



**LANTANYUM (La) KATKILI ÇİNKO OKSİT (ZnO)  
FİLMLEİN BÜYÜTÜLMESİ VE  
KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Saman HABASHYANI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı**

**Nanomalzeme Bilim Dalı**

**Doç. Dr. Mehmet YILMAZ**

**2017**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**LANTANYUM (La) KATKILI ÇİNKO OKSİT (ZnO) FİMLERİN  
BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Saman HABASHYANI**

**NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI  
Nanomalzeme Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2017**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

LANTANYUM (La) KATKILI ÇİNKO OKSİT (ZnO) FİLMLEİN  
BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Doç. Dr. Mehmet YILMAZ danışmanlığında, Saman HABASHYANI tarafından hazırlanan bu çalışma 22/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı – Nanomalzeme Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oyçokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Çağrı ÇIRAK

İmza :

Üye : Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu **28/12/2017** tarih ve **51/10** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### LANTANYUM (La) KATKILI ÇİNKO OKSİT (ZnO) FİLMLERİN BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Saman HABASHYANI

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı  
Nanomalzeme Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

Bu çalışmada, çeşitli oranlarda (%0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.)) La (Lantanyum) katkıli Çinko Oksit (ZnO:La) ince filmleri cam ve *n*-Si altaşlar üzerinde kimyasal püskürtme yöntemi ile elde edilmiştir. Elektriksel ölçümler için ZnO:La filmlerinin üzerine Au (Altın) kontaklar termal buharlaştırma yöntemi ile büyütülmüş ve Schottky tipi aygıtlar (Au/ZnO:La/*n*-Si/Al) elde edilmiştir. X-ışını kırınım desenlerinden (XRD) filmlerin bazı yapısal parametreleri hesaplanmış ve filmlerin hegzagonal wurtzite kristal yapıya sahip oldukları tespit edilmiştir. ZnO:La filmlerin optik özellikleri UV spektroskopisi ile 350 nm-800 nm dalgaboyu aralığında incelenmiş ve filmlerin 3.12-3.30 eV arasında  $E_g$  (yasak bant aralığı) değerlerine sahip oldukları tespit edilmiştir. Filmlerin yüzey morfolojileri AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizleri ile incelenmiştir. Ayrıca elde edilen Schottky diyotlarının *I*-*V* (akım-gerilim) ve *C*-*V* (kapasite-gerilim) ölçümleri alınmıştır. Diyotların *I*-*V* ölçümlerinden *n* (idealite faktörü) ve  $\Phi_b$  (engel yüksekliği) gibi karakteristik diyot parametreleri *TE* (termiyonik emisyon) teorisi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca,  $\Phi_b$  ve  $R_s$  (seri direnç) değerleri Norde fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Farklı oranlarda La katkılanmış diyotların 100, 200, 500 ve 1000 kHz frekanslarda *C*-*V* ölçümleri alınmıştır.  $1/C^2$ -*V* grafiğinden engel yüksekliği,  $E_f$  (fermi enerji seviyesi),  $N_d$  (taşıyıcı yoğunluğu) ve  $V_d$  (difüzyon potansiyeli) gibi diyot parametreleri elde edilmiştir. Tüm sonuçlar ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

2017, 108 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** yarıiletken, çinko oksit, ZnO:La ince film, kimyasal püskürtme tekniği, Schottky diyot, yapısal özellikler, morfolojik özellikler, optik özellikler, elektriksel özellikler

## ABSTRACT

Master's Thesis

### **GROWTH OF LANTHANUM (La) DOPED ZINC OXIDE (ZnO) FILMS AND INVESTIGATION OF THEIR CHARACTERIZATIONS**

Saman HABASHYANI

Atatürk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Nanoscience and Nanoengineering  
Department of Nanomaterials

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet YILMAZ

In this study, La-doped Zinc Oxide (Zn:La) films were obtained by chemical Spray pyrolysis on to soda-lime glass and *n*-Si substrates at various ratios of La (0%, 1%, 2%, 4% and 5% (at.%)) content. For electrical measurements, Au (gold) contacts on ZnO:La films were grown by thermal evaporation method and Schottky type devices (Au / ZnO: La / *n*-Si / Al) were obtained. Some structural parameters of the films were calculated from XRD (X-ray diffraction) patterns and all films were found to have hexagonal wurtzite crystal structure. The optical properties of ZnO:La films were investigated by UV spectroscopy wavelength range between 350 nm and 800 nm and the films were found to have a band gap between 3.12-3.30 eV. Surface morphologies of films were investigated by AFM (Atomic Force Microscopy) and SEM (Scanning Electron Microscopy) analyzes. Besides, *I-V* (current-voltage) and *C-V* (capacitance-voltage) measurements of Schottky diodes were obtained. Characteristic diode parameters such as *n* (ideality factor) and  $\Phi_b$  (barrier height) obtained by *I-V* measurements of devices were calculated by taking TE (thermionic emission) theory into consideration. Additionally,  $\Phi_b$  (barrier height) and  $R_s$  (series resistance) values were calculated by Norde function. *C-V* measurements of La-doped diodes at different ratios were taken at 100, 200, 500 and 1000 kHz frequencies. Basic diode parameters such as barrier height,  $E_f$  (fermi energy levels),  $N_d$  (carrier concentration) and  $V_d$  (diffusion potential) were calculated from  $1/C^2-V$  graph. All results were evaluated in detail.

**2017, 108 pages**

**Keywords:** semiconductor, zinc oxide, ZnO:La thin film, chemical Spray pyrolysis technique, Schottky diode, structural properties, morphological properties, optical properties, electrical properties

## TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma, Mühendislik Fakültesi Nano-Elektronik Laboratuvarında yapılmıştır. Çalışmalarım sürecinde ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen, her türlü desteğini gördüğüm ve bilgilerinden yararlandığım değerli hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a teşekkürlerimi arz ederim.

Bu çalışmamın gerçekleşmesi süresince bilimsel katkılarını gördüğüm, tecrübelerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım. Lisansüstü eğitimim ve tez yazım sürecinde teorik ve pratik bilgilerinden yararlandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Zakir ÇALDIRAN'a ve Sayın Uzm. Hatice KAÇUŞ'a teşekkürlerimi sunuyorum. Numunelerin hazırlamasında hiçbir yardımını esirgemeyen Sayın Ahmet ÖZMEN'e teşekkür ederim. Tez çalışmamın her aşamasında kolaylık sağlayan Atatürk Üniversitesi DAYTAM (Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezi) çalışanlarına ve yöneticilerine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni hep destekleyen aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

**Saman HABASHYANI**

**Aralık, 2017**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>7</b>
2.1. Yarıiletken Malzemeler .....	7
2.1.1. Asal yarıiletkenler .....	9
2.1.2. Katkılı yarıiletkenler.....	9
2.2. Yarıiletken Katkılama .....	10
2.2.1. <i>N</i> -Tipi yarıiletkenler .....	11
2.2.2. <i>P</i> -tipi yarıiletken.....	12
2.3. P-N Ekleme .....	14
2.3.1. P-N ekleminde akım iletimi .....	15
2.3.2. Doğru yönde besleme .....	16
2.3.3. Ters yönde besleme .....	16
2.3.4. P-N ekleminde optik olaylar.....	18
2.4. Metal-Yarıiletken Kontaklar .....	19
2.4.1. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar .....	20
2.4.2. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken omik kontaklar .....	23
2.5. Çinko Oksit (ZnO).....	25
2.5.1. ZnO'in genel özellikleri .....	26
2.5.2. ZnO'in kristal yapısı.....	27
2.5.3. ZnO'in elektriksel özellikleri .....	28
2.5.4. ZnO'in optik özellikleri.....	28
2.5.5. Katkılı çinko oksit .....	29
2.6. Lantanyum (La).....	30

2.7. ZnO Sentezleme Yöntemleri .....	30
2.7.1. Sol-jel yöntemi .....	32
2.7.2. Sol-jel döndürerek kaplama yöntemi (Spin coating).....	33
2.7.3. Sol-jel daldırarak kaplama yöntemi (Dip coating) .....	33
2.7.4. Sol-jel püskürterek kaplama yöntemi (Spray pyrolysis) .....	34
2.7.5. Saçtırma yöntemi (Sputtering) .....	34
2.7.6. Darbeli lazer biriktirme (PLD) .....	35
2.7.7. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) .....	35
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>36</b>
3.1. Giriş .....	36
3.2. Kimyasal Olarak Püskürtme (Spray Pyrolysis) Yöntemi.....	36
3.3. X-Işını Kırınım Metodu (XRD) .....	40
3.3.1. Kristal büyüklüğünün ölçülmesi .....	42
3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) .....	43
3.5. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) .....	46
3.6. UV Spektrometri .....	48
3.6.1. Optik soğurma .....	49
3.7. Au/ ZnO:La/n-Si/Al Schottky Diyotların Elektriksel Karakterizasyonu .....	51
3.7.1. Akım voltaj karakterizasyonu .....	52
3.7.2. Schottky diyotlarında C-V (kapasite-gerilim) karakteristikleri .....	53
3.8. Katkısız ve Lantanyum (La) Katkılı Çinko Oksit (ZnO) Çözeltisinin Hazırlanması.....	56
3.9. Kimyasal Temizleme Prosedürü .....	57
3.10. Schottky Kontakların Hazırlanması .....	58
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>60</b>
4.1. Giriş .....	60
4.2. XRD Ölçümleri .....	60
4.3. SEM görüntüleri ve EDAX ölçümleri.....	65
4.4. AFM Görüntüleri.....	69
4.5. Optik Ölçümler.....	75
4.6. Sıcak Prop Tekniği .....	77
4.7. I-V (Akım-Voltaj) Ölçümleri.....	78



4.8. C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümleri .....	84
<b>5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....</b>	<b>88</b>
5.1. Yapısal, Morfolojik ve Optik Karakterizasyon Sonuçları.....	88
5.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları .....	96
KAYNAKLAR .....	101
ÖZGEÇMİŞ .....	109



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$E_a$	Akseptör Enerji Seviyesi
$E_g$	Yasak Bant Aralığı
$I_0$	Sızıntı Akımı
$N_2$	Azot
$N_d$	Donor Yoğunluğu
$R_s$	Seri Direnç
$R_y$	Yansıma Oranı
$V_d$	Difüzyon Potansiyeli
$\epsilon_0$	Boşluğun Dielektrik Sabiti
$\epsilon_r$	Yarıiletkenin Bağlı Dielektrik Sabiti
$\epsilon_s$	Yarıiletkenin Dielektrik Sabiti
$\Phi_b$	Schottky Engel Yüksekliği
$\Phi_m$	Metalin İş Fonksiyonu
$\Phi_s$	Yarıiletkenin İş Fonksiyonu
$\chi_s$	Yarıiletkenin Elektron İlgisi
Å	Angström
A	Diyodun Etkin Alanı
$A^*$	Richardson Sabiti
Al	Alüminyum
Au	Altın
c	Işık Hızı
Ce	Seryum
cm	Santimetre
CSD	Kimyasal Çözelti ile Biriktirme
C-V	Kapasite-Gerilim
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
D	Kristal Büyüklüğü
DC	Dolaysız Akım

$E_c$	İletkenlik Bandının Tabanı (minimumu)
$E_d$	Donor Enerji Seviyesi
$E_f$	Fermi Enerji Seviyesi
$E_i$	İletkenlik bandı
$E_u$	Urbach enerjisi
eV	Elektronvolt
$E_v$	Valans Bandının Tepesi (Maksimumu)
$F(V)-V$	Norde Fonksiyonu
Fe	Demir
Ga	Galyum
h	Planck Sabiti
HCl	Hidroklorik Asit
HF	Hidroflorik Asit
I	Net Akım
ITO	İndium Kalay Oksit
I-V	Akım-Gerilim
K	Kelvin
k	Boltzmann Sabiti
kHz	Kilohertz
kV	Kilovolt
La	Lantanyum
LCD	Sıvı Kristal Ekran
ml	Mililitre
n	İdealite Faktörü
NH <sub>3</sub>	Amonyak
$N_a$	Akseptör Yoğunluğu
Na	Sodyum
Nd	Neodimyum
nm	Nanometre
OLED	Organik Işık Yayan Ekran
Pa	Pascal
PDP	Plazma Ekran

PLD	Darbeli Lazer Biriktirme
SAW	Yüzey Akustik Dalga Cihazları
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	Silisyum
SnO <sub>2</sub>	Kalay Oksit
<i>t</i>	Film Kalınlığı
T	Sıcaklık
Tb	Terbiyum
TC	Yapı Katsayısı
TCO	Şeffaf İletken Oksit
TE	Termiyonik Emisyon
TFT	İnce Film Tranzistör
TTFT	Geçirgen İnce Film Tranzistör
W	Watt
XRD	X-ışını Kırınımı
Zn	Çinko
ZnO	Çinko Oksit
$\delta$	Dislokasyon Yoğunluğu
$\theta$	Bragg Açısı
$\lambda$	Dalgaboyu
$\mu$	Saçtırma Verimi
$\mu\text{m}$	Mikrometre
$\sigma$	Standart Sapma

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Metal, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin bant aralığı, fermi enerji seviyesi, valans ve iletkenlik bant durumları .....	7
Şekil 2.2. Yarıiletkenlerin periyodik tablodaki durumları .....	9
Şekil 2.3. Fosfor ve Bor katkılanmış silisyum örgünün iki boyutlu gösterimi .....	10
Şekil 2.4. <i>N</i> -tipi bir yarıiletkende enerji bant diyagramındaki verici (donor) bandının durumu .....	12
Şekil 2.5. <i>P</i> -tipi bir yarıiletkende enerji bant diyagramındaki alıcı (akseptör) bandının durumu .....	13
Şekil 2.6. a) Temel bir p-n eklem yapının şematik görüntüsü b) denge durumunda bir p-n eklem yapının şematik görüntüsü .....	14
Şekil 2.7. a) p-n eklemi oluşmadan önce enerji seviyelerin durumu b) p-n eklemi oluşuktan sonra enerji seviyelerin durumu .....	14
Şekil 2.8. Doğru yönde beslenen bir p-n eklemine enerji bant diyagramı .....	16
Şekil 2.9. Ters yönde beslenen bir p-n eklemine enerji bant diyagramı .....	17
Şekil 2.10. İleri yönde ve ters yönde beslenen bir p-n eklemine <i>I-V</i> karakteristiği .....	18
Şekil 2.11. Bir p-n eklemi güneş pilinin şematik görüntüsü .....	19
Şekil 2.12. Kontakta önce metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı (Schottky kontakta önce) .....	21
Şekil 2.13. Kontakta sonra termal dengede metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletkenin doğrultucu (Schottky) kontakın enerji bant diyagramı .....	22
Şekil 2.14. Kontakta önce metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı (omik kontakta önce) .....	24
Şekil 2.15. Kontakta sonra termal dengede metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletkenin omik kontak enerji bant diyagramı .....	25
Şekil 2.16. Çinko Oksit (a) kayatuzu, (b) zinc-blende ve (c) wurtzite yapısı .....	28
Şekil 2.17. Şeffaf yarıiletken malzemenin spektrum dağılımı, $\lambda_{gap}$ bant aralığı soğurma dalgaboyu ve $\lambda_{pl}$ serbest elektron plazma soğurma dalgaboyu .....	29
Şekil 2.18. İnce film üretim teknikleri .....	32
Şekil 3.1. Damlacık boyutuna göre farklı depozisyon durumları .....	38

<b>Şekil 3.2.</b> Kimyasal püskürtme cihazının şeması.....	39
<b>Şekil 3.3.</b> Kimyasal püskürtme cihazı.....	39
<b>Şekil 3.4.</b> Kristal düzlemlerine düşen ve yansıyan ışının yol farkının şeması.....	41
<b>Şekil 3.5.</b> Taramalı elektron mikroskopun temel kısımları.....	44
<b>Şekil 3.6.</b> Atomik Kuvvet Mikroskopunda tarama işleminin şeması .....	47
<b>Şekil 3.7.</b> AFM cihazında tip ve numune arasındaki kuvvetlerin mesafeye bağlı olduğu diyagramı .....	48
<b>Şekil 3.8.</b> UV-Vis spektrometre cihazının şematik gösterimi.....	49
<b>Şekil 3.9.</b> <i>I-V</i> (Akım-voltaj) ve <i>C-V</i> (kapasite-voltaj) ölçüm sistemleri .....	52
<b>Şekil 3.10.</b> Au/ZnO:La/ <i>n</i> -Si/Al Schottky diyodun (a) şematik görüntüsü ve (b) fotoğrafı .....	59
<b>Şekil 4.1.</b> Farklı La katkı miktarı ile elde edilen filmlerin XRD desenleri.....	60
<b>Şekil 4.2.</b> Yapı katsayısı (TC) değerlerinin değişimi.....	61
<b>Şekil 4.3.</b> ZnO:La filmlerinin standart sapmaları .....	62
<b>Şekil 4.4.</b> (100), (002) ve (101) düzlemlerin ve hesaplanan ortalama kristal boyutu.....	62
<b>Şekil 4.5.</b> ZnO:La%0 filminin (a) EDAX spektrumu ve (b) SEM görüntüsü .....	65
<b>Şekil 4.6.</b> ZnO:La%1 filminin (a) EDAX spektrumu ve (b) SEM görüntüsü .....	66
<b>Şekil 4.7.</b> ZnO:La%2 filminin (a) EDAX spektrumu ve (b) SEM görüntüsü .....	67
<b>Şekil 4.8.</b> ZnO:La%4 filminin (a) EDAX spektrumu ve (b) SEM görüntüsü .....	68
<b>Şekil 4.9.</b> ZnO:La%5 filminin (a) EDAX spektrumu ve (b) SEM görüntüsü .....	69
<b>Şekil 4.10.</b> ZnO:La%0 filminin AFM görüntüsü.....	70
<b>Şekil 4.11.</b> ZnO:La%1 filminin AFM görüntüsü.....	71
<b>Şekil 4.12.</b> ZnO:La%2 filminin AFM görüntüsü.....	72
<b>Şekil 4.13.</b> ZnO:La%4 filminin AFM görüntüsü.....	73
<b>Şekil 4.14.</b> ZnO:La%5 filminin AFM görüntüsü.....	74
<b>Şekil 4.15.</b> Fraklı oranlarda (%0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.)) La katkılı ZnO ince filmlerin (ZnO:La) optik geçirgenlik spektrumu .....	75
<b>Şekil 4.16.</b> Farklı oranlarda (%0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.)) La katkılı ZnO ince filmlerin (ZnO:La) optik bant aralığının değişimi .....	76
<b>Şekil 4.17.</b> Farklı oranlarda (%0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.)) La katkılı ZnO ince filmlerin (ZnO:La) $\ln(\alpha)$ 'ya karşı $h\nu$ grafiği .....	76

<b>Şekil 4.18.</b> Çeşitli oranlarda La katkılı ZnO ince filmlerin voltaja (mV) karşı zaman (s) grafikleri.....	77
<b>Şekil 4.19.</b> Au/ZnO:La%0/n-Si/Al diyoduna ait $Ln(I)$ -V grafiği.....	78
<b>Şekil 4.20.</b> Au/ZnO:La%1/n-Si/Al diyoduna ait $Ln(I)$ -V grafiği.....	79
<b>Şekil 4.21.</b> Au/ZnO:La%2/n-Si/Al diyoduna ait $Ln(I)$ -V grafiği.....	79
<b>Şekil 4.22.</b> Au/ZnO:La%4/n-Si/Al diyoduna ait $Ln(I)$ -V grafiği.....	80
<b>Şekil 4.23.</b> Au/ZnO:La%5/n-Si/Al diyoduna ait $Ln(I)$ -V grafiği.....	80
<b>Şekil 4.24.</b> Au/ZnO:La%0/n-Si/Al, Au/ZnO:La%1/n-Si/Al, Au/ZnO:La%2/n-Si/Al, Au/ZnO:La%4/n-Si/Al ve Au/ZnO:La%5/n-Si/Al Schottky diyotlarına ait $Ln(I)$ -V grafikleri .....	81
<b>Şekil 4.25.</b> Au/ZnO:La%0/n-Si/Al, Au/ZnO:La%1/n-Si/Al, Au/ZnO:La%2/n-Si/Al, Au/ZnO:La%4/n-Si/Al ve Au/ZnO:La%5/n-Si/Al Schottky diyotlarının Norde fonksiyonu grafikleri.....	82
<b>Şekil 4.26.</b> Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarının $Ln(I)$ -V grafiğinden ve Norde fonksiyonundan hesaplanan idealite faktörü ve engel engel yükseklik değerlerinin La katkı oranına karşı değişimleri.....	83
<b>Şekil 4.27.</b> Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarının Norde fonksiyonundan hesaplanan seri direnç değerlerinin La katkı oranına karşı değişimleri.....	83
<b>Şekil 4.28.</b> Au/ZnO:La%0/n-Si/Al diyodunun f=100, 200, 500 ve 1000 kHz frekanslarda düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği .....	84
<b>Şekil 4.29.</b> Au/ZnO:La%1/n-Si/Al diyodunun f=100, 200, 500 ve 1000 kHz frekanslarda düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği .....	85
<b>Şekil 4.30.</b> Au/ZnO:La%2/n-Si/Al diyodunun f=100, 200, 500 ve 1000 kHz frekanslarda düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği .....	85
<b>Şekil 4.31.</b> Au/ZnO:%4La/n-Si/Al diyodunun f=100, 200, 500 ve 1000 kHz frekanslarda düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği .....	86
<b>Şekil 4.32.</b> Au/ZnO:%5La/n-Si/Al diyodunun f = 100, 200, 500 ve 1000 kHz frekanslarda düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği .....	86
<b>Şekil 4.33.</b> Farklı oranlarda La katkılı Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarına ait f=500 kHz sabit frekansta $1/C^2$ -V grafikleri .....	87

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Yarıiletkenler, donör ve akseptör atomları .....	11
Çizelge 2.2. ZnO'in fiziksel parametreleri .....	26
Çizelge 4.1. Standart ve hesaplanmış d değerleri arasındaki karşılaştırma .....	61
Çizelge 4.2. Çeşitli La katkılı ZnO filmlerin bazı yapısal parametrelerinin karşılaştırılması .....	63
Çizelge 4.3. Farklı oranlarda La katkılı Au/ZnO:La/n-si/Al diyotlarının <i>I-V</i> grafiğinden ve Norde fonksiyonundan hesaplanan temel diyot parametreleri .....	82
Çizelge 4.4. Farklı oranlarda La katkılı Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarının $1/C^2-V$ grafiğinden hesaplanan temel diyot parametreleri .....	87



## 1. GİRİŞ

Şeffaf iletken oksit (TCO) filmler üstün özelliklere sahiptirler, bu yüzden geçirgen elektrot olarak düz panel ekranlarda, fotovoltaik aygıtlarda, dokunmatik ekranlar gibi fotoelektronik cihazlarda ve ince film güneş pillerinde kullanılırlar (Maity *et al.* 2005; Kuo *et al.* 2006a; Lee *et al.* 2007; Rim *et al.* 2008). Şeffaf iletken oksit filmlerin görünür bölgede yüksek optiksel geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletkenlik özelliğini göstermelerinden dolayı ekran uygulamalarında sıkça kullanılırlar (Kuo *et al.* 2006a). Katkılı ve katkısız SnO<sub>2</sub> ve Indium Kalay Oksit (ITO) şeffaf iletken ince filmleri sıvı kristal ekranlarda (LCD), plazma ekranlarda (PDP) ve organik ışık yayan ekranlarda (OLED) kullanılırlar (Kuo *et al.* 2006b; Xu *et al.* 2006; Lee *et al.* 2007). Çinko oksitin (ZnO) fiyatının düşük olması, Çinko (Zn) elementinin indiyum (In) elementine göre doğada 1000 kat daha fazla olması ve sağlığa zararsız olması gibi nedenlerden dolayı ITO ince filmleri yerine kullanılabilir. Şeffaf iletken oksit ince filmlerin düşük taşıyıcı yoğunluğu öz direncinin yüksek olmasına neden olur. Şeffaf iletken oksit filmlerini katkılanarak taşıyıcı yoğunluğu artırılır. Literatür araştırmalarında ZnO ince filmleri Al, In, Ga gibi elementlerle katkılanmaktadır (Gomez *et al.* 2005; Lee *et al.* 2007; Hafdallah *et al.* 2011).

Kalınlığı 1µm'den büyük filmler kalın film ve 1µm'den küçük filmler ince film olarak tanımlanır. ZnO ince filmlerin görünür bölgede (400 -700 nm) geçirgen olması, yüksek elektro-kimyasal dayanıklılık ve numune yüzeyine iyi tutunmasından dolayı teknolojide çok tercih edilen şeffaf bir iletken oksit ince filmidir. ZnO yapısındaki Oksijen boşlukları ve çinko fazlalıkları gibi doğal kusurlardan dolayı, çinko oksit bir *n*-tipi yarıiletken özellik gösterir. Hegzagonal wurtzite yapısına sahip olan çinko oksit geniş ve direkt bir bant aralığına sahiptir ( $E_g \sim 3.37$  eV). Çinko oksitin örgü sabitleri  $a = 3.24927$  Å ve  $c = 5.20544$  Å olarak tespit edilmiştir (Wyckoff 1982). ZnO bir II-VI bileşik yarıiletkeni olarak oda sıcaklığında (300 K) büyük eksiton bağlanma enerjisine (60 meV) sahiptir (Kim and Park 2001). Bu özelliklerden faydalanarak, yüksek verimli mavi/UV ışık yayan diyotlar ve lazer ışığı üretilebilir (Alaie *et al.* 2015; Hwang *et al.* 2015; Iwan *et al.* 2015). Çinko oksit gaz sensörlerinde (Shen *et al.* 2005), geçirgen ince

film tranzistörlerinde (TTFT) (Nomura *et al.* 2003; Hoffman 2004), yüzey akustik dalga cihazlarında (SAW), güneş pillerinde ve ince film tranzistör (TFT) olarak sıkça kullanılır. ZnO ince filmleri görünür bölgede yüksek geçirgenlik ve yüksek elektriksel özelliğine sahip oldukları için güneş pili uygulamalarında alternatif materyal olarak kullanılabilir. Çinko oksit nanoparçacıklarının yüzeyi genel olarak hidrofildir ve bu özellikten faydalanarak, rüzgar ile su üreten sistemlerde (drew-harvesting) ZnO nanoparçacıkları kullanılmaktadır (Choo *et al.* 2015). Ayrıca çinko oksit nano parçacıklarından kendisini temizleyen yüzeyler üretilir (Khranovskyy *et al.* 2012). Çinko Oksit filmleri farklı yöntemler ile elde edilebilir. Darbeli lazer biriktirme (PLD) (Cho *et al.* 2009), saçırma (sputtering) (Song *et al.* 2002), kimyasal buhar biriktirme (CVD) (Ito *et al.* 2010), döndürerek kaplama ve kimyasal püskürtme (Bahadur and Rao 1992; Chen *et al.* 2008; Bouzrit *et al.* 2012), kimyasal çökeltme (Zamiri *et al.* 2014), mikrodalga destekli yöntemi (Korake *et al.* 2014), kimyasal çözelti ile biriktirme (CSD) (Tang *et al.* 2011), RF magnetron saçırma (Wei *et al.* 2007), ZnO ince film elde etmek için kullanılan bazı yöntemlerdir.

Optoelektronik cihaz teknolojisinde kullanılan ZnO filmlerin yasak bant aralığının değiştirilebilirliğinden dolayı çok ümit verici bir malzemedir. Çinko oksitin bant aralığının değiştirilmesi farklı yoğunluklarda ve farklı malzemelerin katkılanması ile sağlanır. Literatür çalışmalarında ZnO ince filmlerin özelliklerinin iyileştirilmesi, nadir toprak elementleri (La, Ce, Tb, Nd, ...) katkılanmasıyla gerçekleştirilmiştir (Fang *et al.* 2005; Ge *et al.* 2007; Cao *et al.* 2009). Nadir toprak elementleri özel katkı malzemesi olarak kendilerine özgü elektronik yapıya sahipler (Bhargava 1997). Çalışmada kullanılan Lantanyum elementi periyodik tabloda nadir toprak elementler grubunda, lantanidler element grubunun başında gelmektedir. Lantanyumun elektronik konfigürasyonu  $[Xe]5d^16s^2$  olarak gösterilir. Son yıllarda yapılan araştırmalarda ZnO ince filmleri, La elementinin farklı yoğunlukları ile katkılanmış ve farklı kaplama yöntemleri ile kaplanmıştır. Chen *et al.* (2008) tarafından yapılan çalışmada La katkılı ZnO ince filmleri sol-jel kaplama tekniği ile elde edilmiştir. Wei *et al.* (2007) tarafından yapılan çalışmada, magnetron saçırma yöntemi ile elde edilen katkısız ve Lantanyum katkılı çinko oksit filmlerinin yapısal, optiksel ve elektriksel özellikleri araştırılmıştır.

$Zn^{2+}$  iyonunun kaynağı olarak Çinko asetat dihidrat ( $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ ) ve  $La^{3+}$  iyonunun kaynağı için Lantanyum (III) nitrat hidrat ( $LaN_3O_9 \cdot xH_2O$ ) kullanılmıştır. Literature göre ultrasonik ve hava basınçlı (pneumatic) kimyasal püskürtme yöntemi ile ZnO, SnO<sub>2</sub> ve ZnS gibi şeffaf iletken oksit filmler elde edilebilmektedir (Agashe *et al.* 1988; Pike *et al.* 1993; Lee and Park 2004). Kimyasal püskürtme yöntemi basit ve ucuz olduğundan ve numunenin sıcaklığının rahatça kontrol edilebilme gibi avantajlı özelliklere sahiptir. Ayrıca kimyasal püskürtme yöntemi ile üretilen ince filmlerin özellikleri, diğer pahalı yöntemler ile üretilen ince filmlerin özellikleri ile kıyaslanabilecek mertebededir. Kimyasal püskürtme yönteminde filmlerin özelliklerini ve kalitelerini etkileyen birçok etken vardır, bunlardan; alttaşın sıcaklığı, başlık (nozül) ile püskürtülen damlacıkların boyutu, başlığın uç kısmı ile alttaş yüzeyi arasındaki mesafe ve püskürtülen çözeltinin miktarı, çok önemlidir.

Bu çalışmada La katkılı ZnO ince filmleri kimyasal püskürtme yöntemi ile elde edildi. Bu kapsamda ZnO'e %0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.) oranlarında La katkılı ve alttaşın sıcaklığı 270°C'ye sabitlenerek çözelti kuru hava yardımı ile numune yüzeyine püskürtüldü. Elde edilen ZnO:La ince filmlerin optik, morfolojik ve yapısal özellikleri incelendi.

Diğer yandan ZnO:La ince filmlerinin aygıt uygulamasını ve numunelerin elektriksel özelliklerini araştırmak amacıyla metal-yarıiletken Schottky aygıtlar yapıldı ve karakterize edildi. Bu kapsamda kimyasal temizliği yapılmış *n*-tipi silisyum yüzeyine kimyasal püskürtme yöntemi ile %0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.) oranlarında La katkılı ZnO filmler büyütülmüş ve daha sonra ZnO:La ince filmlerinin üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile altın (Au) kontaklar yapılmıştır. Elde edilen Au/ZnO:La/*n*-Si/Al Schottky tipi aygıtların elektriksel özelliklerini incelemek için, oda sıcaklığında ve karanlıkta *I-V* (akım-gerilim) ve *C-V* (kapasite-gerilim) ölçümleri alındı. Yapılan *I-V* ölçümlerinden farklı oranlarda La katkılanmış Au/ZnO:La/Si/Al diyotların idealite faktörü (*n*) ve engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ) gibi karakteristik parametreleri termiyonik emisyon (TE) teorisine göre hesaplandı. Ayrıca diyotların *I-V* grafiğini kullanarak Norde fonksiyonundan da engel yüksekliği ve seri direnç ( $R_s$ ) değerleri hesaplandı. Farklı

oranlarda La katkılanmış diyotların 100, 200, 500 ve 1000 kHz frekanslarda  $C-V$  ölçümleri alındı. Ters beslem  $I/C^2-V$  grafiğinden engel yüksekliği, fermi enerji seviyeleri ( $E_f$ ), taşıyıcı yoğunluğu ( $N_d$ ) ve difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ) gibi temel diyot parametreleri hesaplandı.

ZnO üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, Wei *et al.* (2007) tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda La katkılı ZnO filmleri magnetron saçtırma yöntemi ile elde edilmiştir. X-ışını kırınım desenlerinden kristalin (002) düzleminde büyüdüğü tespit edilmiştir. Filmlerin  $c$ -ekseni boyunca büyüdüğü ve tüm filmlerin hegzagonal wurtzite kristal yapısına sahip oldukları görülmüştür. Filmlerde hiçbir ikincil faza rastlanmamıştır. La katkı oranı artmakla (002) pikleri  $\theta$ 'nın azalan değerlerine kaymıştır. Aynı zamanda La katkı oranı arttıkça filmlerin tanecik boyutu azalmıştır (%0 (% at.):  $D=34.5$  nm ve %5 (%at.):  $D=17.3$  nm). Filmlerin geçirgenliği %80'in üzerindedir ve La katkı oranının artması ile optik bant aralığının daraldığı görülmüştür.

Chen *et al.* (2008) tarafından yapılan bir diğer çalışmada farklı oranlarda (%0, %1, %3, %5, %10 (% at.)) La katkılı ZnO ince filmleri sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile elde edilmiştir. X-ışını kırınım desenlerinden filmlerin hegzagonal wurtzite yapısında oldukları tespit edilmiştir. Filmlerin (002) düzleminde büyüdüğü gözlemlenmiştir. La katkı miktarının artması ile filmlerin  $c$  örgü parametresi artmıştır ve kristal taneciklerinin boyutu azalmıştır. Filmlerin hepsi görünür bölgede yüksek geçirgenlik özelliği göstermişlerdir.

Bouznit *et al.* (2012) tarafından yapılan çalışmada kütlece %0, %1, %2, %4 ve %5 (%wt.), La katkılı ZnO filmler kimyasal püskürtme yöntemi ile elde edilmiştir. X-ışını kırınım desenlerinden tüm filmlerin hegzagonal wurtzite yapısına sahip oldukları tespit edilmiştir. Tüm numunelerde (002) pikinin şiddeti en fazladır. (002) pikinin şiddeti La katkı miktarının artmasıyla artmıştır. Ayrıca (002) pikinin  $2\theta$  konumu La katkı yoğunluğu %0'dan %1'e artınca,  $34.454^\circ$ 'den  $34.4^\circ$ 'ye kaymıştır. Daha sonra La katkılanması ile (002) piklerinin  $2\theta$  konumu yüksek değerlere kaymıştır. La katkılı ZnO filmlerin görünür bölgedeki geçirgenliği %80'in üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. La

katkılmasına bağı olarak filmlerin yasak bant aralığı ( $E_g$ ) ilk önce azalmış ve %2 katkılama yoğunluğunda en düşük değere inmiştir. La katkı miltarı daha da artırıldığında  $E_g$ 'nin değerinde artış olduğu görülmüştür.

Kharroubi *et al.* (2012) tarafında yapılan çalışmada farklı oranlarda (%0, %1, %3 ve %5 (% at.)) Mn katkılı ZnO filmleri ultrasonik püskürtme yöntemi ile elde edilmiştir. X-ışını kırınım desenlerinden filmlerin hegzagonal wurtzite yapısında oldukları ve (002) düzlemlerin en şiddetli düzlem oldukları ortaya çıkmıştır. Filmlerin görünür bölgedeki geçirgenlikleri %90'ın üzerindedir. Diğer yandan filmlerin yasak bant aralıkları Mn katkılaması ile ilk önce azalmış ve daha sonra artan katkı oranı ile artmıştır.

He *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda (%0, %0.5, %1.0, %1.5, %2.0 (% at.)) La katkılı ZnO ince filmleri kimyasal çözelti biriktirme yöntemi ile elde edilmiştir. X-ışını kırınım desenlerinden filmlerin hegzagonal wurtzite yapısında oldukları tespit edilmiştir. Filmlerin ortalama parçacık boyutu La katkı oranının artması ile azalmıştır. SEM görüntülerinden parçacıkların hegzagonal ve çubuk şeklinde oldukları tespit edilmiştir. Filmlerin optik geçirgenliklerinin %74.14 - %88.23 arasında olduğu belirtilmiştir.

Shaban and El Sayed (2016) tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda (%0 ZnO: La, Na, %2.5 ZnO: La, %5 ZnO: La, %7.5 ZnO: La, %2.5 ZnO: Na, %5 ZnO: Na, %7.5 ZnO: Na) La ve Na katkılı çinko oksit filmleri sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile elde edilmiştir. X-ışını kırınım desenlerinden tüm filmlerin polikristal ve hegzagonal wurtzite yapısında oldukları tespit edilmiştir. Filmlerde hiçbir ikincil faz oluşmamıştır. Yani, La ve Na atomları çinko oksitin hegzagonal yapısını değiştirmemiş ve tamamen ZnO fazında yer almıştır. Ayrıca, La katkılamakla, (100) ve (002) pikleri  $2\theta$ 'nın azalan değerlerine kaymıştır.  $Zn^{+2}$ 'nin iyonik yarıçapı ( $r=0.074$  nm) ile,  $La^{+3}$ 'un ve  $Na^{+1}$ 'un iyonik yarıçapları (La:  $r = 0.119$  nm ve Na:  $r = 0.095$  nm) arasındaki fark, yukarıda bahsedilen kaymanın sebebi olarak gösterilmiştir. Filmlerin tanecik boyutu La katkılaması ile azalmıştır. katkısız ZnO ince filmlerin yüzeyinin pürüzsüz olması SEM görüntüleri ile tespit edilmiştir. La katkılı filmlerin görünür bölgedeki geçirgenlikleri

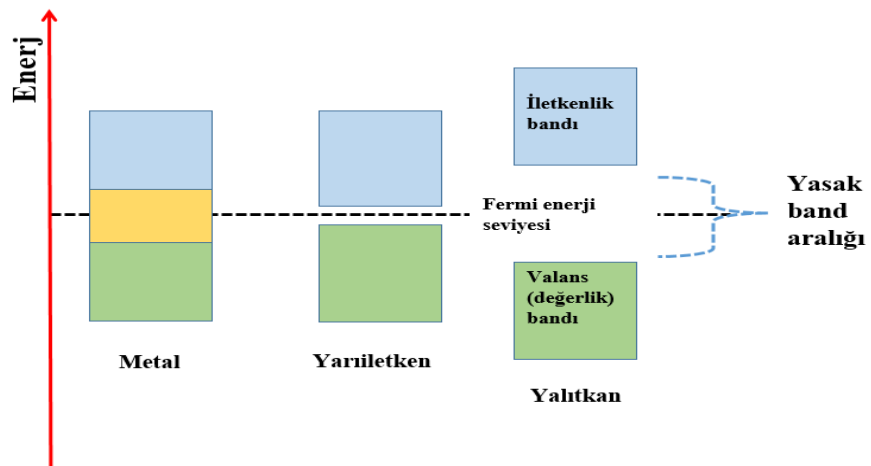
%68-%98 arasındayken Na katkılı filmlerin geçirgenlik oranları %83-%97 arasındadır. Bu durum, La katkılanması ile filmlerin yansımaya oranının da arttığını göstermiştir. Bunun yanında, La artışı ile  $E_g$ 'de azalma gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümü, konunun önemi ve konu ile ilgili yapılan literatür çalışmalarını belirten “Giriş” kısmından oluşmaktadır. İkinci bölüm, teorik bilgi içeren “Kuramsal Temeller” den oluşmaktadır. Üçüncü bölüm, farklı oranlarda La katkılı ZnO ince filmlerin (ZnO:La) ve Au/ZnO:La/n-Si/Al Schottky diyotların hazırlanması, temizlenmesi, kullanılan yöntem ve numune özelliğini araştırmak için kullanılan ölçümleri anlatan “Materyal ve Yöntem” bölümünden oluşmaktadır. Dördüncü bölüm, hazırlanan numunelerin XRD, SEM, AFM, UV ölçümleri ve Schottky diyotların  $I-V$  (akım-gerilim) ve  $C-V$  (kapasite-gerilim) ölçümleri ile elde edilmiş parametreleri içeren “Araştırma Bulguları” kısmından oluşmaktadır. Son bölümde, araştırma bulgularının değerlendirilmesinin yapıldığı “Tartışma ve Sonuç” bölümü ile tez çalışması tamamlanmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Yarıiletken Malzemeler

Malzemeler elektriksel iletkenliklerine göre 3 grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar; iletken, yalıtkan ve yarıiletkenlerdir. Her malzemenin elektrik akımına karşı bir özdirenci vardır ve bu direnç: malzemenin tipine, uzunluğuna, sıcaklığına ve kesit alanına (cross sectional area) bağlıdır. Oda sıcaklığında iletken malzemelerin özdirenci düşüktür ( $10^{-8} - 10^{-6} \Omega \text{ cm}$ ) ve buna karşı yalıtkan malzemelerin özdirenci çok yüksektir ( $10^{14} - 10^{22} \Omega \text{ cm}$ ). Yarıiletken malzemelerin özdirenç değerleri iletken ve yalıtkanların arasındadır ( $10^{-3} - 10^9 \Omega \text{ cm}$ ). İletken malzemelerde sıcaklık artınca iletkenlik de artmış olur. Farklı malzemelerin, farklı özdirence sahip oldukları, onların elektron yapısından ve bant aralığından kaynaklanmaktadır. İletkenlerde bant aralığı yoktur ve buna karşı yalıtkanlarda geniş bant aralığı mevcuttur. Yarıiletkenlerde bant aralığı yalıtkanlar gibi çok geniş değildir ve farklı durumlarda değişebilir. Metal, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin bant aralığı, fermi enerji seviyesi, valans ve iletkenlik bant durumları Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.1.** Metal, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin bant aralığı, fermi enerji seviyesi, valans ve iletkenlik bant durumları

Yarıiletken malzemelerin en önemli özelliklerinden birisi direncin sıcaklıkla değişmesidir. İletkenlerin aksine yarıiletkenlerde sıcaklığın artmasıyla direnç düşer ve mutlak sıfır ( $T=0$  K) değerlerinde yarıiletken yalıtkan gibi davranır.

