

**ELEKTRO KİMYASAL BÜYÜTME YÖNTEMİ İLE  
ELDE EDİLEN ZnO İNCE FİLMLERİN  
ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ  
ÜZERİNDE YÜKSEK ENERJİLİ ELEKTRON  
BOMBARDİMANININ ETKİSİ**

**Pınar KÖÇ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Prof Dr. Sebahattin TÜZEMEN**

**2010**

**Her hakkı saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRO KİMYASAL BÜYÜTME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN  
ZnO İNCE FİLMLERİN ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL  
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE YÜKSEK ENERJİLİ ELEKTRON  
BOMBARDİMANININ ETKİSİ**

Pınar KÖÇ

FİZİK ANABİLİM DALI

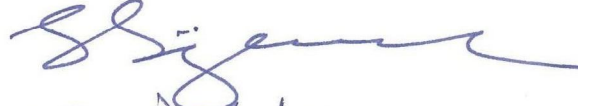
ERZURUM

2010

Her hakkı saklıdır

Prof. Dr. Sebahattin TÜZEMEN danışmanlığında, Pınar KÖÇ tarafından hazırlanan bu çalışma 06.08.2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Sebahattin TÜZEMEN



Üye : Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT



Üye : Yrd. Doc.Dr. Tevhit KARACALI



Yukarıdaki sonucu onaylarım

(İmza)

Prof. Dr. Ömer AKBULUT

Enstitü Müdürü

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### ELEKTROKİMYASAL BÜYÜTME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN ZnO İNCE FİMLERİN ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE YÜKSEK ENERJİLİ ELEKTRON BOMBARDIMANININ ETKİSİ

Pınar KÖÇ

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Bu çalışmada, ZnO İnce filmlerin bazı elektriksel ve optiksel özellikleri incelenmiştir. Filmler, elektrokimyasal büyüme yöntemi ile (ECD) p-tipi GaAs taban malzeme üzerinde -0,9 V ile -1,2 V aralığında 4 farklı potansiyel değerlerinde elde edilmiştir. X-ışını kırınım desenlerinden, elde edilen filmlerin hekzagonal yapıda tek kristale yakın oldukları gözlemlenmiştir. XRD sonuçlarına bakılarak, tercihli yöneliminin şiddetinin büyüme esnasında uygulanan potansiyel değere bağlı olarak değiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Atomik kuvvet mikroskopu (AFM) yardımı ile yüzey incelemesi yapılmış büyüyen filmin kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü görsel olarak gözlemlenmiştir. Daha sonra aynı numuneler yüksek enerjili elektron bombardımanına maruz bırakılarak tekrar radyasyon sonrası XRD sonuçları alınmıştır. Pik şiddetinin azalmasının yanı sıra, radyasyon sonrası AFM görüntülerinden yüzey pürüzlülüğünün de azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca radyasyon öncesi ve radyasyon sonrası alınan I-V grafiklerinden idealite ve turn on potansiyelinin azaldığı belirlenmiştir.

**2010, 87 sayfa**

**Anahtar kelimeler:** Elektro kimyasal büyüme, ZnO ince film, elektron bombardımanı

## ABSTRACT

Master Thesis

### THE EFFECT OF HIGHT-ENERGY ELECTRON BOMBARDMENT ON OPTICAL PROPERTIES AND ELECTRICAL THIN FILMS ZnO OBTAINED WITH ELECTROCHEMICAL MAGNIFICATION METOD

Pınar KÖÇ

Atatürk University  
Institute of Science and Technology  
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Sebahattin TÜZEMEN

In this study, we have examined some electrical and optical properties of thin films ZnO. Films were obtained in four different potential values in the range of -0.9 V and -1.2 V, with electrochemical amplification method (ECD) on p-type GaAs base materials. Films obtained X-ray diffraction patterns were observed close to single crystal in hexagonal structure. By looking at the results of XRD, violance of prefer orionate was rich result change by depending on potantial value applied during growth. Surface rough of films grewed by having surface examination with atomic power microscop were observed visually. Then same patterns exposed to bombard of high energy electrons with 9 MeV energy value and XRD results were obtained repetition after radiation. Besides of reduce pic violence , after radiation were observed reduce of surface rought from atomic power microscop. Besides, I-V graphics which get before radiation and after radiation have examined to reduce of potential idealite and turn on.

**2010, 87 pages**

**Keywords:** Electrochemical deposition, thin films ZnO, electron bombardment

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde hazırlanmıştır.

Tez konumum belirlenmesinden sonuçların değerlendirilmesine kadar her aşamada bana yol gösteren, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sebahattin TÜZEMEN’e teşekkürlerimi arz ederim. Ayrıca XRD ölçümlerinin alınmasında bize kolaylık gösteren Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Yrd. Dç. Dr. Fatih YETİM’e AFM ölçüleri için Atatürk Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Sayın Yrd.Dç.Dr. Erdal SÖNMEZ’e teşekkür ederim.

Ayrıca, bu günlere gelmemde en büyük pay sahibi olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Pınar KÖÇ

Ağustos 2010

## İÇİNDEKİLER

|                                                                        |      |
|------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                             | i    |
| ABSTRACT .....                                                         | ii   |
| TEŞEKKÜR .....                                                         | iii  |
| SİMGELER DİZİNİ .....                                                  | vi   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                  | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                | x    |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                                  | 1    |
| 1.1. Kristal Yapı ve Kristal Büyütme İşlemleri .....                   | 4    |
| 1.1.2. Yarıiletken ince filmlerin yapısal özellikleri.....             | 8    |
| 1.1.3. Yarıiletkenlerin optik özellikleri .....                        | 9    |
| <b>2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....                                      | 12   |
| 2.1. II-VI Bileşikleri .....                                           | 12   |
| 2.2. ZnO Bileşiği .....                                                | 16   |
| 2.3. Elektrokimya .....                                                | 23   |
| 2.3.1. Faraday yasası ve elektroliz kanunu .....                       | 26   |
| 2.3.2. Elektrokimyasal hücreler .....                                  | 27   |
| 2.3.3. Hücre potansiyeli .....                                         | 29   |
| 2.3.4. Referans elektrotlar.....                                       | 30   |
| 2.3.4.a. Standart hidrojen elektrot .....                              | 30   |
| 2.3.4.b. Standart kalomel elektrot .....                               | 32   |
| 2.3.4.c. Gümüş/gümüş klorür referans elektrot.....                     | 32   |
| 2.3.5. Bir Elektrokimyasal hücredeki değişkenler .....                 | 33   |
| 2.3.6. ZnO'nun elektrokimyasal büyütme tekniği ile elde edilmesi ..... | 34   |
| 2.4. Yapısal Karakterizasyon .....                                     | 35   |
| 2.4.1. Laue yasası.....                                                | 35   |
| 2.5. P-N Eklemler.....                                                 | 41   |
| 2.6. Atomik Kuvvet Mikroskobu .....                                    | 50   |
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....                                     | 55   |
| 3.1. Çözelti Hazırlama .....                                           | 55   |

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2. Büyütme İşleminde Kullanılan Malzemelerin Temizliği .....            | 56        |
| 3.3. Büyütme Parametreleri .....                                          | 57        |
| 3.3.1 Potansiyel .....                                                    | 57        |
| 3.3.2. Sıcaklık .....                                                     | 57        |
| 3.3.3. Zaman .....                                                        | 58        |
| 3.3.4. pH .....                                                           | 58        |
| 3.3.5. Çözelti konsantrasyonu.....                                        | 58        |
| 3.3.6. Karşıt elektrot.....                                               | 58        |
| 3.3.7. Deney düzeneği .....                                               | 59        |
| 3.4. Yüksek Enerjili Elektron Bombardımanı .....                          | 60        |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULAR .....</b>                                        | <b>62</b> |
| 4.1. X-Işını Kırınımı ile Kristalografik Yapının Belirlenmesi (XRD) ..... | 62        |
| 4.2. AFM (Atomik kuvvet mikroskobu) .....                                 | 71        |
| 4.3. Akım-Gerilim Karakteristikleri.....                                  | 78        |
| <b>5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....</b>                                         | <b>83</b> |
| KAYNAKLAR.....                                                            | 85        |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                             | 88        |

## SİMGELER DİZİNİ

|                    |                                      |
|--------------------|--------------------------------------|
| A                  | Elektrot alanı                       |
| $\text{\AA}$       | Angstrom                             |
| $A^*$              | Richardson sabiti,                   |
| $a_s$              | latis parametresi                    |
| $^{\circ}\text{C}$ | Santigrad derece                     |
| c                  | Işık hızı                            |
| cm                 | Santimetre                           |
| d                  | Kristal düzlemleri arasındaki mesafe |
| DI                 | deiyonize su                         |
| DMSO               | dimetilsülfoksit                     |
| E                  | Enerji                               |
| $e^-$              | Elektron                             |
| $E_g$              | Yasak enerji aralığı                 |
| E-k                | Enerji-Dalga vektörü                 |
| $E_i$              | İletkenlik band enerjisi             |
| $E_f$              | Fermi enerjisi                       |
| eV                 | elektron volt                        |
| F                  | faraday sabiti                       |
| f                  | latis uyumsuzluğu                    |
| fcc                | yüzey merkezli kübik yapı            |
| $\mu\text{m}$      | mikro metre                          |
| $h$                | Planck sabiti                        |
| I                  | Akım                                 |
| J                  | Yük taşıyıcılarının sürüklenme akısı |
| K                  | Kelvin                               |
| k                  | Dalga vektörü                        |
| $k_B$              | Boltzmann sabiti                     |

|             |                                                          |
|-------------|----------------------------------------------------------|
| $k_f$       | Son seviyedeki dalga vektörü                             |
| LED         | Işık yayan diyot                                         |
| Lp-Ln       | p-tipi ve n-tipi yarıiletkenin deplasyon bölge genişliği |
| M           | Molarite, Matris elementi                                |
| m           | Kütle-metre                                              |
| $M_A$       | Molekül ağırlığı                                         |
| $N_a$       | Elektronların toplam yoğunluğu                           |
| $N_h$       | Hollerin toplam yoğunluğu                                |
| n           | değerlik elektron sayısı                                 |
| nm          | Nanometre                                                |
| $P_{\cdot}$ | Parçacığın dipol momentı                                 |
| Q- q        | Yük miktarı                                              |
| r           | Örgü noktasına göre atomun konumu                        |
| $r_{\cdot}$ | Elektronun konum vektörü                                 |
| s           | Saniye                                                   |
| T           | Sıcaklık                                                 |
| t           | Zaman                                                    |
| UV          | Ultraviolet (Morötesi)                                   |
| V           | Volt-Hacim- Normalizasyon hacmi                          |
| $V_o$       | Oksijen boşluğu                                          |
| $V_{Zn}$    | Çinko boşluğu                                            |
| $\lambda$   | Dalga boyu                                               |
| $\theta$    | Işığın düzleme geliş açısı                               |
| $\nu$       | Frekans                                                  |
| $\omega$    | Açısal frekans                                           |
| $\Omega$    | Ohm                                                      |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|             |                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1.  | Czochralski tekniği ile elde edilen bulk kristal .....                                                                                                                                                                                                    | 4  |
| Şekil 1.2.  | (a)Fotonun enerjisi, $h\nu$ , yarıiletkenin enerjisinden büyük olmak şartıyla tek bir foton bir elektronu valans bandına uyarmaya yeterlidir. (b) Tersine bir iletkenlik elektronu bir boşlukla birleşerek enerjisi, $h\nu$ , olan bir foton üretir ..... | 11 |
| Şekil 2.1.  | Yüzey merkezli kübik (fcc) yapısı .....                                                                                                                                                                                                                   | 13 |
| Şekil 2.2.  | Çinko sülfür yapısı .....                                                                                                                                                                                                                                 | 14 |
| Şekil 2.3.  | Sıkı- paketlenmiş hekzagonal kristal yapısı .....                                                                                                                                                                                                         | 14 |
| Şekil 2.4.  | Hekzagonal (wurtzite) kristal yapısı (ZnS) .....                                                                                                                                                                                                          | 15 |
| Şekil 2.5.  | 1,5 MeV büyüklüğünde radyasyona maruz bırakılmış ZnO numunesi için mobilitenin zaman bağlı değişimi .....                                                                                                                                                 | 18 |
| Şekil 2.6.  | Temel örgü parametreleri a ve c olan wurtzite ZnO yapının şematik gösterimi. ....                                                                                                                                                                         | 20 |
| Şekil 2.7.  | Fermi seviyesine bağlı olarak hesaplanmış nokta kusurların oluşum enerjileri.....                                                                                                                                                                         | 23 |
| Şekil 2.8.  | Elektrik yükü iletim şeması .....                                                                                                                                                                                                                         | 28 |
| Şekil 2.9.  | Çözeltide bulunan A türünün (a) indirgenme (b) yükseltgenme işlemi ....                                                                                                                                                                                   | 30 |
| Şekil 2.10. | Standart hidrojen elektrot .....                                                                                                                                                                                                                          | 31 |
| Şekil 2.11. | Standart kalomel Elektrot .....                                                                                                                                                                                                                           | 32 |
| Şekil 2.12. | Örgü atomların vektörel görünümü .....                                                                                                                                                                                                                    | 36 |
| Şekil 2.13. | Dalga vektörleri .....                                                                                                                                                                                                                                    | 38 |
| Şekil 2.14. | Kristal düzleminde bragg kırınımı .....                                                                                                                                                                                                                   | 40 |
| Şekil 2.15. | $T=65^{\circ}\text{C}$ , $V= -0,9\text{V}$ ve $0,1\text{ M Zn(NO}_3)_2$ büyütme parametreleriyle oluşturulan ZnO ince filmin elektron kırınım görüntüleri.....                                                                                            | 41 |
| Şekil 2.16. | PN eklemi .....                                                                                                                                                                                                                                           | 42 |
| Şekil 2.17. | p ve n tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı .....                                                                                                                                                                                                     | 43 |
| Şekil 2.18. | p-n eklemi ve enerji band diyagramı .....                                                                                                                                                                                                                 | 44 |
| Şekil 2.19. | Elektron ve hollerin difüzyonu sonucu deplasyon bölgesinin oluşumu ....                                                                                                                                                                                   | 45 |

|                    |                                                                                                                                |    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.20.</b> | Elektriksel potansiyel dağılımı.....                                                                                           | 46 |
| <b>Şekil 2.21.</b> | Doğru belsem .....                                                                                                             | 48 |
| <b>Şekil 2.22.</b> | Ters yönde gerilim uygulandığında.....                                                                                         | 49 |
| <b>Şekil 2.23.</b> | p-n eklemünde akım voltaj karakteristiği.....                                                                                  | 50 |
| <b>Şekil 2.24.</b> | Bir optik demet sapma dedektörünün yandan görünüşü. Ucun numune yüzeyini taraması sırasında sistem, 0,01mm'ye duyarlıdır ..... | 52 |
| <b>Şekil 2.25.</b> | Atomik kuvvet mikroskobu için blok şema.....                                                                                   | 53 |
| <b>Şekil 3.1.</b>  | Elektrokimyasal büyütme deney sistemi .....                                                                                    | 59 |
| <b>Şekil 4.1.</b>  | Farklı büyütme potansiyel değerlerinde elde edilen ZnO ince filmler için FWHM ve tanecik büyüklükleri.....                     | 64 |
| <b>Şekil 4.2.</b>  | -0,9 V, -1 V, -1,1 V, -1,2 V' da büyütülen ZnO ince filmleri için XRD spektrumu.....                                           | 65 |
| <b>Şekil 4.3.</b>  | -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin XRD spektrumu .....                                                                        | 67 |
| <b>Şekil 4.4.</b>  | Elektron bombardımanı sonrası -1,1 V' da büyütülen ZnO ince film için XRD spektrumu .....                                      | 68 |
| <b>Şekil 4.5.</b>  | -1,2 V' da büyütülen ZnO ince filmin XRD spektrumu.....                                                                        | 69 |
| <b>Şekil 4.6.</b>  | Elektron bombardımanı sonrası -1,2 V' da büyütülen ZnO ince film için XRD spektrumu .....                                      | 70 |
| <b>Şekil 4.7.</b>  | AFM mikroskobu.....                                                                                                            | 71 |
| <b>Şekil 4.8.</b>  | GaAs'ın yüzey görüntüsü .....                                                                                                  | 72 |
| <b>Şekil 4.9.</b>  | Radyasyon öncesi -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin yüzey görüntüsü .....                                                     | 73 |
| <b>Şekil 4.10.</b> | Radyasyon sonrası -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin yüzey görüntüsü .....                                                    | 74 |
| <b>Şekil 4.11.</b> | Radyasyon öncesi -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin yüzey görüntüsü .....                                                     | 76 |
| <b>Şekil 4.12.</b> | Radyasyon sonrası -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin AFM görüntüsü .....                                                      | 77 |
| <b>Şekil 4.13.</b> | -1,1V'da büyütülen ZnO ince filmin radyasyon öncesi I-V grafiği.....                                                           | 80 |
| <b>Şekil 4.14.</b> | -1,1V'da büyütülen ZnO ince filmin radyasyon sonrası I-V grafiği.....                                                          | 80 |
| <b>Şekil 4.15.</b> | Farklı büyütme potansiyel değerleri altında GaAs altlık üzerine elde edilen ZnO ince filmlerin PL spektrumu .....              | 82 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 2.1.</b> Bazı II-VI bileşiklerine ait enerji bant aralıkları ve iletkenlik türleri<br>(T=300K) .....                       | 12 |
| <b>Çizelge 3.1.</b> Büyütme parametreleri .....                                                                                       | 59 |
| <b>Çizelge 4.1.</b> Farklı piklere karşılık gelen açı değerleri .....                                                                 | 62 |
| <b>Çizelge 4.2.</b> ZnO ve GaAs' in örgü sabitleri ve ince filmlerin kalınlığı.....                                                   | 63 |
| <b>Çizelge 4.3.</b> Radyasyon öncesi -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin yüzey görüntüsü<br>ile ilgili değerler .....                 | 75 |
| <b>Çizelge 4.4.</b> Radyasyon sonrası -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin yüzey görüntüsü<br>ile ilgili değerler .....                | 75 |
| <b>Çizelge 4.5.</b> Radyasyon öncesi ve sonrası -1,1 V' da büyütülen ZnO ince filmin idealite<br>faktörü ve turn on potansiyeli ..... | 81 |

## 1. GİRİŞ

21. yy.'ı yaşadığımız şu günlerinde yarı iletken ince katı filmler teknolojik ve bilimsel araştırmalarda önemli bir yere sahiptir. Elektriğin keşfedilmesi ile elektriği iyi ileten maddeler iletken, elektriği iletmeyen maddeler ise yalıtkan madde olarak tanımlanmıştır. Genel olarak metalik iletkenlik  $10^6 (\Omega.cm)^{-1}$  -  $10^4 (\Omega.cm)^{-1}$  arasındaki değerleri alır iken yalıtkanlarda bu değer  $10^{-10} (\Omega.cm)^{-1}$ 'den azdır. Bazı katı maddelerin elektriksel iletkenlikleri ise  $10^4 (\Omega.cm)^{-1}$  -  $10^{-10} (\Omega.cm)^{-1}$  arasında değişmektedir ki bunlar yarıiletken olarak tanımlanmaktadır (Seeger 1990). Yarıiletkenler bunlar arasında önemli bir yere sahiptir. Çünkü metallerden yalıtkanlara kadar uzanan bölgeyi kapsayan geniş bir olaylar zincirini oluştururlar. Bunun yanı sıra çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptirler. Yarıiletkenlere duyulan ilgi nokta kontaklı transistör'lerin elektronik teknolojisinde kullanılması ile başlamıştır. Bu malzemelerin optik ve elektriksel özellikleri bakımından metaller ve yalıtkanlardan farklıdır bu yüzden endüstriyel açıdan çok önemli hale gelmiştir.

Yarıiletkenlere duyulan ilgi iletkenliğinin  $10^{14}$  gibi çok geniş bir aralıkta değiştirilebilir olmasından kaynaklanmaktadır. Bu noktada yarıiletkenlerle yarı-metaller arasında bir ayırım yapmak gerekmektedir. Yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonu  $10^{17}$  -  $10^{18}$  elektron/ $cm^3$  ve  $10^{14}$  -  $10^{16}$  elektron/ $cm^3$  arasında bir değere sahip iken yalıtkanlarda bu değer  $10^{14}$  elektron/ $cm^3$  'den azdır. Ayrıca bir diğer belirgin özelliklerinden biri  $T=0K$ 'de yalıtkan olmalarıdır. Yasak enerji aralıkları öyle bir değere sahiptir ki, ısıtılma ile erime noktalarının altındaki sıcaklıklarda elektriksel iletkenlik gösterirler.

Günümüzde özellikleri en iyi bilinen ve en çok kullanılan yarıiletkenler, periyodik tablonun IV. Grup elementleri olan Ge ve Si materyalleridir. Bu grupta olan elmas yapıdaki karbon yalıtandır ( $E_g=5,5eV$ ). IV. grup elementleri kovalent kristallerdir ve atomlar kovalent bağlanma ile bir arada tutulurlar. Si ilk aşamalarda bipolar

transistörler'lerin (pnp yapıda Si'dan oluşmuş eklem) yapımında kullanılmıştır. Bazı özel uygulamalara (optoelektronik uygulamalar) olan gereksinim arttıkça Si'un yeterli olmadığı görülmüştür. Bu uygulamalar, optik uygulamalar, yüksek hız ve frekans gerektiren uygulamalardır. Bunun sebebi indirek bant yapısına, düşük mobilite ve düşük iletkenliğe sahip olmasıdır. İndirek bant yapısından dolayı meydana gelen geçişlerde momentum korunmadığından bu tür geçişlere fonon yardımcı geçişler denir. Bu, ışık emisyonunun oldukça zayıf ve soğurma sabitinin oldukça küçük olması demektir. Si'un teknolojik uygulamalarda beklenen yeterli cevabı verememesinden dolayı değişik materyallere yönelim olmuştur. Yapılan araştırmalar bileşik yarıiletkenlerin istenilen birçok özelliğe sahip olduğunu ortaya çıkardı. Adından da anlaşıldığı gibi bileşik yarıiletkenler periyodik tablonun farklı sütunlarındaki elementlerinden meydana gelmişlerdir. Bunlar III-V, II-VI, IV-VI veya IV-IV bileşikleridir

Tarihsel olarak baktığımızda optoelektronik uygulamalarında en çok kullanılan bileşik yarıiletkenler III-V yarıiletkenleridir. Yarıiletken sınıfının önemli bir kısmını III-V bileşikleri oluşturur. Bu bileşikler periyodik tablonun üçüncü ve beşinci grup elementlerinin bileşik oluşturması ile oluşurlar. GaAs, InSb, GaP, bu gruptaki bileşiklere örnek verilebilir. Bu elementler kübik (sphalerite) yapıda kristallenirler. III-V bileşiklerindeki bağlanma tipi de büyük bir oranda kovalenttir.

InSb (indiyum antimon) 1950'de ilk keşfedilen III-V yarıiletkenidir. Bant aralığı oldukça düşü (0,17eV) olması sayesinde far infrared (uzak kızıl ötesi) dedektörlerin geliştirilmesinde çok önemli paya sahiptir. Fakat bant aralığının dar olması elektromanyetik spektrumun yüksek frekanslı bölgelerde çalışan cihazların yapımını engellemektedir. Bu yüzden daha geniş bant aralıklı bileşik yarıiletkenlere yönelim olmuştur. GaAs (1,43eV), InP(1,35 eV) ve GaP (2,1eV) bunlara örnek verilebilir. GaP'nin bant aralığının elektromanyetik spektrumun görünür bölgesine karşılık gelmesi LED'lerin geliştirilmesinde önemli katkı sağlamıştır. Ancak indirek bant yapısına sahip olması ışımalı geçiş verimini azaltmaktadır. Ayrıca belli katkı teknikleri kullanılarak ışımalı verim artırılabilir. GaAs ve InP yüksek mobiliteli elektronlara sahiptir. Bu özellik bunların yüksek hız uygulamaları gerektiren devre elemanlarının gelişiminde

oldukça önemli hale gelmelerini sağlamıştır. GaAs'in dogal olarak yarı yalıtkan özellikte büyümesi altlık malzeme olarak kullanılmasını sağlamıştır. Bu sayede devre elemanları oldukça küçültülebilmekte ve daha fazla devre elemanının daha az yer kaplaması sağlanmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile daha geniş bant aralıklarına sahip yarıiletkenlere ihtiyaç duyulmuştur. SiC, CdO, ZnSe ve ZnO bunlara örnek olarak gösterilebilir.

Yarıiletken ince katı filmler 1950'li yıllardan beri çeşitli yöntemler ile elde edilmiştir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte ince katı filmlerin elde edilme yöntemleri de değişmiştir. İlk film, 1838'de "elektroliz" yöntemi ile elde edilmiştir. 1852' de, Bunsen "kimyasal reaksiyon" yöntemi ile ve Grove "glowe-discharge sputtering" yöntemi ile 1887'de, Faraday asal gaz içerisinde buharlaştırma yöntemi ile metal film elde etmişlerdir. 1887'de, Nahrwold platin ince filmini "joule ısıtması" ile elde etmek için ilk defa vakum kullanmış ve daha sonraki yüzyılda Kundt aynı yolla metal filmler elde etmiştir (Zor 1982).

Günümüzde ise modern cihazlar kullanılarak, elde edilen filmlerin kristal yapıları, elektriksel ve optik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır. İlk önceleri metal ince filmleri cam ve seramik üzerinde dekorasyon olarak kullanılmasına karşın gelişmeler paralelinde ince filmlerin kullanım alanları da çeşitlenmeye başlamıştır. Elektronik cihazların gelişmesinin temelinde bu araştırmalar yer almaktadır (Kul 1996).

Teknolojik alanda görülen gelişmeler beraberinde enerji gibi çeşitli sorunları da oluşmasına neden olmuştur. Bunun sonucu olarak yeni enerji kaynaklarının bulunmasında arayışlar oluşmuştur. Çevre faktörü göz önünde bulundurularak sürekli bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden faydalanma fikri cazip gelmeye başlamış ve güneş pilleri üzerinde yapılan çalışmalar yarıiletken ince katı film araştırmalarının geliştirmiştir. Bunun sonucu olarak güneş pillerinde geniş kullanım alanı bulan yarıiletken ince filmler üzerindeki çalışmalar hız kazanmıştır. Çünkü tek kristal güneş pilleri, yarıiletken ince film güneş pillerine göre hem pahalı hem de yapım teknolojileri oldukça zordur.

