



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



Yüksek Lisans Tezi

**ZnO TABANLI FOTODEDEKTÖR TASARIMI,
FABRİKASYONU ve KARAKTERİZASYONU**

Ümit DOĞAN

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Kamuran KARA KOÇ

Eylül, 2020

İSTANBUL

Bu çalışma, 04.09.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziğı Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Dr. Öğr. Üyesi Kamuran KARA KOÇ (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Ayşe EROL
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Ebru ŞENADIM TÜZEMEN
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Fen Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



ÖNSÖZ

Birlikte çalışmaya lisans eğitimimde başladığım ve bugüne kadar bilgi ve birikimlerini hiçbir zaman esirgemeyen, daima yanımda olan çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi. Kamuran KARA KOÇ'a ve değerli hocam Prof. Dr. Ayşe EROL'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Yüksek lisans çalışmam boyunca hem deneysel yardımlarını esirgemeyen hem de manevi olarak her zaman yanımda olan, zor anlarımda yardım ellerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocalarım Araş. Gör. Dr. Fahrettin SARCAN, Öğr. Gör. Dr. Furkan KURUOĞLU, Araş. Gör. Dr. Selman MUTLU ve Dr. Can YEŞİLYURT hocalarıma sonsuz teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca yarattıkları sıcak ve samimi çalışma ortamı için değerli hocalarım Doç. Dr. Ömer DÖNMEZ'e, Dr. Öğr. Üyesi. Saffettin YILDIRIM'a ve Doç. Dr. Ferhat NUTKU'ya teşekkür ediyorum.

Deneysel çalışmalarında her zaman yanımda olan, sıkıntılarımı paylaştığım, yüksek lisans çalışmalarım boyunca yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli dostlarım Araş. Gör. Göksenin KÖMÜRCÜ'ye, Mustafa AYDIN'a, Sabina JUSUFOVIC'e, Shemshat KERIMOVA'ya, Osman Emin TOPAL'a ve Danyal MERCAN'a teşekkür ederim. Lisans eğitimimde tanıştığım kadim dostum Oğuz KOÇER'e tüm yardımları için sonsuz teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde en büyük emeğe sahip olan, hayatım boyunca verdiğim kararların arkasında duran, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, başarılarımın en büyük mimarı olan anneme, babama ve kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarında çalışan, bu güzel ekibin bir parçası olmuş herkese teşekkür ederim.

Eylül 2020

Ümit DOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	x
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. ÇİNKO OKSİT İNCE FİLMLERİN ÖZELLİKLERİ	3
2.2. ÇİNKO OKSİT İNCE FİLMLERİN ÜRETİLMESİ	3
2.3. FOTODEDEKTÖRLER	4
2.3.1. Fotodedektör Karakterizasyonu.....	6
2.3.1.1. Absorpsiyon	6
2.3.1.2. Foto Yanıt (Responsivite) ve Kuantum Verimi	7
2.3.1.3. Bant Genişliği ve Cevap süresi	8
2.3.1.4. Gürültü.....	9
2.3.2. MSM Fotodedektörler	9
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	13
3.1. ÖRNEK YAPISI	13
3.2. ÖRNEK FABRİKASYONU.....	14
3.2.1. Örneklerin Kesilmesi.....	15
3.2.2. Örneklerin Temizlenmesi	15
3.2.3. Fotodirenç Kaplanması.....	15
3.2.4. Pozlama	16
3.2.5. Metalizasyon İşlemi.....	18
3.3. FOTODEDEKTÖRLERİN KARAKTERİZASYONU	19
3.3.1. Yapısal Karakterizasyon.....	19
3.3.1.1. Taramalı Elektron Mikroskobu.....	19
3.3.1.2. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi	20

3.3.1.3. <i>X-Işınımı Kırınımı</i>	21
3.3.2. Optik Karakterizasyon	22
3.3.2.1. <i>Geçirgenlik</i>	22
3.3.3. Elektriksel Karakterizasyon	27
3.3.3.1. <i>Akım-Voltaj (I-V)</i>	27
3.3.3.2. <i>Hall Olayı</i>	27
3.3.4. Elektro-Optik Karakterizasyon	28
3.3.4.1. <i>Fotoiletkenlik</i>	28
4. BULGULAR	31
4.1. FOTODEDEKTÖR KARAKTERİZASYONU ÖLÇÜM SONUÇLARI	31
4.1.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları	31
4.1.2. Optik Karakterizasyon Sonuçları	34
4.1.3. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları	36
4.1.4. Elektro-Optik Karakterizasyon Sonuçları	39
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	49
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: UV dedektörlerin sınıflandırılması.	5
Şekil 2.2: Metal ile n-tipi yarıiletkenin oluşturduğu bant yapısı a) denge durumu öncesi, b) denge durumu sonrası.	10
Şekil 2.3: Besleme uygulanmadığı durumda n-tipi ZnO MSM fotodedektör bant yapısı.	11
Şekil 2.4: Besleme gerilimi altında n-tipi ZnO MSM fotodedektörün bant yapısı.	11
Şekil 2.5: MSM fotodedektör yapısı.	12
Şekil 3.1: ZnO'nin kristal yapısı [33].	13
Şekil 3.2: AZ5214E Pozitif fotodirencin dönme hızına karşılık kaplama kalınlığı [35].	16
Şekil 3.3: Fotodedektör fabrikasyonu için kullanılan krom kaplı maske.	17
Şekil 3.4: ZnO MSM fotodedektörün fabrikasyon süreçleri.	19
Şekil 3.5: FEI Versa 3D Taramalı Elektron Mikroskobu	20
Şekil 3.6: X-Işını Kırınımı cihazı.	22
Şekil 3.7: Perkin-Elmer Lambda 2S UV/VIS Spektrometresi [8].	23
Şekil 3.8: İnce filmde ışığın yayılma süreçleri [39].	25
Şekil 3.9: Fotoakım ve I-V ölçüm düzeneği.	29
Şekil 3.10: Işık sinyalindeki basamaksı değişim ve fotodedektörün yanıtı [28].	30
Şekil 4.1: XRD ölçüm sonuçları.	31
Şekil 4.2: ZnO örneklerin EDS spektrumları.	32
Şekil 4.3: a) 400 °C'de tavllanmış örneğin SEM görüntüsü b) Tanecik boyutu dağılım grafiği.	33
Şekil 4.4: a) 450 °C'de tavllanmış örneğin SEM görüntüsü b) Tanecik boyutu dağılım grafiği.	33
Şekil 4.5: a) 550 °C'de tavllanmış örneğin SEM görüntüsü b) Tanecik boyutu dağılım grafiği.	33

Şekil 4.6: 400 °C, 450 °C, 550 °C’ de tavllanmış ZnO örneklerin dalgaboyuna bağlı geçirgenlik grafikleri.	34
Şekil 4.7: 400 °C, 450 °C, 550 °C’ de tavllanmış ZnO örneklerin $\alpha h\nu^2$ -E grafikleri.	35
Şekil 4.8: Tavlama sıcaklığı 400 °C olan MSM fotodedektörün I-V grafiği.	37
Şekil 4.9: Tavlama sıcaklığı 450 °C olan MSM fotodedektörün I-V grafiği.	37
Şekil 4.10: Tavlama sıcaklığı 550 °C olan MSM fotodedektörün I-V grafiği.	38
Şekil 4.11: Işık altında MSM fotodedektörlerin (-5 V, +5 V) I-V grafiklerinin karşılaştırılması.	38
Şekil 4.12: Tavlama sıcaklığı 400 °C olan MSM fotodedektörün akım-zaman grafiği.	40
Şekil 4.13: Tavlama sıcaklığı 450 °C olan MSM fotodedektörün akım-zaman grafiği.	41
Şekil 4.14: Tavlama sıcaklığı 550 °C olan MSM fotodedektörün akım-zaman grafiği.	41
Şekil 4.15: MSM fotodedektörlerin akım-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.	42
Şekil 4.16: MSM fotodedektörlerin her bir açma-kapama anındaki yükselme zamanı-zaman grafiği.	42
Şekil 4.17: Tavlama sıcaklığı 400 °C olan MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki akım-zaman grafiği.	44
Şekil 4.18: Tavlama sıcaklığı 450 °C olan MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki akım-zaman grafiği.	44
Şekil 4.19: Tavlama sıcaklığı 550 °C olan MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki akım-zaman grafiği.	45
Şekil 4.20: Tavlama sıcaklıklarına göre MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki voltaj-yükselme zamanı grafiği karşılaştırmaları.	46
Şekil 4.21: Tavlama sıcaklıklarına göre MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki voltaj-normalize edilmiş yükselme zamanı grafiği karşılaştırmaları.	46
Şekil 4.22: UV (370 nm) filtre kullanılarak alınan akım-zaman grafikleri.	48
Şekil 4.23: Solar simülatör (filtresiz) ile alınan akım-zaman grafikleri.	48

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: UV bölgeler.....	4
Tablo 4.1: n-tipi ZnO ince film örneklerin XRD ve SEM analizi.....	32
Tablo 4.2: ZnO örneklerin ince film kalınlıkları ve bant aralıkları.....	36
Tablo 4.3: Hall Olayı ölçümü sonuçları.	39
Tablo 4.4: ZnO MSM fotodedektörlerin dedektör parametrelerinin hesaplanması.	43

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Fotodedektörün etkin bölgesinin alanı
α	: Absorpsiyon katsayısı
Au	: Altın
BW	: Bant genişliği (Bandwidth)
c	: Işık hızı
Cr	: Krom
d	: Absorpsiyon bölgesinin kalınlığı
D	: Tanecik büyüklüğü
e	: Elektronun yükü
E	: Elektrik alan
E_{FM}	: Metalin Fermi seviyesi
E_{FS}	: Yarıiletkenin Fermi seviyesi
E_g	: Yarıiletkenin bant aralığı
E_c	: Yarıiletkenin iletkenlik bandı minimumu
E_v	: Yarıiletkenin valans bandı maksimumu
ϵ_0	: Dielektrik sabiti
ϵ_r	: Absorpsiyon bölgesinin dielektirik sabiti
h	: Planck sabiti
I	: Akım
I_{ph}	: Fotoakım
$I_{karanlık}$	: Karanlık akım
J	: Akım yoğunluğu
k	: Momentum vektörü
κ	: Kırılma indisinin sanal kısmı
L	: İnterdigital elektrotun parmakları arasındaki mesafe
μ	: Mobilite
n	: Kırılma indisi
η	: Kuantum verimi
O	: Oksijen

Φ	: İş fonksiyonu
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
P_0	: Optik güç
θ_B	: XRD grafik pikinin Bragg kırınım açısı
r	: Fresnel yansıma katsayısı
R	: Foto yanıt
R_s	: Örnek direnci
S	: Foto duyarlılık
T	: Geçirgenlik
τ	: Fotodedektör cevap süresi
τ_{tr}	: Taşıyıcı geçiş zamanı
τ_{R_sC}	: RC zaman sabiti
τ_{rise}	: Yükselme zamanı
V	: Voltaj
ν	: Foton frekansı
ν_s	: Taşıyıcı sürüklenme hızı
W_{dep}	: Arınmış bölge genişliği
χ	: Afinite
Zn	: Çinko
ZnO	: Çinko oksit
σ	: İletkenlik
λ	: Dalga boyu

Kısaltmalar	Açıklama
CSP	: Kimyasal püskürtme yöntemi (Chemical Spray Pyrolysis, CSP)
CVD	: Kimyasal buhar depolama yöntemi (Chemical Vapour Deposition, CVD)
DI	: De-iyonize
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS)
FWHM	: Yarı maksimumdaki tam genişlik (Full Width at Half Maximum, FWHM)
IDT	: Tarak şekilli elektrot (Inter Digital Transducer, IDT)
LED	: Işık yayan diyot (Light Emitting Diode, LED)

MBE	: Moleküler ışın demeti yöntemi (Molecular Beam Epitaxy, MBE)
MÖ	: Milattan önce
MSM	: Metal-yarıiletken-metal (Metal Semiconductor Metal, MSM)
PFCVAD	: Atmalı filtreli katodik vakum ark depolama yöntemi (Pulsed Filtered Cathodic Vacuum Arc Deposition, PFCVAD)
PMT	: Fotoçoğaltıcı tüp (Photomultiplier Tube, PMT)
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme yöntemi (Physical Vapour Deposition, PVD)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM)
UV	: Mor ötesi (Ultraviolet, UV)
XRD	: X-Işınımı Kırınımı (X-Ray Diffraction, XRD)



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZnO TABANLI FOTODEDEKTÖR TASARIMI, FABRİKASYONU ve KARAKTERİZASYONU

Ümit DOĞAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Kamuran KARA KOÇ

Tez çalışması kapsamında atmalı filtreli katodik vakum ark depolama (Pulsed Filtered Cathodic Vacuum Ark Deposition, PFCVAD) yöntemi ile büyütülmüş farklı tavlama sıcaklıklarına sahip n-tipi çinko oksit (ZnO) ince film örneklerin yapısal özellikleri, optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. ZnO ince film örneklerin Hall ölçümleri yapılmıştır ve ince film örneklerin taşıyıcı konsantrasyonları, öz dirençleri ve mobiliteleri belirlenmiştir. Hall Olayı ölçümü sonucunda elde edilen veriler tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak karşılaştırılmıştır. ZnO ince filmlerin geçirgenlik ölçümleri yapılmış ve bu ölçüm sonuçlarından yararlanılarak enerji bant aralığı hesapları yapılmıştır. Daha sonrasında tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak ZnO ince filmlerin enerji bant aralıkları karşılaştırılmıştır. ZnO ince film örneklerin XRD ve SEM ölçümleri alınmış ve alınan ölçümlerden ZnO'nun tanecik büyüklükleri hakkında bilgiler elde edilmiştir. Örneklerin EDS ölçümleri yapılmış ve elemental kompozisyonları hakkında bilgiler elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen n-tipi ZnO ince film örnekler tarak şekilli (Inter Digital Transducer, IDT) maske kullanılarak fabrikasyon sürecinden geçmiştir ve metal-yarıiletken-metal (Metal Semiconductor Metal, MSM) fotodedektör yapısında aygıt fabrikasyonu yapılmıştır. Üretilen MSM fotodedektörlerin optiksel ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. MSM fotodedektörler solar simülatör lambası altında filtresiz ve 370 nm filtre kullanılarak +5 V besleme voltajı altında fotoiletkenlik ve -5 V - +5 V aralığında akım-voltaj (I-V) ölçümleri

yapılmıştır. Alınan ölçüm sonuçları ile fotodedektörün dedektör parametreleri belirlenmiş ve bulunan sonuçlar tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Fotodedektörün ideal çalışma besleme gerilimini belirlemek adına 0.25 V – 5 V arası besleme gerilimi altında 0.25 V besleme gerilimi aralıkları ile fotoiletkenlik ölçümleri alınmıştır.

Tez çalışması kapsamında incelenen tüm örnekler PFCVAD yöntemi ile Çukurova Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde büyütülmüştür. ZnO ince film örneklerin geçirgenlik, XRD ve Hall Olayı ölçümleri yine Çukurova Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde yapılmıştır. Tez kapsamında incelenen tüm MSM ZnO fotodedektörlerin fabrikasyonunda litografi yöntemlerinden fotolitografi yöntemi kullanılmıştır. Fabrikasyon süreci İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarı bünyesi altında yer alan İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında fabrikasyonu yapılan tüm ZnO MSM fotodedektör örneklerin optiksel ve elektriksel karakterizasyonları için yapılan tüm ölçümler yine İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde yer alan Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Eylül 2020, 71 sayfa.

Anahtar kelimeler: Fotodedektör, UV Fotodedektör, MSM, ZnO, PFCVAD

SUMMARY

M.Sc. THESIS

DESIGN, FABRICATION and CHARACTERISATION of a ZnO-BASED PHOTODETECTOR

Ümit DOĞAN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Kamuran KARA KOÇ

The structural, optical and electrical properties of the n-type zinc oxide (ZnO) thin film samples with different annealing temperatures grown by pulsed filtered cathodic vacuum arc deposition have been investigated within the scope of this thesis work. Utilizing the hall measurements, a carrier concentrations, resistivity and mobility of ZnO thin film samples were obtained. The data obtained as a result of Hall Effect measurement were compared based on different annealing temperatures. By using the results of transparency measurements of ZnO thin films, the band gap energy has been calculated and further the obtained data were compared based on different annealing temperature. The information about a grain sizes of ZnO in thin films was obtained from the XRD and SEM measurements. The informations about elemental composition of samples was obtained from EDS measurements.

The n-type ZnO samples analyzed within the scope of the study went through the interdigital electrode mask fabrication process where device fabrication was carried out in the metal-semiconductor-metal (Metal Semiconductor Metal, MSM) photodetector structure. The optical and electrical properties of the fabricated MSM photodetectors were also analyzed. The MSM photodetectors were studied under solar simulator lamp without filter and also under 370 nm filter, photoconductivity was analyzed under +5 V supply voltage and current-voltage (I-V)

measurements were performed between range of -5 V and +5 V. As a result of aforementioned measurements the detector parameters were determined and were compared based on different annealing temperatures. The photoconductivity measurements were performed with 0.25 V intervals in supply voltage range of 0.25 V to -5 V in order to determine an ideal working supply voltage of photodetector.

All samples analyzed within the scope of this thesis have been grown by PFCVAD method in the Physics Department at Çukurova University, Faculty of Science. The transparence measurements, XRD and Hall Effect measurements of ZnO thin film samples were carried out in the Physics Department of Çukurova University. Throughout this thesis work all ZnO MSM photodetectors were fabricated by employing the photolithography, one of widely used lithography methods. The fabrication process was carried out in the Advanced Lithographic Methods Laboratory, which is under constitution of the Nano and Optoelectronic Research Laboratory at Istanbul University, Faculty of Science. The optical and electrical characterization of all ZnO MSM type photodetector samples fabricated within the scope of thesis were carried out at the Nano and Optoelectronics Research Laboratory at Istanbul University, Physics Department.

September 2020, 71 pages.

Keywords: Photodetector, UV Photodetector, MSM, ZnO, PFCVAD

1. GİRİŞ

Günümüzde teknoloji hayatımızın her alanında bulunmaktadır. Son yıllarda bilim adamlarının katkılarıyla teknolojik cihazlarda son derece büyük gelişmeler olmaktadır ve cihazların boyutları gittikçe küçülmektedir. Bu çalışmalar kapsamında teknolojik aygıtların boyutlarının değişmesinden ziyade, adının ve yönünün değişmesine de neden olmuştur. Birçok alanı içinde bulunduran (fizik, kimya, biyoloji, uzay ve elektronik vb.) ve çok büyük bütçelerin ayrıldığı bu yeni bilime nanoteknoloji denilmektedir.

Nanoteknoloji, maddeyi nanometre seviyesinde işleyerek ve bu boyutlarda maddenin kazandığı değişik fiziksel, kimyasal, biyolojik, özelliklerini de kullanarak çalışan cihazlar ve sistemler elde etmeyi amaçlamaktadır [1]. Nanoteknoloji alanında üretilen aygıtların temeli katıhal fiziği uygulamalarına dayanmaktadır. Katıhal fiziği uygulamalarında ise yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. Yarıiletken yapıları n-, p-tipi ve asal yarıiletkenler olarak üç gruba ayırabiliriz. Yarıiletkenler katkılanarak n- veya p-tipi olarak elde edilebilir. Aynı zamanda doğası gereği de kendiliğinden n- veya p-tipi olarak bulunabilirler.

Yarıiletken malzemeler, çok katmanlı üretilebildiği gibi ince film şeklinde de üretilebilmektedir. İnce filmler genel olarak, bir alttaş üzerine büyütülmek istenen malzemenin çeşitli yollarla büyütülmesi işlemi sonucu oluşturulur. Günümüz teknolojisinde geniş, yüksek çözünürlüklü ekranlar, entegre devreleri, transistörler, güneş pilleri ve ışık yayan diyotlar gibi elektronik ve optoelektronik alanda kullanılan birçok aygıt ince film teknolojisi ile üretilmiştir.

Tez çalışması boyunca kullanılan örnekler, kendiliğinden n-tipi çinko oksit (ZnO) ince filmlerdir. ZnO toksik olmayan bir malzeme olması ve ucuz olması ile birlikte geniş bant aralığı ve yüksek eksiton bağlanma enerjisi gibi özelliklerinden dolayı nanoteknolojide yarıiletken aygıt tasarımında oldukça fazla kullanılmaktadır.

ZnO oda sıcaklığında 3.25 eV'luk bant aralığına ve 60 meV'luk eksiton bağlanma enerjisine sahiptir. Bu nedenle ZnO kısa dalgaboylu lazer diyot ve LED gibi elektromanyetik spektrumun mor ötesi (ultraviole, UV) bölgesinde çalışan cihazlar için optik kaynak olarak da kullanılabilecek önemli bir malzemedir [2].

