



**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON**  
**BİRİMİ (PAUBAP)**

# BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ SONUÇ RAPORU

**PROJE NO** : 2011 BSP 003  
**PROJE TİPİ** : Başlangıç Seviyesi Projesi  
**İLGİLİ BİRİM** : Fen-Edebiyat Fakültesi  
**PROJE ADI** : Katkısız ve Katkılı CdTe İnce  
Filmlerin Elektrik ve Fotoelektrik Özelliklerinin  
Araştırılması

**PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ** :  
Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN FEF  
**ARAŞTIRMACILAR** :  
YOK

**DENİZLİ - 2014**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**

**BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ  
(PAUBAP)**

**PROJE NO : 2011 BSP 003**  
**PROJE TİPİ : Başlangıç Seviyesi Projesi**  
**İLGİLİ BİRİM : Fen-Edebiyat Fakültesi**  
**PROJE ADI : Katkısız ve Katkılı CdTe İnce**  
**Filmlerin Elektrik ve Fotoelektrik Özelliklerinin**  
**Araştırılması**

**PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ :**  
**Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN** **FEF**  
**ARAŞTIRMACILAR :**  
**YOK**

**DENİZLİ - 2014**

**Katkısız ve Katkılı CdTe İnce Filmlerin Elektrik ve  
Fotoelektrik Özelliklerinin Araştırılması**

**Proje No: 2011 BSP 003**

**Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN**

MART 2014

DENİZLİ

## BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ ONAY SAYFASI

**Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN** yürütücülüğünde hazırlanan **2011 BSP 003** nolu ve “**Katkısız ve Katkılı CdTe İnce Filmlerin Elektrik ve Fotoelektrik Özelliklerinin Araştırılması**” başlıklı **Başlangıç Seviyesi Projesi** Kesin Sonuç Raporu Pamukkale Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu’nun ....../...../20.. tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Latif ELÇİ  
Koordinatör  
......./...../20..

## ÖNSÖZ

Pamukkale Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü' deki Laboratuvarımızda yapılan 2011BSP003 nolu araştırma projesinde '**Katkısız ve Katkılı CdTe İnce Filmlerin Elektrik ve Fotoelektrik Özelliklerinin Araştırılması**' konulu çalışmamız deneysel yöntemlerle incelenmiş ve yarıiletken özelliği gösteren; katkısız ve katkılı CdTe ince filmlerinin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri, X Işını Kırınım yöntemi (XRD), sıcaklık bağımlı elektriksel iletkenlik, fotoiletkenlik ve soğurma ölçümleri ile belirlenerek, malzeme bilimi üzerine çalışan araştırmacılara hizmet verme imkanı doğacaktır. Bu çalışmaya, Başlangıç Seviyesi Projesi olarak desteklerinden dolayı Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi yöneticilerine ve çalışanlarına teşekkür ederim. Projenin tamamlanabilmesi sırasında bilgi ve deneyimleri ile bana yardımcı olan sayın Prof. Dr. Orhan KARABULUT'A TEŞEKKÜR EDERİM. Ayrıca çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen doktora öğrencimiz Duygu TAKANOĞLU' na teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Proje Yürütücüsü  
Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÖZCAN

## ÖZET

### Katkısız ve Katkılı CdTe İnce Filmlerin Elektrik ve Fotoelektrik Özelliklerinin Araştırılması

Bu çalışmanın ana amacı; optik ve elektriksel özellikleri açısından iletken ve yalıtkanlara göre farklı özellikler taşıyan ve endüstrideki kullanım açısından her geçen gün daha fazla önem kazanan yarı iletken ince filmlerin optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesidir. Periyodik tablonun II-VI. grup elementlerinden oluşan II-VI bileşikler ise IV. grup elementlerine göre daha yeni yarı iletken malzemelerdir. Mevcut ve ucuz ham maddelerden yüksek saflıkla elde edilebilmesi, uygun metotlarla kaliteli polikristal tabakalar halinde üretilebilir olması, diğer gruptaki yarı iletkenlere göre üstünlük sağlamaktadır.