### 1.1. Kristal Yapı ve Kristal Büyütme İşlemleri

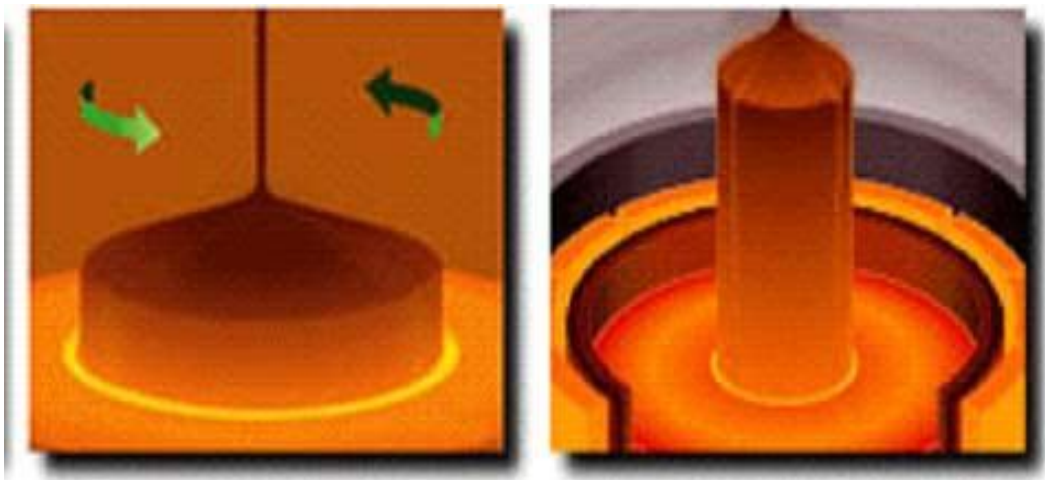
Kristal: Birim hücrenin (kristal yapının içerisinde düzenli bir şekilde dizilmiş atomların düzeni koruyarak alına bilecek en küçük yapı) üç boyutlu olarak kendisini tekrar etmesi sonucu oluşan yapıdır. Yani yapıyı oluşturan atomlar, moleküller ya da iyonlar üç boyutlu olarak kendilerini sürekli yenilerler.

Kristal büyütme işlemi iki şekilde yapılmaktadır.

i. Bulk büyütme: Kristalin külçe şeklinde büyütülmesi işlemidir.

- LEC Tekniği
- CZOCHRALSKI Tekniği
- BRIDGMAN-STOCKBARGER Tekniği

bulk şeklinde kristal elde edilen tekniklerin arasında sayılabilir.



**Şekil 1.1.** Czochralski tekniği ile elde edilen bulk kristal

ii. Epitaxy Büyütme: Taban malzeme üzerine kristalin tabaka tabaka büyütülmesi işlemidir.

Epitaxy yönteminde büyütme işlemi yapmanın avantajları:

1. Kristal yapısında iyileştirme sağlanabilir.(kusur konsantrasyonunda azalma,daha
2. Büyütülen numunenin kalınlığının doğru olarak tayini
3. Keskin ve dereceli ara yüzeylerin elde edilmesi
4. Eşsiz devre yapılarının (nano yapılar) elde edilmesi arasında sayılabilir.

Tabaka tabaka (epitaxy) büyütme yöntemlerinin bazıları şunlardır (Look 2001; Mahalingam *et al.* 2003)

- Termal oksidasyon (Thermal oxidation)
- Elektron demeti buharlaştırılması (Electron beam evaporation)
- Molecular Beam Epitaxy (MBE)
- Laser MBE
- Kimyasal buhar birikimi
- Radyo frekansı magnetron saçılma (Rf magneto Sputtering)
- Aktive edilmiş buharlaştırma (Activated reactive evaporation)

- Kimyasal buhar birikimi (Chemical bath deposition)
- (Metal-Organic Chemical Vapour Deposition (MOCVD))
- Elektrokimyasal büyütme (Electrochemical deposition).

Son yıllarda nanometre büyüklüğünde özellikle ince film formatında yarıiletken yapıda malzeme üretimi kayda değer bir ilgi alanına sahiptir. Güneş pilleri, süper kapasitörler, fotovoltaiik araçlar ve elektrokromik pencerelerde kullanılan materyalin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kontrolünün sağlanabilirliği, yarıiletken ince film ve nano teknolojisi içeren çalışmalara olan ilgiyi arttırmıştır. İnce film formatında nanokristal yarıiletken materyallerde, materyali oluşturan parçacık sayısının artmasından dolayı katı yapıdan moleküler yapıya doğru aşamalı bir geçiş gözlenir. Bir yarıiletkenin nanokristal büyüklüğü, yarı iletkenin bant yapısını etkilediği için, yarıiletkeni oluşturan parçacıkların yeterince küçük olması yük taşıyıcılarının kuantum sınırında bulunmasını ve bant yapılarının kesikli enerji seviyelerine ayrışmasına sebep olur (Pejova *et al.* 2005). Nanometre büyüklüğündeki yarıiletken malzemelerin özelliklerinden biride, yarıiletkenin sahip olduğu değerlik bandının ( $E_g$ ) değerinin artar iken, yarıiletkenin nanokristal yapı çapının azalmasıdır (Yang 2006).

Yarıiletken ince filmler, yapısal mükemmellik derecelerinin azalmasına bağlı olarak homoepitaksiyel filmler, heteroepitaksiyel filmler ve polikristal filmler olmak üzere üç temel grupta elde edilmektedir.

- Homoepitaxy: Taban malzeme ile üzerine büyütülen film aynı maddedendir. Daha kaliteli filmler büyötmek için yada büyütölen filme katkı atomları eklemek için kullanılır. Homoepitaxy de taban malzeme ile film arasında latis uyumsuzluğu (lattice mismatch, misfit) söz konusu değildir.

Latis uyumsuzluğu

$$f = \frac{a_s - a_f}{a_f} \quad (1.1)$$

ile verilir.

$a_s$  ve  $a_f$  sırasıyla taban malzeme filmin latis sabitleridir.

$f < 0$  ise, büyütülen film büzülme zoru altındadır.

$f > 0$  ise, büyütülen film gerilme zoru altındadır.

- heteroepitaxy: taban malzeme üzerine büyütülen malzemenin taban malzemedan farklı olmasıdır. Heteroepitaxy de taban malzeme ile film arasında latis uyumsuzluğu vardır

Homoepitaksiyel ve heteroepitaksiyel filmler ileri teknolojinin kullanımı ile elde edilen maliyeti yüksek filmlerdir. Bilimsel çalışmalarda bu yüzden daha düşük maliyette ve pratik olarak elde edilen polikristal filmler tercih edilmektedir. Polikristal filmler optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle güneş pili, yarıiletken dedektör gibi bir çok uygulama alanı olan basit ve farklı yöntemler ile elde edilen yarıiletken materyallerdir.

Yapılan çalışmalarda kalınlığı küçük olan filmler ince film (thin film), kalınlığı büyük olan filmler kalın film (thick film) olarak adlandırılır (Bilgin 2003).

Homoepitaksi büyütme mümkün olmasına karşın yapılan çoğu büyütme heteroepitaksi ile ilgilidir. Genellikle altlık malzeme olarak safır ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) kullanılmaktadır. GaN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ile  $(\text{ZnO}/\text{Al}_2)\text{X O}_2$  karşılaştırıldığı zaman  $(\text{ZnO}/\text{Al}_2)\text{X O}_2$  daha az dislokasyon içerir. Mavi ışık yayan diyot elde edilmesinde n-ZnO/p-GaN kullanılmaktadır (Özgür *et al.* 2005).

### 1.1.2. Yarıiletken ince filmlerin yapısal özellikleri

Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlikleri, kimyasal özelliklerindeki değişmelere ve kristal yapılarındaki kusurlara oldukça bağlı olup çok küçük değişikliklerde iletkenlikte değişmektedir. Çeşitli malzemelerde kullanılan yarıiletken filmler, büyük oranda ortak elektriksel özelliklere (özdirenç, mobilite, yaşam süreleri vs.) sahiptirler.

Genel olarak yarıiletken malzemeler, dört kristal yapısından birine sahiptirler. Bu kristal yapılar; (i) Kübik elmas yapı (Ge ve Si), (ii) Çinko blend (sphalerite) yapı (ZnS, GaAs), (iii) wurtzite yapı (CdS) ve kaya tuzu (NaCl) yapı (PbS, PbTe) . II-VI ve III-V bileşiklerinin çoğu altıgen wurtzite yapısında olup çok kristalli bir yapıya sahiptirler. Kübik elmas yapı ve wurtzite yapılarındaki malzemeler yüksek kovalent bağ karakteristiği gösterdiği için filmler oldukça yüksek kalınlık değerlerine sahiptirler. Ayrıca oldukça kırılğan ve kristal yüzeyleri çok temiz olduğu şartlarda bile kompleks yüzey yapısına sahiptirler. Bunlar buhar fazında iken, soğuk altlık üzerine yoğunlaştırma işlemine tabi tutar isek elmas ve çinko blend yapısındaki yarıiletkenler ve ayrıca diğer şekilsiz yapılar oluşur. Erime noktası, şekilsiz fazın kararlı olduğu sıcaklığı etkiler. Bazı filmlerde ise bu sıcaklık filmin kirlilik seviyesine ve ayrıca oluşum oranına bağlı olabilir.

Film, malzemenin kristalleştiği yüksek sıcaklıklarda oldukça sağlam bir dokuya sahiptir. Bu dokunun nedeni çekirdeklenme ya da filmin gelişimi esnasında meydana geldiği düşünülmektedir. Eğer oluşum sıcaklığı ya da buhar dolgunluğunu değiştirir isek, film yapısındaki atom sayısı değişecek ve buda kristal yapı geometrisinin değişmesine neden olacaktır. Üzerine büyütme işlemi yapılan altlık malzemenin büyütme yüzeyinin temiz olması ve sahip olduğu atomik düzeni homoepitaksiyel filmlerin gelişimi üzerinde oldukça etkilidir. Aktif haldeki II-VI bileşiklerinin den oluşan filmlerde kristal kusur yoğunlukları çok yüksek olup filmlerin elektriksel ve optik özellikleri kusurların miktarına, dağılımına bağlıdır.

Bağlantı oluşturma amacı ile kullanılan epitaksiyel filmlerde, malzemenin özellikleri, kusurların çeşidine ve yapı içerisinde bulunma yerine oldukça aşırı hassasiyet gösterir. Bu nedenle kusurların oluşum sebebi, nasıl meydana geldikleri ve bu kusurların karakterizasyonu oldukça önemlidir.

Çekirdeklenme, filmde gelişim merkezlerinin genişletilmesi ve birbirlerine temas ettirilmesi ile oluşur. Gelişim adacıkları, kendi etrafında bulunan komşularına göre açılabilir olarak farklı yönlendirilmiş olabilirler. Çekirdeklenme esnasındaki bu farklı yönelimler, kısmi dönme işlemi ile yok edilebilir veya kenarlarda bulunan kenar bozukluklarının oluşumu ile yer değiştirilebilir. Bu gelişim kusurları, büyüme esnasındaki yüzey düzensizliği veya kullanılan altlığın kirlenmesi neticesinde meydana gelir. Eğer bu farklı yönelimlerin sayısı oldukça fazla olur ise tanecik sınırı oluşur. Gelişim merkezlerindeki doygunluk sayısı, altlık sıcaklığının azalması ve buhar akısının artması ile orantılı olarak arttığı için, gelişim kusurları, yüksek buhar oranlarında ve düşük sıcaklıklarda daha fazla vuku bulur.

Yerleşim bozuklukları ise, epitaksiyel büyüme esnasında, gelişmiş tabakanın kafes parametresi veya ısısal genişleme katsayısının yüzeyinkilerden farklı olması sonucu oluşur. Ayrıca heteroepitaksiyel film ve altlığın atomlarının yanlış eşleşmesi ile de oluşmaktadır. Bunlar x-ışını topolojisi ile belirlenebilir.

Heteroepiteksiye olarak oluşan filmler (örneğin Si üzerindeki ZnO), büyük strese sahiptirler. Oluşan filmin kalınlığının çok fazla olduğu ve altlığa zayıf şekilde bağlandığı için soyulduğu gözlenir.

### **1.1.3. Yarıiletkenlerin optik özellikleri**

Bir yarıiletkenin optik özelliklerinin belirlenebilmesi için yarıiletkenin intrinsic ve extrinsic özelliklerine bakılmalıdır. İntrinsic optik geçişler valans bandındaki holler ile iletkenlik bandındaki elektronlar arasında meydana gelir. Ayrıca yükler arasındaki coulomb etkileşmesinden dolayı bu geçişlere ek olarak eksitonik geçişler de

oluşmaktadır. Valans bandındaki elektronların iletkenlik bandına geçişleri termal yöntemler ile olabildiği gibi optik yollarla da mümkün olmaktadır (Turton 2005).

Yarıiletken üzerine en az yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit enerji değerine sahip  $h\nu$  enerji değerinde bir ışık demeti gönderdiğimiz zaman fotonun enerjisi valans bandında bulunan elektron tarafından soğrulacak ve elektron kazandığı bu enerji sayesinde iletkenlik bandına geçecektir. Bu olay sonrası iletkenlik bandına geçen elektron valans bandında yerine bir boşluk bırakacaktır. Fotonun frekansı  $\nu$  ve dalga boyu  $\lambda$  olduğuna göre, enerji

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

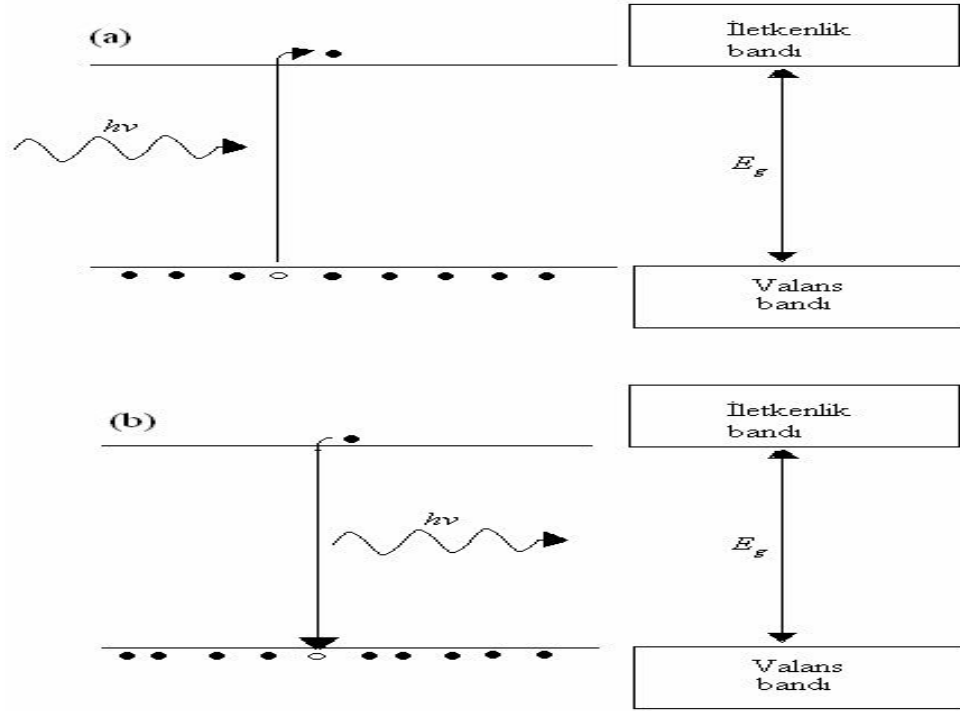
olarak tanımlanır. Minimum frekans,  $\nu_{\min}$  maksimum dalga boyu,  $\lambda_{\max}$ , karşılık geldiğine göre, soğurma

$$\nu_{\min} = \frac{c}{\lambda_{\max}} = \frac{E_g}{h}$$

olarak elde edilir. Burada tanımlanan  $c$  ışığın hızıdır (Turton 2005).

Bu işlem fotoiletkenlik olarak bilinir, uygun dalga boyundaki ışık demetinde bulunan her bir foton ile birçok iletkenlik elektronu etkileşecek ve bunu sonucunda dikkate değer sayıda boşluk oluşacaktır bunun sonucunda iletkenlikte önemli bir artış olacaktır (Turton 2005).

Bunun tersi bir olayda söz konusu olabilir, yani, iletkenlik bandında bulunan bir elektron valans bandında bulunan bir boşluk ile birleşerek, sahip olduğu enerjiyi foton şeklinde dışarıya yayınlayabilir (Şekil 1.2). Bu durum ışık neşreden diyotların (LED) ve yarıiletken lazerlerin temelini oluşturur (Turton 2005).



**Şekil 1.2.** (a) Fotonun enerjisi,  $h\nu$ , yarıiletkenin enerjisinden büyük olmak şartıyla tek bir foton bir elektronu valans bandına uyardırmaya yeterlidir. (b) Tersine bir iletkenlik elektroni bir boşlukla birleşerek enerjisi,  $h\nu$ , olan bir foton üretir.

Eksitonlar (zayıf şekilde birbirlerine bağlı elektron boşluk çifti) bağlı ve serbest eksitonlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Düşük konsantrasyon değerine ve yüksek kaliteye sahip numunelerde eksitonlar temel seviyelerine ek olarak uyarılmış seviyelerde de bulunabilirler. Extrinsic özellikler genellikle yasak enerji aralığında ayırık enerji seviyelerinin oluşmasına neden olan ve bundan dolayı soğurma ve emisyonu etkileyen katkı ve kusurlardan kaynaklanır. Bağlı eksiton seviyeleri yarıiletken malzemenin türüne ve özellikle yarıiletkenin bant yapısına bağlıdır. Teoride eksitonlar nötr yada yüklü donör veya akseptörlere bağlı bulunabilir. Örneğin nötr sıg donora bağlı olan eksiton için bağlı eksiton seviyesindeki iki elektronun spini sıfır olacak şekilde iki seviyeye ayrıldığı kabul edilir. Fazla hol bu iki elektron tarafından oluşturulan Coulomb potansiyelinde zayıf bir şekilde bağlı olarak bulunur. Sıg akseptör durumunda ise valans bandının tepesinde iki hol seviyesi olup tek elektronla etkileşmesi söz konusudur.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. II-VI Bileşikleri

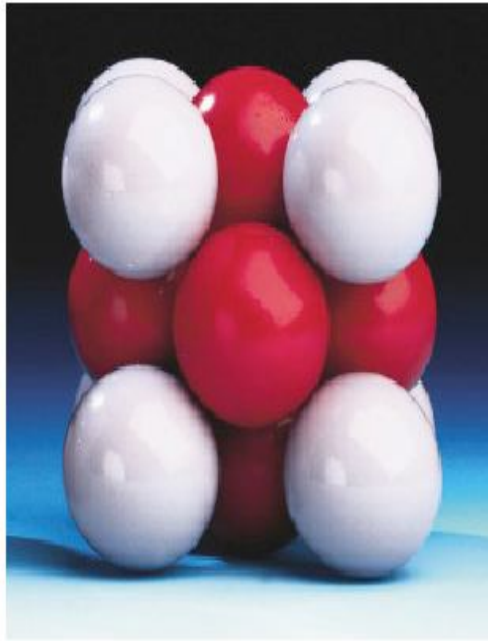
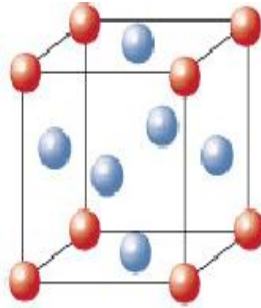
Periyodik cetvelin II. Grup elementlerinden olan Zn, Cd, Hg, ile VI. Grup elementleri olan O, S, Se ve Te ile bileşik oluşturmak için bir araya gelmesi sonucu oluşurlar. Toplamda on iki tane bileşik oluşur. Yasak enerji aralıklarının geniş bir alanı kapsamaları teknolojiye ve bilimsel çalışmalarda kullanılmalarının en önemli nedenleri arasında sayılır. Bunlar, infrared dedektörlerin görüntü sistemleri, yüksek enerjili radyasyon dedektörleri, televizyon kamera tüplerindeki fotoiletken görüntü dedektörleri, güneş pilleri, lazerler, elektrolüminesans diyotlar gibidir (JAIN, M 1993 ; AL-ANI 1993). Bu bileşiklerin enerji bant aralığı 1,8eV- 4eV arasında değişmektedir (Nag and B.R 1980). Bu gruba ait bileşiklerin bazılarının enerji bant aralıkları ve iletkenlik türleri Çizelge 2.1’de verilmiştir (Fahrenbruch 1977).

**Çizelge 2.1.** Bazı II-VI bileşiklerine ait enerji bant aralıkları ve iletkenlik türleri (T=300K)

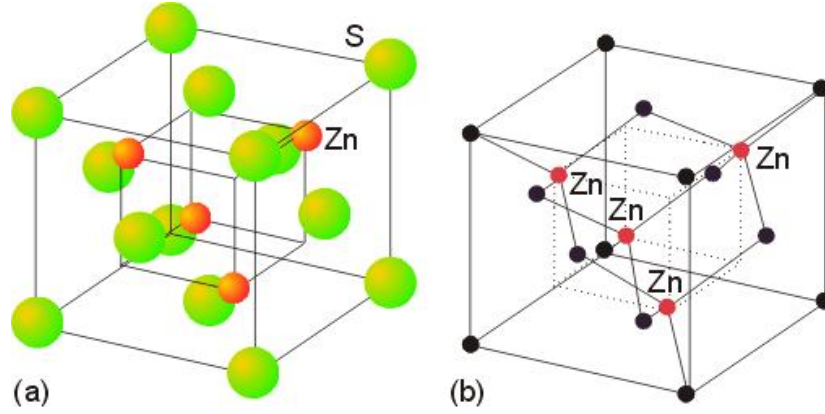
| Materyal | İletkenlik tipi | $E_g$ (eV) |
|----------|-----------------|------------|
| CdS      | n               | 2,42       |
| CdSe     | n               | 1,74       |
| CdTe     | n               | 1,47       |
| ZnS      | n               | 3,66       |
| ZnO      | n               | 3,2        |
| ZnSe     | n               | 2,67       |
| ZnTe     | p               | 2,55       |
| ZnSSe    | n               | 3,12       |
| ZnCdS    | n               | 2,8        |

II-VI bileşiklerinden olan yarıiletkenler, hem kübik (sphalerite) hem de hekzagonal (wurtzite) kristal yapıda kristallenmektedirler (Nag 1980 and Fahrenbruch 1977).

Kübik yapıda ikili bileşiği oluşturan atomlardan biri, diğer türün dört atomu tarafından eşit uzaklıkta olacak şekilde çevrilmiştir. Bu dört atom bir tetrahedronun köşelerini oluşturmaktadır. Diğer komşu atomlar ise iç içe geçmiş iki yüzey merkezli kübik yapıyı oluşturacak şekilde yerleşmişlerdir. Her kübik örgü aynı tür atomlar içermektedir. İki kübik örgü birbirlerine paralel olarak yönelmişlerdir. Bir küpün köşesi, diğer küpün gövde merkezinden geçen köşegenin üzerinde olup köşegen uzunluğunun dörtte biri kadar mesafede bulunmaktadır. Şekil 2.1’de yüzey merkezli kübik yapı, Şekil 2.2’de ise kübik (sphalerite) yapı gösterilmiştir.



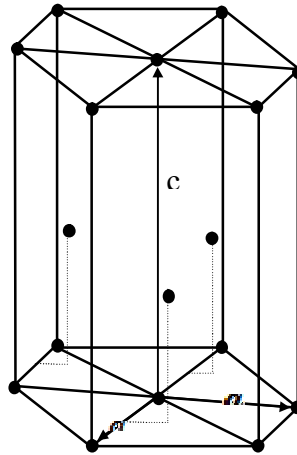
**Şekil 2.1.** Yüzey merkezli kübik (fcc) yapısı



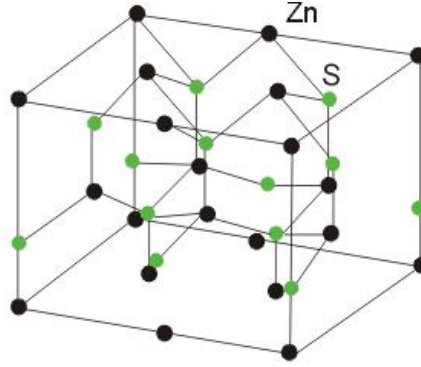
**Şekil 2.2.** Çinko sülfür yapısı

Kübik kristal yapı, fcc örgü simetrisine sahiptir. Kübik örgünün kener uzunluğunu (a) olarak tanımlar isek, örgü sabiti (a) kadardır. Kristalin birim hücre başına düşen atom sayısıdır.

Hekzagonal (wurtzite) yapıdaki atomların yerleşim düzeni hemen hemen kübik yapıya benzemektedir. Bu diğer türün dört atomu tarafından tetrahedral olarak çevrilmiştir. Tetrahedronların yönelimlerinden dolayı atomların yerleşim düzeni iç içe geçmiş iki sıkı- paketlenmiş hekzagonal örgüden oluşmuştur. Sıkı- paketlenmiş hekzagonal yapı ve hekzagonal (wurtzite) yapı Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te verilmiştir.



**Şekil 2.3.** Sıkı- paketlenmiş hekzagonal kristal yapı



**Şekil 2.4.** Hekzagonal (wurtzite) kristal yapı (ZnS)

Şekil 2.4 dikkatlice incelendiğinde iki örgünün aynı eksene sahip oldukları görülmektedir. Ayrıca birinin diğerine göre yer değiştirdiği görülmektedir. Buradan hekzagonal yapı, iki temel atomlu sıkı paketlenmiş hekzagonal yapı olarak değerlendirilebilir.

$$\frac{2a_1}{3} + \frac{a_2}{3} + \frac{c}{2}$$

Sıkı paketlenmiş hekzagonal yapı, bir atomu (0,0,0)'da diğeri ise, vektörünü ucunda yer alan iki temel atomlu hekzagonal bir uzay örgüsüdür. Şekil 2.3'de gösterilen ilkel dönüşüm vektörleri,

$$a_1 = (a/2) (\hat{x} - \sqrt{3}\hat{y}) \quad (1-2)$$

$$a_2 = (a/2)(\hat{x} + \sqrt{3}\hat{y}) \quad (1-3)$$

$$c = c\hat{z} \quad (1-4)$$

İle verilmektedir. Orjin olarak yüzey merkezi seçilmiş olup hekzagonalın kenar uzunluğu 'a' ve

$$\frac{a}{c} = \left(\frac{8}{3}\right)^{1/2} = 1,63$$

' tür.

Temel dönüşüm vektörleri tarafından oluşturulan hücrenin köşelerindeki atomlar sekiz komşu hücre tarafından eşit şekilde paylaşılır. Bunu sonucu olarak hekzagonal örgüdeki böyle bir hücre bir tek atoma sahiptir. Sıkı-paketlenmiş yapıda bu sayı iki, hekzagonal yapıda ise dördür. Hekzagonal yapının birim hücre hacmi  $\left(\frac{\sqrt{3}a^2c}{2}\right)$  ve birim hücre başına düşen atom sayısı ise  $8(\sqrt{3}a^2c)^{-1}$  'dir.

Hem kübik hem de hekzagonal yapıdaki atomlar, tetrahedral örgü simetrisine göre dizilmişlerdir. Bu iki yapıda da bir atomun en yakın komşusu olarak diğer türden dört tane atom, en yakın ikinci komşu olarak aynı tür atomdan on iki tane vardır. Hekzagonal yapıda c eksenı boyunca atomların yerleşim düzeni, kübik yapıda <111> doğrultusu boyunca olan atomların yerleşim düzenine benzemektedir. Hekzagonal yapıdaki bütün atomlar c eksenı boyunca kutuplanmışlardır. Fakat hekzagonal yapı tek eksenli bir simetriye sahiptir. Bundan dolayı bu yapıdaki kristaller piezoelektrik olmalarının yanı sıra pyroelektriktirler.

