

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Havva YANIŞ**

**ATMALI FİLTRELİ KATODİK VAKUM ARK DEPOLAMA YÖNTEMİYLE  
P-TİPİ ÇİNKO OKSİT (ZnO) ÜRETİMİ VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**ADANA, 2008**

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATMALI FİLTRELİ KATODİK VAKUM ARK DEPOLAMA  
YÖNTEMİYLE P-TİPİ ÇİNKO OKSİT (ZnO) ÜRETİMİ VE  
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ**

**Havva YANIŞ**

**YÜKSEK LİSANS**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**Bu Tez .././2008 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği  
/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.**

İmza.....

Prof. Dr. Hamide KAVAK  
Danışman

İmza.....

Prof. Dr. Ramazan ESEN  
Üye

İmza.....

Yrd.Doç.Dr.Ebru Ş.TÜZEMEN  
Üye

Bu tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

**Kod No:**

**Prof.Dr.Aziz ERTUNÇ  
Enstitü Müdürü**

**Bu çalışma Ç.Ü. Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Proje Birimi tarafından  
desteklenmiştir.**

**Proje No: FEF2007YL30**

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların  
kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**ÖZ**

**YÜKSEK LİSANS**

**ATMALI FİLTRELİ KATODİK VAKUM ARK DEPOLAMA  
YÖNTEMİYLE P-TİPİ ÇİNKO OKSİT (ZnO) ÜRETİMİ VE  
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ**

**Havva YANIŞ**

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**Danışman :** Prof. Dr. Hamide KAVAK  
**Yıl :** 2008, **Sayfa:**78  
**Jüri :** Prof. Dr. Hamide KAVAK  
Prof. Dr. Ramazan ESEN  
Yrd. Doç. Dr. Ebru Ş. TÜZEMEN

Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama (PFCVAD) sistemi kullanılarak cam alt tabanlar üzerine oda sıcaklığında Çinko Nitrür ince filmler üretildi. Bu örneklerin farklı sıcaklıklarda tavlanmasıyla p-tipi ZnO (Çinko Oksit) ince filmler elde edildi. Elde edilen p-tipi ZnO (Çinko Oksit) ince filmlerin optik ve elektriksel özellikleri belirlenerek tartışıldı.

**Anahtar Kelimeler:** PFCVAD, p-tipi ZnO, Elektriksel Özellikler

## **ABSTRACT**

**MSc**

|                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>PRODUCTION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF P-TYPE ZINC OXIDE (ZnO) BY PULSED FILTERED CATHODIC VACUUM ARC DEPOSITION METHOD</b></p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Havva YANIŞ**

**DEPARTMENT OF PHYSICS  
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
UNIVERSITY OF ÇUKUROVA**

**Supervisor :** Prof. Dr. Hamide KAVAK  
**Year :** 2008, **Pages:** 78  
**Jury :** Prof. Dr. Hamide KAVAK  
Prof. Dr. Ramazan ESEN  
Assist.Prof. Ebru Ş. TÜZEMEN

Thin Zinc Nitride films were deposited at room temperature on glass substrates by a pulsed filtered cathodic vacuum arc deposition system. These thin films changed into p-type ZnO ( Zinc Oxide) thin films by annealing at different temperatures. Optical and electrical properties of these thin films were determined and discussed.

**Key Words:** PFCVAD, p- type ZnO, Electrical Properties

## TEŞEKKÜR

Tez konumu belirleyen ve çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen Danışmanım Prof. Dr. Hamide KAVAK'a, çalışmalarım sırasında bana yol gösteren hocam Prof. Dr. Ramazan ESEN'e, yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Ebru ŞENADIM TÜZEMEN'e, deneylerim ve ölçümlerim sırasında benden yardımlarını esirgemeyen, deneyleri beraber yaptığımız grup arkadaşlarım Kamuran KARA'ya ve Necdet Hakan ERDOĞAN'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca, bugün sahip olduğum her şeye ulaşmamda her zaman yanımda olan annem Emine YANIŞ'a, babam M. Ali YANIŞ'A, sevgili ablam Ayşe ŞİMŞEK'e ve eşi Şahin ŞİMŞEK'e, kardeşim Hilal YANIŞ'a, canım teyzeciğim Nazike TEKAKAN'a sonsuz teşekkürler sunuyorum.

Her zaman yanımda olan ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Tuğba KARAMAN'a, Türker KARAMAN'a ve Nilay KANTARCI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Sevgisiyle daima motive olduğum biricik yeğenim Ömer Ayberk ŞİMŞEK'e ayrıca teşekkür ediyorum.

| <b>İÇİNDEKİLER</b>                                                 | <b>SAYFA</b> |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZ.....                                                            | I            |
| ABSTRACT .....                                                     | II           |
| TEŞEKKÜR.....                                                      | III          |
| İÇİNDEKİLER.....                                                   | IV           |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                            | VI           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                              | VII          |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                      | IX           |
| 1. GİRİŞ .....                                                     | 1            |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....                                         | 4            |
| 3. MATERYAL VE METOD.....                                          | 11           |
| 3.1. Yarıiletkenler.....                                           | 11           |
| 3.2. ZnO'nun Elektriksel Özellikleri.....                          | 11           |
| 3.3. Yarıiletken İnce Filmlerin Elektriksel İletkenlikleri.....    | 13           |
| 3.4. Hall Etkisi.....                                              | 16           |
| 3.5. Optik Özellikler.....                                         | 18           |
| 3.5.1. Temel Soğurma .....                                         | 18           |
| 3.5.2. İzinli Doğrudan Geçişler .....                              | 19           |
| 3.5.3. Yasaklı Doğrudan Geçişler .....                             | 21           |
| 3.5.4. Dolaylı Bantlar Arasında Dolaylı Geçişler .....             | 22           |
| 3.5.5. Direk Bantlar Arasındaki Dolaylı Geçişler .....             | 29           |
| 3.5.6. Bant Kuyukları Arasındaki Geçişler .....                    | 29           |
| 3.6. Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi .....             | 32           |
| 3.6.1. Soğurma Katsayısının Hesaplanması.....                      | 32           |
| 3.6.2. Yasak Enerji Aralığının Bulunması .....                     | 37           |
| 3.6.3. Film Kalınlığının Belirlenmesi .....                        | 38           |
| 3.6.4. Kırılma İndisi Hesabı.....                                  | 40           |
| 3.7. Atmalı Plazma ve Filtreli Katodik Vakum Ark Yöntemi .....     | 40           |
| 3.7.1. Düzlemler Arası Uzaklık Hesabı.....                         | 40           |
| 3.7.2. Örgü Parametresinin Ölçümü ve Tanecik Büyüklüğü Hesabı..... | 41           |
| 3.8. P-N Eklemler ve Diyot.....                                    | 41           |

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.9. Atmalı Plazma ve Filtreli Katodik Vakum Ark Yöntemi.....                                                                                             | 45 |
| 3.10. ZnO İnce Film Üretiminde Kullanılan PFCVAD Sistemin Yapısı ve<br>Sistemi Oluşturan Elemanlar .....                                                  | 47 |
| 3.10.1. Reaksiyon Odacığı.....                                                                                                                            | 48 |
| 3.10.2. Turbomoleküler Pompa Sistemi.....                                                                                                                 | 48 |
| 3.10.3. Atmalı Plazma Ark Kaynağı.....                                                                                                                    | 50 |
| 3.10.4. Gaz Akış-Basınç Kontrol Sistemi.....                                                                                                              | 51 |
| 3.10.5. Oksijen Tüpü.....                                                                                                                                 | 52 |
| 3.10.6. Katot ve Alt Tabaka.....                                                                                                                          | 52 |
| 3.11. ZnO İnce Filmin Üretilmesi.....                                                                                                                     | 52 |
| 4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR.....                                                                                                                             | 54 |
| 4.1. Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi ile Elde<br>Edilen P-Tipi ZnO İnce Filmlerin Optik ve Yapısal Özelliklerinin<br>Belirlenmesi..... | 54 |
| 4.2. P-tipi ZnO ince filmlerin tavlama ile optik özelliklerinin değişimi..                                                                                | 63 |
| 4.3. Elektriksel Özellikler.....                                                                                                                          | 67 |
| 4.4. Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi İle Elde<br>Edilen ZnO İnce Filmlerin Elektriksel İletkenlik Çalışmaları.....                     | 69 |
| 4.5. p- n Diyot.....                                                                                                                                      | 71 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....                                                                                                                                 | 74 |
| KAYNAKLAR.....                                                                                                                                            | 76 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                                                                                             | 78 |

| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b>                                                                    | <b>SAYFA</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 4.1     Zne 2 için kırılma indisi değerleri.....                                    | 59           |
| Çizelge 4.2     Oze 6 için kırılma indisi hesabı.....                                       | 59           |
| Çizelge 4.3     Zne 2 Hesaplamaları.....                                                    | 62           |
| Çizelge 4.4     Oze 6'nin Hesaplamaları.....                                                | 63           |
| Çizelge 4.5     Filmlerin Soğurma Kenarı, Enerji Bant Aralığı ve Kalınlık<br>Değerleri..... | 67           |
| Çizelge 4.6     Filmlerin Hall Ölçüm Değerleri.....                                         | 68           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

## SAYFA

|            |                                                                                                                    |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1  | Bir n-tipi yarıiletkenin yüzeyinde bant eğilmesi (a) tüketme (azaltma) katmanı (b) düz bant (çoğalma katmanı)..... | 14 |
| Şekil 3.2  | Hall etkisi .....                                                                                                  | 18 |
| Şekil 3.3  | Parabolik bir bant yapısında doğrudan geçiş .....                                                                  | 20 |
| Şekil 3.4  | Dolaylı geçişler .....                                                                                             | 22 |
| Şekil 3.5  | Soğurmanın sıcaklık bağımlılığı.....                                                                               | 25 |
| Şekil 3.6  | İki fonon yardımcı geçişler .....                                                                                  | 26 |
| Şekil 3.7  | Optik soğurmanın iletim bandı durumlarının doldurulmasıyla değişimi.....                                           | 27 |
| Şekil 3.8  | Aşırı katkılamanın bant kenarına etkisi.....                                                                       | 28 |
| Şekil 3.9  | Taşıyıcı yoğunluğunun soğurmaya etkisi.....                                                                        | 28 |
| Şekil 3.10 | İletim bandına doğrudan geçişler .....                                                                             | 29 |
| Şekil 3.11 | GaAs' ın oda sıcaklığındaki soğurma kenarı.....                                                                    | 30 |
| Şekil 3.12 | İletim bant kuyruğunun optik soğurma ile gözlenmesi.....                                                           | 30 |
| Şekil 3.13 | İnce bir tabakadaki soğurma.....                                                                                   | 34 |
| Şekil 3.14 | İnce bir filmde çok yansımali ışık geçirimi.....                                                                   | 35 |
| Şekil 3.15 | Amorf bir yarıiletkenin soğurma katsayısının enerji ile değişimi..                                                 | 38 |
| Şekil 3.16 | p-n eklemi ile alıcı ve verici iyonlar.....                                                                        | 42 |
| Şekil 3.17 | Diyot Sembolü ve Geçirme Yönünde Kutuplanmış Diyot.....                                                            | 43 |
| Şekil 3.18 | İdeal Diyotun Akım-Gerilim Öz Eğrisi.....                                                                          | 43 |
| Şekil 3.19 | Ge ve Si Diyotların Akım-Gerilim Öz Eğrileri.....                                                                  | 44 |
| Şekil 3.20 | PFCVAD sisteminin şematik gösterimi.....                                                                           | 47 |
| Şekil 3.21 | Reaksiyon Odacığı.....                                                                                             | 48 |
| Şekil 3.22 | Turbomoleküler pompa sistemi.....                                                                                  | 48 |
| Şekil 3.23 | (a) Filtrenin kendisi, (b)Atmalı Plazma Ark Kaynağı, (c) Şematik gösterimi.....                                    | 50 |
| Şekil 3.24 | Gaz Akış-Basınç Kontrol Sistemi .....                                                                              | 51 |
| Şekil 3.25 | Film üretiminde kullanılan O <sub>2</sub> tüpü ve Gaz Vanası.....                                                  | 52 |

|            |                                                                                                               |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.1  | Tavlanmamış ZNE 3 ve OZE 7 isimli ince filmlerin dalga boyuna karşı geçirgenlik eğrileri.....                 | 55 |
| Şekil 4.2  | Tavlanmış ZNE 2 ve OZE 6 isimli ince filmlerin dalga boyuna karşı geçirgenlik eğrileri.....                   | 56 |
| Şekil 4.3  | Tavlanmış ZNE 2 ve OZE 6 isimli ince filmlerin $\alpha$ -E değişimi...                                        | 57 |
| Şekil 4.4  | Tavlanmış ZNE 2 ve OZE 6 isimli ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ -E değişimi.....                             | 58 |
| Şekil 4.5  | Oze 7 Xrd sonuçları.....                                                                                      | 60 |
| Şekil 4.6  | Zne 3 Xrd Sonuçları.....                                                                                      | 60 |
| Şekil 4.7  | Tavlanmış Oze 6'nın Xrd Sonuçları.....                                                                        | 61 |
| Şekil 4.8  | Tavlanmış Zne 2'nin Xrd Sonuçları.....                                                                        | 61 |
| Şekil 4.9  | Tavlanmış ZN 19, ZN 26, ZN 9, ZN 22, ZN 23 isimli ince filmlerin dalga boyuna karşı geçirgenlik eğrileri..... | 64 |
| Şekil 4.10 | Tavlanmış ZN 19, ZN 26, ZN 9, ZN 22, ZN 23, isimli ince filmlerin $\alpha$ -E değişimi.....                   | 65 |
| Şekil 4.11 | Tavlanmış ZN 19, ZN 26, ZN 9, ZN 22, ZN 23, isimli ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ -E değişimi.....          | 66 |
| Şekil 4.12 | Elektriksel ölçüm düzeneği.....                                                                               | 69 |
| Şekil 4.13 | $\ln(R/R_0)$ 'ın $1000/T$ 'ye değişimi.....                                                                   | 70 |
| Şekil 4.14 | İletkenliğin $1000/T$ 'ye değişimi.....                                                                       | 71 |
| Şekil 4.15 | p-n eklem diyot .....                                                                                         | 72 |
| Şekil 4.16 | p-n eklem diyot .....                                                                                         | 73 |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

$\alpha$  : Soğurma Katsayısı

$\sigma$  : İletkenlik

PFCVAD : Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Tekniği

$V_H$  : Hall Gerilimi

$\mu$  : Mobilite

$\rho$  : Özdirenç

CVD : Kimyasal Buhar Depolama Yöntemi

ZnO:N : Azot Katkılı Çinko Oksit

PL : Fotolüminesans

Yarı iletkenler iletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alırlar, normal halde yalıtkandırlar. Ancak ısı, ışık ve manyetik etki altında bırakıldığında veya gerilim uygulandığında bir miktar valans elektronu serbest hale geçer, yani iletkenlik özelliği kazanır. Bu şekilde iletkenlik özelliği kazanması geçici olup, dış etki kalkınca elektronlar tekrar atomlarına dönerler. Tabiatta basit eleman halinde bulunduğu gibi laboratuarda bileşik eleman halinde de elde edilir. Yarı iletkenler kristal yapıya sahiptirler. Yani atomları kübik kafes sistemi denilen belirli bir düzende sıralanmıştır. Bu tür yarı iletkenler, yukarıda belirtildiği gibi ısı, ışık, etkisi ve gerilim uygulanması ile belirli oranda iletken hale geçirildiği gibi, içlerine bazı özel maddeler katılarak ta iletkenlikleri arttırılmaktadır. Periyodik cetvelin II. grup elementlerinden olan Zn, Cd, Hg VI. grup elementleri olan O, S, Se ve Te ile 12 tane ikili bileşik oluştururlar. Ayrıca bu bileşikler ile üçlü, dörtlü, hatta beşli bileşikler de oluşturulmaktadır. Yasak enerji aralıklarının geniş bir bölgeyi kapsamamasından dolayı bunlar teknolojiye ve bilimsel çalışmalarda oldukça fazla kullanılmaktadırlar. Bunlar, kızılötesi (Infrared) detektörlerin görüntü sistemleri, yüksek enerjili radyasyon detektörleri, televizyon kamera tüplerindeki fotoiletken görüntü detektörleri, güneş pilleri, lazerler, elektrolüminesans diyotlar gibidir. İyi kalitede tek kristaller çeşitli suni kristal büyütme tekniklerinin geliştirilmesinden sonra üretilmiştir. II-VI bileşiklerinin enerji bant aralığı 1.8-4eV arasında değişmektedir.

Çinko oksit (ZnO) günümüzde birçok teknolojik uygulamaları olan ve potansiyel olarak birçok yeni uygulama alanı olan bir yarıiletkenidir. Bu uygulamaları:

- Morötesi (UV) ışık yayıcılar (LED'ler ve ışıklı paneller),
- Spin fonksiyonel aygıtlar (polarize ışık yayıcılar, Spin alan etkili transistörler s-FET, kuantum bazlı sayısal aygıtlar),
- Biyo-algılayıcılar,
- Gaz algılayıcılar,
- ZnO nanorod aygıtlar,
- Yüzey akustik aygıtlar (SAW),
- Işık geçirgen elektronik uygulamalar (gösterge panelleri),  
gibi ana hatlarıyla listelemek mümkündür.

Ucuz, toksik olmayan bir malzeme olması yanında, elektro-optik aygıtlar için istenen birçok özelliği (yüksek eksiton bağlanma enerjisi, yüksek iyoniklik, yüksek yasak enerji aralığı gibi) birlikte bulundurmasıyla ZnO yarıiletken çalışmalarında hem bilimsel hem de teknolojik öneme sahiptir.

Yarıiletken ince filmlerin depolama sistemleri içinde plazma yardımcı atmalı filtreli katodik ark depolama sistemi yeni gelişmekte olup, düşük alt taban sıcaklıklarında iyi tutunmuş yüzey morfolojisi kontrol edilebilen, yüksek yoğunluklu bileşik filmlerin sentezi için uygun bir sistemdir. Katodik ark, katot yüzeyindeki ark deşarj yayınlama sisteminin katodu erozyona uğratarak buharlaştırmasıyla oluşur ve sistemde reaktif gaza ihtiyaç duyulmaz. Katot, metal, metal alaşım veya yarı iletken olabilir.

Ark kaynağından yayınlanan plazma; elektronlar, iyonlar ve makro parçacıklar ve nötral metal buharı içerir. Nötral metal buharı, kütle transferinin küçük bir kısmını oluşturur. Bu nedenle ark kaynağından kaplama materyal akısı, tümüyle iyonlar ve makro parçacıklardan oluşur ve üretilen iyonların ortalama kinetik enerjileri 10 ile 100

eV arasındadır. Ortalama iyon enerjisi katot ile anot arasındaki potansiyel farkından daha büyüktür. Bu fiziksel karakteristikler, kaplanan filmler için film morfolojisinin kontrolü, düşük örnek sıcaklığı, yüksek film yoğunluğu, yüksek film tutunması, bileşik filmlerin verimli sentezi ve düzgünlük gibi avantajlar sunmaktadır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Püskürtme yöntemiyle hazırlanan ZnO filmler üzerinde yavaş fotoiletkenlik geçişleri etrafı olarak çalışılmıştır. Yüzey yük kontrollü film iletkenliği, kısa bir süre için içerisinde hidrojen gazı ( $H_2$ ) ve oksijen gazı ( $O_2$ ) bulunan bir ortamda tavlansmıştır. Kullanılan filmlerin iletkenlik değerin bir çok durumu için tersinir değışken iletkenlik mümkün olduğu ve ışı nım altında üretilen filmlerin iletkenlik büyüklüğünün karanlık iletkenliğe bağı lı olarak artabileceğı belirtilmiştir. Fotoiletkenlik durulmasının, zıt yöntemi yüzeyde oksijenin bulunduğu durumlar için elektron tünelleme mekanizması ile tanımlanacağı söylenmiştir. Bu çalışmada üretilen filmler hidrojen ortamında 200 – 340 °C aralığında tavlama işlemine maruz bırakılmış ve bunun sonucunda sıcaklık arttırıldıkça iletkenliğin  $0.0012 - 6.6 (\Omega cm)^{-1}$  aralığında, mobilitenin  $0.1 - 28 (cm^2/V.s)$  aralığında, konsantrasyonun da  $0.15 \times 10^{18} - 1.47 \times 10^{18} cm^{-3}$  aralığında arttıkları gözlenmiştir (Studenikin ve ark, 1999).

$Zn_3N_2$  ince filmlerin ısısal oksidasyonu ile yüksek taşıyıcı yoğunluğu ve iyi lüminesans özelliklere sahip olan p tipi ZnO üretilmiş ve yapısal özellikleri incelenmiştir.  $Zn_3N_2$  ince filmler plazma-yardımlı CVD yöntemi kullanılarak silisyum alt tabanlar üzerine depolanmıştır. Kübik antibiksbayt kristal yapısına sahip olan  $Zn_3N_2$  ince filmler, 500 'de tavlandığında, tamamiyle polikristalin hegzagonal vurtzit yapılı ZnO:N ince filmlere dönüştüğü ve tavlama sıcaklığı 700 °C olan filmlerin taşıyıcı yoğunluğunun  $4.16 \times 10^{17} cm^{-3}$  değerine sahip olan yüksek kaliteli p tipi ZnO olduğu görülmüştür.  $Zn_3N_2$  ince filmler 500, 600, 700 ve 800 °C'de birer saat tavlansmış ve bu filmlerin X ışın kırınım desenleri incelenmiştir. Filmlerin tavlama sıcaklığı artırılarak yapılan bu çalışmada kristal kalitesinin iyiye gittiğı görülmüştür (Li, B.S. ve ark, 2002).

Hedef olarak saf çinko diski ve çalışma gazı olarak da Ar- $N_2$  kullanarak, reaktif DC magnetron söktürme yöntemiyle amorf kuvarz üzerine  $Zn_3N_2$  ince filmleri depolanmışlardır. Altaban sıcaklığı  $150 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  olarak belirlemişlerdir. Depolama odasının basıncı  $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  olarak ayarlamışlardır. Söktürme süresince, argonun azota oranı 3:1 ve toplam gaz akış oranı 40 sccm olarak belirlenmiştir. Filmler 3 dakikada depolanmışlardır. Büyütülen  $Zn_3N_2$  filmlerin koyu-gri renkli oldukları ve 3

saatte 350 °C ve 550 °C arasında havada tavlandıktan sonra saydam oldukları görülmüştür.

Farklı sıcaklıklarda hazırlanan ZnO filmlerin UV-görünür soğurma spektrumu elde edilmiş ve bütün spektrumda 385 nm civarında keskin soğurma kenarı bulunmuştur. Buradan da bütün filmlerin saf çinko oksit fazına sahip oldukları belirtilmiştir. Soğurma spektrumundan özden soğurma katsayısı  $\alpha \sim 25 \mu\text{m}^{-1}$  alınarak kalınlık değerleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. 368 nm’deki ortalama soğurma  $5.25 \pm 0.2$  alınarak, ortalama kalınlık 210 nm civarında elde edilmiştir.

