

**FARKLI SOL PARAMETRELERİNDE SOL JEL YÖNTEMİYLE
ELDE EDİLEN ZnO FİMLERİNİN KARAKTERİZASYONU
VE ELEKTRONİK AYGIT UYGULAMALARI**

Meral Nesrin BAŞLANGIÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Aralık, 2017

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Meral Nesrin BAŞLANGIÇ'ın "Farklı Sol Parametrelerinde Sol Jel Yöntemiyle Elde Edilen ZnO Filmlerinin Karakterizasyonu ve Elektronik Aygıt Uygulamaları" başlıklı tezi 05/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Ünvan Adı-Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR
Üye	: Prof. Dr. Gökhan SAVAROĞLU
Üye	: Doç. Dr. Tülay HURMA

.....

Enstitü Müdürü

ÖZET

FARKLI SOL PARAMETRELERİNDE SOL JEL YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN ZnO FİLMLEİNİN KARAKTERİZASYONU VE ELEKTRONİK AYGIT UYGULAMALARI

Meral Nesrin BAŞLANGIÇ

Fizik Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık, 2017

Danışman: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR

Bu çalışmada, Çinko Oksit (ZnO) filmleri, p-Si altaşlar üzerine sol-jel spin kaplama yöntemiyle üç farklı tipte çözelti hazırlanılarak elde edilmiştir. Farklı çözücülerin, ZnO filmlerinin yapısal ve morfolojik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. XRD desenleri tüm filmlerinin hekzagonal yapıda olduğunu göstermiştir. ZnO filmlerinin kristal boyutu (D), örgü parametreleri (a , c) ve yapılanma katsayısı (TC) değerleri hesaplanmıştır. Filmlerin morfolojik özellikleri FESEM görüntülerinden incelenmiştir. Yapısal ve morfolojik özelliklerine göre en iyi ZnO filmleri seçilerek p-Si/ n-ZnO heteroeklem diyot fabrikasyonu yapılmıştır. Bu diyotların elektriksel karakterizasyonu incelenmiştir. Heteroeklem diyotların I - V ölçümlerinden, idealite faktörü (n) ve bariyer yüksekliği (ϕ_b) değerleri hesaplanmıştır. Bu diyotların seri direnç (R_s) ve bariyer yüksekliği (ϕ_b), Norde metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar, metal ve yarıiletken ara yüzeyindeki durumların ve seri direncin heteroeklem diyotların elektriksel özelliklerinde önemli faktör olduğunu göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: ZnO, Sol Jel Spin Kaplama Yöntemi, Heteroeklem Diyot.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF ZnO FILMS BY SOL–GEL METHOD USING DIFFERENT SOLVENTS AND ELECTRONIC DEVICE APPLICATIONS

Meral Nesrin BAŞLANGIÇ

Department of Physics

Anadolu University, Graduate School of Sciences, December, 2017

Supervisor: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR

In this work, Zinc Oxide (ZnO) films have been prepared on p-Si substrates by sol gel method using spin coating technique with three types of solvents. The effects of the different solvents on the structural, and morphological properties of the ZnO films have been investigated. XRD patterns showed that all of the ZnO films exhibited hexagonal crystal structure. The crystallite size (D), lattice parameters (a , c) and texture coefficient (TC) values for the ZnO films have been calculated. The morphological properties of the films were investigated by FESEM images. According to the structural and morphological characteristics, the best ZnO films were selected and p-Si/ n-ZnO heterojunction diodes were fabricated. Electrical characteristics of these diodes have been investigated. From the I - V results of the heterojunction diodes, the ideality factor (n) and barrier height (ϕ_b) have been calculated. Serial resistance (R_s) and barrier height of these diodes (ϕ_b) were calculated using Norde method. It is shown that the interface states between metal and semiconductor and serial resistance shows an important factor on the electrical parameters of heterojunction diodes.

Keywords: ZnO, Sol Gel Spin Coating, Heterojunction Diode.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bana yol gösteren, değerli bilgilerini benimle paylaşan danışman hocam Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR'a, ilgisini ve desteğini göstermekten kaçınmayan Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyeleri Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR ve Prof. Dr. Saliha ILICAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim dönemim boyunca yardım, bilgi ve tecrübeleri ile bana sürekli destek olan, laboratuvar çalışmalarımda yol gösterici olan Dr. Seval AKSOY'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, sabır ve sevgileriyle hedeflerime doğru ilerlememi sağlayan canım aileme teşekkür ederim.

Ayrıca lisans döneminden itibaren hem sınıf arkadaşım hem hayat arkadaşım olan Burak BAŞLANGIÇ'a çok teşekkür ederim.

Saygılarımla,

Meral Nesrin BAŞLANGIÇ

Aralık, 2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

.....

(İmza)

.....

Meral Nesrin BAŞLANGIÇ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BELGESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ ve AMAÇ	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Özeti	2
1.3. Amaç	15
2. TEORİK BİLGİLER.....	16
2.1. Giriş.....	16
2.2. Yarıiletkenler	16
2.2.1. n-tipi yarıiletkenler	18
2.2.2. p-tipi yarıiletkenler	19
2.3. Yarıiletken Aygıtlar	21
2.3.1. p-n heteroeklem diyotlar	21
2.4. Metal-Yarıiletken (MY) Kontaklar	24
2.4.1. Omik kontaklar	25
2.4.2. MY kontakların akım-gerilim bağlantısı.....	27
2.5. ZnO'nun Özellikleri	30
3. ZnO FİMLERİNİN ELDE EDİLMESİ ve HETEROEKLEM DİYOT FABRİKASYONU	32
3.1. Giriş.....	32
3.1.1. Sol jel spin kaplama yöntemi	33
3.2. ZnO Filmlerinin Elde Edilmesi	37

	<u>Sayfa</u>
3.2.1. Alttaşların temizlenmesi.....	37
3.2.2. Çözeltilerin hazırlanması	37
3.2.3. Deneyin yapılışı	38
3.2.4. Kontakların yapılışı	39
4. ZnO FİMLERİNİN ve n-ZnO/ p-Si HETEROEKLEM DİYOTLARIN KARAKTERİZASYONU	41
4.1. Elde Edilen ZnO Filmlerinin X-Işını Kırınım Desenleri.....	41
4.1.1. Giriş.....	41
4.1.2. X-Işını kırınımı.....	41
4.1.3. ZnO filmlerinin XRD desenleri	43
4.2. Elde Edilen ZnO Filmlerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) Görüntüleri.....	48
4.2.1. Giriş.....	48
4.2.2. FESEM görüntülerinin oluşumu	49
4.2.3. ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri.....	50
4.3. Elde Edilen n-ZnO/p-Si Heteroeklem Diyotların Elektriksel Karakterizasyonları.....	55
4.3.1. Giriş.....	55
4.3.2. Heteroeklem diyotların <i>I-V</i> karakterizasyonları	55
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1.	Metal-yarıiletken kontakların iş fonksiyonuna göre doğrultucu ve omik kontaklar	24
Çizelge 3.1.	Film üretim yöntemleri	32
Çizelge 3.2.	Diyot fabrikasyonunda kullanılan metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonları.....	40
Çizelge 4.1.	Elde edilen ZnO filmlerinin 2θ , D ve TC değerleri.....	47
Çizelge 4.2.	Elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabiti değerleri	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Çözücü olarak (a) NH_4OH , (b) NaOH kullanılarak elde ettikleri ZnO filmlerine ait XRD desenleri	3
Şekil 1.2.	Çözücü olarak (a) NH_4OH , (b) NaOH kullanılarak elde ettikleri ZnO filmlerine ait FESEM görüntüleri.....	3
Şekil 1.3.	(a) Metanol ile hazırlanan, (b) Etanol ile hazırlanan çözeltilerden elde edilen ZnO filmlerine ait AFM görüntüleri	4
Şekil 1.4.	(a) Metanol ile hazırlanan, (b) Etanol ile hazırlanan çözeltilerden elde edilen ZnO filmlerine ait XRD desenleri.....	4
Şekil 1.5.	(a) Metanol ile hazırlanan, (b) Etanol ile hazırlanan çözeltilerden elde edilen ZnO filmlerine ait I - V grafikleri.....	4
Şekil 1.6.	Farklı kurutma sıcaklıklarında (a) 120°C , (b) 300°C elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri.....	5
Şekil 1.7.	120°C ve 300°C kurutma sıcaklıklarında ve farklı sabitleyiciler kullanılarak (a, f) MEA, (b, g) DEA, (c, h) TEA, (d, i) TeA ve (e, j) EDA elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri	6
Şekil 1.8.	120°C ve 300°C kurutma sıcaklıklarında ve farklı sabitleyiciler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin geçirgenlik spektrumları ve optik bant aralığı değerleri	6
Şekil 1.9.	Farklı çözücüler kullanılarak (a) MeOH, (b) EtOH, (c) IPA, (d) 2-ME elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri	7
Şekil 1.10.	MeOH, EtOH, IPA, 2-ME gibi farklı çözücüler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri	8
Şekil 1.11.	Nanoyapılı n- ZnO /p-Si heteroeklem diyotun şematik gösterimi ..	8
Şekil 1.12.	Nanoyapılı ZnO filmlerine ait XRD desenleri	9
Şekil 1.13.	Nanoyapılı ZnO filmlerine ait (a) 30000, (b) 300000 büyütmedeki FESEM görüntüleri	9
Şekil 1.14.	Heteroeklem n- ZnO /p-Si diyotların I - V karakterizasyonu.....	10
Şekil 1.15.	Nanoyapılı n- ZnO /p-Si heteroeklem diyotunun şematik gösterimi.....	10

Şekil 1.16.	Farklı p-Si alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerine ait XRD desenleri	11
Şekil 1.17.	Farklı p-Si alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerine ait FESEM görüntüleri	11
Şekil 1.18.	(a) ZnO/Si, (b) ZnO/Et, (c) ZnO/PSi diyotlarına ait karanlık ve oda koşullarındaki <i>I-V</i> karakterizasyonları.....	12
Şekil 1.19.	(a) ZnO/Si, (b) ZnO/Et, (c) ZnO/PSi diyotlarına ait karanlık ve UV aydınlatma koşullarındaki <i>I-V</i> karakterizasyonları.....	13
Şekil 1.20.	Heteroeklem ZnO/p-Si diyotunun şematik gösterimi	13
Şekil 1.21.	Nanoyapılı ZnO filmlerinin XRD desenleri.....	14
Şekil 1.22.	Heteroeklem diyotunun <i>I-V</i> karakterizasyonu.....	14
Şekil 2.1.	Yasak enerji aralığının temsili diyagramı	18
Şekil 2.2.	n-tipi yarıiletkenin şematik gösterimi	18
Şekil 2.3.	Bir yarıiletkende donör enerji seviyesi	19
Şekil 2.4.	p-tipi yarıiletkenin şematik gösterimi	20
Şekil 2.5.	Bir yarıiletkende akseptör enerji seviyesi	20
Şekil 2.6.	p-n heteroekleminin şematik gösterimi	21
Şekil 2.7.	Düzgün olarak katkılanmış ideal bir p-n heteroekleminin katkı profili.....	22
Şekil 2.8.	Uzay yükü bölgesi, elektrik alan ve yüklü taşıyıcılar üzerine etkileyen kuvvetler	23
Şekil 2.9.	(a) Doğru beslem uygulanmış bir p-n ekleminin enerji-bant diyagramı, (b) ters beslem uygulanmış bir p-n ekleminin enerji-bant diyagramı	24
Şekil 2.10.	(a) Schottky kontağın ve (b) omik kontağın akım-gerilim karakteristiği.....	25
Şekil 2.11.	n-tipi yarıiletken/ metal omik kontak, (a) kontakta önce, (b) kontakta sonra enerji bant diyagramı (c) $V \neq 0$ durumundaki, enerji bant grafikleri	26
Şekil 2.12.	p-tipi yarıiletken/ metal omik kontak, (a) kontakta önce, (b) kontakta sonra enerji bant diyagramı (c) $V \neq 0$ durumundaki, enerji bant grafikleri.....	27

Şekil 2.13.	İmaj kuvvet azalma etkisinin doğru beslem altındaki bir metal-yarıiletken kontakta etkisi	28
Şekil 2.14.	ZnO kristal yapıların gösterimi: (a) kübik kaya tuzu (B1), (b) kübik çinko sülfid (B3), (c) hekzagonal wurtzite (B4)	30
Şekil 2.15.	ZnO (a) (Wurtzite) kristal yapısı, (b) [0001] yönü boyunca kesiti	31
Şekil 3.1.	Sol jel yöntemi ile film kaplamanın şematik gösterimi	34
Şekil 3.2.	Çözeltinin alttaşa damlatılması	35
Şekil 3.3.	Çözeltinin alttaşa homojen olarak yayılması	35
Şekil 3.4.	Çözeltinin yüksek hızda döndürülmesi	36
Şekil 3.5.	Buharlaşma ve film oluşumu	36
Şekil 3.6.	LAURELL marka sol jel spin kaplama cihazının fotoğrafı	38
Şekil 3.7.	PROTHERM marka fırının fotoğrafı	39
Şekil 3.8.	VAKSIS PVD Handy-MT/101T model metal buharlaştırma cihazı	40
Şekil 3.9.	Fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların şematik gösterimi.....	40
Şekil 4.1.	X-ışınlarının bir kristal tarafından kırınımı.....	42
Şekil 4.2.	BRUKER D8 Advance marka X-ışını kırınım cihazının fotoğrafı.....	43
Şekil 4.3.	I.Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri	44
Şekil 4.4.	II. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri	45
Şekil 4.5.	III. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri	46
Şekil 4.6.	FESEM’de görüntü oluşumunun şematik gösterimi	49
Şekil 4.7.	ZEISS ULTRAPLUS marka FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) cihazının fotoğrafı	50
Şekil 4.8.	I. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin (a), (c), (e) 300000 büyütmede ve (b), (d), (f) 30000 büyütmede FESEM görüntüleri	51

Şekil 4.9.	II. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin (a), (c) 300000 büyütmede ve (b), (d) 30000 büyütmede FESEM görüntüleri	53
Şekil 4.10.	III. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin (a), (c), (e) 300000 büyütmede ve (b), (d), (f) 30000 büyütmede FESEM görüntüleri	54
Şekil 4.11.	KEITHLEY 2400 <i>I-V</i> kaynağının fotoğrafı	55
Şekil 4.12.	D1 heteroeklem diyotunun yarı-logaritmik <i>I-V</i> grafiği	57
Şekil 4.13.	D2 heteroeklem diyotunun yarı-logaritmik <i>I-V</i> grafiği	58
Şekil 4.14.	D3 heteroeklem diyotunun yarı-logaritmik <i>I-V</i> grafiği	59
Şekil 4.15.	D3 p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun enerji-band diyagramı	60
Şekil 4.16.	(a) D1, (b) D3 heteroeklem diyotlarına ait $F(V)$ - V graafikleri.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A^*	: Richardson Sabiti
A	: Diyotun alanı
Å	: Angstrom
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece
D	: Kristal boyutu
d_{hkl}	: Kristal düzlemleri arası mesafe
a, b, c	: Kristal yapının örgü parametreleri
eV	: Elektron volt
E_c	: İletim bandı minimum enerji seviyesi
E_v	: Valans bandı minimum enerji seviyesi
E_F	: Fermi enerjisi
h	: Planck sabiti
$I_{(hkl)}$: (hkl) düzleminin ölçülen şiddeti
$I_{0(hkl)}$: (hkl) düzleminin standart şiddeti
I	: Akım
V	: Voltaj
I_0	: Doyma akımı
k	: Boltzman sabiti
K	: Kelvin
m^*	: Elektronun iletkenlik bandındaki etkin kütlesi
N	: Difraksiyon piki sayısı

n	: İdealite faktörü
q	: Elektron yükü
R_s	: Seri direnç
T	: Mutlak sıcaklık
TC	: Yapılanma katsayısı
V	: Uygulanan voltaj
λ	: Dalga boyu
β	: Yarı pik genişliği
θ	: Bragg kırılma açısı
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ϕ_b	: Bariyer yüksekliği
γ	: İdealiteden büyük ilk tamsayı
J	: Akım yoğunluğu
e	: Elektron yükü
$F(V)$: Norde fonksiyonu
$F(V_0)$: $F(V)$ değerinin minimum

1. GİRİŞ ve AMAÇ

1.1. Giriş

Bilim insanları, dünden bugüne bilim tarihine her gün yeni katkılarda bulunmuş ve bunları zaman içerisinde geliştirerek doğanın gerçeklerini araştırıp, aydınlatmada hayli yol katetmişlerdir. Yirminci yüzyılın ortalarından beri hızla gelişen elektronik endüstrisinin temeli yarıiletken devre elemanları ve dolayısıyla yarıiletken malzemelerin üretimi, insanlık tarihinin en önemli buluşlarından biri olmuştur. 1839 yılında Alexandre Edmond Becquerel aynı elektrolit içine batırılmış iki elektrottan biri üzerine ışık düşürmüş ve bunlar arasında bir potansiyel fark oluştuğunu gözlemlemiştir. Bu olay yarıiletkenlerin başlangıç tarihi olarak kabul edilebilir. Metal-yarıiletken kontaklar 1874'te Braun'un ilk çalışmalarından daha önce yapılmış olup, Braun, metal ve yarıiletken kontaklar arasındaki elektriksel iletkenliğin asimetrik doğasını keşfetmiştir [1]. Bu devre elemanları başlangıçta radyo detektörü, daha sonraları da radar detektörü ve mikrodalga diyotu olarak geliştirilerek kullanılan ilk pratik devre elemanlarından birisi, 1900'lü yılların başlarında, kullanılan metal-yarıiletken schottky kontaklardır [2].

Elektronik devre elemanlarında kullanılan metal yarıiletken yapıların metal oksit ve oksit yarıiletken ara yüzeylerindeki davranışlarının bilinmesi devre elemanlarının performansında oldukça etkilidir. Bu sebepten dolayı bu yapıların fiziksel özelliklerinin incelenmesi, yeni devre elemanlarının gelişmesinde etkilidir.

Metal-yarıiletken yapıların karakteristiğini ara yüzeyde oluşan potansiyel engelinin yapısı oluşturmaktadır. İlk olarak 1930'lu yıllarda ara yüzeyin oluşumunda yarıiletken malzemenin etkisi araştırılmış ve sonrasında yeni modellemeler ortaya atılmıştır. Schottky ve Mott tarafından ortaya konulan modele göre potansiyel engeli, metal ile yarıiletkeni n iş fonksiyonları arasındaki fark nedeniyle oluşmaktadır. Sonraki yıllarda Bardeen (1947) metal ve yarıiletkende yeteri kadar yüzey durumlarının var olması durumunda potansiyel engeli yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız olacağını ifade etmiştir [3].

Elektronik ve optoelektronik teknolojisinde kullanılan aygıtlar için II-V grubu bileşiklerinin ve bu grup içinde yer alan çinko oksit (ZnO) filmlerinin teknolojinin hızla gelişmesinde önemli rolü bulunmaktadır. ZnO oda sıcaklığında. 3,37 eV yasak enerji bant aralığına sahip önemli bir malzeme olmasından dolayı schottky diyotlar, hızlı

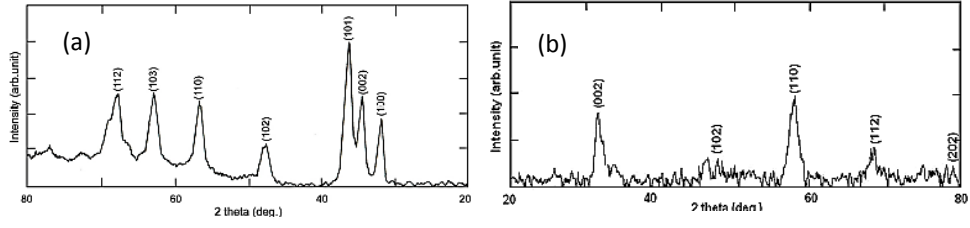
anahtar uygulamaları, ısı kontrol devreleri, motor kontrol devreleri, hareket ve ışık sensörleri, mikrodalga karıştırıcı dedektörler, metal oksit yarıiletken alan etkili transistörler (MOSFET), schottky engel tabakalı alan etkili transistör (MESFET) ve daha birçok elektronik devre elemanlarının elde edilmesinde kullanılmaktadır.

ZnO filmleri, kimyasal buhar biriktirme, atomik tabaka biriktirme, kimyasal banyo depolama, hidrotermal sentez, elektrokimyasal kaplama ve sol jel çeşitli yöntemlerle elde edilmektedir. Bu yöntemlerden sol jel, değişik alttaşların kaplanarak yüzey özelliklerini iyileştirmek, optik, elektronik, kimyasal ve mekanik gibi yeni özellikler kazandırmak amacıyla uygulanan bir film kaplama metodudur. Ayrıca sol jel yöntemi, kimyasal malzemelerinin zararlı olmaması, kullanılan ekipmanların ucuz olması, düşük sıcaklıkta film eldesi gibi avantajının bulunması açısından günümüzde yapılan çalışmalarda önem taşımaktadır.

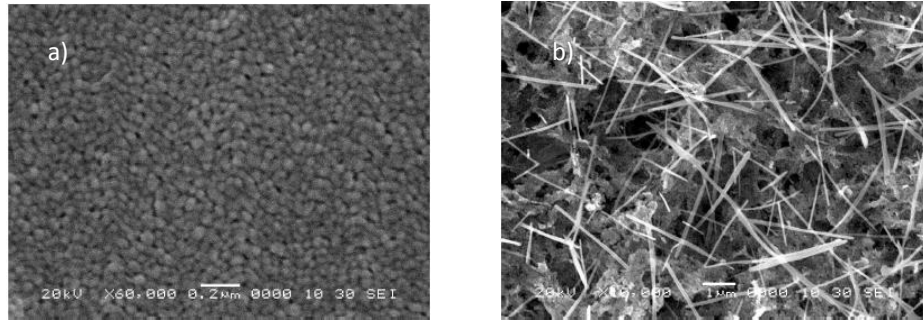
1.2. Literatür Özeti

Literatür incelendiğinde farklı kaplama yöntemleri kullanılarak elde edilmiş ZnO yarıiletken filmleri ile yapılan elektronik aygıt çalışmalarından bazıları aşağıda verilmiştir.

Bari ve arkadaşları [4], başlangıç tuzu olarak çinko asetat ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$), sabitleyici olarak etanol (CH_3CH_2OH), çözücü olarak ise amonyum hidroksit (NH_4OH) ve sodyum hidroksit ($NaOH$) kullanılarak iki farklı çözelti hazırlamışlar ve sol jel daldırmalı kaplama yöntemiyle nanoyapılı ZnO ince filmleri elde etmişlerdir. Elde ettikleri ZnO filmleriyle gaz sensörü fabrikasyonu yapmışlardır. Farklı sol parametreleri ve filmlerin kat sayısı gibi hazırlık parametrelerinin, elde ettikleri taneciklerin şekil ve morfolojik yapılarına etkisi üzerine çalışmışlardır. Elde edilen ZnO ince filmlerine ait XRD desenleri Şekil 1.1'de verilmiştir. Şekil 1.1 (a)'da verilen XRD desenlerinden ZnO'nun (112), (103), (110), (102), (101), (002), (100) yöneliminde olduğunu gözlemişler ve kristal boyutunu 27 nm olarak hesaplamışlardır. Şekil 1.1 (b)'de verilen XRD desenlerinden ZnO'nun ve (002), (102), (110), (112), (202) yöneliminde pikler olduğunu ve kristal boyutunun 39 nm olduğunu rapor etmişlerdir. Elde edilen ZnO ince filmlerine ait FESEM görüntüleri Şekil 1.2'de verilmiştir. Çözücülerin amonyum hidroksitten, sodyum hidroksite değiştirilmesiyle elde edilen ZnO filmlerine ait taneciklerin şeklinin küresel yapıdan, nanotel yapısına dönüştüğünü gözlemlemişlerdir.