G.Busch'e göre yarıiletken sözcüğü ilk defa Alessandro Volta tarafından, 1782 yılında kullanılmıştır. Yarıiletkenlerin etkisi hakkında ilk belgeli gözlem 1833 yılında Michael Faraday tarafından yayınlanmıştır. Faradayın gözlemlediği şey gümüş sülfidin sıcaklığının artmasıyla öz direncin düşmesidir ve bu metallere beklenildiğinden farklı bir durumdur. Yarıiletken malzemeler 1830'dan beri laboratuvarlarda araştırılmaktadır. İlk yarıiletken aygıt, 1874 yılında elektriksel güç ve taşıma amacını gütmekteydi. Telegraf, telefon ve sonralarda radyo ve şimdide cep telefonları ve LED'ler yarıiletken içeren cihazlardır. J.J. Thomson'un, elektronu keşfinden kısa bir süre sonra bilim adamları, metallere iletkenliği açıklamak için çeşitli teoriler önerdiler.

Yarıiletkenler periyodik tabloda IIB ve VIA grupları arasında bulunmaktadır. En çok kullanılan yarıiletkenler Si ve Ge olarak, IV grupta yer almaktadırlar. Ayrıca bileşik yarıiletkenler de günümüzde kullanılırlar. Mesela üç ve beş gruplarındaki bileşik yarıiletkenleri, III-V yarıiletkenleri (GaP, InAs, GaAs, InSb, ...) olarak tanımlanır ve genellikle kübik Kristal yapıya sahip olmakla birlikte, bağ yapıları çoğunlukla kovalenttir. Bununla birlikte, II-VI yarıiletken bileşiklerinin (ZnS, ZnO, CdS, CdSe, ...) kristal yapıları hegzagonal olmakla beraber, bağ yapıları çoğunlukla iyonik veya kovalenttir (Neamen 2003). Yarıiletkenlerin periyodik tablodaki durumları Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



									VIIIA
									2 He 4.003
			III A	IV A	V A	VI A	VII A		
		5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.183		
		13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948		
IB	IIB								
29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80		
47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30		
79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)		

**Şekil 2.2.** Yarıiletkenlerin periyodik tablodaki durumları (Zakaron 2016)

### 2.1.1. Asal yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin iki tür yük taşıyıcıları vardır. Bunlardan biri elektron olarak, negatif yük taşıdıklarından dolayı “n” olarak tanımlanır. Yük taşıyıcıların bir diğeri elektron boşluğudur. yani, konumunu terk etmiş elektronun arkasında bıraktığı boşluktur. Elektron boşlukların yükü pozitifdir ve “p” taşıyıcıları olarak tanımlanırlar. Asal yarıiletkenler mükemmel kristallere sahiptirler. Asal yarıiletkenlerde elektron gerekli enerjiyi aldığı anda iletkenlik bandına geçer ve arkasında bir boşluk bırakır. Bir elektron ve bir boşluk oluşması ile, elektron ve boşluk çifti meydana gelir. Asal yarıiletkenlerde elektron ve boşluk sayısı (n ve p taşıyıcıların sayısı) her zaman eşittir.

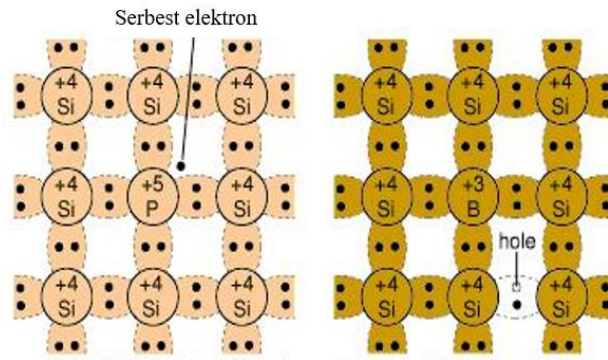
### 2.1.2. Katkılı yarıiletkenler

Katkılı yarıiletkenlerde akım, serbest yüklerle meydana gelir. Katkılamak, belirli sayıda katkılama atomunu yarıiletkenin kristal yapısındaki atom sayısından farklı bir oranla katkılama işlemidir. Katkılanmış yarıiletken artık bir asal yarıiletken değildir ve katkılı yarıiletken olarak tanımlanır. Katkılı yarıiletkenlerde yük taşıyıcıların sayısı (elektronlar ve boşluklar) eşit değildir. Eğer elektronların sayısı boşluklardan fazla olursa, yarıiletken *n*-tipidir ve eğer boşlukların sayısı elektronlardan fazla olursa, yarıiletken *p*-tipidir.

## 2.2. Yarıiletken Katkılama

Katkılama işleminde, uygun atomların asal yarıiletkenlere katkılanması ile elektron ve boşlukların yoğunluğu değişmiş olur. Katkılama atomları iki farklı şekilde davranırlar; bazıları verici (donor) ve bazıları alıcı (akseptör) olarak davranırlar.

Eğer katkılama atomunun valans bandındaki elektron sayısı, yarıiletkenin valans bandındaki elektron sayısından fazla olursa katkılama atomu valans bandındaki fazla elektronlarını yarıiletkenin iletkenlik bandına bağışlar. Böylece, katkılanmış  $n$ -tipi yarıiletken aşırı sayıda elektron alarak taşıyıcı yoğunluğunu artırır ve bu yüzden negatif yüklü taşıyıcıların sayısı, pozitif yüklü taşıyıcıların sayısından fazla olur. Böylece yarıiletken bir  $n$ -tipi yarıiletkene dönüştürülür. Eğer durum aksine olursa, katkılama atomunun valans bandındaki elektron sayısı, yarıiletkenin valans bandındaki elektron sayısından az olur ve bu elektronlar yarıiletkenin valans bandında yer alırlar. Bu durum, boşlukların sayısının artmasına neden olur ve bundan sonra pozitif yüklü taşıyıcıların sayısı, negatif yüklü taşıyıcıların sayısından fazla olur ve  $p$ -tipi yarıiletken oluşur. Fosfor ve Bor katkılanmış silisyum örgünün iki boyutlu gösterimi Şekil 2.3'de verilmektedir.



**Şekil 2.3.** Fosfor ve Bor katkılanmış silisyum örgünün iki boyutlu gösterimi (Saint and Saint 2005)

IV grubundaki elementler için, V grubundaki elementler donör ve III grubundaki elementler akseptördür. VI grubundaki elementler için, III-V grubundaki elementler

donor ve II grubundaki elementler akseptördür. IV grubundaki elementler için, III-V grubundaki elementler hem donor ve hem akseptör olabilir. IV grubundaki elementlerin atomları, III grubunda bulunan yarıiletkenlerin örgülerinde yer alırlarsa o zaman donor olarak davranırlar. IV grubundaki elementlerin atomları, V grubundaki yarıiletkenlerin örgülerinde yer alırlarsa o zaman akseptör olarak davranırlar. Bu durumda IV grubundaki atomlar hem akseptör ve hem donor olarak davranırlar ve amfoterik yabancı atomları olarak tanımlanırlar. Yarıiletkenler, donor ve akseptör atomları Çizelge 2.1'de verilmektedir.

**Çizelge 2.1.** Yarıiletkenler, donor ve akseptör atomları

	Asal yarıiletkenler	Donor Atomları	Akseptör atomları
IV grubundaki yarıiletkenler	Silisyum, Germanyum	Fosfor, Arsenik	Boron, Aluminyum
III-V grubundaki yarıiletkenler	Aluminyum, Fosfit, Aluminum arsenür, Galyum arsenide, Galyum nitrid	Selenyum, Teluryum, Silisyum, Germanyum	Berilyum, Çinko, Kadmiyum, Silikon, Germanyum

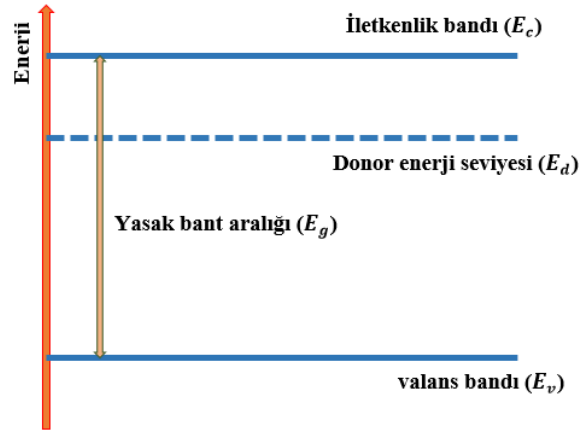
### 2.2.1. N-Tipi yarıiletkenler

Bir donor kirlilik atomunu (arsenik, antimon, veya fosfor), Si gibi bir asal yarıiletkene katkılanmak ile *n*-tipi yarıiletken ortaya çıkar. Bu donor atomlarının beş adet valans elektronu vardır. Donor atomu yarıiletkenin (Si) kristal örgüsünde yerleştiği zaman, 4 adet elektronunu etrafındaki atomlarla ortaklaşır ve kovalent bağ kurar, beşinci elektron çok zayıf bir elektriksel kuvvetle örgüye bağlı olduğundan küçük bir enerji ile iyonlaştırılır. Bu durumda asal yarıiletken bir fazla elektron kazanmış olur ve katkı atomu verici atomu olarak adlandırılır. Donor atomları ile paylaşılan serbest elektronların sayısı, asal yarıiletkenlerdeki serbest elektron ve boşlukların sayısından çok fazladır. Elektronların sayısının boşluklardan çok daha fazla olmasından dolayı, elektronlar çoğunluk taşıyıcılarıdır. Bu tür yarıiletkenler *n*-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Bu durumda çoğunluk taşıyıcıların (elektronlar) yükü negatiftir. Bu tür

yariletkenlerde bulunan verici atomlarının buldukları enerji seviyeleri  $E_d$  ile gösterilir ve,

$$E_d = \left(1/\epsilon_r\right)^2 (m_e^*/m_e) E_H \quad (2.1)$$

eşitliği ile tanımlanır. Denklemdaki  $\epsilon_r$ , yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti,  $m_e^*$  ve  $m_e$  sırasıyla elektronun etkin kütlesi ve elektronun kütlesidir,  $E_H$  ise hidrojenin iyonlaşma enerjisi olarak gösterilir.  $n$ -tipi yarıiletkenlerde verici enerji seviyesi iletkenlik bandına yakın olmasından dolayı bu seviyedeki elektronlar küçük bir enerji ile iletkenlik bandına geçerler. Bu nedenle  $n$ -tipi yarıiletkenlerde elektron sayısı boşluk sayısından fazla olarak, çoğunluk ve azınlık yük taşıyıcıları sırasıyla elektron ve boşluk olur.  $N$ -tipi yarıiletkenlerde, asal yarıiletkenlere göre boşlukların sayısı azdır. Bu yüzden  $n$ -tipi yarıiletkenlerde boşluklardan kaynaklanan akım hesaplamalarda ihmal edilir. Enerji bant diyagramındaki verici bandının durumu Şekil 2.4’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.4.**  $N$ -tipi bir yarıiletkende enerji bant diyagramındaki verici (donor) bandının durumu

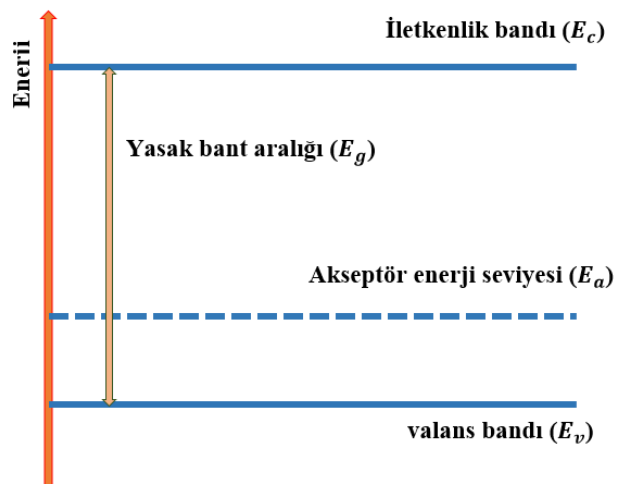
### 2.2.2. $P$ -tipi yarıiletken

$n$ -tipi yarıiletkenlerde olduğu gibi asal yarıiletkene alıcı (akseptör) kirlilik atomu ilave ederek (Si’ a galium, boron veya indiyum) bir  $p$ -tipi yarıiletken meydana gelir. Her

akseptör atomunda üç adet valans elektronu bulunmaktadır. Bir akseptör atomu, yarıiletkenin kristal yapısındaki bir atomun yerini aldığı zaman akseptördeki elektronların üç tanesi etrafındaki yarıiletken atomları ile kovalent bağ oluşturur. *P*-tipi yarıiletkenlerde alıcı enerji seviyesi valans bandına yakın olmasından dolayı bu seviyede bulunan atomlar bağlarını valans bandından elektron alarak tamamlarlar ve bu yüzden valans bandında boşluk sayısı artmış olur ama bu durumda iletkenlik bandındaki elektron sayısı artmaz. *P*-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk ve azınlık yük taşıyıcıları sırasıyla boşluklar ve elektronlar olur. *p*-tipi yarıiletkenlerde, genellikle serbest elektronlardan kaynaklanan akım hesaplamalarda ihmal edilir. Yarıiletkenlerde bulunan alıcı atomlarının buldukları enerji seviyeleri  $E_a$  ile gösterilir ve,

$$E_a = \left(1/\epsilon_r\right)^2 (m_e^*/m_e)E_H \quad (2.2)$$

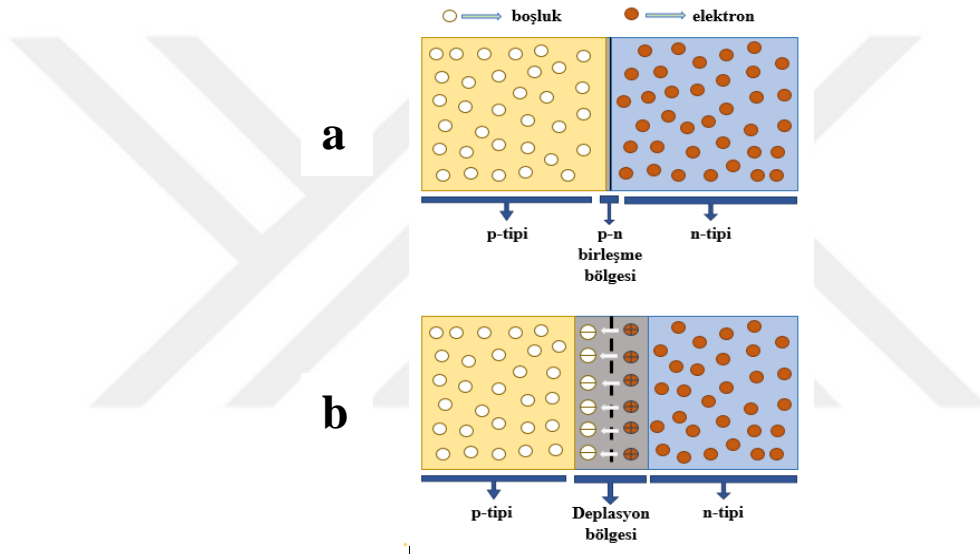
eşitliği ile gösterilir. Enerji bant diyagramındaki alıcı bandının durumu Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Denklemdaki  $\epsilon_r$  yarıiletkenin bağlı dielektrik sabiti,  $m_e^*$  ve  $m_e$  sırasıyla eletronun etkin kütlesi ve eletronun kütlesi olarak, ve  $E_H$  ise hidrojenin iyonlaşma enerjisi olarak gösterilmektedir.



**Şekil 2.5.** *P*-tipi bir yarıiletkende enerji bant diyagramındaki alıcı (akseptör) bandının durumu

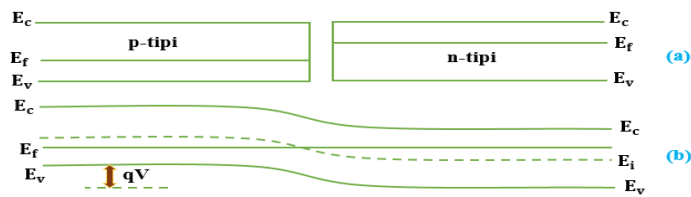
### 2.3. P-N Eklemi

Diyot, tranzistör ve güneş pilleri gibi yarıiletken temelli aygıtlar p-n eklem yapısına sahipler. p-n yapısında olan fotovoltaik aygıtlarda (güneş pilleri), *p*-tipi ve *n*-tipi özellikteki yarıiletkenlerin birleştiği yüzeyler büyük tutulur ve bu arayüzeye gelen fotonların enerjilerinin bir miktarı, yarıiletkendeki serbest elektronları hareket ettirir ve akım oluşmasına neden olur.



**Şekil 2.6.** a) Temel bir p-n eklem yapının şematik görüntüsü b) denge durumunda bir p-n eklem yapının şematik görüntüsü

Teorik olarak bir *p*-tipi ve *n*-tipi yarıiletkenin atomik boyutta birleşmesinden p-n eklemi oluşur. Kristal büyütme sırasında *p*-tipi ve *n*-tipi bölgeleri arasında p-n eklemi oluşur. Temel bir p-n eklem yapının şematik görüntüsü Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



**Şekil 2.7.** a) p-n eklemi oluşmadan önce enerji seviyelerinin durumu b) p-n eklemi oluşuktan sonra enerji seviyelerinin durumu

*P*-tipi yarıiletken bölgesinde boşluk fazlalığı ve *n*-tipi yarıiletken bölgesinde elektron fazlalığı nedeni ile bir p-n eklemi oluştuğunda taşıyıcı yoğunlukları farklı olduğu için bu durumda taşıyıcı difüzyonu gerçekleşir. *N*-tipi yarıiletken bölgesinden *p*-tipi yarıiletken bölgesine elektron difüzyonu ve *p*-tipi yarıiletken bölgesinden *n*-tipi yarıiletken bölgesine boşluk (hole) difüzyonu gerçekleşir. *N* bölgesinden *p* bölgesine geçen elektronlar arkalarında pozitif yüklü verici iyonlar bırakırken, *p* bölgesinden *n* bölgesine geçen boşluklar arkalarında negatif yüklü alıcı iyonlar bırakırlar. Hareketsiz verici ve alıcı yükleri uzay yük bölgesini (deplasyon bölgesi) oluştururlar. Eklem bölgesinde pozitif yüklü verici atomlarından negatif yüklü alıcı atomlarına doğru dahili bir elektrik alan oluşur. Şekil 2.7'de p-n eklemi oluşmadan önce (a) ve p-n eklemi oluşuktan sonra (b) enerji seviyelerinin durumu gösterilmektedir. *N*-tipi yarıiletkeninde fermi enerji seviyesi iletkenlik bandına yakın olurken *p*-tipi yarıiletkeninde fermi enerji seviyesi valans bandına yakın olur. Fakat bu durum p-n eklemi oluşuktan sonra termal denge ile değişir ve her iki taraf için fermi enerji seviyesi eşitlenmiş olur.

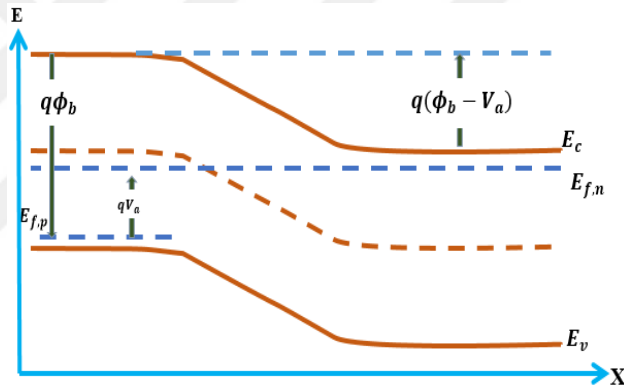
p-n eklemi denge durumuna gelince eklem bölgesinde sıcaklıktan ortaya çıkan elektron-boşluk çiftleri bir sürüklenme akımının oluşmasına neden olurlar ve bu sürüklenme akımı difüzyon akımının tersi yönünde hareket eder.

### **2.3.1. P-N eklemde akım iletimi**

P-N eklem diyotta elektrik akımı bir yönde iletilir. Eklem bölgesinde çoğunluk taşıyıcıların difüzyonundan bir iç elektrik alan oluşur ve bu durumda hareket eden yüklere karşı bir potansiyel engel meydana gelir. P-N eklemi bir dış devre gerilim kaynağına bağlandığında potansiyel engel ortadan kaldırılır ve eklemde elektrik akımı geçer. Bu işleme eklem besleme veya eklem kutuplandırma adı verilir. Eklem besleme işlemi, doğru yönde beslenme ve ters yönde beslenme olarak iki şekilde gerçekleşir.

### 2.3.2. Doğru yönde besleme

Eğer diyot doğru beslem şeklinde, yani diyodun n kısmı negatif olarak ve p kısmı pozitif olarak gerilim kaynağına bağlanırsa, p-tipi bölgeye boşluk ve n-tipi bölgeye elektron sağlanır ve böylece p-n eklemının doğru yönde beslenmesi sağlanmış olur. Bu durumda eklem bölgesindeki potansiyel engel, kaynak ile oluşan yükler yardımı ile azaltılır ve çoğunluk yük taşıyıcıları kolaylıkla difüzyon yaparlar. Bu durumda difüzyon akımı ve sürüklenme akımları arasındaki denge durumu bozularak, ekleminden bir yönde elektrik akımının geçmesi sağlanır. Doğru yönde beslenen bir p-n eklemının enerji bant diyagramı Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Doğru yönde beslenen bir p-n eklemının enerji bant diyagramı

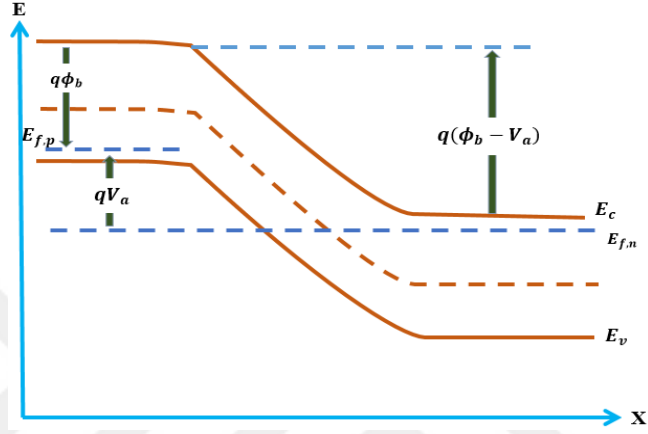
Doğru yönde beslem durumunda eklem bölgesindeki potansiyel engel  $qV_a$  kadar azalmış olur. Burada  $q$ , elektronun yükü ve  $V_a$ , p-n eklemine bağlanan gerilim kaynağının uçları arasındaki potansiyel farktır (veya uygulama gerilimidir).

### 2.3.3. Ters yönde besleme

Eğer diyot ters yönde beslem şeklinde, yani diyodun n kısmı pozitif olarak ve p kısmı negatif olarak gerilim kaynağına bağlanırsa, eklem bölgesindeki potansiyel engel  $qV_a$  kadar artmış olur ve çoğunluk yük taşıyıcıların geçişi zorlanarak, azınlık yük taşıyıcıların geçişi kolaylaşır. Bu durumda sürüklenme akımı ile difüzyon akımı



arasındaki denge bozulmakla, azınlık yük taşıyıcılarından kaynaklanan mikroamper mertebesinde bir akım gerçekleşir. Bu akım sızıntı akımı ( $I_0$ ) olarak adlandırılır. Sızıntı akımını dış kaynağın gerilimi ve sıcaklıkla doğru olarak orantılıdır. Ters yönde beslenen bir p-n eklemının enerji bant diyagramı Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

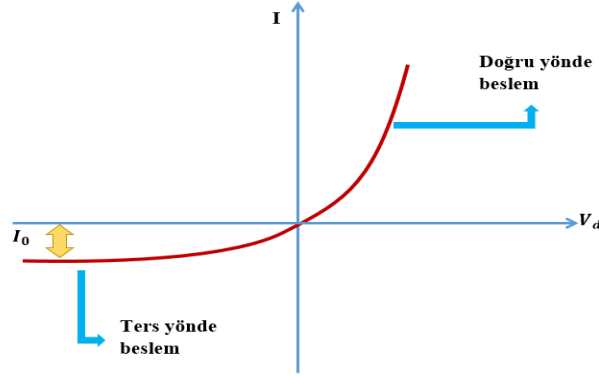


**Şekil 2.9.** Ters yönde beslenen bir p-n eklemının enerji bant diyagramı

p-n eklem bölgesindeki potansiyel engel doğru yönde beslem durumunda küçük olur ve akım tek yönde iletilir ve p-n eklemi bir diyot görevini yapar. Ama ters beslem durumunda potansiyel engel büyük olur. Eğer ters yönde beslenen bir p-n eklemi  $V_a$  gerilim kaynağına bağlanırsa, p-n ekleminden geçen akım ( $I$ );

$$I = I_0(e^{qV_a/kT}) - 1 \quad (2.3)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada  $I_0$ , ters beslem durumundaki maksimum akım (sızıntı akımı),  $q$ , elektronun yükü,  $k$ , Boltzmann sabiti, ve  $T$ , kelvin cinsinden sıcaklıktır. İleri yönde ve ters yönde beslenen bir p-n eklemının  $I$ - $V$  karakteristiği Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



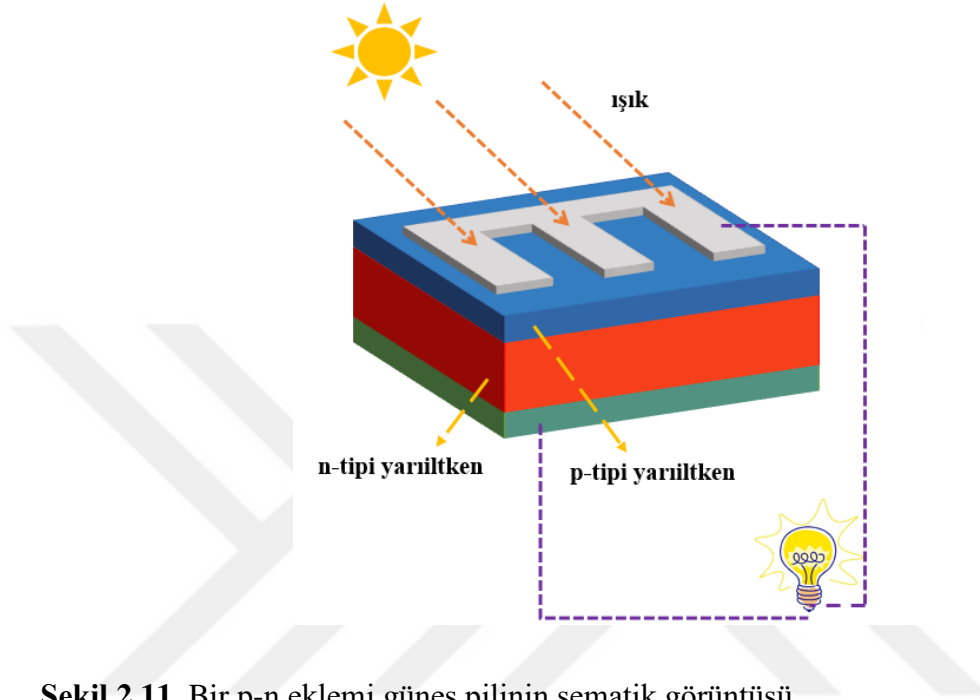
**Şekil 2.10.** İleri yönde ve ters yönde beslenen bir p-n eklemnin  $I$ - $V_a$  karakteristliği

#### 2.3.4. P-N eklemde optik olaylar

Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren p-n eklemeleri güneş pilleri veya fotovoltaik hücreler olarak adlandırılır. Enerji dönüşümü optik olayların sonucunda gerçekleşir. Optik olaylar iki şekilde gerçekleşir: fotoiletkenlik olayı ve fotovoltaik olayı. Fotoiletkenlik olayı: eğer yarıiletkenin yüzeyine düşen fotonların enerjisi ( $E$ ) yarıiletkenin yasak bant aralığı enerjisinden ( $E_g$ ) büyük veya eşit olursa, yarıiletkenin iletkenliği ve elektriksel özellikleri değişir ve fotoiletkenlik olayı gerçekleşir. Fotovoltaik olayı: yarıiletken yüzeyine düşen foton, elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasına neden olur. Elektron-boşluk çiftinin ayrılması ile de bir akım meydana gelir ve bu akım foto akım olarak tanımlanır.

Işık bir akım kaynağı gibi davranır ve böylece ışığın şiddetiyle orantılı bir akım gerçekleşir. Güneş pillerinin taban malzemesi, ince film veya bulk olarak büyütülür. Kalınlıkları 0.2-0.4 mm, yüzey alanları yaklaşık  $100 \text{ cm}^2$  olur. Yüzey şekilleri daire, kare veya dikdörtgendir. Eger taban malzeme ince film olursa kalınlıkları nm düzeyindedir (100 nm-500 nm). Güneş pili üretmek için yasak bant aralıkları  $E_g = 0.5 - 3.3 \text{ eV}$  olan yarıiletkenler (Si, CdSe, CdTe, InP,  $\text{Zn}_3\text{P}_2$ , GaAs, CdS,  $\text{CuSe}_2$ ,  $\text{CuInS}_2$  ve  $\text{CuInSe}_2$ ) kullanılır. Akım gücünü artırmak için, güneş pilleri seri veya paralel olarak bir yüzey üzerine monte edilir. Güneş pilleri yaşam alanlarından uzak

yerlerde aydınlatma veya elektrikle çalışan haberleşme cihazlarını kullanmak için çok yararlıdır. p-n eklemi güneş pilinin şematik görüntüsü Şekil 2.11’de verilmektedir.



Şekil 2.11. Bir p-n eklemi güneş pilinin şematik görüntüsü

#### 2.4. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Bir metal ve bir yarıiletken kontak haline geldiğinde enerji-bant diyagramı farklı olur ve yük alışverişi gerçekleşir. Yük alışverişi, denge durumuna gelinceye kadar (fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar) devam eder. Denge durumunda, enerji seviyeleri aynı düzeyde olur.

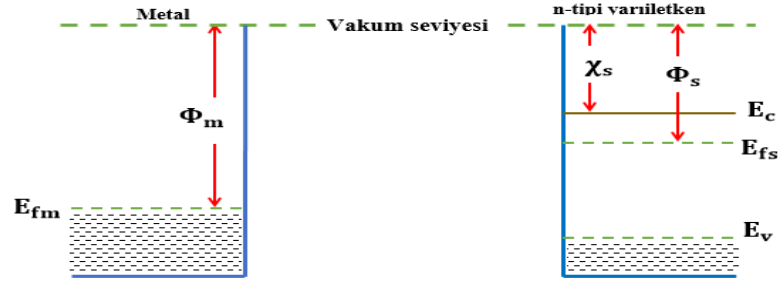
Metal-yarıiletken kontaklar arayüze bağlı olmakla beraber Schottky engeli veya omik kontak olarak davranırlar.  $I-V$  karakterisliği lineer olursa omik kontak ve lineerlikten uzak olursa Schottky kontak olarak davranırlar. Schottky kontaklarda akım tek yönde iletilir. Metal-yarıiletken malzeme kontak haline geldiğinde, metal-yarıiletken yüzeyinde yük ayrışması gerçekleşir ve bu potansiyel engelin oluşmasına neden olur.

İdeal bir metal-yarıiletken kontak, teorik olarak sıfır direnç ile ele alınır. Metal-yarıiletken kontaklar, Schottky tipi kontak ve omik kontak olarak ikiye ayrılırlar. Schottky kontaklarda elektronlardan ve boşluklardan meydana gelen akım bir yönden diğer yöne rahatlıkla hareket edebilir. Yani doğru beslemde akım rahatlıkla iletilir ama ters beslem durumunda eklem akımı neredeyse iletilmez. Omik kontaklarda akım her iki yönde rahatlıkla iletilir. Metal-yarıiletken kontakların doğrultucu veya omik olması, metalin iş fonksiyonu ve yarıiletkenin tipi (n veya p) ve iş fonksiyonuna bağlıdır. İş fonksiyonu bir elektronu fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gereken minimum enerjidir. Yarıiletkenleri alıcı veya verici atomlarla katkılanarak fermi enerji seviyeleri değişir ve bu yüzden yarıiletkenlerin iş fonksiyonları değişken bir niceliktir. Metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonları sırasıyla:  $\Phi_m$  ve  $\Phi_s$  olarak ele alınır.

Metal/n-tipi yarıiletken malzemelerde eğer  $\Phi_s < \Phi_m$  olursa, kontak doğrultucu veya Schottky kontak olarak adlandırılır, ve  $\Phi_s > \Phi_m$  durumunda kontak omik olarak adlandırılır. Metal/p-tipi yarıiletkenler için eğer  $\Phi_s < \Phi_m$  olursa, kontak omik olarak adlandırılır, ve  $\Phi_s > \Phi_m$  durumunda kontak doğrultucu veya Schottky olarak adlandırılır.

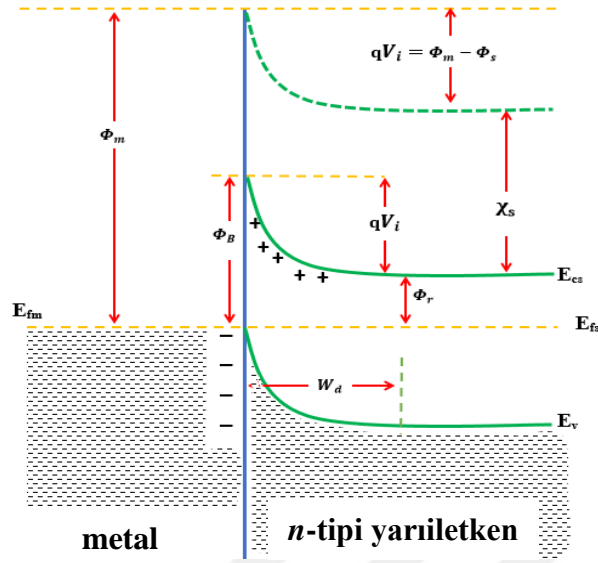
#### **2.4.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar**

Metal ve yarıiletken malzeme kontak haline geldiğinde metal ve yarıiletken arayüzeyinde yükler ayrışır ve bir potansiyel engel oluşur. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda eğer yarıiletkenin iş fonksiyonu ( $\Phi_s$ ) metalin iş fonksiyonundan ( $\Phi_m$ ) daha küçük ( $\Phi_s < \Phi_m$ ) olursa, kontakta doğrultucu veya Schottky kontak adı verilir. Şekil 2.12'de kontakta önce enerji bant diyagramı gösterilmektedir.



**Şekil 2.12.** Kontakta önce metal/*n*-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı (Schottky kontakta önce)

Şekil 2.12.'de gösterildiği gibi  $\chi_s$  yarıiletkenin elektron ilgisi olarak, yarıiletkenin iletkenlik bandının tabanında bulunan bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gereken enerjidir ve yarıiletkendeki katkı atomlarının konsantrasyonundan bağımsızdır. Kontakta önce durumunda yarıiletkenin fermi seviyesi metalin fermi seviyesinden  $(\Phi_m - \Phi_s)$  kadar yukarıdadır. Termal dengeye gelinceye kadar veya fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar yarıiletkenden metale elektron geçişi sağlanır. Kontakta sonra gerçekleşen durum Şekil 2.13'de gösterildiği gibi, yarıiletkenin fermi enerji seviyesi  $(\Phi_m - \Phi_s)$  kadar azalmış olur. Metal ve *n*-tipi yarıiletken malzeme doğrultucu kontak haline geldiğinde, metal tarafındaki yüzey yükleri ve yarıiletken tarafındaki uzay yükleri arasındaki zıt yüklemelerden dolayı bir dipol tabakası meydana gelir ve bu yüzden eklem yüzeyinde bir potansiyel engel oluşur. Metal/*n*-tipi yarıiletken için engel yükseklikleri yarıiletken tarafında  $eV_{dif} = (\Phi_m - \Phi_s)$  ve metal tarafında  $e\phi_b = (\Phi_m - \chi_s)$  olarak ifade edilir. Burada  $e$ , elektronun yükü,  $V_{dif}$ , difzyon potansiyeli,  $\phi_b$  diyodun engel yüksekliği ve  $\chi_s$  yarıiletkenin elektron ilgisidir.



**Şekil 2.13.** Kontakta sonra termal dengede metal/*n*-tipi yarıiletkenin doğrultucu (Schottky) kontaktağın enerji bant diyagramı

Yarıiletkenin iletkenlik bandında bulunan elektronlar, metal tarafına geçerken engel potansiyeli ile karşılaşılır. Yarıiletkendeki elektronlar gerilerinde iyonize olmuş donörler bırakarak yarıiletken tarafından metal tarafına geçerler. Bu iyonize olmuş donörler hareketsiz oldukları için uzay yükleri olarak adlandırılır. Engel tabakasının kalınlığı difüzyon potansiyelinin değerine ve iyonize olmuş donör yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Difüzyon potansiyeli, yarıiletkenin iç potansiyeli olarak metalin yüzeyine göre hesaplanır. Kontakta bulunan yüzey tabaka, potansiyel engelden dolayı engel tabakası olarak adlandırılır. Bu tabaka, uzay yüklü bölgesi, arınma bölgesi veya geçiş bölgesi olarak da adlandırılır. Engel tabakası negatif ve pozitif yükler arasında olduğundan dolayı kapasite özelliğine sahip olur ve Schottky kapasitesi olarak adlandırılır ve arınma tabakasının kalınlığı ile ters ilişkilidir. Termal denge durumunda metal ve yarıiletken tarafındaki bazı elektronlar termal yol ile enerji kazanırlar. Böylece potansiyel engelini aşmak için minimum enerjiiyi kazanırlar ve kontakta zıt yönde ve eşit bir  $I_0$  sızıntı akımı gerçekleşir. Yarıiletken tarafına gerilim kaynağı ile  $-V$  bir gerilim uygulandığı zaman metalden yarıiletkene geçen elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve yarıiletkendeki metale doğru akım sabit olur. Fakat yarıiletken tarafının iletkenlik bandı eV mertebesinde yükselir ve yarıiletkendeki metale geçen elektronlar

için engel yüksekliği eV mertebesinde azalır. Böylece, metalden yarıiletkene doğru iletilen akım  $\exp(eV/kT)$  faktörü kadar yükselir ve ortaya çıkan net akım;

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

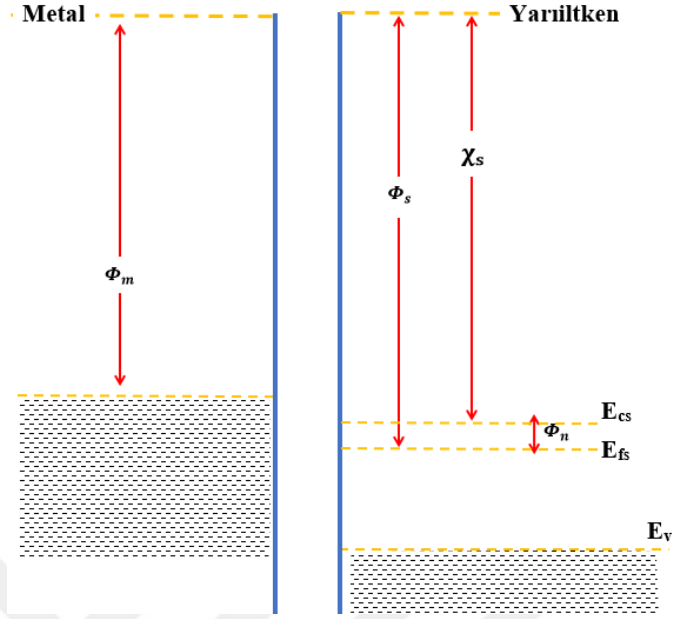
şeklinde ifade edilir. Eğer ( $eV \gg kT$ ) olursa, eşitlikteki 1 rakamı diğer terimin yanında çok küçük olduğu için ihmal edilebilir ve eşitlik;

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \right] \quad (2.5)$$

olarak gösterilir. Net akım (I) pozitif olur ve bu durum doğru yönde beslem olarak adlandırılır. Şekil 2.13.'de metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontağının doğru yönde beslem durumundaki enerji bant diyagramı gösterilmektedir. Yarıiletken tarafına gerilim kaynağı ile +V gerilimi uygulandığı zaman yarıiletken tarafının iletkenlik bandı eV mertebesinde azalmış olur ve yarıiletkenin engel yüksekliği eV mertebesinde yükselir. Gerçekleşen net akım,  $-I_0$  değerine yaklaşır. Bu durumda ( $eV \ll -kT$ ) olur ve ters yönde beslem durumu gerçekleşir (Ziel 1968; Rhoderick and Williams 1988).

