

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> İNCE FİLMLEİNİN ELEKTRİKSEL VE OPTİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İLYAS ÜNAK**

**DENİZLİ, OCAK - 2015**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**



**CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> İNCE FİLMLERİNİN ELEKTRİKSEL VE OPTİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İLYAS ÜNAK**

**DENİZLİ, OCAK - 2015**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**İLYAS ÜNAK** tarafından hazırlanan “**CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> İNCE FİLMLERİNİN ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 27.01.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

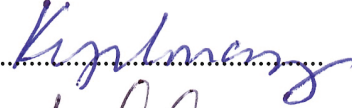
Jüri Üyeleri

İmza

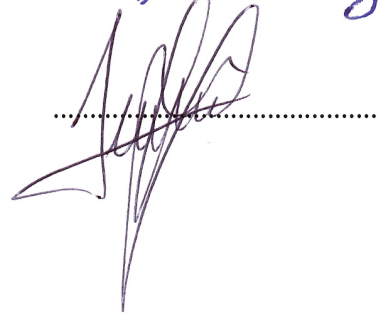
Danışman  
Prof. Dr. Orhan KARABULUT  
PAÜ- Fen Edebiyat Fak. Fizik Bölümü

  
.....

Üye  
Doç. Dr. Koray YILMAZ  
PAÜ- Fen Edebiyat Fak. Fizik Bölümü

  
.....

Üye  
Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN  
PAÜ- Denizli Teknik Bilimler MYO

  
.....

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
18/02/2015 tarih ve 07/18... sayılı kararıyla onaylanmıştır..

  
.....

Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimleri tarafından 2011FBE075 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**



**İLYAS ÜNAK**

## ÖZET

**CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> İNCE FİLMLERİNİN ELEKTRİKSEL VE OPTİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İLYAS ÜNAK  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ORHAN KARABULUT)

**DENİZLİ, OCAK - 2015**

Bu çalışmada II-III-VI grubu bileşiklerinden olan CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiği 1423 °K'de sinterlenerek elde edilmiştir. Elde edilen malzeme kaynak olarak kullanılıp termal buharlaştırma yöntemiyle sıcaklığı 573 K olan cam alttaş üzerine yarıiletken ince film üretilmiştir. Üretilen ince filmler 673 K ve 773 K'de tavlansmıştır. Elde edilen ince filmlerin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir. Bu özelliklere tavlama sıcaklığının etkisi araştırılmıştır.

Üretilen ince filmlerin elementel analizleri ve yüzey özellikleri taramalı elektron mikroskopu (SEM), enerji dağınım spektrometresi (EDS) cihazları ile incelenmiş kristal yapıları ise X-ışını kırınım (XRD) metodu ile belirlenmiştir. İnce filmlerin elektriksel özellikleri 10 K - 400 K aralığında araştırılmış sıcaklığa bağlı iletkenlik ve Hall etkisi ölçümleri yapılmıştır. Yasak enerji band aralığını belirlemek için 190-1100 nm dalga boyu aralığında UV-Vis spektrometre cihazı ile soğurma ölçümleri yapılmıştır. Filmlerin ışığa karşı duyarlılığını araştırmak için ışık şiddetine bağlı fotoiletkenlik ölçümleri yapılmıştır.

Sonuç olarak; alttaş ve tavlama sıcaklığının CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerinin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri üzerine etkileri tartışılmış ve yorumlanmıştır.

**ANAHTAR KELİMELEER:** İnce Film, CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>, Tavlama, Termal Buharlaştırma

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> THIN FILMS**

**MSC THESIS**

**İLYAS ÜNAK**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
PHYSICS**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. ORHAN KARABULUT)**

**DENİZLİ, JANUARY 2015**

In this study the CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> compound which belongs to II-III-VI family has been obtained by sintering method at 1423 K temperature. The obtained CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> compound has been used as source material and semiconductor thin films have been deposited by thermal deposition method onto glass substrates which were at 573 K temperature. Semiconductor thin films have been annealed at 673 K and 773 K temperatures and effects of annealing on electrical, optical and structural properties of thin films have been investigated.

In order to determine the elemental composition and surface morphology of the films, scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) techniques have been used. The crystal structure of the semiconductor films were investigated by X-ray diffraction (XRD) method. Hall effect and temperature dependent conductivity measurements were used to determine electrical properties of the films in the temperature range of 80-420 K. In order to study photosensitivity of the films, photoconductivity measurements depending on light intensity were carried out.

As a conclusion, the effects of annealing temperature on the structural, optical and electrical properties of the CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> thin films were discussed and interpreted.

**KEYWORDS:** Thin Film, CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>, Annealing, Thermal Evaporation

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

|  |           |
|--|-----------|
| ÖZET.....  | i         |
| ABSTRACT .....   | ii        |
| İÇİNDEKİLER .....  | iii       |
| ŞEKİL LİSTESİ.....   | v         |
| TABLO LİSTESİ .....  | vii       |
| SEMBOL LİSTESİ.....  | viii      |
| ÖNSÖZ.....   | ix        |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Önceki Çalışmalar .....  | 2         |
| <b>2. YARIİLETKENLER.....</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1 Giriş .....  | 7         |
| 2.2 Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması.....  | 9         |
| 2.2.1 Saf Yarıiletkenler .....   | 9         |
| 2.2.2 Katkılı Yarıiletkenler .....   | 10        |
| 2.3 Yarıiletkenlerde Taşıyıcı Yoğunluğu .....  | 10        |
| 2.4 Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik .....  | 12        |
| 2.5 Yarıiletkenlerde Hall Etkisi Olayı.....  | 15        |
| 2.6 Yarıiletkenlerde İletim Mekanizmaları .....  | 17        |
| 2.6.1 Amorf Yarıiletkenlerde İletim Mekanizması.....   | 17        |
| 2.6.2 Polikristal Yarıiletkenlerde İletim Mekanizması.....   | 18        |
| 2.6.2.1 Termoiyonik Emisyon.....   | 18        |
| 2.6.2.2 Tünelleme İletim Mekanizması.....  | 19        |
| 2.6.2.3 Sıçrama İletim Mekanizması.....  | 19        |
| 2.7 Yarıiletkenlerde Optik Soğurma.....  | 20        |
| 2.8 Fotoiletkenlik ve Rekombinasyon Mekanizması .....  | 24        |
| 2.9 Yapısal Analiz .....   | 26        |
| 2.9.1 X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi .....   | 26        |
| 2.9.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi .....   | 27        |
| 2.9.3 Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) Analizi .....  | 28        |
| <b>3. DENEYSEL YÖNTEM .....</b>  | <b>30</b> |
| 3.1 Yarıiletkenlerde İnce Film Büyütme İşleme .....  | 30        |
| 3.1.1 Termal Buharlaştırma Yöntemi .....   | 30        |
| 3.1.2 CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> Bileşiğinin Oluşturulması.....                             | 34        |
| 3.1.3 CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> İnce Filminin Elde Edilmesi.....                           | 36        |
| 3.2 Omik Metal Kontakların Elde Edilmesi .....   | 37        |
| 3.3 Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sistemi .....   | 38        |
| 3.4 Fotoiletkenlik Ölçüm Sistemi.....  | 39        |
| 3.5 Hall Etkisi Ölçüm Sistemi .....  | 39        |
| 3.6 Soğurma Ölçüm Sistemi.....   | 43        |
| <b>4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>   | <b>45</b> |
| 4.1 CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> İnce Filmlerinin Yapı Analizi.....                           | 45        |
| 4.1.1 CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> İnce Filmlerinin SEM ve EDS Analizi.....                   | 45        |
| 4.1.2 CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> İnce Filmlerinin XRD Analizi .....                         | 48        |
| 4.2 CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> İnce Filmlerinin Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi..... | 50        |
| 4.2.1 Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sonuçları.....  | 50        |



|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.2     | Hall Etkisi Ölçüm Sonuçları .....  | 54        |
| 4.3       | CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> İnce Filmlerinin Optik Özelliklerinin İncelenmesi..... | 61        |
| 4.3.1     | Optik Soğurma Ölçüm Sonuçları.....   | 61        |
| 4.3.2     | Fotoiletkenlik Ölçüm Sonuçları.....  | 62        |
| <b>5.</b> | <b>SONUÇLAR.....</b>   | <b>66</b> |
| <b>6.</b> | <b>KAYNAKLAR.....</b>  | <b>69</b> |
| <b>7.</b> | <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>  | <b>75</b> |

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

|  |    |
|--|----|
| <b>Şekil 2.1:</b> (a) Yalıtkanlar, (b) yarıiletkenler ve (c) iletkenlerde basitleştirilmiş elektronik enerji bant yapısı ve 0 K sıcaklıktaki fermi enerji seviyeleri. .... | 8  |
| <b>Şekil 2.2:</b> Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu. ....   | 11 |
| <b>Şekil 2.3:</b> Bir yarıiletkende elektrik alanının varlığında elektron ve deşiklerin hareket yönleri. ....  | 14 |
| <b>Şekil 2.4:</b> Hall etkisi olayının şematik diyagramı. ....   | 15 |
| <b>Şekil 2.5:</b> Elektromanyetik radyasyonun x kalınlıklı bir maddeden geçerken soğurulması. ....   | 21 |
| <b>Şekil 2.6:</b> Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu. ....   | 21 |
| <b>Şekil 2.7:</b> Doğrudan bant aralıklı kristallerin bant yapısı. ....  | 22 |
| <b>Şekil 2.8:</b> Dolaylı bant aralıklı kristallerin bant yapısı. ....   | 24 |
| <b>Şekil 2.9:</b> X-ışınlarının kristal tarafından kırınımına uğratılması. ....  | 26 |
| <b>Şekil 2.10:</b> XRD cihazının üstten görünüşü. ....   | 27 |
| <b>Şekil 2.11:</b> SEM cihazının şematik gösterimi. ....   | 28 |
| <b>Şekil 2.12:</b> SEM ve EDS cihazının bir fotoğrafı. ....  | 29 |
| <b>Şekil 2.13:</b> SEM’de gelen elektron demeti ile numunenin etkileşmesi. ....  | 29 |
| <b>Şekil 3.1:</b> Termal buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi. ....  | 30 |
| <b>Şekil 3.2:</b> Termal buharlaştırma sistemi. ....   | 31 |
| <b>Şekil 3.3:</b> Paslanmaz çelik vakum çemberi. ....  | 32 |
| <b>Şekil 3.4:</b> Termal buharlaştırma sisteminin vakum alt birimleri. ....  | 32 |
| <b>Şekil 3.5:</b> Termal buharlaştırma sisteminin elektronik kabin ünitesi. ....   | 33 |
| <b>Şekil 3.6:</b> Kuvartz tüp kapatma işlemi. ....   | 35 |
| <b>Şekil 3.7:</b> Yatay fırın ve kuvartz cam tüp içerisinde sentezlenen numuneler. ....  | 35 |
| <b>Şekil 3.8:</b> Külçe halinde sentezlenen numunenin agat havanda toz haline getirilmesi. ....  | 36 |
| <b>Şekil 3.9:</b> Omik kontak maskesi (a) Şerit, (b) Van der Pauw geometrisi. ....   | 38 |
| <b>Şekil 3.10:</b> Fotoiletkenlik ölçümü için kriyostat içerisine yerleştirilmiş numune ve LED’in fotoğrafı. ....  | 39 |
| <b>Şekil 3.11:</b> Hall ölçümünde kullanılan örnek geometriler. ....   | 40 |
| <b>Şekil 3.12:</b> Van der Pauw tekniği ile Hall voltajı ölçümünün şematik gösterimi. ....   | 41 |
| <b>Şekil 3.13:</b> Van der Pauw tekniği kullanarak direnç ölçümünün şematik gösterimi. ....  | 41 |
| <b>Şekil 3.14:</b> Hall etkisi deney sisteminin şematik gösterimi. ....  | 43 |
| <b>Şekil 3.15:</b> UV/Vis spektrometresinin çalışma şeklini gösteren blok diyagramı. ....  | 44 |
| <b>Şekil 3.16:</b> Soğurma ölçümlerinde kullanılan UV-Vis spektrometresi. ....   | 44 |
| <b>Şekil 4.1:</b> (a) CIS ve (b) CIS-400 (c) CIS-500 ince filmlerine ait SEM görüntüleri. ....   | 47 |
| <b>Şekil 4.2:</b> CIS, CIS-400 ve CIS-500 ince filmlerinin XRD sonuçları. ....   | 49 |
| <b>Şekil 4.3:</b> (a) CIS ve (b) CIS-400 (c) CIS-500 ince filmlerinin iletkenliklerinin sıcaklıkla değişim grafikleri. ....  | 51 |
| <b>Şekil 4.4:</b> (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 ince filmlerinin $\ln(\sigma)-1000/T$ değişim grafikleri. ....   | 53 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Şekil 4.5:</b>  | (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 numunelerine ait mobilite-sıcaklık değişim grafikleri. ....                                    | 55 |
| <b>Şekil 4.6:</b>  | (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 numunelerine ait taşıyıcı yoğunluğu-sıcaklık değişim grafikleri. ....                          | 56 |
| <b>Şekil 4.7:</b>  | (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 numunelerinin LOG( $\mu$ )-LOG( $T$ ) değişim grafikleri. ....                                 | 58 |
| <b>Şekil 4.8:</b>  | (a)CIS, (b)CIS-400 ve (c)CIS-500 ince filminin $\ln\left(\mu T^{\frac{1}{2}}\right) - 1000/T$ değişim grafikleri. ....             | 60 |
| <b>Şekil 4.9:</b>  | (a)CIS, (b)CIS-400 ve (c)CIS-500 ince filmlerinin soğurma katsayısının foton enerjisine göre değişim grafiği. ....                 | 62 |
| <b>Şekil 4.10:</b> | (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 numunelerinin farklı ışık şiddetlerindeki iletkenliklerinin sıcaklıkla değişim grafikleri..... | 63 |
| <b>Şekil 4.11:</b> | (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 numunelerine ait fotoakım-ışık şiddeti değişim grafikleri. ....                                | 65 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| <b>Tablo 2.1:</b> İletken, yarıiletken ve yalıtkanlara ait 300 K sıcaklığındaki elektriksel özdirenç değerleri verilmiştir..... | 7  |
| <b>Tablo 3.1:</b> Üretilen ince filmlerin genel bilgileri. ....   | 37 |
| <b>Tablo 4.1:</b> CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> toz bileşiğine ait EDS ölçüm sonucu. ....                                   | 45 |
| <b>Tablo 4.2:</b> CIS ince filmine ait EDS ölçüm sonucu. ....   | 46 |
| <b>Tablo 4.3:</b> CIS-400 ince filmine ait EDS ölçüm sonucu. ....   | 46 |
| <b>Tablo 4.4:</b> CIS-500 ince filmine ait EDS ölçüm sonucu. ....   | 46 |
| <b>Tablo 4.5:</b> CIS, CIS-400 ve CIS-500 örneklerine ait oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik ve özdirenç değerleri. ....   | 50 |
| <b>Tablo 4.6:</b> CIS, CIS-400 ve CIS-500 ince filmlerinin farklı sıcaklık bölgelerindeki aktivasyon enerjileri. ....           | 52 |
| <b>Tablo 4.7:</b> CIS, CIS-400 ve CIS-500 numuneleri için oda sıcaklığında Hall etkisi ölçüm sonuçları.....                     | 54 |

## SEMBOL LİSTESİ

|            |   |   |
|------------|---|---|
| $E_C$      | : | İletim bandının alt seviyesi                    |
| $E_V$      | : | Değerlik bandının üst seviyesi                  |
| $E_g$      | : | Yasak enerji aralığı enerjisi                   |
| $E_f$      | : | Fermi enerji seviyesi                           |
| $E_D$      | : | Donör seviyesi                                  |
| $E_A$      | : | Akseptör seviyesi                               |
| $\rho$     | : | Özdirenç  |
| $\sigma$   | : | İletkenlik                                      |
| $k_B$      | : | Boltzmann sabiti                                |
| $h$        | : | Planck sabiti                                   |
| $m_h$      | : | Değişin kütlesi                                 |
| $m_e$      | : | Elektronun kütlesi                              |
| $m_h^*$    | : | Değişin etkin kütlesi                           |
| $m_e^*$    | : | Elektronun etkin kütlesi                        |
| $n$        | : | Taşıyıcı yoğunluğu                              |
| $p_0$      | : | Deşik yoğunluğu                                 |
| $n_0$      | : | Elektron yoğunluğu                              |
| $n_i$      | : | Saf yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu         |
| $J$        | : | Akım yoğunluğu                                  |
| $E$        | : | Elektrik alanı                                  |
| $\mu$      | : | Mobilite  |
| $\sigma_i$ | : | Katkısız elektriksel iletkenlik                 |
| $E_a$      | : | İletkenlik için termal aktivasyon enerjisi      |
| $\alpha$   | : | Soğurma katsayısı                               |
| $I_0$      | : | Gelen ışın şiddeti                              |
| $I$        | : | Geçen ışın şiddeti                              |
| $\lambda$  | : | Işığın dalga boyu                               |
| $V_H$      | : | Hall voltajı                                    |
| $R_H$      | : | Hall katsayısı                                  |
| $n_s$      | : | Yüzey taşıyıcı yoğunluğu                        |
| $\phi_b$   | : | Tanecik sınırı bariyer yüksekliği               |
| $I_{ph}$   | : | Fotoakım  |
| $\phi$     | : | Aydınlatma şiddeti                              |
| $f(E)$     | : | Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu                  |
| $T$        | : | Sıcaklık  |
| $E$        | : | Enerji  |
| $N(F)$     | : | İzinli durum yoğunluğu                          |
| $N_C$      | : | İletim bant kenarındaki etkin durum yoğunluğu   |
| $N_V$      | : | Değerlik bant kenarındaki etkin durum yoğunluğu |
| $V$        | : | Taşıyıcı hızı                                   |
| $\mu_n$    | : | Elektron mobilitesi                             |
| $\mu_p$    | : | Deşik mobilitesi                                |

## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın hazırlık sürecinde bana yardımcı olan, bilgi birikim ve tecrübelerinden yararlandığım, emeğini ve hoşgörüsünü gördüğüm saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Orhan KARABULUT'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında yardımlarını benden esirgemeyen ve bilgilerini paylaşan Doç. Dr. Koray YILMAZ, Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN ve Uzm. Süleyman Ş. ÇELİK'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen başta Yunus KAMAÇ, Duygu TAKANOĞLU ve Fatih AŞKIN olmak üzere tüm Yarıiletken Araştırma Grubumuza teşekkür ederim.

Hayatım boyunca benden maddi-manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve değerli eşim Tuğba KAPLAN ÜNAK'a teşekkür ederim.

# 1. GİRİŞ

Katılar, birçok özelliklerinden dolayı günlük yaşantımızda önemli bir yere sahiptir. Özellikle iyi iletken olmaları, kolay şekil alabilmeleri ve fiziksel dayanıklılıklarıyla bilinen metallerin kullanımı uygarlık tarihi kadar eskidir. Katıların en ilginç ve önemli sınıfını oluşturan yarıiletkenler ise ancak 1940'lı yıllarda yarıiletken transistörün ortaya çıkmasıyla önem kazanmıştır. Yarıiletken transistörler elektronik endüstrisinde devrim niteliğinde değişikliklere neden olmuştur.

Günümüzde teknolojik gelişmelerin temel ve belirleyici unsurlarından birini hala yarıiletken teknolojisi oluşturmaktadır. Artık yarıiletkenlerden oluşmuş elektronik malzemeler, insanlığın kullandığı kişisel bilgisayar ve donanımlardan, haberleşme sistemlerine kadar çoğu elektronik aracın içinde bulunmaktadır. Farklı amaçlara hizmet eden (güneş pili, lazer ışık kaynağı, farklı dalga boyu bölgelerinde çalışan algılayıcılar ve elektronik devrelerde kullanılan entegre devreler gibi) yarıiletken malzemeler her geçen gün gelişmektedir (Kırmızıgül 2008).

Teknolojideki gelişmeler ve bilimin ilerlemesi, yeni malzemelerin gelişmesi için itici gücü oluşturmaktadır. Malzemelerde yenilikler ve kesifler, bilim adamlarının yüksek kalitede malzemelerin gelişimine odaklanmasına neden olmaktadır. Güneş pillerinde kullanılan malzemenin ve işçiliğin azaltılması, teknolojinin basitleştirilerek maliyetlerinin düşürülmesi yönünde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, yarıiletken malzemenin geniş yüzeyler üzerine ince film şeklinde kaplanması yöntemi çekici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Mikro elektronik ve optoelektronik endüstrinin temelini oluşturan ince filmler son zamanlarda en çok çalışılan konulardan biri olarak teknolojide önemli bir yer tutmaktadır (Kılınç 2006).

İnce filmler bir altlığın üzerine bireysel atomların depolanması ile üretilen düşük boyutlu malzemeler olarak tanımlanırken, yoğunlaşmamış maddelerin birebir

atom, molekül veya iyon çeşitleri tarafından oluşturulmasıdır. İnce filmlerin kalınlığı genellikle birkaç mikrondan daha azdır. Günümüzde ince film malzemelerindeki ve gereçlerindeki hızlı değişim yeni işlemlerin, malzemelerin ve teknolojilerin gelişimi için yeni fırsatlar yaratmaktadır. Bu yüzden, çeşitli uygulamalardaki ince film performans ve mikro yapısı ile ilgili temel fiziksel ve kimyasal özelliklerin önceden bilinen özelliklerini geliştirmek ve bu alandaki ilerlemeyi artırmak için birçok deney yapılmış ve model sistemleri geliştirilmiştir. Bu model sistemler, çekirdeklenme ve gelişim işlemleri, katı hal reaksiyonları, ince film sistemleri ve faz sınırlarının ısısal ve mekanik durağanlıkları gibi alanların araştırılmasını içerir. Deneysel ve teorik incelemelerin birleştirilmiş sonuçları, yeni ince film sistemlerinin geliştirilmesi ile mikro yapı ve performanslarının şekillendirilmesinde bir önkoşuldur. İnce film depolama işlemleri ile elde edilen enerji dönüşüm uygulamaları önümüzdeki yüzyılda enerji tüketiminde tasarruf ve çevre açısından uygun bir yol olarak kabul edilebilir (Takanoglu 2011).

$A^{II}B^{III}_2X^{VI}_4$  grubuna dahil olan  $CdIn_2Se_4$  ince filmleri çeşitli optoelektronik ve güneş pili uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Özellikle direk geçişli bant aralığına sahip olması ve soğurma katsayısının büyük olması güneş pili uygulamalarında kullanımını cazip hale getirmektedir (Mahalingam ve ark. 2009). Bunun yanı sıra  $CdIn_2Se_4$  ince filmleri, optoelektronik aygıt üretiminde, ışık yayan diyotlarda (LED), devrelerde foto-iletken eleman olarak ve lineer olmayan uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır (Nikale ve ark. 2011).

Bu çalışmada, termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen  $CdIn_2Se_4$  ince filmlerinin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir.

## 1.1 Önceki Çalışmalar

2004 yılında Nikale ve arkadaşları  $CdIn_2Se_4$  ince filmlerini ucuz ve basit bir yöntem olan sprey piroliz yöntemi ile ısıtılmış amorf cam alttaşlar ve flor katkı kalay oksit (FTO) alttaşlar üzerine depolamışlardır. Cd, In ve Se içeren sulu çözelti optimize edilmiş alttaş sıcaklığında kaliteli filmler üretmek için kullanılmıştır.