Kübik ve hekzagonal yapının örgü uzayı birbirine benzemektedir. Fakat kübik ve hekzagonal yapılar piezoelektrik ve pyroelektrik özellikleri bakımından birbirinden ayrılırlar. Kübik ve hekzagonal yapı arasındaki benzerlikten dolayı, II-VI bileşiklerinin enerji bant yapıları birbirlerine benzemektedir (Nag 1980).

## 2.2. ZnO Bileşigi

Son yıllarda geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler, yüksek güç ve yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda ayrıca mavi ve morötesi (UV) bölgedeki fotonik uygulamaları

geliştirmek için araştırılmaktadır. 1993 yılında GaN kullanılarak yapılan LED' den beri mavi lazer diyotlarda, DVD player ve lazer yazıcılarda GaN kullanımı yaygınlaşmıştır. Geniş bant aralığına sahip ZnSe, ZnO gibi diğer yarıiletkenlerde aynı uygulamalar için aday gösterilmektedir (Look et al, 2003). Bununla birlikte ZnSe yüksek akıma maruz bırakıldığı zaman bağ yapısı bozulmakta ve bunun sonucu olarak kusur oluşması ile aygıt performansı azalmaktadır.

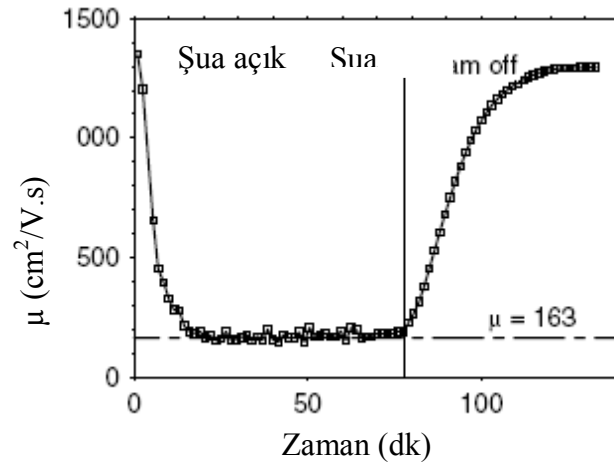
ZnO' direk bant yapısına ve oda sıcaklığında yasak enerji aralığı ( $E_g=3,37\text{eV}$ ) yerine sahiptir. Ayrıca yasak enerji aralığı 3,1eV'dan 4,5eV'a kadar değiştirile bilmektedir. Dolayısı ile ince film modunda tüm görünür bölgede bu film saydam yapılabilmektedir. Bu özelliği ZnO' yu kuantum kuyu laserleri ve hetero yapılı çift katmanlı LED'lerde aktif katman olarak tercih etmemizin sebebidir (Tüzemen *et al.* 2007).

ZnO'nun en geniş uygulamalarından biri de lazer diyotlar (LD) ve ışık yayan diyotlar (LED)' lerdir. Diğer geniş yasak enerji değerine sahip yarıiletkenler (GaN yasak enerji aralığı oda sıcaklığında ( $E_g=3,4\text{eV}$ ) ile kıyaslandığında 60meV değerinde eksiton bağlanma enerjisine ve bunun yanında 15meV'lik bieksiton enerjisine sahiptir. Bu yüzden oda sıcaklığında ve hatta bunun üzerindeki sıcaklık değerlerinde optik uygulamalarda eksitonik davranışı verimli kılmaktadır (Tüzemen *et al.* 2006).

ZnO yarıiletkeni geniş uygulama alanına sahiptir. Bir cihazın fabrikasyonu için etching (dağlama) oldukça önemli bir işlemdir. ZnO seyreltilmiş HCl ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> çözeltilerinde kolaylıkla etch edilebilir (Chen *et al.* 2006). ZnO'nun kolaylıkla tüm asid ve alkaliler ile etch edilebilir ve bu sayede küçük boyutlu devre elemanlarının fabrikasyonu mümkün olmuştur.

ZnO'nun geniş yasak enerji aralığına sahip yarıiletkenler arasından tercih edilmesinin diğer bir sebebi ise, yüksek radyasyona maruz bırakıldığında radyasyona karşı gösterdiği kararlılık ve kimyasal ıslak etching'e gösterdiği hassasiyet gösterilebilir (Özgür *et al.* 2005). ZnO numuneleri 100-500K sıcaklık aralığında radyasyona maruz

bırakılarak taşıyıcıların hareketliliği (mobilité) gözlemlenmiştir. Radyasyonun uygulandığı esnada mobilitenin hızlı bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Radyasyon işleminden sonra sıcaklık belli bir değere düştüğünde mobilitenin tekrar radyasyon öncesi değerine ulaştığı görülmüştür. Buradan mobilitedeki bu değişimin radyasyondan değil de sıcaklıktaki değişimden oluştuğu sonucuna varılmıştır (Coşkun *et al.* 2004). Sıcaklığa bağlı taşıyıcı mobilitesinin ve konsantrasyonunun deneysel olarak elde edilen sonuçları materyalin temel parametrelerini ve saçılma mekanizmasını bulmada kullanılır.



**Şekil 2.5.** 1,5 MeV büyüklüğünde radyasyona maruz bırakılmış ZnO numunesi için mobilitenin zaman bağlı değişim gösterilmiştir.

Yüksek enerjili elektronlar ( $>1,6\text{MeV}$ ) tarafından ZnO kristali bombardıman edildiğinde yarıiletken yapı içerisinde donör ve akseptörler oluşur. Yapılan ölçümlerde ZnO yarıiletkeninin Si,GaAs ve GaN yarıiletkenlerine göre radyasyona karşı daha fazla dayanıklılık göstermiştir. Bu nedenle uydu devrelerinde ZnO yarıiletkeni tercih edilir (Look *et al.* 1999).

III-V grubu elementlerinin bir araya gelerek oluşturdukları bileşiklerde (GaAs, InP) taşıyıcı özellikleri bakımından oldukça caziptirler. Fakat bu özellikler ince film yapısında bozulmakta ve aynı performansı tekrar elde etmek için tek kristal kullanımı zorunlu kılmaktadır (Serway 1996). Buna karşın ZnO elektrolizle kaplama,

buharlaştırma ve eriyik püskürtme gibi işlemleri içeren yöntemler ile büyük alanlı ince film üretimine izin vermektedir. Hidrotermal metod ile ebatlarında, yüksek saflıkta ve şeffaf özellik gösteren tek kristaller oldukça başarılı bir şekilde elde edilmiştir (Ohshima *et al.* 2004).

ZnO n- tipi bir yarıiletkenidir. Elektriksel özellikleri ısı işlem yada uygun katkılama yapılarak tamamen değiştirilebilir. Katkı atomu olarak genelde  $Al^{+3}$ ,  $In^{+3}$ ,  $Ga^{+3}$  kullanılmaktadır (Goyal *et al.* 1992; Sanchez-Juarez. *et al.* 1998).

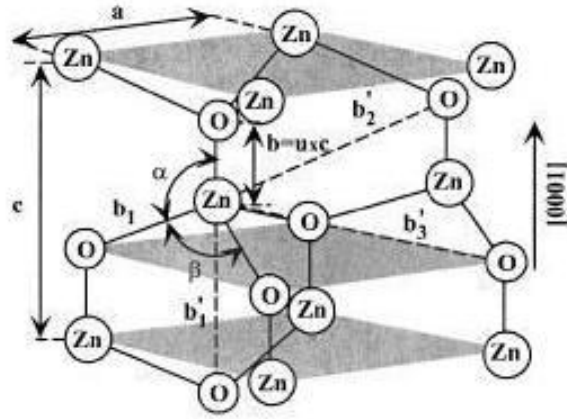
ZnO bileşiği görünür bölgede yaklaşık olarak %80-%90'lık optik geçirgenliğe ve  $10^{-3} - 10^{+2} \Omega cm$  aralığında bir elektriksel direnç değerine sahiptir. Serbest taşıyıcı yoğunluğu  $5 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19} m^{-3}$  arasında kırılma indisi 1,95–2,1 arasında değer alır.

Yüksek kırılma voltajlarına sahip olması ve yüksek elektrik alanlarına dayanıklı olması düşük gürültü ve yüksek sıcaklıklarda çalışılmasına olanak sağlamıştır. Yeterince düşük elektrik alanlarında elektronların kazandığı enerji termal enerji ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Bu yüzden düşük alanların elektronların enerjileri üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Saçılma hızı, elektronların dağılım fonksiyonuna bağlı olan elektronların mobilitelerini belirlediği için düşük alanlarda elektronların mobiliteleri alandan bağımsız olur. Kısacası OHM kanununa uyarlar. Buna karşın elektronların elektrik alandan dolayı kazandıkları enerji termal enerji ile karşılaştırıldığında ihmal edilemeyecek büyüklükte ise elektrik alan değerinin artması ile elektronların dağılım fonksiyonları önemli derecede denge durumundan sapar işte bu elektronlara sıcak elektron adı verilir. ZnO için mobilité değeri  $180 cm^2 V^{-1} s^{-1}$  dir. Bu değerlerden anlaşılacağı gibi saydam bir iletken olarak ZnO, indiyum katkılı kalay oksit (ITO) ve kalay oksit ( $SnO_2$ ) filmleri ile neredeyse rekabet edecek durumdadır.

ZnO, iyonikliği kovalent ve iyonik yarıiletkenler arasında sayılan bir yarıiletkenidir. ZnO wurtzite, çinko sülfür ve kaya tuzu kristal yapılarında kristalleşebilmektedir. Bir kristal yapıda örgü parametreleri;

- İletkenlik bandının minimum noktasını işgal eden serbest elektron konsantrasyonuna
- Yapı içerisinde bulunan yabancı atom konsantrasyonuna ve kusurlara
- Sıcaklığa

bağlı olarak değişim göstermektedir.



**Şekil 2.6.** Temel örgü parametreleri  $a$  ve  $c$  olan wurtzite ZnO yapının şematik gösterimi. \* $u$  parametresi bağ uzunluğu ya da  $c$  ile bölünen en yakın komşu  $b$  mesafesi olarak tasvir edilir (ideal bir kristalde 0,375 değerine sahiptir).  $\alpha$  ve  $\beta$  (ideal kristalde  $109,47^\circ$ ) bağ açılarıdır (Özgür *et al.* 2005).

Şekil2.6'dan anlaşılacağı üzere ZnO birim hücresinin hekzagonal yapısında her Zn atomu birinci kabukta dört O atomu ikinci kabukta ise on iki ZnO atomu tarafından çevrilmiştir.

Oda sıcaklığında ZnO wurtzite yapı için örgü parametreleri  $a = 3,25 \times 10^{-10}$ ,  $b = 5,206 \times 10^{-10}$  değerlerine sahiptir. GaN ile karşılaştırıldığında ( $a_{GaN} = 3,189 \times 10^{-10}$ ,  $b_{GaN} = 5,185 \times 10^{-10}$ ) örgü parametrelerinin çok yakın olduğu

görülür. Her ikisinin de Wurtzite yapıda olmasından dolayı karşılıklı olarak bir birleri için altlık malzeme olarak kullanılabilirler (Tüzemen *et al.* 2007).

Kristal yapı içerisindeki ara yer Zn atomları, oksijen boşlukları ve dislokasyonlar örgü parametrelerinin artmasına neden olur. Yüksek basınç değerlerinde ZnO wurtzite kristal yapıdan kaya tuzu yapısına geçer. Basıncın artması ile 1,12 GPa değerinde geçişin meydana geldiği ve 2 GPa basınç değerinde dahi güçlü bant kenarı UV emisyonu gözlenmiştir (Chen *et al.* 2005).

ZnO kısa dalga boylu optoelektronik devre elemanları uygulamalarında büyük bir öneme sahiptir. ZnO' nun sahip olduğu avantajlarından faydalana bilmek için n- tipi ve p- tipi ZnO' nun elde edilmesi gereklidir. ZnO yarıiletkeni büyütme işlemi esnasında yapısında bulunan oksijen boşluklarından, çinko ara yer atomlarından veya istem dışı yapıya katılan H atomlarının varlığından dolayı n- tipi özellik gösterir.

Donor kusurlarından dolayı akseptörler kompanse edilir bu yüzden p-tipi özellik kazandırmak oldukça zordur (Tüzemen *et al.* 2001). Sığ akseptör seviyelerinin oluşumunu engelleyen derin safsızlık seviyeleri p-tipi katkılama problem kaynağı olarak gösterilebilir. P-tipi ZnO elde etme de en uygun materyal N' dir. V. Grup elementleri arasında en düşük iyonlaşma enerjisine sahiptir. Bunun yanı sıra  $N_{Zn}$  ile antisite oluşturmaz. Tüm bunlara karşın N'un ZnO içindeki çözünürlüğü oldukça düşüktür. Çözünürlüğü arttırmak için III-N çift katkılama işlemi yapılır ( Lu *et al.* 2004).

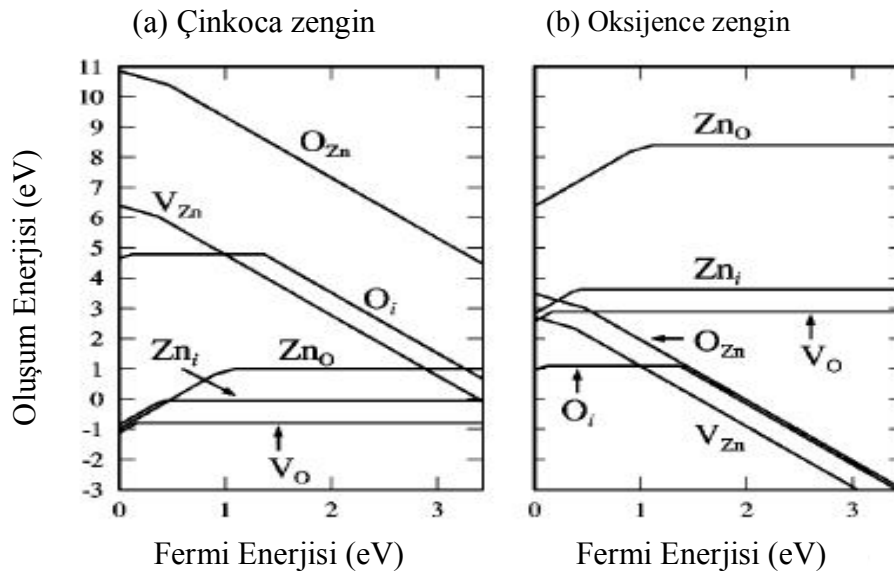
Titreşim, dönme ve elektronik serbestlik derecesinin termal iletkenliğe önemli katkısı vardır. Yüksek güç ve sıcaklıklarda çalışan devre elemanları için termal iletkenliğin önemi oldukça büyüktür. Saf kristaller için Debye sıcaklığı üzerinde  $T^{-1}$  ile orantılı olan fonon- fonon, fonon-kusur, fonon- safsızlık, fonon – kütle değişimi saçılmaları tarafından tayin edilir. ZnO' nun termal iletkenliğinde nokta kusurlar önemli rol oynamaktadır.

ZnO yapısı içerisinde gerçekleşen saçılma mekanizmaları aşağıdaki gibidir.

1. İyonize safsızlık saçılması; kusur yada istek dahilinde yapıya dahil edilen safsızlık atomlarının oluşturduğu yük merkezlerinin Coulomb potansiyelinden dolayı serbest taşıyıcıların saptırıldığı saçılma türüdür.
2. Polar saçılma; polar bir yarıiletkende, iyonik bağların kendi doğal yapılarından kaynaklanan örgü titreşimlerinden dolayı oluşan elektriksel polarizasyonun oluşturduğu elektrik alan ile taşıyıcıların etkileşmesi sonucu oluşan saçılmalardır.
3. Pizoelektrik saçılması; Kristalin bir ucuna uygulanan elektrik sinyali diğer uçta kristale özgü ve sabit bir frekans değerinde ses dalgası oluşturur. Bu olay tersinede cereyan edebilir. Yani kristalin bir ucuna ses dalgası uygulandığı zaman diğer uçta elektrik sinyali oluşur. işte bu çift taraflı enerji çevirme olayına piezoelektirik= basınç elektrik olay' adı verilir.Yani zorlardan dolayı meydana gelen elektrik alandan taşıyıcıların sapmasıdır.
4. Kusur ve dislokasyon yoğunluğu oldukça fazla ise dislokasyon ve kusur saçılmalarında saçılma mekanizmaları arasında düşünülebilir. N-tipi yarıiletken özelliğine sahip bir yarı iletken (elektronların yoğunluğu boşlukların yoğunluğundan fazla olan) akseptör merkezleri dislokasyonlar ile karşılaştığı zaman iletkenlik elektronları yakalanır. Dislokasyon çizgisi negatif yüklenir ve bunun sonucu olarak etrafında bir uzay yükü bölgesi oluşur. Böylece elektronlar bu bölgede dislokasyon saçılmasına uğrar ve mobilite azalır. Şekiller dikkatlice incelenir ise Zn atomlarının kısmi basıçlarına bağlı olarak ZnO kristali içerisinde en çok karşılaşılan kusurun Zn ve O boşluklarıdır. Bunlar düşük oluşum enerjili kusurlardır. Özellikle oksijen boşlukları  $V_O$ ,Zni ara yer atomlarının oluşum enerjilerinden daha düşük enerjiye sahip oldukları için çinkoca zengin durumlarda daha fazla oluşurlar. Oksijence zengin durumda ise Zn boşlukları ( $V_{Zn}$ )daha baskındır (Janotti and Van de Walle 2007). N-tipi yarıiletkende Zn boşlukları valans bandı üzerinde  $\approx 0.8eV$  değerinde bir akseptör seviyesi oluştururlar.

Dolayısıyla iletkenlik bandı ya da sığ donör seviyesi ile akseptör seviyesi arasında yaklaşık 2,6 eV enerji farkı vardır. Bu nedenden dolayı n- tipi numunelerde çoğunlukla yeşil lüminesans meydana gelir.

Diğer yarıiletkenlerden farklı olarak hidrojen amfoterik özellik gösterir. Bu şu anlama gelir, n-tipinde pozitif yüklü iken p- tipinde negatif yüklüdür. ZnO yarıiletkeninde ise H her zaman pozitifdir. Yani donör gibi davranır. Hidrojen atomları ZnO kristalindeki oksijen atomuna sıkıcı bağlı olup OH bağ uzunluğu  $1 \times 10^{-10} m = A^0$  dur. N-tipi ZnO yarıiletkeninde hidrojenin oluşum enerjisi 1,56eV'dur.



**Şekil 2.7.** Fermi seviyesine bağlı olarak hesaplanmış nokta kusurların oluşum enerjileri. a) çinkoca zengin durumlar b) oksijence zengin durumlar (Lee *et al.* 2001).

### 2.3. Elektrokimya

Maddenin elektrik enerjisi ile etkileşmesi sonucu ortaya çıkan kimyasal dönüşümler ile fiziksel değişimleri ve ayrıca kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşmesini inceleyen bilim dalıdır. Elektrokimyasal tekniklerde elektrot-çözelti sistemine bir elektriksel etki uygulanır ve bu etki sonucu sistemin verdiği cevap incelenir. Elektrokimyasal büyütme, yarıiletken ince filmlerin ve nano yapıların ve özellikle

oksitli ve kalgojenit (CdTe, ZnSe, ZnO, CuInSe<sub>2</sub>) yapıların sentezinde yer almaktadır. İnce filmlerin kalitesinin artması, yüksek tavlama sıcaklığına gereksinimi azaltacak ve yeni materyallerin ve yeni yapıların oluşturulması mümkün olacaktır (Lincot *et al.* 2005).

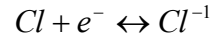
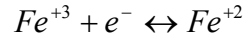
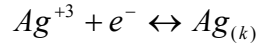
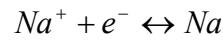
Elektrokimyasal büyütme, metallerin ve büyük yüzey uygulamalarından (örneğin, çinko kaplama) çok ileri elektronik uygulamalara (çiplerin bakır ile kaplanması) kadar olan bütün endüstriyel alanlarda kullanımı yaygın olan metal alaşımların büyütülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle yarıiletken maddelerin elektrokimyasal olarak büyütülmesi endüstriyel açıdan oldukça fazla önem arz etmektedir (Lincot *et al.* 2005).

Elektrokimyasal Büyütme diğer büyütme teknikleri göz önüne alındığında bazı önemli avantajlara sahiptir. (Ishizaki *et al.* 2002). Bu avantajlar,

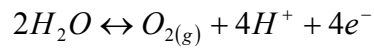
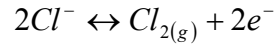
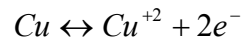
- 373 K’ den daha düşük erime noktasına sahip malzemeleri altlık olarak kullanarak bunlar üzerine büyütme film büyütme işlemi uygulanabilir.
- Filmlerin yapısı, kalınlıkları elektrokimyasal parametreler (uygulanan potansiyel, akım büyütme süresi sıcaklık, vb.) değiştirilerek kontrol altında tutulabilir.
- Kompleks yapıya sahip malzemeler üzerinde homojen filmler nispeten elde edilmektedir.
- Çökertme hızı oldukça yüksektir.
- Deney sistemi pahalı değildir.
- Büyütme işlemi tehlikeli olmamakla beraber çevreci sayılabilir.

Elektrokimyasal bir sistemde katot ve anot olmak üzere iki elektrot bulunur. Bir elektrokimyasal hücrede indirgenme reaksiyonunun olduğu elektrot katot, yükseltgenme reaksiyonunun olduğu elektrot anot olarak tanımlanır.

Katot reaksiyonları; nötr yada iyon halde bulunan bir atomun yada molekülün elektron alarak -1 değerlik kazanmasıdır.



Anot reaksiyonları; nötr yada iyon halde bulunan bir atomun yada molekülün elektron vererek değerlik kazanmasıdır.



Katot materyali olarak platin, altın, karbon gibi metaller yâda kurşun, bakır gibi geçiş metalleri kullanılabilirken, anot olarak inert metallerin yanı sıra metal oksitler kullanılabilir.

### 2.3.1. Faraday yasası ve elektroliz kanunu

Elektrik ile maddenin etkileşmesi sonucu maddenin kimyasal değişmesini ilk olarak 1832’ de Michael Faraday tarafından incelenmiş ve bu incelemenin sonuçları Faraday kanunları olarak kabullenilmiştir. Bunlar,

1. Elektroliz olayı esnasında bir kimyasal maddenin elektrotta tepkimeye giren miktarı hücreden geçen akım ile orantılıdır.

$$Q = i.t$$

2. Aynı miktarda bir elektrik akımı kullanıldığında elektrotta tepkimeye giren çeşitli maddelerin miktarları bu maddelerin eş değer ağırlıklarıyla orantılıdır.

Elektrolizde 1 eşdeğer gram maddenin tepkimesine neden olan elektrik yükünün miktarı 96485,4 coulomb’ dur ve bu elektrik yüküne 1 Faraday denir. Elektrot tepkimesinde akan yük,

$$Q = n.F.N$$

ile verilir.

Denklemlerini birleştirir isek

$$Q = i.t = n.F.N$$

denklemini elde ederiz.

Buradan şunu ifade edebiliriz, eğer biz oluşan ürünün mol sayısını bilir isek bu bilgi ışığında ürünlerin kütlelerini ya da oluşan ürünün gaz olması durumunda hacmini rahatlıkla hesaplayabiliriz (Atkins and Jones 1998).

### 2.3.2. Elektrokimyasal hücreler

Bir elektrokimyasal hücre; uygun bir iyonik iletken (elektrolit) çözeltisine batırılmış (elektrot) olarak isimlendirilen iki elektriksel iletken oluşmaktadır. Bu sistemde elektrot ile elektrolit fazları arasında yük taşınım mekanizmalarını etkileyen süreç ve faktörler arasında durulur. Elektrot ve elektrolit ara yüzeyinde meydana gelen olaylar sadece bir ara yüzeyde meydana gelen olayları düşünmek anlamlı olabilir fakat deneysel olarak böyle izole edilmiş bir yüzey incelenemez. Bundan dolayı elektrokimyasal hücre dediğimiz böyle bir yüzeyden oluşmuş ara yüzey setlerinin özellikleri incelenir.

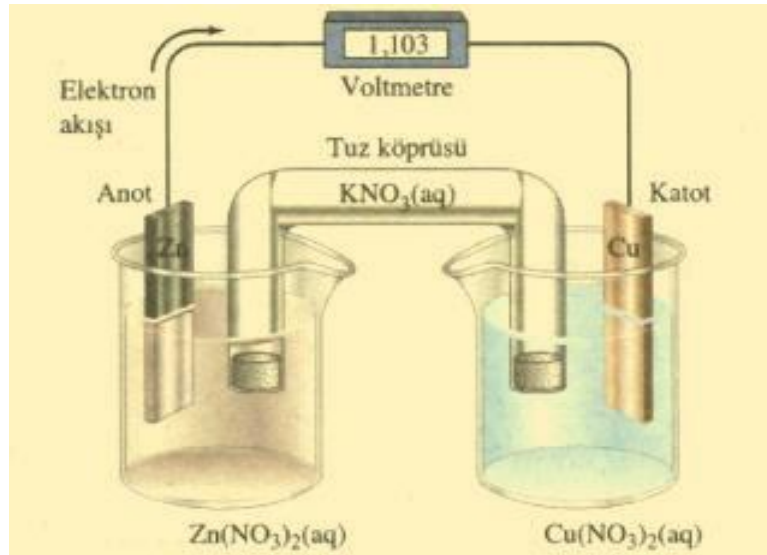
Bir elektrokimyasal hücrede akım oluşması için;

- Elektrotların bir metal iletken vasıtasıyla bağlantı içinde olmalarının sağlanması
- Çözeltiler arasında birinden diğerine iyon geçişini sağlayacak bir temas olmasına
- Her iki elektrotta elektron aktarımı reaksiyonunun olması gereklidir.

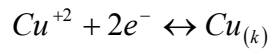
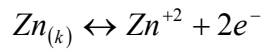
Elektrotları birbirine bağlayan metalik kısımlarda elektron yükü elektronlar tarafından taşınır. Metallerde bulunan değerlik elektronları bir örgü düzeni içinde bulunan ve belli bir değerde titreşen metal iyonları arasında serbest bir şekilde hareket ederek yükü taşırlar. Çözeltilerde ise ortamda bulunan iyonlar tarafından taşınır. Metallerdeki elektronların elektrik yükünü taşıması ile metalik iletkenlik, çözeltilerde iyonların taşınması sonucu iyonik iletkenlik ortaya çıkar.