Günümüz teknolojisinin ilerlemesi ile birçok yöntemle örnek büyütmek mümkündür. Bunlardan bazıları moleküler ışın demeti yöntemi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) [3], kimyasal püskürtme yöntemi (Chemical Spray Pyrolysis, CSP) [4], fiziksel buhar biriktirme yöntemi (Physical Vapour Deposition, PVD) [5], kimyasal buhar depolama yöntemi (Chemical Vapour Deposition, CVD) [6] ve atmalı filtreli katodik vakum ark depolama yöntemi (Pulsed Filtered Cathodic Vacuum Arc Deposition, PFCVAD)'dir [7]. Tez kapsamında çalışılan örnekler atmalı filtreli katodik vakum ark depolama yöntemi (PFCVAD) ile üretilmiştir. PFCVAD yöntemi ile çalışılmasının avantajları ve dezavantajları mevcuttur. İnce film morfolojisi üzerindeki yüksek kontrole sahip olunması, düzlemsel olmayan alt tabanlarda kaplanacak örneğin yüzeye yüksek oranda tutunmasından dolayı yüksek kalitedeki ince film kaplamaları üretmek ve oda sıcaklığında ki alt taban sıcaklıkları ile üretimin gerçekleşmesi gibi avantajları mevcuttur. Bunların yanında dezavantajları ise küçük alanlarda kaplama yapılabilmesi ve makro parçacık üretimi yapıla bilinmesidir [8].

Geniş bant aralığı ile ZnO, UV bölgede çalışan aygıtlar tasarlanması için uygundur. UV ışık, elektromanyetik spektrumun UV bölgesinde (100 nm – 400 nm dalga boyu aralığında) bulunmaktadır [9]. Bu bölgede UV ışık algılayıcı aygıt olarak UV fotodedektörler kullanılmaktadırlar. Fotodedektörler, gelen elektromanyetik dalgayı algılayıp, ölçülebilir sinyallere çeviren ve kayıt edilmesini sağlayan cihazlardır [9]. Fotodedektörler, öncelikle yüksek duyarlılığa sahip olmalıdırlar, gelen optik sinyal ile aynı oranda fotocevap üretebilmelidirler, düşük karanlık akıma sahip olmalıdırlar ve hızlı cevap sürelerine sahip olmalıdırlar. İdeal bir fotodedektörün sahip olması gereken parametreler bu şekilde sıralanabilir.

Tez kapsamında öncelikle farklı tavlama sıcaklıklarında ve farklı ince film kalınlıklarında üretilen n-tipi ZnO ince filmlerin yapısal, optiksel ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. İncelemeler sonucu ZnO ince film örneklerin tanecik boyutları, ince film kalınlıkları, bant aralıkları ve yüzdece geçirgenlikleri bulunmuştur. Daha sonrasında ZnO ince film örneklerin fotodedektör yapısı tasarımı ve fabrikasyonu yapılarak, fotodedektör çeşitlerinden metal-yarıiletken-metal (Metal Semiconductor Metal, MSM) yapıli fotodektör aygıtı üretilmiştir. Üretilen MSM yapıli fotodedektörün karakterizasyonu yapılmış ve fotodedektör özellikleri incelenmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ÇİNKO OKSİT İNCE FİMLERİN ÖZELLİKLERİ

Çinko oksit (ZnO) MÖ 500 yıllarında Hindistan’da tedavi amaçlı kullanıldığı rivayet edilir. İlk olarak ‘Zincite’ minerali olarak bilinen bu materyal daha sonrasında çeşitli kimyasal yollar ile saflaştırılarak ya da sentetik olarak üretilmektedir [10–12].

Geniş bant aralıklı bir yarıiletken olup, büyük eksiton bağlanma enerjisine sahip olmasından dolayı ZnO’nun kullanım alanları oldukça geniştir. ZnO’nun ince film formu yüksek iletkenliğe sahip, düşük öz dirençli ve saydamdır. Saydam özelliğinden dolayı, yaygın olarak kullanılan ITO’ya da alternatif olan bir malzemedir. ZnO ince filmlerin geçirgenlikleri görünür bölgede ortalama %85 civarındadır. Yüksek frekanslı yüzey aygıtları, LED’ler, UV dedektörler, güneş pilleri, alan yayıcılar, fotodedektörler, piezoelektrik aygıtlar, biyo-sensörler gibi birçok elektronik ve optoelektronik aygıtlar olarak hayatımızda yer alması için çalışmalar sürmektedir. Birçok bilim insanı ZnO’nun optik özellikleri hakkında çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar hem katkılı hem de katkısız ZnO’ler üzerinde yapılmıştır. ZnO ince filmlerin geçirgenlik özelliği genel olarak 0.4-2 μm dalgaboyu aralığındadır. İnce filmdeki taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olarak 2-4 μm dalgaboyu aralığında plazma kenar bölgesi bulunur [13–18]. Aynı zamanda ZnO diğer malzemelere göre hem daha ucuz hem bulunması daha kolay hem de zehirli olmayan bir malzeme olduğundan kullanımı daha avantajlıdır.

2.2. ÇİNKO OKSİT İNCE FİMLERİN ÜRETİLMESİ

İnce film üretim yöntemlerini üçe ayırabiliriz. Bunlar fiziksel yöntemler, sıvı faz kimyasal yöntemler ve hem fiziksel hem kimyasal yöntemlerdir. Vakum Buharlaştırma (elektron demetiyle buharlaştırma) ve Moleküler Işın Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) fiziksel yöntemler grubuna örnek olabilirler. Kimyasal yöntemlere örnek olarak Sol-Jel yöntemini verebiliriz. Fiziksel ve kimyasal üretim yöntemine ise örnek olarak söktürme yöntemlerini (dc, rf, reaktif söktürme, magnetron söktürme, iyon yayıcı söktürme), anodik vakum ark yöntemini ve katodik ark depolama yöntemini (atmalı filtreli katodik vakum ark depolama ve dc katodik vakum ark depolama) verebiliriz. Bu tez kapsamında çalışılan örnekler atmalı filtreli katodik vakum ark depolama yöntemi (Pulsed Filtered Cathodic Vacuum Arc Deposition, PFCVAD) ile üretilmiştir. Bu yüzden diğer üretim süreçlerine değinilmeyecektir.

PFCVAD yönteminde, katot yüzeyinde gelişi güzel ve hızlı hareket eden ark spotuyla plazma elde edilir. Plazma, doğrultuları düzensiz olarak hareket eden, neredeyse eşit yoğunlukta ki negatif ve pozitif (elektriksel olarak nötral) parçacıkların oluşturduğu topluluktur. PFCVAD yönteminde sisteme 20 kV'luk bir gerilim uygulanır (ilk olarak 20 kV ve daha sonrasında 600V uygulanır). Uygulanan bu gerilim ile katot ucunda büyütölmek istenen materyal (ZnO) ile ark spotu oluşturulur. Oluşan bu ark spotu katodu aşındırır ve plazma oluşmuş olur. Bu plazma polarize olarak anottan katoda doğru ilerleyerek alttaşın üzerine doğru düşer ve orada birikir. Bu sayede ince filmimiz depolanmış olur [8].

2.3. FOTODEDEKTÖRLER

Fotodedektörler gelen ışığın malzemenin atomik örgüsü ile doğrudan etkileşimi sonucu ışığı algılayan aygıtlardır. Işık ile aygıtın bu etkileşimi fotodedektörün direnç, indüktans, voltaj ve akım gibi parametrelerinde değişime neden olur [9].

Fotodedektörler teknolojiye önemli uygulama alanlarına sahiptir. Özellikle optiksel haberleşmede oldukça geniş çaplı kullanım alanları mevcuttur. İyi bir fotodedektör, yüksek duyarlılığa, düşük gürültüye, hızlı cevap süresine ve düşük maliyete sahip olmalıdır [19,20].

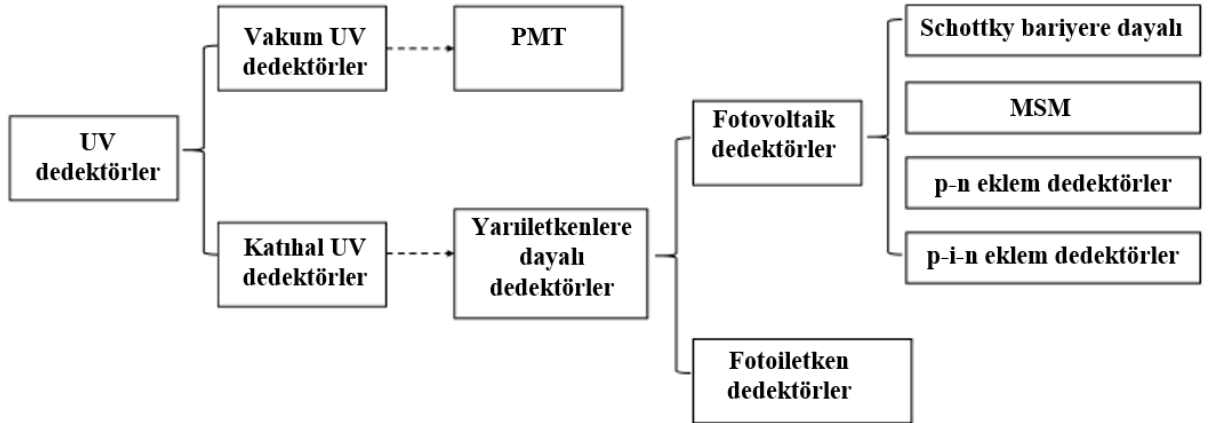
X-ışını ile görünür ışık bölgesi arasında kalan elektromanyetik radyasyon bölgesi (Spektral bant) UV ışık bölgesi ya da morötesi bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölge 10 nm (124 eV) ile 400 nm (3.1 eV) arasında değişen dalga boylarında bulunur [21]. Tablo 2.1'de UV ışık spektrum bölgeleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1: UV bölgeler

UV Tipi	Dalgaboyu Aralığı (nm)	Bant Aralığı Enerjisi (eV)
UV-A	400-300	3.1-3.87
UV-B	320-280	3.87-4.43
UV-C	280-200	4.43-6.2
VUV	200-10	6.2-124

UV-C ve UV-B bölgelerindeki yüksek enerjili ve kısa dalgaboylarındaki UV ışık yeryüzüne ulaşmadan ozon tabakası tarafından emilir. Fakat UV-A bölgesinde daha uzun dalgaboylu UV ışıklar dünya yüzeyine erişebilir ve uzun süre maruz kalındığında cilt kanseri gibi kalıcı hasarlara neden olabilir [22]. Bu nedenlerden dolayı UV ışığın atmosferdeki varlığını izlemek oldukça önemlidir. Bu nedenle UV fotodedektörlerin kullanımı oldukça önemlidir [23].

UV dedektörleri genel olarak Vakum UV dedektörler ve Katıhal UV dedektörler olarak ikiye ayırmak mümkündür. Şekil 2.1’de UV dedektörlerin sınıflandırılması gösterilmiştir. Uzun süreler boyunca UV algılayıcı olarak kullanılan Vakum UV dedektörler Fotoğaltıcı tüplerden (Photomultiplier Tubes, PMTs) oluşmaktadır. Fakat hantal ve çok fazla güç tükettiğinden dolayı kullanımı çok fazla tercih edilmemektedir. Bu durum daha düşük boyutlarda ve düşük güç harcayan güç tasarruflu fotosensörlere duyulan ihtiyacı artırıp yarıiletkenlere dayalı UV dedektörlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Yarıiletken UV dedektörler düşük maliyet, hassas ölçümler yapabilmesi ve düşük güç tüketimi gibi avantajlı özelliklerinden dolayı tıp, çevresel algılama, alev algılama, iletişim alanlarında ve uzay vb. gibi bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [24–26].



Şekil 2.1: UV dedektörlerin sınıflandırılması.

2.3.1. Fotodedektör Karakterizasyonu

Fotodedektörlerin karakterizasyonu için fotodedektörün çalışma dalga boyu, cevap süresi, duyarlılık, bant genişliği ve gürültü gibi fiziksel parametrelerin incelenmesi gerekir. Bu bölümde bu parametrelerin açıklamaları verilmektedir.

2.3.1.1. Absorpsiyon

Enerjinin ortamda soğurulması olayına absorpsiyon denir. Bir yarıiletken üzerine foton düşürüldüğünde eğer bu düşen foton yarıiletkenin bant aralığı enerjisine eşit veya daha büyük enerjiye sahip ise absorpsiyon gerçekleşir. Foton ile uyarım sonucunda valans bandındaki bir elektron iletkenlik bandına çıkar ve arkasında bir boşluk bırakır böylelikle yapıda elektron-boşluk çifti oluşur. Oluşan bu elektron-boşluk çifti yarıiletken içerisinde oluşan iç elektrik alan ile birbirinden ayrılırlar ve bu sayede fotoakım oluşur [27]. Fotodedektörlerde fotoakım, fotonun dalga boyuna, gelen optik güce ve yarıiletkenin absorpsiyon katsayısına bağlıdır. Gelen optik güce bağlı fotoakım,

$$I_{ph} = \frac{P_0(1 - r)}{h\nu} (1 - e^{-\alpha d}) \quad (2.1)$$

formülü ile verilmektedir. Bu ifade de P_0 gelen optik gücü, h Planck sabitini, r hava ile yarıiletken arasındaki Fresnel yansımaya katsayısını, ν foton frekansını, d absorpsiyon bölgesinin kalınlığını ve α absorpsiyon katsayısını göstermektedir. Absorpsiyon katsayısı gelen fotonun dalga boyuna bağlıdır. Dolayısıyla örnek seçimi hangi bölgede çalışmak isteniyor ise yarıiletken malzemenin absorpsiyon katsayısı incelenerek istenilen bölgeye uygun dalga boyu aralığına sahip örnek tercih edilir. Bundan dolayı fotodedektör tasarımında örnek tercihleri istenilen dalga boyu aralığında en yüksek absorpsiyon katsayılı yarıiletkenler tercih edilir [27].

Yarıiletken fotodedektör aygıtı tasarımı yapmak için örnek seçimi yapılırken bir diğer önemli parametre de örneğin direk bant aralıklı yarıiletken olmasıdır. Eğer optik geçişler aynı momentum vektöründe (k) gerçekleşiyorsa yarıiletken direk bant aralıklı yarıiletkenidir. Diğer bir yandan optik geçiş farklı momentum vektörlerinde gerçekleşiyor ise yarıiletken indirek bant aralıklı yarıiletkenidir. İndirek bant aralıklı yarıiletkenlerdeki optik geçişlere fononlar da katkıda bulunduğu için ısı açığa çıkacaktır ve bu durum karanlık akımın artmasına neden olacağından aygıt performansında ciddi düşüşlere neden olacaktır. Aynı zamanda indirek bant aralıklı

yarıiletkenlerde absorpsiyon katsayısı yavaş bir artış gösterirken, direk bant aralıklı yarıiletkenlerde absorpsiyon katsayısı artışı bant aralığı enerjisinin hemen üzerinde başlayıp hızla artar [27].

2.3.1.2. Foto Yanıt (Responsivite) ve Kuantum Verimi

Dedektörün yanıtı (Responsivite), fotodedektörün üzerine düşen optik güç başına fotodedektörde oluşan akım (fotoakımın) olarak tanımlanır. Birimi A/W'dır. Foto yanıt,

$$R = \frac{I_{ph}}{P_0} \quad (2.2)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada I_{ph} fotodedektör üzerine gelen foton sonucu oluşan fotoakımı göstermektedir ve akım-zaman grafiklerindeki maksimum pik değerleridir. Gelen optik güç P_0 , optik güç ölçme cihazı (pyranometer) ile ölçülür ve fotodedektör üzerindeki aktif bölgenin alanı ile çarpılarak bulunur. Fotodedektörün üzerine gelen fotonların ne kadarının elektron-boşluk çifti oluşturduğunun sayısı ise 'kuantum verimi' olarak ifade edilir. İç kuantum verimi ve dış kuantum verimi olarak iki kuantum verimi ifadesi vardır. Dış kuantum verimi, fotodedektöre gelen foton başına oluşan elektron-boşluk çiftlerinin kontaklara ulaşanlarının sayısıdır. İç kuantum verimi ise gelen foton başına fotodedektörde oluşan elektron-boşluk çiftlerinin sayısıdır. İç kuantum verimi sadece absorpsiyon bölgesinde ki verimi (ayrılan elektron-boşluk çiftlerinin kontaklara ulaşmadan önceki verimi) verirken dış kuantum verimi bütün yarıiletkenin verimini verdiği için fotodedektör veriminden bahsedildiğinde daha çok dış kuantum verimi ifade edilir. Kuantum verimi,

$$\eta = R \frac{hc}{e\lambda} = R \frac{hv}{e} = \frac{I_{ph}/e}{P_0/hv} \approx (1 - e^{-\alpha d}) \quad (2.3)$$

ifadesi ile tanımlanır. Burada h Planck sabitini, c ışık hızını, v foton frekansını, e elektronun yükünü, λ gelen ışığın dalgaboyunu göstermektedir. Denklem 2.3'ten de anlaşılacağı gibi absorpsiyon katsayısı ve absorpsiyon tabakasının kalınlığı da kuantum verimini etkileyen önemli parametrelerdendir. Fotodedektörün absorpsiyon kalınlığının artması kuantum verimini artırır fakat absorpsiyon kalınlığının artması ayrılan elektron boşluk çiftlerinin kontaklara ulaşma süresini arttıracığından dolayı fotodedektörün hızının düşmesine neden olacaktır [27].

2.3.1.3. Bant Genişliği ve Cevap süresi

Fotodedektör aygıt tasarımı için dikkate alınacak diğer önemli parametreler bant genişliği ve cevap süresidir. Fotodedektörün saniyede ne kadar veri işleyebildiğinin bir ölçütü bant genişliğidir. Fotodedektör üzerine gelen foton sayesinde oluşan elektron-boşluk çiftlerinin ayrılarak arınmış bölgeye ulaştığı andaki süre ise cevap süresi olarak tanımlanır. Fotodeektörün cevap süresi ne kadar kısa olursa dedektörümüz o kadar hızlı demektir. Fotodedektörün cevap süresi için aşağıdaki ifadeyi kullanabiliriz.

$$\tau = \tau_{tr} + \tau_{R_sC} \quad (2.4)$$

Burada τ_{tr} taşıyıcı geçiş zamanı ve τ_{R_sC} RC zaman sabiti şu şekilde yazılabilir;

$$\tau_{tr} = \frac{W_{dep}}{v_s} \quad (2.5)$$

ve

$$\tau_{R_sC} = R_s \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{W_{dep}} \quad (2.6)$$

Bu ifadelerde verilen v_s taşıyıcı sürüklenme hızını, W_{dep} arınmış bölge genişliğini, R_s örneğin direncini, A fotodedektörün etkin bölgesinin alanını, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitini ve ϵ_r absorpsiyon bölgesinin dielektirik sabitini temsil etmektedir [27].

Bant genişliği ise geçiş zamanı ve RC zaman sabiti ile ilişkilidir ve şu şekilde ifade edilebilir;

$$BW = \frac{1}{2\pi(\tau_{tr} + \tau_{R_sC})} \quad (2.7)$$

Burada genellikle $\tau_{R_sC} \gg \tau_{tr}$ olduğundan $\tau_{R_sC} \approx \tau$ olarak düşünülebilir. Yüksek hızdaki çalışmalarda eklem kapasitansının oldukça küçük olması tercih edilir. Yukarıda Denklem 2.5 ve Denklem 2.6'de görüldüğü gibi arınmış bölge genişliğini artırdıkça fotodedektörün kapasitansıda küçülecektir. Arınmış bölgeyi arttırdığımız durumda RC zaman sabiti azalırken absorpsiyonu ve bu sayede kuantum verimini ve fotodedektörün kapasitansını arttıracaktır. Örnek vermek istersek, optik haberleşme sistemlerinde bulunan hızlı optik sinyallerin dedekte edilmesinde eğer RC zaman sabiti büyük ise dedektör hızlı pulslara yanıt veremeyecek ve gelen

bilginin büyük bir kısmı kaybolacaktır [28]. Fakat RC zaman sabitinin azalması ile geçiş zamanı artacağından fotodedektörün hızı azalacaktır. Anlaşılacağı üzere absorpsiyon bölgesinin kalınlığının optimizasyonu, yüksek kuantum verimli ve yüksek hızlı fotodedektör tasarımlarında oldukça önem teşkil etmektedir.