Element konsantrasyonu, alttaş sıcaklığı gibi hazırlama parametreleri fotoelektrokimyasal ölçüm tekniği için optimize edilmiş ve optimize sıcaklık 280 °C olarak bulunmuştur. Üretilen filmlerin yapısal karakterizasyonu X-Işını kırınımı analizleri (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. XRD analizlerinden optimize edilmiş alttaş sıcaklığında ve diğer sıcaklıklarda üretilen ince filmlerin polikristal yapıda olduğu belirlenmiştir. CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filminin (002) düzleminde daha yüksek şiddette pik verdiği, (111) düzleminde ise CdSe fazının görüldüğü rapor edilmiştir. Örgü sabitin filmlerin kübik yapıda olduğu varsayılarak 5,824 Å olarak bulunmuş ve bu değer tek kristal CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ile uyumlu olduğunu belirlenmiştir. Yapılan SEM ölçümlerinden filmlerin alttaşlar üzerine düzgün kaplandığı ve EDS ile yapılan kompozisyon analizlerinden üretilen ince filmlerin sitokiyometrik olduğu belirtilmiştir. Üretilen malzemelerin özdirenç ve termo-elektrik güç (TEP) karakterizasyonu 300-500 K sıcaklık aralığında iki prob yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerinin sıcaklık artışı ile özdirençlerinin düştüğü ve yarıiletken davranış gösterdiği rapor edilmiştir. Optimize alttaş sıcaklığında üretilen filmlerin en düşük özdirenç değerine sahip olduğu ve bu değer yaklaşık (10<sup>2</sup>–10<sup>3</sup> Ω.cm) aralığında olduğu görülmüştür. Sprey piroliz yöntemi ile üretilen CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerinin elektriksel iletkenlik tipi termo-elektrik güç (TEP) ölçümleri ile belirlenmiş olup malzemelerin n-tipi iletkenlik gösterdiğini gözlenmiştir. Fotovoltaik çıkış karakteristikleri 500 (mW/cm<sup>2</sup>) aydınlatma yoğunluğuna sahip tungsten lamba ile aydınlatma altında gerçekleştirilmiştir. Üretilen hücreye ait doluluk oranı %69 bulurken verimini %3 olarak bulmuşlardır (Nikale ve ark. 2004).

2007 yılında Ahn ve arkadaşları foto duyarlı CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerini oda sıcaklığında (300 K) elektrokimyasal sentez yöntemi ile indiyum kalay oksit kaplı (ITO) alttaşlar üzerine üretmişlerdir. Üretilen ince filmlerin nano kristal yapısı ve 1:2:4 oranındaki Cd, In, Se sitokiyometrisi X-Işını kırınımı ve enerji dağılımlı X-Işını (EDS) analizleri ile belirlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile üretilen numunelerin iki boyutlu görüntülerinden alttaş yüzeyi üzerine CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> taneciklerinin eşit dağılımını net bir şekilde görmüşlerdir. Atomik kuvvet mikroskobu ile yapılan çalışmalarda yaklaşık 400-500 nm civarında düzensiz şekilli

CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> kümelenmeleri tespit edilmiş fakat bu kümelenmelerin içerisinde çok sayıda küresel küçük taneciklerin (~30-40 nm) varlığı da rapor edilmiştir. Nanokristal yapısı nedeniyle CdSe ve In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> ince filmlerine göre nispeten CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> fimlerinin daha yüksek yasak enerji aralığına sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Foto elektro kimyasal ölçümler sonucunda 80 (mW/cm<sup>2</sup>) aydınlatma altında fotovoltaik çevrim verimini %0.42 olarak bulmuşlardır (Ahn ve ark. 2007).

2010 yılında Adpakpang ve arkadaşları CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> tozunu düşük sıcaklıklarda sulu kimyasal indirgeme yöntemi ve çözelti metodu ile üretmişlerdir. Bileşiği oluşturan maddeleri hesaba katarak reaksiyon sıcaklığını 100 ve 130 °C olarak reaksiyon zamanını ise otuz dakika ve altı saat olarak belirleyerek farklı özellikte CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> tozları üreterek yapısal özelliklerini X-Işını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) yöntemleri ile incelemiştir. 100 °C'da farklı reaksiyon zamanlarında üretilen toz numunelerin XRD analizlerinde CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiğinin yanı sıra Se ve In(OH)<sub>3</sub> fazlarına da rastlandığını, reaksiyon sıcaklığının 130 °C olduğu numunelerde ise Se ve In(OH)<sub>3</sub> fazlarının kaybolduğu, sadece CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiğine ait piklerin ortaya çıktığını rapor etmişlerdir. Farklı reaksiyon zamanlarında ve farklı reaksiyon sıcaklıklarında üretilen CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> toz bileşiğinin en saf halinin EDS, SEM ve XRD ölçümleri sonucunda 130 °C' de otuz dakikada üretilen numuneye ait olduğunu bildirmiştir. Son olarak TEM ölçümlerinden numunenin ortalama tanecik boyutunun  $9,17 \pm 0,94$  nm olarak gözlemlenmiştir (Adpakpang, ve ark. 2009).

2010 yılında Mahalingam ve arkadaşları CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerini ITO kaplı alttaşlar üzerine potansiyostatik katodik elektrodepolama yöntemi ile farklı depolama potansiyelleri kullanarak üretmişlerdir. -750 mV ile -1050 mV aralığında değişen farklı depolama potansiyelleri altında ITO kaplı alttaşlar üzerine üretilen CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerinin yapısal özellikleri XRD, SEM ve EDS analizleri ile belirlenmiştir. XRD ölçüm sonuçlarından üretilen filmlerin polikristal yapısının tetragonal olduğu ve örgü sabitlerinin  $a = 5,280$  Å;  $c = 5,8125$  Å olduğunu tespit edilmiştir. -950 mV depolama potansiyeli altında üretilen filmlerin kristal yapısının daha düzenli olduğu ve bu potansiyelin altında ve üstünde filmlerin kristal yapısının

düzeninin azaldığı bildirilmiştir. Ayrıca oluşan piklerin sadece CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> numunesine ait olduğu ve yapıda başka elementlere rastlanmadığı rapor edilmiştir. Yapılan SEM ölçümlerinden ortalama tanecik boyutu 0,29 µm olarak bulunmuştur. Filmlerin kompozisyonu ise enerji dağılım spektrometresi ile ölçülürken -950 mV potansiyel altında üretilen CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> filmlerin sitokiyometrisi 1,04:1,90:4,06 olarak belirlenmiştir. Son olarak farklı potansiyeller altında üretilen filmlerin doğrudan bant aralığına sahip olduğu ve yasak enerji aralığının 1,66 -1,75 eV arasında değiştiği rapor edilmiştir (Mahalingam ve ark. 2010).

2011 yılında Nikale ve arkadaşları CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiğinin foto-elektrokimyasal hücre özelliklerini, akım-voltaj karakteristikleri, fotovoltaj çıkış gücü, kapasitans-voltaj karakteristikleri, açık devre voltajı, kısa devre akımı, doluluk oranı ve verimini ölçerek incelemiştir. CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> foto-elektrokimyasal hücrelerini standart üçlü elektrot konfigürasyonu kullanarak oluşturmuşlardır. Bu uygulamada n tipi CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> foto elektrotu, flor katkılı kalay oksit kaplı (FTO) alttaşlar üzerine aktif foto anot olacak şekilde depolanırken, grafit karşıt elektrot ve doymuş kalomel elektrot ise referans elektrot olarak kullanılmıştır. Yapısal analizlerden üretilen filmlerin kübik yapıda olduğu ve filmlerin sitokiyometrik olduğu rapor edilmiştir. Foto elektrot olarak kullanılan CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> foto-elektrokimyasal hücrelerin bazı fiziksel parametrelerini Gartner modelini kullanarak hesaplamışlardır. Bu hesaplamalar sonucunda üretilen hücrenin, bozunma sabiti 6,41, yasak enerji aralığı (E<sub>g</sub>) 1,88 eV, difüzyon uzunluğu (L<sub>p</sub>) 0,053 µm olarak bulunmuştur. Farklı çözelti derişimde FTO üzerine kaplanan hücrelerin doluluk oranını (FF) 0,37 ve foto-elektrokimyasal hücrenin verimini ise 1,95 olarak bulmuşlardır (Nikale ve ark. 2011).

Yine 2011 yılında Nikale ve arkadaşları n-CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/p-CdTe heteroeklem güneş hücrelerini spre depolama yöntemi ile üreterek, güneş hücresine ait bazı fiziksel parametreleri incelemiştir. Soğurucu tabaka olarak seçilen CdTe flor katkılı kalay oksit alttaşlar (FTO) üzerine 1µm kalınlığında spre yöntemi ile kaplanırken, pencere tabakası olarak seçilen CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiğini soğurucu tabakanın üzerine kalınlığı 0,52 µm olacak şekilde spre piroliz yöntemi ile depolanmıştır. Üretilen güneş hücresinin taşıma mekanizmalarını araştırmak için ileri ve ters yönde

bias uygulanarak akım-voltaj (I-V) karakteristikleri ve kapasitans-voltaj (C-V) ölçümlerini gerçekleştirilirken, heteroeklem güneş hücresine ait, hücre verimi, doluluk oranı, aydınlık ve karanlıkta eklem kalite faktörü gibi fiziksel parametreler hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda üretilen eklem doğrultucu karakteristiğinin klasik p-n diyotlar gibi olduğu belirlenmiştir. Akım gerilim ölçümlerinden bu eklemde ileri yönlü akımın tünellemeye yol açtığı ve bu ileri yönlü akımı da deşik emisyonu sürecinin baskın olduğu taşıyıcı iletim mekanizmasının birçok tünelleme-yakalama emisyonu yolu ile oluştuğu bildirilmiştir. n-CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/p-CdTe heteroeklem güneş hücresinin fotovoltaj çıkış karakteristikleri harici bir bias olmadan ışık altında, değişen akıma karşılık voltaj kaydedilerek ölçülmüş ve doluluk oranı (FF) 0,55, enerji dönüşüm verimi 0,67 olarak bulunurken idealite faktörünü ise 1,82 olarak rapor edilmiştir (Nikale ve ark. 2011).

## 2. YARIİLETKENLER

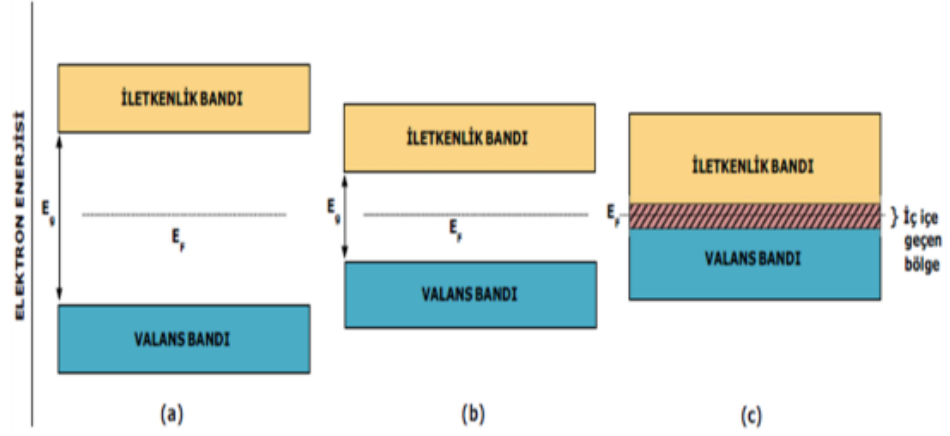
### 2.1 Giriş

Katılar elektriksel özelliklerine göre temel olarak iletken, yarıiletken ve yalıtkan olarak sınıflandırılabilirler (Erol ve ark. 2013). Yarıiletkenler iletkenler ile yalıtkanlar arasında elektriksel iletkenliğe sahip bir malzeme grubudur (Streetman ve ark. 2014). Tablo 2.1’de iletken, yarıiletken ve yalıtkanlara ait 300 K sıcaklığındaki elektriksel özdirenç değerleri verilmiştir (Gündüz 1999).

**Tablo 2.1:** İletken, yarıiletken ve yalıtkanlara ait 300 K sıcaklığındaki elektriksel özdirenç değerleri verilmiştir (Gündüz 1999).

|             | Elektriksel Özdirenç<br>( $\Omega.m$ ) |
|-------------|--|
| İletken     | $10^{-6} - 10^{-4}$                    |
| Yarıiletken | $10^{-4} - 10^{10}$                    |
| Yalıtkan    | $10^{10} -$                            |

Katıları elektriksel özelliklerine göre sınıflamak için enerji bant yapılarını göz önünde bulundurmak daha uygun bir yoldur. İzole bir atomda izinli ayrık enerji seviyeleri bulunurken katılarda bu enerji seviyeleri enerji bantlarına dönüşür ve bu izinli bantlar yasak enerji aralıklarıyla birbirlerinden ayrılırlar. Her katı madde kendisine özgü enerji bant yapısına sahiptir. Enerji bant yapısındaki bu farklılık değişik malzemelerde çok çeşitli elektriksel özelliklerin gözlenmesine neden olur (Streetman ve ark. 2014; Erol ve ark. 2013). Şekil 2.1’de iletken, yalıtkan ve yarıiletkenler için basit bir enerji bant şeması verilmiştir.



**Şekil 2.1:** (a) Yalıtkanlar, (b) yarıiletkenler ve (c) iletkenlerde basitleştirilmiş elektronik enerji bant yapısı ve 0 K sıcaklıktaki fermi enerji seviyeleri (Yacobi 2003).

Enerji bant gösteriminde yaklaşık mutlak sıfır sıcaklığında elektronlarla dolu en üstteki bant değerlik bandı olarak adlandırılır. Değerlik bandından yasak enerji aralığı ile ayrılmış olan bant ise iletkenlik bandı olarak adlandırılır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi metallerde iletkenlik bandı ile değerlik bandı iç içe geçmiş durumdadır. Böylece metallerde elektronlar bir elektrik alanın etkisi altında serbestçe hareket edebilirler. Yarıiletken malzemeler 0 K’de temel olarak yalıtkanlarla aynı bant yapısına sahiptir. Boş bir iletim bandından izinli enerji durumları ihtiva etmeyen bir bant aralığı kadar ayrılmış dolu bir değerlik bandına sahiptir. Yarıiletkenlerin bant aralığı yalıtkanların bant aralığından daha küçüktür. Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı 0 – 3 eV aralığında değişirken yalıtkanların yasak enerji aralığı 3 eV’den daha büyüktür. Yarıiletkenlerin yalıtkanlara göre daha küçük yasak enerji aralığına sahip olması sayesinde termal ya da optik enerji ile uyarılan valans bandındaki bir elektron iletkenlik bandına geçebilir. Yani yarıiletkenlerde iletme katkıda bulunabilecek yük taşıyıcılarının sayısı termal veya optik enerji aracılığıyla önemli bir ölçüde arttırılabilirken yalıtkanlarda bu durum söz konusu değildir (Streetman ve ark. 2014; Cardarelli 2008). Ayrıca yarıiletkenlere yabancı atom katılarak serbest yük taşıyıcı sayısı büyük ölçüde arttırılabilmektedir. Tüm bu özellikleri nedeniyle yarıiletkenlerin elektronik ve optoelektronik alanlarında birçok uygulaması bulunmaktadır. Bu uygulamalardan, diyot, transistör, güneş gözeleri gibi entegre devreler elektronik alanda kullanılan vazgeçilmez unsurlardır (Yacobi 2003; Sze 1985; Orton 2004).

Yarıiletken malzemeler elementel halde (silisyum, germanyum v.b.) bulunabilecekleri gibi galyum arsenik (GaAs), indiyum fosfat (InP) gibi bileşik halde de bulunabilirler (Brennan 2005).

## **2.2 Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması**

Yarıiletkenler hem elektron hem de hollerin elektrik iletimine katkı sağladığı ve yasak enerji aralığı 0 ile 3 eV arasında olan amorf ya da polikristal malzemelerdir. İletkenler ile yarıiletkenler arasındaki en önemli fark sıcaklık artışıyla iletkenlerin elektriksel iletkenlikleri azalırken, yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliklerinin sıcaklıkla eksponansiyel olarak artmasıdır. Elektriksel iletkenliklerinin sıcaklıkla eksponansiyel olarak artmasının yanında yarıiletkenlerin önemli özelliklerinden biride belli bir sıcaklıktaki elektriksel iletkenliklerini katkılama yaparak arttırmanın mümkün olmasıdır (Cardarelli 2008). Bu anlamda yarıiletkenleri katkılı yarıiletkenler ve saf (katkısız, özgül) yarıiletkenler olarak gruplandırmak mümkündür.

### **2.2.1 Saf Yarıiletkenler**

Safsızlıklar veya örgü kusurları ihtiva etmeyen mükemmel bir yarıiletken saf yarıiletken olarak adlandırılır. Bu tür yarıiletkenlerde 0 K'de serbest yük taşıyıcı yoktur. Değerlik bandı elektronlarla dolu ve iletim bandı tamamen boştur. 0 K'in üzerindeki sıcaklıklarda değerlik bandı elektronları termal enerjiyle uyarılarak iletim bandına geçerler. İletim bandına geçen elektron değerlik bandında bir deşik oluşmasına sebep olur. Böylece bir elektron-deşik çifti oluşturulur. İletim bandında serbest elektronlar elektriksel iletime katkı sağlarken değerlik bandında deşikler iletkenliğe katkı sağlarlar. Saf yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu ile deşik yoğunluğu birbirine eşittir (Streetman ve ark. 2014).

### 2.2.2 Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletkenlere safsızlık atomları (yabancı atomlar) katarak yarıiletkende yük taşıyıcıları oluşturmak mümkündür. Katkılama olarak adlandırılan bu işlem yarıiletkenlerin iletkenliğini değiştirmede kullanılan en yaygın yöntemdir. Katkılama işlemi vasıtasıyla yarıiletken malzemedeki elektronlar ya da deşikler sayıca üstün olacak şekilde değiştirilebilirler. Böylece elektronların çoğunlukta olduğu n-tipi veya deşiklerin çoğunlukta olduğu p-tipi katkılı yarıiletkenler oluşturulabilir. Bu tür yarıiletkenlere katkılı (extrinsic) yarıiletkenler denir (Streetman ve ark. 2014; Orton 2004).

Son yörüngesinde dört değerlik elektronu bulunan bir yarıiletkene son yörüngesinde beş değerlik atomu bulunan bir atom katkılanarak n-tipi yarıiletken oluşturulur. Bu şekilde örgüdeki elektron yoğunluğu arttırılır. Katkılanan bu atomlara verici (donör) atomları denir. Elektriksel iletme büyük oranda katkıyı elektronlar sağlarken, deşiklerin iletme katkısı çok azdır. Bundan dolayı n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcılar elektronlar, azınlık taşıyıcılar deşiklerdir (İlgaz 2005; Jenniches 2001; Razeghi 2009).

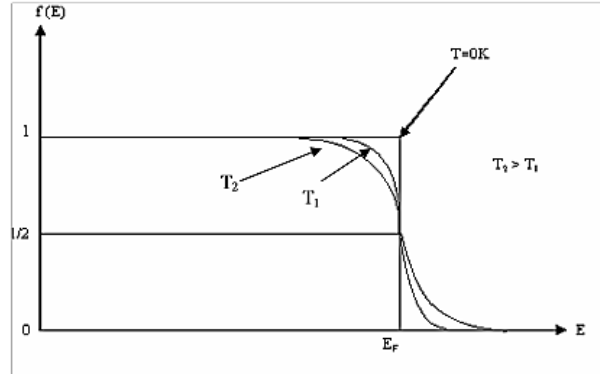
### 2.3 Yarıiletkenlerde Taşıyıcı Yoğunluğu

Yarıiletkenlerin elektronik özellikleri sahip oldukları taşıyıcı sayısı ile ilgilidir. Bu nedenle taşıyıcı yoğunluğu yarıiletkenler için önemli bir özelliktir. Bir elektronun  $E$  enerjili bir durumda bulunma olasılığı Denklem 2.1'de verilen  $f(E)$  Fermi-Dirac fonksiyonu ile verilir (Jenniches 2001).

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-E_f}{k_B T}\right)} \quad (2.1)$$

Burada  $E_f$  fermi enerjisi ve  $k_B$  botzman sabiti ve  $T$  sıcaklıktır. Şekil 2.2'de Fermi-Dirac fonksiyonunun  $E$  enerjisi ile değişim eğrisi verilmiştir.





**Şekil 2.2:** Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu (Streetman 1980).

İletim bandındaki elektronların ve değerlik bandındaki boşlukların yoğunluklarının hesaplanabilmesi için değerlik ve iletim bantlarındaki durum yoğunluğu fonksiyonundan yararlanılabilir. İletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu olan  $n_0$ ;

$$n_0 = \int_{E_c}^{\infty} f(E)N(E)dE \quad (2.2)$$

ile verilir. Burada  $N(E)dE$ ,  $dE$  enerji aralığındaki birim hacim başındaki durum yoğunluğu ve  $E_c$  iletim bandının alt seviyesidir.  $E - E_f \gg k_B T$  olması durumunda Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu, Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonuna indirgenebilir. Bu durumda Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu;

$$f(E) = e^{-\frac{E-E_f}{k_B T}} \quad (2.3)$$

biçiminde yazılır (Streetman ve ark. 2014; Erol ve ark. 2013; Kittel 1996).  $f(E)N(E)$  çarpımı  $E_c$ 'nin yukarısında hızlı bir şekilde azalır. Bundan dolayı iletkenlik bant kenarının çok üzerindeki enerji durumlarının az sayıda elektron işgal eder. Bu nedenle Denklem (2.2) ile verilen integral daha basit bir şekilde;

$$n_0 = N_C f(E_C) \quad (2.4)$$

olarak yazılabilir. Burada  $N_C$  iletim bant kenarındaki etkin durum yoğunluğudur ve iletkenlik bandının kenarında yerleşik kabul edilen izinli durumları temsil eder. İletkenlik bant kenarındaki etkin durum yoğunluğu;

$$N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.5)$$

ile verilir. Benzer şekilde değerlik bant kenarındaki etkin durum yoğunluğu olan  $N_V$  ise,

$$N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_p^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.6)$$

denklemleri ile verilir. Burada  $h$  Planck sabiti,  $m_p^*$  ve  $m_n^*$  sırasıyla deşiklerin ve elektronların etkin kütesidir. Denklem (2.4)'ü kullanarak iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu;

$$n_0 = N_C e^{-(E_C - E_f)/k_B T} \quad (2.7)$$

olarak ifade edilebilir. Benzer şekilde değerlik bandındaki deşik yoğunluğu;

$$p_0 = N_V e^{-(E_f - E_v)/k_B T} \quad (2.8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $E_v$  değerlik bandının üst seviyesi ve  $p_0$  değerlik bandındaki deşik yoğunluğudur. Denklem (2.7) ve (2.8)'de verilen taşıyıcı yoğunluğu ifadeleri termal dengede olan saf ve katkılı yarıiletkenler için geçerlidir (Jenniches 2001; Streetman ve ark. 2014).