350 °C ve 500 °C arasındaki oksidasyon sıcaklıklarında p-tipi iletkenlik sağlanmıştır ve Hall etkisi ölçüm sonuçlarından, 450 °C de  $5.78 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  hall konsantrasyonu, 220  $\Omega\text{cm}$  direnç ve 0.098  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  Hall mobilitesi değerleri elde edilmiştir. Oksidasyon sıcaklığı 500 °C’den daha yüksek olduğunda, filmlerde yeteri kadar N olmadığından dolayı ZnO filmlerin n-tipi oldukları belirtilmiştir (Chao Wang, Zhenguo Ji, Kun Liu, Yin Xiang, Zhizhen Ye, 2003).

Söktürme-depolama yöntemi kullanılarak üretilen  $\text{Zn}_3\text{N}_2$  ince filmlerin ısısal oksidasyonu ile ZnO:N ince filmlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada amorf  $\text{Zn}_3\text{N}_2$  filmler, 15 dakika boyunca 600°C’de oksijenli ortamda tavlansmıştır. %90  $\text{N}_2$ ’de  $\text{Zn}_3\text{N}_2$  depolanırken oda sıcaklığında  $\sim 10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  mobiliteli ve  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  taşıyıcı konsantrasyonlu p- tipi iletim başarılıdır. PL spektrumu 3.36’e keskin bir pik vermektedir. Tüm görünür spektrumdaki p-ZnO:N’nin geçirgenliği yaklaşık %80’dir. Bu da geçirgen elektronikler için materyali uygun hale getirir (Kaminska, E. ve ark, 2005).

Radyo frekans magnetron söktürme yöntemiyle p-tipi Si alttaban üzerine büyütülen ZnO ince filmlerin optik ve elektriksel özellikleri, ısısal tavlamanın etkileri; X-ışını kırınımı (XRD), geçirmeli elektron mikroskopisi (TEM), fotolimünesansı (PL) ve X ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) kullanılarak araştırılmıştır. XRD örnekleri ve direk şekiller, p-tipi Si alt taban üzerine büyütülen ZnO ince filmlerin kristalliğinin ısısal davranışla geliştiğini göstermiştir. XRD örnekleri, kutup şekilleri ve TEM görüntüleri sadece büyütülmüş ve Si alttabanlar üzerine büyütülen tavllanmış ZnO filmlerinin [1000] kristal yöneliminde c-ekseni tercihli bir yönelime sahip olduğunu göstermiştir. PL spektrası; limünesans piklerinin

serbest eksitonlara ve tavlamadan sonra ortaya çıkan derin seviyelere bağlı olduğunu göstermiştir. XPS spektrası; O 1s ve Zn 2p'ye benzer pik pozisyonlarının ısısal tavlamadan sonra biraz değiştiğini göstermiştir. Bu sonuçlar p-Si alttaban üzerine büyütülen ZnO ince filmlerin optik ve elektriksel özellikleri üzerine ısısal etkilerinin anlaşılmasını geliştirmeye yardımcı olmuştur (Han ve ark, 2005).

Bu çalışmada, ZnO ve GaAn yüzeyler üzerine, çinkonitrür tabakaların ısısal oksidasyonu ile azot katkılı (ZnO:N) ZnO ince filmler elde edilmiştir. Birçok teknolojik basamakların optimizasyonu ile p-tipi ZnO elde etmişlerdir. Taşıyıcı konsantrasyonunu  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , mobilitiyi de  $10 \text{ cm}^2/\text{v.s}$  bulmuşlardır (Kaminska ve ark, 2005).

ZnO ince filmleri depolamak için bir ikili-iyon-demeti sistemi kullanmışlar.  $\text{O}^+$  iyon demeti ile reaktif söktürme için % 1 In-katkılı bir Zn hedefi kullanmışlardır. Bu çalışmada  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  ve kuvarz kristal olmak üzere iki çeşit alt taban kullanılmıştır. Depolama odasının basıncı  $9.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  olarak belirlenmiş ve saf  $\text{NH}_3$  ile doldurulduktan sonra basınç değerinin  $6.5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  değerine yükseldiği belirtilmiştir. Depolama süresince, büyütülen filmleri bombardıman etmek için 70 mA'lık iyon akımıyla birlikte 1.8 keV'lik  $\text{O}^+$  iyon demeti kullanılmıştır. Alttaban sıcaklığı  $200^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiştir. 120 dakikalık bir depolama süresinden sonra, SEM ile belirlenen ZnO film kalınlığının 400 nm civarında olduğu belirlenmiştir. Bu örneklerin depolama sonrası tavlama işlemleri, 120 dakikada  $\text{O}_2$  ortamında  $400^\circ\text{C}$  sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

Hall ölçüm sonuçlarından, N-In birlikte katkılı filmlerde asıl taşıyıcı tipinin deşikler olduğu ve oda sıcaklığında deşik konsantrasyonunun  $4.72 \times 10^{15}$ - $2.17 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  arasında olduğu saptanmıştır. Hall mobilitesi  $0.62$ - $3.51 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  civarında ölçülmüştür.

I – V eğrilerinden, IBAD yöntemiyle  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  üzerine depolanan p-tipi ZnO filmlerin fotoelektrik etkiler gösterdikleri ortaya çıkarılmıştır. UV etkisine maruz kalınmadığında akımlar  $-0.8 \text{ V}$  da  $-0.165 \text{ mA}$  ve  $0.8 \text{ V}$  da  $0.092 \text{ mA}$  olarak ölçülmüştür. 30s süresince  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  lik 254nm UV etkisine maruz kalındığında ise filmin akımının çok daha büyük değerlere ( $-0.8 \text{ V}$  da  $-62.45 \text{ mA}$  ve  $0.8 \text{ V}$  da  $62.47 \text{ mA}$ ) ulaştığı ve akımın uygulanan gerilimle lineer bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

254 nm UV etkisine maruz bırakılan p-tipi ZnO filmlerinin iletkenliğinin UV etkisine maruz bırakılmayanlardan yaklaşık 600 kat büyük olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı, p-tipi ZnO filmlerinin UV etkisine maruz bırakılmaya çok duyarlı oldukları ve UV dedektör veya sensörlerde uygulama alanı bulabilecekleri belirtilmiştir (Zhi Yan, Zhi Tang Song, Wei Li Liu, Qing Wan, Fu Min Zhang, Song Li Feng, 2005).

Bu çalışmada, ZnO ince filmlerdeki p tipi iletim, Al ve N katkılanması ile sağlanmıştır. C eksen yönelimli birlikte katkılanan bu ince filmler ortamda saf N<sub>2</sub>O varken 300 ve 600 °C arasında değişen farklı alt taban sıcaklıklarında hazırlanmıştır. 500 °C de hazırlanan birlikte katkılanmış ince filmler en düşük 54.8 Ω cm öz direnç göstermiş ve azot katkılı olanlardan yaklaşık 10<sup>4</sup> kez daha yüksek olan en yüksek 1.3x10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> taşıyıcı konsantrasyonu sonucunu göstermişlerdir. Filmler çok iyi kristal özellik göstermiştir (Zhang Z. H., ve ark., 2006).

Hedef olarak saf çinko diski (4N) kullanılarak, reaktif DC magnetron söktürme yöntemiyle, ZnO ince filmleri cam alttaban üzerine depolamışlardır. Bu makalede alttaban sıcaklığı 200 °C' ye ayarlamışlar ve depolama için bir termokapılı alttabana yerleştirerek bu sıcaklık değerini kontrol altında tutmuşlardır. Depolama odasının taban basınç değerini 8 × 10<sup>-3</sup> Pa ve çalışma basıncını da 9 × 10<sup>-1</sup> olarak belirlemişlerdir. Odacığa yüksek saflıkta argon ( % 99.99 ), azot ve oksijen gazı koymuşlar ve üç sayısal kütle akı kontrol mekanizmasıyla bunların akış oranını kontrol etmişlerdir. Söktürme işlemi süresince toplam gaz akış oranı 60 sccm ve argon gaz akış oranı da 30 sccm olarak ayarlanmıştır. N<sub>2</sub>' nin O<sub>2</sub>' ye oranı 0:30 dan 30:0' a kadar olan oranlarda değiştirilmiştir. Filmler 15 dakikada 150 W' da depolanmışlardır. Depolamadan sonra, filmler 450 °C 'de, hava ortamında 3 saatlik bir süreyle tavlammışlardır.

Hall etkisi ölçüm sonuçlarından, tavlammış filmlerin mobilitesinin büyütülen filmlerin mobilitesinden daha büyük olduğu gözlenmiştir. N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> oranı 20:10 olduğunda, depolanan filmlerin en yüksek deşik konsantrasyonuna ve en düşük dirence sahip oldukları saptanmıştır. N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> oranı 25:5 olduğunda hazırlanan filmlerin n-tipi iletkenlik gösterdiği belirlenmiştir. N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> oranı 20:10 olduğunda ve 450 °C' de 3 saat süreyle tavlendiğinde, 8.34 Ω cm elektriksel direnç ve 7.47 × 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> deşik

konsantrasyonuyla birlikte p-tipi iletkenlik gözlenmiştir ( Chao Wang, Zhenguo Ji, Junhua Xi, Juan Du , Zhizhen Ye, 2006 ).

Azot katkılı ZnO ince filmler (ZnO:N) ZnO hedefe azot gazı püskürtülerek 510 °K'de kuvars cam yüzeyler üzerine reaktif radyo frekans (RF) magnetron püskürtme yöntemi ile büyütülmüştür. Büyütülen ZnO:N filmler oda sıcaklığında yalıtım göstermiştir. Fakat  $10^{-4}$  Pa basınç altında bir saat 860 °K'de karanlıkta tavlandıktan sonra Hall mobilitesi  $0.1 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ , taşıyıcı konsantrasyonu  $1.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , özdirenci  $456 \text{ } \Omega.\text{cm}$  ölçülmüş ve p tipi iletken davranışı gösterdiği bulunmuştur. Ancak, p tipi iletim karanlıkta kararlı değildir ve aşama aşama n tipi yarıiletkene dönüşmektedir. Birkaç dakika gün ışığında kaldıktan sonra n tipi olan ZnO:N, ışık altında p tipine tekrar dönüşmektedir ve ışıktaki p tipi iletken olarak kalmaktadır (Yao, B. ve ark, 2007).

Radyo frekans magnetron söktürme yöntemiyle, yaklaşık 630 nm kalınlıktaki ZnO ince filmleri cam alt taban üzerine depolamışlardır. Filmlerin implantasyon işlemi, oda sıcaklığında,  $2 \times 10^{16}/\text{cm}^2$  dozda, 140 keV enerjili N iyonları ile yapılmıştır. TRIM simulasyonu, N iyonlarının 318 nm derinliğe kadar nüfus ettiğini göstermiştir. İmplantasyon işleminden sonra, filmler vakumda bir saat süreyle 200 den 600 °C' ye kadar tavlama yapılmıştır. Filmlerin elektriksel ve optiksel özelliklerini araştırmak için hall etkisine bakılmış ve fotoluminesans ölçümleri yapılmıştır. PL ölçümlerinden, azot implantasyonu yapılmış ve tavlama yapılmış filmlerde bir kırmızı kayma ile birlikte 2.8 eV ve 3.0 eV da mavi luminesans gözlenmiştir. Tavlama sıcaklığının yükselmesiyle birlikte mavi luminesans şiddetinin arttığı gözlenmiştir. Hall ölçümleri, N implantasyonu yapılmış 600 °C' de tavlama yapılmış filmlerin hala n-tipi olduğunu göstermiştir. Örgü uyumsuzluğu ve yüksek katkı düzeyi, yüksek dozda iyon implantasyonu yapılmış p-tipi ZnO ince filmlerin üretiminde zorluğun ana nedeni olarak gösterilmiştir ( X.D. Zhang, C.L. Liu, Z. Wang, Y.Y. Lü, L.J. Yin, 2007 ).

$Zn_3N_2$  ince filmler 5mTorr basınçta RF magnetron söktürme yöntemi ile depolanmıştır. Hedef olarak  $Zn_3N_2$  kullanılmıştır. Plazma hem azot ( $N_2$ ) gazı hemde Argon (Ar) gazı içermektedir. Filmler 550 °C’ de  $N_2$  ve  $O_2$  atmosferinde tavlansmıştır. Filmlerin özelliklerinin ısısal tavlama ile değişimi incelenmiştir. Ar plazmasında depolanan filmlerin yapısındaki çinko (Zn) fazlalığından dolayı opak ve iletken ( $\rho \sim 10^{-1}-10^{-2} \Omega \text{ cm}$ ,  $N_D \sim 10^{18}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) olduğu bulunmuştur. 400 °C’ de tavlansmadan sonra  $Zn_3N_2$  ince filmler daha sitokiyometrik ve daha geçirgen olmuştur fakat elektriksel özellikleri daha kötüye gitmiştir.  $N_2$  plazmasında depolanan filmler ise geçirgendir fakat tavlandıktan sonra bile çok direnç göstermişler. Her iki tip filmde 400 °C ’de oksidasyonla p-tipi ZnO’ya dönüşmüştür. Üretilen filmlerden 345 nm kalınlığındaki  $Zn_3N_2$  filmlerin ısısal davranışlarına bakılarak, Ar plazmasında depolanan ve oksitlenen filmlerin daha geçirgen olduğu saptanmıştır. Geniş bant aralığına sahip olan  $Zn_3N_2$  yarıiletken ince filmlerin, geçirgen optoelektronik devreler için uygun bir aday olduğu bulunmuştur (Kambılafka, V. ve ark, 2007).

Bu çalışmada ZnO’ de p-tipi iletkenlik sağlamak için birleştirilmiş bir alıcı katkılama metodu önerilmiştir. Azot ve fosforun her ikisi de p- tipi dopantlar olarak kullanılmışlardır. ZnO : (N,P) ince filmleri cam tabakalar üzerine ultrasonik spreyl pyrolysis yöntemi ile depolanmışlardır.  $O_2$  ortamında 20 dakika sürede uygun sıcaklıklarda ( 500 – 700 °C ) ısısal tavlama ile p-tipi iletkenlik başarılmıştır. 600 °C olan tavlama sıcaklığında  $5.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  hall konsantrasyonu ve  $0.94 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  hall mobilitesiyle birlikte  $12.5 \Omega\text{-cm}$  düşük direnç değeri elde edilmiştir. P- tipi davranışın yeniden elde edilebilir ve kalıcı olduğu belirtilmiştir. İkincil iyon kütle spektroskopisiyle (SIMS) ile ZnO içinde azot ve fosforun nüfus ettiği belirlenmiştir (T.H. Vlasenflin, M. Tanaka, 2007 ).

Azot katkılı ZnO ince filmleri a-düzlemli ( 11 – 20 ) safir tabakalar üzerine plazma yardımcı düşük basınç metal organik kimyasal buhar depolama ( MOCVD ) yöntemiyle depolanmışlardır. Dietil çinko, çinko kaynağı olarak kullanılmıştır ve  $N_2$  de taşıyıcı gaz olarak kullanılmıştır. NO plazma, 150 W’ da işlem yapan bir radyo frekans ( RF ) plazma kaynağı tarafından üretilmiştir ve hem oksijen kaynağı olarak hem de N katkı kaynağı olarak rol oynamaktadır. Büyüme sıcaklığı 250’ den 500 °C’

ye kadar değişmektedir ve ortam basıncı 5 Pa olacak şekilde sağlanmıştır. N-katkılı filmlerin ortalama kalınlığı 300 nm civarında elde edilmiştir.

XRD ölçümlerinden N-katkılı filmlerin (002) yönelimli oldukları bulunmuştur. Hall etkisi ölçümlerine bakıldığında, 500 °C büyüme sıcaklığının dışındaki bütün sıcaklıklarda p-tipi iletkenlik başarılmıştır. En iyi sonuçların elde edildiği 400 °C sıcaklıkta, 1.72  $\Omega$  cm direnç, 1.59 cm<sup>2</sup>/Vs hall mobilitesi ve  $2.29 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> hall konsantrasyonu değerleri elde edilmiştir. 450 ve 500 °C da ki yüksek büyüme sıcaklığında N konsantrasyonunun azalmasına bağlı olarak,  $3.68 \times 10^{16}$  cm<sup>-3</sup> düşük hall konsantrasyonu ve hatta n-tipi iletkenlik gözlenmiştir. Sıcaklık 350' den 250 °C' ye düşürüldüğünde, düşük sıcaklıkta ZnO içinde N içeriği arttırılmasına rağmen hall konsantrasyonunda daha fazla bir artış gözlenmemiştir ve bu da ZnO içindeki yüksek N konsantrasyonunun istenmeyen bazı kusurların oluşum enerjisini düşürmesine bağlanmıştır. Örnek olarak, ( N<sub>2</sub> ) gösterilmiştir (Y.J. Zeng, Z.Z. Ye, W.Z. Xu, B.Liu, Y. Che, L.P. Zhu, B.H. Zhao, 2007 ).

### 3.MATERYAL METOD

#### 3.1. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler elektrik akımının bir değere kadar akmasına izin vermeyen, bu değerden sonra sonsuz küçük direnç gösteren maddelerdir.

Yarı iletkenler periyodik cetvelde 3. ve 5. gruba girerler. Bu demektir ki son yörüngelerinde elektron alıcılığı veya vericiliği iletkenlerden fazla yalıtkandan daha azdır. Normal durumda yalıtkan olan maddeler ısı, ışık, manyetik etki veya elektriksel gerilim gibi dış etkiler uygulandığında bir miktar değerlik elektronlarını serbest hale geçirerek iletken duruma gelirler. Uygulanan bu dış etki veya etkiler ortadan kaldırıldığında ise yalıtkan duruma geri dönerler. Bu özellik elektronik alanında yoğun olarak kullanılmalarını sağlamıştır. Yarı iletkenlerin değerlik yörüngelerinde dört elektron bulunur. Bu yüzden yarı iletkenler iletkenlerle yalıtkanlar arasında yer almaktadır. Tüm yarı iletkenler son yörüngelerindeki elektron sayısını sekize çıkarma çabasıdadırlar.

#### 3.2. ZnO'nun Elektriksel Özellikleri

Elektriksel özellikleri nedeniyle ince filmler, son zamanlarda uygulamada sıkça kullanılmış ve teorik olarak incelenmiştir. Eskiden büyük elektriksel sistemlerle yapılabilen işlemler, bugün mikroskobik ince film tabanlı bütünleşmiş devre çipleriyle daha etkili ve güvenilir bir şekilde yapılabilmektedir. Malzemenin sınıfına, fiziksel durumuna, gövde veya film şeklinde olup olmadığına bakılmaksızın, uygulanan  $E$  elektrik alanında  $v$  hızıyla hareket eden  $q$  yüklü bir  $n$  taşıyıcı konsantrasyonunun  $J$  elektriksel akım yoğunluğu aşağıdaki basit bağıntı ile verilir;

$$J = nqv \quad (3.1)$$

Birçok malzeme için, özellikle küçük elektrik alanlarda taşıyıcı hızı elektrik alan ile orantılıdır;

$$v = \mu E \quad (3.2)$$

orantı sabiti veya birim alandaki hız, mobilite ( $\mu$ ) olarak bilinir. Buna göre akım yoğunluğu şu şekilde ifade edilebilir;

$$J = nq\mu E \quad (3.3)$$

ve Ohm kanununda, iletkenlik ( $\sigma$ ) öz direncin tersi ( $1/\rho$ ) olarak verilir;

$$\sigma = 1/\rho = nq\mu \quad (3.4)$$

Elektriksel iletkenlik teorileri, yukarıdaki eşitliklerde malzeme sabitlerinin niteliğini, doğasını ve büyüklüğünü tanımlamaya çalışır.  $n$  ve  $v$  veya  $\mu$ 'nün, sıcaklığın, bileşiğin, yapısal bozukluğun ve elektrik alanın bir fonksiyonu olarak nasıl değiştiğiyle ilgilenir

Gövdenin iletimi hakkında bilinenlerin çoğu, ince filmin davranışını anlamak için iyi bir temel oluşturur. Fakat ince filmlerde bazı önemli farklılıklar vardır ve bunlar aşağıda sıralanmıştır (Ohring, 1991);

1. Fiziksel olarak küçük boyutlarda olması, boyut etkileri: Numuneler, yük taşıyıcılarının yüzey saçılmasını ve kuantum mekaniksel tünellemeyi içerir.

2. Film hazırlama yöntemi: Metal ve yalıtkan filmlerin elektriksel özellikleri, filmlerin yapıma yönteminin bir fonksiyonu olduğu söylenemez. Filmin yapılmasına bağlı koşullar, kristal düzeninin değişmesi, yapısal ve elektronik bozuklukların konsantrasyonları, dislokasyon yoğunlukları, içerilen maddenin eksikliği ve yoğunluğu, tanecik morfolojisi, kimyasal bileşik, elektron tuzak yoğunlukları, birbirine bağlı tepkimelerin olması ve bunlara benzer durumlar, genel olmayan özelliklerin ortaya çıkmasına neden olur. Özellikle yalıtkanlar (örneğin: oksitler, nitritler) bu etkilere daha yatkındır. Metaller ise, daha az etkilenir.

3. Elektrot etkileri: Genellikle, alttabaka ve onun üzerine yapılan iletken bir film, aralarında sandviç oluşturan durumdaki film için elektrotlar olurlar. Genelde,

yalıtkan filmler yüzeylerine kontaklanan elektrotlardan ayrı düşünülemezler. Metallerin (MIM), yarıiletkenlerin (SOS) ve karışık elektrotların (MIS, MOS) arasında yalıtkan (I) veya oksit (O) filmler içeren yapıların elektriksel durumu, büyük ölçüde belirli metalden veya yarıiletken elektrotun yapıldığı malzemeden etkilenir. Yapışmanın iç yüzeyi, zorlama, içteki difüzyon, içeriye safsızlıkların alınması, bir ara yüzeyde yük geçişinin karakteristiğini değiştirebilen etmenlerden bazılarıdır.

4. Film sürekliliği: Süreksiz, ada yapılı filmlerdeki iletim mekanizmaları, sürekli filmlerinkinden farklıdır.

5. Yüksek elektrik alan iletim mekanizmasının olması: Çok küçük boyutların uçlarına uygulanan gerilimler, filmlerde kolaylıkla görülebilen yüksek alan etkilerine neden olur.

