
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

Al KATKILI n-ZnO/p-Si HETEROJONKSİYON FOTO DİYOTUN IŞIĞA DUYARLILIK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Ömer Faruk GÖKTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2018

Ömer Faruk GÖKTAŞ tarafından hazırlanan "Al KATKILI n-ZnO/p-Si HETEROJONKSİYON FOTO DİYOTUN IŞIĞA DUYARLILIK PERFORMANSININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Orhan KAPLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ..……

İkinci Danışman: Prof. Dr. Abdullah YILDIZ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi ...……

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. İlyas ÇANKAYA

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi ...……

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Nihat ÖZTÜRK

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Üye: Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Tez Savunma Tarihi: 11/07/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..…….

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Ömer Faruk GÖKTAŞ

07/07/2018

Al KATKILI n-ZnO/p-Si HETEROJONKSİYON FOTO DİYOTUN IŞIĞA DUYARLILIK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ömer Faruk GÖKTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2018

ÖZET

Al-katkılı ZnO (AZO)/p-Si heterojonksiyon fotodiyot sol – jel spin kaplama yöntemiyle p Si alttaşı üzerine AZO filmlerinin depozisyonu ile üretildi. ZnO tabakasının üç farklı kalınlık değeri için üretilen cihazların diyot, fotodiyot ve fotovoltaik parametreleri araştırıldı. Elde edilen üç farklı kalınlıktaki (AZO 2, AZO 4, AZO 6) ince filmlerin yapısal, yüzeysel ve optik özellikleri araştırıldı. X-ışını difraksiyon (XRD) desenlerinden, üretilen ZnO ince filmlerin hegzagonal yapıda olduğu tespit edildi. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçümleri üretilen üç farklı kalınlıktaki ince filmin yüzeylerinin düzgün ve homojen bir dağılıma sahip olduğu görüldü. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri ile ince filmlerin kalınlıkları tespit edildi. İnce filmlerin karanlık ve AM 1.5 standart test şartları altında elde edilen akım-gerilim karakteristiklerinden ışığa duyarlılık (PS) ve doğrultma oranları (RR) hesaplandı. Elde edilen sonuçlardan üretilen ince filmlerin diyot, fotodiyot ve fotovoltaik cihaz olarak çalışması için ZnO tabakasının optimum kalınlıkları tespit edildi. Sonuç olarak AZO 2/Si cihazının, AZO 4/Si ve AZO 6/Si cihazlarına göre nispeten daha iyi sonuçlar verdiği görüldü.

Bilim Kodu	:	90529
Anahtar Kelimeler	:	AZO film, heterojonksiyon, ışığa duyarılık, fotovoltaik
Sayfa Adedi	:	55
Danışman	:	Dr. Öğr. Üyesi Orhan KAPLAN
İkinci Danışman	:	Prof. Dr. Abdullah YILDIZ

PHOTOSENSITIVITY PERFORMANCE OF Al DOPED n-ZnO/p-Si HETEROJUNCTION DEVICES

(M. Sc. Thesis)

Ömer Faruk GÖKTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2018

ABSTRACT

Al-doped ZnO (AZO)/p-Si heterojunction devices were fabricated by deposition of AZO films on p-Si substrates using sol - jel spin coating technique. Diode, photodiode and photovoltaic parameters of fabricated devices in three different thickness were studied. Structural, surface and optical properties of fabricated thin films in three different thickness (AZO 2, AZO 4, AZO 6) of ZnO were investigated. It was observed from the x-ray diffraction patterns that AZO films were oriented to the c-axis of the hexagonal wurtzite structure along the growth direction. Scanning AFM measurements presented that ZnO thin films had a homogeneous and uniform distribution. The thickness of the film were measured by scanning electron microscope. Photosensitivity (PS) and rectification rates (RR) of devices were calculated from current-voltage characteristics performed under dark and AM 1.5 standard test conditions. Optimum thickness of ZnO layer for fabricated devices to function as diode, photodiode and photovoltaic device were obtained. It was concluded that AZO 2/Si showed better performance as compared to AZO 4/Si and AZO 6/Si devices.

Science Code : 90529
Key Words : AZO film, heterojunction, photosensitivity, photovoltaic
Page Number : 55
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Orhan KAPLAN
Co-Supervisor : Prof. Dr. Abdullah YILDIZ

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim ve tez çalışmalarım süresince benden bilgi, deneyim ve ilgilerini esirgemeyen değerli hocam Dr. Ögr. Üyesi Orhan KAPLAN'a, (Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı)

Fotodiyot elde edilmesi ve karakterizasyonu konusunda Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Laboratuvarları olanaklarından faydalanmamı sağlayan emeğinden ve bilgilerinden yararlandığım değerli hocam Prof. Dr. Abdullah YILDIZ' a, (Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı)

Tez çalışmalarım esnasında destek ve yardımlarıyla bu tezin oluşumunda katkı sunan değerli arkadaşlarım Nur Efşan KÖKSAL ile Mohammed SBETA'ya ve laboratuvarda birlikte çalıştığım tüm arkadaşlarıma,

Destek ve ilgisiyle her zaman yanımda olan hayat arkadaşım Cansu GÖKTAŞ'a,

Ve haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim, maddi ve manevi destekleriyle hep yanımda olan sevgili aileme,

En içten duygularımla teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET v

ABSTRACT vi

TEŞEKKÜR vii

İÇİNDEKİLER viii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. GENEL BİLGİLER 5

2.1. Yarıiletkenler 5

2.2. Katkılanmış Yarıiletkenler 8

2.3. p – n Eklemi 12

2.4. Fotodiyot 15

2.5. Güneş Pili Parametreleri 16

3. METERYAL VE YÖNTEM 19

3.1. Deneysel Kısım 19

3.1.1. Çözelti hazırlama 19

3.1.2. Temizleme süreci 20

3.1.3. Kaplama 21

3.1.4. Metalizasyon 22

3.2. Cihaz Karakteristikleri 23

3.2.1. X-Işınımı kırınımı (XRD) spektrometresi 23

Sayfa

3.2.2. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) 24

3.2.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) 26

3.2.4. UV – Vis absorpsiyon spektrometresi 27

3.2.5. Akım – Voltaj (I-V) ölçümleri 28

4. ARAŞTIRMA BULGULARI 31

4.1. X-Işınımı Kırınımı (XRD) Spektrometresi Sonuçları 31

4.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Sonuçları 33

4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları 35

4.4. UV – VIS Sonuçları 36

4.5. Akım – Gerilim (I-V) Ölçüm Sonuçları ve PV Karakteristiği 39

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 45

KAYNAKLAR 49

ÖZGEÇMİŞ 55

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Kimyasal çözücü ve katkılama için kullanılan madde miktarları..... 19

Çizelge 4.1. AZO ince filmlerinin yapısal parametreleri ……... 33

Çizelge 4.2. Çeşitli kalınlıklardaki Al katkılı ZnO ince filmler için yasak enerji aralığı değerleri 39

Çizelge 4.3. Numunelere ait bariyer potansiyelleri 40

Çizelge 4.4. Numunelere ait -4V'da hesaplanan PS ve RR değerleri 42

Çizelge 4.5. Önceki çalışmalara ait RR, PS değerleri..... 42

Çizelge 4.6. PV karakteristiği için önemli parametreler..... 44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Foto - katot (a) ve yarıiletken fotodiyotun (b) basit gösterimi 2

Şekil 2.1. Valans ve iletim bantlarının şematik gösterimi 5

Şekil 2.2. İletken, yarıiletken ve yalıtkanlarda enerji bant yapıları 6

Şekil 2.3. (a) Silisyumun yüz merkezli kübik birim hücresi, (b) Silisyum atomlarının her biri bir çift elektrona sahip dört kovalent bağının diyagramsal gösterimi. 6

Şekil 2.4. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerde elektronların valans ve iletim bandına dizilişi..... 7

Şekil 2.5. Si kristalinde verici (a) ve alıcı (b) atom safsızlığı..... 10

Şekil 2.6. ZnO'nun kristal yapıları. 10

Şekil 2.7. Al katkılı ZnO kristalinin iki boyutta şematik gösterimi..... 11

Şekil 2.8. Fermi seviyesinin saf ve katkılı yarıiletkenlerde konumları..... 11

Şekil 2.9. p – n eklemi (a) ve tüketim bölgesinin (b) şematik gösterimi 13

Şekil 2.10. Tüketim bölgesinde gerilim oluşumu 13

Şekil 2.11. Fotodiyotta elektron ve deşiklerin hareketi 16

Şekil 2.12. Bir fotovoltaik hücrenin (a) akım-gerilim karakteristiği ve (b) eşdeğer devresi 17

Şekil 3.1. Silisyum yüzeyin temizlenme süreci 20

Şekil 3.2. Numune üzerinde gümüş pastanın görüntüsü 22

Şekil 3.3. Numune üzerinde alüminyum pastanın görüntüsü 23

Şekil 3.4. Atomik kuvvet mikroskobu çalışma prensibi..... 25

Şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskobu şematik gösterimi 26

Şekil 3.6. Basit bir spektrometrenin elemanları..... 28

Şekil 3.7. Güneş simülatörü iç yapısı..... 29

Şekil 4.1. Al katkılı ZnO ince filmin farklı kalınlıklar için XRD sonuçları 32

Şekil 4.2. 2D (sol) ve 3D (sağ) AFM sonuçları a) AZO 2 b) AZO 4 c) AZO 6..... 34

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.3. Numunelere ait SEM görüntüleri a) AZO 2 b) AZO 4 c) AZO 6 35

Şekil 4.4. Çeşitli kalınlıklardaki Al katkılı ZnO ince filmlerin geçirgenlik spektrumları. 36

Şekil 4.5. Çeşitli kalınlıklardaki Al katkılı ZnO ince filmin absorbans spektrumları 37

Şekil 4.6. Al katkılı ZnO ince filmin çeşitli kalınlıklardaki soğurma katsayısın karesine karşılık enerji değişim spektrumları 38

Şekil 4.7. AZO 2 için karanlık, aydınlık ve görünür ışık koşulları altında n-AZO/p-Si'nin akım – voltaj grafiği (AM 1.5)..... 41

Şekil 4.8. AZO 4 için karanlık, aydınlık ve görünür ışık koşulları altında n-AZO/p-Si'nin akım – voltaj grafiği (AM 1.5)..... 41

Şekil 4.9. AZO 6 için karanlık, aydınlık ve görünür ışık koşulları altında n-AZO/p-Si'nin akım – voltaj grafiği (AM 1.5)..... 41

Şekil 4.10. AZO numunelerine ait PV karakteristikleri..... 43

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Numunelerin fırınlandığı optosense fırın 21

Resim 3.2. Sol – gel spin kaplama sonrası elde edilen numuneler..... 22

Resim 3.3. Kullanılan XRD spektroskopisi sistemi..... 24

Resim 3.4. Kullanılan atomik kuvvet mikroskobu (AFM) sistemi..... 25

Resim 3.5. Çalışmada kullanılan QUANTA 400F Field Emission SEM..... 26

Resim 3.6. Kullanılan UV – Vis spektrometre sistemi..... 27

Resim 3.7. Kullanılan solar simülatör ve akım – voltaj ölçüm sistemi 29

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Kısaltmalar	Açıklamalar
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
Al	Alüminyum
Au	Altın
AZO	Alüminyum katkılı çinko oksit
B	Boron
C_{60}	Fulleren
Cu_2O	Bakır (II) sülfit
dk	Dakika
E_f	Fermi enerjisi
E_g	Bant aralığı
EtOH	Etanol
FF	Doluluk faktörü
FWHM	Yarı şiddet genişliği
Ga	Galyum
GaAs	Galyum arsenit
GaN	Galyum nitrat
h	Planck sabiti
I	Akım
I_{SC}	Kısa devre akımı
M	Molarite
MEA	Monoetanolamin
ml	Mililitre
Ml	Mangan
mV	Mili Volt
mW	Miliwatt
nm	Nanometre

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
Pd	Paladyum
P_m	Maksimum güç
RMS	Kare ortalama karekök
Rpm	Dakikadaki devir
R_S	Seri direnç
R_{SH}	Şönt direç
Se	Selenyum
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
Si	Silisyum
UV - VIS	Ultraviyole – VISIBLE (Mor ötesi görünür bölge)
V	Volt
V_B	Bariyer gerilimi
V_{OC}	Açık devre gerilimi
ZAD	Çinko asetat dihidrat
ZnO	Çinko oksit
ZnO:Al	Al katkılı çinko oksit
ZnS	Çinko sülfür

Simgeler	**Açıklamalar**
α	Soğurma katsayısı
θ	Bragg açısı
λ	Dalga boyu
υ	Frekans
µA	Mikroamper
^{0}C	Santigrat
2θ	Kırınım açısı

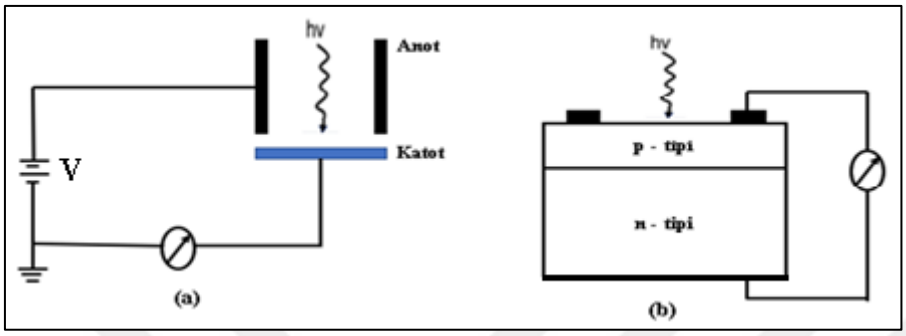
1. GİRİŞ

Günümüzde nanoyapılı malzemelerin elektriksel ve optik özellikleri tane boyutunda kontrol edilebilmektedir. Bu ölçekte malzemelerin bilinen klasik davranışları yerini kuantum davranışlara bırakır. Örneğin elmas kristali iyi bir yalıtkan olup karbon atomlarından meydana gelmektedir. Ancak aynı malzeme nanometre ölçütlerinde incelendiği zaman çok iyi bir iletken olduğu gözlenmiştir [1]. Bu gelişme, nanokristal yarıiletkenlerin askeri, sivil ve uzay çalışmaları gibi pek çok alanda kullanılmalarına imkân sağlamaktadır. Özellikle iyi optik geçirgenlik, elektriksel iletkenlik ve elektrolüminesans sahip nanokristallerin geliştirilmesi; sıvı kristal ekran, ışık yayan diyot, yüksek elektron mobiliteli transistör, lazer diyot, güneş hücresi ve fotodetektör gibi birçok optoelektronik aygıtın üretilmesine yol açmıştır. Bu nedenle, yüksek optik geçirgenliğe, elektriksel iletkenliğe ve elektrolüminesansa sahip nano malzemelerin üretilmesi oldukça önemlidir.

Ultraviyole detektörleri (UV) geniş olarak UV foton detektörleri (veya fotodetektörü) ve termal detektörler olmak üzere iki kategoride toplanabilir. Fotodetektörlerde, malzeme tarafından soğrulan fotonlar elektronların enerji seviyelerinin değişimine sebep olurlar. Elektronların enerji seviyesi değiştirmeleri ise elektrik sinyalleri olarak gözlemlenir. Termal detektörlerde gelen radyasyon malzeme tarafından soğrulur ve sıcaklık artışına sebep olur. Malzemenin sıcaklığa bağlı özelliklerindeki değişim ise elektrik sinyali olarak gözlemlenir.

Benzer şekilde UV foton detektörleri de fotoelektrik detektörler ve fotografik detektörler olmak üzere iki alt sınıfa ayrılabilir. Fotografik detektörler görüntü depolama amacıyla kullanılırlar ve bir tek ışınlama ile büyük bir veriyi kaydetmeleri mümkündür. Ancak bu detektörlerin hassasiyetleri oldukça düşüktür. Diğer taraftan fotoelektrik detektörler, foto-katot detektörler ve yarıiletken detektörler olmak üzere iki kısma ayrılabilir. Foto-katot detektörler (Şekil 1.1.a), fotonun vakum ortamında fotona duyarlı katot'a çarparak elektron koparması ve katot ile anot arasına uygulanan bir elektrik potansiyeli ile akım oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Yarıiletken foto-detektörlerde (Şekil 1.1.b) ise yarıiletken tarafından soğrulan fotonlar fotoelektrik etki vasıtasıyla elektron-deşik çiftlerinin oluşmasına yol açar. Eklem bölgesinde oluşan bir elektrik alanından dolayı elektron-deşik (boşluk) çiftleri birbirinden ayrılırlar ve uygulanan bir potansiyel vasıtasıyla elektrik akımı oluştururlar. Fotoelektrik etkinin meydana gelmesi için soğrulan fotonun enerjisinin

elektronları yarıiletken malzemenin iletim bandına çıkaracak kadar yüksek olması gerekir. Özellikle son yıllarda, çeşitli ticari ve askeri uygulamalarından dolayı morötesi (UV) bandının kısa dalga boyu aralığında çalışan yarıiletken fotodiyotların üretilmesi üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır [2-11].



Şekil 1.1. Fotokatot (a) ve yarıiletken fotodiyotun (b) basit gösterimi

UV radyasyonu elektromanyetik spektrumun 10 - 400 nm aralığını oluşturmaktadır [2] . UV radyasyonunun başlıca kaynağı güneştir. Ancak, Güneş'ten gelen UV radyasyonunun büyük bir bölümü iyonosfer ve ozon tabakası tarafından saçılmaya uğramakta, ancak dalga boyu 300 nm ile 400 nm aralığındaki UV ışınları (Güneş'ten gelen UV ışınlarının yaklaşık %3'ü) yeryüzüne ulaşmaktadır. UV radyasyonu bir iyonlaştırıcı radyasyon çeşididir ve bazı reaksiyonları aktive eder. Özellikle atomik veya moleküler düzeyde iyonlaştırıcı özelliği, foton enerjisinin elektrik akımına dönüştürülmesine imkân sağlamaktadır.

Çeşitli yarıiletken malzemelerden elde edilen optoelektronik sistemlerden bazıları elektronik sinyalini (elektrik akımını) optik radyasyona dönüştürürken (LED'ler ve Lazerler), bazıları ise tersine optik radyasyonu elektrik akımına dönüştürmektedir (fotodiyot ve fototransistör). Optoelektronik sistemlerde kullanılan yarıiletken malzemelerin fabrikasyonu ve karakterizasyonu önem arz etmektedir. Yarıiletken fotodiyotların fabrikasyonunda; ışığa duyarlık, kazanç, kuantum verimi, tepki süresi ve bant genişliği gibi özellikler oldukça önemlidir [2-11].

Çalışma prensibi fotodiyota benzeyen fotovoltaik sistemler üzerine düşen güneş ışığını fotoelektrik etki yoluyla elektrik akımına dönüştüren sistemlerdir. Fotoelektrik etki radyasyonun soğrulması sonucu bir metal yüzeyinden elektronların koparılması olayıdır. Einstein tarafından 1905 yılında keşfedilmiştir ve bu olayı açıklamasından dolayı Einstein

1921 yılında Nobel ödülünü almıştır. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan uygun malzemeler silisyum, bakır - kadmium sülfat ve galyum - arsenit gibi yarıiletkenler malzemelerdir [12]. Bir *n* - tipi saydam yarıiletken olan katkısız ZnO kristali; hekzagonal wurtz kristal yapısına olup, oda sıcaklığında 3,37 eV'lik enerji bant genişliğine ve 60 meV eksiton bağlanma enerjisine sahiptir [13-15].

Yarıiletken ZnO ince filmler elektriksel iletkenliği ve optik geçirgenliği yüksek malzeme olmalarından dolayı ZnO özellikle varistörler, gaz sensörleri, optik sensörler, transistörler ve güneş panelleri gibi birçok elektronik devre elemanının yapımında kullanılmaktadır. ZnO aynı zamanda yüzey akustik dalga bileşenlerinde ve piezoelektrik cihazlarda kullanılan mükemmel bir piezoelektrik malzemedir [16].

Yüksek eksiton bağlanma enerjisine sahip olması, düşük üretim maliyeti, toksik olmaması ve H_2 plazma atmosferinde yüksek kararlılığa sahip olmasından dolayı, son yıllarda ZnO filmlerin değişik metotlar kullanılarak farklı altyapılar üzerine büyütülmesi ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yüksek kalitede ZnO bileşiği; termal buharlaştırma [17], sol – jel spin kaplama [18], çinko oksidasyon [19], ve hidrotermal [20] gibi basit metotlarla üretilebilmektedir. Wang ve diğerleri [21] %1,5; %2,8 ve %4,1 Fe katkılı ZnO ince filmleri magnetik sputter metodunu kullanarak sabit sıcaklık (573 K) ve basınçta ($4{,}5x10^{-4}$ Pa) Si altyapılar üzerinde büyüttü. Çalışmada hazırlanan ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri incelendi ve Fe katkısının hekzagonal wurtz yapısını değiştirmediği görüldü. Bu çalışmada ayrıca Fe konsantrasyonu ile kristal yüzeyindeki tanecik boyutunun azaldığı ve yasak enerji aralığının küçüldüğü görülmüştür. Soumahoro ve diğerleri tarafından yapılan benzer bir çalışmada [22] ise farkldiğerlerıı oranlarda demir katkılı ZnO ince filmler sprey proliz yöntemi ile büyütüldü, elde edilen ince filmlerin elektriksel ve optiksel özellikleri araştırtıldı ve benzer şekilde Fe katkısının ZnO ince filmlerin yasak enerji aralığını azalttığı görüldü.