## 2.4 Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik

Bir malzeme üzerine elektrik alan uygulandığında malzemenin yapısında bulunan serbest yük taşıyıcılarına elektriksel kuvvet etki eder. Elektriksel kuvvet etkisi altındaki serbest yük taşıyıcıları hız kazanırlar. Hareket eden bu taşıyıcıların oluşturduğu akım yoğunluğu;

$$J = nqv \quad (2.9)$$

ile verilir. Burada  $J$  akım yoğunluğu,  $q$  serbest taşıyıcı yükü,  $n$  taşıyıcı yoğunluğu ve  $v$  taşıyıcı hızıdır. Malzemeye uygulanan elektrik alanın şiddeti ile serbest yük taşıyıcılarının hızları birbirleri ile orantılıdır. Bu orantı;

$$v = \mu E \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $E$  malzemeye uygulanan elektrik alan şiddeti ve  $\mu$  taşıyıcıların mobilitesidir. Mobilite, birim elektrik alan başına taşıyıcı hızı ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ ) olarak tanımlanır ve taşıyıcıların uygulanan elektrik alan altında ne kolay hareket edebildiğinin bir ölçüsüdür. Denklem (2.10) ile verilen hız ifadesi Denklem (2.9)'da kullanılarak akım yoğunluğu için;

$$J = nq\mu E \quad (2.11)$$

ifadesi elde edilir. Ohm yasası;

$$J = \sigma E \quad (2.12)$$

şeklindedir ve malzemeye uygulanan elektrik alan ile oluşan akım yoğunluğunun orantılı olduğunu ifade eder. Burada ki orantı sabiti  $\sigma$  malzemenin iletkenliği olarak tanımlanır. Denklem (2.11) ile Denklem (2.12) karşılaştırılarak

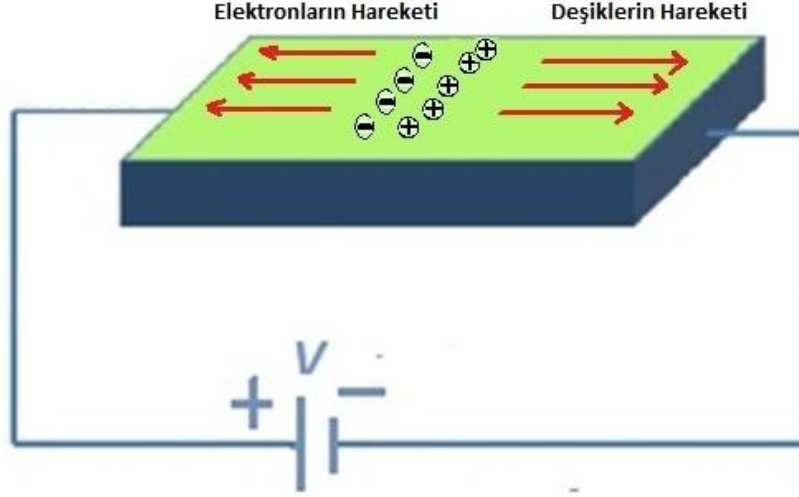
$$\sigma = nq\mu \quad (2.13)$$

olduğu görülebilir. İletkenlik uygulanan elektrik alan şiddetinden bağımsız malzemeye özgü bir büyüklüktür ve özdirenç ile

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.14)$$

şeklinde ilişkilidir. Burada  $\rho$  malzemenin özdirencidir (Erol ve ark. 2013; Ohring 1992).

Yarıiletkenlerde elektrik akımı elektron ve deşikler tarafından oluşturulur. Elektronlar yarıiletken üzerine uygulanan dış elektrik alana zıt yönde hareket ederken değerlik bandındaki pozitif yüklü deşikler elektrik alan ile aynı yönde hareket ederek akım oluşturur. Bu durum şematik olarak Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.3:** Bir yarıiletkende elektrik alanının varlığında elektron ve deşiklerin hareket yönleri.

Malzeme içerisinde oluşan toplam akım yoğunluğu her iki tür taşıyıcının oluşturduğu akım yoğunlukları toplamına eşittir ve

$$J = J_n + J_p = E(qn_0\mu_n + qp_0\mu_p) \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $J_n$  elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu,  $J_p$  deşiklerin oluşturduğu akım yoğunluğu,  $\mu_n$  elektron mobilitesi ve  $\mu_p$  deşik mobilitesidir. Bir yarıiletkenin iletkenliği;

$$\sigma = (qn_0\mu_n + qp_0\mu_p) \quad (2.16)$$

ile verilir. Denklem (2.7) ile Denklem (2.16) kullanılarak;

$$\sigma = q\mu_n N_C e^{-(E_C - E_f)/k_B T} \quad (2.17)$$

şeklinde iletkenliğin sıcaklığa bağlılığı elde edilebilir. Bu ifade daha sade bir şekilde;

$$\sigma = \sigma_0 e^{-(E_C - E_f)/k_B T} \quad (2.18)$$

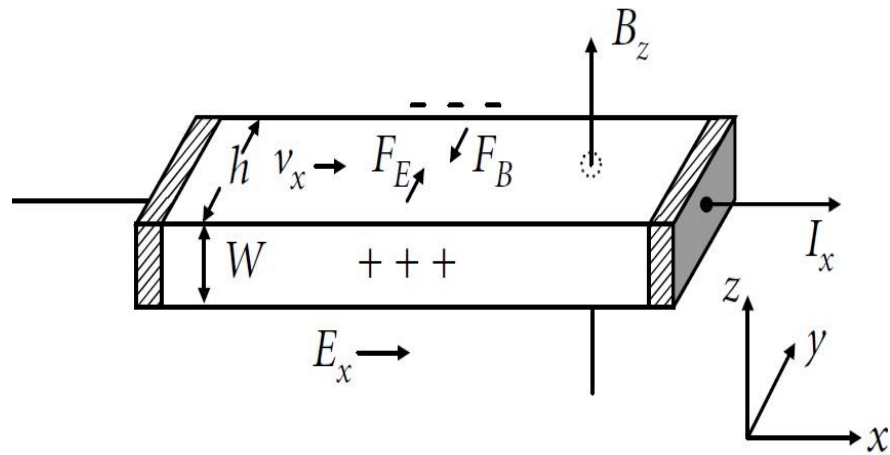
olarak yazılabilir. Burada  $\sigma_0$  sabittir (Ohring, 1992; Sze, 1985; Ishii ve ark., 1986).

Yarıiletkendeki aktivasyon enerjilerinin hesaplanmasında iletkenliğin sıcaklıkla değişimi kullanılabilir.  $\ln(\sigma)$  'nın  $1/T$  'ye karşı grafiğinin eğimi

aktivasyon enerjisinin hesaplanmasında kullanılır. Hesaplanan bu aktivasyon enerjisi yarıiletkendeki taşıyıcıların değerlik bandından iletkenlik bandına geçişlerine, değerlik bandından yasak enerji aralığında bulunan ara seviyelere ya da bu ara seviyelerden iletkenlik bandına geçişlere karşılık gelebilir (Bube 1960).

## 2.5 Yarıiletkenlerde Hall Etkisi Olayı

Hall etkisi, 1879 yılında E. H. Hall tarafından, akım taşıyan bir iletken üzerine etkiyen kuvvetleri araştırırken keşfedilmiştir. Üzerinden akım geçen bir yarıiletken numuneye akıma dik doğrultuda bir manyetik alan uygulandığında yük taşıyıcıları üzerine manyetik kuvvet etki eder ve taşıyıcıların malzemenin bir tarafında toplanmasına sebep olur. Bunun sonucunda yeni bir iç elektrik alan ve potansiyel fark oluşur. Bu potansiyel fark Hall voltajı olarak adlandırılır. Bu olaya ise Hall etkisi olayı denmektedir. Şekil 2.4'deki gibi dikdörtgenler prizması şeklinde olan p-tipi bir yarıiletkeni göz önünde bulunduralım. Yarıiletken numuneden  $E_x$  elektrik alanı etkisiyle x doğrultusunda yoğunluğu  $J_x$  olan bir akım geçtiğini ve bu akıma dik doğrultuda düzgün bir  $B_z$  manyetik alan uygulandığını göz önünde bulunduralım (Kamaç 2013).



Şekil 2 4: Hall etkisi olayının şematik diyagramı (Orton 2004).

Pozitif yük taşıyıcılarının üzerine manyetik alandan dolayı etkiyen Lorentz kuvveti;

$$F_B = -eB_z v_x \quad (2.19)$$

şeklindedir. Burada  $v_x$  yük taşıyıcılarının hızı,  $e$  birim yük ve  $F_B$  Lorentz kuvvetidir. Lorentz kuvveti deşiklerin  $-y$  yönünde hareket etmelerine neden olur. Bu hareket yarıiletkenin karşılıklı kenarları arasında bir  $E_y$  elektrik alanı oluşmasını sağlar. Oluşan bu  $E_y$  elektrik alanına Hall alanı denir. Bir süre sonra Lorentz kuvveti ile  $E_y$  den dolayı oluşan kuvveti dengelenir ve

$$eB_z v_x = eE_y \quad (2.20)$$

yazılabilir. Yarıiletkenin iki yan yüzünde oluşan Hall voltajı ( $V_H$ );

$$V_H = hE_y \quad (2.21)$$

şeklindedir. Burada  $h$  yarıiletken malzemenin genişliğidir. Hall alanı  $E_y$  ile manyetik alan  $B_z$  nin orantılı olduğu Denklem (2.20)'den görülmektedir. Dolayısıyla Hall alanı ile  $J_x$  akım yoğunluğu da orantılıdır ve;

$$E_y = R_H J_x B_z \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $R_H$  orantı sabiti Hall sabiti olarak adlandırılır.  $X$  yönündeki akım yoğunluğu;

$$J_x = ep_0 v_x \quad (2.23)$$

şeklindedir. Denklem (2.19), Denklem (2.20) ve Denklem (2.23) kullanılarak;

$$R_H = \frac{E_y}{B_z J_x} = \frac{v_x}{J_x} = \frac{1}{ep_0} \quad (2.24)$$

Yazılabilir. Bu bağıntı  $R_H$  ile  $p_0$  arasında bir ilişki kurmaktadır.  $R_H$  değerinin ölçülmesi ile  $p_0$  deşik yoğunluğu hesaplanabilir. N-tipi bir yarıiletken için  $R_H$  değeri;

$$R_H = -\frac{1}{en_0} \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir. Hall katsayısının işareti yarıiletkenin tipini yani elektrik iletiminin ne tür taşıyıcı tarafından (baskın olarak) sağlandığını belirler. Hall katsayısı;

$$R_H = \frac{E_y}{B_z J_x} = \left( \frac{V_H}{h} \right) \left( \frac{W h}{B_z I_x} \right) = \frac{V_H W}{B_z I_x} \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $W$  yarıiletken çubuğun kalınlığı ve  $I_x$  yarıiletken içerisinde geçen akımdır. Yarıiletkene ait taşıyıcı mobilitesi ise;

$$\mu_P = \frac{\sigma_P}{e p_0} = \sigma_P R_H \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $\sigma_P$  yarıiletkenin yüzey özdirenç değeridir (Orton 2004).

## 2.6 Yarıiletkenlerde İletim Mekanizmaları

### 2.6.1 Amorf Yarıiletkenlerde İletim Mekanizması

Amorf yapıdaki malzemelerde görülebilen farklı elektriksel iletim mekanizmaları vardır (Campbell 2012). Amorf yarıiletkenlerin elektriksel iletim mekanizmasını açıklayabilmek için en çok bilinen ve uygulanan modellerden birini Mott geliştirmiştir (Dari 2010). Düşük sıcaklıklarda yarıiletkenlerin iletim bandındaki taşıyıcı sayısı çok azdır. Bu durumda, yasak enerji aralığında bulunan lokalize durumlar arasında gerçekleşen sıçrama (hopping) iletim mekanizması baskın hale gelebilir. Sıçrama (hopping) lokalize durumlarda bulunan elektronların bir lokalize durumdan diğerine kuantum mekaniksel olarak geçişini (sıçrayışını) ifade eder (Singh ve ark. 2003.; Dari 2010). Lokalize durumlar, amorf malzemelerdeki yapısal düzensizlikler sonucu potansiyelde oluşan uzamsal sapmalardan kaynaklanmaktadır (Yazıcı 2007; Kittel 1986; Kaplan 1993). Elektronlar farklı mesafelere sıçrayabildiği için bu mekanizma değişken erimli sıçrama iletim mekanizması (Variable Range Hopping Mechanism) olarak adlandırılır (Singh ve ark. 2003; Uzun 2012). Bu iletim mekanizmasının baskın olması durumunda yarıiletkenin elektriksel iletkenliği

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left( - \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.28)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $T_0$  ve  $\sigma_0$  birer sabittir. Değişken erimli sıçrama iletim mekanizmasının baskın olup olmadığını belirlemek için  $\ln(\sigma) - T^{-1/4}$  grafiği çizilir. Bu grafikte lineer bir uyum varsa değişken erimli sıçrama iletim mekanizmasının baskın olduğu söylenebilir (Singh ve ark. 2003; Dari 2010).

Daha yüksek sıcaklıklarda ise amorf yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik mobilite kenarı  $E_C$  ve  $E_V$  civarında meydana gelir. Bu durumda iletkenlik,

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.29)$$

şeklinde verilir (Bostancı 2006; Brodsky 1985).

## 2.6.2 Polikristal Yarıiletkenlerde İletim Mekanizması

Polikristal yapıdaki yarıiletken maddelerde farklı sıcaklık bölgelerinde baskın olan üç temel elektriksel iletim mekanizması vardır. Bunlar; düşük sıcaklıklarda baskın olan sıçrama (hopping) iletim mekanizması, orta sıcaklık bölgelerinde baskın olan tünelleme ve yüksek sıcaklıklarda baskın olan termoiyonik emisyon iletim mekanizmalarıdır (Çolakoğlu 2009; Huş 2006).

### 2.6.2.1 Termoiyonik Emisyon

Polikristal yarıiletkenlerde bulunan tanecik (grain) sınırları birer potansiyel bariyeri gibi davranırlar. Yüksek sıcaklıklarda yeteri termal enerji kazanan serbest elektronlar bu bariyerleri aşarak diğer moleküle geçebilirler (Uzun 2012; Çolakoğlu 2009; Huş 2006). Bu iletim mekanizmasını açıklayabilmek için farklı modeller ileri sürülmüştür. Bunlar arasında Seto tarafından öne sürülen “Tanecik Sınırı Tuzaklama Modeli” deneysel verilerle en uyumlu olan modeldir (Çolakoğlu 2009). Buna modele göre elektriksel iletkenlik;

$$\sigma = q^2 n L (2m^* kT)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right) \quad (2.30)$$

ve taşıyıcı mobilitesi;



$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{q\varphi_b}{kT}\right) = qL(2\pi m^* kT)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{q\varphi_b}{kT}\right) \quad (2.31)$$

ile verilir (Kojima ve ark. 1988; Uzun 2012; Çolakoğlu 2009). Burada  $E_B$  engel enerjisi,  $\varphi_b$  potansiyel bariyer yüksekliği,  $L$  tanecik büyüklüğü ve  $q$  taşıyıcı yüküdür.

### 2.6.2.2 Tünelleme İletim Mekanizması

Termoionik emisyon polikristal yarıiletkenlerdeki birçok elektriksel özelliği açıklamasına rağmen düşük sıcaklıklarda görülen doyum eğilimini açıklamak için yeterli değildir. İlk kez Eley tarafından öne sürülen tünelleme mekanizması kuantum mekaniksel bir süreçtir (Uzun 2012). Bu iletim mekanizmasında, yük taşıyıcıları tanecik sınırında oluşan yüksek fakat dar potansiyel bariyerlerinden kuantum mekaniksel tünelleme yoluyla geçer. Taşıyıcıların tanecik sınırlarında kuantum mekaniksel tünelleme ile geçmesi bir polikristal ince filmin özdirencini sınırlayan mekanizmalardan birisidir (Huş 2006; Uzun 2012). Tünelleme iletim mekanizması ile oluşan iletkenlik;

$$\sigma_{tun} = \left[ Lq^2 \left( \frac{\sqrt{2m^* E_B}}{h^2 l_2} \right) \right] \exp(-4\pi l_2 \sqrt{2m^* E_B}/h) \quad (2.32)$$

şeklindedir (Kojima ve ark. 1988). Burada;  $l_2$  tanecik sınırındaki tüketim bölgesinin genişliği ve  $m^*$  etkin kütleyle ifade eder.

### 2.6.2.3 Sıçrama İletim Mekanizması

Polikristal yarıiletkenlerde oda sıcaklığının çok altındaki sıcaklıklarda iletim bandındaki taşıyıcı yoğunluğu elektriksel iletimi sağlayabilecek büyüklükte değildir. Termoionik emisyon ve tünelleme iletim mekanizmalarının etkin olmadığı ya da çok az etkin olduğu bu sıcaklık bölgesinde sıçrama (hopping) iletim mekanizması baskındır (Huş 2006). Yük taşıyıcıları yasak enerji aralığında dağılmış olan lokalize seviyeler arasında sıçrıyormuş gibi seri tünelleme geçişi yaparlar. Yük taşıyıcılarının bu hareketi elektriksel iletkenliğe belirgin bir katkı sağlar ve düşük sıcaklıklarda baskın olan sıçrama iletim mekanizmasını oluşturur. Bu iletim mekanizması için

Mott ve Davis başarılı bir model geliştirmiştir (Kamaç 2013; Huş 2006). Mott (Mott 1968) tarafından değişken erimli sıçrama mekanizması için hesaplanan iletkenlik ifadesi;

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{T_0} \exp \left[ - \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \quad (2.33)$$

şeklindedir. Burada  $\lambda$  boyutsuz bir sabit olmak üzere;

$$\sigma_0 = 3q^2 \vartheta_{ph} \left( \frac{N(E_f)}{8\pi\alpha k} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

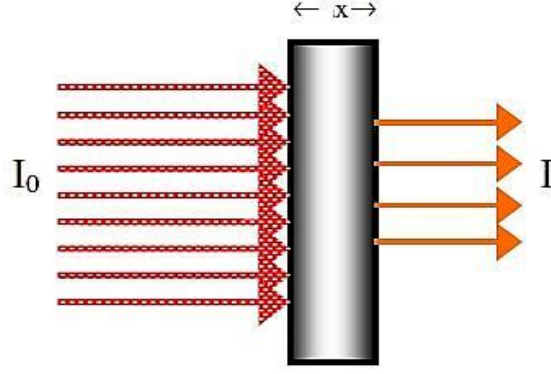
ve

$$T_0 = \frac{\lambda\alpha^3}{kN(E_f)} \quad (2.35)$$

dir (Huş 2006; Kamaç 2013).

## 2.7 Yarıiletkenlerde Optik Soğurma

Bir malzeme üzerine elektromanyetik dalga (foton) gönderildiğinde soğurma, kırılma, yansıma, saçılma gibi olaylar meydana gelebilir (Gölcür 2012). Malzemenin üzerine düşen elektromanyetik dalgalar ile malzeme içerisindeki yük taşıyıcılarının etkileşmesi sonucu oluşan enerji kaybına soğurma denir (Akaltun 2006; Ilıcan ve ark. 2005).

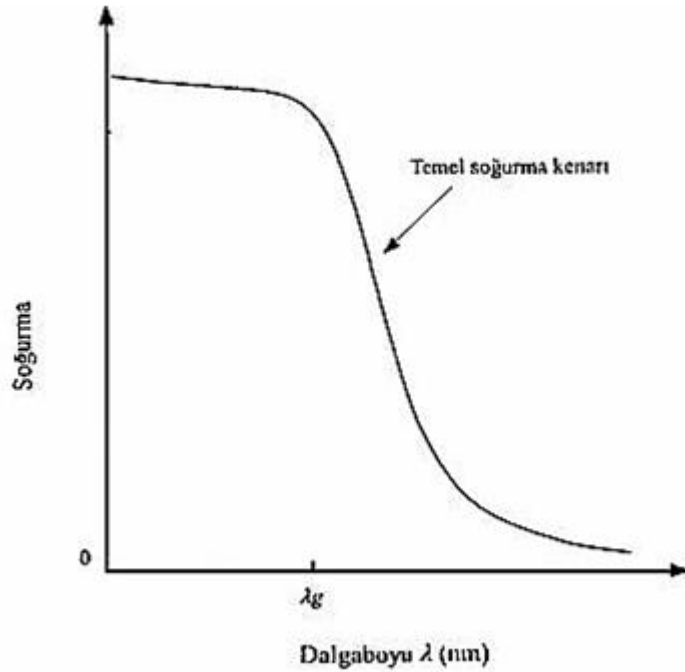


**Şekil 2.5:** Elektromanyetik radyasyonun  $x$  kalınlıklı bir maddeden geçerken soğrulması (Çelik 2006).

$X$  kalınlığına sahip olan bir malzemenin üzerine şiddeti  $I_0$  olan ışın gönderildiğinde, bu ışın  $I$  şiddeti ile numuneyi geçecektir. Numune üzerine düşen ışın şiddeti  $I_0$  ile numuneyi geçen ışın şiddeti  $I$  arasındaki bağıntı;

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.36)$$

şeklindedir. Burada  $\alpha$  lineer soğurma katsayısı olarak adlandırılır. Bu katsayı foton dalga boyu ve malzemenin cinsiyle değişmektedir. Şekil 2.6'da  $\alpha$  soğurma katsayısının dalga boyuna bağlı tipik bir grafiği verilmiştir (Bube 1960; Streetman ve ark. 2014).

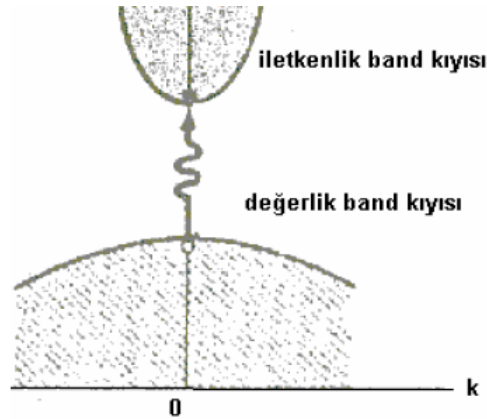


**Şekil 2.6:** Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu (Akaltun 2006; Bube 1960).

Soğurma sürecinde bir foton bir elektronu daha yüksek bir enerji seviyesine uyarır. Yarıiletkenlerde bant yapısına bağlı olarak soğurma olayı farklı şekillerde gerçekleşebilmektedir. Bunlar temel soğurma, eksiton soğurması, serbest yük taşıyıcılarının soğurması, safsızlık atomlarının soğurması şeklinde olabilmektedir. Yarıiletken malzemelerin bant yapılarını belirlemek için kullanılan yöntemlerden biriside temel soğurma metodudur. Temel soğurma olayında numune üzerine düşen fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit yada yasak enerji aralığından daha büyük ise bu foton değerlik bandındaki bir elektronu uyararak iletim bandına geçmesine neden olabilir. İletim bandına geçen elektron geride bir deşik bırakır. Temel soğurma, soğurma spektrumunda hızlı bir artış şeklinde gözlenmektedir (Akaltun 2006; Bube 1960).

Yarıiletkenler direk ve indirek olmak üzere iki tür bant yapısına sahiptirler. Bu nedenle optik soğurma olayı sırasında yük taşıyıcıları değerlik bandından iletkenlik bandına iki farklı şekilde geçebilirler.

Enerji-momentum uzayında iletkenlik bandının minimumu ile değerlik bandının maksimumu aynı dalga vektörü değerine sahip olan yarıiletkenler direk bant yapılı yarıiletkenler olarak adlandırılırlar ve bu durumda bir elektronun değerlik bandından iletkenlik bandına geçmesine direk bant geçişi denir (Erol ve ark. 2013; Colinge ve ark. 2005). Şekil 2.7’de direk bant aralıklı bir yarıiletkenin şematik enerji bant yapısı gösterilmiştir.



**Şekil 2.7:** Doğrudan bant aralıklı kristallerin bant yapısı (Kittel 1996).

Direk geçişlerde soğurma katsayısının gelen fotonun enerjisine bağımlılığı;

$$\alpha(h\nu) = A^*(h\nu - E_g)^n \quad (2.37)$$

şeklindedir. Burada  $E_g$  yasak enerji aralığı ve  $A^*$  değeri;

$$A^* \approx \frac{q^2 \left( 2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{\frac{3}{2}}}{nch^2 m_e^*} \quad (2.38)$$

$n$  değeri direk izinli geçişler için 1/2, izinsiz direk geçişler için 3/2 değerini alan bir sabittir (Ilıcan ve ark. 2005; Pankove 1971).

