



**Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al KONFIGÜRASYONUNA SAHİP SCHOTTKY
DİYOTLARININ FOTODİYOT ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Yusuf ATMACA

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

Yusuf ATMACA

18/10/2024

Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al KONFİGÜRASYONUNA SAHİP SCHOTTKY DİYOTLARININ FOTODİYOT ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Yusuf ATMACA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Bu çalışmada NiCo₂O₄ (nikel kobaltit) ince film yapısını elektriksel ve optik olarak karakterize etmek için Schottky yapıli diyot ve farklı alttaş üzerinde kaplanmıştır. Co₃O₄ (kobalt oksit) çekirdek tabakası üzerinde NiCo₂O₄ ince film yapısı, n-tipi Si, cam ve FTO (flor katkıli kalay oksit) yüzeyleri üzerine döndürmeli kaplama tekniğı kullanılarak oluşturuldu. NiCo₂O₄ ince film yapısı yüzey analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapıldı. Enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizi ile NiCo₂O₄ ince film detaylı yapısal özellikleri incelendi. NiCo₂O₄ ince film kristal yapısının incelemesi de X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile yapılmıştır. Cam ve FTO yüzeyleri üzerindeki NiCo₂O₄ ince film yapısı ultraviyole ve görünür ışık (UV-Vis) spektroskopisi ile optik geçirgenlik ve soğurma analizi yapıldı. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyot yapısı oluşturularak da görünür ışık dalga boylarında farklı aydınlatma şiddetlerinde elektro-optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Akım-gerilim (I-V) grafikleri kullanılarak malzemelerin idealite faktörü (n), bariyer yüksekliğı (Φ_b) ve doyma akımı (I₀) değerleri hesaplandı. Aydınlatma şiddeti arttıkça ters kutuplama da fotoakımın arttığı, numunelerin ışığa duyarlı olduğı ve fotodiyot özelliğı gösterdiği belirlendi. Son olarak da kapasitif özelliklerini incelemek amacıyla da kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) özellikleri incelendi. Tüm bu veriler değerlendirildiğın de de NiCo₂O₄'ün bu özellikleriyle farklı alanlardaki optoelektronik uygulamalarda fotodiyot olarak kullanılabilecek uygun bir malzeme olduğı görüldü.

Bilim Kodu : 20222
Anahtar Kelimeler : NiCo₂O₄, n-Si, ideallik faktörü, engel yüksekliğı, Schottky diyot, fotodiyot
Sayfa Adedi : 59
Danışman : Prof. Dr. Şükrü ÇAVDAR

INVESTIGATION OF THE PHOTODIODE PROPERTIES OF
SCHOTTKY DIODES WITH Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al CONFIGURATION

(M. Sc. Thesis)

Yusuf ATMACA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

In this study, NiCo₂O₄ (nickel cobaltite) thin film structure was coated on Schottky diode and different substrates to characterise its electrical and optical properties. NiCo₂O₄ thin film structure on Co₃O₄ (cobalt oxide) seed layer was formed using spin coating technique on n-type Si, glass and FTO (fluorine doped tin oxide) substrates. Surface analysis of the NiCo₂O₄ thin film structure was performed using scanning electron microscopy (SEM). Detailed structural properties of NiCo₂O₄ thin film were investigated by energy dispersive spectroscopy (EDS) analysis. The crystal structure of NiCo₂O₄ thin film was also investigated by x-ray diffraction (XRD) analysis. The NiCo₂O₄ thin film structure on glass and FTO surfaces was analysed by ultraviolet and visible light (UV-Vis) spectroscopy and optical transmittance and absorption analysis. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diode structure was formed and its electro-optical and electrical properties were investigated at different illumination intensities at visible light wavelengths. The ideality factor (n), barrier height (Φ_b) and saturation current (I_0) values of the materials were calculated using current-voltage (I-V) graphs. It was determined that the photocurrent in reverse polarisation increased as the illumination intensity increased, the samples were photosensitive and showed photodiode properties. Finally, capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G-V) properties were analysed to investigate the capacitive properties. When all these data were evaluated, it was seen that NiCo₂O₄ is a suitable material that can be used as a photodiode in optoelectronic applications in different fields with these properties.

Science Code : 20222
Key Words : NiCo₂O₄, n-Si, ideality factor, barrier height, Schottky diode, photodiode
Page Number : 59
Supervisor : Prof. Dr. Şükrü Çavdar

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında çok değerli katkıları, yol göstericiliği, engin bilgi birikimi ve deneyimi ile yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Şükrü ÇAVDAR'a; tez çalışmam sırasında engin bilgi ve tecrübelerini paylaşarak her türlü fedakârlık ve yardımı gösteren çok değerli hocalarım Prof. Dr. Haluk KORALAY ve Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU'na; deneysel ve karakterizasyon işlemleri sırasında yardımlarını hiç esirgemeyen Gazi Üniversitesi Süperiletkenlik ve Termal Analiz Laboratuvarı'ndaki tüm arkadaşlarıma; tüm eğitim hayatım süresince hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen değerli aileme en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Bu çalışma FYL-2022-8105 proje numaralı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmektedir. Desteklerinden ötürü Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİ.....	5
2.1. Metal/Yarıiletken Schottky Diyot	5
2.1.1. Metal / n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar	7
2.1.2. Metal / n-tipi yarıiletken omik kontaklar	8
2.1.3. Schottky fotodedektörler.....	9
2.1.4. Fotodiyotların akım-gerilim karakteristiği.....	11
2.1.5. Fotovoltaik sistem performans parametreleri.....	12
2.2. Termiyonik Emisyon Teorisi	14
2.3. Norde Yöntemi.....	16
2.4. Yarıiletken Ara Yüzey Durumları.....	17
2.5. NiCo ₂ O ₄ Özellikleri	18
3. MATERYAL VE METOT	21
3.1. Deneysel Üretim ve Karakterizasyonda Kullanılan Yöntem ve Sistemler	21
3.1.1. Sol-jel yöntemi.....	21
3.1.2. Döndürmeli kaplama yöntemi.....	22

	Sayfa
3.1.3. Termal buharlaştırma sistemi	23
3.1.4. X ışınları Kırınımı Tekniği.....	24
3.1.5. Taramalı elektron mikroskobu	24
3.1.6. UV/Vis Spektrometresi	25
3.2. NiCo ₂ O ₄ İnce Film ve Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky Diyot Üretimi	27
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	33
4.1. SEM ve EDS Analiz Sonuçları	33
4.2. XRD Sonuçları	35
4.3. UV/Vis	36
4.4. Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	38
4.5. Norde Fonksiyonları ve Seri Direnç Hesabı	41
4.6. Işık Şiddetine Bağlı Diyot Fotoakım- Zaman Karakteristikleri	44
4.7. Al/NiCo ₂ O ₄ n-Si/Al Schottky Diyotu Fotoiletkenlik Karakteristikleri.....	45
4.8. Fotovoltaik Karakteristiği	46
4.9. Arayüzey Durumları Yoğunluğu.....	47
4.10. Kapasitans-İletkenlik Karakteristikleri	48
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. NiCo_2O_4 özellikleri.....	20
Çizelge 4.1. $\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ Schottky diyotunun ışık şiddetine bağlı ideallik faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve doğrultma oranları (RR)	41
Çizelge 4.2. $\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ Schottky diyotunun ışık şiddetine bağlı Norde fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri	43
Çizelge 4.3. $\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ Schottky diyotu ışık şiddetine bağlı İaçma/İkapama değerleri.....	45
Çizelge 4.4. J-V grafiği sonuçlarından elde edilen $\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ Schottky diyotunun hesaplanan fotovoltaiik sistem parametreleri	46

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal/Yarıiletken Schottky diyotun şematik görünümü.....	6
Şekil 2.2. Metal yarıiletken kontak türü şeması.....	7
Şekil 2.3. Metal / n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak enerji diyagramı.....	8
Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontak enerji band diyagramı	9
Şekil 2.5. Üzerine foton düşürülen bir Schottky diyotun şematik gösterimi	10
Şekil 2.6. Fotodiyotların akım-gerilim karakteristiği grafiği.....	12
Şekil 2.7. NiCo ₂ O ₄ kristal yapısı	19
Şekil 3.1. Döndürmeli kaplama yöntemi	22
Şekil 3.2. Termal buharlaştırma sistemi şematik gösterimi	23
Şekil 3.3. X-ışını kırınımı tekniği şematik gösterimi.....	24
Şekil 3.4. Taramalı elektron mikroskobu şematik gösterimi	25
Şekil 3.5. UV-Vis Spektroskopisi şematik gösterimi	26
Şekil 3.6. Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky diyot deneysel üretim şematik görseli	27
Şekil 3.7. Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky diyot yapısının şematik görünümü	31
Şekil 4.1. FTO üzerine kaplanmış NiCo ₂ O ₄ ince filmlerin XRD deseni.....	36
Şekil 4.2. Literatürde benzer görülen FTO üzerine kaplanmış NiCo ₂ O ₄ ince film XRD deseni.....	36
Şekil 4.3. FTO ve cam üzerine kaplanan NiCo ₂ O ₄ ince filmlerin dalgaboyuna bağlı a) Soğurma b) Geçirgenlik analizleri	37
Şekil 4.4. NiCo ₂ O ₄ ince filmlerin cam ve FTO üzerindeki Tauc yöntemine göre band aralığı analizleri.....	38
Şekil 4.5. Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky diyotun farklı ışık şiddetine bağlı a) Akım-gerilim b) Log akım-gerilim grafiği	40
Şekil 4.6. Seri direncin I-V'ye etkisi	42
Şekil 4.7. Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky diyotunun farklı ışık şiddetine bağlı F(V)-V grafiği.....	43

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky diyotunun farklı ışık şiddetlerinde akım zaman grafiği	44
Şekil 4.9. Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky diyot unu güce bağlı akım grafiği	45
Şekil 4.10. Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky diyotunun farklı ışık şiddetlerinde J-V grafiği	46
Şekil 4.11. Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky diyotun farklı ışık şiddetlerinde arayüzey durum yoğunluğuna karşı enerji değerleri grafiği	47
Şekil 4.12. Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky diyotun farklı frekans değerleri altında C-V grafiği	48
Şekil 4.13. Al/NiCo ₂ O ₄ /n-Si/Al Schottky diyotun farklı frekans değerleri altında G-V grafiği.....	49

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Çekirdek tabaka solüsyonu	28
Resim 3.2. Döndürmeli kaplama cihazı	28
Resim 3.3. Tüp fırın görseli	29
Resim 3.4. NiCo_2O_4 kaplama çözeltisi.....	29
Resim 3.5. NiCo_2O_4 ile kaplanan n-tipi Si, FTO ve cam alt taş görselleri	30
Resim 3.6. Termal kaplama cihazı.....	30
Resim 4.1. NiCo_2O_4 ince film yapısının 50k büyütmeli SEM görüntüsü.....	33
Resim 4.2. NiCo_2O_4 ince film yapısının 100k büyütmeli SEM görüntüsü.....	33
Resim 4.3. NiCo_2O_4 ince film yapısının yanal kesit SEM görüntüsü.....	34
Resim 4.4. NiCo_2O_4 ince film yapısının EDS analizi görseli	34
Resim 4.5. NiCo_2O_4 ince film yapısının elementel EDS analiz görseli.....	35
Resim 4.6. Keithley 2400 akım kaynağı ünitesi	38
Resim 4.7. Sourcetronic ST2826 empedans analizörü	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan
$\text{\AA}$	Angström
A^*	Etkin Richardson sabiti
C	Sığa
C_c	Biriktirme bölgesindeki ölçülen kapasite
d_{ox}	Oksit tabakası kalınlığı
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_f	Fermi enerjisi
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
E_{ss}	Arayüzey durum enerjisi
E_v	Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
$F(V)$	Norde fonksiyonu
G	İletkenlik
h	Planck sabiti
$h\nu$	Foton enerjisi
I	Akım
I_F	Düz beslem akım değeri
I_{max}	Maksimum güç noktasındaki akım
I_o	Doyma akımı
I_{ph}	Fotoakım
I_R	Ters beslem akım değeri
I_{sc}	Kısa devre akımı
J_{ms}	Metalden yarıiletkene doğru doyma akımı
J_o	Doyma akım yoğunluğu
J_{sm}	Yarıiletkenden metale doğru doyma akımı
K	Boltzman sabiti

Simgeler	Açıklamalar
m_n^*	Elektronun etkin kütlesi
n	İdeallik faktörü
N_C	İletkenlik bandı etkin durum yoğunluğu
N_D	Verici yoğunluğu
N_{ss}	Yüzey durum yoğunluğu
N_v	Değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
ϕ_m	Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
q	Elektron yükü
R	Fotoduyarlılık
rpm	Dakikadaki devir sayısı
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Şönt direnci
T	Kelvin cinsinden sıcaklık
t	Zaman
V	Uygulanan gerilim
V_B	Engel yüksekliği aşma gerilim değeri
V_{max}	Maksimum güç noktasındaki gerilim
V_o	Norde fonksiyonu için minimum gerilim
V_{oc}	Açık devre gerilim değeri
γ	Norde fonksiyonu için bir tam sayı
ϵ_i	Yalıtkan malzemenin dielektrik geçirgenliği
ϵ_o	Boşluğun elektriksel geçirgenliği
ϵ_o	Boşluğun dielektrik geçirgenliği
ϵ_s	Yarıiletken malzemenin dielektrik geçirgenliği
χ	Elektron yatkınlığı
Φ_b	Engel yüksekliği
Φ_b	Engel yüksekliği

Kısaltmalar Açıklamalar

C-V Sığa-Gerilim

Kısaltmalar	Açıklamalar
Fcc	Yüzey Merkezli Kübik
FF	Doldurma Faktörü
FTO	Flor katkılı Kalay Oksit
G-V	İletkenlik-Gerilim
I-V	Akım-Gerilim
JCPDF	Toz Kırınımı Standartları Ortak Komitesi
LED	Işık Yayan Diyot
MIS	Metal-Arayüzey Tabakası-Yarıiletken
MSM	Metal-Yarıiletken-Metal
NIR	Yakın Kızılötesi
RR	Doğrultma oranı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TE	Termiyonik Emisyon
TEA	Tiethanol Amin
TMO	Geçiş Metali Oksitleri
USS	Ultra Saf Su
UV	Morötesi
UV/Vis	Morötesi/Görünür Bölge
XRD	X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Yarıiletkenler, elektronik ve fotonik uygulamalarında devrim yaratan, benzersiz ve ayarlanabilir özellikleri nedeniyle yoğun araştırmaların konusu olan bir malzeme sınıfıdır. İletkenler ve yalıtkanlar arasında yer alan bu malzemeler, doping veya sıcaklık gibi dış uyaranlara yanıt olarak elektriksel iletkenliklerini değiştirme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, onları diyotlar, transistörler ve bütünleşik devreler gibi çeşitli elektronik cihazların temel yapı taşları haline getirir. Yarıiletken teknolojisindeki hızlı ilerleme, özellikle silikon tabanlı cihazların minyatürleştirilmesi ve entegrasyonu alanında, bilgisayarlar, iletişim sistemleri ve tüketici elektroniği dahil olmak üzere çok çeşitli sektörlerde benzeri görülmemiş bir ilerlemeye yol açmıştır [1-2].

Schottky diyotlar, bir metal ve bir yarıiletken malzeme arasındaki ara yüzeyde oluşan Schottky bariyeri olarak bilinen bir doğrultma metal-yarıiletken birleşimi kullanan yarıiletken cihazlar olarak sınıflandırılır. Bu diyotlar, modern elektronikte anahtarlama hızları, düşük güç tüketimi ve basit üretim süreçleri gibi avantajları nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Fotodetektörler, güneş pilleri gibi elektro optik uygulamalar, yüksek frekanslı elektronik uygulamalar ve güç elektroniği gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Schottky diyotları, düşük güç tüketimi, basit üretim süreçleri ve düşük maliyet gibi avantajlar sergileyerek onları elektro optik cihazlar, sensörler ve güç elektroniği sistemleri dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda vazgeçilmez bileşenler haline getirir. Özellikle, Schottky fotodetektörler, gelen fotonları elektrik sinyaline dönüştürmek için Schottky bariyerini kullanarak görüntüleme, optik iletişim ve güneş enerjisi hasadı gibi alanlarda önemli bir rol oynar. Dahası, Schottky diyotlarının benzersiz özellikleri, yüksek frekanslı sinyallerin algılanması ve işlenmesi için gerekli olan hızlı yanıt süreleri ve düşük gürültü performansı nedeniyle terahertz teknolojisindeki gelişmeler için umut vadetmektedir [3-6].

Geçiş metali oksitleri (TMO), kısmen dolu d orbitalleri ve çoklu değerlik durumları sergileyen geçiş metallerinden oluşan bileşikler, çeşitli uygulamalarda önemli bir malzeme sınıfı olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle, TMO'ların benzersiz elektronik yapısı ve özellikleri, onları Schottky diyotları dahil olmak üzere yarıiletken cihazların performansını arttırmak için oldukça umut verici hale getirmektedir. Schottky diyotlarının performansı büyük ölçüde metal-yarıiletken ara yüzünün elektronik özelliklerine bağlıdır ve TMO'lar, ara yüz

özelliklerini ve cihaz performansını ayarlamak için bir araç sağlayarak bu ara yüzeyde kullanılabilir. Örneğin, yüksek iletkenliğe sahip TMO'lar, Schottky bariyer yüksekliğini ve seri direncini değiştirerek diyot performansını etkileyebilir. Dahası, TMO'ların katalitik ve elektrokimyasal özellikleri, gaz sensörler ve enerji depolama cihazları gibi uygulamalar için Schottky diyotlarının işlevselleştirilmesi için kullanılabilir [7-8].

Geçiş metal oksitleri arasında, NiCo_2O_4 , benzersiz spinel yapısı, düşük maliyetli olması, geniş spektral duyarlılığı, optik soğuruculuğu, iyi elektriksel iletkenliği, süper kapasitif ve manyetik özellikleriyle öne çıkmaktadır. Süper kapasitör ve elektrot malzemesi olarak sıklıkla kullanılan NiCo_2O_4 'ün bu özellikleri, onu aynı zamanda yüksek performanslı fotodedektör, fotovoltaiik uygulamalar, görüntüleme ve uyarı sensörleri, tıbbi görüntüleme sistemleri gibi geniş bir alanda kullanım potansiyeline sahip optoelektronik cihazlar üretmek için ideal bir malzeme adayı haline getirmiştir [9-20].

Görünür ışık veya ultraviyole bölgesindeki fotonları algılayabilen fotodedektör cihazlar, askeri savunma uygulamaları, çevresel izleme, biyomedikal görüntüleme, optik iletişim ve astronomik gözlemler dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Bu cihazlar, gelen fotonları elektrik sinyaline dönüştürme yeteneklerine dayanarak, hassasiyet, hızlı yanıt süresi ve geniş bir dinamik aralık gibi özellikler gerektirir. Geleneksel silikon tabanlı fotodedektörler görünür spektrumda iyi performans gösterirken, UV ışınlarına karşı sınırlı duyarlılıkları vardır. Sonuç olarak, geniş bant aralıklı malzemeler ve yeni cihaz yapıları kullanan UV gelişmiş fotodedektörler geliştirilmesi önemli araştırma çabalarına odaklanmıştır. Bu kapsamda da nano yapıli malzemeler ve ince film teknolojileri ile, gelişmiş performans özellikleri sunan UV ve görünür bölgede çalışan fotodedektörlerinin geliştirilmektedir. Bu malzemelerin geniş yüzey alanları ve amaca uygun tasarlanabilir bant aralıkları ve yapılarının olması, foton tespitinde çok daha performanslı dedektörler sağlamaktadır. Bu gelişmeler de, yarıiletken nano yapılara dayalı birçok yeni fotodedektörün ortaya çıkmasına ve araştırılmasına yol açmıştır [21-28].