ZnO filmlerin elektriksel iletkenliği çeşitli safsızlık atomları (Al, In, Ga, B gibi) ile katkılanması sonucu arttırılabilir [23]. Özellikle %1-2 oranında Al katkılanması sonucu ZnO ince filminin katkılanmamış ZnO'e göre daha düşük özdirenç gösterdiği görülmüştür [24]. ZnO filmlerinin elde edilmesinde; yüksek kimyasal homojenlik ve kalınlık kontrolü, düşük çalışma sıcaklığı, parçacık ve grainlerin büyüklük ve morfolojilerinin kontrol edilebilmesi, basit ve düşük maliyetli olmasından dolayı sol - jel metodunun diğer büyütme metotlarına göre daha avantajlı olduğu görülmüştür [25]. Suwanboon ve diğerleri [25] cam

alt tabaka üzerine sol - jel tekniğini kullanarak elde ettikleri katkısız ve %10 Al (Alüminyum) ve %10 Mn (Mangan) katkılanmış ZnO ince filmlerinin yapısal ve optiksel özelliklerini inceleyerek karşılaştırdı. Çalışmada, Al iyonlarının c-ekseni yönelimini arttırdığı Mn'nin ise c-eksenini engellediği görülmüştür. Ayrıca Al ve Mn katkılamanın tane büyüklüğünü azalttığı görülmüştür. Yong-Nam ve diğerleri [26] cam alt tabaka üzerinde büyütülmüş Al katkılı (0 0 2) düzlemi yönelimli ZnO ince filmleri üretti ve büyütme sonrası sıcaklığın elektrik ve optik özelliklere etkisini araştırdı. Çalışmada tavlama sıcaklığın (0 0 2) düzlemi boyunca c-ekseni yönelimini arttırdığı görülmüştür. Young - Sung ve diğerleri [7] benzer şekilde sol - jel tekniğini kullanarak elde ettikleri Al katkılı (0 0 2) düzlemi yönelimli ZnO ince filmlerin elektrik ve optik özelliklerine tavlama sıcaklığının etkisini araştırdı ve Yong - Nam ve diğerlerinin bulduğu sonuçları teyit etti. Bu çalışmada tavlama sıcaklığının 500^{o}C den 650^{o}C ye çıkarıldığında ince filmlerin elektriksel özdirencinin 73 Ω cm'den 22 Ωcm'ye düştüğü, ince filmlerin yüzeyinin düzenli ve nano büyüklükte bir mikro yapıda olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca, optik filmlerin 650^{o}C de %86 olan optik geçirgenliğinin sıcaklık 700^{o}C ye çıkarıldığında %80 seviyesine kadar azaldığını tespit etmişlerdir.

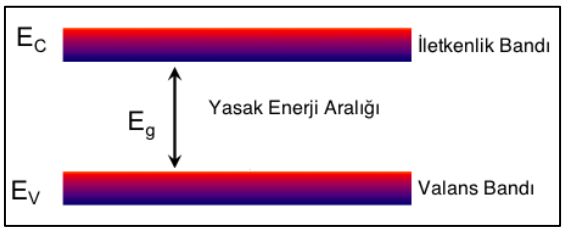
Literatürde Al katkılı ZnO ince filmlerin üretilmesinde genel olarak tavlama sıcaklığının ve katkılama oranlarının ince filmin yapısal, elektriksel ve optiksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır [2-33, 42-52]. Ancak ince film kalınlığının bu özelliklere etkisi araştırılmamıştır. Bu nedenle bu tez çalışmasında Al katkılı n-ZnO(AZO)/p-Si heterojonksiyon fotodiyot, sol – jel spin kaplama yöntemiyle p-Si alt tabaka üzerine AZO filmlerinin depozisyonu ile üretildi. Fotodiyotun karanlık ve AM 1.5 standart test şartları altında elde edilen akım-gerilim karakteristiklerinden ışığa duyarlılık ve doğrultma oranları ile fotovoltaik (PV) parametreleri hesaplanarak PV karakteristiği belirlendi. Yapısal özellikleri ve yüzey analizleri ise XRD, AFM ve SEM ile analiz edildi.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde fotodiyot yapımında kullanılan yarıiletken malzemelerin özellikleri, katkılama, p-n eklemi, fotodiyotun çalışma prensibi ve fotodiyot çeşitleri tartışıldı. İlave olarak bu çalışmada kullanılan ZnO bileşiğinin özellikleri verildi.

2.1. Yarıiletkenler

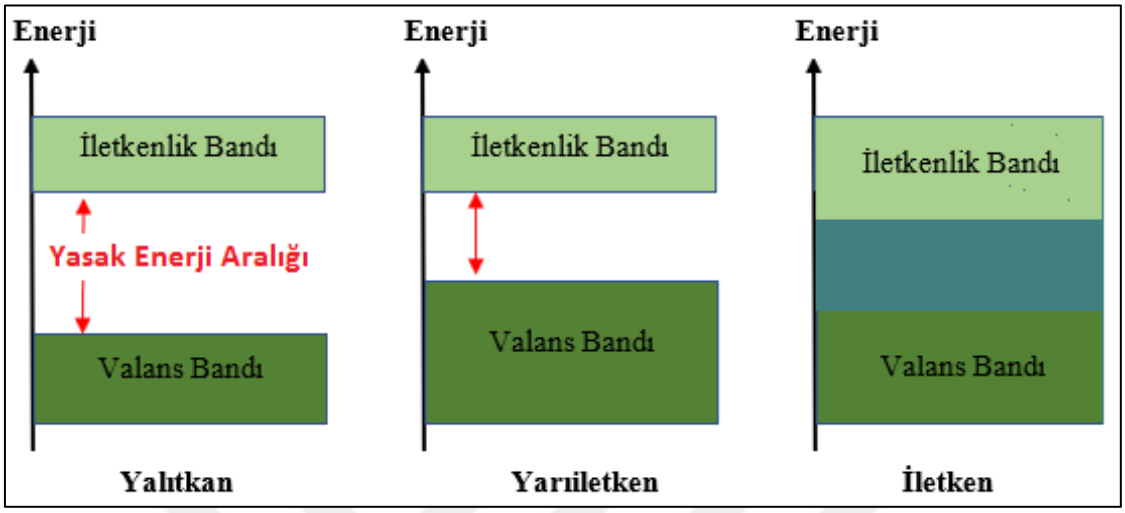
Yarıiletkenler basit olarak elektriksel özdirençleri 10^{-2} ile 10^{9} Ω cm arasında değişen malzemeler olarak tanımlanabilir. Alternatif bir tanımda elektronik uyarılmalar için bant genişlikleri cinsinden yapılabilir. İzole bir atomda elektronlar yalnızca kesikli enerji seviyelerinde bulunurlar. Tek atom için geçerli olan enerji diyagramları atomlar bir araya gelip katı maddeyi meydana getirdiklerinde geçerli değildir. Atomlar bir kristal yapıyı oluşturmak üzere bir araya geldiklerinde, atomik etkileşmelerden dolayı atomların sahip oldukları enerji seviyeleri birçok enerji seviyelerine bölünürler. Bu enerji seviyelerinden birbirine çok yakın olanlar sürekli enerji bantlarını oluştururlar. Enerji bantlarından en yüksek iki tanesi valans bandı ile iletim bandı olarak adlandırılır. Bir katıda elektronlar valans ve iletim bantları arasındaki enerji değerlerine sahip olamazlar. T=0 K de elektronların doldurduğu en son enerji seviyesi (valans bant enerjisi) ile T=0 K de elektronlar tarafından doldurulmamış en ilk enerji seviyesi (iletim bant enerjisi) arasındaki fark yasak enerji aralığı veya bant genişliği olarak adlandırılır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Valans ve iletim bantlarının şematik gösterimi

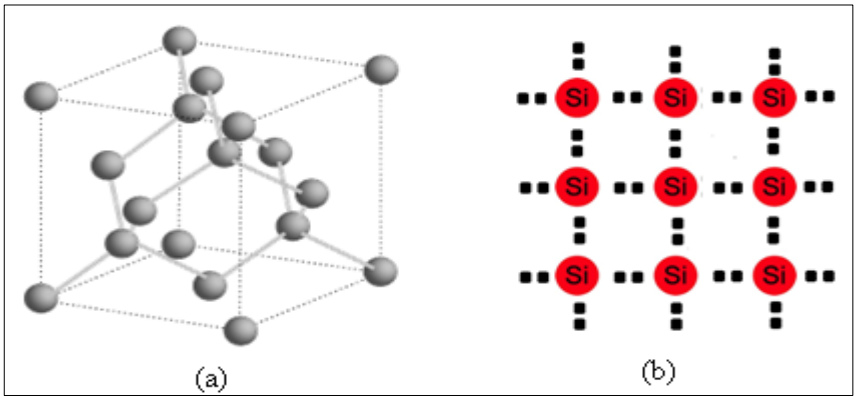
Bant genişlikleri 0,05 eV'tan daha küçük olan malzemeler metal veya yarı metal, bant genişlikleri 3 eV'tan büyük olan malzemeler ise daha ziyade yalıtkan malzemeler olarak tanımlanabilir. Yarıiletkenler elektronik uyarılmalar için enerji aralığı 0,07 eV ile 1,4 eV aralığında değişen malzemelerdir (Şekil.2.2). Ancak bu tanımlamanın dışında kalan durumlarda söz konusudur. Örneğin bir yarıiletken olan elmasın bant genişliği 6 eV iken,

bir yarı yalıtkan olan GaAs (Galyum arsenit)'ın bant genişliği 1,5 eV dur. Optoelektronikte önemli bir malzeme olan GaN (Galyum nitrat)'ın enerji bant genişliği ise 3,5 eV'dur [27].



Şekil 2.2. İletken, yarıiletken ve yalıtkanlarda enerji bant yapıları

Şüphesiz en iyi bilinen yarıiletkenler silisyum (Si) ve germanyum (Ge)'dur. Ancak doğal veya laboratuvar ortamında sentezlenen pek çok yarıiletkenler de mevcuttur. Örneğin ZnS (Çinko sülfür) ve Cu_2O (Bakır-II oksit) gibi mineraller yapay yarıiletkenlerdir. Yarıiletkenler birçok farklı kimyasal kompozisyona ve farklı şekildeki kristal yapılara sahiptirler. Si, C_{60} (Fulleren) ve Se (Selenyum) temel yarıiletkenler, GaAs gibi yarıiletkenler ise ikili bileşikler olarak adlandırılır. Aynı zamanda yarıiletken olan birçok organik bileşik de mevcuttur. Silisyumun kristal yapısı elmasınki ile aynıdır. Her bir silisyum atomu Şekil 2.3'de görüldüğü gibi dört komşu silisyum atomu ile kovalent bağ yapar.

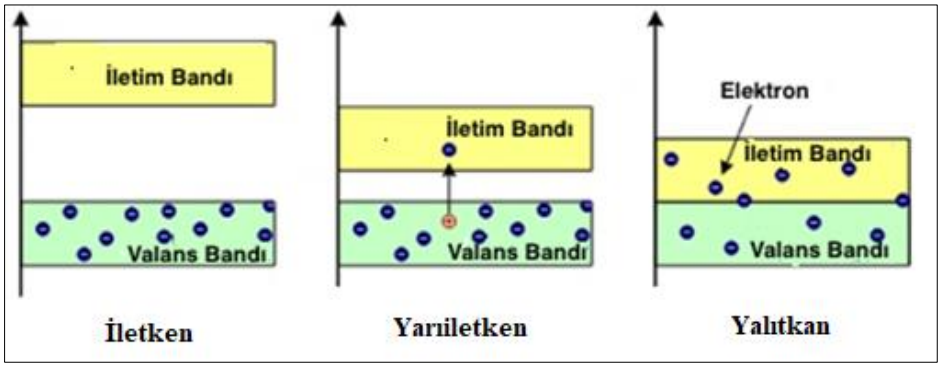


Şekil 2.3. (a) Silisyumun yüz merkezli kübik birim hücresi, (b) Silisyum atomlarının her biri bir çift elektrona sahip dört kovalent bağının diyagramsal gösterimi [27]

Bir malzemenin iletkenliği sahip olduğu serbest elektronların sayısı ve bu elektronların mobilitesine bağılıdır. Metallerde serbest elektronların sayısı yüksektir ve sıcaklığa bağlı değildir. Sıcaklık artığında iletkenlerin direnci artar ve mobilite azalır. Valans yörüngeleri iletkenlere göre daha fazla dolu olduğundan yarıiletkenlerde atomlar arasındaki bağ daha kuvvetlidir. Yarıiletkeni iletken hale getirmek için bu bağı bozabilecek bir enerji uygulamak gerekir. Silisyumun enerji aralığı 1,1 eV, germanyumun 0,7 eV'tur. Germanyum silisyuma göre daha iyi iletkendir. Yarıiletkenlerde sıcaklık arttığında taşıyıcıların sayısında hızlı bir artış olur. Saf silisyum oda sıcaklığında yalıtkan iken, yüksek sıcaklıklarda zayıf bir iletkendir.

Eğer silisyumdaki bir elektron bir fotonun soğrulması sonucunda koparsa silisyum iletken hale gelir. Kristal ν frekansına sahip bir fotonla ışınlandığında elektrona aktarılan maksimum enerji $h\nu$ olur. Valans bandından iletim bandına bir elektronun çıkarılması için fotonun enerjisinin E_C-E_V den daha büyük olması gerekir. Bu enerji ile ışınlanan bir kristalde valans bandından iletim bandına çıkan elektronlar fotoiletkenlik oluştururlar. Fotoiletkenlik serbest hale geçen elektronların sayısı ile orantılıdır.

Yalıtkanlarda valans elektronları komşu atomlar arasında güçlü bağlar oluşturur. Bu bağları bozmak zordur ve bu nedenle akım iletimini sağlayacak serbest elektronlar mevcut değildir. Yarıiletkenlerdeki atomlar arasındaki bağlar orta derecede güçlüdür. Bu nedenle termal titreşimler bazı bağların bozulmasına sebep olabilir. Bir bağ koptuğunda bir elektron valans bandından iletim bandına geçer. Bu elektron bir hareketli negatif yük taşıyıcısıdır. Elektronun koptuğu atomda ise bir elektron boşluğu oluşur (Şekil 2.4). Bu deşik ise bir pozitif yük gibi davranır ve pozitif yük taşıcısı olarak adlandırılır.



Şekil 2.4. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerde elektronların valans ve iletim bandına dizilişi

2.2. Katkılanmış yarıiletkenler

Kristal örgünün yapısından dolayı yarıiletkenlerde izinli ve yasak bant denilen enerji bölgeleri meydana gelir. İzinli enerji bantları, elektronların yerleşebildikleri enerji seviyelerinden oluşurken, izinli bantların arasında elektronlarca yerleşilemeyen yasak bantlar bulunur. Yasak bant aralığı terimi yarıiletkenlerin özelliklerini tanımlamakta önemli rol oynamaktadır [28].

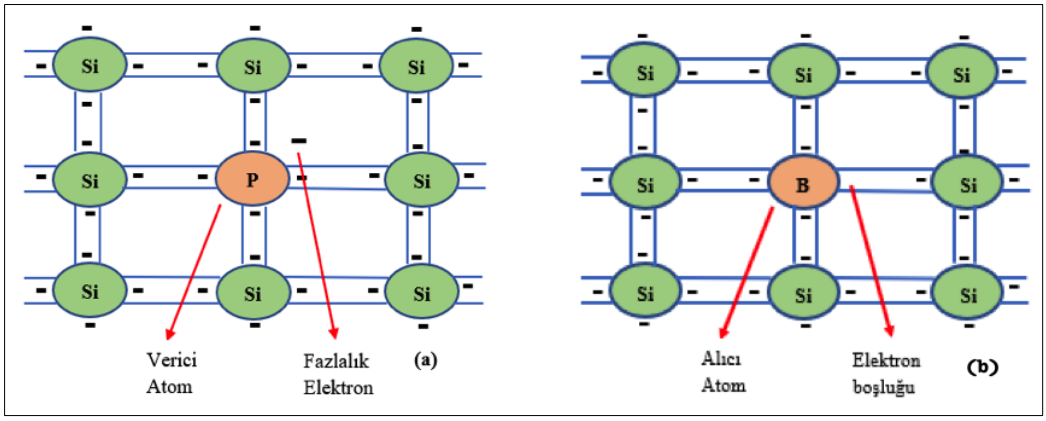
Yarıiletkenleri içinde bulundurdukları atomlara göre saf (intrinsic) ve katkılı (extrinsic) olmak üzere iki kategoride incelemek mümkündür. 0 K (-273^{o}C)'de saf veya katkısız bir yarıiletkenin valans elektronların hepsi komşu atomlara sıkı bir şekilde kovalent bağ ile bağlıdır. Valans bandı doludur ve iletim bandında hiç elektron bulunmaz. Bu nedenle bağlı olan elektronlar kristal yapı içinde hareket edemez ve elektrik akımını iletemez. Dolayısıyla yarıiletken bir yalıtkan gibi davranır. Ancak oda sıcaklığında ($T > 0$ K) yarıiletken bir miktar iletkenlik gösterir. Buradaki elektronlara uygun bir potansiyelin uygulanması elektronları iletkenlik bandına doğru hareket ettirecektir. Saf yarıiletkenlerde serbest elektronlar sadece kristalin ısı veya ışık kaynaklarından kovalent bağı koparmaya yetecek kadar enerji alması veya tam saflaştıramamaktan dolayı valans bandında bulunan az sayıdaki elektronun iletim bandına geçmesinden kaynaklanmaktadır [29]. Saf yarıiletkenler son yörüngesi yarım dolu olan elementlerdir. Örneğin Si atomları (veya Ge) valans seviyesindeki 4 elektronunu komşu dört Si atomu ile kovalent bağ yaparak kristal yapıyı meydana getirirler. Kristal yapı içerisindeki her bir Si atomunun kendi 4 elektronu ile birlikte komşularından paylaştığı 4 elektronu (toplamda 8 elektron) yerinden koparmak kolay değildir.

Eğer kristal yapı son yörüngesinde 5 elektronu olan arsenik veya 3 elektronu olan bohr gibi safsızlık atomları ile katkılanırsa bant yapısı ve dolayısıyla elektriksel ve optiksel karakteristiği değişir. Katkı oranı on milyonda bir civarında olsa bile yarıiletkenin davranışı büyük ölçüde farklılaşır. Uygun katkı atomları ile katkılanarak üretilen yarıiletken malzemeler *n* – tipi ve *p* – tipi yarıiletkenler olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Saf (katkısız) yarıiletkenler de elektron sayısı deşiklerin sayısına eşittir. Bu sebeple elektronlar veya deşiklerin her ikisi de yük taşıyıcısı olarak kullanılabilir. Yarıiletken kristalini oluşturan atomlara uygun değerlerde farklı atomların eklenmesi ile yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini değiştirme işlemine katkılama denilmektedir.

Kristale elektron veren katkı atom “verici atom (donör)” olarak adlandırılır. Verici atomlar tarafından katkılanan yarıiletkenlere *n* – tipi yarıiletken denir. Antimon, arsenik, bizmut ve fosfor gibi valans elektron sayısı beş olan verici atomların germanyum veya silisyum tabana belirli miktarda eklenmesi sonucu *n* – tipi yarıiletkenler elde edilir. *n* – tipi yarıiletken malzemelerde elektron sayısı deşiklerden fazladır. Bu sebeple *n* – tipi yarıiletkenlerde elektronlar çoğunluk yük taşıyıcısı, deşikler ise azınlık yük taşıyıcılarıdır.

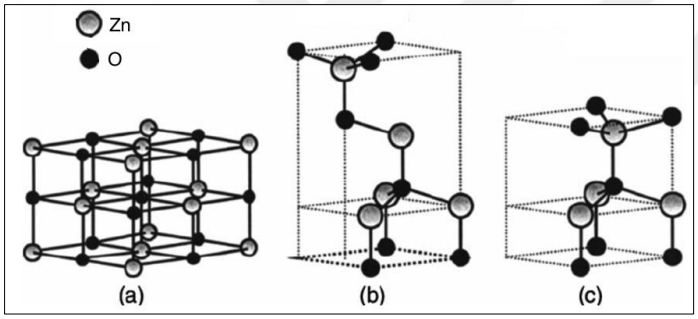
Örneğin 4 değerlik elektronuna sahip Si taban, V. grup atomlarından olan ve valans yörüngesinde 5 elektronu bulunan fosfat (P) ile katkılandığında, her bir fosfat atomu komşu Si atomları ile kovalent bağ yapar, ancak 1 elektronu boşta kalır. Her verici fosfat atomu kristale 1 fazlalık elektronu kattığı için kristalde negatif taşıyıcı yüklerin yoğunluğu artmış olur. Bu tür katkılanmış yarıiletkenlerde iletim elektronlar ile olur. Şekil 2.5.a’da gösterildiği gibi fosfatın dört elektronu Si ile kovalent bağ oluştur, beşinci elektronu ise boşta kalır ve mutlak sıfır sıcaklıkta komşu atoma gevşek bir şekilde bağlıdır. Bu elektron oda sıcaklığında 0,05 eV civarındaki bir enerji ile serbest hale geçer [28].