#### 2.4.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar

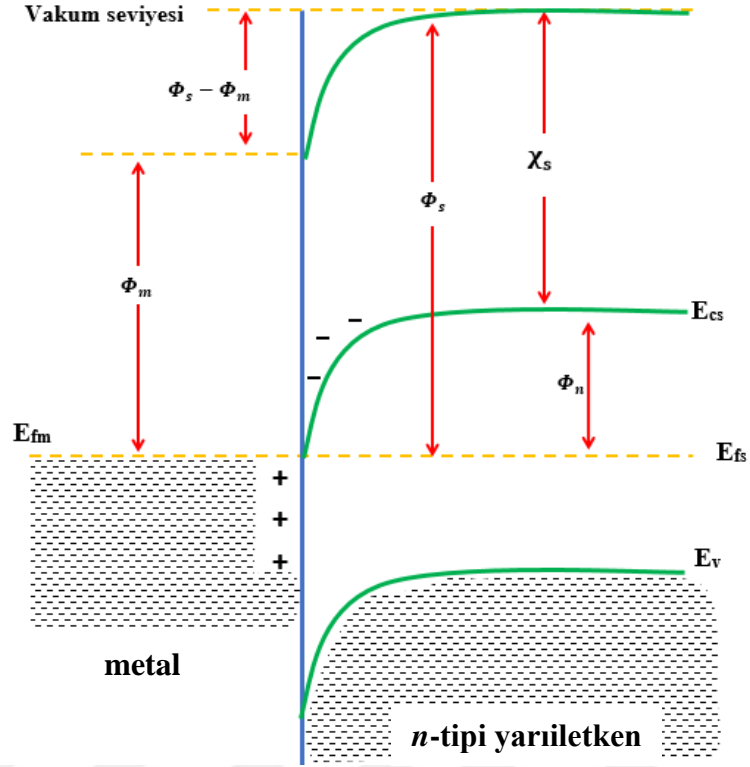
Metal/n-tip yarıiletken kontaklarda eğer yarıiletkenin iş fonksiyonu( $\Phi_s$ ) metalin iş fonksiyonundan ( $\Phi_m$ ) daha büyük ( $\Phi_s > \Phi_m$ ) olursa, kontağa omik kontak adı verilir. Şekil 2.14'de omik kontakta önceki enerji bant diyagramı gösterilmektedir. Kontakta önceki durumda metalin fermi seviyesi yarıiletkenin fermi seviyesinden ( $\Phi_s - \Phi_m$ ) kadar yukardadır.



**Şekil 2.14.** Kontakta önce metal/*n*-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı (omik kontakta önce)

Kontaktan sonra metaldeki elektronlar gerilerinde pozitif yükler bırakarak metal tarafından yarıiletken tarafına geçerler. Yarıiletken tarafında negatif yüzey yükü ve metal tarafında ise pozitif yüzey yükü tabakası oluşur ve bu yüzden bir dipol tabakası gerçekleşir. Yük alışverişi gerçekleştikten sonra gerçekleşen durum Şekil 2.15’de gösterildiği gibi, yarıiletkenin fermi enerji seviyesi ( $\Phi_s - \Phi_m$ ) kadar yükselmiştir. Kontak haline gelmiş ve denge durumundaki metal-yarıiletken omik kontaklarda, yük akışı kolayca her iki tarafa gerçekleşir.





**Şekil 2.15.** Kontakta sonra termal dengede metal/*n*-tipi yarıiletkenin omik kontak enerji bant diyagramı

Eğer metal tarafına bir +V gerilim uygulanırsa yarıiletken tarafından metal tarafına hareket eden elektronlar için engel olmadığından elektronlar bu yönde kolaylıkla hareket ederler. Eğer yarıiletken tarafına bir +V gerilim uygulanırsa hareket eden elektronların karşılarındaki engel çok düşük olur ve bu durumda elektronlar kolaylıkla metal tarafından yarıiletken tarafına akarlar.

## 2.5. Çinko Oksit (ZnO)

Çinko Oksit romalılar tarafında Cadmia olarak adlandırılmış ve pirinç alaşımında sıkça kullanılmıştır. 18. Yüzyılın ortalarında Alman kimyager Cramer, metal Çinkoyu yakarak ZnO elde etmeyi keşfetmiştir. 1781 yılında Fransız bir araştırmacı, Courtois, ZnO üretti ancak 1840 yılına kadar ZnO'yu sanayide kullanmadı. 1840 yılında Leclaire, hızlı ve yüksek kalitede ZnO üretim yöntemi (indirect or French process) oluşturdu. 1850 yılında, New Jersey Çinko firmasında Çinko Oksit yeni bir yöntemle (direct or

American process) üretildi. çinko oksit 19. Yüzyılın ortalarında kimyasal reaksiyonlardaki etkisiyle birlikte daha fazla öneme sahip olmaya başladı. Son zamanlarda çinko oksit ince filmlerin yüksek optik geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletkenlik özelliklerine sahip olmasından dolayı optoelektronik uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır.

### 2.5.1. ZnO'in genel özellikleri

Çinko oksit inorganik beyaz ve toz halinde olan bir bileşendir. Bir II-IV ve doğal *n*-tipi yarıiletkenidir. Yapıştırıcılar, boyalar, ilaçlar, piller, kozmetik ürünleri, seramik, cam ve diş dolgu maddesinde sıkça kullanılmaktadır. Çinko oksit; fotoelektrik cihazlarda, güneş pillerinde, ince film transistörlerde, optoelektronik cihazlarda, gaz sensörlerinde, UV dedektörlerde, piezoelektrik güç çeviricilerde, yüzey akustik devrelerde, termoelektrik aygıtlarda, PH sensörlerde ve biosensörlerde kullanılmaktadır (Tsay *et al.* 2010). ZnO'e ait fiziksel parametreler Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

**Çizelge 2.2.** ZnO'in fiziksel parametreleri (Buxbaum 1998)

Elektron etkin kütlesi	0,24 m
Elektron hareketliliği	200 cm <sup>2</sup> /Vs (300 K)
Hol etkin kütlesi	0,59 m
Hol hareketliliği	5-50 cm <sup>2</sup> /Vs (300 K)
Yoğunluğu	5.65-5.68 gr/cm <sup>3</sup>
Örgü Sabiti	a=3.24 Å, c=5.13 Å, c/a=1.60
Molekül ağırlığı	Zn = 65.38 gr, O = 16 gr, ZnO = 81.38 gr
Yasak enerji aralığı	3.436 eV (0 K), 3.20 eV (300 K)
Eksiton bağlanma enerjisi (uyarım enerjisi)	60 meV
Erime noktası	1975 °C
Örgü Yapısı	Hegzagonal Wurtzite
Örgü enerjisi	965 Kcal/mol
Termal iletkenlik	25.2 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

ZnO bir amfoterik bileşik olarak organik ve inorganik asitlerle tepkimeye girer. Alkali ve amonyaklı (ammonia) çözeltilerde çözülür. Asitik gazlarla ( $\text{CO}_2$ -  $\text{SO}_2$ -  $\text{H}_2\text{S}$ ) kolayca birleşir. Yüksek sıcaklıklarda diğer oksitlerle tepki verir ve çinko ferritler gibi bileşenler oluşturur (Buxbaum 1998).

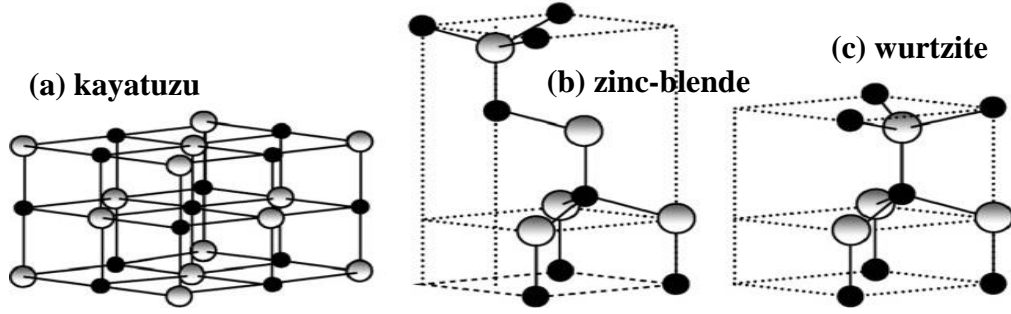
### 2.5.2. ZnO'in kristal yapısı

Çinko oksitin kristal yapısında, bir oksijen atomu dört adet tetragonal (dörtgen) Çinko grubu arasında yer alır. Böylece, ZnO'nun kristal yapısı hegzagonal wurtzite olarak görülebilir. Oda sıcaklığında örgü sabitleri  $a = 3.24 \text{ \AA}$  ve  $c = 5.19 \text{ \AA}$  olarak, tanecik büyüklüğü 50-300  $\text{ \AA}$  olur. *N*-tipi bir yarıiletken olarak açık bir yapısı vardır. Çünkü Zn atomların çoğu tetrahedral bölgelerde yerleşmiş ve oktoheral bölgeler boştur. Bu nedenle oktoheral bölgeler tuzaklarla doldurulmak için uygundur. Akseptör seviyeleri; çinko boşlukları, oksijen arayer kusurları ve kristal yapıda Zn yerine oksijen atomlarının yerleşmesinden oluşur. Donor seviyeleri ise; oksijen boşlukları, Zn arayer kusurları ve kristal yapıda oksijen yerine Çinko atomlarının yerleşmesinden oluşur. (Schmidt-Mende and MacManus-Driscoll 2007).

Çinko Oksitin kristal yapısı Şekil 2.16'da gösterildiği gibi üç fazdadır,

- (a) Wurtzite yapısı
- (b) Zinc-blende (çinko sülfür) yapısı
- (c) Kayatuzu yapısı

Termodinamik açısından normal şartlarda bir tek wurtzite fazındaki yapılar kararlıdır. Zinc-blende fazındaki yapı eğer kübik alttaş üzerinde büyütülürse kararlı olur. Yüksek basınç altında da kayatuzu fazındaki yapılar kararlı olur.



**Şekil 2.16.** Çinko Oksitin (a) kayatuzu, (b) zinc-blende ve (c) wurtzite yapısı (Udom *et al.* 2013)

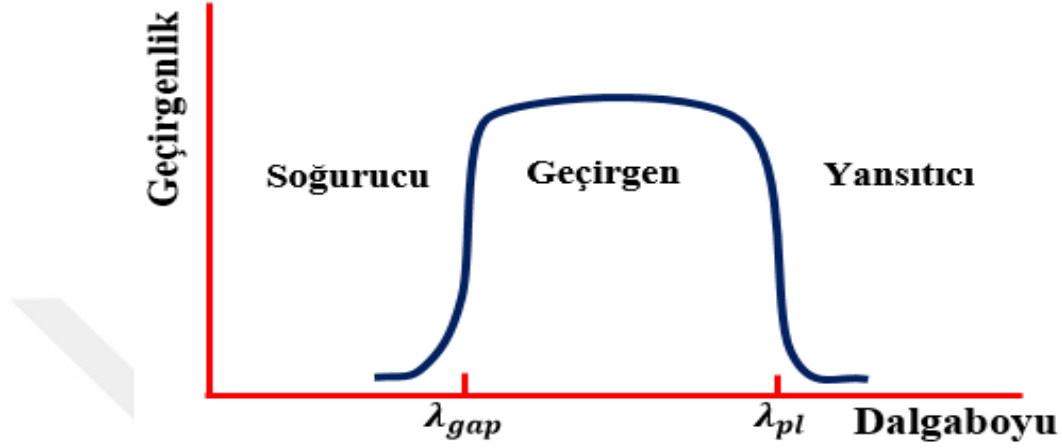
### 2.5.3. ZnO'in elektriksel özellikleri

ZnO filmlerde; ısıtma işlemi, katkılama oranı, katkılanan malzemenin türü, büyütme oranı, büyütme metodu, taşıyıcının yapısı, büyütme sıcaklığı ve film kalınlığı elektriksel iletkenliğini etkileyen faktörlerdir. Doğal *n*-tipi yarıiletken özellikteki Çinko Oksit stokiyometriden sapmayla yüksek iletkenliğe sahip olur. İletkenlik elektronları, metal iyon ( $H_2^-$ , In-, Li) fazlalıkları ile ve oksijen boşlukları ile donör seviyede oluşur ve katkılanma ile iletkenlik yükselir. Donör seviyeleri kimyasal indirgenme ile sağlanır. Donör seviyesi, taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olarak 0.02-0.05 eV değerleri arasındadır. Çinko oksit ince filmlerin öz direnci  $10^{-3} - 10^5 \Omega\text{cm}$  değerleri arasındadır ve oda sıcaklığında yasak bant aralığının enerjisi ( $E_g$ ) 3.2 – 3.3 eV arasında değerler alır (Joseph *et al.* 1999). Çinko oksit doğal iç kusurlarından (çinko fazlalığı veya oksijen boşlukları) kaynaklanan iletkenliğe ilave, farklı katkılama malzemeleri ile dış kusurlar oluşur ve iletkenliğe katkıda bulunur (Lee and Park 2003).

### 2.5.4. ZnO'in optik özellikleri

İletken şeffaf ince filmlerin optik özelliklerini, mikroyapı, kaplama tekniği ve kirlilik oranı gibi parametreler etkilemektedir. Şeffaf yarıiletkenler kızılötesi (IR) bölgesinde yansıtıcı, yakın infrared bölgesinde (NIR) geçirgen özellik gösterirler. Şeffaf yarıiletken malzemenin spektrum dağılımı Şekil 2.17'de gösterildiği gibi, çok düşük

dalgaboylarında yasak bant aralığı etkin olur ve soğurma oluşur. Büyük dalgaboylarında serbest elektronlar yüzünden yansıma meydana gelir.



**Şekil 2.17.** Şeffaf yarıiletken malzemenin spektrum dağılımı,  $\lambda_{gap}$  bant aralığı soğurma dalgaboyu ve  $\lambda_{pl}$  serbest elektron plazma soğurma dalgaboyu

ZnO ince filmlerin büyütme teknikleri ucuz ve belirli bir UV soğurma bölgesine sahiptir. ZnO ile benzer işleve sahip ITO, optoelektronik cihazlar için mükemmel özelliklere sahiptir ama In kaynak malzemesi çok pahalıdır. Buna karşın ZnO ucuzdur ve toksik madde içermez. ZnO filmleri 0.4-2  $\mu m$  dalgaboyları için şeffaf ve 2-4  $\mu m$  dalgaboyları için yansıtıcıdır. ZnO filmlerin ortalama optik geçirgenliği %85 değerinde olmakla bir çok araştırma için konu olmuştur (Lee and Park 2003; Altamiranojuarez 2004; Musat *et al.* 2004; Valle *et al.* 2004).

### 2.5.5. Katkılı çinko oksit

Yarıiletken malzemelerin katkılanabilir olması elektriksel özelliklerini değiştirmekte ve daha fazla alanda kullanılmasını sağlamaktadır.

Katkılama atomlarının boyutu ve değerlik oranları ZnO'in yapısı ve elektriksel özelliklerini etkiler. ZnO'in fiziksel özelliklerini iyileştirmek için Al, Fe, Co, In ve Mn gibi elementlerle katkılanmıştır (Yoshino *et al.* 2008; Wienke and Booi 2008; Belghazi

*et al.* 2009; Singh *et al.* 2009; Bacaksiz *et al.* 2010; Prasada Rao and Santhosh Kumar 2010; Soumahoro *et al.* 2010; Zhu *et al.* 2011). Araştırmalara göre tek değerlik metal oksit (Li- Na oksitler) atomları, çinko oksit'e katkılандıkları zaman, oksijen boşlukların artmasına neden olur. Üç değerlik metal oksit (Al oksit) atomları katkılандıkları zaman oksijen boşlukları azalmış olur. Ayrıca ZnO filmleri, Al, Ga ve In gibi elementlerle katkılanırsa elektriksel özellikleri değişmiş olarak, kararlı yapılar elde edilir (Ziel 1968; Lee and Park 2003; Musat *et al.* 2004; Valle *et al.* 2004; Tahar 2005; Sagar *et al.* 2005; Kuo *et al.* 2006b; Musat *et al.* 2006; Xu *et al.* 2006).

## 2.6. Lantanyum (La)

Lantanyum bir yumuşak ve dövülebilir metaldir. 1839 yılında isveçli kimyager Carl Mosander tarafından keşf edilmiştir. Lanthanum, (La) ile gösterilir ve atom numarası 57 olarak, lantanid adı verilen nadir toprak grubunun başında gelmektedir. Havada hızlıca oksit olur ve su ile hidroksit oluşturur ve ateş karşısında hızlıca tutuşabilir bir elementtir. Tuz şeklinde olan bileşenleri rahatça çözülmez. Eski televizyonlarda ve floresans lambalarda fazlaca bulunabilir bir elementdir. Lantanyum oksit ( $La_2O_2$ ) infrared soğuran camlarda, kamera ve teleskop merceklerinde kullanılır. Lantanyum nadir olarak çok az miktarda doğada bulunur ama nadir toprak elementler arasında çokca bulunan bir elementtir. La katkılı ZnO filmlerinde  $La^{+3}$  iyonları ZnO örgüsüne girerek  $Zn^{+2}$  iyonlarının yerini alır ve çinko oksitin örgüsü genişler. Bunun nedeni  $La^{+3}$  iyonlarının iyonik yarıçapının (0.106 nm),  $Zn^{+2}$  iyonlarının yarıçapından (0.074 nm) ok daha büyük olmasıdır (Chen *et al.* 2008). La katkı oranı arttıkça filmlerin yüzeyinde La-O-Zn yapısı oluşarak kristal büyümesi engellenir.

## 2.7. ZnO Sentezleme Yöntemleri

Son yıllarda ince film teknolojisi üzerinde araştırmalar geliştirilmiş ve bilimsel çalışmalar yoğunlaşmıştır. İnce filmler, aygıt teknolojisinin temelidir ve bu yüzden ince filmlerin performansını iyileştirmek, teknolojik olarak son derece önemlidir. Optiksel uygulamalar için büyütilen ince filmlerin geçirgen ve homojen olması önemlidir.

Elektriksel uygulamalar için de ince filmlerin pürüzsüz olması ve sürekli yüzeylere sahip olması önem taşımaktadır. Bu noktada, ince film büyütme sistemleri istenilen özellikte filmlerin büyütülmesinde önem arz etmektedir.

Farklı kaplama teknikleri ile görünür bölgede yüksek geçirgenlik ve düşük dirençli filmler elde edilebilir. Her ince film büyütme tekniğinin avantajı ve dezavantajı vardır. Örneğin, püskürtme yöntemi ucuzdur ama filmlerin özellikleri her zaman aynı olmayabilir. Saçırma yöntemi ile yapılan filmlerin kalitesi yüksek olmakla beraber ekipman maliyeti yüksek olup, üretim miktarı düşüktür. Araştırmalara göre farklı yöntemlerle yapılan numunelerin özellikleri ve sonuçları önemli ölçüde birbirinden farklılık göstermektedir (Agura *et al.* 2003; Romero *et al.* 2006; Kim and Tai 2007; Yang *et al.* 2009; Kim *et al.* 2010). Farklı yöntemlerdeki optimum katkı konsantrasyonları farklılık gösterir. Yani, elementlerdeki kirlilikler ve kaplama parametrelerinin farklılıkları, sonuçların farklı olmasına neden olur. Filmlerin elektriksel ve optik özellikleri aynı zamanda, kristal yapının kirliliğine ve morfolojisine bağlıdır. Bu yüzden iki aynı yarıiletken malzeme, iki farklı teknik ile kaplandığı zaman filmlerin fiziksel özellikleri farklılık gösterebilir. Aynı teknikteki farklı parametrelerin uygulanması da filmlerin farklı özellik göstermelerine sebep olur. Şeffaf iletken oksit filmler yapmak için farklı yöntemler kullanılır (Aslan 2004; Chaabouni *et al.* 2004). Bunlardan bazıları Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. İnce film üretim teknikleri

### 2.7.1. Sol-jel yöntemi

Sol-jel yönteminde film biriktirmek için sıvı fazı (sol), katı fazına (jel), dönüştürülerek, sol çözeltilisindeki çözücü uzaklaştırılır. Genellikle sol çözeltilisi metal alkoksit, su veya alkol içerir. Sol ortamında koloidal katı parçacıkları kararlı ve sıvı ortamda dağılmış olurlar. Kolloid yapılar heterojen ve homojen yapıları arasındadırlar. Sol durumundaki koloidal parçacıkların boyutu sabit olmalıdır. Genel olarak kolloid parçacıkların boyutu 1-100 nm arasındadır. Moleküller arası Van der Waals ve elektriksel itme kuvvetlerinin etkisi, yer çekimi kuvvetinden çok daha büyük olmasından süspansyonda çökme gerçekleşmez. Sol-jel yöntemi ile film büyütmek için, genellikle alttaş malzemesi olarak cam veya seramik kullanılır. Alttaş üzerinde, sol döndürerek, daldırarak veya püskürterek taşınır. Alttaş üzerindeki sıvı, sıcaklıkla kurutulur ve jel durumuna geldiğinde alttaş üzerinde ince film oluşturulur. Sol-jel yöntemi ile enerji tasarrufu yapılır. Kullanılan aletler ve malzemeler ucuzdur. Farklı geometride olan alttaşlar



üzerinde kaplama yapılabilir. Kalınlığı aynı ve nisbeten homojen filmler elde edilebilir. Fakat kaplama sırasında malzeme kaybı fazla olabilir.

### **2.7.2. Sol-jel döndürerek kaplama yöntemi (Spin coating)**

Bu yöntem ile sert ve küçük bir alttaş üzerinde film büyütülür. Döndürerek kaplama yöntemi dört aşamadan ibarettir, sol damlatma, döndürme başlangıcı, döndürme ve buharlaşma. Filmin kalınlığı solun viskozitesine bağlıdır. Döndürerek kaplama tekniğinde alttaş yüzeyine damlatılan sol düzgün bir şekilde dağılır ve homojen bir film elde edilir. Yüze damlatılan sol merkezcil kuvvet ile radyal şekilde dışa doğru akarak bu kuvvetin tersinde olan sürtünme kuvveti ince bir film oluşmasını sağlar. Yer çekimi kuvveti merkezcil kuvvet karşısında ihmal edilebilir kadar küçüktür. Çözeltinin dağıtılması statik ve dinamik yöntemlerle sağlanır. Statik yöntemde sıvı malzeme alttaşın merkezine damlatılır ve damlatma miktarı kaplanan yüzeyin büyüklüğüne göre, 100-500 µL arasında olabilir. Ama eğer damlatılan sıvının viskozitesi yüksekse veya alttaşın yüzey alanı büyük olursa fazla miktarda çözelti gerekir. Dinamik yöntem ile de dönderme hızını (rpm) ayarlayarak sıvının dağılması ve filmin inceliği ayarlanabilir.

### **2.7.3. Sol-jel daldırarak kaplama yöntemi (Dip coating)**

Bu yöntem ile de, geçirgen iletken tabakalar üretilir. Daldırma tekniğinde cam gibi taşıyıcı, belli bir hızla hazırlanan sol'un içerisine daldırılır ve aynı hızla geri çıkarılır. Film kalınlığı daldırıp çıkarma aralığına bağlı değildir. Daldırarak kaplama tekniği beş aşamadan ibarettir; daldırma, yukarı çekme, kaplama, süzülme ve buharlaşma. Sol ile temas halinde olan taşıyıcının yüzeyleri kaplanmış olur. Kaplama aşamasında gerçekleşen kuvvetler, yer çekimi kuvveti, taşıyıcı yüzeyinde tutulan sol'dan kaynaklanan yüzey gerilim kuvveti ve sol ile taşıyıcı arasındaki sürtünme kuvveti olarak bilinir. Daldırarak kaplama yöntemi ile çok katmanlı film oluşturma rahattır, kaplama kalınlığı rahatça kontrol edilebilir ve düzgün film oluşturulur. Değişik geometride alttaşlar kaplanabilir.

#### 2.7.4. Sol-jel püskürterek kaplama yöntemi (Spray pyrolysis)

Bu yöntemde çözelti, püskürtme başlığı ile atomize edilir ve hava veya azot gibi taşıyıcılar ile sıcak alttaş üzerine püskürtülür. Püskürtme yöntemi ile düşük sıcaklıklarda ve düşük maliyet ile hızlı olarak film üretilebilir. Kolaylıkla katkılı film üretilir ve kullanılması çok basittir (detaylı olarak 3.2 bölümünde bahsedilmiştir).

#### 2.7.5. Saçtırma yöntemi (Sputtering)

Bu yöntem ile hedef malzemedan gelen atomlar veya moleküllerden bir alttaş üzerinde film biriktirme işlemi gerçekleşir. Saçtırma yöntemi bir fiziksel yöntemdir çünkü hedef malzeme yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edildiğinde hedef malzemedan fiziksel olarak parçacıklar koparak alttaş üzerinde kaplama işlemi gerçekleşmiş olur. Kaplama işlemi vakum ortamında ve inert gazlar (Ar gibi) ile plazma oluşturularak ve eksi yüklü iyonlar katodu (hedef malzeme) bombardıman etmesi ile gerçekleşir. Farklı hedef malzeme kullanarak istenilen film yapılabilir. Saçtırma yöntemi ile yapılan filmler homojen olur ve filmler kristalografik özellikler gösterir. Ayrıca bu sistem ile düşük sıcaklıklarda da kaplama işlemi yapılır. Fakat cihazın çalışma prosedürü yavaştır.

Saçtırma verimi  $\mu$  ile gösterilir ve;

$$\mu = \frac{\text{hedef malzemedan kopan parçacık sayısı}}{\text{hedef malzemeye çarpan iyon sayısı}} \quad (2.6)$$

eşitliği ile ifade edilir. Saçtırma oranı bombardıman eden iyonların enerjisine, kütesine, hedef malzemenin türüne ve sıcaklığına bağlıdır. Bu yöntemde 1-100 mtorr gibi yüksek vakum değerlerine ihtiyaç vardır. Farklı saçtırma yöntemleri katoda (hedef malzemeye) uygulanan gücün türü ile DC veya RF olarak sınıflandırılır. DC magnetron saçtırma iletken malzemeler için ve RF magnetron saçtırma ise iletken ve yalıtkan malzemeler için uygulanır.

### **2.7.6. Darbeli lazer biriktirme (PLD)**

Bu yöntemde lazer demeti vakum ortamında hedef malzeme üzerine odaklandırılır ve hedef malzeme yüzeyinde plazma oluşarak, plazma içerisindeki parçacıklar ile ısıtılmış alttaş üzeri kaplanır ve ince film oluşur. Kaplama odacığının basıncı düşürülür ve vakum ortamında yabancı gazların olmamasına çalışılır. Yüksek saflıkta olan kaplama gazı ortama girer. Böylece, kaplama odacığı yabancı atomlardan temizlenir ve kaplama işlemi başarılı olarak gerçekleşir. Filmin özellikleri genel olarak lazer demetinin özelliklerine bağlılık gösterir. Lazer ışığının frekansı ve enerjisi filmin kalitesini etkiler. Kristal büyüme işleminde filmin özelliklerini etkileyen parametreler: kaplama odacığındaki basınç, sıcaklık, hedef malzeme ve alttaş arasındaki mesafe, kaplama öncesi uygulanan vakum, ısıtma ve soğutma hızları, hedef malzeme ve alttaşın dönme hızları ve kaplama işleminden sonra uygulanan ısıl işlemleri olarak bilinir.

### **2.7.7. Kimyasal buhar biriktirme (CVD)**

Bu yöntemde, buhar fazında olan kaynak malzeme, taşıyıcı bir gaz ile ince film oluşturmak için alttaş yüzeyine gelir. Kullanılan gaz veya gazlar 10 Pa basınç değeri ile reaksiyon odacığına girerek ısıtılmış alttaşın yüzeyine ulaşır ve alttaş ile reaksiyona girer. Büyüme bölgelerinde tepkimeye giren gaz türleri difüzyon ile, ve yoğunlaşarak alttaş yüzeyinde katı filmi oluşturur. Eğer tepkime difüzyonsuz gerçekleşirse, büyüme sırasında pürüzlü yüzeye sahip ince film oluşur. Kaynak malzeme için tepkime sıcaklığı, erime noktası ve oda sıcaklığında dayanıklılık önemli parametrelerdir. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile yüksek kalitede ve homojen filmler elde edilir, büyüme oranı yüksektir ve maliyeti düşük bir yöntemdir. Fakat yüksek sıcaklığa ihtiyaç olduğundan ve zehirli gazların kullanılmasından kaynaklanan dezavantajlar dikkate alınmalıdır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Giriş

Bu bölüm katkısız ve farklı oranlarda La katkılı ZnO (ZnO: La) ince filmlerin ve Au/ZnO: La/Si/Al Schottky tipi aygıtların yapımı ile ilgili gerekli olan malzemeler, numune hazırlaması, temizlenmesi, filmlerin ve diyotların üretimi ile ilgili bilgi içermektedir. Hazırlanan numunelerin özelliklerini araştırmak için kullanılan cihazlar ve teknikler bu bölümde yer almaktadır.

#### 3.2. Kimyasal Olarak Püskürtme (Spray Pyrolysis) Yöntemi

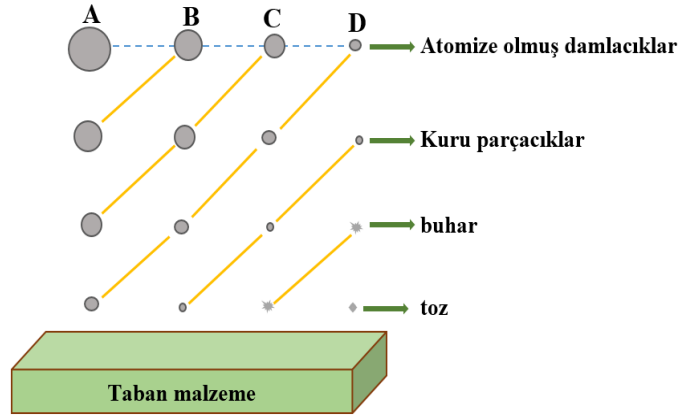
Kimyasal Püskürtme yöntemi, numune yüzeyine çözeltiyi püskürterek kaplama işlemidir. Püskürtme tekniği ile yarıiletken ince film veya çok tabakalı ince film büyütme mümkündür (Perednis and Gauckler 2005). Kullanılması kolay olduğundan, geniş yüzeylerde de uygulanabilir. Bu yöntem ile homojen ve aynı kalınlıkta numune elde etmek zordur (ultrasonik nozul yardımı ile homojen filmler elde edilebilir). Son yıllarda cam endüstrilerinde ve güneş pilleri uygulamalarında süperiletken filmler bu yöntem ile başarıyla büyütülmüştür (Ortega-López and Morales-Acevedo 1998; Okuya *et al.* 2002). Çalışmada çözeltiyi atomize etmek için hava kullanılmıştır. Farklı nozul çeşitleri bulunmaktadır. Bunlar; hava ile sıvıyı püskürten nozul (air blast), kısa dalgaboyu ile çözeltiyi iyi atomize eden nozul (ultrasonik) ve yüksek elektrik alan yardımı ile çözeltiyi püskürten nozuldur (elektrostatik). Kimyasal püskürtme metodunda atomize olmuş çözelti, sıcak bir alttaş üzerine püskürtülür. Bu yöntemde filmlerin kalitesini ve özelliğini etkileyen parametreler, alttaşın özellikleri, alttaşın sıcaklığı, püskürtme nozulu, püskürtme miktarı, püskürtme süresi, çözeltinin molaritesi, katkı malzemesi ve miktarı, çözelti damlacıklarının düzgün boyutta (Uniformity) olması ve püskürtülen çözeltinin akış hızı olarak bilinir (Gurumurugan *et al.* 1995; Sajeesh *et al.* 2010). Çözelti damlacıkları film oluşturmak için alttaş yüzeyine yaklaştığı zaman tamamen buharlaşması gerekiyor ve bu işlem, ideal taşınma olarak tanımlanır. Şekil

3.1'de gösterildiği gibi A damlacıkları çok büyüktür. Bundan dolayı tabana gelene kadar çevresinden yeterli ısıyı alamaz ve buharlaşamaz. Böylece taban üzerinde kuru bir çökelti bırakarak buharlaşır. Diğer yandan da A damlacıkları büyük olduklarından dolayı taban yüzeyinde ısıyı absorbe eder ve taban yüzeyi sıcaklığını düşürür ve kötü bir film oluşur. B damlacıklarının boyutu, A damlacıklarının boyutundan daha küçüktür ve bu yüzden damlacık tabana ulaşana kadar buharlaşabilir, ama B boyutundaki damlacıkların çoğu suyunu kaybederek yoğunlaşır ve taban yüzeyine gelir, bu durumda ısı, damlacıkları buharlaştırmak için yetersiz kalır ve düşük kaliteli film oluşur. C damlacıkların boyutu A ve B damlacık boyutlarından daha küçüktür. Damlacıklar taban yüzeyine ulaşmadan buharlaşarak heterojen bir reaksiyon gerçekleşir. Böylece, C damlacıkları ile en kaliteli filmler elde edilir. Reaksiyon olayları;

1. Reaksiyon moleküllerinin tabana ulaşması,
2. Bir veya fazla molekülün taban yüzeyinde absorbe ve desorbe olması,
3. Moleküllerin kristal örgüsünde birleşmesi,
4. Bazı moleküllerin tabana ulaştığı zaman, yüzeyden uzaklaşması olarak (çözücünün buharlaşması),

kimyasal ve fiziksel olaylar gerçekleşir.

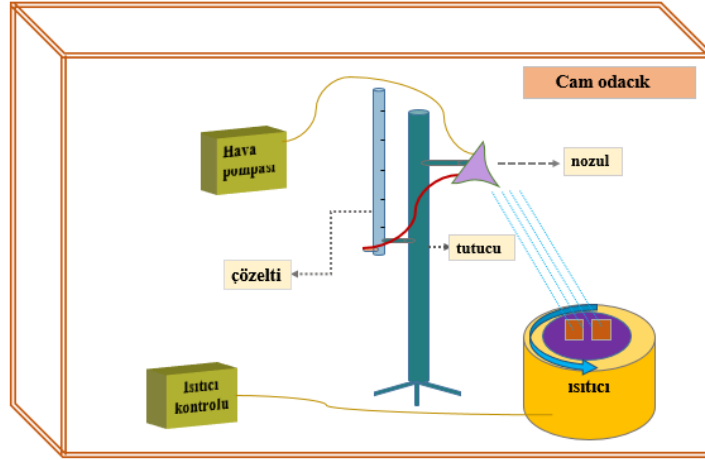
D damlacıklarının boyutu çok küçük olmasından tabana ulaşmadan buharlaşır ve taban üzerinde toz halinde birikir ve ince filmin bozulmasına neden olur. C sürecindeki damlacıklar en idealdir. Bu yöntemde taban malzemesi olarak cam, çelik titanyum, tungsten, alüminyum gibi metaller ve seramik, plastik ve polimer gibi malzemeler kullanılır.



**Şekil 3.1.** Damlacık boyutuna göre farklı depozisyon durumları

Tabanın sıcaklığı termostatla ve püskürtme aralık zamanları kontrol paneliyle kontrol edilir. Kimyasal bileşeni dikkatle seçilmelidir, çünkü solüsyon içindeki kimyasallar termal olarak kimyasal tepkimeye girerler ve altlık üzerinde istenilen kimyasal malzeme ile film oluşur. Taşıyıcı sıvı gibi diğer bileşenler, altlığın sıcaklığıyla buharlaşır. Bu çalışmada, nozulun sıvı damlacıklarını damlatmasından dolayı, nozul belirli bir açı ile deney düzeneğine yerleştirildi. Bu durum Şekil 3.3’de gösterilmiştir

Çalışmada kullanılan deneysel tasarımı Şekil 3.2’de gösterildiği gibidir ve hava pompası, nozul, çözelti tutucusu, termostat ve cam odacıktan oluşmaktadır. Isıtıcı sıcaklığı 370°C’de ayarlandı ve ısıtıcı sabit hızla dönerek filmlerin homojen olarak büyümesi amaçlandı. Her bir kaplama için (%0, %1, %2, %4, %5 (%at.)) 10 ml (0.1 M) çözelti püskürtüldü. Başlığın uç kısmı ve ısıtıcının yüzeyi arasındaki uzaklık, 30 cm olarak ayarlandı.



Şekil 3.2. Kimyasal püskürtme cihazının şeması



Şekil 3.3. Kimyasal püskürtme cihazı

**Isıtıcı:** alttaşın sıcaklığı film büyütme için çok önemlidir. Isıtıcının sıcaklığı, kontrol panel ile kontrol edilir. Düzenekte 2 adet 500 W halojen lamba kullanılmıştır. Isıtıcı üzerindeki bölüm, homojen film elde etmek için sabit bir hızla dönmektedir.

**Hava pompası:** taşıyıcı gazı, nozul yardımı ile atomize solüsyonu sıcak altlık üzerine püskürtmesi için hava pompası kullanılır.

**Başlık:** solüsyon püskürtme cihazıdır, solüsyonu atomize edip ve sıcak altlık üzerine püskürtür.

**Alttaş özellikleri:** Filmlerin kristalleri amorf yapılı cam (lamel) üzerinde büyütüldü. Cam alttaşlar ucuz ve geçirgen olduğu için uygundur. Camların boyutu (yüzey alanı) 1 cm<sup>2</sup> olarak kesilmiştir.

### 3.3. X-Işını Kırınım Metodu (XRD)

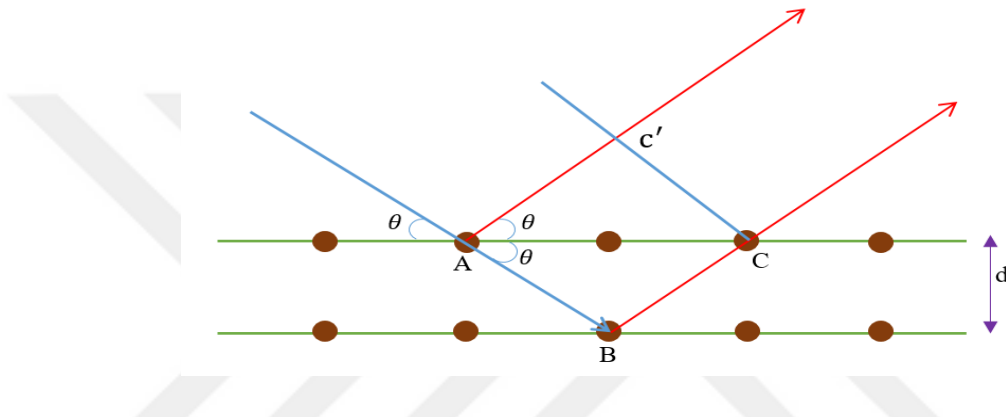
Elektromanyetik spektrum yedi bölgeden oluşur: radyo dalgaları, mikro dalgalar, kızılötesi dalgalar, görünür ışıklar, ultraviyole(morötesi) ışınlar, x-ışınları ve gama ışınları. Radyo dalgaları en büyük dalgaboyuna ve gama ışınları en küçük dalgaboylarına sahiptirler. Bir fotonun dalgaboyu-frekansı, ve dalgaboyu-enerjisi arasında ters ilişki vardır. X-ışınları ikinci en büyük frekansa ve enerjiye ve ikinci en küçük dalgaboyuna sahiptirler. X-ışınlarının dalgaboyu 0.01-10 nm, frekansları  $3 \times 10^{16}$ - $3 \times 10^{19}$  Hz, ve Enerjileri 120 eV-120 keV arasında olan elektromanyetik dalgaboylardır .