Elektrik yükü üç işlem ile iletilmektedir;

- Yükseltgenmenin olduğu elektrottan (anot) indirgenmenin olduğu elektrota (katot) doğru hareket ederek taşıyıcı gibi davranırlar.
- Çözeltiler içerisinde elektriğin akışı, hem katyonların (elektronları protonlarından az olan ve bunun sonucu olarak elektronların perdeleme etkisinin azaldığı pozitif yük taşıyan iyon) hem de anyonların (elektronları protonlarından fazla olan negatif yük taşıyan iyon) göçü ile oluşur.
- Çözeltinin iyon iletimi ile iki elektrot yüzeyinde meydana gelen reaksiyonlar ile



**Şekil 2.8.** Elektrik yükü iletim şeması



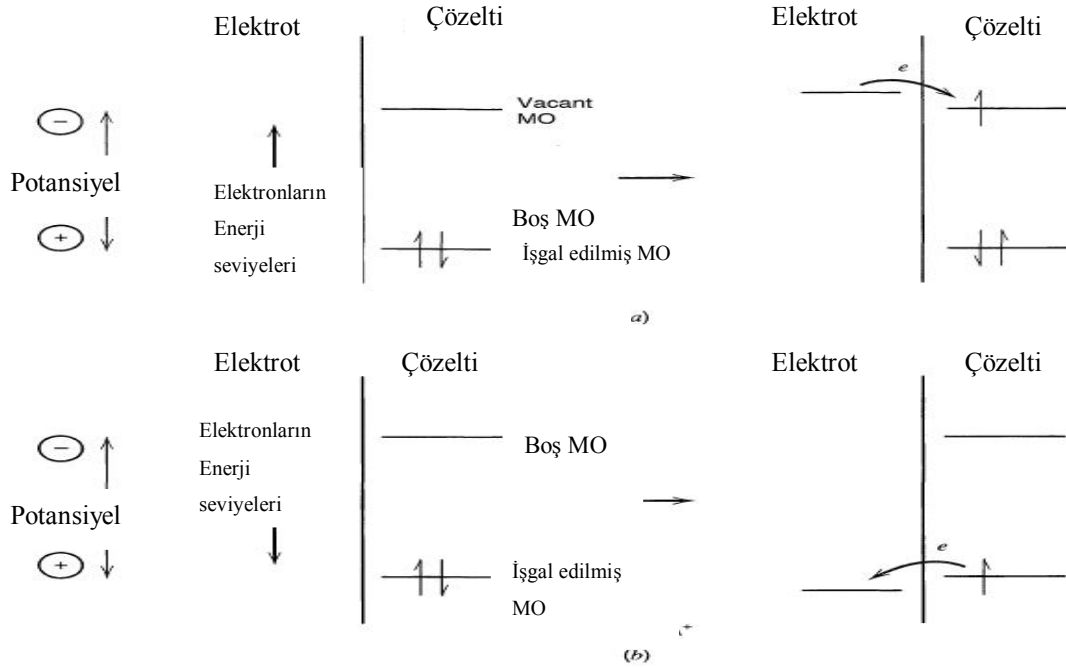
İçerisinde vuku bulan iyonik tepkimelerin kimyasal enerjiyi elektriksel enerjiye çeviren elektrokimyasal hücrelere galvanik hücre ya da pil adı verilir. Tersine, içinde vuku bulan iyonik tepkimelerle dışarıdan aldığı elektriksel enerjiyi kimyasal enerjiye dönüştüren hücrelere ise elektrolitik hücre denir (Sarıkaya 2003).

### 2.3.3. Hücre potansiyeli

Bütün potansiyel ölçüm aletleri sadece potansiyel farkları ölçtüğünden tek bir elektrot ile mutlak potansiyelin ölçümü yapılması olanaksızdır. Bu nedenle potansiyel fark hücre içerisindeki iki elektrot arasında ölçülebilir. Hücre potansiyeli ( $E$ ), bir hücre reaksiyonunun bir devredeki elektronların itme veya çekme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Eğer hücre reaksiyonu dengede ise potansiyel sıfır olur (Atkins and Jones 1998). Elektrotlar arasındaki potansiyel yüklere etki eden kuvveti, dolayısı ile hareketlerini, enerjilerini, transfer hızlarını, doğrultularını belirlediğinden potansiyel kontrolü deneysel elektrokimyanın en önemli kısımlarından birini oluşturur.

Kimyasal hücrede vuku bulan tüm kimyasal reaksiyonlar birbirinden bağımsız iki yarım reaksiyondan oluşur. Her bir yarı tepkime ara yüzey potansiyel farkına bağlı olarak ilgili elektrotta meydana gelir. Reaksiyonların meydana geldiği elektrotlara çalışma elektrotu denir.

Çalışma elektrotuna negatif bir potansiyel uygulanırsa elektronların sahip oldukları enerji yükselir. Enerjilerinde artış olan elektronlar belli bir değerden sonra elektrolit içinde bulunan boş elektronik seviyelere geçerler. Bu durumda elektrottan çözeltiye doğru bir elektron akışı meydana gelir. Bu hareket sonucu oluşan akıma indirgenme akımı (cathodic current) denir. Şekil 2.9.a Buna karşın eğer biz pozitif bir gerilim değeri uygular isek elektronların sahip olduğu enerji değeri azalacaktır. Sahip oldukları enerji değeri azalan elektronlar daha düşük enerji seviyelerine geçmek isteyeceklerinden elektrota doğru hareket ederler. Şekil 2.9.b. bu hareket sonucu meydana gelen akıma yükseltgenme akımı (oxidation current) denir. Bu olaylar sistemde kullanılan maddelerin kritik standart potansiyel değerlerine bağlı olarak değişiklik gösterir.



**Şekil 2.9.** Çözeltide bulunan A türünün (a) indirgenme (b) yükseltgenme işlemi.

\* A türlerinin en yüksek işgal edilmiş ve en düşük boş molekül orbitalleri (MO) gösterilmiştir (Bard and Faulkner 2001).

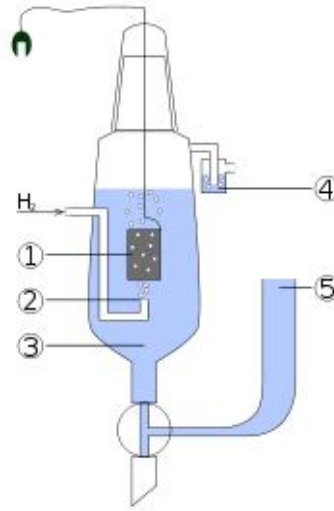
#### 2.3.4. Referans elektrotlar

Referans elektrot, elektrot potansiyel değeri ( $E_{ref}$ ) tam olarak bilinen bir yarı hücredir ve potansiyel değeri, göz önüne alınan çözeltide bulunan analitin veya diğer iyonların konsantrasyonundan bağımsız olup sıcaklık değişmediği sürece değeri sabit kalan elektrotlardır. Sıcaklık değerinde bir artışın olması potansiyelin düşmesine neden olur. Potansiyometrik ölçümlerde daima anot olarak işlem görür. Referans elektrotta olması gereken diğer bir özellik ise küçük akım değerlerinde sabit bir potansiyel oluşmamasıdır. Üç tür referans elektrot vardır. Bunlar,

##### 2.3.4.a. Standart hidrojen elektrot

Bağıl elektrot potansiyel değeri elde etmek için, ilk olarak diğer elektrotlarla karşılaştırma yapabileceğimiz uygun bir referans yarı hücreye sahip olmamız

gerekmektedir. Bu elektrot ise yapımı kolay, tersinir ve tekrarlanabilirliği oldukça yüksek olmalıdır. Bu işlevlerin yerine getirilmesi için hidrojen elektrot kullanılması uygundur. Bu elektrot, değeri bilinen ve sabit hidrojen iyonu aktivitesine sahip sulu bir asit çözeltisine daldırılır. Elektrot yüzeyine sabit basınç değeri altında hidrojen gazı gönderilir ve bu sayede hidrojenle doymuş halde tutulur. Ayrıca standart hidrojen elektrot, tüm elektrotların standart potansiyellerini bulmak için kullanılır. Hidrojen elektrotun potansiyel değeri bütün sıcaklıklarda sıfır olarak kabul edilir.

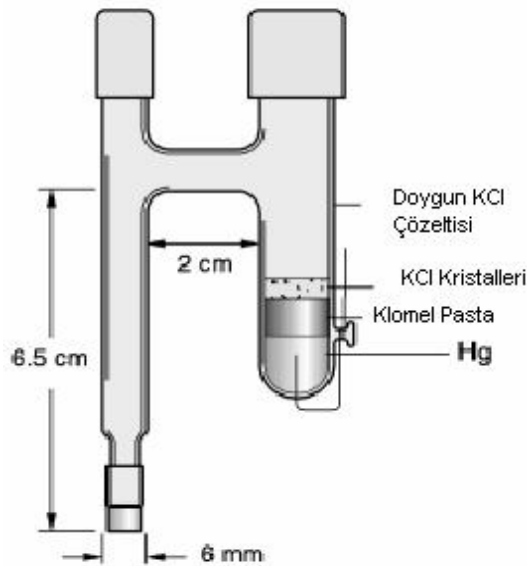


**Şekil 2.10.** Standart hidrojen elektrot

1. Platin kaplı elektrot
2. Dışarıdan verilen hidrojen gazının içeriye dağılım noktası
3. Aktivitesi  $H^+ = 1 \text{ mol dm}^{-3}$  olan asidik çözelti
4. Oksijen ile teması engellemek için yapılmış su tuzağı
5. İkinci yarı hücrenin birleştirileceği kısım böylelikle üzerinde çalışılan elektroda iyonik olarak bir ortam oluşturur.

#### 2.3.4.b. Standart kalomel elektrot

Hazırlanışı bakımından oldukça kolay fakat diğer referans elektrotlar ile karşılaştırıldığında zaman istenmeyen bir dezavantaja; oldukça yüksek sıcaklık katsayısına sahiptir. Yani çok büyük sıcaklık değişimlerinde önem arz etmektedir. Şekil 2.11’de gösterildiği gibi içerdeki tüpte doymuş potasyum klorürdeki civa/ civa (1) klorür pastası bulunmaktadır ve bu küçük gözenekli yapı sayesinde dış tüpte bulunan doymuş potasyum klorür çözeltisi ile temas halindedir. İç tüpteki karışıma daldırılmış bir inert metal elektrot bulunmaktadır. En dışta bulunan tüpün alt kısmındaki gözenekli disk sayesinde analit çözelti ile temas sağlanır. Bu elektrotun elektrot potansiyeli  $25^{\circ}\text{C}$ ’de 0,2444 V’dur.



Şekil 2.11. Standart kalomel elektrot

#### 2.3.4.c. Gümüş/gümüş klorür referans elektrot

Yapısı doymuş bir KCl çözeltisine daldırılmış bir gümüş elektrot ve tüp içerisinde çözeltinin konsantrasyonunu sabit tutmak için katı KCl ve en uç kısımda ise analit çözelti ile iletişimi sağlayan gözenekli bir diskden oluşmaktadır. Elektrot potansiyel değeri oda sıcaklığında  $25^{\circ}\text{C}$ ’de 0,199 V ’dur.

### 2.3.5. Bir Elektrokimyasal hücredeki değişkenler

#### a) elektrot ile ilgili değişkenler

- Yüzey alanı
- Yüzey geometrisi
- Yüzey durumu

#### b) Kütle Transfer Değişkenleri

- Difüzyon ve konveksiyon gibi yayılım şekli
- Yüzey konsantrasyonu
- Kütle tutunması

#### c) çözelti değişkenleri

- Elektriksel olarak aktif türlerin konsantrasyonu
- Diğer türlerin konsantrasyonu
- Çözücü

#### d) Elektriksel değişkenler

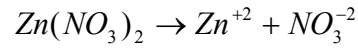
- Potansiyel
- Akım
- Yük miktarı

#### e) dış değişkenler

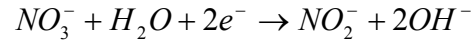
- Sıcaklık
- Basınç
- Zaman

### 2.3.6. ZnO'nun elektrokimyasal büyüme tekniği ile elde edilmesi

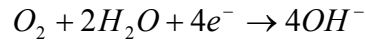
Deiyonize su (DI) içerisine  $Zn(NO_3)_2$  tuzu ilave edilir ise tuz deiyonizesu içerisinde ayrışarak  $Zn^{+2}$  ve  $NO_3^-$  iyonlarını oluşturur.



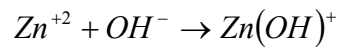
İyonlara ayrışma işleminden sonra aşağıdaki tepkime meydana gelir.



Sisteme dışarıdan ilave edilen oksijen yardımı ile aşağıdaki tepkime oluşur.



Oluşan  $OH^-$  iyonu ile  $Zn^{+2}$  iyonlarının tepkimeye girmesi sonucu



İyonu oluşur.

Son olarak elde ettiğimiz  $Zn(OH)^+$  iyonu ile  $OH^-$  iyonu tepkimeye girerek ZnO maddesini oluşturur.

## 2.4. Yapısal Karakterizasyon

### 2.4.1. Laue yasası

Bazı numunelerin dış yüzeyinden iç yapısının düzeni hakkında bilgi temin edilebilir. Bu tür kristallerin özellikleri optik metotlar ile incelenebilir. Fakat bazı katı maddelerde dış yüzeyinden iç yapısı hakkında bilgi edinme şansımız yoktur. Metallerde ve çoğu kristallerde kristal yapının nasıl olduğu hakkında bilgi edinebilmek için kristal içerisinde ilerleyebilecek ışınlara ihtiyaç duyulur. X- ışınları, küçük dalga boyuna sahip olma özelliklerinden dolayı madde içerisinde kolaylıkla hareket edebilir ve de belli bir kalınlığa kadar olan numunelerden kolaylıkla geçebilirler. Dalga boyu x- ışınının dalga boyu kadar küçük olan nötronlar veya elektronlar kullanılarak da kristalin yapısı hakkında bilgi edinilebilir. X-ışınlarının kristal yapı tayininde kullanılmasının diğer bir nedeni ise yıkıcı olmayıp, kristalin optik ve elektriksel özellikleri üzerinde değiştirici etkisinin bulunmayışıdır.

X- ışını kırınımı ilk olarak 1912 yılında Von Laue tarafından gözlemlenmiştir. Kristal yapıdan geçerken kırınıma uğrayan X- ışınlarının bir dedektör tarafından algılanıp değerlendirilmesi ile hem kristaldeki atom düzlemleri arasındaki mesafeyi ölçmede hem de binlerce atom içeren karmaşık bir moleküldeki atomların konumlarını belirlemede kullanılır (Atkins and Jones 1998).

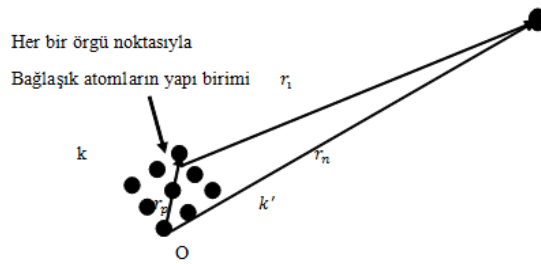
Laue metodu ile aranan cevap verilen bir doğrultuda gelen demetin kristal tarafından hangi doğrultuda saçıldığıdır. Bir kristal üzerine ışık demetini gönderelim. Kristalin dalgaya karşı hareketi liner olsun, yani gelen dalganın frekansı ( $\omega$ ) ve yansıyan dalganın frekansı ( $\omega'$ ) olsun.  $\omega = ck$  ve  $\omega = \omega'$  olduğundan dolayı  $k = k'$  olur.

Serbest uzayda gelen dalganın elektrik alan bileşeni

$$E(x) = E_0 e^{i(kx - \omega t)}$$

İle verilir.

$$E_{sc} = C E(r_p) \frac{e^{ikr}}{r_1} = C E_0 e^{ik \cdot r_p} \frac{e^{i(kr - \omega t)}}{r_1} \quad (2.4.1.)$$



**Şekil 2.12.** Örgü atomlarının vektörel gösterimi

Bu denklem küresel dalga çözümü olup C, saçılan ve gelen dalganın genlikleri oranıdır. Şekil 2.13'e göre

$$r_n = r_1 + r_p \text{ buradan } r_1 = r_n - r_p \text{ olur.}$$

Her iki tarafın karesi alınır ise

$$r_1^2 = (r_n - r_p)^2 = r_n^2 + 2 r_p r_n \cos(r_p, r_n) + r_p^2 \quad (2.4.2.)$$

Yukarıdaki ifadenin karekökü alınıp daha sonra  $r_n$  ortak paranteze alınır ise denklem Şu şekle dönüşür

$$r_1 = r_n \left[ 1 - \frac{2r_p}{r_n} \cos(r_p, r_n) + \left( \frac{r_p}{r_n} \right)^2 \right]^{1/2} \cong r_n \left( 1 - \frac{2r_p}{r_n} \cos(r_p, r_n) \right) + \dots$$

Film ile kristal arasındaki mesafe kristalin örgü parametrelerine göre oldukça fazla olduğu dikkate alınır ise

$$r_1 \cong r_n - r_p \cos(r_p, r_n) \quad (2.4.3)$$

olup burada yüksek mertebeli ifadeler ihmal edilmiştir.

Saçılan dalganın uzaysal faz farkı (2.4.1) ile (2.4.3.) ifadesini bir denklemden birleştirir isek,

$$e^{i(k \cdot r_p + kr)} = e^{ikr_n} e^{i[k \cdot r_p - kr_p \cos(r_p, r_n)]} \quad (2.4.4)$$

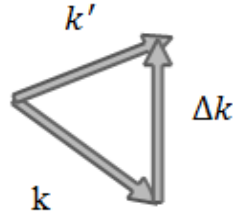
şeklinde yazılabilir. Gelen dalga ile saçılan dalga arasında  $k' = k$  şeklinde bir bağıntı olduğu için ve  $k'$  yönü  $r_n$  yönü olarak alınabileceğinden skaler çarpım kuralları gereği

$$kr_p \cos(r_p, r_n) = k' r_p \cos(r_p, k') = k r_p \quad (2.4.5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradan faz farkı

$$e^{i(k \cdot r_p + kr)} = e^{ikr_n} e^{i[k \cdot r_p - k r_p]} = e^{ikr_n} e^{ir_p \Delta k} \quad (2.4.6)$$

biçiminde yazılabilir.  $\Delta k$  saçılma olayından dolayı dalga vektöründe olan değişimdir.



**Şekil 2.13.** Dalga vektörleri

Şekil 2.13'ten  $\Delta k = k' - k$  ;  $k' = k + \Delta k$

Alınarak (2.4.1.) de verilen saçılma denklemi

$$E_{sc}(r_i) = \left( \frac{CE_0 e^{ikr_n} e^{-i\omega t}}{r_n} \right) \exp(-ir_p \cdot \Delta k) \quad (2.4.7.)$$

Şeklinde ifade edilir. Bir örgü noktasında bulunan atomların belirli bir yörüngedeki toplam saçılmalarını bulmak için (2.4.7) ifadesinin bütün örgü noktaları üzerinden toplamını almak suretiyle ifade edilir. Bu durumda faz vektörlerinin toplamı

$$\alpha = \sum_{mns} \left[ \exp(-ir_{p(mns)} \cdot \Delta k) \right] \quad (2.4.8)$$

Biçiminde yazılabilir. Kristal yapı içerisindeki saçılmalar genellikle yapı içerisindeki elektronlardan kaynaklanmaktadır. Dolayısı ile dV hacim elemanından olan saçılma, lokal elektron yoğunluğu  $n(P)$  ile orantılı olacağından saçılma genliği  $\int dV n(\rho) e^{i\rho \Delta k}$  ile orantılı olarak değişmektedir. Bir kristal göz önüne alalım boyutları sonlu ve paralel kenar şeklinde bir prizma olsun. her bir örgü noktasında  $\rho_{mnp} = ma + nb + pc$  ile tanımlanan aynı saçılma merkezleri olsun. bura da m,n,p tam sayı olup 0'dan M' ye kadar değişir. Bu durumda kristal yapı  $M^3$  tane primitif hücre ihtiva eder ve meydana gelen toplam saçılma

$$\alpha = \sum_{mns} \exp[-i(ma + nb + sc).\Delta k]$$

orantılı olur. Burada a saçılma genliğidir. Örgü noktaları üzerinden toplam alınır ise,

$$r_{p_{mns}}.\Delta k = (ma + nb + sc).\Delta k = 2\pi \quad (\text{tam sayı}) \quad (2.4.9)$$

Olduğu zaman maksimumdur.  $\Delta k$ , (2.4. 1) ifadesini sağladığı zaman  $M^3$  örgü noktalı bir kristalin saçılma genliğinin toplamı

$$a_{\max} = M^3 \quad (2.4.10)$$

olur.

$$a.\Delta k = 2\pi h \quad ; \quad b.\Delta k = 2\pi k \quad ; \quad c.\Delta k = 2\pi l \quad (2.4.11)$$

ifadelerinin üçünü birden sağlar ise,  $\Delta k = k' - k$  ifadesinde (2.4.9) difraksiyon denklemini sağlar. Bu denklemler Laue denklemleri diye adlandırılır.

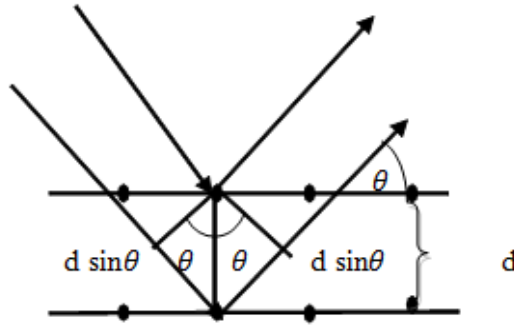
X- ışını bir madde üzerine doğrudan gönderilir ve bunu sonucunda girişim oluşması olayına difraksiyon denir. Gönderilen x-ışını kristal yapıdaki aralarında a kadar mesafe bulunan atom topluluğu ile karşılaştığı zaman her bir atom ikinci bir atom kaynağı olarak hareket eder. Difraksiyon teorisine göre belirli yönde gönderilen dalgalar kuvvetlenerek daha yüksek mertebeden kırınımına uğramış ışınlar yayarlar. Kristal örgüdeki komşu atomlara gelen ve buradan yansıyan ışınların kat ettiği yollar arasında dalga boylarının tam katları kadar bir yol farkı oluşur.

Difraksiyona uğramış ışınlar, bir fotoğraf filmi üzerine düşürülür ise, koyu bir zemin ve parlak lekelerden meydana gelen difraksiyon desenleri oluşur. X- ışınları katı kristal üzerine belli bir açı ile gönderilir ise, yapıcı girişim ve bunun sonucunda ise parlak

lekeler elde edilir. Böylece bir difraksiyon deseni oluşturulmuş olur (Atkins and Jones 1998).

Difraksiyon desenindeki oluşan ilk parlak leke için, atom düzlemleri arasındaki mesafeyi ( $d$ ) olan şekil (2.14) X- ışınlarının dalga boyu  $\lambda$  ve kristale geliş açısı ( $\theta$ ) ile belirtirsek bu değişkenler arasında

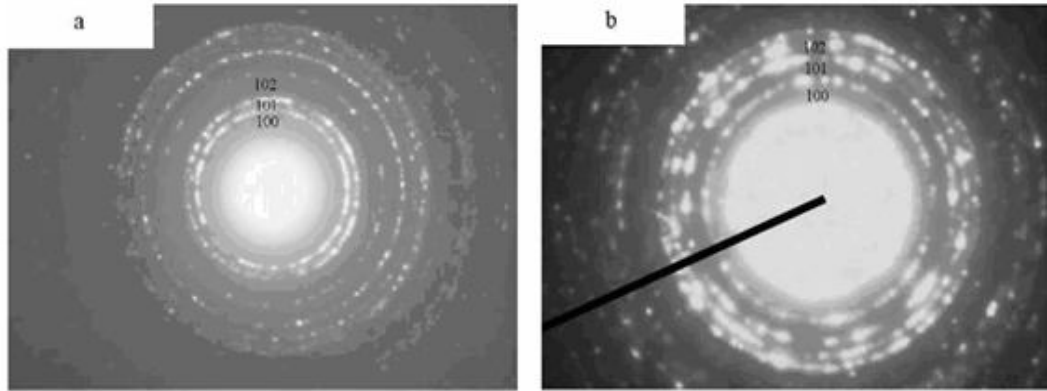
$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (n=1,2,3..)$$



**Şekil 2.14.** Kristal düzleminde bragg kırınımı

bağıntısı vardır ve bu Bragg Kanunu olarak tanımlanır (Atkins and Jones 1998).

Bragg bağıntısı, kristal yapı içerisindeki atom düzlemleri arasındaki mesafeyi hesaplamada kullanılır.  $\sin \theta$  değeri -1 ile 1 arasında değer aldığı için, bu yolla ölçülebilecek en küçük  $d$  mesafesi  $1/2\lambda$  olacaktır. Bu yüzden kristallerdeki difraksiyon çalışmalarında görünür ışık kullanılmaz. Kristalleri incelerken x-ışını kullanılmasının sebebi de budur; x-ışınlarının dalga boyları,  $d$  mesafeleri ile aynı mertebededir (Atkins and Jones 1998).



**Şekil 2.15.**  $T=65^{\circ}\text{C}$ ,  $V= -0,9\text{V}$  ve  $0,1\text{ M Zm(NO}_3)_2$  büyütme parametreleriyle oluşturulan ZnO ince filmin elektron kırınım görüntüleri (Weng *et al.* 2005).

## 2.5. P-N Eklemler

Yarıiletkenler p ve n tipi olarak sınıflandırılır. Yarıiletkenlerde donör ve akseptör gibi katkılar bulunmaktadır. N-tipi (veya donör tipi) yarıiletkenlerde elektron-boşluk çiftlerinin jenerasyonundan başka, elektronların donör düzeyinden iletim bandına geçişleri meydana gelmektedir. Bu olay sonunda n-tipi yarıiletkende elektronlar oluşmaktadır. N-tipi yarıiletkende, elektronlar çoğunluk yük taşıyıcıları, boşluklar ise azınlık yük taşıyıcılarıdır.

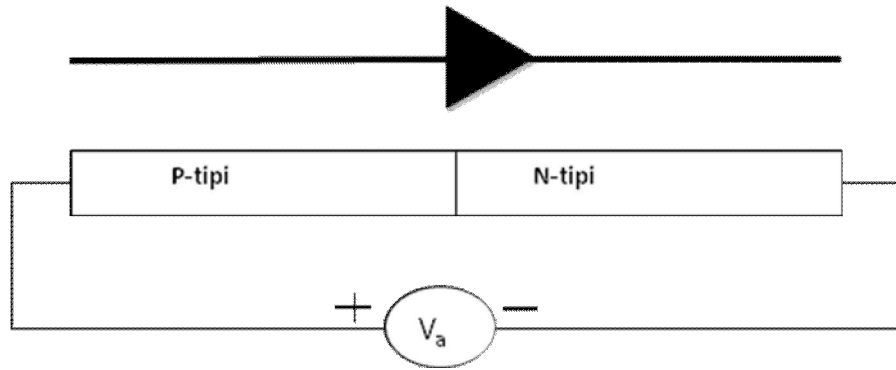
p- tipi yarıiletkenlerde ise elektron-boşluk jenerasyonunun yanı sıra elektronlar donör düzeyinden iletim bandına ve ek olarak valans bandından akseptör düzeyinde elektron geçişleri olmaktadır. Bu işlemler sonucunda p-tipi yarıiletkenlerde boşluklar oluşur. P-tipi yarıiletkenlerde, boşluklar çoğunluk yük taşıyıcıları, elektronlar ise azınlık yük taşıyıcıları olarak tanımlanır.

Donör konsantrasyonu akseptör konsantrasyonundan fazla ise ( $N_d > N_a$ ) ise yarıiletken n-tipidir ve iletim bandına ( $N_d - N_a$ ) tane elektron geçebilir. Geride kalan donör atomlarının elektronları ise daha düşük enerji seviyesinde bulunan akseptör seviyesine

geçerler ve bu olay sonucunda eşit sayıda pozitif yüklü donörler ve negatif yüklü akseptör iyonları oluşmaktadır.

