ZnO:1CdO kompozit fotodiyotta 2.26 A/W olarak hesaplamışlardır. Yine bu fotodiyotun fototepkisi en yüksektir (3.26×10^2). Elde ettikleri sonuçlardan, ZnO:CdO/p-Si ve ZnO:NiO/p-Si heteroeklem diyetotlarının fototepki davranışına ve fotokapasitif etkiye dayalı bir sensör olarak kullanılabileceğini görmüşlerdir.

Ozel ve Yildiz çalışmalarında [56], ilk olarak p-Si üzerinde ayrı ayrı ZnO ve TiO₂ ince filmleri sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile oluşturmuşlardır. Daha sonra bu ince filmler üzerinde hidrotermal yöntemle SnO₂ tabakası biriktirmişlerdir. Böylelikle SnO₂/ZnO/p-Si ve

SnO₂/TiO₂/p-Si olmak üzere iki çeşit kompozit fotodiyot meydana getirmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların yapısal, optiksel, elektriksel ve fototepki özelliklerini incelemişlerdir. Ürettikleri iki fotodiyotta doğrultma davranışı göstermiş ve ışığa karşı hassastır. SnO₂/ZnO/p-Si ve SnO₂/TiO₂/p-Si fotodiyotların fotoduyarlılıkları sırasıyla 68 mA/W ve 92 mA/W olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirdikleri çalışmanın yüksek performanslı, düşük maliyetli heteroeklem UV fotodiyotlarının üretilmesinin yolunu açabileceği sonucuna varmışlardır.

Demirezen vd. çalışmalarında [57], Al/(PCBM/NiO:ZnO)/p-Si fotodiyotların optiksel, elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. İlk olarak p-Si üzerine farklı NiO oranlarında (% 2, % 10 ve % 20) NiO:ZnO kompozit ince filmini sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile kaplamışlar ve daha sonra bu tabakanın üzerine yine aynı yöntemle PCBM kaplamışlardır. Böylelikle Al/(PCBM/NiO:ZnO)/p-Si kompozit fotodiyotları elde etmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların doğrultma özelliği olduğunu tespit etmişlerdir. Doğrultma oranlarını % 2, % 10 ve %20 NiO katkılı fotodiyotlar için ± 4 V'da sırasıyla 0.48×10^5 , 1.40×10^5 ve 0.473×10^5 olarak hesaplamışlardır. Tüm fotodiyotların ışığa karşı hassas olduklarını belirlemişler ve en yüksek fototepki değerlerini % 20 NiO katkılı kompozit fotodiyotta 1277 olarak hesaplamışlardır. Çift logaritmik I_{ph} -P grafiğinin eğimini (m) sırasıyla 0.67, 0.87 ve 0.82 olarak bulmuşlardır. Bu eğimlerden kompozit fotodiyotların fotoiletkenlik davranışı sergilediğini gösterdiği ve üretilen fotodiyotların fotosensör /fotocihaz olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Karabulut vd. çalışmalarında [32], farklı CdO:TiO₂ oranlarında (1:1, 2:1 ve 3:1) kompozit ince filmleri p-Si üzerinde sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile meydana getirmişler ve Al/CdO:TiO₂/p-Si/Al fotodiyotları üretmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotların fototepki ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Tüm fotodiyotların doğrultma davranışı gösterdiği ve ışığa karşı hassas olduklarını tespit etmişlerdir. Ürettikleri CdO:TiO₂ (2:1) kompozit fotodiyotun yaklaşık 7.5×10^3 ile en yüksek fototepki değerini gösterdiğini belirtmişlerdir. TiO₂'ye CdO katkılanarak elektriksel ve fototepki özelliklerinin ve ara yüzey durumlarının değiştirilebileceği sonuçlarına varmışlardır. Ayrıca ürettikleri fotodiyotların optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceğini görmüşlerdir.

Tataroğlu vd. çalışmalarında [8], Al/Cd_{0.4}ZnO_{0.6}/p-Si kompozit fotodiyotunu sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotun optiksel, elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. Al/Cd_{0.4}ZnO_{0.6}/p-Si kompozit fotodiyot doğrultma davranışı göstermiştir ve ışığa karşı hassastır. Çift logaritmik I_{ph} -P grafiğinin eğimini (m) 0.90 olarak bulmuşlardır. C-V ve G-V ölçümlerinden, kapasite ve iletkenlik değerlerinin voltaj ve frekansa bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Seri direnç ve arayüzey durumlarının bu ölçümleri etkileyen önemli parametreler olduğu sonucuna varmışlardır.

Sevik vd. gerçekleştirdikleri çalışmada [27], Al/ZnO:CdO/n-Si/Al kompozit fotodiyotları sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretmişlerdir. Üretimi 5:0, 4:1 ve 3:2 ZnO:CdO molar

oranlarında gerçekleştirmişlerdir. Kompozit fotodiyotların optiksel, fototepki ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Tüm fotodiyotların doğrultma davranışı gösterdiğini tespit etmişler ve en yüksek doğrultma oranını ZnO: CdO oranı 5:0 olan numunede 338 olarak hesaplamışlardır. CdO oranı arttıkça doğrultma oranının düştüğünü görmüşlerdir. Ürettikleri tüm fotodiyotların ışığa karşı hassas olduğunu tespit etmişler ve en yüksek fotoduyarlılığa sahip fotodiyotun ZnO: CdO oranı 3:2 olan fotodiyot olduğunu görmüşlerdir. ZnO: CdO oranı değiştirilerek fotodiyotların fototepki ve elektriksel özelliklerinin değiştirilebileceği ve Al/ZnO: CdO/n-Si/Al kompozit fotodiyotların fotovoltaiik uygulamalarda kullanılabileceği sonuçlarına varmışlardır.

Khusayfan çalışmasında, saf Al/ZnO/n-Si/Al, Al/ZnO_{0.8}MgO_{0.2}/n-Si/Al ve Al/ZnO_{0.6}MgO_{0.4}/n-Si/Al kompozit fotodiyotları sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretmiştir. Ürettiği fotodiyotların fototepki ve elektriksel özelliklerini incelemiştir. Tüm fotodiyotlar ışığa karşı hassastır ve doğrultma davranışı göstermiştir. Saf ZnO fotodiyotun doğrultma oranı ve fotoduyarlılığının kompozit fotodiyotlara göre daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. ZnO: MgO oranı değiştirilerek fototepki ve elektriksel özelliklerin kontrol edilebileceği, ayrıca üretilen fotodiyotların solar haberleşme için fotosensör olarak kullanılabileceği sonuçlarına varmıştır. Ayrıca fotodiyotların güneş ışığı altında hem fotoiletken hem de fotokapasif davranış sergilediğini belirtmiştir.

Al-Hazmi ve Yakuphanoglu gerçekleştirdikleri çalışmada [31], Al/TiO₂: ZnO(2:1)/p-Si/Al kompozit fotodiyotu sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile elde etmişlerdir. Fotodiyotun optiksel, elektriksel ve fototepki özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen kompozit fotodiyotun doğrultma davranışı sergilediğini görmüşler ve doğrultma oranını ± 5 V'da 6.2×10^3 olarak hesaplamışlardır. Fotodiyotun ışığa karşı hassas olduğunu tespit etmişler ve fototepki değerini ± 4 V'de 1.52×10^3 olarak hesaplamışlardır. Kompozit fotodiyotun fotoduyarlılığını ise 1.25×10^2 A/W olarak belirtmişlerdir. Ürettikleri fotodiyotun hem fotoiletken hem de fotokapasitif davranış sergilediği ve elektronik uygulamalarda optoelektronik cihaz olarak kullanılabileceği sonuçlarına varmışlardır.

1.2. Tezin Amacı

Literatür çalışmalarında, p-Si, n-Si ve ITO cam üzerine saf CdO, saf NiO, saf ZnO ve bu metal oksitlere farklı katkı elementleri katılarak (Ag, Cu, Fe, In, Mn, Ru, Zn, Sb, Sn, Cr, PCBM ve coumarin vb.) üretilen fotodiyotların, fototepki ve elektriksel özelliklerinin araştırılması ile ilgili çalışmalar mevcuttur [7, 9, 30, 37, 39, 46, 52, 58-66]. Bunların yanında farklı araştırmacılar tarafından farklı metal oksit oranlarında ZnO: TiO₂ [31], CdO: TiO₂ [32], ZnO: CdO [8, 27, 33], ZnO: NiO [33, 34], ZnO: MgO [10], SnO₂: ZnO [56] ve SnO₂: TiO₂ [56] gibi kompozit fotodiyotlar üretilmiş ve bu fotodiyotların elektriksel ve fototepki özellikleri de araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Literatür çalışmalarından görüldüğü gibi, katkılı ve katkısız NiO, CdO ve ZnO

fotodiyotlar ile ilgili çalışmalar geniş bir yelpazede araştırılmıştır. Farklı metal oksit yarıiletkenlerin kompozit bir filmde birleştirilerek fotodiyotların üretilmesi ve karakterize edilmesi ile ilgili çalışmalar ise halen sınırlı sayıdadır. Bu yüzden farklı metal oksit yarı iletken kompozit esaslı fotodiyotların, güncel olarak araştırılması gereken bir konu olduğu düşünülmektedir. Bu amaçla mevcut çalışmada, literatürde daha önce araştırılmamış olan Al/NiO: CdO/p-Si/Al kompozit fotodiyotların dinamik sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretilmesi, karakterizasyonu, fototepki ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca sınırlı sayıda araştırmacı tarafından araştırılmakla beraber, bu çalışmada Al/NiO: ZnO/p-Si/Al fotodiyotların literatürden farklı katkı oranlarında (yüksek katkı oranları) dinamik sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretilerek fotodiyot özelliklerinin değiştirilmesi ve geliştirilmesi de tezin bir diğer amacıdır. Bunların yanında son yıllarda p-n tipi ince filmlerden meydana gelen cihazların optoelektronik ve fotovoltaj uygulamalar için umut vadeden alternatiflerden biri olması ve literatürde bu tip yapıların fotodiyot uygulamalarında kullanımı ile ilgili çalışmaların oldukça sınırlı olması da bu çalışmanın yapılmasında motivasyon kaynağı olmuştur.

1.3. Tezin Bölümleri

Bu tez çalışması toplam yedi ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde tez çalışmasına genel bir giriş yapılmış ve literatürle birlikte çalışma hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca yine bu bölümde çalışmamıza yön gösterecek literatür araştırmaları kısaca özetlenmiş ve tezin amacından bahsedilmiştir.

İkinci bölümde yarıiletkenlerle ilgili genel bilgiler verilmiş ve yarıiletkenlerde bant oluşumu, bant yapısı ve Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu anlatılmıştır. Yine bu bölümde yarıiletken çeşitlerinden bahsedilmiş ve tez çalışmada kullanılan metal oksit yarıiletkenlerle ilgili bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde fotodiyotlar, fotodiyot çeşitleri ve fotodiyot parametrelerini etkileyen parametrelerden detaylıca bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde çalışmada ince film üretmede kullanılan sol-jel yöntemi anlatılmış, avantaj ve dezavantajları ortaya konmuştur. Bunun yanında sol-jel kaplama yöntemlerinden de bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde çalışmada üretilen kompozit esaslı fotodiyotların nasıl üretildiği detaylıca anlatılmıştır. Ayrıca yapısal, morfolojik, fototepki ve elektriksel özelliklerinin hangi yöntemlerle ve nasıl karakterize edildiği hakkında bilgi verilmiştir.

Altıncı bölümde yapısal, morfolojik, fototepki ve elektriksel karakterizasyon sonuçları değerlendirilmiş ve daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırmada yapılarak detaylıca anlatılmıştır.

Yedinci ve son bölümde ise çalışmadan elde edilen genel sonuçlar maddeler halinde verilmiş ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalardan bahsedilmiştir.



2. YARIİLETKENLER

Katı maddeler elektriksel iletkenlik özelliklerine göre üç sınıfa ayrılırlar (iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler). Bir maddenin yapısındaki atomların yoğunluğu, atomların madde içerisindeki hareket yetenekleri ve dış yörüngelerindeki elektron sayıları elektriksel iletkenliklerini etkiler [67, 68]. Elektriyi iyi bir şekilde ileten maddelere iletken maddeler, elektriyi iyi bir şekilde iletemeyen maddelere yalıtkan maddeler ve özdirençlerinin sıcaklığın artmasına bağılı olarak hızlıca düşmesinin yanında iletkenler ve yalıtkanlar arasında bir elektrik iletim değerine sahip olan maddelere ise yarıiletkenler denir. Yarıiletkenler katı maddeler arasında ilgi çekici özelliklerinden ötürü önemli bir yere sahiptirler ve oldukça geniş kullanım alanları vardır [68]. Bu kullanım alanlarından bazıları güneş pilleri, anahtarlar, termistörler, transistörler, diyotlar, fotodedektörler, opto-elektronik cihazlar, elektronik cihazlar ve bütünleşik devrelerdir [69].

İletken, yalıtkan ve yarıiletken maddelerin oda sıcaklığında özdirenç değerleri sırasıyla, 10^{-6} ohm.cm, $10^{14} - 10^{20}$ nohm.cm ve $10^{-2} - 10^9$ ohm.cm'dir. Yarıiletkenlerin saf ve olağanüstü kristalleri mutlak sıfır sıcaklığında yalıtkan davranış gösterirler ve iletkenlikleri sıcaklıktan, yabancı atomlardan, ışıktan ve manyetik alandan etkilenir. İletkenlik değerlerinin bu gibi etkilere bağılı olarak değişmesi ise bu maddeleri elektronik cihaz uygulamalarında ilgi çekici hale getirmektedir [67, 68, 70].

Yarıiletken maddeler iki çeşittir bu yarıiletkenlerden ilki periyodik tablonun IV grubundaki Germanyum (Ge) ve Si gibi tek çeşit atomdan oluşan elementlerdir. İkinci çeşidi ise, periyodik tablonun III ve V grubunda bulunan Galyum (Ga) ve Arsenik (As) gibi elementlerin veya II ve VI grubunda bulunan Zn ve Oksijen (O) gibi elementlerin bir araya gelerek birleşmesinden oluşanlardır. Yarıiletkenlerden en sık kullanılanları, katkılama ile iletkenliklerinin değiştirilerek kontrol edilebilmeleri, saflıklarının yüksek olması, parametrelerinin ısı ve ışık etkisi ile değiştirilebilmesinden dolayı Ge ve Si'dir [70].

Birçok alanda kullanılan yüksek teknolojik cihazların son yıllarda kullanım alanlarının artmasıyla birlikte farklı özellikteki yarıiletkenlerin üretilmesi oldukça önemlidir. Yarıiletkenler yüksek teknoloji ürünü cihazların geliştirilmesinde yararlanılan en önemli malzemelerdir ve özelliklerinin farklılaştırılarak değiştirilmesi yeni cihazların ortaya çıkmasında oldukça önemli bir yere sahiptir [67, 71].

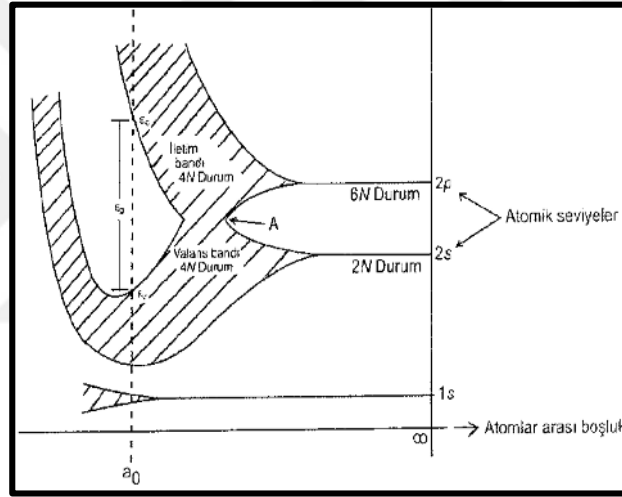
2.1. Bant Oluşumu ve Bant Yapısı

Serbest elektron modeli metal malzemelerin neredeyse tüm özelliklerinin izah edilmesinde oldukça başarılıdır. Bununla birlikte yarıiletkenler ve yalıtkanların metallere arasındaki

farklılıkları açıklamada bu model yetersiz kalabilmektedir. Bu durumdan dolayı daha detaylı modele ihtiyaç duyulmuş ve bant teorisi ortaya çıkmıştır [72].

Bir katı maddeyi oluşturan atomların yapısı ve bir araya gelme şekilleri özelliklerini etkiler. Gazlardaki gibi izole bir atom olarak adlandırılan atomlar arası mesafelerin yüksek olduğu durumlarda atomlar arasındaki etkileşim oldukça düşüktür ve elektronlar belirli bir enerji seviyelerine sahiptirler. Bu enerji seviyelerinde elektronların dizilişi Pauli dışarlama ilkesine göredir. Örnek vermek gerekirse 6 elektrona sahip karbon atomu için elektron konfigürasyonu $1s^2 2s^2 2p^2$ 'dir. En dış yörüngede 2s seviyesinde ve 2p seviyesinde olmak üzere 4 adet valans elektronuna sahiptir [69, 73].

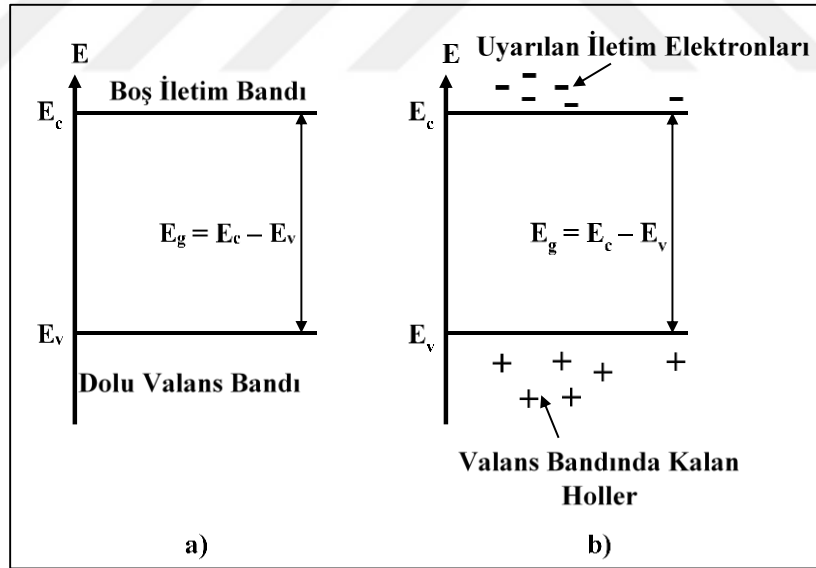
Karbon atomu için elektron durumlarının atomlar arası mesafeye bağlı enerji dağılımı Şekil 2.1'de görülmektedir [69, 73].



Şekil 2.1. Karbon atomu için elektron durumlarının atomlar arası mesafeye bağlı enerji dağılımı [69, 73].

Kristallerdeki atomlarda birbirlerine bağlanmalarını sağlayan bağ kuvveti denilen kuvvetler mevcuttur ve bu atomlar kristal içerisinde üç boyutlu uzayda düzenli bir şekilde belirli doğrultularda dizilirler. Atomlar serbest haldeyken birbirlerine yaklaşıldıkça elektron dalga fonksiyonları en dış yörüngeden itibaren üst üste binerler. Böylelikle elektronlar iki atoma birden eş zamanlı olarak ait olurlar. Bu Pauli dışarlama ilkesine aykırı bir durumdur ve kuantum şartlarının elektronlardan birinde farklı olması gereklidir. Bu durumdan dolayı birbirine yaklaştırılan atomların enerji seviyelerinde yarılmalar meydana gelir. Enerji seviyelerinde meydana gelen bu yarılmalar “enerji bantları” olarak isimlendirilir ve aralarındaki enerji seviyeleri farkı 10^{-9} eV civarındadır. Yarılan enerji seviyeleri arasındaki fark küçük olduğundan enerji aralığı sürekli bir bant yapısı olarak kabul edilir. Elektron durumlarının enerji dağılımları atomlar arası uzaklığa bağlıdır [69, 73].

Şekil 2.2’de katkısız bir yarıiletkenin mutlak sıfır sıcaklığında ve oda sıcaklığındaki bant yapıları görülmektedir [69, 73]. Katılarda meydana gelen enerji bantlarının arasında bulunan enerji seviyelerinde elektronlar yoktur. Bu nedenle elektronların hem var olup hem de var olamayacağı enerji bölgeleri mevcuttur. Elektronların var olmadığı bantlara yasak enerji bantları veya yasak enerji aralığı (E_g) denilmektedir. Elektronların tamamen doldurduğu bant valans bandı (E_v), valans bandının üzerinde yasak enerji bandı ile ayrılmış bant ise iletim bandı (E_c) olarak isimlendirilir [69, 72, 73]. Bir yarıiletkenin bütün elektronları mutlak sıfır sıcaklığında ($T = 0$ K) valans bandında yer alır. Bu durumdan dolayı bu sıcaklıkta elektrik iletimi gerçekleşmez ve yarıiletken çok iyi bir yalıtkan davranışı gösterir (Şekil 2.2a). Sıcaklık yükseldiğinde ise elektronlar ısı enerjisiyle birlikte yasak enerji aralığını aşarak iletim bandına geçerler, bu durumda iletim bandında elektronlar ve valans bandında ise holler yarıiletkenin elektriksel alan uygulandığı zaman elektriksel iletme katkısında bulunurlar (Şekil 2.2b) [73]. Valans bandında bulunan elektronlar yasak enerji aralığını sadece ısı enerjisi yoluyla aşmazlar. Bu etki ışık ve elektrik alan gibi dış etkenlerle de elde edilebilir. Fakat yüksek yasak enerji aralıklarında (birkaç eV gibi) çok yüksek alanlara ihtiyaç vardır [69]. Bir katının bant yapısının bilinmesi, elektriksel ve optik özelliklerinin belirlenmesinde ve karakterizasyonunda oldukça önemli bilgiler sunar [72].



Şekil 2.2. Katkısız bir yarıiletkenin a) mutlak sıfır sıcaklığında ve b) oda sıcaklığındaki bant yapıları [69, 73].

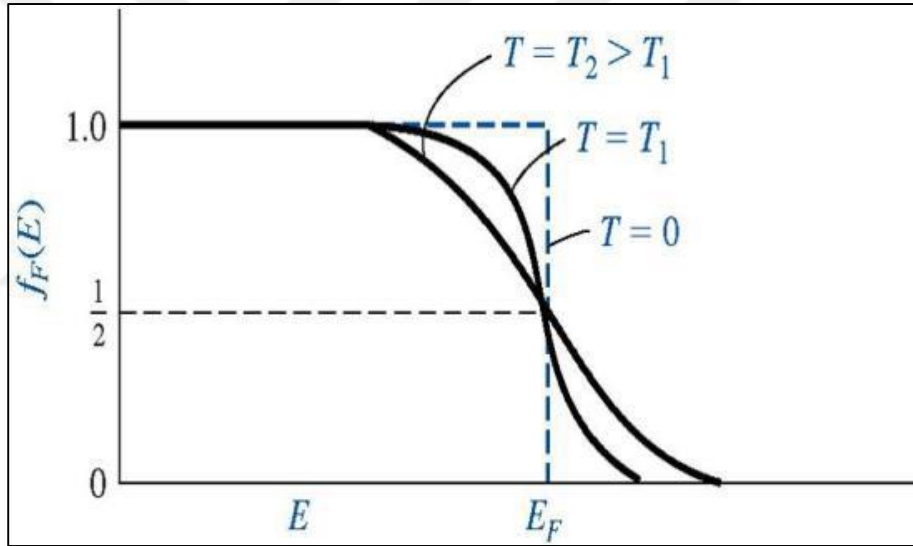
Büyük E_g 'ye sahip yarıiletkenler genelde sıcaklık etkisi ile iletkenlik bandına geçen elektronların sayısı düşük olduğundan tercih sebebidir. Bunun nedeni yarıiletkenin karakteristik özelliklerinde fazla değişimler meydana gelmemesidir. Bu durumdan dolayı Si kristaller Ge kristallerine göre düşük maliyetleri ve kolay üretimleri nedeniyle tercih sebebidir [72, 73].

2.2. Fermi-Dirac Dağılım Fonksiyonu

Serbest taşıyıcıların (elektron ve holler) yoğunluğu yarıiletkenlerde sıcaklığa bağlıdır ve bu taşıyıcıların yoğunluklarını tespit etmek için istatistiksel metotlardan biri olan Fermi-Dirac istatistiğinden faydalanılır. Bu dağılımda elektronlar sıcaklık, Fermi enerjisi veya Fermi düzeyinden karakterize edilir ve Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu $f(E)$ Denklem 2.1 kullanılarak belirlenir [69, 72].

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

Burada E_F , k ve T sırasıyla Fermi enerji seviyesi, Boltzmann sabiti ve mutlak sıcaklığı ifade etmektedir. Şekil 2.3, Fermi-Dirac dağılım fonksiyonunun E enerjisine bağlı olarak değişimini göstermektedir [72].



Şekil 2.3. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu [69, 72].

Fermi-Dirac dağılım fonksiyonunun E enerjisine göre değişimi sıcaklığa göre aşağıdaki şekildedir [69, 72];

1. $T = 0$ K sıcaklıkta $E_F > E$ için, $f(E)$ aşağıdaki gibi ifade edilir [69];

$$f(E) = \frac{1}{\frac{1}{e^{E_F/0}} + 1} \quad (2.2)$$

Bu ifadeden $f(E) = 1$ 'e eşittir. $T = 0$ K sıcaklıkta $E_F < E$ için ise $f(E)$ aşağıdaki gibi ifade edilir [69];

$$f(E) = \frac{1}{\frac{1}{e^{(E-E_F)/0}} + 1} \quad (2.3)$$

Bu ifadeden $f(E) = 0$ olarak hesaplanır. Yani bu sıcaklıkta E_F 'nin altındaki tüm durumlar dolu iken, E_F 'den daha yüksek enerjili bütün durumlar boştur [69].

2. $T > 0$ K sıcaklıkta ve $E = E_F$ için, $f(E)$ aşağıdaki gibi olur [69];

$$f(E) = \frac{1}{e^0 + 1} \quad (2.4)$$

Buradan $f(E) = 1/2$ olarak hesaplanır. E_F 'nin işgal edilme olasılığı % 50'dir [69].

3. $T \gg 0$ K ve $E - E_F \gg kT$ olduğunda ise, $f(E)$ aşağıdaki ifadeye dönüşür [69];

$$f(E) = e^{-\frac{E - E_F}{kT}} \quad (2.5)$$

Bu eşitlik klasik Maxwell - Boltzman dağılım fonksiyonu olarak adlandırılır. Yarıiletkenlerde sırasıyla iletim ve valans bantlarındaki elektronlar ve boşluklar için bu fonksiyon kullanılır. Sonuçlar, enerjisi E_F civarında veya daha büyük olan elektron ve hollerin yarıiletkenlerde iletkenliğe katkıda bulunduğunu göstermektedir. Buna göre sıcaklığın artmasıyla sistemin tüm enerjisi artar ve bu durumdan dolayı da daha fazla yüksek enerjili durumlar işgal edilir [69, 72].

2.3. Yarıiletken Çeşitleri

Yarıiletkenler genel olarak katkısız yarıiletkenler, katkılı yarıiletkenler ve metal oksit yarıiletkenler olarak sınıflandırılabilirler. Bu kısımda bu yarıiletkenlerden detaylıca bahsedilmiştir.

2.3.1. Katkısız Yarıiletkenler

Herhangi bir safsızlık veya kusur içermeyen yarıiletkenlere katkısız yarıiletkenler denilmektedir. Katkısız yarıiletkenler mutlak sıcaklıkta yalıtandırılar ve iletim bantları boş iken valans bantları ise tamamıyla doludur. Katkısız yarıiletkenlerde iletim bandındaki elektronların sayısı (n) ile değerlik bandında bulunan hollerin (p) sayıları birbirine eşittir. Bu durumdan dolayı ısı etkisi ile aktif hale gelen elektronlar valans bandından iletim bandına geçer ve böylelikle iletim bandında serbest halde bulunan bir elektron ve valans bandında ise serbest bir hol meydana gelir. Elektronlarla hollerin yoğunlukları ise birbirlerine eşittir. Bu yarıiletkenlere örnek olarak saf Si ve Ge gösterilebilir [72, 74, 75].

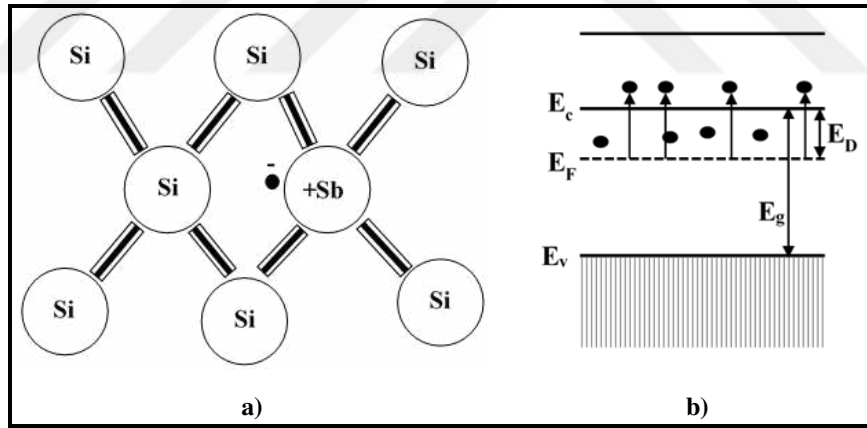
2.3.2. Katkılı Yarıiletkenler

Katkısız yarıiletkenlerin yanında tek taşıyıcı şeklinin olduğu özel malzemelere de birçok uygulamada gerek duyulabilmektedir. Bunun nedeni yarıiletkenlerin katkılanmasıyla oda sıcaklığında elektriksel özelliklerinin değiştirilebilmesindendir. Bu yüzden bu tip yarıiletkenlere

katkılı yarıiletken denilmektedir ve yüksek sıcaklıklarda bu tip yarıiletkenler saf iletkenliğe geçebilirler [68, 76]. Uygun katkı atomları yarıiletkene katılarak yarıiletken içerisinde holler veya elektronlar elde edilir [76]. Katkısız yarıiletkenlere (bor, fosfor, arsenik, vb.) gibi elementler katılarak özelliklerini değiştirmek mümkündür. Katkılı yarıiletkenler, saf Ge veya saf Si'ye periyodik cetvelin beşinci ya da üçüncü sütununda bulunan maddelerin eklenmesiyle oluşur. Katkılı yarıiletkenler katılan elementin çeşidine göre n-tipi ve p-tipi olmak üzere iki gruba ayrılırlar [74, 77]. Katkılı yarıiletken $E > E_F$ ise n-tipi, $E < E_F$ ise p-tipi yarıiletkendir [78].

N-tipi Yarıiletkenler

Yarıiletkenlere verici (donör) atomların katılanmasıyla elektronlar hollerden fazla olur ve çoğunluk taşıyıcılar elektronlardan meydana gelir. Bu tip bir katkı Si ve Ge elementlerinden bir tanesine As, N, Sb ve P gibi periyodik tablonun V. Grup atomlarından biri katılanarak oluşturulabilir. Sıcaklık arttıkça oluşan enerjiden dolayı hollerinde meydana gelmesine rağmen serbest elektronların sayıları daha fazladır ve bu şekilde meydana gelen hollere azınlık taşıyıcı denilmektedir. Bu tip taşıyıcıların hareketlerinden dolayı sızıntı akımları oluşur ve bu tip bir katılama ile meydana gelen yarıiletkenlere n-tipi yarıiletkenler denir [68, 71]. Şekil 2.4'de Si'a Sb katılanması ile edilen n-tipi yarıiletken şematik olarak gösterilmiştir [79].



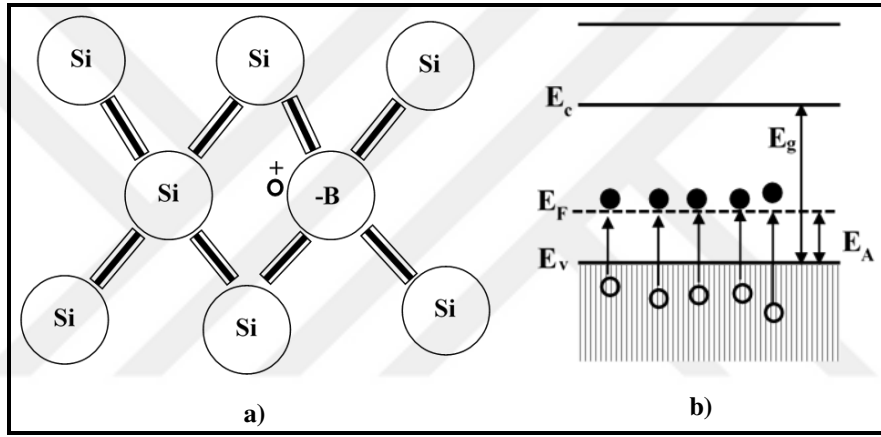
Şekil 2.4. N-tipi yarıiletken a) Si'a Sb katılanması ve b) Donör atomlarının enerji seviyeleri [79].

Si elementinin son yörüngesinde dört adet elektron vardır ve Si elementine Sb katılanması ile bu elementin son yörüngesinde bulunan beş elektron Si'nin dört elektronu ile kovalent bağ yapar. Bu bağın dışında kalan elektronlar iletkenlik bandının hemen aşağısında bir enerji seviyesi meydana getirir ve bu safsızlıklara donör, oluşan enerji seviyesine de donör seviyesi denilir. Donör seviyesindeki elektronlar düşük bir enerji ile iletkenlik bandına geçerler ve katkısız yarıiletkenlerde olduğu gibi holler meydana gelmez. Beşinci elektron Sb atomuna zayıf olarak bağlıdır ve donör atomu düşük bir ısı enerjisi kazandığında, beşinci elektron pozitif yüklü bir Sb iyonu bırakır ve iletkenlik bandına geçer. Kristal içerisinde pozitif iyon sabittir. İletkenlik bandında bulunan

elektron ise kristal boyunca hareket eder ve böylelikle elektron yönünden zenginleştirilmiş olur [79].

P-tipi Yarıiletkenler

Yarıiletkenlere alıcı (akseptör) atomların katkılanmasıyla p-tipi yarıiletkenler elde edilir. Ge ve Si elementlerinden bir tanesine Al, B, In ve Ga gibi periyodik tablonun III. Grup atomlarından bir tanesinin katkılanmasıyla oluşturulur [68]. Örneğin katkısız Si'nin iletim bandında bulunan hollerin sayısını artırmak amacıyla son yörüngesinde 3 elektron bulunan Al ve B gibi atomlar katkılanarak p-tipi yarıiletkenler elde edilebilir. Bu atomlar bununla birlikte yarıiletkenin kristal yapısı içinde bir hol meydana getirdiği için akseptör atomlar olarak adlandırılır [80]. Şekil 2.5'de Si'a B katkılanması ile edilen p-tipi yarıiletken şematik olarak gösterilmiştir [79].



Şekil 2.5. P-tipi yarıiletken a) Si'a B katkılanması ve b) Akseptör atomlarının enerji seviyeleri [79].

Si atomunun valans bandında bulunan dört elektron B atomunun valans bandındaki üç elektron ile kovalent bağ yapar. Tam olarak kovalent bağın oluşması için B atomunun dört adet elektrona ihtiyacı vardır ve bu yüzden bir hol meydana gelir. Yarıiletkene akseptör katkılanması sayesinde hollerin sayısı elektronlardan fazla olduğu için taşıyıcılar hollerdir. Bu tip katkılanmayla meydana getirilen yarıiletkenlere p-tipi yarıiletkenler denilir ve bu yarıiletkenlerde elektronlar azınlık taşıyıcılardır [71, 80].

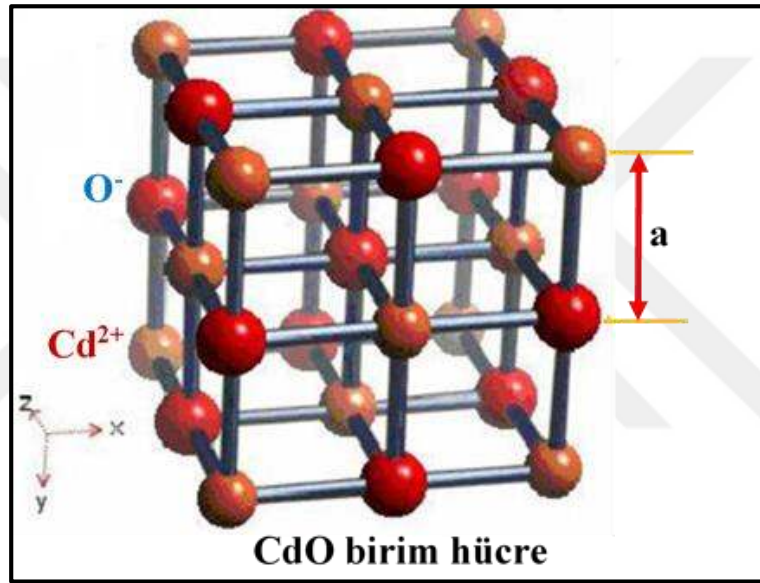
2.3.3. Metal Oksit Yarıiletkenler

Yapısında bir başka elementle en az bir oksijen atomu ihtiva eden bileşiklere oksit denilmektedir. Basit oksitler ilave elementlerde içerebilir ve oksitler kararlı bileşikler olarak kabul görürler. Oksitler yüksek oksijen elektronegatiflikleri nedeniyle neredeyse bütün elementlerle kararlı bağ meydana getirebilirler. Oksitler yalıtkan, yarıiletken ve metal iletkenlerden süperiletken malzemelere kadar tüm iletkenliği kapsar ve teknolojik gelişmelerde önemli bir yere sahiptirler. Bu

bölümde, mevcut çalışmada kullanılan CdO, NiO ve ZnO metal oksit yarıiletkenlerinin özelliklerinden bahsedilmiştir [81].