X-ışınları 1895 yılında alman fizikçi Wilhelm Conrad Rontgen tarafından keşfedildi, ama ne olduklarını anlamadığı için onlar X-ışınları olarak adlandırdı (Cullity 1978). Görünür ışıkların dalgaboyu büyük olduğundan dolayı kristallerin yapısını incelemek için yetersiz kalır ama X-ışınları kullanarak, dalga boyları kristal örgüsündeki atomlar arası mesafe ile yaklaşık aynı olduğu için kristale nüfuz ederek, kristalin yapısı ve yapı parametreleri hakkında bilgi verir. İlk olarak Max Von Laue, 1912 yılında X-ışını kırınımının dalgaboyları kristaldeki iki komşu atomun uzaklığı ile kıyaslanabilir mertebede olduğu için kristal yapının X-ışınları ile incelenmesini önerdi. Laue'nun önerisi ilk olarak bakır sülfür üzerinde denendi ve kristal yapının periyodik olduğu ortaya çıktı (Cullity 1978).

X-ışını üretmek için X-ışını tüpleri kullanılır. Bu tüplerde katot tarafından (tungsten filaman gibi) elektron yayılır ve diğer taraf anot (bakır gibi) olarak elektronları toplar.



Bu durum bir elektron akımı veya bir ışınlanmanın meydana gelmesine neden olur. Eğer bir yüksek güçlü voltaj kaynağı kullanılırsa elektronlar hızlanır ve X-ışınları oluşur. X-ışınları kırınımından bir çok bilgi elde edilir. X-ışınları filmlerin kristal yapısı, kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri hakkında bilgi vermesinden dolayı çok önemli bir keşif olmuştur. Örgü noktalarından saçılan X-ışınlarının yapıcı girişim oluşturabildiği ilk olarak W.L. Bragg tarafından, Bragg yasası ile ifade edildi.



**Şekil 3.4.** Kristal düzlemlerine düşen ve yansıyan ışının yol farkının şeması

$AC'$  boyunca yansıtılan ve  $AB$  boyunca geçen ve  $BC$  boyunca yansıtılan ışınların, katettiği yollar farklıdır.

$$(AB+BC) - (AC') \quad (3.1)$$

Aynı fazda olan farklı iki dalga aynı zamanda bir noktaya düşer ve bunlar aynı zamanda yapıcı girişimdirler. Eğer bu yol farkı dalgaboyunun herhangi bir tamsayı değeri ile eşit olursa, o zaman;

$$(AB+BC) - (AC') = n\lambda \quad (3.2)$$

olur ve;

$$AB = BC = \frac{d}{\sin\theta} \quad (3.3)$$

$$AC = \frac{2d}{\tan\theta} \quad (3.4)$$

$$AC' = AC \cdot \cos\theta = \frac{2d}{\tan\theta} \cos\theta = \left( \frac{2d}{\sin\theta} \cos\theta \right) \cos\theta = \frac{2d}{\sin\theta} \cos^2\theta \quad (3.5)$$

$$n\lambda = \frac{2d}{\sin\theta} (1 - \cos^2\theta) = \frac{2d}{\sin\theta} \sin^2\theta \quad (3.6)$$

$$n\lambda = 2d \sin\theta, \quad (3.7)$$

eşitliklerden Bragg yasasının denklemi elde edilir. Bragg yasasını ele alarak,  $\theta$  açısıyla gelen  $\lambda$  dalgaboylu ışığın, iki komşu düzlem arası katettiği yol farkı  $2d \sin\theta$  olur. X-ışınları her bir düzlemde yansımaya uğrar ve difraksiyon meydana gelir. Bu amaç doğrultusunda, monokromatik ışık kullanılır ve eğer yol farkı ile difraksiyona uğrayan dalgaboyu aynı fazda olursa (yol farkı, dalgaboyunun tam katlarına eşit olursa) Bragg yasası kullanılabilir. Numuneden gelen ışıkların şiddeti dedektör ile algılanır.

### 3.3.1. Kristal büyüklüğünün ölçülmesi

X-ışını kırımından malzemenin kristal büyüklüğü hesaplanabilir. X-ışını kırımından elde edilen pikin gözleendiği açıdaki yarı maksimumdaki tam genişliği (FWHM) ile ilişkilidir. Kristal büyüklüğü Scherrer denklemi ile bulunabilir.

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos\theta} \quad (3.8)$$

burada;  $\beta$ , pikin yarı yükseklikdeki genişliği,  $D$ , kristal büyüklüğü,  $\lambda$ , X-ışınının dalgaboyu, ve  $\theta$ , düzlemdeki Bragg açısıdır. Scherrer denklemi polikristal malzemeler için kullanılır ve bir düzeltme faktörü ( $k \approx 1$ ) ile verilir.

$$\beta = \frac{k\lambda}{D\cos\theta} \quad (3.9)$$

ZnO gibi bir yarıiletken için  $k \approx 0.9$  olur. Yarı yükseklikteki pikin genişliği ve kristal büyüklüğü denklemden olduğu gibi ters ilişkilidir. XRD pikleri geniş olunca, kristal boyutu küçük olur. Polikristaller için dar pikler (daha az yarı yükseklik genişliği) kristal taneciklerinin büyük olmasını gösterir. Kristal büyüklüğü kristalin kalitesi hakkında da bilgi verir (Hammond 2001).

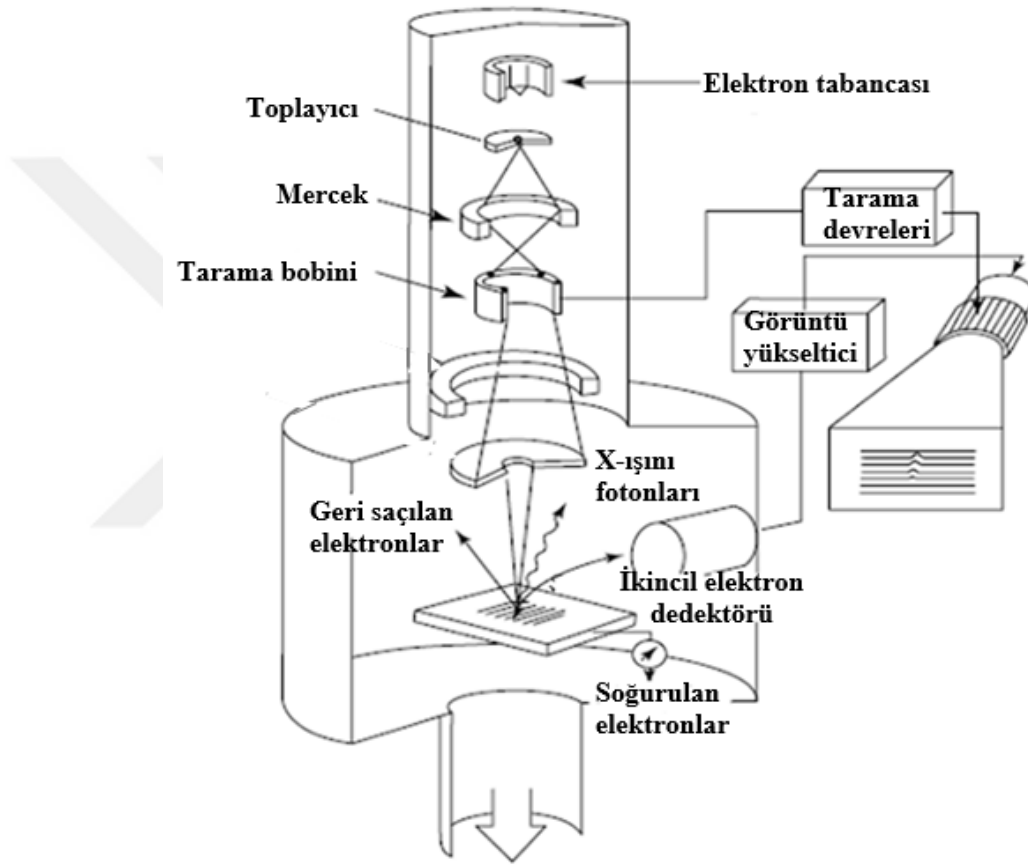
Bu çalışmada, La katkılı ZnO ince filmlerin kristal yapısı Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) bulunan Panalytical markalı Empyrean modeli kırınım ölçer cihazı ile incelenmiştir. Bu cihazda Cu  $k\alpha$  ( $\lambda = 0.15406$  nm) karakteristik X-ışını kullanılmıştır. Kırınım deneyleri, kırınım gerçekleşmek için  $20^\circ$ - $80^\circ$  ( $2\theta$ ) aralığında ve  $1^\circ/\text{dakika}$  tarama hızında taramıştır.

### 3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

İlk elektron mikroskobu (elektronlarla çalışan mikroskop), 1933 yılında, Ernst Ruska tarafından kuruldu. SEM görüntüleri numunenin homojenlik durumu, taneciklerin varlığı, faz dağılımı, tabana tutunma durumu, vs. hakkında bilgi verir. Elektronların dalgaboyu, görünür ışıklardan çok küçüktür. Bu özellik nedeniyle SEM ile elde edilen görüntüler, görünür ışıklarla çalışan mikroskoplardan elde edilen görüntülerden daha detaylı olmasına neden olur. İlk kurulan elektron mikroskobu geçirgenlik özelliği ile çalıştırıldı ise de sonradan taramalı elektron mikroskobu, yansıma özelliğine dayanan elektron mikroskobu ve taramalı geçirgen elektron mikroskopları icat edildi. Görünür ışıklarla çalışan mikroskopların büyütme kabiliyeti 1000 X, ve odak derinliği  $0.1 \mu\text{m}$  olarak, elektron mikroskoplarının büyütme kabiliyeti 1 000 000 X, ve odak derinlikleri  $30 \mu\text{m}$ 'dir.

Taramalı elektron mikroskobu, numuneyi elektron ışınları ile tarayarak görüntü oluşturur. Taramalı elektron mikroskoplarının bir çok üstünlükleri vardır, mesela

mercekler yerine, elektromıknatıslar yardımı ile görüntünün büyütülmesi rahatlıkla kontrol edilebilir. Taramalı elektron mikroskoplarda, geçirgenliğe dayanan elektron mikroskopların aksine, elektronlar numunenin yüzeyi ile etkileşir. Bu yüzden derin bölgelerden de görüntü oluşur ve numunenin üç boyutlu görüntüsü, yüksek kalite ile elde edilir.



**Şekil 3.5.** Taramalı elektron mikroskopun temel kısımları (Schroder 2006)

Şekil 3.5’de gösterildiği gibi, taramalı elektron mikroskoplarda en önemli kısımlar, elektron tabancası, anot, manyetik mercekler, tarama bobinleri, geri saçılan elektron dedektörü, ikincil elektron dedektörü, orta derecede vakum üreten vakum pompasıdır. Elektron ışınları, elektron tabancasıyla üretilir ve elektromıknatıslardan ve tarama bobinlerinden geçerek, numune üzerine düşerler. Elektron ışınları numune üzerine düştüğünde, X-ışınları, auger elektron, birincil geri saçılan elektronlar ve ikincil elektronlar oluşur ve dedektörlerle toplanıp, sinyallere dönüşerek, görüntü sağlanır. En

önemli sinyallerden biri, ikincil elektronlardır, çünkü numunenin morfolojisi ve topografisi hakkında bilgi verirler. Numune üzerine gelen elektronlar, numune atomlarının kabuğundan elektron kopararak ikincil elektronlar meydana gelirler. Sinyal elektronlarının numuneden dedektöre giderken ortamdaki fazla partiküllerle çarpışmalarını için vakum gerekir. Vakumun seviyesi dedektörün tipine bağlıdır. Mikroskopların görüntü çözünürlükleri, elektronların enerjisine bağlıdır.

DeBroglie dalgaboyu,

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (3.10)$$

eşitliği ile verilir ve burada,  $\lambda$ , dalgaboyu,  $h$ , Planck sabiti,  $m$ , parçacığın kütlesi ve  $v$ , parçacığın hızı olur, potansiyel alanından geçen elektron için,

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2qmv}} \quad (3.11)$$

$$\lambda = \frac{1.23}{\sqrt{v}} (nm) \quad (3.12)$$

eşitliği kullanılır ve burada,  $v$ , hızlanan potansiyel,  $q$ , elektronun yükü ve  $m$ , elektronun kütlesi olarak ifade edilir, Abbe denklemi,

$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} \quad (3.13)$$

eşitliği ile ifade edilir. Elektron mikroskopları için,  $n \approx 1$  ve  $n \sin \alpha \approx \alpha$  dır. Burada  $\alpha$ , objektifin, radyanda yarım açılan açısıdır.

$$d = \frac{0.753}{\alpha \sqrt{v}} (nm) \quad (3.14)$$

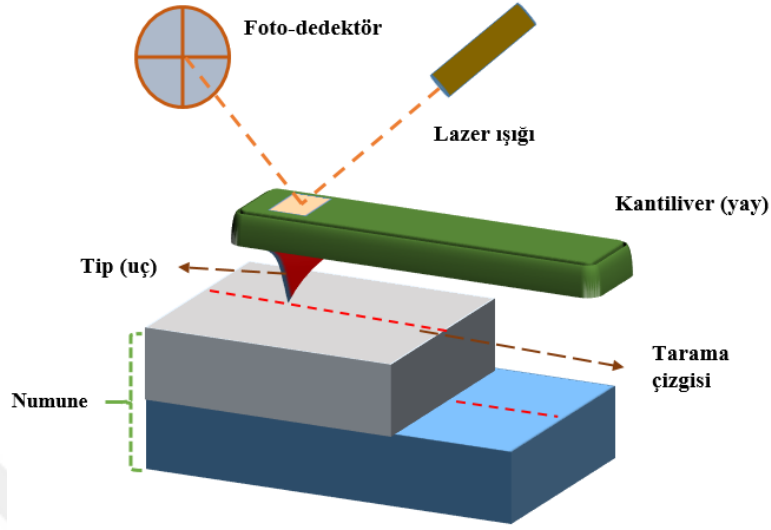
Taramalı elektron mikroskopların voltajı 1 ve 30 kV arasındadır. Bu yüzden cihazın etkili çözünürlüğü yaklaşık olarak 1nm'dir.

Bu çalışmada, La katkılı ZnO ince filmlerin SEM görüntüleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) bulunan Zeiss marka Sigma 300 modeli SEM cihazı ile araştırılmıştır.

### 3.5. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu ilk olarak 1986 yılında Binnig, Quate ve Gerber tarafından icat edildi (Binnig *et al.* 1986). Malzemenin yüzey özellikleri, elektriksel ve optiksel parametrelerini etkiler. Malzemenin yüzeyi makroskopik ve mikroskopik yöntemlerle incelenir. Makroskopik yöntemlerle numunenin yüzeyi hakkında genel anlamda bilgi elde edilir. Ama mikroskopik yöntemlerle numunenin yüzey özellikleri hakkında detaylı bilgiler elde edilir.

Atomik kuvvet mikroskobu numunenin yüzey morfolojisini angstrom ( $\text{\AA}$ ) mertebesinde 100  $\mu$ 'ya kadar görüntüleyerek numunenin morfolojisi ve yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgi verir ve topografik bir görüntü sağlar. AFM cihazları, tip (uç), kantiliver (yay), lazer ışığı, ve çok segmentli bir foto dedektörden oluşur. Uç yaya ve yay piezoelektrik bir tüpe bağlanır. AFM tipleri silisyum veya silisyum nitrit ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) cinsinden üretilir ve eğrilik yarıçapına sahip bir uçtan oluşur. Tipin uç kısmı ne kadar sivri olursa görüntülerin çözünürlüğü o kadar iyi olur. Uçun yay yardımı ile salınım yapması Hook yasasına dayanır ve uçun aşağı ve yukarı hareketi numunenin morfolojisi ve sağ-sol hareketi ise yüzeyin fiziksel özellikleri (manyetik alanlar ve elektrostatik kuvvetleri gibi) hakkında bilgi verir. AFM cihazlarında, salınım ölçmek için en çok lazer ışığı kullanılır. Yayın arkasından gelen lazer yansıması çok segmentli fotodedektör üzerine düşer ve bilgisayar yardımı ile sinyaller analiz edilir ve böylece numunenin görüntüsü elde edilir. Tarama, piezoelektrik malzemesine voltaj uygulanarak, yay-uç (kantiliver-tip) ile yapılır.



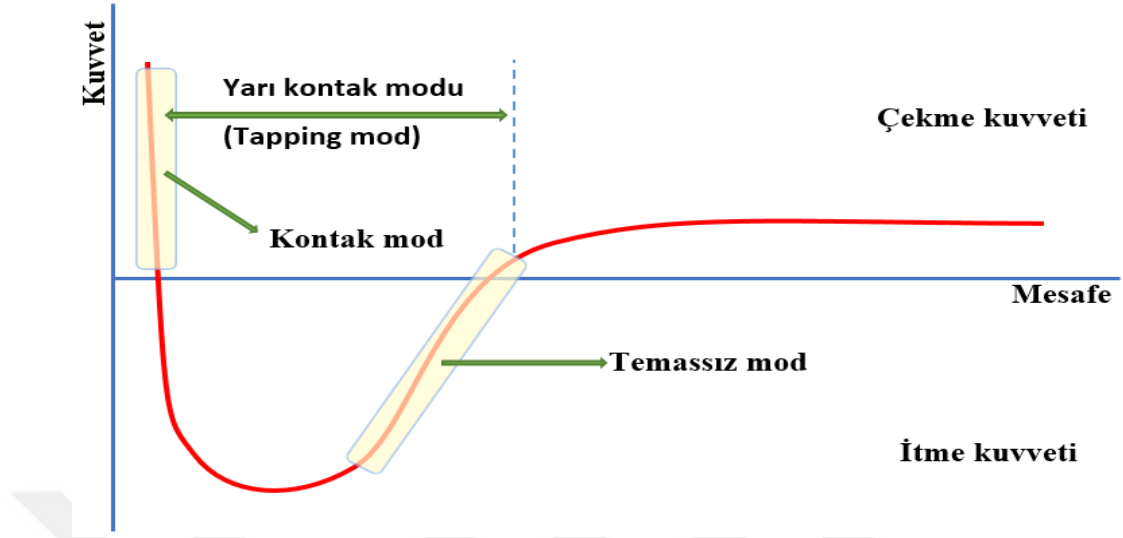
**Şekil 3.6.** Atomik Kuvvet Mikroskopunda tarama işleminin şeması

Tipin uç kısmı ve numune yüzeyi arasında üç çeşit etkileşim ile AFM cihazlarında farklı ölçüm durumları gerçekleşir. Bunlardan:

(a) Tapping mod (yarı kontak modu): Uç, numune yüzeyi ile belli aralıklarla temas eder ve salınım frekansı tipin rezonansından daha az olur. Uç yüzeye yaklaşınca rezonans frekansı azalır ve salınım frekansına gelerek numune yüzeyine dokunur ve numune yüzeyini tarayarak topografik görüntü elde edilir. Belli bir bölgede kuvvetin değişimi ile görüntünün izlenmesi malzemenin sertlik ve elastisitesi hakkında bilgi verir. Bu mod ile yüzeyi bozma ve numune yüzeyine zarar verme ihtimali daha azdır.

(b) Kontak mod: Uç, yüzey ile temas halinde olarak sabit bir kuvvetle hareket ederek numune yüzeyini tarar. Yüksek çözünürlüğe sahiptir ve numunenin sertliği hakkında bilgi verir. Sürekli temas olduğu için vakum gerektirmez.

(c) Kontak olmayan mod (temassız mod): Uç ve numune arasındaki mesafe 50-150 Å arasındadır. Tipin uç kısmı yüzeye temas etmez ve salınım frekansı tipin rezonansından büyüktür. Tip yüzeye yaklaştığında salınım genişliği azalır ve tip numuneye dokunmaz. Çok hassas numunelerde numune yüzeyinin bozulmaması için bu metod kullanılır. Bu mod için yay ve uç kalitesi önemlidir ve dış titreşimlerden çok etkilenen bir mod olarak bilinir.



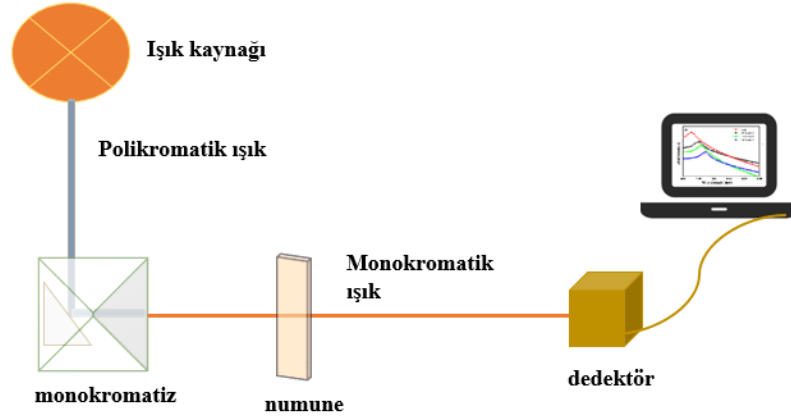
**Şekil 3.7.** AFM cihazında tip ve numune arasındaki kuvvetlerin mesafeye bağlı olduğu diyagramı

Bu çalışmada, La katkılı ZnO ince filmlerin morfolojik özellikleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) bulunan HITACHI 5100N AFM cihazı ile araştırılmıştır.

### 3.6. UV Spektrometri

UV spektroskopileri; ışık kaynağı, dalgaboyu seçicisi ve dedektörem oluşmaktadır. Dedektörde optik sinyalleri bir kaydedici veya galvanometre yardımı ile elektrik sinyallere dönüştürülerek ölçülür. Işık kaynağı olarak tungsten teli, döteryum veya hidrojen lambalar kullanılır. UV cihazlarda polikromatik ışık, prizmalar veya optik ağ parçalarıyla monokromatik ışığa dönüştürülmelidir. Eğer numune üzerine düşen tek dalgaboylu ışığın (fotonun) enerjisi, numunenin yasak enerji aralığından fazla olursa foton soğrulur ve eğer fotonun enerjisi az olursa numuneden soğrulmadan geçer. Numuneden geçen elektronların şiddetini dedektörler ile ölçerek, soğrulan foton miktarı belirlenir. UV cihazlarının dedektörü üç türdür. Bunlar; foto tüp, foto çoğaltıcı tüp ve foto elektrik tüp olarak kullanılır.





**Şekil 3.8.** UV-Vis spektrometre cihazının şematik gösterimi

Bu çalışmada, La katkılı ZnO ince filmlerin geçirgenlik özellikleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) bulunan SHIMADZU UV-3600 Plus marka UV cihazı ile 350 nm ile 800 nm dalgaboyu arasında araştırılmıştır.

### 3.6.1. Optik soğurma

Yarıiletken malzeme üzerine bir fotonun düşmesiyle üç çeşit olay gerçekleşir; ya yarıiletken tarafından soğurulur ya yarıiletken üzerine düşen açıyla yansımaya uğrar veya yarıiletkenin kristal yapısından geçer. Bu gerçekleşen olaylar, yarıiletkenin kristal yapısı ve yasak bant aralığıyla ( $E_g$ ) ilişkilidir. Numune üzerine düşen fotonun enerjisi ( $E$ ),

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.15)$$

eşitliği ile gösterilir, burada  $h$ , Planck sabiti ( $6.62 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$ ),  $\nu$ , fotonun frekansı,  $\lambda$ , fotonun dalgaboyu ve  $c$ , ışık hızıdır ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ). Yarıiletken malzeme saydam olduğu zaman, üzerine düşen fotonun enerjisi, valans bandında bulunan

elektronun enerjisinden az olursa ışın yarıiletkenin kristal yapısından geçerek, geçirgenlik olayı gerçekleşmiş olup ve T ile gösterilir ve;

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (3.16)$$

denklemleri ile ifade edilir. burada  $I_0$  yarıiletken numuneye gelen ışığın şiddeti ve I, yarıiletkenden geçen ışığın şiddetidir. Yarıiletkenin soğurma katsayısı ( $\alpha$ );

$$\alpha = 2.303 \frac{\log^{1/T}}{x} \quad (3.17)$$

eşitliği ile ifade edilir. Soğurma ve geçirgenlik arasındaki ilişki;

$$A = -\log T \quad (3.18)$$

denklemleri ile gösterilir. Yarıiletken numunenin geçirgenliğini hesaplamak için ve dalgaboyuna karşı grafiği çizmek için,

$$T = 10^{-A} \quad (3.19)$$

denklemlerinden istifade edilir. Yarıiletken malzeme ile foton arasındaki bir diğer etkileşim yansımadır. Malzeme üzerine düşen ışının şiddeti, malzeme üzerinden yansıtılan ışının şiddeti ile orantılıdır ve  $R_y$  ile gösterilir. Bu durumda yarıiletken malzemenin yüzeyi düz ve numune üzerine düşen ışının şiddeti, (fotonun enerjisi) yarıiletken malzemenin yasak bant aralığı enerjisinden düşük olur ve fotonların bir kısmı yansıtılır. Malzemeden geçen fotonun şiddeti I ile gösterilir ve yansımaya katsayısı ( $R_y$ ) ile ilişkisi;

$$I = 1 - R_y^2 I_0 e^{-ax} \quad (3.20)$$

eşitliği ile gösterilir. Geçirgenlik, soğurma, ve yansımaya katsayısı ilişkisi;

$$T = 1 - R_y^2 e^{-A} \quad (3.21)$$

denklemleri ile ifade edilir. Buradan yansımaya katsayısı ( $R_y$ ),

$$R_y = 1 - \sqrt{10^{-A} e^A} \quad (3.22)$$

elde edilir. Bu eşitlik yardımı ile soğurma katsayısı bulunur. Soğurma katsayısı ( $\alpha$ ), yansımaya katsayısı ( $R_y$ ) ve geçirgenlik katsayısı ( $T$ ) ilişkisi;

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left\{ \frac{1-R_y^2}{2T} + \left[ \frac{1-R_y^4}{4T^2} + R_y^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (3.23)$$

denklemleri ile ifade edilir (González-Hernández *et al.* 2002). Yarıiletkenlerin yasak bant aralığının hesaplanabilmesi için temel soğurma spektromundan çizilen  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafiği kullanılır. Bu grafikteki lineer bölümün doğrultusunda  $h\nu$  ( $\alpha h\nu$ )<sup>2</sup> ekseninin 0 değerinde kestiği noktanın değeri yarıiletkenin yasak bant aralığı enerjisini belirler.

### 3.7. Au/ ZnO:La/n-Si/Al Schottky Diyotların Elektriksel Karakterizasyonu

Fabrikasyonunu yaptığımız Au/La: ZnO/n-Si/Al Schottky diyotların oda sıcaklıklarında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümündeki Aygıt laboratuvarında bulunan “KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı ile  $I-V$  (akım-voltaj) ve HEWLET PACKART 4192 A, (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı ile de 100, 200, 500 ve 1000 kHz frekans değerlerinde  $C-V$  (kapasite-voltaj) ölçümleri alındı. Alınan bu ölçümlerden farklı metotlardan bazı temel diyot parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği gibi) hesaplandı.  $I-V$  ve  $C-V$  ölçümlerinin alındığı sistemlerin düzeneği Şekil 3.9’da verilmiştir.



**Şekil 3.9.** *I-V* (Akım-voltaj) ve *C-V* (kapasite-voltaj) ölçüm sistemleri

### 3.7.1. Akım voltaj karakterizasyonu

Akım-voltaj ölçümünü kullanarak diyotların düz beslem karakteristiğinden idealite faktörü bulunur. İdealite faktörü diyodun kalitesini belirler ve  $n$  ile gösterilir. İdeal bir diyotta termiyonik emisyon etkisi ile bir akım iletimi oluşur ve  $n=1$  olur. Eğer bu değer 1'den uzaklaşırsa, diyot ideallikten uzaklaşmış olur. Ayrıca *I-V* ölçümünün düz beslem karakteristiğinden, metal-yarıiletken kontak arasındaki engel yüksekliği hesaplanır ve  $\Phi_b$  ile gösterilir. İdealite faktörü,

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.24)$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu denklemde akımın voltaja bağımlılığı gösterilir. Eğer bu denklemde  $eV \gg nkT$  olursa, 1 terimi ihmal edilir ve denklem

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (3.25)$$

şeklinde değişir. Her iki tarafın tabii logaritması ve sonra  $V$ 'ye göre türevi alınarak idealiteyi hesaplama denklemi,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{nkT} \quad (3.26)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $e$ , elektronun yükü ( $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ )  $k$ , Boltzmann sabiti ( $8.625 \times 10^{-5} \text{ eV/k}$ ) ve  $T$  kelvin olarak sıcaklıktır.  $\ln(I)-V$  grafiğın düz beslem kısmındaki lineer bölümüne bir doğrusal fit uygulanırsa, eğim,  $(\ln I) \frac{dV}{d}$  değerini verir ve yukardaki denklemde yerine yazılarak idealite faktörü bulunur ve fit edilen doğrunun  $V=0$  değerindeki düşey ekseninin kestiği nokta doyma akım değerini gösterir ve  $I_0$  ile ifade edilir. Doyma akımın değeri,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.27)$$

denklemini ile verilir. Eğer yukarıdaki denklemin her iki tarafından tabii logaritması alınır ve  $\Phi_b$ 'ye göre düzenlenirse, engel yüksekliği,

$$e\Phi_b = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (3.28)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada  $A$  diyodun etkin alanı,  $A^*$  Richardson sabiti (n-tipi silisyum için  $112 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$  ve p-tipi silisyum için  $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ ) (Rhoderick and Williams 1988).

### 3.7.2. Schottky diyotlarında C-V (kapasite-gerilim) karakteristikleri

Bir metal ile n-tipi yarıiletken kontak haline geldikten sonra metal ve yarıiletken arasındaki yük taşıyıcılarının dağılımı değişir ve yarıiletkenin sınır bölgesinde elektronlardan arınmış olan yüksek dirençli deplasyon tabakası oluşur. Bu tabakanın kalınlığı, gerilim kaynağı ile uygulanan gerilime bağlıdır. Deplasyon tabakasının direnci kontaktaki yarıiletkenin direncinden çok büyük olacağından hareketli yük içermez ve yalıtkan olarak davranır. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda deplasyon tabakası metal-yarıiletken eklem arayüzeyinin oluşumu hakkında bilgi verir. Eğer kontak ters yönde

gerilim kaynağına bağlı olursa, kapasitenin değişiminden ( $1/C^2-V$ ) engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ), difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ), yarıiletkenin taşıyıcı yoğunluğu ( $N_d$ ) ve fermi enerji seviyesi ( $E_f$ ) gibi önemli parametreler hesaplanabilir.

$$C = A \left[ \frac{\epsilon_s \epsilon_0 N_d}{2} \right]^{1/2} \left[ V_d - \frac{kT}{e} \right] \quad (3.29)$$

Denklemdaki  $\epsilon_s$ , yarıiletkenin dielektrik sabitidir ve Si için ( $\epsilon_s=11.8$ ) değerindedir,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabitidir ve değeri ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$  F/m) olarak alınır,  $e$ , elektronun yükü,  $V_d$ , difüzyon potansiyeli,  $k$ , Boltzmann sabiti ( $k = 8.625 \times 10^{-5}$  eV/K),  $N_d$  iyonize olmuş donör yoğunluğu ve  $T$ , kelvin cinsinden sıcaklıktır. 3.29 eşitliği;

$$C^{-2} = \frac{2(V_d+V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (3.30)$$

olarak düzenlenir (Cetin and Ayyildiz 2010).  $1/C^2-V$  grafiği üzerinde lineer fit çizildiğinde,  $1/C^2 = 0$  için,  $V_d = V$  olur ve buradan difüzyon potansiyeli elde edilir. 3.30 denkleminin  $V$ 'ye göre türevi alınırsa;

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (3.31)$$

ifadesi elde edilir ve eğer bu eşitlik  $N_d$  için düzenlenirse;

$$N_d = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (3.32)$$

denklemini elde edilir. Termal denge durumunda  $n$ -tipi yarıiletken için elektron yoğunluğu;

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (3.33)$$

olarak ifade edilir. Burada  $N_c$ , termal denge durumunda iletkenlik bantındaki hal yoğunluğudur, Si için  $N_c = 2.8 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  olur. Bir  $n$ -tipi yarıiletkende  $N_d \gg n_i$  olur ve bu yüzden  $n_0 = N_d$  olarak,  $n_i$ , esas (intrinsic) elektron yoğunluğu olarak;

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (3.34)$$

eşitliği elde edilir. 3.34 ifadenin logaritması alınarak ve iletkenlik bandı için referans seviye,  $E_c = 0$  alınarak;

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (3.35)$$

fermi enerji seviyesi için denklem düzenlenmiş olur. İdeal bir diyot için engel yüksekliği  $C$ - $V$  grafiğinden;

$$\phi_b = E_f + V_d \quad (3.36)$$

ifadesi ile hesaplanır ve ideal olmayan diyotlar için de;

$$\phi_b = \frac{V_d}{n} + E_f \quad (3.37)$$

Denklemleri ile hesaplanır. 3.37 ifadesinden elde edilen engel yükseklikleri “düzeltilmiş engel yüksekliği” olarak adlandırılır (Aydoğan 2003).

### 3.8. Katkısız ve Lantanyum (La) Katkılı Çinko Oksit (ZnO) Çözeltisinin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında, çözelti temelli bir büyütme tekniği olan kimyasal püskürtme tekniği kullanılmıştır. Dolayısıyla, çinko asetat dihidrat ( $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ ) ve Lantanyum (III) Nitrat Hidrat ( $LaN_3O_9 \cdot XH_2O$ ) sırası ile Zn ve La kaynağı olarak kullanılmıştır. (Her iki kimyasal da %99.9 saflıkta olup Sigma Aldrich'den temin edilmiştir.) Ayrıca, bu çözeltide çinko hidroksit kalıntılarının olmaması ve çözeltinin daha kararlı hale gelmesi için HCl kompleks yapıcı olarak kullanılmıştır. Öncül çözelti için, 0.1M  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  10ml. de-iyonize su içerisinde çözülmüş ve çözeltinin pH'sı 5 olarak ayarlanacak şekilde bir kaç damla HCl eklendikten sonra, La katkılı çözeltiler;

- ✓ %0 La katkılı ZnO çözeltisi için: 10 ml  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  çözeltisine %0 (%at.) lantanyum katkısı;
- ✓ %1 La katkılı ZnO çözeltisi için: 10 ml  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  çözeltisine %1 (%at.) lantanyum katkısı;
- ✓ %2 La katkılı ZnO çözeltisi için: 10 ml  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  çözeltisine %2 (%at.) lantanyum katkısı;
- ✓ %4 La katkılı ZnO çözeltisi için: 10 ml  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  çözeltisine %4 (%at.) lantanyum katkısı;
- ✓ %5 La katkılı ZnO çözeltisi için: 10 ml  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  çözeltisine %5 (%at.) lantanyum katkısı;

olacak şekilde hazırlandı. Herbir çözelti yaklaşık olarak 2 saat  $60^\circ C$  sıcaklıkta manyetik karıştırıcıda karıştırılarak şeffaf ve homojen çözeltiler elde edilerek püskürtme işlemi için hazır oldu.



### 3.9. Kimyasal Temizleme Prosedürü

Deney aşamasında kullanılan taban malzemelerinin kimyasal temizliği önem arz etmektedir. Bu kapsamda kullanılan cam ve Si yarıiletkeninin kimyasal temizliği aşağıda belirtilen prosedür ile gerçekleştirildi.

- 10:1 oranında deiyonize su-deterjan çözeltisi ile camlar birkaç kere yıkandı ve sonra durulandı,
- su-sabun çözeltisi ile ultrasonik olarak 15 dakika 60°C yıkandı,
- deiyonize su ile birkaç kere duruladıktan sonra N<sub>2</sub> gazı ile kurutuldu,
- Metil alkol ile 15 dakika 60°C'da ultrasonik olarak yıkandı,
- asetonla yıkandı ve 15 dakika 60°C ultrasonik cihazında bekletildi,
- En son camlar deiyonize su ile durulandı ve 250°C fırında 1 saat sürede kurutuldu.

Bu aşamaların sonunda elde edilen camlar deneysel aşamada kullanılmıştır.

Ultrasonik temizleyicide, titreşim gerçekleşerek temizleyici çözeltiler camların tüm yüzeylerine ulaşır. Deiyonize su ve sabun kullanarak camlar sıradan tozlardan arındırılır. Metil alkol ile camlar yağlı kirliliklerden arındırılır. Aseton kullanarak camlar bütün toz tanecikleri veya küçük boyuttaki bütün taneciklerden temizlenir. Temizliğin tüm aşamalarında camlar cımbızla tutulur ve el ile dokunulmaz.

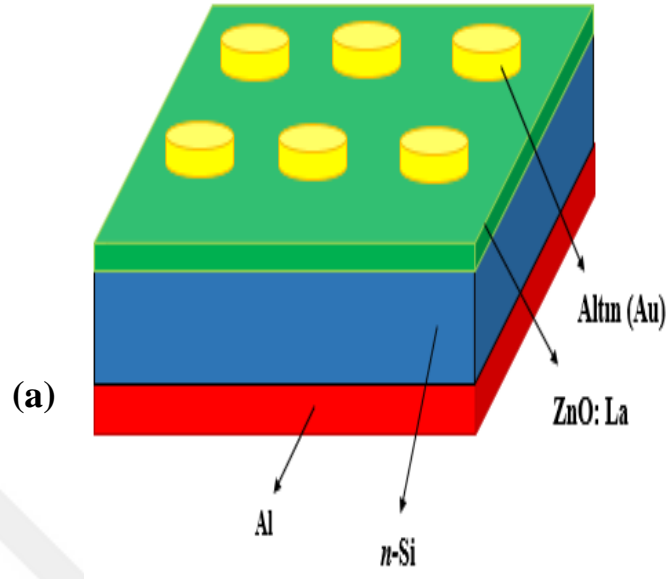
Çalışmada *n*-tipi silisyum kullanıldı. Silisyum altlıkların özdirnci 1-10 Ωcm, kalınlıkları 270 µm ve kristal yönelimleri (100) olarak belirlendi. Yarıiletken yüzeyindeki kirlilikleri ve oluşan oksit tabakasını kaldırmak için yarıiletken yüzeyinin temizlenmesi gerekmektedir. Ayrıca aygıt çalışmalarında, malzemenin yüzeyi, aygıtın performansında çok önemli bir etkidir. Eğer yarıiletkenin yüzeyindeki doymuş bağlar havadaki oksijen atomları ile bağ yaparsa, numune yüzeyinde yalıtkan tabaka oluşur ve aygıtın performansını olumsuz olarak etkiler. Bu durumu önlemek için ve numune yüzeyini kirlilikler ve oksit tabakadan arındırmak için çeşitli çözücüler kullanılır. Si temizleme aşamaları,

- Asetonda 5 dakika ultrasonik olarak yıkama,
- Metanolda 5 dakika ultrasonik olarak yıkama,
- Deiyonize su (DI) ile 5 dakika yıkama,
- $H_2O:H_2O_2:NH_3$  ; 5:1:1 çözeltisinde 15 dakika bekletme,
- Deiyonize su ile 5 dakika yıkama,
- Seyreltik HF'de ( $H_2O:HF$  ; 10:1) 2 dakika bekletme,
- $H_2O_2: H_2O:HCl$  ; 1:4:1 çözeltisinde 15 dakika bekletme,
- $H_2O$  ve  $HCl$   $70^\circ C$ 'de hazırlandıktan sonra  $H_2O_2$  ilave edilir ve çözeltinin 2 dakika dinlenmesinden sonra kullanıma hazırdır,
- Deiyonize su ile 5 dakika durulama,
- Seyreltik HF'de ( $H_2O:HF$  ; 10:1) 2 dakika bekletme,
- Deiyonize su ile iyice durulama,
- Azot ( $N_2$ ) ile kurulama,

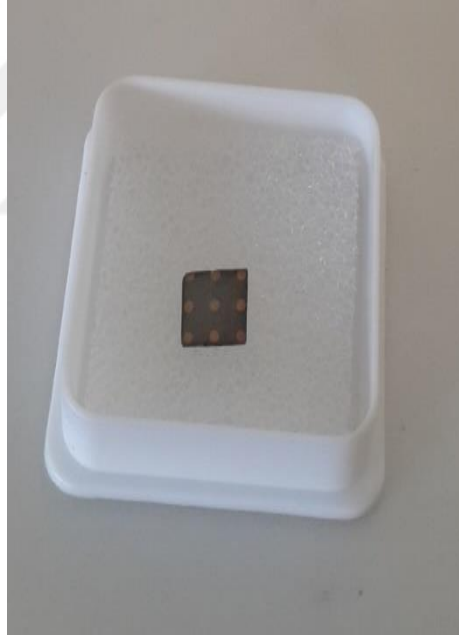
olarak belirlenmiştir.