Bu tez çalışmasının amacı, farklı altaşlar üzerinde ince film NiCo_2O_4 sentezlemek ve $\text{Al}/\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si}/\text{Al}$ Schottky diyot yapılarının fabrikasyonunu ve kapsamlı bir şekilde karakterizasyonunu gerçekleştirmektir. FTO, n-Si ve cam altaşlar üzerinde NiCo_2O_4 ince film büyütülmesi, fiziksel buhar biriktirme veya kimyasal çözelti biriktirme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilecektir. NiCo_2O_4 filmlerinin yapısal ve morfolojik özellikleri,

taramalı elektron mikroskobu, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi ve x-ışını kırınımı kullanılarak incelenecektir. Optik özellikler, UV/Vis spektroskopisi kullanılarak optik bant aralığı, geçirgenlik ve soğurma değerler gibi parametrelere odaklanılarak araştırılacaktır. Daha sonra, termal buharlaştırma yoluyla Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyot yapısı üretilen cihazların elektriksel ve optik özellikleri, akım-gerilim, kapasitans-gerilim ve foto akım-zaman ölçümleri kullanılarak karanlık ve farklı aydınlatma koşulları altında kapsamlı bir şekilde incelenecektir. Diyot parametreleri, ideal diyot davranışından sapmaları anlamak için termiyonik emisyon ve Norde teoremi modeli kullanılarak analiz edilecektir. Ek olarak, NiCo₂O₄ tabanlı Schottky diyotların fotovoltaiik özellikleri, güç dönüştürme verimliliği ve foto akım üretim mekanizmaları hakkında bilgi edinmek için araştırılacaktır. Farklı alttaşlar üzerinde büyütülen NiCo₂O₄ ince filmlerinin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerinin sistematik olarak incelenmesi, Schottky bariyer oluşumu, yük taşıma mekanizmaları ve optoelektronik performansları hakkında derin bir anlayış sağlayacaktır. Bu araştırmadan elde edilen bulgular, gelişmiş optoelektronik cihazlar, özellikle de yüksek verimli güneş pilleri ve hassas fotodedektörler geliştirmek için NiCo₂O₄ tabanlı Schottky diyotların potansiyel uygulamalarına ışık tutacaktır.

2. TEORİK BİLGİ

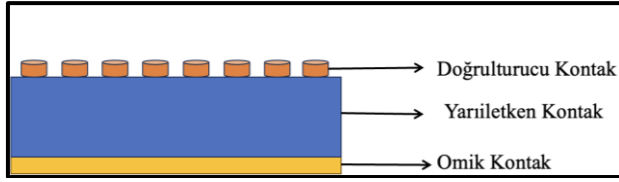
2.1. Metal/Yarıiletken Schottky Diyot

Diyotlar, özellikle akımın tek yönlü iletilmesini sağlayan yarı iletken bileşenler olarak elektronik devrelerde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bileşenler, n-tipi ve p-tipi yarı iletkenlerin birleşiminden meydana gelir ve bu yapı, akımın yalnızca doğru polarma durumunda geçmesine olanak tanır. Ters polarma durumunda ise yüksek bir direnç göstererek akım geçişini engellerler. Bu özellik, diyotların alternatif akımın doğrultulması ve sinyal işleme gibi pek çok elektronik uygulamada yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Ayrıca, LED (Işık Yayan Diyot), zener diyot ve Schottky diyot gibi farklı türleri ile güç düzenlemesi, aydınlatma, fotodedeksiyon ve hassas gerilim kontrolü gibi özel alanlarda da sıklıkla kullanılmaktadır.

Diyotların verimli çalışması, belirli teknik parametrelerle optimize edilir. Bu parametrelerin başında doğrultma faktörü, ideallik faktörü, seri direnç ve kaçak akım seviyesi gibi parametreler yer alır. İdeallik faktörü diyotun ideal bir doğrultucuya ne kadar yaklaştığını gösterir. Kaçak akımı düşük olan diyotlar, daha yüksek doğruluk sunar ve ters polarma durumunda yüksek direnç gösteren yapılar, diyot performansını artırır. Ayrıca, frekans aralığı ve ışık dalga boyu gibi çevresel etmenler, diyot ölçüm doğruluğu ve kararlılığında kritik öneme sahiptir. Bu parametreler, diyotların çeşitli uygulamalarda güvenilir sonuçlar sunmasını sağlar.

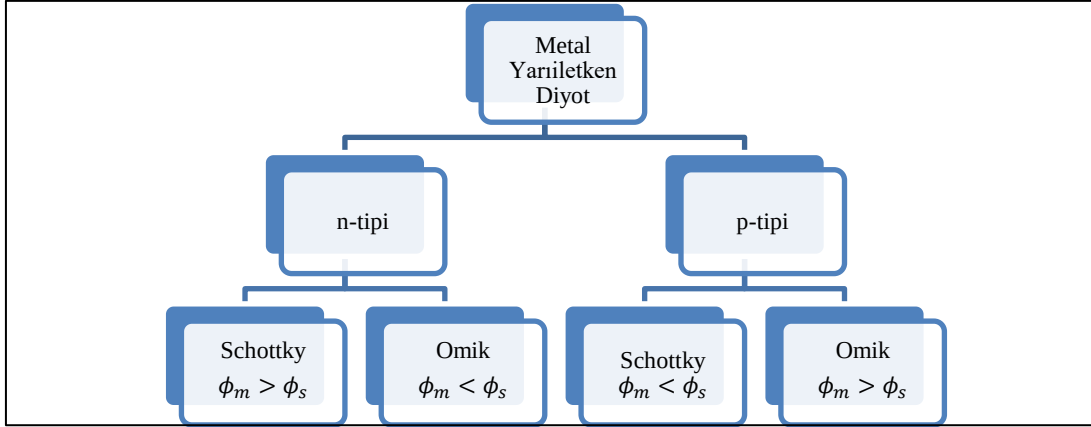
Metal/yarıiletken Schottky diyotlar ise Şekil 2.1’de de görüleceği gibi yarıiletken malzemenin yüzeyine bir metal temas ettiğinde oluşan bir tür diyot yapısıdır. Bu diyotun özellikleri arasında düşük bariyer yüksekliği, hızlı anahtarlama süresi, düşük termal gürültü seviyesi ve düşük gerilim kaybı gibi avantajlar yer almaktadır. Ayrıca, Schottky diyotların bir diğer önemli özelliği ise düşük gerilim uygulamalarında etkin bir şekilde çalışabilmesidir. Schottky diyotların bariyer yüksekliği, yüzeydeki elektrik alanının yarıiletken içerisindeki elektronları itmesi sonucunda meydana gelen yükseklik olarak tanımlanır. Bu bariyer yüksekliği, yarıiletken malzemenin türüne ve metalin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bununla birlikte, Schottky bariyer yüksekliğinin ideal durumu, bariyer yüksekliğinin sıcaklık, frekans, elektrik alanı bağlı olarak belirli değerlere yakınsaması olarak ifade edilir. Schottky diyotlarının elektriksel özellikleri ise, yarıiletken

malzemenin yapısı, metalin özellikleri ve temas hali gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, Schottky diyotları tasarlarken bu faktörleri dikkate almak çok önemlidir. Schottky diyotların performansını iyileştirmek için, uygulama alanına göre uygun bir metalin seçilmesi, doğru diyot boyutlarının belirlenmesi ve uygun bir termal tasarımın yapılması gerekmektedir. Bu şekilde, Schottky diyotların verimliliği artırılabilir ve istenilen elektriksel karakteristiklere sahip diyot yapıları elde edilebilir [29-31].



Şekil 2.1. Metal/Yarıiletken Schottky diyotun şematik görünümü

Schottky diyotlarda, metal ve yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı, temas yüzeyinde bir potansiyel bariyeri oluşturur. Bu bariyer, elektrik akımının sadece bir yönde kolayca akmasına izin verirken, diğer yönde direnç gösterir. Bu özellik, Schottky diyotları doğrultucu diyotlar gibi elektronik devre elemanlarında kullanım için ideal hale getirir. Doğrultucu kontaklar, alternatif akımı doğru akıma dönüştürmek için kullanılır ve güç kaynakları, sinyal işleme ve radyo frekansı uygulamaları gibi birçok alanda kritik öneme sahiptir. Omik kontaklarda ise, metal ve yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı minimum düzeydedir veya hiç yoktur. Bu durum, temas yüzeyinde neredeyse hiç potansiyel bariyeri oluşmamasına ve elektrik akımının her iki yönde de kolayca akmasına olanak tanır. Omik kontaklar, düşük dirençli bağlantılara ihtiyaç duyulan transistör, güneş pili, LED (Işık yayan diyot) gibi birçok elektronik cihazda kullanılır. Bu düşük direnç, cihazın verimliliğini artırır ve güç kaybını en aza indirir. Metal ve yarıiletken malzemelerin iş fonksiyonları, malzemelerin saflığı, kristal yapısı ve yüzey özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, istenen diyot türünü elde etmek için malzemelerin elektronik özelliklerini dikkatlice kontrol etmek ve ayarlamak mümkündür. Örneğin, yarıiletken malzemeye uygun katkı maddeleri ekleyerek veya yüzey işlemleri uygulayarak iş fonksiyonu değiştirilebilir ve böylece Schottky veya omik kontaklar oluşturulabilir. İş fonksiyonlarına göre oluşan omik kontak şeması da Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



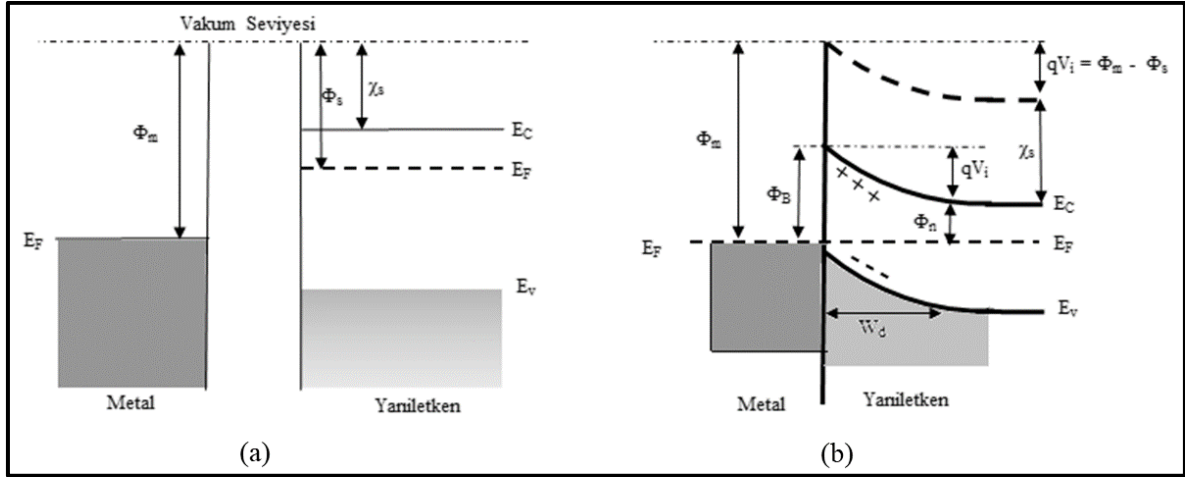
Şekil 2.2. Metal yarıiletken kontak türü şeması

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

2.1.1. Metal / n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Yarıiletken, metal ile kontak yapıldığında, metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olan yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar, yarıiletkenin Fermi seviyesiyle metalin Fermi seviyesi eşit olana kadar metale doğru akarlar.

Yarıiletkendeki elektronlar, metale geçtikleri için yarıiletkenin sınıra yakın bölgesinde serbest elektron yoğunluğunda bir düşüş meydana gelir. İletkenlik bant kenarı E_c ile Fermi seviyesi E_F arasındaki fark, azalan elektron konsantrasyonu ile birlikte artar ve termal denge durumunda E_F tamamen serbest kaldığı için iletkenlik ve valans bandı kenarı Şekil 2.3.b'de görüldüğü gibi kıvrılır. Metale geçen iletkenlik bandındaki elektronlar, pozitif yüklü verici (donör) iyonları geride bırakarak hareket ederler, bu nedenle yarıiletkenin metale yakın bölgelerinde hareketli yükler sona erer [32].



Şekil 2.3. Metal / n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak enerji diyagramı

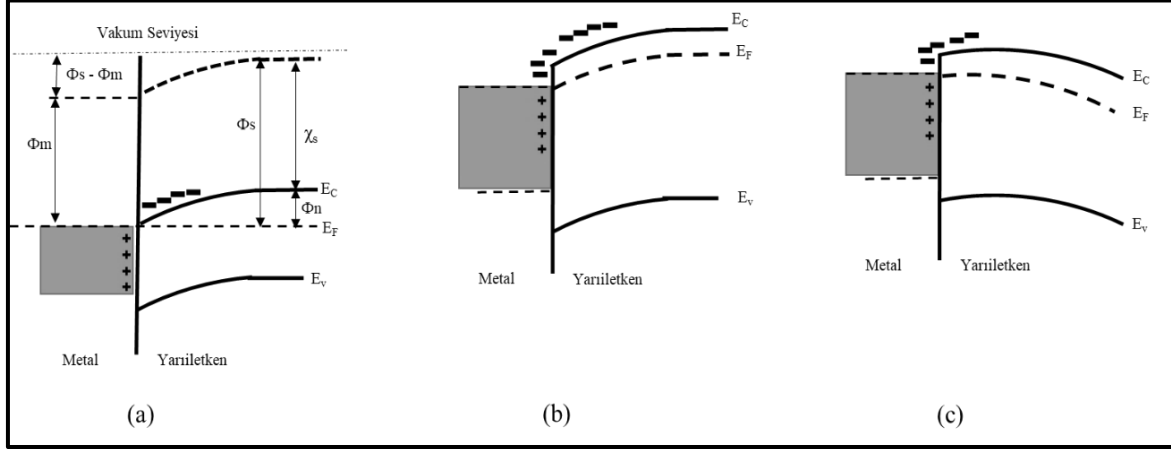
2.1.2. Metal / n-tipi yarıiletken omik kontaktlar

Bir n–tipi yarıiletken iş fonksiyonu Φ_s metalin iş fonksiyonu Φ_m ’den büyük olması durumunda ($\Phi_m < \Phi_s$) omik kontak oluşumu gözlenir. $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda bir n–tipi yarıiletken yapının omik kontakta enerji band durumları Şekil 2.4’de gösterilmektedir. Malzemeler kontak halinde değil iken enerji band diyagramı Şekil 2.4.a’da gösterilmektedir. Bir metal/n-tipi yarıiletken omik kontak yapıldıktan sonra elektronlar metalden yarıiletkenin üstüne, geride bıraktıkları pozitif bir yüzey yükü oluşacak şekilde akarlar ve diyot bölgesinin yarıiletken yüzeyi ise bir negatif yüzey yüküne sebep olurlar.

Termal dengeye gelindiğinde yarıiletkenin Fermi seviyesi düzeyi Şekil 2.4.b’de çizildiği gibi enerji seviyesi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükselir. Yarıiletkende negatif yüklerin artması ile oluşan bölge, Debye aralığı kadarlık bir kalınlık içinde sınırlanmış yüzey yükleridir. Metal içindeki elektronların yoğunluğu fazla olduğu için metal yüzeyindeki pozitif yükler, metal-yarıiletken arasındaki yaklaşık $0,5 \text{ \AA}$ bir uzaklık içinde sınırlanmış olan yüzeydeki yükleridir. Yarıiletken içinde oluşan bir tüketim bölgesi yoktur. Metalden yarıiletkene ya da tersi yönde elektronların akması için herhangi bir potansiyel engeli yoktur. Ara yüzey yakınındaki bölgede elektron yoğunluğu artırılır ve yapının en büyük dirençli bölgesi, yarıiletken bölgesinde meydana gelir.

Düz ve ters besleme durumunda yarıiletken Şekil 2.4.c, doğru ve ters besleme altında yarıiletkende oluşan durumlar görülmektedir. Bu durumda oluşacak akımın bölgenin direnci ile belirlenir ve uygulanan gerilimin yönünün etkisi yoktur. Böyle diyotlar, omik diyot olarak

isimlendirilir ve akımı çift yönlü iletir. Metale negatif, yarıiletkene pozitif bir gerilim uygulanırsa, metaldeki elektronlar yarıiletken tarafına kolayca geçerler bu nedenle omik diyotlara enjeksiyon diyotları ismi de verilir [32].



Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontak enerji band diyagramı

2.1.3. Schottky fotodedektörler

Schottky diyotlar, yüksek verimli fotodedektörler için de ideal bir yapı sunmaktadır. Fotodedektörler, elektromanyetik radyasyon veya parçacıklar tarafından oluşturulan optik sinyalleri algılayan cihazlardır. Gelen ışık veya parçacıkların enerjisini elektriksel sinyale dönüştürerek çalışırlar. Optik sistemlerde yaygın olarak kullanılan iki ana fotodedektör türü, termal dedektörler ve foton dedektörlerdir.

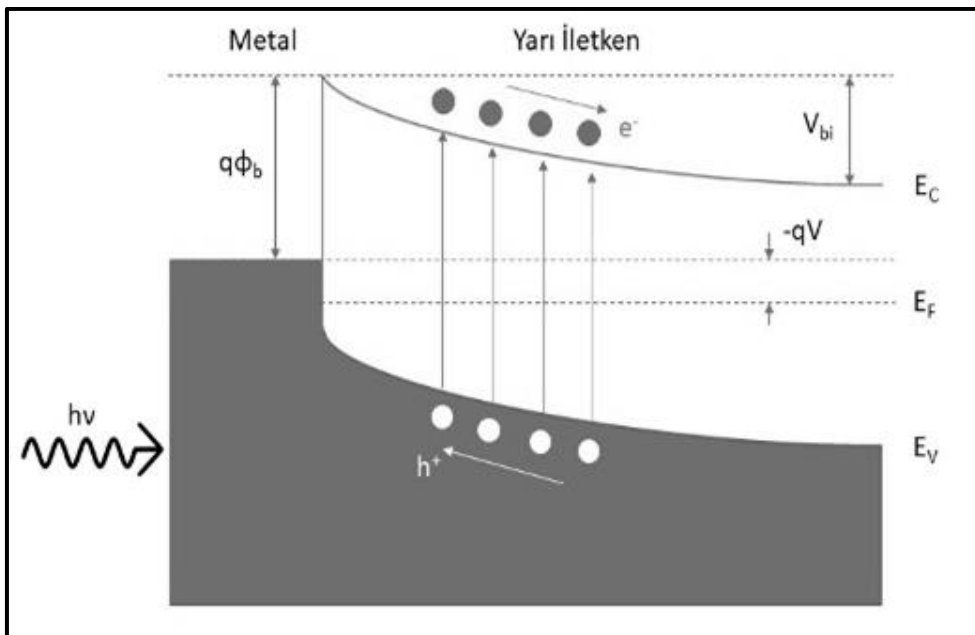
Termal Dedektörler: Işığın soğurulmasıyla dedektörün sıcaklığını artırarak çalışırlar. Sıcaklık değişimine bağlı olarak bazı parametrelerde değişimler gözlenir. Çıktıları genellikle birim zamanda soğurulan enerji miktarıyla orantılıdır ve ışığın dalga boyundan bağımsızdır.

Foton Dedektörler: Malzeme tarafından emilen fotonlar, elektronların enerji seviyelerinde değişikliklere neden olur. Bu değişim, elektronların enerji seviyelerinin değişmesiyle sonuçlanır ve elektrik sinyalleri olarak algılanır. Foton dedektörlerin çalışma prensibi, fotonların bir yarıiletken veya yalıtkan tarafından soğurulmasına dayanır. Bir yarıiletkende, enerjisi yarıiletkenin bant aralığından (E_g) büyük olan bir foton ($h\nu$) soğurulduğunda, fotonun enerjisi valans bandındaki bir elektrona aktarılır. Elektron, enerji olarak valans bandından iletkenlik bandına çıkar ve arkasında bir boşluk (elektron eksikliği) bırakır. Bu da , elektriksel bir sinyal olarak algılanır [33-39].

Şekil.2.5’deki gibi üzerine foton düşürülen bir Schottky diyot foton enerjisine ve uygulanan potansiyel farkı eğimine bağlı olarak, üç çalışma modu bulunmaktadır. Her bir mod, farklı uygulama alanlarında avantajlar sunar. Örneğin, fotoiletken modda çalışan Schottky diyotlar, yüksek hızlı optik anahtarlama ve algılama uygulamalarında tercih edilirken, fotovolttaik modda çalışanlar güneş pillerinde kullanılır. Bu modlar,

1. $E_g > h\nu > q_b$ ve $V < V_B$ için burada V_B engel aşma (çığ bozulma) gerilimidir ve metal içinde foto uyarımlı elektronlar engel potansiyelini aşabilir ve yarıiletken içinde toplanırlar. Bu işlem, metal yarıiletken diyotlarda engel yüksekliğini belirlemede ve metal filmde sıcak-elektron geçişinde kullanılır [1].
2. $h\nu > E_g$ ve $V < V_B$ için radyasyon, yarıiletkende boşluk-elektron çiftini üretir ve diyotun genel karakteristiği p-i-n fotodiyotuna benzer şekilde olur [1].
3. $h\nu > E_g$ ve $V > V_B$ için diyot, fotodiyot olarak çığ bozulma bölgesinde çalışabilir şekildedir.