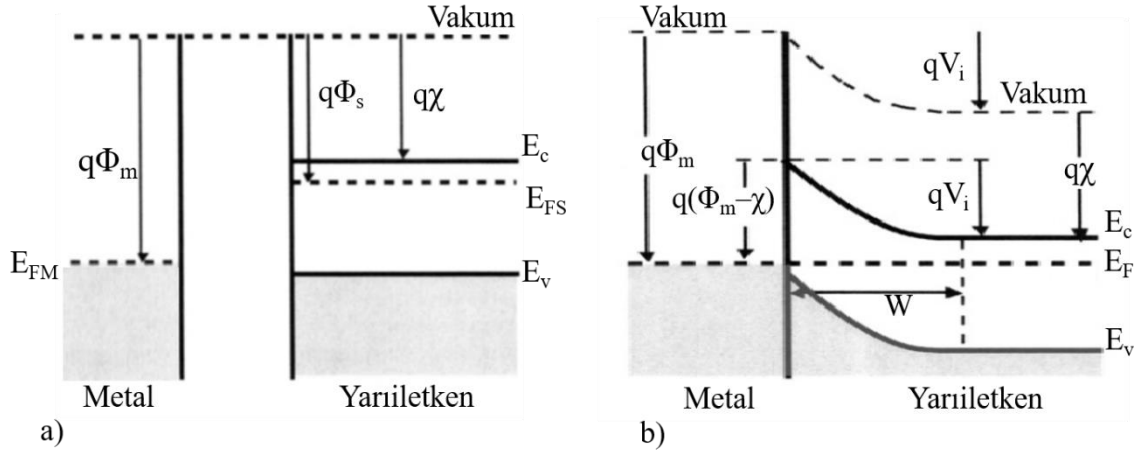
2.3.1.4. Gürültü

İdeal bir fotodedektörde, aygıt üzerine gelen optik sinyal ile çıkış sinyalinin oranı eşit olmalıdır. Fakat her zaman çıktı sinyalinde farklılıklar olur ve sinyalde azalmalar belirsizlikler meydana gelir. Fotodedektörün kalitesini ve limitlerini etkileyen bu durum ‘gürültü’ parametresi olarak ifade edilir.

Yarıiletken içerisinde ısı arttıkça fonon sayısı da artacaktır bundan dolayı taşıyıcı ile fononlar arasındaki çarpışmalar artacaktır. Bu nedenden dolayı oluşan gürültüye “termal gürültü” adı verilir. Gürültü kaynaklarından biri de “Poisson gürültü” olarak bilinen gürültü kaynağıdır. Fotodedektör üzerine gelen fotonların farklı kalınlık bölgelerinde absorplanması sonucu oluşan elektron-boşluk çiftlerinden akıma farklı zamanlarda katkı gelmektedir. Bundan dolayı ölçülen çıkış sinyalinde belirsizlikler oluşur ve bu durum Poisson noise olarak bilinmektedir. Bir diğer gürültü kaynağı da düşük frekanslarda baskın olan ve oluşan elektron-boşluk çiftlerinin düşük enerjili potansiyel bariyerlerle karşılaşması sonucu oluşan gürültüdür. Bu gürültü tipine “ $1/f$ gürültü” olarak bilinmektedir. Diğer bir gürültü kaynağı da fotodedektör içerisindeki tuzak seviyelerinde elektron-boşluk çiftlerin oluşması nedeni ile oluşan “üretim-rekombinasyon” gürültüsüdür [29,30].

2.3.2. MSM Fotodedektörler

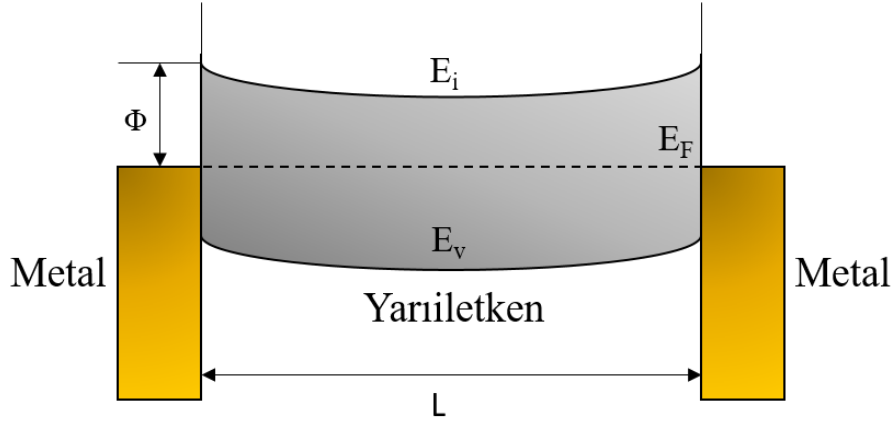
ZnO tabanlı fotodedektör tasarımlarından biri de metal-yarıiletken-metal (metal-semiconductor-metal, MSM) yapıli fotodedektörlerdir. MSM yapıli fotodedektörler temelinde yanyana iki schottky kontakten meydana gelirler. Şekil 2.2’de bir metal ile n-tipi bir yarıiletkenin bir araya getirildiğinde oluşan bant yapısı bulunmaktadır.



Şekil 2.2: Metal ile n-tipi yarıiletkenin oluşturduğu bant yapısı a) denge durumu öncesi, b) denge durumu sonrası.

Metal ile yarıiletken termal dengeye ulaştığı durumda Fermi seviyeleri eşitlenir. Fermi seviyelerinin eşitlenmesi ile metalin iş fonksiyonu olan $q\Phi_m$ yarıiletkenin afinitesi olan $q\chi$ 'den büyük olduğu için yarıiletkenden metale doğru bir yük birikmesi olur ve bantlar bükülür. Bunun sonucunda metal ile yarıiletken arasında arındırılmış bölge oluşur. Ayrıca bantların bükülmesi sonucu taşıyıcılar için bir bariyer oluşur ve bu bariyere Shottky bariyeri denir. Bu yapıya negatif bir besleme gerili uygulandığında Shottky bariyeri büyür ve arınmış bölge genişler. Bunun sonucu olarak da fotoakım artar [31].

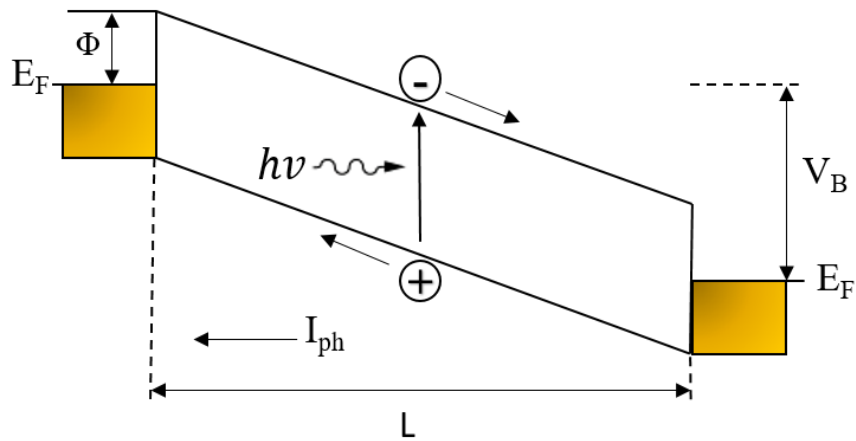
Yarıiletkenin iki tarafının üzerine metal kaplanılarak MSM yapılı fotodedektörler yapılır. MSM yapılı fotodedektörler temelinde yukarıda anlatıldığı gibi iki Shottky kontakdan meydana gelir fakat kontaklar üzerine voltaj uygulandığında bir taraf düz polarlanırken diğer taraf ters polarlanır. Kontaklara besleme voltajı uygulanmadığı durumda fotodedektörün bant yapısı Şekil 2.3'teki gibi olur.



Şekil 2.3: Besleme uygulanmadığı durumda n-tipi ZnO MSM fotodedektör bant yapısı.

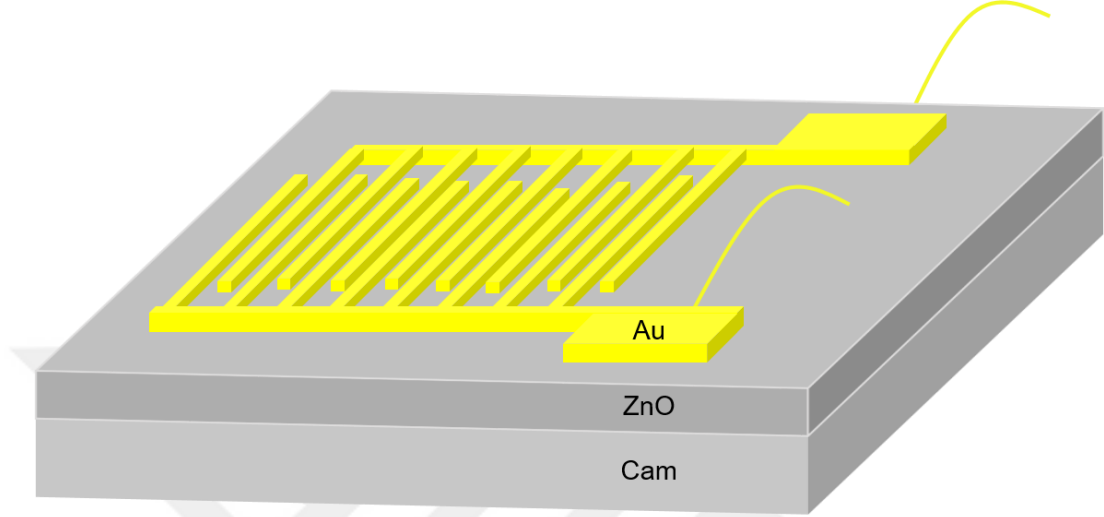
Kontaklar arasına besleme voltajı uygulandığında kontaktardan biri düz diğeri ise ters polarlanmış olacağından, ters polarlanmış bölge tarafındaki arınmış bölge genişler. Gerilim arttırıldığında ve belli bir gerilime ulaşıldığında arınmış bölge genişliği artarak diğer kontağa ulaşır. Bu durumda bant bükülmesi ortadan kalkarak bantlar eğimli düz bir yapı şeklini alır [32].

Fotodedektöre bu besleme voltajı altında ışık düşürüldüğünde elektron-boşluk çiftleri oluşur. Oluşan fototaşıyıcılar kontaktara doğru hareket ederek toplanır ve I_{ph} fotoakımı meydana getirir. Şekil 2.4'te besleme gerilimi altında bantların durumu görülmektedir.



Şekil 2.4: Besleme gerilimi altında n-tipi ZnO MSM fotodedektörün bant yapısı.

MSM fotodedektörler farklı kontak şekilleri ile yapılabilirler. IDT bunlardan bir tanesidir ve taraklı bir yapıya sahiptir. Kullanılan maske Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Tez çalışmasında tasarlanan MSM fotodedektörün yapısı Şekil 2.5'te verilmektedir.



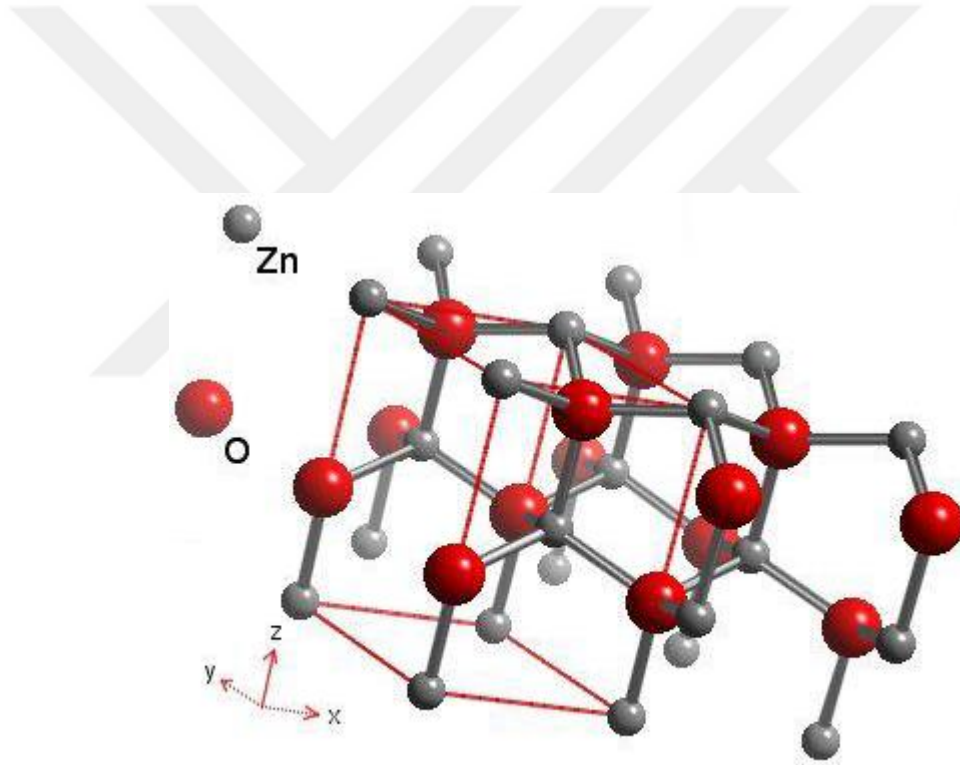
Şekil 2.5: MSM fotodedektör yapısı.

Aygıt tasarımında kontaklar arası mesafe ve kontak boyutları fotodedektörün hızını belirleyen faktörlerdendir. Kontak aralığının artması ve kontak boyutlarının büyümesi ile aygıtın hızı azalmaktadır. Bundan dolayı kontak boyutlarını ve aralıklarını küçültmek aygıtın hızını arttıracaktır. Fakat kontaklar arası mesafenin azalması ile aygıt içerisindeki elektrik alan artacağından aygıtın karanlık akımı da artacaktır. Bu durum fotodedektörün kazanç faktörünü azalmasında etkilidir [32].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. ÖRNEK YAPISI

ZnO doğasında 3,26 eV geniş bant aralığına sahip bir direk bant aralıklı yarı iletkenidir. Zn altıncı grup elementi ve O ikinci grup elementi olduğundan ZnO II-VI grubu elementleri arasında yer alır. ZnO'nin kristal yapısı hekzagonal (altıgen) wurtzite yapıdır. Şekil 3.1'de ZnO'nin kristal yapısı görülmektedir. Wurtzite yapı birim hücreleri dört atom içeren iki iç içe geçmiş hekzagonal yapının birleşiminden oluşur. Yapıdaki örgü parametreleri $a = b \neq c$ ve $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ şeklindedir [8,33].



Şekil 3.1: ZnO'nin kristal yapısı [33].

ZnO doğasında n-tipi olan bir yarıiletkenidir. Genel olarak n-tipi olmasının sebeplerinin yapıda bulunan boşluklar ve ara yerlerde bulunan çinko atomlarının olduğu bilinsede son yıllardaki çalışmalarda, hemen her büyütme ortamında yer alabilecek hidrojen gibi istenmeyen kirliliklerin donörler gibi davranarak yapıda n-tipi iletkenliği sağlayabileceği yer almaktadır [34].

3.2. ÖRNEK FABRİKASYONU

Fabrikasyon teknikleri, mikron ve mikron-altı boyutlarda üretilen yarıiletken tabanlı elektronik ve optoelektronik aygıtların üretilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Fabrikasyon aşamasını iki tür litografiye ayırmak mümkündür. Bunlar fotolitografi ve iyon/elektron demeti litografisidir. Bu tez çalışmasında fabrikasyonu yapılan örneklerin hepsi fotolitografi tekniği kullanılarak şekillendirilmesi yapılmıştır. Bundan dolayı bu kısımda fotolitografi aşamalarından bahsedilecektir.

Fotolitografi tekniği mikro elektronik aygıt üretiminde yaygın olarak kullanılan bir fabrikasyon tekniğidir. Temel olarak ışık ile şekillendirme prensibine dayanır. İlk olarak ışığa duyarlı bir malzeme (fotodirenç) örnek yüzeyine kaplanır ve daha sonra örnek üzerinde oluşması istenen desenin yazdırılmış olduğu bir maske üzerine UV ışık uygulanır ve maskedeki desenin örnek yüzeyi üzerinde elde edilmesi sağlanır. Kullanılan maskeler kuvars üzerine krom kaplanarak özel olarak tasarlanır ve geliştirilir. Maskeler fabrikasyonu yapılacak olan aygıtların şekline ve boyutlarına göre özel olarak tasarlanır.

Örnek yüzeylerinin çok düşük boyutlarda (mikro boyutlarda) desenlemesinde kullanılan gelişmiş bir teknik olan fotolitografi çalışmalarını yapmak için temiz oda koşullarına gereksinim duyulur. Düşük boyutlarda (mikron veya mikron-altı) şekillendirme yapılan örneklerin, fabrikasyon sürecinde veya daha sonrasında, atmosferde bulunan gözle görülemeyen mikron boyutlarında oldukça fazla sayıda olan parçacıkların yer alması, oluşturulan aygıtın optik veya elektriksel özelliklerini olumsuz yönde etkiler.

Bu tez çalışması kapsamında yer alan ve incelenen tüm örneklerin fabrikasyon çalışmaları İstanbul Üniversitesi Fizik Bölümü Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarları bünyesinde bulunan İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı'nda gerçekleştirildi. İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı bünyesinde kurulan temiz oda, içerisinde ft^3 hacim başına 0.5 mikron boyutunda olan partikül (parçacık) sayısı 10, 100 ve 1000 olan üç bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler sırasıyla 'on sınıfı' (ISO 4 sınıfı), 'yüz sınıfı' (ISO 5 sınıfı) ve 'bin sınıfı' (ISO 6 sınıfı) olarak adlandırılan bölümlerdir. Fotodirencin yapısı sarı ışıktan etkilenmediği için fotolitografinin metalizasyon aşamasına kadar olan süreçleri 'sarı oda' olarak adlandırılan 100 sınıfı laboratuvarda gerçekleştirildi. Örnekler IDT geometrisinde hazırlandı.

Fotolitografi sürecinde aşağıdaki adımları sıralamak mümkündür.

1. Örneklerin kesilmesi,
2. Örneklerin temizlenmesi,
3. Fotodirenç kaplama,
4. Pozlama,
5. Metalizasyon (metal kaplama),

3.2.1. Örneklerin Kesilmesi

Tez kapsamında fabrikasyonu yapılan örnekler cam üzerine ince film olarak büyütülmüş ZnO örneklerdir. Örneklerin cam alttaşlarının boyutları kullanılan maske ve maske hizalayıcı (mask-aligner) cihazı için büyük olduğu için, uygun boyutlar da kesilmiştir. Kesim yapılan örneğin ön yüzeyinden bir doğrultu boyunca elmas uçlu kristal kesme kalemi ile derin bir çizik atıldı. Daha sonra çizik atılan bölgede boyunca hafif baskı uygulandı ve örnek istenilen boyutlarda kesilmiş oldu. Fabrikasyon sürecindeki tüm örnekler 1x1 cm² boyutlarında kesilmiştir.

3.2.2. Örneklerin Temizlenmesi

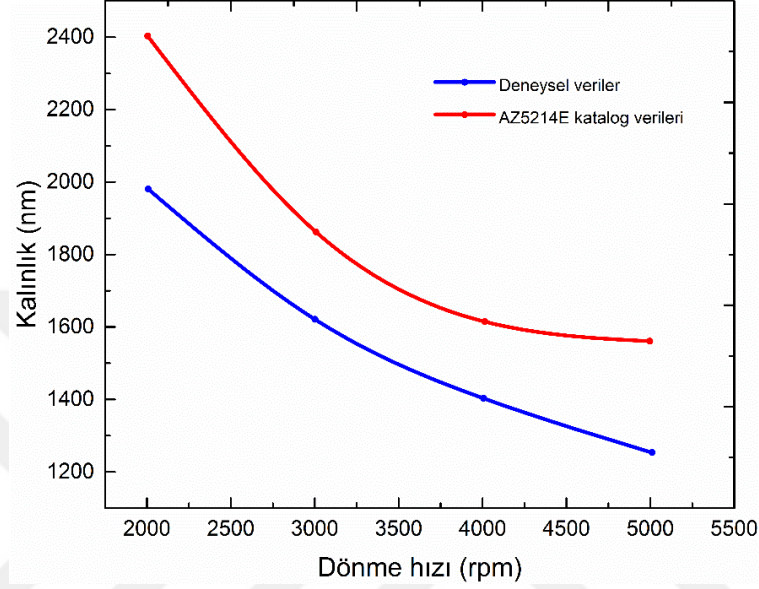
Kesilme sonrasında örneklerin kenarlarında kalan kalıntıları temizlemek hem de örnek yüzeyinde oluşabilecek kirlilikleri gidermek için temizleme işlemi uygulandı. Örnekler saf su (deionised, DI) içerisinde yıkandı ve daha sonrasında saf azot gazı (99.999%) ile kurutulup yüzey üzerinde ki su buharının atılması için 110 °C sıcaklıkta 60 s ısıtıldı.