### 3.10. Schottky Kontakların Hazırlanması

Schottky kontakların hazırlanması için termal buharlaştırma metodu kullanılmıştır. Farklı oranlarda La katkılanmış  $ZnO:La$  ince filmleri  $n$ -Si yarıiletken kristallerinin üzerine kimyasal püskürtme yöntemiyle büyütülmüşlerdir. Büyütme işlemi yapılırken kaplamanın olabildiğince homojen olmasına dikkat edildi. Üzerine  $ZnO:La$  büyütülmüş ve omik kontağı önceden yapılmış olan numuneler, 1 mm çapındaki deliklere sahip pirinçten yapılmış gölge maske üzerine, Schottky kontak için kaplanan yüzeyleri yukarı bakacak şekilde yerleştirilerek üzeri cam lamel ile kapatıldı. Laboratuvarımızdaki omik kontak işleminde kullandığımız kaplama ünitesinin fanusu kapatılarak vakuma alındı. Kaplama ünitesinin içerisinde basınç  $\approx 10^{-6}$  torr değerine ulaşıncaya, sisteme akım verildi.  $ZnO:La$  kaplanmış yüzey üzerine yaklaşık 100 nm kalınlıkta Au metali buharlaştırıldı. Elde edilen aygıt tasarımı ve aygıtlar Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



(b)



Şekil 3.10. Au/ZnO:La/ $n$ -Si/Al Schottky diyodun (a) şematik görüntüsü ve (b) fotoğrafı

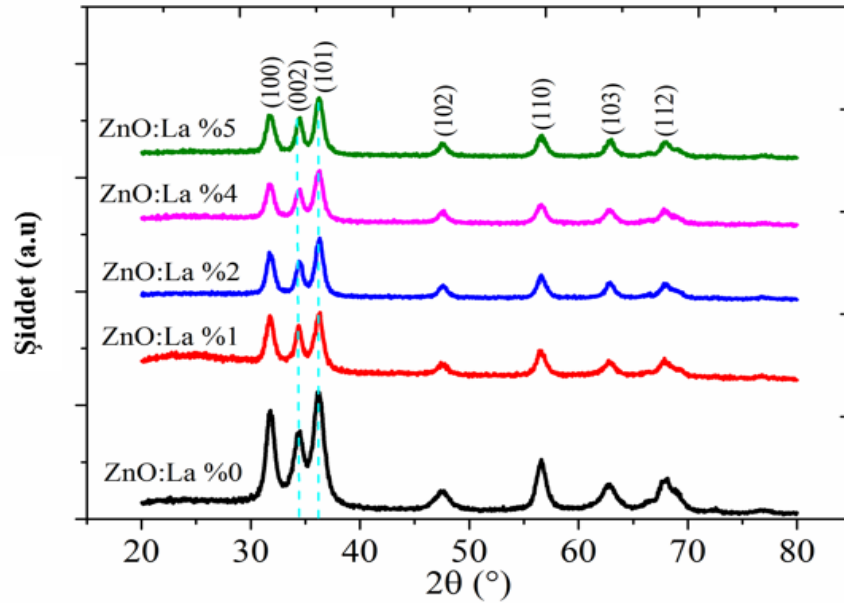
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Giriş

Bu bölümde farklı oranlarda (%0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.)) üretilen La katkılı ZnO (ZnO: La) ince filmlerin optik, yapısal, morfolojik özelliklerini ve Schottky diyotların (Au/ZnO:La/n-Si/Al) elektriksel özelliklerini incelemek için kullanılan farklı yöntemlerle elde edilen grafikler ve çizilgelere bulunan ince film ve Schottky diyot parametreleri yer almaktadır.

### 4.2. XRD Ölçümleri

Farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerin yapısal özelliklerini incelemek için XRD ölçümlerinden elde edilen kırınım desenleri  $20^\circ$  ile  $80^\circ$  ( $2\theta$ ) aralığında Şekil 4.1'de verilmektedir. Filmlerden hesaplanan düzlemler arası mesafe (d) Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

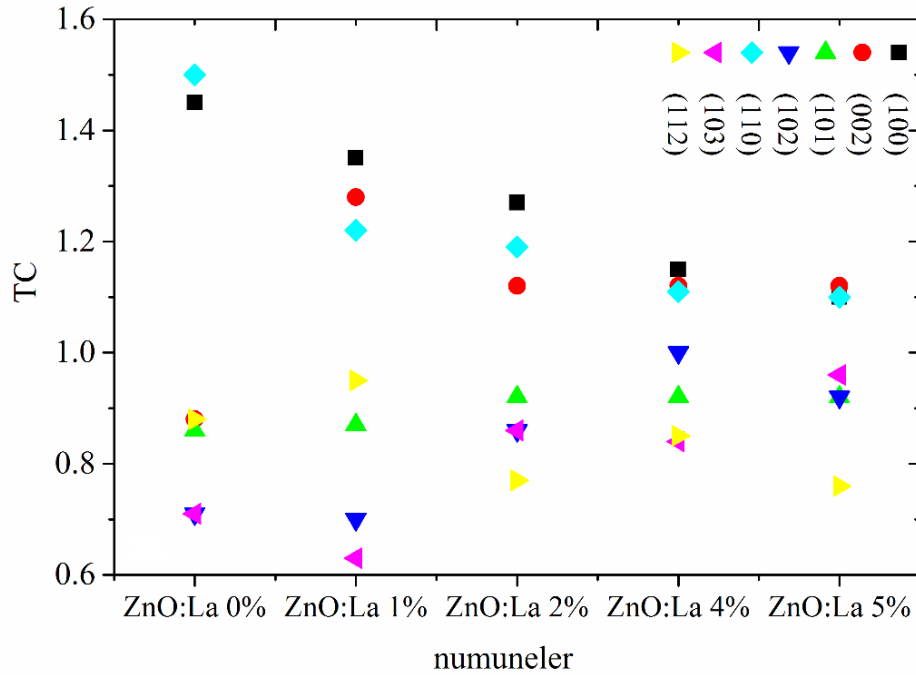


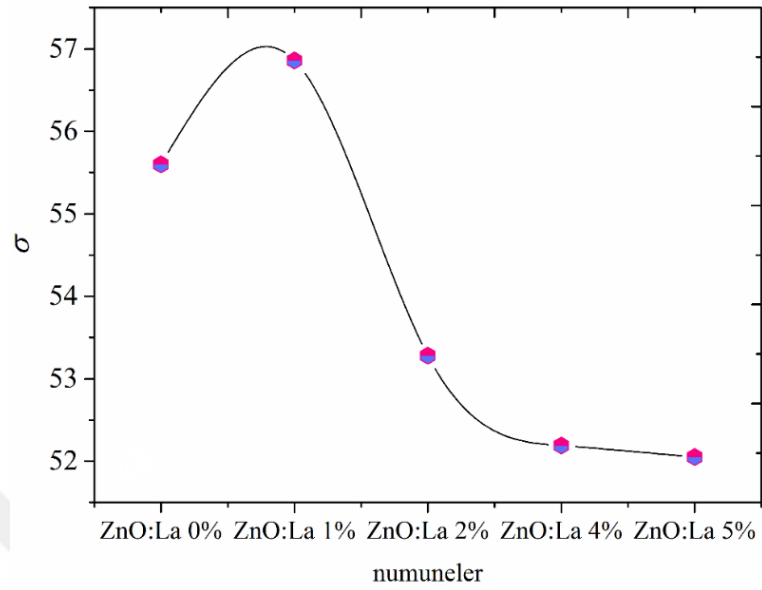
Şekil 4.1. Farklı La katkı miktarı ile elde edilen filmlerin XRD desenleri

**Çizelge 4.1.** Standart ve hesaplanmış  $d$  değerleri arasındaki karşılaştırma

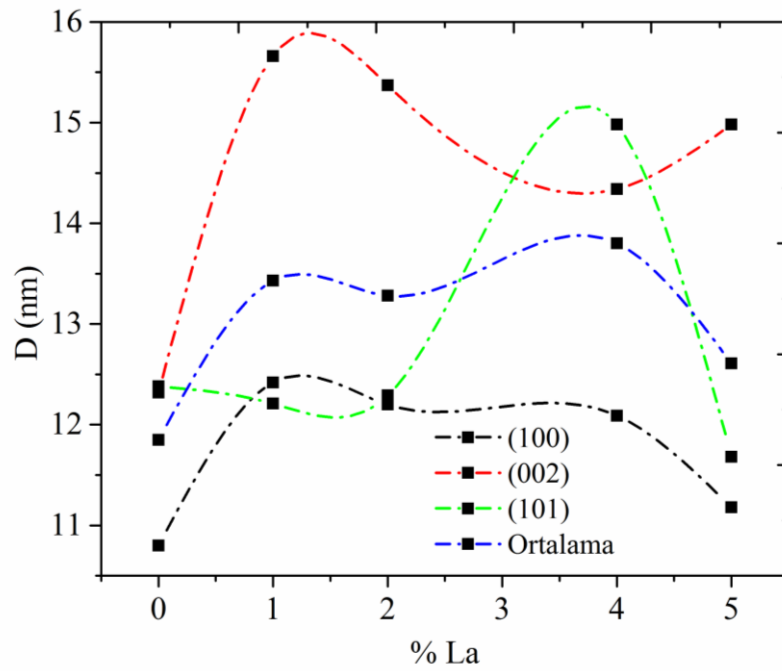
yönelim	"d" standart (Å)	ZnO:La filmleri				
		%0 d (Å)	%1 d (Å)	%2 d (Å)	%4 d (Å)	%5 d (Å)
(100)	2.8143	2.8118	2.8157	2.8199	2.8243	2.8245
(002)	2.6033	2.5978	2.6051	2.6046	2.5978	2.5978
(101)	2.4759	2.4858	2.4698	2.4728	2.4730	2.4761
(102)	1.9111	1.9162	1.9159	1.9088	1.9050	1.9144
(110)	1.6247	1.6248	1.6300	1.6248	1.6248	1.6235
(103)	1.4771	1.4774	1.4786	1.4763	1.4774	1.4744
(112)	1.3782	1.3775	1.3803	1.3775	1.3809	1.3767

Çeşitli oranlarda La katkılı ZnO filmlerden elde edilen yapı katsayısı (TC) Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Ayrıca ZnO:La filmlerinin standart sapmaları Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Şekil 4.4’de (100), (002) ve (101) düzlemlerin kristal boyutu (D) ve hesaplanan ortalama kristal boyutu gösterilmektedir. Çizelge 4.2’de çeşitli miktarlarda La katkılı ZnO (ZnO:La) filmlerin bazı yapısal parametreleri gösterilmektedir.

**Şekil 4.2.** Yapı katsayısı (TC) değerlerinin değişimi



Şekil 4.3. ZnO:La filmlerinin standart sapmaları



Şekil 4.4. (100), (002) ve (101) düzlemlerin ve hesaplanan ortalama kristal boyutu

**Çizelge 4.2.** Çeşitli La katkılı ZnO filmlerin bazı yapısal parametrelerinin karşılaştırılması

numune	hkl	$I_{standart}$	$I_{hesaplanan}$	TC	$\Sigma$ standart sapma	FWHM (°)	D(nm)	$\delta x 10^{15}$	$\epsilon_{zz}$ (%)	$V[\text{Å}]^3$	Örgü parametreleri (Å)	
											a	c
ZnO: La %0	(100)	57.0	95.3	0.87	55.60	0.771	10.80	8.57	2.106	48.555	3.2468	5.3186
	(002)	44.0	44.9	0.88		0.676	12.32	6.58				
	(101)	100.0	100	0.86		0.732	12.38	6.52				
	(102)	23.0	18.9	0.71		0.883						
	(110)	32.0	55.7	1.50		0.767						
	(103)	29.0	23.9	0.71		0.852						
	(112)	23.0	23.4	0.88		0.821						
ZnO: La %1	(100)	57.0	89.1	1.35	56.86	0.671	12.42	6.48	-1.224	47.083	3.2513	5.1431
	(002)	44.0	65.0	1.28		0.532	15.66	4.07				
	(101)	100.0	100.0	0.87		0.682	12.21	6.70				
	(102)	23.0	18.7	0.70		0.537						
	(110)	32.0	45.1	1.22		0.727						
	(103)	29.0	21.1	0.63		0.768						
	(112)	23.0	25.2	0.95		0.582						
ZnO:La %2	(100)	57.0	78.1	1.27	53.28	0.683	12.20	6.71	-1.205	47.236	3.2561	5.1446
	(002)	44.0	53.6	1.12		0.542	15.37	4.23				
	(101)	100.0	100.0	0.92		0.678	12.29	6.62				
	(102)	23.0	21.4	0.86		0.708						
	(110)	32.0	41.4	1.19		0.712						
	(103)	29.0	27.1	0.86		0.708						
	(112)	23.0	19.2	0.77		0.739						

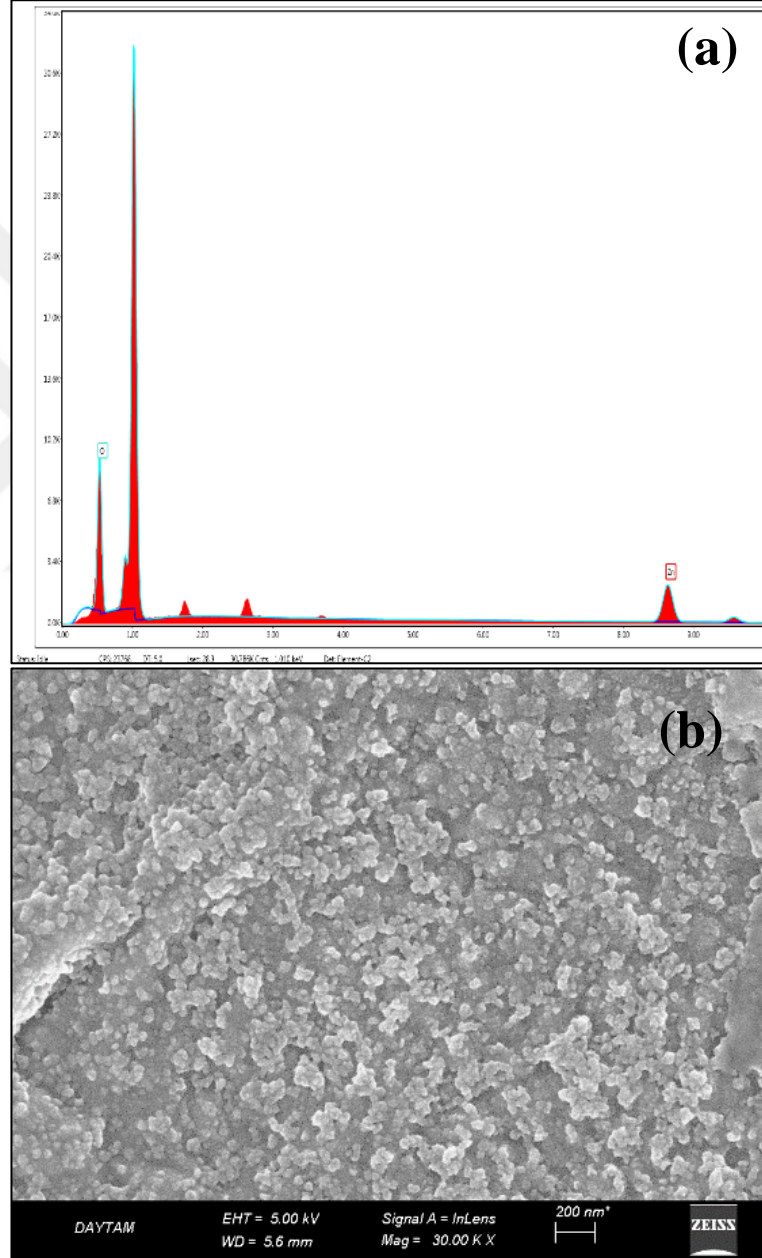
Çizelge 4.2. (devam)

ZnO:La %4	(100)	57.0	71.2	1.15	52.19	0.698	12.09	6.84	-1.699	47.157	3.2612	5.1199
	(002)	44.0	53.2	1.12		0.581	14.34	4.86				
	(101)	100.0	100.0	0.92		0.721	11.55	7.49				
	(102)	23.0	25.1	1.00		0.631						
	(110)	32.0	38.7	1.11		0.772						
	(103)	29.0	26.3	0.84		0.769						
	(112)	23.0	21.1	0.85		0.444						
ZnO:La %5	(100)	57.0	68.3	1.10	52.05	0.745	11.18	8.00	-1.165	47.409	3.2615	5.1464
	(002)	44.0	59.0	1.12		0.556	14.98	4.45				
	(101)	100.0	100.0	0.92		0.713	11.68	7.33				
	(102)	23.0	23.0	0.92		0.684						
	(110)	32.0	38.3	1.10		0.729						
	(103)	29.0	30.4	0.96		0.673						
	(112)	23.0	19.1	0.76		0.669						

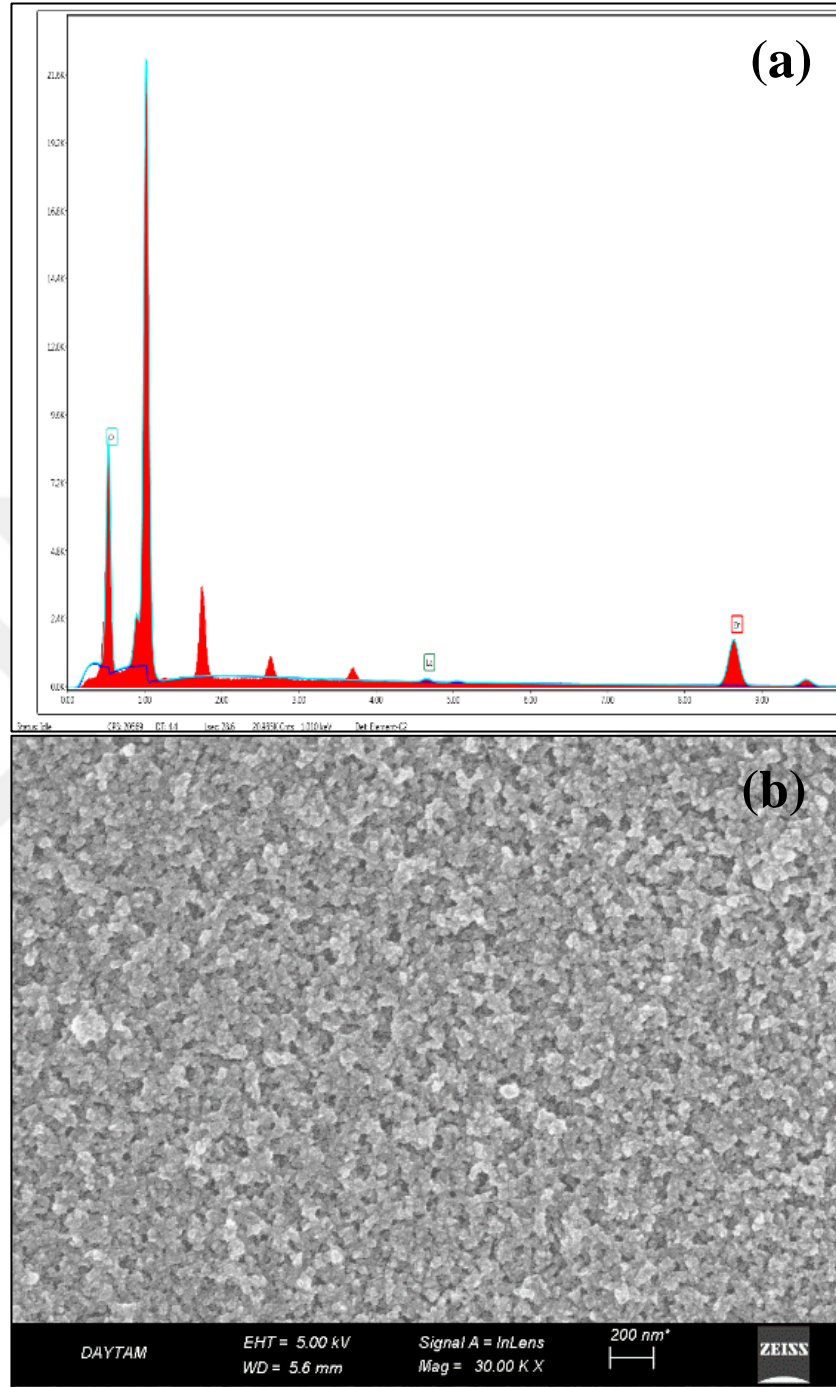


### 4.3. SEM görüntüleri ve EDAX ölçümleri

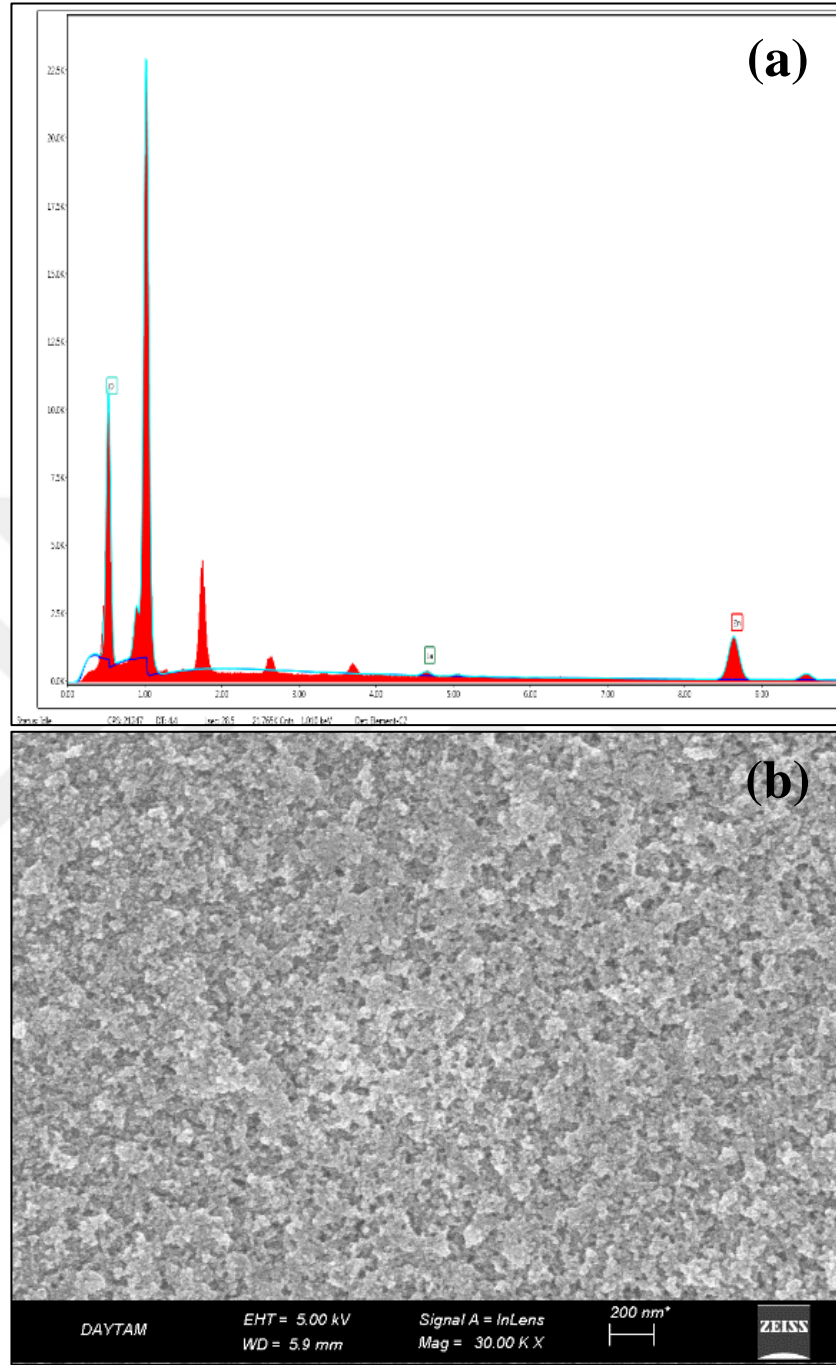
Çeşitli oranlarda ZnO: La malzemesi ile kaplanan filmlerin SEM görüntüleri ve EDAX ölçümleri Şekil 4.5-4.9'da verilmiştir.



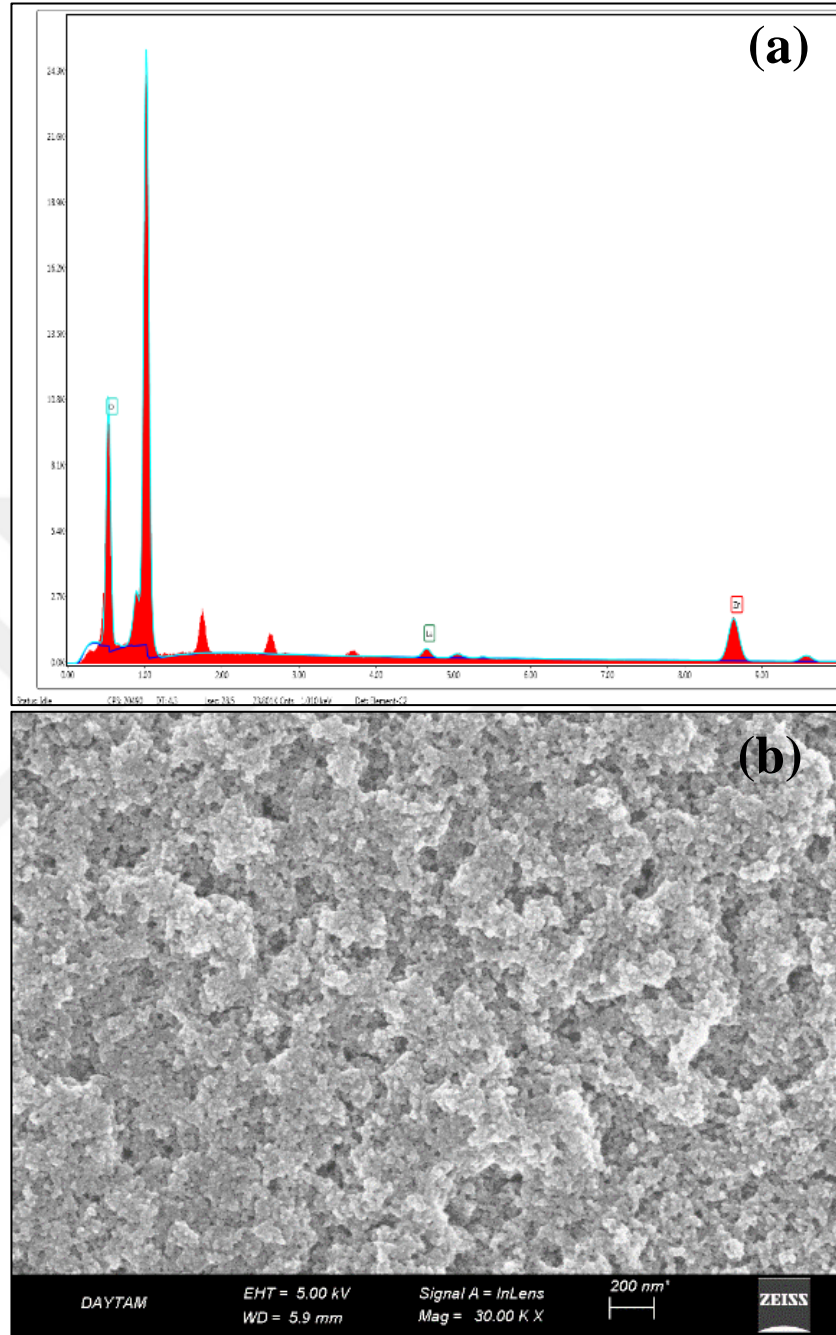
Şekil 4.5. ZnO:La%0 filminin (a) EDAX spektrumu ve (b) SEM görüntüsü



Şekil 4.6. ZnO:La%1 filminin (a) EDAX spektrumu ve (b) SEM görüntüsü

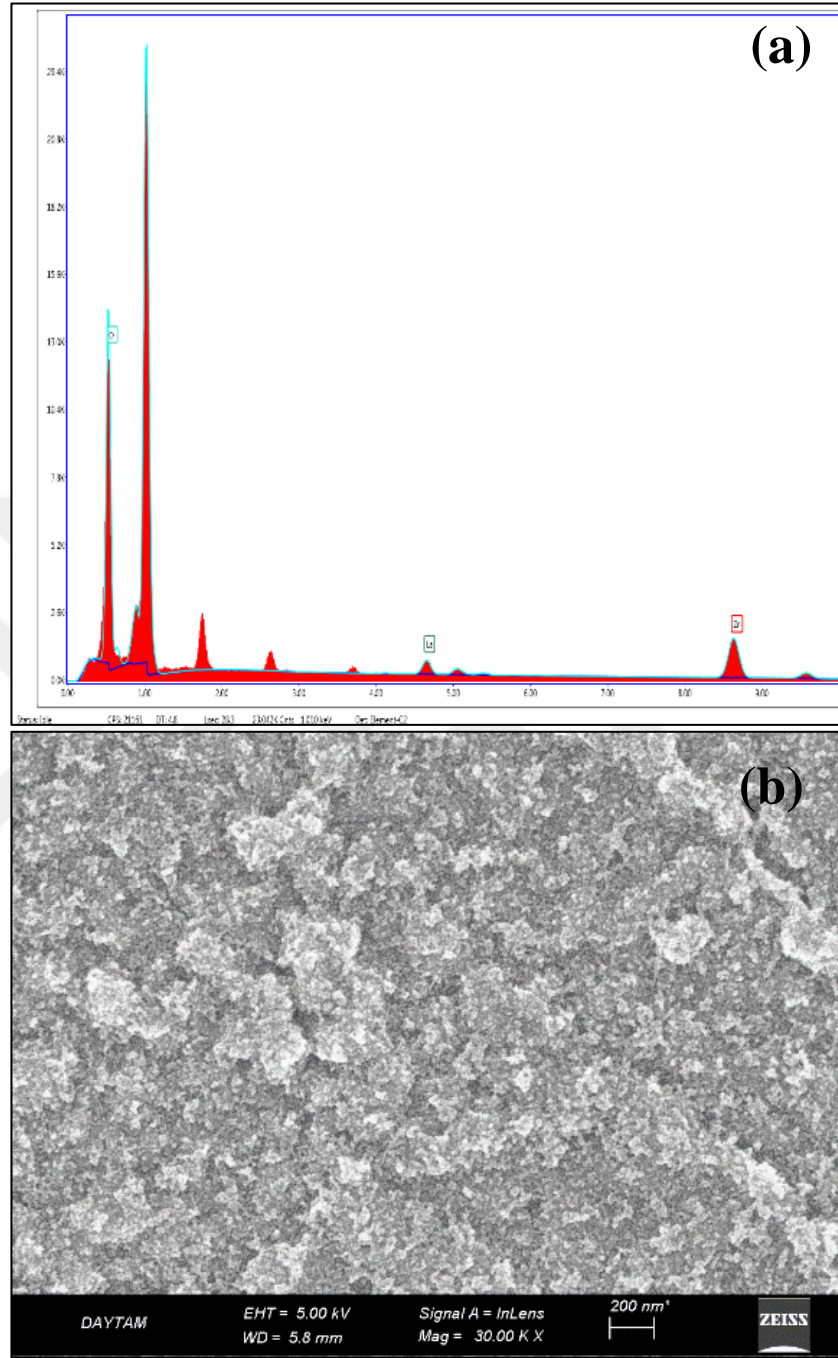


Şekil 4.7. ZnO:La%2 filminin (a) EDAX spektrumu ve (b) SEM görüntüsü



Şekil 4.8. ZnO:La%4 filminin (a) EDAX spektrumu ve (b) SEM görüntüsü

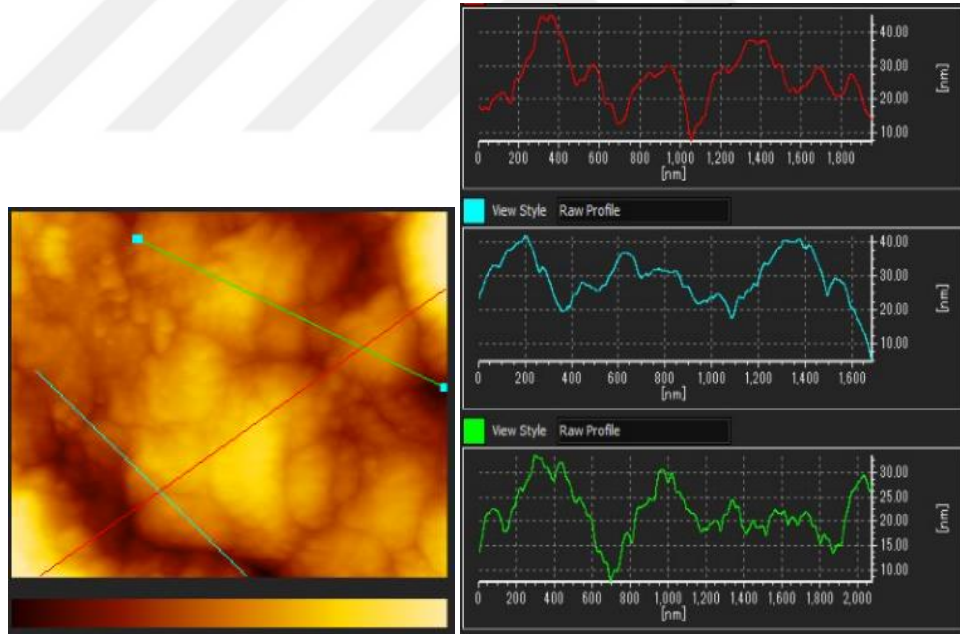
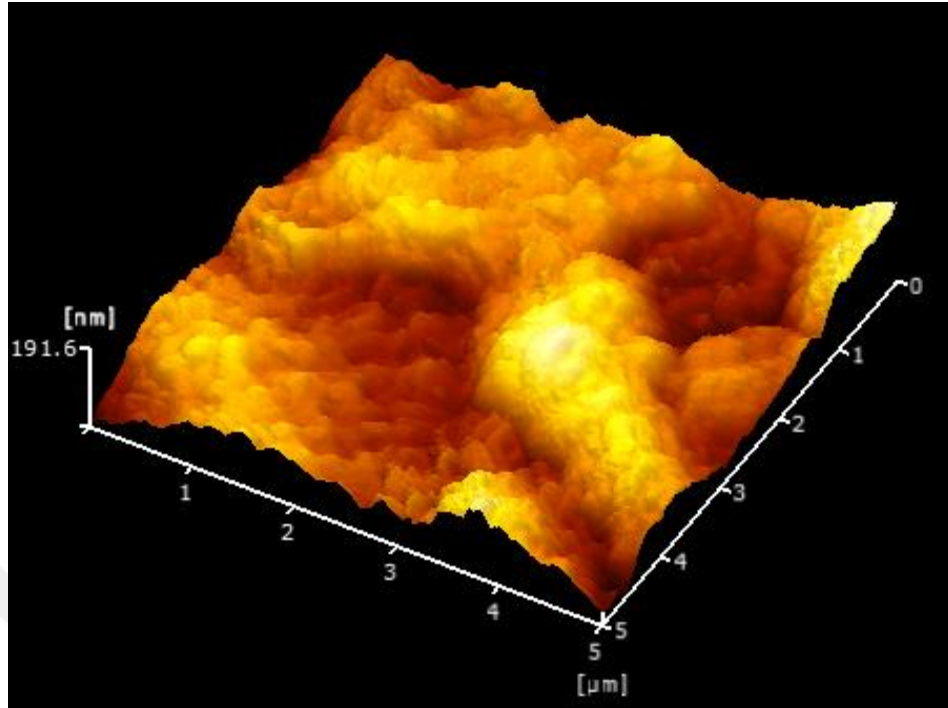




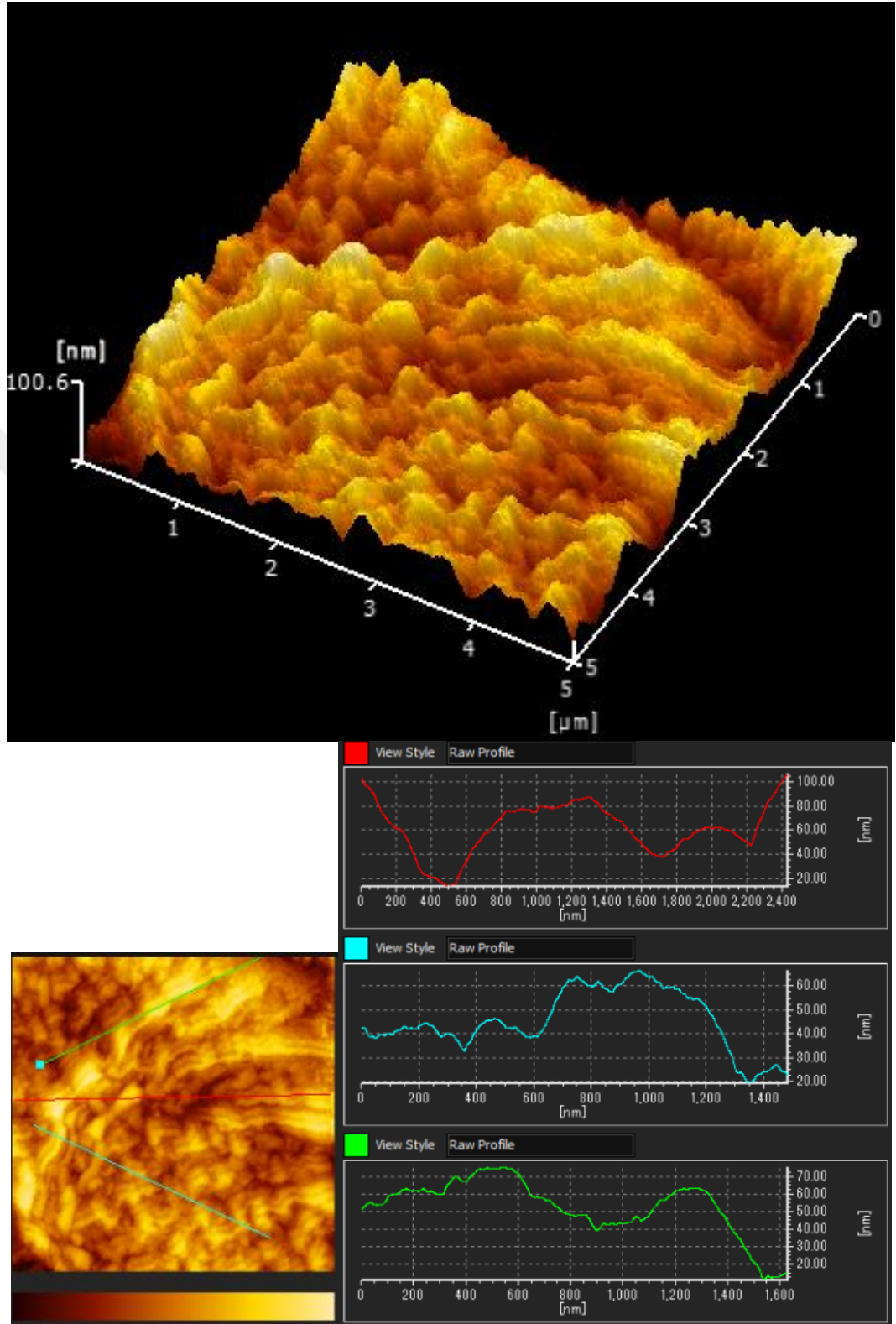
Şekil 4.9. ZnO:La%5 filminin (a) EDAX spektrumu ve (b) SEM görüntüsü