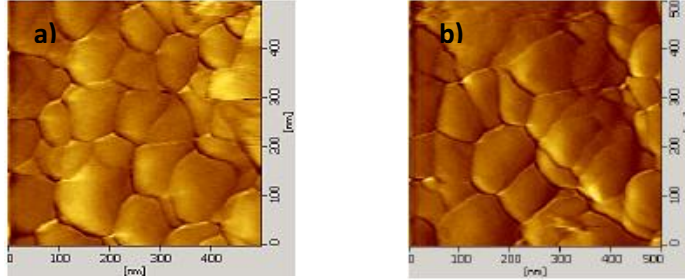
Şekil 1.1. Çözücü olarak (a) NH_4OH , (b) $NaOH$ kullanılarak elde ettikleri ZnO filmlerine ait XRD desenleri. (Bari ve ark., 2008)



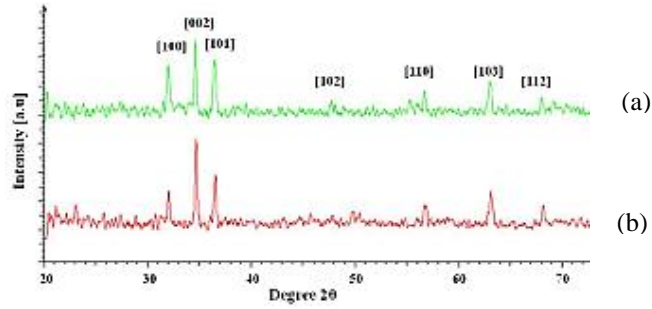
Şekil 1.2. Çözücü Çözücü olarak (a) NH_4OH , (b) $NaOH$ kullanılarak elde ettikleri ZnO filmlerine ait FESEM görüntüleri (Bari ve ark., 2008)

Foo ve arkadaşları [5], ZnO ince filmlerini, metanol (CH_3OH) ve etanol gibi farklı çözücüler kullanarak sol jel yöntemi ile elde etmişlerdir. Elde edilen filmlerin AFM görüntüleri Şekil 1.3'te verilmiştir. Şekil 1.3 (a)'da çözücü olarak etanol kullanılarak hazırlanan filme ait AFM görüntüsünde tanecik boyutunu 8,76 nm olarak hesaplamışlardır. Şekil 1.3 (b)'de çözücü olarak metanol kullanılarak hazırlanan çözeltiye ait AFM görüntüsünde ise ortalama tanecik boyutunu 8,93 nm olarak hesaplamışlardır. Yüzey pürüzlülüğü çözücü olarak etanol kullanılarak elde edilen filmde 6,75 nm, metanol kullanılarak elde edilen filmde ise 6.34 nm olarak bulmuşlardır. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinden yola çıkarak etanol çözeltisi ile hazırlanan filmin yüzeyinin, metanol çözeltisi ile hazırlanan filmin yüzeyine göre daha pürüzlü olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 1.4'te verilen XRD desenlerinde ZnO filmine ait pikin (002) yöneliminde olduğunu belirtmişlerdir. XRD desenlerinden filmlerin hekzagonal wurtzite yapıda olduğunu ve etanol çözeltisi ile hazırlanan filme ait piklerin daha şiddetli olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 1.5'te verilen grafikler incelendiğinde, aynı voltaj altında etanol çözeltisi ile hazırlanan filmin, metanol çözeltisi ile hazırlanan filme göre daha yüksek akım değerine sahip olduğunu

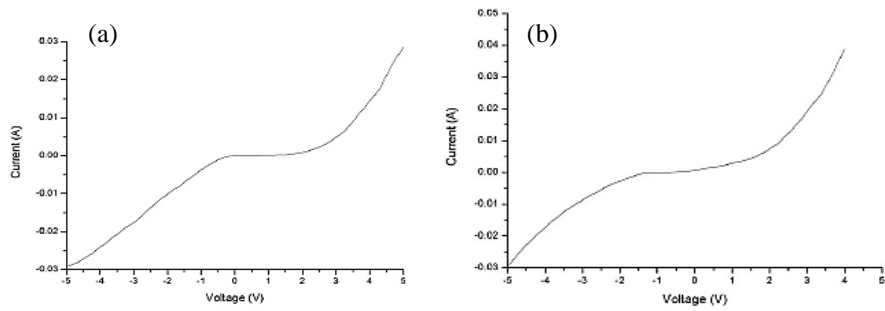
gözlemişlerdir. Bu sebeple, etanol ile hazırlanan filmin, metanol ile hazırlanan filme göre daha iyi iletkenlik özelliği gösterdiğini rapor etmişlerdir.



Şekil 1.3. (a) Metanol ile hazırlanan, (b) Etanol ile hazırlanan çözeltilerden elde edilen ZnO filmlerine ait AFM görüntüleri (Foo ve ark., 2012)

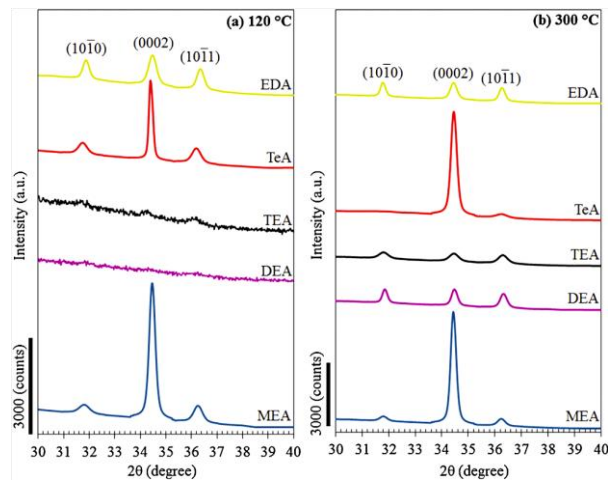


Şekil 1.4. (a) Metanol ile hazırlanan, (b) Etanol ile hazırlanan çözeltilerden elde edilen ZnO filmlerine ait XRD desenleri (Foo ve ark., 2012)

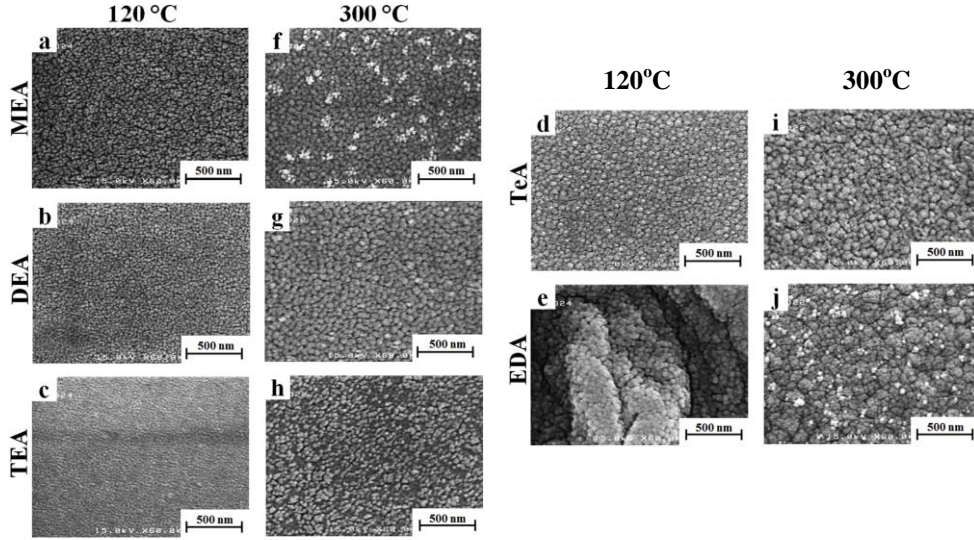


Şekil 1.5. (a) Metanol ile hazırlanan, (b) Etanol ile hazırlanan çözeltilerden elde edilen ZnO filmlerine ait I-V grafikleri (Foo ve ark., 2012)

Vajargah ve arkadaşları [6], çinko asetat ve monoetanolamin ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$), dietanolamin ($\text{HN}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_2$), trietanolamin ($(\text{HOCH}_2\text{CH}_2)_3\text{N}$), trietilamin ($(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{N}$), etilendiamin ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$) gibi farklı katkıları içeren alkolik çözeltiler ile sol jel daldırma yöntemi kullanarak ZnO ince filmlerini elde etmişlerdir. Elde ettikleri filmlere yapılan monoetanolamin, dietanolamin, trietanolamin, trietilamin ve etilendiamin katkılarına göre sırasıyla (MEA), (DEA), (TeA), (TEA) ve (EDA) kodlarını vermişlerdir. ZnO ince filmlerini iki farklı kurutma sıcaklığında ($120\text{-}300^\circ\text{C}$) 10 dakika beklettikten sonra 500°C 'de 1 saat tavlayarak elde etmişlerdir. Katkıların ve kurutma sıcaklığının elde edilen filmlerin kristal yapısına, optoelektronik ve morfolojik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Şekil 1.6'da verilen XRD desenlerinden, karakteristik ZnO piklerinin kurutma sıcaklığının artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. En iyi kristallenmenin MEA ile hazırlanan çözeltiyle elde edilen filme ait olmasının yanı sıra TeA ve EDA filmlerinde de kristallenme olduğunu gözlemişlerdir. TEA ve DEA filmlerinde, kurutma sıcaklığının artmasıyla kristallenme oluştuğunu gözlemişlerdir. Elde edilen filmlerin FESEM görüntüleri Şekil 1.7'de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde tanecik boyutunun kurutma sıcaklığının artmasıyla arttığını belirtmişlerdir. 120°C kurutma sıcaklığında MEA, TeA ve EDA filmlerinin tanecik boyutları 50-55 nm civarında bulunurken, TEA ve DEA filmlerinde yaklaşık 30 nm bulmuşlardır. Kurutma sıcaklığı 300°C arttırıldığında tanecik boyutları MEA, DEA, TEA, TeA, ve EDA filmleri için sırasıyla 55, 60, 50, 70, 100 nm olarak değiştiğini rapor etmişlerdir.

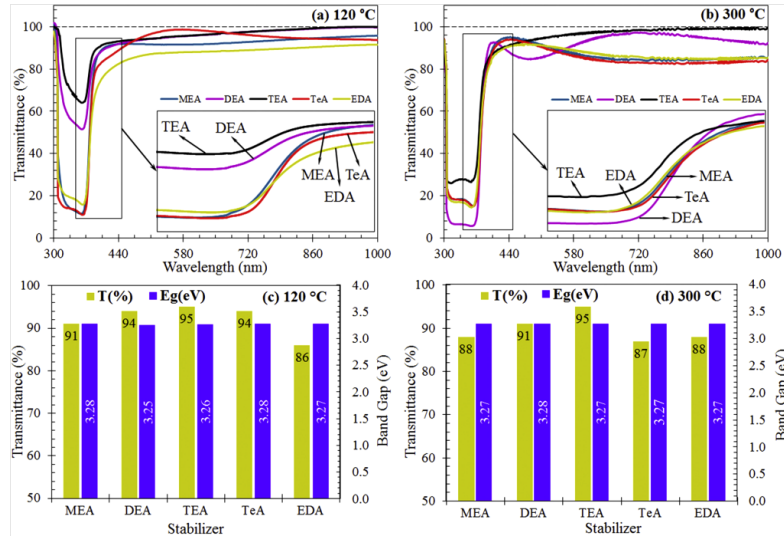


Şekil 1.6. Farklı kurutma sıcaklıklarında (a) 120°C , (b) 300°C elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri (Vajargah ve ark., 2013)



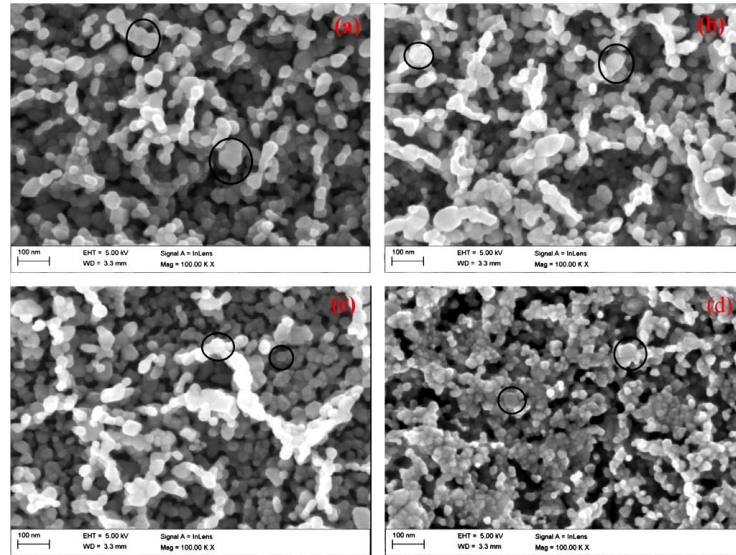
Şekil 1.7. 120°C ve 300°C kurutma sıcaklıklarında ve farklı sabitleyiciler kullanılarak (a,f) MEA, (b,g) DEA, (c,h) TEA, (d,i) TeA ve (e,j) EDA elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri (Vajargah ve ark., 2013)

Şekil 1.8’de filmlere ait geçirgenlik grafikleri yer almaktadır. Filmlerin görünür bölgede geçirgenliğinin, kurutma sıcaklıklarıyla ciddi ölçüde değişmediğini gözlemişlerdir. Tüm filmlerin %85 oranında geçirgen olduğunu belirtmişlerdir.



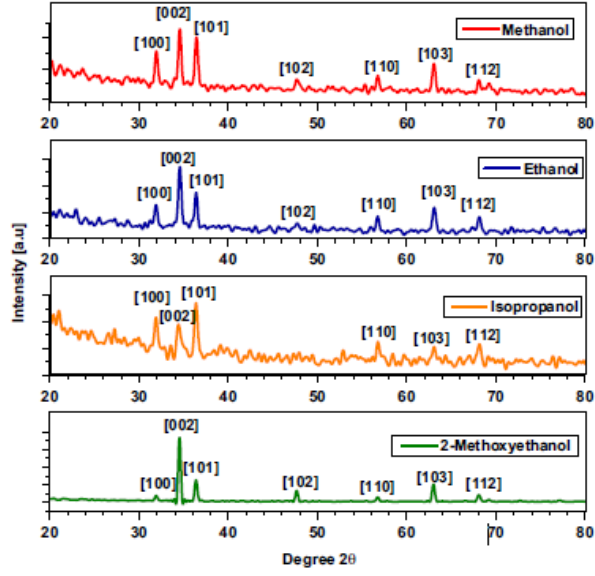
Şekil 1.8. 120°C ve 300°C kurutma sıcaklıklarında ve farklı sabitleyiciler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin geçirgenlik spektrumları ve optik bant aralığı değerleri (Vajargah ve ark., 2013)

Foo ve arkadaşları [7], başlangıç tuzu olarak çinko asetat, çözücü olarak ise metanol, etanol, izopropilalkol ((CH₃)₂CHOH) ve 2-metoksietanol (CH₃OCH₂CH₂OH) kullanarak dört farklı çözelti ile ZnO filmlerini elde etmişlerdir. ZnO filmlerine, metanol, etanol, izopropilalkol ve 2-metoksietanol gibi kullandıkları çözücülere göre sırasıyla MeOH, EtOH, IPA ve 2-ME kodlarını vermişlerdir. Elde ettikleri filmlerin yapısal, morfolojik ve optiksel özelliklerini incelemişlerdir. Şekil 1.9’da verilen FESEM görüntülerinden inceledikleri filmlerin, 50 nm’den küçük hekzagonal yapıda nano parçacıklar olduğunu gözlemlemişlerdir. 2-ME çözeltisiyle elde edilen filmin, diğer filmlere göre yüzey pürüzlülüğünün daha az olduğu, tanecik boyutunun daha küçük yapıda olduğu ve kristallenmenin daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.



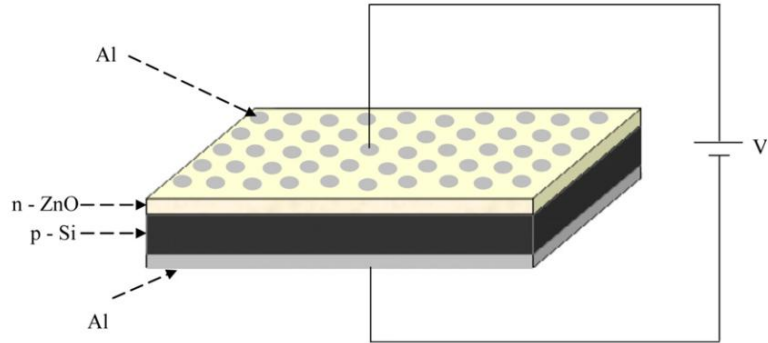
Şekil 1.9. Farklı çözücüler kullanılarak (a) MeOH, (b) EtOH, (c) IPA, (d) 2-ME elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri (Foo ve ark., 2013)

Elde edilen filmlere ait XRD desenleri Şekil 1.10’da verilmiştir. MeOH, EtOH ve 2-ME ile elde edilen filmlerin (002) tercihli yönelimde şiddetli pike sahip olduğu, IPA ile elde edilen filmin ise (101) tercihli yönelimdeki pikin en şiddetli olduğunu gözlemişlerdir. En büyük kristal boyutunun EtOH (22,84 nm) ile elde edilen filme ait olduğunu, en küçük değer ise 2-ME (19,12 nm) ile elde edilen filme ait olduğunu rapor etmişlerdir.



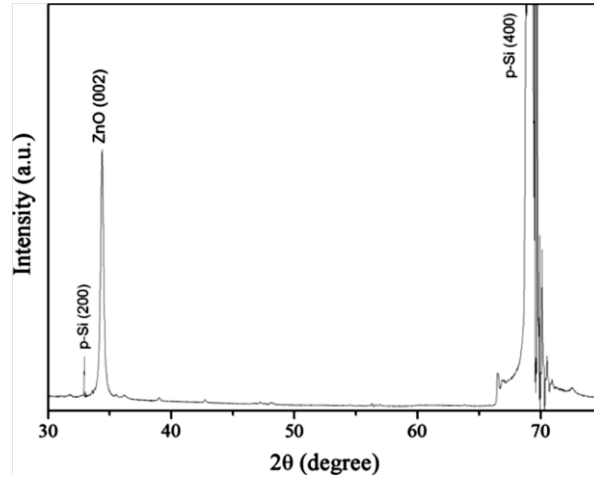
Şekil 1.10. MeOH, EtOH, IPA, 2-ME gibi farklı çözücüler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri (Foo ve ark., 2013)

Aksoy ve Çağlar [8], başlangıç tuzu olarak çinko asetat dihidrat, çözücü olarak 2-metoksietanol ve monoetanolamin kullanarak sol jel yöntemiyle elde ettikleri ZnO filmleri ile Şekil 1.11’de gösterilen heteroeklem n-ZnO/p-Si diyot fabrikasyonu yapmışlardır.



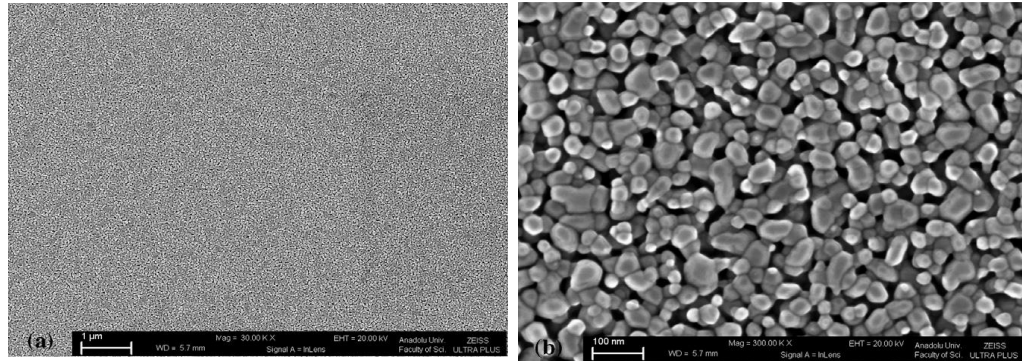
Şekil 1.11. Nanoyapılı n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotun şematik gösterimi (Aksoy ve Çağlar, 2012)

Şekil 1.12’de silisyum (Si) alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri verilmiştir. Bu desenlerden elde edilen ZnO filmlerinin hegzagonal wurtzite yapıda olduğunu ve ZnO’nun (002) yöneliminde pike sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Kristal boyutunu 30 nm olarak hesaplamışlardır.

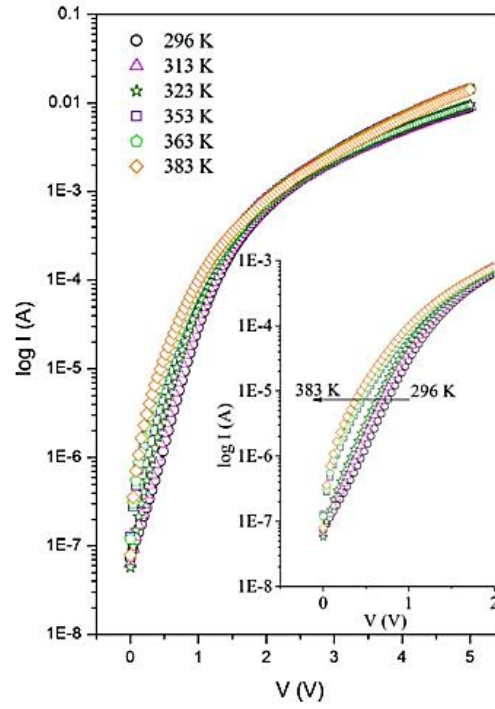


Şekil 1.12. Nanoyapılı ZnO filmlerine ait XRD desenleri (Aksoy ve Çağlar, 2012)

ZnO filmlerine ait FESEM görüntüleri Şekil 1.13'te verilmiştir. Yüzey morfolojisi incelendiğinde, tanecik boyutunun 30 ve 50 nm arasında olduğunu gözlemlemiştirler. Bu sonuçların XRD desenlerinden elde edilen sonuçla uyumlu olduğunu rapor etmişlerdir. Heteroeklem n-ZnO/p-Si diyotların *I-V* karakteristikleri Şekil 1.14'te verilmiştir. *I-V* karakterizasyonunun ileri beslemde eksponansiyel davranış gösterdiğini gözlemlemiştirler ve bariyer yüksekliğini (ϕ_b) ve idealite faktörünü (n) sırasıyla, 0,50 eV ve 6,40 olarak bulmuşlardır.

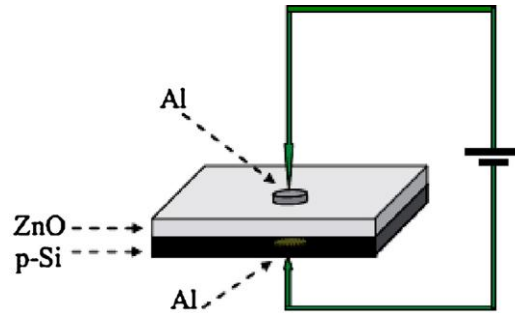


Şekil 1.13. Nanoyapılı ZnO filmlerine ait (a) 30000, (b) 300000 büyütmedeki FESEM görüntüleri (Aksoy ve Çağlar, 2012)



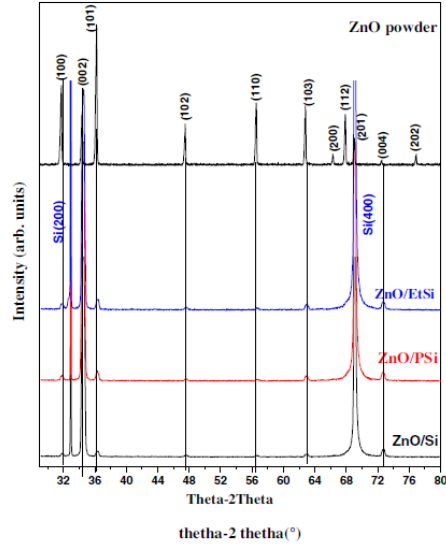
Şekil 1.14. Heteroeklem n-ZnO/p-Si diyotların I-V karakterizasyonu (Aksoy ve Çağlar, 2012)

Chebil ve arkadaşları [9], başlangıç tuzu olarak çinko asetat, çözücü olarak izopropanol ve sabitleyici olarak monoetanolamin kullanarak p-Si (ZnO/Si), yüzeyi gözenekli (ZnO/PSi) ve yüzeyi pürüzlü (ZnO/EtSi) Si alttaşlar üzerine sol jel yöntemiyle ZnO filmlerini elde etmişlerdir. Elde edilen ZnO filmlerinin üst ve alt yüzeylerine alüminyum (Al) kontaklar atılarak Şekil 1.15'te şematik olarak gösterilen n-ZnO/p-Si heteroeklem diyot fabrikasyonu yapmışlardır. ZnO-Ps diyotunun fotovoltajik değerinin diğer diyotlara göre daha iyi olduğunu rapor etmişlerdir.