Bir yarıiletkenin değerlik bandının maksimumu ile iletim bandının minimumu enerji-momentum uzayında aynı  $k$  dalga vektörü üzerinde değilse bu tür geçişlere indirek bant geçişleri denmektedir. İndirek geçişlerde enerji korunur. Ancak momentumun korunması için sürece bir fononun katılması gerekir. Şekil 2.8'de indirek bant aralıklı kristallerin şematik bant yapısı gösterilmiştir. Fonon soğurmalı geçiş için soğurma katsayısı;

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^n}{(e^{\frac{E_p}{k_B T}} - 1)} \quad (2.39)$$

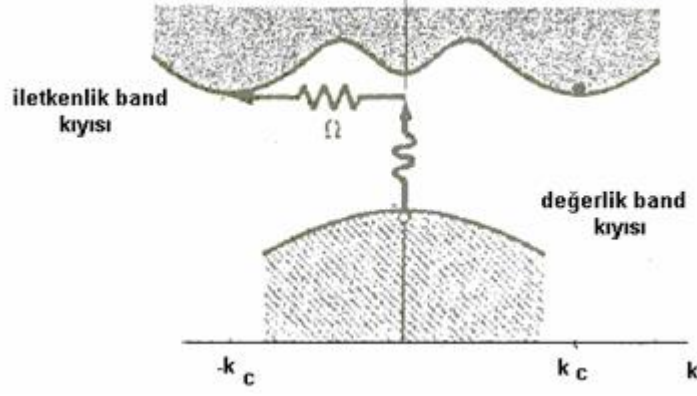
ve fonon salınımlı geçiş için soğurma katsayısı;

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^n}{1 - e^{-\frac{E_p}{k_B T}}} \quad (2.40)$$

şeklindedir. Hem fonon salınımı hem de fonon soğurulması olması durumunda soğurma katsayısı;

$$\alpha(h\nu) = \alpha_a(h\nu) + \alpha_e(h\nu) \quad (2.41)$$

şeklinde verilir (Pankove 1971).



Şekil 2.8: Dolaylı bant aralıklı kristallerin bant yapısı (Kittel 1996).

## 2.8 Fotoiletkenlik ve Rekombinasyon Mekanizması

Fotoiletkenlik, foton soğrulması ile serbest yük taşıyıcılarının sayısındaki artış sonucu elektriksel iletkenlikteki değişme olarak tanımlanabilir (Çolakoğlu 2009). Fotoiletkenlik; yarıiletken madde üzerine düşen ışığın şiddetine, yük taşıyıcılarının yaşam sürelerine, optik bant aralığına ve yasak enerji aralığında bulunan tuzak seviyelerinin yoğunluğuna bağlıdır ve

$$\Delta\sigma_{ph} = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) \quad (2.42)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\mu_n$  ve  $\mu_p$  sırasıyla elektronların ve deşiklerin mobiliteleri,  $\Delta n$  ve  $\Delta p$  sırasıyla elektron ve deşik yoğunluğundaki değişimdir (Gündem 2001; Şahin 1999). Rekombinasyon (yeniden birleşme) olayı genellikle lokalize durumlar olan kusur seviyeleri üzerinde gerçekleşir. Eğer bu seviyedeki bir taşıyıcının zıt işaretli bir taşıyıcı ile yeniden birleşme olasılığı, banda geri dönme olasılığından daha büyük ise bu seviyelere rekombinasyon merkezi denir. Ters durum için, yani serbest kalma olasılığı zıt işaretli bir taşıyıcı ile yeniden birleşme olasılığından daha büyükse bu seviyeler tuzak (trap) seviyeleri olarak adlandırılır (Bube 1960).

Termal dengede, elektriksel iletkenliğe katkıda bulunan fazlalık taşıyıcı sayısı;

$$\Delta n = G\tau_n \text{ ve } \Delta p = G\tau_p \quad (2.43)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $G$  taşıyıcı üretim hızıdır ve birim zamanda birim hacimde üretilen taşıyıcı (elektron ve deşiklerin) miktarını gösterir.  $\tau_n$  ve  $\tau_p$  sırasıyla elektron ve deşiklerin yaşam süreleridir. Oluşan fotoakım,  $I_{ph}$ ,  $G$  taşıyıcı üretim hızına;

$$I_{ph} = G^v \quad 0,5 < v < 1 \quad (2.44)$$

şeklinde üstel olarak bağlıdır (Rose 1978). Bu tip tamsayı olmayan kuvvet terimini monomoleküler ve biomoleküler süreçlerin bir karışımına bağlı olarak açıklamak mümkündür. Klasik olarak fotoakımın uyarıcı ışık şiddetine bağlılığı, kristal yapı katılarda iyi bilinen bir süreçtir. Tek tip bir yarıiletken göz önünde bulundurulur. Işıkla uyarım sonucu  $\Delta n$  ekstra elektron yoğunluğu oluşmuş ise malzemenin termal dengede olduğunu ve yük nötralliğinin olduğunu kabul edersek;

$$G = C_n[(\Delta n)^2 + 2n_0\Delta n] \quad (2.45)$$

elde edilir. Bu ifade taşıyıcı üretim hızına ( $G$ ) ve dolayısı ile uyarıcı ışık şiddetine bağlılığı hakkında bilgi verir.  $n_0 \gg \Delta n$  bölgesinde;

$$\Delta n = \frac{G}{2C_n n_0} \text{ (monomoleküler)} \quad (2.46)$$

olur ve foto akım, uyarılma şiddeti ile lineer olarak değişir.  $n_0 \ll \Delta n$  durumunda ise;

$$\Delta n = \left(\frac{G}{C_n}\right)^{1/2} \text{ (bimoleküler)} \quad (2.47)$$

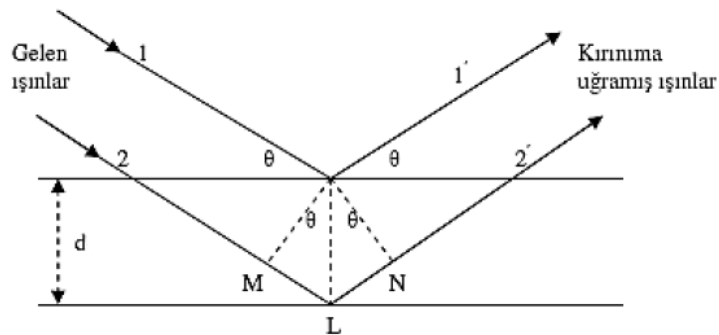
olur ve fotoakım ışık şiddetinin karekökü ile orantılı hale gelir (Gölcür 2012; Kamaç 2013).

## 2.9 Yapısal Analiz

### 2.9.1 X-ışını Kırınımı (XRD) Analizi

Katı malzemelerin yapısal karakterlerini incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem kristale zarar vermediği için oldukça yaygın olarak kullanılır. X-ışını kırınımı analizi ile atomlar arası mesafe, kristalin yönelimi, yapısı, boyutu ve şekli hakkında bilgi sahibi olunur. X-ışını dalga boyları kristalde bulunan atomlar arası mesafe kadar yani 1 Å civarındadır (Demirci 2006).

Kristaldeki kırınım olayını W. L. Bragg, kristale gönderilen X-ışınlarını atom düzlemlerine çarparak yansımaları şeklinde açıklamıştır. Burada kırınım olayı Şekil 2.9 'de gösterildiği gibi yansıya ışınların girişimi ile oluşur (Taner 2010; Kamaç 2013).



**Şekil 2.9:** X-ışınlarının kristal tarafından kırınımına uğratılması (Taner 2010; Şişman 2006).

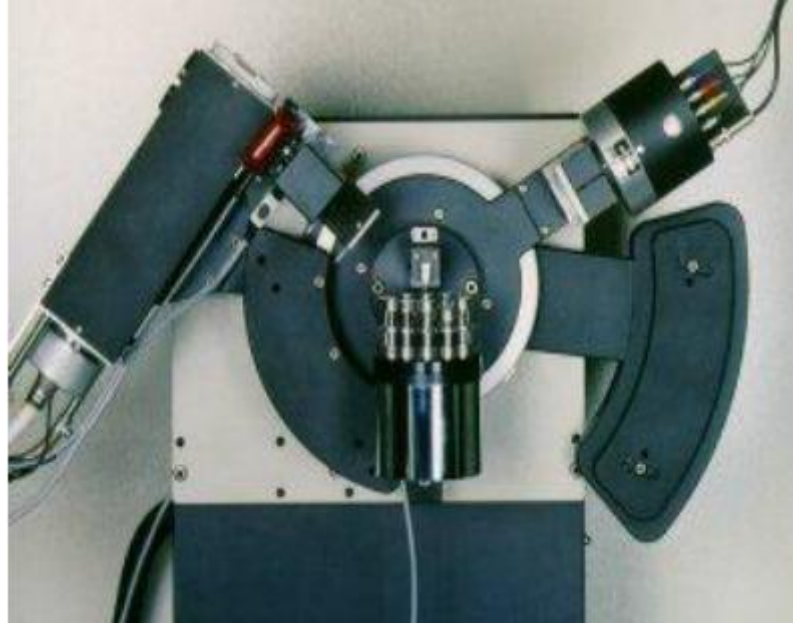
Fakat buradaki yansıma olayı aynalardaki gibi değildir. Işınların düzleme gelme açıları ve aldıkları yollar önemlidir. Atomlar arası mesafenin  $d$  olduğunu ve X-ışınlarının düzleme  $\theta$  açısı ile geldiğini düşünürsek yansıyan ışınların da düzleme arasındaki açı yine  $\theta$  olacaktır. Bu ışınların birbirini söndürmesi ya da kuvvetlendirmesi yol farkı sebebiyle olur. Yansıyan ışınlar arasındaki yol farkı X-ışınları dalga boyunun tam katları şeklinde olmalıdır. Bu durumda yol farkı;

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.48)$$



ile verilir.

Bu denklem Bragg yasası olarak bilinmektedir. Burada  $\theta$  X-ışınının düzlemlerle yaptığı açı,  $d$  düzlemler arası mesafe,  $\lambda$  X-ışınlarının dalga boyu ve  $n$  yansımanın mertebesidir. XRD cihazının üstten görünüşü Şekil 2.10 'da verilmiştir.



**Şekil 2.10:** XRD cihazının üstten görünüşü.

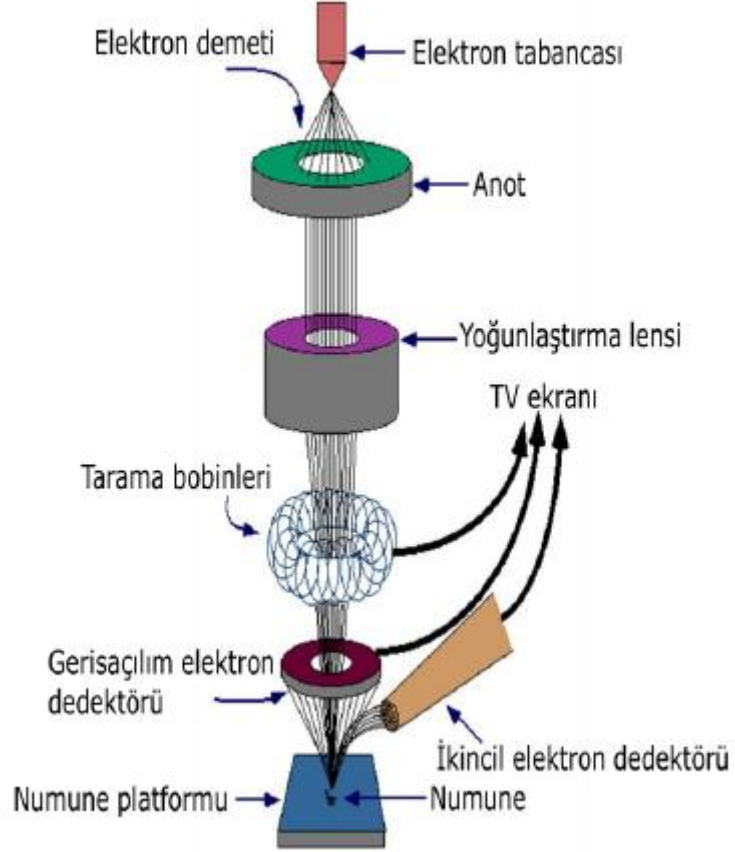
XRD cihazı örneğe X-ışınları göndererek kırılma verilerini toplar ve kristalin yapısına göre X-ışını farklı açılarda ve şiddette kıran örnekler hassas biçimde analiz edilir.

### **2.9.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi**

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) yüksek voltaj ile hızlandırılan elektronları numune üzerine odaklar. Elektronlar numune yüzeyinde taratılır ve bu sırada numune atomları arasında girişimler oluşur. Bu girişimler dedektörde toplanır ve sinyal güçlendirildikten sonra katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla görüntü elde edilir (Flegler 1993).

SEM optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Şekil 2.11'da SEM cihazı şematik olarak verilmiştir. Optik

kolon kısmında elektron tabancası, anot plakası ve yoğunlaştırıcı mercekler bulunur. Anot plakası elektronları hızlandırır ve mercekler elektronları ince demet haline getirir.



**Şekil 2.11:** SEM cihazının şematik gösterimi (Gölcür 2012).

Mercekler aynı zamanda elektron demetini numune üzerine odaklar. Sistem  $10^{-4}$  Pa değerinde vakum altında tutulur. Sistemde bulunan dedektörler oluşan ışınları ve elektron saçılmalarını toplar. Manyetik bobinler ise sinyal çoğaltıcıları ve elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize olarak taramaya yarar (Brundle 1992).

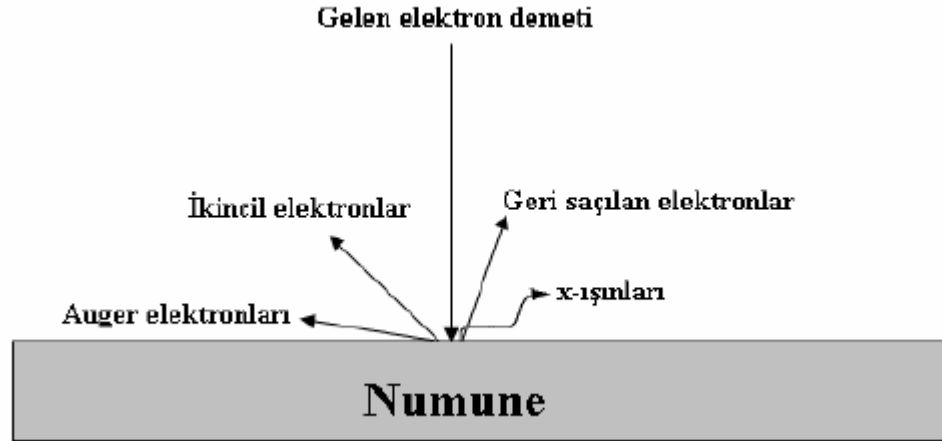
### 2.9.3 Enerji Dağılım Spektroskopi (EDS) Analizi

Enerji dağılım spektroskopi (EDS) yöntemi ile numune yüzeyinde nicel ve nitel analiz yapılmaktadır. Bu sistem taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile birleştirilmiş haldedir. SEM ve EDS sistemlerinin fotoğrafı Şekil 2.12 'de verilmiştir.

SEM’de numuneye gönderilen elektronlar, numune ile etkileşime girer ve bir takım saçılmalara uğrar. Bu saçılmalar şematik olarak Şekil 2.13’da gösterilmiştir. EDS yönteminde saçılmalar sonucu oluşan X-ışını emisyonu ölçülür. Malzeme yüzeyindeki atom çeşidine göre X-ışını emisyonunun enerjisi ya da dalga boyu farklılık gösterir (Özkan 2010).



Şekil 2.12: SEM ve EDS cihazının bir fotoğrafı.



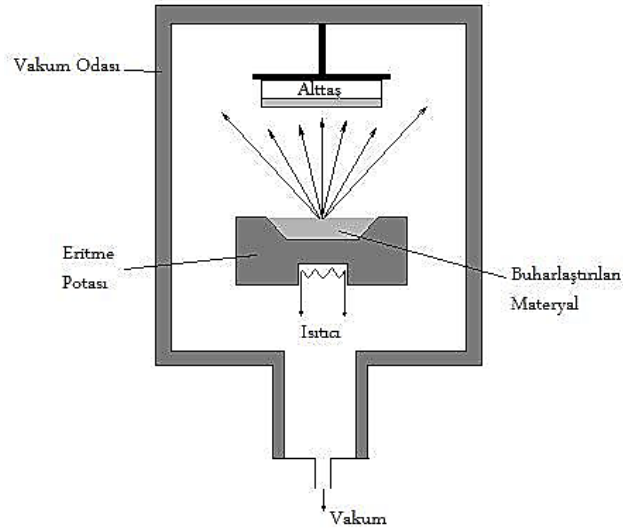
Şekil 2.13: SEM’de gelen elektron demeti ile numunenin etkileşmesi.

### 3. DENEYSEL YÖNTEM

#### 3.1 Yarıiletken İnce Film Büyütme İşlemi

##### 3.1.1 Termal Buharlaştırma Yöntemi

Termal buharlaştırma yöntemi yüksek vakum altında katı haldeki bir malzemenin ısı etkisiyle buharlaştırılarak buhar halindeki atom ve moleküllerin alttaş üzerinde biriktirilmesi şeklinde uygulanan ince film üretme yöntemidir (Aksoy 2011). Şekil 3.1’de termal buharlaştırma yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.1:** Termal buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi (Özkan 2010).

Kaynak malzeme erime sıcaklığı yüksek olan bir pota içerisine yerleştirilmiştir. Pota üzerinden akım geçirilerek kaynak malzemenin erimesi ve buharlaşması sağlanır. Buharlaşan malzeme yüksek vakum ortamında bulunduğu için kolayca alttaş üzerine giderek burada tekrar yoğunlaşır. Bu şekilde alttaş üzerine malzeme biriktirilerek istenilen kalınlıkta ince film üretilebilir (Kasap 2006; Aksoy 2011).

Bu çalışmada incelenen  $CdIn_2Se_4$  ince filmlerin büyütüldüğü Vaksis PVD-Handy termal buharlaştırma sistemi Şekil 3.2’de görülmektedir. Sistem; mekanik ve difüzyon pompaları, yüksek akım düşük voltajlı bir devre, vakum çemberi, su soğutma sistemi ve hava kompresöründen oluşmaktadır. Film büyütme işlemi sisteme bağlı bir bilgisayardan kontrollü bir şekilde gerçekleştirilir.



**Şekil 3.2:** Termal buharlaştırma sistemi (Gölcür 2012).

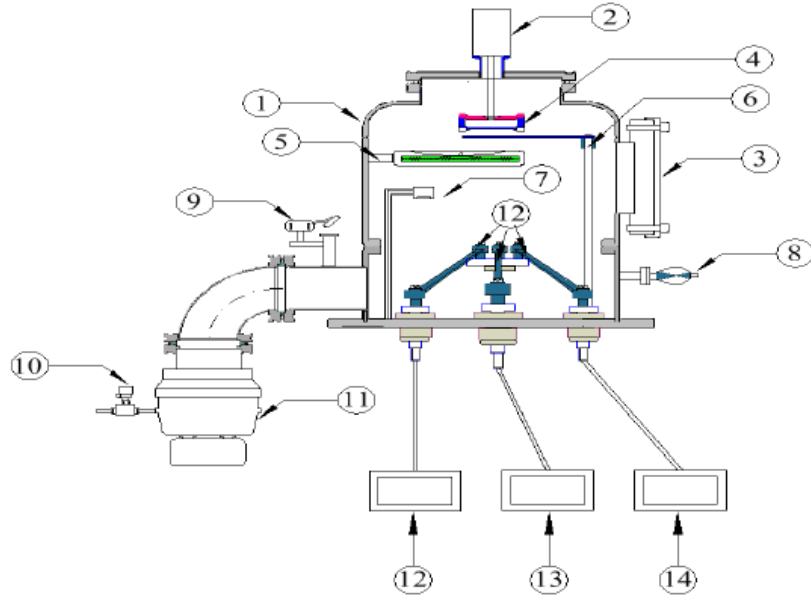
Termal buharlaştırma sistemi üç ana ünitelerden oluşmaktadır.

**a) Vakum Çemberi:** Bu ünite pompa istasyonu ve basınç ölçüm sisteminden oluşur. Şekil 3.3’de vakum çemberinin dıştan bir görünüşü verilmiştir.



**Şekil 3.3:** Paslanmaz çelik vakum çemberi.

**b) Büyütme Kaynakları ve Kontrolleri:** Bu ünite termal buharlaştırmayı oluşturan alt öğeleri içerir (Şekil 3.4).



**Şekil 3.4:** Termal buharlaştırma sisteminin vakum alt birimleri (şematik) 1) Vakum çemberi, 2) DC motor, 3) ISO 100 gözlem penceresi (View Port), 4) Altaş tutucu, 5) Isıtıcı, 6) Kesici (shutter), 7) Kalınlık monitör başlığı, 8) Basınç ölçüm başlığı (Compact Full Range Gauge Head), 9) Çemberin atmosfer anahtarı, 10) Turbo pompa vakum kırma vanası, 11) Turbo pompa, 12-13-14) Termal buharlaştırma güç kaynakları (Kamaç 2013).

c) **Elektronik Cihaz Kabini:** Bu birim bilgisayar ve büyütme kaynakları kısmında açıklanan öğelerin elektronik kontrollerinden oluşur (Şekil 3.5).



**Şekil 3.5:** Termal buharlaştırma sisteminin elektronik kabin ünitesi 1) Kontrol bilgisayarı, 2) Ampermetreler ve termal buharlaştırma güç kaynakları göstergeleri, 3) Turbo pompa kontrolör, 4) Sıcaklık PID kontrolör, 5) Ana şalter, 6) Aç/Kapa Anahtarları (Kamaç 2013).

Termal buharlaşma yönteminde kaplanacak olan kaynak malzeme erime sıcaklığı oldukça yüksek olan metallere (W, Mo, Ta gibi) yapılmış potalara konularak vakum çemberinin içine yerleştirilmiştir. Daha sonra basınç  $5 \times 10^{-5}$  Torr'un altına düşürülmüştür. Basıncı çift pompa kullanarak  $1 \times 10^{-5}$  Torr veya daha düşük bir seviyeye indirmek mümkündür. İstenilen basınca ulaşıldığında kaynak malzemeyi ısıtma işlemi, malzemenin yerleştirildiği potanın bağlı olduğu iki elektrot arasına elektrik gerilimi uygulanarak sağlanır. Üzerinden geçen yüksek akım (40-100 A) aracılığı ile pota içerisine yerleştirilen malzeme buharlaştırılmıştır. Vakum çemberi düşük basınçta olduğu için kaynak malzemedan buharlaşarak ayrılan atom ve moleküller bölmenin üst tarafında bulunan döner tabana ulaşır ve homojen film oluşum süreci başlar. Akım değiştirilerek 10-50 Å/s'lik bir hızla büyütme (deposition) sağlanır. Vakum, moleküllerin bölmede serbestçe yol almasını sağlamak için gereklidir ve buharlaşan malzeme hedef yüzeyde yoğunlaşır. Bu prensip bütün buharlaşma teknolojileri için geçerlidir, sadece kaynak malzemeyi ısıtma yöntemi değişiklik gösterir (Gölcür 2012).

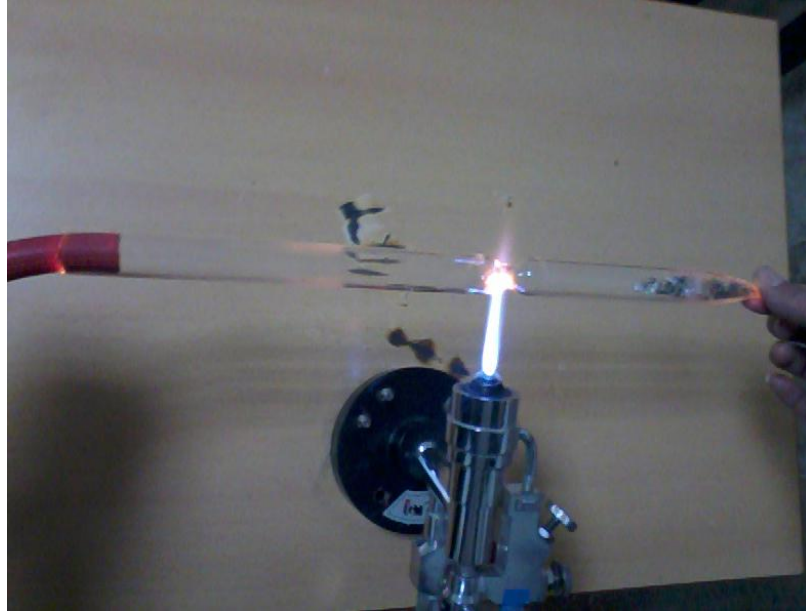
### 3.1.2 CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> Bileşiğinin Oluşturulması

Bu çalışmada termal buharlaştırma sisteminde kaynak malzeme olarak kullanılan polikristal CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiği 1150 °C de sinterlenerek üretilmiştir. Sinterleme işlemi kuvarz cam tüpler içerisinde yapılmıştır. Erime noktasının çok yüksek olması (yaklaşık 2000 °C) ve içerisindeki malzemeler ile kimyasal tepkimeye girmemesi sebebiyle kuvarz cam tüp seçilmiştir.