#### 4.4. AFM Görüntüleri

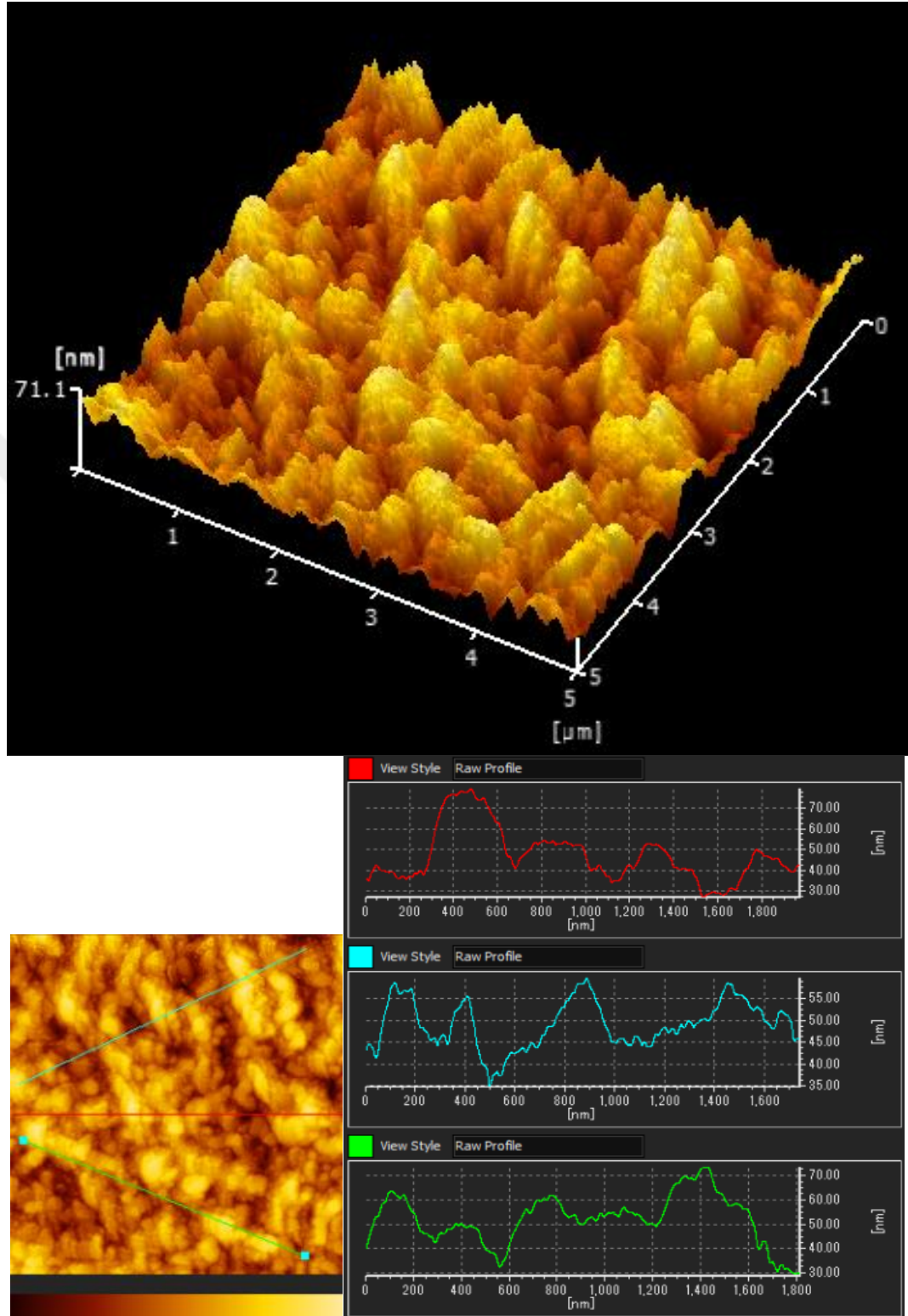
Filmlerin yüzey morfolojileri hakkında bilgi elde etmek için AFM görüntüleri alındı. Şekil 4.10-4.14'de farklı oranlarda La katkılı filmlerin AFM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.10. ZnO:La%0 filminin AFM görüntüsü

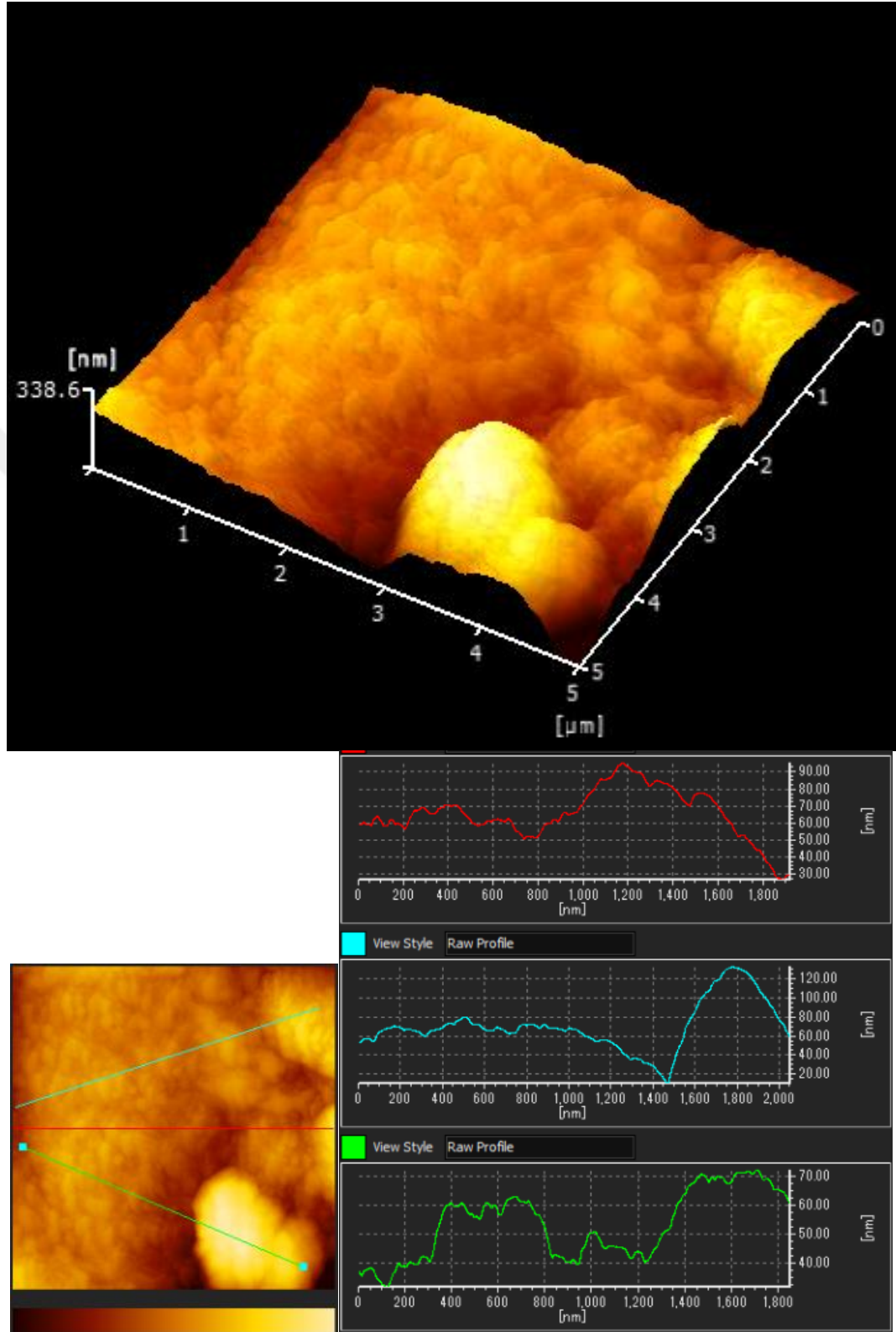


Şekil 4.11. ZnO:La%1 filminin AFM görüntüsü

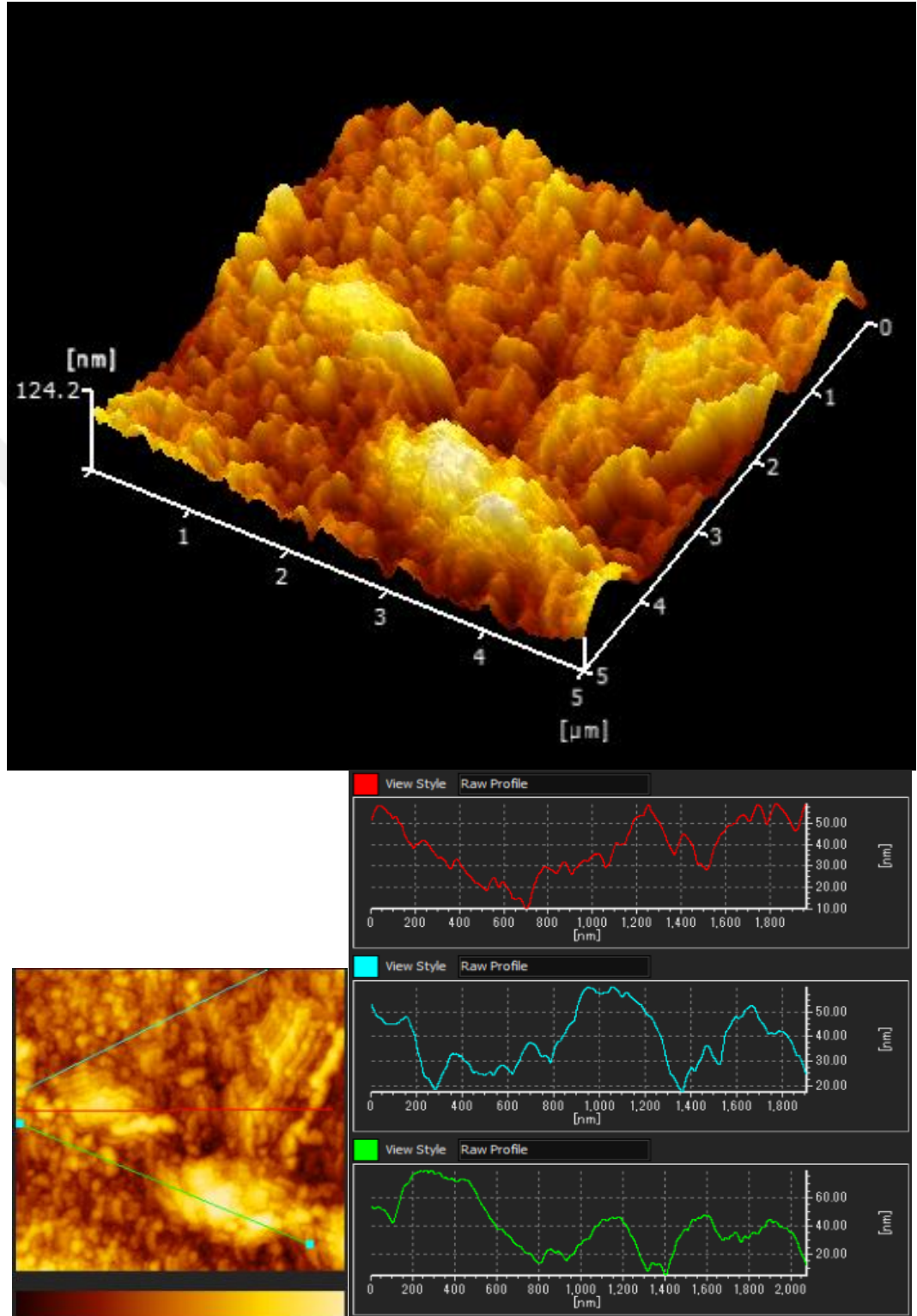


Şekil 4.12. ZnO:La%2 filminin AFM görüntüsü





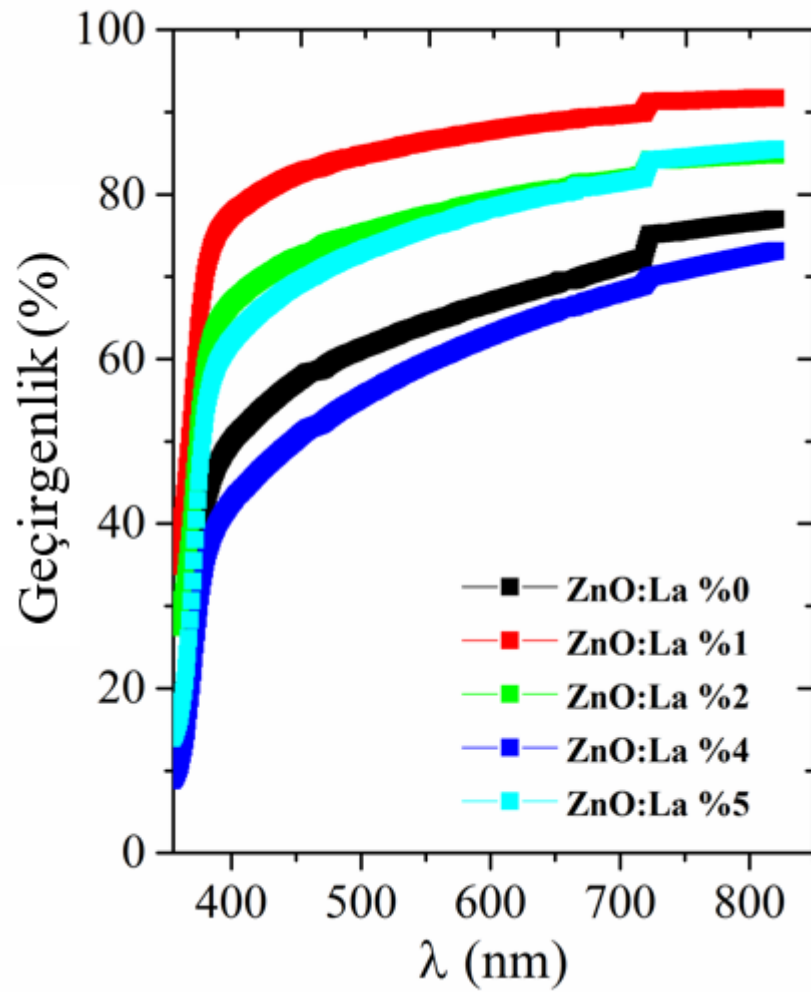
Şekil 4.13. ZnO:La%4 filminin AFM görüntüsü



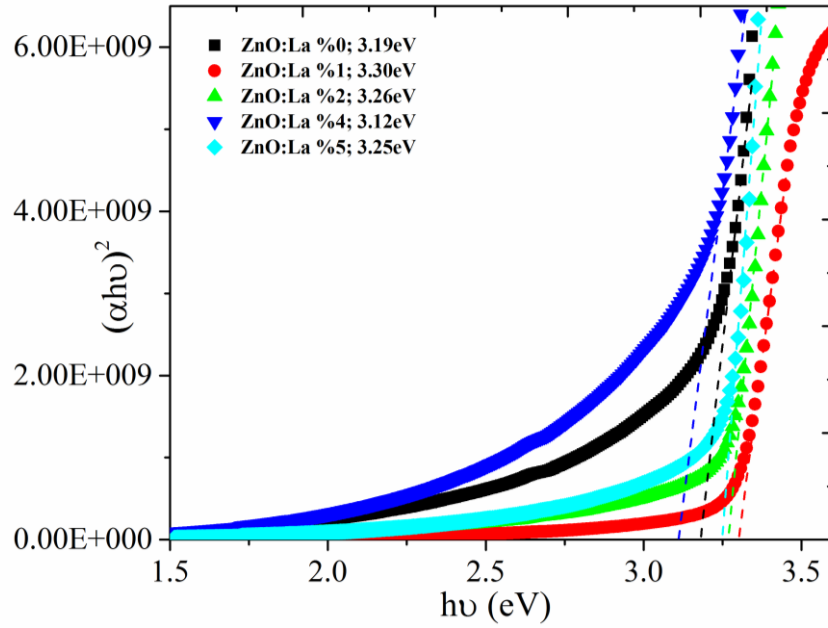
Şekil 4.14. ZnO:La%5 filminin AFM görüntüsü

#### 4.5. Optik Ölçümler

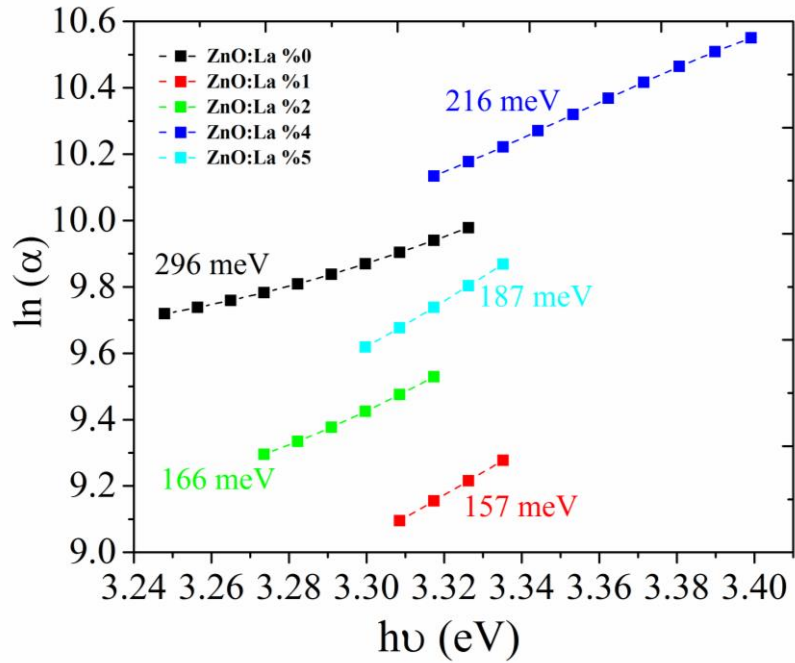
Şekil 4.15’de farklı oranlarda (%0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.)) ZnO: La filmlerin optiksel özelliklerini araştırmak için optik geçirgenlik spektrumu verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.16’dan filmlerden optik bant aralığı elde edilmiştir. Çeşitli oranlarda La katkılı ZnO ince filmlerin (ZnO:La)  $\ln(\alpha)$ ’ya karşı  $h\nu$  grafiği Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.15. Farklı oranlarda (%0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.)) La katkılı ZnO ince filmlerin (ZnO:La) optik geçirgenlik spektrumu



**Şekil 4.16.** Farklı oranlarda (%0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.)) La katkılı ZnO ince filmlerin (ZnO:La) optik bant aralığının değişimi

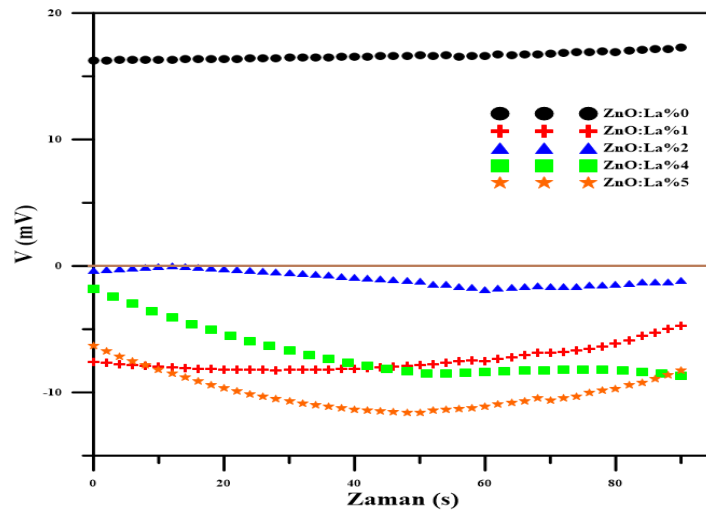


**Şekil 4.17.** Farklı oranlarda (%0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.)) La katkılı ZnO ince filmlerin (ZnO:La)  $\ln(\alpha)$ 'ya karşı  $h\nu$  grafiği

#### 4.6. Sıcak Prop Tekniği

Sıcak prop tekniği, bir yarıiletkenin iletkenlik tipini ( $n$  veya  $p$ -tipi) belirlemek için kullanılan en basit tekniktir. Bu yöntemde deneysel olarak yarıiletkenin yüzeyi üzerine biri sıcak ve diğeri soğuk olan iki prop yerleştirilir. Bu durumda iki prop arasındaki sıcaklık farkından dolayı oluşan gerilimin değişiminden yarıiletkenin iletkenlik tipi ( $n$ -veya  $p$ -tipi) belirlenir. Termodinamik olarak çoğunluk taşıyıcıların sıcak olan taraftan soğuk olan tarafa hareket etmeleri bir gerilim farkına yol açar. Çoğunluk taşıyıcıları elektronlar ise elektronların dışa doğru difüzyonu soğuk tarafa göre sıcak probu pozitif işaretili olarak bırakır. P-tipinde ise tam tersi olur (Aydoğan 2015).

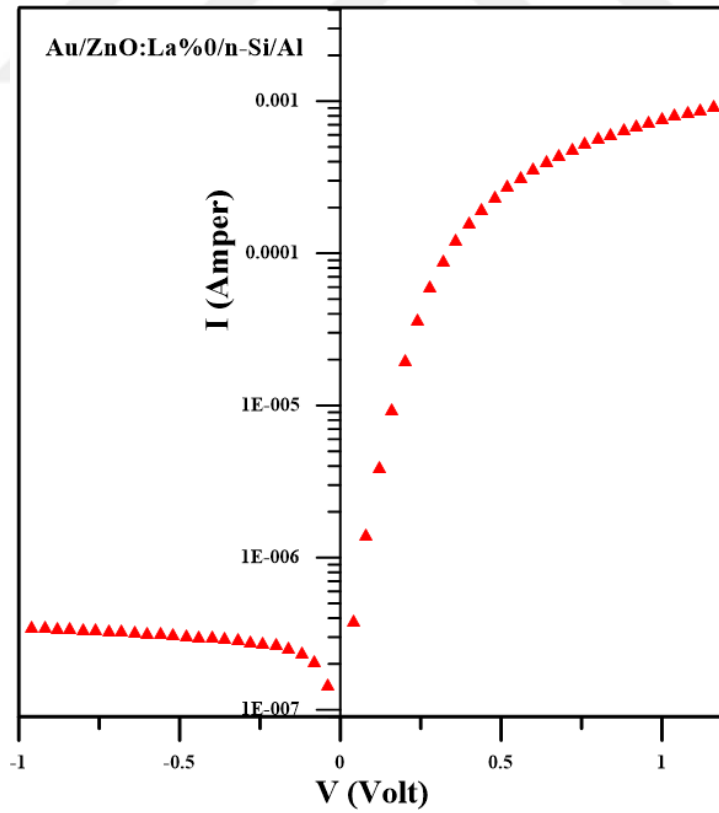
Deneysel olarak çeşitli oranlarda La katkılı ince filmlerin yüzeyi üzerine bir sıcak ve bir soğuk prop yerleştirildi. Probların birbirinden uzaklığı  $\sim 5$  mm olarak ayarlandı. Sıcak probun sıcaklığı  $150^{\circ}\text{C}$  olduğunda, zamana karşı gerilim ölçümü alındı. Şekil 4.18'de görüldüğü gibi %0 (%at.) La katkılı filmi pozitif işaretili voltaj değerleri olarak n-tipinde olduğu tespit edildi. La katkılı filmlerin hepsi negatif işaretili voltaj değerleri olarak p-tipinde oldukları tespit edildi. Bu nedenden dolayı, p-n eklemi elde etmek için n-tipi Si üzerinde ince film büyütüldü. Çeşitli oranlarda La katkılı ince filmlerin voltaja (mV) karşı zaman (s) grafikleri Şekil 4.18'de gösterilmektedir.



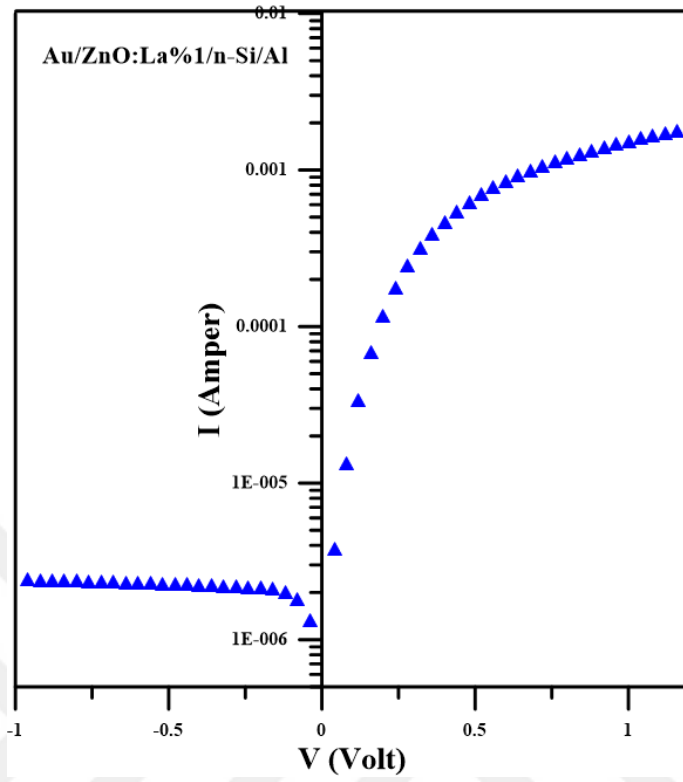
**Şekil 4.18.** Çeşitli oranlarda La katkılı ZnO ince filmlerin voltaja (mV) karşı zaman (s) grafikleri

#### 4.7. $I$ - $V$ (Akım-Voltaj) Ölçümleri

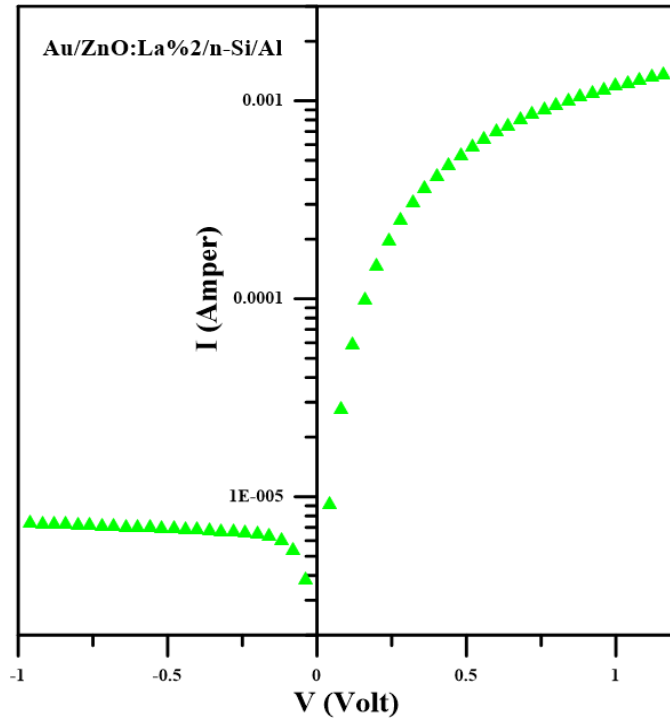
Elde edilen Au/ZnO:La%0/n-Si/Al, Au/ZnO:La%1/n-Si/Al, Au/ZnO:La%2/n-Si/Al, Au/ZnO:La%4/n-Si/Al ve Au/ZnO:La%5/n-Si/Al Schottky diyotların oda sıcaklığında (300 K) ve karanlıkta alınan akım-gerilim ( $I$ - $V$ ) ölçümlerinden çizilen  $\ln(I)$ - $V$  grafikleri Şekil 4.18-4.23'de gösterilmiştir. Elde edilen diyotların Norde fonksiyonu grafiği ( $F(V)$ - $V$ ) Şekil 4.24'de verilmiştir. Ayrıca Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarının  $I$ - $V$  grafiğinden ve Norde fonksiyonundan elde edilen idealite faktörü ( $n$ ) ve engel yükseklik ( $\Phi_b$ ) değerlerinin La katkı oranına karşı değişimleri Şekil 4.26'da verilmiştir. Şekil 4.27'de Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarının Norde fonksiyonundan hesaplanan seri direnç ( $R_s$ ) değerlerinin La katkı oranına karşı değişimleri gösterilmektedir. Farklı oranlarda La katkılı Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarının  $I$ - $V$  grafiğinden ve Norde fonksiyonundan hesaplanan temel diyot parametreleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.



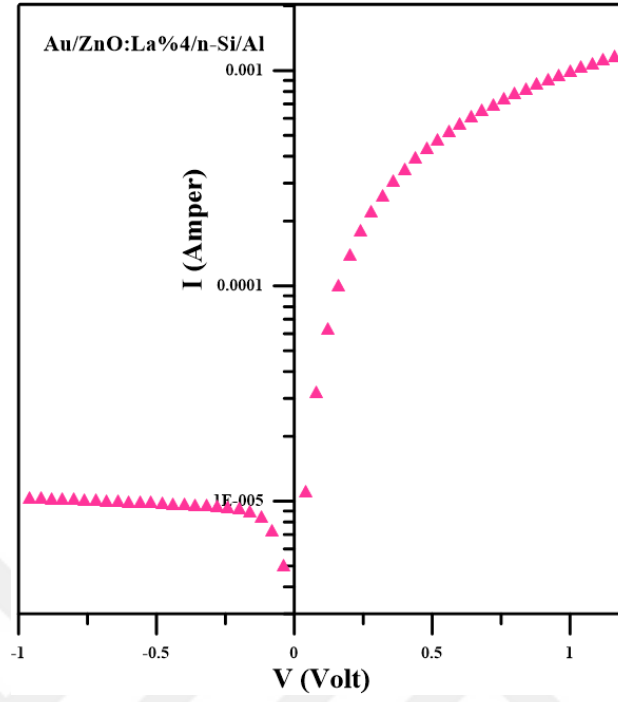
Şekil 4.19. Au/ZnO:La%0/n-Si/Al diyoduna ait  $\ln(I)$ - $V$  grafiği



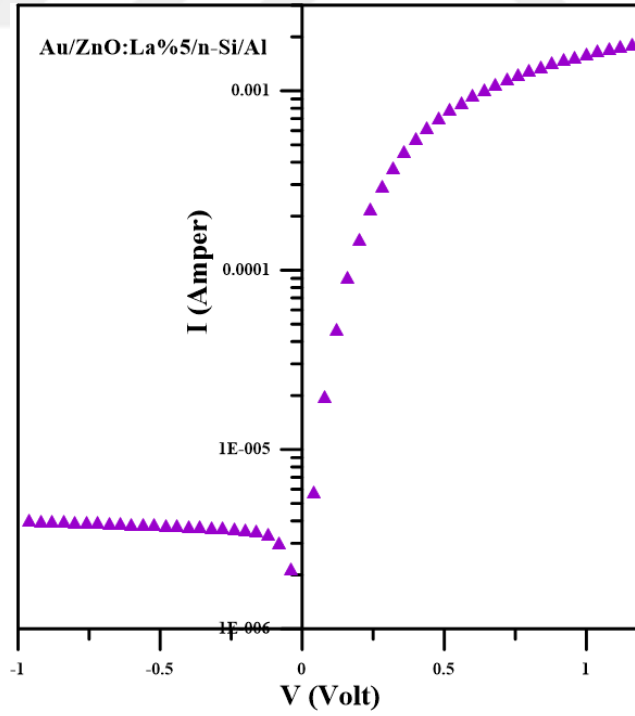
Şekil 4.20. Au/ZnO:La%1/n-Si/Al diyoduna ait  $\ln(I)$ - $V$  grafiği



Şekil 4.21. Au/ZnO:La%2/n-Si/Al diyoduna ait  $\ln(I)$ - $V$  grafiği

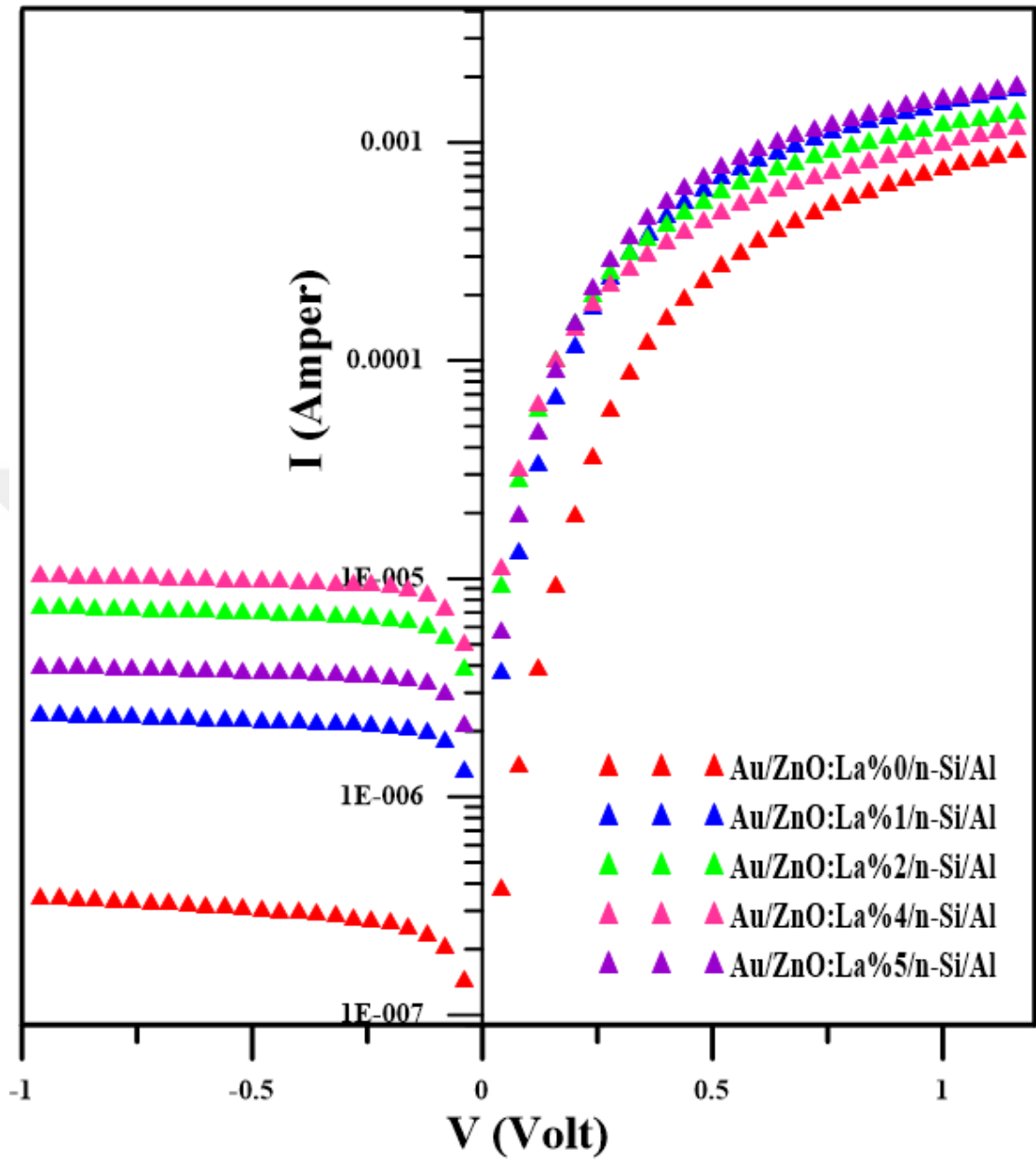


Şekil 4.22. Au/ZnO:La%4/n-Si/Al diyoduna ait  $\ln(I)$ -V grafiği

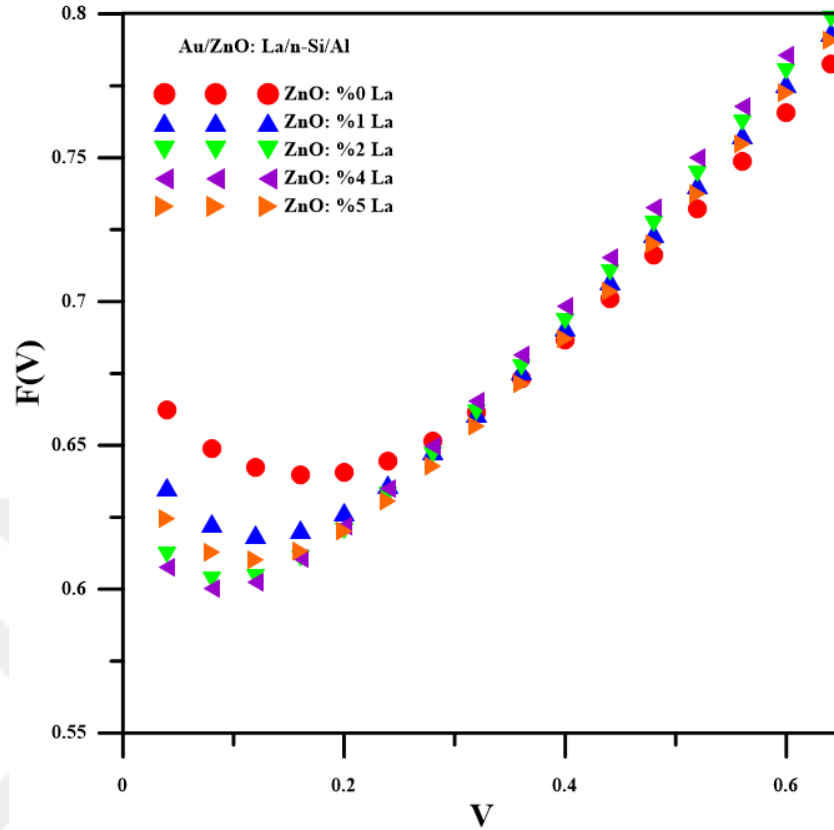


Şekil 4.23. Au/ZnO:La%5/n-Si/Al diyoduna ait  $\ln(I)$ -V grafiği





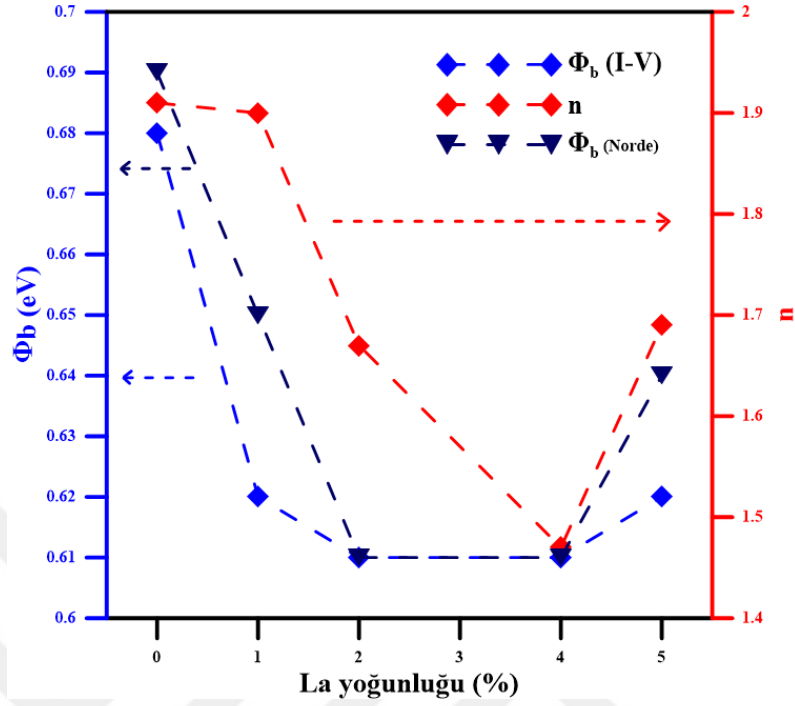
Şekil 4.24. Au/ZnO:La%0/n-Si/Al, Au/ZnO:La%1/n-Si/Al, Au/ZnO:La%2/n-Si/Al, Au/ZnO:La%4/n-Si/Al ve Au/ZnO:La%5/n-Si/Al Schottky diyotlarına ait  $\ln(I)$ - $V$  grafikleri