Kadmiyum Oksit (CdO)

CdO n-tipi bir yarıiletkendir ve diğer metal oksit yarıiletkenlere göre dar sayılabilecek direk geçiş yasak enerji aralığına (2.2 – 2.8 eV) sahiptir ve elektrik direnci düşüktür. Elektron mobilitesi ise oldukça yüksektir (64 cm²/Vs) ve iletkenliği yüksektir. Ayrıca görünür bölgede optiksel geçirgenliği yüksektir. CdO'nun öz direnci ise 4.87 x 10⁻⁴ ohm-cm'dir. CdO fiziksel olarak yumuşak bir oksittir [73, 81]. CdO'nun kübik birim hücre yapısı Şekil 2.6'da görülmektedir [81, 82].

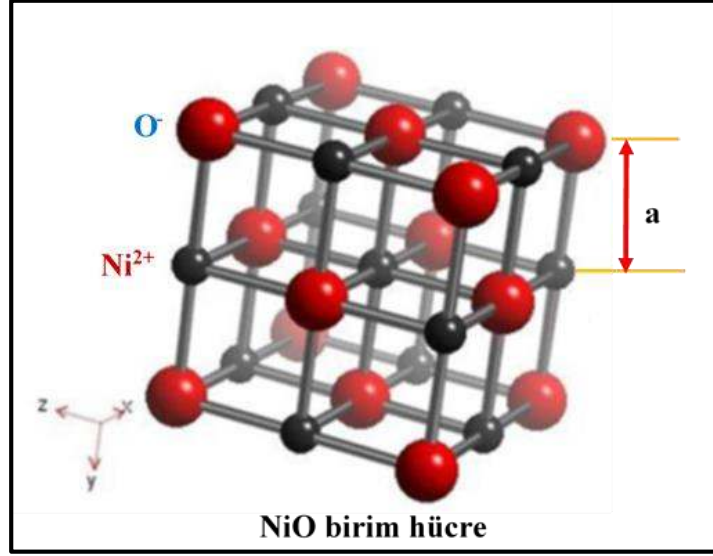


Şekil 2.6. CdO kübik birim hücre yapısı [81, 82].

CdO saydam metal oksit bir malzemedir ve birçok teknolojik uygulamada kendine kullanım alanı bulmuştur.

Nikel Oksit (NiO)

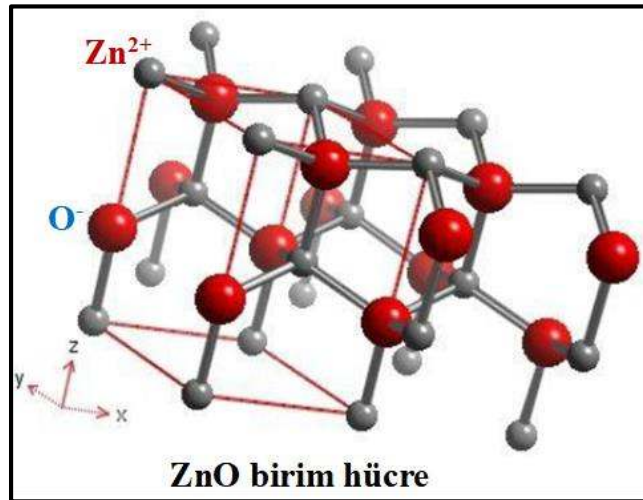
NiO optik, seramik ve cam uygulamaları için oldukça uygun termal olarak kararlı ve yüksek oranda çözünmeyen bir bileşiktir. NiO yeşil renktedir ve Ni'nin ana oksididir. NiO geniş bant aralığına sahip (3.2 – 4 eV) normalde (111) diziliminde kübik bir yapıda olan p-tipi bir yarıiletkendir. NiO doğrudan bant aralığına ve optik geçirgenliğe sahiptir. NiO ayrıca yüksek kimyasal kararlılığa sahip bir metal oksit yarıiletkendir ve elektrokatalizör ve süperkapasitans özellikleri vardır. Bu özellikleri nedeniyle güneş pilleri, fotodiyotlar, elektrokromik cihazlar, elektrokimyasal enerji depolama cihazları ve fotoelektroliz gibi birçok alanda kullanım alanı bulmaktadır. NiO'nun elektriksel iletkenliği ise düşüktür [81-83]. Şekil 2.7'de NiO'nun kristal yapısı görülmektedir [83, 84].



Şekil 2.7. NiO kristal yapısı [83, 84].

Çinko Oksit (ZnO)

ZnO hegzagonal wurtzite kristal yapıda olan n-tipi bir yarıiletkenidir. ZnO'da NiO gibi geniş bir direkt bant geçişli yasak enerji aralığına ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip (3.2 – 3.5 eV) bir yarıiletkenidir. ZnO'nun elektriksel direnci $10^{-3} - 10^{+2} \Omega\text{cm}$ arasındadır ve görünür bölgede yüksek geçirgenliğe sahip saydam bir metal oksit yarıiletkenidir. Ayrıca serbest taşıyıcı yoğunluğu $5 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ arasında ve mobilitesi ise yaklaşık $180 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'dir. İnce filmleri polikristaldir ve ince filmlerin elektrik alan mobiliteleri $7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'dir [69]. ZnO doğada fazla miktarda bulunmasından dolayı maliyeti düşük bir metal oksit yarıiletkenidir. ZnO'nun kristal yapısı Şekil 2.8'de görülmektedir [69, 85].



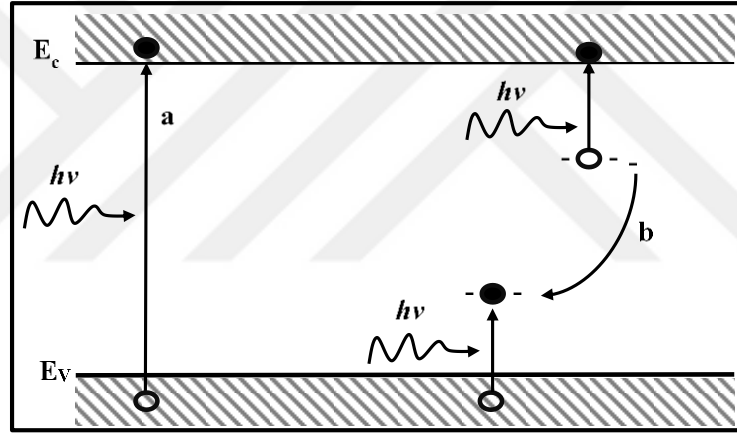
Şekil 2.8. ZnO kristal yapısı [69, 84].

ZnO üstün elektriksel optiksel özelliklerinden dolayı birçok uygulamada kendine kullanım alanı bulabilmektedir. Bu alanlar arasında güneş pilleri, güneş kolektörleri, fotodiyotlar, piezoelektrik cihazlar, saydam elektrotlar, yüzey akustik devreleri, optoelektronik cihazlar ve fotovoltaiik uygulamalar sayılabilir [81, 82].



3. FOTODİYOTLAR

Görünür ışık, ultraviyole ışık veya ışımayı algılayarak bunu bir elektriksel sinyale dönüştüren aygıtlara fotodiyot denilmektedir. Işıma birimi fotodiyotlarda W/m^2 veya W olabilir ve elektriksel çıkış birimleri olarak ise I ve V kullanılır. Bir malzemenin elektromanyetik ışımaları absorbe ederek elektriksel iletkenlikte değişme göstermesi fotoiletkenlik olarak adlandırılır ve bir yarıiletkenin fotoiletken olabilmesi için serbest elektron ve hollerden meydana gelen bir yapısının olması gerekir. Yarıiletken tarafından ışık absorbe edildiği zaman yapılarında bulunan serbest elektronlar ve holler rastgele dağılırlar ve böylelikle elektriksel iletkenlikte artış meydana gelir [72]. Üzerine ışık uygulanan bir fotoiletken malzemenin yapısında bulunan yüklerin bantlar arasında nasıl geçiş yaptığı ve yasak enerji aralığının üzerine çıkarak iletkenlikte meydana gelen artışın nasıl gerçekleştiği Şekil 3.1’de gösterilmiştir [72].



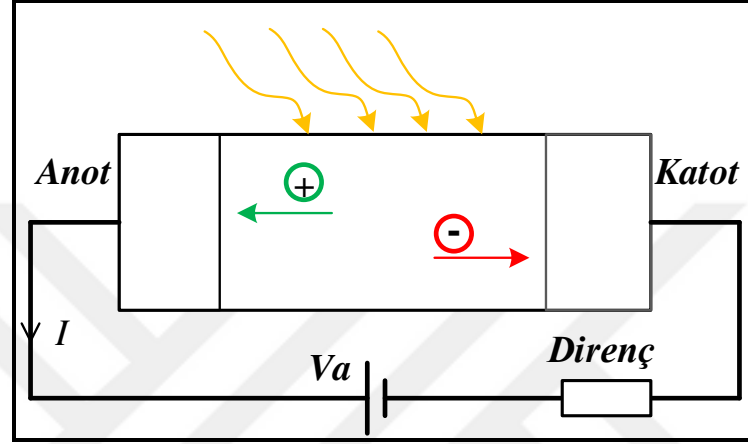
Şekil 3.1. Fotonlarla uyarım yapıldığında (a) bantlar arası geçiş (b) safsızlık seviyesi ile iletim bandı arasındaki fotouyarma [72].

Fotodiyotların anot ve katot olmak üzere iki uçları vardır. Fotodiyotlar üzerine ışık düşürülüp besleme voltajı ve ters besleme uygulandığı zaman iletken hale gelip katottan anoda doğru akım geçirirler. Doğru besleme yapıldığında fotodiyotlar normal diyota benzer şekilde çalışırlar. Fotodiyotlarda fotonlar bir mercekten geçerek p ve n tipi malzemelerin birleştiği bölgeye odaklanır ve bu durumdan dolayı fotonların enerjileri absorbe edilerek valans bandındaki elektronların iletim bandına geçmesi sağlanır. Böylelikle fotodiyotlardan akım geçer. Fotodiyotlar üzerine düşen ışığın şiddeti arttıkça daha çok akım geçer. Bu durum fotonun ışık şiddetinin p-n yüzeyinin birleşimindeki direnci azaltmasından kaynaklanır ve fotodiyota gönderilen ışığın şiddeti p-n yüzeyindeki direnç ile ters orantılıdır [86].

Şekil 3.2’de fotodiyot şematik olarak gösterilmiştir. Fotodiyotun anoduna anottan daha düşük bir potansiyele sahip ters besleme gerilimi uygulanırsa yarıiletken içerisinde bir elektrik alan

ortaya çıkar ve anot ve katodun etrafında foto taşıyıcılar toplanır. Anotta pozitif (+) ve katotta ise negatif (-) yükler belirerek elektrik akımının oluşmasını sağlar. Bu akım fotoakım olarak adlandırılır ve bir fotodiyotta fotoakım 3 aşamada oluşur [87];

- I. Yarıiletkende fotonun absorbe edilmesi ve serbest taşıyıcıların üretilmesi,
- II. Belirli bölgede meydana gelen elektrik alanı içerisinde taşıyıcıların toplanması,
- III. Kontaklarda taşıyıcıların bir araya gelmesi.



Şekil 3.2. Fotodiyotun şematik gösterilişi [87].

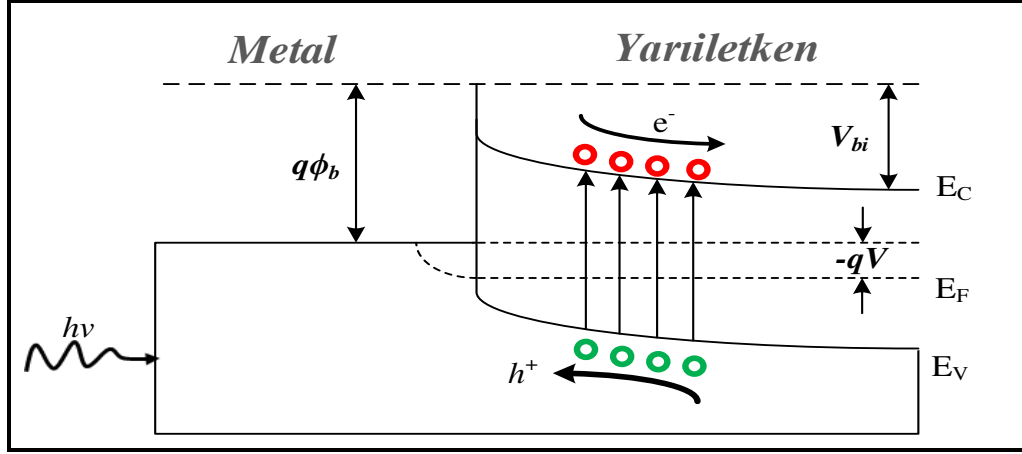
Fotodiyotlar ışığa karşı duyarlı olmalarının yanında çalışma hızları çok yüksek olmasından dolayı fiber optik kabloyla veri iletiminde de kullanılabilirler. Ayrıca ışık ölçüm aygıtlarında, ışık detektörlerinde, elektronik flaşlarda, opto-kuplatörlerde, bilgisayarlarda, fotoğraf makinelerinde ve transistörlerde yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar [87].

3.1. Fotodiyot Çeşitleri

Fotodiyotların üretim şekillerine ve malzeme çeşitlerine göre farklı özellikte olanları mevcuttur. Bu kısımda fotodiyotların çeşitlerinden bahsedilmiştir.

3.1.1. Metal Yarıiletken Fotodiyotlar

Fotodiyot elektronik işlemlerde optik sinyaller meydana getiren bir algılayıcıdır ve yarıiletken bölgesinde yüksek bir elektrik alanıyla boşaltılmış serbest yük taşıyıcılarına sahiptir. Tüketim bölgesinde meydana gelen foto taşıyıcılar yüksek alandan dolayı malzemenin uç kısmında toplanırlar. Şekil 3.3’de metal-yarıiletken eklemine ait enerji-bant yapısı görülmektedir [87].



Şekil 3.3. Aydınlatma altında metal-yarıiletken eklem şematik görüntüsü [87].

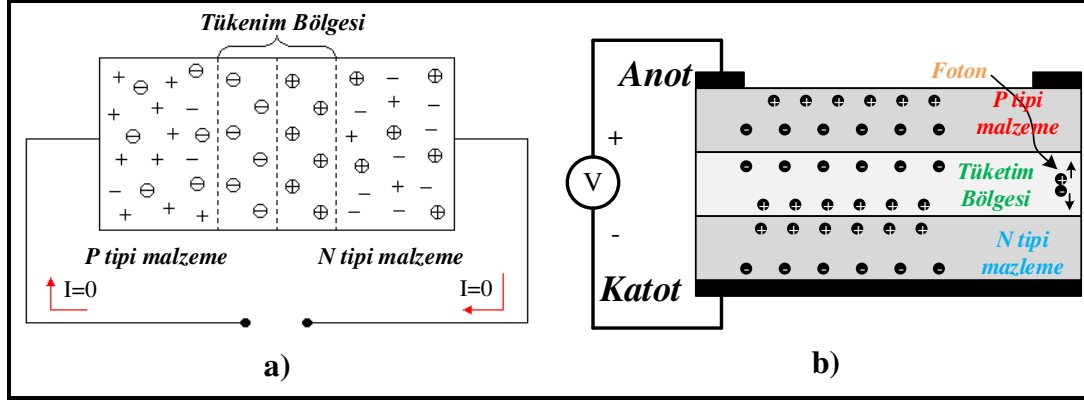
Metal yarıiletken diyot yüksek verime sahip fotodiyotlarda kullanılabilir ve foton enerjisine ve potansiyel farklarına göre farklı diyot çeşitleri düşünülebilir. Diyotlar 3 çalışma şekline sahiptir [88];

- I. $E_g > h\nu > q\phi_b$ ve $V < V_B$ (engeli aşma voltajı) için metal içerisinde fotouyarılmış elektronlar engel potansiyelini aşabilirler ve yarıiletken içerisinde bir araya gelirler. Bu durum metal yarıiletken diyotlarda bariyer yüksekliğinin tespit edilmesinde ve metal filmde sıcak elektron geçişlerinde kullanılır [87, 88].
- II. $h\nu > E_g$ ve $V < V_B$ için yarıiletkende boşluk elektron çifti radyasyondan dolayı üretilir ve diyotun karakteristiği p-i-n fotodiyotuyla benzer özelliklerdedir [87, 88].
- III. $h\nu > E_g$ ve $V > V_B$ için diyot çıkış bozulma bölgesinde çalışabilir ve diyot fotodiyottur [87, 88].

3.1.2. P-n Eklem Fotodiyotlar

p-n eklem fotodiyotlar fotodiyotların en sık kullanılanlarındandır. Fotonların enerjisi yasak enerji bant aralığından daha fazla olduğunda, bu durum eklem iki tarafında da elektronlar için hol meydana getirirler ve güçlü bir elektrik alan etkisinden dolayı birbirlerinden ayrılarak difüzyon derinlikleri kadar uzay yük bölgesi kadar uzaklaşırlar [86]. p-tipi bir yarıiletkene (+) yönlü bir gerilim uygulanırsa yarıiletkenin yapısı içerisindeki holler uygulanan elektrik alanı ile tüketim bölgesine itilir ve böylelikle akım akar. Bu durumda yapıdaki eklem doğru yönde beslenmiş olur. Yarıiletkene (-) voltaj verildiğinde ise taşıyıcılar tüketim bölgesinden uzaklaştıkları için iletme katkıda bulunmazlar ve p-n eklemi ters beslenmiş olur. Böyle bir durumda akımlar çok küçük olarak akar ve konsantrasyon farkından dolayı ortaya çıkan difüzyon akımı ve elektrik alandan dolayı ortaya çıkan sürüklenme akımı farklı polarmalara sahip olur. Bundan dolayı tipi kontak anot

iken n-tipi kontak ise katottur. Şekil 3.4’de görülen p-n eklem diyot modeli fotodiyotların çalışmasını açıklamada kullanılabilir.



Şekil 3.4. a) P-n eklem fotodiyot ve b) Yasak enerji aralığından yüksek enerjiye sahip olan bir foton için elektron-boşluk çifti üretimi şematik gösterimi [86].

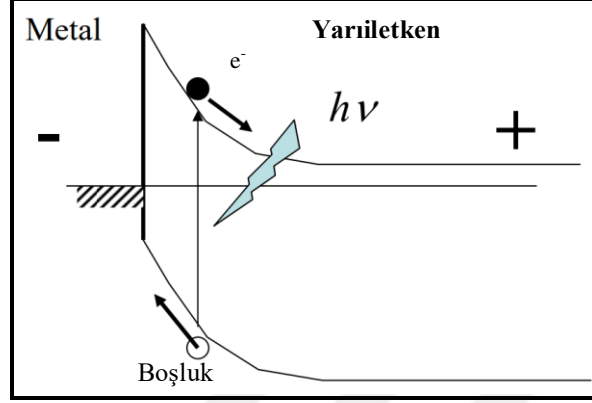
Bu şekilde daire içerisindeki yükler katkı atomlarını diğerleri ise serbest yük taşıyıcılarını göstermektedir. Diyota gelen foton enerjisi yasak enerji aralığından daha yüksek ise elektron boşluk çiftleri oluşur ve bu durum tükenim bölgesinde ortaya çıkarsa yükler elektrik alandan dolayı birbirlerinden ayrılarak ivmelenirler. Holler p-tipi (+) elektronlar ise n-tipi (-) uzay yük bölgesine doğru ivmelenir [87].

3.1.3. P-i-n Eklem Fotodiyotlar

Bu fotodiyotlar p-n eklem fotodiyotların özel bir çeşididir ve p-n eklem fotodiyotlara nazaran daha fazla tercih edilirler. Bunun nedeni p-i-n yapıların frekans cevabı, tükenim kalınlığı ve kuantum verimliliği nedeniyle. p-i-n eklem fotodiyotların p-n fotodiyotlardan farkı p ve n tipi yarıiletkenler arasına katkısız bir yarıiletken yerleştirilmesidir. Bu yarıiletkenin taşıyıcı yoğunluğunun düşük ve direncinin yüksek olmasından dolayı fotodiyota uygulanan gerilimi tamamen gerilimin uygulandığı bölgeye düşürür. Bundan dolayı kızılötesi detektörün hangi dalga boyunda işleyeceğinin tespit edilmesinde önemli rol oynayan katkısız bölgenin kalınlığının çok iyi ayarlanması gereklidir. Fakat cihazdan alınacak cevap ve kuantum verimi bu kalınlık değeri ile farklılık gösterir. Bu durumda alacağımız cevabın hızlı olması için kalınlık az olmalıdır. Kuantum verimini yükseltmek için ise kalınlığının çok yüksek olması gereklidir. Bunların yanında p-i-n fotodiyotların cevap hızı devre parametrelerinden de etkilenir [86, 87]. Bu eklemler fotodiyotlar ve güneş pillerinde verimi yükseltme amacıyla kullanılabilir [72].

3.1.4. Schottky Fotodiyot

Schottky fotodiyotta meydana gelen akım Şekil 3.5’de gösterilmiştir [87].



Şekil 3.5. Schottky fotodiyotta sıfır besleme geriliminde meydana gelen fotoakım [86].

Bu fotodiyotlar metal ile yarıiletkenin kontak edilmesi ile üretilirler. Bu fotodiyotların yapısı oldukça karmaşıktır ve yarıiletken üzerinde iki veya daha fazla kontak oluşturulabilir. Yarıiletken bir metal ile temas ettirilir ve temas halindeki iki malzemenin Fermi enerji seviyeleri aynı hizaya gelir. Böylelikle metal-yarıiletken yüzeyinde potansiyel bir bariyer meydana getirilmiş olur. Fotodiyota gönderilen ışınlar metal katman tarafından absorbe edilir ve böylelikle elektron hol çifti meydana gelir. Uyarılmış elektronlar metal yüzeye varıncaya kadar taşınır ve sadece enerjileri yeterli seviyede olanlar bariyeri geçerek yarıiletkene kavuşur. Bu durumda elektriksel sinyal elde edilmiş olur. Optik güç kayıplarını azaltarak yüksek hızlara bu fotodiyotlarda ulaşılabilir [72, 86, 87].

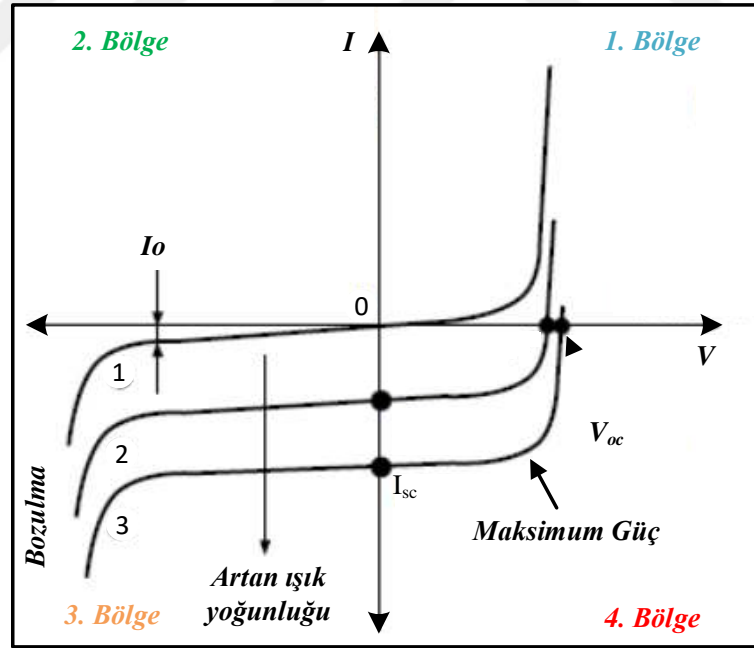
3.1.5. Heteroeklem Fotodiyot

Heteroeklem yapılardan oluşan gelişmiş yarıiletken cihazlar yarıiletken cihaz teknolojisinde önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca bu yapılar yüksek performanslı dedektörler ve optik devre elemanlarında oldukça önemli bir yere sahiptirler ve yüksek hızlı ve frekanslı cihazlarda oldukça geniş bir kullanım alanları vardır. Heteroeklem yapılar yasak enerji aralıkları farklı olan iki yarıiletkenin bir araya getirilmesi ile oluşturulur ve bu yapıların en önemli avantajlarından birisi kuantum verimlerinin eklem mesafesinden bağımsız olmasıdır. Böylelikle oluşan geniş bant aralığı optik gücün iletiminde kullanılabilir ve karanlık akımda oldukça küçüktür. Geniş bant aralığına sahip bir malzeme, fotodiyota gelen optik enerjisinin geçmesi için saydam bir pencere işlevi görür. Heteroeklem yapılar fotodiyotlar, lazerler ve güneş pilleri gibi birçok alanda kullanım alanı bulmaktadırlar [72, 87].

Eklemler iki malzeme arasındaki geçiş uzunluğuna göre kademeli ve ani olarak ikiye ayrılmaktadır. Ani olanda geçiş birkaç atomik uzaklıkta ($\leq \mu\text{m}$) gerçekleşirken kademeli olanda ise geçiş birkaç difüzyon uzunluğundan fazladır. Heteroeiklemlerde iki yarıiletken aynı tip iletkenliğe sahipse izotip, farklı tip iletkenliklere sahiplerse anizotip olarak isimlendirilirler. Heteroeiklemler ayrıca yasak enerji bant aralıklarının büyüklüklerine göre p-n veya n-p şeklinde isimlendirilirler. Bu isimlendirmede yasak enerji bant aralığı düşük olanın tipi ilk olarak söylenir. Örneğin yasak enerji bant aralığı düşük olan yarıiletkenin tipi p, büyük olanın ise tipi n olsun. Bu durumda heteroeiklem p-n olarak isimlendirilir [72].

3.2. Fotodiyotların Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiği

Fotodiyotların I-V karakteristikleri eklemlerindeki akım taşıma mekanizmalarının çeşidi ile meydana gelir. Metal-yarıiletken eklemleri ve p-n eklemleri nedeniyle farklı mekanizmalar ortaya çıkar [86]. Fotodiyotların I-V karakteristikleri normal diyotların I-V karakteristiğine şekilsel olarak benzerler. Bir fotodiyotun karanlıkta ve aydınlık durumlarda I-V karakteristikleri Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6. Fotodiyotun karanlıkta ve aydınlık durumlarda I-V karakteristikleri [86].

Fotodiyotun ışığa duyarlı yüzeyine ışık gelmediğinde sadece termal yoldan azınlık taşıyıcılarla oluşan akım fotodiyot üzerinden akar ve bu akım karanlık akım olarak isimlendirilir. Şekil 3.6'daki A fotodiyotun karanlık durumdaki I-V eğrisi, B ve C ise fotodiyotun aydınlatılmış durumdaki I-V eğrisini göstermektedir. Görüldüğü gibi I-V karakteristikleri dört bölgeden meydana

gelmiştir. Birinci bölgede I ve V pozitifdir ve fotodiyota uygulanan gerilim doğru polaritededir. Bu bölge fotodiyotun doğru besleme bölgesi olarak adlandırılır ve fotodiyot uygulamalarına fotodiyot normal bir diyot davranışı gösterdiğinden uygun değildir. İkinci bölgede fotodiyotun herhangi bir cevabı yoktur ve üçüncü bölgede ise küçük bir akım (I_s) akmaktadır. Fotodiyotun çalışma alanı üzerine gelen ışığın şiddet arttıkça bu bölgedeki eğriler aşağıya doğru negatif akım yönünde değişir. Bu eğrilerin $V = 0$ ekseninde akım eksenini kestiği nokta kısa devre akımıdır (I_{sc}). Akım sıfır olduğunda ise eğrilerin voltaj eksenini kestiği noktalar ise açık devre voltajıdır (V_{oc}). Ters besleme voltajlarının çok yüksek olduğu durumlarda akım hızlıca artar ve diyot bozulabilir. Bu bölge ters bozulma bölgesi olarak adlandırılır (üçüncü bölge). Işığı algılama için uygun bölge ters polariteli gerilimin uygulandığı bölge olan üçüncü bölgedir. Fotodiyotun fotovoltaiik bölgesi ise dördüncü bölgedir [88].

I-V karakteristiği, bant genişliği ve kuantum verimi karakteristiği fotodiyotların üç ana karakteristiğidir ve bir fotodiyotun performansı bu üç karakteristik ile belirlenir. Yüksek bozulma voltajı ve düşük karanlık akımları diyotların eklem niteliklerinin bir göstergesidir. Karanlık durumdaki polarma sırasında diyottan geçen akım düşük karanlık akımı gösterir ve fotodiyotun hassasiyetinin göstergesidir. Burada ters polarma voltajının değeri bozulma voltajıdır ve ters polarma voltajının sınırını gösterir. Bu sınır geçildikten sonra kazanç ve çarpma mekanizmaları fotodiyotun çalışmaya başladığı voltaj sınırını gösterir ve bu sınırdan sonra diyot çalışmaya başlar [86].

Prensipte bir akım üretici olan fotodiyot yeterli oranda ışık üzerine geldiğinde çalışmaya başlar. Işık fotodiyotun içerisinde zayıf bir akım oluşturur ve fotodiyota gerilim uygulandığında devredeki yük direncinden dolayı fotoakım oluşur. Bu yük ise dış devre direncinin toplamıdır ve fotoakımın etkinliği düşük kısmi iç direnç üzerinde meydana gelirken, fotoakımın büyük bir kısmı da dış devre direnci üzerinde oluşur. Bu durumdan dolayı fotodiyotlar fotovoltaiik veya akım kaynağı olarak kullanılabilirler. Fotodiyotların doğru akım karakteristikleri incelendiğinde seri direnç, bariyer yüksekliği ve idealite faktörü gibi parametreler elde edilebilir [88].

3.3. Fotodiyotların Kapasite-Voltaj (C-V) Karakteristiği

C-V karakteristikleri fotodiyotların en önemli karakteristik özelliklerindendir ve cihazların elektriksel özelliklerinde önemli bir yere sahiptirler. Bunun yanında C-V karakteristikleri arayüzey durumlarına karşı oldukça hassastırlar. Düşük frekans değerlerinde kapasitenin yükselmesi alternatif akım (AC) sinyalinin yük taşıyıcılar tarafından takip edilebilmesine bağlıdır. Çok yüksek frekanslarda C-V ölçümleri gerçekleştirilirse ara yüzeydeki yükler AC sinyallerini takip edemez. Fotodiyotlarda kapasite (C) ve voltaj (V) arasında aşağıdaki bağıntı geçerlidir [72, 86];

$$\frac{1}{c^2} = \left[\frac{2}{\epsilon_0 \epsilon_S q N d A^2} \right] \left[V_{bi} - \frac{V - kT}{q} \right] \quad (3.1)$$

Burada, ϵ_0 , ϵ_S , q , d ve V_{bi} sırasıyla boşluğun dielektrik geçirgenliği, dielektrik sabiti, yük, donör konsantrasyonu ve difüzyon voltajıdır [86].

3.4. Fotovoltaik Parametreler

Fotodiyotların veya güneş pillerinin yük karakteristikleri, spektral kuantum verimi (η), açık-devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), doldurma faktörü (FF), maksimum güç noktasındaki voltaj (V_m), maksimum güç noktasındaki akım (I_m), maksimum çıkış gücü (P_m), seri direnç (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}) gibi farklı fotovoltaik parametreler kullanılarak analiz edilir [72, 87, 88].

3.4.1. Açık Devre Gerilimi

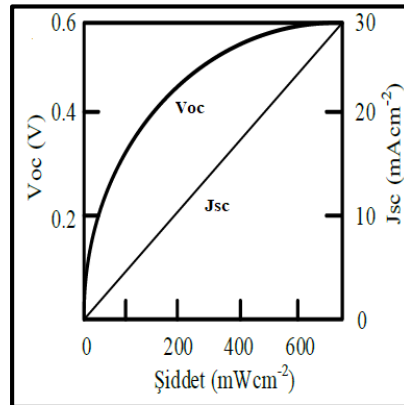
Işığa maruz kalan diyotun I-V karakteristiğinde, eğrinin voltaj eksenini kestiği noktadaki voltaj V_{oc} 'dir ve akım sıfır olduğunda Denklem 3.2 yardımıyla hesaplanabilir [87, 88].

$$V_{oc} = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left[\left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) + 1 \right] \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'den görüldüğü gibi yüksek V_{oc} değerlerine yüksek n değeriyle ulaşılabilir. Bu durum her zaman geçerli olmayıp yüksek n ancak yüksek I_s değerleri ile elde edilebilir ve p-n eklemleri için V_{oc} her zaman, n 'nin değerinin 1'e yakın düşük değerlerinde daha yüksektir.

3.4.2. Kısa Devre Akımı

Işık şiddetine göre V_{oc} ve I_{sc} 'nin değişimi Şekil 3.7'de görülmektedir [87, 88].



Şekil 3.7. Işık şiddetine göre V_{oc} ve I_{sc} değerleri [86].

Uygulanan voltajda ve R_s ile R_{sh} 'ın olmadığı durumlarda belirli bir aydınlatma altında akmaya başlayan I_{sc} çıkış akımı olarak da bilinir. I_{sc} fotodiyota gelen foton sayısı ve aydınlatma şiddeti ile doğru orantılıdır [87, 88].

3.4.3. Spektral Cevap

Spektral cevap, fotodiyot yüzeyine belirli dalga boylarında gelen foton sayısı ile bağlantılıdır ve her bir dalga boyundaki fotoakımların toplamı cihazın spektral cevabını verir. İç spektral cevap $SR(\lambda)$ cihaz yüzeyine gelen fotonların sayısı ile kısa devre durumlarında meydana gelen elektron-boşluk çiftinin sayıdır ve Denklem 3.3 ile hesaplanabilir [87, 88].

$$SR(\lambda) = \frac{J_p(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} + \frac{J_n(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} + \frac{J_{dr}(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} \quad (3.3)$$

Burada $J_p(\lambda)$, $J_n(\lambda)$ ve $J_{dr}(\lambda)$ sırasıyla boşluk difüzyon akım yoğunluğu, elektron difüzyon akım yoğunluğu ve sürüklenme akım yoğunluğudur [87, 88].

3.4.4. Seri Direnç

Kontaklar ve altlık hacimlerinin dirençleri fotodiyotların R_s değerlerini verir. Bir fotodiyotun R_s 'si kontaktların ve altlıkların direncinden ileri gelmektedir ve Şekil 3.8'de devredeki şekli görülmektedir. R_s fotovoltaik durumdaki bir fotodiyotun doğrusallık özelliğini tanılamada yararlanır ve Denklem 3.4 yardımı ile hesaplanabilir [87, 88].

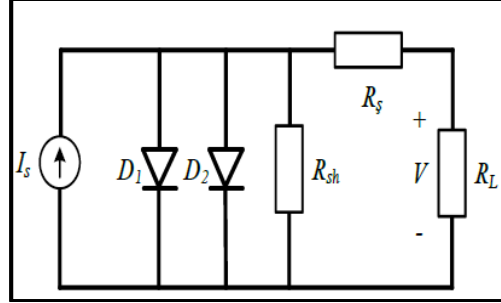
$$R_s = \frac{(W_0 - W_d)\rho}{A_j} + R_c \quad s \quad (3.4)$$

Burada W_0 , W_d , A_j , ρ ve R_c sırasıyla altlık kalınlığı, tükenim bölgesinin genişliği, eklem yayıldığı alan, altlığın öz direnci ve kontak direncini ifade etmektedir. İdeal fotodiyotların R_s 'lerinin olmaması gerekmesine rağmen 10 - 1000 ohm arasındaki değerlere sahip olabildikleri tespit edilmiştir [87, 88].

3.4.5. Şönt Direnci

Fotodiyotta R_{sh} akım üretici olarak gösterilebilir ve başlangıcı $V = 0$ 'da olan bir fotodiyotun I-V eğrisinin eğimi R_{sh} değerini gösterir. İdeal bir fotodiyotta $R_{sh} = \infty$ ve $R_s = 0$ olmalıdır ve R_{sh} fotodiyotlarda besleme voltajı olmadığı durumlarda gürültü akımını ifade etmede yararlanır. Gerçek bir fotodiyotta R_{sh} birkaç mega ohm ($M\Omega$) ile giga ohm ($10^9\Omega$) arasında değerler alabilir. R_{sh} deneysel yöntemlerle bir fotodiyotta ± 10 mV gerilim uygulanarak ve fotodiyotun etkin

direncinin hesaplanmasıyla bulunabilir [87, 88]. R_{sh} 'ın devrede gösterimi Şekil 3.8'de verilmiştir [87].



Şekil 3.8. R_s ve R_{sh} 'dan oluşan fotodiyot için temsili eşdeğer devre modeli [86].

Fotodiyotların R_{sh} değerleri ne kadar yüksekse o kadar ideal bir fotodiyottur. Bu yüzden fotodiyotlarda sönt direnci oldukça önemli parametrelerdendir [87].

3.4.6. Kuantum Verimi

Fotodiyotların η değerleri fotoakım sağlayan ve fotodiyot üzerine gelen foton sayılarının yüzdesidir. Başka bir deyişle fotodiyotların ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirebilme yeteneklerinin yüzde (%) olarak ifade edilmesidir. Farklı bir ifadeyle ise bir fotodiyotun η 'sü fotoakımı destekleyen elektron-boşluk çiftini üreten cihaz üzerine gelen tek foton ihtimali olarak da tanımlanabilir. Fotodiyot duyarlılığı ile η değeri arasındaki eşitlik Denklem 3.5 ve Denklem 3.6 ile tanımlanabilir [88].