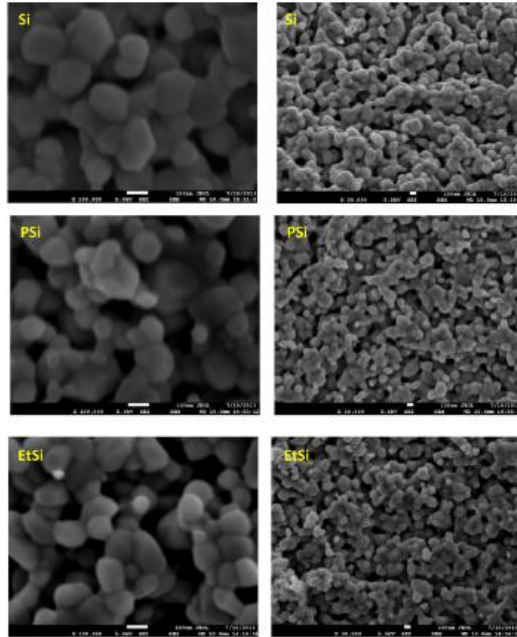


Şekil 1.15. Nanoyapılı n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotunun şematik gösterimi (Chebil ve ark., 2015)

Şekil 1.16’da ZnO filmlerine ait XRD desenleri verilmiştir. XRD desenleri incelendiğinde toz ZnO’ya ait yönelimlerin olduğunu gözlemişlerdir. Şekil 1.17’de ZnO filmlerine ait 30000 ve 100000 büyütmeledeki FESEM görüntüleri verilmiştir. Burada taneciklerin nanoyapılı düzensiz bir şekilde yüzeye yayıldığını rapor etmişlerdir.

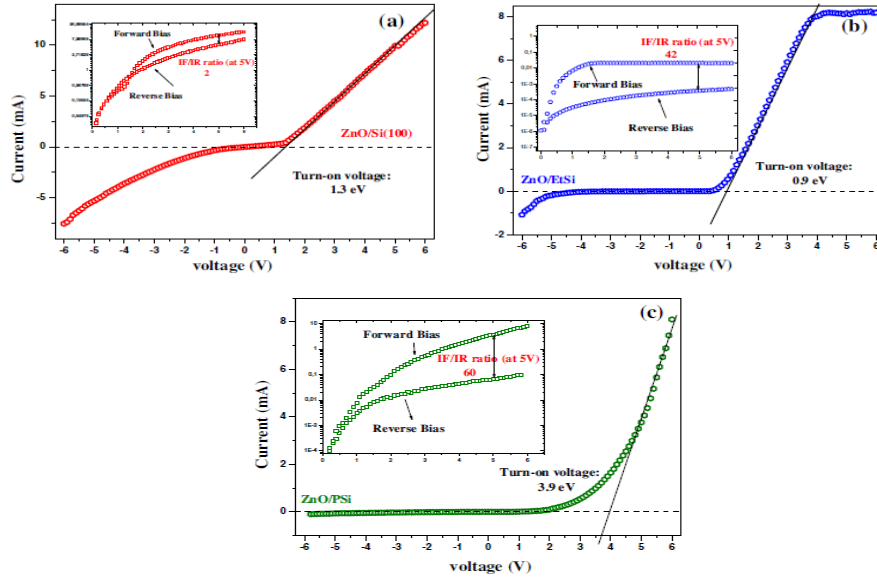


Şekil 1.16. Farklı p-Si alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerine ait XRD desenleri (Chebil ve ark., 2015)

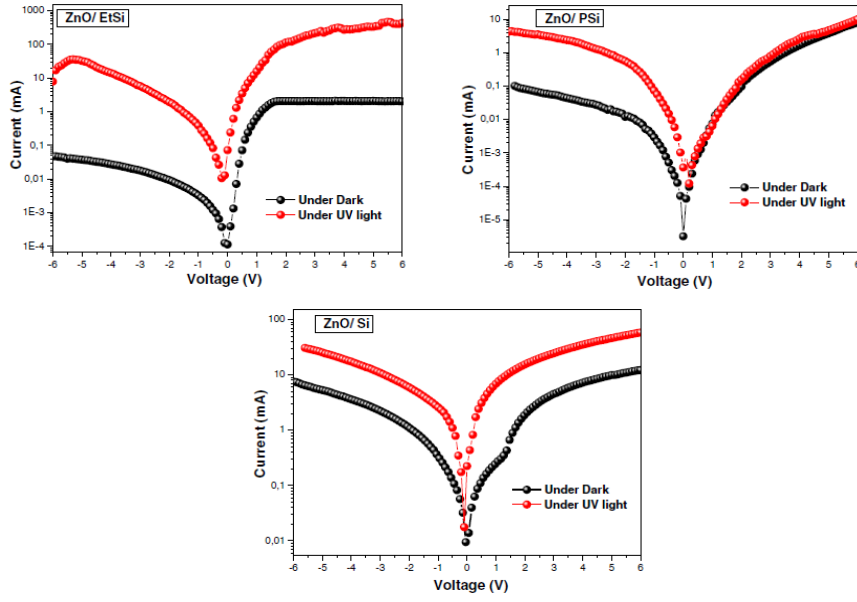


Şekil 1.17. Farklı p-Si alttaşlar üzerine elde edilen ZnO filmlerine ait FESEM görüntüleri (Chebil ve ark., 2015)

Şekil 1.18’de verilen heteroeklem ZnO/Si, ZnO/PSi, ZnO/EtSi diyotlarına ait I - V karakterizasyonları verilmiştir. Diyotların ϕ_b değerlerini; ZnO/Si diyotunun 0,54 eV, ZnO/PSi diyotunun 0,71 eV, ZnO/EtSi diyotunun 0,73 eV olarak hesaplamışlardır. Şekil 1.19’da karanlık ve UV aydınlanmanın olduğu ortamlarda heteroeklem ZnO/Si, ZnO/PSi, ZnO/EtSi diyotlarının I - V karakterizasyonu verilmiştir. Tüm diyotlarda UV ışık şiddeti arttıkça, fotoakım değerinin arttığını rapor etmişlerdir.

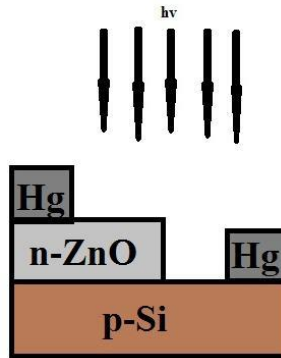


Şekil 1.18. (a) ZnO/Si, (b) ZnO/EtSi, (c) ZnO/PSi diyotlarına ait karanlık ve oda koşullarındaki I - V karakterizasyonları (Chebil ve ark., 2015)



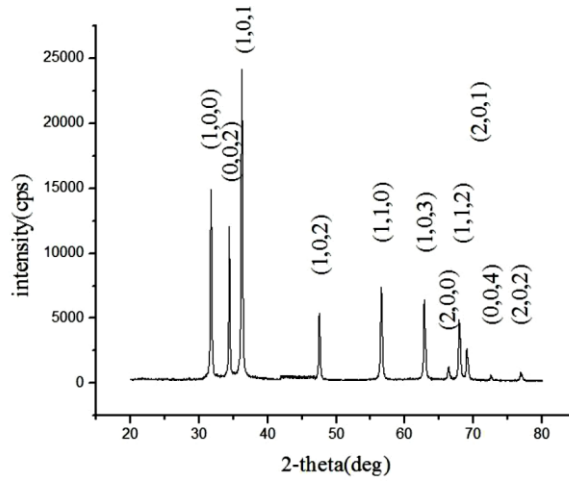
Şekil 1.19. (a) ZnO/Si, (b) ZnO/EtSi, (c) ZnO/PSi diyotlarına ait karanlık ve UV aydınlatma koşullarındaki I-V karakterizasyonları (Chebil ve ark., 2015)

Kabra ve arkadaşları [10], sol jel daldırmalı kaplama yöntemini kullanarak heteroeklem ZnO/p-Si diyot fabrikasyonu yapmışlardır. Şekil 1.20’de gösterildiği gibi civa (Hg) kontaklardan biri p-Si alttaş üzerine, diğeri ise n-ZnO filminin üzerine omik kontaklar atılmışlardır. Kontaklar arasında doğrultma olasılığını engellemek için iş fonksiyonu ZnO’nun (<4 eV) iş fonksiyonundan büyük olan Hg (4.5 eV) kontaklar kullanılmışlardır.

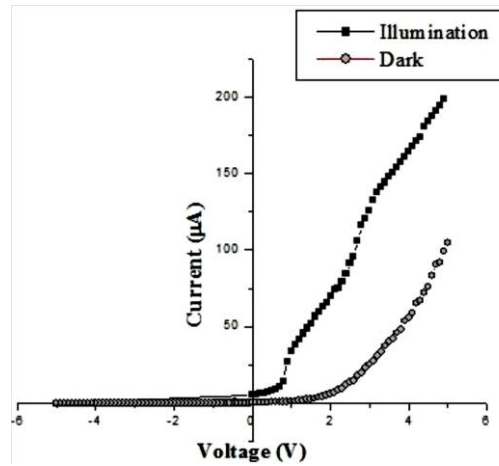


Şekil 1.20. Heteroeklem ZnO/p-Si diyotunun şematik gösterimi (Kabra ve ark., 2015)

Polikristal yapıda olduğu gözlemlenen ZnO filmlerine ait XRD desenleri Şekil 1.21’de verilmiştir. ZnO filmlerine ait difraksiyon piklerinin (100), (002), (101), (110), (103), (112) yöneliminde olduğunu ve kristal boyutunun 26,07 nm olduğunu belirtmişlerdir. Fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların karanlık ve UV aydınlatma altında elde edilen *I-V* karakterizasyonları Şekil 1.22’de verilmiştir. Diyotların doğrultma oranlarını 4V gerilimde, karanlık ortam koşullarında 191, UV aydınlatma koşullarında ise 478 olarak bulmuşlardır.



Şekil 1.21. Nanoyapılı ZnO filmlerinin XRD desenleri (Kabra ve ark., 2015)



Şekil 1.22. Heteroeklem diyotunun *I-V* karakterizasyonu (Kabra ve ark., 2015)

1.3. Amaç

Bu çalışmanın amacı; farklı başlangıç tuzları ve çözücüler ile hazırlanan sollar kullanılarak ekonomik ve pratik bir yöntem olan sol jel spin kaplama yöntemiyle ZnO filmlerini elde etmek ve en iyi kristallenen filmler kullanılarak heteroeklem diyotlarının fabrikasyonunu yaparak ve elektriksel karakterizasyonunu incelemektir.

Çalışmamızın amacı doğrultusunda, ilk olarak sol jel spin kaplama yöntemi kullanılarak, p-Si alttaşlar üzerine farklı başlangıç tuzları ve çözücüler ile hazırlanan sollar kullanılarak ZnO filmleri elde edilmiştir. Elde edilen filmlerin hangi yapıda kristallendiği, örgü parametresi, tercihli yönelimi, kristal boyutu, örgü sabiti gibi yapısal parametreleri XRD desenlerinden; mikroyapısı, yüzeyin homojen olup olmadığı, tanecik boyutu, yüzeyin pürüzlü olup olmadığı gibi morfolojik özellikleri ise FESEM görüntülerinden incelenmiştir. Daha sonra elde edilen filmlerden uygun olan ZnO filmleri seçilerek uygun kontaklar yapılarak ve heteroeklem diyot fabrikasyonu yapılmıştır. Fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların elektriksel karakterizasyonu oda sıcaklığındaki akım-voltaj ölçümlerinden yararlanılarak yapılmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Giriş

Elektronun temelini oluşturan yarıiletkenleri açıklamadan önce madde ile ilgili temel bilgileri öğrenmek gerekir. Yeryüzünde bulunan 105 çeşit maddenin (element) tümü atomların birleşiminden oluşmuştur. Atomlar ise ortada bir çekirdek ve bunun etrafındaki değişik yörüngelerde hareket eden elektronlardan oluşmaktadır. Elektronlar, negatif elektrik yüküne sahiptir. Bir etkiye yolu ile atomdan ayrılan elektronların bir devre içerisindeki hareketi, elektriksel iletkenliği sağlamaktadır. Katıların elektriksel iletkenliğinde en önemli konulardan biri iletkenlik aralığının genişliğidir. Bakır ve gümüş gibi en iyi iletkenle, kükürt gibi en yalıtkan arasındaki iletkenlik oranı 10^{24} değerinden daha büyüktür. Elektriksel iletkenliğin bu çok büyük oranını, malzemelerde bulunan bağları göz önüne alarak açıklayabiliriz. Metalik bağlar serbest elektronlar üretirler ve bu elektronlar bir elektrik alanın etkisiyle kolayca hareket ederler. Dolayısıyla bu malzemeler elektriksel iletkenlerdir. Diğer bir bağ tipinde ise valans elektronları belli atomlara, iyonlara veya kovalent bağda olduğu gibi atom çiftlerine sıkıca bağlı bulunmaktadır. Bu malzemeler de dolayısıyla yalıtkanlardır [11]. Elektriksel iletkenliği metaller ve yalıtkanlar arasında olan malzemeler ise yarıiletkenler olarak adlandırılır.

2.2. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, iletkenlik bakımından iletkenlerle yalıtkanlar arasında yer alan maddelerdir. Yarıiletkenlerin sahip oldukları ilgi çekici özellikler, dar, yasaklanmış bantlar boyunca elektronların ısısal uyarılmaları ile ortaya çıkar. Yarıiletkenler mutlak sıfırda ($T= 0$ K) yalıtkanlardır. Yasak enerji aralıkları öyle bir değere sahiptir ki, ısı uyarılmayla erime noktalarının altındaki sıcaklıklarda elektriksel iletkenlik gösterirler. Oda sıcaklığında yarıiletkenlerin öz dirençleri 10^{-3} - 10^9 Ωcm , yalıtkanların 10^{14} - 10^{22} Ωcm , metallerin ise 10^{-6} Ωcm mertebesindedir.

Yarıiletkenler genel olarak üç grupta sıralandırılabilir; bunlardan ilki periyodik tablonun IV. grubunda bulunan elementel yarıiletkenlerdir. Tek cins atomların birleşmesiyle oluşan element malzemelere örnek, Si ve germanyum (Ge)'dur. Si entegre devrelerde en çok kullanılan yarıiletken malzemelerden biri olup, gün geçtikçe Si ile ilgili çalışmalar artmaktadır. İkincisi III. ve V. Grup elementlerinin birleşimiyle oluşan

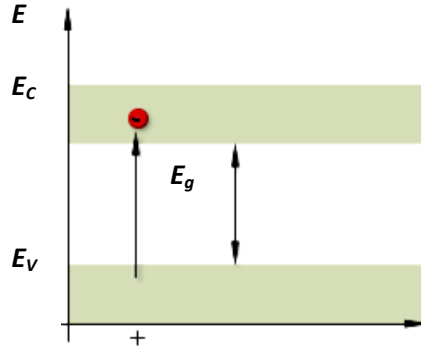
bileşik yarıiletken malzemelerdir. GaAs ve GaP gibi iki element veya ikili bileşikler, III. ve V. grup elementlerinin birleşmesiyle meydana gelir [1]. Üçüncü grup yarıiletkenleri ise II-VI bileşikleri oluştururlar. II-VI bileşiklerinde bağlanma iyonik ve kovalenttir. Bu bileşikler hem kübik hem de hekzagonal yapıda kristallenirler. Bu grubun bileşiklerine CdO, ZnO, CdS, ZnS, CdZnS ve CdSSe örnek verilebilir.

Yarıiletkenlerin bant yapısını anlayabilmek için bir atomdaki enerji seviyelerini incelemek gerekmektedir. Atomlar, enerji bantları şeklinde gruplaşmış yörüngelere sahiptir. Çekirdek etrafında k, l, m, n harfleri ile temsil edilen, belirli bir yörüngeyi oluşturan kabuklar bulunur ve her atom, sabit bir kabuk sayısına sahiptir. Elektronlar her kabuğa Pauli dışarlama ilkesi gereğince yerleşebilirler. Birinci kabuğa yerleşebilecek elektron sayısı en fazla 2, ikinci kabuğa yerleşebilecek elektron sayısı en fazla 8, üçüncü kabuğa yerleşebilecek elektron sayısı ise en fazla 18'dir. Kabuklarda belirli bir düzende yerleşen bu atomların enerji seviyeleri çok küçük değişim içermesine karşın, kabuklar arasındaki enerji farkı çok büyüktür.

Birbirleriyle etkileşecek şekilde, N tane atom birbirlerine yaklaştırılırsa, atomik enerji seviyelerinin her biri, birbirine yakın N tane alt seviyeye ayrılır. N yaklaşık 10^{23} gibi çok büyük bir sayı olduğundan, alt seviyeler birbirine o kadar yakındırlar ki artık kesikli enerji seviyeleri yerine sürekli bir enerji bandından söz etmek daha yerinde olur. Böylece atomdaki kesikli 1s, 2s, 2p,... enerji seviyeleri yerine katıda; 1s, 2s, 2p,... sürekli enerji bantları geçer. Bu bantlar da birbirinden ayrık durumdadırlar [12].

Bir karbon atomunu ele alırsak elektron konfigürasyonu $1s^2 2s^2 2p^2$ şeklinde olacaktır. En dış yörüngede 2 tanesi s seviyesinde, 2 tanesi de p seviyesinde 4 elektronu bulunmaktadır. Eğer iki karbon atomu birbirlerine yaklaştırılırsa atomik enerji seviyesi ikiye yarılacaktır. Her bir karbon atomunun 4 elektronu bulunduğuna göre, bu yalnızca valans bandındaki holleri doldurmaya kâfidir ve iletkenlik bandı boş kalır.

Valans bandı (E_V) ve iletkenlik bandı (E_C) birbirinden, içerisinde elektronlar için hiçbir enerji seviyesi bulunmayan bir enerji aralığı ile ayrılırlar. Şekil 2.1'de gösterilen bu enerji aralığına yasak enerji aralığı (E_g) denir.

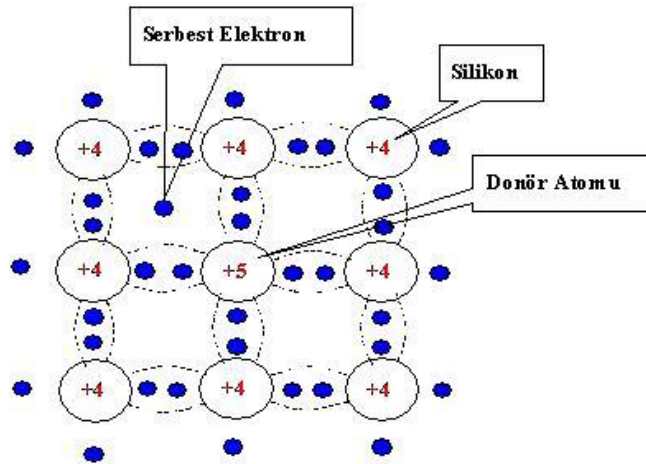


Şekil 2.1. Yasak enerji aralığının temsili diyagramı

2.2.1. n-tipi yarıiletkenler

Si ve Ge saf yarıiletkenlerine katılan safsızlık atomları Şekil 2.2’de verilmiştir. Şekli inceleyecek olursak, Si dört, fosfor (P) beş elektrona sahip olduğundan Si içinde P böyle bir özellik gösterir. Her bir Si atomu dört elektronunu kullanarak komşusu olan dört Si atomuyla kovalent bağ kurar. Eğer bir Si atomu P ile yer değiştirilirse, P atomlarının komşu olduğu dört silisyum atomuyla kovalent bağ yapması beklenir fakat bir elektron fazla kalır. Bu elektron herhangi bir bağa katkıda bulunmadığı gibi en ufak bir enerjiyle iyonlaşabilmektedir, dolayısıyla bu elektron kristal içinde P atomundan bağımsız halde hareket edebilmektedir.

Bu durumda P atomu, Si kristaline bir elektron verdiği için verici (donör) atomu olarak adlandırılır. Si kristalinde ise elektron yoğunluğu, hol yoğunluğundan fazla olduğu için bu tür yarıiletkenlere n-tipi yarıiletkenler denir.

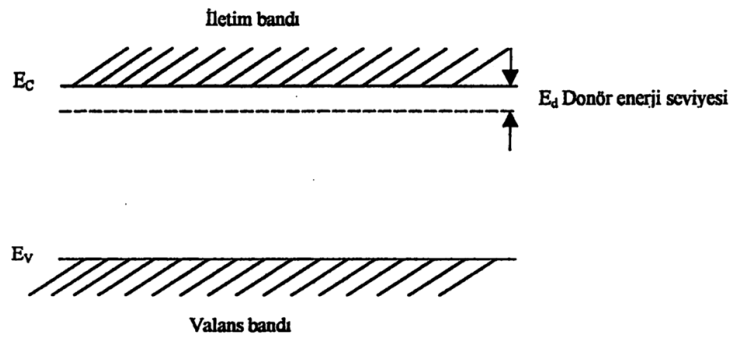


Şekil 2.2. n-tipi yarıiletkenin şematik gösterimi

Donör enerji seviyesi (E_d) Şekil 2.3'te gösterildiği gibi yasak enerji aralığı bölgesinde, iletim bandının hemen altında bulunur. Bu seviye, iletim bandına oldukça yakın bir konumda bulunduğu için, bütün donörler oda sıcaklığında iyonlaşırlar, yani, onların beşinci elektronu haline geçecek şekilde uyarılır [12]. Donör enerji seviyesi,

$$E_d = \left[\frac{1}{\epsilon_r} \right]^2 \left[\frac{m_e^*}{m_e} \right] E_H \quad (2.1.)$$

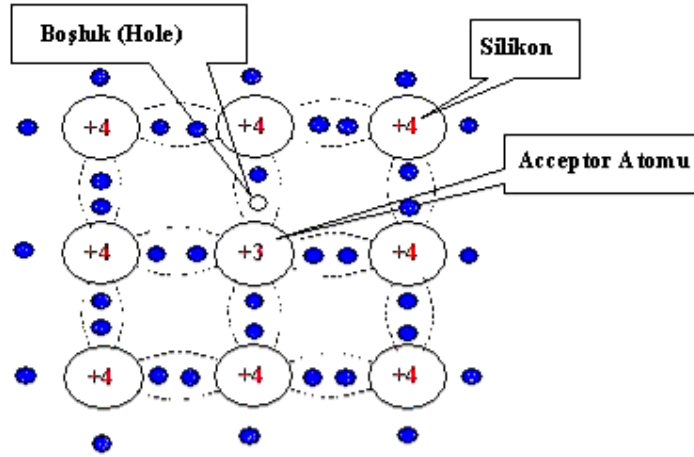
bağıntısı ile verilir. Burada; ϵ_r yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti, $E_H = 13$ eV olan hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisidir.



Şekil 2.3. Bir yarıiletkende donör enerji seviyesi

2.2.2. p-tipi yarıiletkenler

Ge veya Si saf yarıiletkenine, bor (B), indiyum (In), galyum (Ga) veya Al gibi üç değerlikli elementler katkılanırsa, bu elementler kristaldeki atomların örgü noktalarına yerleşirler. Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, Si kristaline B safsızlık atomu katkılanırsa, Si dört, B üç elektrona sahip olduğundan, B atomu Si atomları ile kovalent bağ yapmak için kristalden 1 elektron alır. Bu durumda kristalden elektron aldığı için bu türden atomlara alıcı (akseptör) atomları denir. Bu tür yarıiletkenlerde hol yoğunluğu, elektron yoğunluğundan fazla olduğu için p-tipi yarıiletkenler denir.

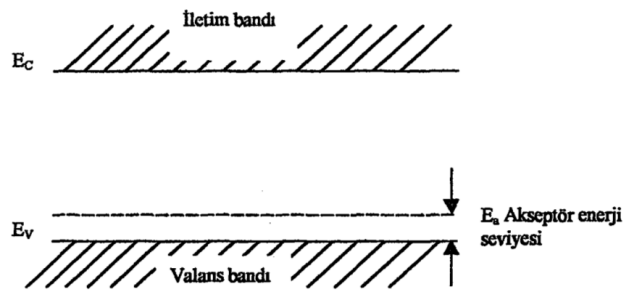


Şekil 2.4. *p*-tipi yarıiletkenin şematik gösterimi

Akseptör enerji seviyesi (E_a) Şekil 2.5'te gösterildiği gibi valans bandından biraz yukarıdadır. Akseptör seviyesi, akseptör tarafından bir hol yakalanabilmesi için gerekli enerjiye eşittir. Akseptör iyonlaştığında, yani bir elektron değerlik bandından holün bulunduğu yeri dolduracak şekilde uyarıldığında, hol değerlik bandının tepesine düşer ve serbest bir taşıyıcı haline gelir [12]. Akseptör enerji seviyesi;

$$E_a = \left[\frac{1}{\epsilon r} \right]^2 \left[\frac{m_h^*}{m_h} \right] E_H \quad (2.2.)$$

bağıntısı ile verilir.