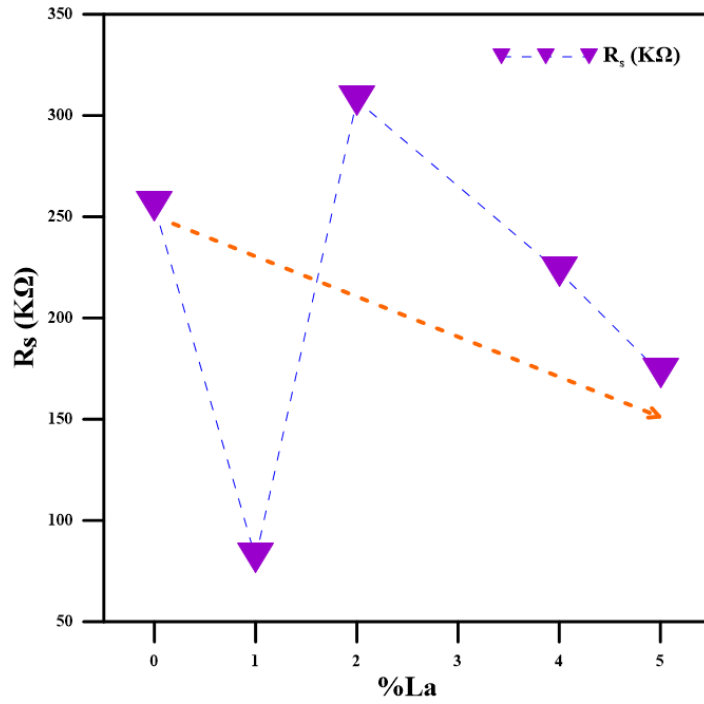
**Şekil 4.25.** Au/ZnO:La%0/n-Si/Al, Au/ZnO:La%1/n-Si/Al, Au/ZnO:La%2/n-Si/Al, Au/ZnO:La%4/n-Si/Al ve Au/ZnO:La%5/n-Si/Al Schottky diyotlarının Norde fonksiyonu grafikleri

**Çizelge 4.3.** Farklı oranlarda La katkılı Au/ZnO:La/n-si/Al diyotlarının  $I-V$  grafiğinden ve Norde fonksiyonundan hesaplanan temel diyot parametreleri

	$I-V$		$F(V)-V$ (Norde)	
	$n$	$\Phi_b$ (eV)	$\Phi_b$ (eV)	$R_s$ (K $\Omega$ )
<b>Au/ZnO:%0La/n-Si/Al</b>	1.91	0.68	0.69	255.14
<b>Au/ZnO:%1La/n-Si/Al</b>	1.90	0.62	0.65	81.38
<b>Au/ZnO:%2La/n-Si/Al</b>	1.67	0.61	0.61	307.45
<b>Au/ZnO:%4La/n-Si/Al</b>	1.47	0.61	0.61	222.78
<b>Au/ZnO:%5La/n-Si/Al</b>	1.69	0.62	0.64	172.76



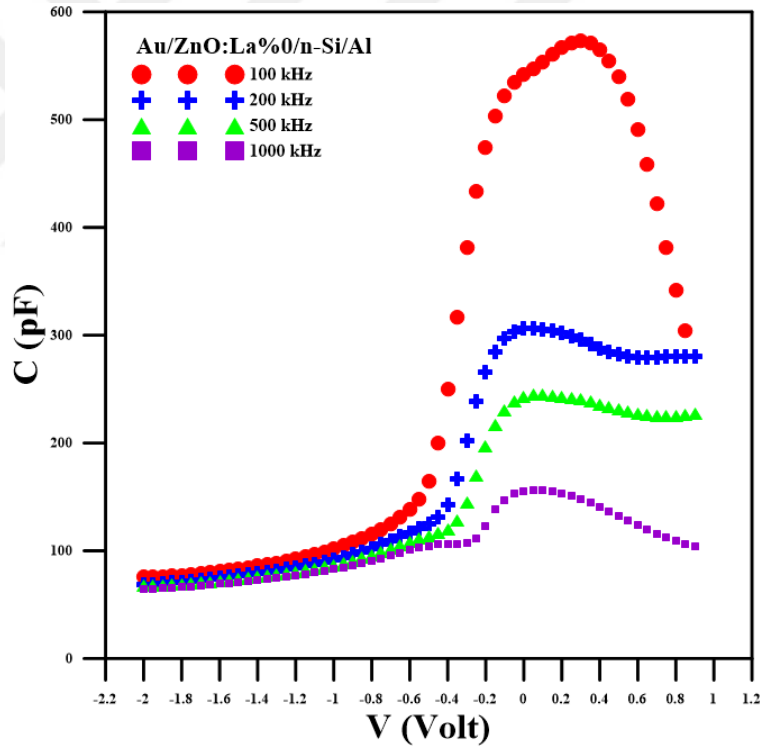
Şekil 4.26. Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarının  $Ln(I)$ -V grafiğinden ve Norde fonksiyonundan hesaplanan idealite faktörü ve engel engel yükseklik değerlerinin La katkı oranına karşı değişimleri



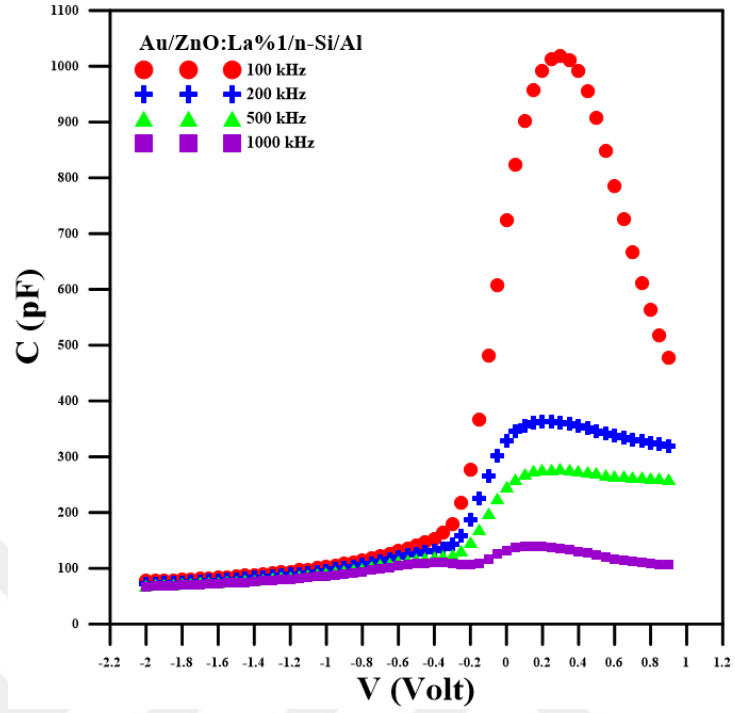
Şekil 4.27. Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarının Norde fonksiyonundan hesaplanan seri direnç değerlerinin La katkı oranına karşı değişimleri

#### 4.8. C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümleri

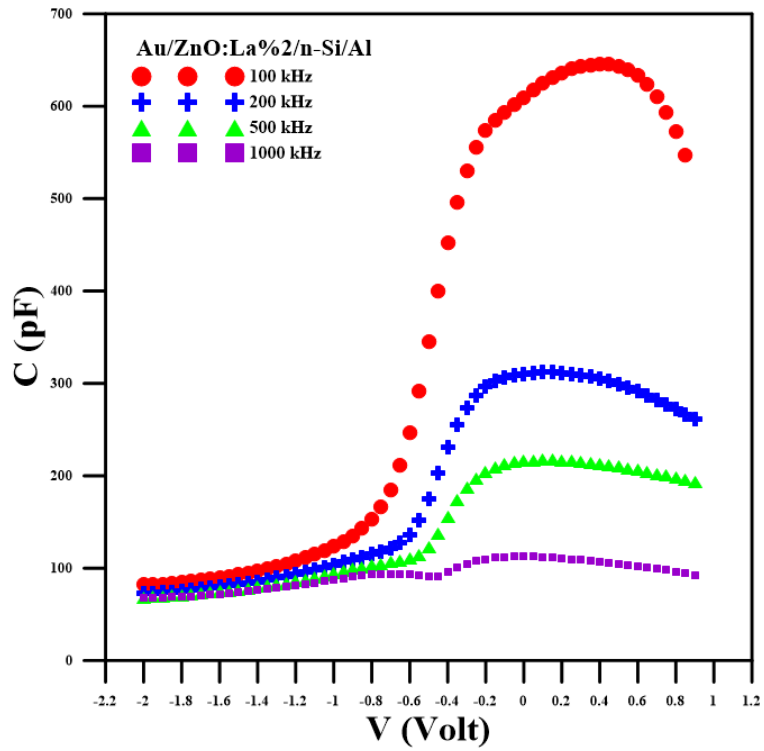
Elde edilen Au/ZnO:La%0/n-Si/Al, Au/ZnO:La%1/n-Si/Al, Au/ZnO:La%2/n-Si/Al, Au/ZnO:La%4/n-Si/Al, Au/ZnO:La%5/n-Si/Al Schottky diyotların oda sıcaklığında (300 K) ve karanlıkta alınan C-V (kapasite-gerilim) ölçümlerinden çizilen grafikler Şekil 4.28-4.32’de gösterilmiştir. Farklı oranlarda La katkılı Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarına ait  $f=500$  kHz sabit frekansta  $1/C^2$ -V grafiği Şekil 4.33’de gösterilmektedir. Farklı oranlarda La katkılı Au/ZnO:La/n-si/Al diyotlarının  $1/C^2$ -V grafiğinden hesaplanan engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ), fermi enerji seviyesi ( $E_f$ ), taşıyıcı yoğunluğu ( $N_{d/a}$ ) ve difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ) gibi temel diyot parametreleri Çizelge 4.4’de verilmektedir.



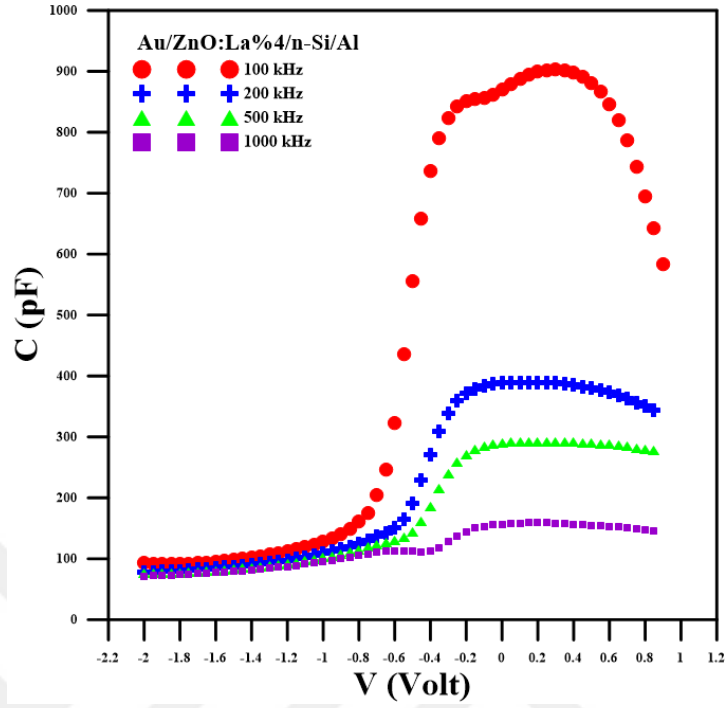
Şekil 4.28. Au/ZnO:La%0/n-Si/Al diyodunun  $f=100$ , 200, 500 ve 1000 kHz frekanslarda düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği



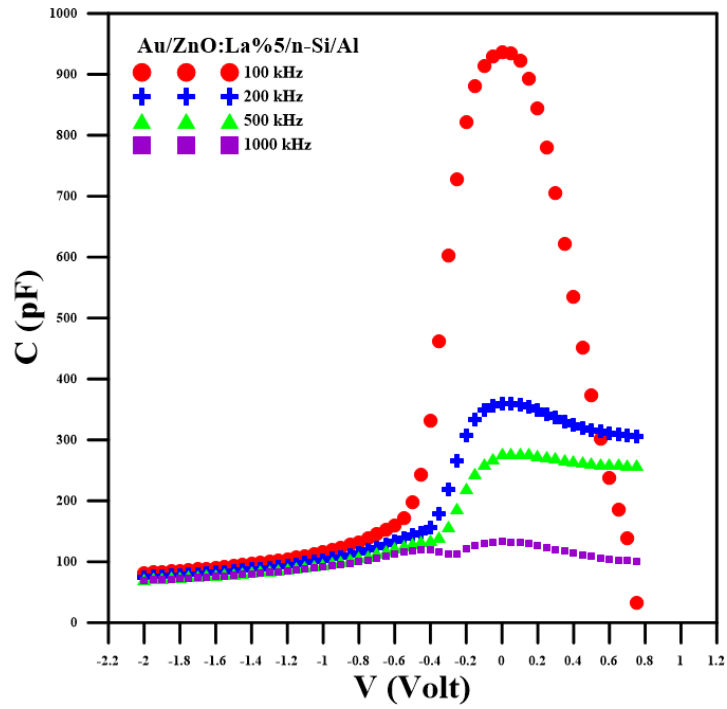
Şekil 4.29.  $\text{Au/ZnO:La}\%1/n\text{-Si/Al}$  diyodunun  $f=100, 200, 500$  ve  $1000$  kHz frekanslarda düz ve ters beslem durumunda  $C$ - $V$  grafiği



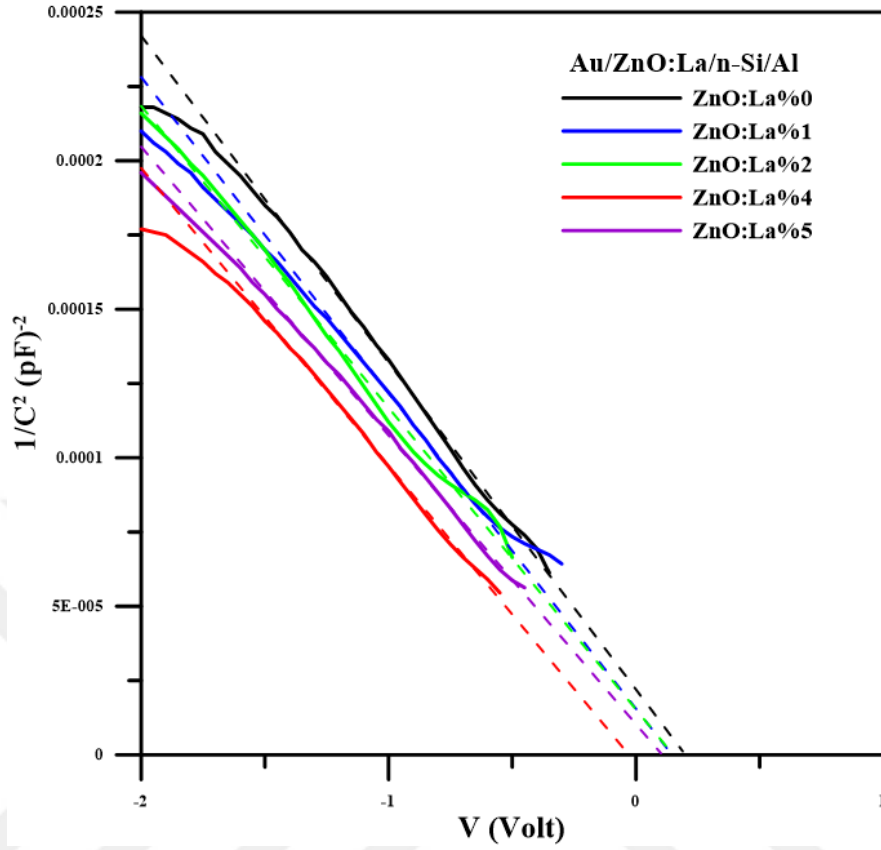
Şekil 4.30.  $\text{Au/ZnO:La}\%2/n\text{-Si/Al}$  diyodunun  $f=100, 200, 500$  ve  $1000$  kHz frekanslarda düz ve ters beslem durumunda  $C$ - $V$  grafiği



Şekil 4.31.  $\text{Au/ZnO:}\%4\text{La/n-Si/Al}$  diyodunun  $f=100, 200, 500$  ve  $1000$  kHz frekanslarda düz ve ters beslem durumunda  $C$ - $V$  grafiği



Şekil 4.32.  $\text{Au/ZnO:}\%5\text{La/n-Si/Al}$  diyodunun  $f = 100, 200, 500$  ve  $1000$  kHz frekanslarda düz ve ters beslem durumunda  $C$ - $V$  grafiği



**Şekil 4.33.** Farklı oranlarda La katkılı Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarına ait  $f=500$  kHz sabit frekansta  $1/C^2$ -V grafikleri

**Çizelge 4.4.** Farklı oranlarda La katkılı Au/ZnO:La/n-Si/Al diyotlarının  $1/C^2$ -V grafiğinden hesaplanan temel diyot parametreleri

	$1/C^2$ -V			
	$V_d$ (V)	$N_{d/a}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$E_f$ (eV)	$\Phi_b$ (eV)
<b>Au/ZnO:La%0/n-Si/Al</b>	0.20	$1.76 \times 10^{15}$	0.25	0.45
<b>Au/ZnO:La%1/n-Si/Al</b>	0.15	$1.82 \times 10^{15}$	0.25	0.49
<b>Au/ZnO:La%2/n-Si/Al</b>	0.08	$1.83 \times 10^{15}$	0.25	0.30
<b>Au/ZnO:La%4/n-Si/Al</b>	0.03	$1.94 \times 10^{15}$	0.25	0.46
<b>Au/ZnO:La%5/n-Si/Al</b>	0.11	$1.99 \times 10^{15}$	0.25	0.39

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada çeşitli oranlarda La katkılı ZnO ince filmleri (ZnO:La%0, ZnO:La%1, ZnO:La%2, ZnO:La%4, ZnO:La%5 (%at.)) kimyasal püskürtme yöntemi ile elde edilmiş ve Au/ZnO:La(% at.X)/n-Si/Al (X=0,1,2,4,5) aygıtlarının performansları katkı yoğunluğuna bağlı olarak incelenmiştir. Elde edilen tüm numuneler yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel açıdan araştırılmıştır.

### 5.1. Yapısal, Morfolojik ve Optik Karakterizasyon Sonuçları

Çeşitli La katkı oranlarında ZnO:La filmlerin X-ışını kırınım desenleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir. X-ışını kırınım desenlerinden tüm filmlerin hegzagonal wurtzite yapıya sahip oldukları tespit edilmiştir. (100), (002), (101), (102), (110), (103) ve (112) düzlemlerinin çeşitli şiddetlerde kırınım piklerinin varlığı filmlerin tercihli yönelime sahip olmadığını göstermektedir. ZnO:La%0 filmi referans numune olarak daha şiddetli kırınım piklerine sahip olmakla birlikte ağırlıklı olarak (100), (002) ve (101) düzlemlerinin diğer piklere göre daha yüksek şiddette kırınım piklerine ve düşük yarı yükseklik genişliğine (FWHM) sahip oldukları görülmektedir. Bu sonuç aynı zamanda referans numunenin kristal yapısının yüksek kalitede olduğu anlamına gelir (Salaken *et al.* 2013). X-ışını kırınım desenlerine göre (101) düzlemlerinin kırınım şiddetleri tüm numunelerde en baskın piktir. (101) pikinin şiddeti sıcaklıkla ters orantılı olarak ilişkilidir. Yani, (101) düzleminin X-ışını kırınım şiddeti, stokiyometriden farklı olarak düşük altaş sıcaklığına bağlı olarak oksijen miktarının azalması ile birlikte de artırılabilir. Bu durumun aksine *c* ekseninin yönelimi yapıdaki oksijen miktarının artışı ile artar (Matsuoka and Ono 1989). Karakteristik ZnO pikleri haricinde, lantanyum, çinko veya bunların karmaşık oksitlerine ait pikler tespit edilmemiştir. Bu sonuç filmlerin tek fazlı olduklarını ve La iyonlarının hegzagonal kristal yapısında homojen olarak dağıldığı fikrini desteklemektedir.



XRD analizlerinden, %4 (%at.) La katkılama oranına kadar Bragg piklerinin şiddetinin sürekli olarak azaldığı daha sonra ise %5 (%at.) La katkılama oranında tekrar artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Büyüme işlemi sırasında La atomu ile Zn veya O atomları arasındaki fiziksel veya kimyasal etkileşim sebebiyle gerçekleşen enerji soğurma değişimleri, pik şiddetlerindeki dalgalanmanın bir nedeni olarak gösterilebilir (Yılmaz and Grilli 2016). Bu durumlara ek olarak, La katkı miktarının artmasıyla ZnO filmlerinin baskın pikleri daha yüksek  $\theta$  değerlerine kaymıştır. Aslında boşluklardan, yer değişmelerden ve benzer olaylardan kaynaklanan kusurlardan dolayı örgü bozulur ve bu durum piklerin kaymasına neden olabilir. Yani,  $Zn^{+2}$  iyonlarının  $La^{+3}$  katkı iyonları ile yer değiştirmesinden dolayı bir iç zorlanma oluşur ve bu durum piklerin kaymasına sebep olur (Goel *et al.* 2017). Ayrıca Denton and Ashcroft (1991) tarafından yapılan çalışmaya göre piklerin yüksek  $\theta$  değerlerine doğru kayması  $La^{+3}$  iyonunun ZnO yapısına başarılı olarak katılanmış olduğu fikrini desteklemektedir. Kumari *et al.* (2015) ve Yılmaz (2014) tarafından yapılan çalışmalarda da sırasıyla N ve Ni katkılama oranına bağlı olarak kırınım piklerinin daha büyük  $\theta$  değerlerine kaydığı bildirilmiştir. Bunun yanında, literatürde La katkılaması ile X-ışını kırınım piklerinin küçük açılara kaydığı da tespit edilmiştir (Wei *et al.* 2007; Jun *et al.* 2008). La katkı miktarının fonksiyonu olarak  $a$  ve  $c$  örgü parametrelerinin değerleri literatürde kolay bir şekilde bulunabilen ifadeler yardımı ile hesaplanmış (Aydoğan *et al.* 2017) ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2’den anlaşılacağı gibi,  $a$  ve  $c$  örgü parametrelerin değişimleri La katkı miktarının artışı ile ters orantılı olarak değişim eğilim göstermektedir. Örgü parametrelerindeki değişikliğin,  $La^{+3}$  ve ZnO arasındaki örgü uyumsuzluğundan kaynaklandığı tahmin edilmektedir ( $La^{+3}$ ,  $Zn^{+2}$  ve  $O^{-2}$  iyonlarının yarıçapı sırasıyla 0.106 nm, 0.074 nm ve 0.132 nm’dir). “ $c$ ” örgü sabiti değerinin azalma miktarı  $a$  örgü sabiti değerinin artışından nispeten daha büyüktür. Buna bağlı olarak ( $V = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c$ ) denkleminde örgü hacminde La miktarına bağlı olarak azalması tespit edilmiş ve bulunan değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu sonuç, Bragg piklerinin daha yüksek açılara kaymasını izah etmek adına yukarıda bahsedilen açıklamaları da desteklemektedir. ZnO filmlerinin yüzeyindeki doymamış bağların varlığı, örgü büzülmesi için olası bir sebep olarak gösterilebilir (Ungula *et al.* 2017). Düzlemler arası mesafe ( $d$ ) değerleri Bragg yasasını ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ) kullanarak her pik için hesaplanmış ve

sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir. Hesaplanan  $d$  değerlerinin JCPDS card no:36-1451’den alınan standart değerlere çok yakın olduğu görülmektedir. Kırınım şiddetleri polikristal kristal yapısının tercihli veya rasgele büyümesiyle uyumludur. Bu sebeple kristal yapının tercihli yönelimi hakkında yorum yapabilmek için her pik için yapı katsayısı (TC) değerleri hesaplanabilir. Kristal düzlemlerin tercihli yönelime sahip olduklarını söylemek için, TC değerleri birden büyük olmalıdır. TC değerlerinin hesaplanabilmesi için aşağıdaki denklem kullanılmıştır (Sönmezoğlu and Akman 2014).

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\left(\frac{1}{N}\right)[\sum_N I(hkl)/I_0(hkl)]} \quad (5.1)$$

Burada,  $I(hkl)$ , filmlere ait  $(hkl)$  düzlemleri ilgili bağıl kırınım şiddetini,  $(hkl)$  ve  $I_0(hkl)$  JCPDS#36-1451’den alınan  $(hkl)$  düzleminin standart şiddetini temsil etmektedir.

Her bir pik için hesaplanan TC değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir ve La katkılmasına bağlı değişimleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Bu sonuçları dikkate alındığında, tüm filmler için (101) düzleminin en şiddetli piklere sahip oldukları ve diğer piklerle kıyasla (100), (002) ve (101) düzlemlerinin en büyük TC değerlerine sahip oldukları söylenebilir. Ayrıca La katkı miktarı artması ile (100) düzlemlerinin TC değerleri gitgide azalmaktadır. Bu durum La iyonlarının ZnO kristal yapısına girdiğinin ve kristal yapı bozulduğunun göstergesidir. Genellikle standart sapma ( $\sigma$ ) hesaplamaları, yüksek veya düşük  $\sigma$  değerlerine bağlı olarak çekirdekleşme türünü belirlemek için yapılır. Denklem 5.2 ile standart sapma değerleri hesaplanmıştır (Han *et al.* 1999).

$$\sigma = \left[ \frac{\sum I_{(hkl)}^2 - \frac{(I_{(hkl)})^2}{N}}{N} \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

Burada,  $I(hkl)$ ,  $(hkl)$  düzlemlerinin bağıl kırınım şiddetini ve  $N$  yansıma veren düzlemlerin sayısını temsil eder. La katkı miktarına bağlı standart sapmaların değerleri Çizelge 4.2’de verilmiş ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir. La katkı miktarının %1’e (%at.)

artmasıyla,  $\sigma$  değerlerinin artması, heterojen çekirdekleşmeyi işaret eder. Hâlbuki La katkı miktarının artmaya devam etmesi ile  $\sigma$  değerleri azalır ve bu durum homojen çekirdekleşmeyi işaret eder. Genellikle kristal yapının kalitesini tahmin etmek için FWHM ve kristal boyutu kullanılır. Kristal boyutu, dislokasyon yoğunluğu ( $\delta$ ) ve  $c$  eksenindeki zorlanma ( $\varepsilon_{zz}$ ) değerleri sırasıyla 5.3, 5.4 ve 5.5 denklemleri ile elde edilmiştir (Benramache *et al.* 2013).

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (5.3)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{c-c_0}{c_0} \times 100\% \quad (5.5)$$

Burada,  $\lambda$  X-ışının dalgaboyu olarak 1.5418Å'dur.  $\theta$ , Bragg açısıdır,  $\beta$ , radyan cinsinde olmak üzere FWHM'dir,  $c$ , Çizelge 4.2'de hesaplanan değerdir ve  $c_0$  standart örgü sabitidir (JCPDS 36-1451'den elde edilmiştir). (100), (002) ve (101) düzlemlerini dikkate alarak Filmlerin ortalama kristal boyutu hesaplanarak Çizelge 4.2'de verilmiştir ve Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

Ortalama kristal boyutu Şekil 4.4'de görüldüğü gibi neredeyse sabittir ve La katkı miktarının artmasıyla biraz artma eğilimi olduğu görülmektedir. Film ve alttaş arasındaki örgü uyumsuzluğu, büyüme süreci boyunca çeşitli derecelerde zorlanmaya neden olabilir. Bu nedenden dolayı, zorlanma filmlerin yapısal özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilir. Filmlerin zorlanma değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Yukarıda bahsedilen tartışmaların hepsini dikkate alarak, Çizelge 4.2'de verilen "c" örgü parametrelerinde azalma eğilimi (filmlerdeki zorlanmanın azalması), ortalama kristal boyutundaki artışın olası bir sebebi olarak gösterilebilir. Benzer sonuçlar Hou *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada kimyasal püskürtme yöntemi ile büyütülen Co katkılı ZnO filmleri için de gözlemlenmiştir. Dislokasyon yoğunluğu önemli bir yapısal faktörü olarak kristal yapıdaki kusurların miktarını belirler. Düşük  $\delta$  değeri, daha düşük yapısal kusuru ve daha yüksek kristalite özelliğini gösterir. Hesaplanan  $\delta$  değerleri

Çizelge 4.2'de verilmiştir. La katkı miktarının artmasıyla dislokasyon yoğunluğu değerlerinde küçük dalgalanmalarla birlikte genel olarak azalma eğilimi göstermiştir.

Elde edilen numunelerin yüzey morfolojileri SEM ve AFM ölçümleri ile değerlendirilmiştir. ZnO filmlerin yüzey morfolojilerinin La katkı miktarına bağlı olduğu Şekil 4.5(a)-4.9(a)'da gösterilmiştir ve EDAX ölçümüyle yapıdaki La varlığı kanıtlanmıştır. Şekil 4.5-4.9'da görüldüğü gibi filmlerde hiçbir çatlaklık yok ve tüm filmler çakıl benzeri nanoyapıdan meydana gelmek ile birlikte tanecik sınırlarının görünür olması, tüm filmlerin polikristal nitelikte olduğunu destekler. Ayrıca, filmlerin homojenliği La katkı miktarının artışı ile gelişmiştir (Şekil 4.5-4.9). Benzer yüzey topografisi diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda da tespit edilmiştir (Kulandaisamy *et al.* 2016; Offiah *et al.* 2017). La katkı miktarının artmasıyla taneciklerin boyutu (taneciklerin istiflenmesinden dolayı) katılanmamış ZnO'den daha büyük olduğu Şekil 4.6-4.9'da göstermiştir. Artan La katkı miktarlarında tanecik boyutunun büyümesi ile yüzeyde kümelenmeler oluşur ve böylece numunelerin yüzeyi değişmiş olur (Şekil 4.8 ve 4.9). Mkawi *et al.* (2015) tarafından yapılan çalışmada ZnO kristal yapısındaki  $Zn^{+2}$  ve  $Al^{+3}$  iyonları arasındaki yüksek iyonik farklılığın sonucu olarak meydana gelen zorlanmanın filmlerin yüzeyini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Çizelge 4.2'de verilen sonuçlar göz önüne alındığında, La katkı miktarının artmasıyla yüzey morfolojinin değişmesi bu açıklamayla desteklenebilir. Taneciklerin düzgün şekilde toplanmış olmaları, birbirleriyle etkileşime girmeleri ve tamamen yoğun oldukları AFM görüntülerinde (Şekil 4.10-4.14) görünmektedir. Numunelerin X-ışını sonuçlarından, La katkı miktarının artması ile birlikte tanecik boyutunun değerleri küçük kararsızlıkla beraber artan eğilimi gösterdiği zaten söylenmişti. Numunelerin çizgi tarama AFM ölçümleri bu sonucu ayrıca desteklemektedir. Ayrıca La katkı miktarının yüzey morfolojisinin homojenitesi üzerinde etkisi hakkında bir fikir edinmek için, yüzey ortalama karekökü (rms) ölçümü alınmıştır. Rms değerleri %0, %1, %2, %4 ve %5 (%at.) La katılı ZnO filmleri için sırasıyla 6.62 nm, 13.14 nm, 9.06 nm, 14.85 nm ve 13.01 nm olarak ölçülmüştür. Homojen tane büyümesi,  $La^{+3}$  ve  $Zn^{+2}$  iyonları arasındaki iyonik yarıçapı farklılıklarından yoğun yüzey topografisine yol açar ve ayrıca rms değerlerinin kararsız olmalarını açıklamak için muhtemel nedenlerden birisi de

olabilir. Bahsedilen öneriler bazı literatür çalışmaları ile uyumludur (Aydoğan *et al.* 2017; Rouchdi *et al.* 2017). Özet olarak, AFM ve SEM ölçümlerinden elde edilen tüm sonuçlar birbirleri ile ve Çizelge 4.2'de verilen yapısal özellikler ile tutarlı olduğu söylenebilir.

La katkılı ZnO filmlerin optik özellikleri, 300-850 nm aralıklarındaki geçirgenlik ölçümü ile değerlendirilmiştir. Numunelerin ortalama kalınlıkları ağırlık farkı yöntemi ile ölçülerek, yaklaşık 350 nm civarında gözlemlenmiştir. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin optik geçirgenlik spektrumları Şekil 4.15'de gösterilmektedir. Tüm filmler görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahipler. Buna ek olarak, çeşitli oranlardaki La katkılı filmler, farklı film yapısı ve stokiometri nedeniyle, 355-380 nm arasında ZnO'nun optik geçişini temsil eden keskin ultraviyole soğurma kenarı göstermektedir.

Benzer yorumlar bazı literatür çalışmalarında da yapılmıştır (Bai and Tseng 2009; Aydoğan *et al.* 2017). Şekil 4.15'e göre, filmlerin optik geçirgenliği, %4 (%at.) La katkılı film dışında genel olarak geliştirilmiştir. Kristal kalitesinin veya yüzey pürüzlülüğünün değişmesi daha fazla ışık saçılmasına yol açarak filmlerin görünür bölgedeki optik geçirgenliklerini etkiler. Bu bağlamda filmlerin AFM sonuçlarının optik özellikleriyle uyumlu olduğu söylenebilir. Yani filmlerin optik geçirgenliği ile yüzey pürüzlülüğü arasında ters bir ilişki vardır ve bu %4 (%at.) ile %5 (%at.) La katkılı ZnO filmleri arasındaki optik geçirgenlik farkını izah etmek için muhtemel bir açıklamadır. Benzer gözlemler Marouf *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada, daldırarak kaplama yöntemi ile büyütülen ZnO filmleri için de tespit edilmiştir. Optik geçirgenlik spektrumundan filmlerin optik bant aralığı ( $E_g$ ) değerlerini belirlemek mümkündür. Bu amaç için, aşağıdaki denklemi kullanılarak soğurma katsayısı ( $\alpha$ ) hesaplanmalıdır:

$$\alpha = \ln\left(\frac{1}{T}\right)/t \quad (5.6)$$

Burada  $T$  ve  $t$  sırasıyla, hesaplanan optik geçirgenlik ve film kalınlığıdır. Optik bant aralığı enerji ( $E_g$ ) değerlerini belirlemek için yukardaki denklemden elde edilen " $\alpha$ " değerleri aşağıdaki eşitlikte kullanılır,

$$(\alpha hv)^2 = C(hv - E_g) \quad (5.7)$$

burada  $hv$  foton enerjisidir,  $C$  elektron-hole hareketliliğine bağlı olan bir sabit ve " $\alpha$ ", eşitlik (5.6) 'dan belirlenen soğurma katsayısıdır.  $E_g$  değeri aşağıda verilen şartlara bağlı olarak daha kısa veya daha uzun dalgaboylarına doğru kayar:

- i. Daha kısa dalgaboyuna (mavi kayma) kayma genellikle en küçük parçacık boyutunun bir sonucu olarak ortaya çıkmış olur. Eğer parçacık boyutu Bohr'un yarıçapından küçük olursa maviye kayma, boyut etkisi veya kuantum sınırlama etkisi ile açıklanabilir.
- ii. Parçacık boyutu Bohr'un yarıçapından daha büyükse,  $E_g$  değerindeki değişim diğer parametrelere bağlı olabilir.

Filmlerin artan La katkı miktarı ile  $(\alpha hv)^2$ 'ye karşı  $hv$  grafiği Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Daha yüksek foton enerji değerlerinde  $(\alpha hv)^2$  ve  $hv$  arasındaki lineer ilişki filmlerin doğrudan geçişli elektronik yapıya sahip oldukları anlamına gelir. Grafiğin lineer kısmına doğrusal fit uygulandığında, fitin kestiği  $hv$  değeri, optik bant aralığı enerji ( $E_g$ ) değeri olarak belirlenir. Hesaplanan  $E_g$  değerleri 3.19-3.30eV aralığındadır (Şekil 4.16). La katkı miktarının artmasıyla filmlerin  $E_g$  değerleri artan eğilim göstermişlerdir. La katkılı ZnO filmler üzerinde araştırılan bazı literatür çalışmalarında da benzer sonuçlara rastlanılmaktadır. (He *et al.* 2014; Xu *et al.* 2015). Ayrıca, La miktarına bağlı olarak  $E_g$  değerlerinde bazı dalgalanmalar görülmektedir. Yani, La katkı miktarı %0'dan (%at.) %1'e (%at.) kadar artırılmasıyla  $E_g$  değeri 3.19 eV'dan 3.30 eV'a artmıştır ve daha sonra %2 (%at.) ve %4 (%at.) La katkı miktarında bu değer 3.26 eV ve 3.12 eV'a düşmüş son olarak ise %5 (%at.) La katkılı filmin  $E_g$  değeri 3.25eV'a tekrar artmıştır. Katkisız ZnO'den %1 (%at.) La katkılı ZnO'ye geçişte  $E_g$  değerinin artmasının muhtemel nedeni Burstein-Moss etkisi (BM etkisi) ile aşağıdaki gibi açıklanabilir;

ZnO, iyi bilinen yozlaşmış (dejenere) bir yarıiletkenidir ve katkı miktarının artması ile fermi seviyesi iletkenlik bandı ( $n$ -tipi yarı iletken için) tabanının üst kenarına veya valans bandı ( $p$ -tipi yarı iletken için) tabanının düşük kenarına yerleşir. Yani optik geçişler valans bandının maksimumu ile fermi seviyesi arasında ( $n$ -tipi iletkenlik) veya fermi seviyesi ile iletkenlik bandının minimumu arasında meydana gelir. La katkılması ile optik bant aralığı değerinin giderek daralması, iki etkiyle açıklanabilir: Birincisi,  $La^{+3}$  iyonları kirlilik bantlarına ek elektron seviyeleri oluşturacak ve yeni en düşük seviyeli moleküler orbitali oluşturmak için iletkenlik bandının alt kenarına yakın olan enerji seviyelerine yerleşecektir. UV ışınının kırmızıya kaymasının ana nedeni budur. İkincisi,  $La^{3+}$  iyonlarının yer değiştirmesi, bant elektronları ile  $La^{3+}$  iyonlarının lokalize olmuş  $d$  elektronları arasındaki  $sp-d$  değişimi güçlü etkileşimlere neden olabilir.  $s-d$  ve  $p-d$  değişim etkileşimleri, valans ve iletkenlik bant enerjileri üzerinde sırasıyla, negatif ve pozitif bir etkiye neden olur. Lang *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca daha fazla La katkılı ZnO filminin (%5La (%at.)) optik bant aralık değerinin artması Lantanyum oksit bileşiğinin kristal yapısındaki varlığı ile ilişkilendirilebilir. ZnO ile kıyaslandığında  $La_2O_3$  daha yüksek optik bant aralığı değerine sahiptir. Bunun sonucu olarak,  $La^{+3}$  iyonunun katkılanması ile ZnO'in iletkenlik bandının üzerinde ek bir enerji seviyesi oluşabilir. Lan *et al.* (2007) tarafından yapılan çalışmada, La katkılı ZnO filmleri için de aynı durumlara rastlandığı görülmektedir. Metal katkılı ZnO yarıiletkenler için optik bant aralığı değerlerinde benzer değişimler, farklı literatür çalışmalarında da elde edilmiştir (Jia *et al.* 2009; Kulyk *et al.* 2009; Chakraborty and Kumbhakar 2013). Urbach bant kuyruğu hesaplanarak bant aralığındaki değişimler ve  $La^{+3}$  katkılması ile enerji bantlarının oluşumu hakkında bilgi elde edinilebilir. Optik bant yapısı ve optik geçişler, bant aralığındaki mevcut lokalize durumların genişliğinden etkilenir. Bu nedenle, yerel kusurlar, Urbach enerjisi (Eu) olarak adlandırılan bant kuyruk enerjisiyle ilişkilidir ve aşağıdaki eşitlikleri kullanılarak hesaplanır:

$$\alpha = \alpha_0 \exp \frac{hv}{Eu} \quad (5.8)$$

$$Eu = \frac{d(hv)}{d(\ln(\alpha))} \quad (5.9)$$

Burada  $\alpha_0$  sabittir,  $h\nu$  fotonun enerjisidir ve  $\alpha$  deneysel olarak belirlenen optiksel soğurma değeridir.  $E_u$  değerleri, Şekil 4.17'de  $\ln(\alpha)$ 'ya karşı  $h\nu$  diyagramının eğiminden elde edilebilir. Bazı literatür çalışmalarına göre (Aydoğan *et al.* 2017; Bedia *et al.* 2015), Urbach enerjisi ile film kalitesi arasında bir ilişki vardır. Dolayısıyla, Urbach enerjisinin azalması film kalitesinin artması anlamına gelir. Çalışmada elde edilen Urbach enerjisi küçük dalgalanmalarla birlikte artma eğilimi göstermiştir, gözlenen dalgalanmalar XRD sonuçlarından elde edilen film kalitesi ile uyumludur. Ayrıca, filmlerin Urbach enerji değerleri optik bant aralığına ters olarak değişir. Yani, filmlerin hem optik bant aralığı hem de Urbach enerji değeri, bant-kuyruk veya kuyruk-kuyruk geçişleri gibi durumların yeniden düzenlenmesi nedeniyle bant kuyruk genişliğinin genişlemesine ve daralmasına bağlıdır.