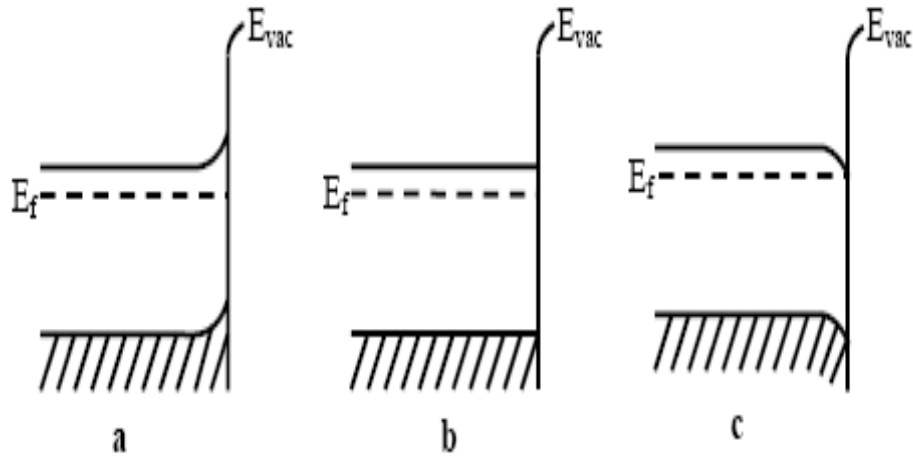
6. Yüksek kimyasal aktivite: Filmler; aşınma, su buharının emilmesi, atmosferik oksitlenme ve sülfitleşme ve alçak sıcaklık katı hal tepkimeleri nedeniyle elektriksel özelliklerde oluşan zamana bağlı değişimlerden veya yaşlanmadan kolaylıkla etkilenebilir.

### 3.3. Yarıiletken İnce Filmlerin Elektriksel İletkenlikleri

Yarıiletken ince filmlerin deneysel incelemesinde, metalik filmlerden daha büyük zorluklarla uğraşılmaktadır. Bunun nedeni, iletkenliğin film yapılma koşullarına olan bağlılığı, kristal örgüdeki bozukluklar ve küçük safsızlık konsantrasyonlarıyla ilgili özelliklerdir. Benzer malzemeler üzerinde farklı araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlardaki çeşitliliğin, metallerdekinden çok daha fazla olması, verilerin yorumunu zorlaştırmıştır. Son zamanlarda bu alanda önemli ilerlemeler olmasına rağmen, yarıiletkenler için verilebilen geçerli kurallar yoktur. Araştırmaların çoğu sadece, belirlenen koşullar altında hazırlanan seçilmiş bir malzemenin özellikleriyle ilgilidir. Teknolojik problemlere ilaveten, gövde yarıiletkenlerin özelliklerinin metallerinkinden çok daha karmaşık ve farklı olmasından dolayı zorluklar ortaya çıkmıştır.

Bütün bozukluklar göz ardı edilir ve mükemmel paralel sınır düzlemleri olan ideal bir yarıiletkenin bir ince film olduğu varsayılırsa, metallerde olduğu gibi büyüklük etkileri, özellikle film iletkenliği ve kalınlığı arasındaki bağıntı, yani kalınlığı ve serbest yük taşıyıcılarının mobilitesi arasındaki bağıntı araştırılabilir.

Yüzey özellikleri ve etkileri yarıiletkenlerde çok önemlidir ve elektriksel iletkenliklerin üzerinde özel etkileri vardır. Bu etki, yarıiletkendeki büyük bir derinliğe yüzey yükünün girmesiyle oluşan alan nedeniyle meydana gelir ve böylece elektriksel taşınma olaylarını (yani yük taşıyıcılarının taşınmasını) etkiler (Eckertova, 1986).



**Şekil 3.1.** Bir n-tipi yarıiletkenin yüzeyinde bant eğilmesi **(a)** tüketme (azaltma) katmanı **(b)** düz bant (çoğalma katmanı)

Sadece özel durumlarda, yüzeyde enerji bandlarının eğilmesine neden olan alan göz ardı edilebilir. Alanın etkileme derinliğiyle karşılaştırıldığında kalınlığı ince olan filmlerde yani Debye uzunluğu ( $L_D$ );

$$L_D = \left[ \frac{4\pi\epsilon kT}{e^2(n_0 + p_0)} \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

olan filmlerde veya sadece düz band yaklaşımındaki kalın filmlerde böyle durumlar olur (Chopra, 1969). Burada  $n_0$  ve  $p_0$ , sırasıyla gövdedeki elektronların ve deşiklerin konsantrasyonları,  $\varepsilon$  ise statik dielektirik sabittir.

İnce numunelerde iletim olduğunda, yük taşıyıcıları normal gövde saçılmasına ek olarak sınır yüzeylerinden önemli saçılmaya uğrarlar. Bundan dolayı etkin taşıyıcı mobilitesi, gövdedeki değerin altına düşer. Çünkü bu ek saçılma iletkenlik boyut etkilerine neden olur. Yarıiletkenlerde boyut etkilerinin irdelenmesi, yarıiletkenlerdeki toplam yüzey potansiyel engeli ve uzay yükünün ek özelliğinden dolayı metallerin irdelenmesinden farklıdır.

Band kenarlarının yüzeylere kadar düz olduğu ve elektron yoğunluğunun ( $n$ ) numunenin her yerinde aynı olduğu ve gövdedeki  $n_0$  değerine eşit olduğu varsayılırsa, yüzey saçılma etkisi ortalama çarpışma zamanı  $\tau_s$  (genellikle  $\sim 10^{-12}$  s) içine alınabilir. Gövde ve yüzey saçılma süreçleri toplanabilirse, ince filmlerdeki elektronlar için ortalama durulma zamanı

$$\frac{1}{\tau_f} = \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_0} \quad (3.6)$$

şeklinde olur. Burada  $\tau_s$  yüzeyden olan saçılmanın durulma zamanı,  $\tau_0$  ise gövdeden olan saçılmanın durulma zamanıdır.

Filmin toplam kalınlığını ( $d$ , bir taşıyıcının yüzeyden ortalama uzaklığı), ortalama hıza bölerek yaklaşık bir hesaplama elde edebilir (Chopra, 1969);

$$\tau_s = \frac{d}{v} = \frac{d}{\lambda} \tau_0 = \gamma \tau_0 \quad (3.7)$$

Burada  $\lambda$ , elektronun ortalama serbest yoludur.  $\lambda = \tau_0 v$  ve  $\gamma = d / \lambda$  ile ifade edilirler.

İnce filmlerdeki mobilite için, gövde için olan ifadeye benzer bir bağıntı kullanılabilir.

$$\mu_f = \frac{\mu_0}{1 + 1/\gamma} \quad (3.8)$$

Burada,  $\mu_0$  n-tipi gövdedeki serbest taşıyıcıların konsantrasyonudur ve gövde taşıyıcı mobilitesidir. Buna göre, film kalınlığının azalmasıyla mobilite azalır ve  $\gamma \gg 1$  için gövdedeki değerine yaklaşır.

Bütün elektronlar difüz saçılmaya uğramazsa, yani elektronların bir  $p$  kesri yansır, yansıma olasılığı  $p$  olmak üzere, elektronların sadece  $(1-p)$  kesri difüz saçılmaya uğrar. Bundan dolayı  $1/\tau$  ifadesi,  $(1-p)/\tau$  ile yer değiştirir ve

$$\mu_f = \frac{\mu_0}{1 + (1-p)/\gamma} \quad (3.9)$$

şeklinde olur.

### 3.4. Hall Etkisi

Yarıiletkenlerin iletkenlik tipini (n-tipi veya p-tipi) bulmak için bazı yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan biri Hall ölçümü yapmak ve taşıyıcı konsantrasyonunun işaretine bakmaktır. Verici (donor) veya n-tipi yarıiletken için taşıyıcı konsantrasyonu işareti negatiftir, alıcı (acceptor) veya p-tipi yarıiletken için taşıyıcı konsantrasyonunun işareti pozitiftir. Bu çalışmada üretilen ince filmlerin “Hall Effect Measurement System HMS-3000 Manual Ver 3.5” sistemi kullanılarak elektriksel ölçümleri yapılmıştır. Bu sistemle taşıyıcı konsantrasyonu, Hall mobilitesi, direnci, sheet konsantrasyonu ve iletkenliği de hesaplanabilmektedir

Manyetik alan içindeki bir iletkenin bir elektrik akımı geçerse, manyetik alan hareket eden yük taşıyıcıları üzerine enine bir kuvvet uygular ve onları iletkenin bir tarafına doğru iter. Bu etki en çok ince düz bir iletkende belirgindir. İletkenlerin kenarlarındaki yük artışı, bu manyetik etkiyi dengeler ve iletkenin iki kenarı arasında

ölçülebilen bir gerilime neden olur. Bu ölçülebilen gerilimin varlığı 1879'da E. H. Hall tarafından keşfedilmesinden sonra Hall etkisi olarak adlandırılmıştır. Hall etkisi, farklı yük taşıyıcıları için farklı olan bir iletim olayıdır. Hall gerilimi, pozitif ve negatif yük taşıyıcılar için farklı bir kutupluluğa sahiptir. Hall geriliminin ölçülmesi, taşıyıcı konsantrasyonunun tayininde önemli bir yöntemdir. Hall gerilimi,  $V_H$  eşitlik 3.10'daki ifade ile verilir (Aygün ve Zengin 1994);

$$V_H = \frac{IB}{ned} \quad (3.10)$$

burada  $I$  numuneden geçen akım,  $B$  uygulanan manyetik alan,  $n$  taşıyıcı konsantrasyonu ve  $d$  numunenin kalınlığıdır. Akım  $I=V/R$ 'dir. Numunenin direnci  $R$ , aşağıdaki eşitlikle verilir;

$$R = \frac{l}{\sigma bd} \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.11'deki  $l$  numunenin boyu,  $\sigma$  numunenin iletkenliği,  $b$  ise numunenin enidir. Eşitlik 3.11, akım ifadesinde yerine yazılırsa;

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V\sigma bd}{l} \quad (3.12)$$

şeklini alır. Bu akım ifadesi, Hall gerilimini veren 3.10 eşitliğinde yerine konulursa 3.13 eşitliği elde edilir;

$$V_H = \frac{IB}{ned} = \frac{V\sigma bdB}{nedl} = \frac{V\sigma bB}{nel} \quad (3.13)$$

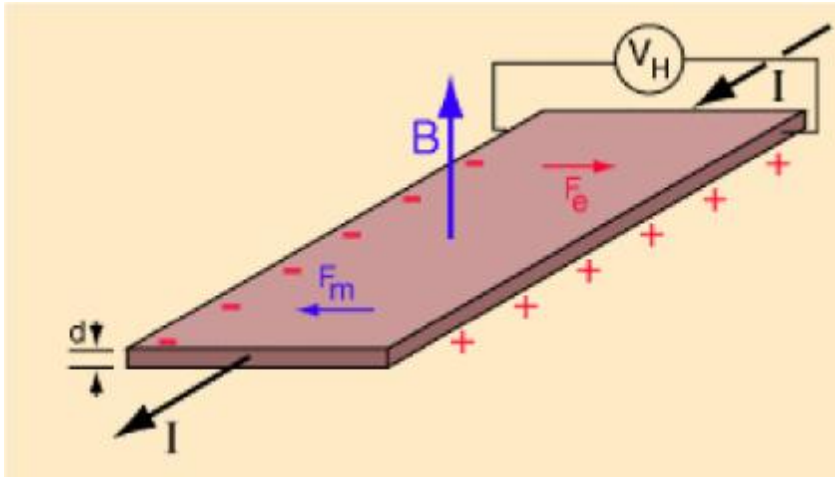
Deneyisel olarak Hall geriliminin ölçülmesiyle, Eşitlik 3.13'den taşıyıcı konsantrasyonu hesaplanabilir;

$$n = \frac{V_{\sigma b B}}{V_H l e} \quad (3.14)$$

Numunenin iletkenliği Eşitlik 3.15 ile verilir;

$$\sigma = ne\mu_H = \frac{\mu_H}{R_H} \quad (3.15)$$

burada  $R_H = 1/ne$ 'dir ve hall katsayısı olarak tanımlanır.  $\mu_H$  ise, Hall mobilitesidir. Bu bağıntıdan Hall mobilitesini de hesaplamak olanaklıdır.



Şekil 3.2. Hall etkisi

### 3.5. Optik Özellikler

#### 3.5.1. Temel Soğurma

Temel soğurma, değerlik bandından iletim bandına bir elektronun, banttan banda veya eksiton geçişlerine karşılık gelir. Temel soğurma kendini soğurma spektrumundaki hızlı artışla belli eder ve bir yarıiletkenin yasak enerji aralığını belirlemede kullanılır.

Bir fotonun momentumu  $h/\lambda$  ( $\lambda$  ışığın dalga boyu), kristalin momentumu  $h/a$  ( $a$ , örgü sabiti) ile kıyaslandığında çok küçük olduğundan foton soğurma esnasında elektronun momentumu korunmalıdır. Verilen bir  $h\nu$  foton enerjisi için soğurma katsayısı  $\alpha(h\nu)$ , elektronun ilk durumdan son duruma geçiş olasılığı  $P_{if}$ , ilk durumdaki elektron yoğunluğu  $n_i$  ve son durumdaki elektron yoğunluğu  $n_f$  ile orantılıdır.

$$\alpha(h\nu) = A \sum P_{if} n_i n_f \quad (3.16)$$

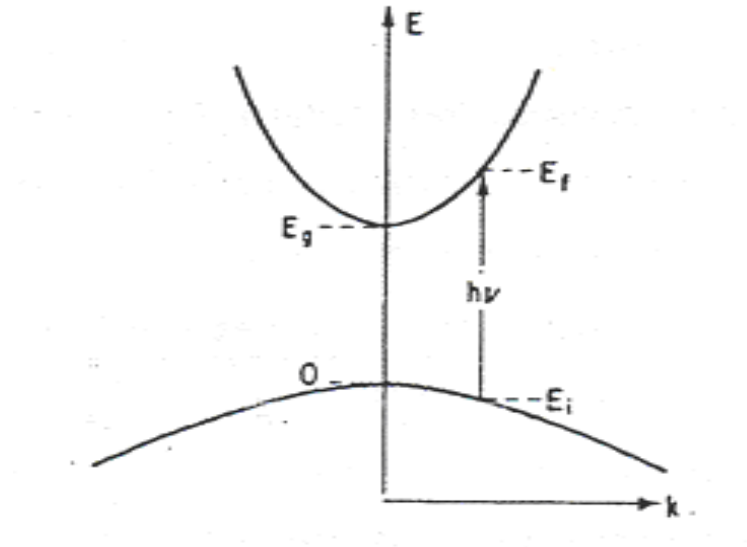
0 °K’de katkısız yarıiletkenler için doğru olan bir durumda, kolaylık olması için tüm alt durumların dolu ve tüm üst durumların boş olduğu kabul edilmiştir (Pankove, 1971).

### 3.5.2. İzinli Doğrudan Geçişler

İki doğrudan enerji çukuru arasında soğurma geçişleri düşünülürse şekil 3.3 toplam momentum korunumlu geçişler izinli olmalıdır.  $E_i$  deki her başlangıç durumu  $E_f$  deki son durumla birleştirilir ve kısaca;

$$E_f = h\nu - |E_i| \quad (3.17)$$

şeklinde verilir.



**Şekil 3.3.** Parabolik bir bant yapısında doğrudan geçiş.

(Pankove, 1971) Parabolik bir bantta;

$$E_f - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad \text{ve} \quad E_i = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (3.18)$$

dir. Böylece,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left( \frac{1}{m_e^*} - \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (3.19)$$

elde edilir. Birleştirilmiş durumların yoğunluğu;

$$N(h\nu)d(h\nu) = \frac{8\pi k^2 dk}{(2\pi)^3} = \frac{(2m_r)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (h\nu - E_g)^{1/2} d(h\nu) \quad (3.20)$$

ile verilir. Burada  $m_r$  indirgenmiş kütle olup;

$$\frac{1}{m_r} = \frac{1}{m_e^*} - \frac{1}{m_h^*} \quad (3.21)$$

şeklinde verilir. Soğurma katsayısı;

$$\alpha(h\nu) = A^* (h\nu - E_g)^{1/2} \quad \text{ve} \quad A^* \approx \frac{q^2 \left( 2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{5/2}}{nch^2 m_e^*} \quad (3.22)$$

ile verilir (Pankove, 1971).

### 3.5.3. Yasaklı Doğrudan Geçişler

Bazı materyallerde kuantum seçim kuralları direk geçiş için  $k = 0$  da izinsiz,  $k \neq 0$  da izinlidir. Geçiş olasılığı  $k^2$  ile artar. Şekil 3.3 için bunun anlamı geçiş olasılığının  $(h\nu - E_g)$  ile orantılı artmasıdır. Doğrudan geçişlerde durum yoğunluğu  $(h\nu - E_g)^{1/2}$  ile orantılı olduğundan soğurma katsayısı;

$$\alpha(h\nu) = A' (h\nu - E_g)^{3/2} \quad (3.23)$$

ile verilir. Burada  $A'$ ,

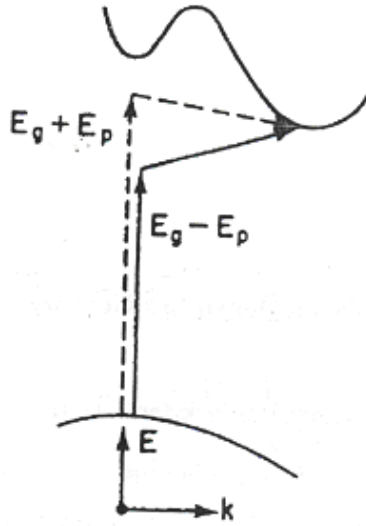
$$A' = \frac{4}{3} \frac{q^2 \left( 2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{5/2}}{nch^2 m_e^* m_h^* h\nu} \quad (3.24)$$

şeklinde verilir (Pankove, 1971).

### 3.5.4. Dolaylı Bantlar Arasında Dolaylı Geçişler

Bir geçiş hem enerji hem de momentumda bir değişme gerektirdiğinde bir ikili ya da iki aşamalı işlem gerekir. Çünkü foton momentumunda bir değişme sağlayamaz.

Momentum Şekil 3.4' de görüldüğü gibi fonon etkileşmesi yoluyla korunur. Fonon, örgü titreşiminin bir kuantumudur.



Şekil 3.4. Dolaylı geçişler. (Pankove, 1971)

Bu fononların her biri tipik bir  $E_p$  enerjisine sahiptir.  $E_f - E_i$  geçişini sağlamak için bir fonon ya soğurulur ya da yayınlanır. Bu iki işlem;

$$h\nu_e = E_f - E_i + E_p \quad (3.25)$$

$$h\nu_a = E_f - E_i - E_p \quad (3.26)$$

bağıntıları ile verilir.

Dolaylı geçişlerde değerlik bandının tüm doldurulmuş durumları iletim bandının tüm durumları ile bağlı olabilir.  $E_i$  enerjili başlangıç durumlarının yoğunluğu,

$$N(E_i) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_h^*)^{3/2} |E_i|^{1/2} \quad (3.27)$$

dir.  $E_f$  enerjili durum yoğunluğu ise,

$$N(E_f) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (E_f - E_g)^{1/2} \quad (3.28)$$

dir. (3.27) ve (3.28) denklemlerini kullanarak;

$$N(E_f) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (h\nu - E_g \mp E_p + E_i)^{1/2} \quad (3.29)$$

şeklinde yazılabilir. Soğurma katsayısı (3.28) denklemiyle verilen ilk durumların ve (3.29) denklemiyle verilen son durumların yoğunluklarının çarpımından elde edilir;  $\alpha$ , fononlarla etkileşme olasılığıyla orantılıdır. Fononların sayısı Bose-Einstein istatistiği ile verilir.

$$N_p = \frac{1}{\exp \frac{E_p}{kT} - 1} \quad (3.30)$$

Böylece soğurma katsayısı;

$$\alpha(h\nu) = Af(N_p) \int_0^{-(h\nu - E_g \mp E_p)} |E_i|^{1/2} (h\nu - E_g \mp E_p + E_i)^{1/2} dE_i \quad (3.31)$$

şeklinde yazılabilir. Gerekli matematiksel işlemlerden sonra fonon soğurmasıyla geçiş için soğurma katsayısı  $h\nu > E_g - E_p$  olmak üzere;

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^2}{\exp \frac{E_p}{kT} - 1} \quad (3.32)$$

bulunur. Fonon yayılım olasılığı  $N_p + 1$  ile orantılıdır. Fonon yayımlı geçiş için soğurma katsayısı  $h\nu > E_g + E_p$  için  $\alpha$ , 3.33 eşitliğinde verildiği gibi olur.

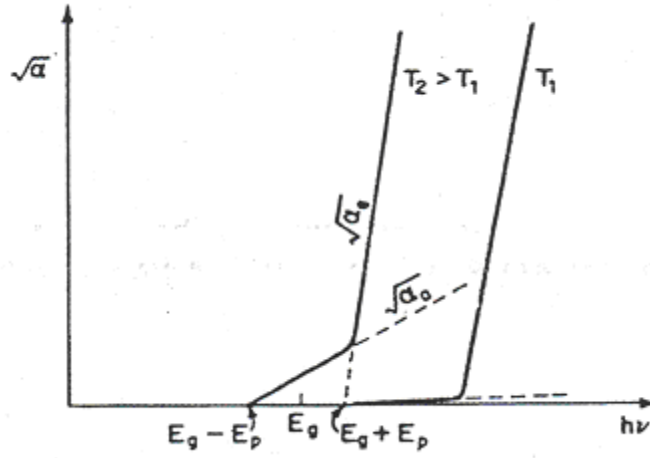
$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^2}{1 - \exp(-\frac{E_p}{kT})} \quad (3.33)$$

Hem fonon yayılımı hem de fonon soğurulması,  $h\nu > E_g + E_p$  durumunda mümkün olduğundan soğurma katsayısı  $h\nu > E_g + E_p$  için;

$$\alpha(h\nu) = \alpha_a(h\nu) + \alpha_e(h\nu) \quad (3.34)$$

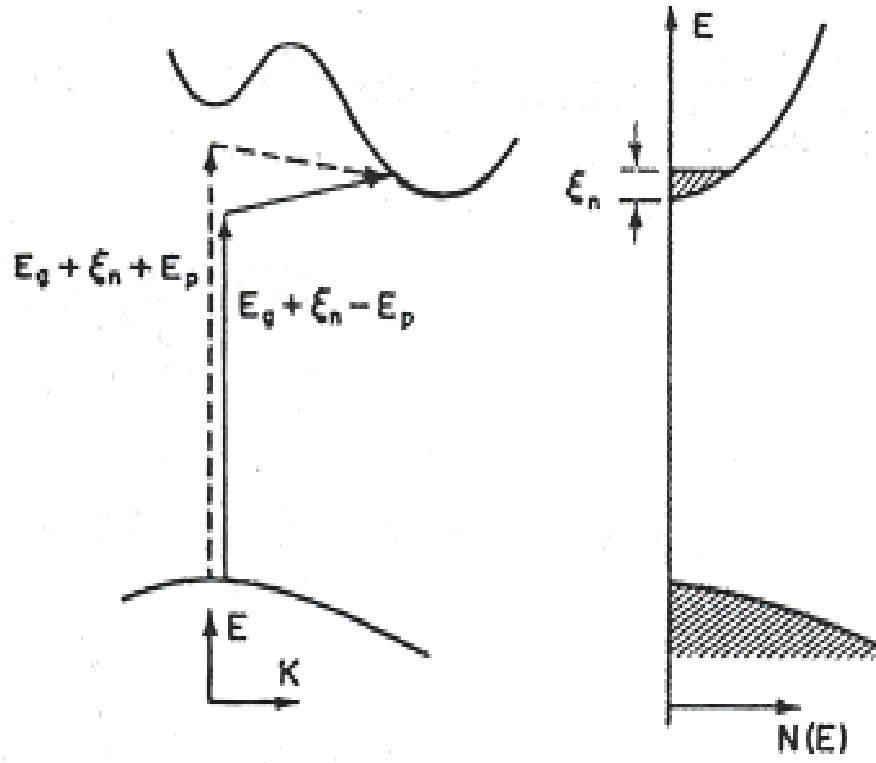
şeklinde gösterilir.