Fotodiyotun çalışması, diyot eklemi içinde foto taşıyıcıların yer değiştirmesine dayanır [1]. Doğrultucu eklem ışık geldiği zaman, yeterli enerjiye ($h\nu > E_g$) sahip olan fotonlar soğrulur. Oluşan fazlalık elektronlar ve boşluklar difüzyon eklem alanı ile yayılır ve diyotun farklı taraflarında toplanırlar. Eğer diyot, dış yüke bağlanırsa soğrulan fotonların ve oluşan taşıyıcıların sayısıyla orantılı olarak bir akım oluşur.



Şekil 2.5. Üzerine foton düşürülen bir Schottky diyotun şematik gösterimi

2.1.4. Fotodiyotların akım-gerilim karakteristiği

Fotodiyotların akım-gerilim (I-V) karakteristiği diyot eklemesindeki akım taşıma mekanizmaları ile belirlenir. Farklı akım taşıma mekanizmaları metal-yarıiletken eklemleri (Schottky, MSM fotodiyot) ve p-n eklemlerine bağlı olarak meydana gelebilir. Fotodiyot un akım-gerilim karakteristiği şekil olarak normal bir diyotunkine benzemektedir. Şekil.2.6'da fotodiyodun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-gerilim karakteristiğini göstermektedir. Fotodiyotun duyarlı yüzeyine ışık düşmüyorsa fotodiyot üzerinden akan akım, termal yoldan azınlık taşıyıcılarıyla oluşan akımdır. Bu akıma karanlık akımı denir [1]. Şekil 2.6'daki A eğrisi fotodiyodun karanlık durumdaki, B ve C eğrileri ise fotodiyodun ışık altındaki akım-gerilim karakteristiğini göstermektedir. Şekil de görüldüğü gibi fotodiyot un karakteristiği dört bölgeden oluşmaktadır. Birinci (1) bölgede, akım ve gerilim değerleri pozitifdir. Bu bölgede fotodiyot doğru kutuplama yapmaktadır ve bu bölge fotodiyot uygulamaları için uygun değildir, çünkü bu bölgede çalıştırılan fotodiyot normal bir diyot gibi davranmaktadır. İkinci (2) bölgede fotodiyotun cevabı yoktur. Üçüncü (3) bölgede sadece çok küçük bir I_s akımı akar. Fotodiyotun aktif alanı üzerine gelen ışığın şiddeti artırıldığında bu bölgedeki eğriler bütünüyle, negatif akım yönünde aşağıya doğru değişecektir. $V=0$ ekseninde bu eğrilerin akım eksenini kestiği nokta kısa-devre akımı I_{sc} 'yi verir. Sıfır akım noktalarında eğrilerin gerilim eksenini kestiği noktalar ise açık-devre gerilimi V_{oc} 'yi verir [40-43].

Çok yüksek ters kutuplanma gerilimlerinde akım hızlıca artar ve diyotun bozulması söz konusu olabilir. Bu ters bozulma bölgesidir. Bu nedenle üçüncü (3) bölge, ters kutuplama gerilimin uygulandığı bölge olup ışığı algılamak için uygun olan bölgedir. Dördüncü (4) bölge ise fotodiyotun fotovoltaiik bölgesidir.

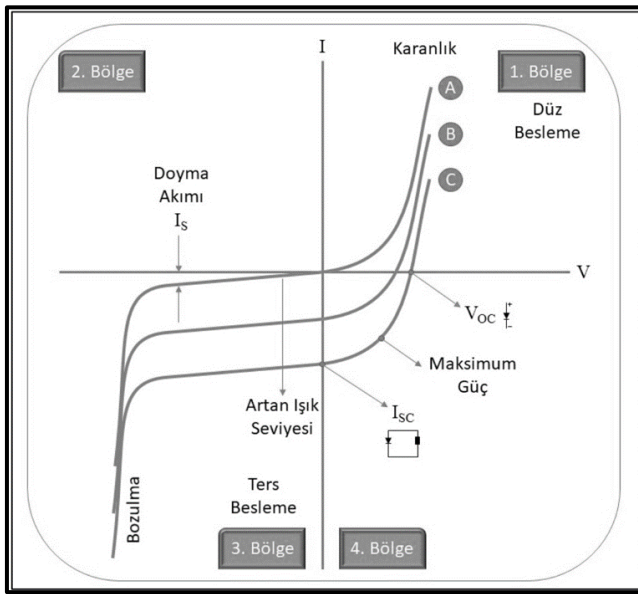
Fotodiyotlar üç ana karakteristiğe sahiptirler ki bunlar;

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

Bir fotodiyotun performansı bu üç karakterizasyon ile ölçülür. Düşük karanlık akımı ve yüksek bozulma gerilimi, diyot eklem niteliğinin iki göstergesidir. Düşük karanlık akımı,

daha yüksek duyarlılık anlamına gelir ve fotodiyota ışık uygulanmaksızın ters kutuplama altında diyot içinde akan akımdır [1].

Bir fotodiyota, yeterince yüksek ters kutuplama gerilimi uygulandığında diyot çığ bozulma bölgesinde çalışır [1]. Bu ters kutuplama geriliminin değeri bozulma gerilimine karşılık gelir ve fotodiyotun çalışması için uygulanabilen ters kutuplama gerilimi sınırını belirler. Bu değerden sonra, kazanç ve çarpma mekanizmaları diyotun çalışmasını gerçekleştirmeye başlar [1,33,42].



Şekil 2.6. Fotodiyotların akım-gerilim karakteristiği grafiği

2.1.5. Fotovoltaik sistem performans parametreleri

Fotodiyotların veya güneş pili hücrelerinin fotovoltaik sistem performansı çeşitli parametrelerin analizi ile yapılır. Bu parametreler de;

- Açık-devre gerilimi (V_{oc}),
- Kısa devre akımı (I_{sc}),
- Doldurma faktörü (FF),
- Maksimum güç noktasındaki gerilim (V_{max}),
- Maksimum güç noktasındaki akım (I_{max}),
- Maksimum çıkış gücü (P_{max}),
- Fotoduyarlılık(R) şeklindedir [44,45] .

Açık-devre gerilimi

Işık altında aydınlatılan diyotun akım-gerilim karakteristiğinde eğrinin gerilim eksenini kestiği değere açık-devre gerilimi (V_{oc}) denir ve akımın sıfır olduğu durumda belirlenir. Formülü de Eş. 2.1’de görülmektedir.

$$V_{oc} = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left[\left(\frac{I_{sc}}{I_s}\right) + 1\right]. \quad (2.1)$$

Kısa devre akımı

Kısa devre akımı (I_{sc}) çıkış, akımı olup uygulanan gerilim ile ideal durumda (R_s ve R_{sh} dirençlerinin etkileri yok olduğu zaman) aydınlatma altında oluşmaya başlar. Bu akım gelen foton sayısı ve aydınlanma şiddeti ile orantılıdır [1].

Doldurma faktörü

Doldurma faktörü, maksimum akım ile maksimum gerilim noktalarının oluşturduğu alanın, kısa devre akımı ve açık-devre gerilim değerinin noktalarının oluşturduğu alana oranıdır ve aşağıdaki Eş. 2.2’deki FF ile ifade edilir.

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.2)$$

Foto duyarlılık

Fotoduyarlılık (R), optik gücü oluşturan fotoakım ile ilgili bir parametredir. Bir fotodiyodun duyarlılığı, ışığa duyarlılığın bir ölçüsüdür. Fotoakımın (I_{ph}), verilen dalga boylarında fotodiyot yüzey üzerine düşen ışığın gücüne oranı olarak tanımlanır. Fotoduyarlılık, bir diğer ifadeyle Işık gücünün elektrik akıma dönüştürülme etkisinin bir ölçümü olup fotodiyot üzerine düşen ışığın dalga boyu ile bunun yanında sıcaklık ve uygulanan ters besleme gerilimi ile değişmektedir. Fotodiyotlar için duyarlılık da Eş 2.3’deki R ile ifade edilir.

$$R = I_{ph} / P_{ph}A \quad (2.3)$$

ifadesi ile verilir burada P_{ph} gelen ışığın şiddeti, A diyotun aydınlanma alanıdır.

2.2. Termiyonik Emisyon Teorisi

Bethe'nin 1942 yılında geliştirdiği Termiyonik emisyon teorisi (TE), elektronların yarıiletken ve metalden oluşan bir bağlantı noktası boyunca hareketini hassas bir şekilde modelleyen yarı klasik bir çerçeve oluşturmaktadır. Termiyonik emisyon teorisi, sıcak bir yüzeyden elektronlar veya taşıyıcıların yayınlanmasıyla ilgili bir teoridir. Bu mekanizma, metal yarıiletken doğrultucu diyotlarda, yeterince termal enerji kazanan taşıyıcıların engelleri aşarak birbirleri üzerinden geçmesi olarak bilinir. Elektronlarda bu mekanizma, metal/n-tipi yarıiletken yapılarda,deşiklerde ise metal/p-tipi yarıiletken yapılarda gerçekleşir. Termiyonik Emisyon Teorisi, potansiyel engelin yüksekliğinin kT/q enerjisinden daha büyük olduğu, taşıyıcı çarpışmalarının Schottky bölgesinde olmadığı, potansiyel engelin şeklinin önemsiz olduğunu ve görüntü kuvvetlerinin etkisinin ihmal edildiği varsayımlara dayanmaktadır. Bu teori, geniş çaplı araştırmalara dayanarak pratik uygulamalarıyla doğrulanmıştır. Termiyonik emisyonun çeşitli alanlardaki uygulamaları ve potansiyel kullanım alanları, bu teorinin önemini ve değerini göstermektedir. Termiyonik emisyonun temel prensiplerinin anlaşılması ve kullanılması, birçok endüstriyel alanda teknolojik ilerlemeleri mümkün kılmaktadır. Elektronların hızları x -yönünde v_x 'tir. Bu nedenle yarıiletken elektronlarının x yönündeki hız bileşeni $v_x + \Delta v_x$ arasında olan elektronların yoğunluğu ile ilgili verilen detaylar, teoriyi desteklemektedir. Bu yoğunluk, elektronların kütlesine, yarıiletken malzemesinin özelliklerine ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilir. Ayrıca, termiyonik emisyonun yarıiletkenlerin üretiminde, güneş pillerinin performansında ve elektronik cihazlardaki enerji verimliliğinin artırılmasında potansiyel kullanım alanları vardır [1,32,46-47]. Elektronların yoğunluğu da Eş.2.4'deki ifade edilir ;

$$dn_x = N_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{m_n^* v^2}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} dv_x \quad (2.4)$$

Eş.2.4'deki bu eşitlikte, k Boltzman sabiti, m_n^* elektronun etkin kütlesi, N_d verici atomların yoğunluğu ve T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Bu durumda yarıiletkene bir gerilim verildiği zaman elektronların yarıiletkenenden metale doğru geçen olan akımın yoğunluğu, hızları Eş.2.5'deki gibi

$$\frac{1}{2} m_x^* v_x^2 > qV_d \quad (2.5)$$

Şartını sağlayan elektronların birim zamanda birim yüzeyden geçen sayısının e ile çarpımı;

$$\begin{aligned}
 J_{S \rightarrow M} &= \int_{v_{ox}}^{\infty} dV_x dn_x = \int_{v_{ox}}^{\infty} dN_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} v_x \exp \left(-\frac{m_n^* v^2}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} dv_x \\
 &= qN_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{m_n^* v_{ox}^2}{2kT} \right) = qN_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{qV_d}{2kt} \right)
 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Eş.2.5'deki gibi ifade edilir. Burada $v_x = \left(\frac{2qV_d}{m_n^*} \right)^{\frac{1}{2}}$ olup taşıyıcının, qV_d potansiyel engelini geçmesi için sahip olması gereken minimum hızdır. İletkenlik bandının alt kenarı sıfır enerji seviyesi olarak alınırsa, katkı atomların birim hacimdeki yoğunluğu;

$$N_C = \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{E_f}{kT} \right) \quad \text{ve} \quad N_V = \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(\frac{E_f}{kT} \right) \quad (2.6)$$

eşitliği ile verilir [41]. Bulmuş olduğumuz N_C ve N_V eşitlikleri, Eş. 2.5 de yerine konulursa

$$J_{S \rightarrow M} = \left(\frac{4\pi q m_n^* k^2 T^2}{h^3} \exp \left(-\frac{qV_d}{kT} + \frac{E_f}{kT} \right) \right) \quad (2.7)$$

Eş.2.7'deki sonuc elde edilir. Metal tarafından yarıiletkenlik bandının kenarına göre görülen potansiyel engel yüksekliği Eş.2.8'deki gibidir.

$$q\Phi_B = qV_d + E_f \quad (2.8)$$

$$A^* = \frac{4\pi q m_n^* k^2 T^2}{h^3} \quad (2.9)$$

A^* Richardson sabitidir. Yarıiletkenden metale doğru olan doyma akım yoğunluğunu bulmak için,

$$J_{S \rightarrow M} = A^* T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_B}{kT} \right) \quad (2.10)$$

2.10 eşitliği ile elde edilir. Schottky kontağı metal/n-tipi yarıiletken doğru beslemde iken engel yüksekliği azalmasından dolayı, akım yoğunluğu sonuçları $\exp(eV/kT)$ çarpanıyla orantılı olarak artacaktır. Buradan yarıiletkenden metale doğru geçen akım yoğunluğu,

$$J_{S \rightarrow M} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.11)$$

şekline dönüşmüştür. Yarıiletken den metale ve metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunlukları termal denge durumunda, eşit olur. Bu nedenle Eş.2.11'deki toplam akım yoğunluğu;

$$J_{S \rightarrow M} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

şeklinde olacaktır. Sızıntı akımı olarak da adlandırılan doyma akım yoğunluğu, Eş.2.12'de köşeli parantez önündeki tüm ifade ile verilir.

2.3. Norde Yöntemi

Schottky diyotlarının en önemli fiziksel parametreleri olan engel yüksekliği (Φ_B), ideallik faktörü (n) ve seri direnç (R_s) değerlerini hesaplamak için bilinen geleneksel metot, deneysel akım-gerilim (I-V) kullanmaktır. Bazı durumlarda (R_s) çok büyük ve ara yüzey durumları belirli bir seviyede yüksek ise I-V karakteristikleri de ideal durumdan sapmalar gösterir. Böyle durumlarda hesaplamalar karışık bir hale gelmekte ve hesaplanan temel parametrelerin güvenilirliği azalmaktadır. Son zamanlarda bu durum için Norde tarafından sunulan metot, ideal olmayan Schottky diyotlara da hesaplama yapmaya olanak sunduğunu göstermiştir. Uyarlanmış Norde fonksiyonları kullanılarak potansiyel engel yüksekliği, ideallik faktörü ve seri direnç değerleri gibi parametreler hesaplanmıştır. Norde fonksiyonu $F(V)$ engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini elde etmek için kullanılmıştır. $F(V)$ fonksiyonu, Schottky diyotunun engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini hesaplamak için kullanılan bir matematiksel fonksiyondur. Bu fonksiyon, diyotun çalışma prensibine bağlı olarak diyotun akım-gerilim karakteristiklerini açıklamak için kullanılır. Norde fonksiyonu, diyotun yapısına ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu fonksiyonun kullanımıyla, Schottky diyotlarının özelliklerini belirlemek ve optimize etmek mümkün hale gelir. İdeal olmayan Schottky diyotlarda da Norde fonksiyonu kullanılarak hesaplama yapılabilir. Norde fonksiyonu, Schottky diyotunun özelliklerini tanımlamak için kullanılan kritik bir araçtır. Diyotun karakteristiklerini doğru bir şekilde hesaplamak ve analiz etmek için bu fonksiyonun kullanılması önemlidir. Bu metot, Schottky diyotların çeşitli uygulamalarda daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu nedenle, Norde fonksiyonunun ve onunla yapılan hesaplamaların önemi yadsınamaz. Schottky diyotlarının

performansını iyileştirmek için Norde fonksiyonu kullanılabilir ve diyotun engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini belirlemek için kullanılabilir. Bu, diyotların daha hassas ve optimize edilmiş bir şekilde tasarlanmasına yardımcı olur ve uygulamalarında daha iyi bir performans sunar [48,49]. Norde yöntemi de $F(V)$ Norde fonksiyonu ile Eş 2.13'de verilmektedir.

$$F(V) = \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (2.13)$$

Burada $I(V)$, I-V eğrisinden hesaplanan akımdır ve γ n'den daha büyük boyutsuz bir tamsayıdır.

Diyotun engel yüksekliği değeri Eş 2.14'teki gibi açıklanabilir (Norde fonksiyonu kullanılarak)

$$\Phi_B = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (2.14)$$

Burada $F(V_{min})$, V_{min} minimum gerilim de $F(V)$ 'nin sahip olduğu değerdir.

Gerilim düşmesinin sebebi yüksek gerilim bölgelerinde bütün sıcaklıklarda ideal olmayan davranış olarak açıklanmıştır (seri direnç bölgesinde). Gerçek diyotlar için ($n>1$) seri direnç Eş 2.15'de tanımlanır,

$$R_s = \frac{(\gamma-n)kT}{qI_{min}} \quad (2.15)$$

Burada I_{min} , $F(V)$ fonksiyonunun minimum değer sergilediği yerde V_{min} gerilimide düz beslem gerilim değeridir.

2.4. Yarıiletken Ara Yüzey Durumları

Metal/yarıiletken doğrultucu diyotlarda diyot parametrelerini etkileyen bir diğer önemli unsur, ara yüzey tabakasıdır. Bu tabaka, metal ile yarıiletken arasında bulunan bir organik veya yalıtkan katmandır. Metal/yalıtkan/yarıiletken yapıya dönüştürülerek, metal ile yarıiletkenin doğrudan temasını engeller ve yük geçişlerinin kontrolünü sağlar. Ayrıca, daha

yüksek elektrik iletkenliği, sızıntı akımlarının azalması ve akım iletim mekanizmalarının kontrol edilmesi gibi avantajlar da sunar. Metal/yarıiletken yapılarında, ara yüzey tabakasının büyüklüğü sırasında oluşan tuzak bölgeleri, hareketli iyonlar ve ara yüzey yükleri gibi faktörler, yapıların özelliklerini değiştiren etkilere sahiptir. Bu durum, yapının ideale yakın özelliklerinden sapmasına neden olabilir. Termal denge durumunda, metal /yarıiletken diyotların arayüzey durumlarına bağlı olarak kalite faktörü eşitliği aşağıdaki Eş 2.16'da verilmiştir [50].

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{w_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (2.16)$$

n-tipi yarıiletkenlerde arayüzey durumlarının enerjisi ise (E_{ss}) ile iletkenlik bandı (E_c) Eş 2.17'deki gibidir.

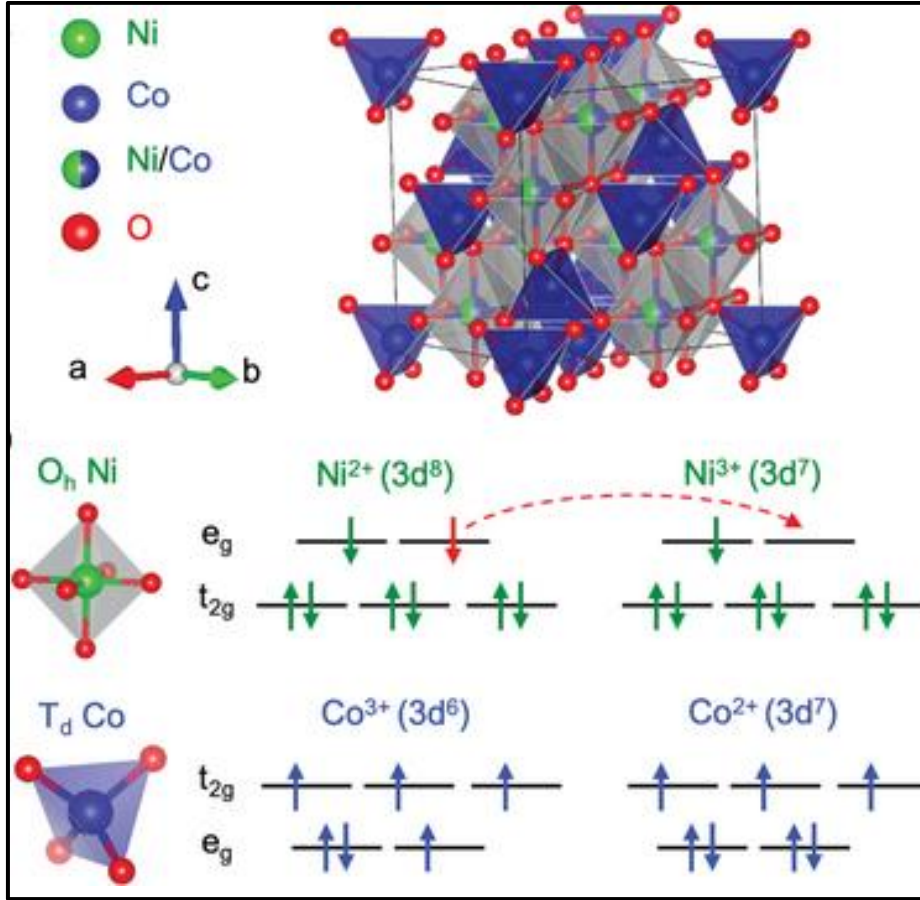
$$E_c - E_{ss} = q [\Phi_e - V] \quad (2.17)$$

Metal ile yarıiletkenin arasına oluşturulan arayüzey tabakası arayüzey durumlarının enerji bandı arasındaki dağılımına ve yoğunluğunda etki göstermektedir.