Tersi durumda ( $N_d < N_a$ ) ise yarıiletken p-tipidir. ( $N_a - N_d$ ) akseptör iyonları valans bandından elektronları kabul eder. ( $N_d - N_a$ ) ve ( $N_a - N_d$ ) farkları donör ve akseptör katkılarının etkin konsantrasyonu olarak tanımlanır.

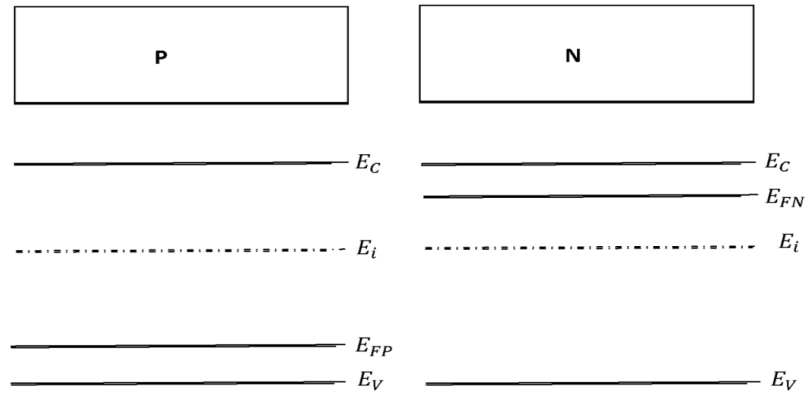
İki farklı tipli (p- tipi ve n- tipi) yarıiletkenler veya p-n eklemler mikroelettronik devre elemanlarının temelini oluşturmaktadır. İki kimyasal aynı malzemeden oluşan, fakat farklı iletkenlik tipine sahip olan kontak, elektron-boşluk eklemi veya p-n eklemi olarak tanımlanır. P-n eklemler, elektrik sinyallerin liner olmayan dönüşümü (doğrultucu, modülasyon, jenerasyon vb), ışının elektrik enerjisine dönüşümü için (fotopiller, güneş pilleri) mikroelettronikte ve bir çok alanda geniş olarak kullanılmaktadır.



**Şekil 2.16.** PN eklemi

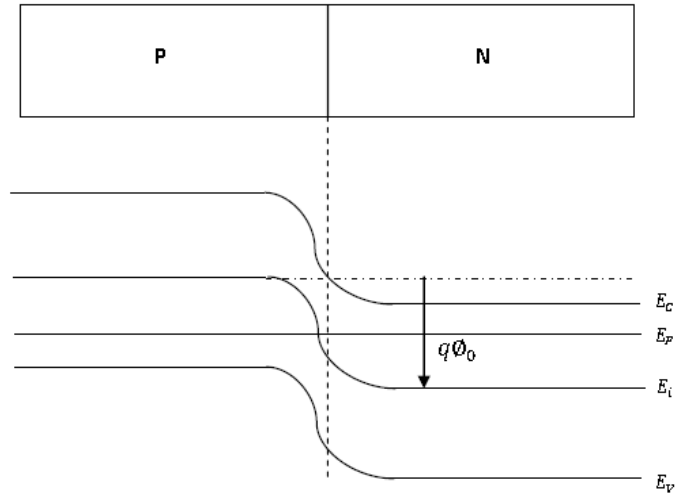
PN eklemi bir beslemde akım akışına izin verirken diğer beslemde izin vermez. Bu yüzden akımı doğrultur. Eğer P tarafa uygulanan potansiyel N tarafa uygulanan potansiyelden daha büyükse uygulanan potansiyel " $V_a$ " pozitif olur  $V_a$  pozitif ise diyottan akım geçer negatif ise akım geçmez. Eğer  $V_a > 0$  ise diyodun düz beslemde olduğu,  $V_a < 0$  ise ters beslemde olduğu söylenir.

p- tipi ve n- tipi yarıiletkenlerden oluşmuş kontağın denge durumunda (yani dışarıdan elektrik gerilimi uygulanmadığı durum) ve yük taşıyıcılarının konsantrasyon dağılımlarının belirgin olduğu durumda p ve n tipi yarıiletkenler için enerji band diyagramları şekil 2.17’de verilmiştir.



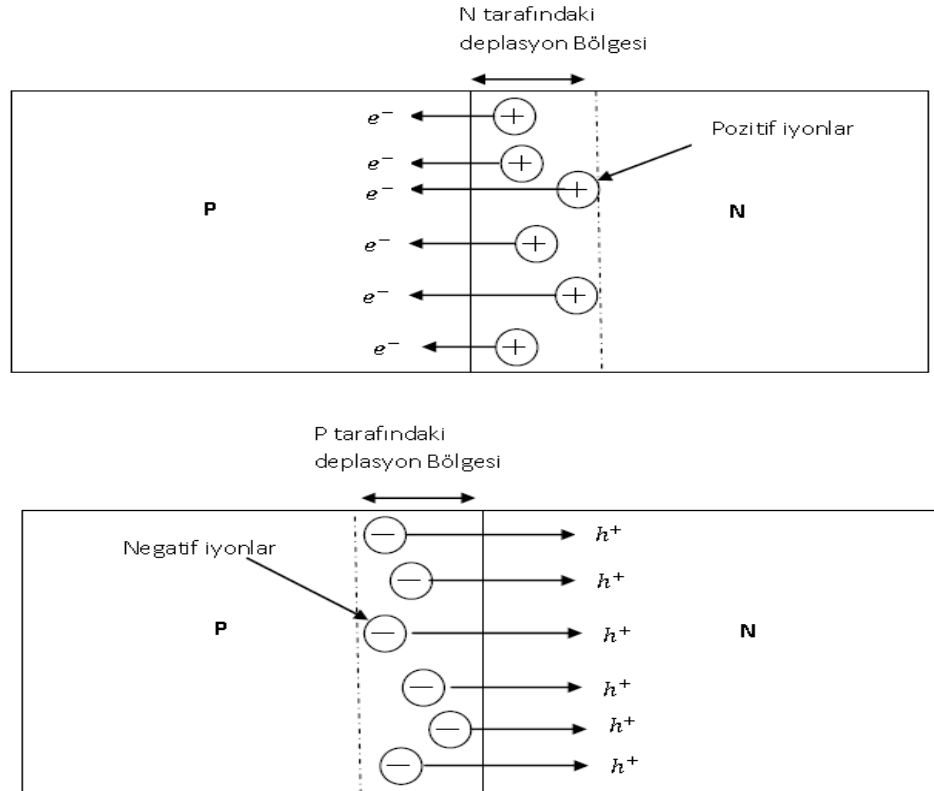
**Şekil 2.17.** p ve n tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı

p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler birbirleri ile temasa getirildiği zaman boşluk ve elektronların konsantrasyon gradyentinden dolayı boşluklar p-tipi tarafından n-tipi tarafına elektronlar ise n-tipi tarafından p-tipi tarafına doğru düfúzyon ile geçerler. Yük yer değişimi sonucu eklem potansiyeli “  $\phi_0$ ” olarak adlandırılan bir iç potansiyel ekleme şekil 2,18’de gösterildiği gibi oluşur. Bir -q çarpanı ile eklem potansiyeli enerji bantlarının bükülmesine eşit olur.



**Şekil 2.18.** PN eklemi ve enerji bant diyagramı

N tipi bölgeden P tipi bölgeye difüze olduklarında geride iyonlaşmış donör atomları bırakırlar. Bu atomlar kristal örgü noktalarına yerleşir ve kristal içerisinde hareket etmezler. Bu pozitif yüklü iyonların bulundukları yer deplasyon bölgesi olarak adlandırılan bir uzay yükü bölgesi oluşturur. Çünkü bu bölge elektronlardan arındırılmıştır. Bu olay sonunda p- tipi tarafında hacimsel olarak bir negatif yük yoğunluğu n -tipi tarafında ise pozitif yük yoğunluğu oluşur. Deplasyon bölgesindeki bu pozitif yükler elektronları çeker öyle ki denge durumunda elektronları P-tipi bölgeye iten difüzyon kuvveti, elektronları N-tipi bölgeye geri çağıran iç elektrik alan kuvvetiyle tam olarak dengelenir. Benzer şekilde P-tipi bölgeden N-tipi bölgeye hollerin difüzyonu P-tipi materyalde bir deplasyon bölgesinin oluşmasına neden olur. Bu bölge hollerden arındırılmıştır ve negatif iyonlardan meydana gelir.



**Şekil 2.19.** Elektron ve hollerin difüzyonu sonucu deplasyon bölgesinin oluşumu

Deplasyon bölgelerinin genişlikleri:

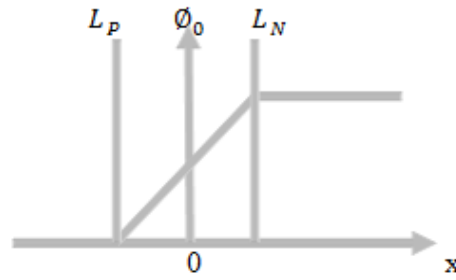
P tipi kısım için

$$l_{po} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{\Phi_o N_d}{N_a (N_a + N_d)}}$$

N tipi kısım için

$$l_{no} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{\Phi_o N_a}{N_d (N_a + N_d)}}$$

Deplasyon bölgesinde yüklerin karşılıklı kutuplaşması sonucu bir elektrik alan meydana gelir. p-n eklemının iç elektrik alanı olarak adlandırılan bu alan, kontakın n-bölgesinden p-bölgesine yönelmiştir, elektron ve boşlukların sonraki dağılmalarını engellemektedir. Sonuçta, elektronların difüzyon akışı (n-tipi yarıiletkeniden p-tipi yarıiletkenine doğru) elektrik alan etkisiyle meydana gelen karşı yöndeki elektronların sürüklenme akışı ile dengelenmektedir. Aynı şekilde boşlukların difüzyon akışı ve karşı yöndeki boşlukların sürüklenme akışı dengelenmektedir. Böylece denge durumunda yarıiletken boyunca Fermi enerji seviyesi sabittir ve p-n geçiş bölgesinde enerji bandlarının eğimi meydana gelmektedir.



**Şekil 2.20.** Elektriksel potansiyel dağılımı

p-n eklemında potansiyel engel yüksekliği Fermi seviyeleri farkı ile belirlenir ve potansiyel engelin en büyük değeri yarıiletkenin yasak band genişliği ile ( $E_g$ ) sınırlanmaktadır.

$$qQ_0 = E_g \quad (2.4.1.)$$

p-n eklemının hacimsel yük bölgesinin kalınlığı ( $L_0$ )

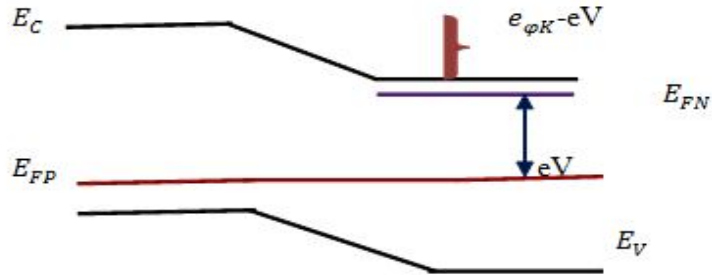
$$L_o = L_p + L_n \quad (2.4.2)$$

olup, taşıyıcıların konsantrasyonu ile ters orantılıdır. Eklemdeki boşluk konsantrasyonu elektronların konsantrasyonundan büyük olması halinde ( $p > n$ ) sebebi ile eklemde  $p$  bölgesindeki hacimsel yük bölgesinin kalınlığı ( $L_p$ ),  $n$  bölgesindeki hacimsel yük bölgesinin kalınlığından ( $L_n$ ) daha küçüktür  $L_p < L_n$  dir.

$$L_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(n+p)}{enp}}\phi_K \quad (2.4.3.)$$

Denklem 2.4.3. incelendiği zaman yük taşıyıcıların konsantrasyonu arttıkça hacimsel yük bölgesinin kalınlığı azalmaktadır. Hacimsel bölgedeki serbest yük taşıyıcıların konsantrasyonun küçük olması nedeni ile bu bölgenin direnci bölge dışındaki kısımlara göre çok büyüktür. Sonuç olarak p-n eklemi iki küçük dirençli bölge arasında bulunan daha büyük dirençli, hacimsel yüklü bölge olarak tanımlanabilir.

Şekil 2.19 ve şekil 2.20'den anlaşıldığı üzere çoğunluk yük taşıyıcıların sınırdan geçişlerinin olabilmesi için ( $e\phi_K$ ) yüksekliğindeki potansiyel engeli aşılmalıdır. Azınlık yük taşıyıcıların geçişleri p-n eklemının elektrik alan etkisi ile oluşmaktadır. Termodinamik denge durumunda, çoğunluk yük taşıyıcıların difüzyon akışı ( $J_{pd}$  p- tipi yarıiletken ve  $J_{nd}$  n-tipi yarıiletken) azınlık yük taşıyıcıların sürüklenme akışı ile ( $J_{ns}$  p-tip yarıiletken ve  $J_{ps}$  n-tip yarıiletken) denkleştir.  $J_{pd} = J_{ns} = J_{ps} = J_{nd}$  durumunda ise p-n ekleminden geçen akım sıfırdır. p-n eklemine dışarıdan bir gerilim uygulandığı zaman, eklemdeki yük taşıyıcıların difüzyon akışı ve sürüklenme akışları dengesi bozulur ve eklemde akım geçişi olur.

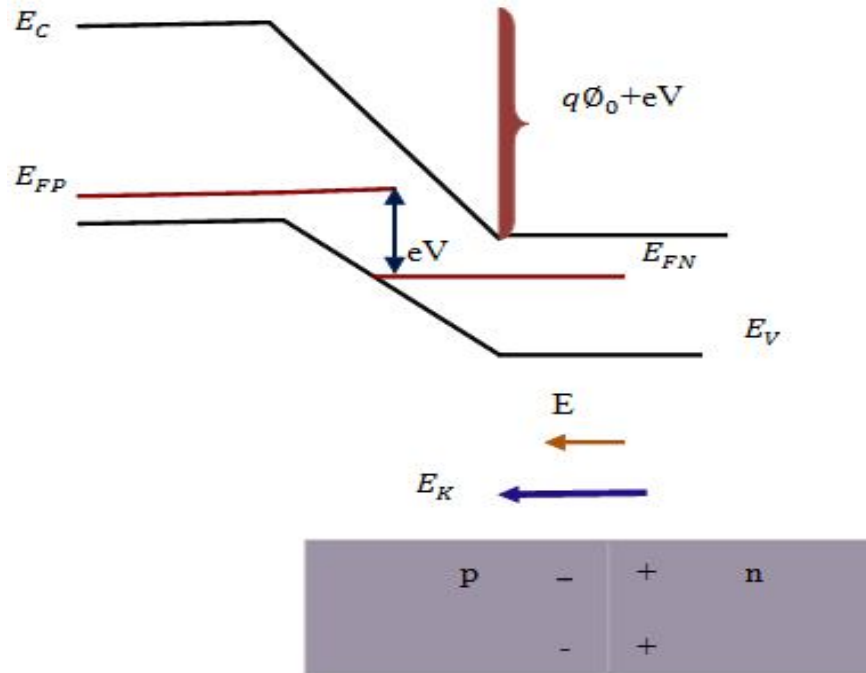


**Şekil 2.21.** Doğru belsem

p-n eklemine doğru gerilim uygulandığı zaman yani p tipi kısmı (+), bu gerilim ile oluşan elektrik alanın yönü, eklemın kontak elektrik alanına terstir. Bu yüzden p-n eklemındaki toplam elektrik alan şiddeti azalmaktadır. Doğru belsem sayesinde, geçiş bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği ( $e\phi_K - eV$ ) kadar azalmaktadır (Şekil 2.21.).

Bu durumda çoğunluk yük taşıyıcıların büyük bir kısmı potansiyel engeli aşabilmektedir ve sonucunda eklemde büyük akım oluşmaktadır.

Doğru belsemde azınlık yük taşıyıcıların sayısında bir artış olur. Boşlukların p- tip bölgeden n- tipi bölgeye, elektronların n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye geçişlerine injeksiyon denir. Uygulanan doğru gerilim artırıldıkça p-n ekleminden komşu bölgelere injeksiyon olan azınlık yük taşıyıcı konsantrasyonu artacak ve bunun sonucunda eklemde geçen akımda keskin bir artış olacaktır.

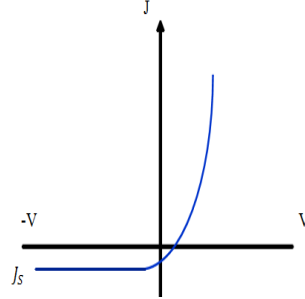


**Şekil 2.22.** Ters yönde gerilim uygulandığında

p-n eklemine ters yönde gerilim uygulanır ise ters gerim ile oluşan elektrik alanın yönü eklemnin elektrik alan yönü ile aynıdır. Yani, toplam elektrik alan şiddeti büyümüştür ve bunun sonucunda çoğunluk yük taşıyıcıları için potansiyel engelin yüksekliği ( $q\phi_0 + eV$ ) kadar artmıştır. Ve ters belsem sonucu p-n eklemnin kalınlığı ve bunun sonucunda direnci artmıştır. Bariyer yüksekliğinin artması sonucu çoğunluk yük taşıyıcıların komşu kısımlara geçişi zorlaşmıştır (Şekil 2.22).

Azınlık yük taşıyıcıları için ise geçiş bölgesinde potansiyel engeli yoktur ve burada oluşan elektrik alan etkisi ile azınlık taşıyıcıları kontak bölgesini çok çabuk bir şekilde geçerler. Azınlık yük taşıyıcıları, p-n eklemnin alanının etkisiyle komşu bölgeye sürüklenmesi, ekstraksiyon olarak adlandırılır. Azınlık taşıyıcıların konsantrasyonu küçük olması nedeni ile ters yönde kutuplanan p-n eklemden küçük değerli ters akım ( $J_s$  doyma akımı) geçmektedir. Bu olaylar sonucunda uygulanan ters gerilimden dolayı p-n eklemden çoğunluk yük taşıyıcıların akımı denge durumuna kıyasla azalmakta azınlık yük taşıyıcıların akımı ise değişmemektedir. Eklemden geçen toplam akımın

yönü n tipinden p tipine doğrudur. Ters gerilim arttıkça ters akım biraz artmakta daha sonra sabitleşmektedir (doyma akımı).



**Şekil 2.23.** p-n eklemünde akım voltaj karakteristiği

## 2.6. Atomik Kuvvet Mikroskobu

Atomik kuvvet mikroskobu (AKM), 1986 yılında geliştirilen yüzey topografisini angstrom ( $\text{\AA}$ ) mertebesinde 100 mikrona ( $\mu$ ) kadar görüntüleyebilen bir yeni dönem mikroskoptur. Bu cihaz sayesinde moleküller arası nano Newton(nN)boyutlarında kuvvetlerin ölçülmesi mümkün olmaktadır. Bu mikroskobun en büyük avantajı, özel bir hazırlık süreci olmadan incelenmek istenen numuneler doğrudan ve hemen hemen her yerde görüntülenebilmesidir (Binning *et al.* 1986). Bu özellikleri sayesinde malzemelerin nanometre boyutlarında yüzey özelliklerinin incelenmesi amacıyla, malzeme ile ilgili çok yaygın bir teknolojik alanda uygulama alanı bulmuştur.

Atomik kuvvet mikroskobu, özellikle gıda, çevre ve tıp teknolojileri başta olmak üzere elektronik, telekomünikasyon, biyomedikal, kimyasal, otomotiv, uzay havacılık,ve enerji gibi alanları etkileyen geniş bir teknoloji aralığında proses ve malzeme problemlerini çözmek amacıyla kullanılmaktadır.

İncelenen malzemeler arasında ince ve kalın film kaplamaları, seramikler, alaşımlar, camlar, sentetik ve biyolojik zar yapıları, metaller, polimerler ve yarı iletkenleri sayabiliriz. AKM ile, aşınma, yapışma, temizleme, çürüme, pürüzlendirme, sürtünme,

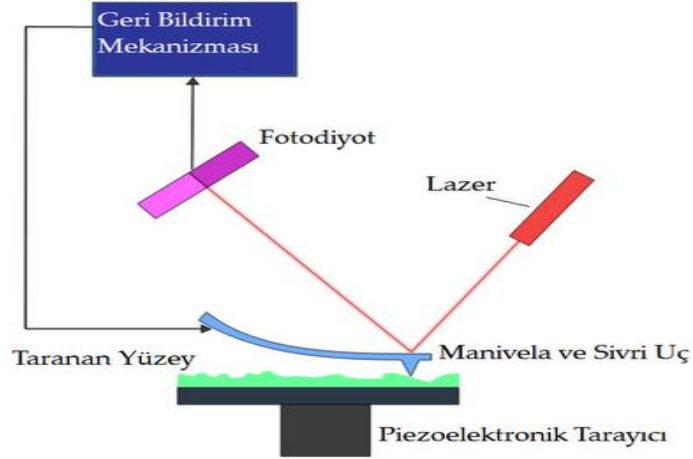
kayganlaştırma, kaplama ve cilalama gibi işlemlerinin materyal üzerindeki sonuçları da gözlemlenebilmektedir.

Çok hassas kantileverin yüzeyi taraması sonucu üç boyutlu görüntü alınır, yine aynı hassas kantilever ile atomik seviyedeki kuvvetleri piko-newton (pN) mertebesindeki hassasiyetle ölçme imkanı sunar. Bu özellikleri sayesinde moleküllerin görüntülenmesi hatta yüzeydeki atomları tek tek tanımlanmasını sağlar. Ayrıca kullanılan kantileverlerin kimyasal olarak modifiye edilerek kullanılması ile bir çok nanoteknolojik uygulamada başarılı olunmuştur. Özellikle kantilevere tutturulmuş atomik boyuttaki iğneye çeşitli moleküllerin bağlanabilmesi birçok spesifik uygulamayı da beraberinde getirmiştir. Bu uygulamaların en önemlilerinden biri de AKM'nin afinite sensör çalışmalarında kuvvet ölçümü yapılarak kullanım imkanının olmasıdır. Ayrıca AKM'nin bir ön hazırlık evresi bulunmadığı için biyolojik moleküllerin üç boyutlu yapısı bozulmadan bulundukları ortamda görüntülenmesini sağlamaktadır. Bu özeliği sayesinde kendisine rakip olabilecek SEM ve TEM gibi mikroskopik tekniklere önemli bir üstünlük sağlamıştır. Numunenin iletken olma şartı da yoktur yani, yalıtkan numuneler içinde kullanım imkânı vardır.

Biyosensör, biyolojik bir eleman içeren konsantrasyona duyarlı, tersinir ölçüm aleti olarak tanımlanabilirler. Biyosensörler biyolojik olarak aktif materyaller içeren ve biyolojik ortamlardaki çeşitli maddelerin tanımlanmasında kullanılan sistemlerdir (Canh 1993). AKM sistemi kullanılarak biyolojik moleküller arasındaki etkileşim kuvvetlerinin ölçülmesi mümkündür (Stuart and Hlady 1999; Harada *et al.* 2000; Wu, *et al.* 2001).

AKM sisteminde kuvvete karşı oldukça duyarlı, bir ucu iğneli denge çubuğu tüm numune yüzeyi üzerinde tarama yapar. Denge çubuğu ve numune arasında oluşan kuvvet, denge çubuğunda küçük hareketlenmelere neden olur ve bu küçük hareketlenmeler optik araçlarla gözlemlenir. İğne ucunun veya bazen de numunenin hareketi bir piezoelektrik tüp ile oluşturulur. Tarama esnasında iğne ucunda oluşan

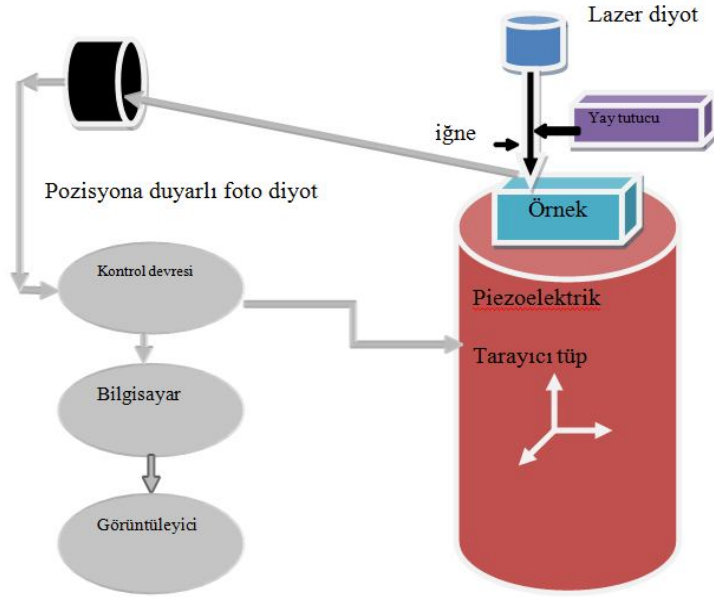
kuvvet, ucun aşağı ve yukarı hareketi sağlanarak sabit tutulur ve bu topografik bilgi sağlar.



**Sekil 2.24.** Bir optik demet sapma dedektörünün yandan görünüşü.

\*Ucun numune yüzeyini taraması sırasında sistem, 0,01mm'ye duyarlıdır.

Ucu tutan denge çubuğunun sapmasının tayininde kullanılan en yaygın yöntemi şematik olarak göstermektedir. Bir lazer demeti denge çubuğu üzerindeki bir noktadan yansıtılarak, hareketi tayin eden parçalara ayrılmış bir fotodiyota ulaşır. Daha sonra fotodiyod çıkışı, uca uygulanan kuvveti kontrol ederek kuvvetin sabit kalmasını sağlar. Baska bir deyişle optik kontrol sistemi, taramalı tünelleme mikroskobunda tünel akımını kontrol eden sisteme benzer.



**Sekil 2.25.** Atomik kuvvet mikroskobu için blok şema

Şekil 2.25’de atomik kuvvet mikroskobunun genel semasını göstermektedir. Hareket ettirici tüplü piezoelektrik sistem, iğne ucunun altında bulunan numunenin x, y ve z yönlerinde üç boyutta hareket etmesini sağlar. Lazer demet dedektöründen gönderilen sinyal, daha sonra numune kontrolünü sağlayacak piezoelektrik transdusere geri besleme şeklinde ulaşarak numune ile uç arasında olan kuvveti sabit tutmak için numunenin aşağı, yukarı hareket etmesini sağlar.

Bir atomik kuvvet mikroskobunun performansı, denge çubuğu ve çubuğun uç kısmında bulunan iğnenin fiziksel nitelikleri ile yakından ilgilidir. AFM’ler ilk yapıldığında metal folyodan oluşmuş çubuklara sahiptiler. Uçları ise, küçük elmas parçalarından yapar ve sonra elle ucu denge çubuğuna yapıştırırlardı. Günümüzde ise gelişen teknolojinin getirdiği yeniliklerin yardımı ile yarı iletken üretim yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemde denge çubuğu/uç sistemi silisyum, silisyum oksit veya silisyum nitrür tek çiplerinin aşındırılmasıyla bir bütün olarak tek parça şeklinde elde edilmektedir. Denge çubukları ve uçların boyutları oldukça küçüktür. Denge çubukları ortalama olarak on, yirmi mikrometre uzunluğunda, genişlikleri ise daha az olup yaklaşık bir mikrometre

kalınlığındadır. Piramit ve koni şeklindeki uçların yüksekliği ve taban genişliği birkaç mikrometredir.