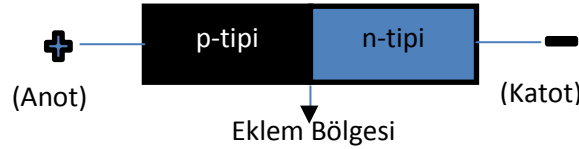
Şekil 2.5. Bir yarıiletkende akseptör enerji seviyesi

2.3. Yarıiletken Aygıtlar

Yarıiletkenlerin elektronik ve optoelektronik devrelerde kullanımı, katıhal fiziğinin en önemli ticari uygulamasıdır. Özellikle entegre devrelerinin ticaretinin maliyeti çok yüksektir. Optik yarıiletken devreler, mesela LED ve yarıiletken lazerler, fiber optik haberleşmenin kullanılmasıyla teknolojiye gittikçe çok önemli bir yer tutmaya başlamıştır [11]. Pratikte gerçekleştirilen ilk yarıiletken devre elemanı, metal-yarıiletken diyotudur. Özellikleri birbirlerinin aynı olan nokta temaslı diyotların gerçekleştirilmeleri çoğu kez zor olduğundan, 1950'lerde bunların yerine, çoğu yerde p-n heteroeklemlili diyotlar kullanılmaya başlanmıştır [13].

2.3.1. p-n heteroeklem diyotlar

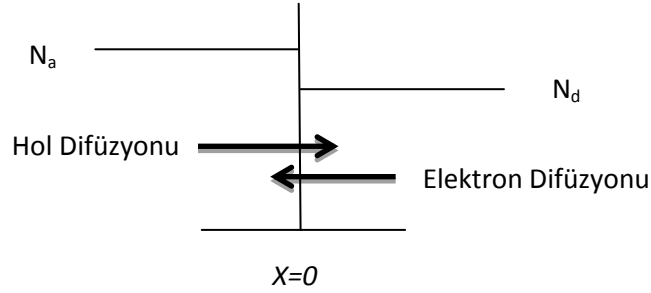
Yarıiletken materyalinin bütün yapı boyunca homojen olduğu eklemler homoeklem olarak adlandırılır. İki farklı yarıiletken bir eklemi oluşturmada kullanıldığında ise yarıiletken heteroeklem olarak adlandırılır. Kristal yapıyı bozmaksızın çeşitli yöntemlerle, p-tipi bir yarıiletken ile n-tipi bir yarıiletkeni bir araya getirilmesiyle elde edilen yapıya p-n heteroeklemi yani diyot denir ve Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. p-n heteroekleminin şematik gösterimi

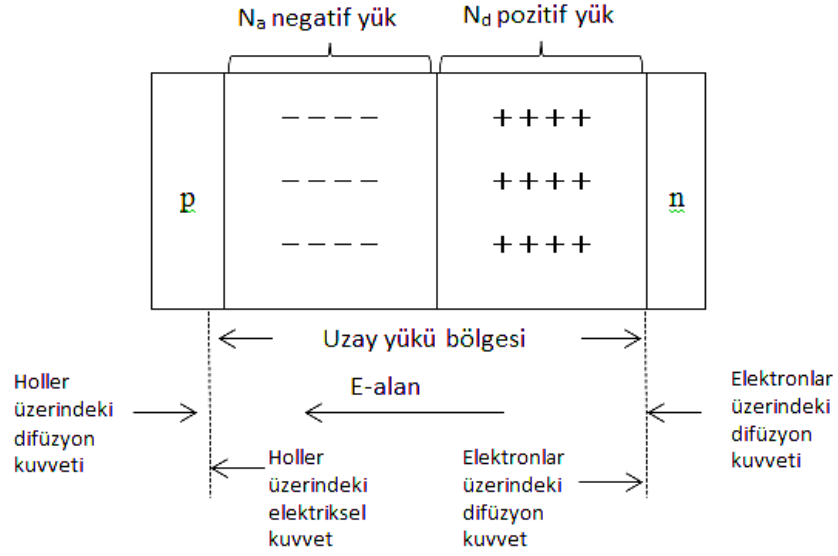
p-n eklemının oluşması sırasında, n tipinde elektronların, p tipinde de hollerin çok fazla olması nedeniyle, n bölgesinden p bölgesine elektron, p bölgesinden n bölgesine ise hol difüzyonu olur. Bunun sonucu olarak n bölgesinin yakın komşuluğundaki p bölgesi negatif, p bölgesinin yakınındaki n bölgesi de pozitif yüklenmiş olur. Elektron ve hol geçişleri bu iki bölge arasında bir termodinamik denge kuruluncaya, yani bölge sınırlarındaki Fermi enerji seviyeleri eşit oluncaya kadar sürer [14]. Şekil 2.7 şematik olarak bir p-n eklemını göstermektedir. Bütün yarıiletkenin bir tek kristalden oluştuğunu fark etmek önemlidir. p bölgesine akseptör kirlilik atomları ve

n bölgesine de donör kirlilik atomları katkılanmıştır. n ve p bölgelerini ayıran ara yüzey metalürjik eklem olarak adlandırılır.



Şekil 2.7. Düzgün olarak katkılanmış ideal bir p-n heteroekleminin katkı profili

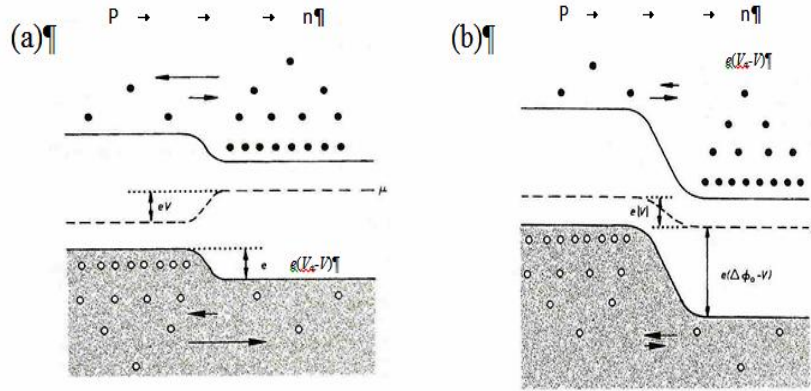
Basit olarak, eklemdeki katkıda ani bir değişimin var olduğunu ve her bir bölgede katkı konsantrasyonunun düzgün olduğu bir adım eklem düşünülürse; başlangıçta, metalürjik eklemde, hem elektron hem de hol konsantrasyonlarında çok büyük yoğunluk grandyenti vardır. n bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı olan elektronlar p bölgesine ve p bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı olan holler de n bölgesine difüze olmaya başlayacaklardır. Eğer yarıiletken harici bir etkinin olmadığını farz edersek o zaman bu difüzyon işlemi sonsuza kadar devam etmez. n bölgesinden elektronlar difüze olduğu için geride pozitif olarak yüklenmiş donör atomları kalır. Benzer olarak, p bölgesinden holler difüze olduğu için geride negatif olarak yüklenmiş akseptör atomları bırakırlar. n ve p tipi bölgelerdeki net pozitif ve negatif yükler metalürjik eklemde yakın bölgede bir elektrik alan oluştururlar. Bu alanın yönü pozitif yükten (N_d), negatif yüke (N_a) doğrudur veya n bölgesinden p bölgesine doğrudur. Bu bölgelerdeki net pozitif ve negatif yük, Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Bu iki bölge uzay yükü bölgesi olarak adlandırılır. Aslında bütün elektronlar ve holler elektrik alanın etkisiyle uzay yükü bölgesinin dışına çıkarlar. Uzay yükü bölgesinde hareketli yükler tükendiğinden dolayı bu bölge tükenim bölgesi olarak da adlandırılır. Bu iki terim birbirlerinin yerine kullanılabilirler.



Şekil 2.8. Uzay yükü bölgesi, elektrik alan ve yüklü taşıyıcılar üzerine etkileyen kuvvetler

Yoğunluk gradyanları, uzay yükü bölgesinin her bir kenarındaki çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonlarında hala mevcuttur. Çoğunluk taşıyıcılar üzerinde etkili olan ve bir difüzyon kuvveti üreten bir yoğunluk gradyanı düşünebiliriz. Bu difüzyon kuvvetleri Şekil 2.8’de görüldüğü gibi uzay yükü bölgesinin kenarlarındaki elektronlara ve hollere etki ederler. Uzay yükü bölgesindeki elektrik alan, parçacıkların her bir tipi için, difüzyon kuvvetinin yönüne zıt yönde, holler ve elektronlar üzerinde etkili olan diğer bir kuvveti oluşturur. Termal dengede difüzyon kuvvetleriyle elektrik alan (E) kuvveti birbirleriyle tamamen dengededir [1].

p-n eklemine dışardan bir voltaj uygulanması, yani p-n eklemının beslenmesi Şekil 2.9’da gösterildiği gibi iki şekilde gerçekleştirilebilir. Bariyer yüksekliğini (ϕ_b) azaltmak üzere p tarafı pozitif, n tarafı negatif yapılırsa, bu uygulamaya “doğru beslem”, ϕ_b engelini arttırmak üzere p tarafı negatif, n tarafı pozitif yapılırsa, bu uygulamaya da “ters beslem” denir. Doğru beslemde azalan ϕ_b nedeniyle taşıyıcı geçişleri kolaylaşır, ters beslemde ise ϕ_b büyüdüğü için geçişler zorlaşır. Sonuç olarak p-n eklemi üzerinden geçen akımı tek yönde geçiren bir araç, bir diyot veya doğrultucudur.



Şekil 2.9. (a) Doğru beslem uygulanmış bir p-n eklemının enerji-bant diyagramı, (b) ters beslem uygulanmış bir p-n eklemının enerji-bant diyagramı

2.4. Metal-Yarıiletken (MY) Kontaklar

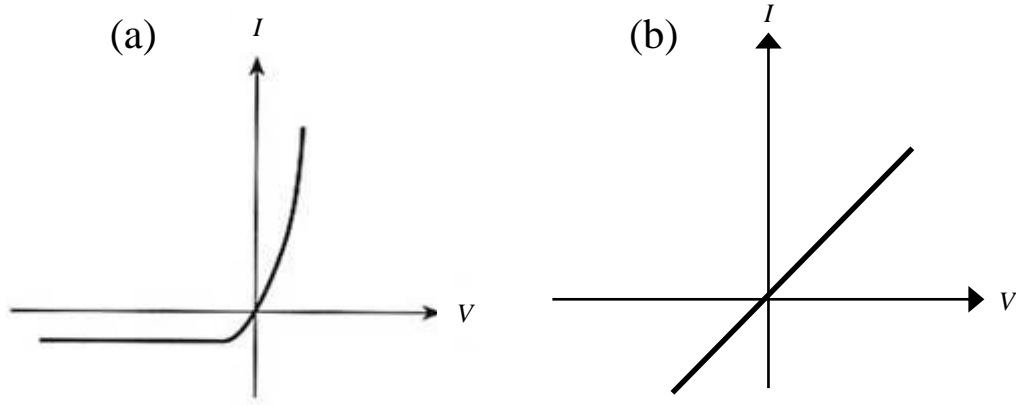
Birbirleriyle aynı olmayan iki metal birbiriyle temas haline getirilirse, iş fonksiyonu küçük olan metalde daha yüksek enerji haline sahip olan elektronlar, iş fonksiyonu daha büyük olan metaldeki daha büyük enerjili boş hollere hareket ederler. Bu durum, iki metalde de Fermi enerjileri eşit olana kadar devam eder.

MY kontaklar, çok temiz ortamlarda yarıiletken devre elemanları veya entegre devrelerin yapımında kullanılırlar. Çizelge 2.1’de verildiği üzere bu kontaklar, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna (ϕ_m , ϕ_s) ve yarıiletkenin katkılanma türüne bağlı olarak omik veya doğrultucu (schottky) kontak özelliği gösterir. Bir omik kontak, yükün her iki yönde iletimi sağlayan düşük dirençli bir eklemidir. Schottky kontak ise, yükün bir diğerine göre daha kolay iletildiği eklemidir.

Çizelge 2.1. Metal-yarıiletken kontakların iş fonksiyonuna göre doğrultucu ve omik kontaklar

Yarıiletken	Schottky Kontak	Omik Kontak
n-tipi	$\phi_m > \phi_s$	$\phi_m < \phi_s$
p-tipi	$\phi_m < \phi_s$	$\phi_m > \phi_s$

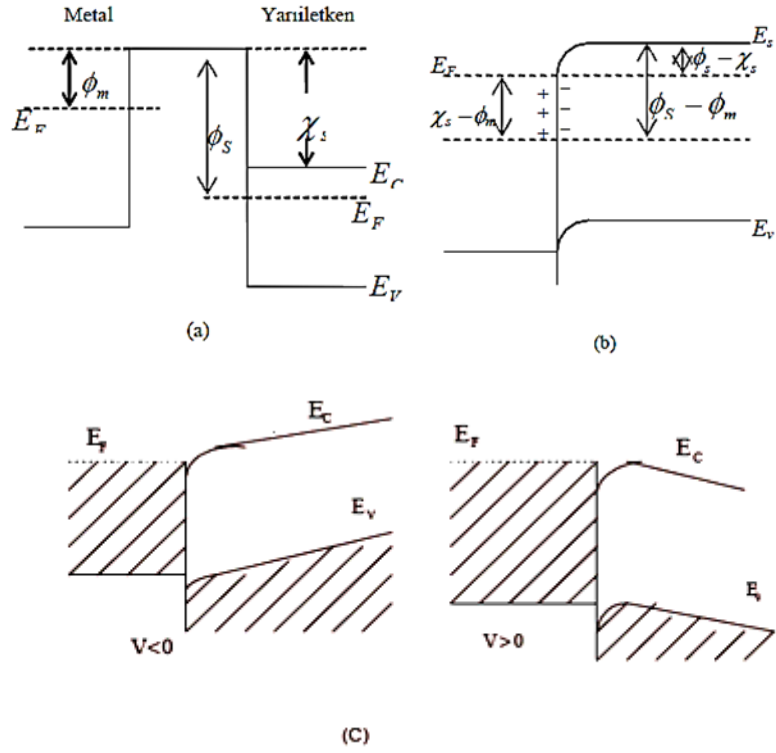
MY ara yüzeyinde yüklerin ayrışmasından dolayı oluşan potansiyel engelin yüksekliği kabaca, o kontağın elektriksel olarak omik ya da schottky karakterde olduğu ile ilgili önemli bilgiler verir. Elde edilen bir kontakta, oda sıcaklığında, engel yüksekliği değeri 0,3 eV değerinden daha düşükse kontak omik karaktere, bu değerden daha büyükse kontak Schottky karaktere sahiptir denebilir. Şekil 2.10.'da schottky ve omik kontağın I - V karakteristiği verilmiştir [15].



Şekil 2.10. (a) Schottky kontağın ve (b) omik kontakın akım-gerilim karakteristiği

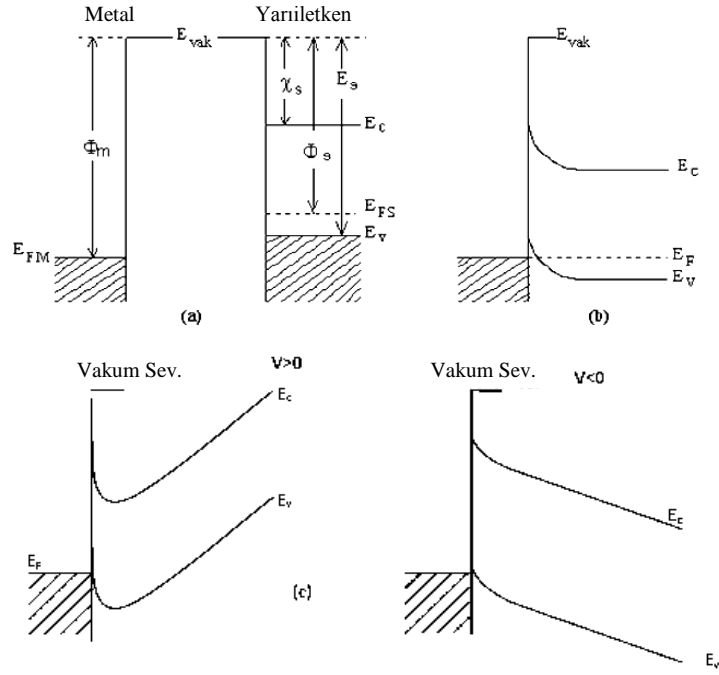
2.4.1. Omik kontaklar

Omik kontak, metal ve yarıiletken arasında her iki yönde iletimi sağlayan düşük dirençli bir eklemdir [1]. n-tipi yarıiletken/ metal omik kontak oluşturulmadan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinden ($\phi_s - \phi_m$) kadar aşağıdadır. Kontak oluşturulduğunda termal dengeye ulaşmak için, elektronlar metalden, yarıiletkenin yüzeyini daha n-tipi yaparak, yarıiletken içindeki daha düşük enerji hallerine akarlar. Termal denge sağlanınca kontakın metal tarafında biriken pozitif yüzey yükleri ile yarıiletken tarafında biriken negatif uzay yükleri bir dipol tabakası oluştururlar. Kontak haline getirilmiş ve dengedeki n-tipi yarıiletken/metal omik kontakta metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale kolayca yük akışı meydana gelir. Bir V gerilimi uygulanırsa bu potansiyel farkı sadece kontak bölgesinde değil bütün yarıiletken boyunca dağılacaktır. n-tipi yarıiletken/ metal omik kontak oluşumu Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. n-tipi yarıiletken/ metal omik kontak, (a) kontakta önce, (b) kontakta sonra enerji bant diyagramı (c) $V \neq 0$ durumundaki, enerji bant grafikleri

p-tipi yarıiletken/ metal omik kontakta ise kontakta önce Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $(\phi_m - \phi_s)$ kadar yukarıdadır. Kontak oluşturulduktan sonra elektronlar termal dengeye ulaşmak için yarıiletkendeki metale doğru akarak geride boş holler bırakacaklardır. Yüzeyde hol konsantrasyonu fazla olacağı için yarıiletkenin yüzeyi p-tipi olacaktır. Metaldeki elektronlar yarıiletkendeki boş holler içine hızlıca hareket edebilecekleri için, bu yük akışı yarıiletkendeki metale akan hollere karşılıktır. Yani kontak haline getirilmiş ve dengedeki p-tipi yarıiletken/metal omik kontakta metalden yarıiletkene ve yarıiletkendeki metale kolayca yük akışı meydana gelir. p-tipi yarıiletken/ metal omik kontak oluşumu Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. *p*-tipi yarıiletken/ metal omik kontak, (a) kontakta önce, (b) kontakta sonra enerji bant diyagramı (c) $V \neq 0$ durumundaki, enerji bant grafikleri

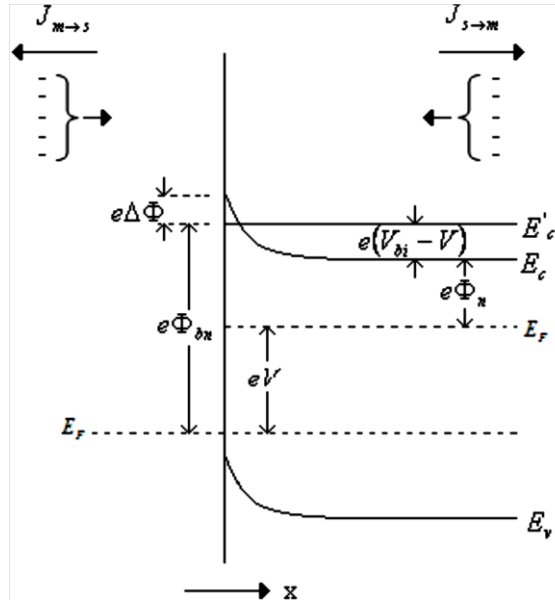
Pratikte, yarıiletken *n* tipi de olsa *p* tipi de olsa, arakesitteki yük etkisi sebebiyle ideal bir omik bağlantı ancak yaklaşık olarak gerçekleştirilebilir. Bir MY arasındaki sıkı bağlantı, özellikle yarıiletkenin katkı yoğunluğu azsa, genellikle omik bir bağlantı değildir. Bununla beraber, yarıiletkenin katkı yoğunluğu fazla (10^{19} cm^{-3} veya daha fazla) ise bir MY bağlantısı omik bir bağlantı olur.

2.4.2. MY kontakların akım-gerilim bağlantısı

MY yapılardan geçen akımın uygulanan gerilimle değişimini ifade etmek için çeşitli kuramlar ortaya atılmıştır. Bunların en önemlileri: Termoiyonik Emisyon (TE) Kuramı, Difüzyon Kuramı, Termoiyonik Emisyon-Difüzyon (TED) Kuramı, Alan Emisyonu (AE) Kuramı, Termoiyonik Alan Emisyonu (TAE) Kuramı, Tüketim Bölgesinde Taşıyıcı Oluşması (Generation) ve Tekrar Birleşmesi (Recombination) Kuramı, Azınlık Taşıyıcı Enjeksiyonu ve T_0 Etkili Akım iletim Kuramıdır [16].

MY yapılarda akım uzay yükü bölgesinin kenarından metale geçen çoğunluk taşıyıcıları ile sağlanır. Gerçek diyotların çoğunda akım iletim mekanizması, Termoiyonik Emisyon (TE) kuramıyla gerçekleşir. Termoiyonik emisyon teorisinde,

MY kontağın engel yüksekliğinin kT 'den çok büyük olduğu bu sebeple Maxwell-Boltzman yaklaşımı altında bile termal dengenin etkilenmediği kabul edilir.



Şekil 2.13. İmaj kuvvet azalma etkisinin doğru beslem altındaki bir metal-yarıiletken kontağa etkisi

Şekil 2.13'te verilen $J_{m \rightarrow s}$ akımı, yarıiletkenden metale elektronların akmasından dolayı oluşan elektron akım yoğunluğu ve $J_{s \rightarrow m}$ akımı da metalden yarıiletken içine elektronların akmasından dolayı oluşan elektron akım yoğunluğudur. Akımların indisleri elektron akışının yönüdür. Alışılmış akım yönü elektron akışına zıttır [1]. $V=0$ için yarıiletkenden metale hol akışı bir doyma akımına (I_0) neden olur. $V>0$ olduğunda ise;

$$I_0 = e^{eV/kT} \quad (2.4)$$

olur. Bu sebeple metalden yarıiletkene hol akışından dolayı oluşan akım I_0 'dır ve toplam I ;

$$I = I_0 \left[e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right] \quad (2.5)$$

denklemleriyle hesaplanır. n , diyotun ideal oluşunun bir ölçüsüdür ve ideal bir diyotta $n=1$ 'dir. Ancak uygulamalarda 1'den büyük olur. Bu sebeple denklem (2.5) için bir n tanımlanarak gerekli düzeltme yapılabilir.

Bu durumda karakteristik I ,

$$I = I_0 \left[e^{\left(\frac{eV}{nkT} \right)} - 1 \right] \quad (2.6)$$

olur. Bu ifadedeki n ,

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.7)$$

denklemleriyle verilir. n , sıcaklığa bağlı olabilir ve yaklaşık olarak voltajdan bağımsızdır. Denklem 2.6'daki I_0 ifadesi ve

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (2.8)$$

denklemleriyle ifade edilir. Burada; A diyotun alanı, A^* parametresi termoyonik emisyon için etkin Richardson sabitidir ve

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

ile verilir. e elektron yükü, h Planck sabiti ve m_n^* iletim bandı içindeki elektronun etkin kütesidir [17]. ϕ_b değeri ise

$$\phi_b = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (2.10)$$

denklemleriyle ifade edilmektedir. Yüksek değerlerde uygulanan gerilim, akım gerilim karakteristiklerinde seri direnç olarak adlandırılan bükülmelere neden olmaktadır. ϕ_b ve seri direnç (R_s) gibi diyot parametrelerinin elde edilmesi için alternatif bir metot olan Norde metodu kullanılmaktadır. Bu metod,

$$F(V) = \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{A^*AT^2} \right) \quad (2.11)$$

denklemleriyle ifade edilmektedir. Burada, burada γ , n değerinden büyük ilk tamsayı değeridir. $I(V)$, $I-V$ karakteristiğinden elde edilen akım değeridir. Engel yüksekliği, $F(V)-V$ grafiğinin minimum dönüm noktası bulunduktan sonra,

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (2.12)$$

denklemleriyle hesaplanır. Burada $F(V_0)$, $F(V)$ değerinin minimum noktasıdır ve V_0 değeri bu minimum noktadaki voltaj değeridir. Seri direnç ise,

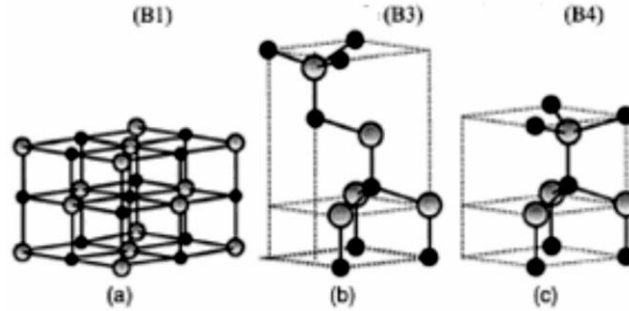
$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI_0} \quad (2.13)$$

denklemleriyle ifade edilmektedir.