2.5. NiCo₂O₄ Özellikleri

AB₂O₄ genel formülüyle gösterilen spinel bileşikler, doğal minerallerde ve sentetik malzemelerde yaygın olarak bulunan önemli bir oksit sınıfını temsil eder. Bu bileşiklerin kristal yapısı, birim hücre içinde 32 oksijen anyonunun oluşturduğu yüz merkezli kübik (fcc) bir kafes üzerine kuruludur. Bu kafes içindeki boşluklar, A ve B olarak adlandırılan iki farklı katyon tarafından doldurulur. A katyonları genellikle 2+ yüklü metal iyonlarıdır ve tetrahedral boşluklarda yer alırken, B katyonları genellikle 3+ yüklü metal iyonlarıdır ve oktahedral boşluklarda bulunurlar. Spinel bileşiklerin bu özgün kristal yapısı, manyetik, elektronik, optik ve katalitik özellikler gibi çeşitli fonksiyonel özelliklere yol açar. Bu nedenle, spinel bileşikler, pil elektrotlarından manyetik malzemelere, pigmentlerden katalizörlere kadar geniş bir uygulama yelpazesinde potansiyel göstermektedir.

Spinel ailesinin önemli bir üyesi olarak kabul edilen NiCo₂O₄, nikel (Ni²⁺) ve kobalt (Co³⁺) katyonlarının tetrahedral ve oktahedral boşluklarda farklı kombinasyonlarda yer aldığı karmaşık bir yapıya sahiptir. NiCo₂O₄ kristal yapısı da Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7. NiCo₂O₄ kristal yapısı [51]

Bu özel katyon dağılımı, NiCo₂O₄'e son derece yüksek düzeyde elektriksel iletkenlik sağlar ve aynı zamanda iyi bir elektrokimyasal performans sergiler. Ayrıca, bu katyon dağılımı, NiCo₂O₄'ün katalitik aktivite ve manyetik özellikler kazanmasına da yardımcı olur. Tüm bu özellikler bir araya geldiğinde, NiCo₂O₄, enerji depolama sistemleri (örneğin lityum iyon piller ve süperkapasitörler), elektrokimyasal sensörler, yakıt hücreleri ve çevresel katalizörler gibi çok çeşitli uygulama alanlarında umut verici bir malzeme haline gelir. NiCo₂O₄'ün özellikle yüksek teorik kapasitesi ve döngü kararlılığı, lityum iyon piller için ideal bir anot malzemesi olarak dikkat çeker. Ayrıca NiCo₂O₄'ün optik bant aralığı, farklı sentez yöntemleri ve koşullarına bağlı olarak ayarlanabilir, bu da onu optoelektronik uygulamalar için potansiyel bir aday yapar. NiCo₂O₄'ün yüksek kırılma indisi ve dielektrik sabiti, onu optik kaplamalar, güneş hücreleri ve optoelektronik cihazlar gibi çeşitli optik uygulamaları için önemli kılmaktadır [9-21].

NiCo₂O₄'e ait bazı özelliklerini gösteren özet de Çizelge 2.1'de bulunmaktadır.

Çizelge 2.1. NiCo₂O₄ özellikleri

Özellikleri	
Kristal Yapı	Spinel
Yoğunluk (g/cm ³)	6,15
Bağıl Dielektrik sabiti	11.9
Termal iletkenlik (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	~100
Molekül ağırlığı (g)	240.5574
Manyetik Özellikler	Ferromanyetik

3. MATERYAL VE METOT

Tez çalışmasının bu bölümünde üretim ve karakterizasyon için kullanılacak sistemler açıklanacaktır. Sonrasında NiCo_2O_4 ince film yapısının ve $\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ Schottky diyotun üretim aşamaları ve parametreleri sunulacaktır. NiCo_2O_4 ince film yapısının Co_3O_4 (kobalt oksit) çekirdek tabakası üzerinde büyütülmüştür. Bunun için öncelikle n-tipi Si ve cam ve FTO (flor katkılı kalay oksit) alt taş yüzeyleri üzerine döndürerek kaplama tekniği Co_3O_4 tabakası oluşturulmuştur. Çekirdek tabakanın üzerinde NiCo_2O_4 (nikel kobaltit) ince film büyütülmüştür. $\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ Schottky yapıli diyot cam ve FTO üzerinde NiCo_2O_4 üretilmiştir. Schottky yapıli diyot yapıli ve ince film kaplamalarla da yapısal, morfolojik, elektriksel ve optik özellikler karakterize edilmiştir.

NiCo_2O_4 yapıli ve diyot üretimi için de öncü malzeme olarak aşağıdaki ürünler kullanılmıştır;

- Nikel asetat tetrahidrat ($\text{C}_4\text{H}_6\text{NiO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – Central Drug House, Yeni Delhi, Hindistan, %98),
- Kobalt asetat tetrahidrat ($\text{C}_4\text{H}_6\text{CoO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – Alfa Aesar, Massachusetts, Amerika Birleşik Devletleri, %98),
- Etanol ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$ – Isolab Chemicals, Wertheim, Almanya, %99,9),
- Ultra saf su (UPDW – Elga Purelab Classic UVF, Celle, Almanya)
- n-tipi Si (100) kristali, 525 μm kalınlığa ve 1-20 $\Omega\text{-cm}$ dirence sahip özelliklerdedir.

3.1. Deneyisel Üretim ve Karakterizasyonda Kullanılan Yöntem ve Sistemler

3.1.1. Sol-jel yöntemi

Sol-jel yöntemi, genellikle inorganik ve organik bileşiklerin sentezlenmesinde kullanılan bir kimyasal işlemdir. Bu yöntem, kolayca kontrol edilebilen nano yapıların oluşturulmasına olanak tanır. Ayrıca, yüksek yüzey alanına sahip malzemelerin üretiminde sıklıkla tercih edilir. Sol-jel yönteminin uygulama alanları oldukça geniştir ve malzeme bilimi, nanoteknoloji, kimya ve biyoloji gibi çeşitli disiplinlerde kullanılır. Sol-jel yönteminin temel prensiplerinden biri, solun kolloidal yapıda olmasıdır. Bu, moleküler ölçekte homojen bir dağılım sağlar. Ayrıca, sol-jel işlemleri genellikle düşük sıcaklıklarda gerçekleşir, bu da termal

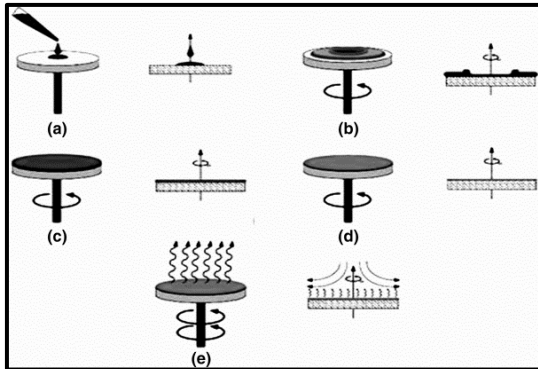
enerjinin düşük maliyetli olmasını sağlar. Bu yöntem ince film oluşturma ve nano boyutlu malzemelerin sentezlenmesi gibi çeşitli uygulamalar için de uygun bir seçenektir [52-54].

3.1.2. Döndürmeli kaplama yöntemi

Döndürmeli kaplama, malzeme yüzeylerine ince film katmanları biriktirmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve çeşitli endüstriyel ve araştırma alanlarında kapsamlı uygulamalar bulmaktadır. Döndürmeli kaplama işleminin altında yatan temel prensip, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle bir kaplama çözeltisinin hedef yüzey üzerinde eşit dağılımını içerir. Bu kuvvet, biriktirilen filmin eşit şekilde yayılmasını ve kalınlık kontrolünü sağlamada kritik bir rol oynar.

Döndürmeli kaplama yöntemi Şekil 3.1’de gösterildiği gibi biriktirme, döndürme, sabit hızda eğirme ve buharlaştırma aşamalarından oluşur. Biriktirme aşaması sırasında, kaplama çözeltisi hedef yüzeye dağıtılır. Döndürme aşaması, alt tabakanın istenen dönüş hızına kadar hızlandırılmasını içerir ve çözeltinin yüzey boyunca eşit olarak dağılmasını sağlar. Sabit hızlı eğirme aşaması, merkezkaç kuvvetinin sıvı inceltme davranışına hâkim olduğu ve tek tip bir ince film tabakasının oluşmasına yol açtığı aşamadır. Son olarak, buharlaştırma aşaması, çözücünün buharlaştığı nihai film kalınlığını belirlemede baskın faktör haline geldiği aşamadır.

Döndürmeli kaplama yönteminin etkinliği büyük ölçüde santrifüj kuvvetinin hassas kontrolüne ve yönetimine bağlıdır. Çizgiler veya kenar etkileri gibi istenmeyen kusurlara yol açmadan kaplama çözeltisinin yüzey boyunca eşit şekilde dağılmasını sağlamak için santrifüj kuvveti dikkatlice dengelenmelidir [55-57].



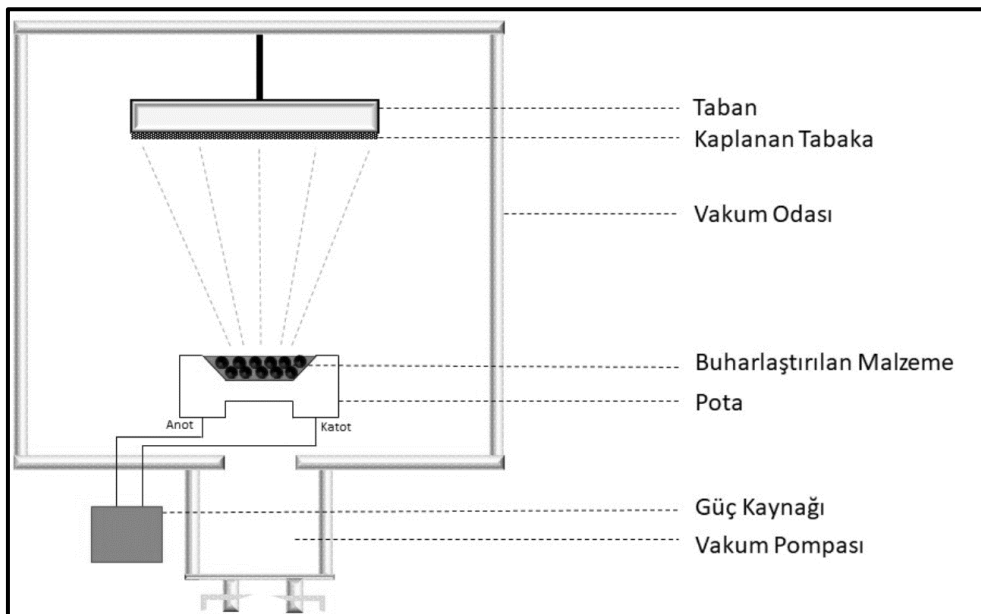
Şekil 3.1. Döndürmeli kaplama yöntemi

3.1.3. Termal buharlaştırma sistemi

Termal buharlaştırma sistemi, biriktirme parametreleri üzerinde hassas kontrol ile yüksek kaliteli, tek tip filmler üretme kabiliyeti sayesinde ince film kaplama endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir biriktirme tekniğidir. Bu işlem, bir kaynak malzemenin buharlaşana kadar ısıtılmasını ve ardından buharın bir alt tabaka üzerinde yoğunlaşarak ince bir film oluşturmaya izin verilmesini içerir. Termal buharlaştırma sistemine ait şematik gösterimde Şekil 3.2’de gösterilmektedir.

Termal buharlaştırmanın en önemli avantajlarından biri, metaller, seramikler ve hatta bazı organik bileşikler de dahil olmak üzere çok çeşitli malzemeleri biriktirme yeteneğidir. Bu esneklik, her biri belirli uygulamalara göre uyarlanmış çeşitli kaplamaların üretilmesine olanak tanır. Termal buharlaştırmada tipik olarak kullanılan yüksek vakum koşulları da kontaminasyonu en aza indirmeye yardımcı olarak biriktirilen filmlerin saflığını sağlar.

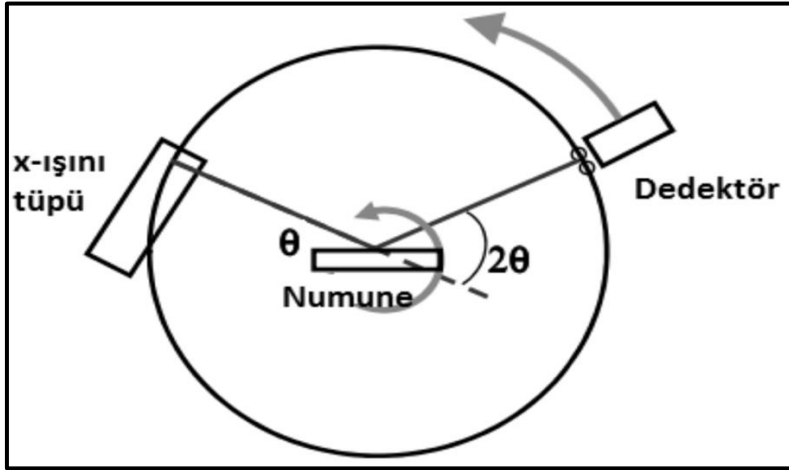
Termal buharlaştırma özellikle tek tip, geniş alanlı kaplamaların biriktirilmesi için çok uygundur. Kaynak sıcaklığı, biriktirme hızı ve alt tabaka konumlandırma gibi parametreleri dikkatlice kontrol ederek, araştırmacılar biriktirilen filmlerin kalınlığı ve morfolojisi üzerinde mükemmel kontrol elde edebilirler. Bu kontrol seviyesi, optik kaplamalar, elektronik cihazlar ve koruyucu bariyerlerin üretimi gibi birçok uygulamada kritik öneme sahiptir [58-59].



Şekil 3.2. Termal buharlaştırma sistemi şematik gösterimi

3.1.4. X ışınları Kırınımı Tekniği

X-ışını kırınımı tekniği, çeşitli malzemelerin kristal yapılarının ve atomik düzenlemelerinin analizi için malzeme bilimi, kimya ve jeolojide yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. X-ışını kırınımının arkasındaki temel ilke, gelen x-ışınları ile malzemenin kristal yapısı içindeki atomların periyodik düzenlemesi arasındaki etkileşimdir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi monokromatik bir x-ışını demeti bir numuneye yönlendirildiğinde, x-ışınları atomlar tarafından saçılır ve ortaya çıkan kırınım desenleri malzemenin kristal yapısını karakterize etmek için kullanılabilir. Kırınım desenlerindeki pik yoğunlukları, kafes içindeki atomların dağılımı tarafından belirlenir ve x-ışını kırınım desenini malzemenin periyodik atomik düzenlemesinin benzersiz bir “parmak izi” haline getirir [60,62].



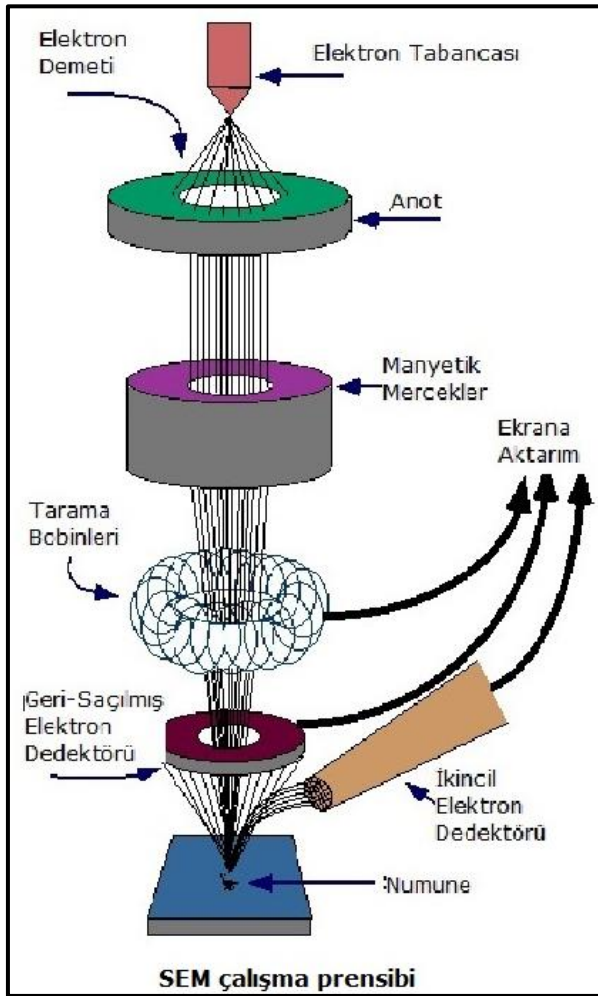
Şekil 3.3. X-ışını kırınımı tekniği şematik gösterimi

3.1.5. Taramalı elektron mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobu, yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek ve numunelerin yapısını nano ölçek düzeyinde incelemek için güçlü bir araçtır. Bu teknik, bir numunenin yüzeyini taramak için odaklanmış bir elektron demeti kullanır ve elde edilen sinyaller ayrıntılı topografik bilgi üretmek için kullanılır.

Taramalı elektron mikroskobunun temel ilkeleri arasında yüksek çözünürlük, geniş alan görüntüleme ve derinlik analizi yer alır. Taramalı elektron mikroskobunun ana bileşenleri bir elektron kaynağı, elektromanyetik lensler, bir tarama sistemi ve bir dedektördür.

Elektronlar yüksek gerilim kullanılarak yüksek hızlara çıkarılır ve numune yüzeyine odaklanır. Elektron ışını numuneyi tarar ve üretilen sinyaller algılanır ve yüzeyin ayrıntılı bir görüntüsünü oluşturmak için kullanılır. Tipik olarak bir katot ışını elektron tabancası olan elektron kaynağı, elektronları üretir ve hızlandırır. Elektromanyetik lensler elektron ışınını numuneye odaklayarak yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağlar. Bu sayede, numunenin yüzeyi ayrıntılı bir şekilde taranır ve detaylı görüntüler elde edilir. Şematik olarak da taramalı elektron mikroskobu Şekil 3.4’de verilmiştir [63,64].