Tarama işleminin bazı dezavantajları vardır. İğne ucunun tarama işlemi boyunca numune yüzeyi ile sürekli temas içinde olması, ayrıca ucun aşağı yukarı doğru hareketini sağlamak için uygulanan kuvvetin dikkate değer olması yüzeyin hasar görmesini ve bunun sonucunda da görüntünün bozulmasına neden olur. Bu problem özellikle biyolojik numuneler ve polimerler gibi yumuşak, hassas malzemelerde oldukça önem arz etmektedir. Bu sorunu çözmek için tarama işlemi sürecinde uç numuneye çok kısa sürelerle periyodik olarak teması sağlanmakta ve tekrar yüzeyden uzaklaştırılmaktadır.

Titreşimli (tapping) mod adı verilen bu teknikte denge çubuğu birkaç yüz kilohertz'lik bir frekansla salınım yaparak yüzeye çarpar. Bu salınım hareketi sabit bir sürücü kuvvetle periyodik olarak sağlanır ve genlik sürekli olarak gözlemlenir. Denge çubuğu, her salınım döngüsünde yüzeye temas eder. Bu teknik sabit temas modun da görüntüsü alınamayan veya çok zor alınan çeşitli malzemenin görüntüsünü başarılı bir şekilde elde etmek için kullanılır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEMLER

#### 3.1. Çözelti Hazırlama

Çözelti konsantrasyonu elektrokimyasal büyütme tekniğinde önemli bir yer tutar. Çünkü yüksek yada düşük çözelti konsantrasyonu film kalitesinde oldukça etkilidir. Film kalınlığı ve büyüme oranı üzerinde istenmeyen olumsuz etkilere neden olabilir.

ZnO elde etmek için kullanılan çözelti için çözücü madde olarak 100 ml DMSO (dimetilsülfatoksit) ve deiyonize su kullanılmıştır. DMSO yüksek dielektrik sabitine (46,5),  $189^{\circ}\text{C}$  ' de kaynama ve  $18,5^{\circ}\text{C}$  ' de donma sıcaklığına ve 1,095 g/cm yoğunluk değerine sahiptir (Izutsu 2002). Susuz ve protonsız yüksek dielektrik sabitine sahip olan DMSO çözeltideki ZnO oluşumunu kolaylaştırmakta ve  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  oluşumunu mümkün olduğunca sınırlamaktadır (Ghosh *et al.* 2009) ve elektrolit olarak  $0,05\text{M Zn}(\text{NO}_3)_2 + 6\text{H}_2\text{O}$  ve  $0,1\text{M LiClO}_4$  kullanılmıştır. Bu molarite değerleri M olmak üzere

$$M = \frac{n}{V} \quad (\text{birim hacim başına düşen mol sayısı}) \quad (3.2.1)$$

$$n = \frac{m}{M_A} \quad (\text{birim molekül başına düşen kütle miktarı}) \quad (3.2.2)$$

$$m = M \times M_A \times V \quad (3.2.3)$$

ifadesi elde edilir. Denklem 3.2.1, 3.2.2 ve denklem 3.2.3 kullanılarak  $0,05\text{M Zn}(\text{ClO}_4)_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın 100 ml çözelti için kütle miktarı 2,79 g bulunmuştur. Aynı formüller kullanılarak 0,1 M  $\text{LiClO}_4$  hazırlamak için 0,16 g  $\text{LiClO}_4$  kullanılmıştır.

### 3.2. Büyütme işleminde kullanılan malzemelerin temizliği

a) Karşıt elektrot olarak Zn kullanılmıştır.Çözeltide Zn elektrot kullanılmasının nedeni, büyütme esnasında çözeltideki Zn miktarında bir azalma olduğunda Zn karsıt elektrot çözeltiye Zn sağlaması için kullanılabilir(Yoshiba et al.2004).

%99,9 saflığa sahip ZnO elektrotu büyütme işlemi öncesi aşağıdaki sıralama doğrultusunda temizleme işlemine tabi tutulmuştur.

- 3 dk trikloretilen
- 3 dk deiyonize su
- 3 dk aseton
- 3 dk deiyonize su
- 3 dk metanol
- 3 dk deiyonize su

b) Atlık malzeme olarak p-GaAs kullanılmıştır. Taban malzeme kullanılmadan önce aşağıdaki iki farklı temizleme işleme tabi tutulmuştur.

Birinci aşamada;

- ultrasonik banyoda 5 dk trikloretilen
- 5 dk deiyonize su

- Ultrasonik banyoda 5 dk aseton
- 5 dk deiyonize su
- Ultrasonik banyoda 5 dk metanol
- 5 dk deiyonize su

İkinci aşamada;

$H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$  bileşiklerini içeren (3:1:1) oranlarında bir çözelti hazırlandı ve numune çözelti içerisinde bir dakika süresince bekletildi. Ayrıca bu süreç boyunca çözelti sürekli olarak deiyonize su ile seyreltme işlemine tabi tutuldu. Deiyonize su ile bolca yıkanan numune üzerinde su buharı kalmaması için yaklaşık bir dakika boyunca azot gazı ile kurutularak kullanıma hazır hale geldi.

### 3.3. Büyütme Parametreleri

#### 3.3.1. Potansiyel

Elektrokimyasal büyütme tekniğinde uygulanan potansiyel değerinin oluşan kristal yapı üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için -0,9 V'dan başlayarak 0,1 V'luk artışlarla -1V, -1,1V, -1,2V değerlerinde büyütme işlemi yapıldı.

#### 3.3.2. Sıcaklık

Büyütme işlemi oda sıcaklığından başlayarak  $130^{\circ}C$  'ye kadar  $10^{\circ}C$  'lik artışlar ile yapılmıştır ve en iyi büyümenin  $130^{\circ}C$  'de olduğu gözlemlenmiştir. Büyütme

işlemlerinde uygulanan dört potansiyel değerleri için sıcaklık değeri dışarı ile hiçbir etkileşme olmadan  $130^{\circ}\text{C}$  'de tutulmuştur.

### 3.3.3. Zaman

Büyütme işlemi süresi için 5 dk başlayarak beşer dakikalık artışlar ile deneme yapılmış olup en iyi büyütme işleminin bir saatte olduğu görülmüştür ve bütün potansiyel değerleri için büyütme süresi 1 saat (60 dk) alınmıştır.

### 3.3.4. pH

Çözeltinin pH değeri literatürde genellikle 5,2 olarak verilmektedir (Lee and Tak 2001). Bu pH değeri direk olarak oluşturulan çözeltinin pH değerine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla pH değeri 5,2 olarak alınmıştır.

### 3.3.5. Çözelti konsantrasyonu

Çözelti konsantrasyonu Zn kaynağı olarak kullandığımız  $\text{ZnCl}_2$  ve  $\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2$  tuzlarından en iyi büyümenin  $\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2$  ile gerçekleştiği görülmüştür. 0,01M' dan 0,1M'a kadar 0,01M' lık adımlarla değiştirilmiştir ve elde edilen bulgulara bakılarak en iyi büyümenin 0,05M değerinde olduğu görülmüştür. Bu yüzden çözelti konsantrasyonu her çözelti için sabit tutulmuştur.

### 3.3.6. Karşıt elektrot

Tüm büyütme işlemlerinde karşıt elektrot olarak %99,9 saf Zn elektrot kullanılmıştır.

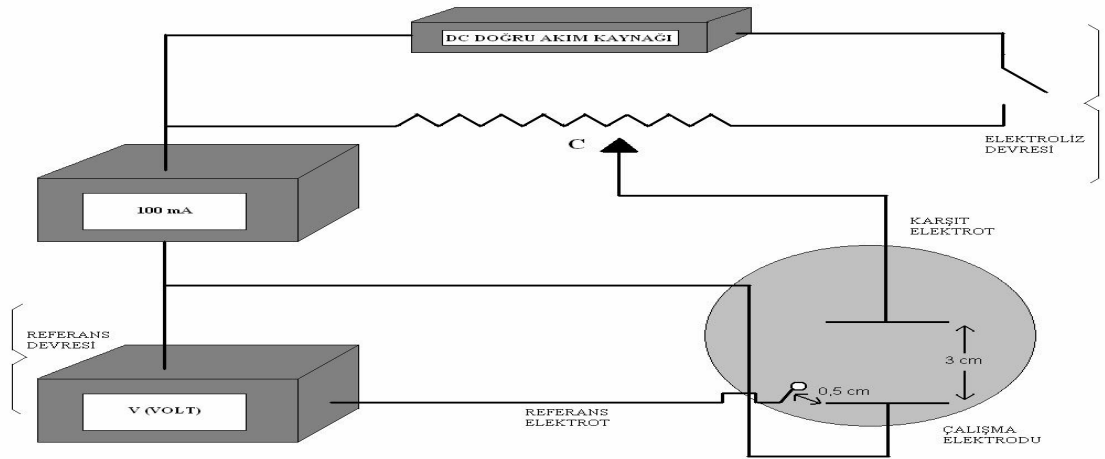
Büyütme parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 3.1. Büyütme parametreleri

| ZnO No | pH | Sıcaklık (T, °C) | Potansiyel (V, Volt) | Büyütme Süresi (t, saniye) | Molarite $\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ | Molarite $\text{LiClO}_4$ |
|--------|----|------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1      | 6  | 130              | -0,9                 | 3600                       | 0,05                                                       | 0,1                       |
| 2      | 6  | 130              | -1                   | 3600                       | 0,05                                                       | 0,1                       |
| 3      | 6  | 130              | -1,1                 | 3600                       | 0,05                                                       | 0,1                       |
| 4      | 6  | 130              | -1,2                 | 3600                       | 0,05                                                       | 0,1                       |

### 3.3.7. Deney düzeneği

Büyütme işlemi Gamry Reference 600 Potentiostat/Galvanostat sistemi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1.) Referans elektrot olarak Ag/AgCl karşı elektrot olarak Zn elektrotu kullanılmıştır. Büyütme işlemi sırasında daha iyi sonuç almak için çalışma elektrotu ile karşı elektrot arasındaki mesafe 3 cm olarak ayarlanmıştır (Gu *et al.* 1999).



Şekil 3.1. Elektrokimyasal büyüme deney sistemi (Güney 2006)

### 3.4. Yüksek Enerjili Elektron Bombardmanı

Büyütülen ZnO ince filmler üzerinde radyasyonun etkisini görebilmek için numune3(ZnO3) ve numune4 (ZnO4) adlı numuneler aşağıda ifade edildiği kadar enerjiye sahip yüksek enerjili elektronlar tarafından bombardıman edildi.

**ENERJİ:** 9 MeV **T:** 21,3 °C

**P:** 818,9

#### Elektron ışınlamasının yapıış şekli

1.  $E = 9 \text{ MeV}$  de  $10 \times 10$  alanda ve  $d_{\max} = 2 \text{ cm}$  de 100 MU (34 saniye) ışınladı ve  $M_0 = 17,69 \text{ nCi}$  okundu
2.  $M_0$  değeri  $1 \times 10^{-9}$  ile çarpılarak  $\text{Ci}$  'a çevrildi.
3. Çıkan sonuç elektron yükü olan  $1,602 \times 10^{-19}$ , a bölünerek  $100 \text{ cm}^2$  deki elektron sayısı bulundu.

100 MU (34 saniyede) de  $d_{\max}$  ta  $100 \text{ cm}^2$  ye düşen  $\bar{e}$  sayısı

$$= \frac{17,69 \times 10^{-9}}{1,602 \times 10^{-19}} = 1,104 \times 10^{11}$$

dir.

100 MU de  $100 \text{ cm}^2$  lik alana  $1,104 \times 10^{11}$   $\bar{e}$  veriliyorsa

$$X = 1 \times 10^{12} \bar{e}$$

$$X = 326,92 \text{ saniye} = 906 \text{ MU}$$

**Sonuç olarak,** 9 MeV da 10x10 alanda ve  $d_{\text{max}}=2$  cm de 9 MeV ile 906 MU ışınlandığında numune üzerine  $1 \times 10^{12}$  tane  $\bar{e}$  gidecektir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

##### 4.1. X-Işını Kırınımı ile Kristalografik Yapının Belirlenmesi (XRD)

Numunelerin X- Işını Kırınımı ölçümleri,  $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$  dalga boyuna sahip Cu-K $\alpha$  kullanılarak Rigaku-2200D/Max XRD cihazı ile gözlemlenmiştir.

Tarama işlemi 0,05 derecelik açılar ile 20 ile 80 derece arasında gerçekleştirildi ilk etapta bütün numuneleri GaAs üzerine büyüttüğümüz için GaAs' den gelen pikleri(kırınimleri) ayırt edebilmek için GaAs' ğin kırınım ölçümleri alındı. Alınan ölçüm sonuçları (Şekil 4.1. ile 4.3.) arasında verilmiştir. GaAs ve diğer piklere karşılık gelen açı değerleri çizelge 4.1 de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Farklı piklere karşılık gelen açı değerleri (Fahoume *et al.* 2006)

| Pik Değerleri | 2 $\theta$ değerleri |
|---------------|----------------------|
| GaAs (004)    | 66                   |
| ZnO (100)     | 31,807               |
| ZnO (002)     | 34,462               |
| ZnO (101)     | 36,287               |
| ZnO (102)     | 47,530               |
| ZnO (110)     | 56,615               |

X-ışını kırınım ölçümlerinde esas, numune üzerinden yansıyan x ışınlarının bir elektronik cihaz tarafından algılanarak sayılmasıdır. X ışınları kırınımı vasıtasıyla bu kristal yapıların yönelimleri, tek yada çok kristal yapıları oluşları, kimyasal yapı analizi, kristal yapının tayini yapılabilmektedir.

Aşağıdaki çizelgede elde edilen dört ayrı film için  $2\theta$  açlarına karşılık lattice parametreleri verilmiştir

**Çizelge 4.2.** ZnO ve GaAs' in örgü sabitleri ve ince filmlerin kalınlığı

| Numune adı               | $2\theta$<br>(derece) | Örgü parametreleri<br>( $\text{\AA}$ )                                                          | Film kalınlığı<br>(nm) | Tanecik büyüklüğü<br>(nm) |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| GaAs                     |                       |                                                                                                 |                        |                           |
| ZnO1                     | 34,4                  | $d_{002} = 2,603$<br>$d_{100} = 2,838$<br>$d_{101} = 2,480$<br>$d_{102} = 1,913$<br>$c = 5,206$ | 100,1 nm               | 19,7                      |
| ZnO2                     | 34,4                  | $d_{002} = 2,603$<br>$d_{100} = 2,821$<br>$d_{101} = 2,407$<br>$c = 5,206$                      | 669,7 nm               | 18,3                      |
| ZnO3                     | 34,6                  | $d_{002} = 2,591$<br>$d_{101} = 2,473$<br>$c = 5,193$                                           | 5,9 $\mu\text{m}$      | 24,33                     |
| ZnO4                     | 34,6                  | $d_{002} = 2,591$<br>$d_{100} = 2,804$<br>$d_{101} = 2,467$<br>$d_{102} = 1,905$<br>$c = 5,136$ | 130 $\mu\text{m}$      | 22,19                     |
| Bombardıman sonrası ZnO3 |                       | $c = 5,193$                                                                                     | 5,7 $\mu\text{m}$      | 20,62                     |
| Bombardıman sonrası ZnO4 |                       | $c = 5,193$                                                                                     | 121 $\mu\text{m}$      | 17,80                     |

Bu çizelgede belirtilen parametreler sırası ile aşağıdaki gibi olup, hesaplama yöntemleri ifade edildiği gibidir.

D: Kristal büyüklüğü (tanecik büyüklüğü) olup her bir numune için aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

d-value: Düzlemler arası mesafe

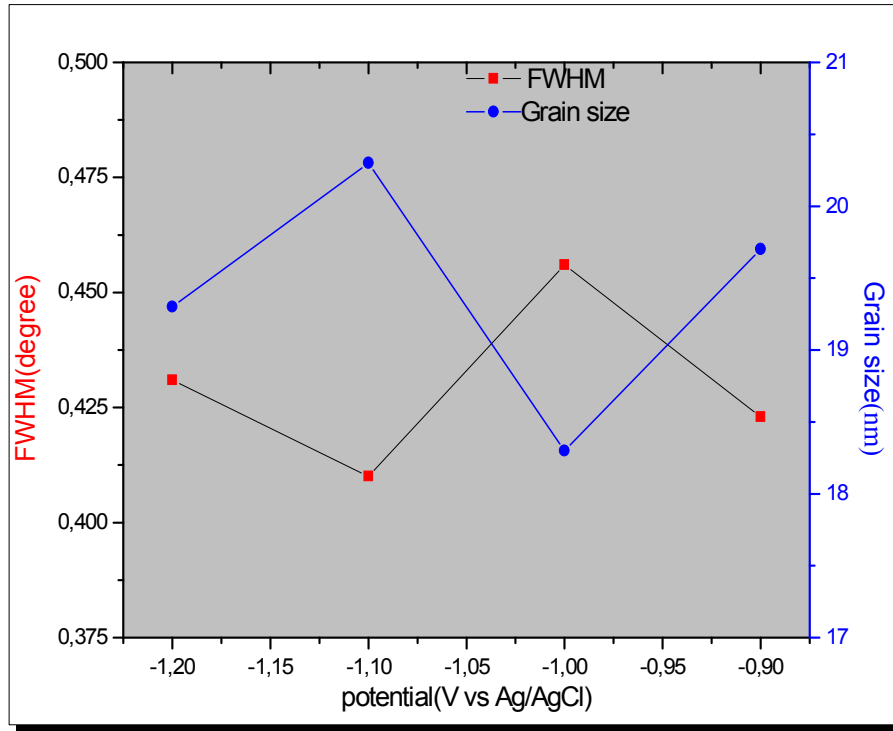
$$D = \frac{K * \lambda}{\cos \theta} \quad (\text{Hong } et al. 2005)$$

$$\beta = FWHM * \frac{\pi}{180}$$

FWHM= Kristal yönelim pikinin yarı yükseklikteki genişlik değeri

$$K=0,9$$

$$\lambda = 1,54 A^0$$



**Şekil 4.1.** Farklı büyütme potansiyel değerlerinde elde edilen ZnO ince filmler için FWHM ve tanecik büyüklükleri

Filmin kalınlığı: büyütülen her bir ince film için faraday yasası kullanılarak ince filmlerin kalınlıkları hesaplandı

$$t = \frac{MQ}{\rho nFA}$$

burada

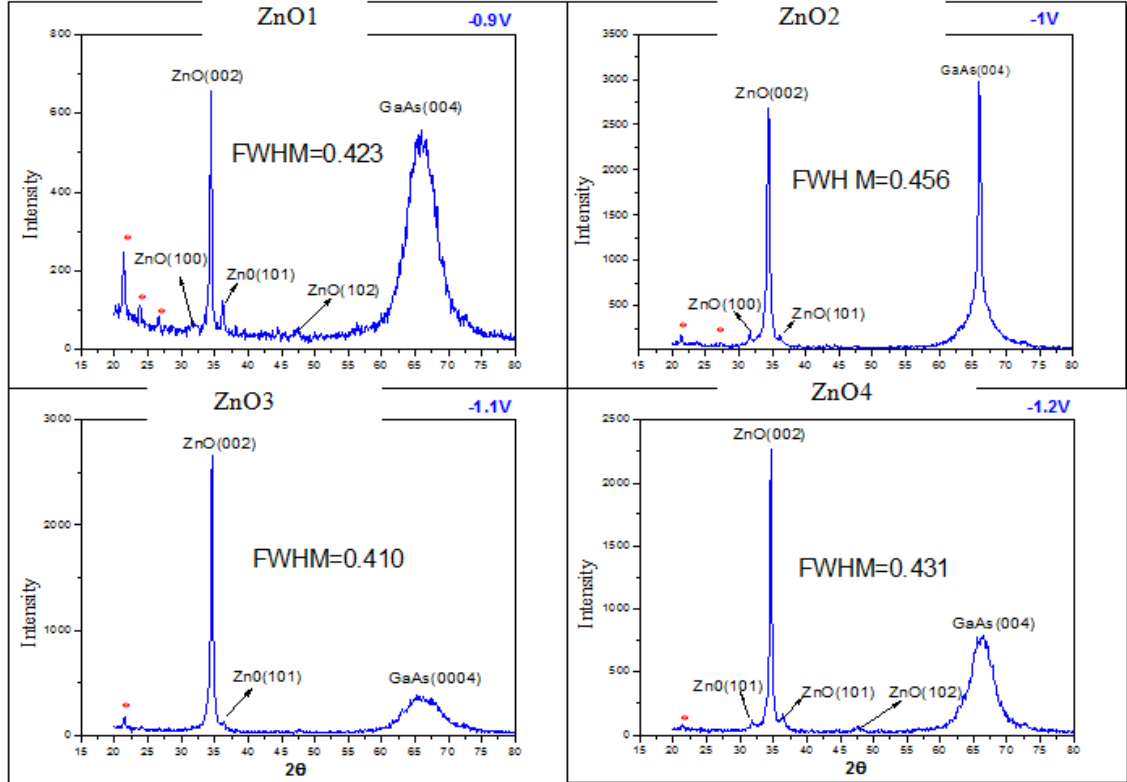
t = filmin kalınlığı

M = Molekül ağırlığı

n = elektro negatiflik katsayısı

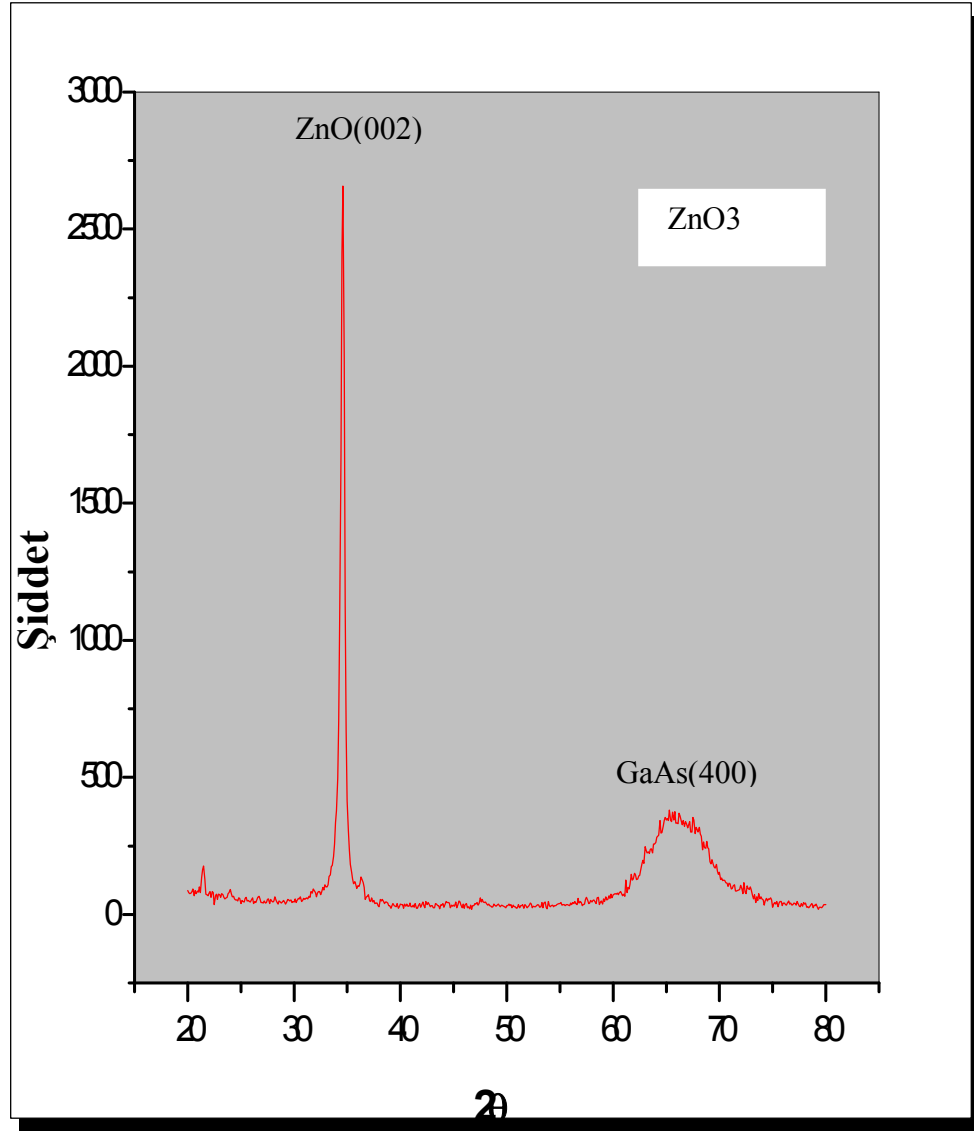
F = faraday sabiti

A = Elektrot alanı ( $1 \text{ m}^2$ )

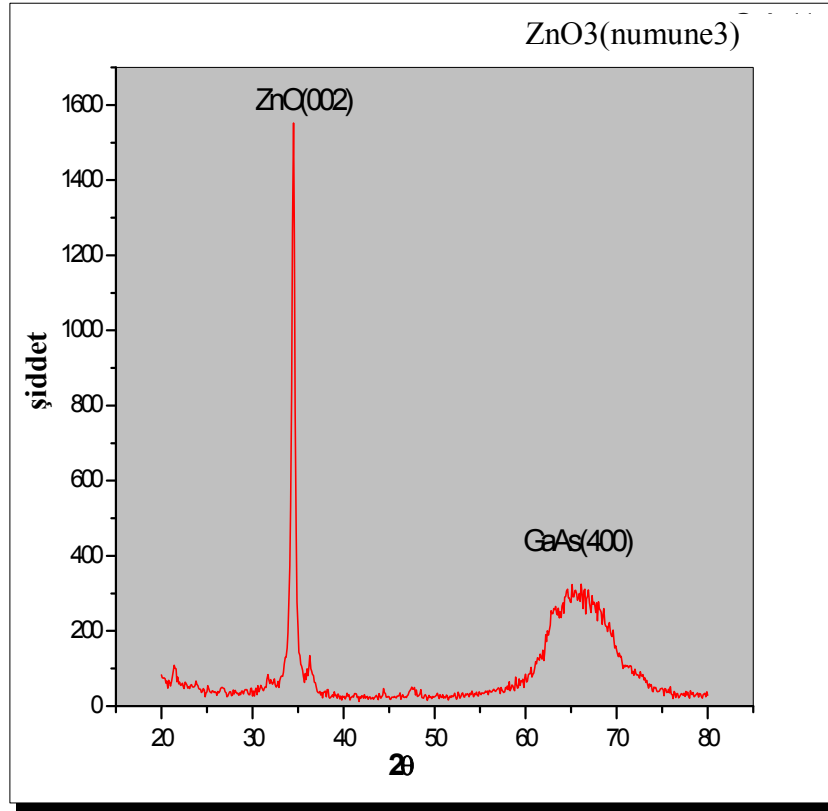


**Şekil 4.2.** -0,9 V, -1 V, -1,1 V, -1,2 V'da büyütülen ZnO ince filmleri için XRD spektrumu

Genel olarak büyütülen ince filmlerin (100), (101) ve (002) yönelimlerinde büyüdüğü görüldü. Lee ve Tak (2001) tarafından yapılan çalışmada da 0,72V altında büyüttükleri filmlerin (101) tercihli yönelime sahip olduğunu gözlemişlerdir. Gu ve Fahidy (1999) yaptıkları benzer çalışmada yine ZnO filmlerinin (101) tercihli yönelime sahip olduğunu bildirmişlerdir. Buna karşın bu çalışmada (002) yönelimlerinin diğer yönelimlere kıyasla daha fazla belirgin olduğu görüldü. Y. F. Gao'ya göre wurtzite yapıdaki saf ZnO'nun (002) yönündeki büyümesi altlık malzemeye (GaAs) dik yönde gerçekleşmektedir (Gao *et al.* 2006). Artan uygulama potansiyel değerine bağlı olarak FWHM değerinin belli bir değere kadar arttığı ve daha sonra azaldığı görülmüştür. Yani, artan potansiyel değerine bağlı olarak kristal yapının iyileştiği gözlemlenmiştir.