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

$$Q.E = R_{\lambda} \frac{hc}{\lambda q} * 100 \quad (3.6)$$

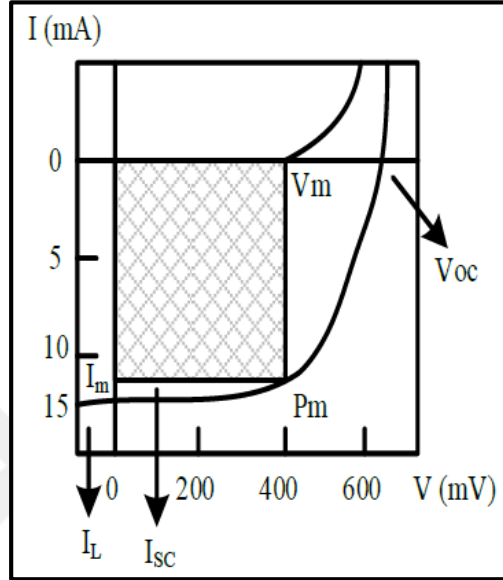
Bu denklemlerde h , c , q , R_{λ} ve λ sırasıyla plank sabiti, ışık hızı, elektron yükü, fotoduyarlılık ve λ dalga boyudur.

3.4.7. Doldurma Faktörü

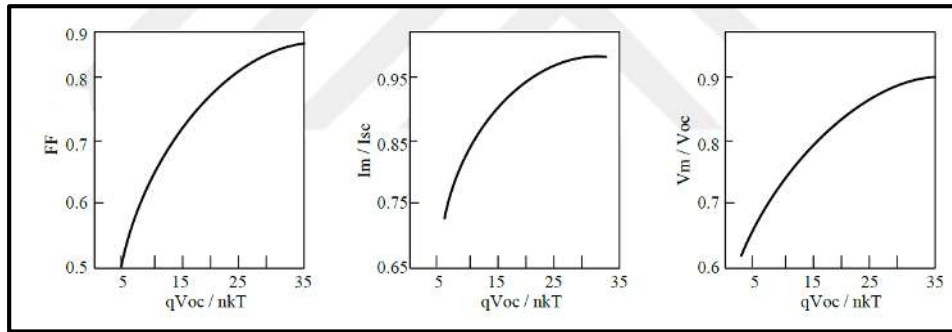
Doldurma faktörü (FF) Denklem 3.7 yardımıyla hesaplanabilir [87, 88].

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

FF Şekil 3.9’da verildiği gibi I-V çizgilerinin kullanılmasıyla elde edilen şekillerin (kare veya dikdörtgen) alanları ile ilişkilidir. Bant aralığı yüksek olan malzemeler V_{oc} değerlerinin yüksekliğinden dolayı yüksek FF değerine sahiptirler [87, 88]. Normalleştirilmiş V_{oc} ’ye bağlı FF, V_m/V_{oc} ve I_m/I_{sc} ’nin değişimi Şekil 3.10’da görülmektedir [86].



Şekil 3.9. Fotodiyotun karanlık ve aydınlık durumlarda I-V karakteristiği [86].



Şekil 3.10. qV_{oc}/nkT ’nin fonksiyonu olarak FF, V_m/V_{oc} ve I_m/I_{sc} ’nin değişimi [86].

R_{sh} ve R_s ihmal edilirse FF, V_m/V_{oc} ve I_m/I_{sc} değerleri bütün alt değerlere kadar düşmektedir [87, 88].

3.4.8. Fotoduyarlılık

Optik gücü meydana getiren fotoakım ile ilgili olan fotoduyarlılık (PR) fotodiyotların ölçüm parametrelerinden biridir ve fotodiyotlarda ışığa karşı hassasiyetin bir ölçüsüdür. Fotodiyotlarda fotoakımın (I_{ph}) verilen dalga boylarında fotodiyota gelen ışın gücüne oranı PR’yi verir. Diğer bir

deyişle fotodiyota gelen ışığın gücünün elektrik akımına çevrilen etkisinin ölçüsüdür. Fotodiyotlarda PR değeri ışığın dalga boyu, sıcaklık ve ters besleme voltajının değişmesinden etkilenir ve PR değeri Denklem 3.8 ile bulunabilir [88].

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

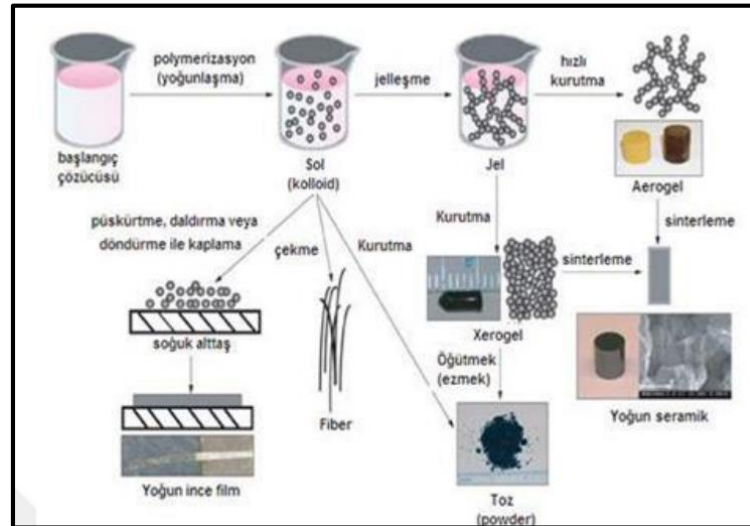
Fotodiyotların duyarlılıklarını yükseltmek için fotodiyot yüzeyine çarpan ışıkla yansıyan ışık arasındaki oranı düşürmek gereklidir [88].



4. SOL-JEL İNCE FİLM KAPLAMA YÖNTEMİ

Bu yöntem kimyasal bir yöntemdir ve başlangıç malzemesi olarak bir solüsyon ve bu solüsyondan elde edilen bir jel kullanıldığı için bu yöntem “sol-jel” olarak adlandırılmıştır. Geleneksel yöntemlere nazaran daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir (100 - 600 °C) ve özellikle inorganik ince film kaplamalarda yaygın olarak kullanılır [89]. Katı maddelerin sıvı içerisindeki süspansiyonuna sol denilmektedir. Sollerde moleküller arasındaki kuvvetler (Van der Waals ve elektriksel itme kuvvetleri) yerçekimi kuvvetine oranla daha etkili olduğundan yerçekimi ihmal edilebilir. Bu durumdan dolayı solü meydana getiren maddeler dibe çökmez. Sol-jel yönteminde ilk basamak metal organik bileşiklerin bir alkol içerisinde çözündürülmesi ve bu çözeltinin hidrolize edilmesidir. Bu adımdan sonra çözelti polimerleştirilerek meydana gelen çözelti dehidrolize edilir ve sol-jel çözeltisi oluşturulmuş olur. Elde edilen sol-jel çözeltisi altlık malzemeler üzerine daldırma, sprey ve döndürme gibi farklı tekniklerle kaplanır ve elde edilen amorf film 500 – 800 °C’de tavlanarak kristalleştirilir ve yoğunlaştırılır [90].

Sol-jel oluşturmada birinci adım farklı başlangıç maddelerini uygun çözücülerde çözündürerek homojen bir çözeltinin meydana getirilmesidir. Bu adımdan sonra sırasıyla hidroliz, polimerizasyon, yoğunlaşma, jelleşme, yıkama ve yaşlandırma ile sol-jel elde edilmiş olur [90]. Sol-jel yöntemi şematik olarak Şekil 4.1’de görülmektedir [91, 92].



Şekil 4.1. Sol-jel kaplama yöntemi aşamaları [91, 92].

Sol-jel yönteminin avantajları aşağıda sıralanmıştır [69]:

- Farklı geometrilere sahip malzemelerin kaplanabilmesine imkan vermesi.
- Kirliliğinin olmaması
- Tehlikesinin olmaması (kimyasallarda herhangi bir tehlike bulunmazsa).

- Yöntemin basit olması ve malzemelerin rahat bulunabilmesi.
- Oluşturulan ince filmlerin yapılarının kontrol edilebilirliği.
- Nispeten düşük sıcaklıklarda saf ve homojen malzemelerin üretilmesine imkân vermesi.
- Gözenekli yapıların oluşturulmasına imkân vermesi sebebiyle düşük kırma indisli filmlerin üretilmesi.
- Kaplama tabakasının kat sayısının artırılabilmesi.
- Maliyetinin düşük olması.

Bu yöntemin birçok avantajı olmakla beraber aşağıda verilen bazı dezavantajları da vardır [69]:

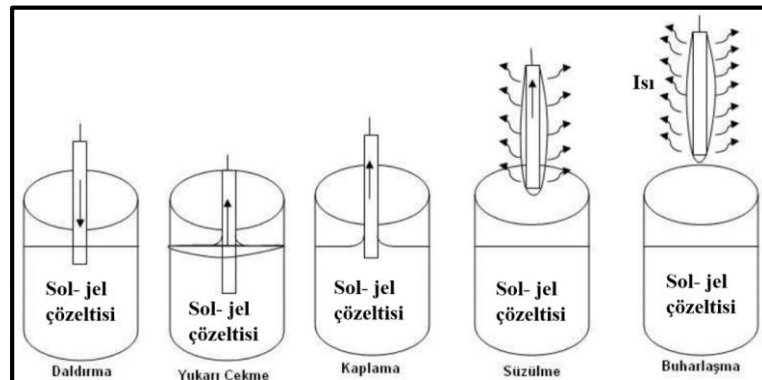
- Yöntemde kullanılacak bazı kimyasalların maliyetleri yüksek olabilir.
- Kaplama işleminde malzeme kaybı yüksek olabilir.
- Oluşturulan yapıda karbon kalabilir.
- Bazı kimyasallar sağlığa karşı zararlı olabilir.
- Yapıda ince boşluklar meydana gelebilir.

4.1. Sol-jel Kaplama Yöntemleri

Sol-jel kaplama yöntemleri daldırma, püskürtme ve döndürerek kaplama olmak üzere üç ana başlık altında toplanırlar.

4.1.1. Daldırma ile Kaplama

Şekil 4.2’de sol-jel daldırarak kaplama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [89, 90].



Şekil 4.2. Sol-jel daldırarak kaplama yöntemi [89, 90].

Kaplama yapmadan önce altlık malzeme temizlenir ve hazırlanan sol-jel çözeltisine batırılır. Daha sonra yukarı çekildikten sonra dikey tüp fırın içerisinde kurutulur. Kaplamanın kalınlığını

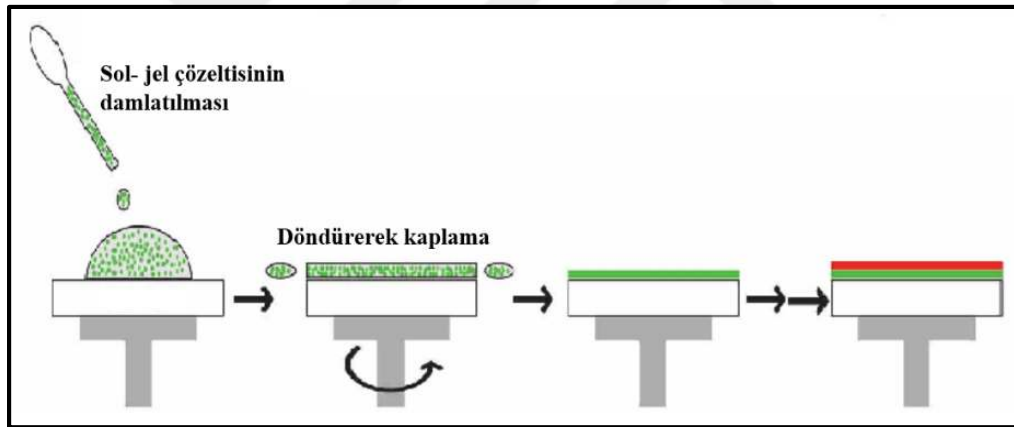
genellikle yukarı çekme sırasındaki hız ve açı belirler. Bunun yanında sol-jel çözeltisinin yoğunluğu da kaplama kalınlığı üzerinde önemli bir faktördür. Sol-jel çözeltisinin derişimi atmosferden dolayı alkolün buharlaşması sonucunda değişeceğinden çözeltinin atmosfere karşı yalıtılması gerekir. Bu ince filmin şeffaflığı üzerinde oldukça önemlidir [89, 90].

4.1.2. Püskürtme ile Kaplama

Bu yöntemde sol-jel çözeltisi önceden ısıtılan bir altlık malzemeye bir aparat vasıtasıyla püskürtülür. Yüzeye çarpan damlacıklar altlık malzeme üzerinde yoğunlaşırken çözücü ise buharlaşır. Böylelikle yüzeyde ince bir film tabakası meydana getirilmiş olur. Bu yöntemde homojen bir kaplama tabakası elde edilebilmesi oldukça güçtür [89, 90].

4.1.3. Döndürerek Kaplama

Şekil 4.3’de sol-jel döndürerek kaplama yöntemi şematik olarak görülmektedir [89, 90].



Şekil 4.3. Sol-jel döndürerek kaplama yöntemi [89, 90].

Bu yöntemde birkaç damla sol-jel çözeltisi altlık üzerine damlatıldıktan sonra 500 – 4000 d/dk. hızlarda altlık döndürülür. Bu dönüş esnasında çözelti ince bir film şeklinde altlık üzerine yayılır ve çözücü buharlaşmaya başlar. Çözücünün kalanı düşük sıcaklıklarda (~100 – 250 °C) buharlaştırılarak ince film elde edilmiş olur. Aynı işlemler istenildiği kadar tekrarlanarak farklı kalınlıklarda kaplama tabakaları elde etmek mümkündür. Oluşturulan ince filmde diğer organik kalıntılar yüksek sıcaklıklarda (~300 – 600 °C) tavlanoarak uzaklaştırılır ve böylelikle ince film elde edilmiş olur [89, 90].

5. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde tezde üretilen fotodiyotların üretim aşamaları ve karakterizasyonlarının nasıl gerçekleştirildiğinden detaylıca bahsedilmiştir.

5.1. Silisyum Altlık Malzemenin Hazırlanması

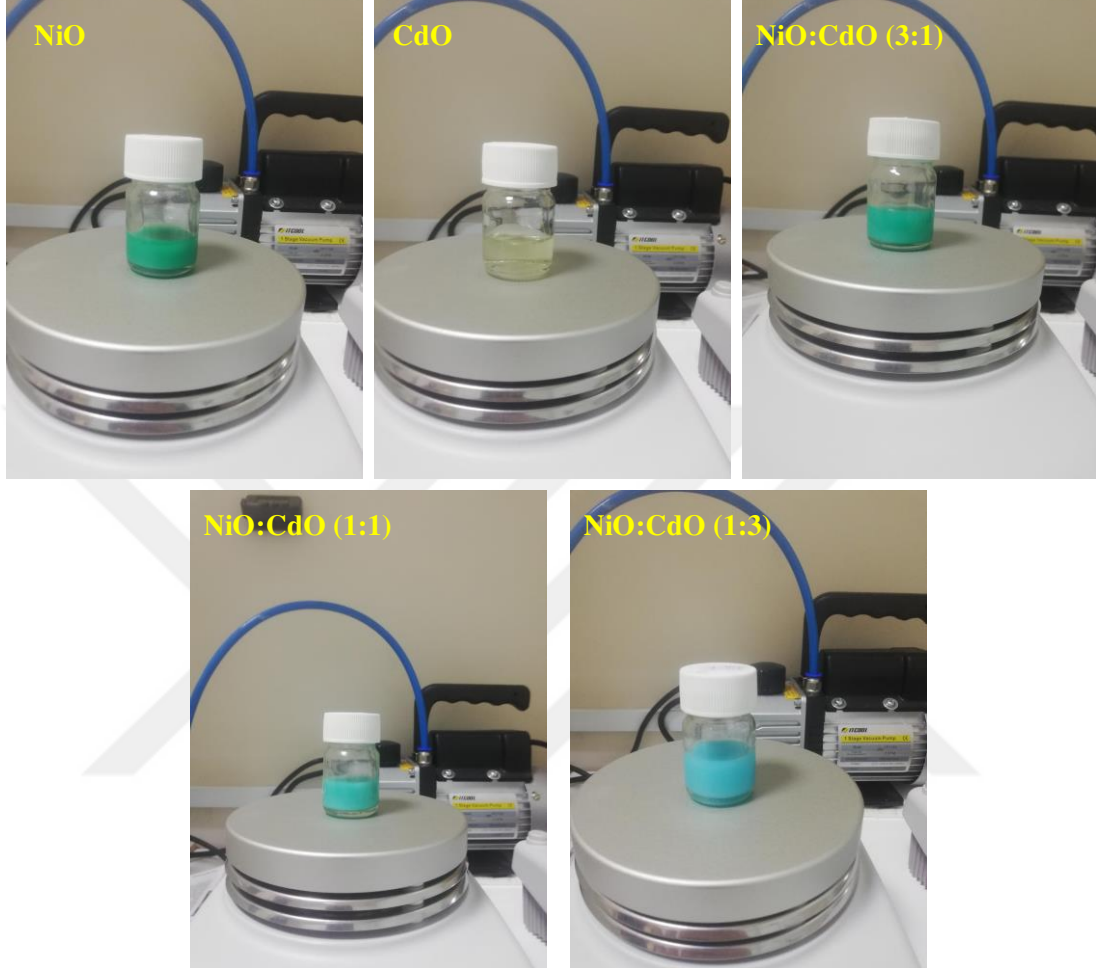
Piyasadan temin edilen $\langle 100 \rangle$ yöneliminde, 600 μm kalınlığında ve 1 - 10 cm^2 direncinde p-Si tabakalara organik ve ağır metal kirliliklerinden temizlemek için kimyasal temizleme yöntemi uygulandı. Temizleme için ilk olarak p-Si tabakalar aseton içerisinde 5 dakika ultrasonik banyoda temizlendi. Bu işlemten sonra aynı sürede saf su içerisinde ultrasonik banyoda durulandı. Aynı işlemler etanol ve saf su ile tekrarlandı ve son olarak p-Si plakalar 1:10 oranında Hidroflorik asit (HF): H_2O çözeltisinde 30 saniye daldırıldıktan sonra saf su içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika süre ile durulandı. Azot gazı ile kurutulan plakaların mat tarafları Nanovak marka vakumlu termal buharlaştırma cihazı ile 150 nm kalınlığında Alüminyum (Al) (99.99% saflıkta) ile kaplandı. Daha sonra plakalar azot gazı altında fırında 570 $^{\circ}\text{C}$ 'de 5 dakika süre ile tavlandı. Bu işlemden sonra p-Si tabakalar küçük parçalar halinde kesildi.

5.2. NiO:CdO İnce Filmlerin Üretimi

Saf NiO ince filmleri üretmek için Chemsolute marka 10 ml 2-methoxyethanol'e 0.5 M Carlo Erba marka Nikel (II) asetat tetrahidrat ($\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) döküldü ve manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırıldı. Tüm tozlar çözüldükten sonra aynı molar oranda Chemsolute marka monoethanolamine ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) bu karışıma karıştırma işlemi devam ederken eklendi ve birlikte 80 $^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat karıştırılarak sol-jel elde edilmiş oldu. Saf CdO ince filmleri üretmek için gerekli sol-jel içinde aynı işlemler tekrarlandı tek fark olarak $\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ yerine Acros Organics marka Kadmiyum asetat dihidrat ($\text{C}_4\text{H}_6\text{CdO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) kullanıldı. Kompozit NiO:CdO ince filmler için gerekli sol-jel çözeltisi için ise yukarıdaki işlemler aynen tekrarlandı tek fark olarak 3:1, 1:1 ve 1:3 molar oranlarında $\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ / $\text{C}_4\text{H}_6\text{CdO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ toplam 0.5 M olacak şekilde 10 ml 2-methoxyethanol'e eklendi. Böylelikle toplam 5 adet sol-jel çözeltisi elde edilmiş oldu (Şekil 5.1).

Elde edilen sol-jel çözeltileri bir gün boyunca dinlendirildikten sonra belirli boyutlarda kesilmiş p-Si plakalar üzerine 3000 devirde 30 saniye süre ile kaplandı. Kaplama işlemi dinamik modda FYTRONIX döndürerek kaplama cihazında yapıldı (Şekil 5.2). Kaplanan numuneler 150 $^{\circ}\text{C}$ 'de 10 dakika sürede kurutuldu ve bu işlemten sonra 10 dakika oda sıcaklığında soğuması

beklendi. Aynı işlemler tekrarlanarak bir kat daha kaplama tabakası meydana getirildi. Üretilen ince filmler 450 °C’de 1 saat süre ile Nükleon marka fırında tavlandı (Şekil 5.3).



Şekil 5.1. NiO:CdO ince filmlerin üretilmesinde kullanılacak sol-jel çözeltileri.



Şekil 5.2. Fytronix 8000 döndürerek kaplama cihazı.

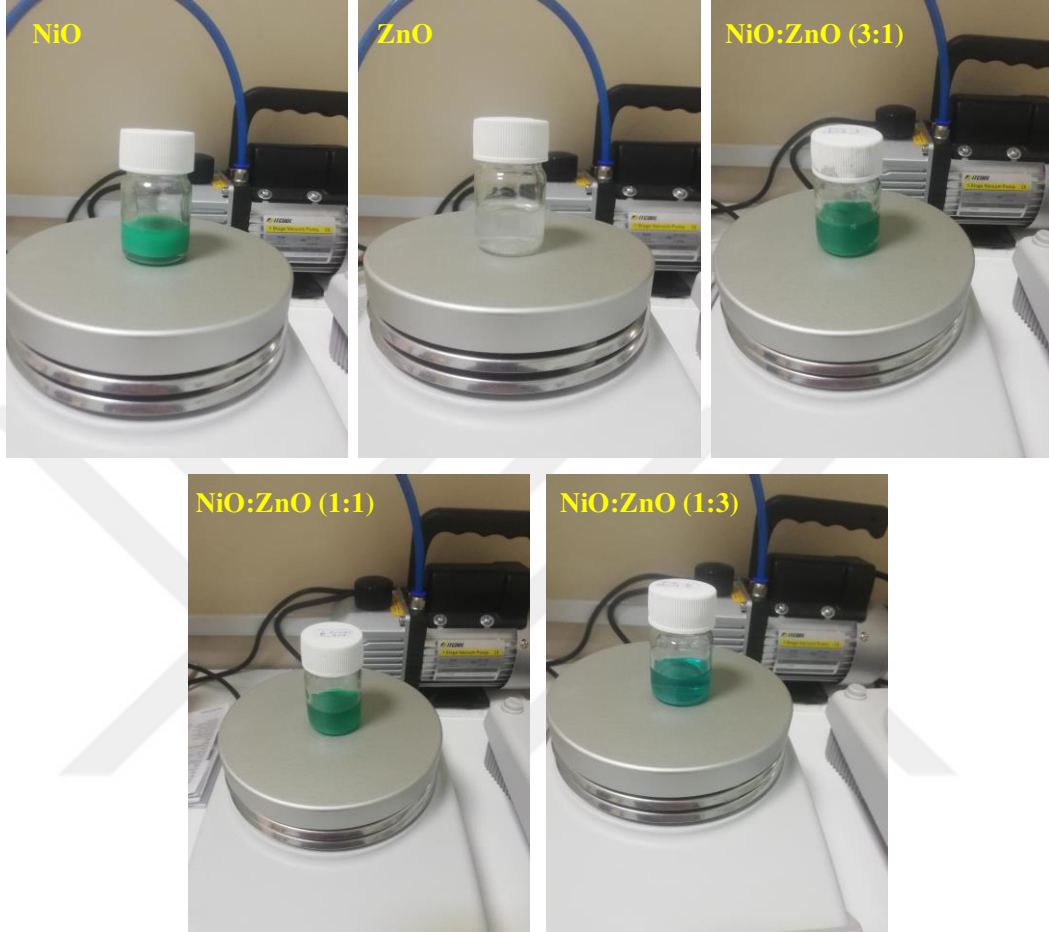


Şekil 5.3. Yüksek sıcaklık fırını.

5.3. NiO:ZnO İnce Filmlerin Üretimi

NiO:ZnO ince filmleri üretmek için gerekli sol-jel çözeltileri de NiO:CdO sol-jel çözeltisiyle aynı şekilde üretildi. Tek fark olarak $C_4H_6CdO_4 \cdot 2H_2O$ yerine Sigma Aldrich marka Çinko asetat dihidrat ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$) kullanıldı. NiO:ZnO ince filmleri üretmek için gerekli sol-jel

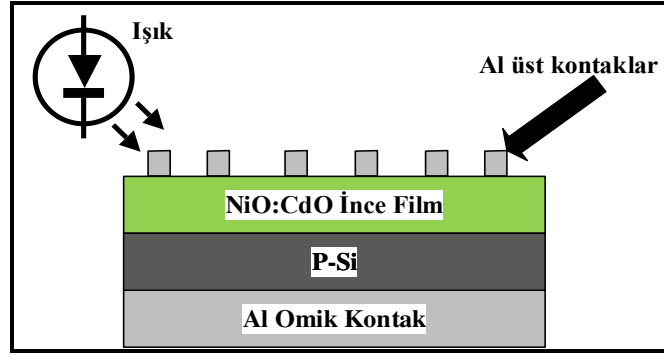
çözeltileri Şekil 5.4’de görülmektedir. İnce film kaplama işleminde de NiO:ZnO ince filmleri üretmede kullanılan bütün aşamalar tekrarlandı.



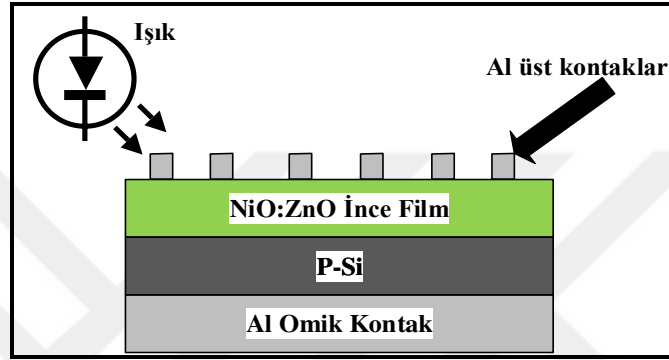
Şekil 5.4. NiO:ZnO ince filmlerin üretilmesinde kullanılacak sol-jel çözeltileri.

5.4. Fotodiyotların Üretimi

NiO:ZnO ve NiO:ZnO ince film kaplanmış yüzeylerin üzeri fiziksel bir maske ile Nanovak marka vakumlu termal buharlaştırma cihazı kullanılarak %99.99 saflıkta Al ile kaplandı ve böylelikle üst kontaklar elde edilmiş oldu. Böylelikle Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlar üretilmiş oldu. Üretilen fotodiyotların temsili resimleri Şekil 5.5’de görülmektedir. Üretilen diyotların kontak alanları $7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ olarak hesaplandı.



a)



b)

Şekil 5.5. Üretilen fotodiyotların temsili resimleri a) Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve b) Al/NiO:ZnO/p-Si/Al

5.5. İnce Filmlerin Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu

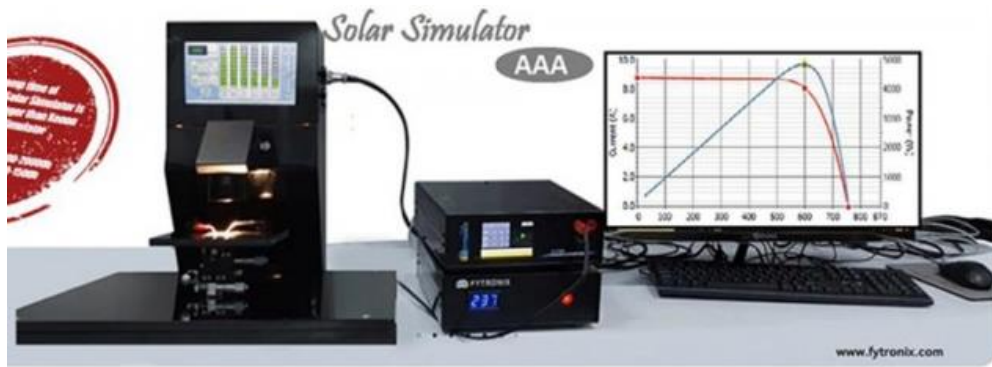
Üretilen NiO:CdO ve NiO:ZnO ince filmlerin XRD analizleri Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM)'da bulunan PANalytical Empyrean marka XRD cihazında 45 kV/40 mA'de, $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonunda, 0.0262606° tarama adımında ve $2\theta = 20 - 80^\circ$ de yapıldı. İnce filmlerin yüzey özellikleri ve bileşimleri DAYTAM'da bulunan Zeiss Crossbeam 540 marka FE-SEM cihazı ve EDX analizi ile belirlendi.

5.6. Fotodiyotların Elektriksel ve Fototepki Karakterizasyonu

Üretilen Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fototepki ve elektriksel karakterizasyonları, KEITHLEY 4200 marka yarıiletken analiz sistemi (Şekil 5.6) ve FYTRONIX marka solar simülatör (Şekil 5.7) kullanılarak gerçekleştirildi [93].



Şekil 5.6. Keithley 4200 yarıiletken karakterizasyon sistemi.



Şekil 5.7. Fytronix 9200 solar simülâtör.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

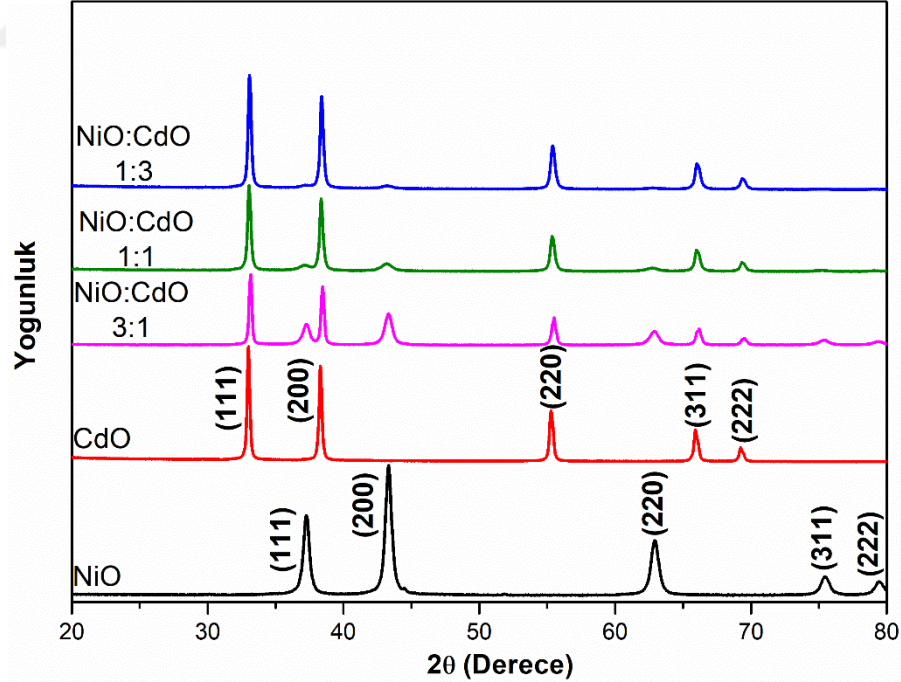
Bu bölümde, üretilen ince filmlerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonundan detaylıca bahsedilmiştir. Bunun yanında üretilen fotodiyotların elektriksel ve fototepki karakterizasyonları detaylıca araştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

6.1. Üretilen İnce Filmlerin Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu

Üretilen kompozit ince filmlerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonları FE-SEM, EDX ve XRD ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları aşağıdaki kısımlarda irdelenmiştir.

6.1.1. NiO:CdO İnce Filmlerin Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu

Üretilen NiO:CdO nanoyapıların XRD kırınım desenleri Şekil 6.1’de görülmektedir. Saf NiO ve saf CdO numunelerinde kırınım zirveleri sırasıyla JCPDS kart numarası 47–1049 ve JCPDS kart numarası 75-0594 ile uyumludur. Bu kartlara göre hem NiO [26, 94, 95] hem de CdO [96, 97] kübik yapıdadır. Kırınım düzlemlerinin 2θ açıları Tablo 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. NiO:CdO ince filmlerin XRD kırınım desenleri.

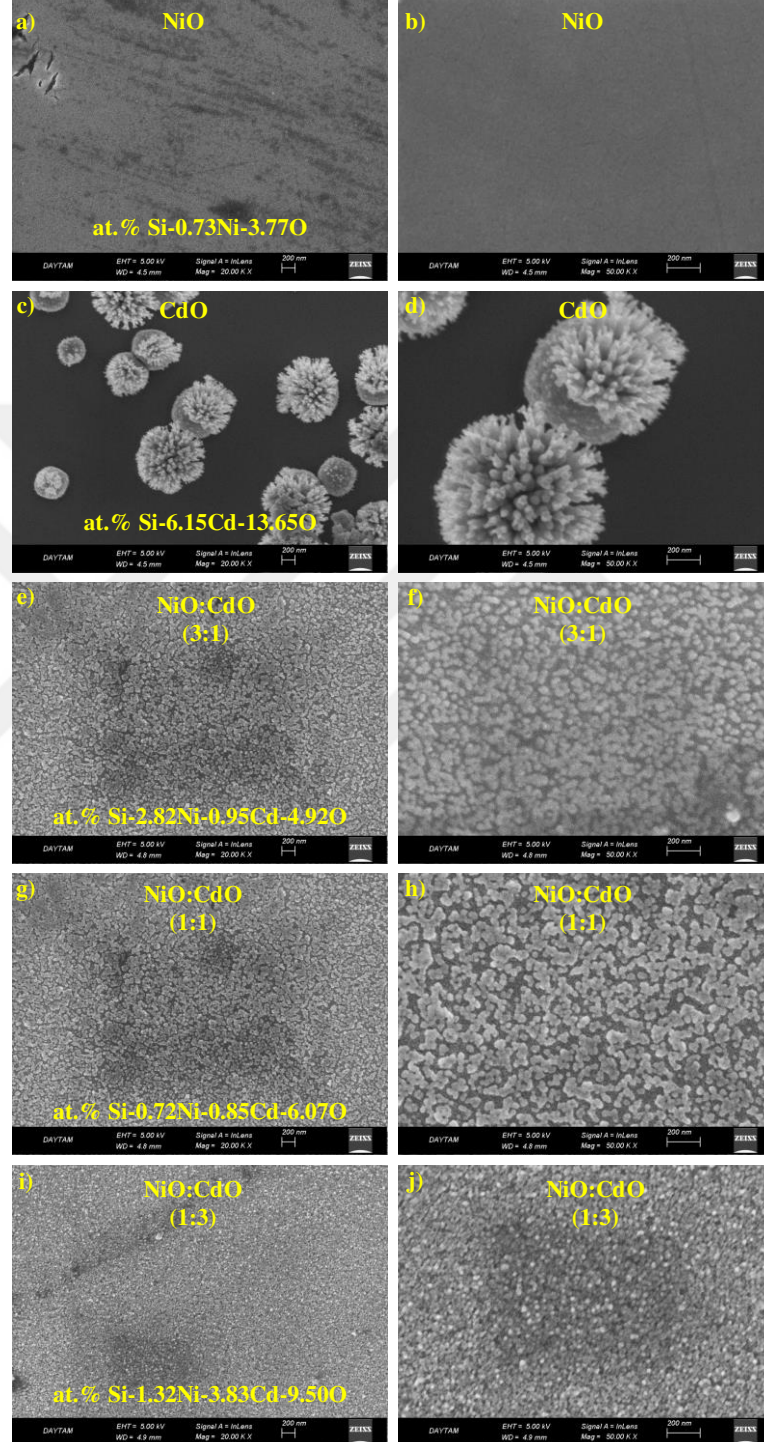
Tablo 6.1. NiO:CdO ince filmlerin kırınım düzlemlerinin 2 θ açıları.