Düşük sıcaklıklarda fonon yoğunluğu çok küçük olacak bundan dolayı  $\alpha_a$  küçük olacaktır. Şekil 3.5' de  $\alpha_a$  ve  $\alpha_e$  nin sıcaklık bağımlılıkları gösterilmektedir. Geçiş işlemine katılan birkaç değişik fonon tipleri ve bunların değişik olasılıkları vardır.

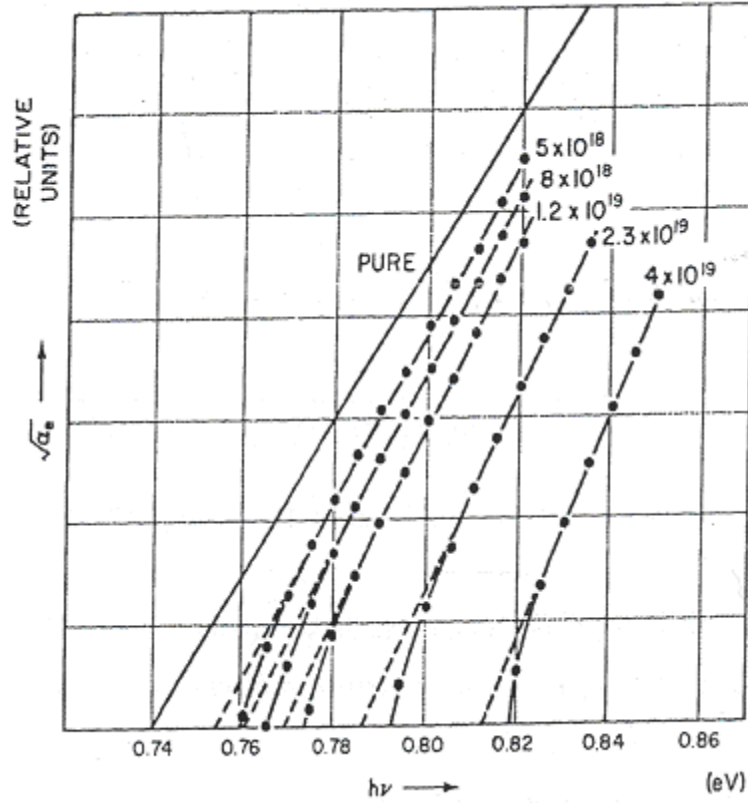


**Şekil 3.5.** Soğurmanın sıcaklık bağımlılığı. (Pankove, 1971)

Eğer yarıiletken fazla oranda katkılanmış ise bant içindeki Fermi seviyesi ( $n$  tipi yarıiletken)  $E_n$  dir.  $E_n$  enerjisinin altındaki durumlar dolu olduğundan  $E_g + E_n$  altındaki durumlara olan temel geçişler yasaktır. Böylece soğurma kenarı  $E_n$  kadarlık bir değerle daha yüksek enerjilere kayar (şekil 3.6). Soğurma katsayısının hesaplanması çok katkılanmış  $n$  tipi germanyum için yapılmış ve sonuçlar Şekil 3.7 de gösterilmiştir.  $0^\circ\text{K}$  de sadece fonon yayılım işlemi mümkündür;  $\sqrt{\alpha_e}$  saf germanyum için  $x$  ekseninde  $E_p + E_g$  de kesişir. Hesaplanan kesişimler  $E_n$  değeri kadar kaymıştır. Verilen  $h\nu > E_g + E_p + E_n$  değerinde soğurmada düşüş olmaktadır. Bunun sebebi mümkün son durumların sayısının azalmasıdır.



Şekil 3.6. İki fonon yardımcı geçişler. (Pankove, 1971)

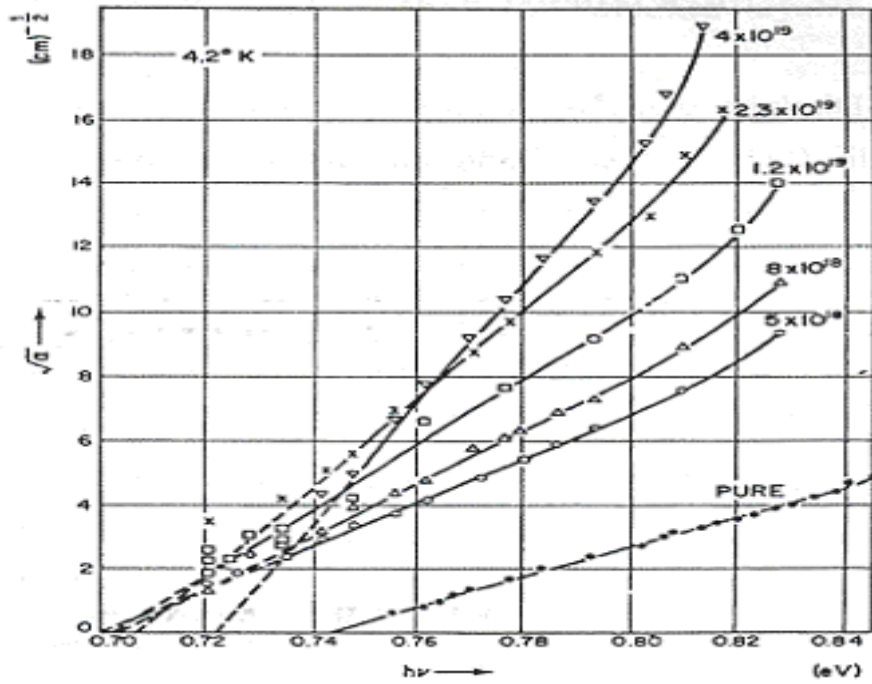


**Şekil 3.7.** Optik soğurmanın iletim bandı durumlarının doldurulmasıyla değişimi.  
(Pankove, 1971)

Fazla katkılı dolaylı bant aralığına sahip yarıiletkenlerde momentumu elektron-elektron saçılması gibi saçılma işlemleriyle korumak mümkündür. Bu durumlarda saçılma olasılığı saçıcıların sayısı  $N$ , ile orantılıdır ve fonon yardımına ihtiyaç duyulmaz. Böylece soğurma katsayısı;

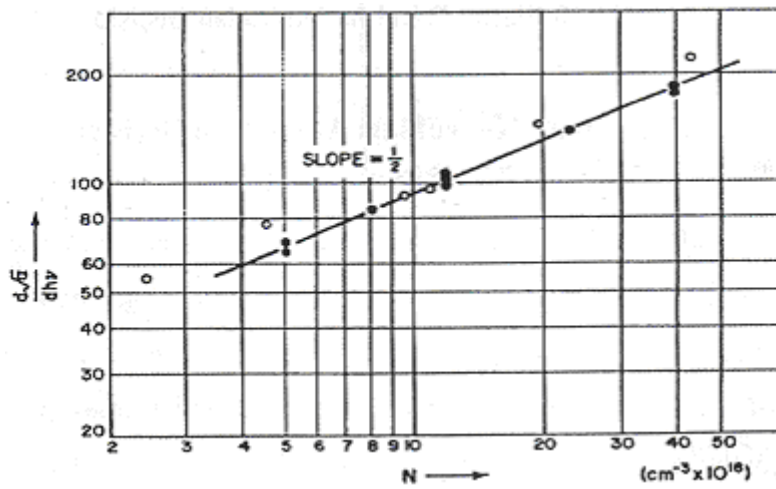
$$\alpha(h\nu) = AN(h\nu - E_g - E_n)^2 \quad (3.35)$$

şekline gelir. Şekil 3.8' de As katkılı germanyum için veriler gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Aşırı katkılamanın bant kenarına etkisi. (Pankove, 1971)

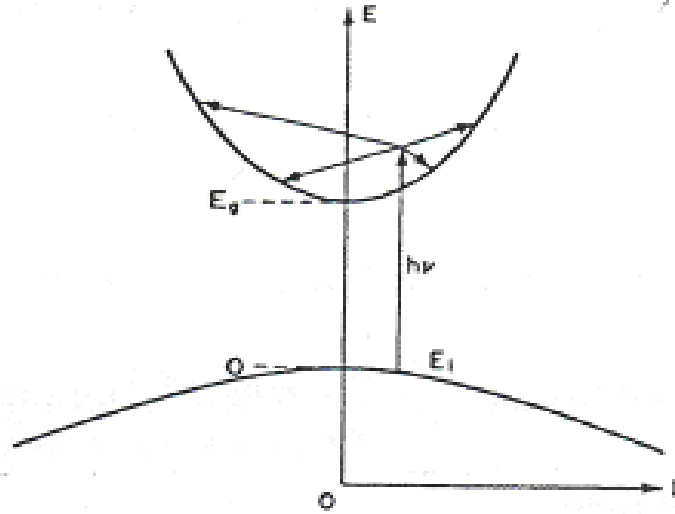
Soğurma kenarı katkılama ile kaymaktadır. Gerçekte (3.35) denkleminin fonksiyonel bağımlılığı  $\frac{d\sqrt{\alpha}}{d(h\nu)}$  nün  $N^{1/2}$  ile orantılı olması şeklindedir. Bu şekil 3.9 de gösterilmektedir (Pankove, 1971).



Şekil 3.9. Taşıyıcı yoğunluğunun soğurmaya etkisi. (Pankove, 1971)

### 3.5.5. Direk Bantlar Arasındaki Dolaylı Geçişler

Direk bantlar arasındaki geçişler, dolaylı bantlar arasındaki geçişlere oldukça benzerdir (Şekil 3.10). Momentum fonon yayını, soğurumu veya kusur ya da taşıyıcı saçılmaları gibi ikincil işlemlerle korunur. Burada değerlik bandının herhangi dolu ilk durumu ile iletim bandının boş durumuyla bağlanmıştır. Bu durumda soğurma katsayısı 3.32' den 3.34' e kadar olan denklemlerle fonon içeriyorsa ve eğer fononlar momentum korunumunda kullanılmıyorsa 3.35 denklemleriyle hesaplanır. Bu tür dolaylı geçişler iki adımlı işlemlerle olur ve bunların olasılığı direk geçişlerin olasılığından azdır. Gerçek soğurma katsayısı her iki katkının toplamı olmalıdır.

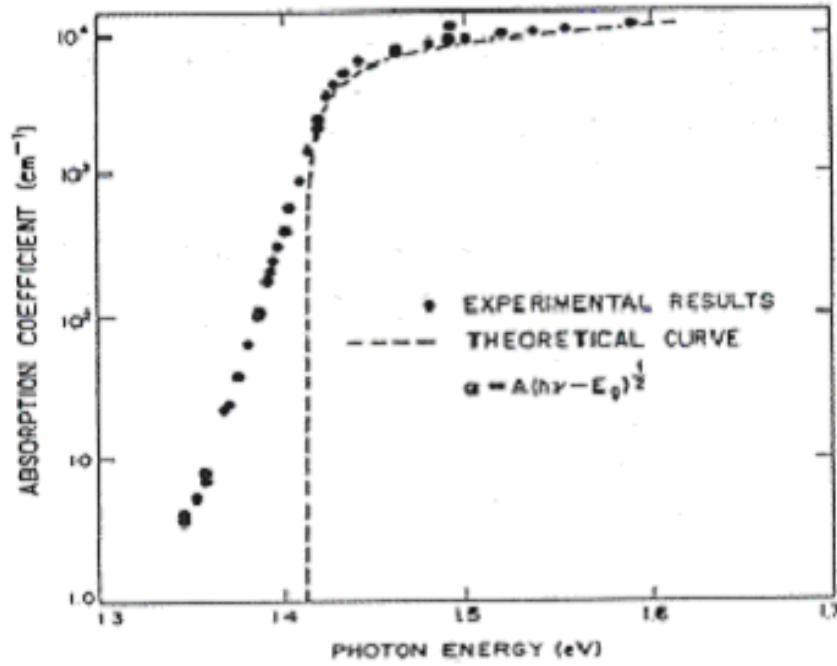


**Şekil 3.10.** İletim bandına doğrudan geçişler. (Pankove, 1971)

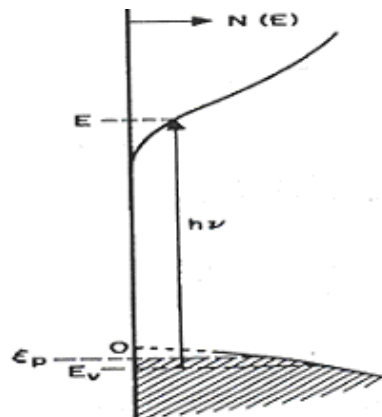
### 3.5.6. Bant Kuyrukları Arasındaki Geçişler

Parabolik bantlar arasında olan momentum korunumlu geçişler soğurma kenarında oluşur. Soğurma kenarı yarı logaritmik olarak Şekil 3.11' de çizilmiştir. Direk geçişler için enerji aralığının altındaki değerler için soğurma olmaması beklenir ve bundan dolayı basamak şeklinde artan soğurma kenarı gösterilmektedir. Fakat pratikte genellikle üstsel artan soğurma kenarı bulunmaktadır. Çoğu

materyalde Urbach kuyruğu olarak bilinir ve  $d(\ln \alpha)/d(h\nu) = 1/kT$  şeklinde gösterilir. GaAs' in katkılama ile kontrol edilen üstsel soğurma kenarının bant kuyruğu içeren geçişlerle oldukça uyumlu sonuçlar verdiği bulunmuştur.



Şekil 3.11. GaAs' in oda sıcaklığındaki soğurma kenarı. (Pankove, 1971)



Şekil 3.12. İletim bant kuyruğunun optik soğurma ile gözlenmesi. (Pankove, 1971)

Durum yoğunluklarının soğurma katsayısını nasıl etkilediğini belirlemek için p tipi yozlaşmış örneği ele alalım. Fermi seviyesi değerlik bandının parabolik kısmında yer alır böylece değerlik bandının bozulmuş kısmı Fermi seviyesinin üstünde kalır. İlk durumların yoğunluğu  $N_i, |E_v|^{1/2}$  ile orantılıdır. Şekil 3.12 de p tipi yarıiletkende durumların iletim bant kuyruklarının optik soğurma ile değişimi görülmektedir. Son durumlar, iletim bandının içinde üssel kuyruk oluşturur ve bunların herhangi bir E enerjisindeki yoğunlukları;

$$N_f = N_0 e^{E/E_0} \quad (3.36)$$

şeklinde verilir. Momentum korunumu optik geçişlerde sorun çıkarmaz ve matris elementi geçişler için sabittir yani foton enerjisinden bağımsızdır.

Soğurma katsayısı verilen  $h\nu$  değerleri için tüm mümkün geçişler üzerinden entegre edilen ilk ve son durum yoğunluklarının çarpımıyla orantılıdır;

$$\alpha(h\nu) = A \int_{E_p}^{h\nu-E_p} |E_v|^{1/2} \exp \frac{E}{E_0} dE \quad (3.37)$$

$E_v$  yerine  $E - h\nu$  koyup gerekli değişken değişimlerini kullanırsak;

$$x = \frac{h\nu - E}{E_0} \quad (3.38)$$

3.37 denklemi;

$$\alpha(h\nu) = -A e^{h\nu/E_0} (E_0)^{3/2} \int_{(h\nu+E_p)/E_0}^{E_p/E_0} x^{1/2} e^{-x} dx \quad (3.39)$$

şekline gelecektir. Alt limit  $\infty$ ' a ayarlanmıştır, çünkü  $h\nu \gg E_0$  dır. Bu integrali  $h\nu$  den bağımsız yaparsak çözüm;

$$\alpha(h\nu) = A e^{h\nu/E_0} (E_0)^{3/2} \left[ \frac{1}{2} (\pi)^{1/2} - \int_0^{E_p/E_0} x^{1/2} e^{-x} dx \right] \quad (3.40)$$

şekline gelir. Soğurma kenarının yarı logaritmik çizimdeki eğimi;

$$E_0 = \left[ \frac{d(\ln \alpha)}{d(h\nu)} \right]^{-1} \quad (3.41)$$

ile verilir (Pankove, 1971).

### 3.6. Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi

#### 3.6.1. Soğurma Katsayısının Hesaplanması

Tek renkli ışık demetinin soğurucu özelliğe sahip örnek üzerine düşürüldüğünü düşünelim ve gelen ışığın bir kısmının ilk yüzeyden ve diğer bir kısmında ışığın örnekten ayrıldığı yüzeyden yansıdığı gerçeğini ihmal edelim. Böylece gelen ışığın şiddeti  $I_0$  ve ortamdan geçen ışığın şiddeti  $I_T$  olmak üzere iki değere sahip oluruz. Örneğin çok ince olduğunu düşünürsek ışık  $\Delta x$  kalınlıktaki bölgeden geçtikten sonra gelen ışığın şiddeti  $-\Delta I$  kadar azalır, azalma ilk şiddet ve  $\Delta x$ ' e bağlıdır.

$$-\Delta I = I_T - I_0 = I_0 \alpha \Delta x \quad (3.42)$$

$\alpha$ , sabiti soğurma katsayısıdır ve soğurucu ortamın ve ışığın dalga boyunun karakteristiğini gösterir. Işığın şimdi iki ya da daha fazla ince  $\Delta x$  kalınlığındaki

tabakalardan geçtiğini düşünelim. Soğurma katsayısı, verilen materyalin karakteristiğini gösterecek ve gelen ışın şiddetinden bağımsız olacaktır. Böylece  $\Delta x$  kalınlığındaki plakanın arkasına yerleştirilen ikinci plaka ile ilk plakadan geçen ışığın şiddeti biraz daha az azalacaktır. Fakat buraya gelen ışık şiddeti birinciye gelenden az olacağından daha az kayıp olacaktır. Fakat mutlak kayıp az olsa da her iki tabakadan olan ışık kaybı oranı eşit olacaktır. Bu N tabaka olsa da geçerli olur. Bu durumda aşağıdaki bağıntılar elde edilecektir.

$$\Delta I = -I_0 \alpha \Delta x \quad (3.43)$$

$$\alpha = -\frac{\Delta I}{I_0 \Delta x} \quad (3.44)$$

Burada  $\alpha$  soğurucu materyalin her birim kalınlıktan kaynaklanan azalma oranını veya soğuruculuğunu göstermektedir. Katmanları  $dx$  gibi çok küçük kalınlıklara indirgersek, ışık her katmanı geçerken soğurulan ilk ışık şiddeti oranının kesri olan  $\frac{dI}{I_0}$  oranı böylece ;

$$\frac{dI}{I_0} = -\alpha dx \quad (3.45)$$

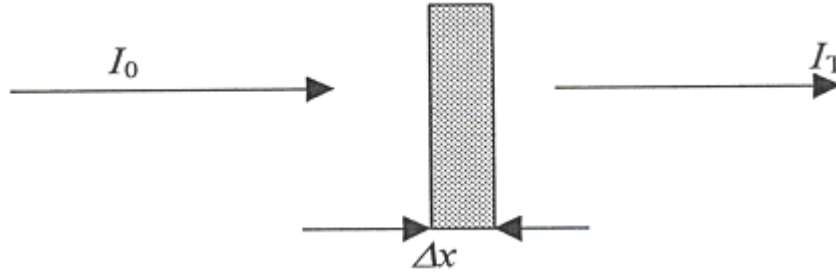
şekline gelecektir. Toplam  $x$  kalınlığından geçen ışık şiddetindeki azalmayı bulmak için bu ifade,  $x=0$  da  $I_0$  ve  $x=x$  de  $I_T$  olmak üzere entegre edilirse;

$$\int_0^x \frac{dI}{I_0} = -\alpha \int_0^x dx \quad (3.46)$$

$$\ln\left(\frac{I_T}{I_0}\right) = -\alpha x \quad (3.47)$$

$$I_T = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.48)$$

Elde edilen bu üssel soğurma yasasıdır ve Lambert tarafından geliştirilmiştir.



**Şekil 3.13.** İnce bir tabakadaki soğurma. (Meyer, 1972)

Buradan gördüğümüz gibi soğurma için Beer-Lambert yasası:

$$\alpha = \frac{I}{I(\lambda)} \frac{dI(\lambda)}{dx} \quad (3.49)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $I(\lambda)$  ışık şiddetini,  $x$  ortam içinde gidilen yolu ve  $\alpha$  soğurma katsayısını göstermektedir.

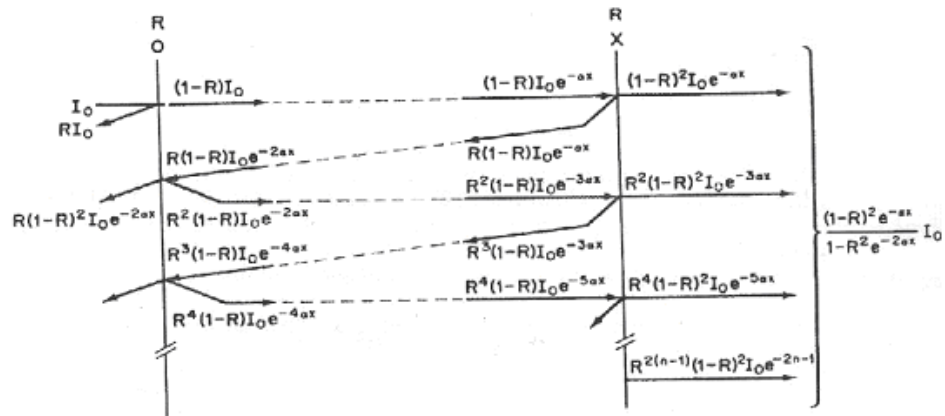
Yansıma  $R$ ;

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k^2}{(n_2 + n_1)^2 + k^2} \quad (3.50)$$

şeklinde verilebilir.  $n$  ve  $k$  kırılma indisinin gerçek ve sanal kısımlarıdır. Görünür bölgede  $k$ ,  $n$  den çok küçük olduğundan (3.50) denklemi;

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (3.51)$$

şekline indirgenir. Toplam geçirgenliği ZnO ince film için bulmak için şekilde gösterildiği gibi iki bölge alabiliriz.