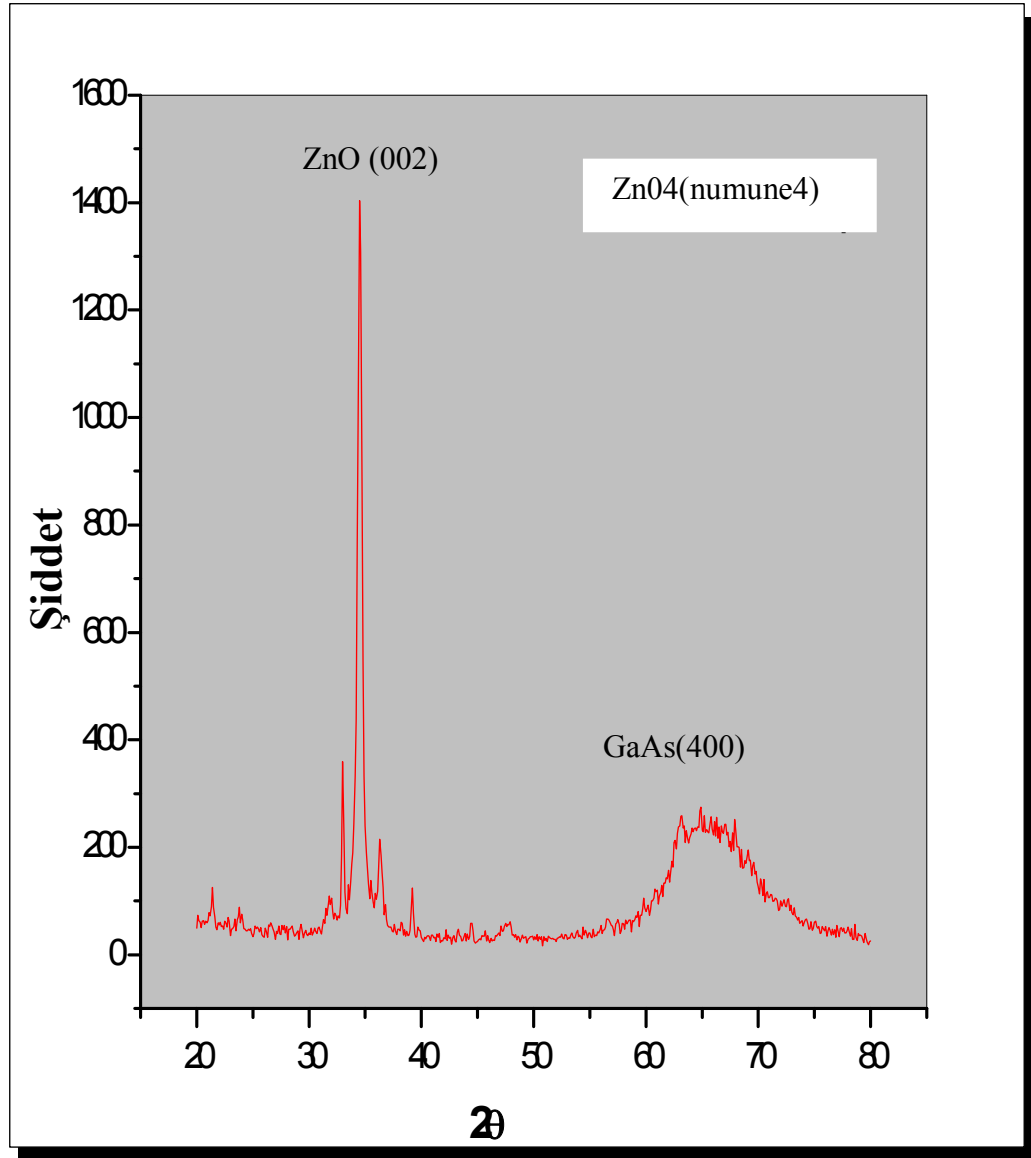


Şekil 4.3. -1,1 V’da büyütülen ZnO ince filmin XRD spektrumu

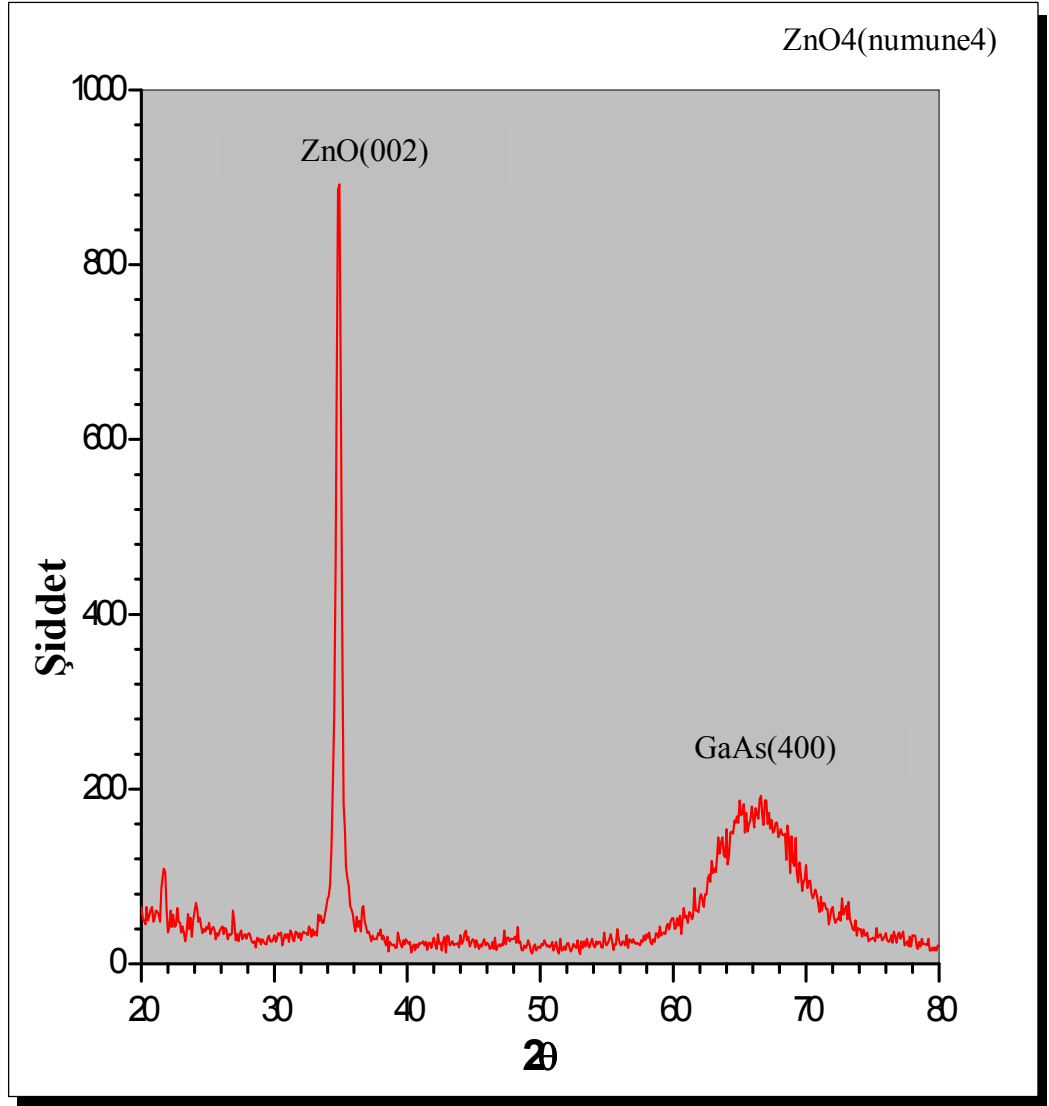


**Şekil 4.4.** Elektron bombardımanı sonrası -1,1V'da büyütülen ZnO ince film için XRD spektrumu

Elektron bombardımanı sonrası yeni yönelimlerin oluştuğu ve (002) yönelimindeki pik şiddetinin azaldığı görülmüştür. Bu radyasyon sonucu meydana gelen tavlama etkisi ile açıklanabilir. Radyasyon sonrası yeni enerji değerlerine sahip olan örgü atomları sahip oldukları bu enerji değerini dışarı verir iken farklı yönelimde yerleşimler meydana gelmiştir. Örgü atomlarının bölgesel olarak yeniden düzenlenimi yeni piklerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bunun sonucu olarak şiddette bir azalma meydana gelmiştir. Her iki durumda da baskın olan yönelim (002) olup örgü parametresi.



Şekil 4.5. -1,2 V’da büyütülen ZnO ince filmin XRD spektrumu



**Şekil 4.6.** elektron bombardımanı sonrası -1,2 V'da büyütülen ZnO ince film için XRD spektrumu

Radyasyon sonrası örgü sabitindeki büyüme örgü atomlarının radyasyon sonrası kaymaya uğradığını göstermektedir. Grafıklere bakıldığında şiddetin önemli derecede düştüğü açıkça görülmektedir. Burada radyasyonun filmin kristalografisini olumsuz yönde etkilediği apaçık ortadadır.

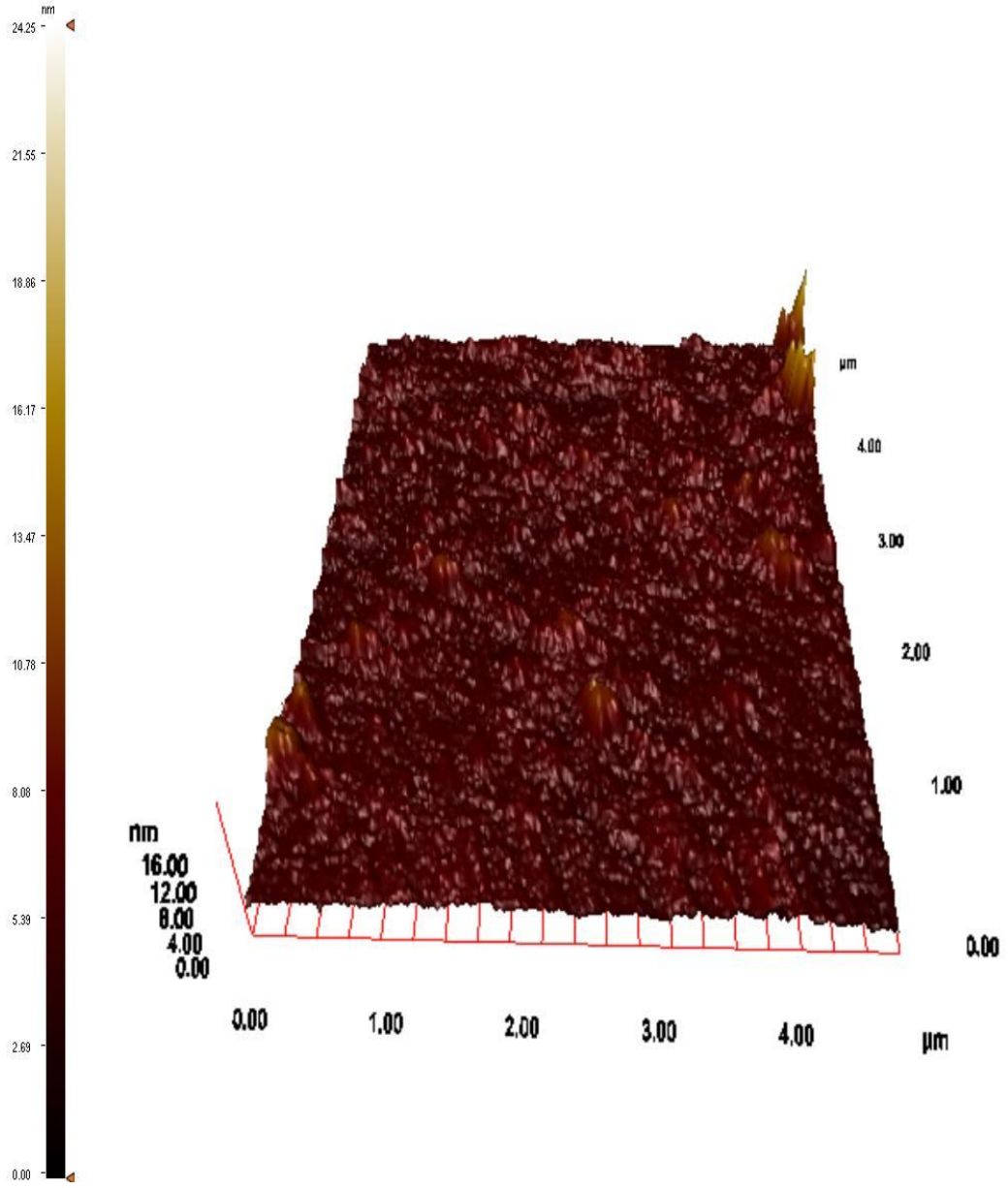
#### 4.2. AFM (Atomik kuvvet mikroskobu)

Büyütülen ince filmlerin yüzey görüntülerini gözlemleye bilmek için by product Nanomagnetics- inst cihazı yardımı ile yüzey görüntüleri alındı. AFM dört modludur. (Tapping, Non- contact, contact, STM) . Görüntü alma işlemleri Tapping mod da 5 tarama alanları şeklinde ve 1nm/s tarama hızında görüntü elde edilmiştir.  $V_2$  kanalından görüntü alınmıştır.

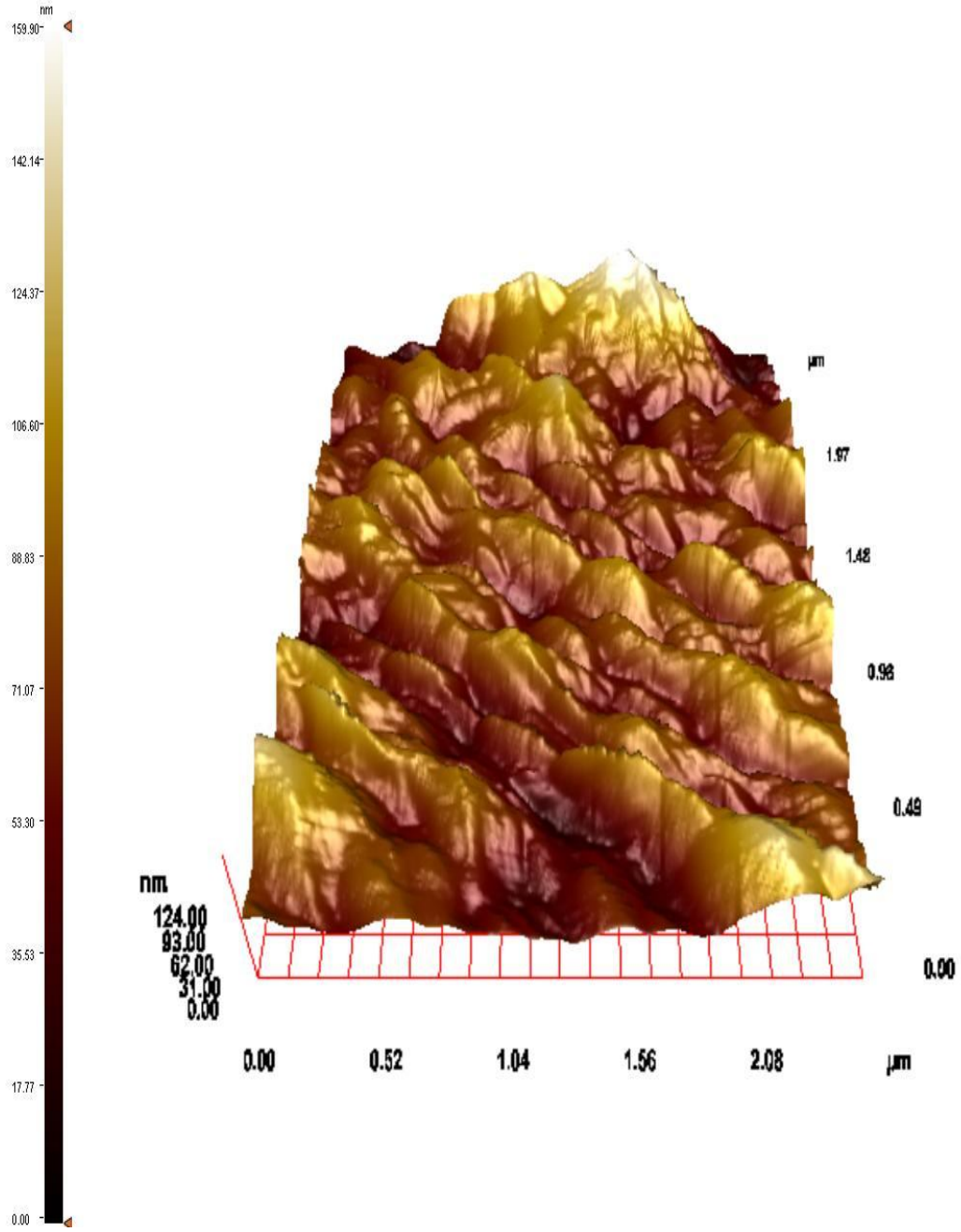
İlk olarak kıyaslama yapabilmek için altlık malzeme olarak kullanılan GaAs kristalinin yüzey görüntüsü elde edildi (Şekil 4.8). Şekil 4.9 ve 4.10'da da sırası ile radyasyon öncesi ve radyasyon sonrası büyütülen ince filmlerin yüzey görüntüleri elde edildi. Şekillerde yüzeydeki maksimum tepe ve çukur arasındaki mesafe gösterilmiştir. Radyasyon sonrası bu mesafenin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çizelge 4.1 ve 4.2'de radyasyon sonrası yüzey pürüzlülüğü, yüzey çarpıklığı, yüzey basıklık ve karekök ortalama değerleri hakkında bilgi edinilmektedir.



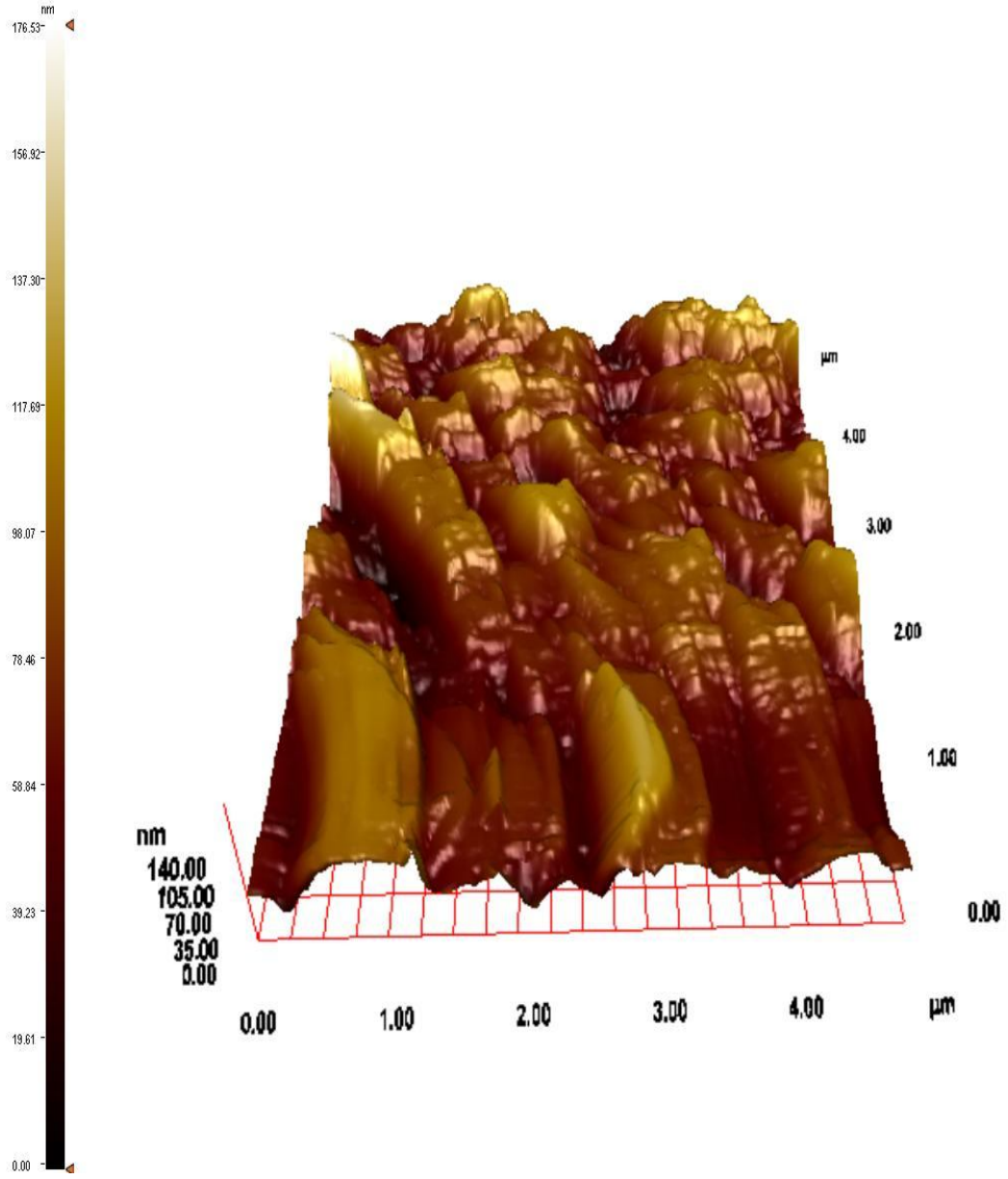
Şekil 4.7. AFM Mikroskobu



Şekil 4.8. GaAs'in yüzey (AFM) görüntüsü



**Şekil 4.9.** Radyasyon öncesi -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin yüzey (AFM) görüntüsü



**Şekil 4.10.** Radyasyon sonrası -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin yüzey (AFM) görüntüsü

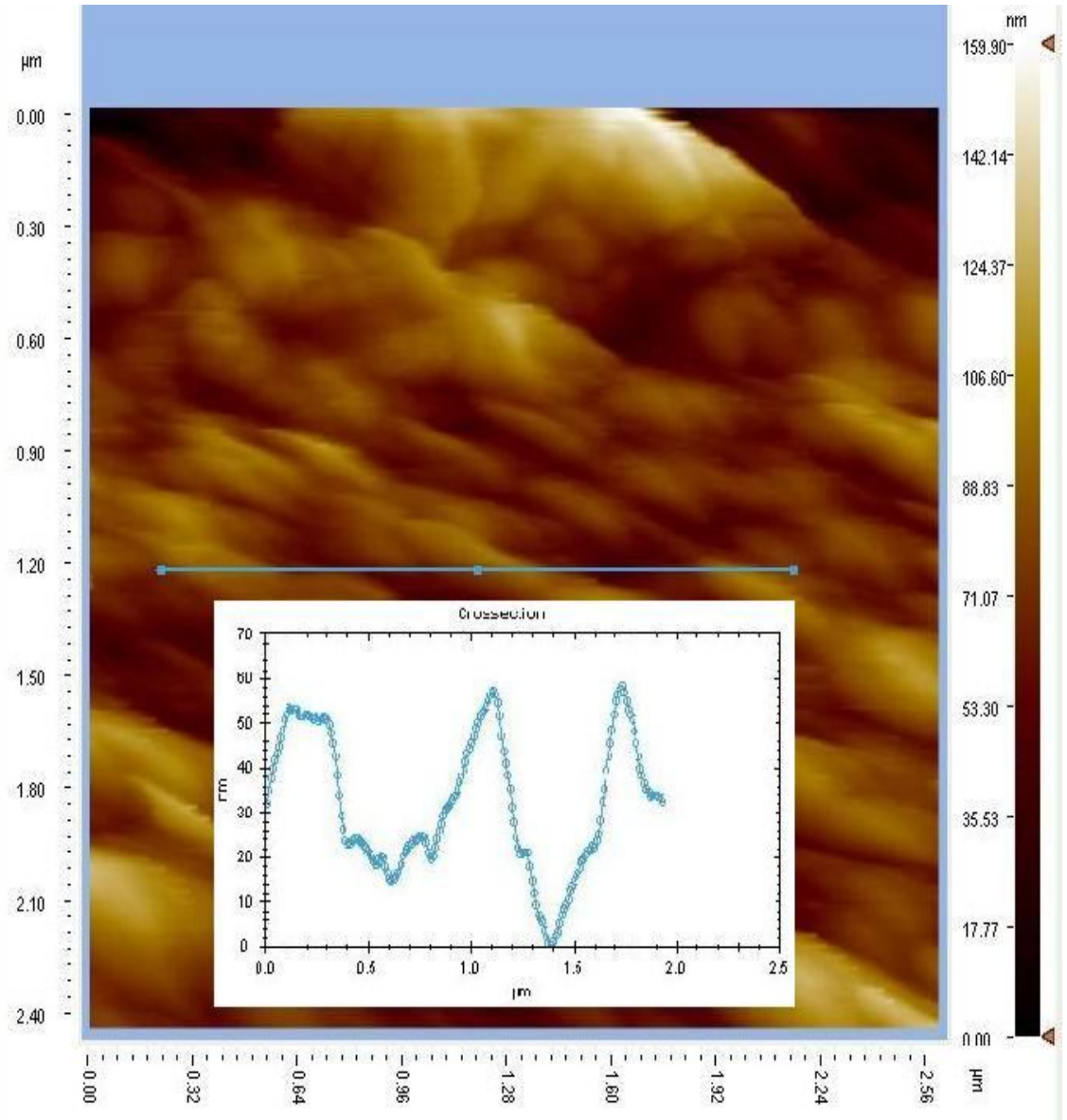
**Çizelge 4.3.** Radyasyon öncesi -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin yüzey görüntüsü ile ilgili değerler

| Coefficient | Değeri   | Birimi | Description       |
|-------------|----------|--------|-------------------|
| SA          | 215,1066 | nm     | Yüzey pürüzlülüğü |
| SQ          | 248,0506 | nm     | Ortalama kare kök |
| SSK         | 1,308656 | -      | Yüzey çarpıklığı  |
| SKU         | 1,836999 | -      | Yüzey sivriligi   |