Numune/Düzlem	Oksit	111	200	220	311	222
NiO	NiO	37.26°	43.30°	62.92°	75.48°	79.44°
CdO	CdO	33.01°	38.29°	55.28°	65.91°	69.25°
NiO:CdO (3:1)	CdO	33.16°	38.45°	55.49°	66.17°	69.54°
	NiO	37.29°	43.33°	62.89°	75.42°	79.38°
NiO:CdO (1:1)	CdO	33.06°	38.36°	55.35°	66.02°	69.35°
	NiO	37.18°	43.20°	62.76°	75.18°	79.17°
NiO:CdO (1:3)	CdO	33.09°	38.39°	55.41°	66.04°	69.38°
	NiO	37.23°	43.22°	62.81°	-	-

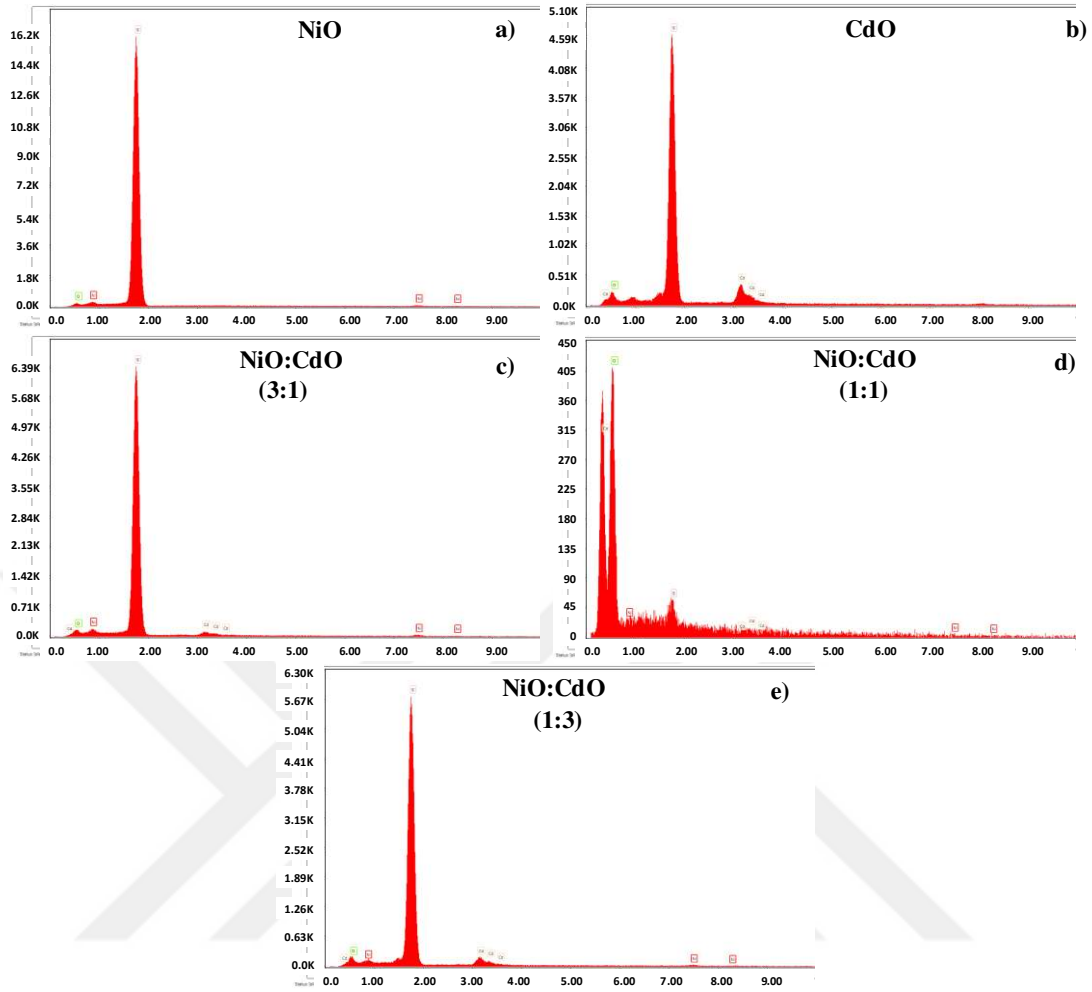
NiO ince film kaplamada 37.26°, 43.30°, 62.92°, 75.48° ve 79.44° 2 θ açılarında, CdO ince film kaplamada ise 33.01°, 38.29°, 55.28°, 65.91° ve 69.25° 2 θ açılarında gözlenen yoğun pikler, sırasıyla (111), (200), (220), (311) ve (222) düzlemlerine karşılık gelmektedir. (111) ve (200) düzlemlerinin yüksek yoğunlukları, NiO'nun kristalli olduğunu göstermektedir. XRD kırınım piklerinde ikincil fazların ve safsızlıkların olmaması, NiO ve CdO'nun başarıyla oluşturulduğunu ve yüksek saflıkta olduğunu kanıtlamaktadır [26, 94-97]. (111) düzleminin CdO'daki yüksek yoğunluğu ise CdO'nun polikristal yapıda olduğunu belirtir [98, 99]. Kompozit ince filmlerin XRD kırınım piklerinin konumları ve yoğunlukları, saf NiO ve CdO ile karşılaştırıldığında farklılık göstermiştir. Bununla birlikte yine JCPDS kart numarası 47-1049 ve JCPDS kart numarası 75-0594 ile uyumludurlar. Ek olarak, kompozit ince filmlerde hem NiO hem de CdO'nun karakteristik kırınım pikleri gözlenmiştir ve kompozit ince filmlerde artan NiO veya CdO oranı ile karakteristik piklerin yoğunlukları artmıştır. Ayrıca kompozit yapılarda başka hiçbir faz veya safsızlık bulunmamıştır. XRD analiz sonuçları NiO:CdO kompozit ince filmlerin başarılı bir şekilde üretildiğini ve kompozitlerin yüksek saflıkta kübik yapıları olduğunu göstermektedir [100, 101].

Şekil 6.2'de p-Si tabakalar üzerine kaplanmış NiO:CdO ince filmlerin FE-SEM görüntüleri ve Şekil 6.3'de ise EDX analiz sonuçları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, tüm filmler p-Si tabakalar üzerinde başarıyla oluşturulmuştur. Çatlaksız ve homojen kaplama tabakaları elde edilmiştir. Saf ve kompozit ince film kaplamalar nanoyapılardan meydana gelmiştir. NiO kaplama ince taneli toplanmış nanoparçacıklardan oluşurken, CdO kaplamada nano çiçek benzeri yapılarla karşılaşmıştır. FE-SEM analizinde görüntülenen yapıların benzerlerine farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda da rastlanmıştır [102-106]. Kompozit ince film kaplamalar ise bu iki kaplamadan farklı bir yapıya sahiptir ve literatür çalışmasına benzer şekilde yarı küresel, düzgün olmayan ve yığılmış granül benzeri (beyaz alanlar) yapılardan oluşmuştur [107]. Kompozit yapıdaki NiO oranı arttıkça kaplamadaki bu yapıların yoğunluğu azalmıştır. EDX analiz sonuçlarına göre saf NiO, saf CdO ve NiO:CdO kompozit ince filmlerde Si ve O dışında farklı bir element bulunmamıştır. Bu durumda XRD analizini doğrulamaktadır. Kompozit ince filmlerde Ni: Cd oranları 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 2.97, 0.85 ve 0.34'tür. Bu oranlar katkılama oranlarına

oldukça yakındır. Bu sonuçlar, XRD analiz sonuçlarıyla birlikte NiO:CdO kompozit yapıların başarıyla oluşturulduğuna işaret etmektedir.



Şekil 6.2. NiO:CdO ince filmlerin FE-SEM görüntüleri.

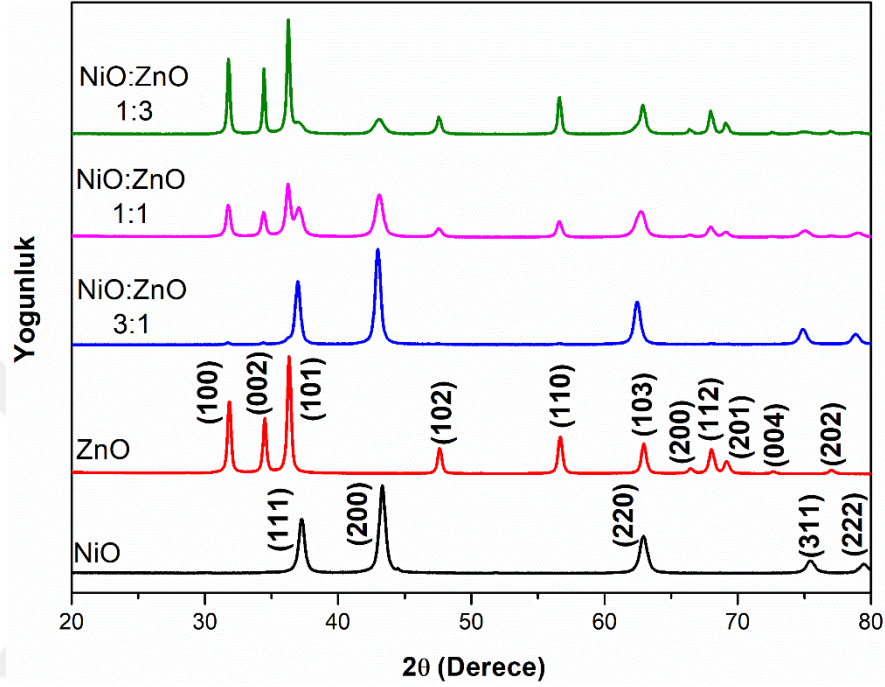


Şekil 6.3. NiO:CdO ince filmlerin EDX analiz sonuçları.

6.1.2. NiO:ZnO İnce Filmlerin Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu

Şekil 6.4’de, üretilen NiO:ZnO ince filmlerin XRD kırınım desenleri görülmektedir. Tablo 6.2’de NiO:ZnO ince filmlerin ZnO’ya ait ve Tablo 6.3’de NiO:ZnO ince filmlerin NiO’ya ait kırınım düzlemlerinin 2θ açıları verilmiştir. Saf NiO’ya ait XRD analiz yorumları yukarıda verildiği için bu kısımda bahsedilmemiştir. Saf ZnO ince filmin XRD analiz sonuçlarında, (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) ve (202) düzlemlerinde oluşan yoğun pikler sırasıyla 31.85° , 34.50° , 36.32° , 47.63° , 56.67° , 62.94° , 66.46° , 68.01° , 69.14° , 72.63° ve 77.07° 2θ derecelerinde gözlemlenmiştir. Bu pikler, 36-1451 numaralı JCPDS kartı ve literatür çalışmaları ile uyum içerisindedir ve üretilen ZnO filmlerin altıgen wurtzite yapıda olduğunu göstermektedir [44, 47, 108, 109]. Saf ZnO’da oluşan farklı tepe noktaları ise ZnO’nun polikristal yapısında olduğuna işaret eder [110]. NiO:ZnO kompozit ince filmlerde ise her iki okside ait karakteristik piklere rastlanmıştır. Piklerin şiddetleri ve yerlerinin değişmesine rağmen saf NiO ve saf ZnO’ya ait XRD desenleri ile ve saf NiO ve saf ZnO’ya ait daha önce sözü edilen JCPDS kartları

ile uyum içerisinde oldukları. NiO ve ZnO'ya ait karakteristik piklerin şiddetleri kompozitlerdeki oranları arttıkça artmıştır. Saf ve kompozit ince filmlerde herhangi bir safsızlık veya farklı bir faza ait piklere rastlanmamıştır. Bu durum NiO:ZnO kompozit ince filmlerin başarılı bir şekilde oluşturulduğunu ve yüksek saflıkta olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.4. NiO:ZnO ince filmlerin XRD kırınım desenleri.

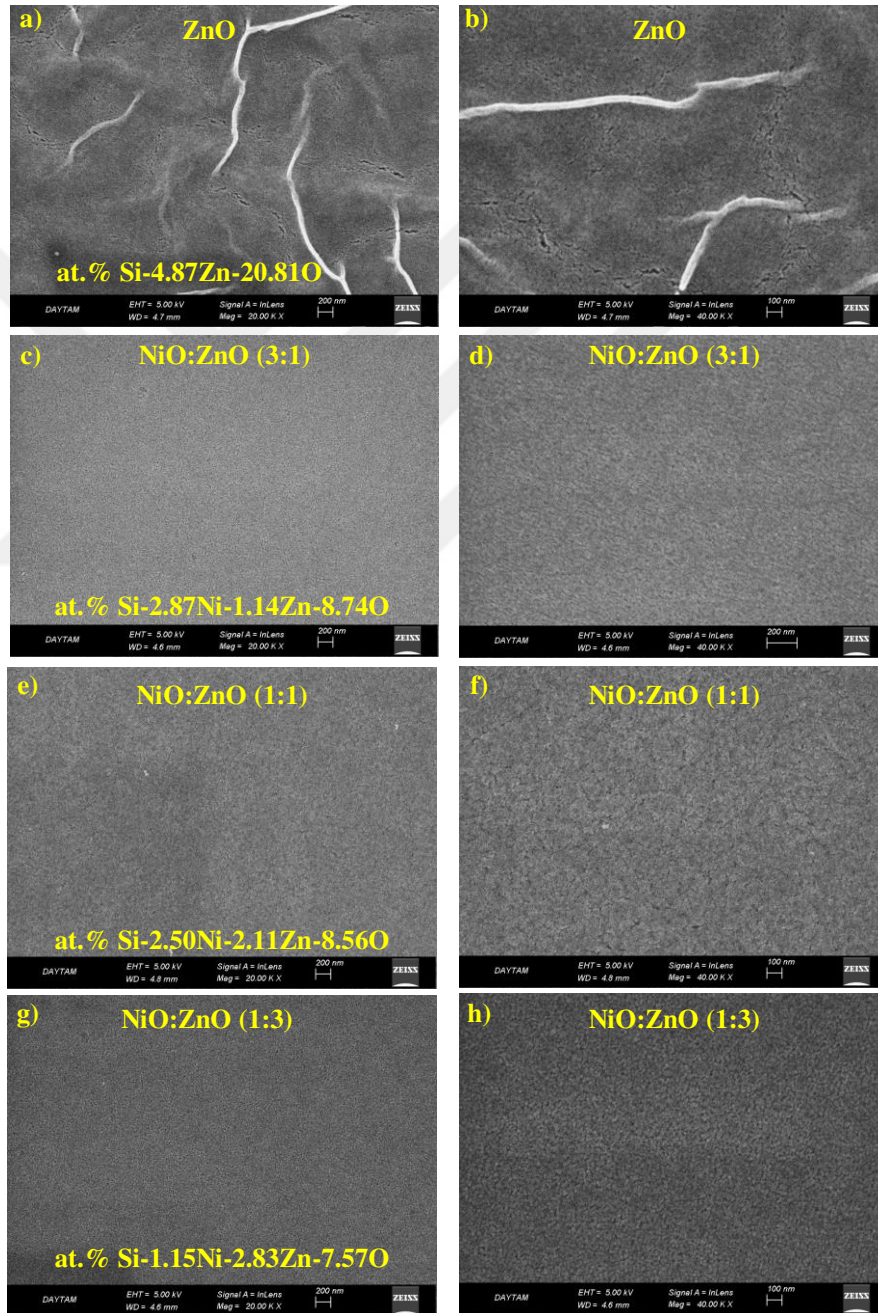
Tablo 6.2. NiO:ZnO ince filmlerin ZnO'ya ait kırınım düzlemlerinin 2θ açıları.

Numune	100	002	101	102	110	103	200	112	201	004	202
ZnO	31.85°	34.50°	36.32°	47.63°	56.67°	62.94°	66.46°	68.01°	69.14°	72.63°	77.07°
NiO:ZnO (3:1)	31.80°	34.34°	-	-	56.67°	62.50°	-	-	-	-	-
NiO:ZnO (1:1)	31.72°	34.40°	36.24°	47.58°	56.59°	62.71°	66.38°	67.99°	69.14°	-	76.97°
NiO:ZnO (1:3)	31.80°	34.42°	36.26°	47.55°	56.61°	62.89°	66.41°	67.96°	69.10°	72.58°	76.99°

Tablo 6.3. NiO:ZnO kompozit ince filmlerin NiO'ya ait kırınım düzlemlerinin 2θ açıları.

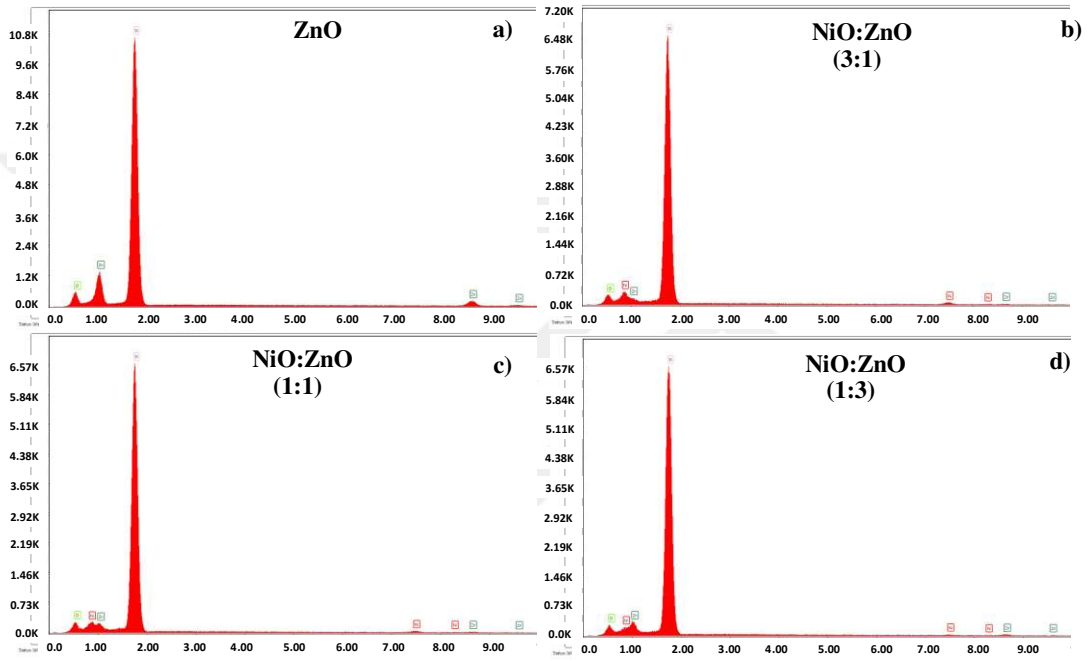
Numune	111	200	220	311	222
NiO	37.26°	43.30°	62.92°	75.48°	79.44°
NiO:ZnO (3:1)	36.10°	42.96°	62.44°	74.89°	78.83°
NiO:ZnO (1:1)	37.02°	43.06°	62.71°	75.02°	79.04°
NiO:ZnO (1:3)	37.05°	43.10°	62.86°	74.10°	79.02°

Şekil 6.5’de NiO:ZnO ince filmlerin FE-SEM görüntüleri görülmektedir. Tüm ince filmler çatlaksız ve homojen bir biçimde p-Si üzerine başarılı bir şekilde kaplanmıştır. İnce filmler nano yapılardan oluşmuştur. ZnO’da bu yapılar ince tanecikli toplanmış nanoparçacıklar şeklindedir ve aynı yapıların yanında yer yer fiber benzeri yapılar meydana gelmiştir [111]. Kompozit ince filmler ise saf NiO ve ZnO’ya göre bir miktar daha büyük toplanmış ince tanecikli nanoparçacıklardan oluşmuştur. Kompozit ince filmlerde saf ZnO’da görülen fiber benzeri yapılara rastlanmamıştır.



Şekil 6.5. Saf ZnO ve NiO:ZnO kompozit ince filmlerin FE-SEM görüntüleri.

Şekil 6.6’da NiO:ZnO ince filmlerin EDX analiz grafikleri görülmektedir. EDX analiz sonuçlarına göre NiO:ZnO ince filmlerde Si ve O dışında farklı bir element bulunmamıştır. Bu durumda XRD analizini doğrulamaktadır. Kompozit ince filmlerde Ni:Zn oranları 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 2.52, 1.18 ve 0.41’dir. Bu oranlar katkılama oranlarına oldukça yakındır. EDX analiz sonuçları incelendiğinde XRD analiz sonuçları ve katkılama oranı ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, NiO:ZnO ince filmlerin dinamik sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile p-Si üzerinde başarıyla oluşturulduğunu göstermektedir.



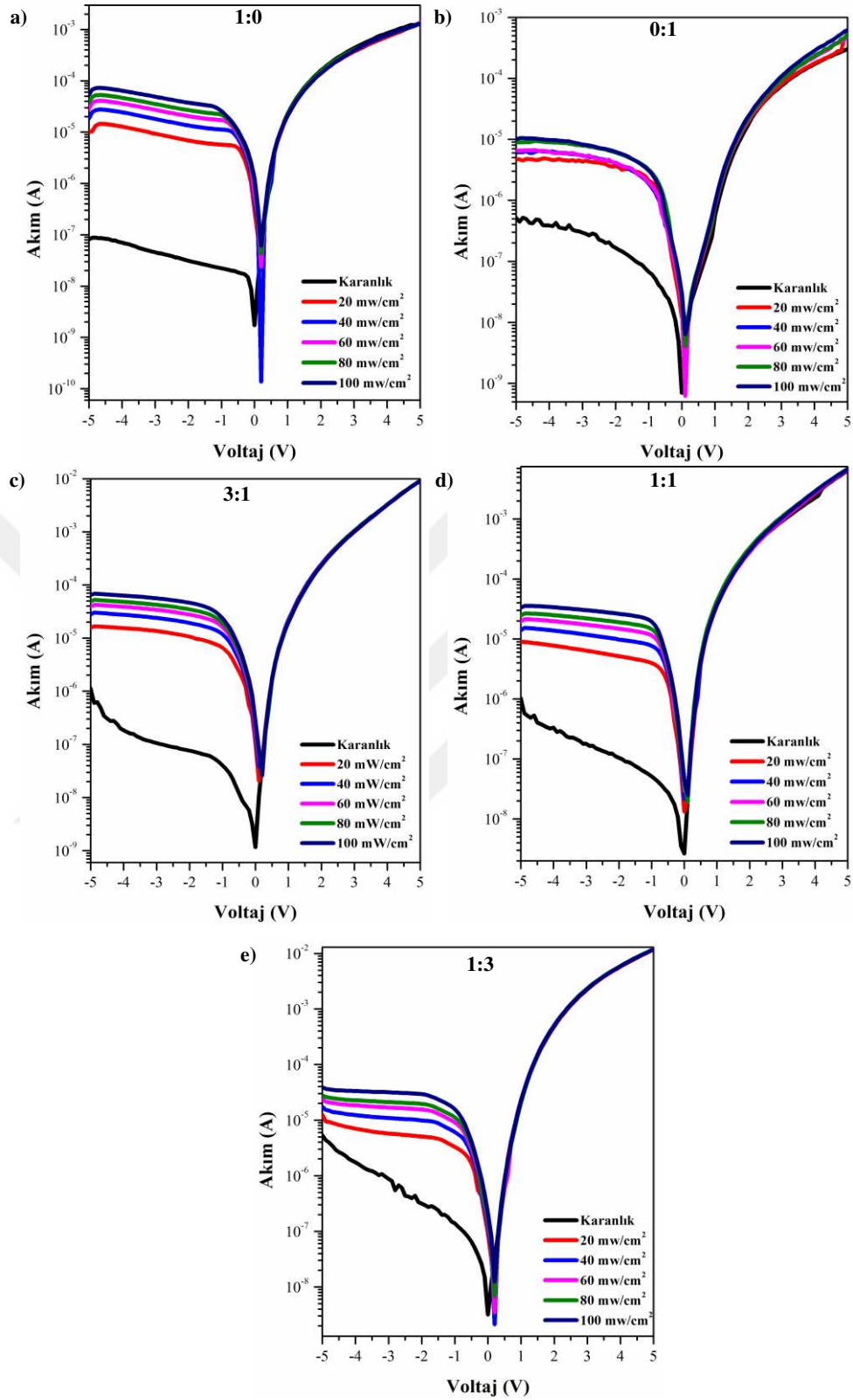
Şekil 6.6. Saf ZnO ve NiO:ZnO kompozit ince filmlerin EDX analiz sonuçları.

6.2. Fotodiyotların I-V Karakteristikleri

Bu kısımda üretilen kompozit esaslı fotodiyotların akım-gerilim karakteristikleri detaylıca incelenmiştir.

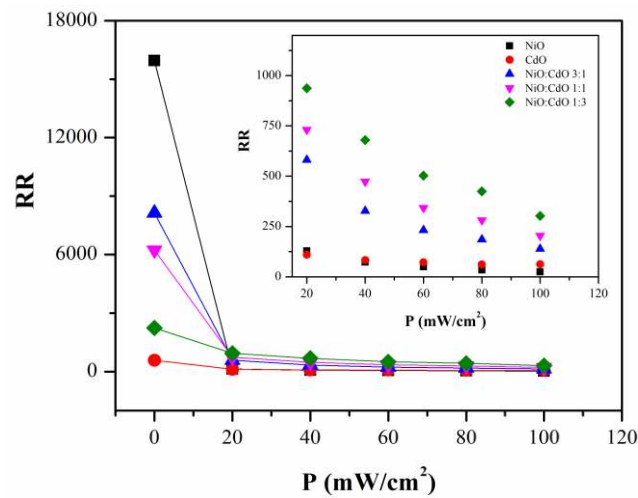
6.2.1. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların I-V Karakteristikleri

Şekil 6.7’de Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotların karanlıkta ve farklı ışık şiddetlerinde ($20 - 100 \text{ mW/cm}^2$) I-V özellikleri gösterilmiştir. Tüm fotodiyotların I-V karakteristiklerinin NiO:ZnO oranı ile değiştiği görülmüştür. Karanlık ve aydınlatma arasında negatif önyargı bölgesinde oldukça belirgin farklılıklar gözlenmektedir. Yine aydınlatma altında Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların uygulanan herhangi bir voltajdaki ters akım değerleri karanlıkta olduğundan daha yüksektir [25, 35].



Şekil 6.7. Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların I-V karakteristikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotlarda ileri akımın, uygulanan voltaja bağlı olarak artma eğilimi göstermesi ve ters akımda ise bozulmaların olması diyotların doğrultma özelliklerinin olduğuna işaret etmektedir [42]. I-V grafiklerinden görüldüğü gibi tüm Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotlar ışığa karşı duyarlıdır. Uygulanan voltajla ters akımda meydana gelen değişim, yük taşıyıcılarının değerlik bandından iletim bandına foton uyarılması ile ilişkilendirilebilir. Fotodiyotlara gelen ışığın elektron deliği çiftleri oluşturması nedeniyle akım ters ön gerilimde ışık şiddeti arttıkça artmakta iken ileri ön gerilim bölgesinde neredeyse sabit kalmıştır. Bu durumun serbest yük taşıyıcılarının akıma katkıda bulunmasından dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir [25, 42, 112]. Ters ön gerilim bölgesinde artan aydınlatma yoğunluğu ile akımdaki artış, üretilen fotodiyotların fotovoltmik özelliklerini destekler [35]. Bu sonuçlara göre üretilen fotodiyotlar ışığa karşı hassastır ve fotodiyot davranışı göstermektedir. Üretilen fotodiyotlarda karanlıkta ve farklı ışık şiddetlerindeki +5 V'da ileri yönlü akımın (IF) -5 V'da ters yönlü akıma (IR) oranı (IF/IR) olan doğrultma oranı (RR) grafikleri Şekil 6.8'de görülmektedir. Karanlık durumda fotodiyotların RR değerleri NiO:CdO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1; 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 1.60×10^4 , 5.76×10^2 , 8.14×10^3 , 6.24×10^3 ve 2.23×10^3 'dür. RR değerinin 1000'den büyük olması durumunda iyi doğrultma özelliğinden söz edilebilir [112]. CdO hariç tüm numunelerin RR değeri 1000'den yüksek olduğundan iyi doğrultma davranışı göstermiştir. Işık açıldığında RR değerleri bir düşüş göstermiş ve ışık şiddeti arttıkça azalmıştır. Işık şiddeti arttıkça RR değerlerindeki azalmanın ışıktan dolayı değerlik bandındaki elektronların ışık absorpsiyonu yoluyla iletim bandına geçmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [42]. Karanlıkta en yüksek RR değerine sahip numune NiO'dur. Işık altında kompozit fotodiyotların RR değerleri saf olanlardan daha yüksektir ve kompozit filmdeki CdO oranı arttıkça RR değeri düşmüştür. Bu sonuçlar, üretilen fotodiyotların fotoiletken davranış sergilediğini göstermektedir.



Şekil 6.8. Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların ışık yoğunluğuna göre RR değerleri.

Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotlarda NiO:CdO oranının diyot özelliklerini ne kadar etkilediğini görmek için fotodiyotlarda hayati bir yere sahip olan bariyer yüksekliği (ϕ_b) ve idealite faktörü (n) gibi parametrelerin bulunması gereklidir. Fotodiyotların ϕ_b ve n değerleri aşağıdaki denklemle ifade edilen Termiyonik Emisyon Teorisi (TET) kullanılarak hesaplanabilir [9, 24, 113];

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV - IR_s}{nkT}\right) \right) - 1 \quad (6.1)$$

Burada, I_0 , V , T , k , q ve R_s sırasıyla doyma akımı, uygulanan gerilim, mutlak sıcaklık, Boltzmann sabiti ve elektron yükü ve seri direnci ifade etmektedir. I_0 terimi aşağıdaki ilişki kullanılarak hesaplanabilir [9, 114];

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (6.2)$$

Burada A^* Richardson sabitidir ve p-Si için değeri $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ 'dir. A ise hesaplanan diyot alanıdır ve değeri $7.85 \times 10^3 \text{ cm}^2$ 'dir. I-V grafiğine karşı ileri ön gerilim akımının kesişimi ve eğimi, sırasıyla ϕ_b ve n değerlerini bulmak için kullanılır. Denklem 6.1 ve 6.2 yeniden düzenlenerek bu değerler aşağıdaki denklemler kullanılarak bulunabilir [9];

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (6.3)$$

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (6.4)$$

Tablo 6.4'de hesaplanan n ve ϕ_b değerleri verilmiştir. NiO:CdO oranı değiştikçe bu değerlerde farklılaşmalar meydana gelmiştir.

Tablo 6.4. Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların n ve ϕ_b değerleri.

Numune	n	ϕ_b (eV)
NiO	6.85	0.4178
CdO	4.01	0.4356
NiO:CdO (3:1)	7.05	0.4179
NiO:CdO (1:1)	6.03	0.4128
NiO:CdO (1:3)	8.17	0.4169

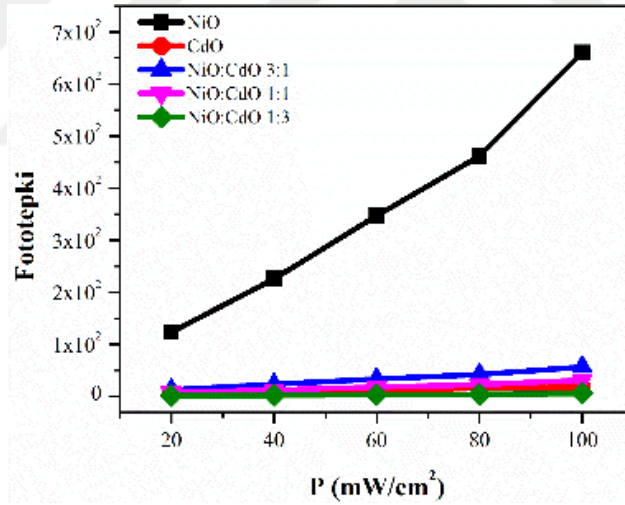
İdeal bir diyotta bir (1) olması gereken n değeri, üretilen fotodiyotlarda NiO:CdO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 6.85, 4.01, 7.05, 6.03 ve 8.17'dir. n değeri ideal bir fotodiyotun sahip olması gereken bir (1) değerinden farklıdır. Bu durumun arayüz film tabakasından, seri dirençten, arayüz durumlarından ve homojen olmayan bariyerden kaynaklandığı

düşünülmektedir [9, 108]. İdealite faktörü 1'in üzerinde olsa da düşük olması bir gelişme olarak kaydedilir [33]. Bariyer yükseklikleri de NiO:CdO oranı değişiminden bir miktar etkilenmiştir ve en düşük ϕ_b değeri 1:1 NiO:CdO oranına sahip fotodiyotta elde edilmiştir. Bu sonuçlar üretilen Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların doğrusal olmayan bir davranışa sahip olduğunu göstermektedir [25].

Fotodiyotların fototepkileri (R) ışığa karşı hassasiyetlerini belirlemede önemli bir ölçüttür. Denklem 6.5 kullanılarak Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların -5 V'da R değerleri hesaplanmış [7] ve bu değerler Şekil 6.9'da gösterilmiştir.

$$R = \frac{I_{ph} - I_{karanlık}}{I_{karanlık}} \quad (6.5)$$

Burada I_{ph} ve $I_{karanlık}$ sırasıyla fotoakım ve karanlıktaki akımdır. Üretilen tüm fotodiyotlar aydınlatma altında karanlığa göre daha yüksek bir ters akım değerine sahiptir ve en yüksek ışık hassasiyetine sahip olan fotodiyot NiO'dur. Literatürde Zn katkılı fotodiyotlarla ilgili yapılan çalışmada da saf olan numunenin R değeri en yüksektir [42].



Şekil 6.9. Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların ışık yoğunluğuna göre R değerleri.

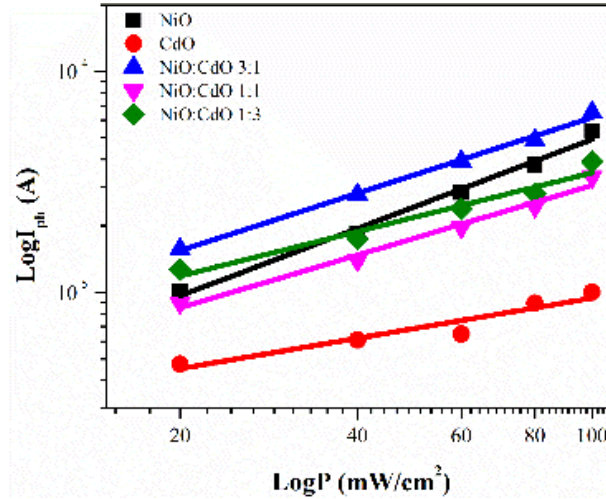
Fotodiyotların R değerleri NiO:CdO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1; 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 6.60×10^2 , 0.18×10^2 , 0.57×10^2 , 0.32×10^2 ve 0.06×10^2 'dir. En yüksek fototepki 100 mW/cm^2 ışık şiddetinde NiO fotodiyotta 6.60×10^2 'dir ve NiO:CdO kompozit fotodiyotlarda CdO oranı arttıkça fototepki azalmıştır. Fotodiyotların fototepkileri ışık şiddeti arttıkça artmıştır ve NiO:CdO oranı değiştikçe farklı ışık hassasiyetine sahip fotodiyotlar ortaya çıkmıştır. Benzer sonuçlara literatür çalışmalarında da rastlanmıştır [42]. NiO'ya CdO ilavesiyle NiO'nun iş fonksiyonu değişmiştir ve diyotun tükenme bölgesinin genişliğinde bir farklılaşmaya neden olmuştur. Bu durumun, negatif voltajlarda yük ayırımı azaltarak NiO'ya göre kompozit esaslı NiO:CdO fotodiyotların daha düşük

fototepki göstermesine neden olduğu düşünülmektedir. Bazı optik iletişim uygulamalarında yüksek fototepki istenirken bazı uygulamalarda ise elektronik cihazların bir bileşenini anahtarlama için kontrolörlerin düşük fototepki vermesi gerekebilir [10]. Al/NiO: CdO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotlarda NiO: CdO oranının değişmesiyle ışık tepkilerinin kontrol edilebileceği görülmüştür ve üretilen fotodiyotlar fotoiletken davranış sergilemiştir.

Fotodiyotların ışığa duyarlılıklarını daha iyi analiz etmek için aydınlatma durumundaki akımın aydınlatma yoğunluğuna göre grafiği çizilmiş ve sonuçlar $\log(I_{ph}) - \log(P)$ grafiğinde gösterilmiştir (Şekil 6.10). I_{ph} ve aydınlatma gücü (P) arasındaki ilişki aşağıdaki denklemle ifade edilir [9];

$$I_{ph} = \alpha P^m \quad (6.6)$$

Burada, α sabit, P ışık yoğunluğu ve m bir sabittir. $\log(I_{ph}) - \log(P)$ grafiğinin eğimi bulunarak m değerleri elde edilebilir. Al/NiO: CdO/p-Si/Al fotodiyotların NiO: CdO oranına göre m değerleri 1.014 (1:0 için), 0.456 (0:1 için), 0.861 (3:1 için), 0.793 (1:1 için) ve 0.669 (1:3 için) olarak bulunmuştur. Pehlivanoglu tarafından gerçekleştirilen çalışmada da saf NiO için m değeri 1.12 bulunmuştur ve çalışmamızla uyumludur [42]. Yine NiO fotodiyotlarla ilgili bir başka çalışmada da m değeri 1.29 olarak hesaplanmıştır [25]. Kompozit fotodiyotlarda CdO oranı arttıkça m değeri azalmıştır. ZnO: CdO kompozit fotodiyotlarla ilgili çalışmada da benzer bir durum ortaya çıktığı görülmüştür ve yüksek CdO oranında m değeri 0.56 olarak hesaplanmıştır [27].



Şekil 6.10. Al/NiO: CdO/p-Si/Al fotodiyotların I_{ph} -P çizimleri.