Şekil 3.14. İnce bir filmde çok yansımali ışık geçirimi. (Pankove, 1971)

Girişim ihmal edildiği zaman d kalınlığındaki bir ince filme  $I_0$  şiddetinde tek renkli ışık düşürülürse film içine giren ışık miktarı  $I$ ;

$$I = (1 - R) I_0 \quad (3.52)$$

şeklinde yazılabilir. İkinci bölgeye ulaşan ışık şiddeti ise;

$$I = I_0 (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (3.53)$$

şeklindedir. Filmten geçen ışık miktarı;

$$I = I_0 (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.54)$$

olur. Bu şekilde iç yansımalar devam ettirilirse yansıyan ışık miktarının her yansımada bir;

$$I = R^{2n} (1 - R)^2 I_0 e^{-(2n+1)\alpha d} \quad (3.55)$$

terimi kadar arttığı görülür. Bu artış göz önüne alındığında filmin toplam ışık geçirgenliğinin;

$$I = (1 - R)^2 I_0 e^{-\alpha d} \left( \sum_r R^{2n} e^{-2n\alpha d} \right) \quad (3.56)$$

olduğu görülür. Bu geometrik bir seridir. Böylece toplam geçirgenlik örnek tarafından yansıtılan ışık şiddetinin örnek üzerine gelen ışık şiddetine oranı şeklinde tanımlanır.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (3.57)$$

Bu iç yansımalar şekilde gösterildiği gibi devam ettirilirse toplam geçirgenlik;

$$T = \frac{(1 - R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (3.58)$$

şekline indirgenir. Bu son denklemde çok soğurucu bölge için  $d \gg 0$  yaklaşımı yapıldığında;

$$T = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.59)$$

T, daha sade bir hal alır. Burada eğer  $R$  ve  $d$  bilirse, eşitlik  $\alpha$  için çözülebilir.

$$A = \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) \quad A = -\log_{10} T \quad (3.60)$$

$$T = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.61)$$

$$2.3 \log_{10} T = \ln \left[ (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \right] \quad (3.62)$$

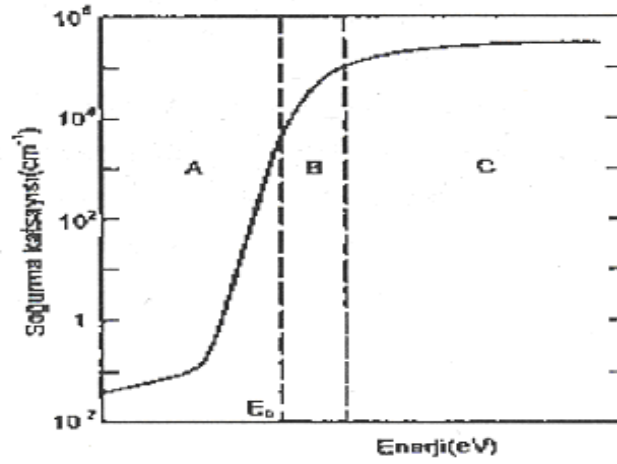
$$-2.3A = \ln(1 - R)^2 - \alpha d \quad (3.63)$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \left[ 2.3A + \ln(1 - R)^2 \right] \quad (3.64)$$

elde edilir. (3.63) denklemi yardımıyla soğurma katsayısı hesaplanıp optik karakterizasyonda kullanılabilir. Biz soğurma katsayısını (3.64) denklemindeki R yansıma değeri içeren kısmı ihmal ederek hesaplıyoruz.

### 3.6.2. Yasak Enerji Aralığının Bulunması

Amorf bir yarıiletkenin soğurma katsayısının enerjiye göre değişimi şekil 3.15’ de görülmektedir. Burada işaretlenen A bölgesi enerji aralığındaki yapı kusurlarının oluşturduğu elektron enerji durumlarına bağlı soğurma olup  $\alpha < 1 \text{ cm}^{-1}$  dir. B bölgesi Urbach kuyruğu denen değerlik ve iletkenlik bandı elektron enerji durumlarının uzantılarının oluşturduğu ( $1 < \alpha < 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ) bölgedir. Bu bölgeler arasındaki sınırlar kesin değil, içi içe girmiş haldedir. Yarıiletkenin yasak enerji aralığı B bölgesine düşer. Ölçülen soğurma katsayısından  $E_g$  aşağıdaki yöntem ve yaklaşımlar kullanılarak hesaplanabilir. C bölgesi ise banttan banda geçişlerin oluşturduğu bölge olup fotoiletkenlik yöntemiyle bile tamamı ölçülemeyen  $\alpha > 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  bölgesidir.



**Şekil 3.15.** Amorf bir yarıiletkenin soğurma katsayısının enerji ile değişimi. (Mott, 1979)

Doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerde soğurma katsayısı olarak

$$\alpha(h\nu) = A * (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (3.65)$$

ifadesi kullanılır. Burada  $A$ , soğurma  $E_g$ , yasak enerji aralığıdır (Pankove, 1975). Buradan soğurma katsayısının enerjile çarpımının karesinin enerjiye karşı çizilen  $(\alpha E)^2 - E$  grafiğinin teğetinin enerji eksenini kestiği nokta  $E_g$  yasak enerji aralığını verir.

### 3.6.3. Film Kalınlığının Belirlenmesi

Bir boyutta +x yönünde ilerleyen bir elektromanyetik dalga;

$$E = E_0 e^{i2\pi\nu(t - \frac{x}{v})} \quad (3.66)$$

bağıntısı ile verilir. Burada  $E$ ,  $E_0$  elektrik alanı,  $v$ , elektromanyetik dalganın ortam içindeki hızını,  $\nu$ , frekansını,  $t$  ise zamanı göstermektedir. Elektromanyetik dalga  $n$  kırılma indisli,  $x$  kalınlıklı bir film içine girdiğinde film çıkışındaki düzlem dalganın faz değişimi;

$$\theta = \frac{n}{c} 2\pi vx = 2\pi \frac{n}{\lambda} x \quad (3.67)$$

olur.  $m$  bir tam sayı olmak üzere yapıcı ve yıkıcı girişim gözlenir.

$$x = \frac{(2m+1)\lambda}{2n} \quad (\text{yapıcı girişim}) \quad (3.68)$$

$$x = \frac{(2m+1)\lambda}{4n} \quad (\text{yıkıcı girişim}) \quad (3.69)$$

Böylece ince bir filmde çıkan elektromanyetik dalganın şiddeti  $\cos\theta$  gibi bir faz farkıyla modüle edilmiş olur (Pankove, 1971).

İki ardışık tepe değerlerinin gözlemlendiği  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  dalga boylarının farkı alınırsa eşitlik (3.68) den;

$$n = \frac{1}{\left(\frac{1}{\Delta\lambda}\right)x} \quad (3.70)$$

bulunur. Eşitlikten kırılma indisi bilindiğinde, film kalınlığı ya da diğer yönüyle kırılma indisi hesaplanabilir. Eğer farklı dalga boylarına ait farklı kırılma indisleri olursa, denklem şu şekilde yazılabilir. Bu denklem ardışık iki maksimum tepe değeri için geçerli olan ifadedir.

$$x = \left\{ 2 \left[ \frac{n(\lambda_1)}{\lambda_1} - \frac{n(\lambda_2)}{\lambda_2} \right] \right\}^{-1} \quad (3.71)$$

### 3.6.4. Kırılma İndisi Hesabı

Kırılma indisi, birçok çalışmada zarf metodu kullanılarak belirlenmiştir. Zarf metodunda, geçirgenlik eğrisi zarf içine alınır. En üst ve en alt zarflara belirli dalga boylarına karşılık gelen  $T_{max}$  ve  $T_{min}$  değerleri belirlenmektedir.

Aşağıdaki Formül kullanılarak kırılma indisi hesaplanmaktadır.

$$n = [N + (N^2 - n_s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (3.72)$$

Burada

$$N = \frac{(n_s^2 + 1)}{2} + 2n_s \frac{(T_{max} - T_{min})}{T_{max} T_{min}} \quad (3.73)$$

ile tanımlanır ve  $n$  filmin kırılma indisi,  $n_s$  cam alt tabanın kırılma indisi ve değeri 1.53'tür (Gümüş, 2006).

## 3.7. Filmlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi

### 3.7.1. Düzlemler Arası Uzaklık Hesabı

Bragg yasasına göre,

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (n= 1, 2, 3, \dots) \quad (3.74)$$

olarak bilinir. Burada  $\lambda$  kristal örgüsüne düşen x-ışınlarının dalga boyu, ( $\lambda=0.154$  nm)  $\theta$  örgüye düşen x-ışınları ile örgünün yüzeyi arasındaki açı,  $d$  kristaldeki atomlar arası mesafe veya düzlemler arası uzaklık olarak tanımladığımız ifadedir.  $n$  yansıma derecesidir. Yansıma derecesi, ince filmin kristal örgüsündeki düzlemler arası uzaklık hesaplanacaksa 1 alınır.

### 3.7.2. Örgü Parametresinin Ölçümü ve Tanecik Büyüklüğü Hesabı

Hegzagonal kristal yapının birim hücreleri a, c gibi iki değişken parametre ve d düzlemler arası uzaklığı

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.75)$$

eşitliği ile karakterize edilmektedir. Ayrıca hegzagonal sıkı paket yapı için oran  $\frac{c}{a} = 1.61836$  'dır. ( Kittel, 1996) Bu eşitlikler kullanılarak örgü parametreleri hesaplanmaktadır.

Düzlemler arası uzaklığı bilinen filmlerin X-ışınlarının kırınım deseninden yararlanıp Scherrer formülü kullanılarak tanecik büyüklükleri hesaplanabilmektedir.

Aşağıda Scherrer formülü ile tanecik büyüklüğünün nasıl hesaplandığı görülmektedir:

$$D = \frac{0.9\lambda}{B(\text{radyan})\cos(\theta_B)} \quad (3.76)$$

Denklemdaki  $\lambda$ , kırınımda kullanılan x-ışınının dalga boyu,  $D$  toz taneciğinin çapı,  $B$  değeri, kırınım deseninde gözlenen maksimum piklerin yarı maksimumdaki genişliklerinin (FWHM de denir) radyan cinsinden değeri,  $\theta_B$  dikkate alınan pikin Bragg yansıma açısıdır. Bu denklemden yararlanarak tanecik büyüklükleri tahmin edilebilir.

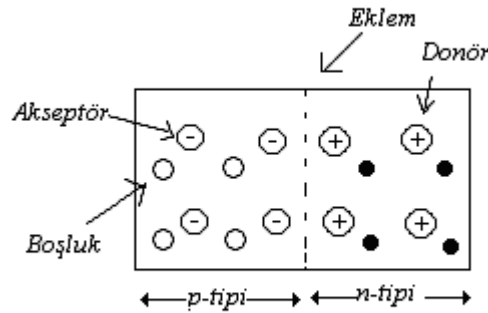
### 3.8. P-N Eklemler ve Diyot

Bir yarı iletkenin bir kısmı p-tipi, diğeri n-tipi olacak şekilde katkılanırsa, birbirlerine komşu iki farklı bölge ile bunların sınır bölgesi, yani **p-n eklemi (p-n jonksiyonu)** gerçekleşir. Yarı iletkenin elektron verici (donör) atomlarla katkılanması n-tipi yarı iletkeni, elektron alıcı (akseptör) atomlarla katkılanması ise

p-tipi yarı iletkeni oluşturur (Şekil 3.16). Bu şekilde oluşturulan p-n eklemine, örneğin p-tipi bölgedeki büyük yoğunluktakideşikler n-tipine doğru, n-tipi bölgedeki çoğunluktaki elektronlar p-tipine doğru yayılırlar. Bu olaya “difüzyon” denir. Ancak bu olay sürüp gidemez. Belirli bir süre sonra yüklerin hareketleri durur.

Bir p-n eklemine p-tipi bölgeye negatif, n-tipi bölgeye ise pozitif gerilim uygulanırsa; oluşan elektrik alan, yüklerin hareketini önemli ölçüde engeller. Dolayısıyla eklemde hemen hemen hiç akım akmaz. Böyle bir gerilim uygulanması “tıkama yönünde kutuplama” olarak anılır. Bunu tersi halinde, yani p-tipi bölgeye pozitif gerilim uygulanması durumunda ise eklemde büyük akım akar. Bu durum “geçirme yönünde kutuplama” olarak adlandırılır.

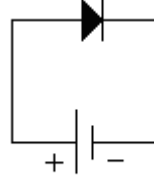
Sonuç olarak geçirme yönünde kutuplanan bir p-n eklemine büyük miktarda akım akıtılmasına karşılık; tıkama yönünde kutuplanmasında ise çok çok küçük bir akım akıttığı söylenebilir.



**Şekil 3.16.** p-n Eklemi ile Alıcı ve Verici İyonlar

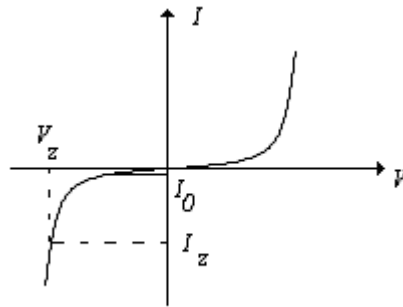
Bir p-n eklemi, p-tipi bölgesi n-tipi bölgesine göre negatif olduğunda çok çok küçük akım; ancak tersi durumda büyük bir akım akıtabildiğine göre; bir yönde akım geçiren bir devre elemanı, yani **diyot** olarak kullanılabilir. Bu nedenle bir p-n eklemi **yarı iletken diyot** işlevini görür.

Böyle bir diyot şematik olarak Şekil 3.17’deki gibi gösterilir.



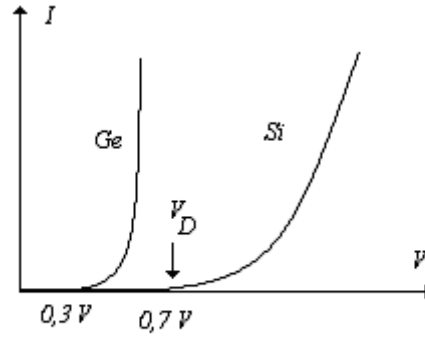
**Şekil 3.17.** Diyot Sembolü ve Geçirme Yönünde Kutuplanmış Diyot

Bu şekildeki gibi geçirme yönünde kutuplanmış bir diyotta p-n ekleminden geçen net akım, n-tipinden p-tipine geçen elektronların oluşturduğu akımla p-tipinden n-tipine geçen deşiklerin oluşturduğu akımın toplamıdır. Yarı iletken bir diyotun ideal akım-gerilim eğrisi Şekil 3.18'deki gibidir.



**Şekil 3.18.** İdeal Diyotun Akım- Gerilim Öz Eğrisi

Bu şekilde, tıkama yönünde kutuplanmış diyottan geçen ve tıkama yönü doyma akımı olarak adlandırılan  $I_0$  akımının gösterilebilmesi için ölçeğin bu kısmının genişletilmiş olduğuna dikkat edilmelidir; zira bu akımın değeri  $\mu A$  mertebesinde. Gerçekte bir diyotun elektriksel davranışı, diyotun öz eğrisi olarak adlandırılan bu değişime pek uymaz.



**Şekil 3.19.** Ge ve Si Diyotların Akım-Gerilim Öz Eğrileri

Şekil 3.19’da verilen gerçek akım-gerilim öz eğrilerinden anlaşılabileceği üzere,  $V_D$  gibi bir “eşik gerilimi” olarak isimlendirilen bir gerilim değerinin altında diyotun akıttığı akım çok küçüktür. Bu değer Si diyotlarda  $0.7V$ , Ge diyotlar ise  $0.3V$  civarındadır. Diyot karakteristiklerinden biri de  $R_f$ , “diyot direnci” olarak anılan diyotun çalışma durumunda uçları arasındaki  $V$  geriliminin diyottan geçen akıma oranı olarak tanımlanan  $V/I$  büyüklüğüdür. Ancak bu  $R_f$  büyüklüğü  $V$  ve  $I$ ’ya bağımlı olarak çok fazla değişir. Bu nedenle de  $\Delta I$  akım aralığındaki  $\Delta V$  değişimine bağlı olarak,

$$R_f = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \quad (3.77)$$

şeklinde tanımlanması daha uygundur.

### 3.9. Atmalı Plazma ve Filtreli Katodik Vakum Ark Yöntemi

İnce filmlerin depolanmasında birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemleri aşağıdaki gibi üç ana başlık altında toplayabiliriz.

- 1-Sıvı Faz kimyasal işlemler
- 2-Fiziksel işlemler
- 3-Fiziksel ve kimyasal işlemler

Genel olarak üç bölüm halinde inceleyebildiğimiz ince film depolama yöntemleri kendi içerlerinde birçok yöntemi barındırırlar. Fiziksel işlemler grubuna giren ince film depolama yöntemlerine örnek olarak Vakum Buharlaştırma (Klasik vakum buharlaştırma, Elektron demetiyle buharlaştırma) ve MBE (Molecular Beam Epitaxy) yöntemlerini, sıvı faz kimyasal işlemler grubuna kimyasal depolama yöntemini, fiziksel ve kimyasal grubuna ise söktürme yöntemlerini (dc, rf, magnetron söktürme, reaktif söktürme, iyon yayıcı söktürme), katodik ark depolama yöntemini (atmalı katodik vakum ark ve dc katodik vakum ark) ve anodik vacuum ark yöntemlerini örnek verebiliriz. Görüldüğü gibi katodik vakum ark tekniği üçüncü grup olan fiziksel ve kimyasal işlemler grubuna dahil olmaktadır.

Katodik arklar şu önemli karakteristiklere sahiptir.

- 1) Plazma, katot yüzeyinde hızlı ve gelişigüzel hareket eden ark spotuyla üretilir.
- 2) Plazma katot materyalinden elde edilir.
- 3) Katot yüzeyinden aşındırılan materyalin büyük bir kısmı (%10-100) iyonlardan oluşur
- 4) İyonların büyük bir yüzdesi çoklu yük durumundadır (+2,+3 gibi)
- 5) İyonların ortalama kinetik enerjisi yüksektir (10-100 eV)

Bu fiziksel karakteristikler, filmler ve kaplamaların depolanmasında aşağıdaki özellikleri sağlar.

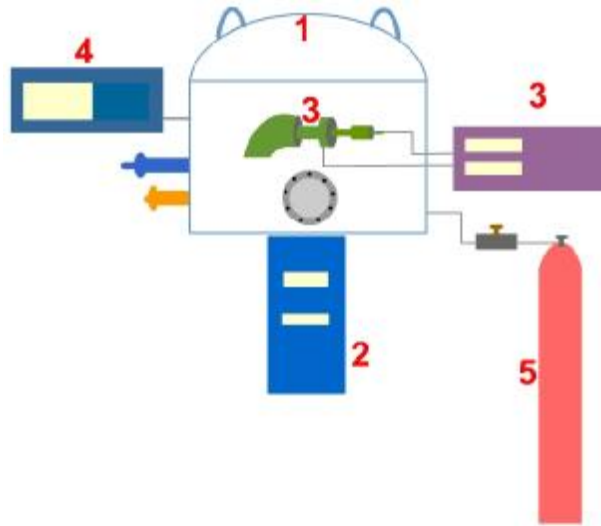
- 1) Film morfolojisi üzerinde mükemmel kontrol
- 2) Düşük alt tabaka sıcaklıkları
- 3) Yüksek film yoğunluğu
- 4) Bileşik filmlerin etkin sentezi
- 5) Yüksek film tutunması
- 6) Düzlemsel olmayan yüzeylerde de mükemmel kaplama düzgünlüğü
- 7) Alaşım bileşenlerinin kaynaktan alt tabakaya taşınması

Plazma, elektriksel olarak nötral olan ve rasgele doğrultularda birlikte hareket eden hemen hemen eşit yoğunluktaki pozitif ve negatif parçacıklar topluluğudur. Atmalı plazma sisteminde bu ortam bir defaya mahsus yüksek derecede gerilim (yaklaşık 24000V) daha sonra da sabit bir gerilim (yaklaşık 600V) uygulanarak sağlanmaktadır. Uygulanan 24000 V luk gerilim ile katottan üretilen materyalle bir ark spotu oluşturulur. Oluşan ark spotu katodu aşındırarak plazmayı oluşturur. Oluşan plazma polarize olur ve anottan katoda doğru ilerleyerek alt tabanın üzerine düşer ve böylece film depolanmış olur.

Katodik vakum ark depolama sistemi, güç kaynağının tanımlanmasına bağlı olarak sürekli ark kaynakları (DC katodik vakum ark) ve atmalı ark kaynakları (Atmalı katodik vakum ark) olmak üzere iki grupta toplanabilir. DC katodik vakum ark depolama yöntemi geniş yüzeylerin kaplanmasına olanak verirken kalınlık kontrolünü sağlama atmalı katodik vakum ark tekniğine göre daha zordur. Atmalı ark kaynakları ise depolama üzerinde iyi kontrol sağlayan ve böylece metalik ince film ve monolayer seviyelerine kadar uzanan kalınlık bölgesinde üretime izin veren tetikleme sistemidir. DC katodik vakum ark yöntemine göre dezavantajı daha küçük alanları kaplar.

### 3.10. ZnO İnce Film Üretiminde Kullanılan PFCVAD Sistemin Yapısı ve Sistemi Oluşturan Elemanlar

Şekil 3.20' de ZnO üretiminde kullanılan PFCVAD sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Sistemi oluşturan elemanlar ve özellikleri konunun devamında tanıtılmıştır. Şeklin üzerindeki rakamlar sistemi oluşturan elemanın hangi bölümde anlatıldığını göstermektedir.



Şekil 3.20. PFCVAD sisteminin şematik gösterimi

### 3.10.1.Reaksiyon Odacığı



**Şekil.3.21.** Reaksiyon Odacığı

Reaksiyon odacığı manyetik alan girişine izin veren 304 paslanmaz çelikten yapılmıştır. Yarıçapı 24.3 cm, boyu 38.5 cm dir. 1 Thermo couple gauge, 1 ion gauge, 1 gözlem penceresi, gaz akış kontrol ve kalınlık ölçme, 1 valf ve alt taban tutucu girişleri bulunmaktadır. Vakuma alındığında basınç  $1.3 \times 10^{-8}$  Torr'a kadar düşebilmektedir.

### 3.10.2.Turbomoleküler Pompa Sistemi



**Şekil 3.22.** Turbomoleküler pompa sistemi

Vakum pompası aşağıdaki özelliklere sahiptir. Sahip olduğu bu özellikler sayesinde reaksiyon odacığının havası boşaltılıp vakum ortamı oluşturulabilmektedir. Boşaltılma işlemi sonucunda taban basıncı  $1.3 \times 10^{-8}$  Torr'a kadar düşürülebilmektedir.