Valans elektron sayısı 3 olan alüminyum ve galyum gibi katkı maddelerinin germanyum veya silisyum bir tabana önceden belirlenmiş oranlarda eklenmesi ile *p* – tipi yarıiletkenler elde edilmektedir. Bu tip malzemelerde deşik sayısının elektron sayısından fazla olması sebebi ile deşikler çoğunluk yük taşıyıcısı, elektronlar ise azınlık yük taşıyıcısıdır. Örneğin Si taban, periyodik tablonun III.grup atomlarından olan ve valans yörüngesinde 3 elektronu bulunan bor (B) ile katkılandığında, kristali oluşturan Si atomları ile kovalent bağ yapmak için kristalden 1 elektron alır. Kristalden elektron aldığı için bu türden atomlara alıcı (acceptor) atomlar denir. Her alıcı atom kristalden 1 elektron aldığı için kristalde pozitif yük taşıyıcılarının (deşiklerin) yoğunluğu artmış olur. Bu tür katkılanmış yarıiletkenlere *p* – tipi katkılı yarıiletken denir. Bu yarıiletkenlerde iletim deşikler ile olur. Şekil 2.5.b’de görüldüğü gibi her bir B atomu, Si kristalini oluşturan dört değerlik elektronuna sahip Si atomları ile kovalent bağ oluşturmak için kristalden bir elektron alır ve bu nedenle pozitif yük yoğunluğu artmış olur [28].



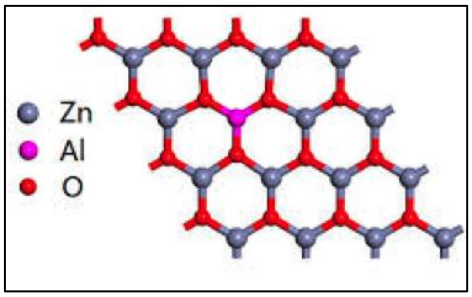
Şekil 2.5. Si kristalinde verici (a) ve alıcı (b) atom safsızlığı

ZnO kristaller; hegzagonal wurtzite, çinko sülfür ve kayatuzu yapısında bulunabilirler. Çevre şartlarında termodinamik olarak sabit fazda hegzagonal wurtzite yapıdadır. ZnO'nun kristal yapıları Şekil 2.6'da verilmiştir.



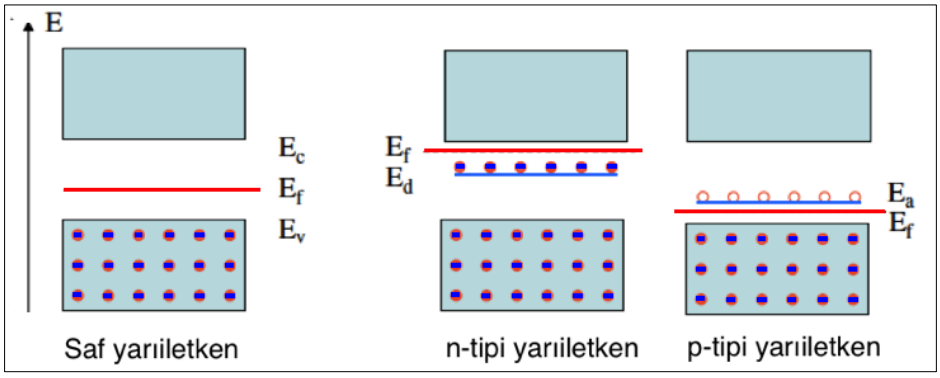
Şekil 2.6. ZnO'nun kristal yapıları (a) Kübik kayatuzu, (b) Kübik Çinko Sülfür c) Hegzagonal wurtzite.

ZnO periyodik tablonun II B-VI A grubundan bir bileşik yarıiletkendir. Geniş bir bant aralığına sahip olması optoelektronik uygulamalarda potansiyel bir yarıiletken olmasını yol açmaktadır. ZnO yapıyı oluşturan atomlardan Zn'nin 12, O'nun ise 6 tane değerlik elektronu mevcuttur. Zn'nin valans yörüngesinde 2 elektronu eksik, O'nin valans yörüngesinde ise boşluğu mevcuttur. ZnO kristaline Al katkılandığı zaman atomik büyüklüğünden dolayı bazı Al atomları Şekil 2.7'de görüldüğü gibi Zn atomlarının yerine geçer. Al'nin valans yörüngesinde 3 elektronu mevcuttur. Bu nedenle O atomları ile bağ yaptıktan sonra birer elektronu boşta kalır. Boşta kalan elektronlar kristalde negatif yük yoğunluğunun artışına yol açar. Böylece *n* - tipi yarıiletken elde edilir.



Şekil 2.7. Al katkılı ZnO kristalinin iki boyutta şematik gösterimi

Bir saf yarıiletkende valans bandındaki deşiklerin sayısı iletim bandındaki elektronların sayısına eşittir. Bu nedenle, valans ve iletim bandındaki enerji seviyelerinin doldurulma ihtimalleri eşittir. T=0 K'de elektronlar tarafından doldurulan en yüksek enerji seviyesi Fermi Enerji Seviyesi (E_f) olarak adlandırılır. Fermi seviyesi saf yarıiletkenlerde valans ve iletkenlik bandı seviyelerinin tam ortasında iken, *p* – tipi yarıiletkende valans bandına ve *n* - tipi yarıiletkenlerde ise iletkenlik bandına yakındır [27]. Şekil 2.8'de fermi seviyesinin konumları verilmiştir. Verici atomlar sayesinde yarıiletken kristalin bandında meydana gelen enerji düzeyi (E_d), yasak enerji aralığında iletkenlik bandının altında yer almaktadır. Fermi seviyesi (E_f) ise iletkenlik bandına yaklaşır. Alıcı atomların bantta oluşturduğu enerji düzeyi (E_a), valans bandına yakın bir şekilde ve yasak enerji aralığında yer almaktadır. Fermi seviyesi (E_f) ise valans bandına yaklaşır [27].



Şekil 2.8. Fermi seviyesinin saf ve katkılı yarıiletkenlerde konumları

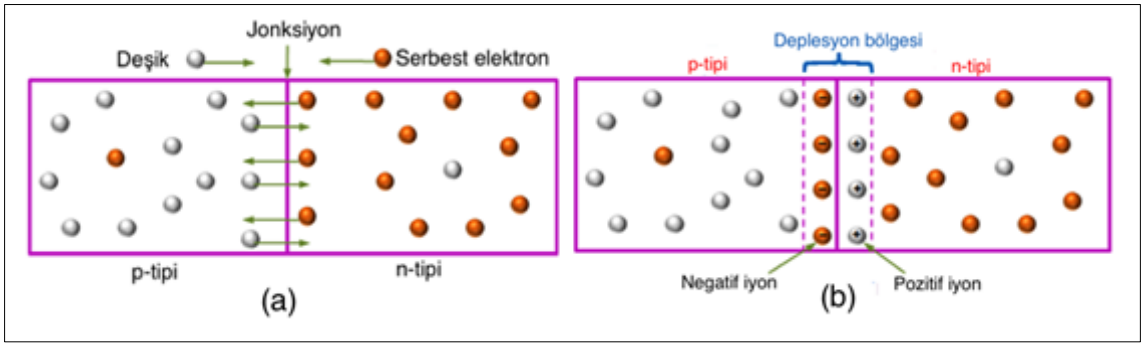
Yarıiletkenlerde iletkenlerde olmayan bir iletim biçimine rastlanır. Katkılama sonucu *n*-tipi yarıiletkenlerde negatif yük taşıyıcı konsantrasyonu pozitif yük taşıyıcı konsantrasyonundan çok fazladır. *p* - tipi yarıiletkenlerde ise durum tam tersinedir. İki yarıiletken tipi bir araya getirildiğinde (p-n eklemi) taşıyıcı konsantrasyonu fazla olan bölgeden az olan bölgeye doğru taşıyıcı yük akışı meydana gelir ve yük akışı nedeniyle bir

akım oluşur. Bu akıma difüzyon akımı adı verilir. Yoğunluk değişimi olmadığı durumda difüzyon meydana gelmediğinden difüzyon akımı da oluşamayacaktır. Yarıiletken içerisinde taşıyıcı yükler, difüzyon nedeniyle hareket ederken zıt yüklü taşıyıcı ile karşılaştığında bağ oluşturarak yok olacaktır. Taşıyıcı yük, difüzyon sırasında, yok oluncaya kadar yarıiletken içerisinde bir yol kat eder. Katedilen yolun ortalama değeri difüzyon yolu adını alır. Difüzyon yolu, yarıiletken cinsine, katkı yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı bir büyüklüktür. Difüzyon olayına, aynı kristal içerisinde *p* ve *n* tipi yarıiletken malzemelerin oluşturulması halinde de rastlanır. Böyle bir durumda iki bölge arasında taşıyıcı yük yoğunlukları farklıdır. Bu fark nedeniyle yoğunluğu az olan bölgeye doğru, difüzyon nedeniyle yük geçişi olacaktır.

2.3. *p* - *n* Eklemi

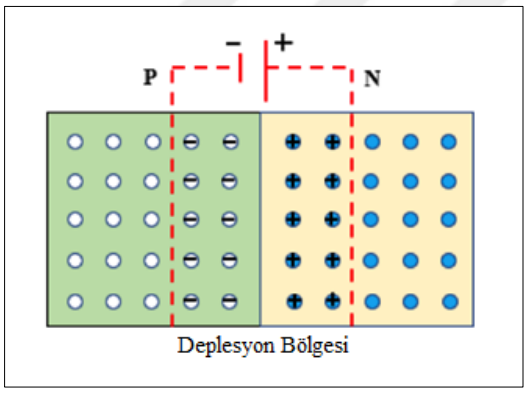
p ve *n* tipi yarıiletken malzemeler bir kristal yapı içinde bir araya getirildiğinde iki bölge arasında bir arakesit yüzey oluşur. Bu arakesit yüzey *p* - *n* jonksiyonu (eklemi) olarak adlandırılır. Bu eleman yarıiletken diyot olarak bilinir ve tek yönde akım geçirir. Hemen hemen tüm elektronik ve optoelektronik uygulamalarda karşımıza çıkan bu cihazlar ışık yayan diyotlar, solar hücreler, transistörler ve fotodedektörler gibi birçok cihazın temelini oluşturmaktadır.

Eklemin oluşmasından önce p bölgesinde çok sayıda deşik (p bölgesinde deşiklerin konsantrasyonu n bölgesine göre fazladır), n bölgesinde ise çok sayıda elektron vardır (n bölgesinde serbest elektron konsantrasyonu p bölgesine göre fazladır). Bu elektronlar ve deşikler tüm yönlere serbest bir şekilde hareket ederler. Şekil 2.9.a'da gösterildiği gibi *p* ve *n* tipi yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesinden (kontaktan) sonra, elektron ve deşikler yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru difüzyonla geçiş yaparlar. n bölgesinden p bölgesine hareket eden elektronlar burada ekleme yakın bir bölgede deşiklerle birleşirler ve ekleme yakın bu bölgede sadece negatif iyonlar kalır. Bu durumda n bölgesinde elektronlarını kaybeden atomlar ise pozitif yüklenmiş olurlar. Böylece eklem civarında n tarafında pozitif iyonların ve p tarafında negatif iyonların olduğu deplesyon (tüketim) bölgesi adı verilen bir bölge meydana gelir (Şekil 2.9.b).



Şekil 2.9. p-n eklemi (a) ve tüketim bölgesinin (b) şematik gösterimi

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi tüketim bölgesi n tarafı pozitif, p tarafı ise negatif olacak şekilde sabit yükler içerir ve bu yükler arasında bir elektrik alanı oluşur. Bu alan, daha fazla taşıyıcının eklemi aşmasına mani olur ve tüketim bölgesinde bir iç potansiyel veya bariyer gerilimi (V_B) oluşturur. Bariyer geriliminin değeri yarıiletken bölgelerin katkı yoğunluklarına, sıcaklığına ve yarıiletkenin cinsine bağlıdır. p-n eklemi Si yarıiletken kullanılarak yapılmış ise bu gerilimin değeri normal sıcaklıklarda 0,6 – 0,7 V kadardır (Germanyum için bu değer 0,3 V civarındadır).



Şekil 2.10. Tüketim bölgesinde gerilim oluşumu

Tüketim bölgesinde oluşan bu elektriksel alanı, diğer deyişle iç potansiyel (V_B) çoğunluk taşıyıcıların karşı bölgeye geçişini engelleyecek, azınlık taşıyıcıların ise geçişini kolaylaştıracak yöndedir. Ancak yarıiletken bölgelerin boşluk ve elektron yoğunlukları arasında çok büyük fark vardır. Çoğunluk taşıyıcılar, elektriksel alanın engeline rağmen difüzyonla karşı bölgeye az sayıda da olsa geçmeyi başarırlar. Azınlık taşıyıcılar alan etkisi ile çoğunluk taşıyıcılar da difüzyonla karşı bölgeye geçmektedir. Ekleme dışardan gerilim uygulanmadığında bir denge söz konusudur ve akan akım sıfırdır. Yani eklemden alan etkisi ile geçen azınlık taşıyıcıların sayısı kadar difüzyonla çoğunluk taşıyıcı geçmektedir. Bu

durum eklemde oluşan dengeye karşılık gelmektedir. Eklemi geçmek isteyen çoğunluk taşıyıcıları için tüketim bölgesi bir engel teşkil etmektedir. Bu engeli aşabilmek için n bölgesindeki bir elektronun gerekli enerjiye sahip olması gerekir. Başka bir deyişle *p* – tipi ve *n* – tipi yarıiletkenler bir araya geldiğinde, taşıyıcıların her iki bölgede farklı yoğunluklarda olması yani fermi seviyelerinin farklı olması nedeni ile taşıyıcı difüzyonu meydana gelir. Bu difüzyon fermi seviyeleri eşitlenene kadar devam etmektedir. [30-32].

p - *n* ekleminin p bölgesine pozitif ve n bölgesine negatif bir gerilim uygulanması durumuna ileri kutuplama (ileri beslem) denir. İleri beslem durumunda n bölgesindeki elektronlar katot olarak adlandırılan kaynağın negatif tarafından ve p bölgesindeki deşikler de anot olarak adlandırılan kaynağın pozitif ucu tarafından tüketim bölgesine doğru itilirler. Böylece tüketim bölgesindeki pozitif ve negatif iyonlar nötr hale gelmeye başlar. Ekleme uygulanan V_F gerilimi yeteri kadar büyük ise, diyot içinde oluşan gerilim sıfırlanır ve tüketim bölgesi ortadan kalkar. Böylece n bölgesindeki elektronlar yeterli enerji alarak p bölgesine geçer. p bölgesine geçen elektron burada valans elektron haline gelir ve deşikten deşiğe atlayarak kaynağın pozitif ucuna doğru hareket eder. p bölgesinde valans elektronların hareketi, deşiklerin ters yönde hareketi demektir. Akım yönü, deşik hareketi ile aynı yönde kabul edilir. n bölgesini terk eden her elektron için kaynağın negatif ucundan bir elektron çıkar. Böylece eklemden sürekli akım geçer.

p - *n* ekleminin p bölgesine negatif ve n bölgesine pozitif bir gerilim uygulanması durumuna ters kutuplama (ters beslem) adı verilir. Uygulanan ters gerilim nedeniyle p bölgesindeki deşikler uygulanan potansiyelin negatif kutbu ve n bölgesindeki elektronlar ise uygulanan potansiyelin pozitif kutbu tarafından çekilirler. Elektron ve deşiklerin eklem bölgesinden uzaklaşmaları eklem bölgesinin genişlemesini sağlar. Başlangıçta (geçici rejim) çoğunluk taşıyıcıları bir akım oluştursada, tüketim bölgesinin genişlemesinden sonra (kararlı rejim) bu bölgenin potansiyeli *p* - *n* eklemine uygulanan V_R gerilimine eşit olur ve çoğunluk taşıyıcı akımı sıfır olur. Uygulanacak çok küçük bir V_R gerilimi çoğunluk akım taşıyıcılarının akışını durdurmak için yeterlidir. Diğer taraftan ters kutuplanan bir *p* - *n* ekleminde azınlık taşıyıcıları eklemden bir sızıntı akımı geçirir. V_R geriliminin artmasıyla sızıntı akımı bir süre artar. Ancak azınlık taşıyıcılarının sayısı sıcaklığa bağlı olduğunda V_R geriliminin daha fazla arttırılması sızıntı akımını arttırmaz. Eklemden geçen maksimum sızıntı akımına ters doyma akımı denir [31,32].

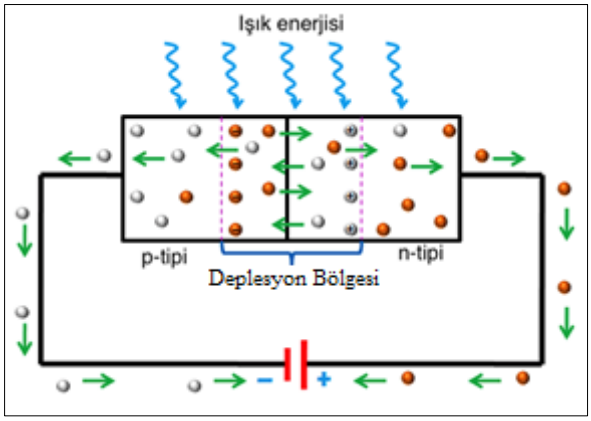
2.4. Fotodiyot

p - *n* diyot doğru yönde kutuplandığında, *n* - tipi yarıiletkendeki serbest elektronlar difüzyon ile p bölgesine geçer. Elektronlar p bölgesinde deşiklerle birleşerek valans elektron haline gelir. n bölgesinde iletim bandında bulunan elektronların, p bölgesinde valans bandına geçmeleri enerji kaybetmelerine neden olur. Bu enerjinin bir miktarı ışık enerjisine (fotonlara) dönüşür.

Fotodiyot (fotodetektör, fotosensör veya ışık detektörü) üzerine düşen ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren *p* - *n* eklemidir. Fotodiyotler ters beslemde çalışacak şekilde dizayn edilirler. Yani fotodiyotun p tarafı bataryanın negatif ucuna, n tarafı da bataryanın pozitif ucuna bağlanır. Fotodiyot ışığa oldukça duyarlıdır. Üzerine düşen ışığı (fotonları) elektrik akımına dönüştürür. Fotovoltaik sistemler fotodiyotların bir çeşididir. Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemler daha ziyade parlak ışıkta çalışmaktadır.

Normal bir *p* - *n* eklemi diyotta ters beslemde daima küçük bir elektrik akımı oluşur. Ters beslemde elektrik akımını arttırmak için daha fazla azınlık taşıyıcısını oluşturmak gerekir. *p* - *n* eklemine uygulanan harici ters potansiyel azınlık taşıyıcılarının enerjilerini arttırır ancak yoğunluğunu arttırmaz. Buna rağmen azda olsa bir miktar azınlık taşıyıcısı oluşur. Ancak n veya p tarafında oluşan azınlık taşıyıcıları eklem bölgesini geçemeden yeniden birleşirler. Bu nedenle bu taşıyıcılar nedeniyle akım oluşmaz. Bu problemin üstesinden gelmek için doğrudan tüketim bölgesine dışarıdan bir enerji vermek gerekir. Fotodiyotta tüketim bölgesinde yük taşıyıcılarını oluşturmak için ışık veya fotonlar kullanılmaktadır.

p - *n* eklem fotodiyota ışık enerjisi verildiğinde, tüketim bölgesindeki valans elektronları enerji kazanır. Eğer fotodiyota uygulanan ışık enerjisi yarıiletken malzemenin bant genişliğinden daha büyük ise valans elektronları atomlarından koparak serbest hale geçerler. Valans elektronu valans kabuğunu terk edince bir boşluk oluşur. Serbest elektron ve deşik bir çift oluşturur.

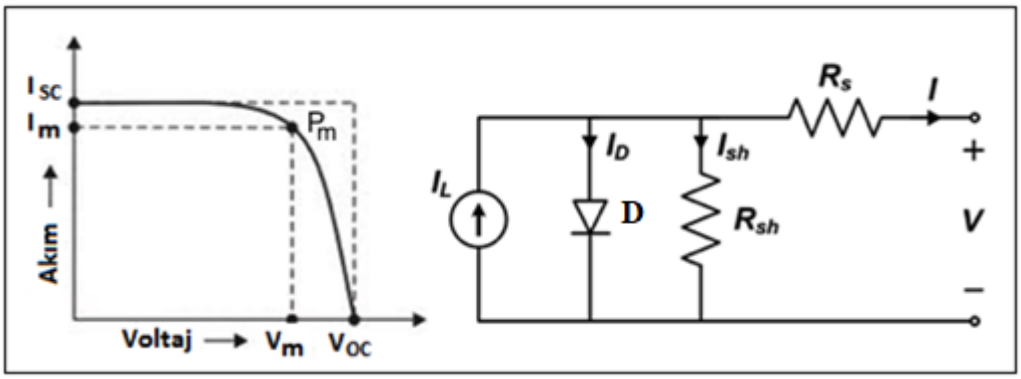


Şekil 2.11. Fotodiyota elektron ve deşiklerin hareketi

Azınlık taşıyıcılarına tüketim bölgesindeki ve dış elektrik alanlarından dolayı bir kuvvet etki eder. Bunun sonucunda Şekil 2.11'de görüldüğü gibi serbest elektronlar n bölgesine doğru hareket ederler. n bölgesinde bu elektronlar, bataryanın pozitif kutbundan dolayı çekilirler. Benzer şekilde deşiklerde ters yöne doğru hareket eder. Tüketim bölgesindeki güçlü bir elektrik alanı ve dış alan serbest elektronların sürüklenme hızını arttırır. Yüksek sürüklenme hızı ise tüketim bölgesinde oluşturulan azınlık taşıyıcılarının (serbest elektronlar ve deşikler) birleşmeden *p - n* eklem bölgesini geçmelerine yol açar. Bunun sonucunda ise azınlık taşıyıcılarının yol açtığı akım artar. Işık uygulanması sonucunda fotodiyotta oluşturulan elektrik akımı fotoakım olarak adlandırılır.