Eğer $m = 1$ ise rekombinasyon mekanizması monomolekülerdir, eğer $m = 0.5$ ise rekombinasyon mekanizması bimolekülerdir, $m = 0.5 - 1$ arasında bir değerde ise bu değerler tuzak seviyelerinin bölgesel durumlarda sürekli dağılımını gösterir [7, 30, 112]. Rekombinasyonun

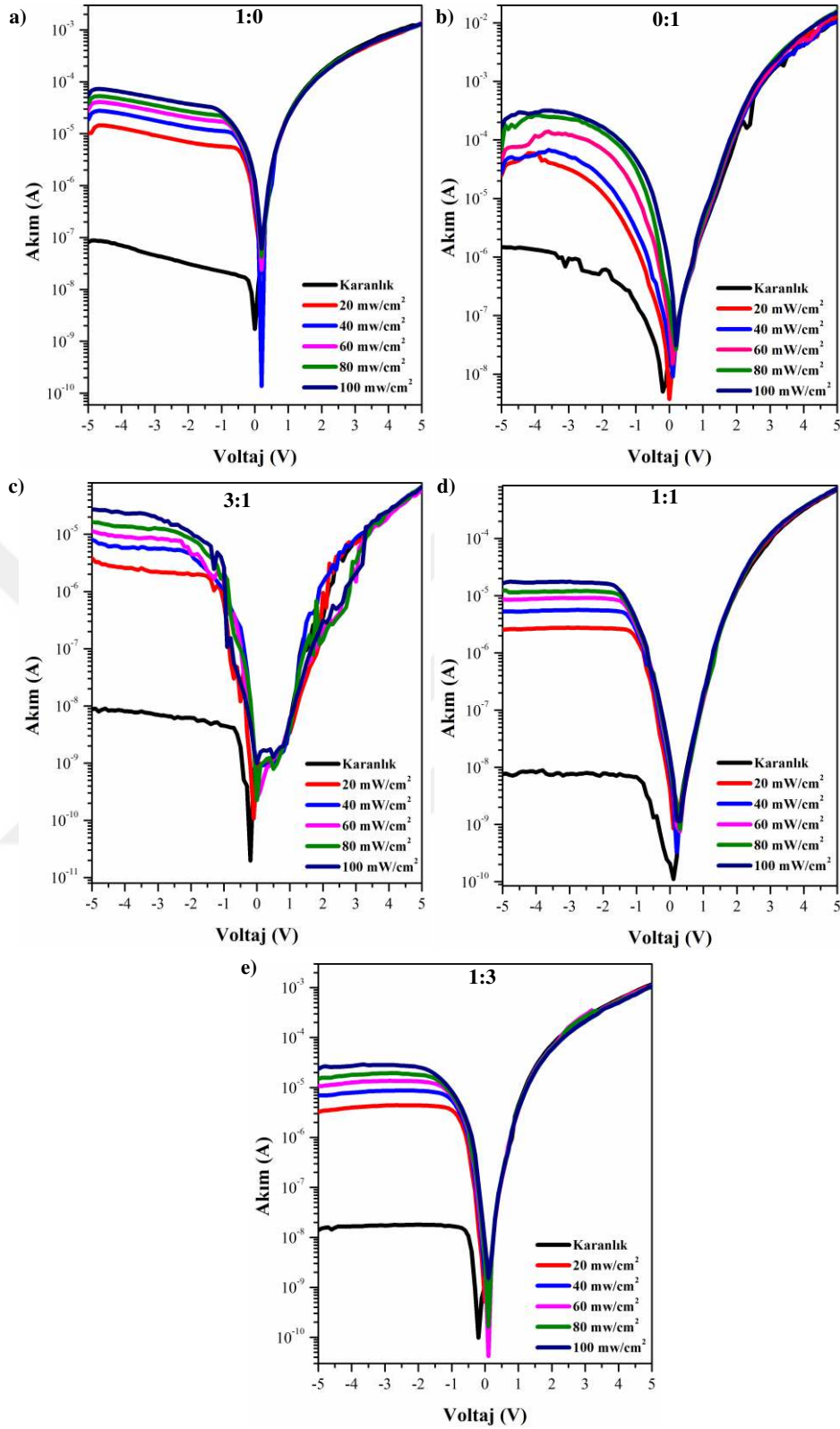
monomoleküler olması tuzak durumu veya rekombinasyon merkezi boyunca bir elektron ve delik rekombinasyonunu ifade ederken, rekombinasyonun bimoleküler olması, Fermi seviyesine ulaşan taşıyıcıların yoğunluğunun Fermi seviyesinin altına düşen taşıyıcıların yoğunluğundan daha fazla olmasını ifade eder [42]. Bu çalışmada elde edilen m değerleri Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların fotoiletkenlik davranışının doğrusal olduğunu göstermektedir. NiO ve CdO fotodiyotların rekombinasyon mekanizmaları sırasıyla monomoleküler ve bimolekülerdir. Kompozit fotodiyotların m değerleri 0.5 - 1 arasında olduğundan bu fotodiyotların fotoiletken mekanizmaları tuzak seviyelerinin sürekli dağılımının varlığı ile kontrol edilebilir [25]. Fotodiyotların fotoduyarlılıkları (PR) Denklem 6.7 kullanılarak hesaplanabilir [42].

$$PR = \frac{I_{ph} - I_{karanlık}}{PA} \quad (6.7)$$

Burada, I_{ph} , $I_{karanlık}$, P ve A sırasıyla fotoakım, karanlıktaki akım, ışık yoğunluğu ve fotodiyotun yüzey alanını ifade etmektedir. Üretilen fotodiyotların 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki PR değerleri NiO:CdO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 4.83 x 10⁻⁴ A/W, 8.54 x 10⁻⁵ A/W, 4.04 x 10⁻⁴ A/W, 1.90 x 10⁻⁴ A/W ve 1.88 x 10⁻⁴ A/W'dur. Gozesh vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada saf CdO için PR değeri 1 x 10⁻⁵ olarak elde edilmiştir [9]. Fotovoltaik performansı iyileştirmek için daha hızlı fotoduyarlılık gereklidir [33]. En yüksek PR değerine sahip fotodiyot NiO en düşük PR değerine sahip fotodiyot ise CdO'dur. Kompozit fotodiyotlarda ise bu iki fotodiyot arasında değerler elde edilmiştir ve kompozit filmde CdO oranı arttıkça PR değerleri düşmüştür. Tüm Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotlar fotoduyarlıdır ve PR değerlerinin NiO:CdO oranının değişiminden etkilendiği görülmüştür.

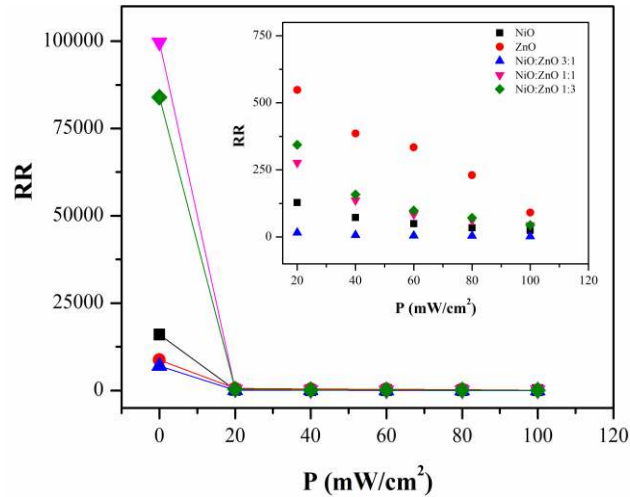
6.2.2. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların I-V Karakteristikleri

Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların I-V karakteristiklerinin anlatıldığı kısımda verilen bütün denklemler bu kısımda da aynen kullanıldı. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotların karanlıkta ve farklı ışık şiddetlerinde (20 - 100 mW/cm²) I-V özellikleri Şekil 6.11'de görülmektedir. NiO:ZnO oranı 3:1 olan fotodiyot hariç diğer fotodiyotlarda ileri bölgede akımın ışık şiddetinden çok fazla etkilenmediği görülmüştür. Bu numunede ise yaklaşık 2.5 - 3.5 volt aralığında akım değerlerinde farklılaşmalar gözlemlenmiştir. Ters bölgede ise akım ışık şiddetinden etkilenmiş ve ışık şiddeti arttıkça akım yükselmiştir. Bu durum, üretilen cihazların fotodiyot davranışı sergilediğini göstermektedir ve bu durumun elektron boşluk ikilisinin ters ön gerilim bölgesinde daha geniş bir alana yayılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [25, 108].



Şekil 6.11. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların I-V karakteristikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların karanlıkta ve farklı ışık şiddetlerindeki RR değerleri Şekil 6.12’de görülmektedir. Işık açıldığında RR değerleri bir düşüş göstermiş ve ışık şiddeti arttıkça azalmıştır. Karanlık durumda fotodiyotların RR değerleri NiO:ZnO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 1.60×10^4 , 8.70×10^3 , 7.01×10^3 , 9.97×10^4 ve 8.39×10^4 ’dür. RR değerleri 1000’den büyük olduğu için tüm fotodiyotlar iyi doğrultma davranışı göstermiştir [112]. En yüksek RR değeri NiO:ZnO oranı 1:1 olan Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotta elde edilmiştir. ZnO katkısı CdO’ya göre fotodiyotların doğrultma özelliklerini geliştirmiştir. Literatürde ZnO:NiO kompozit fotodiyotlarla ilgili gerçekleştirilen çalışmada RR değerleri 1000’den düşük olarak hesaplanmıştır [33]. Buna göre ürettiğimiz Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlar literatür çalışmasına göre daha iyi doğrultma özelliği göstermiştir. Sonuçlar, Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotoiletken davranış gösterdiğine ve NiO:ZnO oranı değiştirilerek fotoiletken davranışların kontrol edilebileceğine işaret etmektedir. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların hesaplanan n ve ϕ_b değerleri Tablo 6.5’de verilmiştir. Görüldüğü gibi bu değerler NiO:ZnO oranından etkilenmiştir ve n değerleri ideal bir diyotta olması gereken değerden ($n = 1$) daha yüksektir. Bu durum arayüz film tabakasından, seri dirençten, arayüz durumlarından ve homojen olmayan bariyerden kaynaklanmış olabilir [9, 108]. Bariyer yükseklikleri de NiO:ZnO oranı değişiminden etkilenmiştir ve en düşük ϕ_b değeri saf NiO fotodiyotta elde edilmiştir. Bu sonuçlar üretilen Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların doğrusal olmayan bir davranışa sahip olduğuna işaret etmektedir [25].

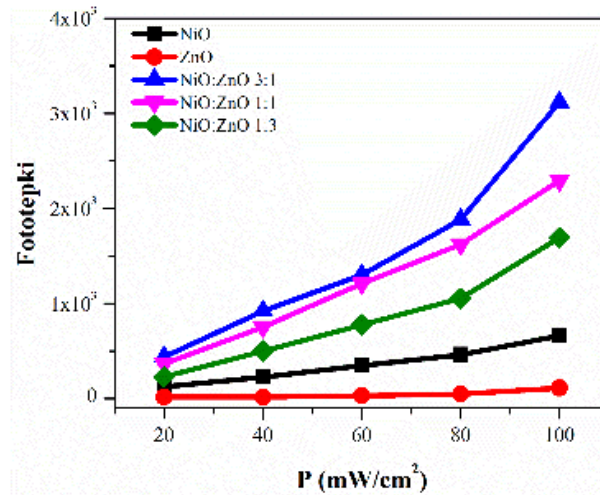


Şekil 6.12. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların ışık yoğunluğuna göre RR değerleri.

Tablo 6.5. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların n ve ϕ_b değerleri.

Numune	n	ϕ_b (eV)
NiO	6.85	0.4178
ZnO	8.43	0.4553
NiO:ZnO (3:1)	2.42	0.4524
NiO:ZnO (1:1)	4.65	0.5489
NiO:ZnO (1:3)	7.57	0.4979

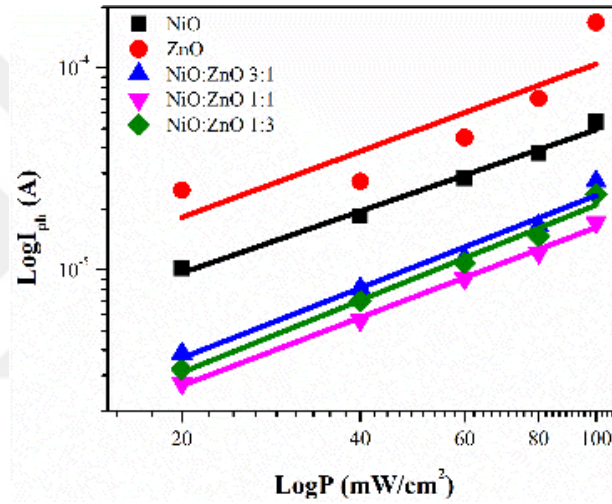
Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların farklı ışık şiddetlerinde fototepki değerleri (R) Şekil 6.13’de görülmektedir. Görüldüğü gibi fotodiyotların aydınlatma altındaki fototepkileri karanlık durumdan daha yüksektir ve aydınlatma şiddeti arttıkça artmıştır. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların R değerleri NiO:ZnO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 6.60×10^2 , 1.13×10^2 , 3.12×10^3 , 2.29×10^3 ve 1.69×10^3 ’dür. Kompozit fotodiyotların ışığa karşı hassasiyetleri saf olanlardan daha yüksektir ve ZnO oranı arttıkça azalmaktadır. Işığa karşı en yüksek hassasiyetli fotodiyot NiO:ZnO oranı 3:1 olan Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyottur ve en yüksek fototepki bu cihazda 100 mW/cm^2 ışık şiddetinde 3.12×10^3 olarak hesaplanmıştır. ZnO:NiO fotodiyotlarla ilgili daha önce gerçekleştirilen bir çalışmada da en yüksek fototepki değerine yüksek NiO içeren numunede ulaşılmıştır (1277) ve buna göre elde ettiğimiz sonuçlar literatürle uyum içerisindedir [57]. Sonuçlar, NiO:ZnO oranının değiştirilerek fotodiyotların ışık tepkilerinin kontrol edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 6.13. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların ışık yoğunluğuna göre R değerleri.

Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların $\log(I_{ph}) - \log(P)$ grafikleri Şekil 6.14’de görülmektedir. Bu fotodiyotların NiO:ZnO oranına göre m değerleri 1.014 (1:0 için), 1.085 (0:1 için), 1.15 (3:1

için), 1.12 (1:1 için) ve 1.19 (1:3 için) olarak elde edilmiştir. Soylu vd. [33], tarafından gerçekleştirilen NiO:ZnO fotodiyotlarla ilgili çalışmada kompozit fotodiyotların m değerleri 1'in üstünde ve bizim çalışmamızla uyum içerisinde bulunmuştur ($m = 1.10-1.38$). Kompozit NiO:ZnO fotodiyotların m değerli saf olanlardan daha yüksektir. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların bulunan m değerleri fotoiletkenlik davranışının doğrusal olduğunu göstermektedir ve bu fotodiyotların rekombinasyon mekanizmaları monomolekülerdir. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki PR değerleri NiO:ZnO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 4.83×10^{-4} A/W, 1.49×10^{-3} A/W, 2.46×10^{-4} A/W, 1.54×10^{-4} A/W ve 2.12×10^{-4} A/W olarak hesaplanmıştır. En yüksek fotoduyarlılık değeri saf ZnO numunesinde elde edilmiştir. Tüm fotodiyotlar ışığa karşı duyarlıdır ve PR değerleri NiO:ZnO oranını değiştirerek ayarlanabilir.



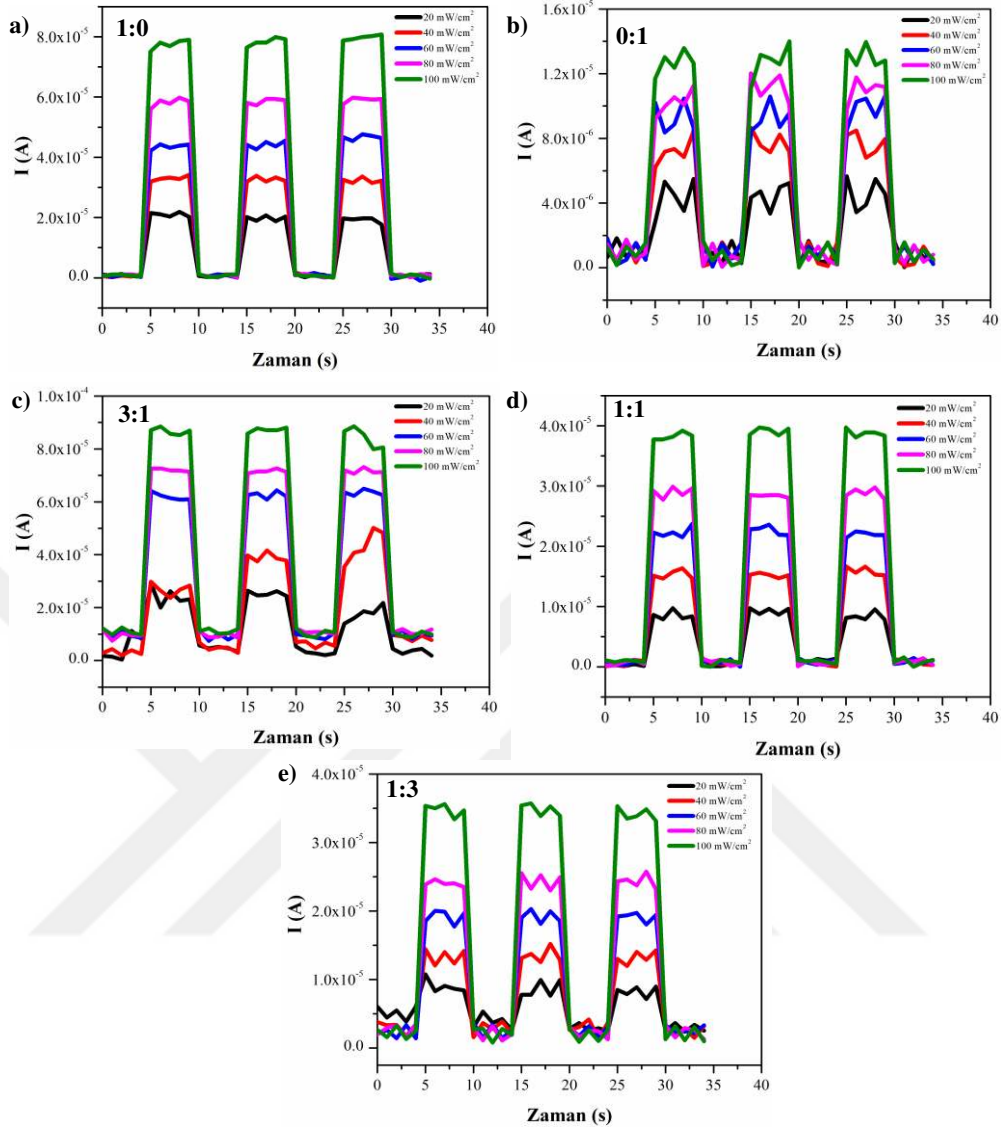
Şekil 6.14. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların I_{ph} -P çizimleri.

6.3. Fotodiyotların Geçici Fotoakım, Fotokapasitans ve Fotoiletkenlik Özellikleri

Bu kısımda üretilen kompozit esaslı fotodiyotların geçici fotoakım, fotokapasitans ve fotoiletkenlik özellikleri detaylıca incelenmiş ve irdelenmiştir.

6.3.1. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların Geçici Fotoakım, Fotokapasitans ve Fotoiletkenlik Özellikleri

Fotodiyotların fotoiletkenlik mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasında fotoakım-zaman ($I-t$) karakterizasyonları önemli bir yere sahiptir. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların -5V'da ve farklı aydınlatma şiddetlerinde (20 - 100 mW/cm²) zamana bağlı geçici fotoakım ölçüm sonuçları Şekil 6.15'de görülmektedir.



Şekil 6.15. Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların geçici fotoakım-zaman grafikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

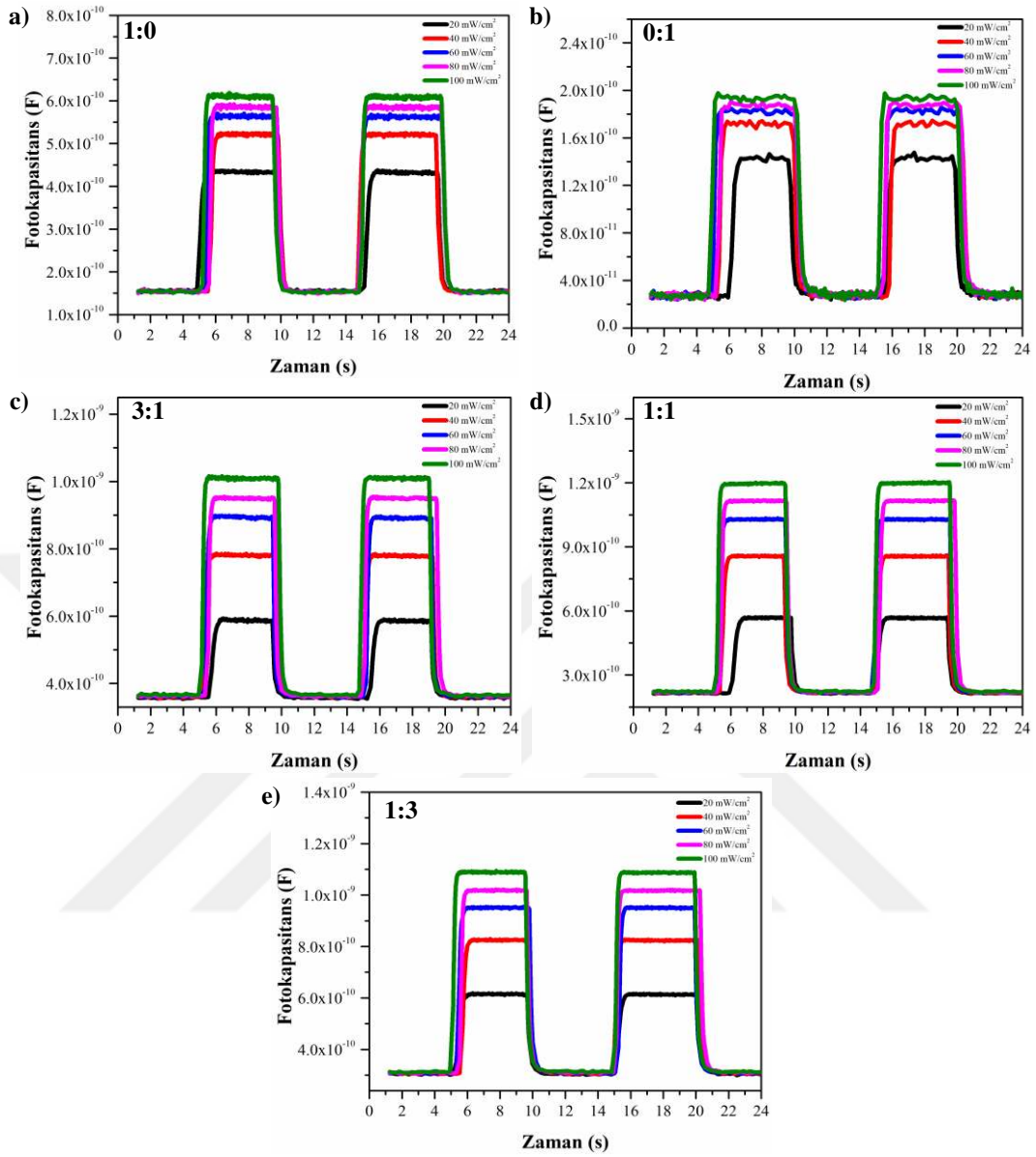
Fotoakımlarda ışık şiddeti arttıkça ani artışlar görülmüştür. Bu durum fotodiyotların tükenme bölgesinde güneş ışınımı ile daha fazla yük taşıyıcısı oluşturmamasından kaynaklanmıştır. Fotoakımların ışık şiddeti arttıkça artması üretilen fotodiyotların iyi fotoiletken davranışa sahip olduğunu göstermektedir [108]. Aydınlatma ile beraber fotoakımlar doyma seviyesine kadar yükselir, bunun nedeni serbest yük taşıyıcılarının oluşarak sayılarının artması ve fotojenere elektronların akıma katkı sağlamasıdır [25, 42, 108]. Aydınlatmaya son verildiğinde ise fotoakımlar yük taşıyıcıların derin seviyelerde sıkışıp kalmasından dolayı hızla azalarak başlangıç seviyesine düşmüştür [25, 30, 42]. Aydınlatma açılıp kapatıldıkça yukarıda bahsedilen durumlar tekrar etmiştir bu tekrarlar Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların tersine çevrilebilir anahtarlama davranışı gösterdiğini ifade eder [42].

Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki fotoakım değerleri NiO:CdO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 7.90 x 10⁻⁵ A, 1.36 x 10⁻⁵ A, 8.85 x 10⁻⁵ A, 3.92 x 10⁻⁵ A ve 3.56 x 10⁻⁵ A'dır. Bu çalışmada üretilen saf NiO ve saf CdO fotodiyotların fotoakım değerleri literatür çalışmalarındaki NiO ve CdO fotodiyotların değerleriyle uyum içerisindedir [7, 25, 26, 30]. En yüksek fotoakım değeri en düşük CdO oranına sahip kompozit fotodiyotta elde edilmiştir ve CdO oranının artması fotoakım değerlerinin düşmesine yol açmıştır. Fotoakımdaki meydana gelen bu düşüşün yüksek CdO varlığının NiO taşıyıcı konsantrasyonunu artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu taşıyıcı konsantrasyonun artması yüzey elektrik alanını bozarak taşıyıcı hareketliliğini azaltabilir ve bu durum fototepki sürelerinin artmasına neden olabilir [42]. Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların fototepki özellikleri NiO:CdO oranı ile değiştirilebilir ve kontrol edilebilir.

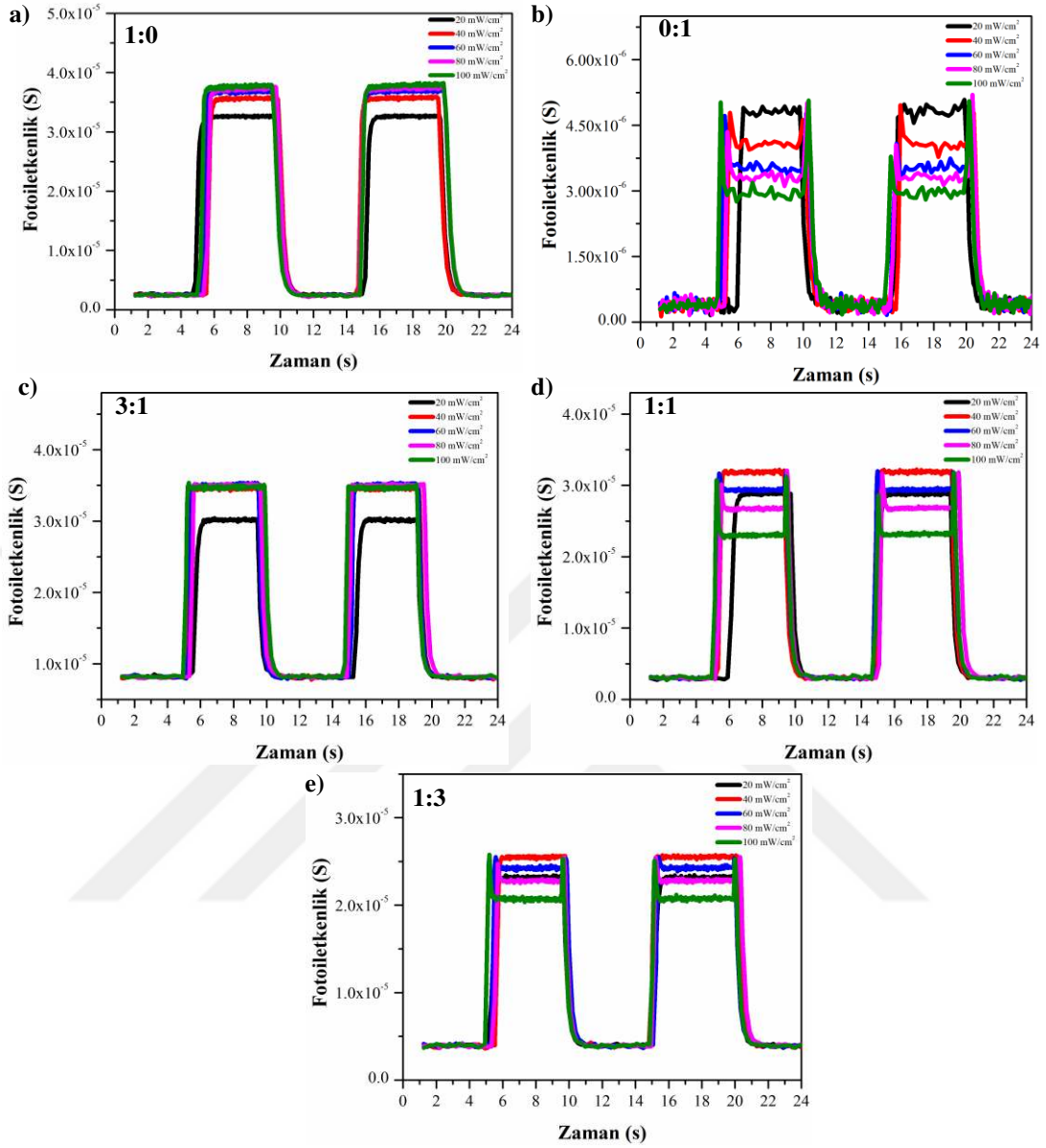
Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların 10 kHz'de ve farklı ışık şiddetlerindeki (20 - 100 mW/cm²) fotokapasitanslarının zamana bağlı değişimleri Şekil 6.16'da ve Şekil 6.17'de gösterilmiştir. Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların fotokapasitans ve fotoiletkenlikleri ışık şiddetinden etkilenmiştir. Işık açıldığında fotokapasitans aniden artmış ve doymuş hale gelmiştir. Işık açık kaldıkça ise kararlı durumunu devam ettirmiş ve ışık kapatıldığında ise fotokapasitans herhangi bir bozulma olmadan eski seviyesine geri dönmüştür. Işık şiddeti arttıkça fotokapasitans artmıştır. Bu durumun ışık altında serbest yük taşıyıcılarının daha fazla üretilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [25, 108].

Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki fotokapasitans değerleri NiO:CdO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 0.62 nF, 0.2 nF, 1.02 nF, 1.19 nF ve 1.09 nF'dır. En yüksek fotokapasitans değerine yarı yarıya NiO ve CdO içeren Al/NiO:CdO/p-Si/Al kompozit esaslı numunede ulaşılmıştır ve kompozit numunelerin fotokapasitans değerleri saf olanlardan daha yüksektir. Fotoiletkenlik değerleri de ışık açıldığında aniden yükselmiş ve belirli bir doymuşluk değerine ulaştıktan sonra tekrar eski değerine dönmüştür. Aydınlatmaya bağlı olarak fotokapasitans ve fotoiletkenlik değerlerinde meydana gelen ani değişiklikler üretilen fotodiyotların fotokapasitif ve fotoiletken davranış sergilediğini göstermektedir [9, 25, 27, 108, 112].

Kararlı fotokapasitans ve fotoiletkenlik durumlarının NiO:CdO oranına göre değiştirilebileceği saptanmıştır. Bu sonuçlar, Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların fotokapasitör olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



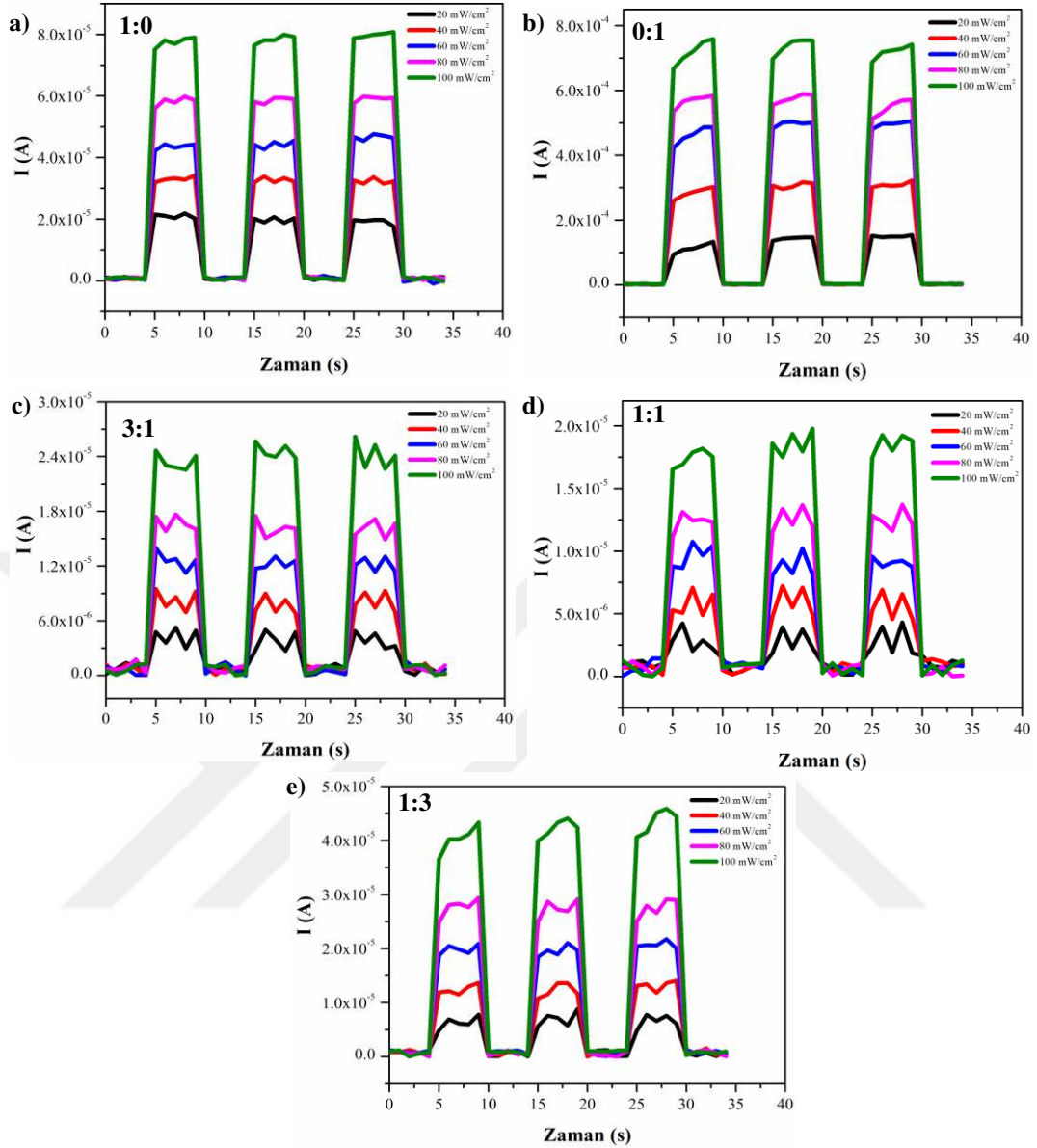
Şekil 6.16. Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların geçici fotokapasitans - zaman grafikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.



Şekil 6.17. Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların fotoiletkenlik - zaman grafikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

6.3.2. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların Geçici Fotoakım, Fotokapasitans ve Fotoiletkenlik Özellikleri

Şekil 6.18’de Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların -5V’da ve farklı aydınlatma şiddetlerinde ($20 - 100 \text{ mW/cm}^2$) zamana bağlı geçici fotoakım ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.18. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların geçici fotoakım-zaman grafikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

Fotoakımlarda ışık şiddeti arttıkça ani artışlar görülmüştür. Aydınlatma ile beraber fotoakımlar doyma seviyesine kadar yükselmiş ve belirli bir doygunluk seviyesine ulaştıktan sonra aydınlatma sonlandırıldığında hızla başlangıç seviyesine düşmüştür. Aydınlatma açılıp kapatıldıkça bu bahsedilen durumların tekrar etmesinden dolayı Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlar tersine çevrilebilir anahtarlama davranışı göstermiştir. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki fotoakım değerleri NiO:ZnO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 7.90×10^{-5} A, 7.59×10^{-4} A, 2.57×10^{-5} A, 1.97×10^{-5} A ve 4.41×10^{-5} A'dır. Sonuçlar NiO, ZnO ve ZnO esaslı kompozit fotodiyotlarla ilgili yapılan çalışmalarla uyum içerisindedir [10, 33, 46, 47, 55, 57].

En yüksek fotoakım değeri saf ZnO numunesinde elde edilmiştir. NiO'ya ZnO katkısı fotoakım değerlerini düşürmüştür. Soylu vd. tarafından gerçekleştirilen benzer bir çalışmada da yüksek ZnO katkısı NiO:ZnO kompozit fotodiyotun fotoakım değerinin düşmesine yol açmıştır [33]. Fotoakımdaki meydana gelen bu düşüşün yüksek ZnO varlığının NiO taşıyıcı konsantrasyonunu artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu taşıyıcı konsantrasyonun artması yüzey elektrik alanını bozarak taşıyıcı hareketliliğini azaltabilir ve bu durum fototepki sürelerinin artmasına neden olabilir [42].