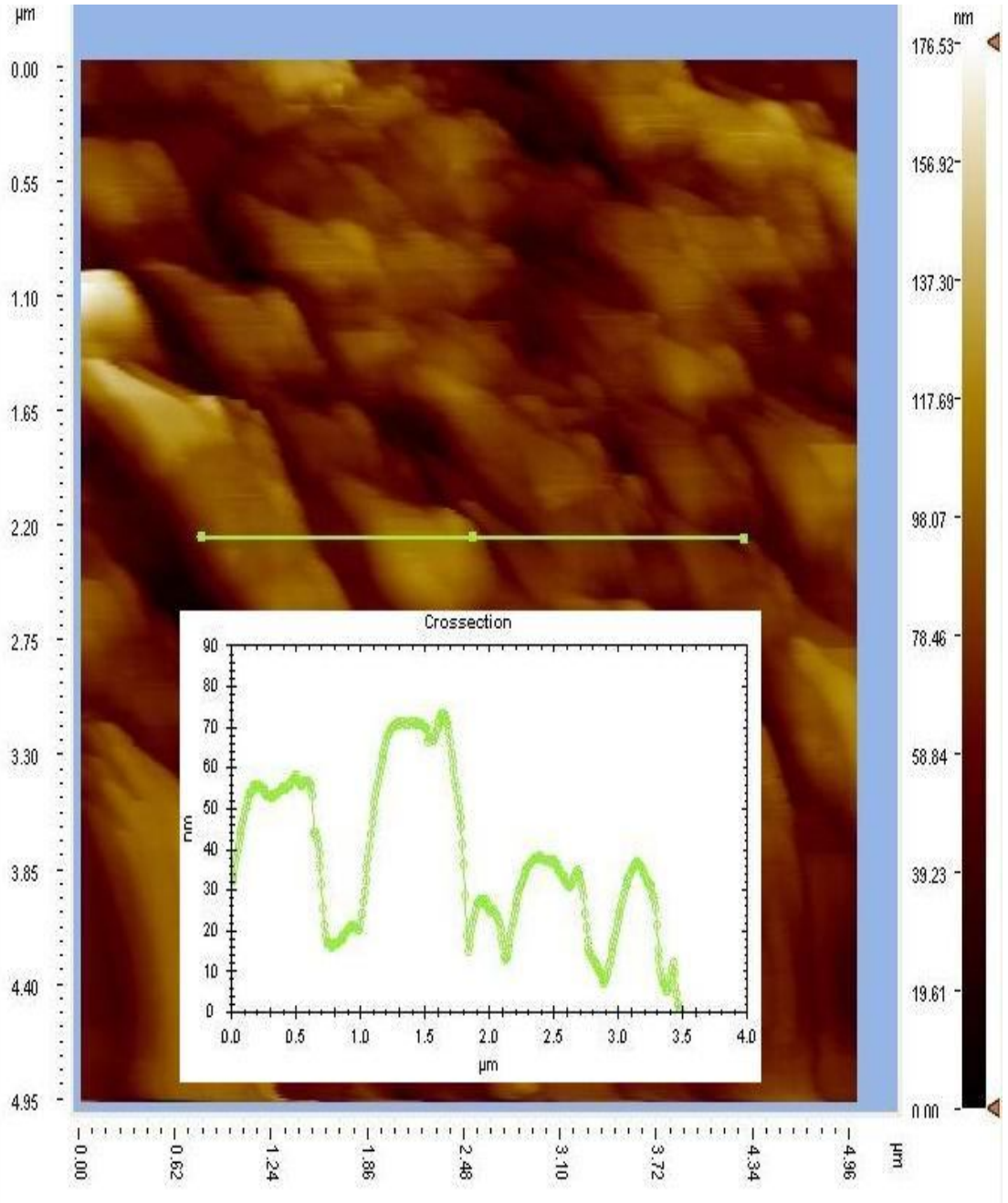
**Çizelge 4.4.** Radyasyon sonrası -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin yüzey görüntüsü ile ilgili değerler

| Coefficient | Değeri   | Birimi | Description       |
|-------------|----------|--------|-------------------|
| SA          | 21,70617 | nm     | Yüzey pürüzlülüğü |
| SQ          | 26,54343 | nm     | Ortalama kare kök |
| SSK         | 1,527998 | -      | Yüzey çarpıklığı  |
| SKU         | 2,71625  | -      | Yüzey sivriligi   |

Çizelge 4.3. ve çizelge 4.4. incelendiği zaman yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Ayrıca yine aynı numunenin radyasyon öncesi ve radyasyon sonrası yüzey görüntülerinden radyasyon sonrası atomların çaplarında her hangi bir değişme olmaz iken yükseklik (atomların yüzeyden yükseklikleri) sınırların radyasyon öncesine kıyasla kaybolduğu ve daha da belirgin olarak görüldüğü gözlemlenmiştir. Buda radyasyon sonrası büyütülen ince filmin altlık malzemenin yüzeyini daha iyi kapladığının filmin tüm yüzeyde homojen olarak dağılımının göstergesidir. Bunun ısıma sırasında oluşan yüzeyin aşırı ısınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. (Şekil 4.9 ve şekil 4.10.).



**Şekil 4.11.** Radyasyon öncesi -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin yüzey (AFM) görüntüsü



**Şekil 4.12.** Radyasyon sonrası -1,1 V'da büyütülen ZnO ince filmin AFM görüntüsü

Şekil 4.11 ve şekil 4.12 karşılaştırıldığında zaman görüntü üzerindeki çizilen çizgi boyunca iğnenin ucunun karşılaştığı tepe ve çukurlar gözükmemektedir. Radyasyon sonrası iğnenin ucunun karşılaştığı tepe noktalarının radyasyon öncesine nazaran daha düzleştiği keskin piklerin kaybolduğu yani filmin altlık malzeme yüzeyini daha homojen bir şekilde kapladığının göstergesidir.

### 4.3. Akım-Gerilim Karakteristikleri

Akım voltaj karakteristiği incelenerek diyodun idealite faktörü düzbeslem tarafındaki değişiminden hesaplanabilir. İdealite faktörü diyodun kalitesini belirleyen birimsiz bir parametredir. İdeal bir diyot için akım iletiminde termoiyonik emisyon mekanizması etkilidir ve  $n=1$  ' dir.  $n$  değeri 1 ' den uzaklaştıkça diyot idealden uzaklaşıyor demektir. Aşağıda  $n$ -ZnO/p-GaAs heteroeklemlerinden bir kaçı için radyasyon sonrası ve radyasyon öncesi durumlarına ait I-V karakteristikleri verilmiştir. Numunelerin diyot parametrelerinin tayin edilmesi için farklı yöntemler mevcuttur. Bulardan birincisi diyotun ideal olmadığı ( $n>1$ ) kabul edilerek en genel durum göz önüne alınırsa akımın gerilimle değişimi;

$$I=I_0[\exp(qV/nkT)-1] \quad (4.3.1)$$

denkleminde uymaktadır. Burada

- $q$ ; elektronun yükü,
- $V$ ; uygulanan gerilim,
- $n$ ; diyot idealite faktörü,
- $k$ ; Boltzmann sabiti,
- $T$ ; Kelvin cinsinden sıcaklıktır.
- $J_s$ ; doyma akım yoğunluğu olup

$$J_s=A*T^2\exp(-q\phi_0/kT) \quad (4.3.2)$$

dir.

Burada  $A^*$  ; Richardson sabiti,

$q\phi_0$  ;engel yüksekliğidir.

Denklem (4.3.1) çözülürse;

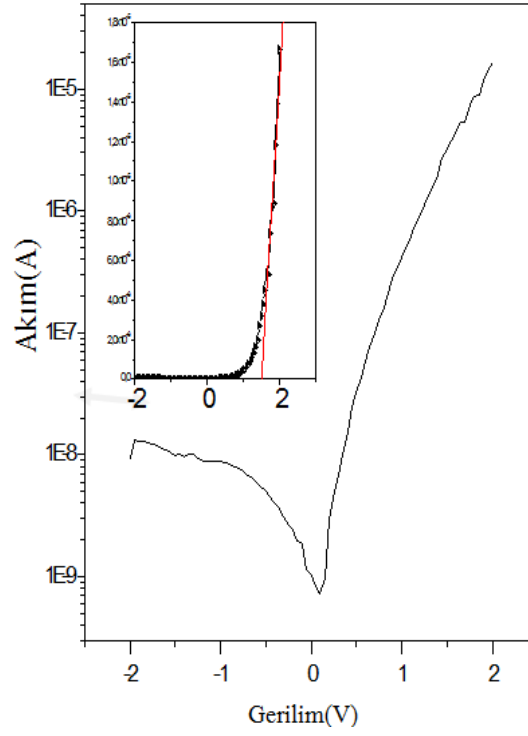
$$\ln J = \ln J_0 + (q/nkT)V \quad (4.3.3)$$

elde edilir. Denklem (4.3.3) den faydalanarak her numune için ölçülen I-V karakteristiklerinden faydalanılarak  $\ln J$ -V grafikleri çizilir. Çizilen grafiklerde eğrinin lineer bölgesinde  $\ln J$  eksenini kestiği noktadan  $J_s$  akım yoğunlukları ve eğrilerin eğiminden;

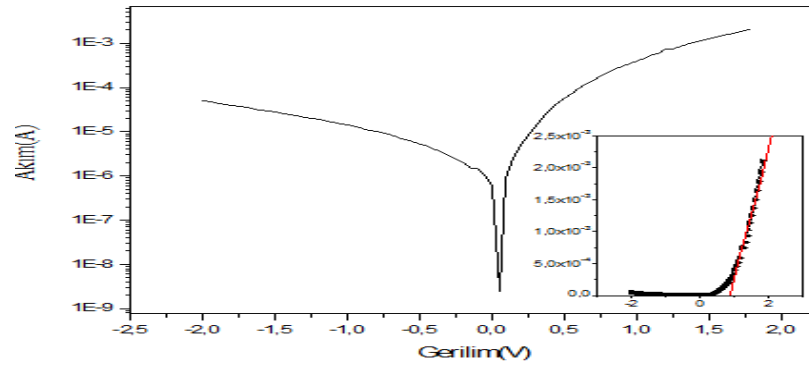
$$n = (q/kT)[d(\ln J)/dV]^{-1} \quad (4.3.4)$$

bağıntısı kullanılarak diyot idealite çarpanı bulunur.

Akım ölçme ve gerilim uygulama işlemi  $10^{-12}$  A hassasiyetine sahip Keithley 487 piko ampermetre kullanılarak gerçekleştirildi.



**Şekil 4.13.** -1,1V’da büyütülen ZnO ince filmin radyasyon öncesi I-V grafiği (idealite faktörü 4,71, çalışma voltajı 1,468 V)



**Şekil.4.14.** -1,1V’ da büyütülen ZnO ince filmin radyasyon sonrası I-V grafiği (İdealite faktörü 1,88, çalışma voltajı 0,852 V)

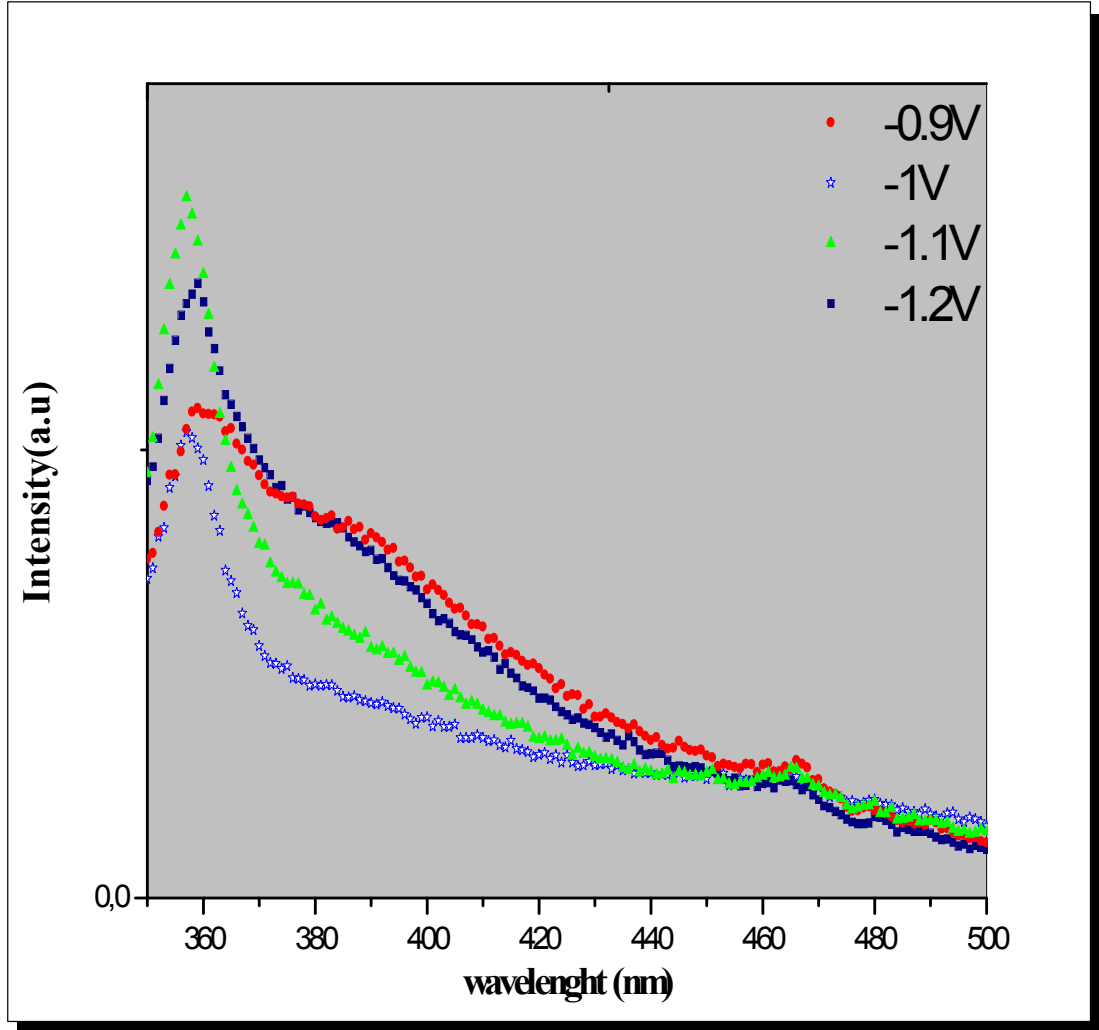
I-V grafiklerini incelediğimizde çalışma voltajı 0,8 V ile 1,5 V arasında değiştiği görülmektedir. Ayrıca idealite faktörünün de radyasyon sonrası dikkate değer bir düzelim yönünde değişim olduğu görülmüştür.

Grafiklerden;

**Çizelge 4.5.** Radyasyon öncesi ve sonrası -1,1 V’ da büyütülen ZnO ince filmin idealite faktörü ve çalışma voltajı

| Numune                             | İdealite faktörü | Çalışma voltajı |
|------------------------------------|------------------|-----------------|
| ZnO <sub>3</sub> radyasyon öncesi  | 4,71             | 1,486 V         |
| ZnO <sub>3</sub> radyasyon sonrası | 1,88             | 0,852 V         |

Ayrıca -0,9 V ile -1,2V arasında büyütülen numunelerin PL spektrum ölçümlerinden genel olarak büyütülen numunelerin 357 nm (FWHM=20nm) 359nm (FWHM=20nm) 359nm (FWHM=17nm) ve 359nm (FWHM=18nm) arasındaki dalga boyu değerlerinde pikler elde edilmiştir. PL ölçümlerinden banttan banda geçiş 3,45 eV’da gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.15.** Farklı büyütme potansiyel değerleri altında GaAs altlık üzerine büyütülen ZnO ince filmlerin PL spektrumu

## 5. TARTIŞMA

Günümüz teknolojisinde elektroniğin temelini oluşturan yarıiletken teknolojisi, gün geçtikçe daha dayanıklı, daha kolay üretilen, daha ucuza mal edilen yarıiletken malzeme üretebilme arayışı içinde olup bu yolda birçok bilim adamı araştırmalar ve deneme yanılmalar gerçekleştirmektedir.

Elektrokimyasal büyütme yöntemi ile GaAs altlık üzerine ZnO ince filmler büyütme parametresi (büyütme potansiyeli) değiştirilerek elde edilmeye çalışıldı. Daha sonra büyütülen numunelerin

XRD

AFM

I-V

verileri incelendi. Bu ölçümler yapıldıktan sonra numuneler yüksek enerjili elektron (9MeV ) bombardımanına maruz bırakıldı ve daha sonra aynı ölçümler tekrarlandı.

XRD spektrumuyla çok fazla belirgin olmamakla beraber farklı yönelimlerde oluşan kristal yapıları için çeşitli sebepler söylenebilmektedir. Örneğin (001) yönündeki büyümeye, GaAs'ya yakın yerlerde bulunan hidroksil iyonunun (OH) gradyentinin neden olduğu gösterilmektedir (Gao *et al.* 2006).

Büyütülen ince filmlerde artan potansiyel değerine bağlı olarak (002) yönelim şiddetinin arttığı ve diğer yönelimlerin ise artan uygulama potansiyel değerine bağlı olarak azaldığı tek kristale yakın bir büyümenin olduğu sonucu elde edildi.

Radyasyon sonrası (002) yönelimindeki pikin şiddetinin azaldığı örgü parametresinin arttığı görülmüştür. Buna; yapı içerisinde atomların bombardıman sonucu enerjilerindeki artıştan dolayı örgü içerisindeki kaymasının neden olduğu düşünülmektedir.

Büyütülen ince filmlerin radyasyon sonrası kalınlık değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bunun yüksek enerjili elektronlar ile bombardıman esnasında yüzeyde zayıf olarak tutunan atomların enerjilerindeki değişmeden dolayı yüzeyi tamamen terk etmesi ile gerçekleştiği düşünülmektedir. Uygulanan katodik potansiyel değerine bağlı olarak tanecik büyüklüğünde artış yönünde değişimin olduğu fakat radyasyon sonrası tanecik büyüklüğünde çok büyük bir farklılığın olmadığı görülmüştür.

AFM görüntülerinden radyasyon öncesine nazaran radyasyon sonrası yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür. Ayrıca ısıma sırasında yüzeyde oluşan aşırı ısınmadan dolayı radyasyon sonrası filmin altlık malzeme yüzeyini daha iyi kapladığı homojen olarak numune yüzeyine dağıldığı gözlemlenmiştir. İğne ucunun karşılaştığı tepe noktalarının sivrilik değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bundan yola çıkarak elektron bombardımanının filmin kalitesinde önemli bir artış sağladığı sonucuna varıldı. Ayrıca bombardımanın atomların çapında belirgin bir artışa neden olmayıp sadece yüzeyde konumlarında yani, atomların yüzeye nazaran yüksekliklerinde bir azalışın olduğu görülmüştür.

Akım–gerilim ölçümlerinden radyasyon öncesi ve radyasyon sonrası turn-on potansiyelinin 0,9 V ile 1 ,4 V arasında değiştiği görülmektedir ve idealite faktörün de ideallik yönünde dikkate değer bir değişim olduğu yani ideal değere yaklaştığı gözlemlenmiştir.

Numunelerin PL ölçümlerinden enerji band aralıkları değerinin 3,45 Ev olarak bulunmuş olup bunun literatürdeki değer ile uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Al-A, S.K.J., Makatsı, M.N., Al-Shakarchi, I.K. and Hogarth C.A., Preparation, Structural, Optical and Electrical Properties of the  $CdTe_{1-x}S_x$  System, *J. Mater. Sci.*, 28, 251-258 (1993).
- Atkins and Jones P.L., 1998 Temel Kimya 1, Oxford University, University of Northern Colorado, Bilim Yayıncılık, Ankara.
- Bard, Allen J., Faulkner, Larry R., 2001 electrochemical method Fundamentals and applications
- Bilgin V. 2003, ZnO filmlerinin elektrik, optik, yapısal ve yüzey özellikleri üzerine kalay katkısının etkisi, Doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 165 s.
- Binning G., Quate C.F., and Gerber Ch., "Atomic force microscope," *Physics Review Letters* Cilt 56: Sayfa 930, 1986.
- Canh, T.M., *Sensors Physics and Technology*, Sayfa 2:122, 1993.
- Chen, J.J., Jang, S., Ren, F., Li Y., Kim H.S., Norton, D.P., Pearton, S.J., Osinsky, A., Chu, S.N.G., and Weaver, J.F., (2006) Selective and non selective wet etching of  $Zn_{0.9}Mg_{0.1}O/ZnO$  Journal of electronic materials. 35, 4, 2006
- Coskun, C., Look D. C., Farlow G.C. and Sizelove J. R., 2004. Radiation hardness of ZnO at low temperatures. *Semiconductor science and technology*. 752–754
- Fahrenbruch, A.L. II-VI Compounds in Solar Energy Conversion, *J. Cryst. Growth*, 39, 73-91 (1977).
- Fahoume M., Maghfoul O., Aggour M., Hartiti B., Chraïbi., Ennaoui A. 2006. Growth and characterization of ZnO thin films prepared by electrodeposition technique. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1439
- Gao, Y.-F., Nagai M., Masuda Y., Sato F., Koumoto K. 2006. Electrochemical deposition of ZnO film and its photoluminescence properties. *Journal of Crystal Growth*, 447, 448, 449, 450.
- Goyal, D.J., Agashe, C., Takwale, M.G., Marathe, B.R., and Bhide, V.G., Development Of Transparent and conductive ZnO Films by spray PYROLRATHE, B.R. ve BHIDE, V.G., Development Of Transparent and conductive ZnO Films by spray PYROLSİS, *Journal of materials science*, 27, 4705-4708 (1992)
- Gu Z.H. and Fahidy T.Z. 1999. Elektrochemical Deposition of Thin Films on Tin-Coated Glasses. *Journal of The Electrochemical Society*, 146 (1) 156–159
- Güney, H. 2006. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Ishizaki, H., Imaizumi M., Matsuda S., Izaki M., Ito T. 2002. Incorporation of boron in ZnO film from an aqueous solution containing zinc nitrate and dimethylamine-borane by electrochemical reaction. *Thin Solid Films*, 65
- Jain, M., II-VI Semi conductor Compounds Word Scientific Publishing, Singapore (1993).
- Stuart, J. K. and Hlady, V., *Biophys. J.* Cilt 76, Sayfa 500, 1999
- Kul, M.,  $Cd_2S(In_2Si_3)$  Yarıiletken Filmlerin Bazı Fiziksel özellikleri, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye (1996)

- Lee ,E.C., Kim, Y. S., Jin, Y.G., and Chang, K.J., 2001. Compensation Mechanism for N Acceptors in ZnO. *Physical Review B*, Volume 64,085-120.
- Lee and Tak 2001. Elektrodeposition of ZnO on ITO Electrode by Potential Modulation Method. *Electrochemical and Solid-State Letters*,4 (9) C63-C65
- Lincot, Daniel. 2005. Electrodeposition of semiconductors. *Thin Solid Films*, 1.
- Look, D.C., 2001. Recent advances in ZnO materials and devices. *Materials Science and Engineering*, B80, 383–387.
- Look ,D.C.,Reynolds, D.C.,and Hemskey,J.W.,1999 *Appl.phys.lett.*75,811
- Lu, J.G.,Ye,Z.Z., Zhuge, F., Zeng, Y. J.,Zhao, and Zu, L. P., 2004. P-type Conduction in N-Al Co- doped ZnO Thin Films. *Appl. phys.lett.* Vol:85, No:15 (2004)
- Mahalingam T., John V.S., Sebastian P.J. 2003. Growth and caharacterizastion of electrosynthesised zinc oxide thin films. *Materials Research Bulletin* 296–277
- Nag, ,B.R., *Electron Transport in Compound Semiconductors*, Springer Verlag, New York(1980).
- Ohshima ,E.,Ogino,H.,Niikura,I., Maeda,K.,Satu,M.,Ito,M., Fukuda ,T., 2004 Growth of the 2-in- Size Bulk ZnO Single cristals by the Hydrothermal Method. *Journal of Crystal Growth* , 260(2004) 166-170
- Özgür, Ü., Alivov Ya. I., Liu C., Teke A., Reshchikov M.A., Doğan S., Avrutin V. 2005. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 4.
- Pejova B., Grozdanov I. 2006, Structural and optical properties of chemically deposited thin films of quantum-sized bismuth (III) sulfide, *Materials Chemistry and Physics* 99:39–49
- Sarıkaya, Yüksel. 2003. *Fizikokimya*. Gazi Kitabevi, Ankara
- Sanchez-Juarez, A.,TIBURCIO-Silve, A.,ORTIS A.,ZIRONI,E.P.ve RICKARDS,J., Electrical and optical properties of fluorine- doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis,thin solid films.333,1196-202(.1998).
- Seeger, K., 1990. *Semiconductor Physics, An Introduction*. Schottky Institute at Gaching, München, Springer- Verlag, New York
- Serway, Raymond A. 1996. *Fen ve Mühendislik İçin Fizik 3*. Palme yayıncılık, Ankara.
- Turton, R. 2005. *Katıların Fiziği*, Aktif Yayınevi, İstanbul.
- Tüzemen, S., Gür E. 2007. Principal issues in producin new ultraviolet light emitters based on transparent semiconductor zinc oxide. *Optical Materials*, 1-2.
- Tüzemen, S., Gür E., Yıldırım T., Xiong G., Williams R.T. 2006. An investigation of control mechanisms of the excitonic behavior in reactively sputtered ZnO on (0001)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . *Journal of Applied Physics*, 1.
- Tüzemen,S., Xiong, G., Wilkinson, J., Mischuck,B., Ucer,K. B., Williams,R.T., 2001. Production and Properties of p-n Junction in reactively Sputtered ZnO. *Physica B* 308-310 (2001) 1197-1200.
- Yang C.C., Jiang Q. 2006, Size effect on the bandgap of II–VI semiconductor nanocrystals, *Materials Science and Engineering B* 131: 191–194.
- Y. Harada, M. Kuroda and A. Ishida, *Langmuir Cilt:16, Sayfa 708*, 2000.

- Yoshida T., Komatsu D., Shimokawa N., Minoura H., 2004. Mechanism of cathodic electrodeposition of zinc oxide thin films from aqueous zinc nitrate baths. *Thin solidfilms*, 451–452, 166–169
- Zor, M., Spray-Pyrolysis ile elde edilen  $\text{AgInS}_2$  Bileşiminin Bazı Fiziksel Özellikleri, Doçentlik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye (1982).
- Weng, Jian, Zhang Y., Han G., Zhang Y., Xu L., Xu J., Huang X., Chen K. 2005. Electrochemical deposition and characterization of wide band semiconductor ZnO thin film. *Thin Solid Films*, 25,28.
- Wu, R. H. Datar, K. M. Hansen, T. Thundat, R. J. Cote and A. Majumdar, *Nat. Biotechnol.*, Cilt 19, Sayfa 856, 2001

## **ÖZGEÇMİŞ**

1983 Erzurum doğumlu olup ilk ve orta öğrenimini Erzurum da tamamladı.2002 yılında Atatürk üniversitesi fen fakültesi fizik bölümünde lisans eğitime başladı ve 2007 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk üniversitesi fen bilimleri enstitüsünde fizik anabilim dalında yüksek lisans eğitime başlayarak ve 2010 yılında mezun oldu.