2.5. Güneş Pili Parametreleri

Bir fotovoltaik hücreyi tanımlayan önemli parametreler; kısa devre akımı (I_{SC}), açık devre voltajı (V_{OC}), doluluk faktörü (FF), seri ve şönt dirençleri (R_S, R_{SH}) ve maksimum güç noktası (P_m) dır. Bu parametreler genel olarak bir fotovoltaik hücrenin akım - gerilim karakteristiğini gösteren Şekil 2.12.a ve eşdeğer devresini gösteren Şekil 2.12.b'de verilmiştir. İdeal bir fotovoltaik davranışı için R_S değerinin küçük R_{SH} değerinin ise büyük olması istenir.



Şekil 2.12. Bir fotovoltaik hücrenin (a) akım-gerilim karakteristiği ve (b) eşdeğer devresi

I_{SC} akımı, üzerindeki voltajın sıfır olduğu durumda fotovoltaik hücreden geçen akımdır. Kısa devre akımının fotovoltaik hücrenin etkin alanına oranına kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) denir.

$$J_{SC} = \frac{I_{SC}}{A} \qquad (\text{mA/cm}^2) \tag{2.1}$$

V_{OC}, sıfır akım durumunda hücre üzerindeki maksimum gerilimdir. V_m ve I_m sırasıyla maksimum güç değerine (noktasına) karşılık gelen voltaj ve akım olmak üzere doluluk faktörü (FF),

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{OC} I_{SC}} \tag{2.2}$$

ile verilir. R_{SH} esas olarak fotovoltaik hücrenin içine yerleştirilir ve kusurlarla ilgilidir. R_S fotovoltaik hücre içerisindeki omik kayıpları göstermektedir. Böylece fotovoltaik hücrenin ürettiği maksimum güç (P_m),

$$P_m = V_m I_m \tag{2.3}$$

şeklinde veya

$$P_m = V_{OC} I_{SC} FF \tag{2.4}$$

ile verilir. Bir güneş pilinin verimi (η) pilin ürettiği maksimum çıkış gücünün, pil üzerine düşen ışığın gücüne oranı olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_{in}} \tag{2.5}$$

Burada AM 1.5 şartları altında P_{in}=1000 W/m^2 dır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Kısım

Bu bölümde Al katkılı ZnO/p-Si Heterojonsiyon fotodiyotun fabrikasyon süreci verildi. İlk olarak *p* – tipi silisyum alttaşlar üzerine sürülecek olan Al katkılı çinko oksit çözeltisi hazırlandı. Hazırlanan çözeltiler *p* – tipi silisyum alttaşları üzerine kaplanmadan önce bu alttaşlar temizleme sürecine tabi tutuldu. *p* – tipi silisyum alttaşların temizleme işleminin ardından daha önce hazırlamış olduğumuz çözeltiler sol – jel spin kaplama yöntemi kullanılarak damlalık yardımı ile *p* – tipi silisyum alttaşlar üzerine çeşitli kalınlıklarda kaplandı. Son olarak elektriksel ölçümlerin yapılabilmesi için gerekli olan alt (alüminyum pasta) ve üst (gümüş pasta) kontaklar yüzey kaplama yöntemi ile sürüldü.

3.1.1. Çözelti hazırlama

Bu çalışmada farklı kalınlıklardaki ZnO:Al ince filmleri sol - jel spin kaplama metodu kullanılarak hazırlandı. Bu yöntemle sıvı fazdaki faklı kimyasallardan elde edilen *n* - tipi ZnO:Al kaplama malzemesi 380μm kalınlıktaki 10Ωcm özdirençli *p* - tipi Si (1 1 1) alttaşlar üzerine kaplandı. Kaplanan filmler düşük sıcaklıkta ısıtılarak kurutuldu ve daha sonra sıcaklık arttırılarak filmlerin yoğunluğunun artması sağlandı.

Çözelti hazırlanırken çinko (Zn) materyal kaynağı olarak çinko asetat dihidrat (ZAD) (≥ % 98,0; Merck), çözücü materyal olarak etanol (E) (≥ % 99,9; Merck), stabilizer materyal olarak monoetanolamin (MEA) (% 99,5; Merck) ve katkı materyali olan alüminyum için ise alüminyum nitrat (%98,0; Sigma Aldrich) kimyasalları kullanıldı. Kullanılan kimyasalların miktarı Çizelge 3.1'de verilmiştir.

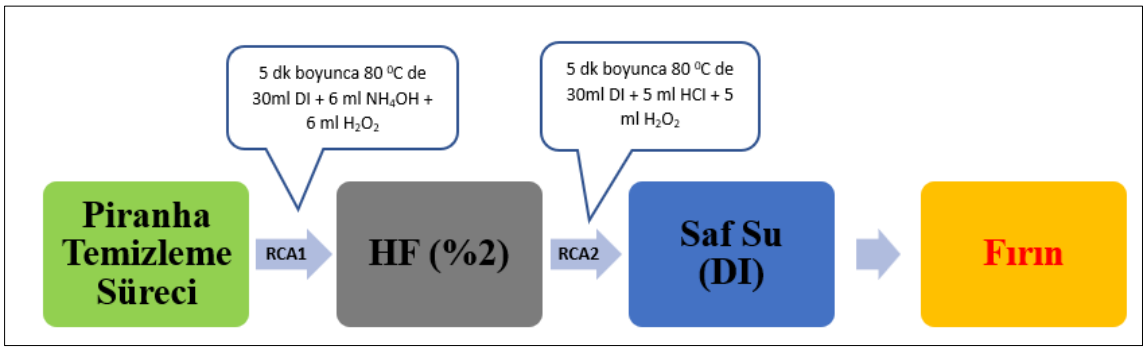
Çizelge 3.1. Kimyasal çözücü ve katkılama için kullanılan madde miktarları

Materyal		Miktar
Prekürsor	Çinko asetat dihidrat (ZAD)	1,317 g
Katkı Materyalı	Alüminyum Nitrat	0,028 g
Stabilizer	Monoetanolamin (MEA)	0,370 g
Çözücü	Etanol (EtOH)	25 mL

Katman çözeltisi hazırlanmasına yönelik çalışmalarda çözeltinin molarite değerinin 0,2 M ve katkılama oranının da %2 olduğu durumda en iyi sonucun elde edildiği belirlenmiştir [33]. Bu nedenle çalışmamızda çözelti moleritesi değeri 0,2 M (mol/L) ve katkılama oranı değeri ise %2 alınarak çözelti hazırlandı. İlk olarak birinci behere hassas kantar yardımı ile ZAD ve çözücü olarak kullanılan etanolün toplamının yarısı eklendi. Bu karışım 15 dk boyunca 60 rpm hızında 50 ^{0}C de manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. İkinci bir beherde ise hassas bir şekilde tartılan katkı maddesi alüminyum nitrat ile kalan çözücü (etanol) miktarı eklendi ve aynı süre ile sıcaklık değerinde karıştırıldı. 15 dk sonunda birinci ve ikinci beherde bulunan karışımlar üçüncü bir beherde birleştirildi. Hazırlamış olan bu karışıma ise stabilizer olarak belirli ölçülerde monoetanolamin eklendi ve 50 ^{0}C, 60 rpm'de 2 saat süre ile karıştırıldı. 2 saatlik karıştırma işleminden sonra berraklaşan çözelti 48 saat süre ile yaşlandırma işlemine bırakıldı. Bu işlemlerin sonucunda alüminyum katkılı çinko oksit (Zno:Al, AZO) kaplama çözeltisi hazırlanmış oldu.

3.1.2. Temizleme süreci

Hazırlamış olan alüminyum katkılı çinko oksit (ZnO:Al, AZO) çözeltisinin Si alttaşı üzerine kaplanması işlemini gerçekleştirmeden önce, alttaşın yüzeyi organik ve inorganik partiküllerden temizlendi ve pürüzsüz bir yüzey haline getirildi (aksi durum deney sonuçlarını etkileyecektir). Bahsedilen temizleme süreçlerinin adımları Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Silisyum yüzeyin temizlenme süreci

p - tipi silisyum alt tabakanın, organik ve inorganik partiküllerden temizlenmesi için 50 ^{0}C'de 15 dk boyunca 30 ml sülfürik asit ve 10 ml hidrojen peroksit (3:1 oranında) içeren bir kapta bekletildi. Bu işlem piranha temizleme süreci olarak adlandırılır. Daha sonra *p* – tipi

silisyum örneği kimyasal olarak temizlenmesi için 80 ^{0}C'de 5 dk boyunca 30 ml saf su (DI), 6 ml amonyum hidroksit (NH_4OH) ile 6 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) içeren bir kapta bekletildi. Bu adım RCA-1 olarak adlandırılır. Bir sonraki aşamada ise *p* - tipi silisyum tabakanın doğal oksit tabakadan temizlenerek pürüzsüz bir yüzeye sahip olabilmesi için 37 ml saf su (DI) ile 2,5 ml hidroflorik asit karışımından oluşan bir karışımda 5 dk boyunca bekletildi. Bu aşamaya hidroflorik asit (HF) temizlemesi denilmektedir. Tekrardan *p* – tipi silisyum örneği kimyasal olarak temizlenmesi için 80 ^{0}C'de 15 dk boyunca 30 ml saf su (DI), 5 ml hidroklorik asit (HCL) ile 5 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) içeren bir kapta bekletildi. Bu adım ise RCA-2 olarak adlandırılır. RCA-2 işleminden sonra ise 30 saniye boyunca *p* – tipi silisyum örneği durulamaya bırakıldı ve sonrasında kurutma işleminin gerçekleşebilmesi için 10 dk boyunca 150 ^{0}C'de fırına konuldu (OptoSense). Resim 3.1'de OptoSense fırın gösterilmiştir.

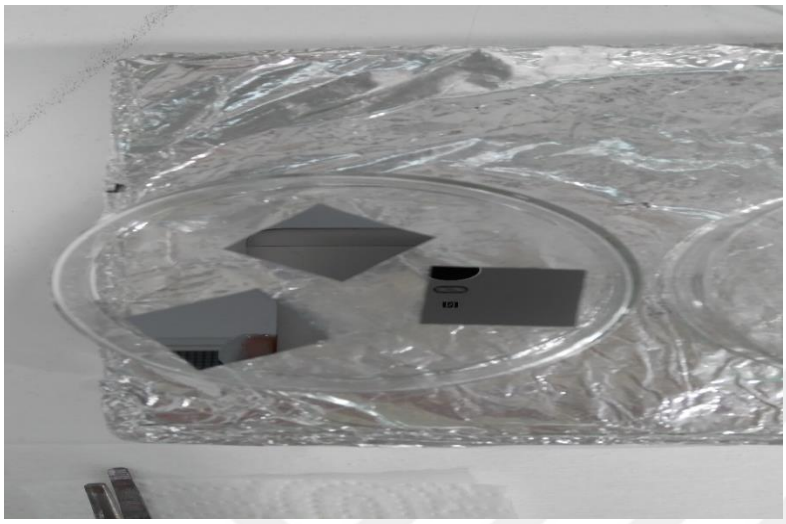


Resim 3.1. Numunelerin fırınlandığı OptoSense fırın

3.1.3. Kaplama

Temizleme işleminden sonra hazır hale gelen *p* - tipi silisyum numunelerin iletken yüzeyine hazırlamış alüminyum katkılı çinko oksit (AZO) çözeltisi damlalık yardımı ile damlatıldı. Bu işlem, farklı kalınlıklarda filmler elde etmek için 2 kez, 4 kez ve 6 kez tekrarlanarak sol – jel spin kaplama yapıldı. Sol – jel spin kaplama uygulamasından sonra 2 kez, 4 kez ve 6 kez kaplanan numuneler daha önceden 500 ^{0}C'ye ısıtılmış olan fırında 5 dk süreyle fırınlandı.

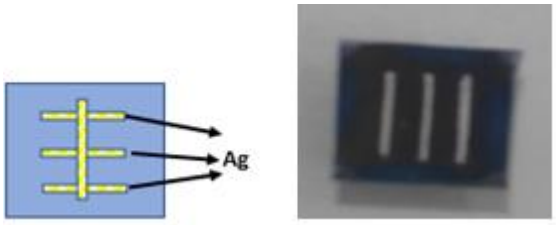
Fırınlama işleminden sonra numuneler üzerinde oluşan alüminyum katkılı çinko oksit ince film (ZnO:Al, AZO) tabakasının kalınlığı 80 ile 240 nm aralığında değişmektedir. Resim 3.2'de sol - jel spin kaplama sonrasında oluşan numuneler gösterilmiştir.



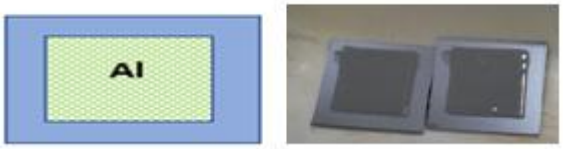
Resim 3.2. Sol – jel spin kaplama sonrası elde edilen numuneler

3.1.4. Metalizasyon

Gümüş (Ag) ve alüminyum pastalar, ZnO:Al ile kaplanan (2 kez, 4 kez ve 6 kez) numunelerin ön ve arka yüzeylerine yüzey kaplama metodu ile sürüldü. Pastalar sırasıyla ön ve arka yüzeylere sürüldükten sonra kuruması için belirli bir süre bekletildi. Pastalar sürüldükten sonra numunelerin üzerindeki pasta üzerinde deformasyonlar oluşmaması için fırınlama işlemine geçildi. Fırınlama işlemi alüminyum pasta için 150 ^{0}C'de 15 dakika, gümüş pasta için ise 800 ^{0}C'de 20 saniyedir. Şekil 3.2'de gümüş, Şekil 3.3'de ise alüminyum (Al) pastanın numuneler üzerine sürülmüş halleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Numune üzerinde gümüş pastanın görüntüsü



Şekil 3.3. Numune üzerinde alüminyum pastanın görüntüsü

3.2. Cihaz Karakteristikleri

Al katkılı n-ZnO/p-Si heterojonksiyon diyotun yapısal, optiksel, elektriksel ve yüzeysel özelliklerinin belirlenebilmesi için deneyler Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi (AYBÜ) Enerji Sistemleri Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirildi. Üretilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri ise Ortadoğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) merkez laboratuvarında yapıldı. Üretilen ince filmlerin yapısal özellikleri Rigaku Miniflex 600 X-Işını Kırınımı Spektrometresi (XRD), yüzey özelikleri Quesant Ambious Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve optiksel özellikleri de Shimadzu Corporation UV- Görünür Bölge Absorpsiyon Spektrometresi (UV-Vis 1700) ile belirlendi. Elde edilen heterojonksiyon fotodiyotların akım - voltaj (I - V) karakteristiklerinin belirlenmesinde ise Keithley 2400 kaynak ölçer ve güneş simülatörü (ABET teknoloji) kullanıldı.

3.2.1. X - Işınımı kırınımı (XRD) spektrometresi

XRD (X ışınımı kırınımı) ölçümleri, malzemelerin yapısal özellikleri belirlenmesi için kullanılır. Bragg yasasına dayanan XRD spektroskopisinde kristal üzerine gönderilen sürekli bir X - ışını demeti kristal içinde kırınıma uğrar. Kırınıma uğrayan ışıma ise belirli doğrultularda yoğunlaşır. Bu doğrultular kristalin tabakalarından yansıyan dalgalar arasındaki yapıcı girişime karşılık gelir. Kırınıma uğrayan ışınların dedektör tarafından algılanmasıyla örnek numunenin kristal yapısı anlaşılır. Örgü noktalarından saçılan ışınların girişim oluşturma şartını veren Bragg yasası

$$n\lambda = 2dsin\theta \tag{3.1}$$

olarak verilir. Burada d; atomik düzlemler arasındaki mesafe, θ; x - ışınının düzlemle olan açısı ve λ (0,154 nm) ise numuneye çarpan x - ışınlarının dalga boyudur [34]. XRD spektrometresinde numuneler üzerinde Bragg şartına göre kırınıma uğrayarak detektöre

gelen x - ışınlarının oluşturduğu desen PDXL yazılımı kullanılarak analiz edildi. Elde edilen kırınım deseninde sergilenen pikler JCPDS XRD kartlarında tanımlanan fazlarla karşılaştırılarak incelenen numunelerin sahip olduğu fazlar ve bu fazların kristal yapıdaki yönelimleri belirlendi. Çalışmada kullanılan Rigaku Miniflex 600 XRD cihazı Resim 3.3'de gösterilmiştir.



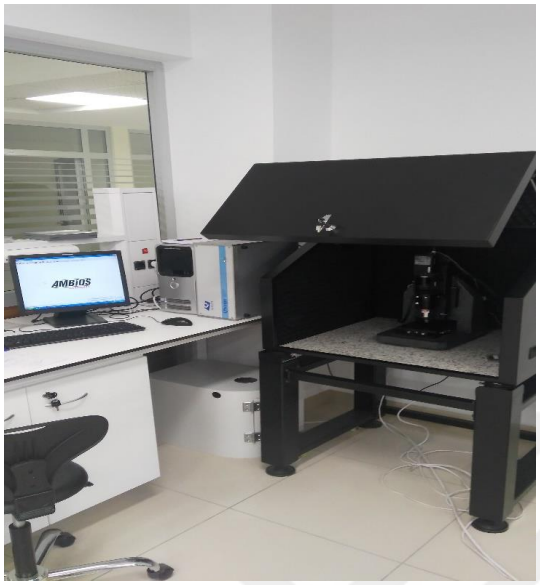
Resim 3.3. Kullanılan XRD spektroskopisi sistemi

X – ışınları kırınımı (XRD) ölçümleri faz tanımlamasına ek olarak ölçülen numuneye dair kristal boyutunu, kafes parametresi ve kristallik yüzdesini de verir.

3.2.2. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

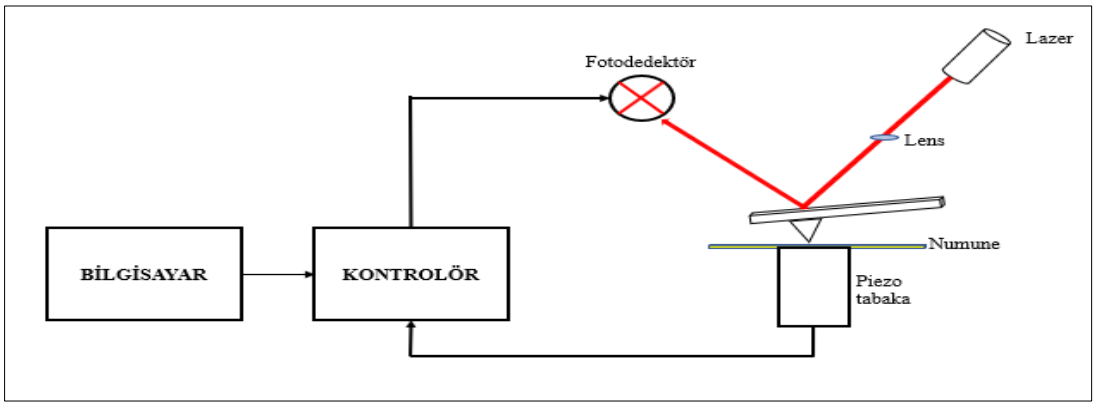
Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), malzemelerin yüzey morfolojisini incelemek için kullanılan bir araçtır. Sistem cantilever denilen bir yayın ucundaki bir iğne, fotodedektör, lazer ile birlikte gerekli kontrollerin yapılabilmesi için bir arayüz ve bilgisayardan oluşmaktadır. Genel olarak AFM'de incelenen numune yüzeyini taramak için çubuk benzeri bir düzenek ucundaki oldukça ince bir iğne kullanır. Bu iğne yüzeye yeteri kadar yaklaştığında, yüzey ve iğne arasındaki çekim kuvvetleri ile çubuğun yüzeye doğru sapmasına neden olur. İğne yüzeye daha da yaklaştıkça, yüzeye temas etmesi gibi, itme kuvvetinde artış meydana gelir ve çubuk yüzeyden dışarı doğru sapar. Uçta kullanılan iğne,

incelenmek istenilen yüzeye göre farklılık gösterir. Çalışmada kullanılan AFM sisteminin görüntüsü Resim 3.4'de verilmiştir.



Resim 3.4. Kullanılan atomik kuvvet mikroskobu (AFM) sistemi

Uç pozisyonuna göre AFM cihazı iki modda çalışmaktadır. Bunlar temaslı ve temassız modlardır. Temas modunda cihaz numunenin yüzeyine zarar verebilmektedir. Temassız çalışma durumunda iğnenin numune yüzeyine olabildiğince yakın olması halinde atomik kuvvet mikroskobu rezonans frekansında salınım yaparak numunemizi Şekil 3.4'te ki gibi taramaya başlar. Yüzey özelliklerine bağlı olarak gelen lazer açısı değişmektedir. Bu değişimler fotodedektörler tarafından tespit edilirler ve yazılım vasıtası ile analiz edilmektedir. AFM yüzey morfolojisini angstrom (Å) mertebesinde görüntüleyebilen bir mikroskoptur [35].