3.2.3. Fotodirenç Kaplanması

Fotodirenç kaplama işlemi için dönme hızı kontrol edilebilen bir tabla (spin coater) kullanıldı. Tablanın örnek yerleştirilecek olan orta kısmı ince bir kanal ile vakum sistemine bağlıdır. Bu örneğin dönerek savrulmamasını sağlamaktadır. Bu dönerek örnek kaplama sistemi fotodirencin örnek yüzeyine ince ve düzgün bir şekilde kaplanmasında kullanılır.

Fotolitografinin bu aşamasında örnekler pozitif fotodirenç (AZ5214E kodlu) kullanılarak, döndürülerek kaplama yöntemi (spin coating) ile kaplandı. Dönerek kaplama sistemi istenilen dönme hızına programlandı. Yaklaşık 1,4 µm kalınlık elde etmek için dönme hızı 4000 rpm

(rotating per minute, rpm) olarak ayarlandı. Ayarlanan program da ilk olarak 10 s 500 rpm ve sonrasında 4000 rpm'e ulaştıktan sonra dönme süresi 60 s olacak şekilde ayarlandı. Şekil 3.2'de AZ5214E'nin kalınlık-dönme hızı eğrisi verilmektedir ve buradan dönme hızı ile kalınlığın azaldığı görülebilir.



Şekil 3.2: AZ5214E Pozitif fotodirencin dönme hızına karşılık kaplama kalınlığı [35].

Fotodirenç kaplama işlemi süreçleri şu şekildedir;

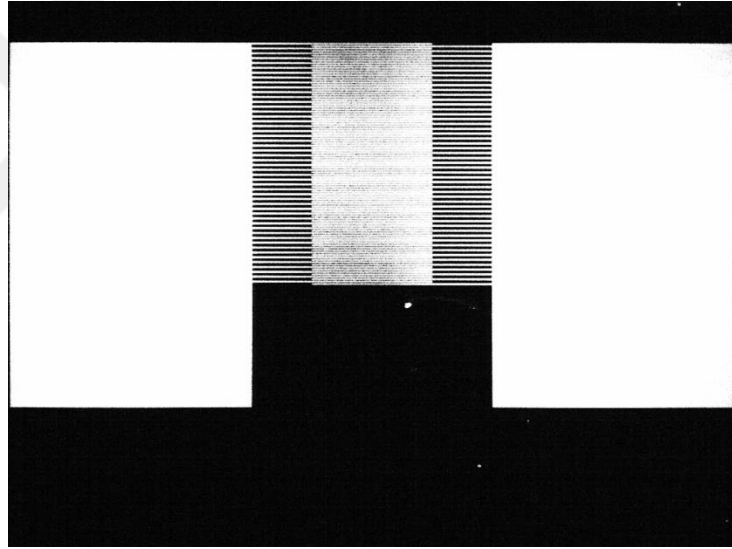
- Döndürülerek kaplama cihazında ki örnekler üzerine AZ5214E pozitif fotodirenci örnek yüzeyine kaplayacak şekilde birkaç damla damlatıldı (yaklaşık 2-3 damla miktarında).
- Üzerine fotodirenç kaplanan örnekler önce 10 s 500 rpm de sonrasında 4000 rpm de 60 s döndürülerek yüzeylerin fotodirenç kaplanması sağlandı.
- Örnekler fotodirenç kaplandıktan sonra 20 s 110 °C'de ısıtıldı. Bu işlem örnek yüzeyine kaplanan fotodirenç çözeltisi içerisindeki çözücüyü buharlaştırmaktadır. Ayrıca fotodirencin örnek yüzeyine daha iyi tutunmasını sağlamaktadır.

3.2.4. Pozlama

Fotodirenç kaplanan ve kurutulan örnekler IDT maske altında, maske hizalayıcıya (SUSS MicroTec MJB4) yerleştirildi. Pozlama işlemi sırasında Maske hizalayıcının Hard Contact ve Soft Contact modlarından Soft Contact modu kullanıldı. Hard Contact mod örnek ile maskenin

tam temas ettiği durumdur. Bu modda örnek maske ile tam temas etmesi için örneğın altından azot gazı verilerek örnek maskeye itilir. Kırılgan örneklerde bu tercih edilmez. Kırılgan örneklerde çözünürlüğü daha kötü olmasına rağmen örneklere zarar vermemek adına Soft Contact mod tercih edilir. Bu tez çalışması kapsamında tüm örneklerde Soft Contact modu kullanılmıştır.

Kullanılan maske cam üzerine UV ışığı geçiremeyecek bölümleri krom kaplıdır. Kullanılan maskenin görüntüsü Şekil 3.3'te verilmiştir. Pozlama işleminde önemli olan maske ile örnek arasındaki boşluğu minimuma indirmektir. Bu sayede düşük boyutlarda ki örnek şekillerinde kırınım desenleri oluşmaz ve istenilen şekil daha net elde edilir.



Şekil 3.3: Fotodedektör fabrikasyonu için kullanılan krom kaplı maske.

Hizalama işleminden sonra örnek 45 s UV ışığa maruz bırakıldı. Maske hizalayıcının UV ışık kaynağı (HBO 350) 405 nm (h-line)'de 23 mW/cm^2 ve 365 nm (g-line)'de 11 mW/cm^2 şiddete sahiptir.

Pozlama işlemi sonrasında örnek uygun çözelti (AZ400K developer: DI su, 1:4) içerisinde bekletilir. Pozitif fotodirenç UV ışığa maruz kaldığında bağlarında zayıflamalar olur. Bu sayede çözücünün içerisine giren örneklerin UV ışığa maruz kalmış kısımları çözülür ve temizlenir. Örnekler 1:4 developer-DI çözeltisi içerisinde 75 s bekletilmelidir. İstenilen şekil örnek üzerinde

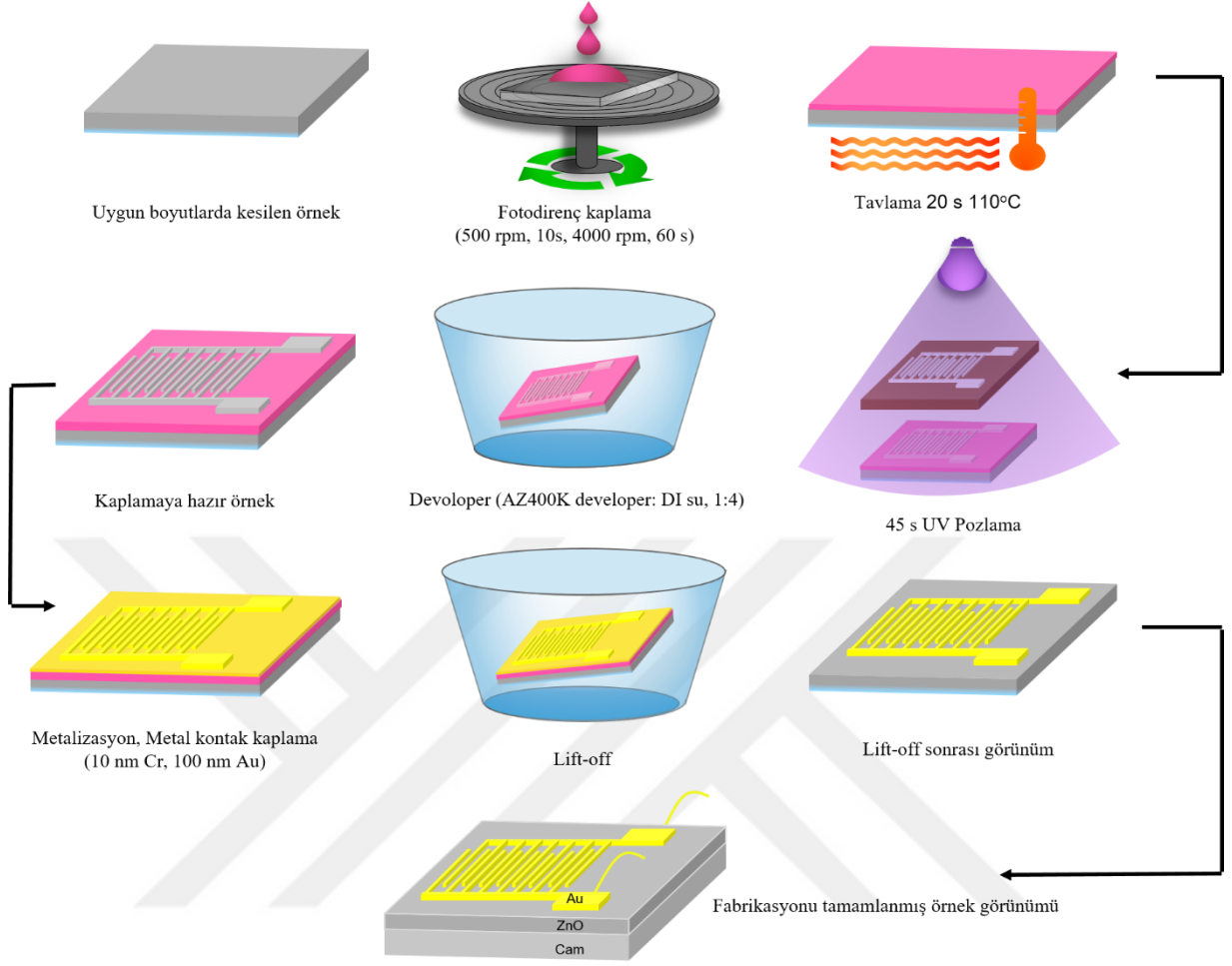
net oluşup oluşmadığı optik mikroskop ile incelenmelidir ve istenilen şekil oluşmamış ise örnekler bir süre daha 1:4 developer-DI çözeltisi içerisinde bekletilmelidir. Tüm örnekler 75 s 1:4 developer-DI çözeltisi içerisinde tutulmuştur. Çözelti içerisinde çıkan örnekler DI su ile yıkanıp daha sonrasında azot gazı ile kurutulmuştur.

3.2.5. Metalizasyon İşlemi

Örnekler üzerinde elektriksel ölçümlerin alınabilmesi için elektrotlara ihtiyaç duyulur. Metalizasyon işlemi örneklerin elektrotlarını oluşturmak ve elektriksel kontak alabilmek için yapılmaktadır.

Metalizasyon işlemi öncesinde fotodirenç kaplı develop edilmiş örnekler fotodirencin bir miktar bozulması için bir süre UV ışığa maruz bırakıldı. Bu işlem metalizasyon sonrasında örneğin üzerindeki metal kaplı fotodirencin daha rahat temizlenmesine olanak sağlar.

Kaplanacak olan metallerin miktarı kaplanmak istenen kalınlığa göre belirlenir. Bu çalışmada metal elektrot kaplama işlemi termal buharlaştırma yöntemi ile gerçekleştirildi. Bu işlem için termal buharlaştırma sistemi (Vaksis twin chamber thermal evaporator) kullanıldı. Termal buharlaştırma işlemleri $\sim 2 \times 10^{-5}$ Torr'luk yüksek vakum ortamında gerçekleştirildi. Örnekler üzerine öncelikle yüzey pürüzlülüğünü arttırmak ve Altının (Au) yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamak için 10 nm Krom (Cr) kaplandı. Krom kaplama sonrasında yüzeye 100 nm Au kaplandı. Daha sonrasında örnek üzerinden metal kaplı fotodirencin kaldırılma işlemi (Lift-off) yapıldı. Örnekler aseton içerisine koyuldu ve örneğin metal kaplı fotodirenç kısımlarının kalkması için bir süre beklendi. Fotodirenç kısımları kaldırıldıktan sonra örnek DI su ile temizlendi. Fotolitografi fabrikasyonu süreçleri şematik olarak Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4: ZnO MSM fotodedektörün fabrikasyon süreçleri.

3.3. FOTODEDEKTÖRLERİN KARAKTERİZASYONU

3.3.1. Yapısal Karakterizasyon

3.3.1.1. Taramalı Elektron Mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM), örneğin yapısını, şeklini, boyutlarını, içeriğini, kristal, yapısını, fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgiler veren ve ayrıca örnek yüzeyinin büyük görüntülerinin oluşturulmasını sağlayan bir cihazdır [36]. 1935 yılında Max Knoll, SEM çalışma prensibini ilk olarak ifade eden kişidir [37]. Daha sonrasında yon Ardenne tarafından 1938 yılında ilk SEM cihazı geliştirildi. 1950 ve 1960 yılları arasında Cambridge Üniversitesinde çalışan Prof. Dr. Sir Charles Oatley ve öğrencileri olan Thomas Eugene Everhart, Richard F. M. Thornley tarafından ticari olarak günümüzde

kullanımda olan SEM cihazlarına yönelik önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir [38]. SEM temel olarak bir elektron üreten tabanca (elektron tabancası), elektron ışınının geçtiği bir sütun, gelen ışının odaklanması için bir dizi lens, örneğin konulduğu bir bölüm ve bu bölümün vakuma alınması için gerekli pompalardan oluşur. SEM'in cihaz gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5: FEI Versa 3D Taramalı Elektron Mikroskobu

3.3.1.2. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

Taramalı Elektron Mikroskobu ile örnek yüzeyi hakkında bilgi alabilirken, Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) ile malzemenin elemental kompozisyonu hakkında bilgi alabiliriz. Elemental kompozisyon elektron-örnek etkileşimi sonucu ortaya çıkar [27]. Yüksek enerjili bir elektron atomun iç kabuğundaki elektrona (K kabuğunda bulunan bir elektron) çarptığı zaman, enerjisi yeterli ise kabuktaki elektrona kopartır ve elektronun konumu boşalır. Atom bu kabuğu hemen dış kabuktan bir elektron (L

kabuğunda bulunan bir elektron) ile doldurur ve bu esnada ortama bir enerji çıkar. Bu enerji karakteristik X-ışını olarak yayılır [36]. Bu karakteristik X-ışınlarının enerjiye bağlı grafiğinden elde edilen pikler bize örneğin elemental kompozisyonlarını göstermektedir.

3.3.1.3. X-Işınımı Kırınımı

X-Işınımı Kırınımı (X-Ray Diffraction, XRD) kristal formundaki örneklerin yapısal analizleri için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. X-ışınları 1 Angstrom civarında dalga boyuna sahiptir ve bu değer bir kristaldeki atomlar arası mesafeye karşılık gelir [8]. Örnek üzerine gönderilen x-ışınları belirli bir kristal formunda dizilmiş olan atomlardan saçılır. Saçılan ışınların oluşturdukları yapıcı girişimler incelenerek malzemenin kristal yapısını belirlemek mümkündür. Saçılan ışınların açıları incelendiğinde malzemenin kristal yapısı, atomların yerleri, kristal veya taneciğin yönelimi, ışınların genlikleri incelendiğinde tanecik boyutları elde edilebilir. Şekil 3.6'da X-ışını kırınımı cihazının bir gösterimi bulunmaktadır.

XRD sistemleri genel olarak bir ışık kaynağı (X-ışınları oluşturmak için), dönüş açısı ayarlanabilen bir örnek tutucu ve bir detektörden (X-ışını dedektörü) oluşur. Örnek, örnek tutucuya yerleştirilir ve üzerine x-ışınları gönderilir, bu esnada örnek döndürülürken saçılan ışınlar detektöre ulaşır. Dedektördeki sinyaller bilgisayar ve gerekli programlar ile okunarak grafik haline getirilir. Elde edilen grafikteki tepe noktaları örneğin karakteristik bilgileri olduğundan, veri tabanındaki bilgiler ile karşılaştırılarak kristal yönelimleri belirlenir. Grafiklerin yarı maksimumdaki tam genişlik (Full Width at Half Maximum, FWHM) değerleri kullanılarak Scherrer denklemi ile tanecik boyutları hesaplanır. Aşağıda, Scherrer formülü ile tanecik boyutunun hesaplanması gösterilmektedir.

$$D = \frac{0.9\lambda}{B(\text{radyan}) \cos(\theta_B)} \quad (3.1)$$

Denklemdaki D tanecik büyüklüğünü göstermektedir. B değeri XRD sonuçlarında ki grafik piklerinin yarı maksimumdaki tam genişliğinin (FWHM) radyan cinsinden değerini göstermektedir, θ_B grafik pikinin Bragg kırınım açısıdır ve λ ölçümde kullanılan x-ışının dalga boyunu göstermektedir [8].



Şekil 3.6: X-Işını Kırınımı cihazı

3.3.2. Optik Karakterizasyon

3.3.2.1. Geçirgenlik

Maddeler üzerlerine gelen elektromanyetik dalganın tamamını ya da bir kısmını ya geçirirler ya absorplarlar ya da yansıtırlar. Bu davranışlar incelendiğinde malzemenin enerji bant aralığı hakkında bilgi edinebiliriz. Tez kapsamında alınan geçirgenlik ölçüm sonuçlarından önce soğurma katsayısı hesapları yapılmış ve daha sonrasında da soğurma katsayısı kullanılarak malzemenin bant aralığı hesapları yapılmıştır. Geçirgenlik ölçümleri Şekil 3.7’de gösterilen Perkin-Elmer Lambda 2S UV/VIS Spektrometresi ile yapılmıştır. Spektrometrenin dalga boyu 200-1100 nm aralığında değişmektedir.



Şekil 3.7: Perkin-Elmer Lambda 2S UV/VIS Spektrometresi [8].

Soğurma katsayısı sabiti α , gösterilmektedir. Soğurma katsayısı, gelen ışığın dalga boyunun ve soğurucu ortamın karakteristiğini gösterir. Işığın iki Δx kalınlığındaki ince plakadan geçtiğini düşünelim. Böyle bir durumda ilk plakadan geçen ışık, ikinci plakadan geçerken daha az şiddete sahip olacaktır. Fakat her iki plakadaki kayıp da aynı oranda olacaktır. Çünkü ikinci plakaya gelen ışık şiddeti az olacağından kayıpta o oranda az olacaktır. Bunu daha fazla plaka içinde söyleyebiliriz. Bu bize soğurma katsayısının gelen ışık şiddetinden bağımsız olduğunu gösterir [8]. Böylelikle aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$-\Delta I = I_T - I_0 = I_0 \alpha \Delta x \quad (3.2)$$

$$\Delta I = -I_0 \alpha \Delta x \quad (3.3)$$

$$\alpha = -\frac{\Delta I}{I_0 \Delta x} \quad (3.4)$$

Katmanların çok düşük kalınlıklarda olduğunu düşünürsek, formül şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{dI}{I_0} = -\alpha dx \quad (3.5)$$

Bu ifade $x=0$ da I_0 ve $x=x$ de I_T olarak integrali alınırsa şu şekilde yazılabilir:

$$\int_0^x \frac{dI}{I_0} = -\alpha \int_0^x dx \quad (3.6)$$

$$\ln\left(\frac{I_T}{I_0}\right) = -\alpha x \quad (3.7)$$

$$I_T = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.8)$$

buradan Beer-Lambert yasası şu şekilde yazılabilir:

$$\alpha = \frac{I}{I(\lambda)} \frac{dI(\lambda)}{dx} \quad (3.9)$$

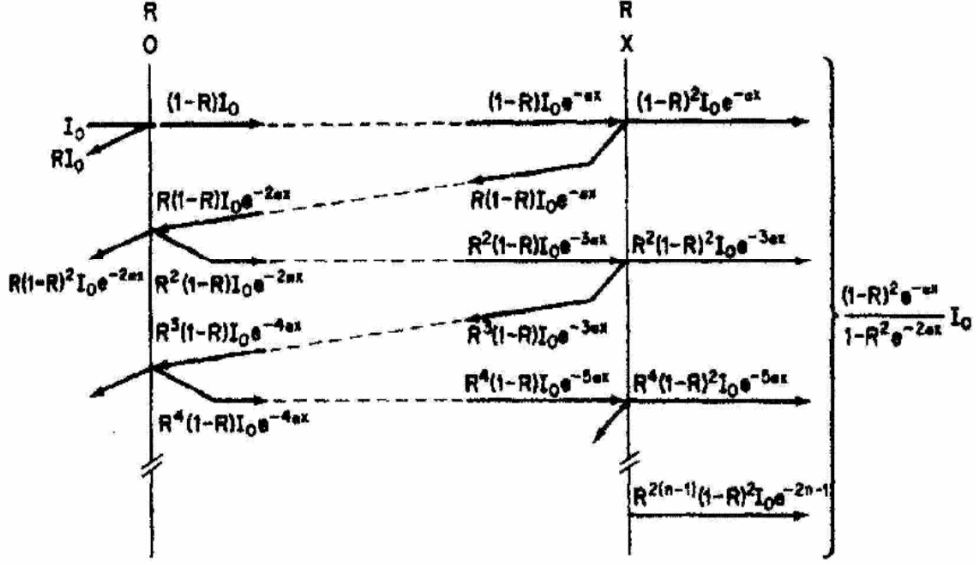
Burada ışık şiddeti $I(\lambda)$ şeklinde gösterilir. Ortam içindeki giden yol x ve α soğurma katsayısı olarak gösterilir. Geçirgenlik hesapları için öncelikle yansıma formüllerine değinmeliyiz. R yansıma olmak üzere;

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2 + \kappa^2}{(n_2 + n_1)^2 + \kappa^2} \quad (3.10)$$

Denklemden n kırılma indisinin gerçek ve κ kırılma indisinin sanal kısmıdır. Görünür bölgede κ , n den çok küçük ($\kappa \ll n$) olduğundan ihmal edilebilir. Bu ihmal sonucu denklem şu şekilde yazılır;

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (3.11)$$

Toplam geçirgenliği hesaplamak için Şekil 3.8’de gösterildiği gibi iki bölge üzerinden hesaplar yapabiliriz.