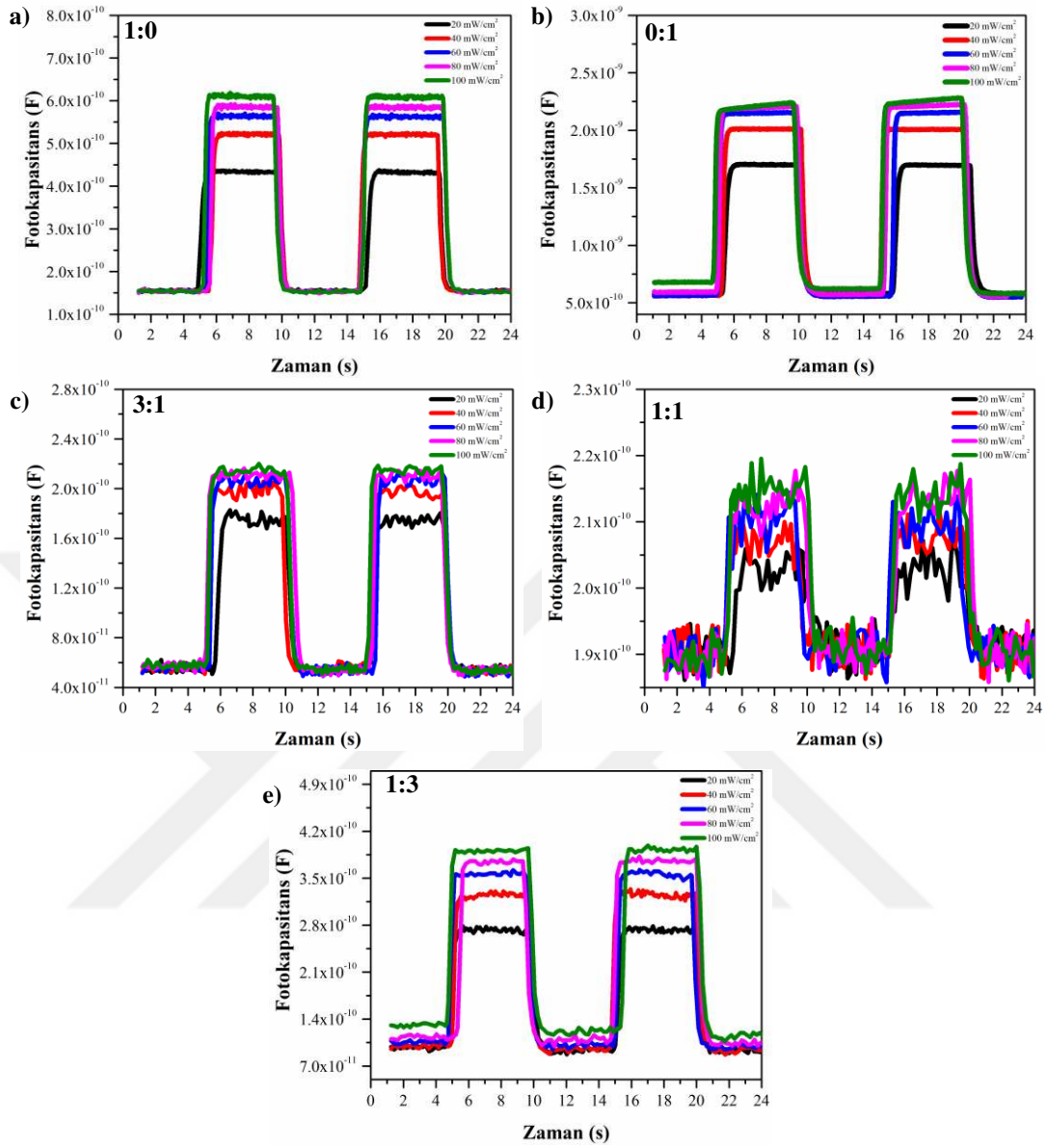
Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fototepki özellikleri NiO:ZnO oranı ile değiştirilebilir ve kontrol edilebilir.

Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların 10 kHz'de ve farklı ışık şiddetlerindeki (20 - 100 mW/cm²) fotokapasitans ve fotoiletkenliklerinin zamana bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de görülmektedir. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotokapasitans ve fotoiletkenlikleri ışık şiddetinden etkilenmiştir. Işık açıldığında fotokapasitans aniden artmış ve doygun hale gelmiştir. Işık açık kaldıkça ise kararlı durumunu devam ettirmiş ve ışık kapatıldığında ise fotokapasitans herhangi bir bozulma olmadan eski seviyesine geri dönmüştür. Işık şiddeti arttıkça fotokapasitans değerleri yükselmiştir.

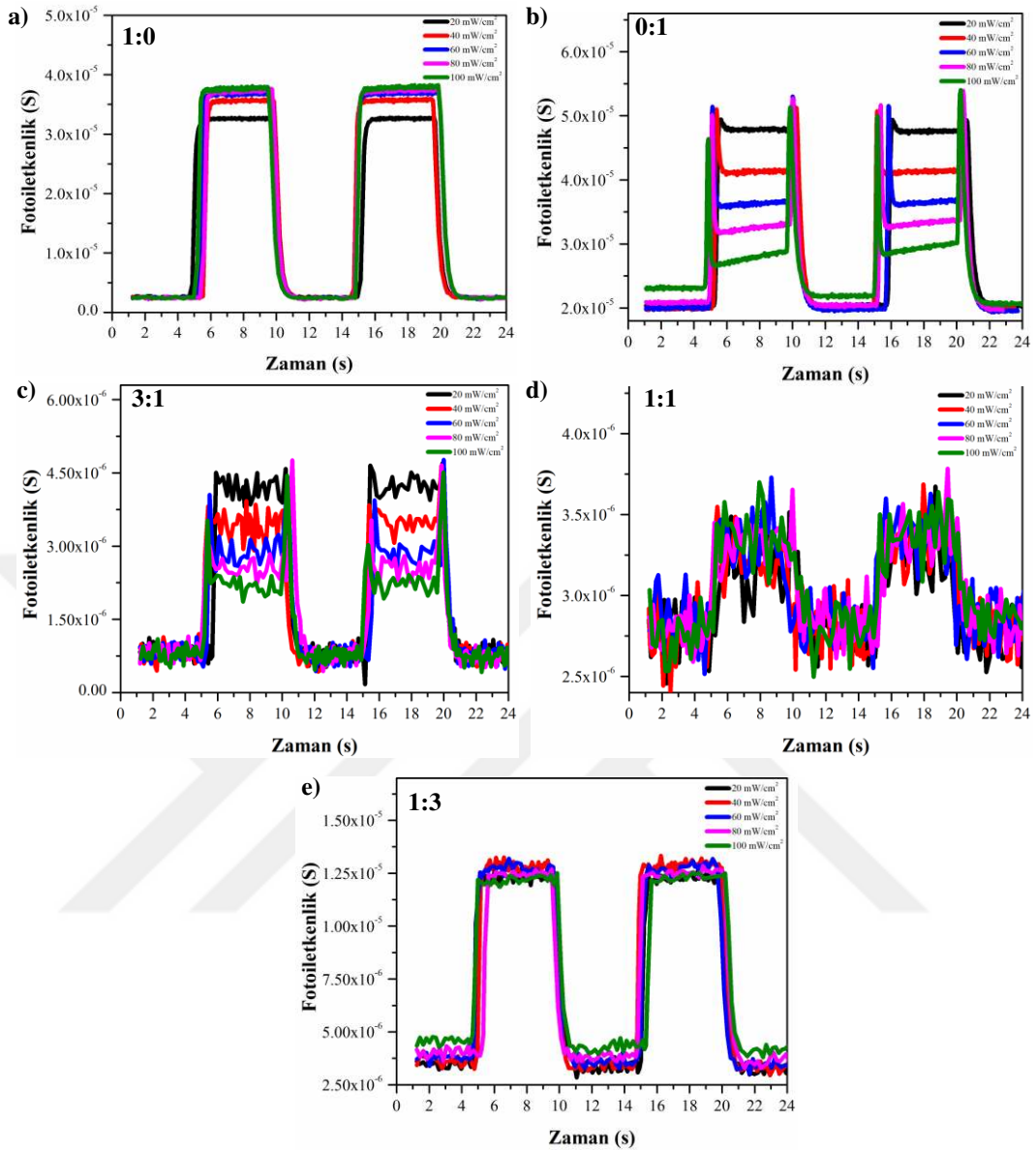
Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki fotokapasitans değerleri NiO:ZnO oranına göre 1:0, 0:1, 3:1, 1:1 ve 1:3 için sırasıyla 0.62 nF, 2.24 nF, 0.21 nF, 0.22 nF ve 0.40 nF olarak elde edilmiştir. En yüksek fotokapasitans değerine sahip numune saf ZnO'dur. NiO:ZnO kompozit numunelerin fotokapasitans değerleri ZnO oranı arttıkça artmıştır.

Fotoiletkenlik değerleri de ışık açıldığında aniden yükselmiş ve belirli bir doygunluk değerine ulaştıktan sonra tekrar eski değerine dönmüştür. Aydınlatmaya bağlı olarak fotokapasitans ve fotoiletkenlik değerlerinde meydana gelen ani değişiklikler üretilen fotodiyotların fotokapasitif ve fotoiletken davranış sergilediğine işaret eder [9, 25, 27, 108, 112].

Sonuçlar, kararlı fotokapasitans ve fotoiletkenlik durumlarının NiO:ZnO oranına göre değiştirilebileceğini ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotokapasitör olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 6.19. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların geçici fotokapasitans - zaman grafikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.



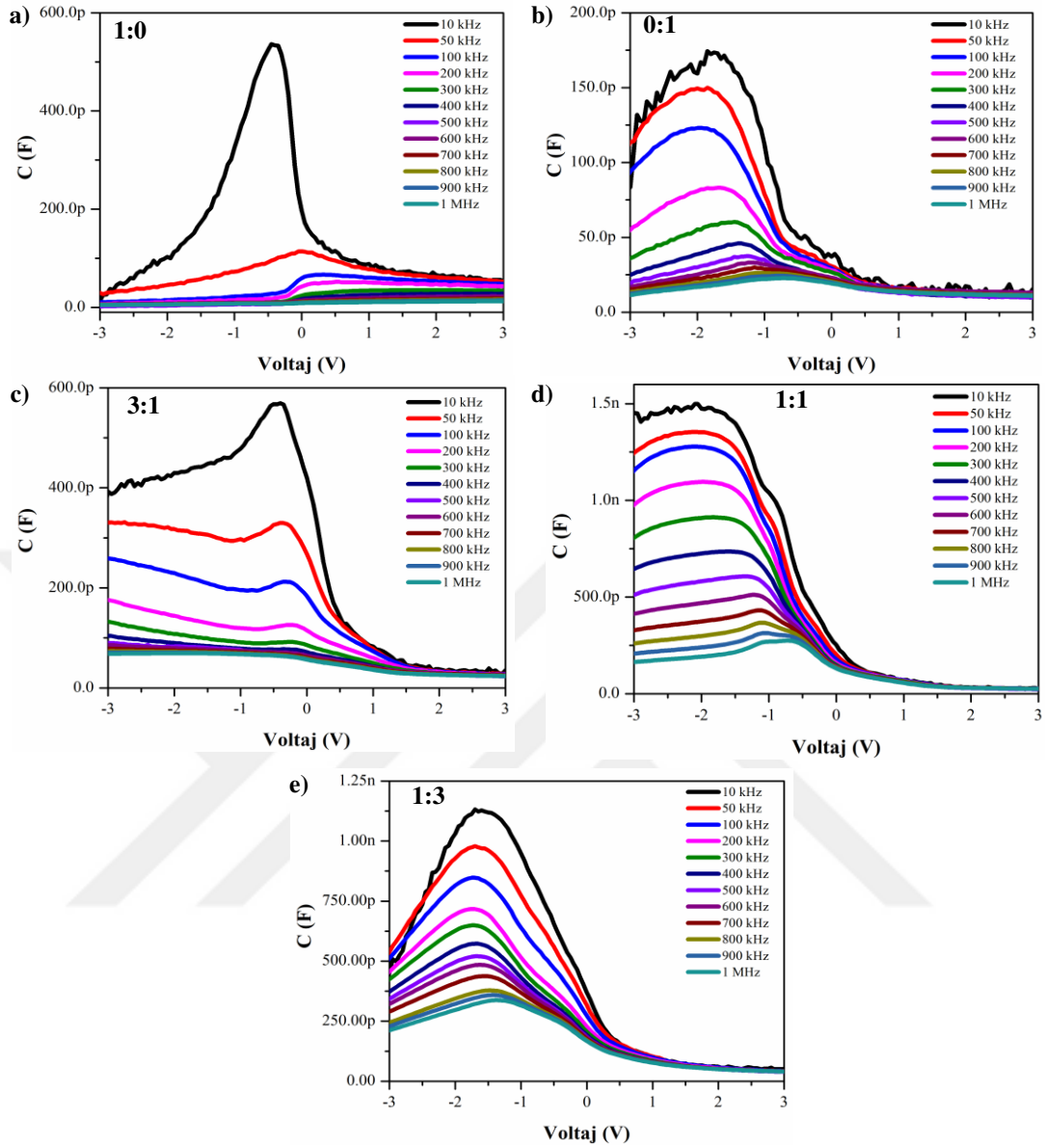
Şekil 6.20. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotoiletkenlik - zaman grafikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

6.4. Fotodiyotların C-V ve G-V Karakteristikleri

Bu kısımda, üretilen kompozit esaslı fotodiyotların elektriksel karakterizasyonları sonucu elde edilen veriler detaylıca incelenmiş ve irdelenmiştir.

6.4.1. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların C-V ve G-V Karakteristikleri

Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların C-V and G-V ölçümleri elektriksel davranışlarını daha iyi karakterize etmek için yapılmıştır. Farklı frekanslarda (10 kHz – 1 MHz) Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların C-V grafikleri Şekil 6.21’ de görülmektedir.



Şekil 6.21. Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotları C-V karakteristikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

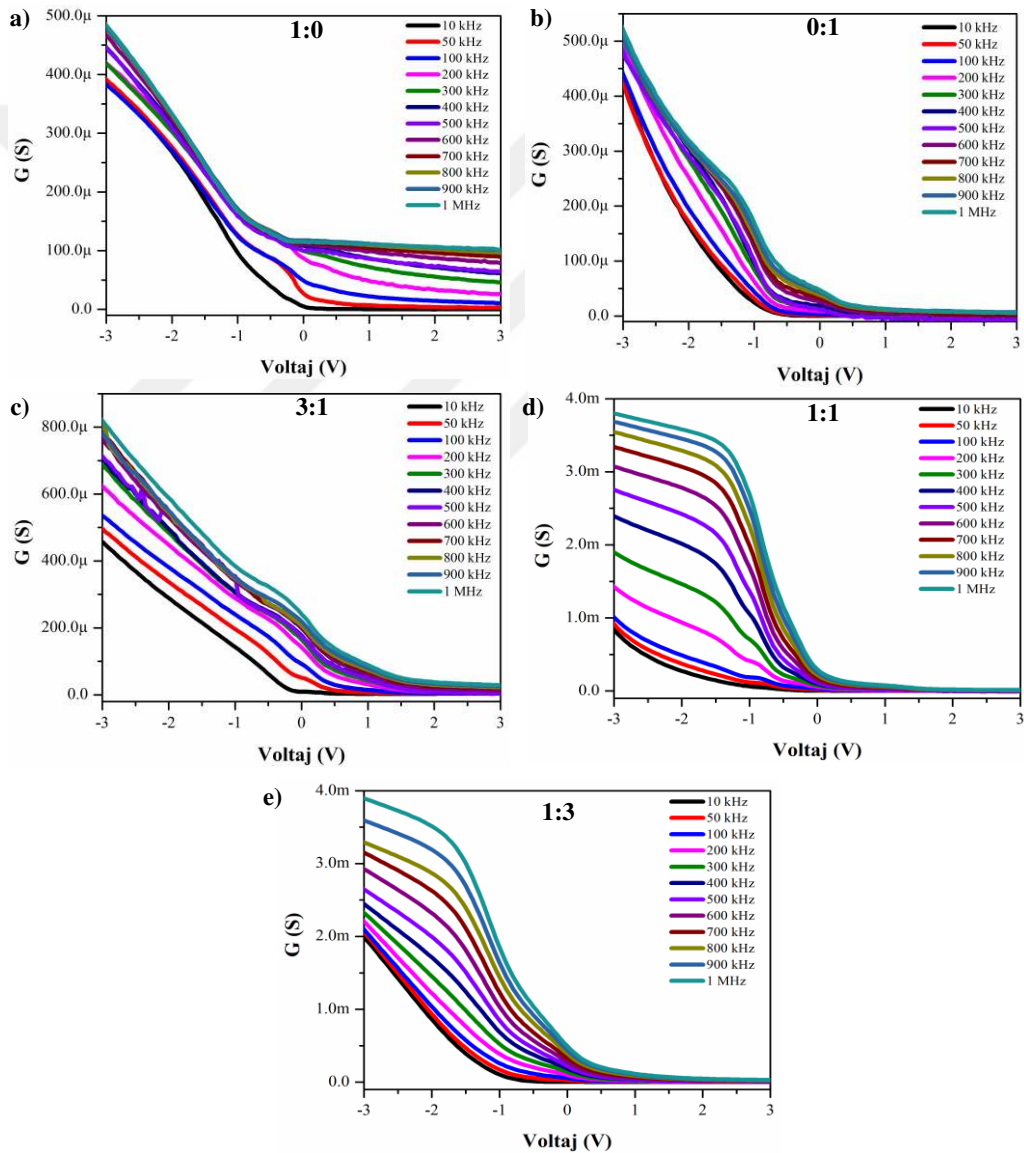
NiO numunesinde ters ön gerilim bölgesinde sadece 10 kHz frekansta pik oluşmuş ve frekans arttıkça pikler ileri sapmada görülmeye başlamıştır. CdO ve kompozit numunelerde ise tüm frekans değerlerinde piklerin ters ön gerilim bölgesinde olduğu gözlenmektedir. Bu piklerin varlığı arayüzdeki durum değişiklikleri, seri direnç ve bant kuyrukları durumunda yakalanan taşıyıcılarla açıklanabilir [42, 108].

Piklerin konumları NiO:CdO oranına göre değişmiştir ve NiO hariç diğer numunelerde frekans arttıkça pikler daha düşük voltaj değerlerinde oluşmuştur. Tüm devre elemanlarında artan frekansla kapasite değerlerinde düşme meydana gelmiştir. Bu durum sinyal değişimine cevap veren arayüz durumlarında sıkışan yüklerin varlığına ve düşük frekans değerlerinde yük taşıyıcıların AC

sinyallere yanıt vermesine atfedilir [9, 27, 35]. NiO:CdO oranı değıştikçe arayüz yüklerinin sayısı değıştirilebilir ve böylelikle kapasite profili kontrol edilebilir [10].

En yüksek kapasite değeri 1:1 NiO:CdO oranına sahip kompozit fotodiyotta elde edilmiştir ve Al/NiO:CdO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotların kapasite değeri saf olanlardan daha yüksektir. Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların kapasiteleri NiO:CdO oranı değıştirilerek ayarlanabilir.

Farklı frekanslarda (10 kHz – 1 MHz) Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların G-V grafikleri Şekil 6.22’de görölmektedir.



Şekil 6.22. Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların G-V karakteristikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

İletkenlik değerleri de frekans ve voltaj değişiminden etkilenmiş ve kapasitenin aksine frekans arttıkça iletkenlik üretilen tüm fotodiyotlarda artmıştır. Bu artış arayüz durumlarının varlığını doğrulamaktadır [25, 42, 108].

En yüksek iletkenlik değeri yüksek CdO oranına sahip kompozit fotodiyotta elde edilmiştir ve kompozit numunelerin iletkenlik değerleri daha yüksektir. Ayrıca kompozit fotodiyotlarda CdO oranı arttıkça iletkenlik değeri artmıştır. Literatürde yapılan ZnO:CdO kompozit fotodiyotla ilgili çalışmada da en yüksek iletkenlik değerini yüksek CdO oranına sahip fotodiyot vermiştir [27].

Sonuçlar, Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların kapasite ve iletkenliklerinin seri dirençten etkilendiğini göstermektedir.

C-V ve G-V ölçümlerinden Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların kapasite ve iletkenliklerinin seri dirençten oldukça etkilendiği tespit edilmiştir. Bu etki teorik olarak düzeltilebilir veya ortadan kaldırılabılır [9, 27]. Kapasite ve iletkenlikler aşağıdaki denklemler yardımıyla düzeltilebilir [9, 115, 116];

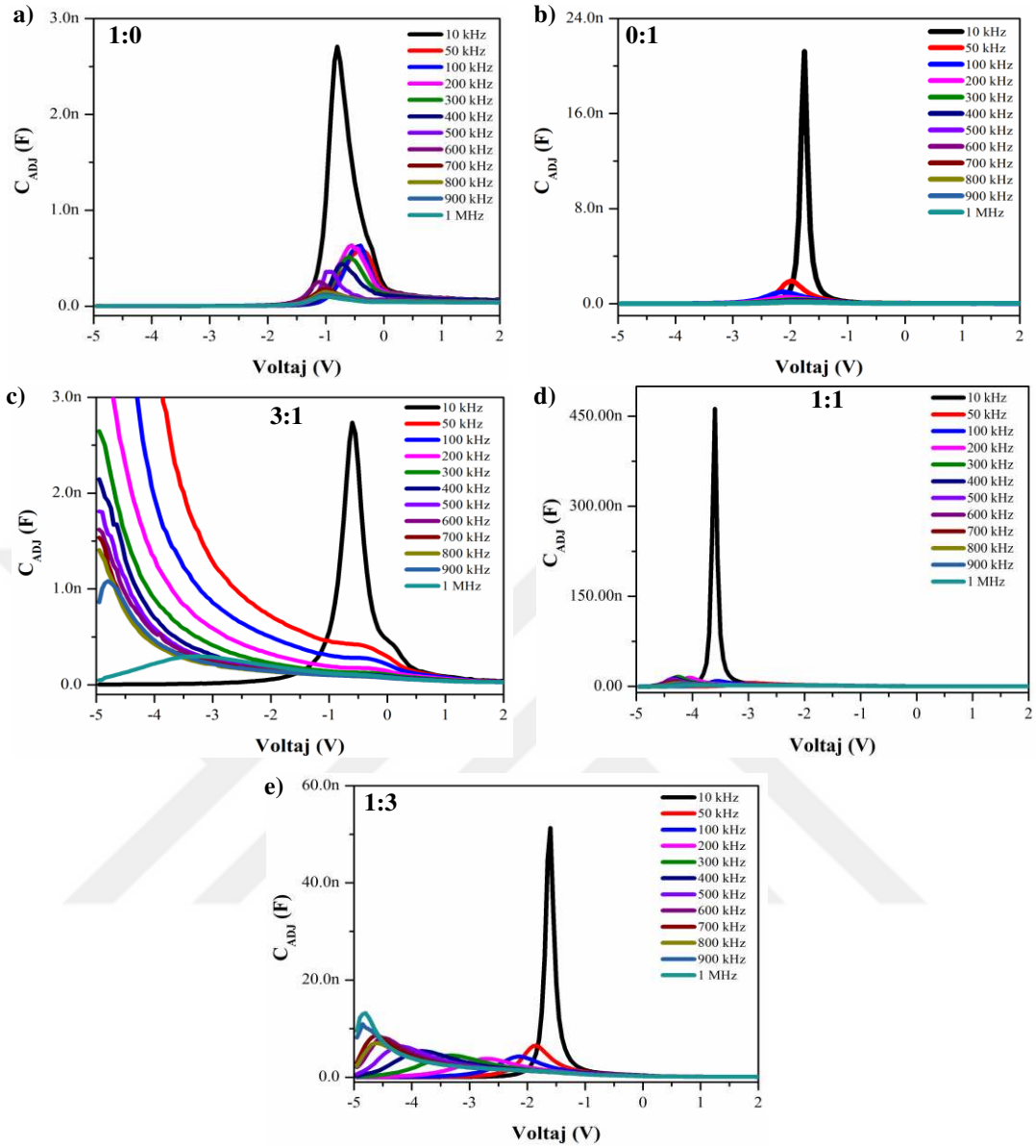
$$C_{ADJ} = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (6.8)$$

$$G_{ADJ} = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (6.9)$$

Burada, C_{ADJ} , G_{ADJ} , C_m , G_m ve ω sırasıyla düzeltilmiş kapasite, düzeltilmiş iletkenlik, ölçülen kapasite, ölçülen iletkenlik ve açısal frekansı ifade etmektedir. Denklemlerdeki a değeri ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir [9, 115, 116];

$$a = G_m - [G_m^2 + (\omega C_m)^2] R_s \quad (6.10)$$

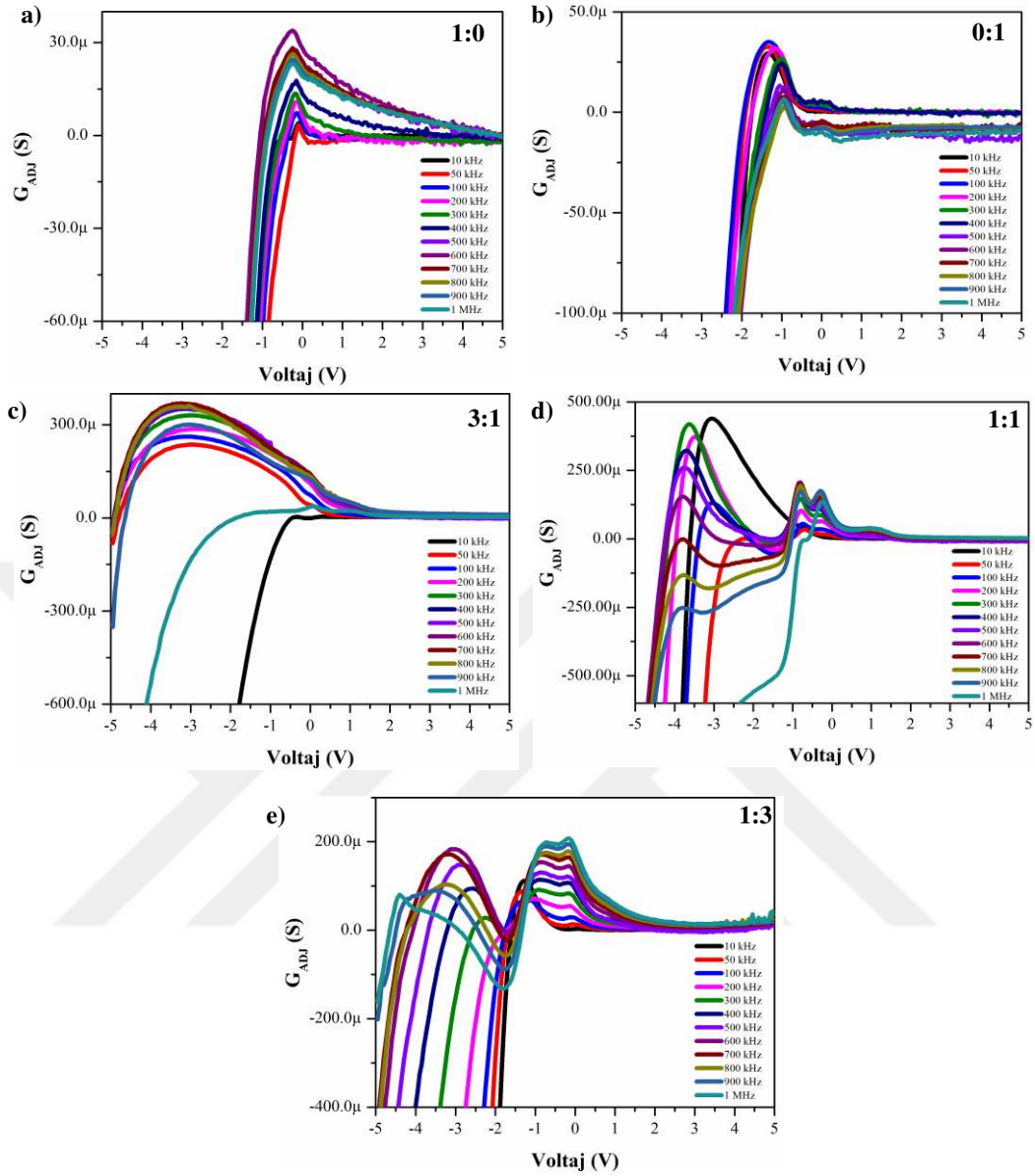
Şekil 6.23 ve Şekil 6.24’de sırasıyla Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların 10 kHz – 1 MHz arasında değişen frekans değerlerinde C_{ADJ} -V ve G_{ADJ} -V grafikleri görülmektedir. C_{ADJ} -V grafiklerinde negatif sapma bölgesinde pikler belirmiştir ve bu pikler yüksek frekanslarda azalmıştır. Saf fotodiyotlarda pikler frekans arttıkça genelde azalmış, kompozit numunelerde ise frekanslara bağlı olarak farklı şiddete pikler meydana gelmiştir. Bu pikler seri dirençlerin ve arayüz durumlarının varlığını doğrulamaktadır [8, 32, 108]. İleri ön gerilim bölgesinde ise C_{ADJ} frekans ve voltaj değişimlerinden etkilenmemiş ve sabit kalmıştır.



Şekil 6.23. Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların C_{ADJ} -V karakteristikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

G_{ADJ} -V grafiklerindede yine negatif sapma bölgelerinde pikler oluşmuştur ve bu piklerin konumları ve şiddetleri NiO:CdO oranı değiştiğçe değişmiştir. Saf fotodiyotlarda tek bir pik görülürken kompozit fotodiyotlarda bir kaç adet pikin oluştuğu görülmüştür. Bu piklerinde seri direnç ve arayüz durumlarının varlığından kaynaklanığı düşünülmektedir [8, 23, 117].

Kompozit fotodiyotların G_{ADJ} değerleri saf olanlardan daha yüksektir ve en yüksek G_{ADJ} değerine sahip Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyot 1:1 oranında NiO:CdO içeren kompozit esaslı fotodiyottur. Fotodiyotların C_{ADJ} ve G_{ADJ} değerlerinin NiO:CdO oranı değiştirilerek kontrol edilebileceği ve değiştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

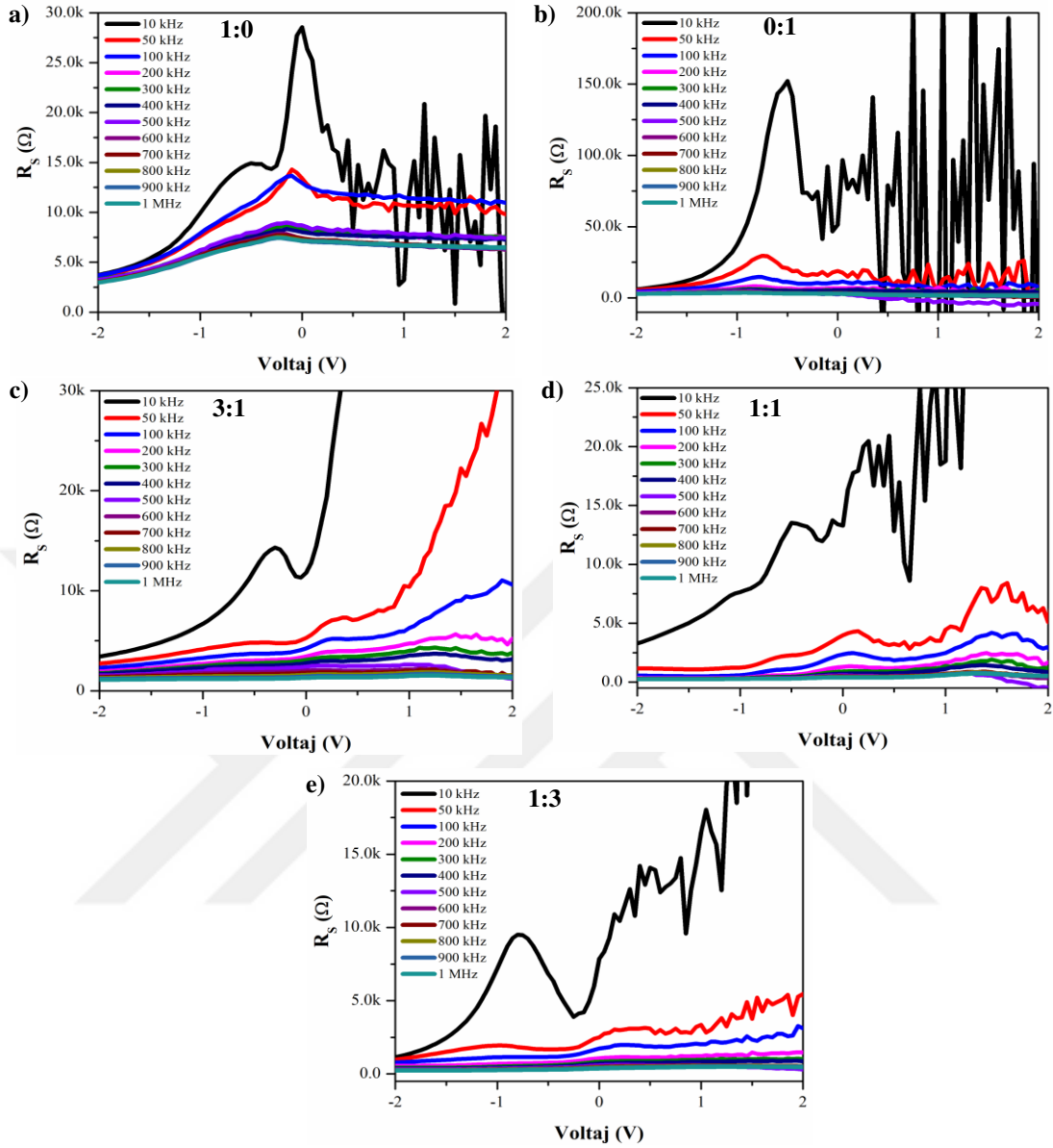


Şekil 6.24. Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların G_{ADI} -V karakteristikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

Fotodiyotların kapasite ve iletkenlikleri seri dirençten (R_s) önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu durumdan dolayı fotodiyotların kapasite ve iletkenliklerindeki oluşan doğrusal olmayan davranışları daha iyi anlayabilmek için fotodiyotların R_s karakteristiklerinin bilinmesi önemlidir. R_s değerleri aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir [9, 118, 119];

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (6.11)$$

Farklı frekans değerlerinde (10 kHz – 1 MHz) Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların R_s değerlerinin voltaja bağlı değişim grafikleri Şekil 6.25’de görülmektedir.



Şekil 6.25. Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların R_s -V karakteristikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

Görüldüğü gibi R_s değerlerinde pikler oluşmuştur ve bu pikler frekans arttıkça azalmıştır. Bu durumun düşük frekansları arayüz durumlarının takip etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir ve böylelikle düşük frekans değerlerinde daha fazla direnç ortaya çıkmıştır [9]. Ayrıca R_s değerleri ve piklerin büyüklükleri frekans arttıkça azalmıştır. Bu durumların arayüz yük taşıyıcıların sayısından ve bu taşıyıcıların frekansları takip etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [9, 30]. Yine frekansın değişmesine bağlı olarak R_s değerlerinde meydana gelen değişimlerin farklı lokalize arayüz yüklerinden (sıkışmış, sabit ve hareketli oksit yükleri) dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir [42].

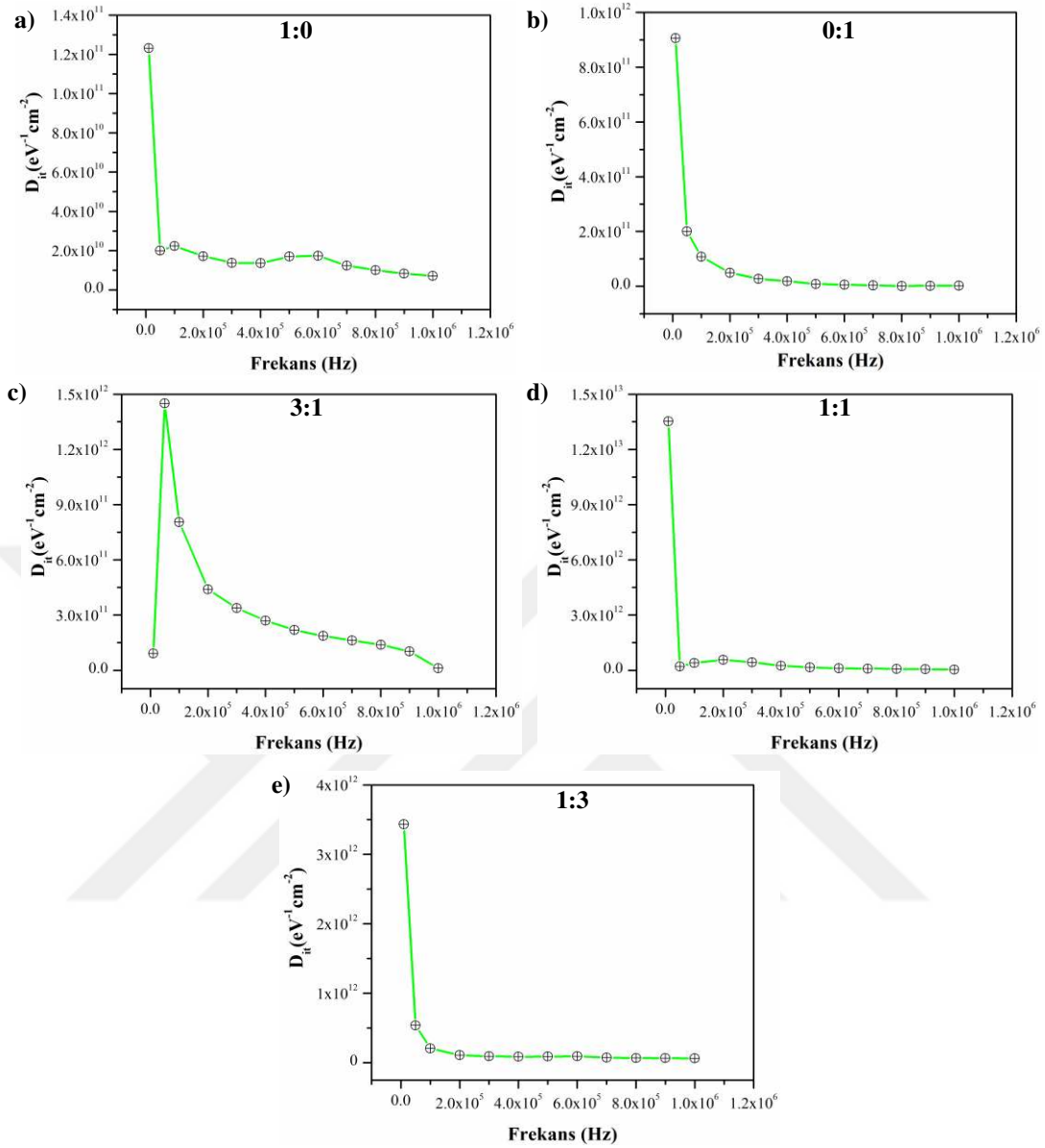
NiO:CdO oranı değıştikçe farklı R_s değeri ve R_s -V davranışları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların R_s değeri ve frekanstan ve NiO:CdO oranının değışmesinden etkilendiğini göstermektedir. Yine sonuçlardan görüldüğü gibi fotodiyotların önemli parametreleri arayüz durumlarının yoğunluğundan oldukça etkilenmektedir. Bu durumdan dolayı fotodiyotların arayüz durum yoğunluklarının (D_{it}) tespiti oldukça önemlidir [9]. Bir fotodiyotun D_{it} değeri elde etmek için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir [9, 120];

$$D_{it} = \frac{2}{qA} \frac{(G_{max}/\omega)}{\left[\left(\frac{G_{max}}{\omega C_{ox}}\right)^2 + \left(1 - \frac{C_m}{C_{ox}}\right)^2\right]} \quad (6.12)$$

Burada C_{ox} ve G_{max} sırasıyla ara katmanın kapasitesi ve ölçülen maksimum iletkenliktir. Şekil 6.26'da üretilen fotodiyotların D_{it} değeri ve frekansa bağlı değışimleri görülmektedir. Fotodiyotların D_{it} değeri frekansın yükselmesine bağlı olarak düşmüştür ve özellikle yüksek frekanslarda neredeyse stabil bir hale gelmiştir. Fotodiyotların D_{it} değeri ve frekansın artmasına bağlı olarak düşmesi yüksek frekans değeri ve arayüz yük taşıyıcılarının AC sinyalini takip edememesine atfedilir [32, 121].