Dönme hızı dakikada 42.000 devir

Taban basıncı  $< 1 \times 10^{-10}$  Torr

Pompalama Hızı

$N_2 = 550$  l/s

$He = 600$  l/s

$H_2 = 510$  l/s

Sıkıştırma Oranı

$N_2 : > 1 \times 10^9$

$He: 1 \times 10^7$

$H_2 : 1 \times 10^6$

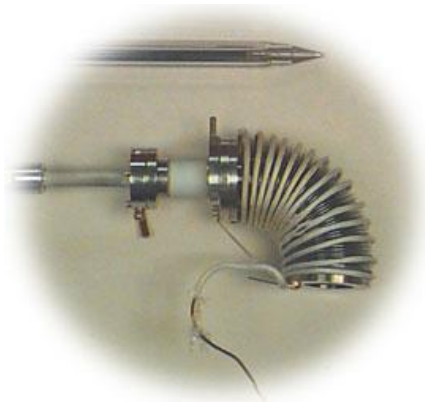
### 3.10.3. Atmalı Plazma Ark Kaynağı



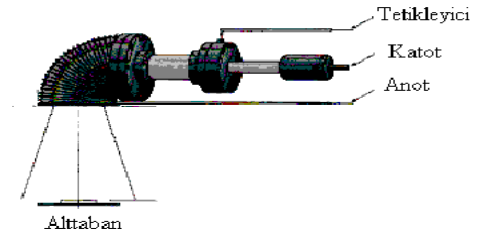
(a)



(b)



(c)



**Şekil 3.23.** (a) Filtrenin kendisi, (b) Atmalı Plazma Ark Kaynağı, (c) Şematik gösterimi

Atmalı tetiklemeyle 0.1 monolayer hassaslığında kalınlık kontrolü yapılabilmektedir. Bu kontrol çok ince filmlerin üretilmesine olanak sağlar. Şekil 3.5 de plazma tabancasının şekli görülmektedir. ZnO ince film depolamada kullanılan plazma tabancasının özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

1) Katot çıkışı : Çıkış gerilimi plazma tabancasının katoduyla bağlantılıdır. Çıkış kablosu 15 kV'ta sınırlıdır. Kaynak materyalde atma deşarjı 750 volt, 650 A ve 600  $\mu$ s'dir.

2) Tetikleyici çıkışı : Plazma tabancasının tetikleyicisiyle bağlantılıdır. Çıkış kablosu 25 kV'ta sınırlıdır. Tetikleyici devrede atma deşarjı 24 kV, 150 mA ve 70  $\mu$ s'dir.

3) Anot çıkışı : Çıkış gerilimi plazma tabancasının anoduyla bağlantılıdır.

#### 3.10.4.Gaz Akış-Basınç Kontrol Sistemi



**Şekil 3.24.** Gaz Akış-Basınç Kontrol Sistemi

Gaz akış-basınç kontrol sistemi gaz akışının ve basınç kontrolünü sağlar. 4 akış ve 1 basınç kanalı bulunmaktadır. Bu sistem sayesinde reaksiyon odacığına giren gaz miktarını ayarlayabilme olanağına sahip oluyoruz. Dolayısıyla reaksiyon odacığının sahip olacağı basıncı da ayarlayabiliyoruz.

### 3.10.5.Oksijen Tüpü



**Şekil 3.25.** Film üretiminde kullanılan O<sub>2</sub> tüpü ve Gaz Vanası

Oksijen tüpünden reaksiyon odacığına oksijen gazı göndererek hem film üretimi için gerekli basıncı hem de ZnO (çinko oksit) ince film üretmek için ortamda gerekli oksijeni sağlamış oluyoruz.

### 3.10.6. Katot ve Alt Tabaka

Bizim sistemimizde katot olarak %99,99 saflıkta Zn (çinko) tel kullanılmıştır. Zn tel istenilen uzunlukta kesilip katot tutucuya yerleştirilir. Alt taban olarak da cam kullanılmıştır. ZnO ince film cam alt taban üzerine depolanmıştır.

### 3.11. ZnO İnce Filmin Üretilmesi

İlk olarak üzerine film depolanacak olan cam alt taban temizleme işleminden geçirilir. Cam önce yıkanarak temizlenir; daha sonra yıkama asitinin içerisinde bir süre bekletilir. Bekleme işleminden sonra saf suyla üzerindeki asitten arındırılır. Son olarak da ilk önce metanolla doldurulmuş behere sonrasında 2-propanolla doldurulmuş behere daldırılıp çıkarıldıktan sonra kuruma işlemine tabi tutulur.

İkinci olarak içerisi daha önceden metanol ile temizlenmiş olan reaksiyon odacığının içerisinde bulunan katot tutucuya istenilen uzunlukta çinko tel yerleştirilir. Sonrasında katot filtrenin girişinde bulunan anota doğru yerleştirilir.

Temizlenmiş olan cam alt taban da alt taban tutucuya yerleştirildikten sonra alt taban tutucunun filtrenin tam alt kısmına ortalanarak yerleştirilir. Bütün bu işlemler tamamlandıktan sonra reaksiyon odacığının kapağı kapatılır. Reaksiyon odacığının üzerinde bulunan valfin kapalı olduğundan emin olunduktan sonra vakum pompası çalıştırılır. Odacığın içerisindeki basınç  $1 \times 10^{-3}$  Torr seviyesine kadar termo couple gauge den gözlenebilir. Bu değerden daha düşük basınçları iyon gauge den gözlemlenir. Sistem taban basıncına ulaştıktan sonra ortama oksijen gazı verilerek basınç yükseltilir. Basınç  $10^{-4}$  Torr seviyelerine geldiğinde istediğimiz değeri içeri giren gaz miktarını değiştirerek ayarlanır. Basınç ayarını yaptıktan sonra iki atma arasındaki süreyi belirlediğimiz atmalı plazma ark kaynağının düğmesini yukarı kaldırarak katoda gerilim uygulanmasını sağlar. Uygulanan ilk gerilimin değeri 24000 V tur. Bu gerilim katodu aşındırarak ark spotunun oluşmasını sağlar. Bu gerilim ile oluşan ark spotu daha sonra uygulanan 600 V luk gerilim ile katodu aşındırarak plazmanın oluşmasına neden olur. Oluşan plazma katot ile anot arasında polarize olur. Böylece katottan anota doğru hareket edebilir. Plazma, filtrenin etrafına sarılı olan tellerden kaynaklanan manyetik alan ile saptırılarak içerisinde bulunan makro parçacıkların filtrenin içerisinde kalması sağlanır. Filtreden geçen plazma filtrenin alt kısmına yerleştirilmiş cam alt taban üzerine düşer. Böylece ZnO ince film depolanmış olur.

#### 4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR

##### 4.1. Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi ile Elde Edilen P-Tipi ZnO İnce Filmlerin Optik ve Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi

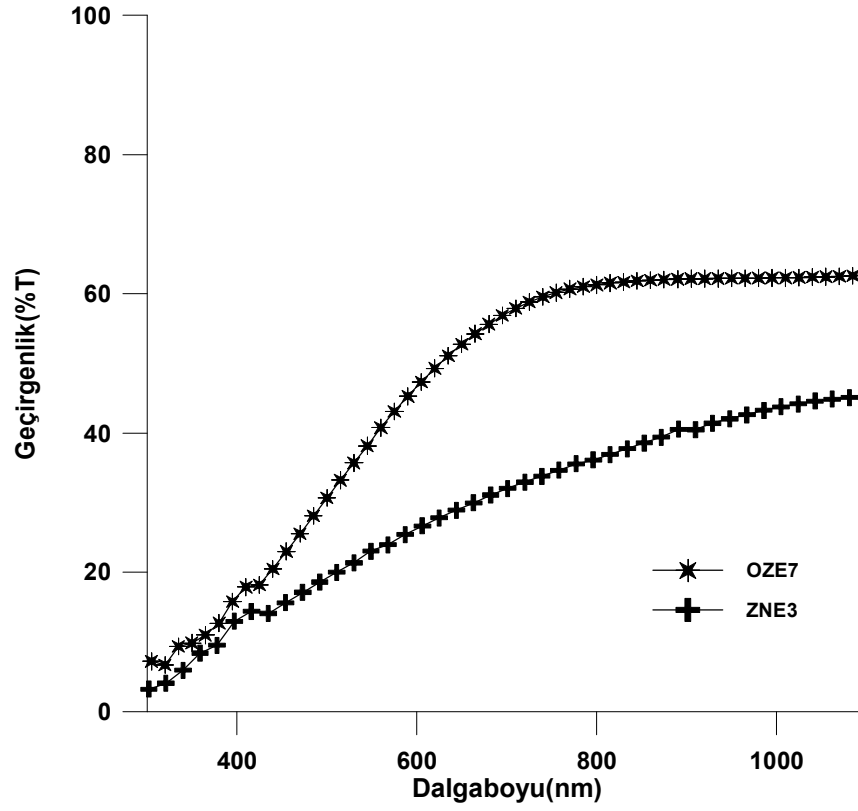
Başlangıç materyali olarak Çinko Nitrür seçilmiş ve filmlerin ısısal oksidasyonla p-tipi yarıiletken ZnO ince filmlerine dönüştüğü belirlenmiştir.

Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi ile elde edilen Çinko Nitrür ve p-tipi ZnO ince filmlerin optik özelliklerini belirlemek için yapılan bu çalışmada önce oda sıcaklığındaki optik geçirgenlikleri ölçüldü. Bu ölçümler 200 – 1100 nm dalga boyu aralığına sahip Perkin-Elmer UV/VIS Lambda 2S Spektrometresi ile yapıldı. Ölçümlerde elde edilen optik geçirgenlik değerlerinin alt taban soğurmasından bağımsız olmasını sağlamak için önce sistemin zemin düzeltmesi yapılarak camdan geçen ışınım %100 olarak normalize edildi.

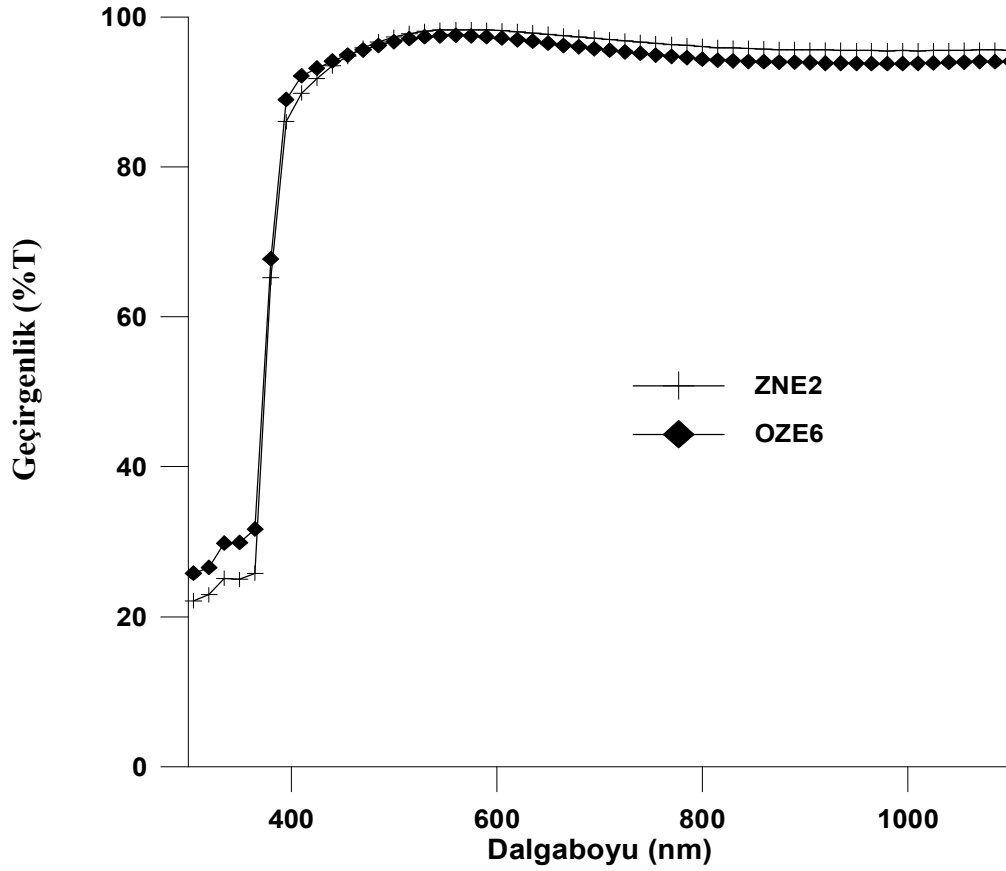
PFCVAD yöntemi ile aynı basınçta ( yaklaşık  $8.5 \times 10^{-4}$  Torr basıncında ) seri olarak üretilen, ZnO ve Çinko Nitrür ince filmlerin tavlanmadan önce ve sonraki optiksel ölçümleri ile XRD ölçümleri yapıldı.  $8.5 \times 10^{-4}$  Torr basıncında üretilen bu filmlerden OZE 6 ve OZE 7 isimli film ZnO, ZNE 2 ve ZNE 3 isimli film de Çinko Nitrür olarak üretilmiş, incelenmiştir.

Filmler üretildikten hemen sonra ZNE 3 ve OZE 7 isimli filmlerin optik özelliklerini belirlemek için dalga boyuna karşılık geçirgenlik eğrileri çizildi.

ZNE 2 ve OZE 6 isimli filmler ise 450 °C’de birer saat atmosfer ortamında tavlandı. Tavlanan filmlerin tekrar optik özellikleri incelendi ve dalga boyuna karşılık geçirgenlik eğrileri çizildi.



Şekil 4.1. Tavlanmamış ZNE 3 ve OZE 7 isimli ince filmlerin dalga boyuna karşı geçirgenlik eğrileri

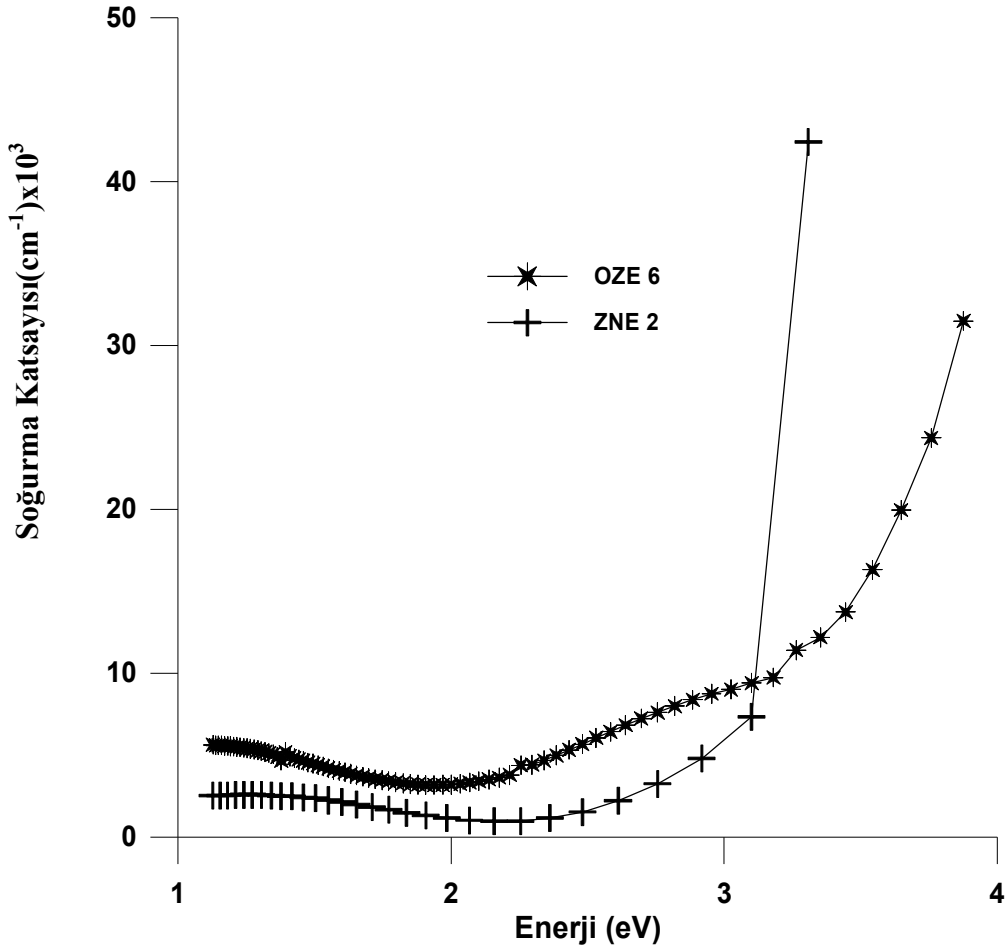


**Şekil 4.2.** Tavlanmış ZNE 2 ve OZE 6 isimli ince filmlerin dalga boyuna karşı geçirgenlik eğrileri

OZE 6 ve ZNE 2 isimli ince filmlerin kalınlıkları denklem 3.36 yardımıyla hesaplanmış ve OZE 6 için kalınlık 197 nm ve ZNE 2 için kalınlık 179 nm olarak bulunmuştur.

Zn zengini olarak üretilen ve optik geçirgenlikleri düşük olan filmlerin tavlanarak oksitlendiği anlaşılmıştır. Çinko Nitrür'ün tavlanması ile filmdeki bazı N atomları, O atomları ile yer değiştirmekte ve filmin içerisinde kalan azot atomları da ZnO:N (azot katkılı ZnO) ince filmdeki alıcı seviyelerini oluşturmaktadır. Çinko nitrür ince filmlerin ısısal oksidasyonla ZnO ince filmlerin optik karakteristiğine uyduğu ayrıca yüksek geçirgenlikte ( $>95\%$ ) olduğu belirlenmiştir.

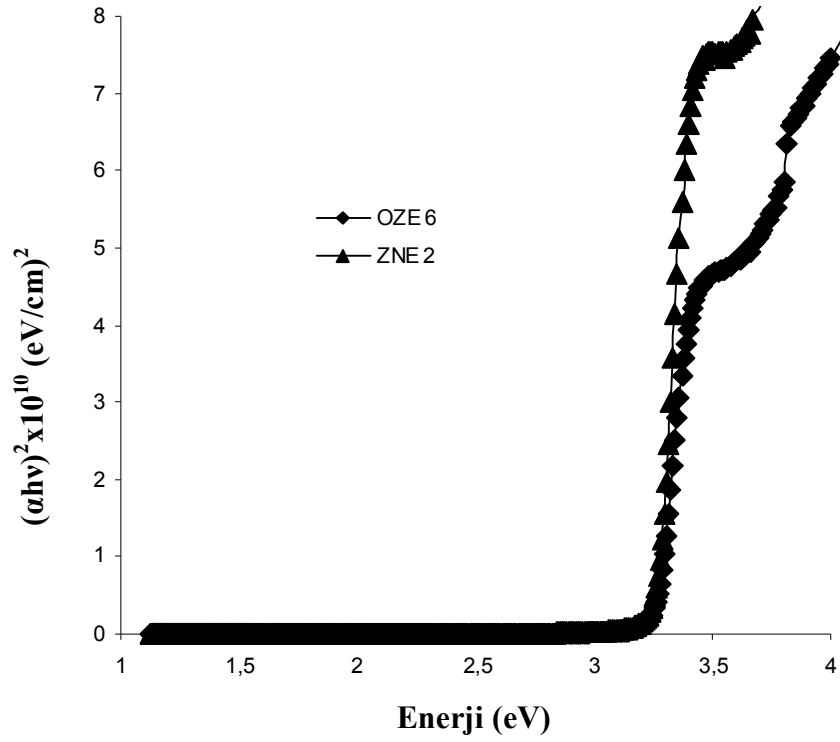
Tavlanan bu filmlerin ZnO'nun karakteristiğine uyduğunu belirlemek için soğurma kenarı, enerji bant aralığı ve kırılma indisi ( Zarf Metoduyla ) hesaplanmıştır.



**Şekil 4.3.** Tavlanmış ZNE 2 ve OZE 6 isimli ince filmlerin  $\alpha$ -E değişimi

Şekil 4.3’de aynı basınçta üretilen örneklerin soğurma katsayısının enerjiye göre değişimi görülmektedir.

Filmlerin soğurma katsayıları elde edildikten sonra yasak enerji aralığı  $E_g$ ’yi bulmak için  $(\alpha E)^2$ ’nin  $E$ ’ye karşı grafikleri çizildi. Bu çizimin teğetinin enerji eksenini kesim noktası yasak enerji aralığını vermektedir ve elde edilen film örneklerinin yasak enerji aralıkları bu yolla bulunmuştur.



**Şekil 4.4.** Tavlanmış ZNE 2 ve OZE 6 isimli ince filmlerin  $(\alpha h\nu)^2$ -E değişimi

p-tipi ve n-tipi ZnO için kırılma indisi zarf (envelope) metoduyla hesaplanmıştır. Geçirgenlik eğrisine zarf çizilmiştir. Çizilen zarfın belirli dalga boylarına karşılık gelen maksimum ve minimum geçirgenlik değerleri belirlenmiş ve denklem 3.72 ve 3.73 yardımıyla aşağıdaki tablo oluşturulmuştur.  $n_s$  camın kırılma indisidir ve değeri 1.53'tür.