Şekil 3.8: İnce filmde ışığın yayılma süreçleri [39].

İnce film kalınlığı d olan bir örnek üzerine I_0 şiddetinde tek dalga boyulu bir ışık düşürüldüğün de film içerisine giren ışık miktarı I ;

$$I = (1 - R)I_0 \quad (3.12)$$

şeklinde yazılabilir. İkinci bölgedeki ışık şiddeti ise;

$$I = I_0(1 - R)e^{-\alpha d} \quad (3.13)$$

şeklindedir. Filmden geçen ışık miktarı;

$$I = I_0(1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.14)$$

olur. İç yansımalar bu şekilde devam ettiğinde yansıyan ışık miktarı her yansımada bir;

$$I = R^{2n}(1 - R)^2 I_0 e^{-(2n+1)\alpha d} \quad (3.15)$$

kadar artacaktır. Bu artış ile ince filmin toplam ışık geçirgenliği şu şekilde yazılabilir;

$$I = (1 - R)^2 I_0 e^{-\alpha d} \left(\sum_r R^{2n} e^{-2n\alpha d} \right) \quad (3.16)$$

Bu ifade bize geçirgenliğin yansıyan ışık şiddetinin, gelen ışık şiddetine oranı olduğunu gösterir.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (3.17)$$

İç yansımalar devam ettirildiğinde, toplam geçirgenlik:

$$T = \frac{(1 - R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (3.18)$$

şeklinde olacaktır. Bu denklemde yüksek soğurucu bölge için $d \gg 0$ olarak yaklaşım yapıldığında denklem şu şekilde yazılabilir:

$$T = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.19)$$

Bu son denklemde d ve R bilindiğinde, α bulunabilir.

$$A = \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.20)$$

$$T = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.21)$$

$$2.3 \log_{10} T = \ln[(1 - R)^2 e^{-\alpha d}] \quad (3.22)$$

$$-2.3A = \ln(1 - R)^2 - \alpha d \quad (3.23)$$

$$\alpha = \frac{1}{d} [2.3A + \ln(1 - R)^2] \quad (3.24)$$

olarak elde edilir. Soğurma katsayısı hesaplamaları yapılırken denklemde ki R değeri içeren kısım ihmal edilir. Spektrometreden alınan soğurma verileri A ifadesi ile temsil edilir. Denklem son olarak şu şekilde yazılabilir:

$$\alpha = \frac{1}{d} [2.3A] \quad (3.25)$$

Soğurma katsayısının bir diğer formülü ise,

$$\alpha = -\frac{1}{d} \left[\ln \left(\frac{T}{100} \right) \right] \quad (3.26)$$

Tez kapsamında yapılan soğurma katsayısı hesapları Denklem 3.26 kullanılarak hesaplanmıştır.

Direk bant aralıklı yarıiletkenlerde soğurma katsayısı ifadesi şu şekildedir:

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (3.27)$$

Burada A soğurma verileri ve E_g bant aralığıdır [39]. Bu denklemde soğurma katsayısının enerji ile çarpımının karesinin enerjiye karşı $(\alpha E)^2$ -E grafiğinin teğetinin enerji eksenini kestiği nokta E_g bant aralığını gösterir.

3.3.3. Elektriksel Karakterizasyon

3.3.3.1. Akım-Voltaj (I-V)

Elektronik veya optoelektronik aygıtlar üretildiğinde ilk olarak Akım-Voltaj grafikleri incelenir. Bu aygıtın performansı hakkında bize bilgi verir. Aynı zaman da aygıtın davranışı hakkında (omik, doğrultucu vb.) bilgi ediniriz. Temel olarak aygıtın iki kontağı arasına belli bir aralıktaki gerilim uygulanarak bu kontaklar arasından geçen akım ölçülür. Bu kontaklar arasına sabit bir akım uygulanarak voltaj okuma şeklinde de yapılabilir.

Fotodedektörler gibi ışığa karşı tepki veren optoelektronik aygıtlar ışık altında ve karanlık ortamda farklı elektriksel özelliklere sahiptirler. Bu nedenle aygıtların iki farklı ortamda I-V ölçümleri alınmaktadır. Karanlık ortamda alınan I-V ölçümleri karanlık akım ölçümleridir. Fotodedektörün üzerine cevap verebileceği bir dalga boyunda ışık düşürülerek alınan I-V ölçümü ise ışık altındaki I-V ölçümüdür. Tez kapsamında çalışılan örneklerin I-V ölçümleri için kullanılan ölçüm düzeneğinin blok diyagramı Şekil 3.9'da verilmektedir.

3.3.3.2. Hall Olayı

Hall Olayı yarıiletkenin iletkenlik tipini belirlemenin yöntemlerinden biridir. Hall Olayı ölçümü sonucu örneğin taşıyıcı konsantrasyonunu, mobilitesini, direncini ve iletkenliğini hesaplayabiliriz. Ölçümler sonucu hesaplanan taşıyıcı konsantrasyonun işareti negatif ise örnek

n-tipi, eğer pozitif ise örnek p-tipi davranış göstermektedir. Bu çalışmada yer alan örneklerin Hall Olayı ölçümleri ‘Hall Effect Measurement System HMS-3000’ ölçüm sistemi kullanılarak yapılmıştır.

Hall Olayı sonucu belirlenen mobilite ve taşıyıcı konsantrasyonları ile iletkenlik hesapları yapılabilmektedir. Hall Olayı ölçümü ile bu değerler belirlenir ve aşağıdaki formüllerden yararlanılarak iletkenlik hesapları yapılabilmektedir.

Akım yoğunluğu,

$$J = nev_s \quad (3.28)$$

şeklinde ifade edilir. Burada e elektron yükü, v_s elektronun sürüklenme hızı ve n elektronun yük taşıyıcılarının yoğunluğudur. Mobilite,

$$\mu = v_s/E \quad (3.29)$$

Şeklinde ifade edilir ve E elektrik alanıdır. Denklem 3.29’da ki ifadeyi Denklem 3.28’de yerine yazarsak akım yoğunluğu;

$$J = ne\mu E \quad (3.30)$$

eşitliğine dönüşür. Buradan iletkenlik;

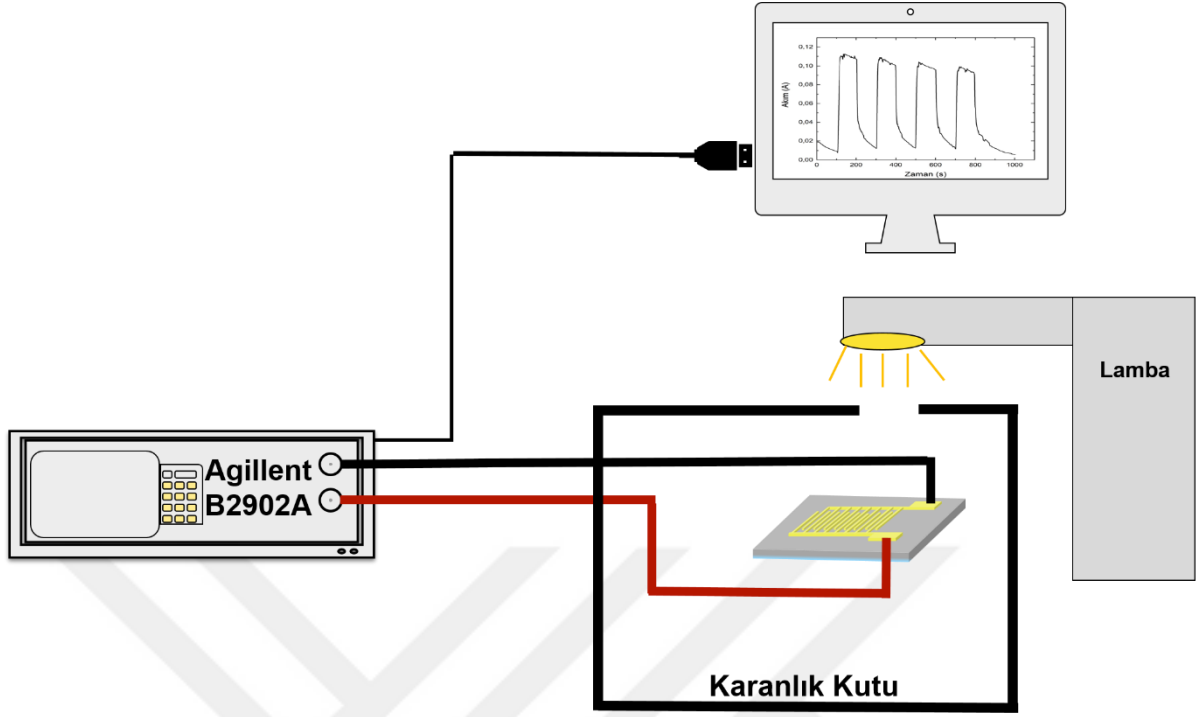
$$\sigma = J/E = ne\mu \quad (3.31)$$

olarak ifade edilir.

3.3.4. Elektro-Optik Karakterizasyon

3.3.4.1. Fotoiletkenlik

Bir fotodedektörün üzerine dedektörün çalışma dalga boyu aralığında ışık gönderildiğinde dedektörün gelen ışığı soğurması sonucu elektriksel iletkenliğinde oluşan değişime fotoiletkenlik denir. Fotoiletkenlik ölçümlerinden yararlanılarak dedektörün duyarlılığına, tepki zamanına ve gürültüsüne ilişkin parametreler elde edilir. Fotoiletkenlik ölçümleri için kullanılan fotoakım ölçüm düzeneği Şekil 3.9’da verilmektedir. Aynı zamanda örneklerin I-V ölçümleri yine bu ölçüm sistemi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.9: Fotoakım ve I-V ölçüm düzeneği.

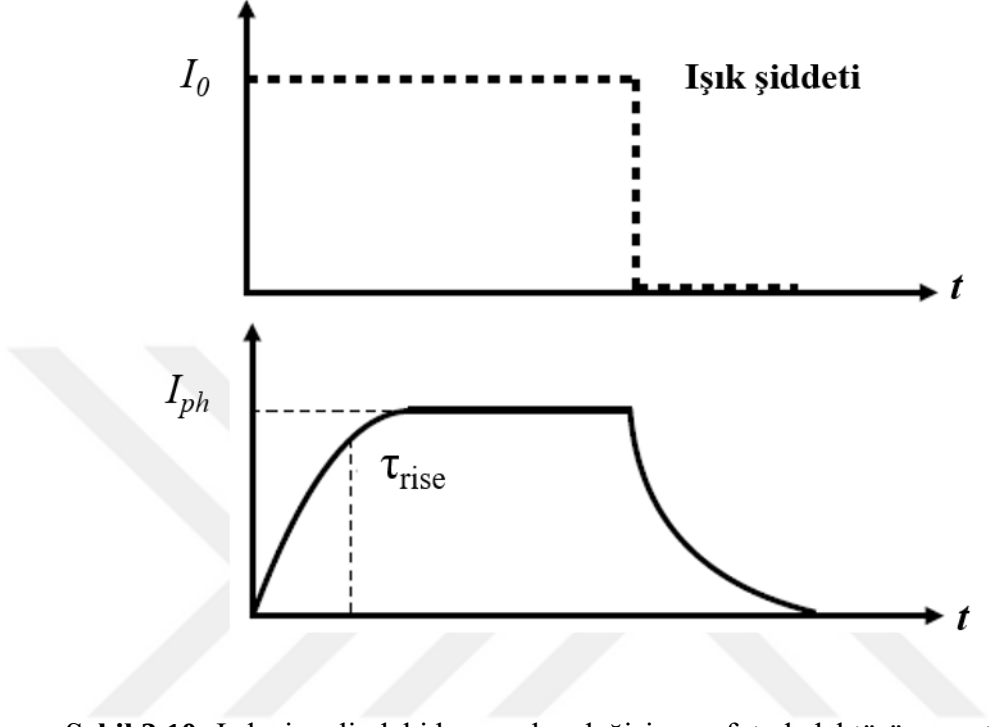
Şekil 3.9’da görüldüğü gibi karanlık kutu içerisindeki metal yarıiletken metal örneğe besleme voltajı uygulanır. Örnek üzerine lamba yardımı ile ışık düşürüldüğünde elektron-boşluk çiftleri oluşur. Bu sayede Agilent B2902A hassas multimetre (kaynak/ölçüm aleti) ile örnek üzerinden geçen akım değerleri bilgisayara kaydedilir. Örnek üzerine ışık düştüğünde geçen akım yükselecektir ve ışık kaldırıldığında geçen akım eksponansiyel olarak azalma gösterecektir. Fotodedektörün bu akımda ki yükselmesi için geçen süreye dedektörün yükselme zamanı (rise time) denilmektedir.

$$\tau = \tau_{RC} + \tau_{tr} \quad (3.32)$$

Denklem 3.32’de RC zaman sabiti ($\tau_{RC} = RC$) ve taşıyıcıların oluştukları yerden kontaklara gidene kadar geçen sürenin τ_{tr} ($\tau_{tr} = W/v_s$) toplamı τ zaman sabitini verir.

Fotodedektörün yanıt zaman eğrisinin (akım-zaman grafiği) %10 ve %90 değeri farkından elde edilen yükselme zamanından (rise time) yararlanılarak dedektörün tepki hızı (rise time, τ_{rise}) hesaplanır [28]. Bir ışık sinyalindeki basamaklı değişim ve buna bağlı olarak fotodedektörün yanıt grafiği Şekil 3.10’da gösterilmektedir.

$$\tau_{rise} = (\ln 9)\tau_{RC} + \tau_{tr} \quad (3.33)$$



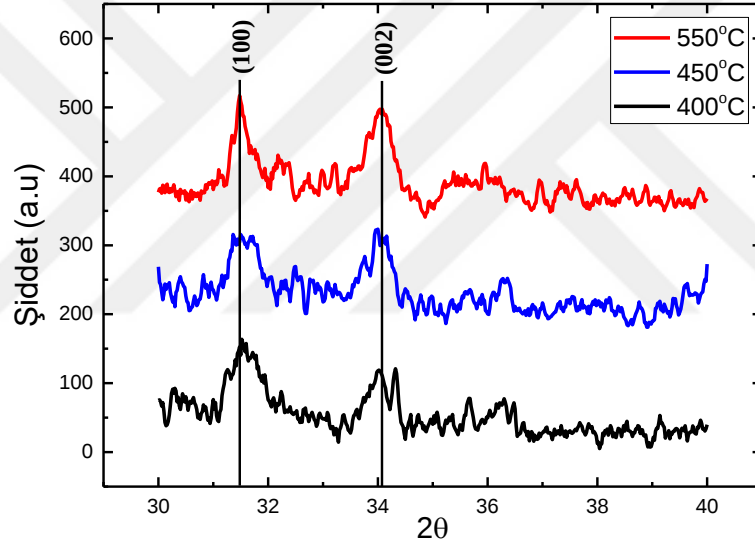
Şekil 3.10: Işık sinyalindeki basamaksı değişim ve fotodedektörün yanıtı [28].

4. BULGULAR

4.1. FOTODEDEKTÖR KARAKTERİZASYONU ÖLÇÜM SONUÇLARI

4.1.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

ZnO örneklerin yapısal karakterizasyonu için XRD, SEM, EDS ölçüm sonuçları incelenmiştir. Alınan XRD ölçüm sonuçlarında 0.154059 nm dalgaboylu Rigaku Miniflex XRD ölçüm sistemi kullanıldı. Aşağıdaki Şekil 4.1’de 400°C, 450°C ve 550°C tavllanmış n-tipi ZnO örneklerin XRD ölçüm sonuçları yer almaktadır.



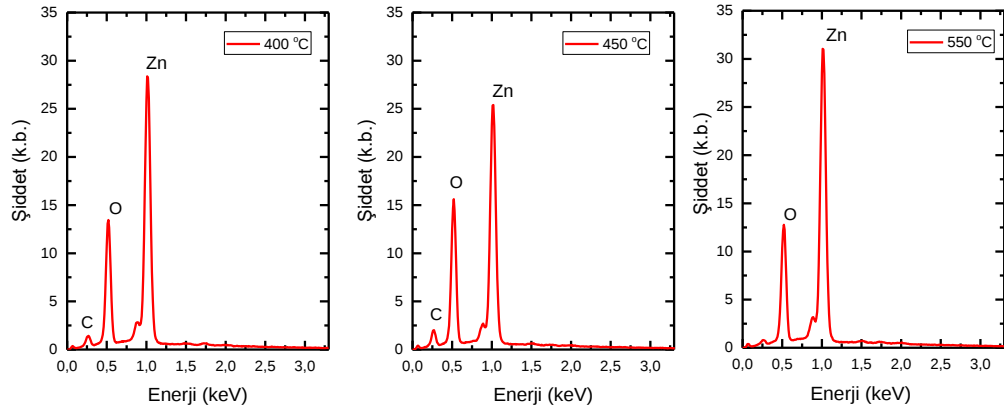
Şekil 4.1: XRD ölçüm sonuçları.