NiO:CdO oranı değıştikçe farklı D_{it} değeri elde edilmiştir ve kompozit fotodiyotların D_{it} değeri saf olanlardan özellikle düşük frekans değeri ve daha yüksektir. Yüksek frekans değeri ve frekansında ise üretilen tüm Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların D_{it} değeri birbirlerine oldukça yakındır. Fotodiyotların D_{it} değeri ve frekansında meydana gelen bu değışimlerin NiO:CdO arayüzünde oluşan kompozit yapıların kompozisyonlarının değışmesinden dolayı arayüz durumlarının meydana gelmesi ve bu arayüz durumlarının yeniden düzenlenmesine atfedilir [27].

D_{it} -V grafiklerinden arayüz durumlarının frekansa oldukça bağımlı olduğu ve NiO:CdO oranı değıştirilerek arayüz durum yoğunluklarının değıştirilebileceği görülmüştür.

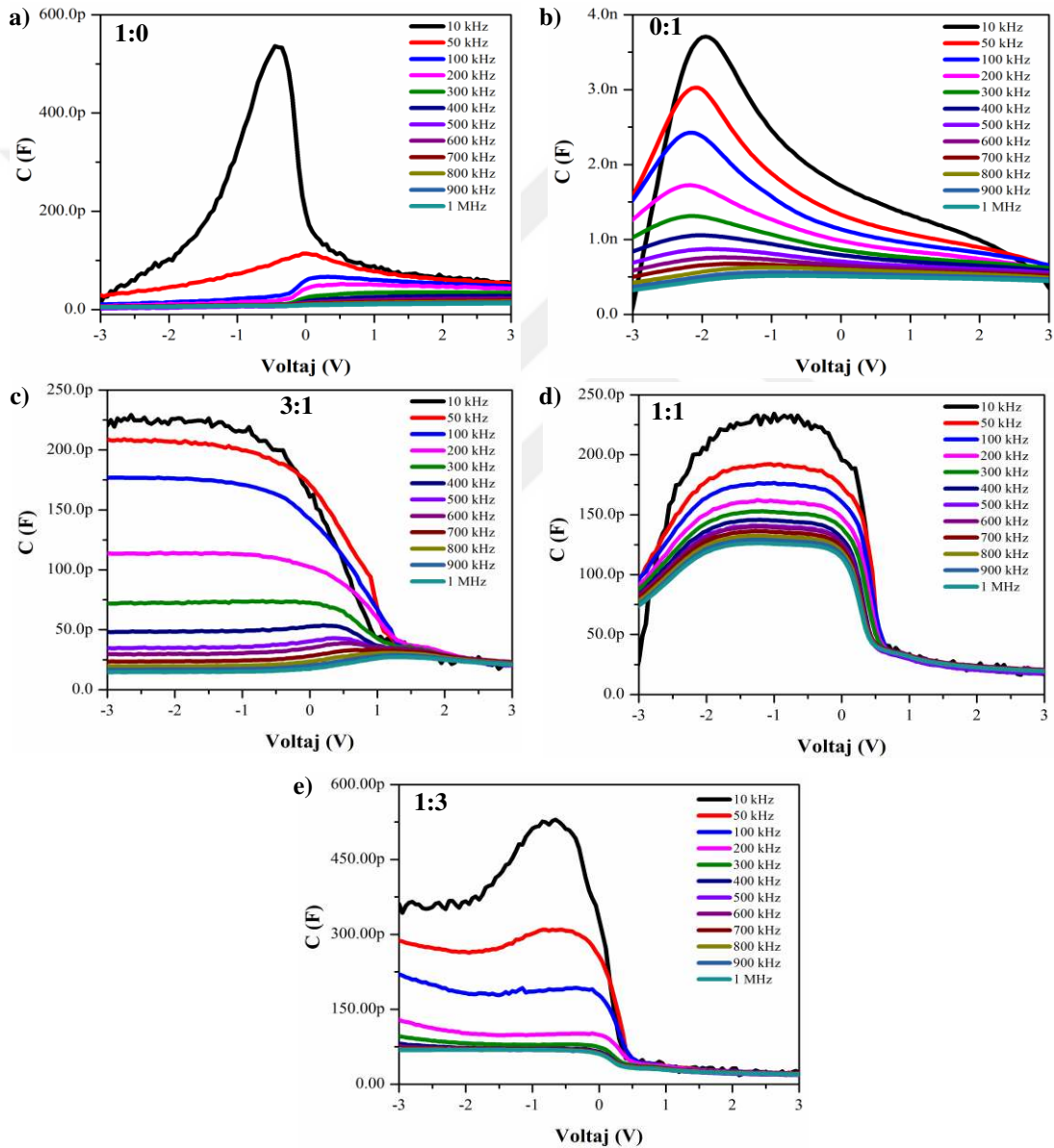


Şekil 6.26. Farklı NiO:CdO oranlarında üretilmiş Al/NiO:CdO/p-Si/Al fotodiyotların D_{it} -F grafikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

6.4.2. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların C-V ve G-V Karakteristikleri

Farklı frekanslarda (10 kHz – 1 MHz) Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların C-V grafikleri Şekil 6.27’de görülmektedir. NiO numunesinde ters ön gerilim bölgesinde sadece 10 kHz frekansta pik oluşmuş ve frekans arttıkça pikler ileri sapmada görülmeye başlamıştır. ZnO numunesinde tüm pikler ters ön gerilim bölgesinde görülmüştür ve literatürdeki saf ZnO numunesine yakın değerler elde edilmiştir [108]. NiO:ZnO oranları 3:1 ve 1:3 olan numunelerde pikler düşük frekans değerlerinde ters ön gerilim bölgesinde görülürken yüksek frekanslarda ise pikler ileri ön gerim bölgesine doğru kaymıştır. Yarı yarıya NiO:ZnO’dan meydana gelen numunede ise pikler ters ön gerilim bölgesinde meydana gelmiştir. Bu piklerin varlığı arayüzdeki durum değişiklikleri, seri

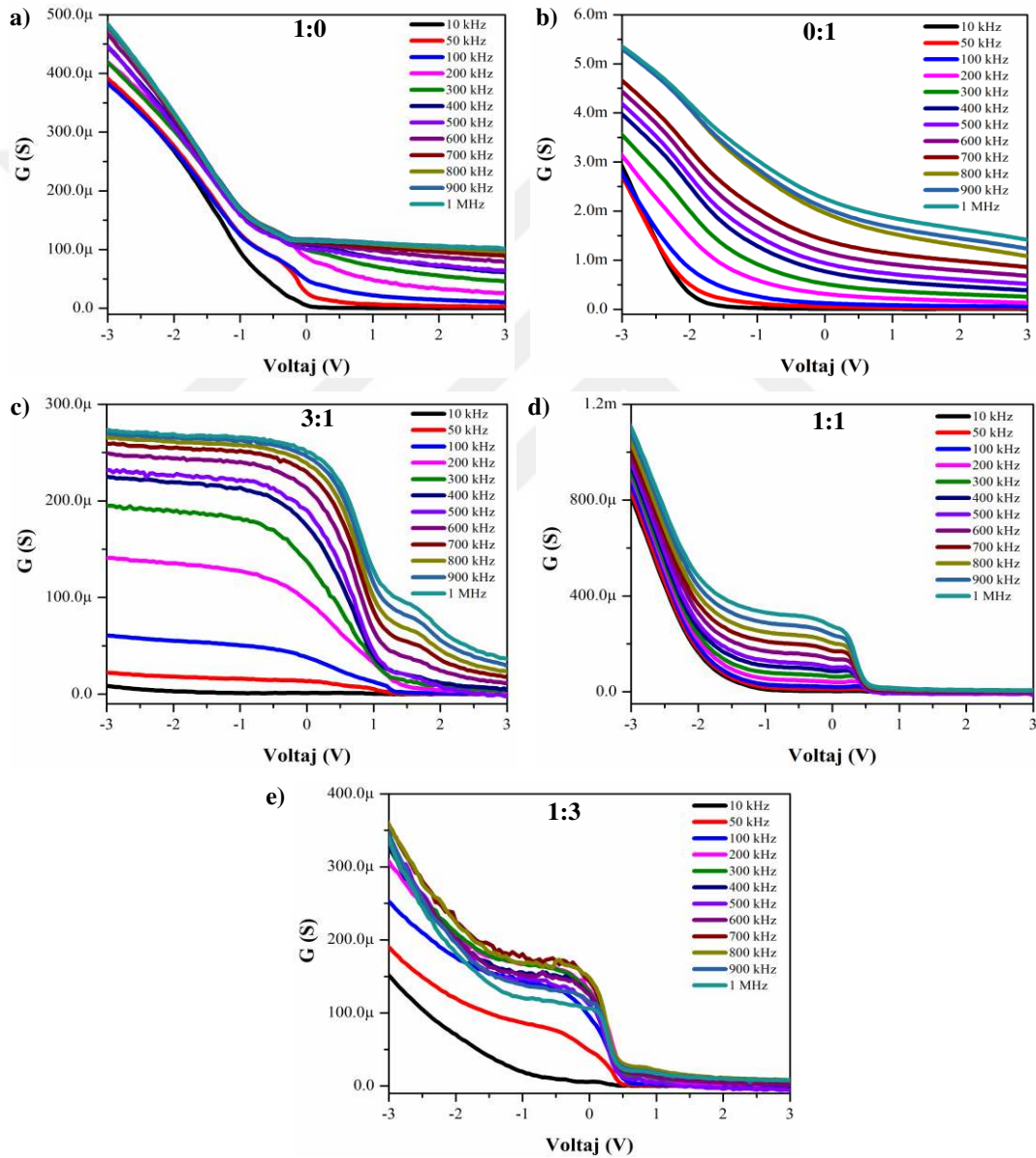
direnç ve bant kuyukları durumunda yakalanan taşıyıcılarla açıklanabilir [42, 108]. Piklerin konumları NiO:ZnO oranına göre değişmiştir ve ZnO hariç diğer numunelerde frekans arttıkça pikler daha yüksek voltaj değerlerinde oluşmuştur. Tüm Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlarda frekans arttıkça kapasite değerleri düşmüştür. Bu durum sinyal değişimine cevap veren arayüz durumlarında sıkışan yüklerin varlığına ve düşük frekans değerlerinde yük taşıyıcıların AC sinyallere yanıt vermesine atfedilir [9, 27, 35]. Bu sonuçlar literatür çalışmaları ile uyumludur [33, 55, 108, 122].



Şekil 6.27. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların C-V karakteristikleri
a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

NiO:ZnO oranı değıştikçe arayüz yüklerinin sayısı değıştirilebilir ve böylelikle kapasite profili kontrol edilebilir [10]. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlarda en yüksek kapasite değeri saf ZnO fotodiyotta elde edilmiştir ve kompozit fotodiyotların kapasite değeri saf olanlardan daha düşüktür. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların kapasiteleri NiO:ZnO oranı değıştirilerek ayarlanabilir.

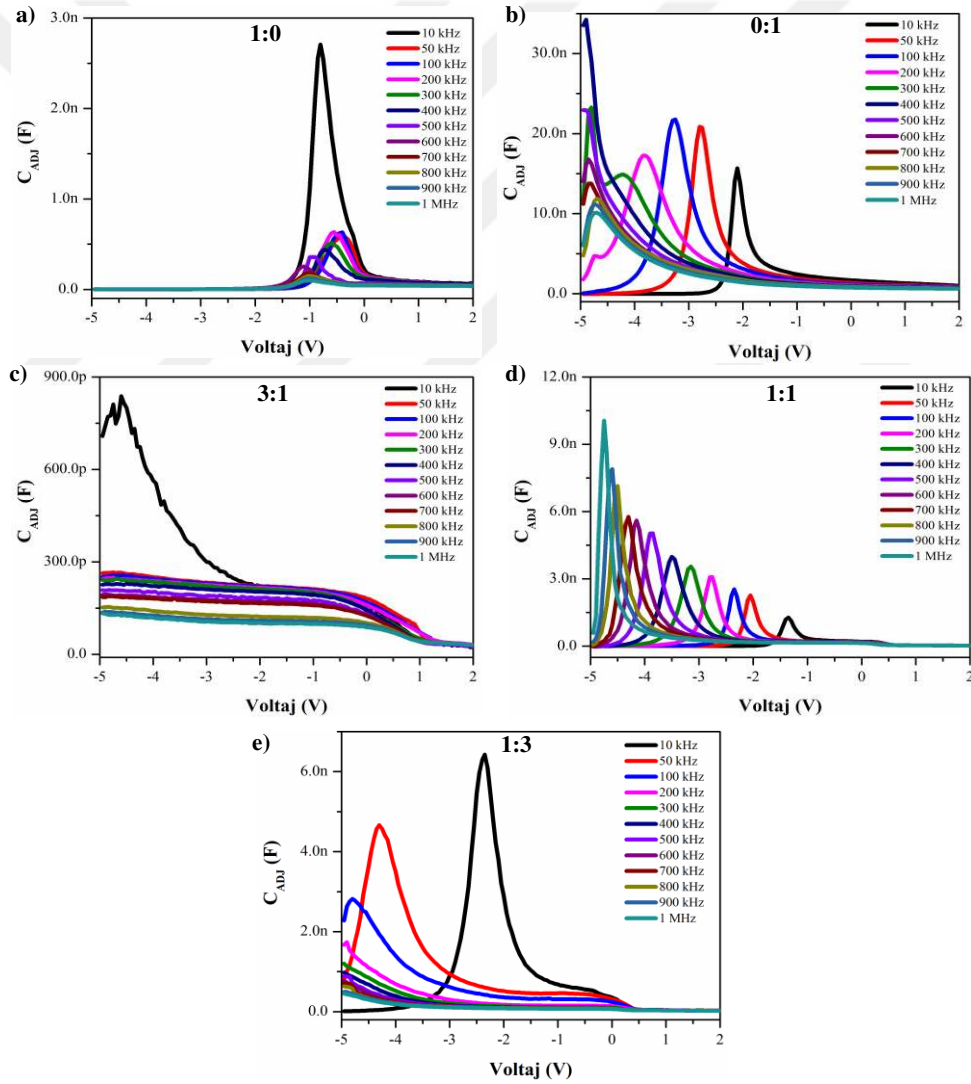
Farklı frekanslarda (10 kHz – 1 MHz) Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların G-V grafikleri Şekil 6.28’de görölmektedir.



Şekil 6.28. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların G-V karakteristikleri
a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

İletkenlik değerleri de frekans ve voltaj değişiminden etkilenmiş ve kapasitenin aksine NiO:ZnO oranı 1:3 olan numune hariç diğer numunelerde frekans arttıkça iletkenlik Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlarda artmıştır. Bu artış arayüz durumlarının varlığını doğrulamaktadır [25, 42, 108]. En yüksek iletkenlik değeri saf ZnO fotodiyotta elde edilmiştir ve NiO:ZnO oranının değişimi iletkenlik değerlerini etkilemiştir. Kompozit fotodiyotlarda yeni özellikte bir malzeme oluşturulduğundan farklı iletkenlik değerleri görülebilir [27, 33, 57]. Sonuçlar, Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların kapasite ve iletkenliklerinin seri dirençten etkilendiğini göstermektedir.

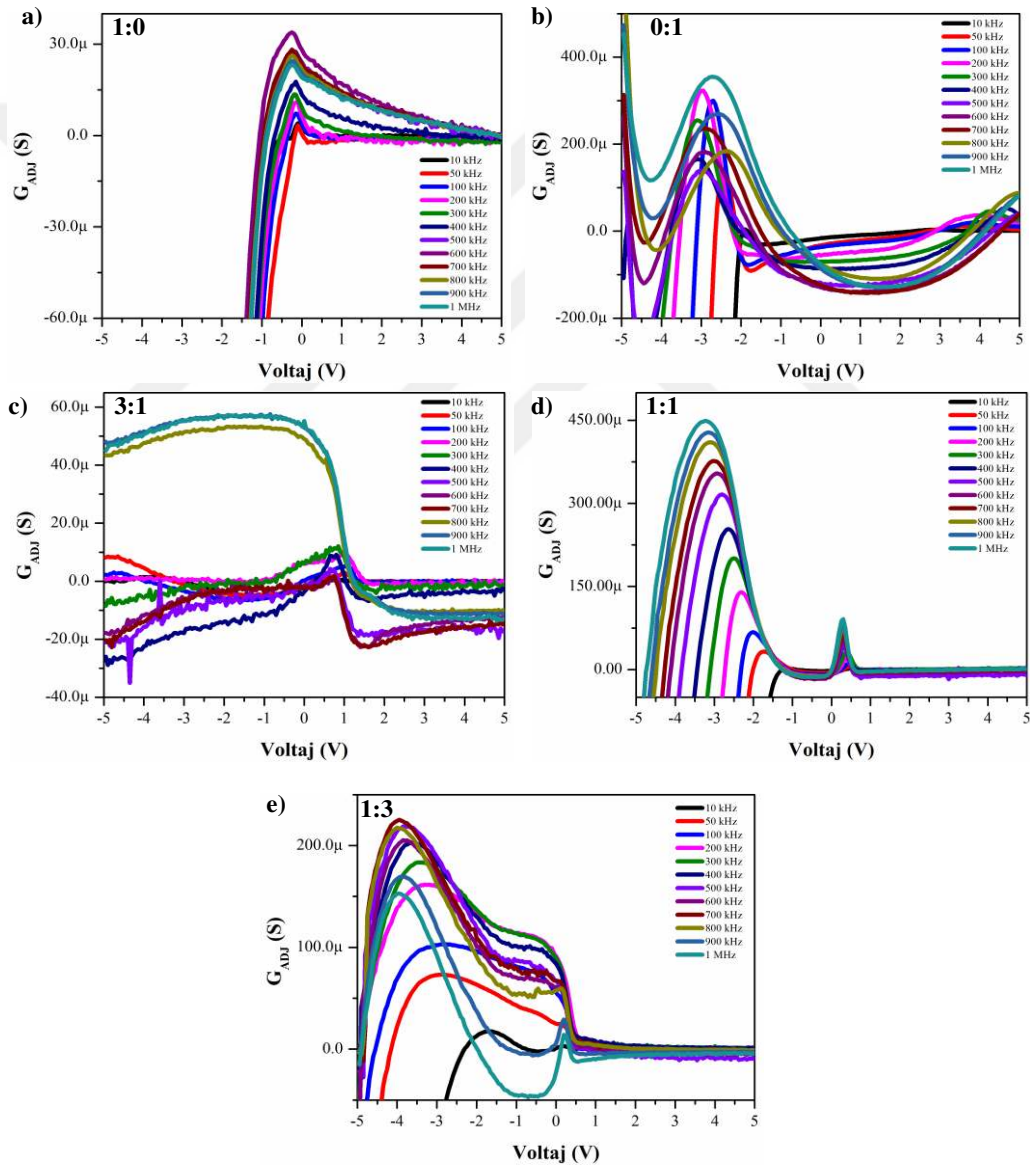
Şekil 6.29'da Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların 10 kHz – 1 MHz arasında değişen frekans değerlerinde C_{ADJ} -V grafikleri görülmektedir.



Şekil 6.29. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların C_{ADJ} -V karakteristikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

C_{ADJ} -V grafiklerinde negatif sapma bölgesinde pikler belirmiştir ve bu bölgede C_{ADJ} değerleri frekanstan etkilenmiştir. İleri ön gerilim bölgesinde ise C_{ADJ} frekans ve voltaj değişimlerinden etkilenmemiş ve sabit kalmıştır. Saf ZnO ve NiO:ZnO kompozit numunelerde frekanslara bağlı olarak farklı şiddetlerde pikler görülmüştür. Bu pikler seri dirençlerin ve arayüz durumlarının varlığını doğrulamaktadır [8, 32, 108].

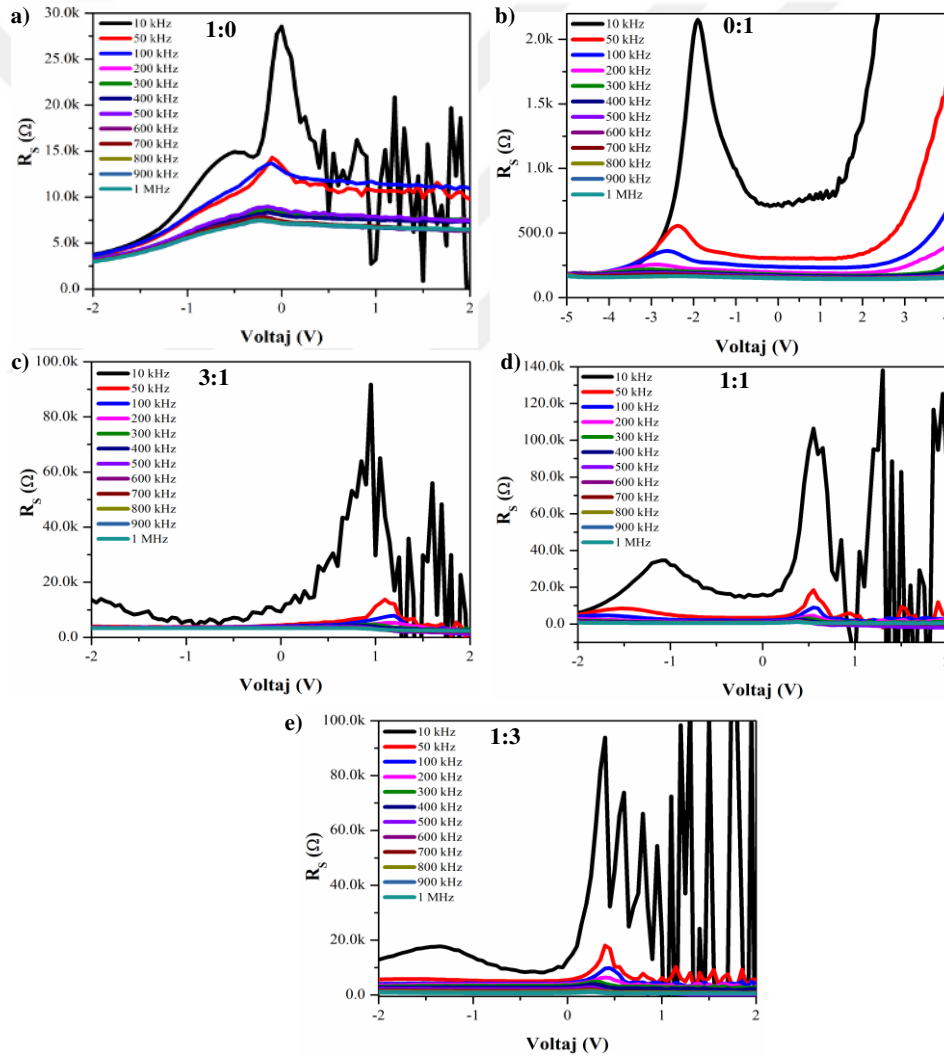
Şekil 6.30'da Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların 10 kHz – 1 MHz arasında değişen frekans değerlerinde G_{ADJ} -V grafikleri görülmektedir.



Şekil 6.30. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların G_{ADJ} -V karakteristikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların G_{ADJ} değerleri voltaj ve frekans değişiminden etkilenmiş ve NiO:ZnO oranına göre farklı özellikte G_{ADJ} -V karakteristikleri ortaya çıkmıştır. Saf ZnO ve NiO:ZnO kompozit numunelerin G_{ADJ} -V grafiklerinde negatif sapma bölgelerinde yoğun olmak üzere ileri bölgede pikler oluşmuştur. Bu piklerin konumları ve şiddetleri NiO:ZnO oranı değiştikçe değişmiştir. Bu piklerin seri direnç ve arayüz durumlarının varlığından kaynaklanığı düşünülmektedir [8, 23, 117]. En yüksek G_{ADJ} değerine sahip Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyot 1:1 oranında NiO:ZnO içeren kompozit fotodiyottur. Fotodiyotların C_{ADJ} ve G_{ADJ} değerlerinin NiO:ZnO oranı değiştirilerek kontrol edilebileceği ve değiştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların farklı frekans değerlerinde (10 kHz - 1 MHz) R_s değerlerinin voltaja bağlı değişim grafikleri Şekil 6.31'de görülmektedir.



Şekil 6.31. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların R_s -V karakteristikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

Şekil 6.31’den görüldüğü gibi R_s değerlerinde pikler oluşmuştur ve bu pikler frekans arttıkça azalmıştır. Bu durumun düşük frekansları arayüz durumlarının takip etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir ve böylelikle düşük frekans değerlerinde daha fazla direnç ortaya çıkmıştır [9]. Ayrıca R_s değerleri ve piklerin büyüklükleri frekans arttıkça azalmıştır. Bu durumların arayüz yük taşıyıcıların sayısından ve bu taşıyıcıların frekansları takip etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [9, 30].

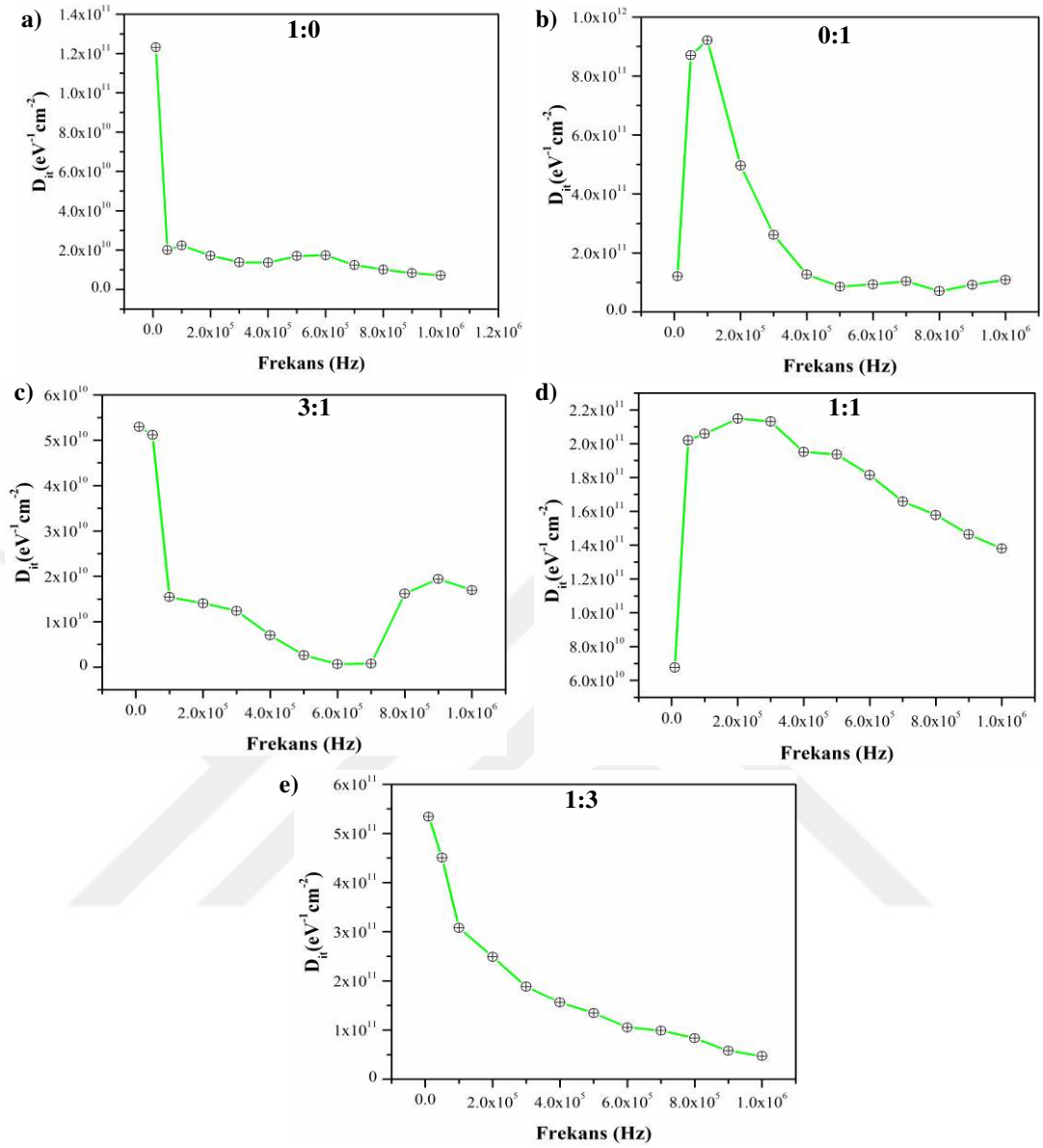
Yine frekansın değişmesine bağlı olarak R_s değerlerinde meydana gelen değişimlerin farklı lokalize arayüz yüklerinden (sıkışmış, sabit ve hareketli oksit yükleri) dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir [42]. NiO:ZnO oranı değiştikçe farklı R_s değerleri ve R_s -V davranışları elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların R_s değerlerinin frekanstan ve NiO:ZnO oranının değişmesinden etkilendiğini göstermektedir. Yine sonuçlardan görüldüğü gibi Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların önemli parametreleri arayüz durumlarının yoğunluğundan oldukça etkilenmiştir.

Şekil 6.32’de üretilen fotodiyotların D_{it} değerlerinin frekansa bağlı değişimleri görülmektedir. Fotodiyotların D_{it} değerleri frekansın yükselmesine bağlı olarak genelde düşmüştür. NiO:ZnO oranı 3:1 olan numunede ise 800 kHz’den sonra yükselme görülmüştür. Kompozit ve katkılı fotodiyotlarda frekansa bağlı olarak D_{it} değerinin yükselmesi rastlanılabilen bir durumdur [32, 122]. Fotodiyotların D_{it} değerlerinin frekansın artmasına bağlı olarak düşmesi yüksek frekans değerlerinde arayüz yük taşıyıcılarının AC sinyalini takip edememesine atfedilir [32, 121].

NiO:ZnO oranı değiştikçe farklı D_{it} değerleri elde edilmiştir. Saf Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların D_{it} değerleri yüksek frekanslarda neredeyse sabit kalmıştır. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotların D_{it} değerleri ise frekans arttıkça genelde düşme eğilimindedir. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların D_{it} değerlerinde meydana gelen bu değişimler NiO:ZnO arayüzünde oluşan kompozit yapıların kompozisyonlarının değişmesinden dolayı arayüz durumlarının meydana gelmesi ve bu arayüz durumlarının yeniden düzenlenmesine atfedilir [27].

D_{it} -V grafiklerinden arayüz durumlarının frekansa oldukça bağımlı olduğu ve NiO:ZnO oranı değiştirilerek arayüz durum yoğunluklarının değiştirilebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.32. Farklı NiO:ZnO oranlarında üretilmiş Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların D_d -F grafikleri a) 1:0, b) 0:1, c) 3:1, d) 1:1 ve e) 1:3.

6.5. Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al Fotodiyotların Fotodiyot Parametrelerinin Karşılaştırılması

Tablo 6.6’da bu çalışma sonucunda Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlarla ilgili elde edilen veriler toplu olarak verilmiştir. En düşük idealite faktörü NiO:ZnO oranı 3:1 olan Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotta 2.42’dir. NiO’ya aynı oranda CdO katkısı ZnO katkısına göre idealite faktörü değerini artırmıştır. En düşük bariyer yüksekliği NiO:CdO oranı 1:1 olan Al/NiO:CdO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotta 0.4169 eV’dir. Doğrultma oranı en yüksek olan numune NiO:ZnO oranı 1:1 olandır ve bu numunede RR değeri 9.97×10^4 olarak hesaplanmıştır. En yüksek fototepki değeri NiO:ZnO oranı 3:1 olan

Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotta 3.12×10^3 'dür. Bu değer literatürde yapılan NiO:ZnO kompozit fotodiyotları [33, 57], ZnO:CdO kompozit fotodiyotları [33], NiO [123], CdO [35, 36, 39] ve ZnO [43, 46, 47, 51, 124] ile ilgili yapılan çalışmalardan daha yüksektir. Bazı çalışmalardan ise düşük olmakla beraber yakın değerlerdedir [9]. En yüksek fotoduyarlılık, fotoakım ve fotokapasitans NiO:ZnO oranı 0:1 olan Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotta sırasıyla 1.49×10^{-3} A/W, 7.59×10^{-4} A ve 2.24 nF'dir.

Tablo 6.6. Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotodiyot parametreleri.

Numune	n	ϕ_b (eV)	RR	R	PR (A/W)	Fotoakım (A)	Fotokapasitans (nF)
NiO	6.85	0.4178	1.60×10^4	6.60×10^2	4.83×10^{-4}	7.90×10^{-5}	0.62
CdO	4.01	0.4356	5.76×10^2	0.18×10^2	8.54×10^{-5}	1.36×10^{-5}	0.2
ZnO	8.43	0.4553	8.70×10^3	1.13×10^2	1.49×10^{-3}	7.59×10^{-4}	2.24
NiO:CdO (3:1)	7.05	0.4179	8.14×10^3	0.57×10^2	4.04×10^{-4}	8.85×10^{-5}	1.02
NiO:CdO (1:1)	6.03	0.4128	6.24×10^3	0.32×10^2	1.90×10^{-4}	3.92×10^{-5}	1.19
NiO:CdO (1:3)	8.17	0.4169	2.23×10^3	0.06×10^2	1.88×10^{-4}	3.56×10^{-5}	1.09
NiO:ZnO (3:1)	2.42	0.4524	7.01×10^3	3.12×10^3	2.46×10^{-4}	2.57×10^{-5}	0.21
NiO:ZnO (1:1)	4.65	0.5489	9.97×10^4	2.29×10^3	1.54×10^{-4}	1.97×10^{-5}	0.22
NiO:ZnO (1:3)	7.57	0.4979	8.39×10^4	1.69×10^3	2.12×10^{-4}	4.41×10^{-5}	0.40

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı molar oranlarda NiO:CdO ve NiO:ZnO ince filmler Al omik kontaklı p-Si üzerinde dinamik sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile oluşturuldu. Al üst kontaklar oluşturulduktan sonra Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotlar elde edildi. Yapılan yapısal, morfolojik, fototepki ve elektriksel incelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. NiO:CdO ve NiO:ZnO ince filmlerin XRD sonuçlarında herhangi farklı bir faza veya safsızlığa rastlanmadı. Yüksek saflıkta saf ve kompozit ince filmler elde edildi.
2. Saf olanlara göre kompozit ince filmlerin XRD kırınım piklerinin konumları ve şiddetlerinin katkı oranından etkilendiği tespit edildi.
3. NiO:CdO kompozit ince filmlerde hem NiO hem de CdO'nun karakteristik kırınım pikleri gözlemlendi ve artan NiO veya CdO oranı ile karakteristik piklerin yoğunluklarının attığı görüldü.
4. NiO:ZnO kompozit ince filmlerde hem NiO hem de ZnO'nun karakteristik kırınım pikleri gözlemlendi ve artan NiO veya ZnO oranı ile karakteristik piklerin yoğunluklarının attığı görüldü.
5. NiO:CdO ve NiO:ZnO ince filmlerin p-Si üzerine çatlaksız ve homojen bir biçimde başarıyla kaplandığı görüldü.
6. NiO:CdO ve NiO:ZnO ince filmlerin nanoyapılardan meydana geldiği görüldü.
7. NiO kaplamanın ince taneli toplanmış nanoparçacıklardan oluştuğu tespit edildi.
8. CdO kaplamanın nano çiçek benzeri yapılardan oluştuğu görüldü.
9. NiO:CdO kompozit ince film kaplamalar yarı küresel, düzgün olmayan ve yığılmış granül benzeri yapılardan meydana geldiği görüldü.
10. ZnO ince film ince tanecikli topaklanmış nanoparçacıklardan ve bunların yanında yer yer fiber benzeri yapılardan oluştuğu görüldü.
11. NiO:ZnO kompozit ince filmler saf NiO ve ZnO'ya göre bir miktar daha büyük toplanmış ince tanecikli nanoparçacıklardan meydana geldiği görüldü.
12. EDX analiz sonuçlarında NiO:CdO ve NiO:ZnO kompozit ince filmlerdeki Ni: Cd ve Ni: Zn oranlarının katkılama oranları ile uyumlu olduğu tespit edildi.
13. Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların doğrultma özelliği gösterdiği tespit edildi ve doğrultma oranlarının oranları ışık şiddeti arttıkça düştüğü görüldü.
14. Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların doğrultma oranlarının NiO:CdO-ZnO oranından etkilendiği görüldü.