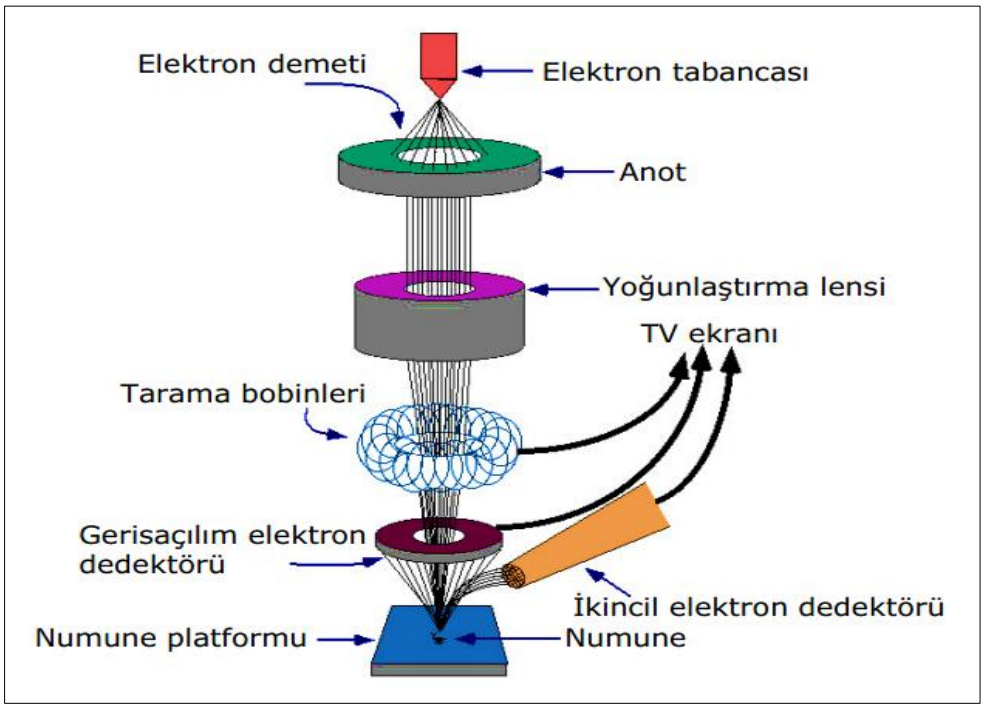
Şekil 3.4. Atomik kuvvet mikroskobu çalışma prensibi [36].

3.2.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Bu çalışmada üretilen numunelerin elektron mikroskobu sonuçları için Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarın da bulunan Resim 3.5'de gösterilen QUANTA 400F Field Emission SEM marka, yüksek çözünürlüklü elektron mikroskobu kullanılmıştır. Cihazın çözünürlük değeri 1,2 nm'dir [37]. Taramalı elektron mikroskobuna ait şematik görüntü Şekil 3.5'de verilmiştir.



Resim 3.5. Çalışmada kullanılan QUANTA 400F Field Emission SEM [37]

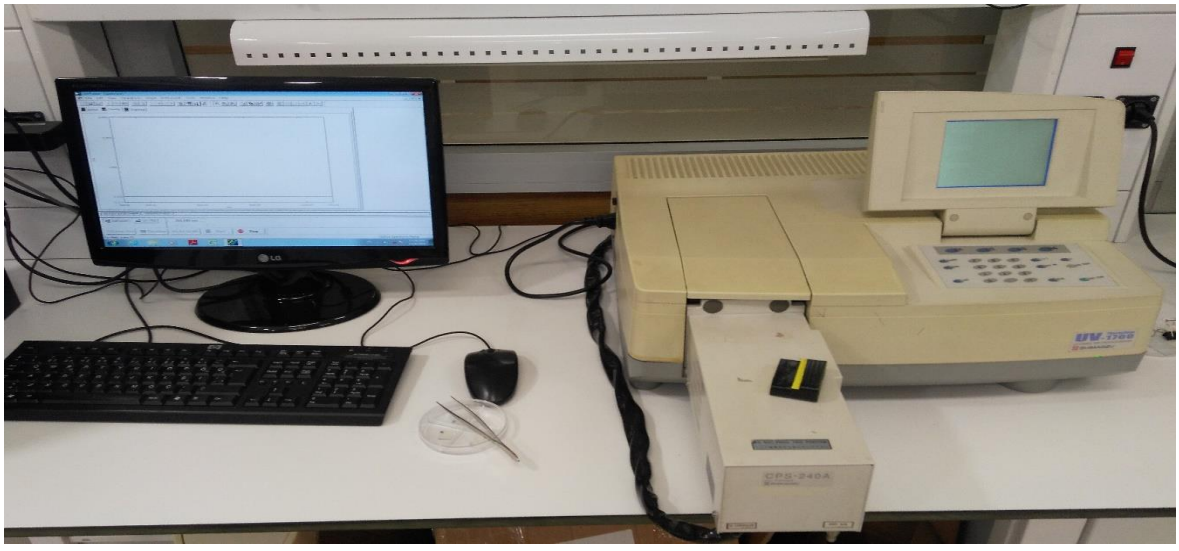


Şekil 3.5 Taramalı elektron mikroskobu şematik gösterimi [38]

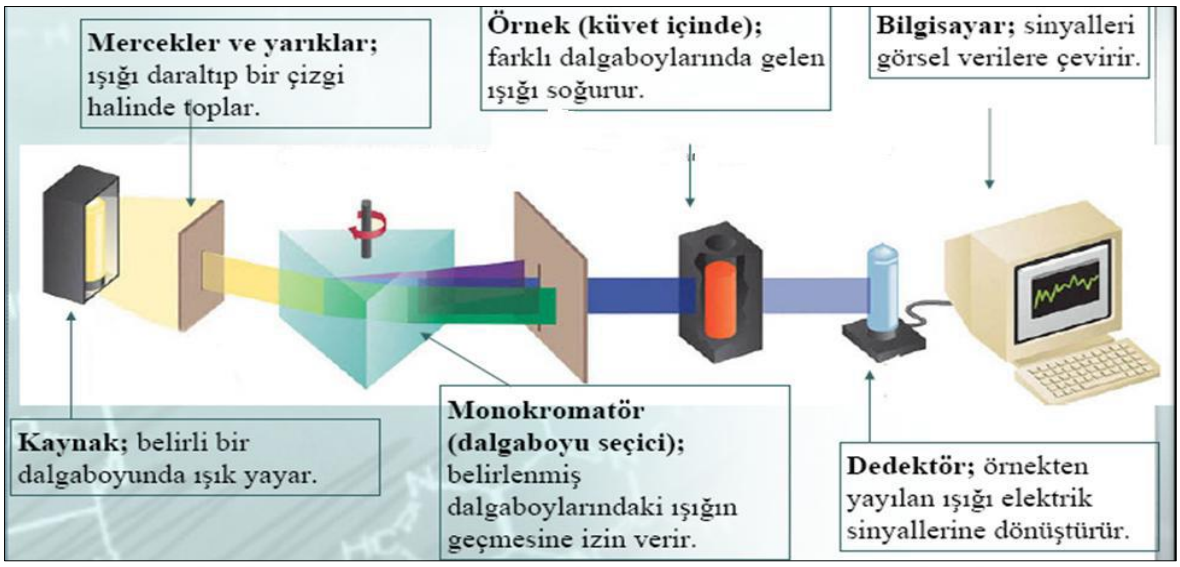
Taramalı elektron mikroskobunun optik tarafında elektron demeti kaynağı olarak elektron tabancası, demeti yönlendirmek ve topraklamak için condenser, yüksek gerilim uygulayarak elektronları numuneye doğru hızlandırmak için objektif mercekleri ve anot plakası, demeti uygun bir şekilde saptırarak numune yüzeyini taramaya yarayan tarama bobinleri ve demet çapını sınırlamakta kullanılan apertürler vardır. Alt tarafta ise numune ocağı bulunmaktadır. Numune ocağı içerisinde, demet ile numunenin etkileşimi sonucu meydana gelen ve farklı sinyalleri algılayabilen algılayıcılar ve numune kızağı bulunmaktadır. Mikroskobun flaman ve mercek akımı ile uyarma gerilimini yine mikroskobun içerisindeki elektron donanımlar tarafından kararlı tutulur. Ayrıca bu elektronik donanımlar algılayıcılardan gelen sinyalleri işler ve bu işlenen sonuçlar numunenin özelliklerini yansıtan görüntüler oluşturur [39].

3.2.4. UV – Vis absorpsiyon spektrometresi

UV – Vis (UV – Görünür bölge absorpsiyon) spektrometresi dalga boyuna karşı absorbans veya transmitans ölçümünün yapıldığı bir cihazdır. Genellikle dalga boyları 100 ile 800 nm arasında değişen ışın ile tarayarak çalışırlar. UV – Vis spektroskopisi modeline göre bilgisayara bağlı veya bağımsız şekilde çalışabilmektedir. Tez çalışmasında Resim 3.6 verilen bilgisayara bağlı çalışan Shimadzu Corporation UV – 1700 serisi UV – Vis spektrometre sistemi kullanılmıştır.



Resim 3.6. Kullanılan UV – Vis spektrometre sistemi

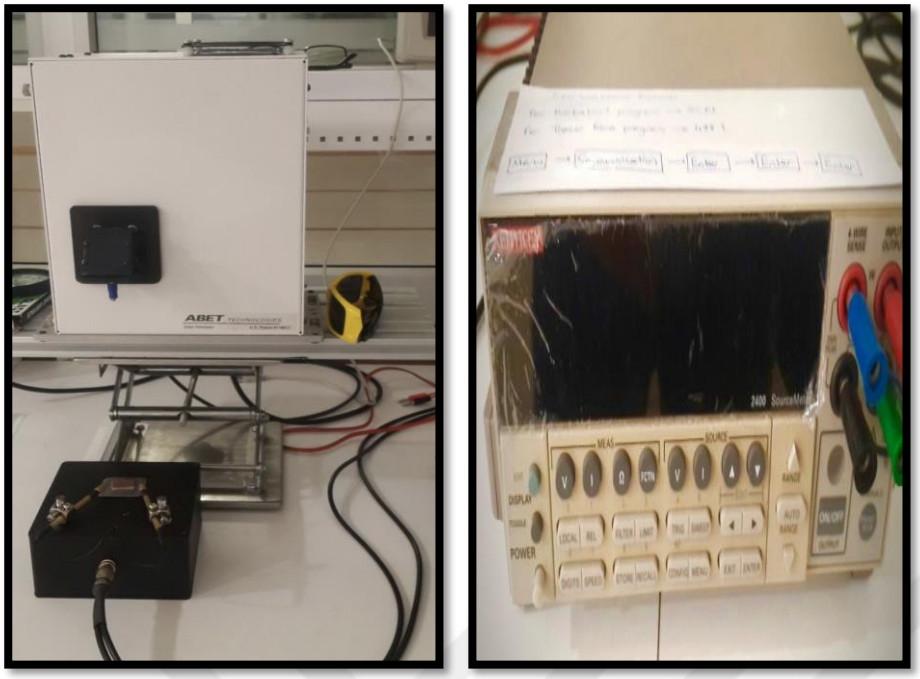


Şekil 3.6. Basit bir spektrometrenin elemanları [40]

Burada ışık kaynağından farklı dalga boylarında ışık bir dalgaboyu seçiciden (monokromatör) geçirilerek tek bir dalga boyuna sahip ışığa çevrilir. Tek bir dalga boyuna sahip ışık numune üzerinden geçerek fotodedektöre gelir. Daha sonra gönderilen ışık ile fotodedektöre gelen ışık verileri karşılaştırılarak numunelere ait geçirgenlik – dalga boyu ve absorbans – dalga boyu grafikleri bulunur. Basit bir spektrofotometrenin elemanları Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Numuneden çıkan ışık şiddetinin numuneye giren ışık şiddetine oranı (I/I_0), transmitans (T) olarak tanımlanır. Absorbans ise bir numune üzerine düşen ışığın ne kadarının soğrulduğunun bir ölçüsüdür. Absorbans ve transmitans, genellikle yüzde (%) olarak tanımlanır.

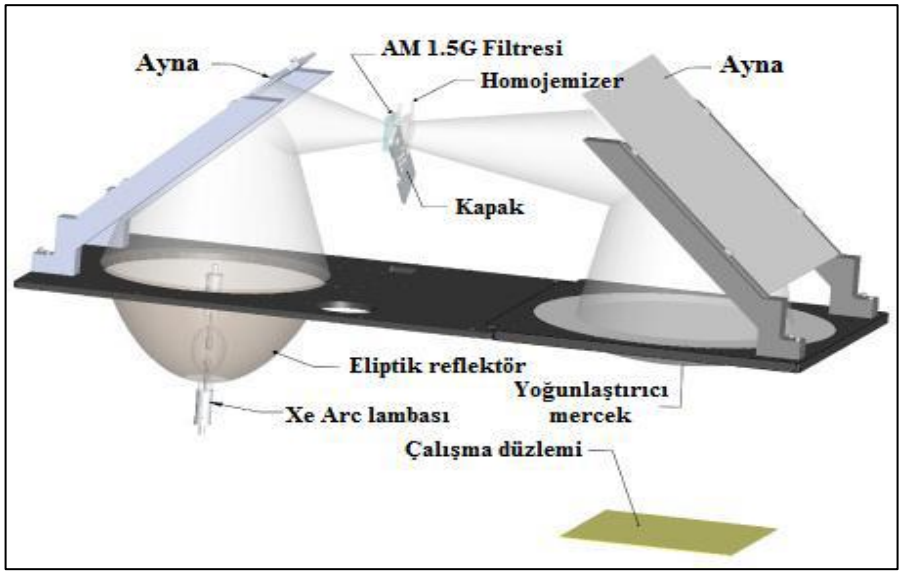
3.2.5. Akım – voltaj (I-V) ölçümleri

Yapay olarak güneş ışığı üreten ve güneş pillerinin akım (I) ve voltaj (V) karakteristiklerini bulmamızı da sağlayan bir cihaz olan solar simülatör yardımıyla, bu çalışmada elde ettiğimiz fotodiyotların akım (I) ve voltaj (V) karakteristikleri elde edildi. Abet teknoloji güneş simülatörü, Keithley 2400 kaynak ölçer ve bir bilgisayardan meydana gelmektedir. Resim 3.7'de kullanmış olduğumuz solar simülatör ve akım – voltaj ölçüm sistemi görünmektedir.



Resim 3.7. Kullanılan solar simülatör ve akım – voltaj ölçüm sistemi

Şekil 3.7'de Abet teknoloji güneş simülatörünün yapısı gösterilmiş ve çalışma prensibine değinilmiştir. Şekil 3.7'de gösterilmeyen bir güç kaynağı ile Xe Ark lambası enerjilendirilerek buradan elde edilen ışınlar ayna yardımı ile yansıtılır. Yansıtılan ışınlar AM 1.5G filtresinden geçerek tekrar başka bir ayna ile yoğunlaştırıcı mercek üzerinden numunemizin üzerine düşürülür.



Şekil 3.7. Güneş simülatörü iç yapısı [41]

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde cam ve silisyum alttaşlar üzerine sol - jel spin kaplama metodu ile kaplanan farklı kalınlıklardaki Al-katkılı ZnO ince filmlerinin yüzeysel, yapısal ve optik özellikleri ile ilgili yapılan ölçümler ve Ag/ZnO/Si/Al cihaz yapısında 3 farklı cihazın elektriksel ölçümleri ile yapılan tüm ölçümlerin analizleri verildi. İnce filmlerin yapısal özellikleri X - ışını difraksiyonu (XRD) ve yüzey morfolojisi atomik kuvvet mikroskobu (AFM), numune kalınlıkları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile belirlendi. Ayrıca filmlerin optik özelliklerini belirlemek için, cam üzerine üretilen ince filmlerin UV - Vis spekturumu 190 - 1100 nm aralığında alındı. Ag/ZnO/Si/Al yapısındaki 3 farklı cihazın diyot ve fotodiyot karakteristikleri karanlıkta ve AM 1.5 standart test şartları altında I-V ölçümleri ile belirlendi.

4.1. X - Işınımı Kırınımı (XRD) Spektrometresi Sonuçları

Şekil 4.1'de *p* - tipi Si alt tabaka üzerinde büyütülmüş farklı kalınlıklardaki *n* - tipi AZO filmlerin XRD sonuçları gösterilmiştir. ZnO kristalinin XRD deseni standart olarak alındığında (JCPDS: 036-1451), ince filmlerin hegzagonal yapıda olduğu görülmektedir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi her üç kalınlıktaki numune için ZnO kristalinin hegzagonal yapısının desenleri (0 0 2) düzlemlerine ait keskin kırınım piklerini göstermektedir. Bu pikler tüm AZO filmlerin (0 0 2) düzlemi boyunca tercih edilen bir yönelime (2θ değeri AZO2, AZO4 ve AZO6 numuneleri için sırasıyla 34,494; 34,443 ve 34,349) sahip olduğunu gösterir.

Üretilen Al katkılı ZnO numunelerinin Bragg piklerine ait konumlarından

$$D = \frac{0{,}9\lambda}{\beta cos\theta} \tag{4.1}$$

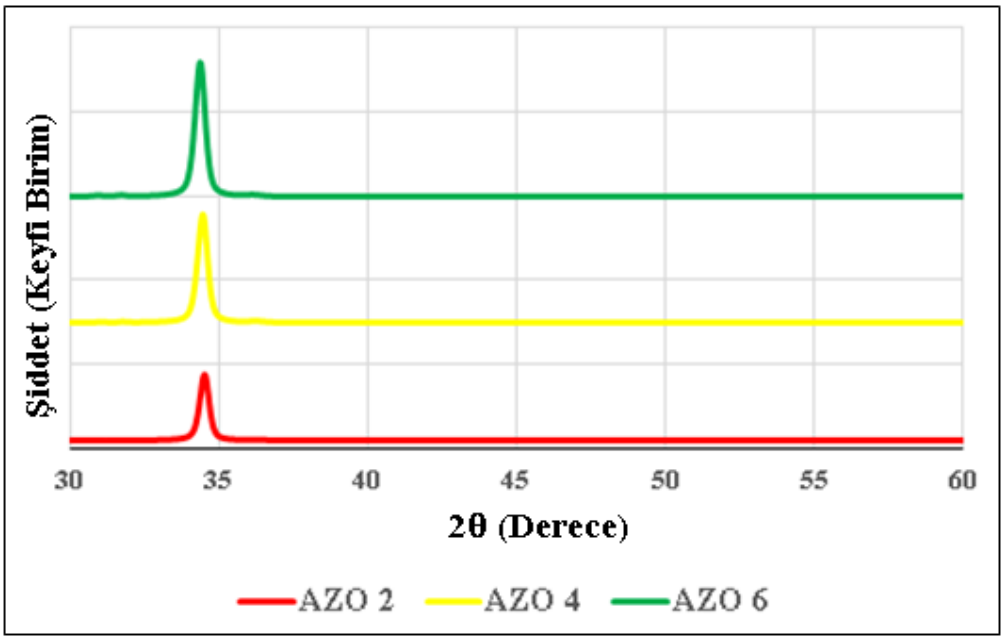
Eş. 4.1 ile verilen Debye – Scherer eşitliği kullanılarak ince filmlerin kristal boyutları (*D*) hesaplanmıştır [42]. Eşitlikte λ; x - ışınları dalga boyu (0.154 nm), β; yarı şiddette tam genişlik (FWHM) ve θ; kırınım açısını göstermektedir. Hegzagonal kristal yapıya sahip AZO ince filmlerin örgü sabiti *c*,

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3}\left(\frac{h^2+hk+k^2}{a^2}\right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.2)$$

eşitliği ile hesaplandı [28]. Eş. 4.2'de *a* ve *c* örgü sabitleri, d_{hkl}; kristal düzlemler arasındaki mesafe ve (*h k l*) Miller indisidir. *c* tüm kaplama döngüleri için aynıdır. Zorlanma (ε) ise *c* örgü sabiti cinsinden

$$\varepsilon = \frac{c-c_0}{c_0} \quad (4.3)$$

eşitliği ile hesaplandı. Burada c_0; herhangi bir zorlama altında olmayan ZnO'nun örgü sabiti olup, değeri 0,5205 nm'dir.



Şekil 4.1. AZO ince filmlerinin XRD sonuçları

Çizelge 4.1'de her üç numune (AZO 2, AZO 4 ve AZO 6) için sırasıyla hesaplanan *2θ* değerleri verilmiştir. Filmlerin yarı şiddet genişliği (FWHM) ve kristal boyutu (*D*) hesaplandı. Kaplama döngüsü Çizelge 4.1'deki gibi arttığında ortalama tanecik büyüklüğünün (*D*) 21,6'dan 19,5 nm'ye düştüğü görüldü. Ayrıca Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi *c* örgü sabitinin Al katkılı çinko oksitin kalınlığı arttıkça arttığı bulundu. Bu durum zorlanma (ε) değerlerinin AZO 2 için negatif, AZO 4 ve AZO 6 için pozitif olmasına yol açar. Negatif zorlama değeri örgüde daralmanın, pozitif değer ise örgüde genişlemenin olduğunu gösterir. Çizelgeden görüldüğü gibi, AZO 4 numunesi diğer iki numuneye göre

çok düşük zorlama değerine (ε_{AZO2} (%) = 0,0005) sahiptir. Bu durum, AZO/Si ara yüzeyinde oluşacak kusurların AZO 4 ile oldukça azaltıldığını gösterir. AZO 6 numunesinin, düşük *D* ve yüksek ε değerleri ile yapısal özelliklerinin belirli bir kaplama döngüsünden sonra kötüleşmesinden dolayı, AZO 6/Si cihazının performansının diğerlerinden daha düşük olması beklenir.