Sinterleme öncesi kuvarz tüpler içerisinde bulunan yağ, toz ve metalik kirlerin arındırılması oluşacak kristalin kalitesi açısından oldukça önemlidir. Aksi halde kristal içerisinde kirlilik oluşacak ve yapısı önemli ölçüde değişecektir. Bunun için kuvarz tüpler öncelikle toz ve yağları temizlemek için deterjan ve sıcak saf su ile yıkanmıştır. Daha sonra %40' lık HNO<sub>3</sub> çözeltisinde iki saat bekletilerek metalik kirlere arındırılması sağlanmıştır. Bunun sonrasında kuvarz tüpler deterjan ile temizlenip saf suyla durulanmıştır. Durulama işleminden sonra 30 dakika izopropil alkolde bekletilmiştir. Tüp içerisinde kalmış olması muhtemel safsızlıkları çıkarabilmek için son olarak tüpler 10<sup>-5</sup> Torr' luk basınç altında ısıtılmıştır (Karabulut 2003; Kamaç 2013).

CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiğini oluşturmak için %99,99 saflıkta kadmiyum (Cd), indiyum (In) ve selenyum (Se) elementleri kullanılmıştır. Elementler molar ağırlıklarına göre 1:2:4 oranında tartılarak kuvarz tüplere yerleştirilmiştir. Tüp içerisindeki basınç turbo pompa ile 10<sup>-5</sup> Torr'a kadar düşürülmüş ve bu basınçta iken tüplerin ağzı eritilerek kapatılmıştır. Kuvarz tüpü kapatma işlemi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.





**Şekil 3.6:** Kuvartz tüp kapatma işlemi.

$\text{CdIn}_2\text{Se}_4$  bileşiğini oluşturabilmek için vakumda ağzı kapatılan tüp yatay fırın içerisine yerleştirilmiştir.  $1150\text{ }^\circ\text{C}$  ye kadar kontrollü bir şekilde ( $\sim 10\text{ }^\circ\text{C/saat}$ ) ısıtılarak elementlerin tamamen erimesi sağlanmıştır. Daha sonra kristal oluşumunu sağlamak için yavaş yavaş kontrollü bir şekilde oda sıcaklığına soğutulmuş ve bileşik oluşturma işlemi tamamlanmıştır. Tüm bu işlemler sırasında bileşiğin homojenliğini sağlamak için kuvartz tüp belli aralıklarla çalkalanmıştır. Yatay fırın ve kuvartz cam tüp içerisinde sentezlenen numuneler Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.7:** Yatay fırın ve kuvartz cam tüp içerisinde sentezlenen numuneler (Kamaç 2013).

Oluşan külçe halindeki bileşiği termal buharlaştırma sisteminde kullanıma uygun hale getirebilmek için Şekil 3.8’de görüldüğü gibi agat havanda toz haline getirilmiştir.



**Şekil 3.8:** Külçe halinde sentezlenen numunenin agat havanda toz haline getirilmesi (Kamaç 2013).

### 3.1.3 CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> İnce Filminin Elde Edilmesi

CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerini üretmek için alttaş olarak 10x12 mm<sup>2</sup> boyutundaki lamel camlar kullanılmıştır. Büyütme işleminden önce alttaş olarak kullanılan camlar temizlik işleminden geçirilmiştir. Camlar öncelikle kaba kirden arındırmak için deterjanlı suda yıkanmıştır. Daha sonra 30 dakika boyunca ultrasonik banyo yardımıyla saf su içinde çalkalanmıştır. Camların yüzeyindeki organik maddeleri temizlemek için %30 seyreltilmiş H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kaynar çözeltisinde çalkalanmış böylece organik kirler suda çözünebilir bileşiklere dönüştürülmüştür. Son olarak camlar ultrasonik banyoda saf su içerisinde çalkalanmıştır. Temizlenmiş olan camlar saf su içerisinde saklanmış ve büyütmeden hemen önce sıcak hava üflenerek kurutulmuştur (Yılmaz, 2004).

CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmleri Vaksis PVD Handy termal buharlaştırma sisteminde üretilmiştir. Hazırlanan alttaşlar ve kaynak malzeme vakum çemberi içerisine yerleştirilerek çember kapatılmıştır. Vakum çemberi 10<sup>-5</sup> Torr’luk basınca getirilmiştir. Vakum çemberi içerisindeki ısıtıcı yardımıyla alttaş sıcaklığı 300 °C ye çıkarılmış böylece sistem büyütme işlemine hazır hale getirilmiştir. Kesici (shutter) kapalı konumdayken pota üzerinden akım geçirilerek kaynak malzemenin erimesi

sağlanmıştır. Buharlaşma hızı 20-25 (Å/s) değerine ulaştığında kesici açılarak kaynak malzemedan buharlaşan atomların alttaş üzerine birikmesi sağlanmıştır. Filmlerin homojenliğini sağlayabilmek için büyütme sırasında alttaşlar sürekli döndürülmüştür. Alttaşların üzerinde oluşan film kalınlığı 0,5 µm değerine ulaştığında kesici kapatılmış ve büyütme işlemi tamamlanmıştır. Daha sonra ince filmler vakum çemberinden çıkarılan azot gazı ortamında yatay fırın içerisinde 400 °C ve 500 °C'de tavlama işlemi tamamlanmıştır. Sonuç olarak elde edilen ince filmler özellikleri ile Tablo 3.1'de verilmiştir.

**Tablo 3.1:** Üretilen ince filmlerin genel bilgileri.

| <b>Kaynak Bileşik</b>             | <b>Tavlama Sıcaklığı</b> | <b>Alttaş Sıcaklığı</b> | <b>Kalınlık</b> | <b>İsmlendirme</b> |
|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|--------------------|
| CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> | -                        | 300 °C                  | 0,5 µm          | CIS                |
| CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> | 400 °C                   | 300 °C                  | 0,5 µm          | CIS-400            |
| CdIn <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> | 500 °C                   | 300 °C                  | 0,5 µm          | CIS-500            |

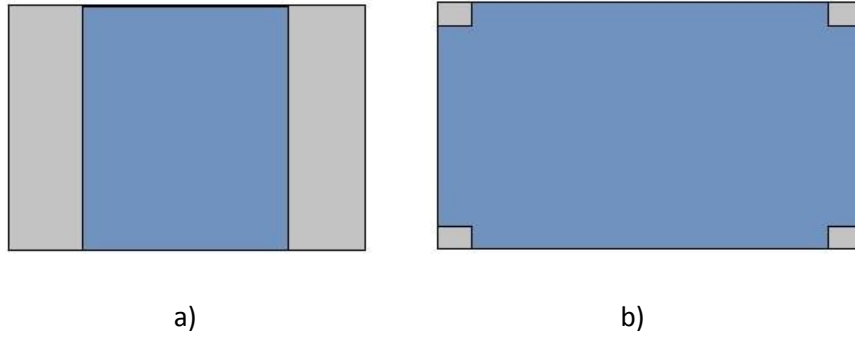
### 3.2 Omik Metal Kontakların Elde Edilmesi

İncelenen yarıiletken ince filmlerin elektriksel özelliklerinin belirlenebilmesi için film üzerine omik kontaklar oluşturulmalıdır. Bu şekilde ince film ile ölçüm sistemi arasında bağlantı sağlanabilir. Oluşturulacak omik kontakın şu şartları sağlaması gerekmektedir;

- Kontakların akım gerilim karakteristikleri doğrultucu olmamalıdır, yani kontak direnci akım yönüne bağlı olmamalıdır ve akım-voltaj değişimi çizgisel (lineer) olmalıdır.
- Kontak direnci akımın değerine bağlı olmamalıdır.
- Kontak direnci yarıiletkenin direncine göre ihmal edilebilecek boyutta olmalıdır.
- Kontakta akım geçerken gürültü olmamalıdır.

- Kontak malzemesi yarıiletken ile mekanik olarak iyi birleşmelidir (Gölcür 2012; Soylu 2006).

İnce filmlerin yüzeyinde omik kontak oluşturabilmek için indiyum (In) kullanılmıştır. Termal buharlaştırma yöntemiyle filmlerin yüzeyine indiyum büyütülmüş ve bu işlem sırasında özel olarak hazırlanan maskeler kullanılmıştır. Kullanılan maskelerin geometrik yapısı Şekil 3.9’da verilmiştir.



**Şekil 3.9:** Omik kontak maskesi (a) Şerit, (b) Van der Pauw geometrisi.

### 3.3 Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sistemi

Elektriksel iletkenlik ölçüm sistemi Lake Shore 331 sıcaklık kontrol ünitesi, Keithley-2400 kaynak-ölçüm cihazı, azot soğutmalı Janis marka kriyostat ve Pfeiffer marka D-35614 model vakum pompasından oluşmaktadır. Sisteme ait tüm cihazların otomasyonu bilgisayar aracılığıyla yapılmaktadır. Hazırlanmış olan ince filmler kriyostatın içerisine yerleştirilmiş ve kriyostat vakuma alınmıştır. Sistemin soğutulması sıvı azot yardımıyla sağlanmaktadır. İstenilen basınç ve sıcaklık değerlerine ulaşıncaya bilgisayar yardımıyla deney başlatılmış ve deney süresince kontrol bilgisayar programı tarafından sağlanmıştır. Kriyostat içerisindeki numuneye sabit bir akım verilerek numune üzerinde oluşan gerilim ölçülmüştür. Bu işlem farklı sıcaklıklarda tekrar edilir. Ölçüm sonucunda elde edilen veriler ile direnç, öz direnç değerleri hesaplanmış ve bunların sıcaklığa bağlı değişimleri gözlenmiştir.

### 3.4 Fotoiletkenlik Ölçüm Sistemi

Elektriksel iletkenlik ölçüm sistemine Şekil 3.10'da görüldüğü gibi bir LED eklenerek sistem fotoiletkenlik ölçümü yapmaya uygun hale getirilmiştir.



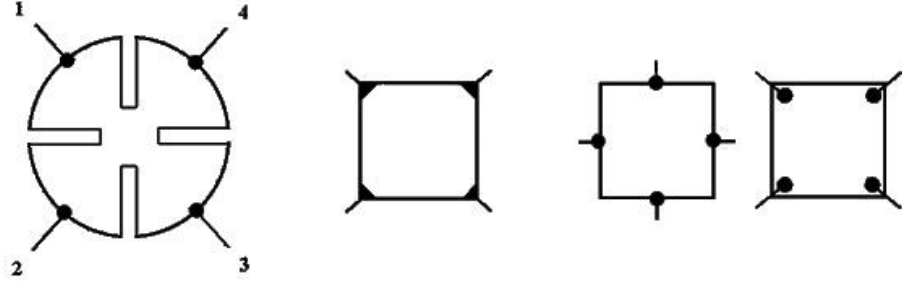
**Şekil 3.10:** Fotoiletkenlik ölçümü için kriyostat içerisine yerleştirilmiş numune ve LED'in fotoğrafı (Kamaç 2013).

Deney sırasında LED'e uygulanan 40, 50, 60, 70, 80, 90 ve 100 mA'lik akımlara karşı yayınlanan ışık demetlerinin şiddeti sırasıyla 5001, 6313, 7616, 8891, 10201, 11445, 12708 lüks şeklindedir. Numune kriyostatın içerisine yerleştirilmiştir ve ortam istenilen sıcaklık ve basınç değerlerine getirilmiştir. Numune üzerine gerilim uygulanarak karanlık ortamda iken akım ölçülür. Daha sonra LED'e 40-100 mA aralığında değişen farklı akımlar uygulanmış ve farklı şiddetlerde ışık altındaki numune üzerinden geçen akım değerleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Bu işlem farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilir.

### 3.5 Hall Etkisi Ölçüm Sistemi

Hall etkisi olayı yarıiletkenleri karakterize etmekte kullanılan önemli metotlardan birisidir (Orton 2004). Hall etkisi ölçümleri ile bir yarıiletkenin serbest taşıyıcı yoğunluğu, taşıyıcı mobilitesi ve tipinin belirlenmesi mümkündür (Erol ve ark. 2013). Bir yarıiletken ince filmde yüzey taşıyıcı yoğunluğunun ve mobilitesinin belirlenebilmesi için Hall etkisi ölçümleriyle birlikte ince filmin direncinin de ölçülebilmesi gerekmektedir. İnce filmlerin direncini belirlemek için kullanılan en

yaygın metotlardan birisi Van der Pauw metodu (Pauw 1958). Hem Hall voltajı hem de direnç ölçümünün yapılabilmesi için ince film numunelerin Şekil 3.11’de gösterilen geometrilerde hazırlanması ve kontak alınması gerekmektedir.



**Şekil 3.11:** Hall ölçümünde kullanılan örnek geometriler (Kamaç 2013).

Van der Pauw  $R_A$  ve  $R_B$  karakteristik dirençlerini Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’deki gibi tanımlamıştır.  $R_A$ ,  $R_B$  ve ince filmin yüzey direnci  $R_S$  arasındaki bağıntı Van der Pauw denklemi ile

$$e^{\frac{\pi R_A}{R_S}} + e^{\frac{\pi R_B}{R_S}} = 1 \quad (3.1)$$

şeklinde verilir (Pauw 1958).

Van der Pauw tekniğinde Hall ölçümünün amacı  $V_H$  Hall gerilimini ölçerek  $n_s$  yüzey taşıyıcı yoğunluğunu belirlemektir. Hall gerilim ölçümü, sabit bir akım ve örnek düzlemine dik bir manyetik alan uygulanmasıyla birlikte bir dizi gerilim ölçümünden ibarettir.  $V_H$ ’yi ölçmek için bir  $I$  akımı karşılıklı kontak çifti 1 ve 3’ten geçmeye zorlanır ve bunun karşısındaki geri kalan kontak çiftleri 2 ve 4’ten ise  $V_H$  ( $V_{24}$ ) Hall gerilimi ölçülür.  $I$ ,  $B$ ,  $q$  bilinenleriyle ve  $V_H$  Hall geriliminin belirlenmesiyle yüzey taşıyıcı yoğunluğu  $n_s = IB/q|V_H|$  eşitliği kullanılarak belirlenebilir (Kamaç 2013; Erdoğan 2010). Burada  $R_A$  ve  $R_B$  değerleri;

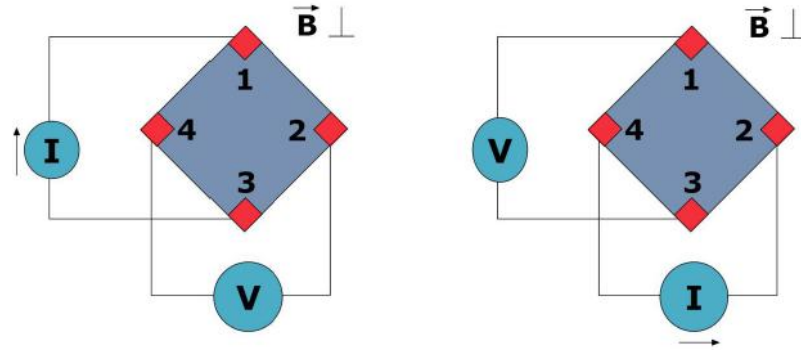
$$R_A = \left( \frac{R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21}}{4} \right) \quad (3.2)$$

$$R_B = \left( \frac{R_{32,41} + R_{34,14} + R_{14,23} + R_{41,32}}{4} \right) \quad (3.3)$$

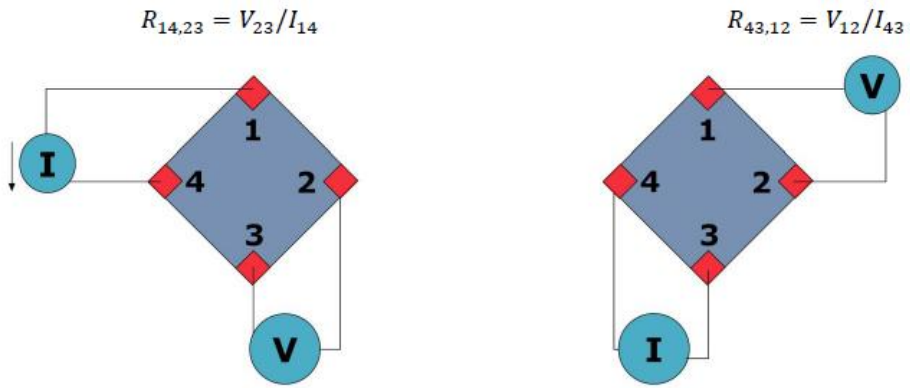
şeklinde hesaplanır. Yarıiletken ince filmin kalınlığı  $d$  olmak üzere hacimsel öz direnç;

$$\rho = R_S d \quad (3.4)$$

şeklinde hesaplanır.



**Şekil 3.12:** Van der Pauw tekniği ile Hall voltajı ölçümünün şematik gösterimi (Kamaç 2013).



**Şekil 3.13:** Van der Pauw tekniği kullanarak direnç ölçümünün şematik gösterimi (Kamaç 2013).

Gerilimlerin toplamı pozitif ise  $p_s$  yüzey yük (deşik) yoğunluğu olmak üzere;

$$p_s = \frac{8 \times 10^{-8} IB}{[q(V_C + V_D + V_E + V_F)]} \quad (3.5)$$

olur ve gerilimler toplamı negatif ise  $n_s$  yüzey yük (elektron) yoğunluğu olmak üzere;

$$n_s = \left| \frac{8 \times 10^{-8} IB}{[q(V_C + V_D + V_E + V_F)]} \right| \quad (3.6)$$

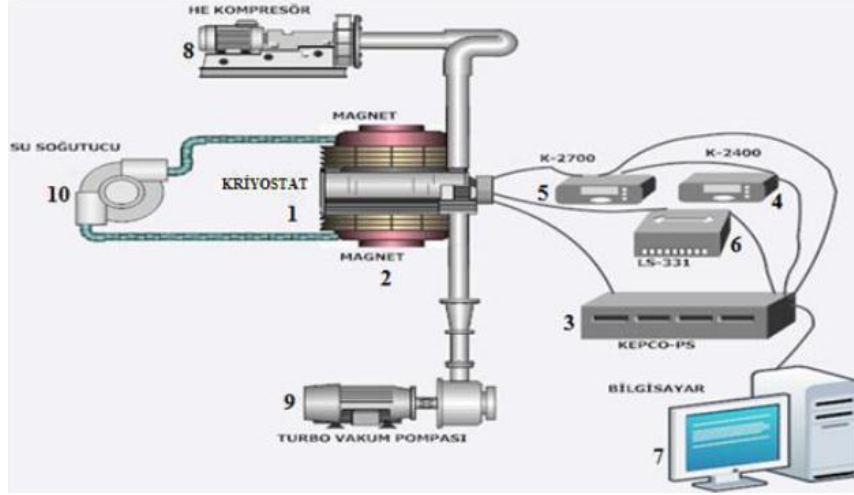
şeklindedir. Burada  $B$  manyetik alanı Gauss ve  $I$  akımı Amper olarak seçilebilir. Eğer numunenin yüzey taşıyıcı yoğunluğu ve kalınlığı ( $d$ ) biliniyorsa  $n_0$  hacimsel elektron yoğunluğu veya  $p_0$  hacimsel deşik yoğunluğu bulunabilir;

$$n_0 = \frac{n_s}{d} \quad ve \quad p_0 = \frac{p_s}{d} \quad (3.7)$$

Hall mobilitesi ( $\mu$ ), yüzey taşıyıcı yoğunluğu  $n_s$  (veya  $p_s$ ) ve yüzey direnci  $R_s$  'den  $\mu = 1/qn_s R_s$  ( $cm^2 V^{-1} s^{-1}$ ) eşitliği kullanılarak hesaplanabilir (Erdoğan 2010).

Hall Etkisi ölçümünü yapmak için Şekil 3.14'da gösterilen bilgisayar kontrollü Hall etkisi ölçüm sistemi kullanılmıştır.





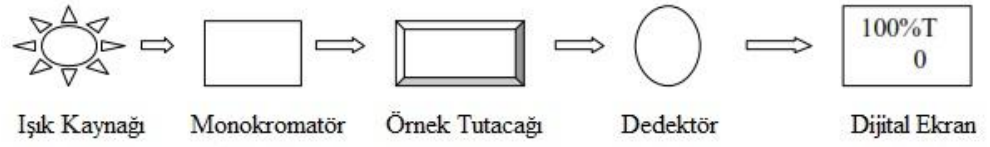
**Şekil 3.14:** Hall etkisi deney sisteminin şematik gösterimi 1) Numunenin yerleştirildiği kriyostat 2) 1,2 Teslalık GMW magnetleri 3) Magnetler için güç kaynağı 4) Akım kaynağı 5) Gerilim ölçümleri için veri kaydedicisi ve ölçülen gerilim uçlarını ölçüm esnasında değiştirmek için anahtarlama kartı 6) Sıcaklık kontrol ünitesi 7) LABVIEW programı ile destekli bilgisayar 8) Sistemi soğutmak için helyum kompresör 9) Turbo moleküler vakum pompası 10) Magnetler için su soğutma sistemi (Gölcür 2012).

### 3.6 Soğurma Ölçüm Sistemi

Yarıiletken yasak enerji aralığını belirlemek için kullanılan yöntemlerden birisi de optik soğurma ölçümüdür (Bube 1960). Üretilen ince filmlerin optik soğurma ölçümleri oda sıcaklığında UNICO marka SQ 2802 UV/Vis spektrometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan spektrometrenin tarama bölgesi 190-1100 nm arasındadır. Spektrometre beş temel birimden oluşmaktadır.

1. Işık kaynağı olarak kullanılmak için halojen ya da döteryum lamba
2. İstenilen dalga boyunda ışığı seçmek ve istenmeyen ikinci dereceden radyasyonu yok etmek için kullanılan monokromatör
3. Örnek yerleştirme bölmesi
4. Geçen ışığı alan ve elektrik sinyaline dönüştüren bir dedektör
5. Soğurma ve geçirgenliği gösteren dijital bir gösterge

Şekil 3.15’de UV/Vis spektrometresinin çalışma şeklini gösteren blok diyagramı gösterilmiştir.



**Şekil 3.15:** UV/Vis spektrometresinin çalışma şeklini gösteren blok diyagramı.

Işık girişi odaklanır ve toplayıcı aynalar ışığı bir prizmaya gönderir. Prizma bir spektrum üretecek şekilde ışığı dağıtır ve ışık çıkışa yönlendirilir. Buradan çıkan ışık filtreden geçerek örnek üzerine düşürülmüştür. Filtreler istenmeyen ikinci dereceden radyasyonu engeller. Örneği geçen demet silikon fotodiyot üzerine düşer ve elektrik sinyaline dönüştürülerek dijital göstergede görüntülenir. Şekil 3.16'da kullanılan UV/Vis spektrometre gösterilmiştir.



**Şekil 3.16:** Soğurma ölçümlerinde kullanılan UV-Vis spektrometresi.

## 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> İnce Filmlerinin Yapı Analizi

Bu bölümde üretilen CIS, CIS-400 ve CIS-500 yarıiletken ince film numunelere ait deneysel ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir. İnce filmlerin yapısal özellikleri, XRD ve EDS yöntemleri ile araştırılmıştır. Elektriksel özelliklerinin incelenmesi için Hall etkisi ve sıcaklığa bağlı iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Optik özelliklerin araştırılması için ise optik soğurma, dalga boyuna bağlı fotoiletkenlik ve ışık şiddetine bağlı fotoiletkenlik deneyleri yapılmıştır.