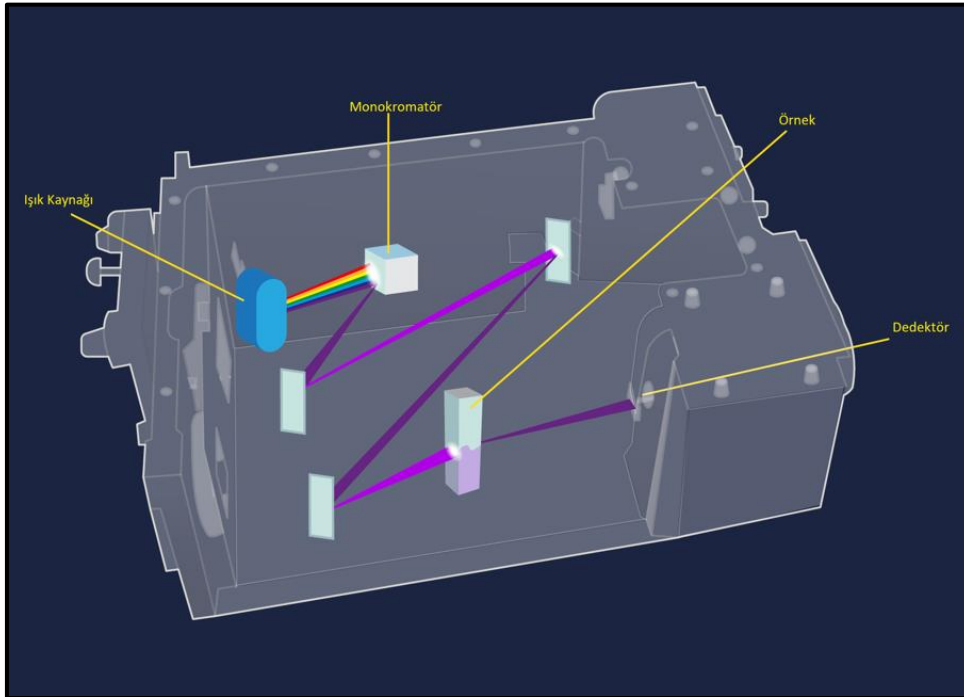


Şekil 3.4. Taramalı elektron mikroskobu şematik gösterimi

3.1.6. UV/Vis Spektrometresi

UV-Vis spektrometresi, ultraviyole (UV) ve görünür (Vis) ışık bölgesindeki elektromanyetik radyasyonun emilim veya yansıma özelliklerini inceleyen bir cihazdır. Bu spektrometreler, örneğin bir maddenin kimyasal bağları, geçiş metal komplekslerinin karakterizasyonu, organik bileşiklerin yapısal analizi gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

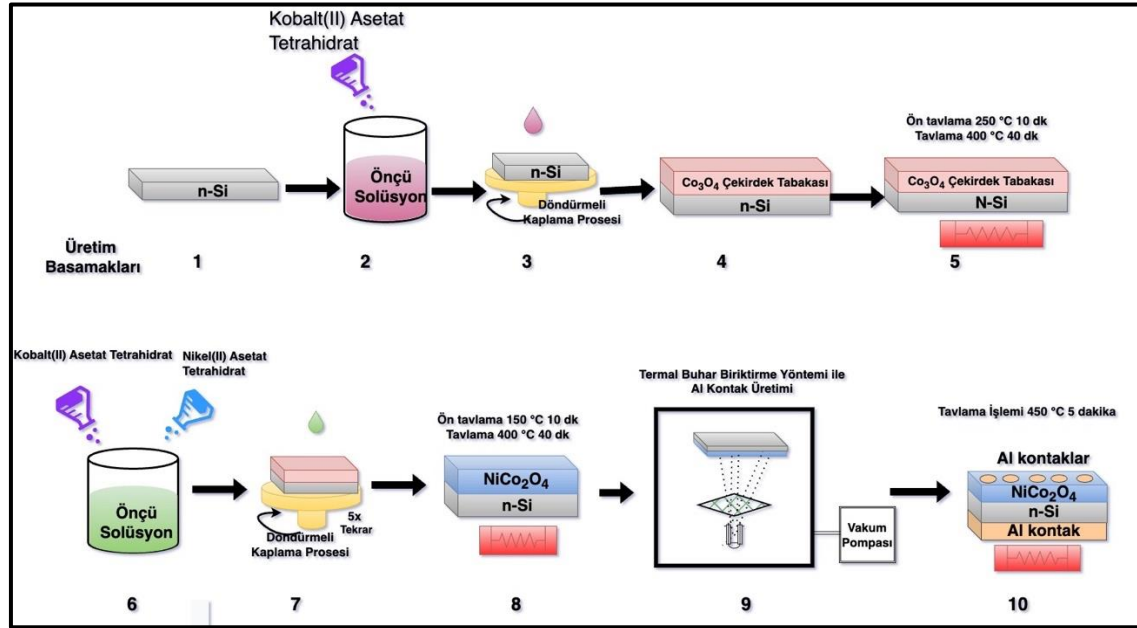
UV-Vis spektrometresinin temel prensibi, maddenin ışık Emilimi veya geçirgenliği ile ilgilidir. Bu spektrometre, numunenin çeşitli dalga boylarındaki ışığı nasıl emdiğini veya geçirdiğini belirlemek için kullanılır. Numunenin emdiği veya geçirdiği ışığın miktarı, numunenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi verir. Ayrıca, spektrometre, numunenin çözünürlüğünü, konsantrasyonunu ve reaksiyon kinetiğini de belirlemek için kullanılır. Spektrometrenin çalışma mekanizması, numunenin ışığı emme veya geçirgenliği ile ilgili ölçümler yaparak analiz yapmaya dayanır. UV-Vis spektrometresi, elektromanyetik spektrumun morötesi, görünür bölge ve yakın kızılötesi (NIR) bölge boyunca fotonların soğrulma miktarını ölçmek için kullanılan bir tekniktir. Bu bölgede gelen foton madde ile etkileşime girdiğinde molekülleri düşük enerjili bir temel durumdan uyarılmış bir duruma geçirir. Burada fotonların bir kısmı optik olarak soğrulur, bir kısmı yansır ve bir kısmı ise madde içinden geçebilir. Şekil 3.5’de görüldüğü gibi UV-Vis spektrometresi genellikle dört temel bileşenden oluşur. Bunlar ışık kaynağı, algılayıcı dedektör, numune tutucu ve monokromatördür. Işık kaynağından gönderilen fotonlar numuneden geçer ve dedektör aracılığıyla elektrik sinyaline dönüştürülerek bilgisayar sistemine aktarılır. Böylece malzemenin optik spektrumları elde edilir. Bu spektrometre ile herhangi bir malzemenin UV-Vis-NIR bölgesindeki fotonları geçirmesi (T), soğurması (A) ve yansıtması (R) gibi özellikleri analiz edilir. [65-66].



Şekil 3.5. UV-Vis Spektroskopisi şematik gösterimi

3.2. NiCo_2O_4 İnce Film ve $\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si}/\text{Al}$ Schottky Diyot Üretimi

$\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si}/\text{Al}$ Schottky diyot yapısı ve NiCo_2O_4 ince film kaplamalı cam, FTO ve n tipi Si yüzeyler oluşturulurken aşağıdaki süreçler izlenmiştir. Bütün bu süreçleri gösteren özet şematikte Şekil 3.6'da verilmiş olup ince film ve diyot üretim basamaklarının açıklamaları ardından verilmiştir.



Şekil 3.6. $\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si}/\text{Al}$ Schottky diyot deneysel üretim şematik görseli

Bu çalışmada öncelikli olarak elmas kesici bıçak yardımı n tipi Si, FTO alt taşlar kesildikten sonra kirlilikleri ve organik tabakaları temizlik için aşağıdaki işleme tabi tutulmuştur. Kaplamadan önce n-Si üzerindeki kirlilikler ve oksit tabakaların temizlenmesi için standart temizleme yöntemi uygulanmıştır. Alttaşlar için öncelikle kloroform, aseton ve etil alkol ile sırasıyla 5 dakika ultrasonik temizlik yapıldıktan sonra RCA1 ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_3$; 6:1:1) ve RCA2 ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$; 6:1:1) solüsyonlarından geçirildikten sonra HF ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$;10:1) solüsyonunda 60 saniye bekletilmiştir. Daha sonra deiyonize su ile asitten arındırılmış azot gazı ile kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Temizle işleminden sonra 10 ml metanol- CH_3OH , 0.627 g kobalt(II) asetat tetrahidrat- $\text{C}_4\text{H}_6\text{CoO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve 0.5 ml triethanol amin (TEA)- $\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$ çözeltisi manyetik karıştırıcıda yarım saat karıştırılarak çekirdek tabakanın için Resim 3.1'de gibi mor renkli bir solüsyon hazırlanmıştır.



Resim 3.1. Çekirdek tabaka solüsyonu

Daha sonra bu solüsyon döndürmeli kaplama tekniği ile n tipi Si, FTO ve cam alt taşlar üzerinde çekirdek tabaka olarak oluşturulmuştur. Döndürmeli kaplama işlemi 2000 rpm’de 30 saniye boyunca statik olarak yapılmıştır. Döndürmeli kaplama işlemi için de Resim 3.2’de gösterilen Fytronix marka FY 8000 spin coater cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.2. Döndürmeli kaplama cihazı

Döndürmeli kaplama işlemi ile oluşturulan çekirdek tabaka oluşturma işleminden sonra ön tavlama süreci için sıcak yüzey üzerinde 250 °C 10 dk. bekletilmiştir. Daha sonra tavlama işlemi içinde Resim 3.3’te gösterilen tüp fırın içerisinde 400 °C 40 dk. bekletilmiştir.



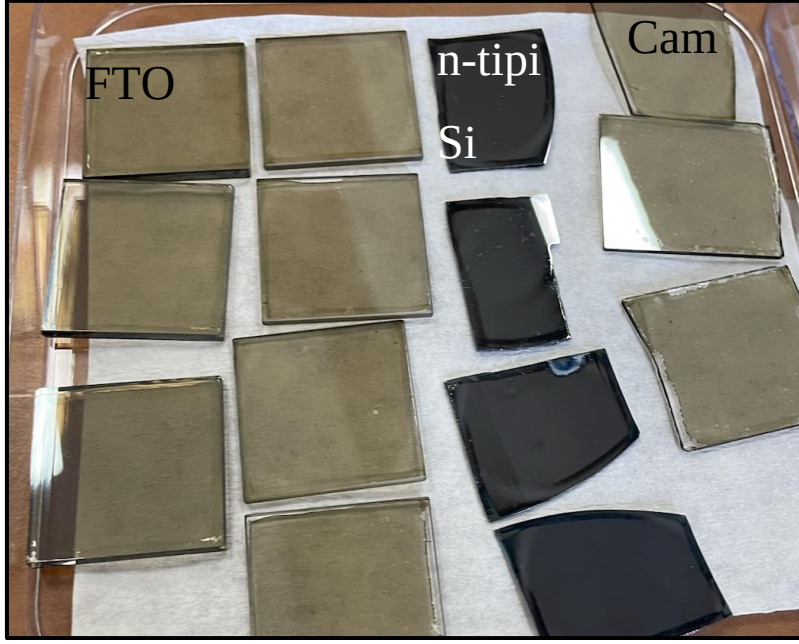
Resim 3.3. Tüp fırın görseli

Çekirdek tabaka oluşturulduktan sonra bu yüzeylere NiCo_2O_4 ince film oluşturmak içinde 60 ml USS 0,002 mol nikel(II) asetat tetra hidrat- $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve 0,004 mol g kobalt(II) asetat tetra hidrat- $\text{C}_4\text{H}_6\text{CoO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 15 dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılarak çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltinin görseli Resim 3.4’de gösterilmektedir.



Resim 3.4. NiCo_2O_4 kaplama çözeltisi

Çözelti oluşturulduktan sonra da yine döndürmeli kaplama tekniği ile çekirdek yüzey üzerine NiCo_2O_4 kaplanmıştır. Kaplama sonrasında sıcak yüzey üzerinde $150\text{ }^\circ\text{C}$ 10 dk. ön tavlama ve tüp fırın içerisinde $400\text{ }^\circ\text{C}$ 40 dk. tavlama işlemi tekrar yapılmıştır. Oluşturulan kaplamalı yüzeyler de Resim 3.5’te gösterilmektedir.



Resim 3.5. NiCo_2O_4 ile kaplanan n-tipi Si, FTO ve cam alt taş görselleri

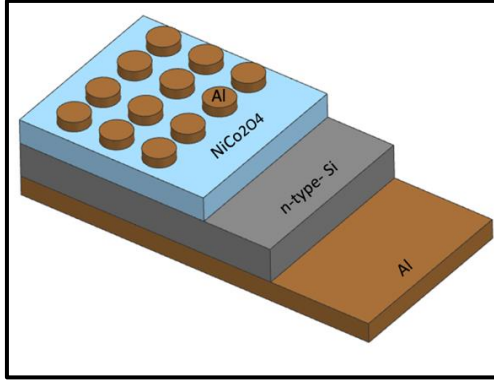
Resim 3.6’da gösterildiği gibi 5.10^{-5} Torr basınç altında termal buharlaştırma sistem ile Al omik kontak NiCo_2O_4 alt yüzeyine kaplanmıştır.



Resim 3.6. Termal kaplama cihazı

Daha sonrasında düşük öz dirençli omik kontak elde etmek için vakumlu fırın ile 450°C sıcaklığında yaklaşık 5 dakika termal işleme maruz bırakılmıştır.

Doğrultucu kontak oluşturmak için de yine yukarıdaki işleme benzer şekilde %99,99 saflıktaki alüminyum (Al) metali, $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si}$ üst yüzeyine kaplanmıştır. Doğrultucu kontak işlemi içinde 1.4 mm çapında delikleri olan paslanmaz çelik malzemeden yapılan maske NiCo_2O_4 üzerinde tutularak Al/ $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si}/\text{Al}$ Schottky diyot yapısı başarıyla elde edilmiştir. Al/ $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si}/\text{Al}$ Schottky diyot yapısının görseli Şekil 0.6'da görülmektedir.

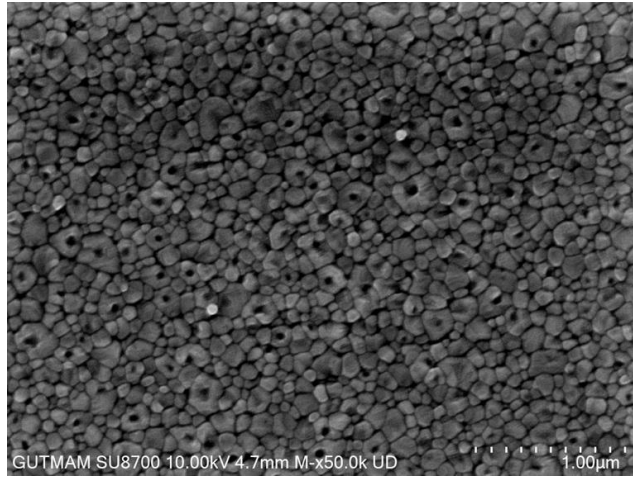


Şekil 3.7. Al/ $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si}/\text{Al}$ Schottky diyot yapısının şematik görünümü

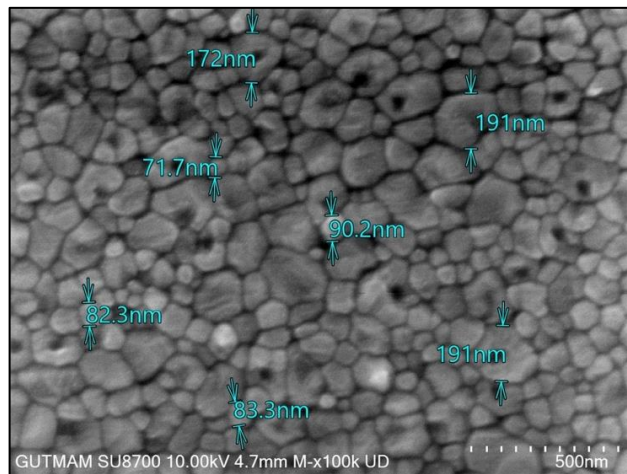
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. SEM ve EDS Analiz Sonuçları

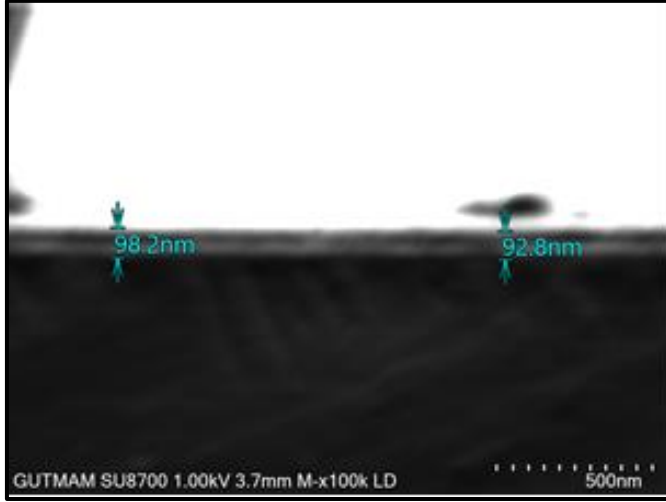
NiCo_2O_4 ince film yapısının SEM analizleri Gazi Üniversitesi Temel ve Mühendislik Bilimleri Merkez Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Field Emission Scanning Electron Microscope – Hitachi SU8700 SEM ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçümlerle yapısal ve morfolojik özellikler incelenmiştir 50k ve 100k büyütmeli görseller ve yanal kesit görüntüsü Resim 4.1,2 ve 3'te görülmektedir.



Resim 4.1. NiCo_2O_4 ince film yapısının 50k büyütmeli SEM görüntüsü



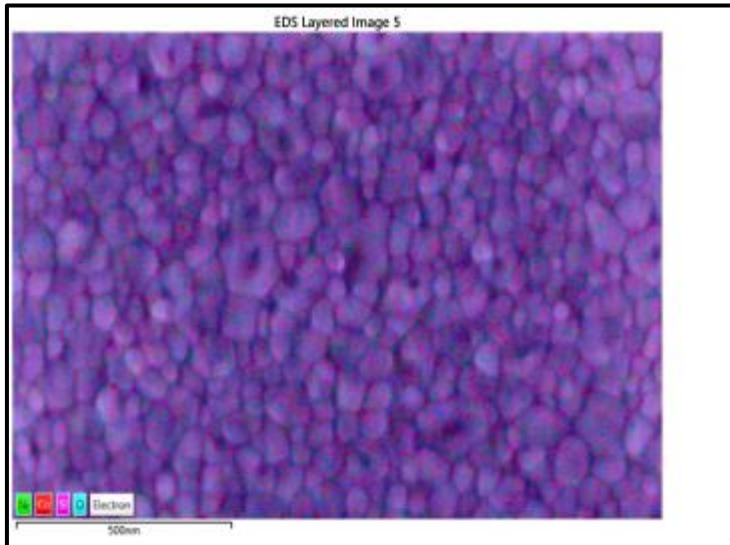
Resim 4.2. NiCo_2O_4 ince film yapısının 100k büyütmeli SEM görüntüsü



Resim 4.3. NiCo₂O₄ ince film yapısının yanal kesit SEM görüntüsü

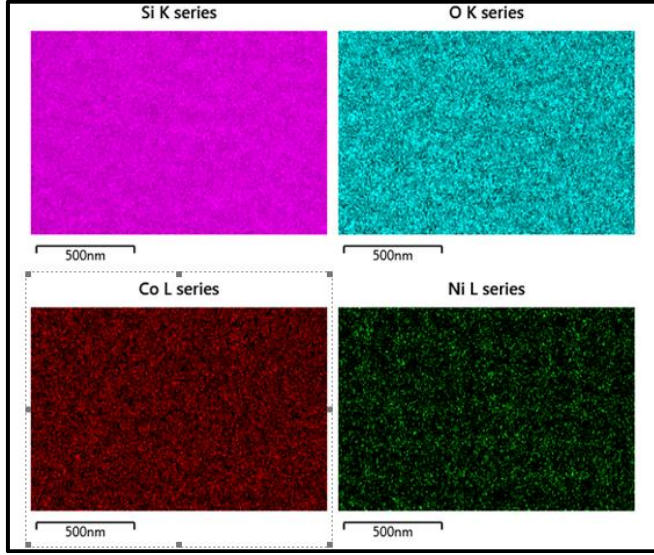
SEM analizleri incelendiğinden NiCo₂O₄ yapısının içi oyuk taneli bir şekilde yüzeyde rastgele bir dağılıma sahip bir şekilde oluştuğu gözlenmiştir. Taneli yapıların boyutunun 71.9 ile 191 nm arasında değişkenlik gösterdiği ve yanal kesit görselinden de görüleceği üzere yanal kesit kalınlığının 92.8 ile 98.2 nm aralığında bir kalınlığa sahip olduğu görülmüştür.

SEM analizlerinin yanı sıra yüzey morfolojisinin daha iyi bir şekilde belirlenmesi adına EDS analizleri de yapılmıştır. EDS analizlerine ait sonuçlar da Resim.4.4 ve Resim.4.5'te verilmektedir.



Resim 4.4. NiCo₂O₄ ince film yapısının EDS analizi görseli

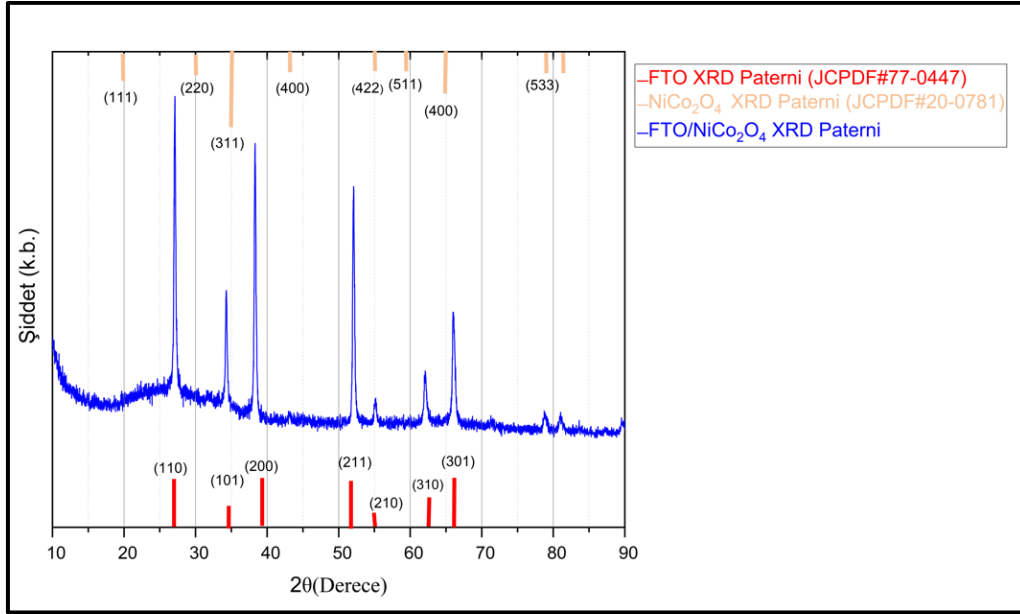
Resim.4.5’deki EDS analiz şekillerinden de görüleceği üzere Si alttaş üzerinde Ni Co ve O elementlerin yapıya homojen bir şekilde dağıldığı ve NiCo_2O_4 yapısına uygun olarak oksijen açısından zengin ve NiCo_2O_4 molekül yapısına uygun açısından bir kompozisyona sahip olduğu sonucu çıkarılmaktadır.