Son yıllarda periyodik cetvelin II-VI grubu bileşiklerinden olan tek kristallerin optik lüminesans ve iletkenlik özellikleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu bileşikler geniş bir bant aralığına sahip olup, mor üstünden kırmızı altı spektrumuna kadar olan görünür bölgede ışımaya yaparak çok iyi bir lüminesans özelliği göstermektedir. Bu nedenle foto ve katodolüminesans ölçümleri için çok elverişli malzemelerdir. Ayrıca, II-VI grubuna dahil bileşiklerin çoğu elektrik enerjisini oldukça iyi iletmekte olup, enerji bant aralığında çok miktarda taşıyıcı iyon sürüklenmesine sahiptir. Bu nedenle kadmiyum bileşiklerinin teknolojiye elektrolüminesans, diyot, lüminesans, ekran ve güneş pili yapımında kullanılabilmesi için geniş araştırma ve incelemeler yapılmaktadır. Yarı iletken teknolojisinde, klasik Si, GaAs, InP gibi külçe yarı iletkenler dışında, gerek opto elektronik, gerekse yarı iletken aygıt üretiminde ihtiyaca uygun yeni yarı iletken ince filmlerin üretilmesi ve bu filmlerin üretim teknikleri konusundaki çalışmalar önem kazanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İnce Film, CdTe, Elektriksel Karakterizasyon, Optik Karakterizasyon

## **ABSTRACT**

### **Investigations of electrical properties of some layered semiconductors and new oksim and compexes.**

The main purpose of this study is to investigate the transport properties of some layered semiconductors and oksim complexes showing semiconductor properties with respect to band structure by means of temperature dependent conductivity measurements. Since, the solid solutions of these materials cover a wide range of the visible spectrum; the crystal band structure of this material makes it a promising semiconductor in optoelectronic devices especially in the visible and infrared ranges of the spectrum. Thus, researchers are focus on structural, electrical and optical properties of ternary wide gap semiconductors and polymeric complexes. Therefore, photoelectrical and optical properties make them a promising material for use in opto-electronic devices. These materials have very important technological applications such that these materials can be used as memory cells, switching devices, photoconductors, radiation sensors, etc. These technological applications require the knowledge of the structural, optical and transport properties. Thus, the energy levels, band gap structure, dominant transport mechanisms of these produced materials will be investigated by means of temperature dependent electrical conductivity measurements and absorption measurements. The information obtained from this study would help researchers toward applying this material in electronic technological applications.

**Keywords: Thin Films, CdTe, Electrical Characterization, Optical Characterization**

## İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER .....	i
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 CdTe'nin Yapısı .....	1
1.1 Önceki Çalışmalar .....	2
<b>2. GENEL BİLGİLER .....</b>	<b>5</b>
2.1 Yarıiletkenler.....	5
2.1.a Katkısız Yarıiletkenler .....	6
2.1.b Katkılı Yarıiletkenler.....	6
2.2 Elektriksel İletkenlik .....	7
2.2.1 Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik .....	7
2.2.2 Polimerlerde Elektriksel İletkenlik .....	7
2.3 Hall Olayı.....	8
2.4 Foto İletkenlik .....	11
2.4.1 Yarıiletkenlerde Foto İletkenlik .....	12
2.4.1.1 Elektronik Geçişler.....	12
2.4.1.1.a Soğurma ve Uyarma.....	13
2.4.1.1.b Tuzaklama ve Yakalama .....	15
2.4.1.1.c Yeniden Birleşme .....	15
2.5 Optik Soğurma.....	16
<b>3. DENEYSEL YÖNTEM .....</b>	<b>18</b>
3.1 Giriş.....	18
3.2 Kristal Sentezlenmesi .....	18
3.2.1 Büyütme Tüplerinin Temizlenmesi .....	20
3.2.2 Numunelerin Hazırlanması ve Sinterleme .....	19
3.3 İnce Film Depolama .....	19
3.3.1 Alttaşların Temizlenmesi.....	19
3.3.2 Termal Buharlaştırma Yöntemi ile İnce Film Depolama.....	20
3.4 Tavlama İşlemi .....	21
3.5 Kontak Alma İşlemleri.....	21
3.6 Elektriksel Karakterizasyon Ölçümleri.....	22
3.6.1 Sıcaklığa Bağlı Direnç Ölçümleri .....	22
3.7 Optik Ölçümler.....	23
3.7.1 Optik Soğurma Ölçümleri .....	23
3.8 Yüzey Yapısı ve Elementel Analiz.....	24
3.8.1 Taramalı Elektron Mikroskopu(SEM) Analizi .....	25
3.8.2 Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) .....	25
3.9 X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi.....	26