#### 4.1.1 CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> İnce Filmlerinin SEM ve EDS Analizi

Kaynak madde olarak kullanılan CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiğinin ve CIS, CIS-400 ve CIS-500 ince filmlerinin elementel bileşimlerini belirlemek ve yapıda kirlilik atomlarının bulunup bulunmadığını gözlemlemek için EDS ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları sırasıyla Tablo 4.1, Tablo 4.2, Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'de verilmiştir.

**Tablo 4.1:** CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> toz bileşiğine ait EDS ölçüm sonucu.

| Element | Yüzdece Ağırlık % | Atomik Ağırlık % |
|---------|-------------------|------------------|
| Cd      | 16,42             | 13,74            |
| In      | 35,64             | 29,19            |
| Se      | 47,94             | 57,08            |

Yapılan ölçüm sonucunda üretilen ince filmlerin ve kaynak maddenin yapısında kirlilik atomunun bulunmadığı gözlenmiştir. Kaynak madde olarak kullanılan CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiğinin 1:2:4 stokiyometrik oranına hemen hemen uyduğu gözlenmiştir. Üretilen ince filmlerde Cd oranının belirgin bir şekilde azaldığı belirlenmiştir. CIS, CIS-400 ve CIS-500 ince film numunelerinde In oranı kaynak maddeye göre artarken

Se oranının azaldığı görülmektedir. EDS ölçümlerinde yüzey ve yüzeye yakın film bileşimi incelendiği için Cd atomlarının film derinliğinde topaklanmış olduğu düşünülebilir. Yine filmlerin tavlama ya bağlı olarak elementlerin atomik yüzdelerinde küçük bir değişim gözlenmiştir.

**Tablo 4.2:** CIS ince filmine ait EDS ölçüm sonucu.

| Element   | Yüzdece Ağırlık % | Atomik Ağırlık % |
|-----------|-------------------|------------------|
| <b>Cd</b> | 7,30              | 6,19             |
| <b>In</b> | 48,14             | 39,98            |
| <b>Se</b> | 44,56             | 53,82            |

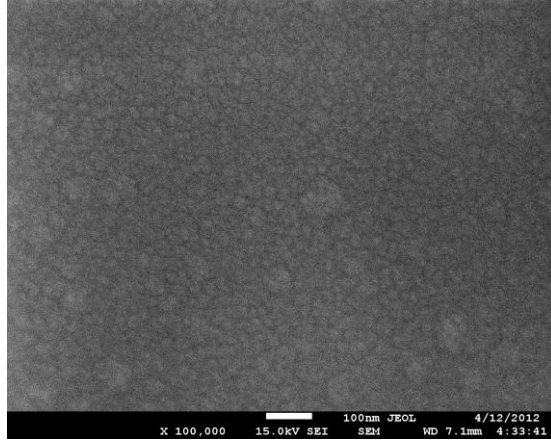
**Tablo 4.3:** CIS-400 ince filmine ait EDS ölçüm sonucu.

| Element   | Yüzdece Ağırlık % | Atomik Ağırlık % |
|-----------|-------------------|------------------|
| <b>Cd</b> | 21,80             | 18,23            |
| <b>In</b> | 30,55             | 25,02            |
| <b>Se</b> | 47,65             | 56,75            |

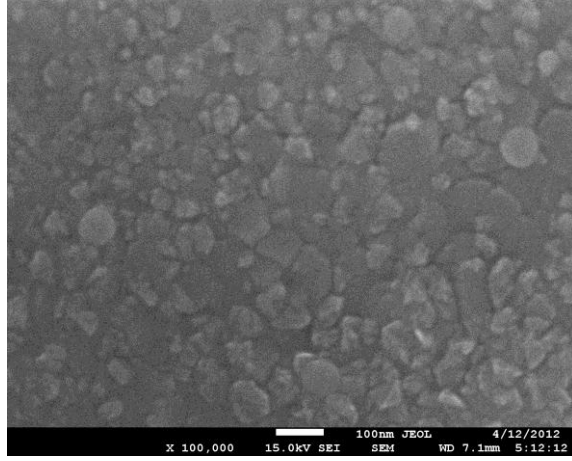
**Tablo 4.4:** CIS-500 ince filmine ait EDS ölçüm sonucu.

| Element   | Yüzdece Ağırlık % | Atomik Ağırlık % |
|-----------|-------------------|------------------|
| <b>Cd</b> | 6,56              | 5,52             |
| <b>In</b> | 46,94             | 38,71            |
| <b>Se</b> | 46,51             | 55,77            |

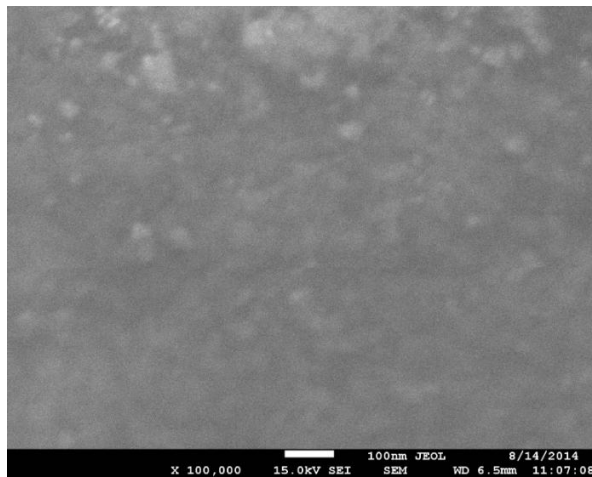
Üretilen ince filmlerin mikro yapılarının incelenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Numunelerin SEM görüntüsünü elde edebilmek için JSM-7600 F model JEOL marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 4.1’de sırasıyla CIS, CIS-400 ve CIS-500 ince filmlerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmlerin SEM görüntüleri 15 kV hızlandırma gerilimi ve 100 000 büyütme oranında elde edilmiştir. Tavlama etkisi ile tanecik boyutunun belirgin bir şekilde arttığı Şekil 4.1’de görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

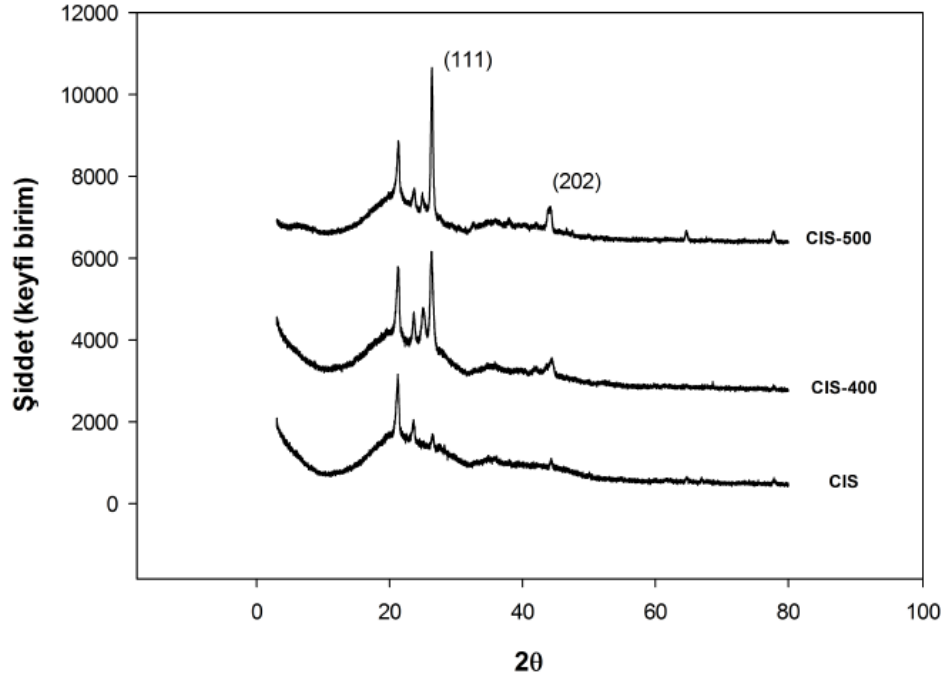
**Şekil 4.1:** (a) CIS ve (b) CIS-400 (c) CIS-500 ince filmlerine ait SEM görüntüleri.

#### 4.1.2 CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> İnce Filmlerinin XRD Analizi

CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerinin yapısal özelliklerinin incelenmesi için XRD analizleri yapılmıştır. Filmlerin X-ışını kırınım desenleri 1,54 Å dalga boylu X-ışını demeti kullanılarak 3° – 80° aralığında elde edilmiştir.

CIS, CIS-400 ve CIS-500 ince filmlerine ait oda sıcaklığındaki XRD desenleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Filmlere ait X-ışını kırınım desenleri incelendiğinde piklerin şiddetlerinin büyük, genişliklerinin dar olduğu görülmüştür. Bu durum filmlerde kristallenmelerin iyi olduğu anlamına gelmektedir.

Tavlama sıcaklığının artmasıyla kristalleşmenin daha baskın hale geldiği, pik pozisyonlarının neredeyse değişmediği ve şiddetlerinin arttığı gözlenmiştir. Buna bağlı olarak filmlerin kristal yapıları incelendiğinde en iyi kristal yapının CIS-500 numunesinde olduğu görülmüştür. Numunelerin XRD desenleri incelendiğinde görülen farklı şiddetlerdeki pikler filmlerin polikristal yapıda olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.2:** CIS CIS-400 ve CIS-500 ince filmlerinin XRD sonuçları.

Pik değerleri CIS numunesi için  $2\theta = 21,23^\circ, 23,60^\circ, 26,48^\circ, 44,34^\circ$ , CIS-400 numunesi için  $2\theta = 21,29^\circ, 23,63^\circ, 25,03^\circ, 26,28^\circ, 44,36^\circ$  ve CIS-500 numunesi için  $2\theta = 21,32^\circ, 23,67^\circ, 24,90^\circ, 26,36^\circ, 44,02^\circ$  olarak ölçülmüştür.  $2\theta = 26,36^\circ$  de gözlenen pik tavlamaya bağlı olarak baskın hale geçmekte ve  $500^\circ\text{C}$ 'de tavlanan örnek için en baskın pik olduğu görülmektedir. Çözülme yoluyla elde edilen  $\text{CdIn}_2\text{Se}_4$  bileşikleri için (111), (202) ve (311) düzlemlerine karşı gelen  $2\theta$  değerleri  $26,528^\circ, 44,009^\circ$  ve  $52,124^\circ$  olmak üzere üç ana pik gözlenmiştir (Adpakpang 2010). Yine elektrokimyasal olarak İTO üzerine kaplanan  $\text{CdIn}_2\text{Se}_4$  filmlerinin XRD ölçümlerinde baskın difraksiyon pikinin  $2\theta = 26,44^\circ$  de gözlendiği ve bu pikin  $\text{CdIn}_2\text{Se}_4$  oluşumunu desteklediği ve bu pike karşı gelen düzlemin (002) olduğu rapor edilmiştir (Ahn 2007). XRD sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması sonucunda  $\text{CdIn}_2\text{Se}_4$  yapısının oluştuğunu ve baskın pikin  $26,528^\circ$ 'ye karşı geldiği görülmüştür.

## 4.2 CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> İnce Filmlerinin Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi

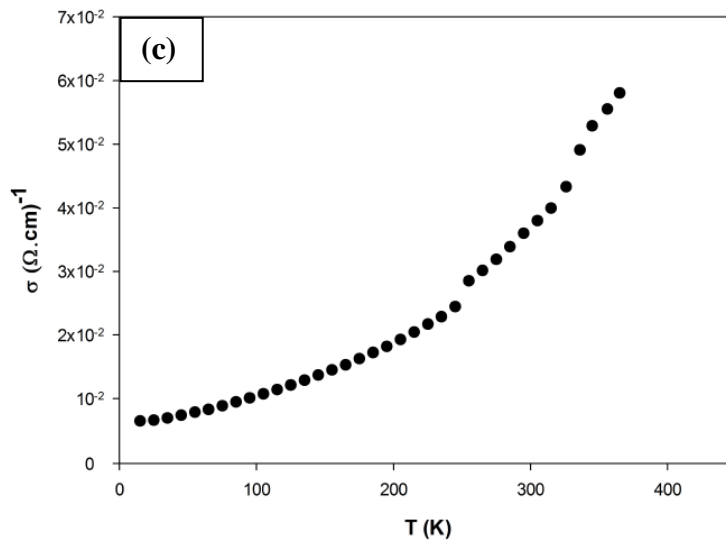
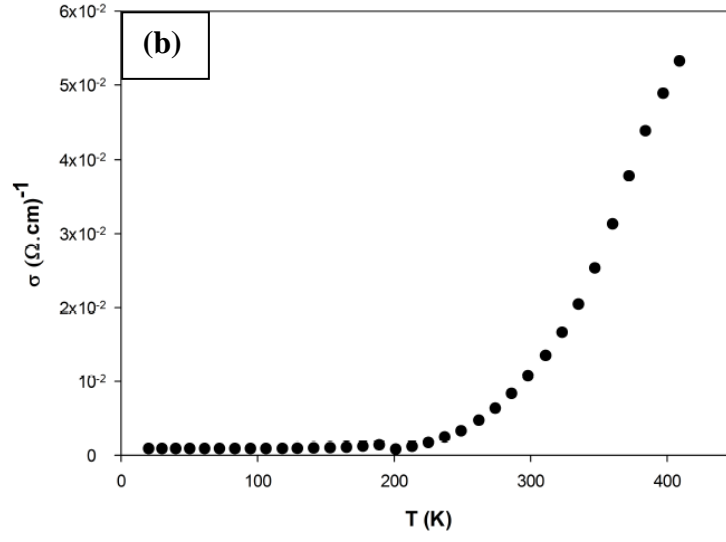
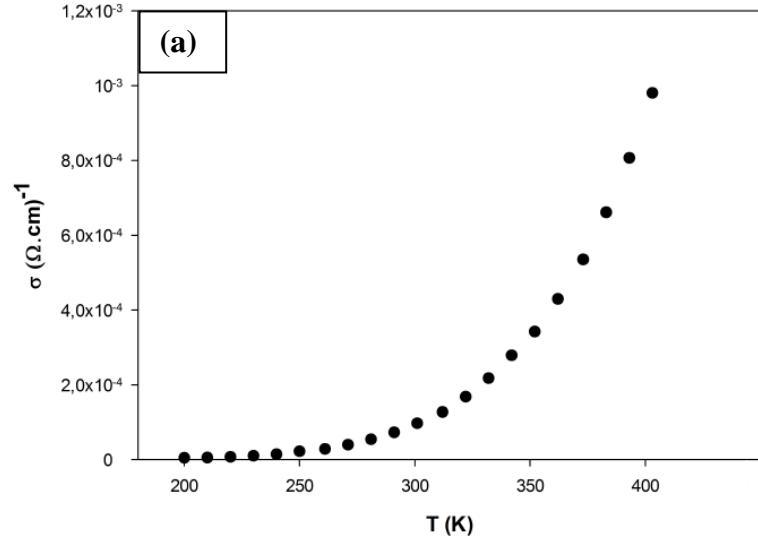
### 4.2.1 Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sonuçları

CIS, CIS-400 ve CIS-500 numunelerinin sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik özelliklerinin belirlenebilmesi için Van der Pauw yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler 10 K ile 400 K sıcaklık aralığında helyum soğutmalı kriyostat içerisinde yapılmıştır. Numunelerin iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.3'de verilmiştir. Grafiklerden görülebileceği gibi numunelerin iletkenlikleri sıcaklıkla üstel olarak değişmektedir ve tipik yarıiletken özelliği göstermektedirler. Yarıiletken numunelere ait oda sıcaklığındaki (300 K) iletkenlik ve özdirenç değerleri Tablo 4.5'de verilmiştir. Tavlama sıcaklığı arttıkça filmlerin oda sıcaklığında özdirençlerinin azaldığı belirlenmiştir.

**Tablo 4.5:** CIS, CIS-400 ve CIS-500 örneklerine ait oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik ve özdirenç değerleri.

| Numune  | Özdirenç ( $\rho$ ) ( $\Omega.cm$ ) | İletkenlik ( $\sigma$ ) ( $\Omega.cm$ ) <sup>-1</sup> |
|---------|-------------------------------------|---|
| CIS     | $1,03 \times 10^4$                  | $9,72 \times 10^{-5}$                                 |
| CIS-400 | $9,30 \times 10^1$                  | $1,08 \times 10^{-2}$                                 |
| CIS-500 | $2,63 \times 10^1$                  | $3,80 \times 10^{-2}$                                 |





Şekil 4.3: (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 ince filmlerinin iletkenliklerinin sıcaklıkla değişim grafikleri.

Yarıiletken ince filmlerin iletim mekanizmalarının araştırılması amacıyla elektriksel iletkenlik değişimleri

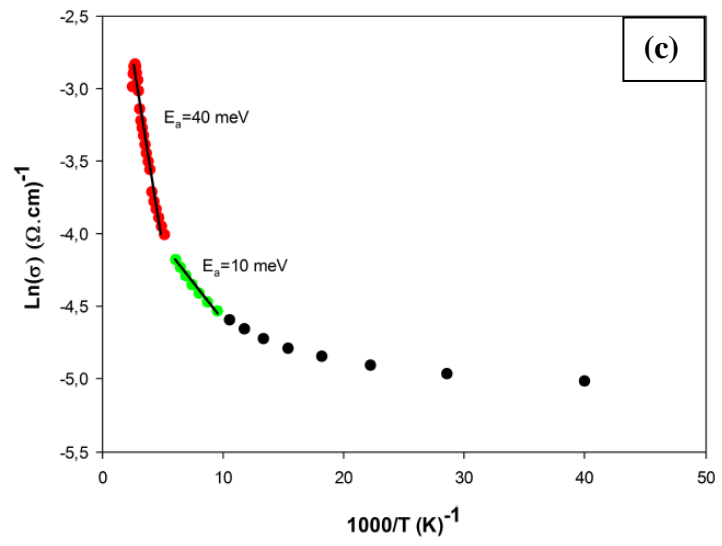
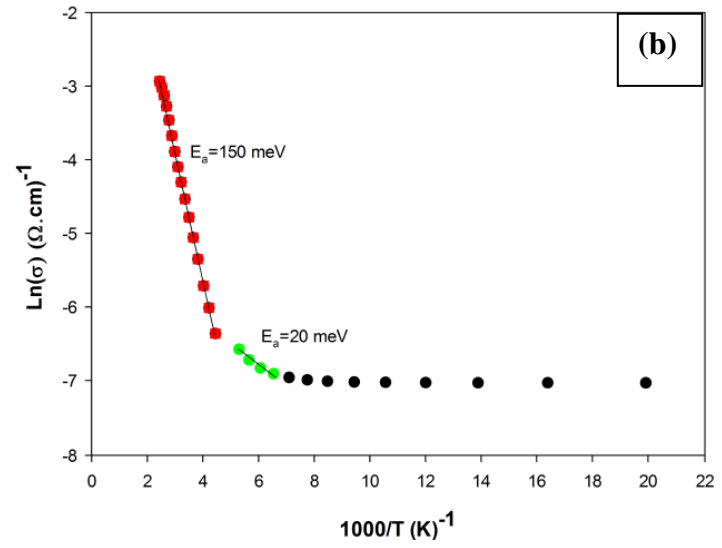
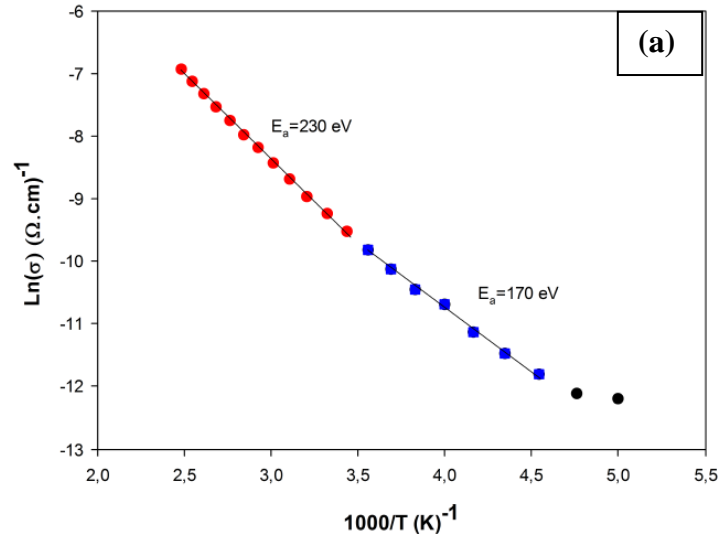
$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (4.1)$$

ile verilen genel iletkenlik ifadesine göre analiz edilmiştir. Şekil 4.4’de  $\ln(\sigma)$ - $1000/T$  grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerin lineer olduğu sıcaklık bölgelerinin eğimi kullanılarak o sıcaklıklara ait aktivasyon enerjileri hesaplanabilir. Denklem (4.1)’e göre elektriksel iletkenlik verileri analiz edilmiş ve numunelerin farklı sıcaklık bölgelerinde farklı aktivasyon enerjilerine sahip oldukları görülmüştür. Elde edilen aktivasyon enerji değerleri Tablo 4.6’de verilmiştir.

**Tablo 4.6:** CIS, CIS-400 ve CIS-500 ince filmlerinin farklı sıcaklık bölgelerindeki aktivasyon enerjileri.

| Numune         | $E_{a1}$ (meV)          | $E_{a2}$ (meV)          |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>CIS</b>     | <b>230</b><br>(291-403) | <b>175</b><br>(220-281) |
| <b>CIS-400</b> | <b>150</b><br>(225-409) | <b>20</b><br>(141-189)  |
| <b>CIS-500</b> | <b>40</b><br>(195-385)  | <b>10</b><br>(105-165)  |

Tablo 4.6 incelendiğinde her bir numune için sıcaklık arttıkça aktivasyon enerjisinin arttığı görülmektedir. Bu durumda, termal enerjinin artması ile daha derin seviyelerdeki elektronların uyarıldığı ve iletme katkı sağladığı söylenebilir. Alttaş sıcaklığının artmasıyla her sıcaklık aralığında aktivasyon enerjileri azalmaktadır. Bu durumun görülmesinin sebebi alttaş sıcaklığının artmasıyla derin tuzak seviyelerinin yok olmuş olması şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4.4: (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 ince filmlerinin  $\ln(\sigma)$ - $1000/T$  değişim grafikleri.