**Çizelge 4.1.** ZNE 2 için kırılma indisi değerleri

| <b>ZNE 2</b>    |                       |                       |                |                       |                       |          |          |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------|----------|
| Dalga Boyu (nm) | T <sub>max</sub> (%T) | T <sub>min</sub> (%T) | N <sub>s</sub> | T <sub>max</sub> /100 | T <sub>min</sub> /100 | N        | n        |
| 400             | 86.85                 | 78.25                 | 1.53           | 0.8685                | 0.7825                | 2.057677 | 1.852995 |
| 450             | 93.47                 | 86.1                  |                | 0.9347                | 0.861                 | 1.950679 | 1.777847 |
| 500             | 97.12                 | 91                    |                | 0.9712                | 0.91                  | 1.882346 | 1.725935 |
| 550             | 98.23                 | 92.85                 |                | 0.9823                | 0.9285                | 1.85095  | 1.700776 |
| 600             | 98.23                 | 93.38                 |                | 0.9823                | 0.9338                | 1.832245 | 1.685326 |
| 650             | 98.23                 | 93.92                 |                | 0.9823                | 0.9392                | 1.813404 | 1.669376 |
| 700             | 98.23                 | 94.45                 |                | 0.9823                | 0.9445                | 1.795121 | 1.653492 |
| 750             | 98.23                 | 94.98                 |                | 0.9823                | 0.9498                | 1.777043 | 1.637349 |
| 800             | 98.23                 | 95.52                 |                | 0.9823                | 0.9552                | 1.75883  | 1.6206   |

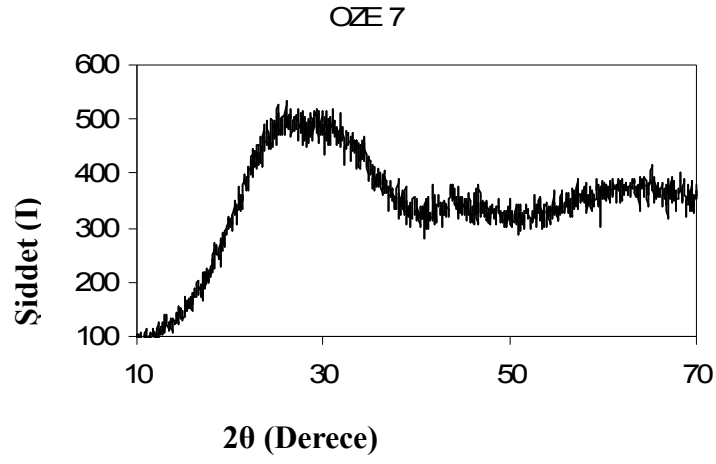
**Çizelge 4.2.** OZE 6 için kırılma indisi hesabı

| <b>OZE 6</b>    |                       |                       |                |                       |                       |          |          |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------|----------|
| Dalga Boyu (nm) | T <sub>max</sub> (%T) | T <sub>min</sub> (%T) | N <sub>s</sub> | T <sub>max</sub> /100 | T <sub>min</sub> /100 | N        | n        |
| 400             | 90,2                  | 77,5                  | 1,53           | 0,902                 | 0,775                 | 2,226376 | 1,960545 |
| 450             | 94,6                  | 81,6                  |                | 0,946                 | 0,816                 | 2,185778 | 1,93566  |
| 500             | 96,8                  | 84,75                 |                | 0,968                 | 0,8475                | 2,119912 | 1,894008 |
| 550             | 97,5                  | 86,6                  |                | 0,975                 | 0,866                 | 2,065476 | 1,858231 |
| 600             | 98                    | 88,5                  |                | 0,98                  | 0,885                 | 2,005628 | 1,817254 |
| 650             | 98,4                  | 90,02                 |                | 0,984                 | 0,9002                | 1,959939 | 1,784621 |
| 700             | 98,4                  | 91,6                  |                | 0,984                 | 0,916                 | 1,901305 | 1,740703 |
| 750             | 98,4                  | 92,8                  |                | 0,984                 | 0,928                 | 1,858108 | 1,706594 |
| 800             | 98,4                  | 93,55                 |                | 0,984                 | 0,9355                | 1,831672 | 1,684847 |

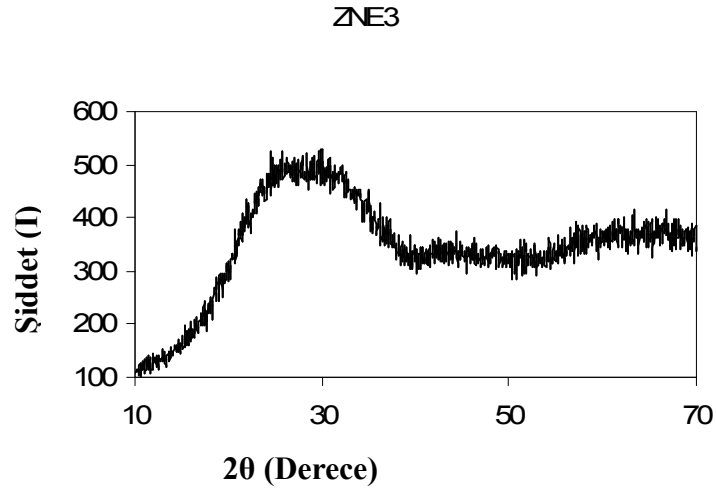
ZNE 2 ve OZE 6 için geçirgenlik eğrisinden faydalanarak zarf metodu ile hesaplanan kırılma indisi kıyaslandığında 450 °C’de bir saat atmosfer ortamında tavlanan ZnO ile Zn<sub>3</sub>N<sub>2</sub>’nin birbirine yakın değerlerde çıktığı görülmektedir. Bu da çinko nitrür’ün ısısal oksidasyonla ZnO’nun karakteristiklerini gösterdiğine bir kanıttır.

Cam alttaban üzerine depolanan aynı basınçta ( $8.5 \times 10^{-4}$  Torr) ZnO ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri Rigaku Miniflex marka CuK $\alpha$  radyasyonlu  $\lambda=0,154$  nm dalga boyuna sahip X-ışını spektrometresi ile ODTÜ Fizik bölümünde ölçüldü.

XRD sonuçlarına göre çinko zengini filmlerin tavlardan önce amorf yapıda oldukları görülmektedir. Şekil 4.5 ve 4.6’ da görülmektedir.

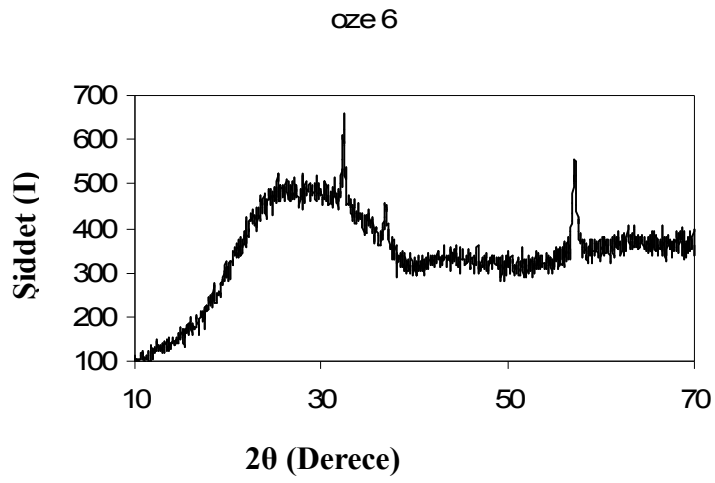


Şekil 4.5. OZE 7 XRD Sonuçları

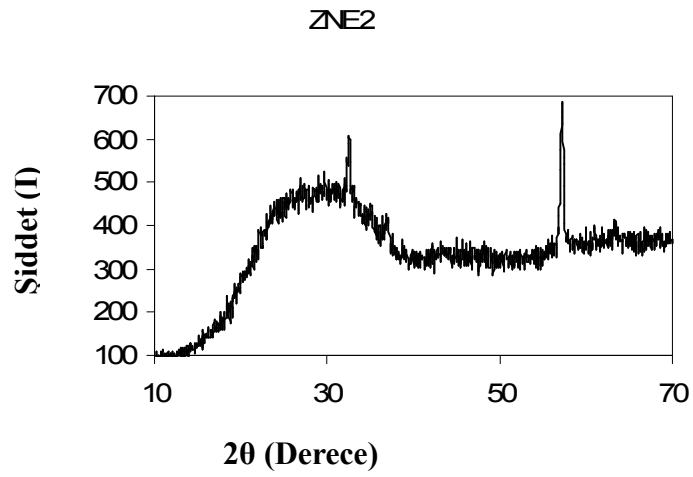


Şekil 4.6. ZNE 3 XRD Sonuçları

Şekil 4.5 ve 4.6’da aynı şartlarda üretilen filmlerin 450 °C’de bir saat atmosfer ortamında tavlandıktan sonra polikristal yapıli yarıiletken ince filmlere dönüştüğü görülmüştür.



**Şekil 4.7.** Tavlanmış OZE 6'nın XRD Sonuçları



**Şekil 4.8.** Tavlanmış ZNE 2'nin XRD Sonuçları

Cam alttaban üzerine depolanan aynı basınçtaki filmlerin ( yaklaşık  $8.5 \times 10^{-4}$  Torr ) X-ışını kırınım desenlerinin incelenmesiyle elde edilen değerler Çizelge 4.3'de görülmektedir.

**Çizelge 4.3.** ZNE 2 Hesaplamaları

|                                  |                      |       |       |
|----------------------------------|----------------------|-------|-------|
| Azot Basıncı (Torr)              | $8.6 \times 10^{-4}$ |       |       |
| Açı ( $2\theta$ )                | 32.55                | 36.95 | 57.25 |
| Şiddet (I)                       | 158.7                | 88.6  | 360.7 |
| FWHM                             | 0.35                 | 0.40  | 0.50  |
| Atama                            | (100)                | (101) | (110) |
| Tanecik büyüklüğü, $D$ (nm)      | 23.8                 | 21.2  | 18    |
| Düzlemler arası uzaklık $d$ (nm) | 0.270                | 0.243 | 0.161 |
| Örgü parametresi $c$ (nm)        | 0.504                | 0.508 | 0.521 |

**Çizelge 4.4.** OZE 6'nın Hesaplamaları

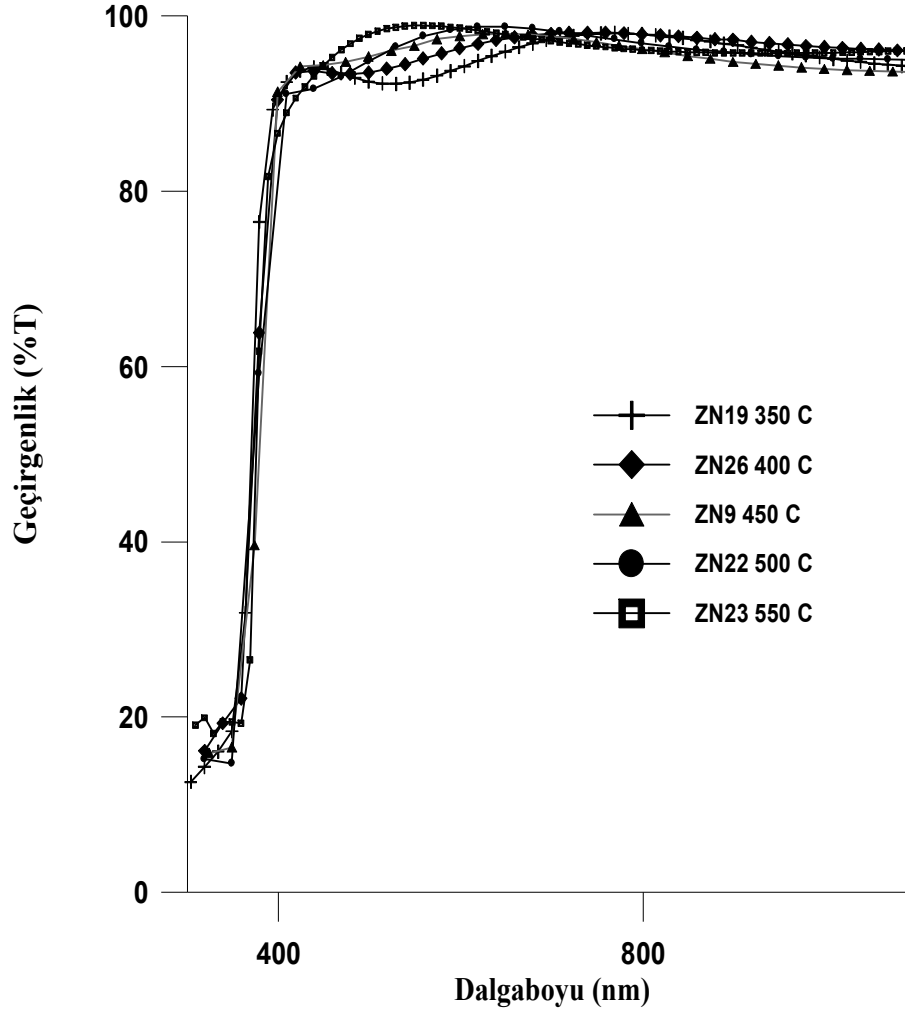
|                                  |                      |       |       |
|----------------------------------|----------------------|-------|-------|
| Oksijen Basıncı (Torr)           | $8.5 \times 10^{-4}$ |       |       |
| Açı (2 $\theta$ )                | 32.55                | 36.85 | 57.25 |
| Şiddet (I)                       | 242                  | 108   | 220   |
| FWHM                             | 0.25                 | 0.40  | 0.50  |
| Atama                            | (100)                | (101) | (110) |
| Tanecik büyüklüğü, $D$ (nm)      | 33.1                 | 21.1  | 18.2  |
| Düzlemler arası uzaklık $d$ (nm) | 0.27                 | 0.24  | 0.16  |
| Örgü parametresi $c$ (nm)        | 0,504                | 0.508 | 0.521 |

Cam alt tabanlar üzerine depolanan filmlerin X-ışını kırınım desenlerinin incelenmesiyle elde edilen değerler Çizelge 4.4' de görülmektedir. Çizelgeden görüldüğü gibi üretilen filmlerin hepsinin 32.5, 36.85, 57.25 civarında (100) (101) (110) kırınım piki sergiledikleri, tavlanan ZnO ile tavlanan çinko nitrür'ün, hemen hemen aynı kristal özelliklere sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu da çinko nitrür'ün tavlendiğinde ZnO'ya dönüştüğünü yapısal olarak göstermektedir.

#### 4.2. P-Tipi ZnO İnce Filmlerin Tavlama ile Optik Özelliklerinin Değişimi

XRD'sine bakılan filmlerin ısısal oksidasyonla kristal yapıya ulaştığı belirlendikten sonra PFCVAD yöntemi ile aynı basınçta (  $9.2 \times 10^{-4}$  torr basıncında ) seri olarak üretilen, aynı şartlardaki filmlerin tavlama etkisi incelenmiştir. Filmler 350 ile 550 °C arasındaki sıcaklıklarda 1'er saat süreyle atmosfer altında tavllanmış

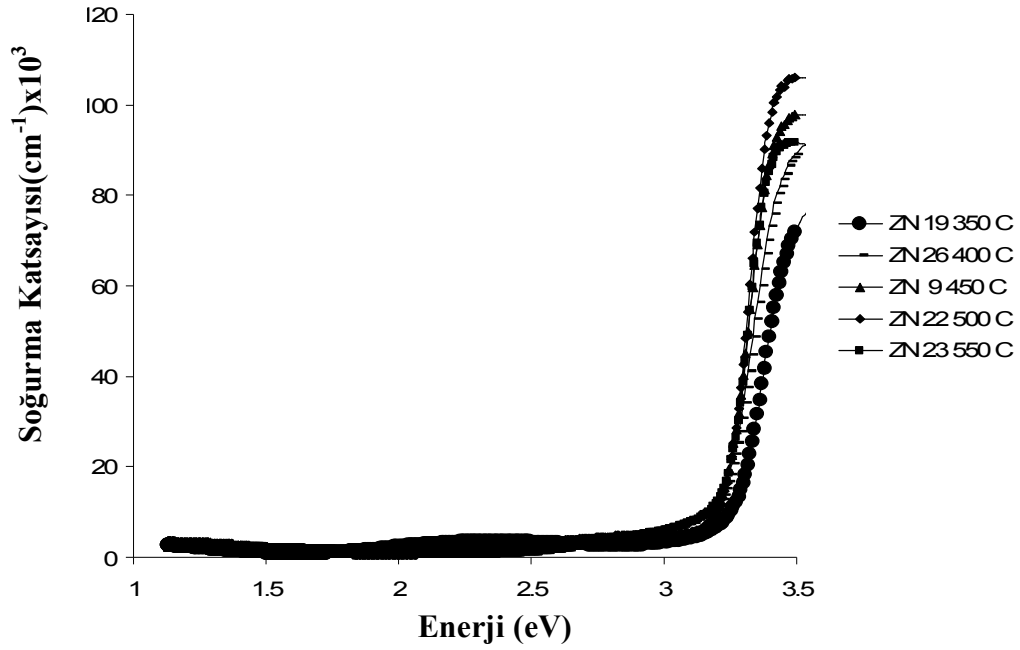
ve optik geçirgenlik değerlerinin dalga boyuna karşı grafiği Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



**Şekil 4.9.** Tavllanmış Zn 19, Zn 26, Zn 9, Zn 22, Zn 23 isimli ince filmlerin dalga boyuna karşı geçirgenlik eğrileri.

Cam alt tabanlar üzerine depolanan aynı basınçtaki ( $9.2 \times 10^{-4}$  torr basıncında ) ZnO yarıiletken ince filmlerin geçirgenliğinin dalga boyuna göre değişimi Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Görünür bölgede filmlerin ortalama geçirgenliği %90'ın üzerindedir.

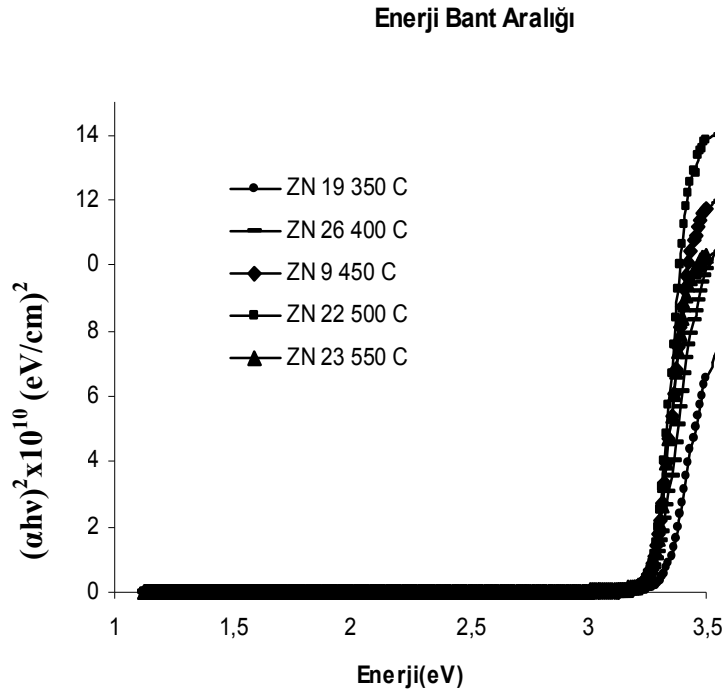
Elde edilen bu filmlerin soğurma katsayılarının enerjiye bağlı değişimleri de Şekil 4.10 yardımıyla verildi.



**Şekil 4.10.** Tavlanmış ZN 19, ZN 26, ZN 9, ZN 22, ZN 23, isimli ince filmlerin  $\alpha$ -E değişimi.

Tavlama sıcaklığı arttıkça soğurma kenarının keskinleştiği görülmektedir. Soğurma katsayısı tavlama sıcaklığının artması ile azalmaktadır. Tersine tavlama sıcaklığının artması ile enerji bant aralığı azalmaktadır. O halde soğurma katsayısı ve enerji bant aralığı tavlama sıcaklığına bağlıdır diyebiliriz.

Filmlerin soğurma katsayıları elde edildikten sonra yasak enerji aralığı  $E_g$ ' yi bulmak için  $(\alpha E)^2$ ' nin  $E$ ' ye karşı grafikleri çizildi. Bu çizimin teğetinin enerji eksenini kesim noktası yasak enerji aralığını vermektedir. Elde edilen filmlerin yasak enerji aralıkları bu yolla bulunmuştur.



**Şekil 4.11.** Tavlanmış ZN 19, ZN 26, ZN 9, ZN 22, ZN 23, isimli ince filmlerin  $(\alpha h\nu)^2$ -E değişimi.

İnce filmlerin geçirgenlik değerlerinin ( > % 93 ) yüksek olduğu gözlenmiştir. Filmlerin optik geçirgenlikleri belirlendikten sonra filmlerin soğurma kenarı, enerji bant aralığı ve kalınlık değerleri 3.65 ve 3.66 denklemleri yardımıyla hesaplandı ve bu değerler çizelge 4.5’de gösterildi.

**Çizelge 4.5.** Filmlerin Soğurma Kenarı, Enerji Bant Aralığı ve Kalınlık Değerleri

| Filmin adı | Tavlama Sıcaklığı (°C) | Soğurma Kenarı (nm) | Enerji Bant Aralığı (eV) | Kalınlık (nm) |
|------------|------------------------|---------------------|--------------------------|---------------|
| ZN 19      | 350                    | 381                 | 3.325                    | 220           |
| ZN 26      | 400                    | 386                 | 3.298                    | 178           |
| ZN 9       | 450                    | 387                 | 3.289                    | 186           |
| ZN 22      | 500                    | 388                 | 3.281                    | 183           |
| ZN 23      | 550                    | 387                 | 3.289                    | 181           |

#### 4.3. Elektriksel Özellikler

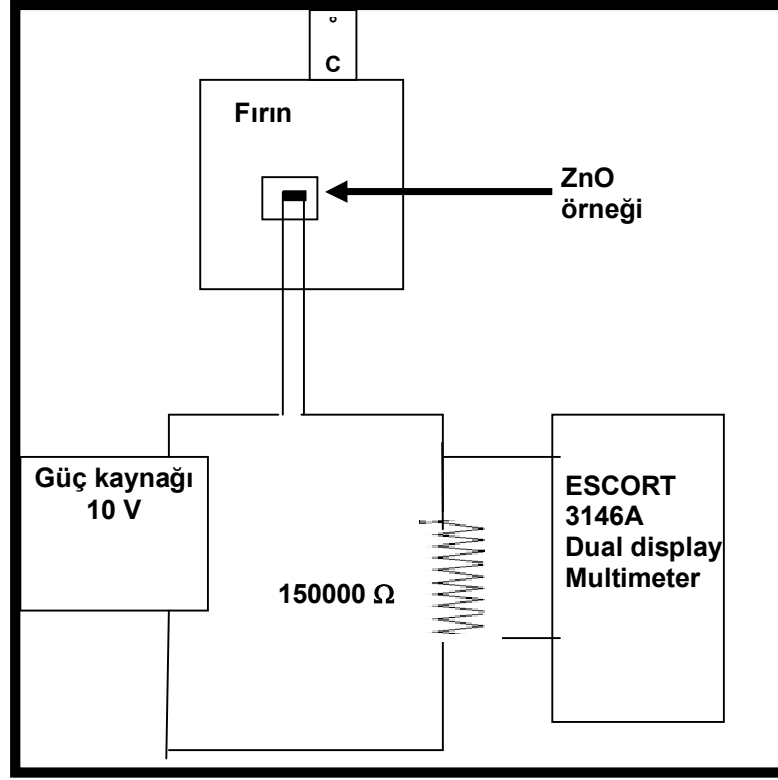
Tavlanarak ZnO'ya dönüşen bu filmlerin p-tipi mi yoksa n-tipi mi olduğu Hall ölçümlerinden belirlenmiştir. Hall Effect Measurement System HMS-3000 sistemi kullanılarak elektriksel ölçümler yapılmıştır. Bu sistemle filmlerin hacim konsantrasyonu, Hall mobilitesi, direnci, yüzey konsantrasyonu ve iletkenlikleri hesaplanmıştır. Yarıiletkenlerin iletkenlik tipini (n-tipi veya p-tipi) bulmak için taşıyıcı yoğunluğunun işaretine bakılmıştır. Donör veya n-tipi yarıiletken için taşıyıcı yoğunluğunun işareti negatiftir, akseptör veya p-tipi yarıiletken için taşıyıcı yoğunluğunun işareti pozitifdir. Bu çalışmada filmlerin Hall ölçüm sonuçlarına bakarak filmlerin yüksek taşıyıcı yoğunluğuna ve düşük öz dirence sahip olduğunu söyleyebiliriz.