2.5. ZnO'nun Özellikleri

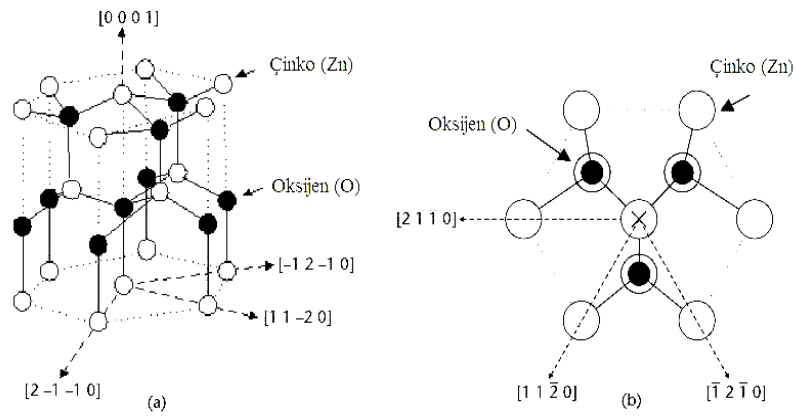
Çinko oksit kimyasal formülü ZnO olan, beyaz toz görünümlü, hemen hemen suda hiç çözünmeyen, doğada bol bulunan inorganik bir bileşiktir. Malzeme biliminde şeffaf iletken oksitler sınıfında yer alan ZnO bileşiği, yüksek şeffaflığı, elektron mobilitesi ve saturasyon hızı, direk geçişli geniş bant aralığı (3,37 eV), yüksek eksiton bağlanma enerjisi (60 meV), güçlü oda sıcaklığı lüminesans özelliklerinden dolayı, gaz sensörleri, biyosensörler, güneş pilleri, şeffaf ince film transistörler, varistörler, ışık geçirgen elektronik paneller, yüzey akustik (SAW) aygıtlar, spin fonksiyonel aygıtlar, UV ışık yayıcılar gibi birçok popüler uygulama alanına sahiptir.

ZnO iyonikliği kovalent ve iyonik yarıiletkenler arasında olan bir II-VI grubu n tipi yarıiletkenidir. ZnO'nun kristal yapısı Şekil 2.14'te gösterildiği gibidir. ZnO çevre şartlarında termodinamik olarak sabit fazda wurtzite' tir. Çinko sülfür ZnO yapı sadece kübik alt tabanlar üstüne büyütülmeyle kararlı olabilir. Kaya tuzu (NaCl) yapısı rölatif olarak yüksek basınçlarda bulunmalıdır [18].



Şekil 2.14. ZnO kristal yapılarının gösterimi: (a) kübik kaya tuzu (B1), (b) kübik çinko sülfür (B3), (c) hegzagonal wurtzite (B4) (Burada gri küreler Zn, siyah küreler ise O atomlarını ifade etmektedir)

Wurtzite yapı Şekil 2.15'te verilen iç içe geçmiş iki hekzagonal birim hücreden oluşur ve birim hücreler dört atom içerir. Her atom tetrahedronun köşelerindeki diğer elementin dört atomu tarafından kuşatılmıştır. Yapı a ve c olmak üzere iki örgü parametresiyle temsil edilir. İdeal bir hekzagonal yapıda $\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}}$ tür. Gerçek bir ZnO kristalinde bu değerden sapmalar görülür. Wurtzite yapıda simetri merkezinin olmayışı yüksek elektromekanik çiftlenim verimiyle birleştiğinde, ZnO'nun güçlü piezoelektrik özelliğe sahip olmasını sağlar [19].



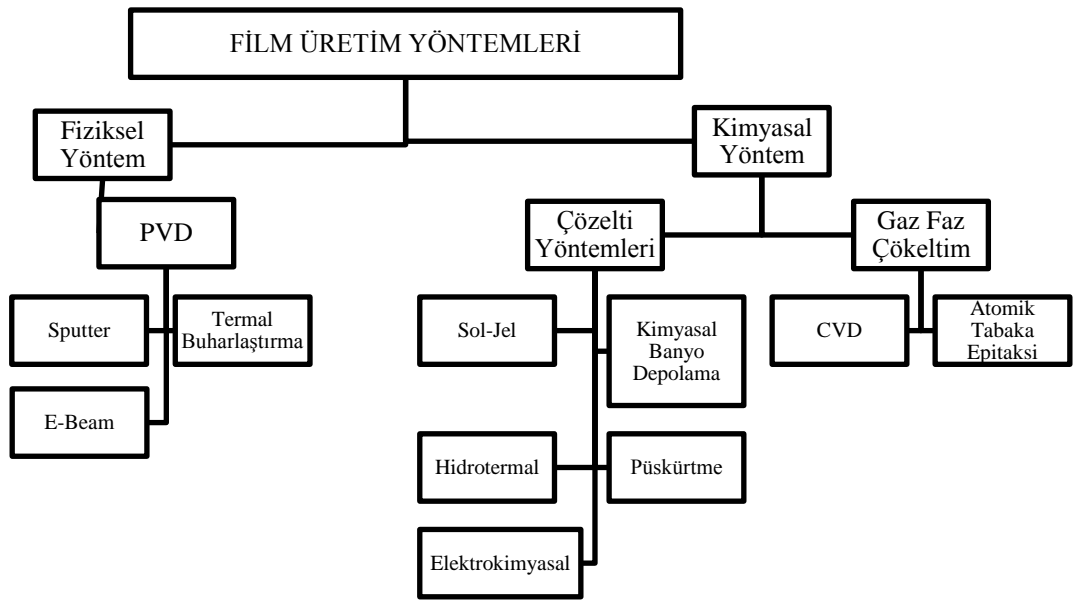
Şekil 2.15. ZnO (a) (Wurtzite) kristal yapısı, (b) [0001] yönü boyunca kesiti

3. ZnO FİMLERİNİN ELDE EDİLMESİ ve HETEROEKLEM DİYOT FABRİKASYONU

3.1. Giriş

Günümüzde birçok kaplama yöntemi kullanılarak filmler elde edilmektedir. Bu yöntemler fiziksel ve kimyasal olarak iki kısma ayrılabilir. Tablo 3.1’de film üretim yöntemleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Film üretim yöntemleri



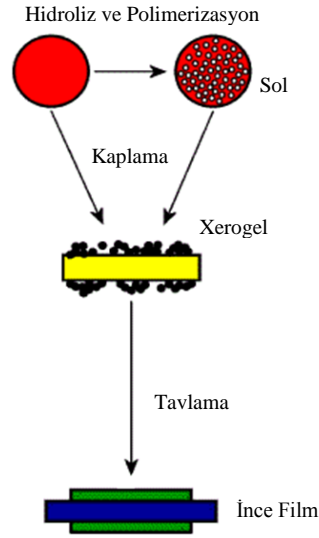
Fiziksel buhar biriktirme tekniği (PVD), bilimsel anlamda ilk olarak 19. yüzyıl sonlarında çalışılmaya başlanmıştır, ancak son 50 senedir vakum teknolojisindeki gelişmeler ile bu çalışmalar hız kazanmıştır. Günümüze kadar geliştirilen farklı depolama işlemleri ile uygulanan bu yöntemin mekanizması, kaplama malzemesi katı, sıvı veya gaz kaynağından fiziksel olarak elde edilip atomik, moleküler veya iyon şeklinde yüzeye gönderilmesi işlemi olarak özetlenebilir. Vakumlu ortamda, bir ısıtıcı (rezistans, lazer, elektron bombardımanı vb.) ile buharlaştırılan kaplayıcı malzeme, kaplanacak olan malzeme üzerinde ince bir film katmanı halinde depolanır. PVD yöntemi, günümüzde, mikro elektronik, tıp, korozyona karşı direnç gerektiren uygulamalar vb. pek çok farklı alanda kullanılmaktadır.

Film üretiminde kullanılan kimyasal yöntemler gaz faz çökeltim ve çözelti yöntemleri olarak iki kısımda incelenmektedir. Gaz faz çökeltim yöntemleri olan, Kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve atomik tabaka biriktirme yöntemi, ısıtılmış alttaş yüzeyinde ısı destekli kimyasal reaksiyonları içeren yöntemlerdir. Bu yöntemlerle tek kristalli, çok kristalli veya amorf yapılar elde edilebilir.

Film üretiminde düşük maliyetli ve kolay proseslere sahip olması açısından en çok kullanılan yöntemler çözelti yöntemleridir. Kimyasal banyo depolama, uygun stokiometriye sahip sulu çözeltisi hazırlanan kimyasal maddeler kullanılarak uygun sıcaklıkta uygun alttaşlar üzerine film elde etme yöntemidir Hidrotermal sentez, maddelerin kapalı bir ortamda yüksek sıcaklık ve basınçta reaksiyona girmesiyle elde edilen film elde etme yöntemidir. Püskürtme yöntemi, elde edilecek filmler için hazırlanan sulu çözeltilerin karıştırılarak sıcak alttaş üzerine hava ya da azot gazı yardımı ile atomize edilerek püskürtülmesi yöntemidir. Elektrokimyasal kaplama yöntemi , elektrokimya kuralları kullanılarak tepkimeler gerçekleştirilip film elde etme yöntemidir. Sol jel yöntemi ise, cam, seramik, metal ve plastik alttaşların kaplanarak yüzey özelliklerini iyileştirmek ve yeni özellikler kazandırmak (optik, elektronik, kimyasal ve mekanik gibi) amacıyla uygulanan bir kaplama yöntemidir.

3.1.1. Sol jel spin kaplama yöntemi

Film üretiminde kullanılan birçok yöntem arasında sol jel yönteminin, ucuz olması, ekipmanlarının kolay olması ve elektronik aygıt uygulamalarında kullanılan filmler için uygun olması gibi avantajları vardır. Bu yöntem, sıvı faz içinde bulunan katı taneciklerden oluşan koloidal süspansiyonların (sol) ve sonrasında sıvı faz içerisinde 3 boyutlu katı inorganik ağ yapılarının (jel) oluşmasını içerir. Filmlerin elde edilmesi aşamasında, hazırlanan sol, püskürtme kaplama (spray coating), laminer kaplama, daldırmalı kaplama (dip coating), merdaneli kaplama (roll coating), baskı kaplama (printing), akış kaplama (flow coating), spin kaplama (spin coating) gibi çeşitli yöntemlerden biri kullanılarak alttaş üzerine kaplanır. Sol jel yöntemiyle film kaplamanın şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



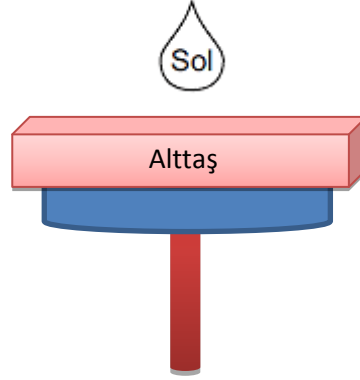
Şekil 3.1. Sol jel yöntemi ile film kaplamanın şematik gösterimi

Sol jel yöntemi kullanılarak fabrikasyonu yapılan filmlerin düşük ısılarda elde edilmesi sayesinde enerji tasarrufu sağlanmaktadır. En büyük avantajı, elde edilen filmin mikro yapısının kolayca kontrol edilebilir olmasıdır. Bu yöntem ile gözenekli yapılar elde edilebildiği için düşük kırılma indisli filmler yapmak mümkündür. Sol jel yönteminde, filmler cismin geometrisine bakılmaksızın elde edilebilir. Ancak bu avantajlarının yanında malzemenin maliyeti fazla olması, kaplama sırasında malzeme kaybının fazla olması gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Ayrıca kullanılan kimyasallar sağlığa zararlı olabilir ve filmlerde karbon çözültisi kalma olasılığı yüksektir.

Sol jel spin kaplama yöntemi film üretiminde oldukça yaygın olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu işlemden hazırlanan çözelti damlasının alttaşın merkezine damlatılması ve sonra alttaşın yüksek hızlarda döndürülmesi ile olmaktadır.

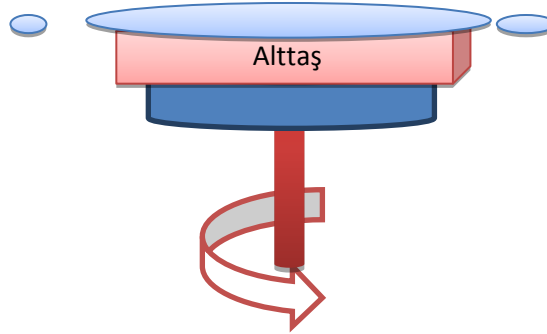
Sol jel spin kaplama yöntemi ile film kaplama, damlatma, döndürme, döndürmeyi sonlandırma ve buharlaştırma olarak 4 bölüme ayrılabilir.

1) Şekil 3.2’de damlatma aşaması verilmektedir. Burada, dönecek yüzeye sabitlenmiş olan alttaş üzerine mikropipet yardımıyla belirli bir miktar sol damlatılır.



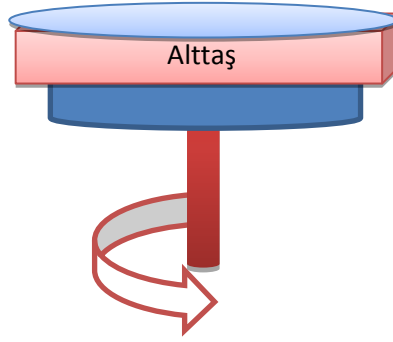
Şekil 3.2. Çözeltinin alttaşa damlatılması

2) Şekil 3.3’te döndürme aşaması verilmiştir. Bu aşamada, başlangıçta durmakta olan alttaş döndürülür. Dönme sırasında alttaş üzerine damlatılmış sol, merkezci kuvvetin etkisi ile radyal bir şekilde alttaş yüzeyinin dışına doğru akar. Merkezdeki hız fazla çözeltinin alttaştan ayrılması ve kalan kısım ile film oluşumunu kolaylaştırır.



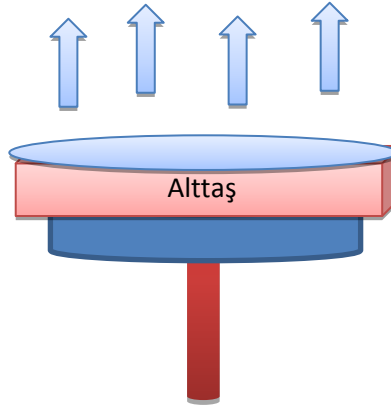
Şekil 3.3. Çözeltinin alttaşa homojen olarak yayılması

3) Şekil 3.4'te döndürmeyi sonlandırma aşaması verilmiştir. Bu aşamada, fazla olan sol alttaş yüzeyini terk etmiş durumdadır. Film kalınlığının incelmesiyle alttaş yüzeyini terk eden sıvının miktarı azalır. Nedeni ise film kalınlığının azalması ile akışkanlığa karşı olan direncin artmasıdır. Aynı zamanda uçucu olmayan madde konsantrasyonundaki artış, akışkanlığa karşı direncin artmasına sebep olur.



Şekil 3.4. Çözeltinin yüksek hızda döndürülmesi

4) Şekil 3.5'te buharlaşma aşaması verilmiştir. Bu aşamada, filmlerin kalınlıklarının incelmesindeki son ve en önemli safhadır. Buharlaşmanın başlamasıyla alttaş üzerinde jel oluşmaya başlar.



Şekil 3.5. Buharlaşma ve film oluşumu

Sol jel spin kaplama yönteminin bir avantajı, film oluşurken yüzeyde oluşmaya başlayan filmin düzgün bir şekilde dağılmasıdır. Bunun sonucu olarak film kalınlığı, yüzey boyunca homojen bir özellik gösterir. Solün viskozitesi değişmedikçe film kalınlığı aynı kalır. Film kalınlığının düzgün olmasında iki ana kuvvet etkindir. Bunlar; taşıyıcı üzerine damlatılan sıvının radyal bir şekilde dışa doğru akmasına neden olan merkezci kuvvet ve ters yöne doğru olan sürtünme kuvvetidir. Döndürme safhasındaki merkezci kuvvet, yer çekim kuvvetinin ihmal edilmesine sebep olur. Böylece filmin incelme aşamasında sadece merkezci kuvvet vardır.

3.2. ZnO Filmlerinin Elde Edilmesi

3.2.1. Alttaşların temizlenmesi

Bu çalışmada, alttaş olarak bir tarafı mat diğer tarafı parlak p-Si alttaşlar kullanılmıştır. Elde edilecek filmlerin yüzeylerinde meydana gelebilecek ara yüzey hal oluşumunu minimuma indirmek için, kaplanacak olan alttaşların temiz olması gereklidir. Yüzeyleri homojen ve düzgün olarak elde edilen filmlerin, elektriksel, optik ve morfolojik özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür.

İlk olarak p-Si alttaşlar, seyreltilmiş HF çözeltisine koyulmuştur (HF çözeltisi; %5 hidroflorik asit (HF) içeren, 50ml'lik HF ve deiyonize sudan oluşmaktadır). 3 dakika bekledikten sonra deiyonize sudan geçirilen alttaşlar en son asetonla temizlenip azotla kurutulmuştur. Bu işlemler deney başlangıcından hemen önce yapılarak alttaşlar, yüzeylerinde oluşabilecek organik kirlilerden, ağır metal kirliliklerinden ve oksit tabakasından arındırılmıştır.

3.2.2. Çözeltilerin hazırlanması

ZnO filmleri, p-Si alttaşlar üzerine üç farklı tipte çözeltiler hazırlanarak sol jel spin kaplama yöntemi ile elde edilmiştir. Tüm çözeltiler 0.35M olarak hazırlanmıştır.

i) I. Tip çözeltilerin hazırlanması: Başlangıç tuzu olarak çinko asetat dihidrat ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$) ve sabitleyici olarak etanolamin ($NH_2CH_2CH_2OH$) kullanılmıştır. Çözücü olarak, gliserol ($HOCH_2CH(OH)CH_2OH$), 2-metoksietanol ($CH_3OCH_2CH_2OH$) ve etanol (CH_3CH_2OH) kullanılarak üç farklı çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltiler 40°C' de 2 saat karıştırılmaya bırakıldıktan sonra 24 saat boyunca karanlıkta, oda sıcaklığında bekletilmiştir. Elde edilen filmlerin kodları, gliserol ile elde edilen

filmin Z1, 2- metoksietanol ile elde edilen filmin Z2, etanol ile elde edilen filmin ise Z3 olarak verilmiştir.

ii) II. Tip çözeltilerin hazırlanması: Başlangıç tuzu olarak çinko asetat dihidrat, sabitleyici olarak polietilen glikol ($H(OCH_2CH_2)_nOH$) ve deiyonize su (H_2O), çözücü olarak ise etanol kullanılmıştır. pH değeri 6,67 olarak ölçülen çözelti iki eşit parçaya ayrılmıştır. İlk çözeltinin pH değeri 7,15 olacak şekilde sodyum hidroksit ($NaOH$) eklenmiştir. İkinci çözeltinin pH değeri ise 9,5 olacak şekilde amonyum hidroksit (NH_4OH) eklenmiştir. Hazırlanan çözeltiler oda sıcaklığında 15 dakika karıştırılıp, 2 saat bekletilmiştir. Elde edilen filmlerin kodları, pH değeri 9,5 olanın Z4, 7,15 olanın ise Z5 olarak verilmiştir.

iii) III. Tip çözeltilerin hazırlanması: Başlangıç tuzu olarak çinko nitrat heksahidrat ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$), sabitleyici olarak etilen glikol monometil eter ($C_3H_8O_2$) kullanılmıştır. İlk hazırlanan çözelti herhangi bir çözücü eklenmeden, ikinci çözelti deiyonize su eklenerek, üçüncü çözeltiye ise 2- metoksietanol eklenerek hazırlanmıştır. İlk çözelti $50^\circ C + 80^\circ C$ 'de, diğer çözeltiler $50^\circ C$ 1 saat karıştırılıp, 24 saat karanlık ortam ve oda sıcaklığında bekletilmiştir. Elde edilen filmlerin kodları, çözücü kullanılmayan çözelti ile elde edilen filmin Z6, 2- metoksietanol ile elde edilen filmin Z7, deiyonize su ile elde edilen filmin ise Z8 olarak verilmiştir.

3.2.3. Deneyin yapılışı

ZnO filmleri, Şekil 3.6'da verilen LAURELL marka spin kaplama cihazı kullanılarak sol jel spin kaplama yöntemi ile elde edilmiştir. Önceden temizlenerek hazırlanmış olan alttaşlar cihazın tutucu bölmesine yerleştirip cihaz çalışır konuma getirilmiştir. Elde edilen çözelti, spin kaplama cihaza yerleştirilen alttaş üzerine damlatılıp, 3000 rpm döndüme hızında 30 saniye döndürülmüştür.



Şekil 3.6. LAURELL marka sol jel spin kaplama cihazının fotoğrafı

Çözelti alttaş yüzeyine yayıldıktan sonra film oluşumu için Şekil 3.7’de verilen PROTHERM marka fırında 10 dakika 300°C’de kurutulmuştur. 5 kez tekrarlanan bu süreçten sonra filmler 550°C’de 1 saat tavlannmıştır.



Şekil 3.7. PROTHERM marka fırının fotoğrafı

3.2.4. Kontakların yapılışı

Vakum buharlaştırma yöntemi, 10^{-5} - 10^{-6} torr basıncına kadar havası bir difüzyon pompası ile boşaltılmış bir vakum bölmesi içerisinde, buharlaştırılacak madde, genellikle bir metal filamandan yüksek akım geçirilerek, bazen de elektron ışını ile ısıtılarak film yüzeyinin kaplanması yöntemidir. Bir filaman üzerindeki sıcaklık derecesini azaltan en önemli etken hava kaybı ile ısının kaybıdır. Buharlaşma noktasının üstünde belirli bir sıcaklıkta, bu kaynaktan her yönde atom veya moleküller yayılır. Buhar halindeki bu atomların, kaynaktan belli mesafeye (10-25 cm) konmuş taşıyıcılar üzerinde toplanması ile film üzerine istenen kontak elde edilir.

Filaman, yüksek erime sıcaklığına sahip molibden (Mo), volfram (W), tantal (Ta), platin (Pt) gibi metallere, kontak yapılacak materyale uygun bir şekilde yapılır. Bu filaman materyali, yüksek sıcaklıkta bazı elementlerle kimyasal reaksiyona girebileceğinden, buharlaştırılacak elemente en uygun filaman metali bulmak için araştırma yapmak gereklidir. Yüksek akım ısıtması ile 1600°C’ye, elektron ışını ile 2500°C– 3000°C’ye kadar sıcaklıklar elde edilebilmektedir [20].

Elde edilen ZnO filmlerinin, XRD desenleri ve FESEM görüntüleri incelendikten sonra en iyi özellik gösteren Z3, Z5 ve Z8 numunelerine omik kontaklar atılmıştır. MY kontaklar atılmadan önce seçilen ZnO filmlerinin alt tabakaları ilk olarak HF çözeltisiyle daha sonra da saf su kullanılarak temizlenmiştir. Filmle kaplı olan yüzeyler

ise Plasma Cleaner cihazı kullanılarak yüzeyde oluşmuş kirliliklerden arındırılmıştır. Kontak oluşturmak için kullanılacak metaller sırasıyla trikloretilen ve asetonla geçirilerek, azot yardımıyla kurutulmuştur. Filmler üzerine, Şekil 3.8’de gösterilen VAKSIS marka metal buharlaştırma cihazı kullanılarak omik kontaklar atılmıştır.