Çizelge 4.1. AZO ince filmlerinin yapısal parametreleri

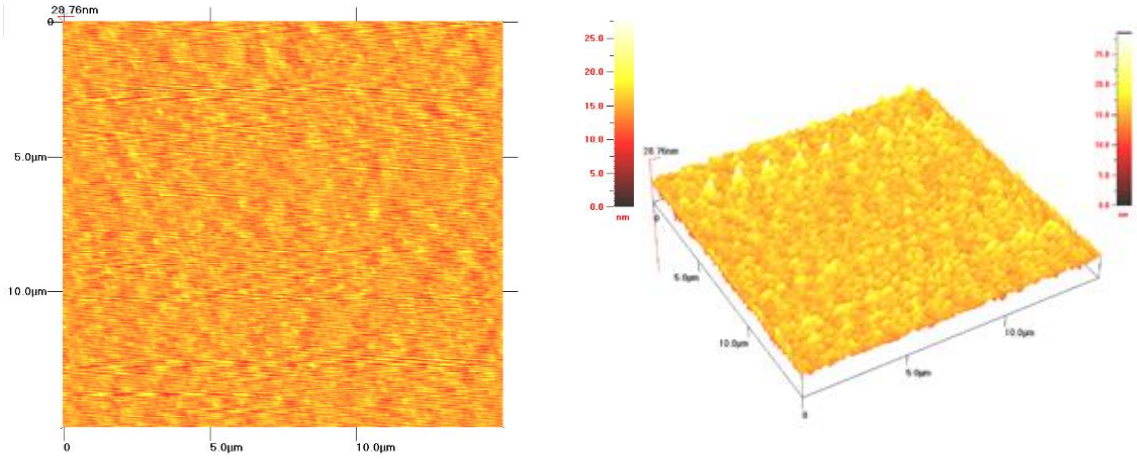
Numune	2θ	β	D (nm)	d_{hkl} (nm)	ε (%)	c
AZO 2	34,494	0,402	21,6	0,25980	-0,17097	0,5200
AZO 4	34,443	0,431	20,2	0,26030	0,0005	0,5205
AZO 6	34,349	0,445	19,5	0,26090	0,2377	0,5217

4.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Sonuçları

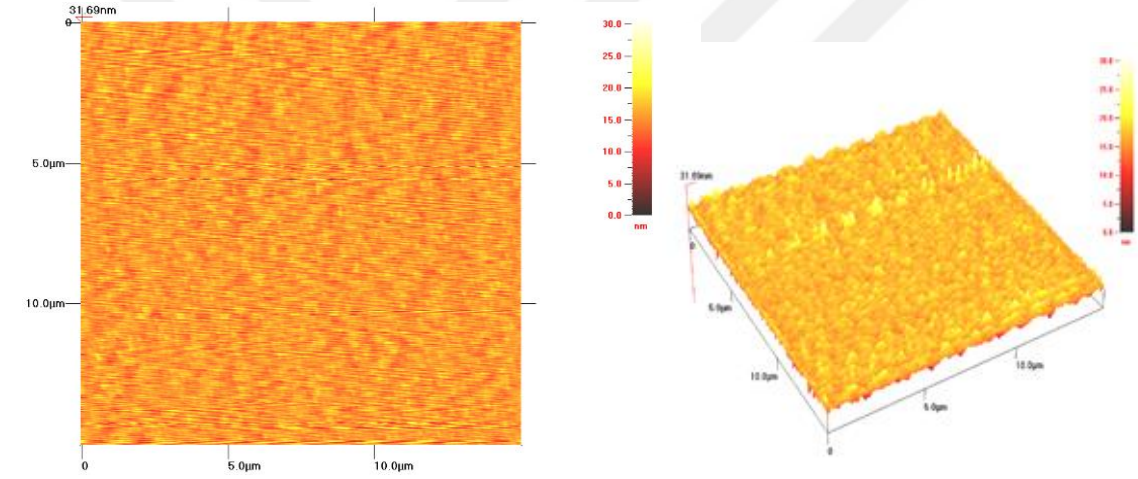
Elde edilen numunelerin iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) yüzey morfolojileri Şekil 4.2'de verilmiştir. Burada atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntüleri ile numunelere ait yüzey morfolojileri, hesaplanan yüzey pürüzlülüğü değerleri ile tespit edildi. İnce filmlerin yüzey pürüzlülüğü RMS (Kare ortalama karekök – yüzey yüksekliklerinin standart sapmasını temsil eder.) değeri ile karakterize edilir. AZO filmlerin RMS değerleri AZO 2, AZO 4 ve AZO 6 için sırasıyla 1,72; 1,80 ve 1,85 nm olarak bulundu. Bulunan RMS değerleri literatürde sol - jel spin kaplama yöntemi ile elde edilen AZO filmler için verilen değerlerle (8 - 10 nm) [43] kıyaslandığında oldukça düşüktür. Bu durum AZO/Si cihaz yapısının olası istenmeyen yüzey problemlerinin (yüzey de elektron-deşik çiftinin tekrar birleşmesi) bu çalışmada elde edilen numunelerde azaltıldığını gösterir. Öte yandan, AZO 2'den AZO 6'ya gidildiğinde yüzey pürüzlülüğü artmıştır.

Silisyumun yüzey pürüzlülüğünün artmasının AZO/Si kombinasyonunun arayüz direncinin azalmasını sağlayacağı belirtilmiştir [44]. Arayüz direncinin azalması valans bandı ile iletim bandı arasında bariyer potansiyeli oluşmasının olasılığını düşürmektedir. Bariyer potansiyelinin oluşma olasılığının düşmesi arayüzde omik davranışın daha iyi hale gelmesi demektir. Bu çalışmada kullanılan Si alttaşlara herhangi bir yüzey işlemi yapılmadığı için AZO/Si ara yüzey etkileşimi göz önünde tutulmamıştır. AZO'nun değişen RMS değeri cihaz üzerine düşen ışık ile etkileşimini ve yüzey özelliklerini etkilemektedir.

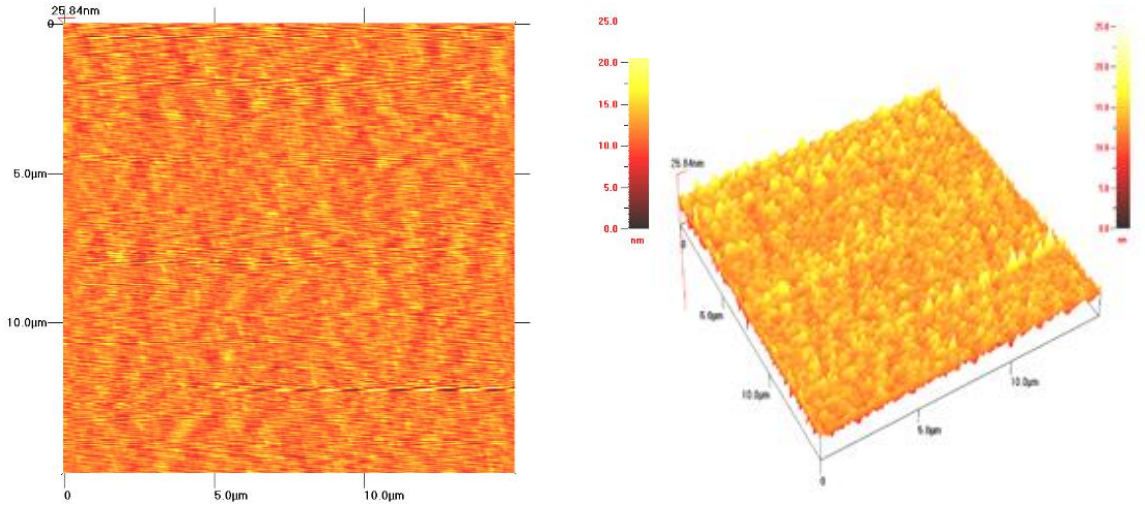
a)



b)



c)

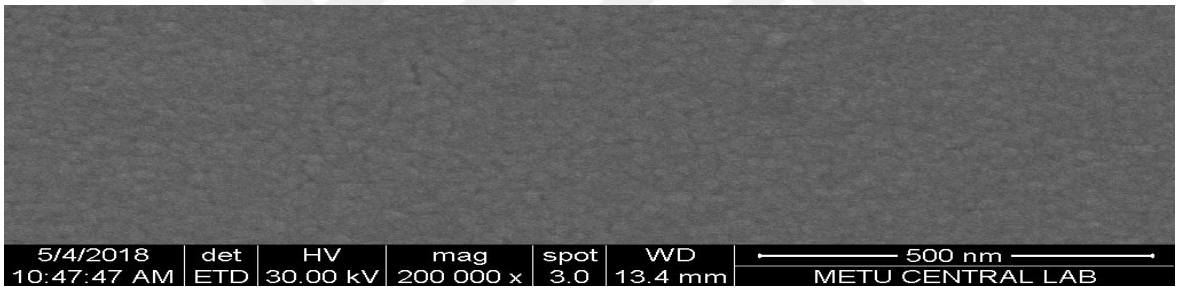


Şekil 4.2. 2D (sol) ve 3D (sağ) AFM sonuçları a) AZO 2 b) AZO 4 c) AZO 6

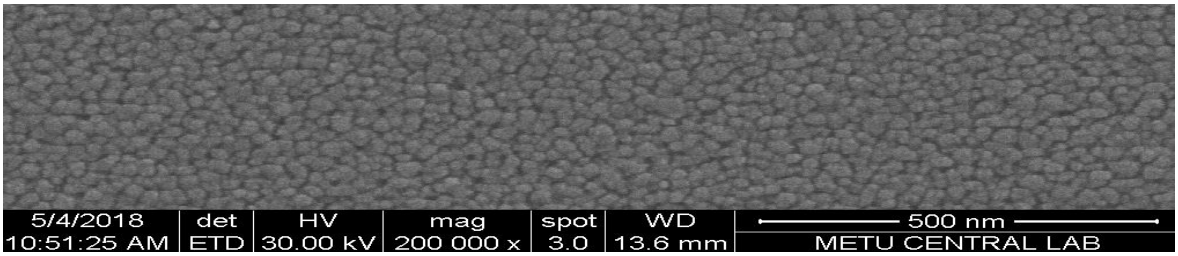
4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

Şekil 4.3'de çalışmaya ait numunelerin yüzey morfolojilerini gösteren SEM görüntüleri verilmiştir. SEM ölçümlerinden önce Si alttaşlar üzerinde büyütülen AZO numuneleri düzgün bir şekilde kesildi ve iletken özellik gösterebilmesi için 3 nm kalınlığında Au – Pd çözeltisi ile kaplandı. Filmlerin yoğun bir yapıya sahip olup homojen şekilde dağıldıkları görülmektedir. Şekil 4.3'deki numuneler incelendiğinde, AZO 2, AZO 4 ve AZO 6 için sırasıyla tanecik boyutları 18,6; 19,0 ve 23,4 nm olarak bulundu. Bunun yanısıra AZO 2, AZO 4 ve AZO 6 için numune kalınlıkları sırasıyla 80,3; 116,6 ve 177,9 nm olarak bulundu. Yüzeydeki tabaka kalınlığının artması tanecik boyutunu arttırmaktadır. Mikro tabakaların kısmen birleşmesi ile yüzeyde gözenekler meydana gelmektedir. Benzer şekilde sıcaklığın artması ile de yüzeyde gözenekler meydana geldiği görülmüştür [45].

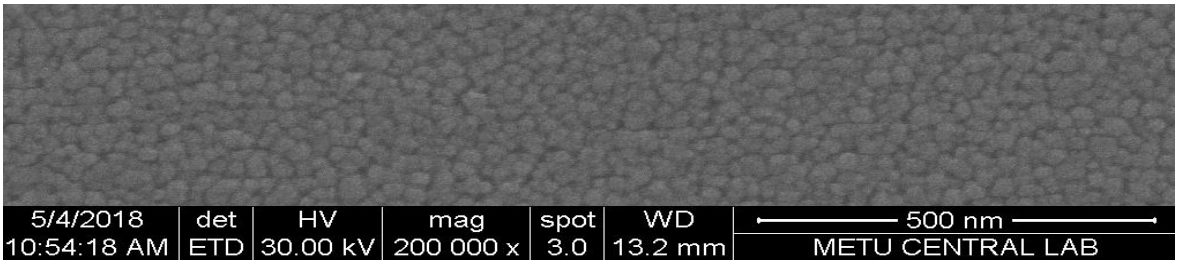
a)



b)



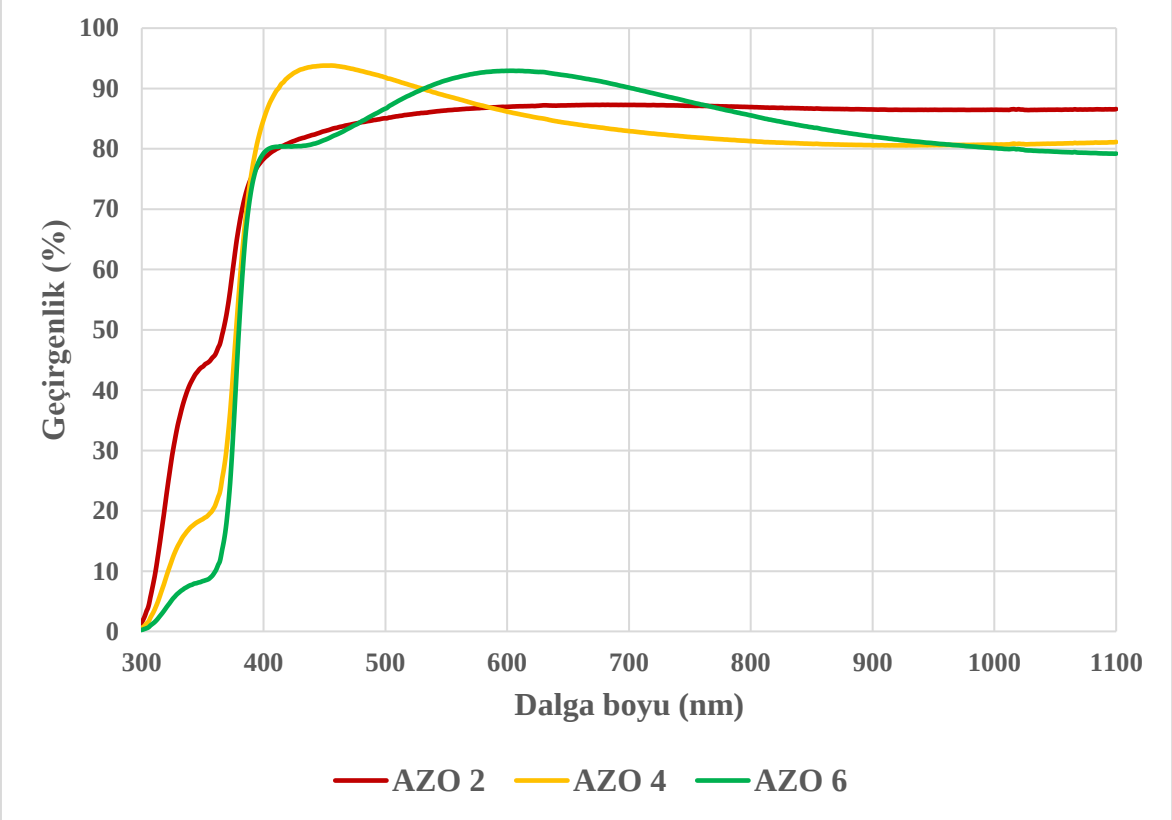
c)



Şekil 4.3. Numunelere ait SEM görüntüleri a) AZO 2 b) AZO 4 c) AZO 6

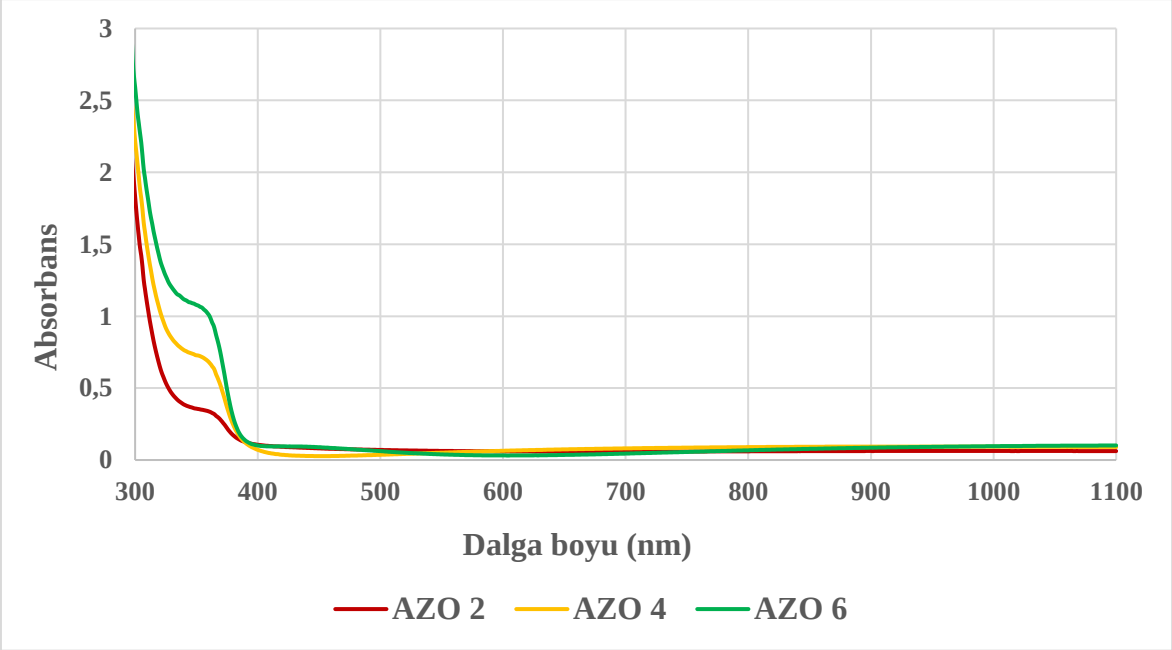
4.4. UV – Vis Sonuçları

Şekil 4.4 ve 4.5'de AZO/Cam numuneler için 190-1100 nm aralığında UV-Vis spektrometre ölçüm sonuçları elde edilen geçirgenlik ve soğurma (absorbans) grafikleri verildi. Şekil 4.4'de gösterilen AZO filmlerin geçirgenlik oranları 85,8 - 88% arasındadır. Bu durum tüm filmlerin görünür bölgede son derece şeffaf olduğunu gösterir. Uzun dalga boylu görünür bölge ile ultraviyole bölgesinde ise artan kalınlıkla geçirgenlik değerlerinin düştüğü görülmektedir. Özellikle bu yapıların cihaz uygulamaları için yüksek şeffaflık gereklidir. Çünkü AZO yüzeyine düşen ışığın Si tabakasına ulaşması ve elektron - deşik çifti üretilerek akımın elde edilmesi gerekir. Dolayısıyla bu çalışmada, farklı kalınlıklarda üretilen (AZO 2/Si, AZO 4/Si ve AZO 6/Si) ince filmlerin görünür (Vis) ve ultraviyole (UV) dalga boylarında geçirgenlik oranlarının %80 ile %95 aralığında değiştiği, yani üretilen filmlerin Vis ve UV bandı için yeterince şeffaf olduğu görülmüştür.