**Çizelge 4.6.** Filmlerin Hall Ölçüm Değerleri

| Örnek | Kalınlık (nm) | Tavlama Sıcaklığı (°C) | Hall Mobilitesi (cm <sup>2</sup> /Vs) | Taşıyıcı Konsantrasyonu (1/cm <sup>3</sup> ) | Özdirenç (Ωcm) | Taşıyıcı Tipi |
|-------|---------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|---------------|
| ZN-26 | 179           | 400                    | 0.14                                  | +1.08x10 <sup>18</sup>                       | 40.73          | p             |
| ZN-9  | 186           | 450                    | 13.65                                 | +2.11x10 <sup>16</sup>                       | 21.65          | p             |
| ZN-22 | 183           | 500                    | 63.98                                 | +2.34x10 <sup>15</sup>                       | 41.65          | p             |
| ZN-23 | 181           | 550                    | 10.15                                 | -2.80x10 <sup>16</sup>                       | 21.98          | n             |

Filmlerin 400, 450, 500 °C’de p-tipi davranış sergilediğini, 550 °C’de filmlerin tekrar n-tipine dönüştüğünü Hall ölçümlerine bakarak söyleyebiliriz. Çizelge 4.6 ZnO yarıiletken ince filmlerin kalınlığa göre hacim konsantrasyon, Hall mobilite, direnç, yüzey konsantrasyon ve iletkenliğini göstermektedir. Bu filmlerin basıncı aynıdır (8,5x10<sup>-4</sup> Torr). Direncin artan kalınlıkla azaldığı bulunmuştur. Azalan direnç gelişen kristallik ve artan kristal boyutundan kaynaklanır ve iç kristal sınır saçılması zayıflar, taşıyıcı yaşam zamanı artar, sonuç olarak mobilite artmaktadır.

#### 4.4. Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi İle Elde Edilen ZnO İnce Filmlerin Elektriksel İletkenlik Çalışmaları



**Şekil 4.12.** Elektriksel ölçüm düzeneği

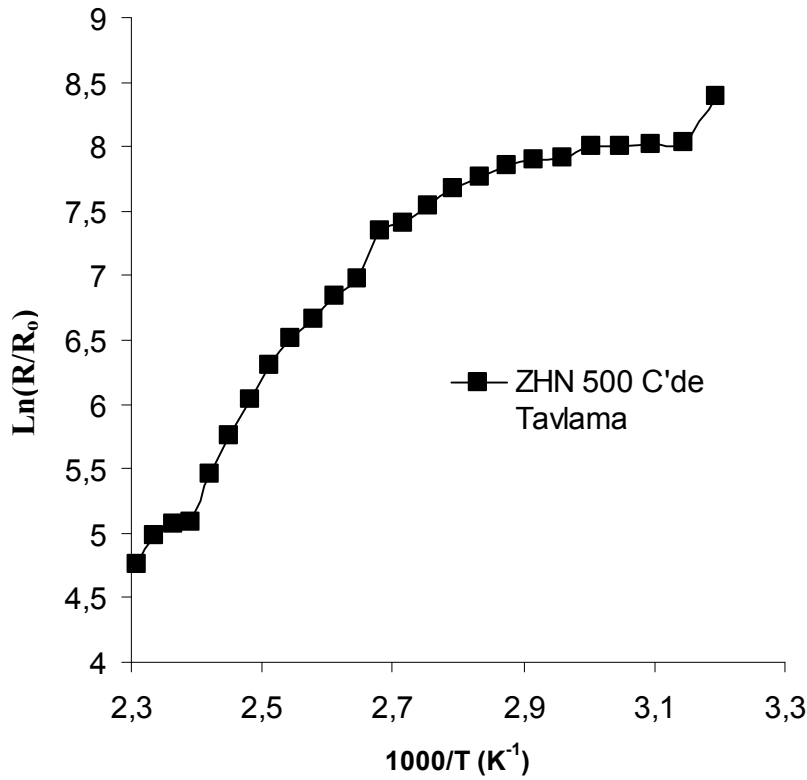
Isısal uyarım elektronun iletim bandına hareket ettirildiği durumdur. Hem elektronlar hem de deşikler baskınsa elektriksel iletkenliği birlikte sağlarlar. Oda sıcaklığında cam alt tabanlara PFCVAD tekniğiyle depolanan farklı ZnO yarıiletken ince filmlerin elektriksel iletkenlikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Elektriksel ölçümleri yapmak için Şekil 4.12'deki düzenek kurulmuştur. Üretilen n-tipi ZnO yarıiletken ince filmlerin elektriksel direnci

$$R = R_0 \exp[E_a / kT]$$

denklemleri ile verilen yarıiletken ilişkisi kuralıyla bulunmuştur. Burada  $R_0$  sıcaklıktan bağımsız direnç,  $k$  Boltzman sabiti ve  $E_a$  aktivasyon enerjisidir. Filmin  $R$  değerleri

$$R = \frac{10V}{V_{ölç}} (R_0)$$

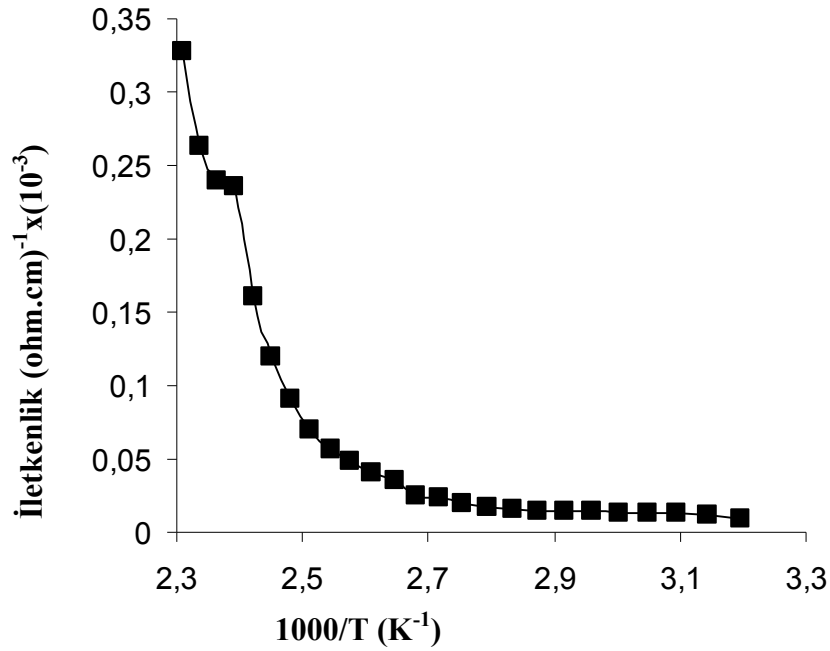
denklemleri yardımıyla hesaplanmıştır. Burada  $R_0=150000 \Omega$  olarak alınmıştır. ZnO yarıiletken ince filmlerin aktivasyon enerjisi  $\ln(R / R_0)$  'ın  $1/T$  ile değişiminden elde edilen grafikten tanımlanmıştır. Direnç ölçümlerinden elde edilen düşük aktivasyon enerjisi değerleri, yasak enerji aralığındaki safsızlık atomlarından kaynaklanan tuzak veya diğer enerji seviyelerinden kaynaklanır. Yani kusurlar ve safsızlıklar yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik özelliklerini etkilemektedir.



**Şekil 4.13.** ZHN filmi için  $\ln(R/R_0)$ 'ın  $1000/T$  'ye değişimi

Şekil 4.13 cam alt taban üzerine depolanan ZnO yarıiletken ince filminin  $\ln(R/R_0)$ 'ın  $1000/T$ 'ye göre değişimini gösterir. Şekilden görüldüğü gibi  $\ln(R/R_0)$ , 4,7 ile 8 arasında değişmektedir. Grafiğin eğiminden faydalananarak aktivasyon enerjisi

bulunmuştur. Bu film için grafikten iki eğim çizgisi belirlenmiştir. Birinci eğimden cam alt taban üzerine depolanan ZnO yarıiletken ince filminin aktivasyon enerjisi 0.15 eV, ikinci eğimden de filmin aktivasyon enerjisi 0.061eV olarak bulunmuştur.



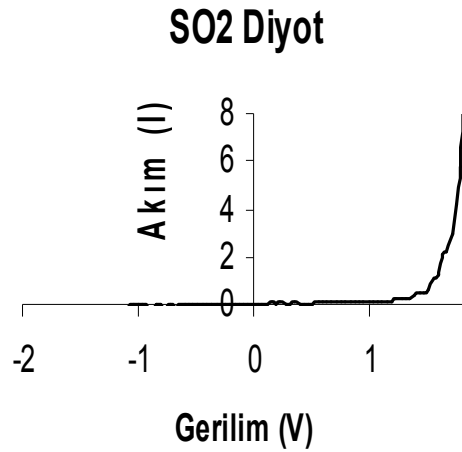
**Şekil 4.14.** ZHN'nin İletkenliğinin 1000/T 'ye değişimi

Sıcaklık değiştirilerek akım-gerilim değerlerine bakılmıştır ve grafikleri çizilmiştir. Şekil 4.14 cam alt taban üzerine depolanan ZnO yarıiletken ince filminin iletkenliğinin 1000/T'ye göre değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi iletkenlik 0,03 ve 0,33 /ohm-cm arasında değişmektedir. Sıcaklık arttıkça iletkenliğin arttığı görülmektedir.

#### 4.5. p- n Diyot

Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark depolama (AFKVAD) yöntemi ile cam alttabanlar üzerine Çinko Nitrür ve ZnO ince filmler üretilmiştir. Daha sonra depolanan Çinko Nitrür ve ZnO ince filmleri atmosfer ortamında 400 °C'de

tavlanmıştır. Tavlanan bu filmlerin optiksel ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. 400 °C’de tavlanan Çinko Nitrür filminin p-tipi olduğu ve yine 400 °C’de tavlanan ZnO’nun daha iyi özelliklerde n- tipi olduğu, yüksek taşıyıcı yoğunluğu ve düşük özdirence sahip oldukları gözlenmiştir. n-tipi Si alt taban üzerine oda sıcaklığında Çinko Nitrür üretilmiş olup 400 °C’de tavlanarak p-tipi ZnO’ya dönüştürülerek n-p yapısı elde edilmiştir. Benzer şekilde p-tipi Si alttaban üzerine n tipi ZnO ince filmler depolanarak p-n yapısı oluşturulmuştur. Alt ve üst metal elektrotlar Zn/Al alaşımı kullanılarak ısısal evaporatör kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen yapıların akım-gerilim karakteristikleri (I-V) yarıiletken parametrik analizör ölçüm sistemi (Agilent 4156C) kullanılarak yapılmıştır.



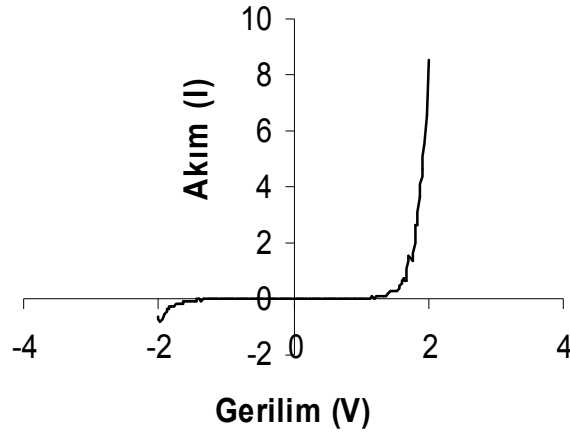
**Şekil 4.15.** p-n Ekleme Diyot

İleri bölgedeki diyot I-V akımı

$$I(V_G) = I_s \exp\left(\frac{eV_G}{nk_B T}\right), \quad (1)$$

şeklinde gösterilir. Burada  $I$  akım,  $I_s$  ters doyum akımı,  $V_g$  uygulanan ileri gerilim,  $e$  elektron yükü,  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  sıcaklık  $n$  de diyot ideallik katsayısıdır. Doyum akımı  $I_s = A^*T^2 \exp(-\phi_B/k_B T)$  ile verilir. Buradaki  $A^*$  Richardson sabitidir ve ZnO için teorik değeri literatürlerde,  $A^* = 32 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$  olarak verilmiştir. Yaptığımız

hesaplamalara göre  $n$  değeri 1 civarındadır. Kesinlik için bu deney ve hesaplamaların tekrarlanması gerekmektedir. İleri bölgede ON/OFF gerilimi 1.7 volt civarındadır. Görüldüğü gibi bu değer silisyum diyotun ON/OFF gerilimi olan 0.6 Volttan çok büyüktür. Bu diyodun çalışma parametrelerini ZnO belirlemektedir.



**Şekil 4.16.** p-n Eklem Diyot

Şekil 4.16'daki ve 4.17'deki diyotun Agilent 4156C I-V parametre analizörü kullanılarak I-V ölçümü yapılmıştır. Bu diyotta ON/OFF gerilimi Volttur ve n-Si/p-ZnO' daki bu değer bir önceki diyottan daha yüksektir. Geri besleme bölgesinde kırılma 2 Voltta gerçekleşmektedir. Bu değerlere bakıldığında p-Si nin başlangıç malzemesi olarak alındığı diyodun ideal diyoda daha yakın olduğu görülmektedir. Her iki diyotta da kaçak akımı ihmal edilecek kadar küçüktür.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ZnO ince filmlerin optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. ZnO ince filmler görünür bölgede yüksek geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletkenlik değerine sahip saydam iletken oksit filmler olduklarından güneş pilleri, optoelektronik aygıtlar gibi teknolojinin birçok alanında uygulama bulmaktadırlar. ZnO ince filmlerin elektriksel ve optik özelliklerinin belirlenmesi, ZnO kullanılarak yapılmış ya da yapılacak olan aygıtların karakteristiğini belirlemek açısından oldukça büyük bir önem taşımaktadır.

Yapılan çalışmada Çinko Nitrür ince filmler atmalı filtreli katodik vakum ark depolama yöntemiyle oda sıcaklığında aynı basınçlarda cam alttaban üzerine depolanmışlardır. Daha sonra bu filmler çeşitli sıcaklıklarda ısısal oksidasyona tabi tutulmuştur. Filmlerin tavlama öncesi ve tavlama sonrası optik geçirgenliğine ve XRD özelliklerine bakılmıştır. Tavlanmayan Çinko Nitrür ince filmlerin geçirgenliği % 50-60 civarında iken tavlama ile bu değerlerin % 90' ın üzerine çıktığı gözlenmektedir.

Hall ölçümünden filmlerin 350, 400, 450, 500 °C'de p-tipi ZnO özelliği gösterdiği, 550 °C'de de n- tipi ZnO özelliği gösterdiği anlaşılmıştır. Çünkü 300-500 °C arasında filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu işareti (-), 550 °C' de ise bu işaretin (+) olduğu görülmüştür.

Elde edilen p-tipi ZnO ince filmlerin optik geçirgenliğin değişiminden yasak enerji aralığı, bant kenarı ve filmlerin kalınlığı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda yasak enerji aralığının kalınlık azaldıkça azaldığı görülmüştür. Bant kenarının değeri de kalınlığın azalması ile arttığı gözlenmiştir. Ölçülen soğurma değerlerinden hesaplanan yasak enerji aralığının değerleri 3.32 eV ile 3.28 eV arasındadır. Çinko nitrür filmi 500 °C 'de tavlanaarak  $\ln(R/R_0)$ 'ın  $1000/T$  'ye karşı grafiği çizilip grafikten iki eğim çizildi. Bu eğimler bize aktivasyon enerjisi değerini verir. Birinci eğimden aktivasyon enerjisi 0.15 eV, ikinci eğimden de filmin aktivasyon enerjisi 0.061eV olarak bulunmuştur. İletkenliğin  $1000/T$ 'ye göre değişimi de çizildi. Şekilden iletkenliğin 0.03 ve 0.33 /ohm cm arasında değiştiği görülmektedir. Sıcaklık arttıkça iletkenliğin arttığı gözlenmiştir.

Hall ölçümünden filmlerin yüksek taşıyıcı yoğunluğu ( $1.8 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ), düşük özdirence ( $40.73 \, \Omega \, \text{cm}$ ) sahip oldukları gözlenmiştir.

Cam alttabanlar üzerine Çinko Nitrür ve ZnO ince filmler üretilmiştir. Daha sonra depolanan Çinko Nitrür ve ZnO ince filmleri atmosfer ortamında  $400 \, ^\circ\text{C}$ 'de tavlansmıştır. Tavlanan bu filmlerin optiksel ve elektriksel özellikleri incelenmiştir.  $400 \, ^\circ\text{C}$ 'de tavlanan  $\text{Zn}_3\text{N}_2$  filminin p-tipi olduğu ve yine  $400 \, ^\circ\text{C}$ 'de tavlanan ZnO'nun daha iyi özelliklerde n- tipi olduğu, yüksek taşıyıcı yoğunluğu ve düşük özdirence sahip oldukları gözlenmiştir. n-tipi Si alt taban üzerine oda sıcaklığında  $\text{Zn}_3\text{N}_2$  üretilmiş olup  $400 \, ^\circ\text{C}$ 'de tavlansarak p-tipi ZnO'ya dönüştürülerek n-p yapısı elde edilmiştir. Benzer şekilde p-tipi Si alttaban üzerine n tipi ZnO ince filmler depolanarak p-n yapısı oluşturulmuştur. Alt ve üst metal elektrotlar Zn/Al alaşımı kullanılarak ısısal evaporator kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen yapıların akım-gerilim karakteristikleri (I-V) analiz edildiğinde ON/OFF geriliminin 1.7 ve 2 Volt olduğu ve bu parametrenin heretroeklemede ZnO tarafından kontrol edildiği gözlenmiştir. Kaçak akımları çok küçük değerler olduğu için ihmal edilmiştir. Ancak n tipi silisyum üzerine yapılan diyotun ters gerilim dayanıklılığı istenen değerden küçük (2V) bulunmuştur. Bu sonucu elde edilen filmin kalınlığının kimi bölgelerde homojen olmadığı şeklinde yorumlamaktayız.

Bu veriler ışığında üretilen p-tipi ve n-tipi ZnO ince filmlerin optoelektronik çalışmalar için uygun olduğu düşünülmektedir. Görünür bölgede yüksek geçirgenliğe sahip, yüksek kalitede polikristal ZnO ince filmlerin PFCVAD sistemiyle üretimi mümkün olup Diyot gibi aygıtların yapımı için gerekli ve önemli bir yarıiletken materyalidir.

## KAYNAKLAR

- AYGÜN, E., ZENGİN, D. M., 1994, Kuantum Fiziği, Bilim Yayınevi, 304s, Ankara.
- CHOPRA, K. L., 1969, "Thin Film Phenomena" MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, New York, 401-454.
- CAFEROV, T., 1998. Yarıiletken Fiziği, Y. T. Ü., Basım-Yayın Merkezi Matbaası, İstanbul, 200s.
- ECKERTOVA, L., 1986, Physics of Thin Films. Plenum Pres, Second Edition, 233-237.
- GÜMÜŞ, C., OZKENDİR O. M., KAVAK H., UFUKTEPE Y., 2006, Structural and Optical Properties of Zinc Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 8: 299 -303.
- HAN, W. G., KANG, S. G., KIM, T. W., KIM, D. W., CHO, W. J., 2005, Effect of Thermal Annealing on the Optical and Electronic Properties of ZnO Thin Films Grown on p-Si Substrates. Applied Surface Science, 245: 384-390.
- JAIN, M., II-VI Semiconductor Compounds, World Scientific Publishing, Singapore (1993).
- KAMBİLAFKA, V., VOULGAROPOULOU, P., DOUNİS, S., ILİOPOULOS, E., ANDROULİDAKİ , M., TSAGARAKİ, K., ŠÁLY, V., RUŽİNSKÝ, M., PROKEİN, P., APERATHİTİS, E., 2007, The Effect of Nitrogen on the Properties of Zinc Nitride Thin Films and Their Conversion into P-Zno:N Films. Thin Solid Films, 515: 8573-8576.
- KAMİNSKA, E., PIOTROWSKA, A., KOSSUT, J., BARCZ, A., BUTKUTE, R., DOBROWOLSKI, W., JAKİELA, R., DYNOWSKA, E., 2005, Transparent p-type ZnO Films Obtained by Oxidation of Sputter –Deposited Zinc Nitride, Solid State Communications, 135: 11-15.
- KITTEL, C., 1996. Katıhal Fiziğine Giriş. Güven Kitap Yayın Dağıtım, İstanbul, 434s.
- Lİ, B. S., Liu, Y.C., Zhi, Z.Z., Shen, D. Z., Lu, Y.M., Zhang, J.Y., Fan, X.W., Mu, R.X., Henderson, D.O., 2002, Optical Properties and Electrical Characterization of P-

- type ZnO Thin Films Prepared by Thermally Oxidizing Zn<sub>3</sub>N<sub>2</sub> Thin Films. Journal of Materials Science, 18: 13-17.
- MEYER, R. J., 1972. Introduction to Classical and Modern Optics. Prentice-Hall, 471- 478.
- MOTT, N. F., DAVIS, E. A., 1979. Electronic Process in Noncrystalline Materials. Clarendon Press, Inc. Oxford, pp 273-274.
- NAG, B.R., Electron Transport in Compound Semiconductors, Springer Verlag, New York (1980).
- OHRING, M., 1991, The Materials Science of Thin Films, 451-453.
- TÜZEMEN, E., Ş., 2007. ZnO İnce Filmlerinin Eldesi ve Aygıt Üretimi için Parametrelerinin Optimizasyonu . Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Fizik Bölümü, Adana, 208s.
- VLASENFLİN, T. H., 2007, p-type Conduction in ZnO Dual-Acceptor-Doped with Nitrogen and Phosphorus. Solid State Communications, 142: 292-294.
- WHANG, C., JI, Z., XI, J., DU, J., YE, Z., 2006, Fabrication and Characteristic of the Low-Resistive p-type ZnO Thin Films by DC Reactive Magnetron Sputtering. Materials Letters, 60: 912-914.
- YAN, Z., TANG, SONG, Z. T., LIU, W. L., WAN, Q., ZHANG, F. M., FENG, S. L., 2005, Optical and Electrical Properties of P-type Zinc Oxide Thin Films synthesized by Ion Beam Assisted Deposition. Thin Solid Films, 492: 203-206.
- YAO, B., GUAN, L.X., XING, G.Z., ZHANG, Z.Z., LI, B.H., WEI, Z.P., WANG, X.H., CONG, C.X., XIE, Y.P., LU, Y.M., SHEN D.Z, 2007, P Type Conductivity and Stability of Nitrogen-Doped Zinc Oxide Prepared by Magnetron Sputtering. Journal of Luminescence, 122-123: 191-194.
- ZHANG, X. D., LIU, C. L., WANG, Z., LÜ, Y. Y., YIN, L. J., 2007, Photoluminescence and Electrical Properties of N-Implanted ZnO Films. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 254: 83-86.

## **ÖZGEÇMİŞ**

30 Nisan 1982 yılında Adana’da doğdum. İlk öğrenimimi Orhan Gazi İlkokulu’nda, orta öğrenimimi 23 Nisan Ortaokulu’nda, lise öğrenimimi Danişment Gazi Süper Lisesi’nde tamamladım. Daha sonra Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde lisans eğitime başladım. 2004 yılında mezun oldum. 2005 yılında Çukurova Üniversitesinde yüksek lisans eğitime başladım.