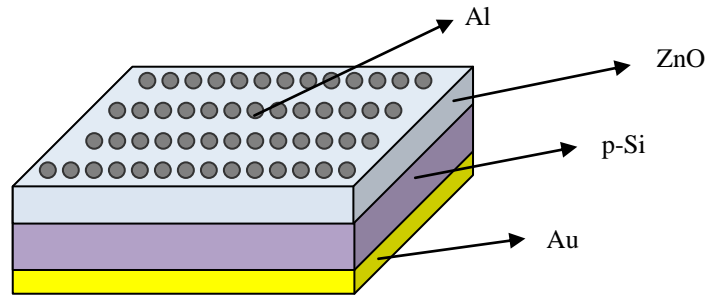


Şekil 3.8. VAKSIS PVD Handy-MT/101T model metal buharlaştırma cihazı

ZnO filmlerinin mat yüzeylerine Çizelge 3.2’de verilen metallerin iş fonksiyonları göz önünde bulundurularak 200 nm kalınlığında Au, film olan yüzeylerine ise 150 nm Al buharlaştırılarak omik kontaklar yapılmıştır. Fabrikasyonu yapılan heteroeklem heteroeklem diyotların şematik gösterimi Şekil 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.2. Diyot fabrikasyonunda kullanılan metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonları

	n-ZnO	p-Si	Au	Al
İş fonksiyonu	4,7	4,8	5,1	4,6



Şekil 3.9. Fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların şematik gösterimi

4. ZnO FİMLERİNİN ve n-ZnO/ p-Si HETEROEKLEM DİYOTLARIN KARAKTERİZASYONU

4.1. Elde Edilen ZnO Filmlerinin X-Işını Kırınım Desenleri

4.1.1. Giriş

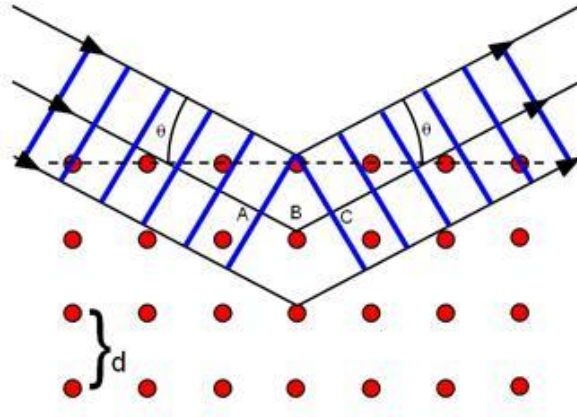
X-ışınları 1895 yılında Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından keşfedilmiş ve ne olduğu tam olarak açıklanamadığı için bu isim verilmiştir. X ışını, görünmeyen, yüksek giriciliğe sahip, görünür ışıktan daha kısa dalga boylu (yüksek frekanslı) elektromanyetik dalgadır. X-ışınları için dalga boyu aralığı 10^{-8} - 10^{-11} m, buna karşılık gelen frekans da 3×10^{16} - 3×10^{19} Hz civarındadır. Doğrusal bir yol boyunca ışık hızıyla yayılırlar. Fotoğraf filmine etki ederler ve bu bakımdan film çekiminde kullanılırlar.

Kristal yapı tayininde kullanılacak elektromanyetik dalganın dalga boyu kristal atomları arasındaki mesafeyle kıyaslanabilmelidir. X-ışınlarının dalga boyu aynı boyutta olduğu için kristalin yapısı hakkında bilgi edinmede X-ışınlarından yararlanılır. Alman fizikçi Von Laue 1912 yılında X-ışını kırınımını gerçekleştirerek, malzemenin yapısı hakkında bilgi edinilebileceğini kanıtlamıştır.

4.1.2. X-Işını kırınımı

Bragg yasası, kırınımın olabilmesi için λ ve θ 'nin uyumlu olmasını gerektirmektedir. Verilen herhangi üç boyutlu bir kristale rasgele bir açıyla çarpan λ dalga boylu tek renkli x-ışınları genellikle yansıtılamayacak dolayısıyla bir kırınım deseni oluşamayacaktır. Kırınımın oluşması için bir rastlantı gerekir ve bu rastlantıyı sağlamak için de ya dalga boyu ya da açının taranması gerekmektedir.

Kristal yapısı foton, nötron ve elektronların kırınımı yoluyla incelenmektedir ve bu durumun basit bir açıklaması W.L. Bragg tarafından yapılmıştır. Buna göre, x-ışını demeti bir kristalin yüzeyine düştüğünde; o kristaldeki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılırlar. Dalga boyu olan x-ışınlarının atom yüzeyine θ açısı yaparak geldiğinde ve atomlar arasındaki uzaklığın d olduğu kristale çarpıp saçıldıklarında aradaki yol farkı $2d \sin \theta$ olur. X-ışınlarının kırınımı Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. X-ışınlarının bir kristal tarafından kırınımı

Bragg yasası şu şekilde ifade edilir;

$$n' \lambda = 2d \sin \theta \quad (4.1)$$

Burada; d düzlemler arası mesafe, n' 1,2,3,... gibi tam sayı değeri alabilen kırınımın mertebesidir. Kırınıma uğrayan ışının şiddeti hızla azaldığı için x-ışını kristalografisinde $n'=1$ alınır. Bragg yansıması sadece;

$$n' \lambda \leq 2d \quad (4.2)$$

dalga boyu şartı sağlandığı zaman meydana gelir ve buna Bragg Kırınım Yasası denmektedir. Bu koşulu görünür ışığın dalga boyu ile sağlamak mümkün olmadığından X-ışınları kullanılmaktadır.

Kırınım deseninde maksimum piklere karşılık gelen θ açıları kullanılarak birim hücrenin boyut ve şeklini tarif eden örgü sabitleri hesaplanmaktadır. Örgü sabitleri (a , b ve c), kübik, hekzagonal, tetragonal, rombohedral, ortorombik, monoklinik ve triklinik olmak üzere yedi adet kristal sistemi tespit edilmiş olup, hekzagonal yapıya ait olanlar analitik metot kullanılarak aşağıdaki denklemden hesaplanmaktadır.

$$\frac{1}{a^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.3)$$

Kristalin tercihli yönelimini belirlemek için yapılanma katsayısı TC (texture coefficient) kullanılarak, tercihli yönelimin hangi düzlemde olduğu belirlenmektedir. TC aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır;

$$TC = \frac{I(hkl)/I_0(hkl)}{N^{-1}\sum I(hkl)/I_0(hkl)} \quad (4.4)$$

Burada; $I(hkl)$, (hkl) düzleminin ölçülen şiddetini, $I_0(hkl)$, JCPDS (Joint Committee for Powder Diffraction Standards) kartlarındaki (hkl) düzleminin standart şiddetini, N difraksiyon piklerinin sayısını gösterir.

X-ışını kırınım desenleri kullanılarak, filmlerin ortalama kristal boyutları aşağıda verilen Scherer eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır;

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.5)$$

Burada; D kristal boyutu, k sabit bir değer (0,9), λ X-ışını dalga boyu, β yarı pik genişliğidir (FWHM).

4.1.3. ZnO filmlerinin XRD desenleri

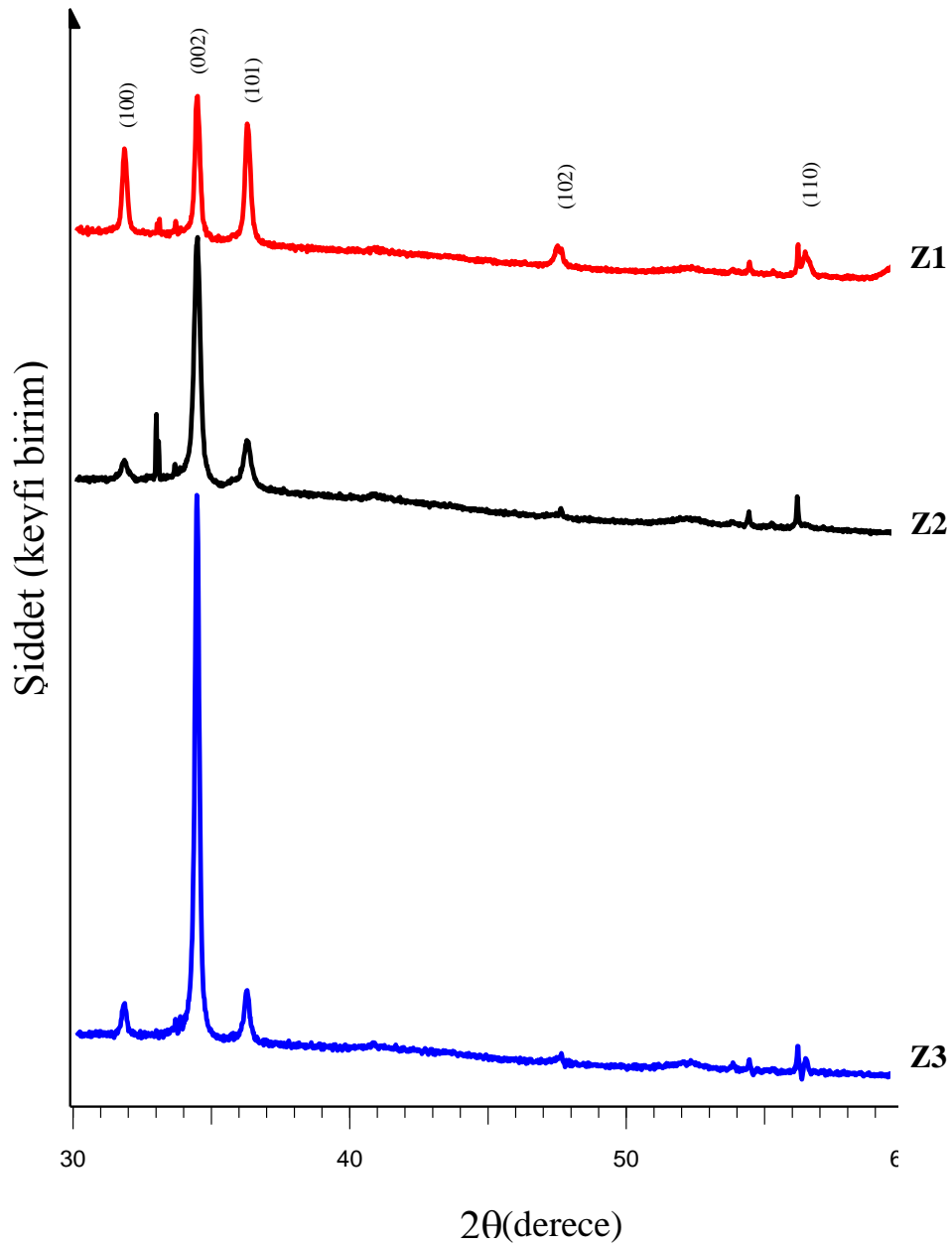
Bu çalışmada elde edilen filmlerin yapısal karakterizasyonu Şekil 4.2’de verilen BRUKER D8 Advance marka X-ışını kırınım (XRD) cihazında, oda sıcaklığında, $30^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ sınır değerlerinde, $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$ dalga boylu $\text{CuK}\alpha$ ışını kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen filmlerin tanecik boyutları, örgü sabitleri ve yapılanma katsayıları yukarıda yer alan formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1 ve 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. BRUKER D8 Advance marka X-ışını kırınım cihazının fotoğrafı

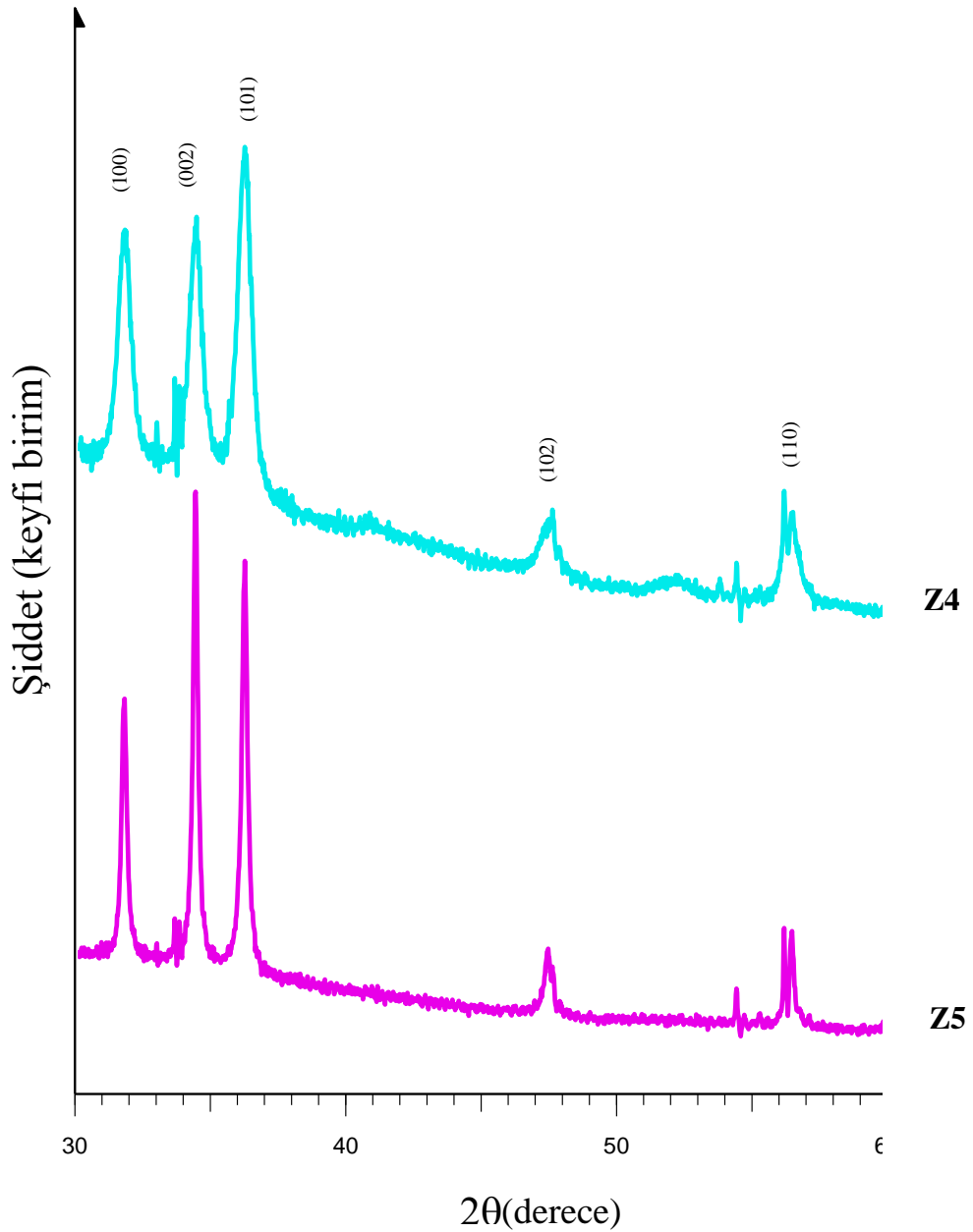
Elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenlerine ait pikler incelendiğinde, genişlikleri dar ve şiddeti büyük olan pikler kristalleşmenin iyi olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.3'te I. tip çözeltiler ile elde edilen ZnO filmlerine ait XRD desenleri verilmiştir. Tüm filmler (100), (002), (101) yönelime sahiptir (JSPDS: 00-0361451). En şiddetli ve keskin piklerin Z3 filmine ait olduğu görülmekte olup, Z1 ve Z2 filmlerine göre daha iyi kristallenme özelliği göstermektedir.



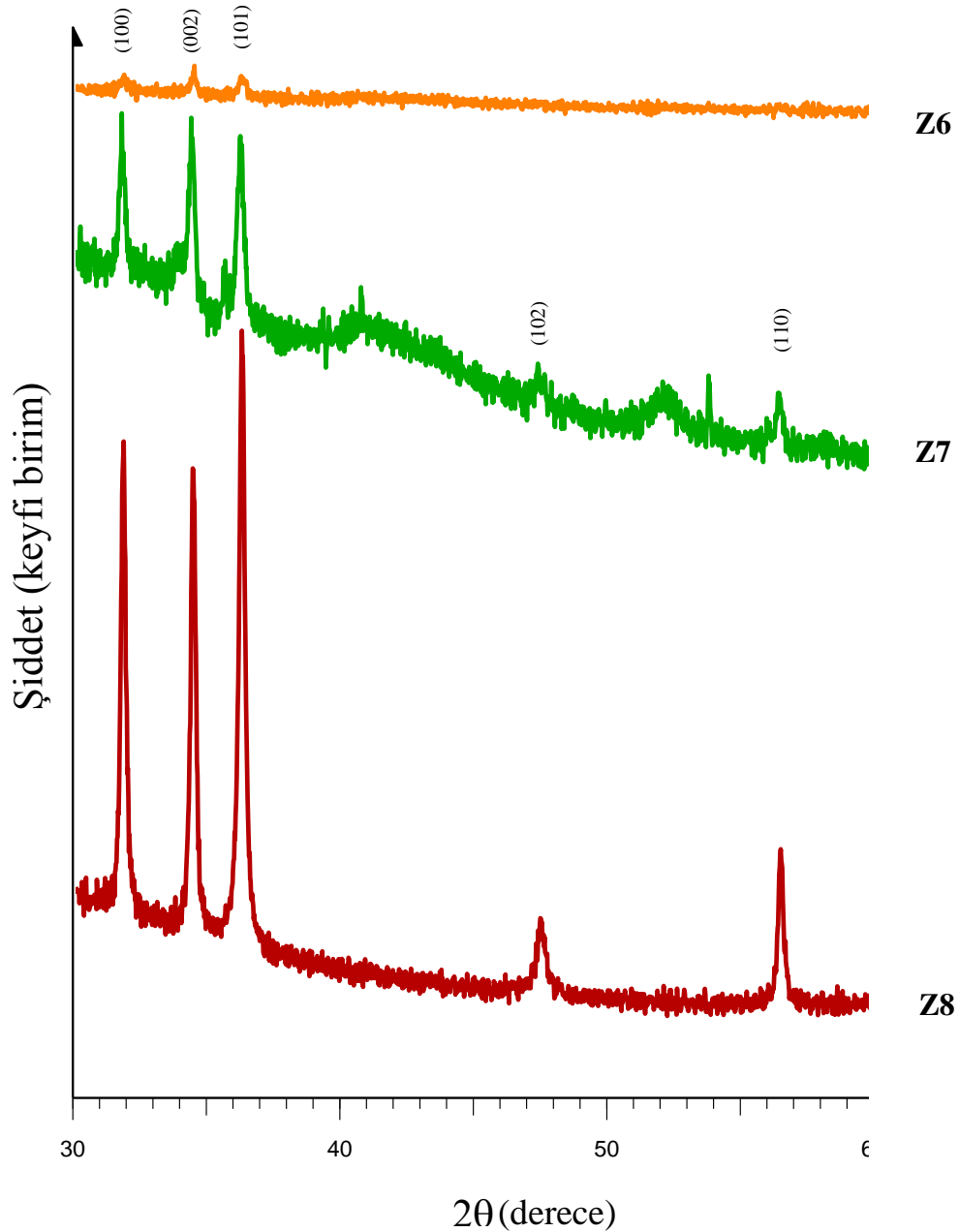
Şekil 4.3. I. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri

Şekil 4.4'te II. tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerine ait XRD desenleri verilmiştir. Tüm filmler (100), (002), (101), (102) ve (110) yönelime sahiptir (JSPDS: 00-0361451). Z5 filmine ait piklerin daha dar ve şiddetli olduğu görülmekte olup, Z4 filmine göre daha iyi kristallenme özelliği göstermektedir.



Şekil 4.4. II. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri

Şekil 4.5'te III. tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerine ait XRD desenleri verilmiştir. Z6 numunesi (100), (002), (101) yönelime sahipken, Z7 ve Z8 numuneleri (100), (002), (101), (102) ve (110) yönelime sahip olduğu görülmüştür (JSPDS: 00-0361451). En şiddetli ve keskin piklerin Z8 filmine ait olduğu görülmekte olup, Z6 ve Z7 filmlerine göre daha iyi kristallenme özelliği göstermektedir.



Şekil 4.5. III. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin XRD desenleri

Çizelge 4.1’de elde edilen ZnO filmlerine ait 2θ , D ve TC değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Elde edilen ZnO filmlerinin 2θ , D ve TC değerleri.

<u>Numune Kodu</u>	<u>(hkl)</u>	<u>$2\theta(^{\circ})$</u>	<u>D (nm)</u>	<u>TC</u>
Z1	(100)	31,769	48	1,04
	(002)	34,413		1,85
	(101)	36,255		0,71
	(102)	47,547		1,00
	(110)	56,497		0,39
Z2	(100)	31,730	38	0,51
	(002)	34,386		2,16
	(101)	36,181		0,33
Z3	(100)	31,788	46	0,33
	(002)	34,431		2,47
	(101)	36,231		0,21
Z4	(100)	31,769	17	1,09
	(002)	34,424		1,41
	(101)	36,245		0,73
	(102)	47,615		1,03
	(110)	56,385		0,74
Z5	(100)	31,773	43	0,94
	(002)	34,433		1,93
	(101)	36,264		0,75
	(102)	47,588		0,76
	(110)	56,668		0,62
Z6	(100)	31,689	26	0,99
	(002)	34,331		1,46
	(101)	36,145		0,55
Z7	(100)	31,767	37	1,10
	(002)	34,390		1,42
	(101)	36,249		0,74
	(110)	56,601		0,74
Z8	(100)	31,783	40	1,19
	(002)	34,415		1,48
	(101)	36,266		0,77
	(102)	47,561		0,77
	(110)	56,616		0,80

Farklı çözelti parametreleriyle hazırlanan çözeltiler ile elde edilen ZnO filmlerinde, D ve TC değerlerinin çözelti parametreleriyle önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. ZnO filmlerinin D değerleri 17-48 nm arasında değişmekte olup en büyük değerler Z1 ve Z3 filmlerine aittir. Hesaplanan TC değerleri, her bir filmin maksimum tercihli yöneliminin (002) değerini vermekte olup, en yüksek değer Z3 filmine aittir.

Çizelge 4.2’de verilen örgü sabiti değerleri, ZnO’ya ait JCPDS kartındaki (JSPDS: 00-0361451, $a=3,24982$, $c=5,20661$) değerlere yakın değerler olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2. Elde edilen ZnO filmlerinin örgü sabiti değerleri

<u>Numune Kodu</u>	<u>a (nm)</u>	<u>c (nm)</u>
Z1	3,24983	5,20796
Z2	3,25363	5,21200
Z3	3,24786	5,20536
Z4	3,24977	5,20630
Z5	3,24941	5,20506
Z6	3,25776	5,22002
Z7	3,24998	5,21128
Z8	3,24843	5,20768

4.2. Elde Edilen ZnO Filmlerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) Görüntüleri

4.2.1. Giriş

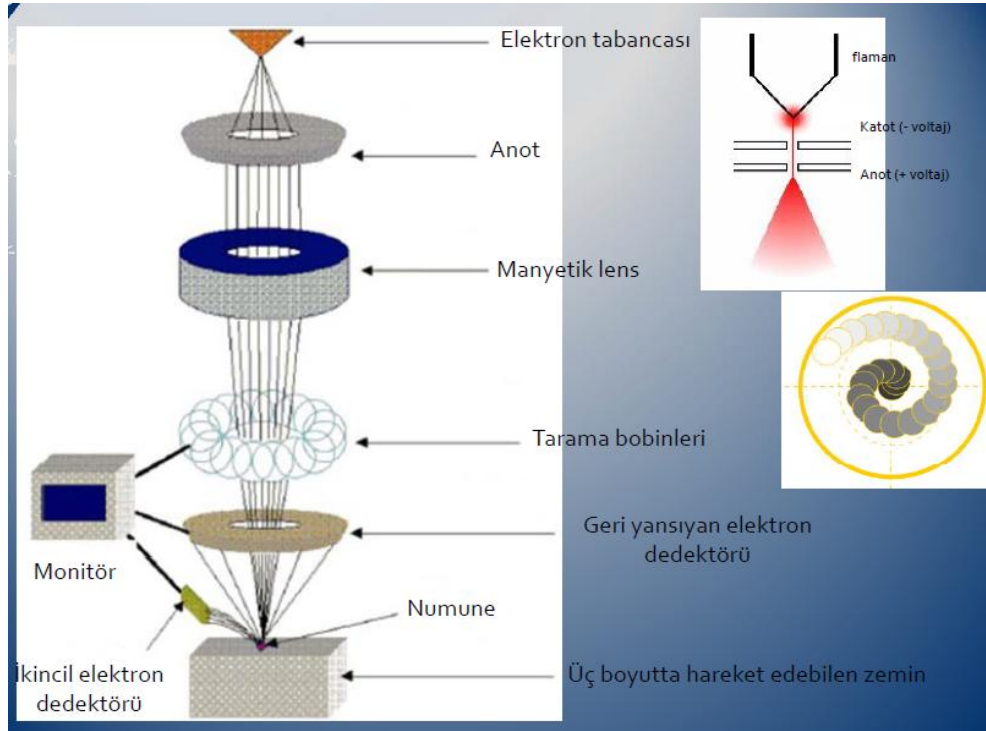
Görme ve görüntü üretme, nesnelere yansıyan ışınların işlenmesine bağlı olduğundan, çözünürlüğün artırılarak daha küçük ölçeklere inilebilmesi için, görünür ışığından çok daha kısa dalga boylarına inilmesi gerekmiştir. Kuantum mekaniğinin sınırları çözüldükçe, dikkatler elektronun düşük enerjilerde sergilediği dalga davranışına odaklanmıştır. Sonuç olarak, 1933 yılında Max Knoll ve Ernst Ruska adlı iki Alman bilim adamı görüntüyü oluşturmak için, foton yerine elektronları kullanan elektron mikroskobunu keşfetmişlerdir.