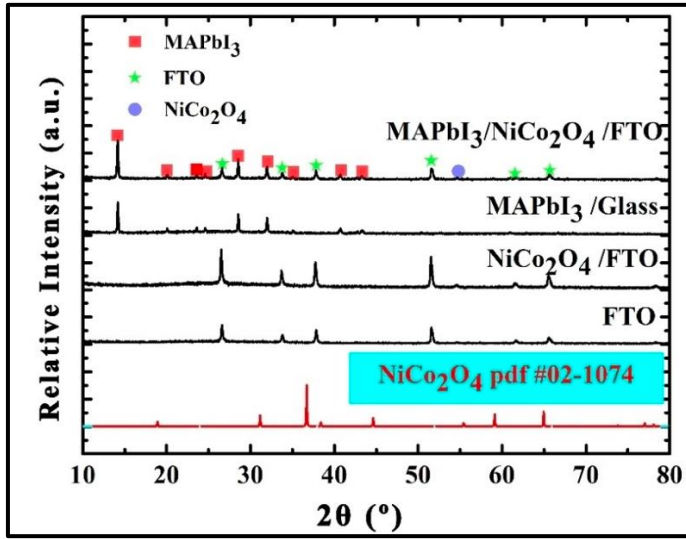
Resim 4.5. NiCo_2O_4 ince film yapısının elementel EDS analiz görseli

4.2. XRD Sonuçları

NiCo_2O_4 ince filmlerin XRD analizleri için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesinde bulunan Bruker D8 marka XRD analiz cihazı 2θ ; 10^0 - 90^0 aralığında $\text{Cu}/\text{K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak elde edilmiştir. FTO alt üzerinde büyütülen NiCo_2O_4 ince film yapısının numunen XRD kırınım ölçümleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir. XRD ölçümü incelendiğinde JCPDF#77-0447 x-ışını desenine uyan FTO ve JCPDF#20-0781 x-ışını desenine uyan NiCo_2O_4 piklerin oluştuğu görülmektedir. En baskın piklerin FTO tarafından geldiği gözlenmiştir. Buna rağmen NiCo_2O_4 ’nin de (311) gibi belirgin piki gözlenip, literatür ile de karşılaştırması yapıldığında da FTO üzerine büyütülen NiCo_2O_4 ince film yapısının XRD desenin de bizim çalışmamız benzer bir şekilde olduğu görülmüştür. Buna ait XRD görseli de aşağıdaki Şekil 4.2’de görülmektedir [67].



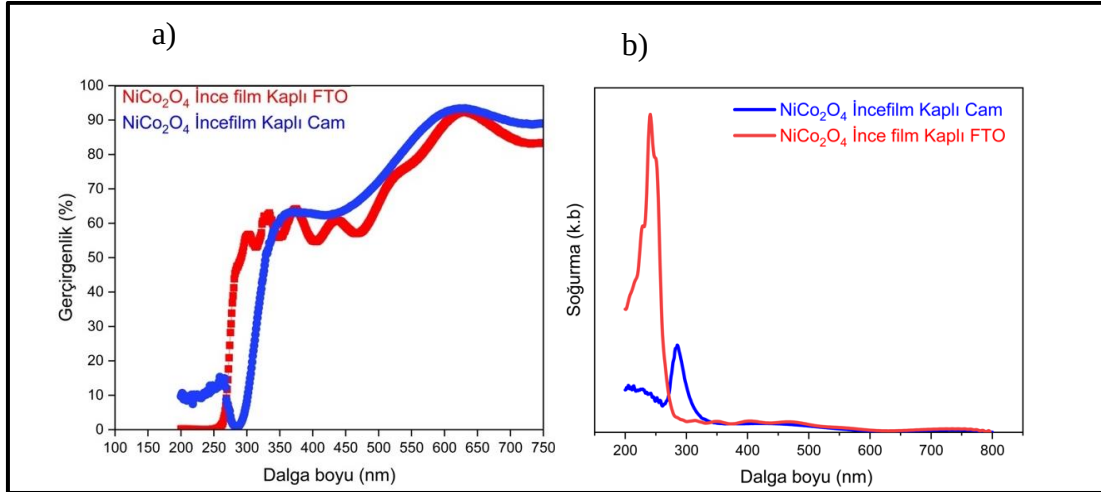
Şekil 4.1. FTO üzerine kaplanmış NiCo₂O₄ ince filmlerin XRD deseni



Şekil 4.2. Literatürde benzer görülen FTO üzerine kaplanmış NiCo₂O₄ ince film XRD deseni

4.3. UV/Vis

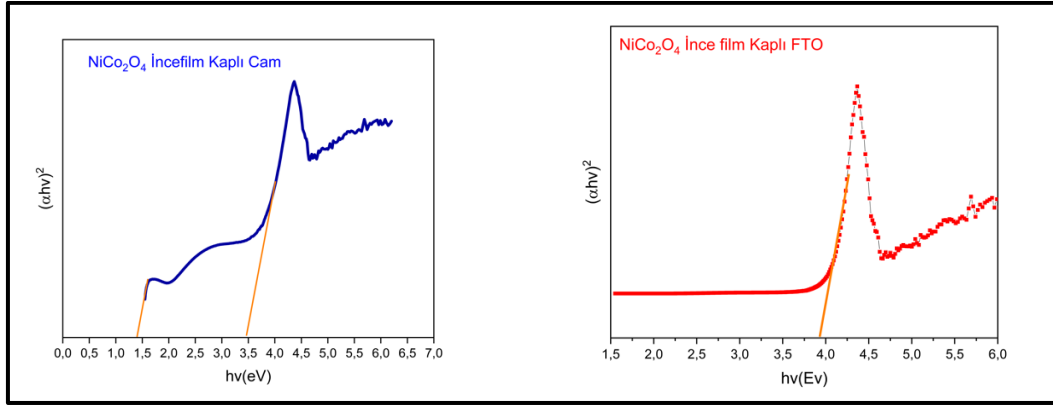
UV/Vis analiz ölçümleri Gazi Üniversitesi Kimya bölümünde bulunan Shimadzu markasının UV-1800 modeline ait UV/Vis spektroskopi cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizlerde FTO ve cam üzerine kaplanan NiCo₂O₄ ince filmlerin dalga boyuna bağlı soğurma ve geçirgenlik analizleri yapılmıştır. Bu analizlere ait görseller aşağıdaki Şekil 4.3’de sunulmuştur.



Şekil 4.3. FTO ve cam üzerine kaplanan NiCo₂O₄ ince filmlerin dalgaboyuna bağlı
a) Soğurma b) Geçirgenlik analizleri

Bu analizlerde filmlerin %60 üstünde 275 nm dalga boyundan 750 nm boyuna kadar UV'den VIS'a kadar geniş bir spektrumda geçirgenlik sağladığı görülmüştür. FTO'da 275 nm de başlayan %60 üzerindeki geçirgenliğin cam yüzeyde ise 330 nm de başladığı görülmüştür. Soğurma grafikleri incelendiğinde de FTO kaplı NiCo₂O₄ ince filmlerin 225 nm dalga boyunda cama göre çok yüksek bir oranda soğurduğu görülmüştür. Soğurulan bu dalga boyu özellikle güneş körü UV uygulamalar için uygun olabileceği değerlendirilmektedir.

Bunun yanında yarıiletken ve optik malzemelerin optik band aralığını elde etmek amacıyla sıklıkla Tauc yöntemi kullanılır. Malzemenin optik soğurma spektrumundan elde edilen $(\alpha h\nu)^n$ değerleri, foton enerjisi ($h\nu$) grafiğine göre çizilir. Burada α , soğurma katsayısı, h Planck sabiti ve ν ise frekanstır. n değeri, geçişin doğasına bağlı olarak 1/2, 2, 3/2 veya 3 olabilir. Elde edilen eğrinin doğrusal bölgesi, x eksenini ($h\nu$) kestiği nokta, malzemenin optik bant aralığına karşılık gelir [68,69]. FTO ve cam üzerindeki NiCo₂O₄ ince filmin optik band aralığı da Tauc yöntemiyle Şekil 4.4'ten hesaplanmıştır. Cam için 1,45 ve 3,5 eV iki değer, FTO içinde 3,9 eV bulunmuştur.



Şekil 4.4. NiCo_2O_4 ince filmlerin cam ve FTO üzerindeki Tauc yöntemine göre band aralığı analizleri

Litaratür incelendiğinde band aralığının filmin oluşturulduğu sıcaklığa, direk ve dolaylı geçişlere, kristal yapısına, yapı kusurlarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir. Litaratürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında ise 3,5 eV ve 3,9 eV direk geçişlere ait band geçişlerine 1,45 eV değerinin ise dolaylı geçişlere ait olabileceği değerlendirilmektedir [70].

4.4. Akım-Gerilim Karakteristikleri

Akım-gerilim elektriksel ölçümleri, Gazi Üniversitesi Süperiletkenlik ve Termal Analiz Laboratuvarında yapılmıştır. Akım-gerilim (I-V) ölçümleri -5 V ile +5 V aralığın da 0.01 V aralıklar ile Resim 4.6'da gösterilen Keithley 2400 ayarlanabilir akım kaynağı ünitesi kullanılarak ölçümler yapılmıştır. FYTRONIX 7000 Solar Simulator System cihazıyla da farklı ışık şiddetleri altında I-V ve $I-t$ ölçümleri yapılmıştır.



Resim 4.6. Keithley 2400 akım kaynağı ünitesi

Kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri alınırken ise Resim 4.7'de gösterilen Sourcetronic ST2826 empedans analizörü kullanılmıştır. Numune oda sıcaklığında 2 kHz ile 2 MHz aralığındaki frekans değerleri alınarak kapasitans değerleri incelenmiştir.



Resim 4.7. Sourcetronic ST2826 empedans analizörü

Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyot yapısının I-V verileri termiyonik emisyon teorisine göre analiz edilmiştir [20]. Bu teoriye göre akım ifadesi;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right]. \quad (4.1)$$

şeklinde verilmektedir.

Burada V diyot gerilimi, q elektron yüküdür, n ideallik faktörü, k Boltzmann sabitini ve T Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. Burada I₀ doyma akımı;

$$I_0 = AA^* n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (4.2)$$

$$\exp \left(- \frac{q \Phi_b}{kT} \right) \quad (4.3)$$

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (4.4)$$

eşitli ği ile tanımlanır. Kalite faktörü (n) ve engel yüksekli ği (Φ_b) ise;

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

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

Formüllerde geçen Richardson sabiti olan A* n-Si için 112 AK⁻² cm⁻², elektron yük değeri q 1,602×10⁻¹⁹ C, Boltzmann sabiti olan k 1,381 × 10⁻²³ J/K değeri olarak alınmıştır.

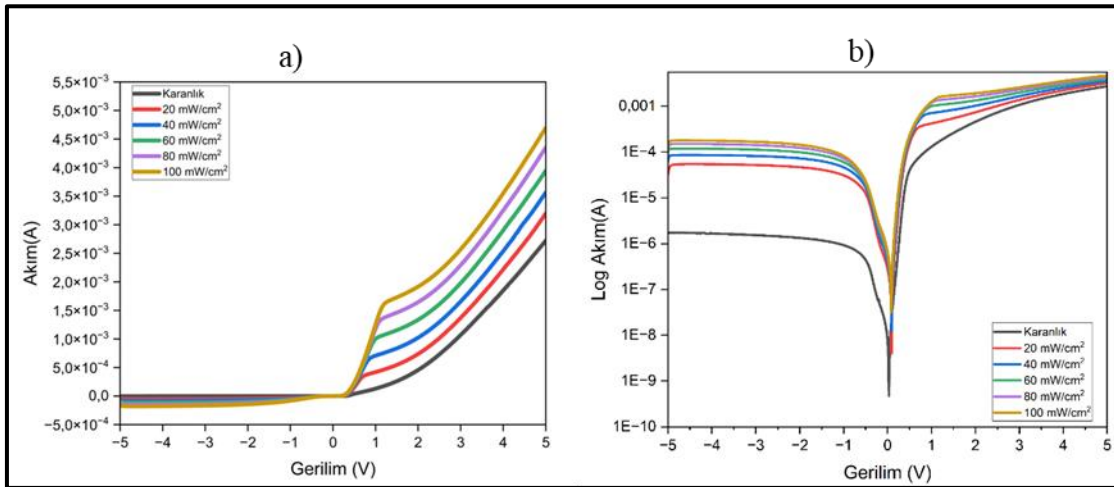
Üretilen diyotların doğrultma oranı (RR);

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

Eş. 4.7 ile hesaplanmaktadır. Burada I_F düz beslem akım değeri, I_R ise ters beslem akım değeridir.

Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotun farklı ışık şiddetine bağlı olarak I-V ve logI-V eğrileri Şekil 4.5'te verilmiştir. Alınan ölçümler oda sıcaklığında alınmıştır.

Işık şiddetine bağlı performansını incelemek için karanlık (0) ile 100 mW/cm² aralığında 20 mW/cm² adımlar ile 6 ışık şiddeti değeri için I-V ölçümü yapılmıştır. Diyot üzerine uygulanan gerilim -5 V ile +5 V aralığında 0,01 V adımlar ile veriler alınmıştır. Bu verilerden doyma akımı, ideallik faktörü, engel yüksekliği ve doğrultma oranı değerleri farklı ışık şiddetlerine göre hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotun farklı ışık şiddetine bağlı a) Akım-gerilim b) Log akım-gerilim grafiği

Bu eğrilerden faydalanarak TE teorisine göre $3kT/q$ (0,07 V) gerilim değerinden büyük lineer bölgeler tespit edilerek yukarıda belirtilmiş elektriksel diyot performans parametreleri olan doyma akımı Eş.4.2, kalite faktörü Eş.4.5 ve engel yüksekliği Eş.4.6 formülleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Schottky diyotunun farklı ışık şiddetine bağlı $\ln I$ - V eğrileri ile hesaplanan kalite faktörü, engel yüksekliği ve doğrultma oranı değerleri Çizelge 4.1 de verilmektedir. Çizelge 4.1'den görüldüğü üzere kalite faktörü 1,141 ile 1,414, engel yüksekliği 0,879 ile 0,806 eV ve $\pm 5V$ 'daki doğrultma oranları da 1573,1 ile 20,1 arasında bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun ışık şiddetine bağlı ideallik faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve doğrultma oranları (RR)

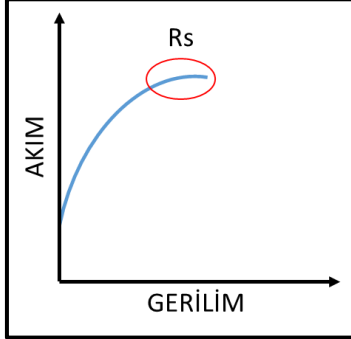
Işık Şiddeti (mW/cm ²)	İdeallik faktörü (n)	Engel yüksekliği (Φ_b)(eV)	RR ($\pm 5V$)
Karanlık	1,141	0,879	1573,1
20	1,250	0,852	100,8
40	1,329	0,833	58,2
60	1,369	0,821	42,7
80	1,394	0,812	21,8
100	1,414	0,806	20,1

Üretimi gerçekleştirilen Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotun ışık şiddetine bağlı olarak alınan I - V ölçümleri incelendiğinde, Schottky diyot yapısının ışık şiddeti ile duyarlılık gösterdiği ve fotodiyot özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir. Özellikle ışık şiddeti arttıkça ters polarma altında fotoakımın belirgin şekilde arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, diyotun fotodetektör olarak kullanılabilirliğini desteklemektedir. Ayrıca, ideallik faktörü (n) ve bariyer yüksekliği (Φ_b) gibi parametrelerin, ışık şiddetine bağlı olarak değişim gösterdiği görülmüştür. İdeallite faktörü (n), bir Schottky diyotun ne kadar ideal davrandığını gösteren önemli bir parametredir. İdeal bir Schottky diyot için bu faktör 1'e yakın olmalıdır. Ancak, gerçek diyotlar genellikle ideal olmaktan uzak oldukları için, idealite faktörü 1'den büyük olabilir ve bu da diyotun ideal olmayan davranışını yansıtır. İdeallik faktöründe farklı ışık şiddetlerinde 1,141 ve 1,414 arasında değişmesi diyot olarak iyi bir performans göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

4.5. Norde Fonksiyonları ve Seri Direnç Hesabı

Metal yarıiletken diyotlarda ideal elektriksel karakteristiğinden sağmasına neden olan faktörlerden birisi de seri direnç etkisidir. Seri direnç diyotlarda güç kaybına neden olmakta ve diyotun yapısına bağlılık göstermektedir ve metal yarıiletken doğrultucu diyotlarda, yarıiletken tarafında oluşan tüketme bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır [47]. Seri direnç etkisi fazla gerilim değerlerinde dominant olmaya başlar ve diyot akımının azalmasına neden olur. Şekil 4.6'de Schottky

diyotunda yüksek gerilim değerlerinde seri direncin etkisiyle diyot akımında bir azalma görülmektedir.



Şekil 4.6. Seri direncin I-V'ye etkisi

Norde fonksiyonu yardımı ile seri direnç değerleri ve engel yüksekliği değerleri hesaplanmıştır. Norde yöntemi $n=1$ durumu için engel yüksekliği ve seri direnci özgün bir $F(V)$ fonksiyonun yardımıyla elde etmeyi amaçlar. Bu parametreleri elde etmek için fonksiyonun minimum noktasından faydalanılır. $F(V)$ fonksiyonu aşağıda verilen Eş.4.8 ifade edilir.

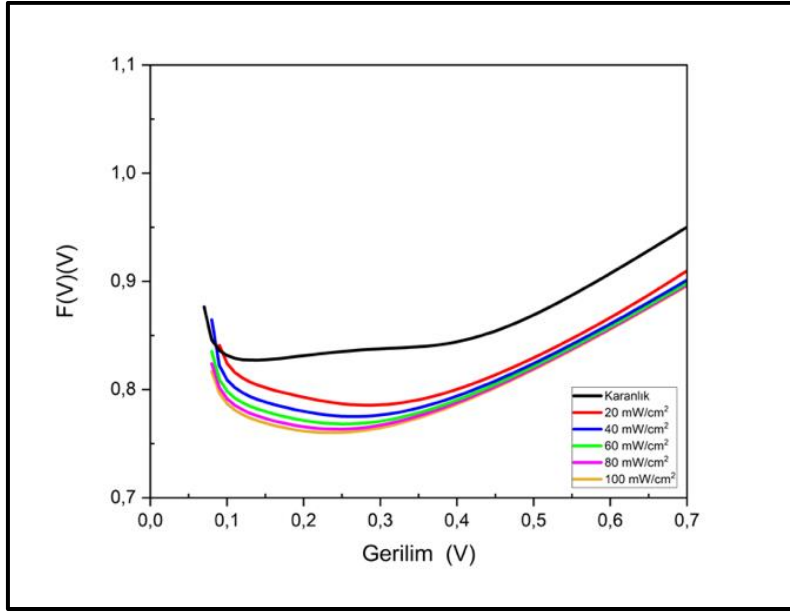
$$F(V) = \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (4.8)$$

Bu eşitlikte γ değeri ideallik değerinden büyük ilk tam sayı olarak değer almaktadır. V_0 ve $I(V)$ değerleri I-V eğrilerindeki değerlerini almaktadır. Seri direnç değeri ve engel yüksekliği için, Bu ifadeden ise Eş 4.9'daki engel yüksekliği ve Eş.4.10'deki seri direnç diyot parametreleri belirlenmektedir.

$$\Phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.9)$$

$$R_s = \frac{kT}{q} \frac{(\gamma-n)}{I_{min}} \quad (4.10)$$

Üretilen diyotun farklı ışık şiddetlerindeki $F(V)$ -V grafikleri çizilmiş ve Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Bu grafiklerden faydalanılarak $F(V)$ değerinin minimum noktaları tespit edilmiş, V_{min} ile I_{min} değerleri Eş. 4.9 ve Eş 4.10 kullanılarak engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.7. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun farklı ışık şiddetine bağlı F(V)-V grafiği

Şekil 4.7'deki F(V)-V eğrilerinden yararlanarak hesaplanan engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Çizelge 4.2'de verilmektedir.