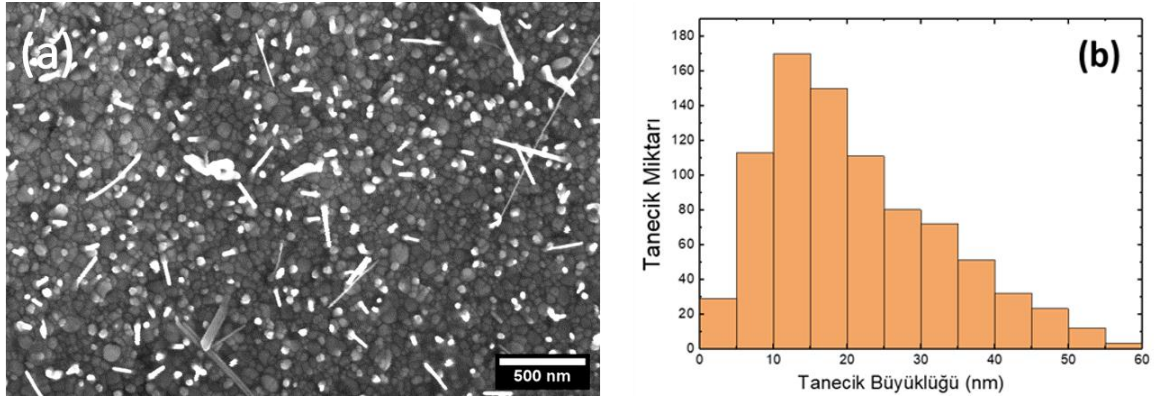
Ölçüm sonuçları incelendiğinde 2θ değeri 31° ve 34° civarlarında olan kırınım piklerinin ZnO’ye ait olduğu görülmektedir. Bu kırınım pikleri sırasıyla hekzagonal wurtzite yapıdaki ZnO yarıiletkeninin (100), (002) düzlemleridir. XRD grafikleri analiz edilerek grafiklerden FWHM değerleri elde edilmiş ve Scherrer denkleminde yararlanılarak örneğin en belirgin 2θ pikine ait olan (100) düzlemindeki tanecik büyüklükleri elde edilmiştir. Tablo 4.1’de n-tipi ZnO ince film örneklerin FWHM değerleri ve tanecik büyüklükleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1: n-tipi ZnO ince film örneklerin XRD ve SEM analizi

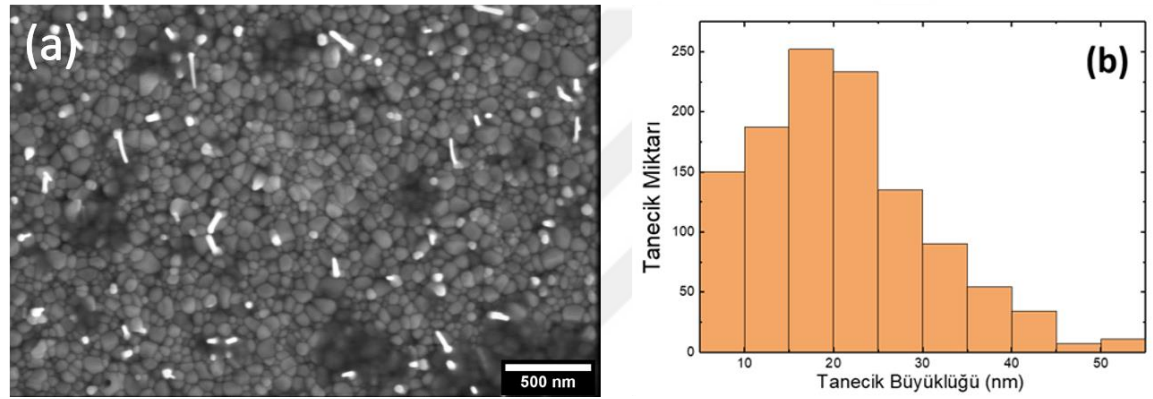
Tavlama Sıcaklığı (°C)	Açı (2θ) (derece)	FWHM (derece)	Düzlem	Tanecik Büyüklüğü (Scherrer denklemi ile hesaplanan) (nm)	Tanecik Büyüklüğü (SEM görüntüleri ile hesaplanan) (nm)
400	31.59	0.92987	(100)	8.87	10.5
450	31.57	0.54732	(100)	15.08	15.5
550	31.52	0.51841	(100)	15.92	18.3

ZnO örneklerinin SEM görüntüleri ve SEM görüntülerinden alınan verilerle hesaplanmış tanecik boyutları dağılım grafikleri Şekil 4.3'te, Şekil 4.4'te ve Şekil 4.5'te gösterilmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde örneğin tavlama sıcaklıkları arttıkça tanecik boyutlarının da arttığı görülmektedir. XRD analizinden yararlanılarak Scherrer denklemi ile hesaplanan tanecik büyüklüğü ve SEM görüntülerinden belirlenen tanecik büyüklükleri kıyaslandığında, SEM görüntülerinde belirlenen tanecik boyutlarının ile küçük farklar olduğu ve yaklaşık olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada örneklerin EDS spektrumları incelenmiş ve Şekil 4.2'de görüldüğü gibi tavlama sıcaklığının artması ile ZnO yoğunluğunun arttığı görülmüştür.

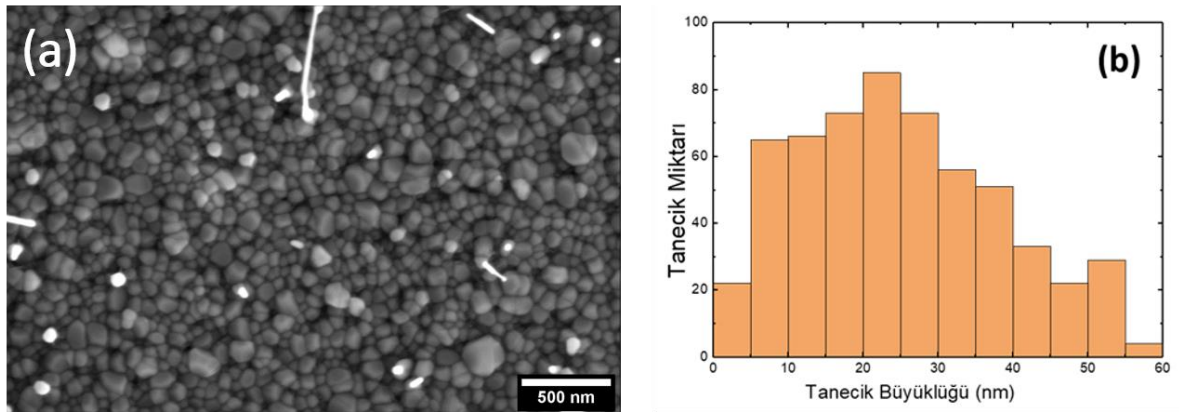
**Şekil 4.2:** ZnO örneklerin EDS spektrumları



Şekil 4.3: a) 400 °C’de tavllanmış örneğin SEM görüntüsü b) Tanecik boyutu dağılım grafiği.



Şekil 4.4: a) 450 °C’de tavllanmış örneğin SEM görüntüsü b) Tanecik boyutu dağılım grafiği.

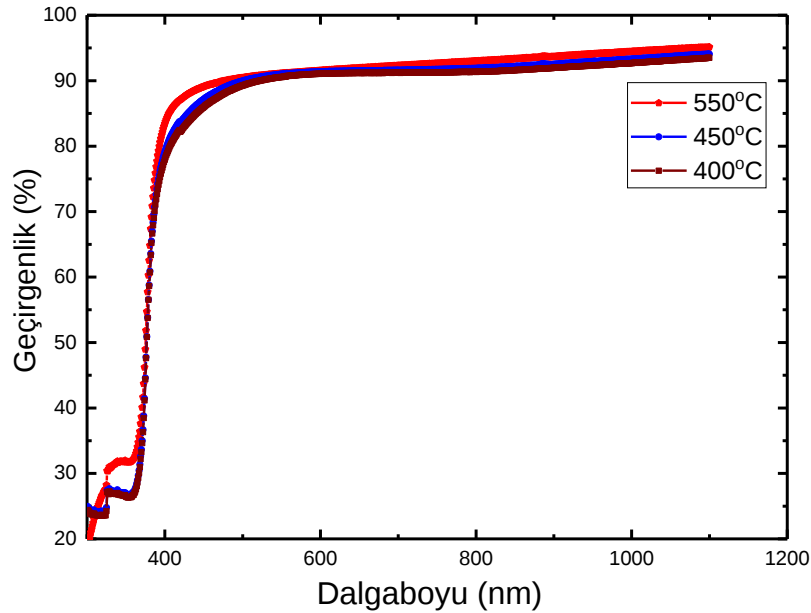


Şekil 4.5: a) 550 °C’de tavllanmış örneğin SEM görüntüsü b) Tanecik boyutu dağılım grafiği.

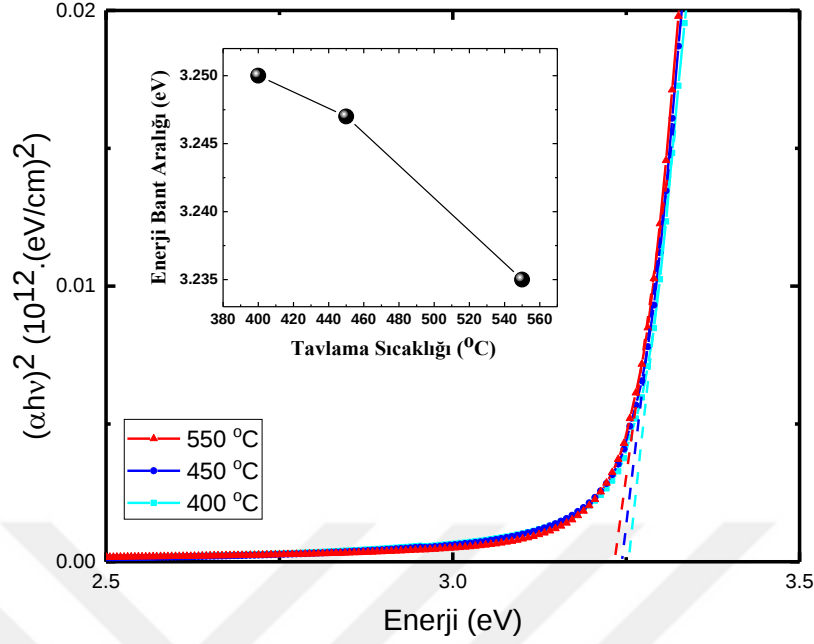
4.1.2. Optik Karakterizasyon Sonuçları

Tez kapsamında kullanılan n-tipi ZnO ince film örneklerinin optik özelliklerini belirlemek için geçirgenlik ölçümleri alınmış ve buradan soğurma katsayısı hesabı yapılmıştır. Daha sonrasında n-tipi ZnO örneklerin bant aralığı enerjileri hesaplanmıştır. Örneklerin geçirgenlik ölçümleri, Çukurova Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde bulunan Perkin-Elmer Lambda 2S UV/VIS Spektrometre cihazı kullanılarak alınmıştır [8].

Geçirgenlik sonuçları incelendiğinde örneklerin geçirgenliklerinin %90 civarında olduğu görüldü. Elde edilen geçirgenlik sonuçları incelendiğinde enerji bant aralığı, $(\alpha h\nu)^2$ nin fotonun enerjisine $(h\nu)$ karşı grafiğinin, enerji eksenini kestiği nokta alınarak hesaplandı [40]. Hesaplamalar sonucu örneklerin bant aralıkları 3.25 eV (381 nm) civarında olduğu görüldü. Bu örneklerin yakın UV bölgesinde olduğunu ve örneklerin saf ZnO fazında olduklarını göstermektedir. Ayrıca bu durum ZnO örneklerin yüksek UV soğurma özelliklerinin olduğunu göstermektedir [8].



Şekil 4.6: 400 °C, 450 °C, 550 °C’ de tavlanmış ZnO örneklerin dalgaboyuna bağlı geçirgenlik grafikleri.



Şekil 4.7: 400 °C, 450 °C, 550 °C’ de tavllanmış ZnO örneklerin $(\alpha h\nu)^2$ -E grafikleri.

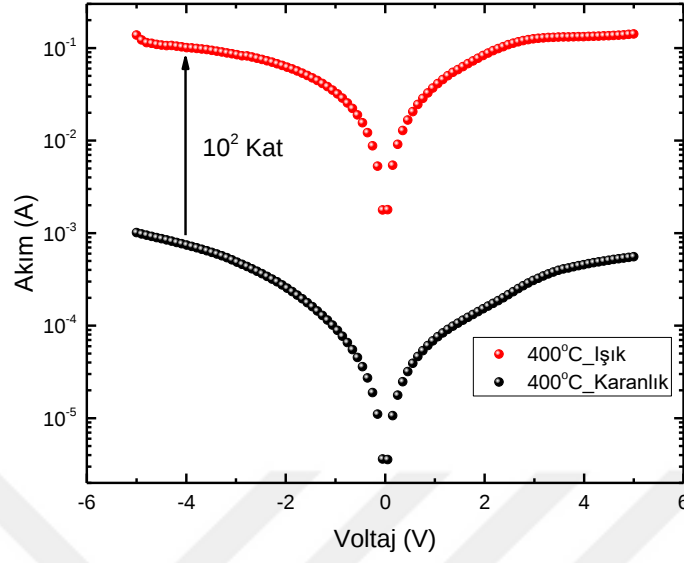
Şekil 4.6’da 400 °C, 450 °C, 550 °C’ de tavllanmış ZnO örneklerin dalgaboyuna bağlı geçirgenlik grafikleri bir arada bulunmaktadır. Şekil 4.7’de ise 400 °C, 450 °C, 550 °C’de tavllanmış ZnO örneklerin $(\alpha h\nu)^2$ -E grafikleri bir arada bulunmaktadır. Grafikler incelendiğinde E_g bant aralığının 400 °C’de tavllanmış örnek için 3.250 eV, 450 °C’de tavllanmış örnek için 3.247 eV ve 550 °C’de tavllanmış örnek için 3.235 eV olduğu görülmektedir. Burada tavlama sıcaklığı arttıkça bant aralığının azaldığı görülmektedir [41]. ZnO örneklerin kalınlık ölçümleri İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarında bulunan KLA Tencor profilometre cihazı ile ölçülmüştür. İnce film kalınlıkları ± 5 nm hata payı ile 400 °C’de, 450 °C’de ve 550 °C’de tavllanmış örnekler için 100 nm olarak belirlenmiştir. Bant aralığı hesaplamalarının sonuçları ve ince film kalınlıkları ölçüm sonuçları Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: ZnO örneklerin ince film kalınlıkları ve bant aralıkları

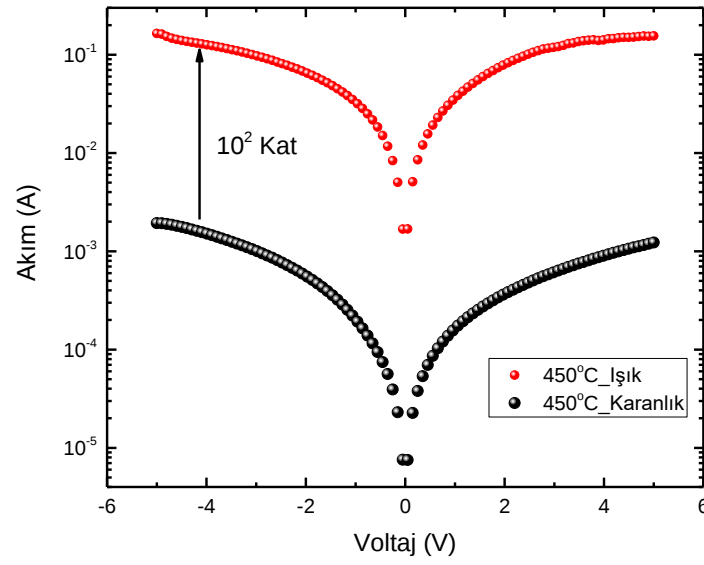
Tavlama Sıcaklığı (°C)	İnce Film Kalınlığı (nm)	Bant Aralığı (eV)
400	100 ±5nm	3.250
450	100 ±5nm	3.247
550	100 ±5nm	3.235

4.1.3. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları

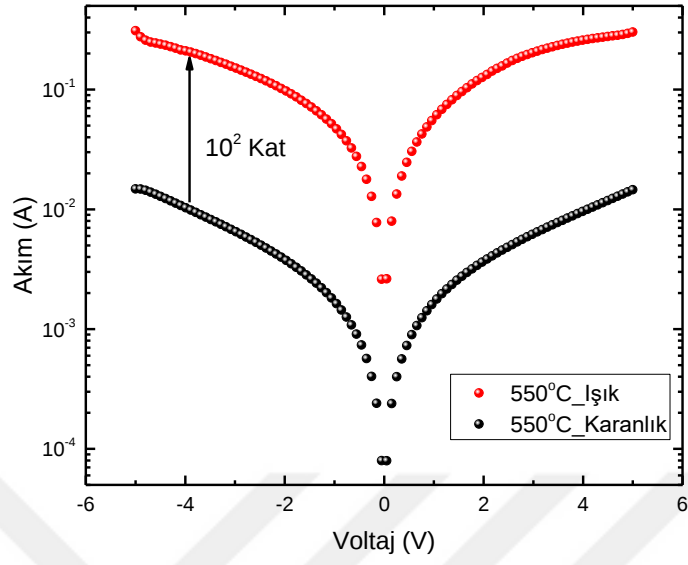
Tez kapsamında çeşitli tavlama sıcaklıklarında hazırlanan MSM ZnO fotodedektörlerin elektriksel karakterizasyonları için akım-voltaj (I-V) ölçümleri ve Hall Olayı ölçümleri alınmıştır. Alınan I-V ölçümleri 370 nm filtre ve geniş spektruma sahip olan Xe Lamba ile çalışan solar simülatör (filtresiz) altında alınmıştır. Işık altında ve karanlık ortamda alınan I-V ölçümleri incelenmiştir. Ölçümler +5 V ve -5 V besleme gerilimleri altında yapılmıştır. Alınan ölçüm sonuçları aşağıda yer almaktadır.



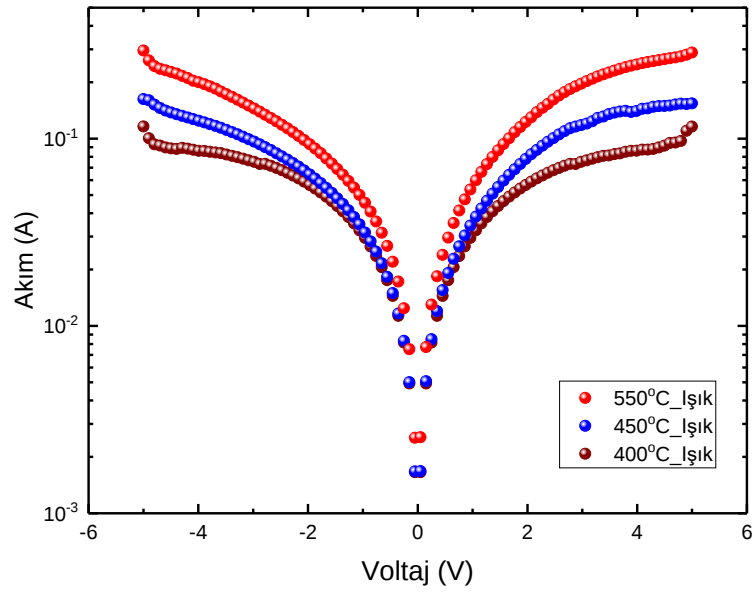
Şekil 4.8: Tavlama sıcaklığı 400 °C olan MSM fotodedektörün I-V grafiği.



Şekil 4.9: Tavlama sıcaklığı 450 °C olan MSM fotodedektörün I-V grafiği.



Şekil 4.10: Tavlama sıcaklığı 550 °C olan MSM fotodedektörün I-V grafiği.



Şekil 4.11: Işık altında MSM fotodedektörlerin (-5 V, +5 V) I-V grafiklerinin karşılaştırılması.

MSM fotodedektörler, yapılarından dolayı tam olarak bir diyot özelliği göstermezler. Diyotlardaki gibi bir ters besleme voltajı söz konusu değildir. Grafikler incelendiğinde akımın her iki yönde besleme ile arttığı görülmektedir. Şekil 4.8’de, Şekil 4.9’da ve Şekil 4.10’da görüldüğü gibi ışık altında örneklerin akım değerinin artması örneklerin fotoiletkenlik özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.

ZnO ince film örneklerin iletkenlik hesaplarını yapabilmek, taşıyıcı konsantrasyonlarını bulmak ve örneğin mobilitesini belirleyebilmek için Hall Olayı ölçümleri alınmıştır. Alınan ve hesaplanan ölçüm sonuçları Tablo 4.3’te gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde tavlama sıcaklığı arttıkça örneklerin taşıyıcı konsantrasyonları ve iletkenlikleri artmaktadır. Bununla birlikte mobiliteleri, özdireçleri ve bant aralıklarının azaldığı görülmektedir.

Tablo 4.3: Hall Olayı ölçümü sonuçları.

Tavlama Sıcaklığı (°C)	Taşıyıcı Konsantrasyonu (cm⁻³)	Mobilite (cm²/Vs)	Özdirenc (Ω cm)	Bant Aralığı (eV)	İletkenlik (Ω cm⁻¹)
400	0.929x10 ¹⁸	45.60	91.80	3.250	0.01
450	1.823x10 ¹⁸	23.24	6.53	3.247	0.15
550	6.342x10 ¹⁸	1.31	0.16	3.235	6.25

4.1.4. Elektro-Optik Karakterizasyon Sonuçları

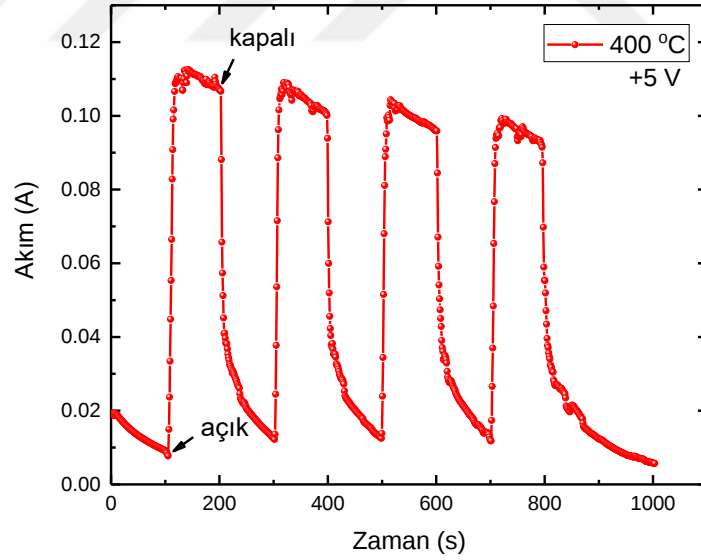
ZnO MSM fotodedektörlerin elektro-optik karakterizasyonları kapsamında, örnek üzerine ışık periyodik olarak düşürülerek zamana bağlı akım ölçümleri alınmıştır. Ölçüm düzeneği Şekil 3.9’da gösterilmektedir. MSM Fotodedektör örnekleri yaklaşık 30 d karanlık kutu içerisinde bekletilmiş ve daha sonra ölçüm alınmaya başlanmıştır. Örneklerin karanlık kutuda bekleme süresi ile akım değerlerinde farklılık olup olmadığını görmek için örnekler 24 saat süre ile karanlık kutuda bekletilip ölçüm alındığında da 30 d bekletilip ölçüm alındığındaki sonuçlar ile aynı sonuçlara sahip olduğu gözlenmiştir. Alınan fotoiletkenlik ölçümleri 100 s ışık altında ve

100 s ışık kapalı şekilde alınmıştır. Ölçümler 5 V besleme geriliminde ve 0.25-5 V arası 0.25 V aralıklarla alınmıştır. Şekil 4.15'te görüldüğü gibi 5 V besleme voltajı altında alınan ölçümlerde tavlama sıcaklığının artışı ile örneğin fotoakımının arttığı gözlenmektedir. Grafikler incelendiğinde dedektörün yükselme ve alçalma (rise time, fall time) zamanları hesaplanmıştır. Aynı zamanda ZnO MSM fotodedektörün karanlık akım değerleri, foto yanıt hesapları, foto duyarlılık hesapları, yükselme ve alçalma zaman hesapları yapılmıştır. Hesaplamaların sonuçları Tablo 4.4'te gösterilmektedir.