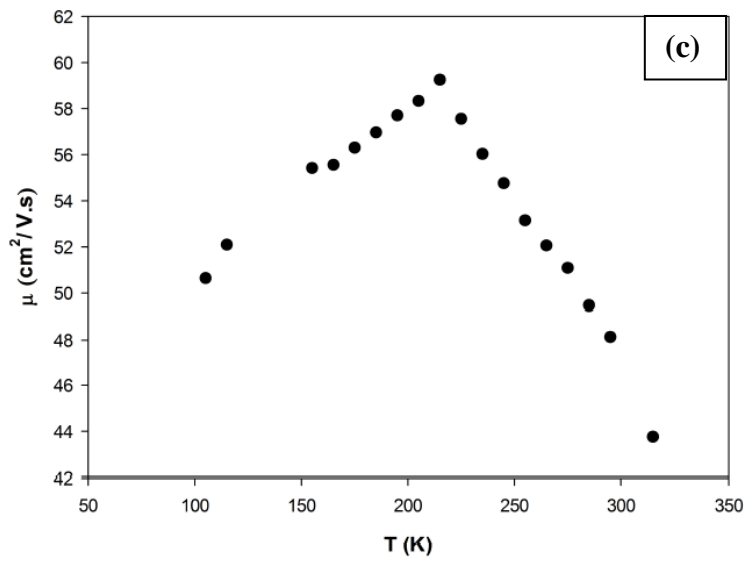
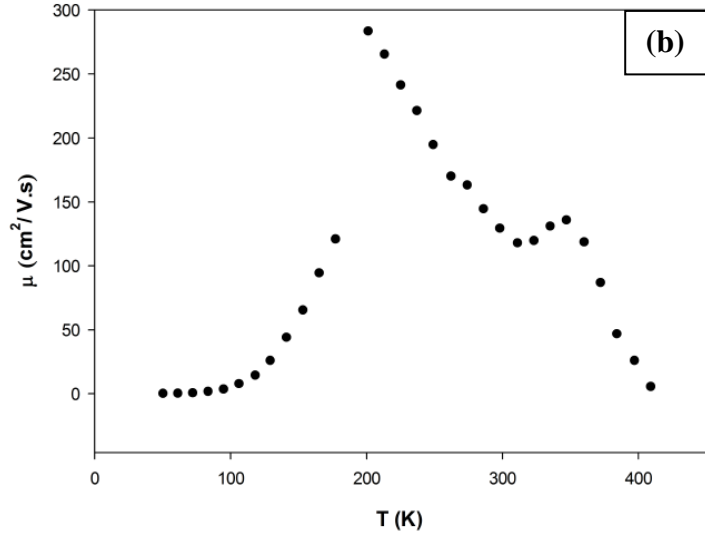
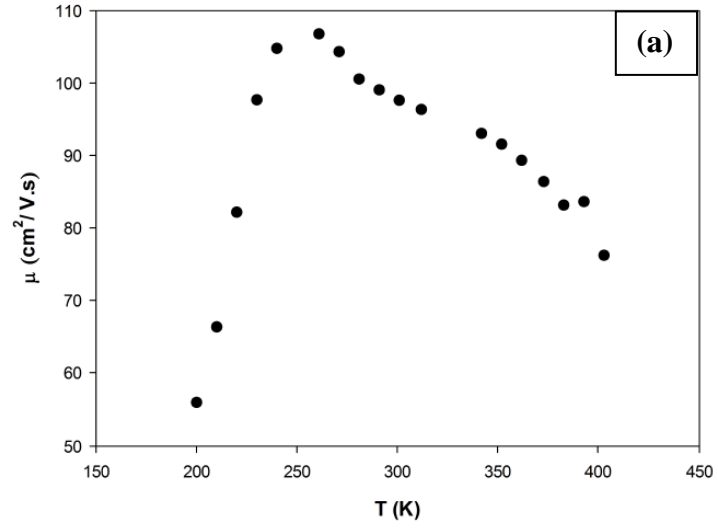
#### 4.2.2 Hall Etkisi Ölçüm Sonuçları

Hall etkisi ölçümleri Van der Pauw geometrisine uygun şekilde hazırlanmış olan ince film numuneler için 40 K ile 420 K sıcaklık aralığında yapılmıştır. Ölçümler sırasında film yüzeyine dik doğrultuda 1,2 T büyüklüğünde düzgün bir manyetik alan uygulanmıştır. Hall etkisi ölçümleri ile yarıiletken örneklerin taşıyıcı yoğunluğu ( $n$ ), taşıyıcı türü, Hall voltajı ( $V_H$ ), mobilitesi ( $\mu$ ) değerleri elde edilmiştir. CIS, CIS-400 ve CIS-500 numunelerine ait mobilite-sıcaklık değişim grafikleri Şekil 4.5’de verilmiştir. Ayrıca Hall etkisi ölçüm sonuçlarının oda sıcaklığındaki değerleri Tablo 4.7’de verilmiştir.

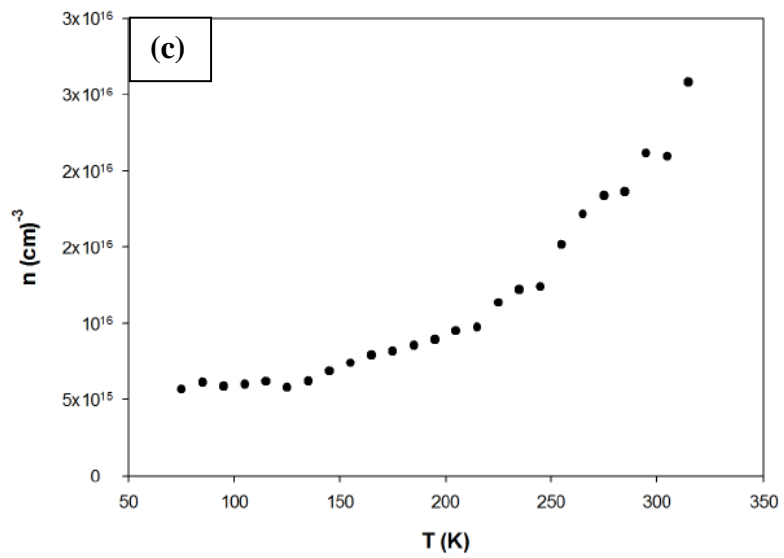
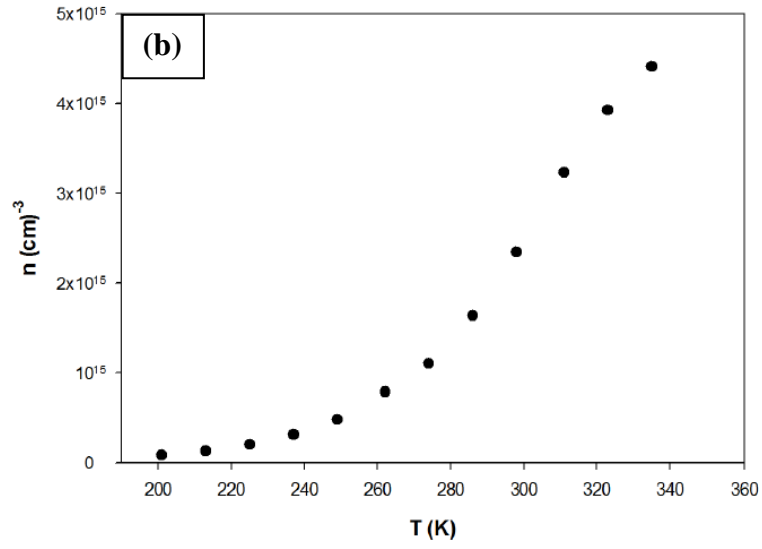
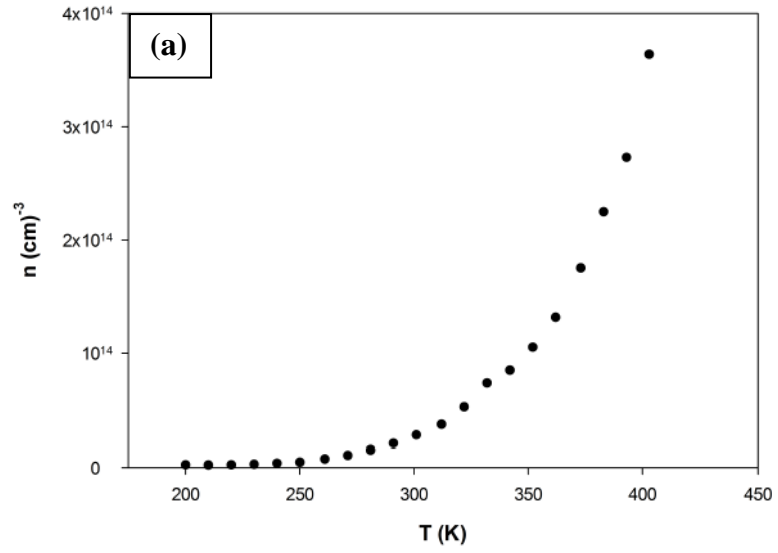
Tablo 4.7’den görülebileceği gibi sıcaklığın artmasıyla oda sıcaklığındaki taşıyıcı yoğunluğu artmaktadır. Numunelere ait taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı grafikleri Şekil 4.6’da verilmiştir. CIS numunesinde mobilite, sıcaklığın artmasıyla 250 K sıcaklığa kadar artmakta daha yüksek sıcaklıklar için azalmaktadır. CIS-400 ve CIS-500 numunelerinde mobilite, sıcaklığın artmasıyla yaklaşık olarak 215 K sıcaklığa kadar artmakta ve daha yüksek sıcaklıklarda azalmaktadır.

**Tablo 4.7:** CIS, CIS-400 ve CIS-500 numuneleri için oda sıcaklığında Hall etkisi ölçüm sonuçları.

| Numune  | Sıcaklık (T) | $n (cm)^{-3}$         | $\mu (cm^2/V.s)$ | $\rho (\Omega.cm)$ | tip |
|---------|--------------|-----------------------|------------------|--------------------|-----|
| CIS     | 300          | $2,82 \times 10^{13}$ | 97,6             | $1,03 \times 10^4$ | n   |
| CIS-400 | 300          | $2,35 \times 10^{15}$ | 130,0            | $9,30 \times 10^1$ | n   |
| CIS-500 | 300          | $2,10 \times 10^{16}$ | 51,3             | $2,63 \times 10^1$ | n   |

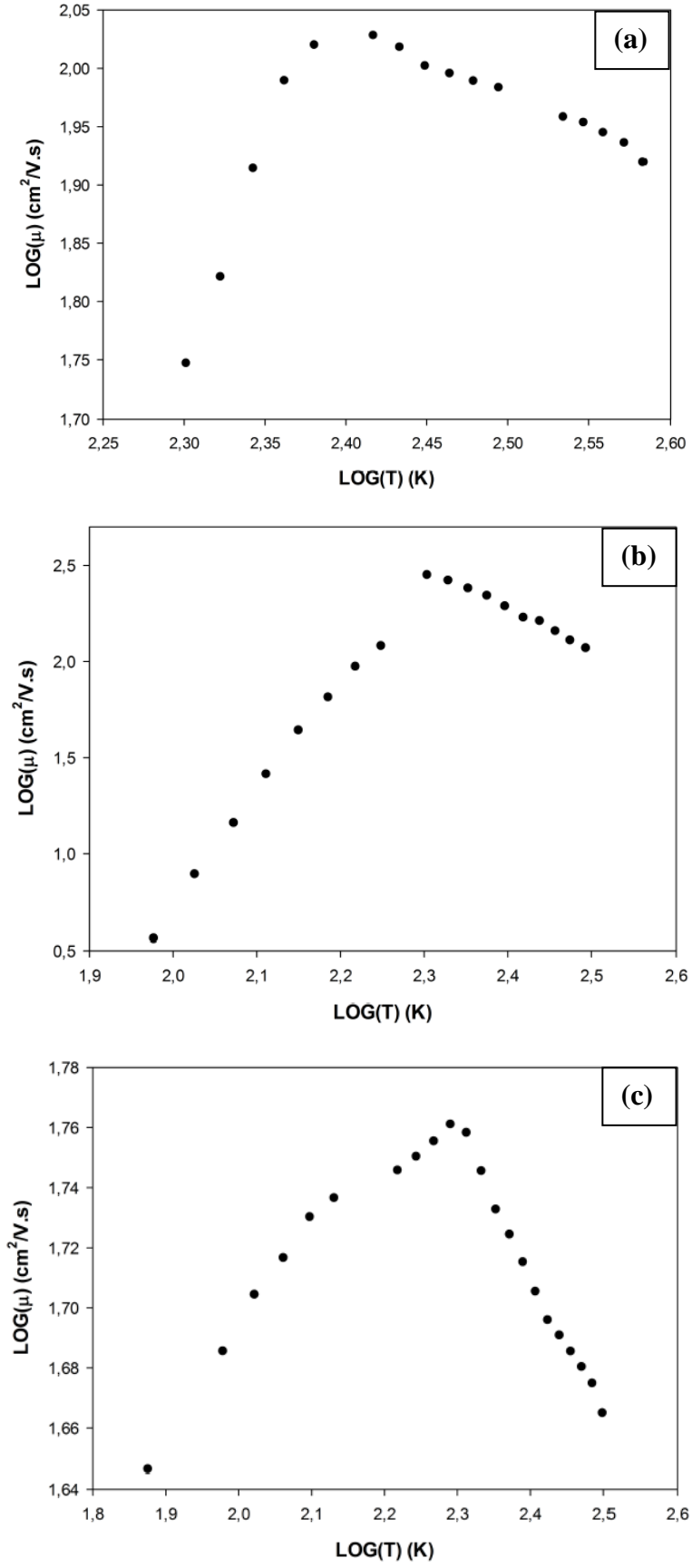


Şekil 4.5: (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 numunelerine ait mobilite-sıcaklık değişim grafikleri.



Şekil 4 6: (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 numunelerine ait taşıyıcı yoğunluğu- sıcaklık değişim grafikleri.

Film üretim sürecinde yapıda oluşan kusurlar (safsızlıklar, dislokasyonlar) taşıyıcıların örgü içerisinde bu kusurlardan saçılarak hareketlerinin sınırlandırılmasına neden olur (Kılıç 2006). Yarıiletken numunelerdeki saçılma mekanizmaları mobilitenin sıcaklığa üstel bağlılığı araştırılarak belirlenebilir. Bu bağlılık  $\mu \sim T^n$  şeklindedir. Burada  $n$  değeri baskın saçılma mekanizması ile ilgili doğrudan bilgi vermektedir.  $\text{LOG}(\mu)$ - $\text{LOG}(T)$  değişim eğrisi analiz edilmiş ve  $n$  değerleri elde edilmiştir. Düşük sıcaklıkta yavaş hareket eden taşıyıcılar safsızlıkların yakınından geçerken Coulomb kuvvetinin etkisiyle saçılmaya uğrarlar. Yüksek sıcaklıklarda ise örgü titreşimlerinden kaynaklanan saçılma mekanizması baskındır. Bu saçılma mekanizmasında taşıyıcılar safsızlıklara oranla örgü titreşimlerinden (fononlardan) daha çok saçılırlar (Schubert 2009; Sheng 1977 ). CIS numunesinde 250 K sıcaklığa kadar safsızlık saçılma mekanizması baskın iken daha yüksek sıcaklıklarda fonon saçılma mekanizmasının baskın olduğu söylenebilir. CIS-400 ve CIS-500 numunelerinde yaklaşık 215 K sıcaklığa kadar safsızlık saçılma mekanizmasının, daha yüksek sıcaklıklarda örgü titreşimi saçılma mekanizmasının baskın olduğu söylenebilir.



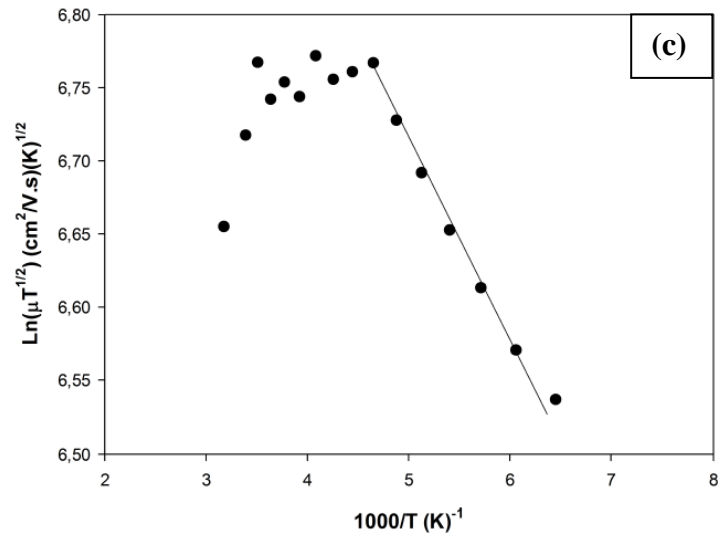
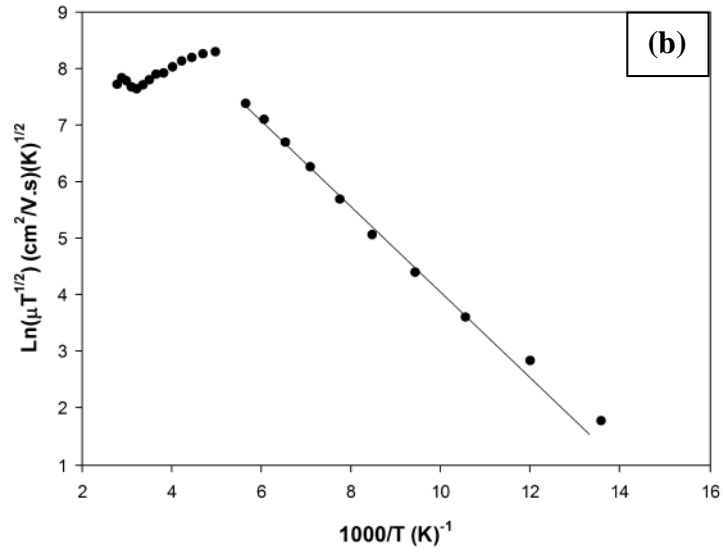
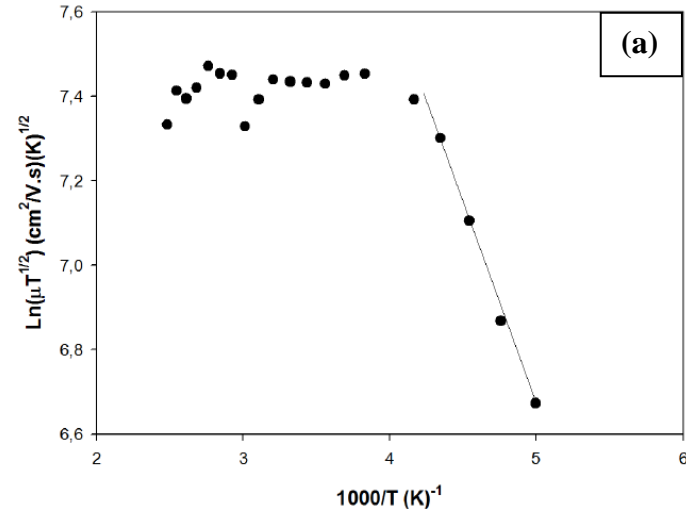
**Şekil 4.7:** (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 numunelerinin  $\text{LOG}(\mu)$ - $\text{LOG}(T)$  değişim grafikleri.



Sıcaklığa bağlı mobilite ölçümlerinden elde edilen veriler temoiyonik emisyon iletim modeline göre analiz edilmiştir (Seto 1975). Bu modele göre yük taşıyıcılar tanecik sınırında oluşan potansiyel engeline yüksek sıcaklıklarda kazandıkları termal enerji ile aşabilirler. Taşıyıcıların mobilitelerinin tanecik sınırı bariyer yüksekliği ile ilişkisi;

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{-q\varphi_b}{k_B T}\right) \quad (4.2)$$

şeklindedir. Burada  $\mu_0$  bir sabit ve  $\varphi_b$  tanecik sınırı bariyer yüksekliğidir.  $\ln\left(\mu T^{\frac{1}{2}}\right) - 1000/T$  değişim grafiğinin eğimi kullanılarak tanecik sınırı bariyer yüksekliği bulunabilir. CIS, CIS-400 ve CIS-500 numuneleri için elde edilen tanecik sınırı bariyer yüksekliği sırasıyla 77,8 meV, 60,2 meV ve 10,5 meV şeklindedir. Tavlama etkisiyle yarıiletken numunelerde tanecik sınırında oluşan bariyer yüksekliğinin azaldığı belirlenmiştir.



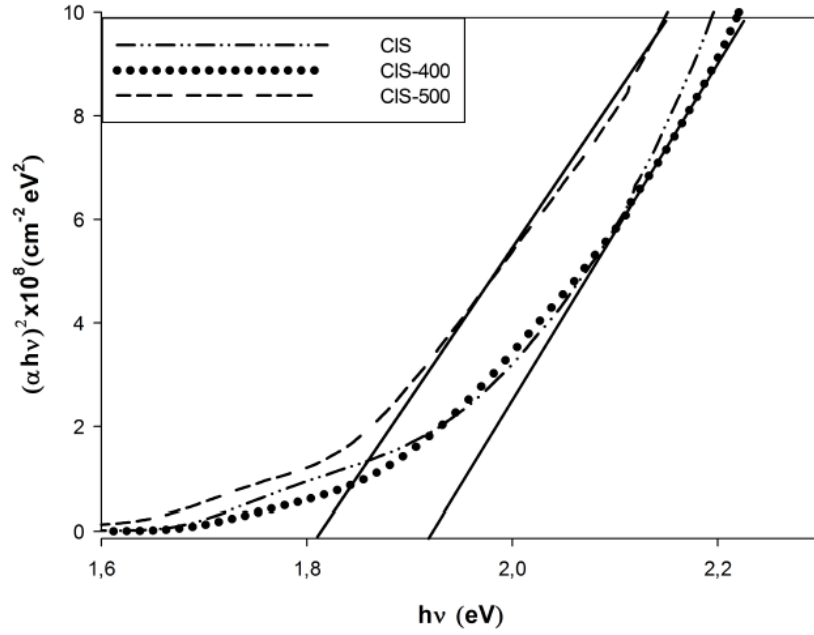
Şekil 4.8: (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 ince filminin  $\text{Ln}(\mu T^{1/2}) - 1000/T$  değişim grafikleri.

### 4.3 CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> İnce Filmlerinin Optik Özelliklerinin İncelenmesi

#### 4.3.1 Optik Soğurma Ölçüm Sonuçları

Örneklerin optik soğurma ölçümleri; oda sıcaklığında (300K), 190-1100 nm dalga boyu aralığında, UNICO SQ 2802 UV/VIS spektrometre cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm verileri ile optik bant aralığını belirlemek amacıyla  $(\alpha h\nu)^n - h\nu$  grafikleri doğrudan geçiş için n=2 ve indirek geçiş için n=1/2 alınarak analiz edilmiş ve yapılan analiz sonucunda numunelerin bant yapılarının  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  ilişkisine uyduğu ve tüm örneklerin doğrudan geçişli bant aralığına sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.9'de de görüldüğü gibi  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  değişimi doğrusal olup yasak enerji aralığının direkt olduğunu göstermektedir. CIS ve CIS-400 örneklerinin yasak enerji aralıkları yaklaşık olarak birbirine eşit olup 1,91 eV civarındadır. CIS-500 örneğinin ise yasak enerji aralığı tavlama etkisiyle 1,81 eV civarına kaydığı gözlenmiştir. Sprey piroliz yöntemiyle hazırlanan CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerinde yasak enerji aralığı 1,92 eV (Nikale ve ark. 2002) ve elektrodepolama yöntemi ile elde edilen CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> örneklerinde 2,16 eV direkt bant aralığı rapor edilmiştir (Hankare 2006). Yine elektrodepolama yöntemi ile elde edilen CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> örneklerinde yasak enerji aralığının direkt ve 1,88 eV olduğu bulunmuştur (Ahn ve ark. 2007).