Elektro optik prensipler çerçevesinde tasarlanmış taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-FESEM), bu amaca hizmet eden cihazlardan birisidir. Taramalı Elektron Mikroskobu, birçok dalda araştırma- geliştirme çalışmalarında

kullanımı yanında, mikro elektronikte yonga üretiminde, sanayinin değişik kollarında hata analizlerinde, biyolojik bilimlerde, tıp ve kriminal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.2.2. FESEM görüntülerinin oluşumu

FESEM’de görüntü oluşumu yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektron demetinin inceleme yapılacak alan üzerine odaklanıp, seçilen yüzeyi taraması prensibine dayanmaktadır. Bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bilgisayar ekranına aktarılmasıyla elde edilmektedir. Şekil 4.6’da FESEM cihazında görüntü oluşumunun şematik gösterimi verilmiştir. FESEM, Optik Kolon, Numune Hücresi ve Görüntüleme Sistemi olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.



Şekil 4.6. FESEM’de görüntü oluşumunun şematik gösterimi

Optik kolon bölümünde, elektronlara yüksek gerilim uygulayarak numuneye doğru hızlanmasını sağlayan anot plakası elektron tabancası denilen kısımda yer almaktadır. Ayrıca, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler,

demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta aparatlar ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Elektron demetini, elektromanyetik alan ile inceltmek veya numune üzerine odaklama işlemine mercek sistemleri gerçekleştirmektedir. Tüm optik kolon ve numune 10^{-4} Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır. Görüntüleme sisteminde, elektron demeti ile numune arasında esnek olmayan çarpışmalar girişimi sonucunda oluşan birtakım elektronlar ve işımaları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır. Elde edilen bu görüntülerden, numuneye ait homojenlik, pürüzlülük, tanecik boyutu gibi morfolojik özellikler hakkında bilgi edinilmektedir.

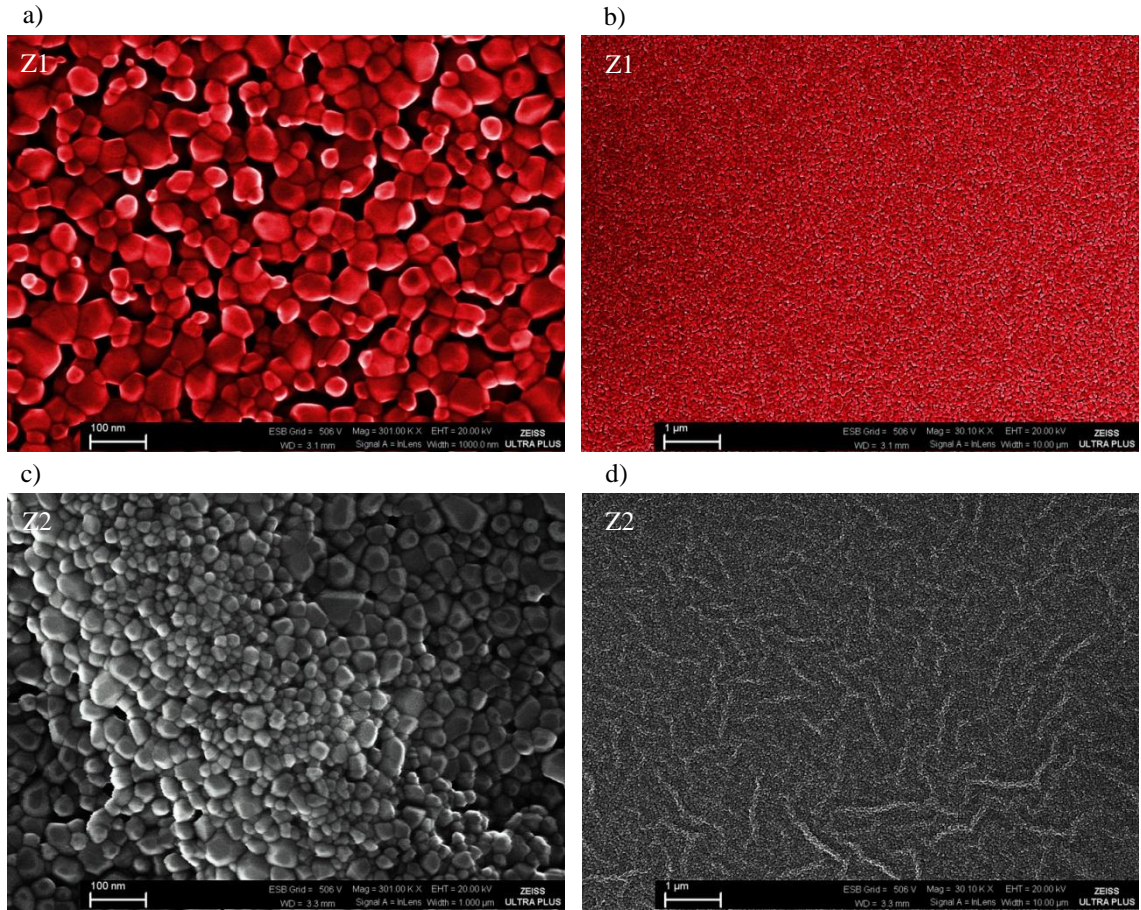
4.2.3. ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri

Bu çalışmada, üretilen ZnO filmlerinin yüzey morfolojisi hakkında bilgi edinmek için Şekil 4.7’de verilen ZEISS ULTRAPLUS marka FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) cihazı kullanılmıştır. Elde edilen FESEM görüntüleri Şekil 4.8-4.10’da verilmektedir.

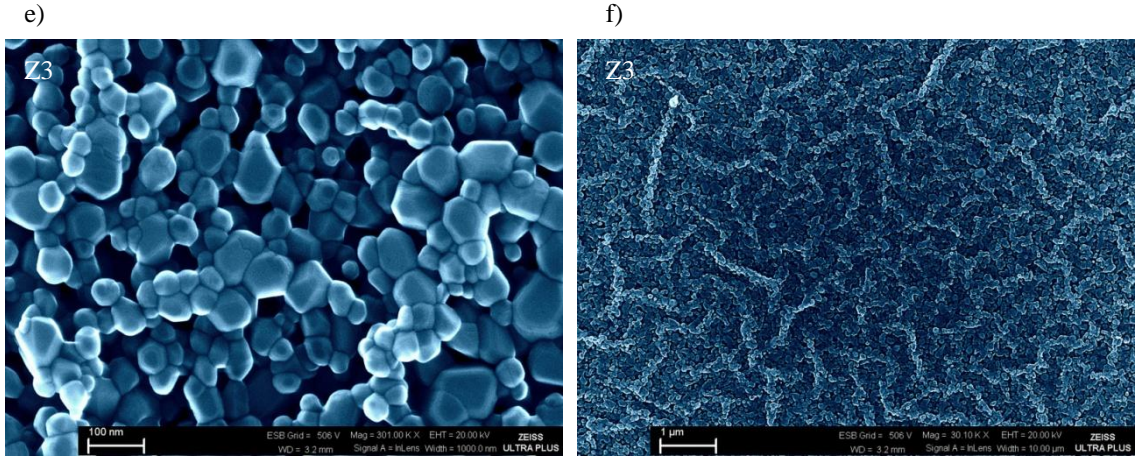


Şekil 4.7. ZEISS ULTRAPLUS marka FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) cihazının fotoğrafı

Şekil 4.8’de I. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri yer almaktadır. ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri 30000 ve 300000 kez büyütülmüş olarak elde edilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, Z1 ve Z3 filmlerinin Z1 filmine göre daha büyük tanecik yapısına (40-50 nm) sahip olduğu görülmekte olup XRD sonuçlarından hesaplanan D değerleriyle uyum içerisindedir. Z1 filminin yapısında tanecikler arasında boşluklar bulunmaktadır. Z2 filmine ait FESEM görüntülerinde film yüzeyinin wrinkle yapıda olduğu, tanecik boyutunun diğer filmlere göre daha küçük yapıda (30-40 nm) olduğu görülmektedir. Z3 filmine ait FESEM görüntülerinde ise tanecik sınırları diğer filmlere göre daha keskin ve belirgindir. Tanecikler arasında çok az boşluk bulunmaktadır. Film alttaşı yüzeyine homojen olarak dağılmış olup wrinkle bir yapı sergilemektedir.

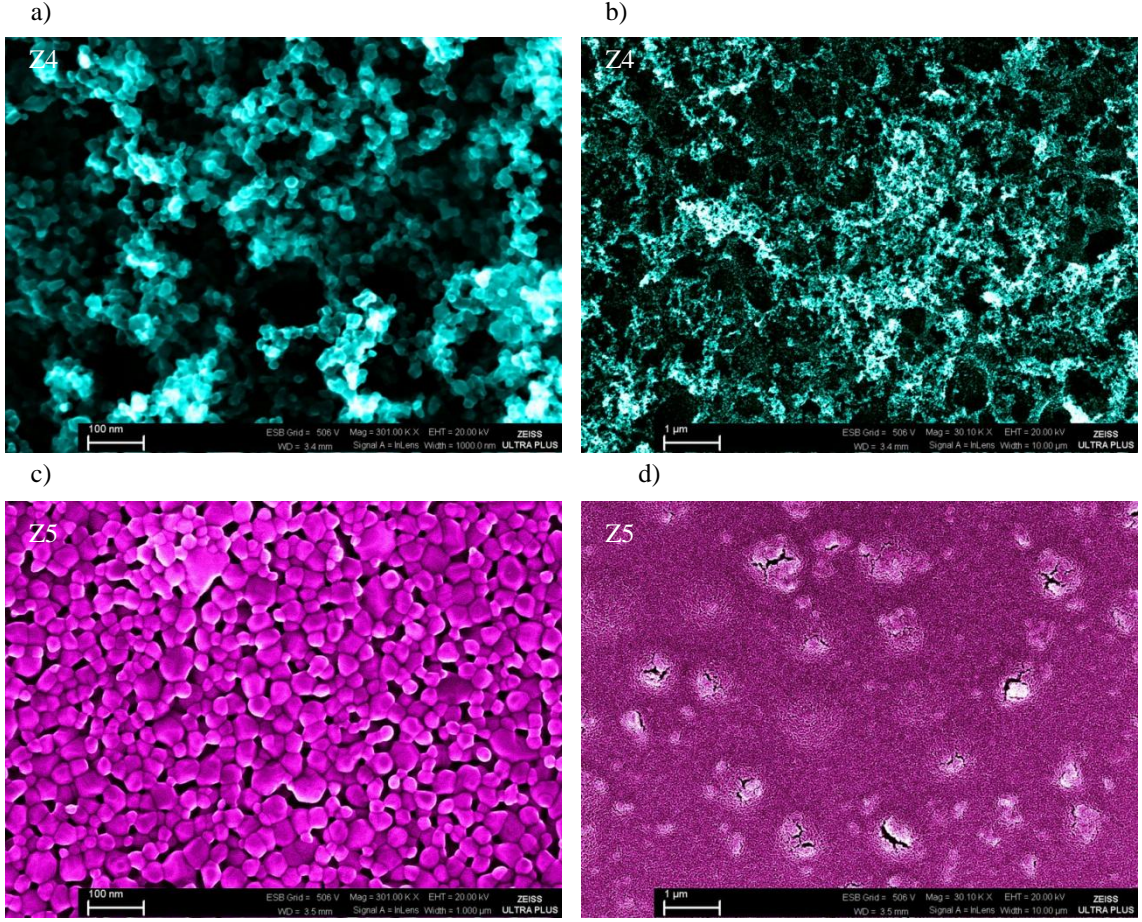


Şekil 4.8. I. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin (a), (c), (e) 300000 büyütmede ve (b), (d), (f) 30000 büyütmede FESEM görüntüleri



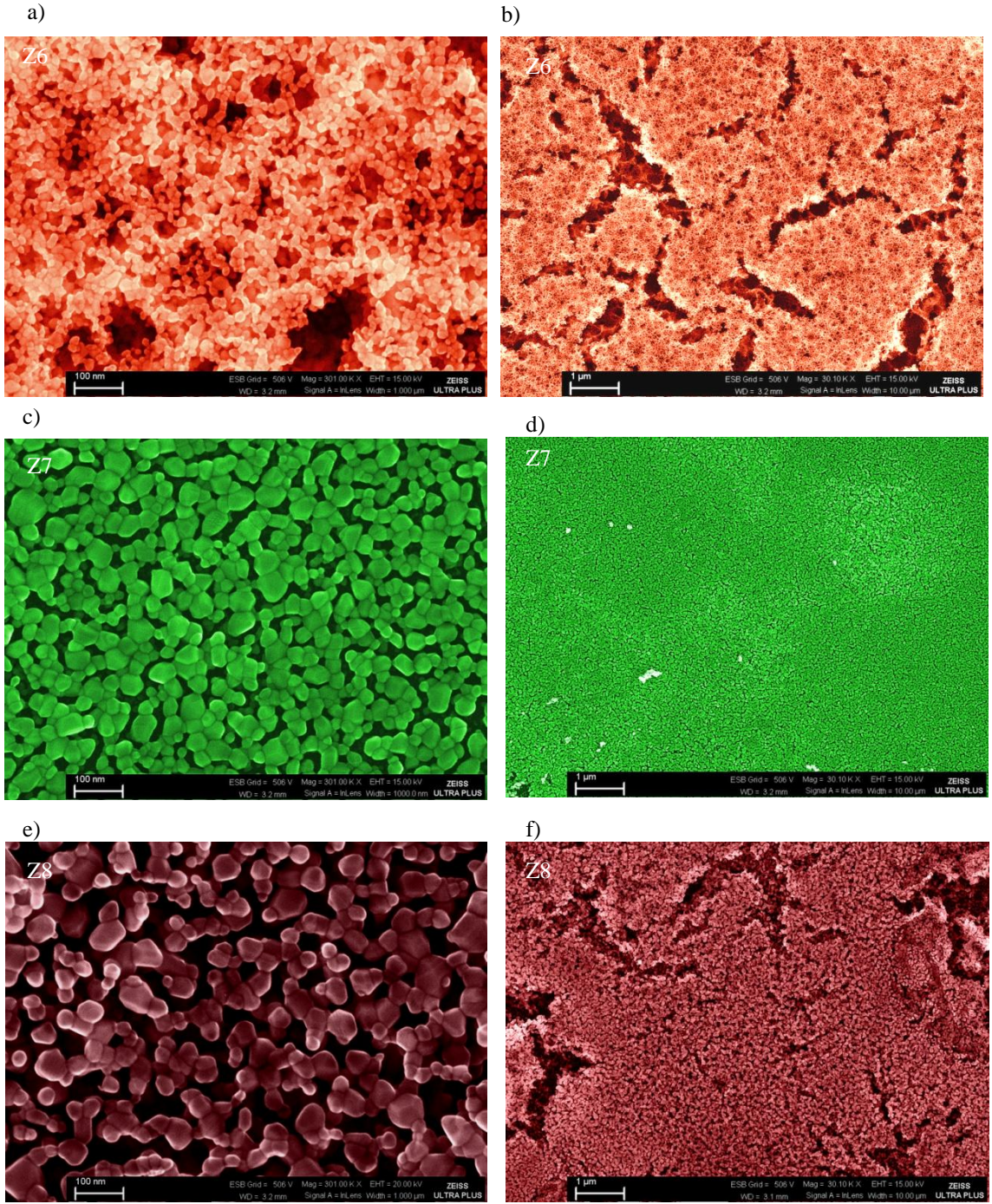
Şekil 4.8.(Devam) I. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin (a), (c), (e) 300000 büyütmede ve (b), (d), (f) 30000 büyütmede FESEM görüntüleri

Şekil 4.9’da II. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri yer almaktadır. Z4 filmine ait görüntüler incelendiğinde, filmin alttaş yüzeyine homojen olarak dağılmadığı, taneciklerin sınırlarının belirgin olmadığı, aralarda büyük boşlukların olduğu görülmektedir. Z5 filmine ait görüntülerde filmin alttaş yüzeyine homojen olarak dağıldığı ve keskin sınırlı taneciklere sahip olduğu görülmektedir. Z5 filminin tanecik boyutunun (40-50 nm), Z4 filminin tanecik boyutuna (10-20 nm) göre daha büyük olduğu görülmüştür ve XRD sonuçlarıyla uyum içerisindedir.



Şekil 4.9. II. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin (a), (c) 300000 büyütmede ve (b), (d) 30000 büyütmede FESEM görüntüleri

Şekil 4.10'da III. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri yer almaktadır. Görüntüler incelendiğinde, Z6 filminin diğer filmlere göre gözenekli yapıda olduğu, alttaş yüzeyine homojen olarak dağılmadığı görülmektedir. Filmin tanecik boyutu (20-30 nm) diğer filmlere göre daha küçük yapıdadır. Z7 filminde tanecik boyutunda (30-40 nm) artış gözlenmektedir. Tanecikler keskin sınırlıdır fakat aralardaki mesafeler geniştir. Z8 filminin tanecik boyutları (30-40 nm) Z7 filminin tanecik boyutuna yakın değerlerde olup, tanecik sınırları keskin ve arada boşluklar bulunmamaktadır.



Şekil 4.10. III. Tip çözeltiler kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin (a),(c),(e) 300000 büyütmede ve (b), (d), (f) 30000 büyütmede FESEM görüntüleri

4.3. Elde Edilen n-ZnO/p-Si Heteroeklem Diyotların Elektriksel Karakterizasyonları

4.3.1. Giriş

En iyi kristal yapılanmanın ve yüzey morfolojilerinin en pürüzsüz olduğu belirlenen Z3, Z5 ve Z8 filmlerine omik kontaklar atılarak n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotların fabrikasyonu yapılmıştır. Z3 filmi ile fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyot D1, Z5 filmi ile fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyot D2, Z8 filmi ile fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyot D3 olarak adlandırılmıştır. $I-V$ ölçümleri yapılarak elde edilen verilerle yarı logaritmik $I-V$ grafikleri çizilmiştir. Bu grafiğin doğru beslem bölgesindeki lineer bölgenin eğiminden engel yüksekliği (n), akım eksenini kestiği noktadan ise idealite faktörü (ϕ_b) hesaplanmıştır [2]. Fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların $F(V)-V$ grafikleri çizilerek, grafiklerin minimum noktası olan $F(V_o)$ değerlerinden ϕ_b hesaplanmıştır. $F(V)$ değerinin minimum noktasındaki I_0 değeri kullanılarak heteroeklem diyotların R_s değerleri hesaplanmıştır.

4.3.2. Heteroeklem diyotların $I-V$ karakterizasyonları

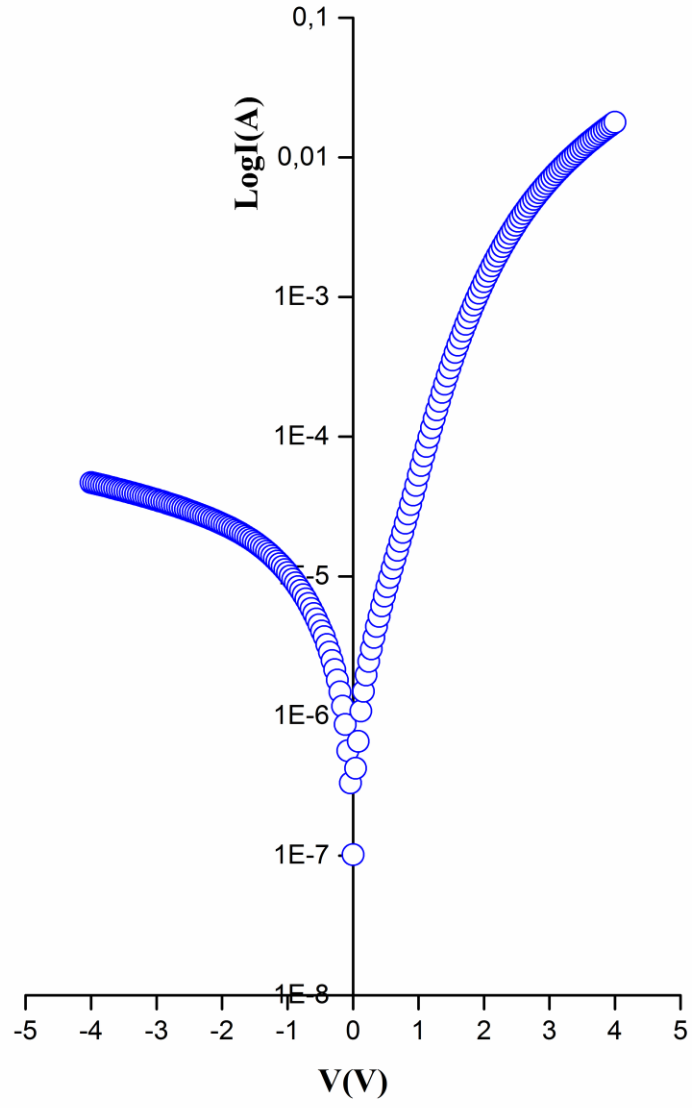
Fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların $I-V$ karakterizasyonları Şekil 4.11’de verilen KEITHLEY 2400 $I-V$ kaynağı ile incelenmiştir. Heteroeklem diyotların $I-V$ ölçümleri oda sıcaklığında alınmıştır.



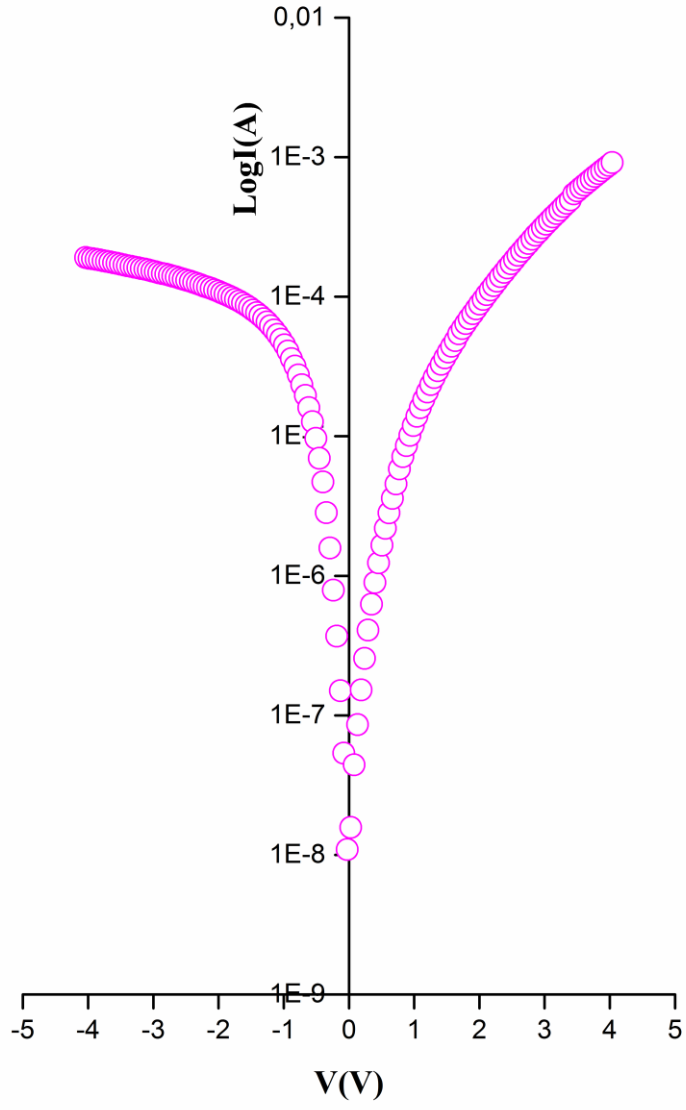
Şekil 4.11. KEITHLEY 2400 $I-V$ kaynağının fotoğrafı

Şekil 4.12- 4.14'te D1, D2 ve D3 heteroeklem diyotlarının yarı-logaritmik $I-V$ grafikleri verilmiştir. Grafiklerin doğru beslem bölgesindeki eğiminden n değerleri Denklem 2.7 kullanılarak, D1, D2, D3 heteroeklem diyotları için sırasıyla 10,10; 28,11 ve 7,34 olarak bulunmuştur. İdeal bir diyota ait n değeri 1 olmalıdır. Fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların n değerlerinin 1'den büyük olmasının nedeni metal ve yarıiletken arasında oluşan ara yüzey tabakasının akım iletimini etkilemesi olarak açıklanabilir. Güzel, doktora tezinde [21], metal ve yarıiletken arasında oluşan ara yüzey tabakası nedeniyle bölgeye düşen voltajın azalmakta olduğunu ve bu durumun da engel yüksekliğinin değişimine sebep olduğunu rapor etmiştir. Bu durum heteroeklem diyotları ideallikten uzaklaştırırken, engel yüksekliğinin uygulanan voltaja bağlılığını göstermektedir. Shaivalini Singh ve Chakrabarti [22], ZnO ince filmlerini üç farklı film üretme yöntemiyle elde etmişlerdir. Sol-jel spin kaplama yöntemiyle fabrikasyonunu yaptıkları diyotun idealite faktörünü 9,04 bulmuşlardır. Aksoy ve Çağlar [8] da yaptıkları çalışmada, n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotun idealite faktörünü 6,40 olarak bulmuşlardır. Bu değerlerin nedenini iki yarıiletken arasındaki seri direnç ve arayüz durumlarından kaynaklandığını rapor etmişlerdir.