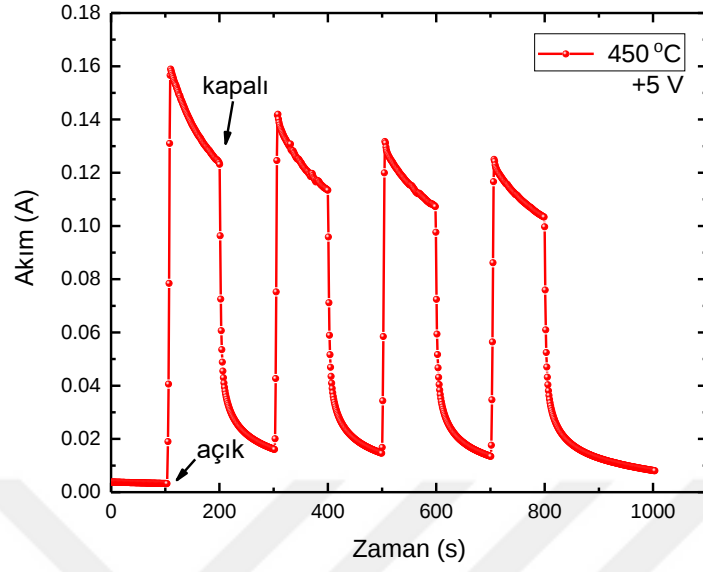
Tablo 4.4'te yer alan foto duyarlılık parametresi, maksimum fotoakımın karanlık akıma oranıdır.

$$S = I_{ph}/I_{karanlık} \quad (4.1)$$

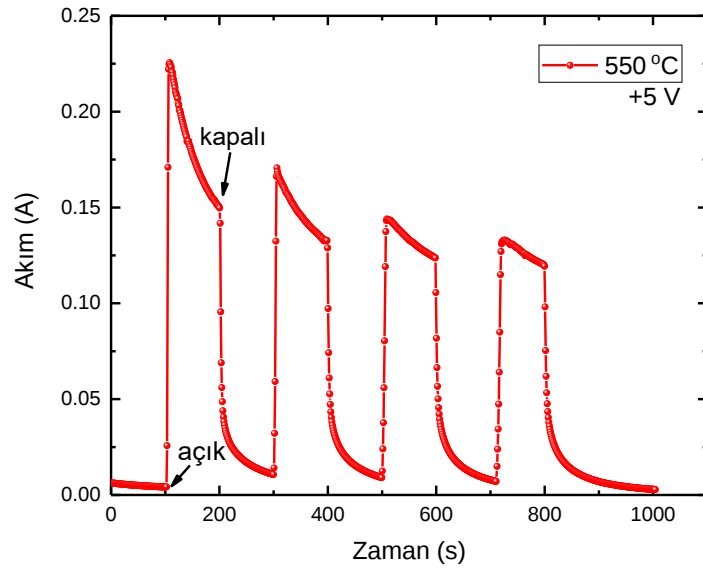
şeklinde ifade edilir. Burada I_{ph} değeri fotoakım değerini göstermektedir ve grafiklerdeki maksimum akım değerinin karanlık akım ($I_{karanlık}$) değerinden çıkartılmış halidir.



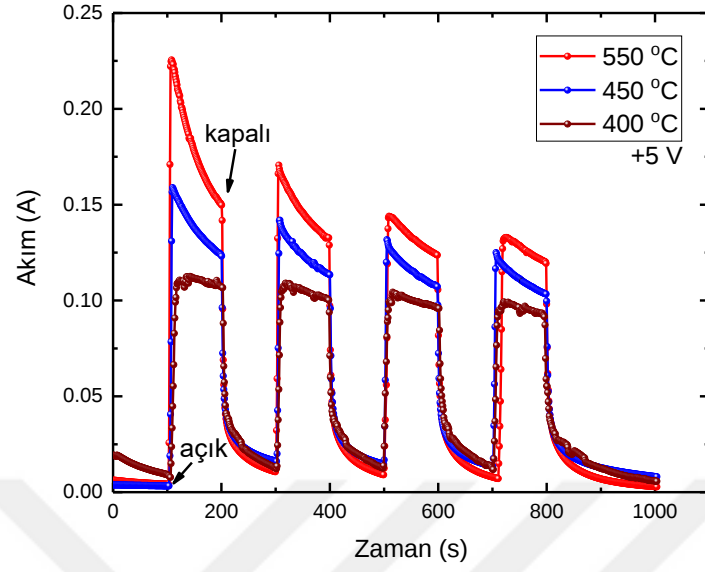
Şekil 4.12: Tavlama sıcaklığı 400 °C olan MSM fotodedektörün akım-zaman grafiği.



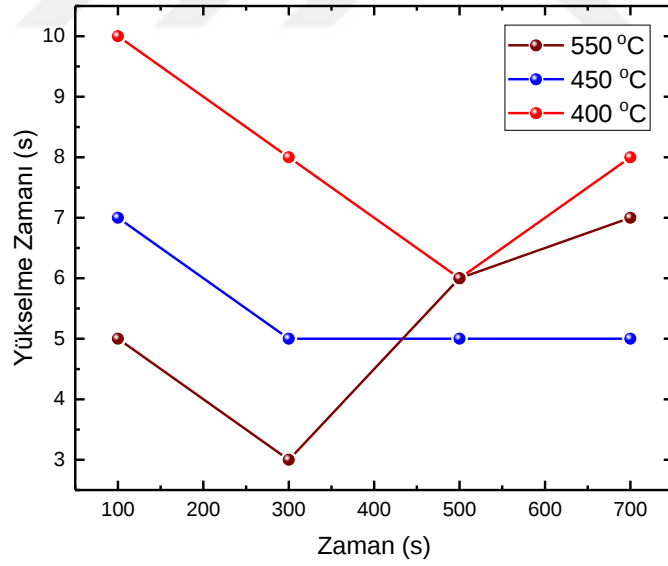
Şekil 4.13: Tavlama sıcaklığı 450 °C olan MSM fotodedektörün akım-zaman grafiği.



Şekil 4.14: Tavlama sıcaklığı 550 °C olan MSM fotodedektörün akım-zaman grafiği.



Şekil 4.15: MSM fotodedektörlerin akım-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

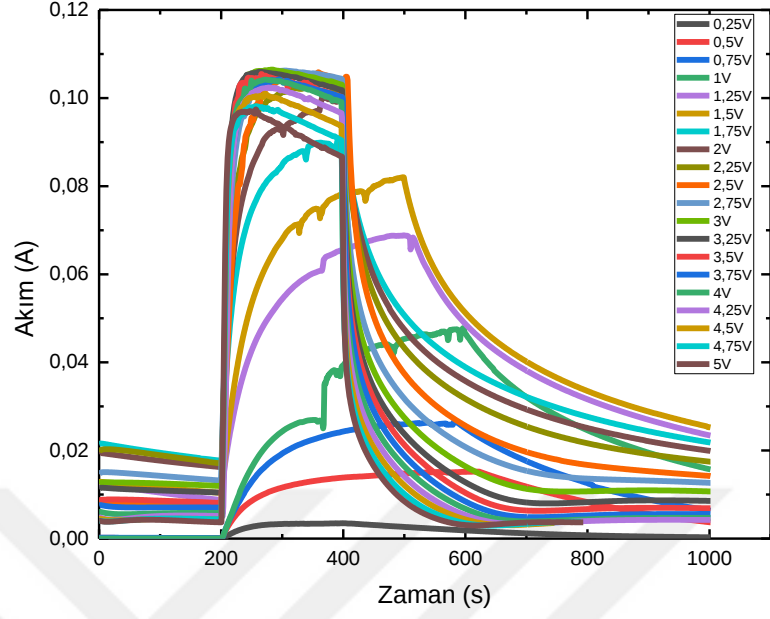


Şekil 4.16: MSM fotodedektörlerin her bir açma-kapama anındaki yükselme zamanı-zaman grafiği.

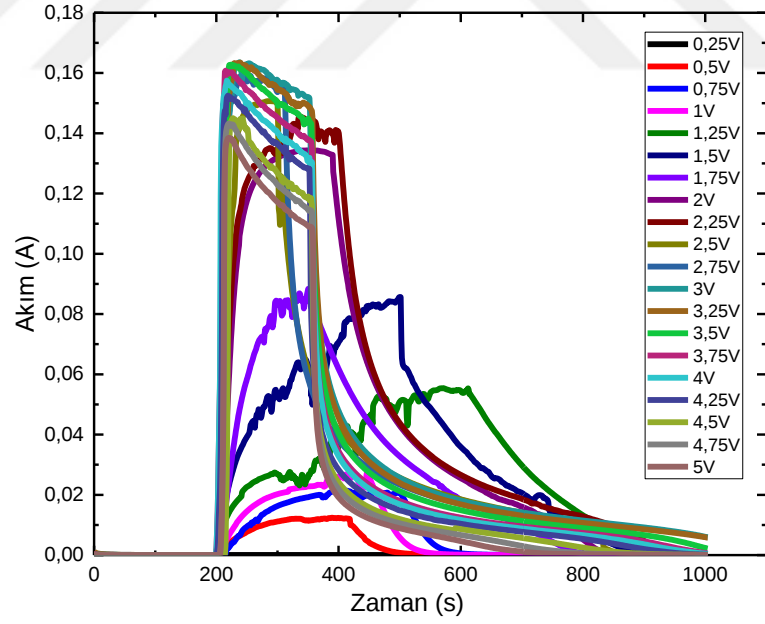
Tablo 4.4: ZnO MSM fotodedektörlerin dedektör parametrelerinin hesaplanması.

Tavlama Sıcaklığı (°C)	Karanlık Akım (mA) ($I_{karanlık}$)	Maksimum Akım (mA) (I_{ph})	Foto Duyarlılık ($I_{ph}/I_{karanlık}$)	Yükselme Zamanı (s)	Alçalma Zamanı (s)
400	6.7	98.2	14.65	15	90
450	1.9	116.7	61.42	6	76
550	1.95	132.8	68.10	4	22

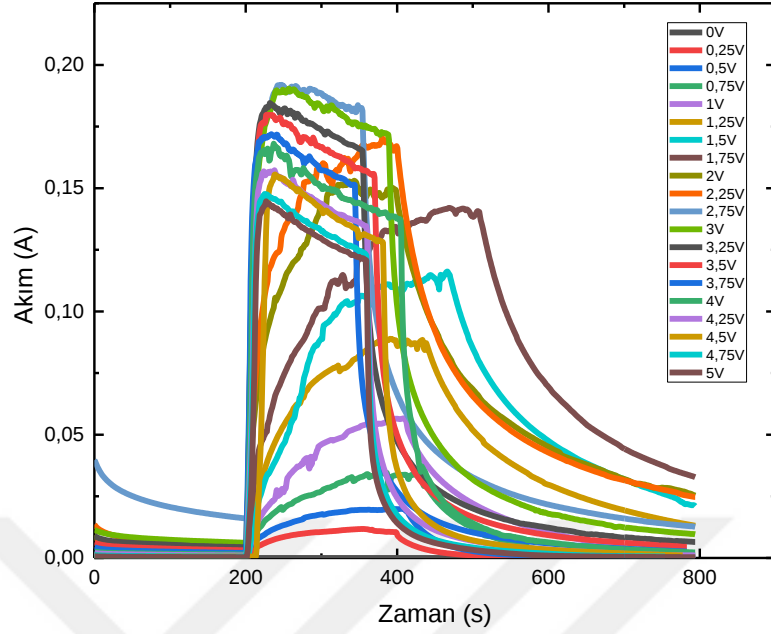
Yukarıda ZnO MSM fotodedektörlerin fotoiletkenlik ölçümleri 0.25-5 V besleme voltajı aralığında 0.25 V aralıklarla alındığından bahsetmiştik. Bu ölçümler sonucunda aygıt 2-3 V besleme voltajı altında en ideal sonuçları vermiştir. Bu fotoiletkenlik ölçümleri incelendiğinde besleme voltajı arttıkça akımın arttığı gözlemlenmiş fakat 2-3 V besleme voltajı civarına ulaşıldığında, besleme voltajını arttırdıkça fotoakım değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin örneğin zamanla ısınmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.17: Tavlama sıcaklığı 400 °C olan MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki akım-zaman grafiği.



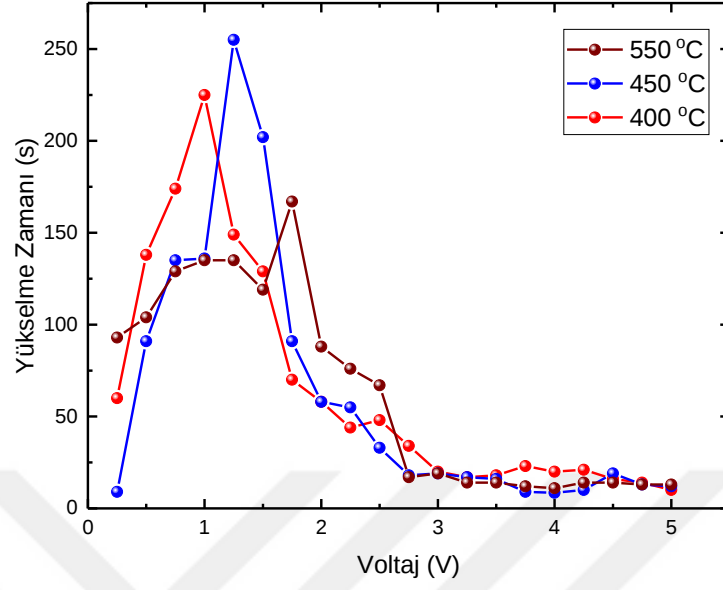
Şekil 4.18: Tavlama sıcaklığı 450 °C olan MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki akım-zaman grafiği.



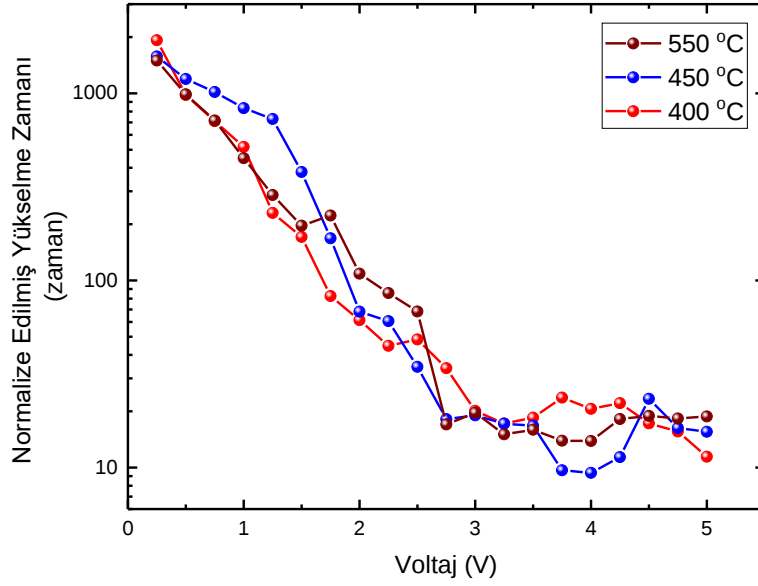
Şekil 4.19: Tavlama sıcaklığı 550 °C olan MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki akım-zaman grafiği.

Şekil 4.17’de tavlama sıcaklığı 400 °C olan MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki akım-zaman grafiği bulunmaktadır. Grafik incelendiğinde 2.5 V besleme voltajı altında örneğin fotoakım değerinin en ideal durumda olduğu görülmektedir. 2.5 V sonrasında fotodedektörün fotoakımı giderek azalmaktadır. Şekil 4.18’de tavlama sıcaklığı 450 °C olan MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki akım-zaman grafiği bulunmaktadır. Grafik incelendiğinde 3 V besleme voltajı altında örneğin fotoakım değerinin en ideal durumda olduğu görülmektedir. Şekil 4.19’da tavlama sıcaklığı 550 °C olan MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki akım-zaman grafiği bulunmaktadır ve grafik incelendiğinde en ideal fotoakım değerinin 2.75 V besleme voltajı altındaki fotoakım değeri olduğu görülmektedir.

0.25-5 V arası alınan fotoakım ölçümlerinin voltaja bağlı yükselme zamanı grafikleri incelenmiştir. Grafikler hem yükselme zaman değerleri ile hem de normalize edilmiş yükselme zaman değerleri ile çizilmiştir.



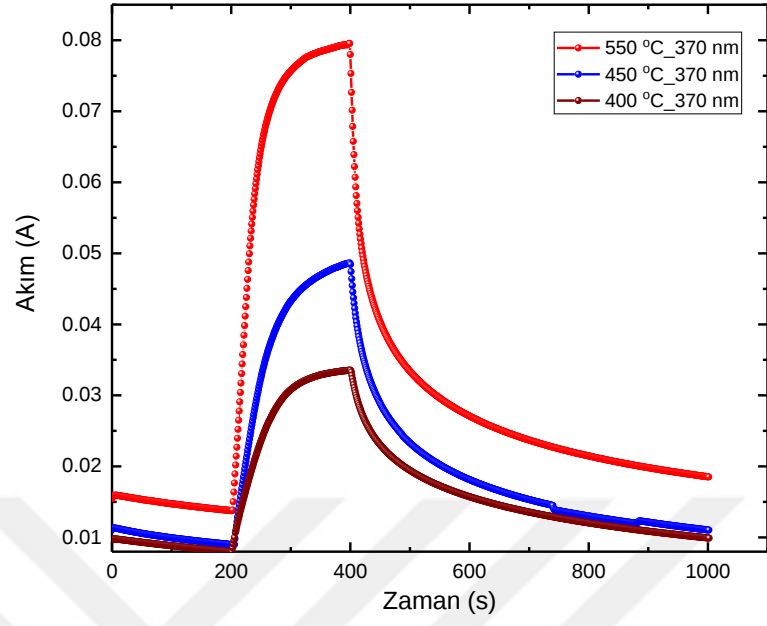
Şekil 4.20: Tavlama sıcaklıklarına göre MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki voltaj-yükselme zamanı grafiği karşılaştırmaları.



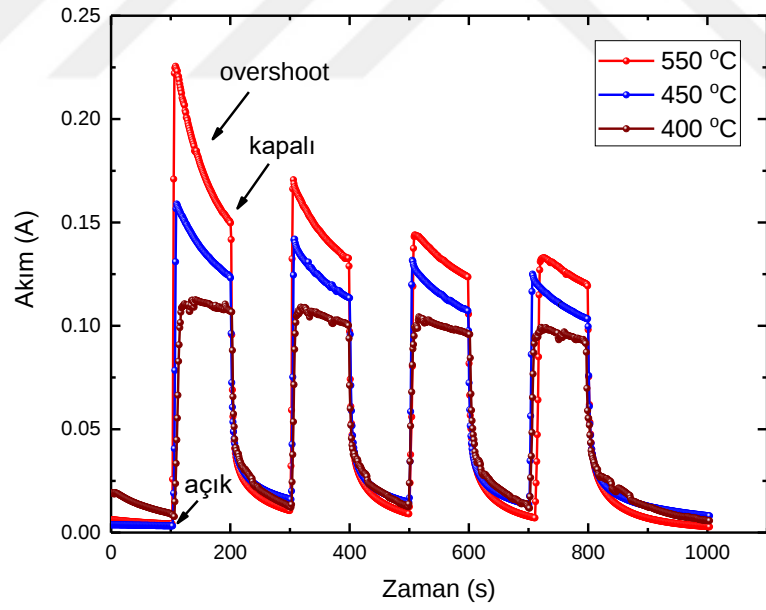
Şekil 4.21: Tavlama sıcaklıklarına göre MSM fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerilimi altındaki voltaj-normalize edilmiş yükselme zamanı grafiği karşılaştırmaları.