15. En yüksek doğrultma oranı NiO:ZnO oranı 1:1 olan Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotta 9.97×10^4 olarak hesaplandı. Bu değerin literatürdeki benzer çalışmaya oranla dah yüksek olduğu görüldü [33].
16. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların aydınlatma altında karanlığa göre daha yüksek bir ters akım değerine sahip olduğu belirlendi.
17. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların ışığa karşı hassas olduğu görüldü.
18. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların doğrusal olmayan bir davranışa sahip olduğu belirlendi.
19. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlar fotoiletken davranış sergilediği tespit edildi.
20. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotoiletkenlik davranışının doğrusal olduğu sonucuna varıldı.
21. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fototepki özelliklerinin NiO:ZnO oranı ile ayarlanabileceği ve kontrol edilebileceği görüldü.
22. En yüksek fototepki NiO:ZnO oranı 3:1 olan Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyotta 3.12×10^3 olarak elde edildi. Bu değerin literatürdeki benzer çalışmalardan daha yüksek olduğu belirlendi [33, 57].
23. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotoduyarlılıklarının NiO:ZnO oranının değişmesinden etkilendiği göüldü.
24. En yüksek fotoduyarlılık saf ZnO fotodiyotta 1.49×10^{-3} A/W olarak elde edildi. Bu değerin bazı çalışmalardan yüksek olduğu görüldü [9, 36-38, 40, 51].
25. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlar tersine çevrilebilir anahtarlama davranışı gösterdiği tespit edildi.
26. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotoakım değerlerinin ışık şiddetinden etkilendiği ve ışık şiddeti arttıkça yükseldiği görüldü.
27. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotokapasitans ve fotoiletkenliklerinin ışıktan etkilendiği belirlendi.
28. Kararlı fotokapasitans ve fotoiletkenlik durumlarının NiO:ZnO oranına göre değiştirilebileceği saptandı.
29. En yüksek fotoakım ve fotokapasitans saf ZnO fotodiyotta elde edildi.
30. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fotokapasitör olarak kullanılabileceği sonucuna varıldı.
31. Al/NiO:ZnO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların kapasite ve iletkenliklerinin seri dirençten oldukça etkilendiği tespit edildi.

32. Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların C_{ADJ} ve G_{ADJ} değerlerinin NiO:CdO-ZnO oranı değiştirilerek kontrol edilebileceği ve değiştirilebileceği sonucuna varıldı.
33. Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların seri direnç ve arayüz durum yoğunluklarının frekanstan ve NiO:CdO-ZnO oranından etkilendiği görüldü
34. Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların fototepki ve elektriksel özelliklerinin arayüz durumlarından etkilendiği sonucuna varıldı.
35. En düşük idealite faktörüne sahip fotodiyotun NiO:ZnO oranı 3:1 olan Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyot olduğu görüldü.
36. En düşük bariyer yüksekliğine sahip fotodiyotun NiO:CdO oranı 1:1 olan Al/NiO:CdO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyot olduğu belirlendi.
37. Tüm sonuçlar neticesinde, Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotların elektronik endüstrisinde fotoduyarlı optoelektronik uygulamalarda kendine kullanım alanı bulabileceği görüldü.

Bu çalışmanın sonuçları neticesinde gelecekte yapılabilecek çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. En yüksek fototepki değerine sahip NiO:ZnO oranı 3:1 olan Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyota PCBM ve coumarin katkılanarak fototepki ve elektriksel özellikleri araştırılabilir.
2. En yüksek fototepki değerine sahip NiO:ZnO oranı 3:1 olan Al/NiO:ZnO/p-Si/Al kompozit esaslı fotodiyota farklı elementler katkılanarak fototepki ve elektriksel özellikleri araştırılabilir.
3. Al/NiO:CdO/p-Si/Al ve Al/NiO:ZnO/p-Si/Al fotodiyotlarda altlık olarak p-Si yerine n-Si kullanılabilir. Yeni oluşturulan fotodiyotların fototepki ve elektriksel özellikleri araştırılabilir.
4. NiO:CdO:ZnO üçlü kompozitinden fotodiyotlar üretilebilir ve fototepki ve elektriksel özellikleri araştırılabilir.
5. Farklı metal oksit yarıiletkenlerle yeni kompozit fotodiyotlar üretilebilir ve fototepki ve elektriksel özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Yang, C.-K., Cheng, T.-C., Cheng, C.-H., Wang, C.-C., Lee, C.-C. (2017). Open-Loop Altitude-Azimuth Concentrated Solar Tracking System for Solar-Thermal Applications, *Solar Energy*, 147, pp. 52-60
- [2] Nsengiyumva, W., Chen, S.G., Hu, L., Chen, X. (2018). Recent Advancements and Challenges in Solar Tracking Systems (STS): A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, pp. 250-279
- [3] Eldin, S.S., Abd-Elhady, M., Kandil, H. (2016). Feasibility of Solar Tracking Systems for PV Panels in Hot and Cold Regions, *Renewable Energy*, 85, pp. 228-233
- [4] Hafez, A., Yousef, A., Harag, N. (2018). Solar Tracking Systems: Technologies and Trackers Drive Types - A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, pp. 754-782
- [5] Sidek, M., Azis, N., Hasan, W., Ab Kadir, M., Shafie, S., Radzi, M. (2017). Automated Positioning Dual-Axis Solar Tracking System with Precision Elevation and Azimuth Angle Control, *Energy*, 124, pp. 160-170
- [6] Chen, C.-P., Lin, P.-H., Chen, L.-Y., Ke, M.-Y., Cheng, Y.-W., Huang, J. (2009). Nanoparticle-Coated n-ZnO/p-Si Photodiodes with Improved Photoresponsivities and Acceptance Angles for Potential Solar Cell Applications, *Nanotechnology*, 20(24), pp. 245204
- [7] Aslan, F., Esen, H., Yakuphanoglu, F. (2019). The Effect of Coumarin Addition on the Electrical Characteristics of Al/Coumarin: CdO/P-Si/Al Photodiode Prepared by Drop Casting Technique, *Optik*, 197, pp. 163203
- [8] Tataroğlu, A., Aydın, H., Al-Ghamdi, A.A., El-Tantawy, F., Farooq, W., Yakuphanoglu, F. (2014). Photoconducting Properties of $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{p-Si}$ Photodiode by Sol Gel Method, *Journal of Electroceramics*, 32(4), pp. 369-375
- [9] Gozeh, B.A., Karabulut, A., Ismael, C.B., Saleh, S.I., Yakuphanoglu, F. (2021). Zn-doped CdO Effects on the Optical, Electrical and Photoresponse Properties of Heterojunctions-Based Photodiodes, *Journal of Alloys and Compounds*, 872, pp. 159624
- [10] Khusayfan, N. (2021). Fabrication of The Solar Light Sensitive $\text{ZnO}_{1-x}\text{MgO}_x/\text{n-Si}$ Photodiodes, *Journal of Molecular Structure*, 1224, pp. 129030
- [11] Demirezen, S., Yerişkin, S.A. (2020). A Detailed Comparative Study on Electrical and Photovoltaic Characteristics of Al/p-Si Photodiodes with Coumarin-doped PVA Interfacial Layer: The Effect of Doping Concentration, *Polymer Bulletin*, 77(1), pp. 49-71
- [12] Liu, H.-Y., Huang, Z.-Y. (2021). Investigation of p-NiO/N-Ga_{0.3}Zn_{0.7}O Heterojunction Photodiodes for Ultraviolet-B Detection, *IEEE Sensors Journal*, 21(19), pp. 21486-21493
- [13] Abbasi, M.A., Ibupoto, Z.H., Khan, A., Nur, O., Willander, M. (2013). Fabrication of UV Photo-detector Based on Coral Reef Like p-NiO/n-ZnO Nanocomposite Structures, *Materials Letters*, 108, pp. 149-152
- [14] Hendi, A., Yakuphanoglu, F. (2016). Graphene Doped $\text{TiO}_2/\text{p-Silicon}$ Heterojunction Photodiode, *Journal of Alloys and Compounds*, 665, pp. 418-427
- [15] Selman, A.M., Hassan, Z., Husham, M., Ahmed, N.M. (2014). A High-Sensitivity, Fast-Response, Rapid-Recovery p-n Heterojunction Photodiode Based on Rutile TiO_2 Nanorod Array on p-Si (1 1 1), *Applied Surface Science*, 305, pp. 445-452
- [16] Yıldırım, M. (2019). Characterization of the Framework of Cu Doped TiO_2 Layers: An Insight into Optical, Electrical and Photodiode Parameters, *Journal of Alloys and Compounds*, 773, pp. 890-904
- [17] Ruzgar, S., Pehlivanoglu, S.A. (2020). The Effect of Fe Dopant on Structural, Optical Properties of TiO_2 Thin Films and Electrical Performance of TiO_2 Based Photodiode, *Superlattices and Microstructures*, 145, pp. 106636
- [18] Kaplan, H.K., Olkun, A., Akay, S.K., Pat, S. (2021). Si-based Photodiode and Material Characterization of TiO_2 Thin Film, *Optical and Quantum Electronics*, 53(5), pp. 1-1

- [19] Aldemir, D.A., Benhaliliba, M., Benouis, C. (2020). Photodiode Based on Al-doped SnO₂: Fabrication, Current-Voltage and Capacitance-Conductance-Voltage Measurements, *Optik*, 222, pp. 165487
- [20] Yuvaraja, S., Kumar, V., Dhasmana, H., Kumar, A., Verma, A., Jain, V. (2019). Ultraviolet Detection Properties of Electrodeposited n-SnO₂ Modified p-Si Nanowires Hetero-junction Photodiode, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(8), pp. 7618-7628
- [21] Benhaliliba, M., Benouis, C., Ayeshmariam, A., Mouffak, Z. (2020). Light Effect on I-V and Profile of C/ω-V and G/ω-V Characteristics of In-doped SnO₂/Si Heterojunction for Photodiode Applications, *Optik*, 206, pp. 164032
- [22] Young, S.-J., Ji, L.-W., Fang, T.-H., Chang, S.-J., Su, Y.-K., Du, X. (2007). ZnO Ultraviolet Photodiodes with Pd Contact Electrodes, *Acta Materialia*, 55(1), pp. 329-333
- [23] Yakuphanoglu, F. (2016). Transparent Metal Oxide Films Based Sensors for Solar Tracking Applications, *Composites Part B: Engineering*, 92, pp. 151-159
- [24] Ameen, B.A.H., Yildiz, A., Farooq, W., Yakuphanoglu, F. (2019). Solar Light Photodetectors Based on Nanocrystalline Zinc Oxide Cadmium Doped/p-Si Heterojunctions, *Silicon*, 11(1), pp. 563-571
- [25] Khusayfan, N.M. (2016). Electrical and Photoresponse Properties of Al/Graphene Oxide Doped NiO Nanocomposite/p-Si/Al Photodiodes, *Journal of Alloys and Compounds*, 666, pp. 501-506
- [26] Soyly, M., Dere, A., Al-Sehemi, A.G., Al-Ghamdi, A.A., Yakuphanoglu, F. (2018). Effect of Calcination and Carbon Incorporation on NiO Nanowires for Photodiode Performance, *Microelectronic Engineering*, 202, pp. 51-59
- [27] Sevik, A., Coskun, B., Soyly, M. (2020). The Effect of Molar Ratio on the Photo-generated Charge Activity of ZnO–CdO Composites, *The European Physical Journal Plus*, 135(1), pp. 65
- [28] Al-Sehemi, A.G., Mensah-Darkwa, K., Al-Ghamdi, A.A., Soyly, M., Gupta, R., Yakuphanoglu, F. (2017). Composite CuFe_{1-x}Sn_xO₂/p-type Silicon Photodiodes, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 180, pp. 110-118
- [29] Park, N., Sun, K., Sun, Z., Jing, Y., Wang, D. (2013). High Efficiency NiO/ZnO Heterojunction UV Photodiode by Sol–Gel Processing, *Journal of Materials Chemistry C*, 1(44), pp. 7333-7338
- [30] Gupta, R., Hendi, A., Cavas, M., Al-Ghamdi, A.A., Al-Hartomy, O.A., Aloraini, R., El-Tantawy, F., Yakuphanoglu, F. (2014). Improvement of Photoresponse Properties of NiO/P-Si Photodiodes by Copper Dopant, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 56, pp. 288-295
- [31] Al-Hazmi, F.E., Yakuphanoglu, F. (2018). Photoconducting and Photovoltaic Properties of ZnO:TiO₂ Composite/p-Silicon Heterojunction Photodiode, *Silicon*, 10(3), pp. 781-787
- [32] Karabulut, A., Dere, A., Al-Sehemi, A.G., Al-Ghamdi, A.A., Yakuphanoglu, F. (2018). Cadmium Oxide: Titanium Dioxide Composite Based Photosensitive Diode, *Journal of Electronic Materials*, 47(12), pp. 7159-7169
- [33] Soyly, M., Al-Sehemi, A.G., Dere, A., Al-Ghamdi, A.A., Yakuphanoglu, F. (2022). The Photovoltaic Application and Optics of ZnO–CdO and ZnO–NiO Nanocomposite Binary System, *Micro and Nanostructures*, pp. 207190
- [34] Hwang, J.-D., Lin, W.-M. (2018). Enhancing the Photoresponse of p-NiO/n-ZnO Heterojunction Photodiodes Using Post ZnO Treatment, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 18, pp. 126-131
- [35] Dugan, S., Koç, M.M., Coşkun, B. (2020). Structural, Electrical and Optical Characterization of Mn Doped CdO Photodiodes, *Journal of Molecular Structure*, 1202, pp. 127235
- [36] Ravikumar, M., Ganesh, V., Shkir, M., Chandramohan, R., Kumar, K.D.A., Valanarasu, S., Kathalingam, A., AlFaify, S. (2018). Fabrication of Eu Doped CdO [Al/Eu-nCdO/p-Si/Al] Photodiodes by Perfume Atomizer Based Spray Technique for Opto-Electronic Applications, *Journal of Molecular Structure*, 1160(pp. 311-318
- [37] Raj, I.L.P., Chidhambaram, N., Saravanakumar, S., Sasikumar, S., Varadharajaperumal, S., Alagarasan, D., Alshahrani, T., Shkir, M., AlFaify, S. (2021). A Comprehensive Study on Effect of Annealing on Structural, Morphological and Optical Properties of CdO and Photodetection of Heterojunction n-CdO/p-Si Diode, *Optik*, 241, pp. 166406

- [38] Mohanraj, K., Chang, J., Balasubramanian, D., Chandrasekaran, J., Marnadu, R., Babu, B., Kumar, N.S., Chandrasekar, S. (2021). Effect of Ti on Microstructural and Optoelectrical Characteristics of Ti-CdO Nps Prepared with Microwave Irradiation Techniques for Application of the n-TiCdO/p-Si Photodetector, *Journal of Alloys and Compounds*, 888, pp. 161568
- [39] Rajini, M., Vinoth, S., Hariprasad, K., Karunakaran, M., Kasirajan, K., Chidhambaram, N., Ahamad, T., Alshehri, S.M. (2021). Tuning the Optoelectronic Properties of n-CdO:Fe/p-Si Photodiodes Fabricated by Facile Perfume Atomizer Technique for Photo-Detector Applications, *Applied Physics B*, 127(8), pp. 1-11
- [40] Ravikumar, M., Chandramohan, R., Kumar, K., Valanarasu, S., Kathalingam, A., Ganesh, V., Shkir, M., AlFaify, S. (2018). Effect of Gd³⁺ Doping on Key Structural, Morphological, Optical, and Electrical Properties of CdO Thin Films Fabricated by Spray Pyrolysis Using Perfume Atomizer, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 85(1), pp. 31-40
- [41] Mohanraj, K., Balasubramanian, D., Chandrasekaran, J. (2019). Synthesis and Characterization of Ruthenium-doped CdO Nanoparticle and its n-RuCdO/p-Si Junction Diode Application, *Journal of Alloys and Compounds*, 779, pp. 762-775
- [42] Pehlivanoglu, S.A. (2021). Fabrication of p-Si/n-NiO:Zn Photodiodes and Current/Capacitance-Voltage Characterizations, *Physica B: Condensed Matter*, 603, pp. 412482
- [43] Gullu, H., Yildiz, D., Kocyigit, A., Yildirim, M. (2020). Electrical Properties of Al/PCBM:ZnO/p-Si Heterojunction for Photodiode Application, *Journal of Alloys and Compounds*, 827, pp. 154279
- [44] Rasool, A., Kumar, S., Mamat, M., Gopalakrishnan, C., Amiruddin, R. (2020). Analysis on Different Detection Mechanisms Involved in ZnO-Based Photodetector and Photodiodes, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(9), pp. 7100-7113
- [45] Arya, S., Sharma, A., Singh, B., Riyas, M., Bandhoria, P., Aatif, M., Gupta, V. (2018). Sol-Gel Synthesis of Cu-doped p-CdS Nanoparticles and Their Analysis as p-CdS/n-ZnO Thin Film Photodiode, *Optical Materials*, 79, pp. 115-119
- [46] Yildirim, M., Kocyigit, A. (2018). Characterization of Al/In:ZnO/p-Si Photodiodes for Various In Doped Level to ZnO Interfacial Layers, *Journal of Alloys and Compounds*, 768, pp. 1064-1075
- [47] Karthick, K., Kathirvel, P., Marnadu, R., Chakravarty, S., Shkir, M. (2021). Ultrafast One Step Direct Injection Flame Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles and Fabrication of p-Si/n-ZnO Photodiode and Characterization, *Physica B: Condensed Matter*, 612, pp. 412971
- [48] Ruzgar, S., Caglar, M. (2020). Fabrication and Characterization of Solution Processed Al/Sn:ZnO/p-Si Photodiodes, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 115, pp. 105076
- [49] Yadav, A.B., Pandey, A., Somvanshi, D., Jit, S. (2015). Sol-gel-based Highly Sensitive Pd/n-ZnO Thin Film/n-Si Schottky Ultraviolet Photodiodes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 62(6), pp. 1879-1884
- [50] Huang, C.-H., Chu, Y.-L., Ji, L.-W., Tang, I., Chu, T.-T., Chiou, B.-J. (2020). Fabrication and Characterization of Homostructured Photodiodes with Li-Doped ZnO Nanorods, *Microsystem Technologies*, 28, pp. 369-375
- [51] Hendi, A. (2015). Electrical and Photoresponse Properties of Graphene Oxide:ZnO/Si Photodiodes, *Journal of Alloys and Compounds*, 647, pp. 259-264
- [52] Tursucu, A., Aydogan, S., Kocyigit, A., Ozmen, A., Yilmaz, M. (2022). Investigation the Performance of Cr-Doped ZnO Nanocrystalline Thin Film in Photodiode Applications, *JOM*, 74(3), pp. 777-786
- [53] Echresh, A., Echresh, M., Khranovskyy, V., Nur, O., Willander, M. (2016). High Photocurrent Gain in NiO Thin Film/M-Doped ZnO Nanorods (M= Ag, Cd and Ni) Heterojunction Based Ultraviolet Photodiodes, *Journal of Luminescence*, 178, pp. 324-330
- [54] Buyuk, G.I., Ilican, S. (2020). Electrical and Photovoltaic Properties of Pn Heterojunctions Obtained Using Sol Gel Derived Nanostructured ZnO:La Films onto p-Si, *Superlattices and Microstructures*, 145, pp. 106605

- [55] Gozeh, B.A., Karabulut, A., Yildiz, A., Yakuphanoglu, F. (2018). Solar Light Responsive ZnO Nanoparticles Adjusted Using Cd and La Co-dopant Photodetector, *Journal of Alloys and Compounds*, 732, pp. 16-24
- [56] Ozel, K., Yildiz, A. (2020). SnO₂/ZnO/p-Si and SnO₂/TiO₂/p-Si Heterojunction UV Photodiodes Prepared Using a Hydrothermal Method, *Sensors and Actuators A: Physical*, 31, pp. 112351
- [57] Demirezen, S., Çetinkaya, H., Kara, M., Yakuphanoglu, F., Altındal, Ş. (2021). Synthesis, Electrical and Photo-sensing Characteristics of the Al/(PCBM/NiO:ZnO)/p-Si Nanocomposite Structures, *Sensors and Actuators A: Physical*, 317, pp. 112449
- [58] Kasirajan, K., Anasthasiya, A.N.A., Aldossary, O.M., Ubaidullah, M., Karunakaran, M. (2021). Structural, Morphological, Optical and Enhanced Photodetection Activities of CdO Films: An Effect of Mn Doping, *Sensors and Actuators A: Physical*, 319, pp. 112531
- [59] Afzal, A.M., Bae, I.-G., Aggarwal, Y., Park, J., Jeong, H.-R., Choi, E.H., Park, B. (2021). Highly Efficient Self-powered Perovskite Photodiode with an Electron-blocking Hole-transport NiO_x Layer, *Scientific Reports*, 11(1), pp. 1-14
- [60] Jeong, I.-S., Kim, J.H., Im, S. (2003). Ultraviolet-enhanced Photodiode Employing n-ZnO/p-Si Structure, *Applied Physics Letters*, 83(14), pp. 2946-2948
- [61] Yakuphanoglu, F., Caglar, Y., Caglar, M., Ilican, S. (2010). ZnO/p-Si Heterojunction Photodiode by Sol-gel Deposition of Nanostructure n-ZnO Film on p-Si Substrate, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13(3), pp. 137-140
- [62] Mandalapu, L., Xiu, F., Yang, Z., Zhao, D., Liu, J. (2006). p-Type Behavior from Sb-doped ZnO Heterojunction Photodiodes, *Applied Physics Letters*, 88(11), pp. 112108
- [63] Kheirandish, N., Mortezaali, A. (2013). Ultraviolet/Visible Photodiode of Nanostructure Sn-doped ZnO/Si Heterojunction, *Journal of Applied Physics*, 113(18), pp. 183103
- [64] Asar, T., Yavuz, T., Coşkun, B. (2020). A Comprehensive Investigation on Ag-doped ZnO Based Photodiodes with Nanofibers, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(8), pp. 6059-6071
- [65] Öztürk, T. (2021). Effect of Various PCBM Doping on the Interfacial Layer of Al/PCBM:ZnO/p-Si Photodiodes, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(8), pp. 10180-10193
- [66] Karataş, Ş., El-Nasser, H., Al-Ghamdi, A., Yakuphanoglu, F. (2018). High Photoresponsivity Ru-doped ZnO/p-Si Heterojunction Diodes by the Sol-gel Method, *Silicon*, 10(2), pp. 651-658
- [67] Taşer, A. (2018). *Bazı İkili ve Üçlü Alaşımlardan Üretilen Alaşım/Yarıiletken Doğrultucu Kontakların Elektriksel Karakteristiklerinin Zamana Bağlı Olarak Araştırılması*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [68] Biçak, R. (2014). *Ag Katkılı In₂S₃ Yarıiletkeninin Sol-Jel Yöntemi ile Üretilmesi, Optiksel ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [69] Ateş, T. (2012). *Metal Oksit Yarı İletken Malzemelerin Üretilmesi ve Kuartz Kristal Mikroterazi Nem Sensörlerinin Hazırlanması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [70] Çalman, Y.B. (2021). *Fotovoltaik Uygulamaları İçin Elektrobiriktirme Yöntemi ile Büyütülmüş Zn Katkılı CdS İnce Filmlerinin Elektrofiziksel Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [71] Bulut, N. (2021). *Katkısız ve Katkılı NiO/Aktif Karbon Nanoparçacıkların Fotokatalitik Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [72] Kara, F. (2020). *Fe Katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Üretimi ve Optik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [73] Dinek, T. (2006). *CdO Yarıiletken Bileşiğinin Spray Pyrolysis Yöntemi ile Elde Edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [74] Sandıkçı, T.A. (2013). *Bor, Selenyum ve Kurşun Katkılı Yarıiletken Alaşımların Üretimi ve Yapısal Özelliklerinin Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

- [75] Canbay, C.A. (2005). *Kompozit Yarıiletkenlerin Termal, Elektrik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [76] Şenel, M. (2013). *In₂O₃ Yarıiletken Filminin Döndürerek Kaplama Yöntemiyle Elde Edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [77] Tören, A. (2019). *Laser Boyası Kullanılarak Oluşturulmuş Schottky Yapıların Kapasite Voltaj Spektroskopisi*, Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [78] Çabuk, G. (2012). *Kimyasal Püskürtme Tekniği ile Üretilen Katkısız ve Ga Katkılı CdO Bileşiklerinin Yapısal, Optiksel ve Elektriksel Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [79] Kirezli, B. (2019). *N-GaAs ve n-Si Yarıiletkenler Üzerinde Yüzey Polimerizasyon Yöntemiyle Elde Edilmiş Olan P[(EGDMA-VPCL)-SWCNT] Filmlerinin Oluşturduğu Fotodiyot Yapıların Elektrik ve Optik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [80] Şahin, R. (2020). *n-Si/Mo Schottky Diyotların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [81] Yıldız, S. (2020). *Bazı Oksit ve III-V Yarıiletken Mikro ve Nano Yapıların Yüzey Fiziği Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [82] Çoban, Ö. (2018). *Oksit Yarıiletken Tabanlı Optik Gaz Sensörlerinin Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [83] Hopoğlu, H. (2022). *Katkısız Ve Azot Katkılı Nio İnce Filmlerin Magnetron Söktürme ile Büyütülmesi, Yapısal ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [84] Nickel Oxide, https://www.webelements.com/compounds/nickel/nickel_oxide.html, Erişim Tarihi: 16.04.2022
- [85] Zinc Oxide, http://www.webelements.com/compounds/zinc/zinc_oxide.html Erişim Tarihi: 16.04.2022
- [86] Özdere, A. (2021). *Hidrotermal Metod ile Nano Yarıiletken Malzeme Esaslı Fotodiyot Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [87] Aslan, F. (2019). *Organik-İnorganik Hibrit Yarı İletken Fotodiyotların Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [88] Gündüz, B. (2007). *Organik Yarı İletken Fotodiyotların Hazırlanması ve Optoelektronik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [89] Demirbilek, N. (2019). *Çinko Oksit Arayüzeyli Yarıiletken-Yarıiletken UV Fotodedektörler*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [90] Aydın, M. (2014). *Al Katkılı CdMnO Seyreltik Manyetik Yarıiletkenin Manyetik, Yapısal, Yüzeysel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [91] Gürgeç, T. (2017). *Aisi 1020 Çeliğinin Plazma Transfer Ark Yöntemi ile Alaşımlandırılmasında Bor Katkısının Yüzey Özellikleri Üzerine Etkisi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [92] İnce Film Teknikleri, <https://yusufbilgen.wordpress.com/2015/01/16/ince-film-teknikleri/>, Erişim Tarihi: 16.04.2022
- [93] Solar Simulator – C – V Analyzer System, https://fytronix.com/index.php?route=product/product&product_id=393, Erişim Tarihi: 05.04.2022
- [94] Al-Ghamdi, A., Mahmoud, W.E., Yaghmour, S.J., Al-Marzouki, F. (2009). Structure and Optical Properties of Nanocrystalline NiO Thin Film Synthesized by Sol–Gel Spin-coating Method, *Journal of Alloys and Compounds*, 486(1-2), pp. 9-13
- [95] Zhao, S., Shen, Y., Zhou, P., Zhang, J., Zhang, W., Chen, X., Wei, D., Fang, P., Shen, Y. (2018). Highly Selective NO₂ Sensor Based on p-Type Nanocrystalline NiO Thin Films Prepared by Sol–gel Dip Coating, *Ceramics International*, 44(1), pp. 753-759

- [96] Zargar, R., Chackrabarti, S., Malik, M., Hafiz, A. (2021). Sol-Gel Syringe Spray Coating: A Novel Approach for Rietveld, Optical and Electrical Analysis of CdO Film for Optoelectronic Applications, *Physics Open*, 7, pp. 100069
- [97] Kumari, R., Kumar, V. (2020). Impact of Zinc Doping on Structural, Optical, and Electrical Properties of CdO Films Prepared by Sol-gel Screen Printing Mechanism, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 94(3), pp. 648-657
- [98] Rajput, J.K., Pathak, T.K., Kumar, V., Kumar, M., Purohit, L. (2017). Annealing Temperature Dependent Investigations on Nano-cauliflower Like Structure of CdO Thin Film Grown by Sol-Gel Method, *Surfaces and Interfaces*, 6, pp. 11-17
- [99] Ganesh, V., AlFaify, S. (2019). Linear and Nonlinear Optical Properties of Sol-gel Spin Coated Erbium-doped CdO Thin Films, *Physica B: Condensed Matter*, 570, pp. 58-65
- [100] Zeid, E.F.A., Ibrahim, I.A., Ali, A.M., Mohamed, W.A. (2019). The Effect of CdO Content on the Crystal Structure, Surface Morphology, Optical Properties and Photocatalytic Efficiency of p-NiO/n-CdO Nanocomposite, *Results in Physics*, 12, pp. 562-570
- [101] Anitha, S., Suganya, M., Prabha, D., Srivind, J., Balamurugan, S., Balu, A. (2018). Synthesis and Characterization of NiO-CdO Composite Materials Towards Photoconductive and Antibacterial Applications, *Materials Chemistry and Physics*, 211, pp. 88-96
- [102] Wang, X.L., Liu, Z., Wen, C., Liu, Y., Wang, H.Z., Chen, T., Zhang, H.Y. (2018). Thickness Effect of Nickel Oxide Thin Films on Associated Solution-Processed Write-Once-Read-Many-Times Memory Devices, *Applied Physics A*, 124(6), pp. 1-7
- [103] Wang, J., Yang, P., Wei, X., Zhou, Z. (2015). Preparation of NiO Two-dimensional Grainy Films and Their High-performance Gas Sensors for Ammonia Detection, *Nanoscale research letters*, 10(1), pp. 1-6
- [104] Akinkuade, S.T., Meyer, W.E., Nel, J.M. (2019). Effects of Thermal Treatment on Structural, Optical and Electrical Properties of NiO Thin Films, *Physica B: Condensed Matter*, 575, pp. 411694
- [105] Rajput, J.K., Pathak, T.K., Swart, H.C., Purohit, L.P. (2019). Synthesis of CdO Nanoflowers by Sol-gel Method on Different Substrates with Photodetection Application, *Physica Status Solidi (a)*, 216(20), pp. 1900093
- [106] Ocak, Y.S., Batibay, D., Baturay, S. (2018). Optical and Electrical Properties of Ni-doped CdO Thin Films by Ultrasonic Spray Pyrolysis, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(20), pp. 17425-17431
- [107] Miled, I.B., Jlassi, M., Sta, I., Dhaouadi, M., Hajji, M., Mousdis, G., Kompitsas, M., Ezzaouia, H. (2018). Influence of In-doping on Microstructure, Optical and Electrical Properties of Sol-gel Derived CdO Thin Films, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(13), pp. 11286-11295
- [108] Aslan, F., Esen, H., Yakuphanoglu, F. (2019). Electrical and Fotoconducting Characterization of Al/Coumarin:ZnO/Al Novel Organic-Inorganic Hybrid Photodiodes, *Journal of Alloys and Compounds*, 789, pp. 595-606
- [109] Samavati, A., Samavati, Z., Ismail, A., Othman, M., Rahman, M.A., Zulhairun, A., Amiri, I. (2017). Structural, Optical and Electrical Evolution of Al and Ga Co-doped ZnO/SiO₂/Glass Thin Film: Role of Laser Power Density, *RSC Advances*, 7(57), pp. 35858-35868
- [110] Islam, M.R., Rahman, M., Farhad, S., Podder, J. (2019). Structural, Optical and Photocatalysis Properties of Sol-gel Deposited Al-doped ZnO Thin Films, *Surfaces and Interfaces*, 16, pp. 120-126
- [111] Fazmir, H., Wahab, Y., Saadon, S., Anuar, A., Zainol, M., Johari, S., Mazalan, M., Arshad, M.M. (2015). Study of Ideal Piezoelectric Sandwich Structure Based on Foot Plantar Pressure Applications, *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 72(1), pp. 1-6
- [112] Aslan, F., Esen, H., Yakuphanoglu, F. (2020). Al/p-Si/Coumarin:TiO₂/Al Organic-Inorganic Hybrid Photodiodes: Investigation of Electrical and Structural Properties, *Silicon*, 12(9), pp. 2149-2164
- [113] Mansour, A., Abou Hammad, A.B., El Nahrawy, A.M. (2021). Sol-gel Synthesis and Physical Characterization of Novel MgCrO₄-MgCu₂O₃ Layered Films and MgCrO₄-MgCu₂O₃/p-Si Based Photodiode, *Nano-Structures & Nano-Objects*, 25, pp. 100646

- [114] Zedan, I., El-Menyawy, E., Mansour, A. (2019). Physical Characterizations of 3-(4-Methyl Piperazinylimino Methyl) Rifampicin Films for Photodiode Applications, *Silicon*, 11(3), pp. 1693-1699
- [115] Nicollian, E., Goetzberger, A. (1967). The Si-SiO₂ Interface—Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique, *The Bell System Technical Journal*, 46(6), pp. 1055-1033
- [116] Nicollian, E.H., Brews, J.R., Nicollian, E.H. (1982). *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*, Wiley, New York
- [117] Dere, A., Soylu, M., Yakuphanoglu, F. (2019). Solar Light Sensitive Photodiode Produced Using a Coumarin Doped Bismuth Oxide Composite, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 90, pp. 129-142
- [118] Dökme, İ., Altındal, Ş., Tunç, T., Uslu, İ. (2010). Temperature Dependent Electrical and Dielectric Properties of Au/Polyvinyl Alcohol (Ni, Zn-Doped)/n-Si Schottky Diodes, *Microelectronics Reliability*, 50(1), pp. 39-44
- [119] Nicollian, E., Goetzberger, A. (1965). MOS Conductance Technique for Measuring Surface State Parameters, *Applied Physics Letters*, 7(8), pp. 216-219
- [120] Hill, W., Coleman, C. (1980). A Single-frequency Approximation for Interface-state Density Determination, *Solid-State Electronics*, 23(9), pp. 987-993
- [121] Imer, A.G., Dere, A., Al-Sehemi, A.G., Dayan, O., Serbetci, Z., Al-Ghamdi, A.A., Yakuphanoglu, F. (2019). Photosensing Properties of Ruthenium (II) Complex-based Photodiode, *Applied Physics A*, 125(3), pp. 1-10
- [122] Coşkun, B., Mensah-Darkwa, K., Soylu, M., Al-Sehemi, A.G., Dere, A., Al-Ghamdi, A., Gupta, R., Yakuphanoglu, F. (2018). Optoelectrical Properties of Al/p-Si/Fe:N Doped ZnO/Al Diodes, *Thin Solid Films*, 653, pp. 236-248
- [123] Özerli, H., Bekereci, A., Türüt, A., Karataş, Ş. (2017). Electrical and Photovoltaic Properties of Ag/p-Si Structure with GO Doped NiO Interlayer in Dark and under Light Illumination, *Journal of Alloys and Compounds*, 718, pp. 75-84
- [124] Orak, İ. (2016). The Performances Photodiode and Diode of ZnO Thin Film by Atomic Layer Deposition Technique, *Solid State Communications*, 247, pp. 17-22

ÖZGEÇMİŞ

Ezgi GÜRGENÇ

[Redacted Section Header]

[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]

[Redacted Section Header]

[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]

[Redacted Section Header]

[Redacted]	[Redacted]
	[Redacted]
	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]

[Redacted Section Header]

-
- [Redacted]
 - [Redacted]
 - [Redacted]

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Gürgenç, E., Dikici, A., Aslan, F. (2022). Production and Characterization of Al/NiO:ZnO/p-Si/Al Composite Photodiodes for Solar Energy Tracking Systems. *Turkish Journal of Science and Technology*, 17(1), pp. 109-119.
2. Gürgenç, E., Dikici, A., Bıryan, F., Aslan, F., Koran, K. (2022). Sol-Jel Yöntemi ile Sentezlenen La Katkılı CdO Nanoparçacıkların, Yapısal Karakterizasyonu ve Dielektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), pp. 229-237.
3. Gürgenç, E., Dikici, A., Aslan, F. (2022). Investigation of structural, electrical and photoresponse properties of composite based Al/NiO:CdO/p-Si/Al photodiodes. *Physica B: Condensed Matter*, 639, 413981.
4. Gürgenç, E., Dikici, A. (2022). Structural and morphological characterization of rare earth element doped NiO thin films produced by dynamic sol-gel spin coating method. *Journal of Materials and Electronic Devices*, 1(1), pp. 1-6.

5. Varol Altay, E., Gurgenc, E., Altay, O., Dikici, A. (2022). Hybrid artificial neural network based on a metaheuristic optimization algorithm for the prediction of reservoir temperature using hydrogeochemical data of different geothermal areas in Anatolia (Turkey). *Geothermics*, 104, 102476.

Bildiriler:

1. Gürgeç, E., Dikici, A., Aslan, F. (2021). Structural Properties of Nano CdO/NiO Composite Thin Films Prepared by Sol–Gel Spin Coating Technique, *7th International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS)*, Bosnia and Herzegovina
2. Gürgeç, E., Dikici, A., Medeni, Somer. (2021). Synthesis and Characterization of Sr-Doped NiO Nanoparticles Synthesized By Hydrothermal Method, *7th International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS)*, Bosnia and Herzegovina
3. Gürgeç, E., Dikici, A., Aslan, F. (2021). Investigation of Structural Properties of Al/p-Si/CdO:NiO/Al Photodiode Fabricated by Sol–Gel Spin Coating Method, *Latin American Conference on Natural And Applied Sciences*, Villahermosa, Mexico
4. Gürgeç, E., Dikici, A., Aslan, F. (2021). Structural Characterization of ZnO-NiO Composite Photodiodes Produced by Drop Casting Method, *8th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation (MSNG2021)*, Fırat Üniversitesi, Elazığ