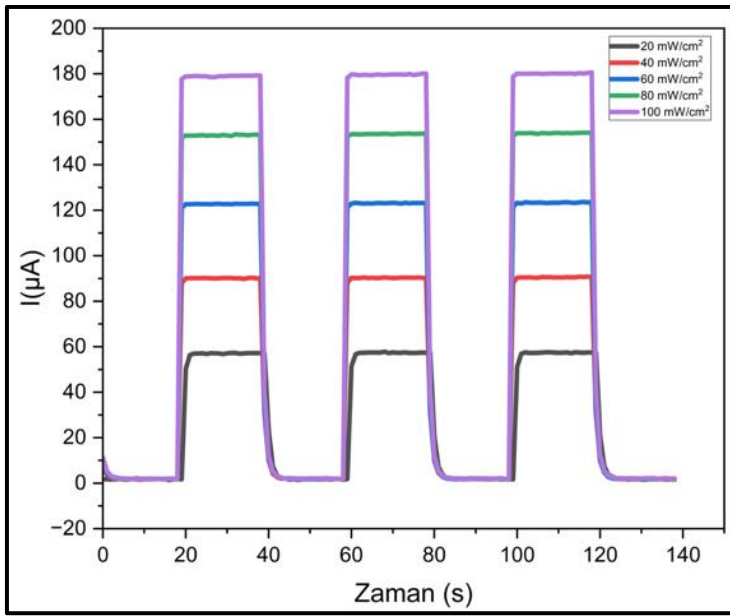
Çizelge 4.2. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun ışık şiddetine bağlı Norde fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	Engel yüksekliği (eV)	R _s (Ω)
Karanlık	0,86	1,60 x 10 ⁶
20	0,86	1,54 x 10 ³
40	0,83	1,11 x 10 ³
60	0,82	1,18 x 10 ³
80	0,81	941,00
100	0,80	979,21

Norde fonksiyonunda elde edilen engel yüksekliği sonuçlarının termiyonik emisyon teorisine göre elde edilen sonuçlarla tutarlı ve benzerlik göstermiştir. Bu sonuçlarda her iki yöntemin birbiri desteklemektedir. Işık şiddetinin artmasıyla engel yüksekliğinin düştüğü görülmektedir, diyot içerisindeki elektronların fotonlar tarafından uyarılır ve enerji kazandığı ve bu uyarılmış elektronların, metal-yarı iletken arayüzündeki bariyeri aşarak iletme katkıda bulunduğu ve ışık şiddetinin artmasına, daha fazla fotonun daha fazla elektronu uyararak iletkenlikte artışa yol açmasına neden olduğu ve engel yüksekliğinin düşmesine yol açabilmektedir.

4.6. Işık Şiddetine Bağlı Diyot Fotoakım- Zaman Karakteristikleri

Zamana bağlı fotoakım ölçümleri, diyotun taşıma mekanizmasını anlamak için kullanılan bir yöntemdir. Diyotun fotoakım ölçümleri farklı ışık şiddetleri için -2V'da 20s aralıklarla ışığın açılıp kapatılması şeklinde yapılmıştır. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyot unu fotoakım ölçümleri farklı aydınlatma şiddetlerinde 20s'lik aralıklarda 20-140s aralığında yapıldı. Bu süre içinde akımda değişim gözlenmedi. Şekil 4.8'te diyotun fotoakım zaman grafiği görülmektedir.



Şekil 4.8. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun farklı ışık şiddetlerinde akım zaman grafiği

Diyota ışık verildiğinde bir fotoakımın oluştuğu ışığın kapatılmasıyla fotoakımın da ilk durumuna geri döndüğü görüldü. Aynı zamanda artan ışık şiddetiyle fotoakımın da arttığı gözlemlendi. Şekil 4.8'deki verilerden yararlanarak, ışık şiddetine bağlı $I_{açma}/I_{kapama}$ değerleri Çizelge 4.3. gösterilmiştir. Bu sonuçların literatürle de uyumlu olduğu görüldü. Işık açık olduğu durumda diyotun fotoakımı, belirli bir seviyeye kadar aniden artar ve maksimum değere ulaştığında bu değerde hafif değişimlerle akım devam eder. Işık kapatıldıktan sonra fotoakım ilk durumuna geri döner. Diyotun bu davranışı üretilen diyotun bir fotoiletken davranış sergilediğini göstermektedir. Fotoakımdaki ilk artış, diyotun aydınlatılmasıyla daha fazla serbest yük taşıyıcısının üretildiğini gösterir. Literatür incelendiğinde ışık şiddetinin artmasıyla gerçekleşen bu artışa diyotun kusurların ve tuzak seviyelerinde sıkışıp kalan yük taşıyıcılarının etkili olduğu ifade edilmektedir [43-47].

Çizelge 4.3. Al/NiCo₂O₄ n-Si/Al Schottky diyotu ışık şiddetine bağlı $I_{açma}/I_{kapama}$ değerleri

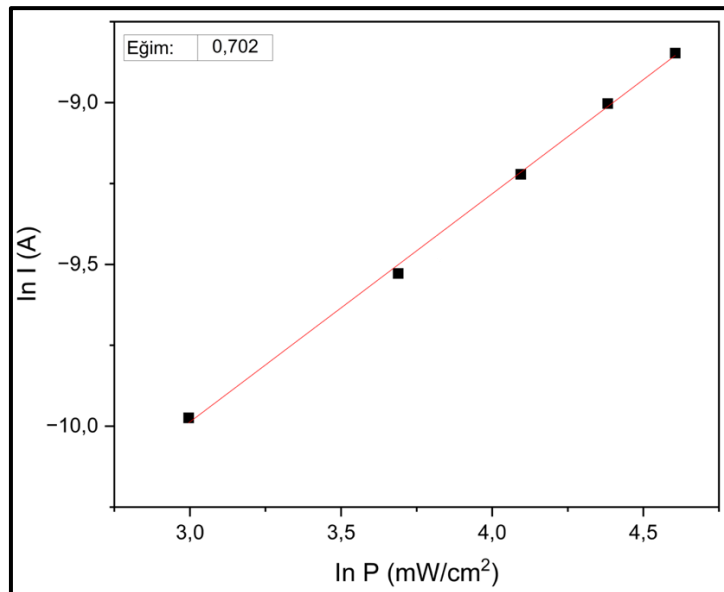
Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	$I_{açma}/I_{kapama}$
20	31,6
40	50,1
60	68,3
80	85
100	99,4

4.7. Al/NiCo₂O₄ n-Si/Al Schottky Diyotu Fotoiletkenlik Karakteristikleri

Fotodedektörün ışığa duyarlı yüzeyine bir ışık düşerse, bu ışık ile oluşan foto akım Eş.4.11 de gösterilmektedir, Denklemi ile gösterilmektedir. Bağıntıda fotoakım, P gelen ışığın şiddeti, I akım, B ve m ise birer sabittir. m değerinin 0,5 ile 1 aralığında elde edilmesi, diyotun foto-iletken mekanizmasının lineer davranış sergilediğini göstermektedir.

$$I_{ph}=B.P^m \quad (4.11)$$

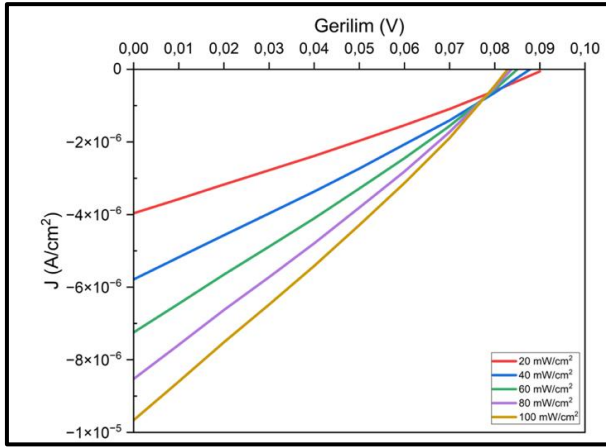
Bu durum, foto iletken mekanizmanın yarıiletkenin yasak bant aralığındaki safsızlık seviyelerinin eksponansiyel dağılımının varlığı ile kontrol edildiğini göstermektedir. Şekil 4.9'da de Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun güce bağlı akım grafiği gösterilmektedir.

Şekil 4.9. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyot unu güce bağlı akım grafiği

Şekil 4.9'dan güce bağlı akım grafiği incelendiğinde bu grafiğin eğiminden Eş.4.1'deki m değeri 0,702 olarak hesaplandı. Bu sonuçların literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermektedir [71-74].

4.8. Fotovoltaik Karakteristiği

Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun akım gerilim karakteristiği incelendiği diyotun 0,00 ile 0,09 V aralığında fotovoltaik karakteristik sergilediği görülmüştür. Farklı ışık şiddetleri altında fotovoltatik özellik gösterdiği bölgeye ait J-V grafiği de aşağıdaki Şekil 4.10'de gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun farklı ışık şiddetlerinde J-V grafiği

Ayrıca bölüm 2.2.3'de belirtilen fotovoltaik sistem performans eşitliklerine göre fotovoltaik parametreler hesaplanarak Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

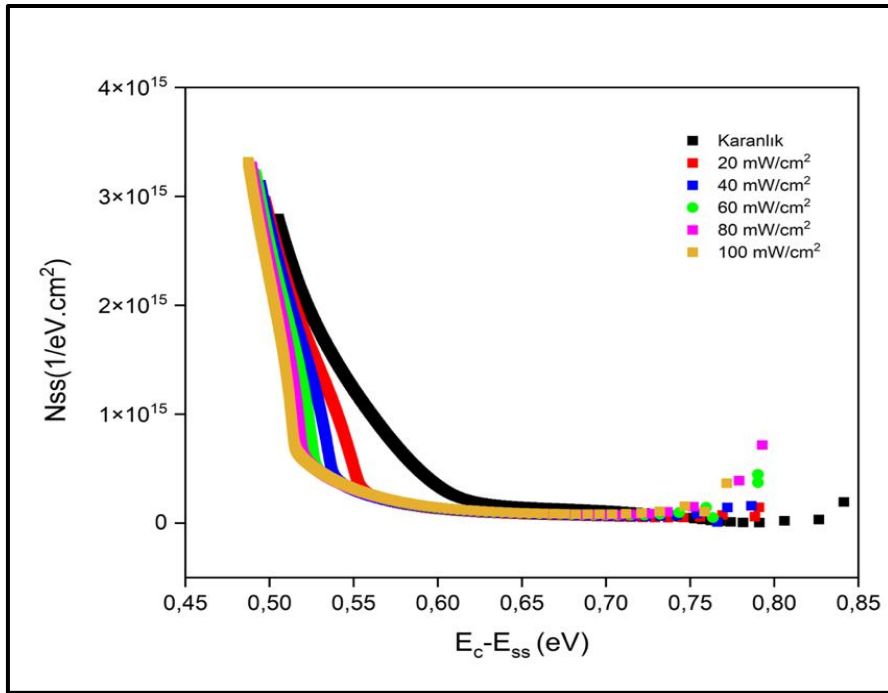
Çizelge 4.4. J-V grafiği sonuçlarından elde edilen Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun hesaplanan fotovoltaik sistem parametreleri

P(mW/cm ²)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	J _{sc}	V _{max} (V)	I _{max} (A)	P _{max}	FF	R (-2V)	S (-2V)
20	0,09	2,776E-07	3,9653E-06	0,05	1,37668E-07	6,88E-09	0,275542	96720,84	35,01071
40	0,08	4,05E-07	5,78549E-06	0,05	1,91327E-07	9,57E-09	0,29527	108695,5	54,68087
60	0,08	5,072E-07	7,24581E-06	0,04	2,87467E-07	1,15E-08	0,283382	122868,7	74,29598
80	0,08	5,971E-07	8,52986E-06	0,04	3,3559E-07	1,34E-08	0,281021	130679,8	92,46694
100	0,08	6,764E-07	9,66311E-06	0,04	3,79207E-07	1,52E-08	0,280305	135479,1	108,0651

Çizelge 4.4.'deki hesaplanan fotovoltaik sistem performans parametreleri incelendiğinde sistemin $20 - 100 \text{ mW/cm}^2$ ışık şiddeti altındaki her durumda fotovoltaik özellik gösterdiği düşük verimde de olsa %27,55 ile %29,53 arasında doldurma faktörüne sahip olduğu görülmüştür. Farklı ışık şiddetleri altında da en büyük V_{oc} değerinin $0,09 \text{ V}$ olduğu ve V_{max} değerinin de $0,05 \text{ V}$ olduğu görülmüştür. -2V altında hesaplanan R ve S değerleri de incelendiğinde bu değerlerin ışık şiddetiyle orantılı olacak şekilde beklendiği gibi arttığı görülmüştür.

.9. Arayüzey Durumları Yoğunluğu

$\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ diyotun arayüzey durum yoğunluğunu hesaplamaları SEM analizi sonuçlarından elde edilen kalınlığı değeri ve Eş.2.15 ve Eş.2.16'da belirtilen eşitlikler yardımıyla her bir ışık şiddeti için N_{ss} değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan arayüzey durum yoğunluğuna karşı enerji değeri grafiği de Şekil 4.11'de verilmiştir.



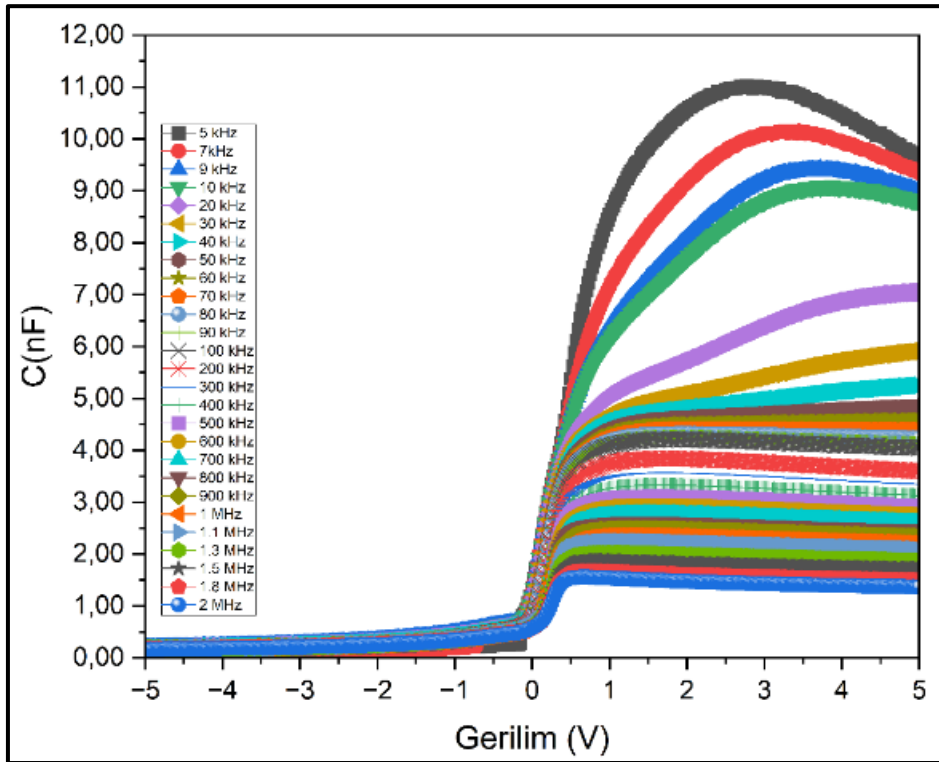
Şekil 4.11. $\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ Schottky diyotun farklı ışık şiddetlerinde arayüzey durum yoğunluğuna karşı enerji değerleri grafiği

NiCo_2O_4 arayüzey tabakalı diyotun arayüzey yoğunluğu durumları ışık şiddetine bağlı değişmektedir. Karanlıkta hesaplanan N_{ss} değerleri $0,20 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ile $2,55 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değişmektedir. 100 mW/cm^2 ışık aydınlatmada ise N_{ss} değerleri $0,20 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ile

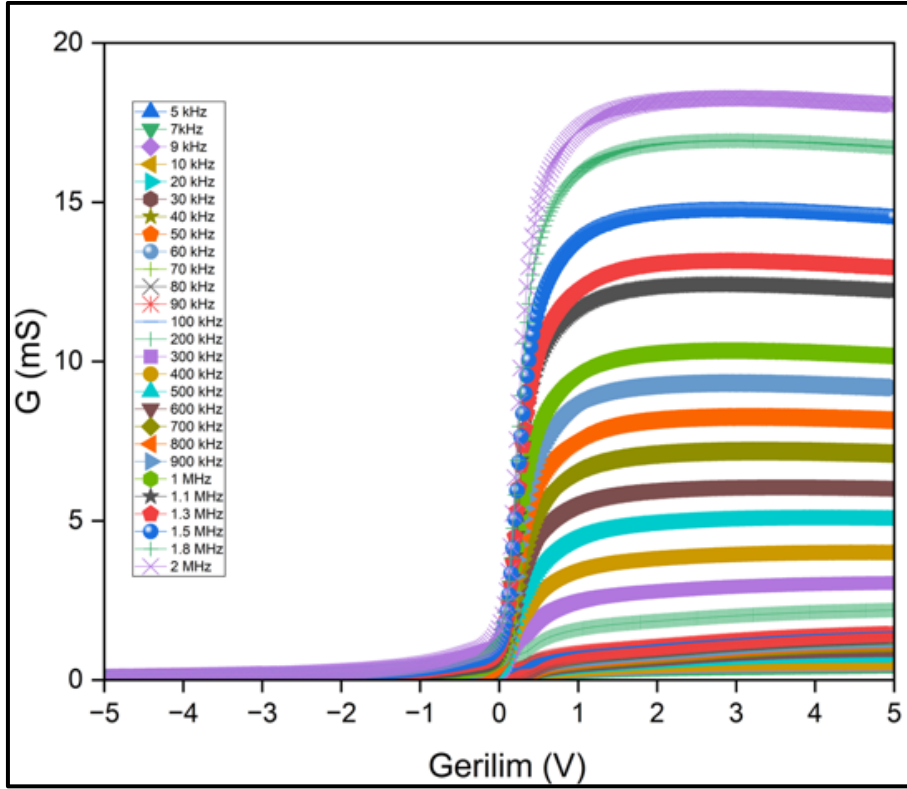
$3,55 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında değişmektedir. Işık şiddetinin artması ile N_{ss} kısmen ve tuzaklı bölgelerde yüksek enerjiye geçmekte olduğu şeklinde değerlendirilmektedir.

4.10. Kapasitans-İletkenlik Karakteristikleri

Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotun oda sıcaklığında kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri ve iletkenlik-gerilim ölçümleri (G-V) 5 kHz -2 MHz frekans aralığında, -5 V ile +5 V gerilim aralığında incelenmiştir. C-V ölçümlerine ait grafik Şekil 4.12’de bunun yanında da G-V ölçümlerine ait grafikte ise Şekil 4.13’de gösterilmektedir. C-V ve G-V için alınan her iki ölçümde oda sıcaklığında, 0 ışık şiddeti(karanlık) ortam şartlarında alınmıştır.



Şekil 4.12. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotun farklı frekans değerleri altında C-V grafiği



Şekil 4.13. Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotun farklı frekans değerleri altında G-V grafiği

Şekil 4.12'deki Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun C-V grafiği incelendiğinde diyotun bütün frekans değerlerinde kapasitif özellik gösterdiği görülmektedir ve artan gerilime bağlı olarak kapasitans değerinin arttığı görülmektedir. -5 V'dan -1,5 V'a kadar tersinme bölgesinde kapasitans değeri gerilim altında değişmezken, -1,5 V'dan 0,9 V gerilim değeri altında tüketme ve 0,9'dan 5 V'a kadar da kapasitans değerinin arttığı biriktirme bölgesinden oluşmaktadır.

Kapasitans değerleri frekansa göre karşılaştırıldığında ters orantılı şekilde azalmakta olup 2 Volt değerinde 5 kHz'de kapasitans 10,75 nF değeri alırken 2 MHz'de 1,50 nF'ta düşmektedir. Bunun yanında 700 kHz ile 2 MHz aralığında kapasitans değeri sergilerken 700kHz'den düşük değerlerde pozitif bölgede frekans düşmesiyle doğru orantılı olarak bu davranışında sapmalar olduğu düşük frekans yüksek gerilimde frekansa bağımlılığı olduğu görülmüştür. Arayüzey durumlarının varlığından ötürü yükselen frekans değeri ile de kapasitans değerinin azaldığı değerlendirilmektedir.