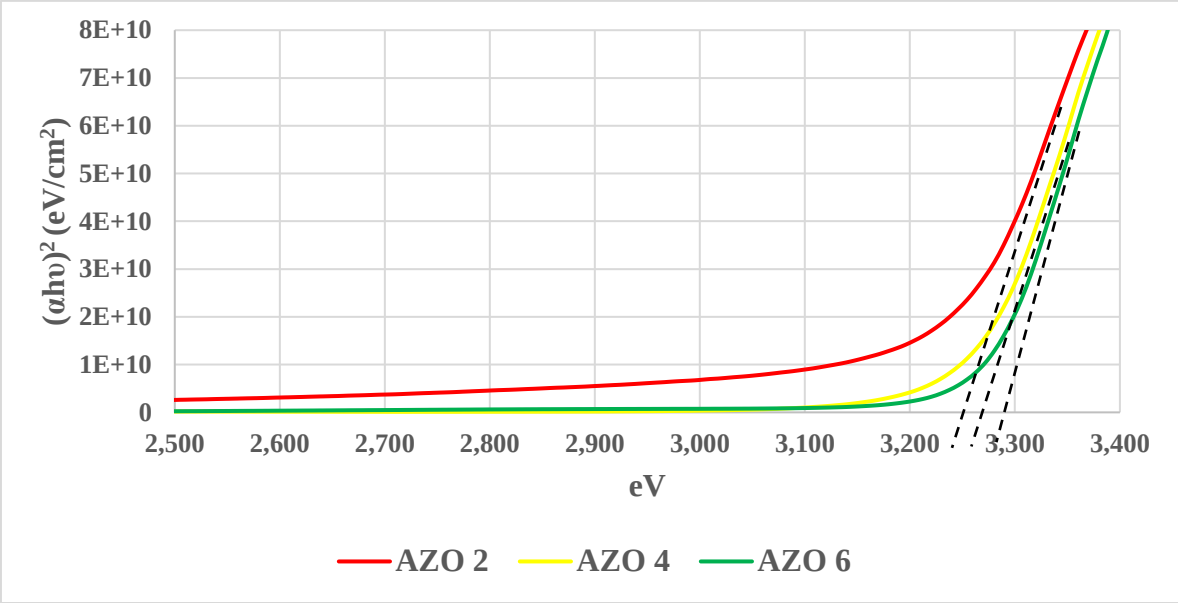
Şekil 4.4. Çeşitli kaplama döngülerine sahip Al katkılı ZnO ince filmlerin geçirgenlik spektrumları

Şekil 4.5'de AZO ince filmlerin çeşitli kaplama sayılarında absorbans (soğurma) grafiği gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde çeşitli kaplama sayılarındaki numunelerin yaklaşık 300 - 400 nm civarında soğurma keskin bir artış gösterdi ve kaplama sayısının artması (kalınlığın artması) ile yükselmenin görüldüğü kısımlarda düşük enerjiye doğru kaymanın olduğu gözlendi. Artan kalınlıkla AZO filmlerin absorbansının artması ve uzun dalga boylarında geçirgenliğinin düşmesi, AZO yüzeyine düşen ışığın Si tabakasına ulaşma ihtimalini azaltmaktadır. Bu yüzden AZO 6/Si kombinasyonu için optoelektronik özelliklerde düşüş beklenir. Ayrıca elektromanyetik spektrum dikkate alındığında AZO 2/Si, AZO 4/Si ve AZO 6/Si ince filmlerinin kısa dalga boylu görünür bölgede absorbanslarının iyi olduğu, ancak kızılötesi bölgesinde absorbaslarının oldukça düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. Çeşitli kaplama döngülerine sahip Al katkılı ZnO ince filmin absorbans spektrumları

Şekil 4.6'da numunelere ait yasak enerji aralığı değerleri, soğurma katsayısının karesinin sıfır olduğu noktadan enerji eksenini keseceği noktaya ekstrapolasyon (Bir zaman dizisinin kapsadığı verilerin dışındaki değerlerin geçmiş değerlerden hareketle tahmin edilmesi.) yapılması sonucunda elde edildi. Geçirgenliğin dalga boyu verileri ile AZO ince filminin yasak enerji aralığı hesaplandı.



Şekil 4.6. Al katkılı ZnO ince filmin çeşitli kaplama kalınlıklarındaki soğurma katsayısının karesine karşılık enerji değişim spektrumları

Filmlerin soğurma katsayısı (α) Eş. 4.4 kullanılarak hesaplandı.

$$\alpha = \frac{Ln(\frac{1}{T})}{\mathrm{d}} \tag{4.4}$$

Eş. 4.4'de *d*; ince filmin kalınlığı, *T* ise geçirgenliğidir. Fotonun enerjisi ve soğurma katsayısı, Eş. 4.5 kullanılarak hesaplandı [46].

$$(\alpha h\upsilon)^2 = A(h\upsilon - E_g) \tag{4.5}$$

Eş. 4.5'de E_g; yasak enerji aralığı, *hν;* fotonun enerjisi, *A*; sabit değerdir. Yasak enerji aralığı değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiş olup AZO 2, AZO 4 ve AZO 6 için sırasıyla 3,24; 3,26 ve 3,28 eV olarak hesaplandı. Bulunan değerler literatürle uyumludur [49]. Literatürden bilindiği üzere, AZO filmlerin yasak enerji aralığı katkısız ZnO (3,2 eV)'nunkinden biraz daha yüksek bir değerdir. Bu sonuçlar Burstein- Moss etkisi ile uyumlu olup Al katkısı ile bant boşluğunun arttığını göstermektedir [47].

Çizelge 4.2. Çeşitli kaplama kalınlıklarındaki Al katkılı ZnO ince filmler için bulunan yasak enerji aralığı değerleri

Numune	E_g (eV)
AZO 2	3.24
AZO 4	3.26
AZO 6	3.28

4.5. Akım – Gerilim (I-V) Ölçümü Sonuçları ve PV Karakteristiği

Diyotun I – V karakteristiği diyotun uçlarına uygulanan gerilim ile diyotun üzerinden geçmekte olan akım arasındaki ilişkiyi verir. Diyotlar ters besleme ve ileri besleme durumları altında farklı davranışlar sergilerler. Diyot ileri besleme durumunda iletimdedir. Fakat silisyum kullanılarak yapılmış bir diyotta ileri beslemede iletime geçilebilmesi için silisyum diyotun bariyer değeri olan 0.7V eşik değerinin aşılması gerekmektedir. Ters besleme durumunda ise diyot üzerinden geçen akım çok küçük değerlerde olmaktadır. Bu akıma ise sızıntı akımı veya doyma akımı denilmektedir.

Ag/n-Zno:Al/p-Si/Al fotodiyotun I - V karakteristikleri karanlık ve aydınlık ışık bölgelerinde incelendi. Bulunan I - V karakteristikleri Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da gösterilmiştir. Şekillerdeki akım ve gerilim değerleri Eş. 4.6 ile hesaplanmıştır [48].

$$I = \mathrm{Io}\exp\left(\frac{q(V-IRs)}{\mathrm{nkT}}\right)\left[1-\exp\left(\frac{q(V-IRs)}{\mathrm{nkT}}\right)\right] \quad (4.6)$$

Eş. 4.6'da, *q*; elektrik yükü, *T*; sıcaklık, *n*; diyotun idealite faktörü, *k*; Boltzman sabiti, *V*; uygulanan gerilim, I_o; doyma akımı ve R_s seri dirençtir [48]. I_o, Eş. 4.7 ile verilir.

$$Io = AA^{*}T^{2}\exp\left(\frac{-q\Phi b}{kT}\right) \quad (4.7)$$

Eş. 4.7'de *A**, Richardson sabitidir ve *p* - tipi Si için bu değer 32 A/cm^{2}K^2'dir, *A*; diyotun kontak alanı ve Φ_b engel yüksekliğidir [49]. Üretilen cihazların bariyer potansiyelleri ise Eş. 4.8 ile hesaplandı [51].

$$\emptyset_{\mathrm{b}} = \frac{kT}{q}.\ln\left(\frac{\mathrm{AA^{*}T^{2}}}{\mathrm{I_o}}\right) \quad (4.8)$$

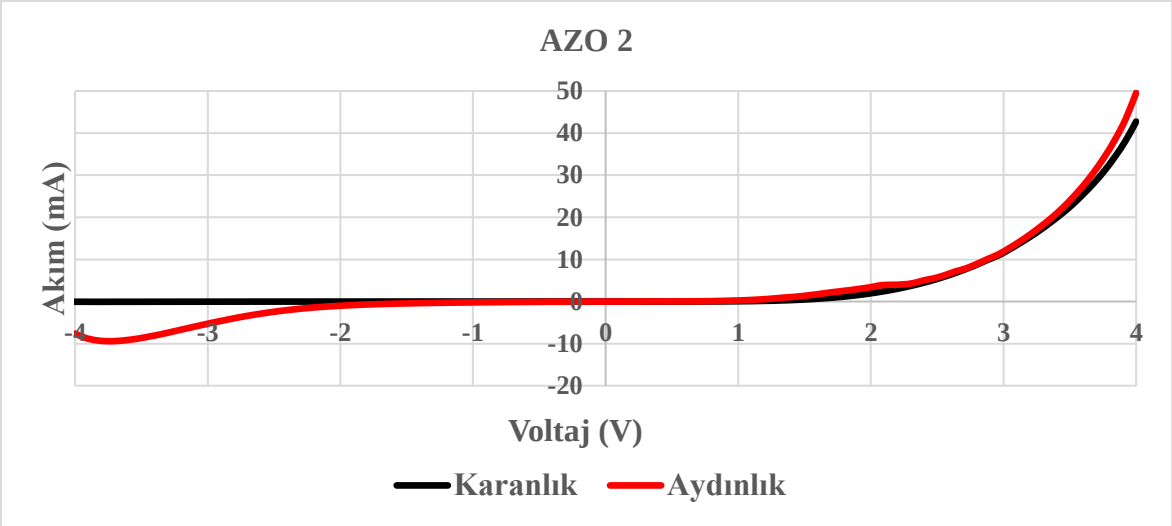
AZO 2/Si, AZO 4/Si ve AZO 6/Si için hesaplanan bariyer potansiyeli değerleri Çizelge 4.3' de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Numunelere ait bariyer potansiyelleri

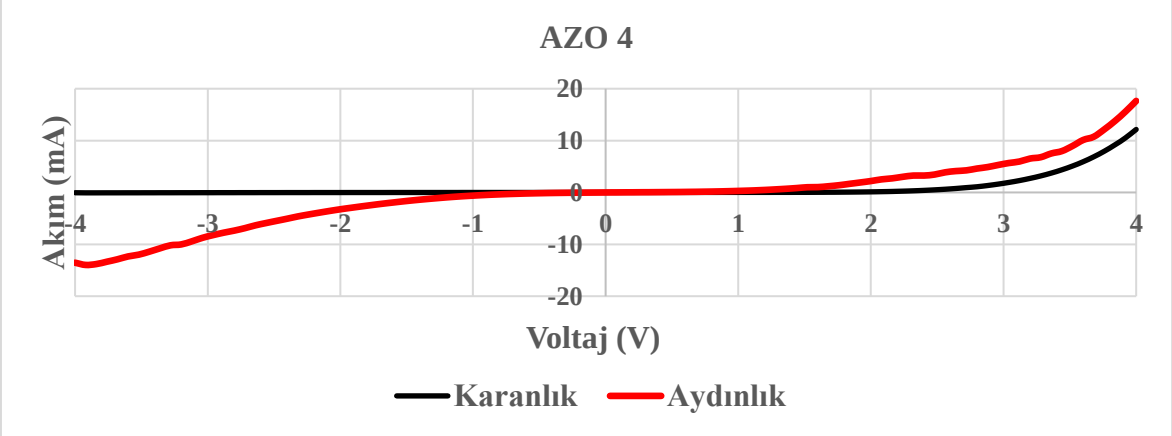
Numune	$\emptyset_b$
AZO 2	0,68
AZO 4	0,72
AZO 6	0,70

Hesaplanan bariyer potansiyel değerleri Si için beklenilen değerlerle tutarlıdır. ZnO tabakasının artan kalınlığı ile bariyer potansiyelin önce arttığı fakat daha sonra azaldığı görülmektedir.

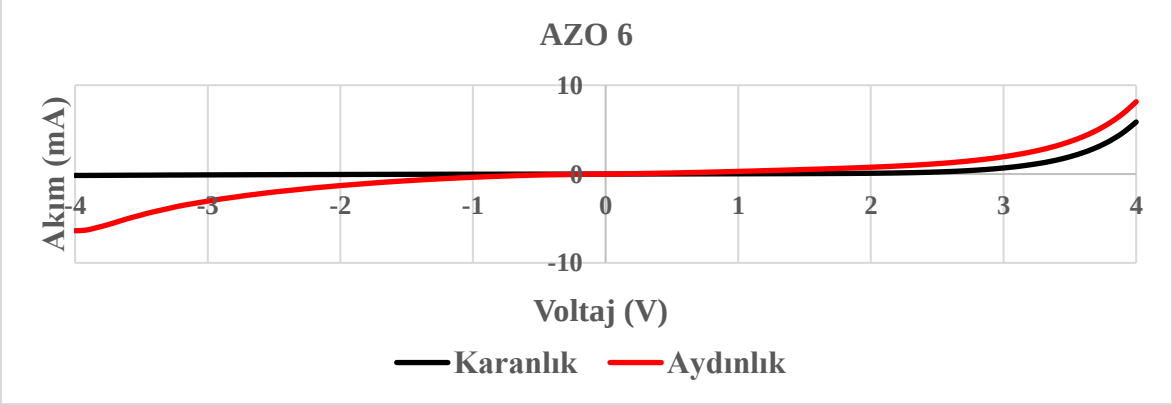
Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da görüldüğü üzere, elde edilen cihazlar tipik bir diyot davranışı göstererek karanlık şartlar altında ters besleme akımı μA düzeyinde iken düz besleme akımı mA düzeyine ulaşmaktadır. Ayrıca hesaplanan bariyer potansiyeli değerleri Si için beklenilen değer (~0,7 V) ile uyumludur. Karanlık şartlar altında cihazların doğrultma oranları ($RR=I_F/I_R$; burada I_F ve I_R sırası ile düz ve ters besleme akımlarıdır) ±4V'da hesaplandı. Hesaplanan değerler Çizelge 4.4 ve 4.5'de verilmiştir. Bulunan doğrultma değerleri literatürle uyum içerisindedir [50 - 52]. En iyi doğrultma oranı AZO 2/Si kombinasyonu ile 923 olarak hesaplandı. Artan kalınlıkla bu değer 37'ye kadar düşmüştür. Bu durum AZO 6 numunesi için doyma akımının artması ile ilgilidir. Doyma akımının artması yapıdaki kusurlara atfedilir.



Şekil 4.7. AZO 2 için karanlık, aydınlıkta n-AZO/p-Si'nin akım – voltaj grafiği (AM 1.5)



Şekil 4.8. AZO 4 için karanlık, aydınlıkta n-AZO/p-Si'nin akım – voltaj grafiği (AM 1.5)



Şekil 4.9. AZO 6 için karanlık, aydınlıkta n-AZO/p-Si'nin akım – voltaj grafiği (AM 1.5)

Cihazların ışığa duyarlılık değeri (PS = $I_{aydınlık}/I_{karanlık}$) -4V'da, AM 1.5 şartları altında ters besleme akım oranlarından hesaplandı. Bulunan bu değerler Çizelge 4.4'de verilmiştir. Çizelge 4.4'de görüldüğü gibi değişen kalınlıktan fotodiyot özelliklerinin etkilendiği görülmektedir. En yüksek PS değeri AZO 4/Si cihazı ile 252 olarak bulunurken en düşük değer (40) AZO 6/Si cihazına aittir. Öte yandan AZO 2/Si cihazı için PS değeri AZO 4/Si cihazı için bulunan değerden küçük olmasına rağmen, ideal bir fotodiyot davranışı gösterdiği I - V grafiğinden anlaşılmaktadır. Buna göre düz besleme bölgesinde akım ışıktan etkilenmezken sadece ters besleme bölgesinde ışığa karşı duyarlılık sergilemektedir.

Çizelge 4.4 incelendiğinde AZO 2/Si, AZO 4/Si ve AZO 6/Si cihazlarının ışığa karşı duyarlılıkları bakımından en iyi sonucun 4 kez çözelti uygulanmış AZO 4/Si numunesinde elde edildiği, doğrultma oranı açısından ise en iyi sonucun 2 kez çözelti uygulanmış AZO 2/Si numunesinde elde edildiği görülmüştür. Bulunan değerler Çizelge 4.5'de verilen literatür değerleri ile uyum içerisindedir.

Çizelge 4.4. Numunelere ait -4V'da hesaplanan PS ve RR değerleri

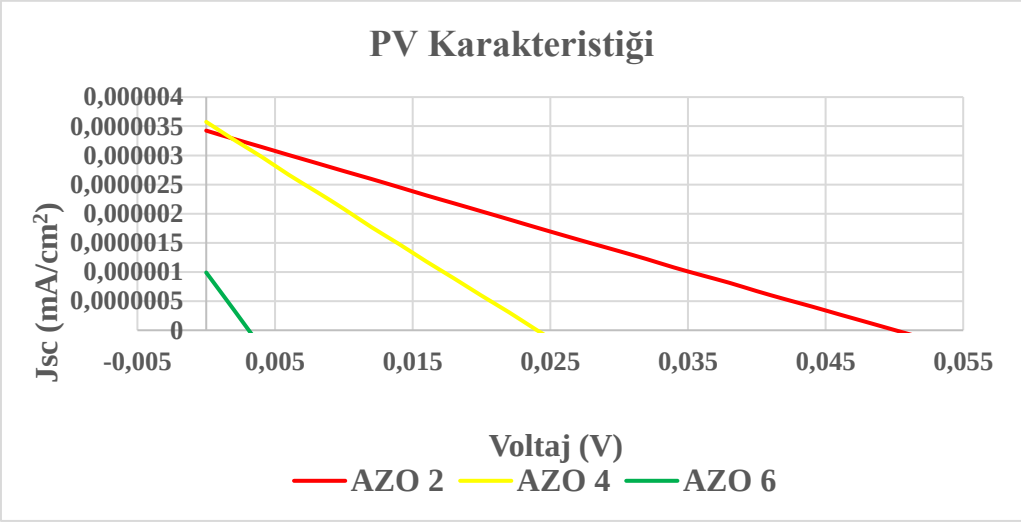
Numune	PS	RR
AZO 2	164	923
AZO 4	252	226
AZO 6	40	37

Çizelge 4.5. Önceki çalışmalarda bulunan RR, PS değerleri

Katkı	Yapı	Işık Kaynağı	Yöntem	Doğrultma Oranı (RR)	Işığa Duyarlılık (PS Aydınlık)	Kaynakça
-	Ga_2O_3/Al_2O_3	Civa lamba (254 nm)	Püskürtme	-	550 (20 V)	[50]
-	ITO/ZnO	500W Xenon Lamba	Sol - jel	504 (+/- 2 V)	-	[51]
Al	ZnO/Si	AM 1.5	Sol - Jel	6915 (+/- 3V)	-	[52]
-	ZnO/Si	Argon Lazer	Püskürtme	519 (+/- 3V)	-	[52]
Al	Zno/Si (AZO 2)	AM 1.5	Sol - Jel	923	164	Bu çalışma
Al	Zno/Si (AZO 4)	AM 1.5	Sol - Jel	226	252	Bu çalışma
Al	Zno/Si (AZO 6)	AM 1.5	Sol - Jel	37	40	Bu çalışma

Araştırılan cihazların fotovoltaik karakteristikleri AM 1.5 test şartları altında araştırıldı ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'da verilmiştir. Cihazlar fotovoltaik davranış sergilemelerine

rağmen, Şekil 2.12.a'dan anlaşılacağı üzere ideal bir fotovoltaik karakterine sahip olmadıkları görülmektedir. Bunun başlıca sebebi Şekil 2.12.b'de eşdeğer devrede gösterilen dirençlerin (R_s ve R_{SH}) değerlerinin istenilen değerlerden uzak olmasından kaynaklanır. İdeal durumda R_s nin küçük R_{SH}'ın ise büyük olması istenir. R_s ve R_{SH} sırası ile J_{sc} ve V_{oc} değerlerini etkiler. Öte yandan bu dirençlerden hangisinin hangi parametre üzerinde baskın olduğu, direnç değerlerinin beklenen değerlerinden farklı olduğu durumlarda tam olarak ayrıştırılamaz. Bu durumda verimdeki değişim, FF'deki değişimle belirlenir. Şekil 4.10'dan maksimum kısa devre akımı (I_{SC}), maksimum açık devre gerilimi (V_{OC}) ile gücün maksimum olduğu noktadaki (Pm) akım (I_m) ve gerilim (V_m) değerleri elde edildi. Bu değerlerden faydalanılarak Eş.2.2. kullanılarak doluluk faktörü (FF) hesaplandı. Maksimum kısa devre akımının (I_{SC}), fotovoltaik hücrenin etkin alanına (1 cm^2) oranı ise akım yoğunluğunu vereceği için Eş.2.1'den akım yoğunluğu değeri bulundu. Verim değeri ise Eş. 2.5 kullanılarak hesaplandı.



Şekil 4.10. AZO numunelerine ait PV karakteristikleri

Çizelge 4.6 incelendiğinde, kalınlık değeri arttıkça R_s değerinin arttığı, FF'nin azaldığı bu yüzden verimin düştüğü görülmektedir. AZO 2/Si kombinasyonu en iyi ışık-elektrik dönüşümü değerini vermiştir. Buna rağmen AZO 2/Si'nin halen ideal fotovoltaik davranıştan uzak olduğu görülmektedir. Bu yüzden çeşitli stratejilerin geliştirilmesi ile bu cihazın AZO/Si kombinasyonu durumunda fotovoltaik uygulamaları için umut verici olacağı öngörülmektedir.

Çizelge 4.6. PV karakteristiği için önemli parametreler

	Voc (V)	Jsc (μA/cm^2)	R_s (kΩcm^2)	η(%) (Verim)	FF (%) (Doluluk faktörü)
AZO 2	0,052	3,42	0,08	4,23E-05	23,753
AZO 4	0,026	3,57	0,18	2,12E-05	22,841
AZO 6	0,004	0,99	1.25	7,10E-07	17,924

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada AZO/Si heteroeklem yapısı, AZO tabakasının üç farklı kalınlığı ile (AZO 2 için 80,6; AZO 4 için 116,6 ve AZO 6 için 177,9) sol - jel spin kaplama yöntemi ile edildi. Böylece AZO tabakasının kalınlığının yapısal, morfolojik, optiksel ve elektriksel performanslara etkisi incelendi.