## 5.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları

Elde edilen çeşitli oranlarda La katkılı ZnO aygıtların (Au/ZnO:La%0/n-Si/Al, Au/ZnO:La%1/n-Si/Al, Au/ZnO:La%2/n-Si/Al, Au/ZnO:La%4/n-Si/Al ve Au/ZnO:La%5/n-Si/Al) hepsi iyi doğrultma özelliğine sahiptirler (Şekil 4.19-4.24). Au/ZnO:La%0/n-Si/Al, Au/ZnO:La%1/n-Si/Al, Au/ZnO:La%2/n-Si/Al, Au/ZnO:La%4/n-Si/Al ve Au/ZnO:La%5/n-Si/Al aygıtların doğrultma oranı değerleri ( $\pm 0.7$  V'da) sırasıyla  $2.0 \times 10^3$ ,  $5.5 \times 10^2$ ,  $2.1 \times 10^2$ ,  $1.4 \times 10^2$  ve  $5.4 \times 10^2$  olarak ve sızıntı akımı değerleri de sırasıyla  $2.2 \times 10^{-9}$ ,  $1.79 \times 10^{-8}$ ,  $2.0 \times 10^{-8}$ ,  $1.8 \times 10^{-8}$ , ve  $1.1 \times 10^{-8}$  olarak ve açılma voltaj (turn on voltage) değerleri sırasıyla 0.2V, 0.13V, 0.12V, 0.11V ve 0.10V olarak hesaplanmıştır. Schottky diyotları p-n eklemelerle kıyasla daha hızlı anahtarlama ve daha düşük açılma voltajı gibi önemli özelliklere sahiptirler. Bu nedenle düşük açılma voltajına sahip aygıtlar elde etmekle yüksek verimli p-n eklem Schottky diyot elde edilir. Ayrıca p-n eklemi diyotların bir diğer önemli parametresi ise p-tipi tabakanın yüksek boşluk (hole) yoğunluğu ile büyük iletkenliğe sahip olmasıdır. Benzer gözlemler GaN p-n heteroeklem diyotları için de tespit edilmiştir (Tuan *et al.* 2015). Yukarıda belirtilen açıklamalar, bu çalışmada elde edilen C-V ölçümleri ile de uyumludur. İdeal bir Schottky diyot için baskın akım taşıyıcıları, iletim mekanizmasını oluşturan yegane etkendir. Kısmi katkılı yarıiletkenin üzerinde bir Schottky diyodunun



$I$ - $V$  karakteristiklerini araştırmak için Termiyonik Emisyon (TE) teorisinin egemen akım taşıma mekanizması olduğu kabul edilir. Dolayısıyla, yalnızca Schottky engel yüksekliğini aşabilecek kadar enerjiye sahip olan taşıyıcı, akıma katkıda bulunabilir ve termiyonik emisyon teorisinin matematiksel denklemi,  $I$ - $V$ 'ye bağlı olarak aşağıdaki formülle verilir (Aydoğan *et al.* 2016).

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] \quad (5.10)$$

Diyodun lineer olmayan karakteristikleri denklem 5.10'da verilmiştir. Doyma akımı ve idealite faktörü gibi bazı diyot parametrelerini hesaplamak için sırasıyla 3.27 ve 3.26 denklemlerinden faydalanılmıştır. Termiyonik Emisyon (TE) teorisine göre ideal bir diyot için idealite faktörünün değeri ( $n$ ) bir olmalıdır. Ancak yapılan çalışmada idealite faktörünün değerinin çeşitli nedenlerden dolayı bir'den daha büyük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Diyodun ideallikten uzaklaşması; eklem malzemelerin arasındaki oksit tabakanın varlığına, yüzey bölgelerde taşıyıcıların rekombinasyonuna, deplasyon tabakasında jenerasyona, büyük gerilimlerdeki taşıyıcıların aşırı enjeksiyonuna, parazitik IR düşmesi ile oluşan seri dirence ve yarıiletkenin bant aralığındaki enerji seviyeleri arasındaki tünelleme mekanizmasına atfedilebilir (Yılmaz and Aydoğan 2015; Deniz *et al.* 2016). Bu çalışmada, aygıtlar için elde edilen idealite faktörünün değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. La katkı miktarı %4'e (%at.) kadar artmakla idealite faktörü azalma eğilimi göstermiş ve diyotlar idealliğe yaklaşmışlar. Daha sonra %5 (%at.) La katkı miktarında idealite faktörünün değer artmıştır. İdealite faktörünün değişimleri, homojen olmayan engel yüksekliğinden ve metal-yarıiletken arasındaki ara yüzeyde oluşan potansiyel dalgalanmasından kaynaklanabilir (Pan *et al.* 2014).

Engel yüksekliğin değerleri denklem 3.28 ile hesaplanmıştır ve Çizelge 4.3'de verilmiştir. La katkı miktarının artması ile idealite faktörü ve engel yüksekliği aynı değişim karakteristiği göstermişlerdir (Şekil 4.26). La katkı miktarının artması ile engel yüksekliğin azalması Fermi seviyesinin optik bant aralığının ortasına doğru kaymasıyla açıklanabilir. Bu durum Şekil 4.16'de verilen optik ölçümleri ile de uyumludur. Coğunluk elektronlarının yarıiletkenden metale doğru akması ile engel yüksekliğin

azalması sağlanır. Sn/n-ZnO Schottky diyotları için de benzer sonuçlardan bahsedilmiştir (Wary and Rahman 2010). Ayrıca aygıtların idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi doğrultma parametreleri aynı koşullar altında elde edilmiş olsa bile bir aygıttan diğerine farklılık gösterebilir. Kontak oluşturma sırasında oluşan arayüzey kusurları bu durumun muhtemel nedeni olarak gösterilebilir. Şekil 4.19-4.24'den görüldüğü gibi farklı miktarlarda La katkılı Au/ZnO:La/n-Si/Al aygıtının sahip olduğu doğrultma özelliği; voltaja ve +0.5V'dan sonra gözlemlemeye başlayan seri direnç etkisine bağlıdır. Yani, lineer olmayan davranış seri direncin daha yüksek değerleri ile açıklanabilir. Ayrıca bu çalışmada, Norde fonksiyonundan engel yüksekliği ve seri direnç gibi eklem parametreleri hesaplanmıştır ve Çizelge 4.3'de verilmiştir. Norde fonksiyonunun ayrıntıları aşağıdaki denklem ile gösterilebilir.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (5.11)$$

burada,  $\gamma$  idealite faktöründen daha büyük keyfi bir tamsayıdır.  $I(V)$ ,  $I-V$  verilerinden elde edilen doğru besleme akımıdır. Norde fonksiyonundan Schottky eklem parametrelerini hesaplamak için  $F$ 'ye karşı  $V$  grafiği çizilir ve engel yüksekliği aşağıdaki denklemle hesaplanabilir;

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (5.12)$$

burada  $F(V_0)$ ,  $F(V)-V$  grafiğinde  $F(V)$ 'nin minimum noktasıdır ve  $V_0$ ,  $F(V_0)$  ile ilgili minimum voltajdır. Bu bilgilerden  $F(V)-V$  grafiği çizilmiş ve Şekil 4.25'de gösterilmiştir. Denklem 3.28'den ve denklem 5.12'den hesaplanan engel yükseklik değerleri karşılaştırıldığında hesaplanan değerlerin küçük farklılıklarla birbirilerine çok yakın oldukları gözlemlendi (Şekil 4.26).  $I-V$  grafiğinden ve Norde fonksiyonundan hesaplanan engel yükseklik değerlerindeki tutarsızlıkların nedeni ideal olmayan  $I-V$  karakteristiklerine ve ZnO:La/n-Si eklemine homojensizliğine atfedilebilir. Özet olarak aygıt parametrelerin belirlenmesi için kullanılan Norde fonksiyonu ideallığe yakın olan diyotlar için daha etkilidir. Yapılan çalışmada, idealite faktörünün ideallikten

uzaklaşmasının sonucu olarak Norde fonksiyonundan ve termiyonik emisyon (TE) teorisinden hesaplanan eklem parametrelerinin birbirinden farklı olduğu söylenebilir. Varma *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada da benzer olaylar gözlemlenmiş ve bu çalışmadakine benzer tartışmalar yapılmıştır. Norde fonksiyonundan ve  $I$ - $V$  grafiğinden hesaplanan engel yükseklik değerleri arasındaki farklılıklar ayrıca metal-yarıiletken arasındaki arayüzey hallerin ve seri direncin varlığını da destekler. Norde fonksiyonunu ile seri direnç ( $R_s$ ) değerleri aşağıda verilen denklem ile hesaplanmış (Rajan *et al.* 2016) ve Çizelge 4.3’de verilmiştir.

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI} \quad (5.13)$$

Genel olarak La katkı miktarının artması seri direnç değeri dalgalanmalar ile beraber azalma eğilimi göstermiştir (Şekil 4.27). La katkı miktarının artmasıyla azalan seri direnç değerleri tanecik sınırlarına bağlı olarak izah edilebilir. Çizelge 4.2’de gösterilen sonuçlara göre, La katkı miktarının artmasıyla beraber ortalama tanecik boyutunun artma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Dolayısıyla, kristal boyutunun artması tanecik sınırlarının azalması anlamına gelir ve böylece daha az taşıma direnci oluşur. Bu durum bir akım sınırlayıcı olarak da Şekil 4.24’de gösterilmiştir. Yılmaz *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada, Ag/TiO<sub>2</sub> nanotüp aygıtlarda oluşabilecek büyük seri direnç değerleri tanecik sınırları dikkate alınarak açıklanmıştır.

$C$ - $V$  (Kapasite-gerilim) ölçümleri ile de engel yüksekliği gibi diyot parametreleri hesaplanabilir. Çeşitli miktarlarda La katkılı ZnO diyotlarının (Au/ZnO:La%0/ $n$ -Si/Al, Au/ZnO:La%1/ $n$ -Si/Al, Au/ZnO:La%2/ $n$ -Si/Al, Au/ZnO:La%4/ $n$ -Si/Al ve Au/ZnO:La%5/ $n$ -Si/Al) kapasite-gerilim ( $C$ - $V$ ) ölçümleri çeşitli frekans değerlerinde (100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz) gerçekleştirilmiştir.  $C$ - $V$  ölçümlerinin alınması esasında DC gerilimde olan bir aygıtın üzerine AC sinyali bindirilmesi temeline dayanır. Bu çalışmada, bu amaç doğrultusunda 10 mV AC sinyali kullanılmıştır. Düşük frekanslarda gerilimin artması ile kapasite artarken büyük frekanslarda kapasite azalır. Derin seviyelerde bulunan yükler sadece AC voltajının daha düşük frekanslara doğru değişimini izleyebilirler. Yani, ara yüzey halleri düşük

frekanta kolayca AC sinyali izleyebilirler, ancak daha büyük frekansta ara yüzey hallerde bulunan yük rahatlıkla AC sinyali izleyemez. Bu nedenle frekansın artmasıyla aygıtın kapasitesi düşer. Doğru besleme de kapasite değerini sınırlayan piklerin varlığı görülmektedir ve bu piklerin varlığı seri dirence ve ara yüzey hallerine ithaf edilebilir (Şahin *et al.* 2005). Schottky diyotlarında bulunan deplasyon bölgesinin kapasitesi ve engel yüksekliği sırasıyla 3.30 ve 3.36 numaralı denklem vasıtası ile elde edilmiştir. Tüm aygıtların 500 kHz frekanslı  $C-V$  ölçümlerinden  $C^2-V$  grafiği çizilmiştir ve Şekil 4.33'de verilmiştir.  $C$ 'nin değeri gerilim ile doğrudan ilişki içerisindedir.  $C^2-V$  grafiğinden elde edilen engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ), fermi enerji seviyeleri ( $E_f$ ), taşıyıcı yoğunluğu ( $N_d$ ) ve difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ) gibi diyot parametreleri Çizelge 4.4'de verilmiştir. La katkı miktarının artması ile birlikte iyonize olmuş katkı yoğunlukları artma eğilimi göstermiştir. Bu durum, bu tür aygıtlar için beklenen bir sonuçtur. Ayrıca bu durum La katkı miktarının artmasıyla optik bant aralığı enerji değerinin azalmasının başka bir nedeni olarak da görülebilir. Srivastava and Kumar (2013) tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.  $C^2-V$  grafiğinden bulunan engel yüksekliği değerleri  $I-V$  ölçümünden bulunan değerlerle kıyasla benzer bir davranış sergilemişlerdir.  $C^2-V$  grafiğinden elde edilen engel yükseklik değerlerinin  $I-V$  ölçümünden hesaplanan değerlerden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum  $I-V$  ölçümünden elde edilen engel yüksekliklerin imaj düşme kuvvetinden etkilenmediğine atfedilebilir. Çinko oksitin geniş bant aralığına ( $\sim 3.2\text{eV}$ ) sahip olmasından ve epitaksiyal tabakanın düşük miktarda katkılı ( $<10^{17}\text{cm}^{-3}$ ) olmasından dolayı imaj kuvvetinin etkisi ve deplasyon bölgesinde rekombinasyonun engel yüksekliğine önemli bir katkısının olduğu söylenemez. Benzer açıklamalar homojen olmayan engel yüksekliği hakkında yük taşıma mekanizmasını açıklamak için diğer çalışmalarda da yapılmıştır (Skromme *et al.* 2000; Shivaraman *et al.* 2012).

**KAYNAKLAR**

- Agashe, C., Takwale, M. G., Marathe, B. R., Bhide, V. G., 1988. Structural properties of SnO<sub>2</sub>: F films deposited by spray pyrolysis. *Solar Energy Materials*, 17 (2), 99-117.
- Agura, H., Suzuki, A., Matsushita, T., Aoki, T., Okuda, M., 2003. Low resistivity transparent conducting Al-doped ZnO films prepared by pulsed laser deposition. *Thin solid films*, 445 (2), 263-267.
- Alaie, Z., Nejad, S. M., Yousefi, M. H., 2015. Recent advances in ultraviolet photodetectors. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 29, 16-55.
- Altamiranojuarez, D., 2004. Low-resistivity ZnO:F:Al transparent thin films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82 (1-2), 35-43.
- Aslan, M., 2004. Preparation of c-axis-oriented zinc-oxide thin films and the study of their microstructure and optical properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82 (4), 543-552.
- Aydoğan, Ő., 2003. Polimer/İnorganik Yarıiletken Kontakların Karakteristik Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı *I-V* (Akım-Voltaj), *C-V* (Kapasitesi-Voltaj) VE *C-f* (Kapasite-Frekans) Ölçümlerinden Tayin Edilmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aydoğan, Ő., 2015. Katihal Elektronikđi. Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Őti., 236 p, Ankara.
- Aydoğan, Ő., Grilli, M. L., Yılmaz, M., Çaldıran, Z., Kaçuş, H., 2017. A facile growth of spray based ZnO films and device performance investigation for Schottky diodes: Determination of interface state density distribution. *Journal of Alloys and Compounds*, 708, 55-66.
- Aydoğan, Ő., Yılmaz, M., Çaldıran, Z., 2016. Improving the rectifying properties of metal/semiconductor junction using novel material: Zam-zam. *Sensors and Actuators A: Physical*, 248, 22-28.
- Bacaksız, E., Aksu, S., Yılmaz, S., Parlak, M., Altunbaş, M., 2010. Structural, optical and electrical properties of Al-doped ZnO microrods prepared by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 518 (15), 4076-4080.
- Bahadur, L. and Rao, T. N., 1992. Photoelectrochemical studies of cobalt doped ZnO sprayed thin film semiconductor electrodes in acetonitrile medium. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 27 (4), 347-360.
- Bai, S. N. and Tseng, T. Y., 2008. Electrical and optical properties of ZnO:Al thin films grown by magnetron sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 20 (3), 253-256.
- Bedia, A., Bedia, F. Z., Aillerie, M., Maloufi, N., Benyoucef, B., 2015. Morphological and Optical Properties of ZnO Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis on Glass Substrates at Various Temperatures for Integration in Solar Cell. *Energy Procedia*, 74, 529-538.
- Belghazi, Y., Aouaj, M. A., El Yadari, M., Schmerber, G., Ulhaq-Bouillet, C., Leuvre, C., Colis, S., Abd-lefdil, M., Berrada, A., Dinia, A., 2009. Elaboration and characterization of Co-doped ZnO thin films deposited by spray pyrolysis technique. *Microelectronics Journal*, 40 (2), 265-267.

- Benramache, S., Benhaoua, B., Bentrach, H., 2013. Preparation of transparent, conductive ZnO: Co and ZnO: In thin films by ultrasonic spray method. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 3 (1), 54.
- Bhargava, R. N., 1997. The role of impurity in doped nanocrystals. *Journal of Luminescence*, 72-74, 46-48.
- Binnig, G., Quate, C. F., Gerber, C., 1986. Atomic force microscope. *Phys Rev Lett*, 56 (9), 930-933.
- Bouznit, Y., Beggah, Y., Ynineb, F., 2012. Sprayed lanthanum doped zinc oxide thin films. *Applied Surface Science*, 258 (7), 2967-2971.
- Buxbaum, G., Pfaff, G., 1998. *Industrial Inorganic Pigments*, 3<sup>rd</sup> ed., WILEY-VCH, 315 p, Germany.
- Cao, Y., Pan, W., Zong, Y., Jia, D., 2009. Preparation and gas-sensing properties of pure and Nd-doped ZnO nanorods by low-heating solid-state chemical reaction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 138 (2), 480-484.
- Cetin, H. and Ayyildiz, E., 2010. On barrier height inhomogeneities of Au and Cu/n-InP Schottky contacts. *Physica B: Condensed Matter*, 405 (2), 559-563.
- Chaabouni, F., Abaab, M., Rezig, B., 2004. Effect of the substrate temperature on the properties of ZnO films grown by RF magnetron sputtering. *Materials Science and Engineering: B*, 109 (1-3), 236-240.
- Chakraborty, S. and Kumbhakar, P., 2013. Observation of bandgap narrowing effect and photoluminescence emission characteristics of chemically synthesized Co doped ZnO nanosheets. *Indian Journal of Physics*, 88 (3), 251-257.
- Chen, J. T., Wang, J., Zhang, F., Zhang, G. A., Wu, Z. G., Yan, P. X., 2008. The effect of La doping concentration on the properties of zinc oxide films prepared by the sol-gel method. *Journal of Crystal Growth*, 310 (10), 2627-2632.
- Cho, D. H., Kim, J. H., Moon, B. M., Jo, Y. D., Koo, S. M., (2009). Control of a- and c-plane preferential orientations of ZnO thin films. *Applied Surface Science*, 255 (6), 3480-3484.
- Choo, S., Choi, H. J., Lee, H., 2015. Water-collecting behavior of nanostructured surfaces with special wettability. *Applied Surface Science*, 324, 563-568.
- Cullity, B. D., 1978. *Elements of X-Ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing, 531 p, Massachusetts, USA.
- Deniz, A. R., Caldiran, Z., Metin, O., Meral, K., Aydogan, S., 2016. The investigation of the electrical properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/n-Si heterojunctions in a wide temperature range. *J Colloid Interface Sci*, 473, 172-181.
- Denton, A. R. and Ashcroft, N. W., 1991. Vegard's law. *Physical review A*, 43(6), 3161.
- Fang, Z. B., Tan, Y. S., Gong, H. X., Zhen, C. M., He, Z. W., Wang, Y. Y., 2005. Transparent conductive Tb-doped ZnO films prepared by rf reactive magnetron sputtering. *Materials Letters*, 59 (21), 2611-2614.
- Ge, C., Xie, C., Cai, S., 2007. Preparation and gas-sensing properties of Ce-doped ZnO thin-film sensors by dip-coating. *Materials Science and Engineering: B*, 137 (1), 53-58.
- Goel, S., Sinha, N., Yadav, H., Joseph, A. J., Kumar, B., 2017. Experimental investigation on the structural, dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of La doped ZnO nanoparticles and their application in dye-sensitized solar cells. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 91, 72-81.

- Gomez, H., Maldonado, A., Olvera, M. d. l. L., Acosta, D. R., 2005. Gallium-doped ZnO thin films deposited by chemical spray. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87 (1-4), 107-116.
- González-Hernández, J., Gorley, P.M., Horley, P.P., Vartsabyuk, O.M., Vorobiev, Yu.V., 2002. X-Ray, kinetic and optical properties of thin CuInS<sub>2</sub> films. *Thin Solid Films*, 403, 471-475.
- Gurumurugan, K., Mangalaraj, D., Narayandass, S. K., 1995. Structural characterization of cadmium oxide thin films deposited by spray pyrolysis. *Journal of crystal growth*, 147 (3-4), 355-360.
- Hafdallah, A., Yanineb, F., Aida, M. S., Attaf, N., 2011. In doped ZnO thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (26), 7267-7270.
- Hammond, C., 2001. *The Basics of Crystallography and Diffraction*, Oxford University Press, 213 p, New York, USA.
- Han, B. M., Chang, S., Kim, S. Y., 1999. Chopping effect on the crystallinity of ZnO films prepared by a rf planar magnetron sputtering method. *Thin Solid Films*, 338 (1), 265-268.
- He, H. Y., Huang, J. F., Fei, J., Lu, J., 2014. La-doping content effect on the optical and electrical properties of La-doped ZnO thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26 (2), 1205-1211.
- Hoffman, R. L., 2004. ZnO-channel thin-film transistors: Channel mobility. *Journal of Applied Physics*, 95 (10), 5813-5819.
- Hou, Q., Meng, F., Sun, J., 2013. Electrical and optical properties of Al-doped ZnO and ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> films prepared by atomic layer deposition. *Nanoscale research letters*, 8 (1), 144.
- Hwang, J. D., Wu, D. H., Hwang, S. B., 2015. Inserting an i-ZnO layer to increase the performance of p-Si/n-ZnO heterojunction photodetectors. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 39, 132-135.
- Ito, Y., Sakai, O., Tachibana, K., 2010. Study of plasma enhanced chemical vapor deposition of ZnO films by non-thermal plasma jet at atmospheric pressure. *Thin Solid Films*, 518 (13), 3513-3516.
- Iwan, S., Zhao, J. L., Tan, S. T., Bambang, S., Hikam, M., Fan, H. M., Sun, X. W., 2015. Ion-dependent electroluminescence from trivalent rare-earth doped n-ZnO/p-Si heterostructured light-emitting diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 30, 263-266.
- Jia, T., Wang, W., Long, F., Fu, Z., Wang, H., Zhang, Q., 2009. Fabrication, characterization and photocatalytic activity of La-doped ZnO nanowires. *Journal of Alloys and Compounds*, 484 (1-2), 410-415.
- Joseph, B., Gopchandran, K. G., Thomas, P. V., Koshy, P., Vaidyan, V. K., 1999. A study on the chemical spray deposition of zinc oxide thin films and their structural and electrical properties. *Materials Chemistry and Physics*, 58 (1), 71-77.
- Jun, L., Ru-Zhi, W., Wei, L., Xing-Wang, Z., Zhi-Qiang, D., Bo, W., Hui, Y., 2008. Enhancement of field emission properties in La-doped ZnO films prepared by magnetron sputtering. *Chinese Physics Letters*, 25 (7), 2657.
- Kharroubi, B., Baghdad, R., Abdiche, A., Bousmaha, M., Bousquet, M., Zeinert, A., El Marssi, M., Zellama, K., Hamzaoui, S., 2012. Mn doping effect on the structural

- properties of ZnO-nanostructured films deposited by the ultrasonic spray pyrolysis method. *Physica Scripta*, 86 (1), 015805.
- Khranovskyy, V., Ekblad, T., Yakimova, R., Hultman, L., 2012. Surface morphology effects on the light-controlled wettability of ZnO nanostructures. *Applied Surface Science*, 258 (20), 8146-8152.
- Kim, D., Yun, I., Kim, H., 2010. Fabrication of rough Al doped ZnO films deposited by low pressure chemical vapor deposition for high efficiency thin film solar cells. *Current Applied Physics*, 10 (3), S459-S462.
- Kim, K. J. and Park, Y. R., 2001. Large and abrupt optical band gap variation in In-doped ZnO. *Applied Physics Letters*, 78 (4), 475-477.
- Kim, Y. S. and Tai, W. P., 2007. Electrical and optical properties of Al-doped ZnO thin films by sol-gel process. *Applied Surface Science*, 253 (11), 4911-4916.
- Korake, P. V., Dhabbe, R. S., Kadam, A. N., Gaikwad, Y. B., Garadkar, K. M., 2014. Highly active lanthanum doped ZnO nanorods for photodegradation of metasytox. *J Photochem Photobiol B*, 130, 11-19.
- Kulandaisamy, A. J., Karthek, C., Shankar, P., Mani, G. K., Rayappan, J. B. B., 2016. Tuning selectivity through cobalt doping in spray pyrolysis deposited ZnO thin films. *Ceramics International*, 42 (1), 1408-1415.
- Kulyk, B., Sahraoui, B., Figà, V., Turko, B., Rudyk, V., Kapustianyk, V., 2009. Influence of Ag, Cu dopants on the second and third harmonic response of ZnO films. *Journal of Alloys and Compounds*, 481 (1-2), 819-825.
- Kumari, R., Sahai, A., Goswami, N., 2015. Effect of nitrogen doping on structural and optical properties of ZnO nanoparticles. *Progress in Natural Science: Materials International*, 25 (4), 300-309.
- Kuo, S. Y., Chen, W. C., Cheng, C. P., 2006a. Investigation of annealing-treatment on the optical and electrical properties of sol-gel-derived zinc oxide thin films. *Superlattices and Microstructures*, 39 (1-4), 162-170.
- Kuo, S. Y., Chen, W. C., Lai, F. I., Cheng, C. P., Kuo, H. C., Wang, S. C., and Hsieh, W. F., 2006b. Effects of doping concentration and annealing temperature on properties of highly-oriented Al-doped ZnO films. *Journal of Crystal Growth*, 287 (1), 78-84.
- Lan, W., Liu, Y., Zhang, M., Wang, B., Yan, H., Wang, Y., 2007. Structural and optical properties of La-doped ZnO films prepared by magnetron sputtering. *Materials Letters*, 61 (11), 2262-2265.
- Lang, J., Zhang, Q., Han, Q., Fang, Y., Wang, J., Li, X., Liu, Y., Wang, D., Yang, J., 2017. The study of structural and optical properties of (Eu, La, Sm) codoped ZnO nanoparticles via a chemical route. *Materials Chemistry and Physics*, 194, 29-36.
- Lee, J. H. and Park, B. O., 2004. Characteristics of Al-doped ZnO thin films obtained by ultrasonic spray pyrolysis: effects of Al doping and an annealing treatment. *Materials Science and Engineering: B*, 106 (3), 242-245.
- Lee, J. H., and Park, B. O., 2003. Transparent conducting ZnO:Al, In and Sn thin films deposited by the sol-gel method. *Thin Solid Films*, 426 (1-2), 94-99.
- Lee, W., Dwivedi, R. P., Hong, C., Kim, H. W., Cho, N., Lee, C., 2007. Enhancement of the electrical properties of Al-doped ZnO films deposited on ZnO-buffered glass substrates by using an ultrathin aluminum underlayer. *Journal of Materials Science*, 43 (3), 1159-1161.



- Maity, R., Kundoo, S., Chattopadhyay, K. K., 2005. Electrical characterization and Poole–Frenkel effect in sol–gel derived ZnO:Al thin films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 86 (2), 217-227.
- Marouf, S., Beniaiche, A., Guessas, H., Azizi, A., 2017. Morphological, Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Dip Coating Method. *Materials Research*, 20 (1), 88-95.
- Matsuoka, M. and Ono, K. I., 1989. Crystal structures and optical properties of ZnO films prepared by sputtering-type electron cyclotron resonance microwave plasma. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 7 (5), 2975-2982.
- Mkawi, E. M., Ibrahim, K., Ali, M. K. M., Farrukh, M. A., Mohamed, A. S., 2015. The effect of dopant concentration on properties of transparent conducting Al-doped ZnO thin films for efficient Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin-film solar cells prepared by electrodeposition method. *Applied Nanoscience*, 5 (8), 993-1001.
- Musat, V., Teixeira, B., Fortunato, E., Monteiro, R. C. C., 2006. Effect of post-heat treatment on the electrical and optical properties of ZnO:Al thin films. *Thin Solid Films*, 502 (1-2), 219-222.
- Musat, V., Teixeira, B., Fortunato, E., Monteiro, R. C. C., Vilarinho, P., 2004. Al-doped ZnO thin films by sol–gel method. *Surface and Coatings Technology*, 180, 659-662.
- Neamen, D. A., 2003. *Semiconductor Physics and Devices Basic principles*, McGraw-Hill, 746 p, Boston.
- Nomura, K., Ohta, H., Ueda, K., Kamiya, T., Hirano, M., Hosono, H., 2003. Thin-film transistor fabricated in single-crystalline transparent oxide semiconductor. *Science*, 300 (5623), 1269-1272.
- Offiah, S. U., Agbo, S. N., Sutta, P., Maaza, M., Ugwuoke, P. E., Osuji, R. U., Ezema, F. I., 2017. Study of the extrinsic properties of ZnO: Al grown by SILAR technique. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 1-8.
- Okuya, M., Nakade, K., Kaneko, S., 2002. Porous TiO<sub>2</sub> thin films synthesized by a spray pyrolysis deposition (SPD) technique and their application to dye-sensitized solar cells. *Solar energy materials and solar cells*, 70 (4), 425-435.
- Ortega-López, M., Morales-Acevedo, A., 1998. Characterization of CuInS<sub>2</sub> thin films for solar cells prepared by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 330 (2), 96-101.
- Pan, L. L., Meng, K. K., Li, G. Y., Sun, H. M., Lian, J. S., 2014. Structural, optical and electrical characterization of gadolinium and indium doped cadmium oxide/p-silicon heterojunctions for solar cell applications. *RSC Advances*, 4 (94), 52451-52460.
- Perednis, D., and Gauckler, L. J., 2005. Thin film deposition using spray pyrolysis. *Journal of Electroceramics*, 14 (2), 103-111.
- Pike, R. D., Cui, H., Kershaw, R., Dwight, K., Wold, A., Blanton, T. N., Gysling, H. J., 1993. Preparation of zinc sulfide thin films by ultrasonic spray pyrolysis from bis (diethyldithiocarbamate) zinc (II). *Thin Solid Films*, 224 (2), 221-226.
- Prasada Rao, T., and Santhosh Kumar, M. C., 2010. Physical properties of Ga-doped ZnO thin films by spray pyrolysis. *Journal of Alloys and Compounds*, 506 (2), 788-793.
- Rajan, L., Periasamy, C., Sahula, V., 2016. Electrical characterization of Au/ZnO thin film Schottky diode on silicon substrate. *Perspectives in Science*, 8, 66-68.

- Rhoderick, E. H., and Williams, R. H. 1988. Metal-semiconductor contacts. Clarendon Press, 252 p, Oxford.
- Rim, Y. S., Kim, S. M., Choi, H. W., Park, S. J., Kim, K. H., 2008. Preparation of Al-doped ZnO thin film deposited at room temperature. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 313, 461-464.
- Romero, R., Leinen, D., Dalchiele, E. A., Ramos-Barrado, J. R., Martin, F., 2006. The effects of zinc acetate and zinc chloride precursors on the preferred crystalline orientation of ZnO and Al-doped ZnO thin films obtained by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 515 (4), 1942-1949.
- Rouchdi, M., Salmani, E., Fares, B., Hassanain, N., and Mzerd, A., 2017. Synthesis and characteristics of Mg doped ZnO thin films: Experimental and ab-initio study. *Results in Physics*, 7, 620-627.
- Sagar, P., Kumar, M., Mehra, R. M., 2005. Influence of hydrogen incorporation in sol-gel derived aluminum doped ZnO thin films. *Thin Solid Films*, 489 (1-2), 94-98.
- Şahin, B., Çetin, H., Ayyildiz, E., 2005. The effect of series resistance on capacitance–voltage characteristics of Schottky barrier diodes. *Solid state communications*, 135 (8), 490-495.
- Saint, J. L., and Saint, C., 2005. Integrated circuit (IC), <https://www.britannica.com/technology/integrated-circuit> (29.09.2017).
- Sajeesh, T. H., Warriar, A. R., Kartha, C. S., Vijayakumar, K. P., 2010. Optimization of parameters of chemical spray pyrolysis technique to get n and p-type layers of SnS. *Thin Solid Films*, 518 (15), 4370-4374.
- Salaken, S. M., Farzana, E., and Podder, J., 2013. Effect of Fe-doping on the structural and optical properties of ZnO thin films prepared by spray pyrolysis. *Journal of Semiconductors*, 34 (7), 073003.
- Schmidt-Mende, L., and MacManus-Driscoll, J. L., 2007. ZnO – nanostructures, defects, and devices. *Materials Today*, 10 (5), 40-48.
- Schroder, D., K., 2006. Semiconductor material and device characterization. Wiley-IEEE Press, 800 p, Tempe, AZ.
- Shaban, M., and El Sayed, A. M., 2016. Effects of lanthanum and sodium on the structural, optical and hydrophilic properties of sol–gel derived ZnO films: A comparative study. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 41, 323-334.
- Shen, W., Zhao, Y., Zhang, C., 2005. The preparation of ZnO based gas-sensing thin films by ink-jet printing method. *Thin Solid Films*, 483 (1-2), 382-387.
- Shivaraman, S., Herman, L. H., Rana, F., Park, J., Spencer, M. G., 2012. Schottky barrier inhomogeneities at the interface of few layer epitaxial graphene and silicon carbide. *Applied Physics Letters*, 100 (18), 183112.
- Simon, M. S., Kwok, K. N., 1969. *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, 832 p, New Jersey.
- Singh, P., Kaushal, A., Kaur, D., 2009. Mn-doped ZnO nanocrystalline thin films prepared by ultrasonic spray pyrolysis. *Journal of Alloys and Compounds*, 471 (1-2), 11-15.
- Skromme, B. J., Luckowski, E., Moore, K., Bhatnagar, M., Weitzel, C. E., Gehoski, T., Ganser, D., 2000. Electrical characteristics of Schottky barriers on 4H-SiC: The effects of barrier height nonuniformity. *Journal of Electronic Materials*, 29 (3), 376-383.

- Song, D., Aberle, A. G., Xia, J., 2002. Optimisation of ZnO:Al films by change of sputter gas pressure for solar cell application. *Applied Surface Science*, 195 (1-4), 291–296.
- Sönmezoğlu, S., and Akman, E., 2014. Improvement of physical properties of ZnO thin films by tellurium doping. *Applied Surface Science*, 318, 319-323.
- Soumahoro, I., Moubah, R., Schmerber, G., Colis, S., Aouaj, M. A., Abd-lefdil, M., Hassanain, N., Berrada, A., Dinia, A., 2010. Structural, optical, and magnetic properties of Fe-doped ZnO films prepared by spray pyrolysis method. *Thin Solid Films*, 518 (16), 4593-4596.
- Srivastava, A. K., Kumar, J., 2013. Effect of zinc addition and vacuum annealing time on the properties of spin-coated low-cost transparent conducting 1 at% Ga–ZnO thin films. *Science and technology of advanced materials*, 14 (6), 065002.
- Tahar, R. B. H., 2005. Structural and electrical properties of aluminum-doped zinc oxide films prepared by sol–gel process. *Journal of the European Ceramic Society*, 25 (14), 3301-3306.
- Tang, M. H., Zeng, Z. Q., Li, J. C., Wang, Z. P., Xu, X. L., Wang, G. Y., Zhang, L. B., Yang, S. B., Xiao, Y. G., Jiang, B., 2011. Resistive switching behavior of La-doped ZnO films for nonvolatile memory applications. *Solid-State Electronics*, 63 (1), 100-104.
- Tsay, C. Y., Fan, K. S., Chen, S. H., Tsai, C. H., 2010. Preparation and characterization of ZnO transparent semiconductor thin films by sol–gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 495 (1), 126-130.
- Tuan, T. T. A., Kuo, D. H., Li, C. C., Li, G. Z., 2015. Effect of Temperature Dependence on Electrical Characterization of pn GaN Diode Fabricated by RF Magnetron Sputtering. *Materials Sciences and Applications*, 6 (09), 809.
- Udom, I., Ram, M. K., Stefanakos, E. K., Hepp, A. F., Goswami, D. Y., 2013. One dimensional-ZnO nanostructures: Synthesis, properties and environmental applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16 (6), 2070-2083.
- Ungula, J., Dejene, B. F., Swart, H. C., 2017. Effect of annealing on the structural, morphological and optical properties of Ga-doped ZnO nanoparticles by reflux precipitation method. *Results in Physics*, 7, 2022-2027.
- Valle, G. G., Hammer, P., Pulcinelli, S. H., Santilli, C. V., 2004. Transparent and conductive ZnO:Al thin films prepared by sol-gel dip-coating. *Journal of the European Ceramic Society*, 24 (6), 1009-1013.
- Varma, T., Periasamy, C., Boolchandani, D., 2017. Performance analyses of Schottky diodes with Au/Pd contacts on n-ZnO thin films as UV detectors. *Superlattices and Microstructures*, 112, 151-163.
- Wary, G., Rahman, A., 2010. Thermal and Doping Effect on Sn/(n) ZnO Schottky Junction and Its Performance as a PV Effect. *International Journal of Thermophysics*, 31 (10), 2040-2049.
- Wei, L., Liu, Y., Ming, Z., Bo, W., Hui, Y., Wang, Y., 2007. Structural and optical properties of La-doped ZnO films prepared by magnetron sputtering. *Materials Letters*, 61 (11-12), 2262-2265.
- Wienke, J., and Booij, A. S., 2008. ZnO:In deposition by spray pyrolysis Influence of the growth conditions on the electrical and optical properties. *Thin Solid Films*, 516 (14), 4508-4512.
- Wyckoff, R. W. G., 1982. *Crystal Structures*, Krieger, 318 p, Malabar, FL.

- Xu, J. H., Cui, S., Liu, C., 2015. Fabrication and optical properties of La-doped ZnO thin films. *Proceedings of the 2015 2nd Int. Work. Mater. Eng. Comput. Sci.*, Atlantis Press, Paris, France, 259-262.
- Xu, Z. Q., Deng, H., Li, Y., Guo, Q. H., Li, Y. R., 2006. Characteristics of Al-doped c-axis orientation ZnO thin films prepared by the sol-gel method. *Materials Research Bulletin*, 41 (2), 354-358.
- Yang, W., Liu, Z., Peng, D. L., Zhang, F., Huang, H., Xie, Y., Wu, Z., 2009. Room-temperature deposition of transparent conducting Al-doped ZnO films by RF magnetron sputtering method. *Applied Surface Science*, 255 (11), 5669-5673.
- Yilmaz, M., 2014. Characteristic properties of spin coated ZnO thin films: the effect of Ni doping. *Physica Scripta*, 89 (9), 095802.
- Yilmaz, M., and Aydoğan, Ş., 2015. The Effect of Mn Incorporation on the Structural, Morphological, Optical, and Electrical Features of Nanocrystalline ZnO Thin Films Prepared by Chemical Spray Pyrolysis Technique. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46 (6), 2726-2735.
- Yilmaz, M., and Grilli, M. L., 2016. The modification of the characteristics of nanocrystalline ZnO thin films by variation of Ta doping content. *Philosophical Magazine*, 96 (20), 2125-2142.
- Yilmaz, M., Cirak, B. B., Aydoğan, S., Grilli, M. L., Biber, M., 2017. Facile electrochemical-assisted synthesis of TiO<sub>2</sub> nanotubes and their role in Schottky barrier diode applications. *Superlattices and Microstructures*.
- Yoshino, K., Oyama, S., Yoneta, M., Taniyama, T., 2008. Structural and magnetic characterization of Mn-doped ZnO films grown by spray pyrolysis method. *Materials Science and Engineering: B*, 148 (1-3), 234-236.
- Zakaron, R., 2016. Explain qualitatively how the conduction properties of semiconductors could be changed by n type and p type doping?. <https://www.quora.com/Explain-qualitatively-how-the-conduction-properties-of-semiconductors-could-be-changed-by-n-type-and-p-type-doping> (29.09.2017).
- Zamiri, R., Lemos, A. F., Reblo, A., Ahangar, H. A., Ferreira, J. M. F., 2014. Effects of rare-earth (Er, La and Yb) doping on morphology and structure properties of ZnO nanostructures prepared by wet chemical method. *Ceramics International*, 40 (1), 523-529.
- Zhu, G., Lv, T., Pan, L., Sun, Z., Sun, C., 2011. All spray pyrolysis deposited CdS sensitized ZnO films for quantum dot-sensitized solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (2), 362-365.
- Ziel, A., 1968. *Solid-state physical electronics*. Prentice-Hall, 650 p, New Jersey.

## ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında İran'ın Oroumieh şehrinde doğdu. 2008 yılında Oroumieh Devlet Üniversitesi Kimya bölümünü kazanarak 2012 yılında aynı bölümden mezun oldu. 2015 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanomalzeme Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans programına yerleşti.