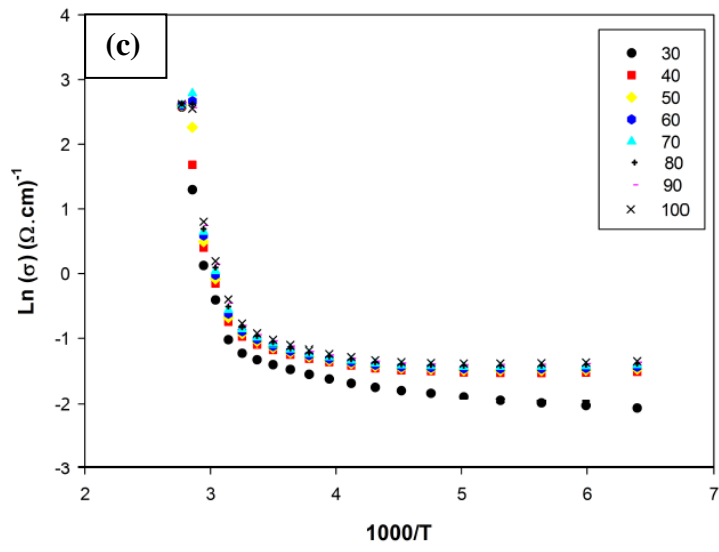
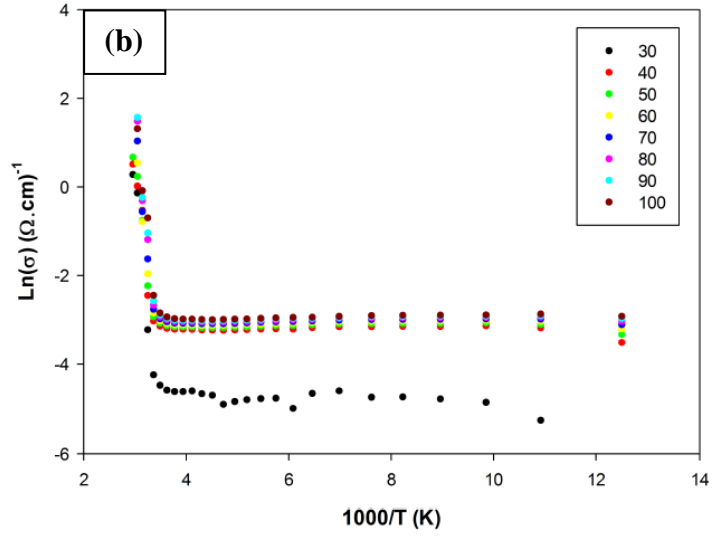
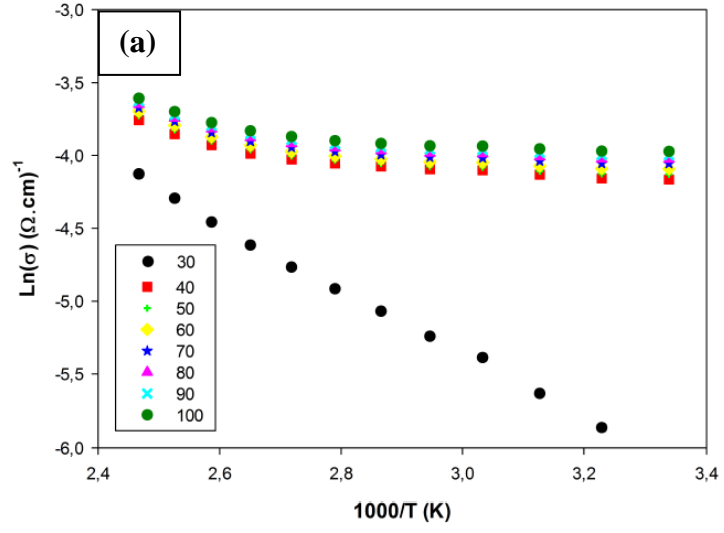


**Şekil 4.9:** CIS, CIS-400 ve CIS-500 ince filmlerinin soğurma katsayısının foton enerjisine göre değişim grafiği.

### 4.3.2 Fotoiletkenlik Ölçüm Sonuçları

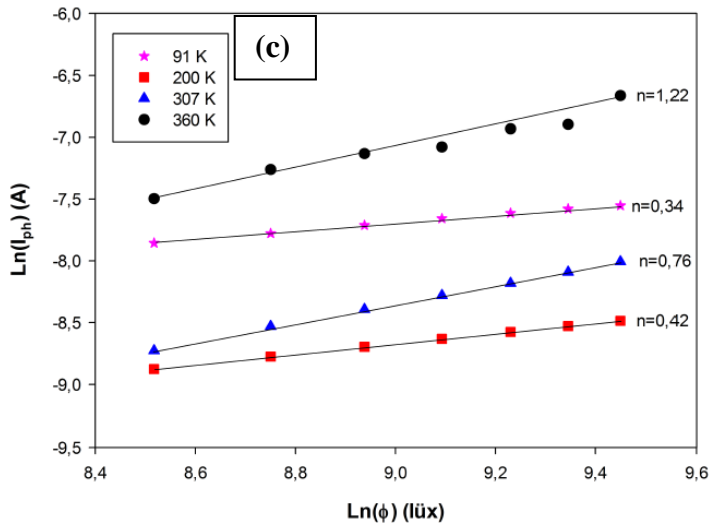
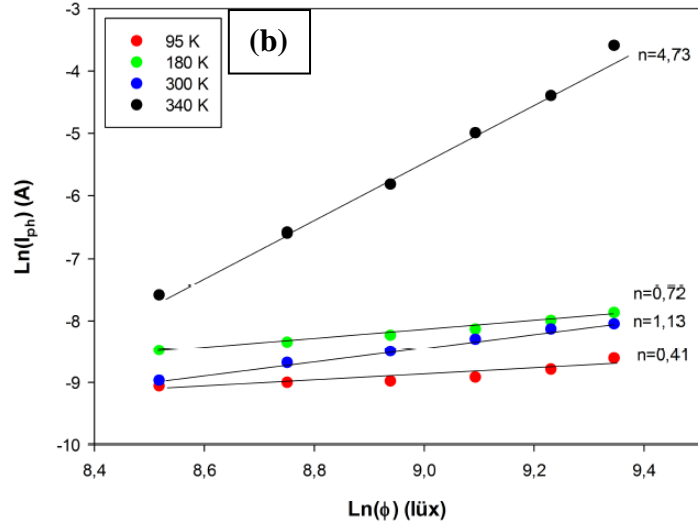
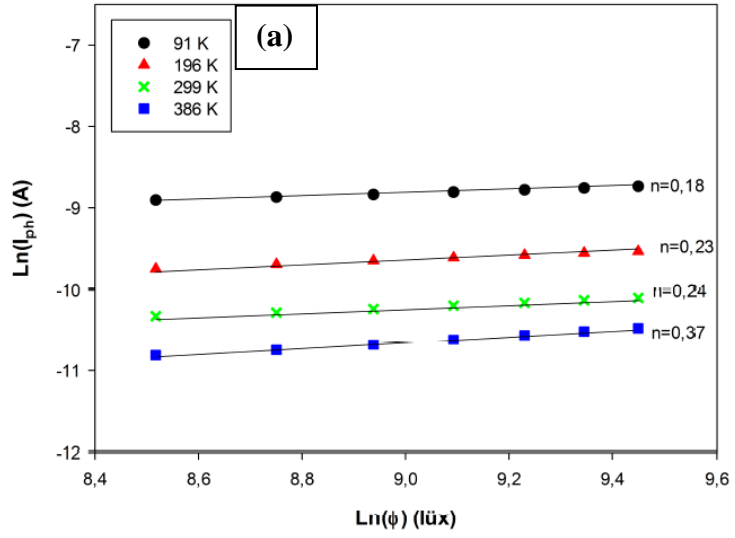
CIS, CIS-400 ve CIS-500 örneklerine ait ışık şiddetine bağlı fotoiletkenlik ölçümleri 80-420 K sıcaklık aralığında yapılmıştır. Numunelere sırasıyla; 50 (V/cm), 70 (V/cm) ve 40 (V/cm) büyüklüğünde elektrik alan uygulanmıştır. İnce filmlerin farklı ışık şiddetlerinde elde edilen iletkenlik-sıcaklık değişim grafikleri Şekil 4.10'de verilmiştir.

CIS numunesinde ışık şiddeti arttıkça iletkenlikte artış olduğu Şekil 4.10'de görülmektedir. Tavlanmış olan CIS-400 ve CIS-500 numunelerine uygulanan ışık şiddeti arttıkça iletkenliklerinin düşük sıcaklık bölgesinde arttığı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık bölgesinde ışık şiddetinin iletkenliğe belirgin bir etkisinin olmamasının sebebi sıcaklık etkisiyle tuzak seviyelerinin iyonize olması ve buradan iletkenliğe gelen katkının azalması şeklinde açıklanabilir.



**Şekil 4.10:** (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 numunelerinin farklı ışık şiddetlerindeki iletkenliklerinin sıcaklıkla değişim grafikleri.

Fotoiletkenliğin ışık şiddetine bağlılığı dengede olmayan foto-taşıyıcıların yeniden birleşme mekanizmaları ile açıklanır. Yeniden birleşme merkezlerinin karakteristiği fotoakımın ışık şiddetine olan bağlılığını farklı sıcaklıklarda ölçülmesi ile belirlenebilir. Fotoakımın ışık şiddetine bağımlılığı  $I_{ph} \sim \phi^m$  şeklindedir (Bube 1960). Burada  $m$  değeri dengede olmayan taşıyıcıların yeniden birleşme mekanizmasının bir fonksiyonudur.  $m$  değerinin 0,5 ile 1 arasında değerlere sahip olması yeniden birleşme mekanizmasının tek bir tuzak seviyesi üzerinden gerçekleştiğini göstermekte olup,  $m < 1$  değeri bimoleküler yeniden birleşim mekanizmalarına karşı gelmektedir.  $m > 1$  değeri ise yasak enerji aralığında bulunan tuzak seviyelerinin sürekli dağılımını gösterir (Gölcür 2012). CIS, CIS-400 ve CIS-500 numunelerine ait değişik sıcaklıktaki fotoakım ışık şiddeti değişimleri Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11: (a) CIS, (b) CIS-400 ve (c) CIS-500 numunelerine ait fotoakım-ışık şiddeti değişim grafikleri.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada termal buharlaştırma yöntemiyle 300 °C alttaş sıcaklığında üretilmiş ve 400 °C ve 500 °C’ de tavllanmış CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerinin elektriksel, yapısal ve optik özellikleri incelenmiştir.

Filmlerin yapısal ve stokiometrik özellikleri X-ışını kırınımı EDS yöntemi ile araştırılmıştır. Kaynak madde olarak kullanılan CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiğinin 1:2:4 stokiometrik oranına uyduğu gözlenmiştir. Üretilen CIS, CIS-400 ve CIS-500 ince filmlerine ait SEM görüntüleri 15 kV hızlandırma gerilimi ve 100 000 büyütme oranında elde edilmiştir. Tavlama etkisi ile tanecik boyutunun belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür. CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> ince filmlerinin yapısal özelliklerinin incelenmesi için XRD analizleri yapılmıştır. Filmlerin X-ışını kırınım desenleri 1,54 Å dalga boylu X-ışını demeti kullanılarak 3° – 80° aralığında elde edilmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla kristalleşmenin daha baskın hale geldiği, pik pozisyonlarının neredeyse değişmediği ve şiddetlerinin arttığı gözlenmiştir. Buna bağlı olarak filmlerin kristal yapıları incelendiğinde en iyi kristal yapının CIS-500 numunesinde olduğu görülmüştür.

Elde edilen CIS, CIS-400 ve CIS-500 numunelerinin iletkenlikleri sıcaklıkla üstel olarak değişmekte ve tipik yarıiletken özelliği göstermekte olduğu görülmüştür. Yarıiletken numunelere ait oda sıcaklığındaki (300 K) iletkenlik ve öz direnç değerleri belirlenmiş ve tavlama sıcaklığı arttıkça filmlerin oda sıcaklığında öz dirençlerinin azaldığı görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda tavllanmış olan CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> bileşiğinin Ln( $\sigma$ )-1000/T grafiklerinin lineer olduğu sıcaklık bölgelerinin eğimi kullanılarak o sıcaklıklara ait aktivasyon enerjileri hesaplanmış ve elektriksel iletkenlik verileri analiz edilmiş ve numunelerin farklı sıcaklık bölgelerinde farklı aktivasyon enerjilerine sahip oldukları görülmüştür.



Elde edilen filmler için Hall etkisi ölçümleri 40 K ve 420 K aralığında gerçekleştirilmiş ve filmlerin n tipi iletkenliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tavlama sıcaklığının artmasıyla ince filmlerin taşıyıcı yoğunluğunun arttığı ve mobilite değerlerinin ise sıcaklığa bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir.

CIS numunesinde 250 K sıcaklığa kadar safsızlık saçılma mekanizması baskın iken daha yüksek sıcaklıklarda fonon saçılma mekanizmasının baskın olduğu görülmüştür. CIS-400 ve CIS-500 numunelerinde yaklaşık 215 K sıcaklığa kadar safsızlık saçılma mekanizmasının, daha yüksek sıcaklıklarda örgü titreşimi saçılma mekanizmasının baskın olduğu belirlenmiştir.

Sıcaklığa bağlı mobilite ölçümlerinden elde edilen veriler temoiyonik emisyon iletim modeline göre analiz edilmiş ve bu modele göre tanecik sınırı bariyer yüksekliği hesabi yapılmıştır. CIS, CIS-400 ve CIS-500 numuneleri için elde edilen tanecik sınırı bariyer yüksekliği sırasıyla 77,8 meV, 60,2 meV ve 10,5 meV şeklinde olduğu hesaplanmıştır. Tavlama etkisiyle yarıiletken numunelerde tanecik sınırında oluşan bariyer yüksekliğinin azaldığı belirlenmiştir.

Oda sıcaklığında 190-1100 nm dalga boyu aralığında yapılan optik soğurma ölçümleri ile filmlerin yasak enerji aralıkları belirlenmiştir. CIS ve CIS-400 örneklerinin yasak enerji aralıkları yaklaşık olarak birbirine eşit olup 1,91 eV civarındadır. CIS-500 örneğinin ise yasak enerji aralığı tavlama etkisiyle 1,81 eV civarına kaydığı gözlenmiştir. Yapılan analiz sonucunda numunelerin bant yapılarının  $(\alpha hv)^2 - hv$  değişimi doğrusal olup yasak enerji aralığının direkt olduğunu göstermektedir.

Sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ölçümleri ile filmlerin ışığa karşı duyarlılıkları 80 K ve 420 K sıcaklık aralığında araştırılmıştır. CIS numunesinde ışık şiddeti arttıkça iletkenlikte artış olduğu, tavllanmış olan CIS-400 ve CIS-500 numunelerine

uygulanan ışık şiddeti arttıkça iletkenliklerinin düşük sıcaklık bölgesinde arttığı görülmüştür.

## 6. KAYNAKLAR

Adpakpang, K., Sarakonsri, T., Isoda, S., Shinoda, Y., Thanachayanont, C., “Synthesis of  $\text{CdIn}_2\text{Se}_4$  compound used as thermoelectric materials via the solution method”, *Journal of Alloys and Compounds*, 500, 259–263, (2010) .

Ahn, J.H., Cai, G., Mane, R. S., Todkar, V. V., Shaikh, A. V., Chung, H., Yoon, M. Y., Han, S. H., “Electrochemically deposited photoactive  $\text{CdIn}_2\text{Se}_4$  thin films: Structural and optical studies”, *Applied Surface Science*, 253, 8588–8591, (2007).

Akaltun, Y., “CdSe, ZnSe ve  $\text{CdxZn}_{1-x}\text{Se}$  Yarıiletken İnce Filmlerinin Sılar Tekniği ile Büyütülmesi Yapısal, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2006).

Aksoy, Ç., “ $(\text{In}_{10}\text{Ga}_{80})\text{Se}$  Yarıiletken Kristalinin ve Amorf İnce Filmlerinin Doğrusal Olmayan Optik Soğurma Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2011).

Bostancı, H., “Amorf InTe Yarıiletken Malzemesinin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2006).

Brennan, K. F., “Introduction to Semiconductor Devices”, Cambridge University Press, New York, (2005).

Brodsky, M. H., “Amorphous Semiconductors”, Springer Verlag, Berlin, (1979).

Brundle, C. R., Eves, C. A., Wilson, J. S., “Encyclopedia of Materials Characterization”, Butterworth-Heinemann, ISBN (0-7506-9168-8), (1992).

Bube, R. H., “Photoconductivity of Solids”, John Wiley & Sons Inc., London, (1960).

Campbell, B. K., “Investigations of Conduction Mechanisms of Ion-Conducting, Bridging Memory Devices (CBRAM/PMC/ECM)”, Master Thesis of Science in Electrical Engineering, *Boise State University*, (2012).

Cardarelli, F., “Materials Handbook-A Concise Desktop Reference”, Springer, London, New York, (2008).

Colinge, J. P., ve ark., “*Physics of Semiconductor Devices*”, Nobel Akademik Yay, Ankara, (2011).

Çelik, A., “EDXRF Tekniği Kullanarak CuInSe<sub>2</sub> İnce Filminin Kalınlık Tayini”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, (2006).

Çolakoğlu, T., “The Effect of Post-Annealing Process On The Physical Properties of Silver-Indium-Selenium Ternary Semiconductor Thin Films Deposited by E-Beam Technique”, Doktora Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2009).

Dari, N. A., “Transport Characteristics of Amorphous Semiconductors in The Dilute Carrier Regime: A Variable Range Hopping Treatment”, Master Thesis of Science, *University of Missouri, Kansas City*, (2008).

Demirci, B., “İndiyum Katkılı ZnO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2006).

Erdoğan, H., “P-tipi Çinko Oksit (ZnO) Yarıiletken İnce Filminin Atmalı Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi ile Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, (2010).

Erol, A., ve ark., “*Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*”, Seçkin Yay., Ankara, (2013).

Flegler, S. L., Heckman, J., Klomparens, K. L., “Scanning and Transmission Elektron Microscopy: An Introduction”, Oxford Univ. Press, ISBN (0-19-510751-9), (1993).

Gölcür D., “CdInTe İnce Filmlerinin Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2012).

Gündem, E. Ü., “Electrical and Optical Properties of Amorphous Semiconducting a-Si/A-SiN<sub>x</sub> : H Multilayer Films”, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi*, Ankara, (2001).

Gündüz, E., “*Modern Fiziğe Giriş*”, Ege Üniv. Fen Fakültesi Kitaplar Serisi, No.100, İzmir, Türkiye, (1999).

Hankare, P. P., Kokate, A. V., Asabe, M. R., Delekar, S. D., Chougule, B. K., “Properties of pulsed electrodeposited CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> thin film”, *Materials Science and Engineering*, B133, 37-41, (2006).

Huş, M., Ş., “Physical Properties of CdSe Thin Films Produced by Thermal Evaporation and E-Beam Techniques”, Yüksek Lisans Tezi, *Middle East Technical University Physics Department*, Ankara, (2006).

İlgaz, A., “GaN/AlGaN Hemt Yapılarda Saçılma Mekanizmaları”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi*, Balıkesir, (2005).

Ishii, T. and Kambe, N., “J. Crys.”, Growth, 76489, (1986).

Jenniches, H. J., “Spin Electronics”, Edited by M.J. Thornton, M. Ziese, *Lecture Notes in Physics*, vol. 569, p.172, Springer Berlin Heidelberg, (2001).

Kamaç Y., “CuGaTe<sub>2</sub> İnce Filmlerinin Yapısal Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2013).

Kaplan, R., “Optically Modulated Photoconductivity Studies on Amorphous Semiconductors”, Doktora Tezi, *University of Sheffield, Sheffield*, (1993).

Karabulut, O., “Structural, Electrical and Optical Characterization of N-an Si Implanted GaSe Single Crystal Grow by Brigman Method”, Doktora Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2003).

Kasap S., Capper P., “Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials”, Springer, New York, (2006).

Kılıç, L., “Seçici Katkılı In<sub>0,48</sub>Al<sub>0,52</sub>As/In<sub>0,57</sub>Ga<sub>0,43</sub>As Heteroeklemler Yapılarda Saçılma Mekanizmaları”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2006).

Kılınç T., “Zn<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>S İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş, (2006).

Kırmızıgül F., “CdO İnce Filmlerin Püskürtme Yöntemi ile Hazırlanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, (2008).

Kittel, C., “*Katıhal Fizikine Giriş*”, (Çevr. B. Karaoğlu), Güven Yayınları, İstanbul, (1986).

Kittel, C., “*Katıhal Fizikine Giriş*”, (Çevr. G. Önengüt, D. Önengüt), Palme Yayıncılık, Ankara, (2014).

Kojima, M., Kato, H. And Imai, A., “Electronic Conduction of Tin Oxide Thin Films Prepared by Chemical Vapor Deposition”, (1988).

Mahalingam, T., Thanikaikarasana, S., Chandramohan, R., Chung, K., Chu, J. P., Velumani, S., Rhee, J. K., “Electrosynthesis and studies on Cadmium-Indium-Selenide thin films”, *Materials Science and Engineering B*, 174, 236–241, (2010).

Mott, N. F., *J. Non-Cryst. Solids*, 1, 1, (1968).

Mott, N.F. and Davis, E.A., *Electronic Processes in Non – Crystalline Materials*, Clarendon Press Oxford Univ., London, (1971).

Nikale, V. M., Bhosale, C. H., “Properties of spray-deposited CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> thin films for photovoltaic applications”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 82, 3-10, (2004).

Nikale, V. M., Gaikwad, N. S., Rajpure, K. Y., Bhosale, C. H., “Structural and optical properties of spray-deposited CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> thin films.” *Mater. Chem. Phys.* 78,363, (2002).

Nikale, V. M., Shinde, S. S., Babar, A. R., Bhosale, C. H., Rajpure, K. Y., “Photoelectrochemical performance of sprayed n- CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> photoanodes”, *Solar Energy*, 85, 325-333, (2011).

Nikale, V. M., Shinde, S. S., Babar, A. R., Bhosale, C. H., Rajpure, K. Y., “The n-CdIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/p-CdTe heterojunction solar cells”, *20 Solar Energy*, 85, 1336–1342, (2011).

Ohring, M., “*The Materials Science of Thin Films*”, Academic Press, San Diego, (1992).

Orton, J., “*The Story of Semiconductors*”, Oxford University Press Inc., New York, (2004).

Özkan, M., “Termoionik Vakum Ark (TVA) Tekniği ile II-VI Grubu Bazı Yarıiletken Bileşiklerin İnce Filmlerinin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel

Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2010).

Pankove, J. I., “Optical Process in Semiconductors”, Princeton Press, New Jersey, USA, (1971).

Pauw, L. J., “A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape”, *Philips Res. Repts*, 13, 1-9 (No:1), (1958).

Razeghi, M., “Fundamentals of Solid State Engineering”, *Springer Science*, (2009).

Rose, A., “Concept in Photoconductivity and Allied Problems”, Rber E. Kriger Publishing Co., New York, (1978).

Schubert, E. F., “Physical Foundations of Solid State Devices”, *Rensselaer Polytechnic Institute Troy*, New York, (2009).

Seto, J. Y. W., “J. Appl. Phys.”, 46,5247, (1975).

Sheng S. L., “The Dopant Density and Temperature Depence of Electron Mobility and Resistivity in N-Type Silicon”, U.S. Government PrintingOffice, Washington, (1977).

Singh, J., ve Shimakawa, K., “Advances in Amorphous Semiconductors”, D.D. Sarma, G. Kotliar, and Y. Tokura, Eds. Boca Raton, FL, USA: CRC: Press, 2003, vol. 5, (2003).

Soylu, M., “Atmalı Katodik Vakum Ark Depolama Sistemiyle Üretilen ZnO’nun Elektriksel İletkenliği ve Isıl İşleme Değişimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, (2006).

Streetman, B. G., ve ark., “*Katıhal Elektroniği Devre Elemanları*”, Palme Yayıncılık, Ankara, (2014).

Sze, S. M., “Physics of Semicnducturs Devices”, John Wiley and Sons. 523 s. New, (1985).

Şahin, M., “Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Güneş Pillerinde Fotoiletkenlik Çalışmaları”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (1999).

Şişman, İ., “CdS, CdSe ve CdTe Bileşik Yarıiletken İnce Filmlerinin Aynı Çözeltiden Elektrokimyasal Olarak Au (111) Elektrodu Üzerine Büyütülmesi

ve AFM, STM, XRD ve Uv-Vis Spektroskopisi ile Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2006).

Takanoğlu D., “Katkısız ve Katkılı CdSe İnce Filmlerinin Optik ve Elektrik Özelliklerinin Araştırılması”, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2011).

Taner, A., “Sırlar Yöntemi ile ZnO Yarıiletken Filminin Elde Edilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2010).

Uzun, Ş., “Sol-Gel Yöntemiyle Büyütülen İndiyum Katkılı Çinko Oksit Filmlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2012).

Yacobi, B. G., “*Semiconductor Materials*”, Kluwer Academic Publishers, New York, (2003).

Yazıcı, D., “Fosfor Metal Komplekslerinin Fiziksel Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi*, Adana, (2007).

Yılmaz, K., “Investigation of InSe Thin Film Based Devices”, Doktora Tezi, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2004).



## 7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İlyas ÜNAK

Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul/ 01.08.1984

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : ilyasunak@gmail.com

İletişim Adresi : Atalar Mah. 955 Sokak No:15/4  
Pamukkale/DENİZLİ