X – ışınımı spektrometresi ölçümlerinden artan AZO kalınlığı ile ortalama kristal boyutunun azaldığı bulundu. Bu değerin 20nm civarında olduğu gözlemlendi. AZO 4/Si ve AZO 6/Si cihazlarının zorlanma değerlerinin pozitif, AZO 2/Si cihazının zorlanma değerinin ise negatif olduğu hesaplandı. Bu durumda AZO 4 ve AZO 6'nın kristal yapısında örgüde genişleme, AZO 2'de ise örgüde daralma olduğu sonucuna varıldı. Sonuç olarak AZO 4 /Si kombinasyonunda zorlanma değerinin pozitif ve sıfıra çok yakın olduğu, bu yüzden Si tabaka üzerinde oluşacak mekanik zorlanmanın AZO 4/Si cihazı ile büyük oranda azaltıldığı gözlemlendi [54 -57].

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçümleri ile üretilen üç farklı kalınlıktaki AZO/Si cihazlarının yüzey morfolojileri incelendi. Artan kalınlıkla birlikte pürüzlülüğün artmasına rağmen (AZO 2, AZO 4 ve AZO 6 için RMS değerleri sırasıyla 1,72; 1,80 ve 1,85 nm) bu değerin 1,80 nm civarında olduğu gözlemlendi. Üretilen AZO/Si numunelerin RMS değerlerinin literatürde sol - jel spin kaplama yöntemi ile elde edilen AZO filmler için verilen değerler (8 - 10 nm) [43,58,63] ile karşılaştırıldığında oldukça düşük oldukları görüldü. Bu durum bu çalışmada sol - jel tekniği ile Si alttaşları üzerine Al katkılı ZnO'nun depozisyonu ile elde edilen fotodiyotun yapısının olası istenmeyen yüzey problemlerinin (yüzey de elektron-deşik çiftinin tekrar birleşmesi) azaltıldığını gösterir. Bu nedenle sol - jel tekniği diğer tekniklere göre Al katkılı ZnO ince filmlerin büyütülmesinde tercih edilebilir. Öte yandan, Al katkılı ZnO yüzey pürüzlülüğünün artması arayüz direncinin azalmasına ve böylece açık devre voltajı ile dolum faktörünün değişmesine neden olmaktadır [53].

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri ile ince filmlerin kalınlıkları ve tanecik boyutları belirlendi. SEM sonuçları artan kalınlıkla birlikte tanecik boyutunun arttığı, yapının daha yoğun bir hal aldığı ve gözeneklerin arttığını gözlendi [59,60].

UV – Vis ölçümleri ile geçirgenlik ve absorbans grafikleri elde edildi. Elde edilen AZO/Si yapılarının geçirgenlik oranları 85,8 – 88% arasında olduğu tespit edildi. Bu durum tüm filmlerin görünür bölgede son derece şeffaf olduğunu gösterdi. Şeffaflık, AZO yüzeyine düşen ışığın silisyum tabakasına ulaşması ve elektron – deşik çifti üretilerek akımın elde edilmesi için önemli bir parametredir. Bu çalışmada uzun dalga boylu görünür bölge ve ultraviyole bölgede artan kalınlıkla beraber geçirgenlik oranının düştüğü gözlenmesine rağmen geçirgenlik değerlerinin 85,8 – 88% aralığında olması yeterince şeffaf cihazlar elde edildiğini gösterdi. Absorbans sonuçları dikkate alındığında ise artan kalınlıkla birlikte AZO filmlerin absorbanslarının artığı gözlemlendi. Geçirgenlik ve absorbans sonuçları beraber değerlendirildiğinde artan kalınlıkla beraber AZO filmlerin absorbanslarının artması ve geçirgenliklerinin düşmesi AZO yüzeyine düşen ışığın Si tabakasına ulaşma ihtimalini azaltır. Bu yüzden AZO 6/Si cihazı için optoelektronik özelliklerinde düşüş olduğu gözlendi. AZO/Si cihazlarına ait yasak enerji değerleri geçirgenliğin dalga boyu verilerinden yararlanılarak hesaplandı. AZO/Si cihazlarına ait yasak enerji değerleri AZO 2/Si, AZO 4/Si ve AZO 6/Si cihazları için sırasıyla 3,24; 3,26 ve 3,28 eV olarak hesaplandı. AZO filmlerin yasak enerji aralığının katkısız bir ZnO için 3.2 eV olduğu göz önünde tutulursa Al katkısı ile bant genişliğinin arttığı görüldü [59,62].

Sonuç olarak üretilen AZO/Si cihazlarının karanlık ve AM 1.5 standartlarında diyot karakteristikleri incelendi. Çalışmada tüm cihazların gerçek bir diyot gibi davrandığı ve özellikle ters besleme bölgelerinde uygulanan ışığa karşı duyarlı oldukları tespit edildi. Bu bölgedeki direnç değerinin ışıkla beraber azaldığı anlaşıldı. Karanlık şartlar altında cihazların doğrultma oranları ($RR=I_F/I_R$; burada I_F ve I_R sırası ile düz ve ters besleme akımlarıdır) ±4V'da hesaplandı ve en iyi doğrultma oranı AZO 2/Si cihazı için 923 olarak elde edildi. Cihazların ışığa duyarlılık değeri ($PS = I_{aydınlık}/I_{karanlık}$) -4V'da, AM 1.5 şartları altında ters besleme akım oranlarından hesaplandı ve en iyi ışığa duyarlılık oranı AZO 4/Si cihazı için elde edildi. Fakat AZO 2/Si cihazının ışığa duyarlılık değerinin (164) AZO 4/Si'nin ışığa duyarlılık değerinden daha küçük olmasına rağmen AZO 2/Si'nin I - V grafiğinde düz besleme bölgesinde karanlıktaki ve AM 1.5 standartlarında ölçülen akımlarının çakıştığından dolayı AZO 2/Si cihazının ideale daha yakın bir I - V karakteristiği verdiği görüldü. Bulunan RR ve PS değerlerinin literatür ile uyumlu oldukları görüldü [50 - 52].

Her üç AZO/Si cihazının PV karakteristikleri AM 1.5 standartları altında incelendi. Her üç cihazında zayıf fotovoltaik özellikler gösterdikleri tespit edildi. Bunun nedeninin ise elektriksel kayıplar ile ilgili olduğu tespit edildi. Artan kalınlıkla R_S direnci değerinin arttığı ve FF değerinin azaldığı tespit edildi. Bulunan bu değerler literatür ile uyum içerisindedir [61]. Ayrıca AZO 2/Si cihazının AZO 4/Si ve AZO 6/Si cihazlarına göre nispeten daha iyi verime sahip olduğu hesaplandı.

Sonuç olarak AZO 2/Si cihazının en iyi diyot, fotodiyot ve PV özellikleri gösterdiği tespit edildi. Bu bulgular göz önünde bulundurularak,

- Daha ince bir AZO 2/Si yapısı yaparak,
- Alüminyum katkı oranını değiştirerek (%1, %3 vs.),
- Çözelti molaritesini değiştirerek,
- Deney aşamasında tavlama sıcaklığı değiştirerek (AZO tabakasının elektriksel iletkenliğini arttırır),
- ZnO/Si ara yüzüne yeni bir tabaka ekleyerek (Ara yüzeyin olumsuz etkileri ortadan kaldırılır),
- Ag ve Al kontaklar yerine iş fonksiyonu dikkate alınarak (omik davranış istenildiğinden dolayı) daha iyi iletken kontaklar kullanarak,
- Altın ve gümüş gibi farklı boyut ve şekillerdeki metal nano parçacıklar ZnO üst tabakasına uygulanarak (cihaz performansında artış sağlanabilir),
- Kullanılan silisyum alttaşının farklı yönelim ve kalınlıkları göz önünde tutularak

daha iyi diyot, fotodiyot ve PV karakteristikler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Cao, G., (2005). *Nanostrucrures ve Nanomaterials Synthesis, Properties, and Applications*, London: Imperial College Press, 1.

2. Monroy, E., Omn`es, F. and Calle, F., (2003). Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors, *Semicond. Sci. Tech.* 18, R33–R51.

3. Razeghi, M. and Rogalski, A., (1996). Semiconductor ultraviolet detectors, *J. Appl. Phys.* 79 (10), 7433-7473.

4. Al-Hardan, N. H., Jalar, A., Abdul Hamid, M.A., Keng, L. K., Ahmed, N.M. and Shamsudi, R., (2014). A wide-band UV photodiode based on n-ZnO/p-Si heterojunctions, *Sensors and Actuators* A 207, 61– 66.

5. Lee, J.Y., Choi, Y.S., Choi, W.H., Yeom, H.W., Yoon, Y.K., Kim, J.H. and Im, S., (2002). Characterization of films and interfaces in n-ZnOyp-Si photodiodes, *Thin Solid Films* 420-421, 112–116.

6. Zhang, Y., Xu, J., Lin, B., Fu, Z., Zhong, S., Liu, C. and Zhang, Z., (2006). Fabrication and electrical characterization of nanocrystalline ZnO/Si heterojunctions, *Applied Surface Science*, 252, 3449–3453.

7. Kim, Y-S. and Tai, W-P., (2007). Electrical and optical properties of Al-doped ZnO thin films by sol–gel process, *Applied Surface Scie*nce, 253, 4911–4916.

8. Haapalinna, A., (2004). *Characterization Methods for Silicon Photodiode and Silicon Sub-Surface Properties*, Ph. D. Thesis, Helsinki University of Technology, 4-7.

9. Yakuphanoglu, F., Caglar, Y., Caglar, M. and Ilican S., (2010). ZnO/p-Si heterojunction photodiode bys sol–gel deposition of nanostructure n-ZnO filmon p-Si substrate, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13, 137–140.

10. Luo, L., Zhang, Y., Mao, S. S. and Lin, L., (2006). Fabrication and characterization of ZnO nanowires based UV photodiodes, *Sensors and Actuators* A,127, 201–206.

11. Yildiz, A., Uzun, S., Serin, N. and Serin, T., (2016). Influence of grain boundaries on the figure of merit of undoped and Al, In, Sn doped ZnO thin films for photovoltaic applications, *Scripta Materialia*,113, 23–26.

12. Altaş, İ. H., (1998). Fotovoltaj Güneş Pilleri: Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 47, 66-71.

13. Xu, N. and Ching, W. Y. (1993). Electronic Optical and Structural Properties of Some Wurtzite *Crystals, Phys.Rew. B*, 48, 4335–4351.

14. Gaspar, C., Costa, F. and Monteiro, T. (2001). Optical Characterization of ZnO, *J.Mat.Sci*., 12, 269–271.

15. Ng, Z.-N. and Chan, K.-Y., (2012). Thanaporn Tohsophon, Effects of annealing temperature on ZnO and AZO films prepared by sol–gel technique, *Applied Surface Science* 258, 9604– 9609.

16. Wang, Z.L. and Song, J., (2006). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowirearrays, *Science,* 312, 242–246.

17. Zhong, L. W., (2004). Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 16, 829-858.

18. Ahn, S.E., Lee, J.S., Kim, H., Kim, S., Kang, B.H. and Kim, K.H., et al., (2004). Photore-sponse of sol–gel-synthesized ZnO nanorods, *Applied Physics Letters*, 84, 5022–5024.

19. Hsueh, T.-J. and Hsu, C.-L., (2008). Fabrication of gas sensing devices with ZnO nanostructureby the low-temperature oxidation of zinc particles, *Sensors and Actuators B:Chemical* 131, 572–576.

20. Sunandan, B. and Joydeep, D., (2009). Hydrothermal growth of ZnO nanostructures, *Science and Technology of Advanced Materials* 10, 1-18.

21. Wang, C., Chen, Z., He, Y., Li, L. and Zhang, D., (2009). Structure, morphalogy and properties of Fe-doped ZnO films prepared by facing-target magnetron sputtering system. *Applied Surface Science,* 255, 6881-6887.

22. Saumahoro, I., Moubah, R., Schmerber, G., Colis, S., Aouaj, M.A., Abd-lefdil, M., Hassanain, N., Berrada, A. and Dinia, A., (2010). Structural, optical and magnetic properties of Fe-doped ZnO films prepared by spray pyrolysis method. *Rue du Loess*, 518, 4593-4596.

23. 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, 119–125.

24. Majumder, S.B., Jain, M., Dobal, P.S. and Katiyar, R.S., (2003). Investigations on solution derived aluminium doped zinc oxide thin films, *Mater. Sci.Eng*., B 103, 16–25.

25. Suwanboon, S. T., Ratana, T. and Ratana, T., (2007). Effects of Al and Mn Dopant on Structural and Optical Properties of ZnO Thin Film Prepared by Sol-Gel Route, *Walailak J Sci & Tech,* 4(1), 111-121.

26. Kim, Y.-N., Lee, S.-S., Song, J.-K. Noh, T.-M., Kim, J.-W. and Lee, H.-S., (2008). Characteristics of Al-doped ZnO thin films prepared by sol-gel method, *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology,* 18(1), 50-55.

27. Umesh, K. M. ve Jasprit, S., (2008). *Semiconductor Device Physics and Desing*, Netherlands: Springer, 146-160.

28. Yu, Y. P. and Cardona M., (2005). *Fundamentals of Semiconductors Physics and Materials Properties* (Third Edition). New York Berlin Heidelberg: Springer, 1.

29. Sertel T., (2016). *Seyreltik Azotlu P-N Eklem Yapılarının MBE Tekniği İle Büyütülmesi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-8.

30. Boylestad, R. and Nashelsky, L. (1998). *Electronic Devices and Circuit Theory* (Seventh Edition). New York/USA: Prentice-Holl, 3-42.

31. Sze, S. M. and Ng, K., (2006). *Physics of Semiconductor Devices* (Third Edition). New Jersey/USA: John Wiley & Sons Inc., 79-129.

32. Sarı, H. (2008). *2008-2009 Güz Dönemi Optoelektronik Dersi*. Ders Notu, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü, Ankara.

33. Liu, Y., Sun, X., Tai, Q., Hu, H., Chen, B., Huang, N., Sebo, B. and Zhao, X.Z. (2010). Efficiency enhancement in dye-sensitized solar cells by interfacial modification of conducting glass/mesoporous TiO_2 using a novel ZnO compact blocking film, *Journal of Power Sources*, 196, 475-481.

34. Kittel, C., (2005). *Introduction to Solid State Physics* (Eight Edition), New Jersey/USA: John Wiley & Sons Inc., 25-26.

35. Eaton, P., ve West, P, (2010). *Atomic Force Microscopy*, New York/USA: Oxford University Press Inc., 9-14.

36. Bellitto, V., (2012). *Atomic Force Microscopy – Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale*, Rijeka,/Croatia: InTech, 24.

37. İnternet: Taramalı Elektron Mikroskobu, URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fmerlab.metu.edu.tr%2Ftr%2Ftaramali-elektron-mikroskobu&date=2018-06-30, Son Erişim Tarihi: 04.06.2018.

38. Zhou, W., ve Wang, Z., L., (2006). *Scanning Microscopy for Nanotechnology Techniques and Applications*, New York/USA: Springer, 1-3.

39. Erdin, N. (1987). Taramalı Elektron Mikroskobunun Temel Prensipleri ve Numune Hazırlama, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, B-36-2.

40. Özel, K., (2017). *ZnO Tabakalı, TiO_2 Bazlı Boya Duyarlı Organik Güneş Pillerinin Sentezlenmesi, Karakterizasyonu ve Veriminin Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 43.

41. İnternet: Solar Simulator Elements, URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fabet-technologies.com%2Fsolar-simulators%2Fsolar-simulator-elements%2F&date=2018-06-30, Son Erişim Tarihi: 26.05.2018.

42. Chou, J.C., Lin, Y.J., Liao, Y.H., Lai, C.H., Chu, C.M. You, P.H. and Nien, Y.H., (2016). Photovoltaic Performance Analysis of Dye-Sensitized Solar Cell With ZnO Compact Layer and TiO2/Graphene Oxide Composite Photoanode. *Journal of the Electron Devices Society*, 4(6), 402-409.

43. Sahoo, R.K. and Mukherjee, C.D., (2012). Effect of annealing on the structural, topographical and optical properties of sol–gel derived ZnO and AZO thin films Joydip Sengupta,; *Materials Letters*, 83, 84–87.

44. Qi, J.H., Li, Y., Duong, T.T., Choi, H.J. and Yoon, S.G., (2013). Dye- sensitized solar cell based on AZO/Ag/AZO multilayer transparent sonductive oxide film. *Journal of Alloys and Compounds*, 556, 121-126.

45. Kim, Y.-S. and Tai, W.-P., (2007). Electrical and optical properties of Al – doped ZnO thin films by sol – gel process, *Applied Surface Science* 253, 4911–4916.

46. Singh, K. B. and Tripathi, S., (2015). Fabrication and characterization of Au/p-ZnO Schottky contacts, *Superlattices and Microstructures*, 85, 697–706.

47. Shan, F.K. and Yu, Y.S., (2004). Band gap energy of pure and Al-doped ZnO thin films, *J. Eur. Ceram. Soc.* 24,1869–1872.

48. Zhang, X., Zhai, J., Yu, X., Ding, L. and Zhang, W., (2013). Fabrication and characterization of flexible Ag/ZnO Schottky diodes on polyimide substrates, *Thin Solid Films*, 548, 623-626.

49. Zhu, R., Zhang, X., Zhao, J., Li R. and Zhang, W., (2015). Influence of Illumination Intensity on The Electrical Characteristics and Photo Responsivity of the Ag/Zno Schottky Diodes, *Journal of Alloys and Compounds* 631, 125-128.

50. Qian, L.X., Wang, Y., Wu, Z.H., Sheng, T. and Liu, X.Z., (2017). β-Ga_2O_3 solar-blind deep-ultraviolet photodetector based on annealed sapphire substrate, *Vacuum* 140, 106 – 110.

51. Yuan, Z., Fu, M. and Ren, Y., (2016). Wendeng Huang, Chunjiang Shuai, Fabrication and optoelectronic properties of ZnO nanoparticle/P3HT heterojunction photodiode, *Microelectronic Engineering* 163, 32–35.

52. Bozkaplan, C., (2011). *Ag/ZnO/p-Si Yapısının Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 43.

53. Qi, J.H., Li, Y., Duong, T.T., Choi, H.J. and Yoon, S.G. (2012). Dye- sensitized solar cellbased on AZO/Ag/AZO multilayer transparent sonductive oxide film. Journal of Alloys and Compounds, 556, 121-126.

54. Wang F.H. and Chang C.L., (2016) Effect of substrate temperature on transparent conducting Al and F co-doped ZnO thin films prepared by rf magnetron sputtering, Applied Surface Science, 161, 1-43.

55. Srinatha, N., No, Y.S., Vinayak, B.K., Chakravarty, S., Suriyamurthy, N., Angadi, B., Umarji, A.M. and Choi, W.K., (2016). Effect of RF power on the structural, optical and gas sensing properties of RF-sputtered Al doped ZnO thin films, RSC Advances, 6, 9779-9788.

56. Sandeep, K.M., Shreesha, B. and Dharmaprakash, S.M., (2018). Nonlinear absorption properties of ZnO and Al doped ZnO thin films under continuous and pulsed modes of operations, Optics and Laser Technology 102, 147–152.

57. Mickan, M., Helmersson, U. and Horwat, D., (2018). Effect of substrate temperature on the deposition of Al-doped ZnO thin films using high power impulse magnetron sputtering, Surface & Coatings Technology, 347, 245-251.

58. Patel, A.T., Singh, C.C. and Panda, E., (2018). Microstructure influenced variation in the local surface electrical heterogeneity in thickening Al-doped ZnO films: Evidence using both scanning tunnelling spectroscope and conductive atomic force microscope, Materials Science in Semiconductor Processing, 75, 65-74.

59. Jo, G.H., Kim, S.H. and Koh, J.H., (2018). Enhanced electrical and optical properties based on stress reduced graded structure of Al-doped ZnO thin films, Ceramics International, 44, 735-741.

60. Djelloul, A., Larbah, Y., Adnane, M., Labdelli, B., Ziane, M.I., Manseri, A. and Messaoud, A., (2018). Properties of Undoped and (Al, In) Doped ZnO Thin Films Prepared by Ultrasonic Spray Pyrolysis for Solar Cell Applications., Journal of Nano and Electronic Physıcs, 10, 1-5.

61. Mbule, P., Wang, D., Grieseler, R., Schaaf, P., Muhsin, B., Hoppe, H., Mothudi, B. and Dhlamini, M., (2018). Aluminum-doped ZnO thin films deposited on flat and nanostructured glass substrates: Quality and performance for applications in organic solar cells., Solar Energy, 38, 1-6.

62. Ajala, F., Hamrouni, A., Houas, A., Lachheb, H., Megna, B., Palmisano, L. and Parrino, F., (2018). The influence of Al doping on the photocatalytic activity of nanostructured ZnO: the role of adsorbed water, Applied Surface Science, 445, 376-382.

63. Marikkannan, M., Dinesh, A., Mayandi, J., Vishnukanthan, V. and Pearce, J.M., (2018). Properties of Al-Doped Zinc Oxide and In-Doped Zinc Oxide Bilayer Transparent Conducting Oxides for Solar Cell Applications, Materials Letters, 222, 50-53.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: GÖKTAŞ, Ömer Faruk
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 28.05.1990, Ankara
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (538) 701 20 47
e-mail	: goktas.omerfaruk@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik - Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Fırat Üniversitesi / Elektrik - Elektronik Mühendisliği	2012
Lise	Elazığ Hıdır Sever Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Ahi Evran Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2014-2017	TÜBİTAK	Uzman Yardımcısı
2013-2014	ARAS Elektrik Dağıtım A.Ş.	Uzman Yardımcısı
2012-2013	BM Holding	Kontrolör

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Futbol



GAZİ GELECEKTİR..