Şekil 4.13'teki Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunu G-V grafiği incelendiğinde diyotun bütün frekans değerlerinde iletkenlik gösterdiği görülmektedir ve artan frekansa bağlı olarak

iletkenlik değerinin pozitif gerilim altında arttığı görülmektedir. Kapasitans değerleri frekansa göre karşılaştırıldığında ise 2 Volt değerinde 2 MHz ve 200 kHz arasında yaklaşık 17 kat daha fazla iletkenlik olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında farklı alttaşlar üzerinde döndürmeli kaplama yöntemi ile NiCo_2O_4 ince film büyütmesi ve $\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ Schottky diyot yapısı başarıyla gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan NiCo_2O_4 ince filmlerinin morfolojik ve yapısal özellikleri de SEM ve XRD analizleri yapılarak incelenmiştir. Diyot yapısının I-V ve I-t analizleri farklı ışık şiddetleri altında yapılarak diyot karakterisasyonu ve özellikleri incelenmiştir. Termiyonik emisyon teorisi ve Norde teorimi ile de I-V, I-t, C-V, G-V InI-InP ve $F(V)-V$ grafikleri çizilerek diyot parametreleri incelenmiştir. Bunun yanında UV/Vis analizleri yapılarak filmlerin soğurma ve geçirgenlik analizleri yapılmıştır. Bu elde edilen sonuçlarda diyot yapısının optik ve elektro-optik uygulamaları için uygunluğu değerlendirilmiştir.

NiCo_2O_4 ince film yapısının morfolojik özelliklerini tayin edebilmek amacıyla SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. SEM analizlerinde NiCo_2O_4 yapılarının yüzeyde içi oyuk rastgele şekilde olduğu görülmektedir. Parçacık boyutlarının 71.9 ile 191 nm aralığında yanal kesit kalınlığının da 92.8 ile 98.2 nm aralığında görülmüştür. EDS analiz sonuçlarında da Ni, Co, O elementlerinin Si yüzeye homojen dağıldığı görülmektedir.

FTO yüzeyine kaplanan NiCo_2O_4 ince film tabakasının XRD ile yapılan yapısal analizleri incelendiğinde XRD deseninde alttaş olan FTO ve NiCo_2O_4 'a ait pikler elde edilmiştir ve FTO'a ait piklerin daha baskın olduğu görülmüştür. Bunun yanında XRD deseninde belirli piklerin görülmediği gözlenmiştir ve literatürle de karşılaştırıldığında bu XRD deseninin literatürle uyumlu olduğu görülmüştür.

$\text{Al/NiCo}_2\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ Schottky diyotun elektriksel karakterisasyonu için farklı I-V ve I-t ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler $\pm 5\text{V}$ gerilim aralığında ve 0, 20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm^2 farklı ışık aydınlatma şiddetlerindeki alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Termiyonik emisyon teorisi ve Norde yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. İdealite faktörü, engel yüksekliği gibi diyot parametreleri hesaplanmıştır. Doğrultma oranları yukarıdaki belirtilen farklı ışık şiddetleri altında 1573,1 ,100,8 ,58,2 ,42,7 21,8 ,20,1 olarak bulunmuştur.

Farklı ışık şiddetlerinde idealite faktörleri 1,141; 1,250; 1,329; 1,369; 1,394; 1,414 şeklinde bulunmuştur. Tüm idealite faktörünün 1 ile 1,5 arasında olmasının diyot parametreleri

açısından iyi bir performans sağladığını göstermektedir. Engel yüksekliğin değerleri sırasıyla 0,86; 0,86; 0,83; 0,82; 0,81; 0,80 eV olduğu ve ışık şiddetinin artmasıyla düştüğü gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ışık şiddetinin artmasıyla ters beslemede tüm numuneler için akım değerinde bir artış gözlemlendi ve başka bir ifadeyle ışık şiddetine bağlı bir fotoakım olduğu gözlemlendi. Bu sonuçlar doğrultusunda üretilen yapının iyi bir diyot olarak kullanılabileceği ve optoelektronik uygulamalarda görünür ve ultraviyole dalga boylarında kullanılma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotun I-t analizlerinde -2V'da 20s'lik aralıklarla 0-140 saniyelik zaman dilimi içerisinde 20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm² farklı ışık şiddetlerinde yapılmıştır. Diyotun her farklı ışık şiddeti için farklı bir maksimum akım değere ulaştığı ve bu değer aralığında akımın belirlenen süre boyunca sabit kaldığı ışık kapatıldıktan sonrada başlangıç değerine geri döndüğü görülmüştür. $I_{açma}/I_{kapama}$ değerlerinin sırasıyla 31,6; 50,1; 68,3; 85,0; 99,4 olduğu görülmüştür. Bu da diyotun ışık şiddetine bağlı optik duyarlılık performansının iyi olduğunu göstermektedir.

Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun C-V grafiği incelendiğinde, diyotun tüm frekanslarda kapasitif özellik gösterdiği ve artan gerilimle birlikte kapasitans değerinin arttığı görülmektedir. -5 V'dan -1,5 V'a kadar olan tersinme bölgesinde kapasitans değerinin gerilim altında sabit kaldığı, -1,5 V ile 0,9 V arasında tüketme bölgesinde kapasitansın arttığı ve 0,9 V'dan 5 V'a kadar olan biriktirme bölgesinde de kapasitans değerinin yükseldiği gözlemlenmiştir.

Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotunun G-V grafiği incelendiğinde, diyotun tüm frekans değerlerinde iletkenlik gösterdiği ve artan frekansla birlikte pozitif gerilim altında iletkenlik değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Kapasitans değerlerinin frekanslara göre karşılaştırılmasında ise, 2 V'ta 2 MHz ve 200 kHz arasında yaklaşık 17 kat daha yüksek iletkenlik olduğu belirlenmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasında NiCo₂O₄ ince film kaplamalar ve Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyot deneysel olarak üretilmiştir. NiCo₂O₄ ince filmin yapısal ve morfolojik özellikleri belirlenerek Al/NiCo₂O₄/n-Si/Al Schottky diyotun da optik ve elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Belirtilen tüm bu veriler ışığında da yapının iyi bir doğrultucu diyot ve optoelektronik uygulamalar için iyi bir fotodiyot olarak kullanılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Sze, S. M., ve Ng, K. K. (2021). *Physics of semiconductor devices* (4th Edition). New York: John Wiley & Sons, 78 - 93.
2. Neamen, D. A. (2011). *Semiconductor physics and devices: Basic principles* (4th Edition). New York: McGraw-Hill Education, 12-45.
3. Çaldıran, Z. (2021). Modification of Schottky barrier height using an inorganic compound interface layer for various contact metals in the metal/p-Si device structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 865, 158856.
4. Özdemir, A., Göksu, T., Yıldırım, N., and Turut, A. (2021). Effects of measurement temperature and metal thickness on Schottky diode characteristics. *Physica B: Condensed Matter*, 616, 413125.
5. Jeon, B., Lee, C., and Park, J.Y. (2021). Electronic control of hot electron transport using modified Schottky barriers in metal–semiconductor nanodiodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(7), 9252-9259.
6. Lv, L., Yu, J., Hu, M., Yin, S., Zhuge, F., Ma, Y., and Zhai, T. (2021). Design and tailoring of two-dimensional Schottky, PN and tunnelling junctions for electronics and optoelectronics. *Nanoscale*, 13(14), 6713-6751.
7. Pawade, V. B., Salame, P. H. and Bhanvase, B. A. (2020). *Multifunctional nanostructured metal oxides for energy harvesting and storage devices* (1st Edition). Boca Raton: CRC Press, 1-73.
8. Yoon, Y., Truong, P. L., Lee, D., and Ko, S. H. (2021). Metal-oxide nanomaterials synthesis and applications in flexible and wearable sensors. *ACS Nanoscience Au*, 2(2), 64-92.
9. Shawky, A., Alhaddad, M., Mohamed, R., Awwad, N.S., and Ibrahim, H.A. (2020). Magnetically separable and visible light-active Ag/NiCo₂O₄ nanorods prepared by a simple route for superior photodegradation of atrazine in water. *Progress in Natural Science: Materials International*, 30(2), 160-167.
10. Aparna, M., Thomas, T., and Rao, G.R. (2022). Battery-like supercapacitive behavior of urchin-shaped NiCo₂O₄ and comparison with NiCo₂X₄ (X= S, Se, Te). *Journal of The Electrochemical Society*, 169(2), 020515.
11. Wang, X., Deng, C., Hong, X., Dong, W., and Liang, B. (2022). Controllable synthesis of NiCo₂O₄, NiCo₂O₄/graphene composite and their electrochemical application in supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 55, 105837.
12. Sakthivel, C., Nivetha, A., Thiruppathi, G., Sundararaj, P., and Prabha, I. (2023). Synthesis of a multi-functionalized NiCo₂O₄ spinel heterostructure via the hydrothermal route for high-performance photo-electrocatalytic, anti-bacterial and eco-toxicity applications. *New Journal of Chemistry*, 47(2), 571-588.

13. Dos, O., Turan, N., Tugluoglu, N., and Cavdar, S. (2024). The impact of temperature and frequency on negative capacitance and dielectric attributes in NiCo₂O₄ bulk ceramic. *Ceramics International*, 50(13), 24487-24498
14. Majumder, S., Gu, M., and Kim, K.H. (2022). Facile fabrication of BiVO₄/Bi₂S₃/NiCoO₂ for significant photoelectrochemical water splitting. *Applied Surface Science*, 574, 151562.
15. Mann, D.S., Patil, P., Kwon, S.-N., and Na, S.-I. (2021). Enhanced performance of pin perovskite solar cell via defect passivation of nickel oxide/perovskite interface with self-assembled monolayer. *Applied Surface Science*, 560, 149973.
16. Dawood, A., Ahmad, J., Ali, S., Ullah, S., Asghar, Z., and Shah, M. (2022). 12 Metal oxide/carbon composites and their applications in. *Metal Oxide-Carbon Hybrid Materials: Synthesis, Properties and Applications*, 4, 309.
17. Kumar, R. (2020). NiCo₂O₄ nano-/microstructures as high-performance biosensors: a review. *Nano-Micro Letters*, 12, 1-52.
18. Wu, Z., Zhu, Y. and Ji, X. (2014). NiCo₂O₄-based materials for electrochemical supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(36), 14759-14772.
19. Wang, C., Zhou, E., He, W., Deng, X., Huang, J., Ding, M. and Xu, X. (2017). NiCo₂O₄-based supercapacitor nanomaterials. *Nanomaterials*, 7(2), 41.
20. Saafi, I., Dridi, R., Mami, A., Ben Naceur, J., Amlouk, A., Chtourou, R. and Amlouk, M. (2021). Some physical investigations on NiCo₂O₄ thin films for potential applications. *Applied Physics A*, 127, 1-12.
21. Hu, L., Wu, L., Liao, M., and Fang, X. (2011). High-Performance NiCo₂O₄ Nanofilm Photodetectors Fabricated by an Interfacial Self-Assembly Strategy. *Advanced Materials*, 17(23), 1988-1992.
22. Chen, H., Liu, K., Hu, L., Al-Ghamdi, A.A., and Fang, X. (2015). New concept ultraviolet photodetectors. *Materials Today*, 18(9), 493-502.
23. Ashtar, M., Yao, K., Marwat, M. A., Yang, J., Yang, Y., Wang, Q. and Cao, D. (2024). High performance self-powered photodetector based on CuBi₂O₄/MAPbI₃ heterostructure. *Vacuum*, 219, 112759
24. Çiçek, O., Karasüleymanoğlu, M., Kurnaz, S., Öztürk, Ö. and Taşçı, A. T. (2022). Self-powered visible-UV light photodiodes based on ZnO nanorods-silicon heterojunctions with surface modification and structural enhancement. *Optik*, 261, 169137.
25. Gayen, R. N., Paul, R. and Biswas, S. (2020). Schottky enabled enhanced UV detection by graphene oxide composited transparent ZnO thin films. *Applied Surface Science*, 533, 147149.
26. Sarcan, F., Doğan, U., Althumali, A., Vasili, H. B., Lari, L., Kerrigan, A. and Erol, A. (2023). A novel NiO-based pin ultraviolet photodiode. *Journal of Alloys and Compounds*, 934, 167806.

27. Rogalski, A., Bielecki, Z., Mikołajczyk, J. and Wojtas, J. (2023). Ultraviolet photodetectors: From photocathodes to low-dimensional solids. *Sensors*, 23(9), 4452.
28. Liu, K., Sakurai, M. and Aono, M. (2010). ZnO-based ultraviolet photodetectors. *Sensors*, 10(9), 8604-8634.
29. Al-Ahmadi, N. A. (2020). Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: a review of recent advances. *Materials Research Express*, 7(3), 032001.
30. Wang, Y., Liu, S., Li, Q., Quhe, R., Yang, C., Guo, Y., Zhang, X., Pan, Y., Li, J., and Zhang, H. (2021). Schottky barrier heights in two-dimensional field-effect transistors: from theory to experiment. *Reports on Progress in Physics*, 84(5), 056501.
31. Cao, Z., Lin, F., Gong, G., Chen, H., and Martin, J. (2020). Low schottky barrier contacts to 2H-MoS₂ by Sn electrodes. *Applied Physics Letters*, 116(2), 25-121.
32. Aydoğan Ş. (2015). *Katıhal elektroniği* (1. Baskı). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 2-55.
33. Aslan, F., Esen, H., ve Yakuphanoglu, F. (2020). Çeşitli metal oksitlere katkılama yapılarak üretilmiş fotodiyotların elektriksel özelliklerinin incelenmesi: bir araştırma. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 4(2), 41-54.
34. Li, N., Mahalingavelar, P., Vella, J.H., Leem, D.-S., Azoulay, J.D., and Ng, T.N. (2021). Solution-processable infrared photodetectors: Materials, device physics, and applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 146, 100643.
35. Rogalski, A. (2019). *Infrared and terahertz detectors* (5th Edition). Boca Raton, FL: CRC Press, 3-65.
36. Schinke, D.P., Smith, R.G., Hartman, A.R. (1980). Photodetectors. In: Kressel, H. (eds) *Semiconductor devices for optical communication, topics in applied physics* (4th Edition). Berlin, Heidelberg: Springer, 39, 21-64.
37. Nishizawa, J., Saito, H. and Kimura, M. (1981). Schottky barrier photodetectors for visible and infrared light. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 28(3), 349-356.
38. Streetman, B. G. and Banerjee, S. (2015). *Solid state electronic devices* (7th Edition). London: Pearson, 3-35.
39. Capasso, F. S. (1985). Barrier photodetectors. In *semiconductors and semimetals* (1st Edition). Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 22-36.
40. Bian, J. and Yun-fang, L. (2018). Photovoltaic properties and current transport mechanisms in diode junctions. *Journal of Semiconductor Devices*, 22(4), 345-357.
41. Al-Ezzi, M. and Ansari, R. (2022). Photovoltaic effects in photodiodes and mechanisms of electron-hole pair separation. *Journal of Electronic Materials*, 45(8), 1556-1567.
42. Donati, S. (2021). *Photodetectors: Devices, circuits and applications* (4th Edition). Boca Raton: CRC Press, 7-41.

43. Kasap, S. O. (2013). *Optoelectronics and photonics: Principles and practices* (2nd Edition). London: Pearson, 65-112.
44. Green, M. A. (2008). *Third generation photovoltaics: Advanced solar energy conversion* (4th Edition). New York: Springer, 7-45.
45. Nelson, J. (2003). *The physics of solar cells* (3th Edition). London: Imperial College Press, 3-45.
46. Razeghi, M. (2019). *Fundamentals of solid state engineering* (1st Edition). Cham: Springer, 672-674.
47. Rhoderick, E.H. and Williams, R.H. (1988). *Metal-semiconductor contacts* (4th Edition). New York: Oxford Science Publication, 94-95.
48. Bohlin, K. E. (1986). Generalized norde plot including determination of the idealityfactor. *Journal of Applied Physics*, 60(3), 1223-122
49. Önal, Y. (2023). *Farklı GO katkılı pan arayüzey tabakali al/n:si yapıların elektriksel özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-64.
50. Henisch, H. K. (1984). *Semiconductor contacts* (4th Edition). New York: Celerondon Press, 2-41.
51. Lv, H., Huang, X.C., Zhang, K.H.L., Bierwagen, O., and Ramsteiner, M. (2023). Underlying mechanisms and tunability of the anomalous Hall effect in NiCo₂O₄ films with robust perpendicular magnetic anisotropy. *Advanced Science*. 10(28), 2302956.
52. Diebold, P., Vazquez-Pufleau, M., Bandara, N., Mpoy, C., Raliya, R., Thimsen, E. and Rogers, B. E. (2018). Aerosol-synthesized siliceous nanoparticles: impact of morphology and functionalization on biodistribution. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 7375-7393.
53. Mackenzie, J. D. and Ulrich, D. R. (1990). Sol-gel optics, present status and future trends. *Sol-Gel Optics*, 1328, 2-13.
54. Maruszewski, K., Stręk, W., Jasiorowski, M. and Ucyk, A. (2003). Technology and applications of sol-gel materials. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 158(1-6), 439-450.
55. Tyona, M. D. (2013). A theoretical study on spin coating technique. *Advances in Materials Research*, 2(4), 195.
56. Hameed, A. S., Madloul, R. A., Ridha, N. J., Hussein, B. M., Alosfur, F. K. M. and Tahir, K. J. (2022). Fabrication of spin coater device using hematocrit centrifuge with vacuum substrate holder for thin film deposition. *Materials Research*, 25, e20210496.
57. Irzaman, I., Siskandar, R. and Aminullah, A. H. (2017). Modified spin coating method for coating and fabricating ferroelectric thin film as sensors and solar cells. *Artifacts on Surface Phenomena and Technological Facets*, 4, 33-54.

58. Mattox, D. M. (2010). *The foundations of vacuum coating technology* (4th Edition). Berlin, Heidelberg: Springer, 7-39.
59. Ohring, M. (2002). *Materials science of thin films: Deposition and structure* (2nd ed.). Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 3-41.
60. Cullity, B. D. and Stock, S. R. (2001). *Elements of X-ray diffraction* (3rd ed.). Hoboken, New Jersey: Prentice Hall, 7-19.
61. Warren, B. E. (1990). *X-ray diffraction* (4th Edition). Mineola, New York: Dover Publications, 15-39.
62. Tsirelson, V.G. and Ozerov, R.P., (1996). *Electron density and bonding in crystals: Principles, theory and X-ray diffraction experiments in solid state physics and chemistry* (1st Edition). New York: CRC Press, 72-93.
63. Dey, P., (2023). Electron microscopy: Principle, components, optics and specimen processing. In *Basic and Advanced Laboratory Techniques in Histopathology and Cytology* (4th Edition). Singapore: Springer, 303-313.
64. Nakamae, K. (2021). Electron microscopy in semiconductor inspection. *Measurement Science and Technology*, 32(5), 052003.
65. Akash, M.S.H., Rehman, K., Akash, M.S.H., and Rehman, K. (2020). Ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy. *Essentials of Pharmaceutical Analysis*, 4, 29-56.
66. Peymanfar, R., Yektaei, M., Javanshir, S., and Selseleh-Zakerin, E. (2020). Regulating the energy band-gap, UV–Vis light absorption, electrical conductivity, microwave absorption, and electromagnetic shielding effectiveness by modulating doping agent. *Polymer*, 209, 122981.
67. Li, G., Dong, C. and Wang, R. (2022). Nickel Cobaltite Nanosheet Layer as Hole-Transporting Material in Inverted Perovskite Solar Cells. *ChemistrySelect*, 7(26), e202201354.
68. Tauc, J., Grigorovici, R. and Vancu, A. (1966). Optical properties and electronic structure of amorphous germanium. *Physica Status Solidi (b)*, 15(2), 627-637.
69. Yacobi, B. G. and Holt, D. B. (2001). Optical properties of solids: An overview. *Journal of Materials Science*, 36, 2859-2880.
70. Dileep, K., Loukya, B., Silwal, P., Gupta, A. and Datta, R. (2014). Probing optical band gaps at nanoscale from tetrahedral cation vacancy defects and variation of cation ordering in NiCo₂O₄ epitaxial thin films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47(40), 405001.
71. Şahin Y. (2022). *SILAR yöntemi ile Al/Cd:ZnO/p-Si/Al fotodiyot üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-39.

72. Gürgeç, E., Dıkıcı, A. and 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.
73. 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, 501-506.
74. Aslan, F., Esen, H. and Yakuphanoglu, F. (2020). Al/P-Si/Coumarin: TiO₂/Al organic-inorganic hybrid photodiodes: investigation of electrical and structural properties. *Silicon*, 12(9), 2149-2164.



Gazili olmak ayrıcalıktır