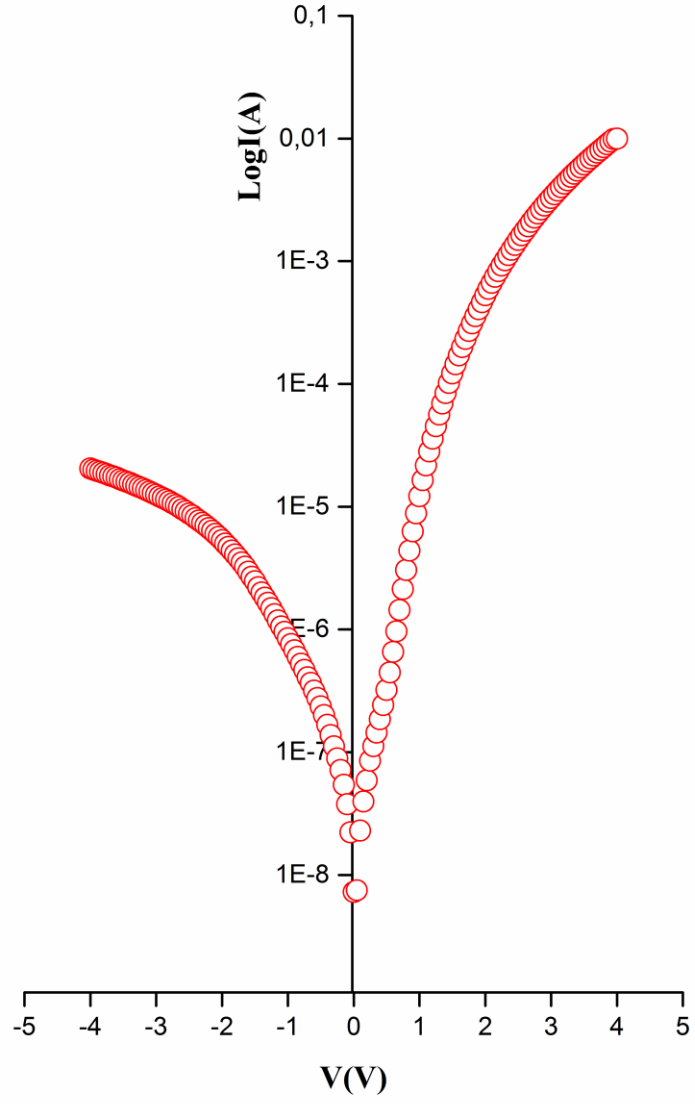
Fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların $I-V$ grafiklerinin doğru beslem bölgesindeki kesme noktasından ϕ_b değerleri Denklem 2.10 kullanılarak hesaplanmış ve D1, D2 ve D3 heteroeklem diyotları için sırasıyla 0,61; 0,57; 0,69 eV bulunmuştur. Lee ve arkadaşları [23], yaptıkları çalışmada n-ZnO/p-Si heteroeklem diyot fabrikasyonu yapmışlar ve diyotun bariyer yüksekliğini 0,56 eV olarak bulmuşlardır. Singh ve arkadaşları [24], sol-jel spin kaplama yöntemini kullanarak, n-ZnO/ p-Si heteroeklem diyotun bariyer yüksekliğini 0,73 eV bulmuşlardır. Bu sonuçların, fabrikasyonu yapılan D1, D2 ve D3 heteroeklem diyotlar için bulunan sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12. DI heteroeklem diyotunun yarı-logaritmik I-V grafiği

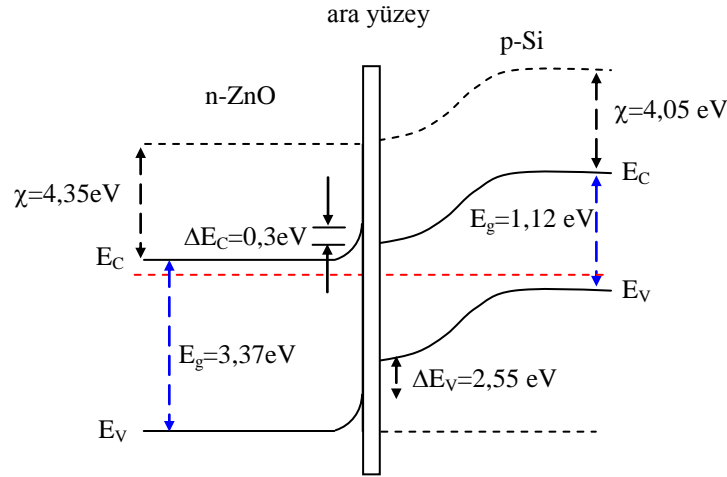


Şekil 4.13. D2 heteroeklem diyotunun yarı-logaritmik I-V grafiği



Şekil 4.14. D3 heteroeklem diyotunun yarı-logaritmik I-V grafiği

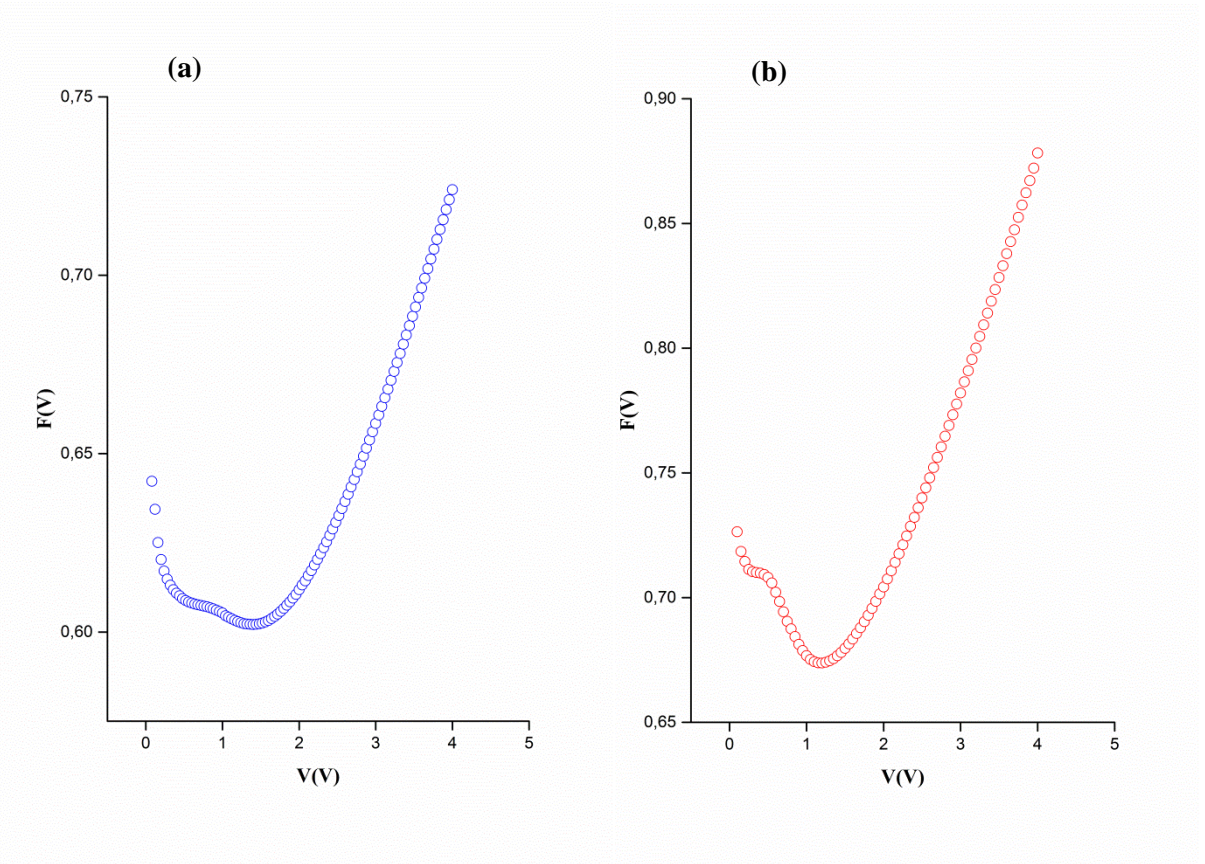
Şekil 4.15'te p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotun enerji-band diyagramı verilmiştir. Burada E_c iletim bandı sınırı, E_v valans bandı sınırı, E_g yasak enerji aralığı ve χ elektron ilgisidir. Diyagramda $E_{g(Si)}$; 1,12 eV, $E_{g(ZnO)}$; 3,37 eV, $\chi_{(Si)}$; 4,05 eV, $\chi_{(ZnO)}$; 4,35 eV değerleri kullanılmıştır. Valans bandındaki band süreksizliği, iletim bandına göre geniştir. Bu durum, diyotun ileri beslenmesi durumunda çok yüksek akım geçirirken, ters beslenmesi durumunda çok küçük akım geçireceği şeklinde yorumlanmıştır [25].



Şekil 4.15. p-Si/n-ZnO heteroeklem diyotunun enerji-band diyagramı

Fabrikasyonu yapılan D1 ve D3 heteroeklem diyotlarının $F(V)$ - V grafikleri Şekil 4.15 ve 4.16'da verilmiştir. D2 diyotuna ait idealite faktörünün çok yüksek değerde çıkması nedeniyle $F(V)$ - V grafiğinde istenilen sonuçlar elde edilememiştir. Engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini hesaplamak için Norde tarafından ortaya atılan metod kullanılmıştır. $F(V)$ - V grafiklerinin minimum değerleri bulunarak bariyer yükseklikleri Denklem 2.12 kullanılarak, D1 ve D3 heteroeklem diyotları için sırasıyla 0,70; 0,80 eV olarak hesaplanmıştır. Yılmaz ve arkadaşları [26], fabrikasyonunu yaptıkları ZnO/ p-Si diyotunun bariyer yüksekliğini norde metoduyla hesaplamışlar ve 0,78 eV bulduklarını rapor etmişlerdir. Soylu ve arkadaşları [27], yaptıkları çalışmada norde metodunu kullanarak hesapladıkları bariyer yüksekliği değerini 0,79 eV olarak bulduklarını rapor etmişlerdir.

Diyotların R_s değerleri ise $F(V)$ - V grafik eğrilerinin minimum $F(V_0)$ değerleri bulunduktan sonra Denklem 2.13 kullanılarak, D1 ve D3 heteroeklem diyotları için sırasıyla 20 ve 271 k Ω olarak bulunmuştur. D1 diyotu için bulunan değer Yılmaz ve arkadaşlarının [26] yaptıkları çalışmada buldukları sonuçla (31 k Ω) yaklaşık değerde olduğu gözlemlenmiştir. Baturay ve arkadaşları [28], sol jel spin kaplama yöntemini kullanarak n-ZnO/p-Si heteroeklem diyot fabrikasyonu yapmışlar ve norde metodunu kullanarak hesapladıkları seri direnç değerini 4748 k Ω olarak bulmuşlardır. Yüksek seri direnç değerleri heteroeklem diyotların ideallikten uzaklaştığını göstermektedir.



şekil 4.16. (a) D1, (b) D3 heteroeklem diyotlarına ait $F(V)$ - V graafikleri

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada; farklı başlangıç tuzları ve çözücüler ile hazırlanan çözeltiler kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine sol-jel spin kaplama yöntemiyle ZnO filmleri elde edilmiştir. Elde edilen ZnO filmlerinin yapısal ve morfolojik özellikleri XRD ve SEM cihazları yardımıyla araştırılmıştır. En iyi kristallenme gösteren filmlere uygun kontaklar (Al ve Au) atılarak heteroeklem diyot fabrikasyonu yapılmıştır. Fabrikasyonu yapılan n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotların elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır.

ZnO filmleri, üç farklı tipte çözelti hazırlanılarak elde edilmiştir. Elde edilen filmlerin ilk olarak XRD desenleri incelenmiştir. Filmlerin (100), (002), (101), (102) ve (110) yönelimlerinde piklere sahip olduğu görülmüş olup, hekzagonal wurtzite yapıda oldukları gözlenmiştir (JSPDS: 00-0361451). Filmlerin XRD desenlerinden D , TC ve (a ve c) hesaplanmıştır. ZnO filmlerinin D değerleri 17-48 nm arasında değiştiği, en yüksek değerlerin Z1 ve Z3 filmlerine ait olduğu gözlemlenmiştir. Filmlerin (002) yönelimindeki TC değerleri 0,28 ile 0,82 arasında değişmekte olup, en yüksek değer Z3 filmine ait olduğu görülmüştür. Hesaplanan örgü sabiti değerlerinin ZnO'ya ait JCPDS kartındaki (JSPDS: 00-0361451, $a=3,24982$, $c=5,20661$) değerler ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, ZnO filmlerinin FESEM görüntüleri ile de uyum içerisinde [29].

Elde edilen ZnO filmlerinin yapısal ve morfolojik özellikleri incelendikten sonra, en iyi film oluşumu gözlenen filmlere kontaklar (Al ve Au) atılarak heteroeklem diyot fabrikasyonu yapılmıştır. Bu filmler, I. tip çözeltiler hazırlanarak elde edilen Z3, II. tip çözeltiler hazırlanarak elde edilen Z5, III. tip çözeltiler hazırlanarak elde edilen Z8 numuneleridir. Fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotlara, Z3, Z5 ve Z8 filmleri için sırasıyla D1, D2, D3 kodları verilmiştir. Heteroeklem diyotların akım voltaj ölçümleri oda sıcaklığında alınmış olup elde edilen sonuçlar kullanılarak yarı logaritmik $I-V$ grafikleri çizilmiştir. Grafiklerin eğiminden n , akım eksenini kestiği noktadan ise ϕ_b hesaplanmıştır. n değerleri D1, D2, D3 heteroeklem diyotları için sırasıyla 10,10; 28,11 ve 7,34 bulunmuştur. Termoiyonik emisyon teorisine göre idealite faktörü 1 olmalıdır. Elde edilen heteroeklem diyotların 1'den büyük değerde çıkması, idealite faktörünün ara yüzey durumlarına ve ara yüzey tabakanın kalınlığına bağlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [30]. Heteroeklem diyotların ϕ_b değerleri, $I-V$ grafiklerinde akım eksenini kestiği noktadan bulunan I_0 doyma akım değeri kullanılarak hesaplanmış olup, D1, D2, D3 heteroeklem diyotları için sırasıyla, 0,61; 0,57; 0,69

olarak bulunmuştur. Heteroeklem diyot fabrikasyonu sırasında veya kimyasal temizleme esnasında, kristal yüzeyinin ortamdan kaynaklanan oksitlenmesi nedeniyle pratikte ideal diyot elde etmekte zorlanılmaktadır [31].

Fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların, seri direnç ve engel yüksekliği değerlerini hesaplamak için norde metodu kullanılmıştır. D1 ve D3 heteroeklem diyotların $F(V)$ - V grafikleri çizilerek, $F(V_0)$ değerlerinden ϕ_b ; D1, ve D3 heteroeklem diyotları için sırasıyla 0,70; 0,80 eV olarak hesaplanmıştır. D2 heteroeklem diyotunun yüksek idealite faktörü gibi olumsuz özelliklerinden dolayı $F(V)$ - V grafiği çizilememiştir. D1 ve D3 heteroeklem diyotlar için bulunan değerlerin I - V grafiklerinden hesaplanan değerlerle uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. MY kontaklar arasındaki kirli film katmanının veya parçacıklarının neden olduğu, ayrıca yarıiletken arasındaki düzensiz katkıların yüksek özdirençli bölgeler meydana getirmesi nedeniyle meydana gelen seri direnç (R_s) değeri; D1 ve D3 heteroeklem diyotları için sırasıyla 20 ve 271 k Ω olarak hesaplanmıştır. R_s , I - V eğrilerinin yüksek voltaj bölgesinde aşağı doğru bükülmesine ve dolayısı ile heteroeklem diyotun ideallikten sapmasına neden olmaktadır [30].

Farklı çözelti parametrelerinin, elde edilen filmlerin yapısal, morfolojik ve elektriksel karakterizasyonu üzerinde etkisinin oldukça fazla olduğu görülmüştür. Başlangıç tuzu olarak çinko asetat dehidrat, çözücü olarak etanol, sabitleyici olarak ise etanolamin kullanılarak p-Si alttaşlar üzerine elde edilen Z3 filmi, yapısal ve morfolojik açıdan en iyi özellik gösteren filmidir. Bu film kullanılarak fabrikasyonu yapılan D1 heteroeklem diyotunun elektriksel açıdan en iyi değerlere sahip olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Neamen, D. (2012). *Yarıiletken fiziği*. (Çev: M. Sağlam, A. Ateş). İstanbul: Aktif.
- [2] Çetinkaya, S. (2011). *Al/ZnO/p-Si ve Au/CuO/p-Si Schottky yapıların farklı metotlarla elde edilmesi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Hatay: Mustafa Kemal Üniversitesi.
- [3] Aydın, G. (2009). *Sn/p-Si Schottky diyot karakteristiklerine doğal oksit tabakasının etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. Hatay: Mustafa Kemal Üniversitesi.
- [4] Bari, A.R., Shinde, M.D., Deo, V., Patil, L.A. (2009). Effect of solvents on the particle morphology of nanostructured ZnO. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 47, 24-27.
- [5] Foo, K.L., Kashif, M., Hashim, U., Usman Ali, S.M., Willander, M. (2012). Study of ZnO thin film on silicon substrate by sol-gel spin coating method for bio-medical application. *International Conference on Biomedical Engineering*. DOI: 10.1109/ICoBE.2012.6179009
- [6] Vajargah, P.H., Abdizadeh, H., Ebrahimifard, R., Golobostanfard, M.R. (2013). Sol-gel derived ZnO thin films: effect of amino-additives. *Applied Surface Science*, 285, 732–743.
- [7] Foo, K.L., Kashif, M., Hashim, U., Liu, W. (2014). Effect of different solvents on the structural and optical properties of zinc oxide thin films for optoelectronic applications. *Ceramics International*, 40, 753–761.
- [8] Aksoy S. ve Çağlar Y. (2012). Effect of ambient temperature on electrical properties of nanostructure n-ZnO/p-Si heterojunction diode. *Superlattices and Microstructures*, 51, 613–625.
- [9] Chebil, W., Fouzria, A., Fargic, A., Azead, B., Zaaboubd, Z., Sallette, V. (2015). Characterization of ZnO thin films grown on different p-Si substrate elaborated by sol gel spin-coating method. *Materials Research Bulletin*, 70, 719–727.
- [10] Kabra, V., Hashmi L., ve Malik, M. M. (2015). Fabrication and characterization of solution processed n-ZnO/p-Si nano heterojunction diode. *Materials Today: Proceedings*, 2, 4544–4549.

- [11] Turton, R. (2007). *Katıların Fiziği*. (Çev: Yoğurtçu, Y.K.). İstanbul: Aktif Yayınevi.
- [12] Dikici, M. (1993). *Katıhal Fiziğine Giriş*. Samsun: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları.
- [13] Yang, E.S. (2008). *Yarıiletken Devre Elemanlarının Temelleri*. (Çev: Leblebici, Y.). İstanbul: Yüce Yayın A.Ş.
- [14] Büğet, U. (1984). *Pn Eklemi Kristal Diyot Ve Tranzistörler*. Ankara: Meteksan.
- [15] Eun, J. ve Cooper, J.A. (1993). *High temperature ohmic contact technology to n-type GaAs*. Yüksek Lisans Tezi. Hindistan: Purdue Üniversitesi.
- [16] Pakma, O. (2008). *Metal/TiO₂/c-Si/metal yapılarında yüzey şartlarının elektriksel belirtkenler üzerindeki etkisi*. Doktora Tezi. Ankara: Ankara Üniversitesi.
- [17] Rhoderick, E.H. ve Williams, R.H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford: Clarendon Press.
- [18] Tüzemen, E.Ş. (2007). *ZnO ince filmlerinin eldesi ve aygıt üretimi için parametrelerinin optimizasyonu*. Doktora Tezi. Adana: Çukurova Üniversitesi.
- [19] Aşar, N. (2011). *Çinko oksit (ZnO) nanoyapıların sentezlenmesi ve sensör özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Üniversitesi.
- [20] Tozlu, N. (2011). *ZnO tabanlı yarıiletkenlerde metal kontak özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Adana: Çukurova Üniversitesi.
- [21] Güzel, T. (2015). *6H-SiC tabanlı schottky diyotların hazırlanması ve geniş sıcaklık aralığında elektriksel parametrelerinin incelenmesi*. Doktora Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- [22] Singh, S. ve Chakrabarti, P. (2013). Comparison of the structural and optical properties of ZnO thin films deposited by three different methods for optoelectronic applications. *Superlattices and Microstructures*, 64, 283–293.

- [23] Lee, J.D., Park, C.Y., Kim, H.S., Lee, J.J., Choo, Y.G. (2010). A study of conduction of ZnO film/p-Si heterojunction fabricated by photoinduced electrodeposition under illumination. *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 43, 1-6.
- [24] Singh, S., Hazra, P., Tripathi, S., Chakrabarti, P. (2015). Fabrication and experimental characterization of a sol–gel derived nanostructured n-ZnO/p-Si heterojunction diode. *Mater Sci: Mater Electron*, 26, 7829–7836.
- [25] Aksoy, S. (2017). *Sol jel spin kaplama yöntemiyle elde edilen nano yapılı metal oksit filmlerinin fiziksel karakterizasyonu*. Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [26] Yilmaz, M., Caldiran, Z., Deniz, A.R., Aydoğan, S., Gunturkun, R., Turut, A. (2015). *Appl. Phys. A*, 119, 547–552.
- [27] Soylu, M. ve Savas, O. (2013). Electrical and optical properties of ZnO/Si heterojunctions as a function of the Mg dopant content. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 29, 76–82.
- [28] Baturay, S., Ocak, Y.S., Kaya D. (2015). The effect of Gd doping on the electrical and photoelectrical properties of Gd:ZnO/p-Si heterojunctions. *Journal of Alloys and Compounds*, 645, 29–33.
- [29] Temel, M.N. ve Çağlar, Y. (2012). *Preparation and characterization of nanostructure zno thin films by sol–gel method using different solvents*. İtalya.
- [30] Akgül, K.B. (2015). *Aynı şartlar altında üretilen özdeş Au/n-Si (100) schottky diyotlarda karakteristik parametrelerin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- [31] Özmenteş, R. (2006). *Schottky diyotların karakteristik parametrelerinin belirlenmesinde frekans optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Van: Yüzüncü Yıl Üniversitesi.

http-1: <http://www.turkcebilgi.com/>

(Erişim tarihi: 22.02.2017)

http-2: http://www.selcuk.edu.tr/ileri_arge/birim/web/sayfa/ayrinti/5874/tr

(Erişim tarihi: 22.02.2017)