Şekil 4.20’de verilen grafik incelendiğinde besleme voltajı arttıkça yükselme zamanının giderek azaldığı ve fotodedektörün daha hızlı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni besleme voltajının artması ile ayrılan elektron-boşluk çiftleri daha hızlı bir şekilde kontaklara ulaşacağı için fotodedektörün tepki hızı artacaktır. Bu durum Şekil 4.21’de bulunan normalize edilmiş yükselme zamanı grafiğinde daha rahat görülmektedir. Şekil 4.20’de 1 V civarındaki yükselme zamanı pik şiddeti, 1-2 V aralığında yükselme zamanı değerinde en yüksek değerde olduğu için fotodedektör daha yavaştır.

Tez kapsamında yapılan fotoiletkenlik ölçümleri bant aralığı enerjisinden daha yüksek bir enerji göndermek için 370 nm filtre kullanılarak da yapılmıştır. Şekil 4.22’de solar simülatörün önüne bir UV (370 nm) filtre koyularak alınan akım-zaman grafikleri görülmektedir ve Şekil 4.23’te solar simülatör lambası ile alınan akım-zaman grafikleri görülmektedir. Şekil 4.23’te görüldüğü gibi filtre kullanılmadan alınan ölçüm sonuçları, ışığın ilk açıldığı anda fotoakımın hızlı bir şekilde arttığını ve sonrasında eksponansiyel olarak azaldığını göstermektedir. Işık açıldığı anda ince film yüzeyine gelen fotonlar tuzak seviyelerinde yüklenmeyi meydana getirmektedir. Bu durum ilk olarak tuzak seviyelerinin dolup daha sonrasında boşalmasından dolayı ‘overshoot’ olayı olarak adlandırılan olayı meydana getirmektedir [42]. Filtresiz ve UV filtre kullanılarak alınan ölçümler incelendiğinde, UV filtre ile alınan fotoiletkenlik ölçümlerinde overshoot olayının olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni foton ile uyarmada gelen fotonun enerjisi atomun uyarılma enerjilerinden birine eşit ise ancak foton atomu uyarmamaktadır. Eğer fotonun enerjisi atomun birinci uyarılma enerjisinden büyük ama diğer uyarılma enerjileri arasında bir değerde ise foton atomu uyarmamaktadır. Dolayısıyla UV filtre kullanılarak gelen ışın, filtre kullanılmadan solar simülatörden gelen ışına göre daha yüksek enerjili olduğundan tuzaklara yakalanmamaktadır. Böylelikle fotoiletkenliğe katkı tuzak seviyelerinden gelmemektedir. Bu yüzden Şekil 4.22’de görüldüğü gibi 370 nm UV filtre ile alınan ölçümlerde overshoot pikini görememekteyiz.



Şekil 4.22: UV (370 nm) filtre kullanılarak alınan akım-zaman grafikleri



Şekil 4.23: Solar simülatör (filtresiz) ile alınan akım-zaman grafikleri.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, PFCVAD ile üretilen n-tipi ZnO ince film örneklerin yapısal, optiksel ve elektriksel karakterizasyonları yapılmış ve çıkan sonuçlar incelenmiştir.

Tez kapsamında çalışılan örnekler tavlama sıcaklıklarına göre sınıflandırılmıştır. Kullanılan bütün örnekler 5 sccm (standart cubic centimeter per minute, sccm) oksijen gaz akışı (flow rate) ortamında üretilmiştir. Daha sonrasında üretilen örnekler 400 °C, 450 °C ve 550 °C’de bir saat hava ortamında tavlannmıştır. Tavlama sonrasında örneklerin yapısal karakterizasyonlarını incelemek için ince film kalınlıkları, SEM, EDS ve XRD ölçümleri alınmıştır. Örneklerin optik karakterizasyonları için geçirgenlik ölçümleri yapılmıştır. Elektriksel karakterizasyonlar için ise Hall Olayı ölçümleri alınmıştır. ZnO ince film örneklerin ince film kalınlıklarının ölçümü profilometre cihazı ile ölçülmüştür. Alınan XRD ölçümleri sonucunda n-tipi ZnO örneklerin yönelimlerine ait piklerinin 2θ değerleri 31° ve 34° ’de olduğu görülmüştür. Bu 2θ değerleri sırasıyla (100) ve (002) yönelimlerine ait olduğu literatür araştırması ile belirlenmiştir. Alınan XRD ölçümlerinden örneğin tanecik boyutu hakkında bilgi edinilerek bu bilgiler doğrultusunda tavlama sıcaklığına bağlı olarak tanecik büyüklükleri karşılaştırılmıştır. ZnO örnekler için alınan geçirgenlik ölçümlerinden örneklerin soğurma katsayıları elde edilmiş ve sonrasında soğurma katsayılarından yararlanılarak bant aralığı hesapları yapılmıştır. Bant aralıkları, tavlama sıcaklıkları karşılaştırılmış ve tavlama sıcaklığı daha yüksek olan ZnO ince film örneklerin bant aralığının daha düşük olduğu görülmüştür. Bant aralığının azalmasının nedeninin tanecik büyüklükleri sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Üretilen n-tipi ZnO ince filmlerin geçirgenlik ve bant aralıkları ölçümleri incelendikten sonra optik soğurma bölgesinin 381 nm civarında olması nedeni ile UV fotodedektör aygıt tasarımı için uygun olduğu düşünülmüş ve bu bağlamda çalışmalar devam ettirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında üretilen n-tipi ZnO ince film örnekler üzerine fabrikasyon sürecinde MSM fotodedektör tasarlamak için IDT maske deseni kullanılarak altın (Au) kontaklar oluşturulmuştur. Kullanılan IDT kontakların parmak uzunlukları 2 mm olup parmak kalınlıkları 10 μm ve parmaklar arası mesafe 10 μm ’dir. Fotodedektör üzerinde bulunan IDT kontaklar 100 adet parmaktan oluşmaktadır.

Fabrikasyonu yapılan n-tipi ZnO MSM fotodedektörlerin karakterizasyonları yapılmıştır. Elektriksel karakterizasyonları için ışık altında ve karanlık ortamda -5 V ve +5 V besleme gerilimi aralığında akım-voltaj (I-V) ölçümleri yapılmıştır. Alınan I-V ölçümleri incelendiğinde fotodedektörün üzerine gelen optik sinyal ile akımda hem negatif (-5 V) hem de pozitif (+5 V) bölgede bariz bir artışın olduğu gözlemlenmiştir. Buda MSM fotodedektör yapısının her iki yönde de besleme ile çalışabildiğini göstermektedir. Daha sonrasında ZnO MSM fotodektörün duyarlılık, tepki süreleri hesaplarını yapmak için fotoiletkenlik ölçümleri yapılmıştır. 5 V besleme gerilimi ve $0.325 \times 10^{-3} W$ optik güç altında alınan fotoiletkenlik ölçümleri incelenmiştir. Bu ölçüm sonuçları incelendiğinde fotodedektörlerin karanlık akım değerlerinin 1.9 mA mertebesinde olduğu ve maksimum fotoakımın 132.8 mA mertebesinde olduğu görülmüştür. Yükselme ve alçalma zamanları hesaplanmış ve en hızlı tepki süresine (4 s yükselme zamanı ve 22 s alçalma zamanı) en yüksek tavlama sıcaklığına sahip fotodedektörün olduğu belirlenmiştir. Alınan fotoiletkenlik ölçümleri sonucu fotoakım değerleri ince film kalınlıklarına ve tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak karşılaştırılmış ve tavlama sıcaklığı yüksek olan örneğin fotoakımının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Tanecik sınırları azalması sonucu, tanecik sınırları arasında ki saçılmalar azalıyor bu sayede fotoakımın arttığı düşünülmektedir. Fotodedektörün 0.25-5 V besleme gerili altında 0.25 V besleme gerilimi aralıklarıyla akım-zaman ölçümleri alınmış ve fotoakım değerlerinin değişimleri incelenmiştir. Bu ölçümler sonucu belirli besleme voltajı (2-3 V) değerleri aralığında fotodedektörlerin fotoakım değerlerinin maksimum değerlerine ulaştığı ve sonrasında besleme voltajı arttıkça fotoakımın azaldığı görülmüş ve bunun nedeninin zamanla örneğin ısınması ve fononların etkisi ile fotoakım değerinde azalmanın meydana gelmesi olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda örneğin ısınmaya başlayacağı aralığa kadar (2-3 V) elektrik alanının artması ile sürüklenme hızı artacağından elektronlar kusur olan bölgede kalamayacağı için o bölgeyi hızlı geçip akıma katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu nedenle fotoakım değerleri 2-3 V civarlarına kadar giderek artmaktadır. Farklı besleme voltajı altındaki fotoakım grafiklerinden besleme voltajına bağlı olarak yükselme zaman grafikleri çizilmiş ve bu grafiklerin incelenmesi sonucu fotodedektörün besleme voltajının artması ile yükselme zamanının azaldığı ve fotodedektörün hızının arttığı görülmüştür. Bunun nedeninin besleme voltajının artması ile oluşan elektron-boşluk çiftlerinin daha hızlı ayrılıp kontaklara ulaşmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

ZnO MSM fotodedektörlerin solar simülatörün lambası (Xe Lamba) filtreli ve filtresiz olarak kullanılıp ölçüm alınmıştır. Solar simülatörün lambasının önüne 370 nm filtre kullanılarak

fotoiletkenlik ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçüm sonuçları solar simülatör lambası (filtresiz) kullanılarak alınan fotoiletkenlik ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmış ve solar simülatörün lambası kullanılarak alınan fotoiletkenlik ölçümlerinde bulunan overshoot pikinin 370 nm filtre ile alınan ölçümlerde gözlemlenmediği görülmüştür.

Literatür ile kıyaslandığında bu çalışmada ki örneklerin karanlık akım değerlerinin oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedenlerinden bir tanesi büyütme şartları olduğu düşünülmektedir. ZnO örnekler de oldukça fazla tuzak seviyeleri mevcut. Literatür araştırması bizlere MBE ile büyütülen örneklerin karanlık akımlarının daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu da MBE ile büyütülen örneklerin PFCVAD ile büyütülen örneklerle göre daha az tuzak seviyelere sahip olduğundan dolayı olduğu düşünülmektedir.

MSM yapıda dedektör yapmanın p-n dedektör yapmaktan daha avantajlı olduğu bazı noktalar vardır. Bunlardan bazıları, fabrikasyonunun daha kolay olması, tek tip yarıiletkenler ile çalışılabilmesi sonucu maliyetin daha az olması ve tek tip saçılma merkezi olacağından saçılma mekanizmaları daha az. Bu sayede diğer yapılarda üretilen detektörlere göre dedektör hızı çok daha fazladır.

KAYNAKLAR

- [1]. Wolf, E. L., 2004, *Nanophysics and nanotechnology*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., Weinheim, ISBN: 3-527-40651-4.
- [2]. Lee, C. Y., Tseng, T. Y., Li, S. Y., and Lin, P., 2003, Growth of zinc oxide nanowires on silicon (100), *Tamkang J. Sci. Eng.* 6 (2), 127–132.
- [3]. Ogata, K., Sakurai, K., Fujita, S., Fujita, S., and Matsushige, K., 2000, Effects of thermal annealing of ZnO layers grown by MBE, *J. Cryst. Growth.* 214, 312–315.
- [4]. Ayouchi, R., Martin, F., Leinen, D., and Ramos-Barrado, J. R., 2003, Growth of pure ZnO thin films prepared by chemical spray pyrolysis on silicon, *J. Cryst. Growth.* 247 (3–4), 497–504.
- [5]. Kong, Y. C., Yu, D. P., Zhang, B., Fang, W., and Feng, S. Q., 2001, Ultraviolet-emitting ZnO nanowires synthesized by a physical vapor deposition approach, *Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics.* 78 (4), 407–409.
- [6]. Wu, J. and Liu, S., 2002, Low-temperature growth of well-aligned ZnO nanorods by chemical vapor deposition, *Adv. Mater. Wiley Online Library.* 14 (3), 215–218.
- [7]. Kara, K., TÜZEMEN, E. Ş., and Esen, R., 2014, Annealing effects of ZnO thin films on p-Si (100) substrate deposited by PFCVAD, *Turkish J. Phys. The Scientific and Technological Research Council of Turkey.* 38 (2), 238–244.
- [8]. Kara, K., 2013, *PFCVAD Sistemi ile Üretilen n ve p Tipi ZnO İnce filmlerin Fotoiletkenlik Özelliklerinin Karşılaştırılması*, Tez (Doktora), Çukurova Üniversitesi.
- [9]. BOĞA, S. S., 2017, *GaN Metal Yarıiletken Metal Fotodedektör Üretim Parametreleri ve Karakterizasyonu*, Tez (Yüksek Lisans), Ankara Üniversitesi.
- [10]. Baruah, S. and Dutta, J., 2009, Hydrothermal growth of ZnO nanostructures, *Sci. Technol. Adv. Mater. IOP Publishing.* 10 (1), 13001.
- [11]. Schulz, D., Ganschow, S., Klimm, D., and Struve, K., 2008, Inductively heated Bridgman method for the growth of zinc oxide single crystals, *J. Cryst. Growth.* 310 (7–9), 1832–1835.
- [12]. Takahashi, K., Yoshikawa, A., and Sandhu, A., 2007, Wide bandgap semiconductors, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Springer.* 239.
- [13]. Lee, J. H. and Park, B. O., 2003, Transparent conducting ZnO: Al, In and Sn thin films deposited by the sol–gel method, *Thin Solid Films.* 426 (1–2), 94–99.
- [14]. Sorar, İ., 2008, *Katkılı ve Katkısız Çinko Oksit (ZnO) İnce Filmlerin Hazırlanması ve*

Karakterizasyonu, Tez (Doktora), İstanbul Teknik Üniversitesi.

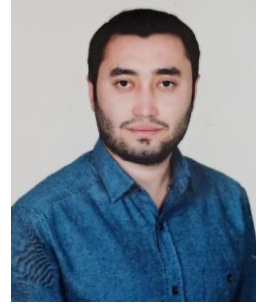
- [15]. Kasapoğlu, A. E., 2014, *Sol-Jel Spin Kaplama Metodu ile Büyütülen ZnO ve ZnO: Fe İnce Filmlerin Yapısal ve Yüzeysel Özellikleri*, Tez (Yüksek Lisans), Atatürk Üniversitesi.
- [16]. Lee, J. H., Ko, K. H., and Park, B. O., 2003, Electrical and optical properties of ZnO transparent conducting films by the sol-gel method, *J. Cryst. Growth*. 247 (1–2), 119–125.
- [17]. Natsume, Y. and Sakata, H., 2000, Zinc oxide films prepared by sol-gel spin-coating, *Thin Solid Films*. 372 (1–2), 30–36.
- [18]. Altamirano-Juárez, D. C., Torres-Delgado, G., Jiménez-Sandoval, S., Jiménez-Sandoval, O., and Castanedo-Pérez, R., 2004, Low-resistivity ZnO: F: Al transparent thin films, *Sol. energy Mater. Sol. cells*. 82 (1–2), 35–43.
- [19]. Wachs, I. E., 1996, Raman and IR studies of surface metal oxide species on oxide supports: Supported metal oxide catalysts, *Catal. Today*. 27 (3–4), 437–455.
- [20]. Wisitsoraat, A., Comini, E., Sberveglieri, G., Wlodarski, W., and Tuantranont, A., 2007, TiO₂ based nanocrystalline thin film gas sensors prepared by ion-assisted electron beam evaporation, *2007 2nd IEEE Int. Conf. Nano/Micro Eng. Mol. Syst.* 109–112.
- [21]. Shi, L. and Nihtianov, S., 2012, Comparative study of silicon-based ultraviolet photodetectors, *IEEE Sens. J.* 12 (7), 2453–2459.
- [22]. De Gruij, F. R., 1999, Skin cancer and solar UV radiation, *Eur. J. Cancer*. 35 (14), 2003–2009.
- [23]. Yassir Abdullahi, A., 2019, *Investigating Electrical and Photoconductive Properties of Aluminum Nitride Nanowire (AlNNW) Based Ultraviolet (UV) Photodetector*, Thesis (Msc), İstanbul Şehir University.
- [24]. Premi, S., Wallisch, S., Marinho, C. M., Weiner, A. B., Bacchiocchi, A., Wakamatsu, K., Benchara, E. J. H., Halaban, R., Douki, T., Brash, D. E., 2015, Chemiexcitation of melanin derivatives induces DNA photoproducts long after UV exposure, *American Association for the Advancement of Science*. 347 (6224), 842–847.
- [25]. Chen, H., Liu, K., Hu, L., Al-Ghamdi, A. A., and Fang, X., 2015, New concept ultraviolet photodetectors, *Mater. Today*. 18 (9), 493–502.
- [26]. Zou, Y., Zhang, Y., Hu, Y., and Gu, H., 2018, Ultraviolet detectors based on wide bandgap semiconductor nanowire: A review, *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 18 (7), 2072.
- [27]. Sarcan, F., 2018, *Rezonans Kaviteli ve İç Kazançlı GaInNAs- Tabanlı IR Fotodedektör*, Tez (Doktora), İstanbul Üniversitesi.
- [28]. Erol, A. and Balkan, N., 2013, *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*, Ankara,

Seçkin Yayıncılık, ISBN: 9789750222214.

- [29]. Sun, X., 2002, *High performance 1300 nm photodetectors grown by molecular beam epitaxy*, Thesis (PhD), The University of Texas at Austin.
- [30]. Rogalski, A., 2011, *Infrared detectors* CRC Press, Boca Raton, ISBN: 978-1-4200-7671-4.
- [31]. Biyikli, N., Kimukin, I., Tut, T., Aytur, O., and Ozbay, E., 2005, Fabrication and characterisation of solar-blind Al/sub 0.6/Ga/sub 0.4/N MSM photodetectors, *Electron. Lett.* IET. 41 (5), 274–275.
- [32]. Çalışkan, M. D., 2014, *Yeni Nesil İnce filmler İle Optoelektronik Uygulamaların Araştırılması*, Tez (Doktora), Hacettepe Üniversitesi.
- [33]. Aşar, N., 2011, *Çinko Oksit (ZnO) Nanoyapıların Sentezlenmesi ve Sensör Özelliklerinin İncelenmesi*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi.
- [34]. Van de Walle, C. G., 2000, Hydrogen as a cause of doping in zinc oxide, *Phys. Rev. Lett.* APS. 85 (5), 1012.
- [35]. Çetinkaya, Ç., 2016, *III-V Grubu Alaşım Yarıiletkenlerde Gunn Olayına Dayalı Işımanın İncelenmesi*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi.
- [36]. Kuruoğlu, F., 2018, *Nano Yapılı Üçüncü Olmayan Bellek Aygıtların Üretimi ve Karakterizasyonu*, Tez (Doktora), Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [37]. Knoll, M., 1935, Static potential and secondary emission of bodies under electron irradiation, *Z Tech Phys.* 16, 467.
- [38]. Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., and Joy, D. C., 2017, *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*, Springer, New York, ISBN: 1493966766.
- [39]. Pankove, J. I., 1971, *Optical processes in semiconductors*, Dover publication, Mineola, ISBN: 0-486-60275-3.
- [40]. Erdoğan, H., 2010, *P-tipi Çinko Oksit (ZnO) Yarıiletken İnce Filminin Atmalı Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi ile Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu*, Tez (Doktora), Çukurova Üniversitesi.
- [41]. Ivanova, T., Harizanova, A., Koutzarova, T., and Vertruyen, B., 2010, Study of ZnO sol-gel films: Effect of annealing, *Mater. Lett.* 64 (10), 1147–1149.
- [42]. Fang, Y., Hou, Y., Hu, Y., and Teng, F., 2015, Transient photocurrent response of plasmon-enhanced polymer solar cells with gold nanoparticles, *Materials (Basel)*. 8 (7), 4050–4060.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Ümit DOĞAN
Doğum Yeri	Zonguldak
Doğum Tarihi	07.01.1992
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	0537 838 46 19
E-Posta Adresi	doganumit10@gmail.com
Web Adresi	http://nano-optoelectronics.org/



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik Bölümü
Mezuniyet Yılı	15.06.2016

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Katıhal Fiziği