<b>4. Analiz ve Yorumlar.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 CdTe İnce Filmlerinin Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi .....</b>	<b>28</b>
4.1.1 SEM ve EDS Analizi.....	28
4.1.2 XRD Analizi .....	30
<b>4.2 Elektriksel Ölçümler.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3 Optik Ölçümler .....</b>	<b>32</b>
4.3.1 Fotoiletkenlik Ölçümleri.....	32
4.3.2 Optik Soğurma Ölçümleri .....	35
<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>37</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>39</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Katıların bant modeli .....	5
Şekil 2.2 : Yarıiletkenleri İçin Hall Etkisi.....	8
Şekil 2.3 : Foto iletkenlerde yaygın olan geçişler.....	13
Şekil 2.4 : Yarıiletkenlerde soğurma ve emisyon spektrumları.....	14
Şekil 2.5 : (a) Enerjisi Bant Aralığının altında olan (b) Enerjisi Bant Aralığının Üstünde Olan Fotonlar İçin Soğurma Olayı .....	16
Şekil 3.1 : Termal Buharlaştırma Sisteminin Şematik Gösterimi.....	20
Şekil 3.2 : Van der Pauw ve Şerit Kontak Geometrisinde kontak Alınmış İnce Filmler.....	22
Şekil 3.3 : Deney Düzenineğinin Şematik Gösterimi .....	23
Şekil 3.4 : Spektrometrenin Şematik Gösterimi.....	24
Şekil 4.1 : Üretilen Filmlerin SEM Görüntüleri .....	29
Şekil 4.2 : Soğuk Taban ve 400 °C' de Tavlanmış İnce Filmlerin XRD Sonuçları .....	30
Şekil 4.3 : Üretilen CdTe İnce Filmlerinin İletkenliğinin Sıcaklıkla Değişimi ..	31
Şekil 4.4 : (a) Soğuk Taban Üzerine (b) 400 °C' de Tavlanan CdTe İnce Filmlerinin Farklı Aydınlatma Şiddetlerinde İletkenliklerinin Sıcaklıkla Değişimi .....	33
Şekil 4.5 : (a) Soğuk Taban Üzerine (b) 400 °C' de Tavlanmış CdTe İnce Filmlerinin Fotoiletkenliklerinin aydınlatma şiddeti ile değişimi .....	35
Şekil 4.6 : Üretilen İnce Filmlerin Oda Sıcaklığındaki Soğurma Ölçümleri ..	36

## 1.GİRİŞ

Optik ve elektriksel özellikleri açısından iletken ve yalıtkanlara göre farklı özellikler taşıyan yarıiletken malzemeler, endüstrideki kullanım açısından her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Tek ve polikristal halde gruplandırılan yarıiletkenler, Si ve Ge gibi element halinde bulunurken, değişik yöntemlerle ikili, üçlü veya dördü bileşikler halinde de elde edilmektedir.

Son yıllarda periyodik cetvelin II-VI yarıiletken grubu bileşiklerinden olan tek kristallerin optik lüminesans ve iletkenlik özellikleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu bileşikler geniş bir bant aralığına sahip olup, mor ötesinden kızıl ötesi spektrumuna kadar olan görünür bölgede ışımaya yaparak çok iyi bir lüminesans özelliği gösterdiklerinden dolayı, foto ve katodolüminesans ölçümleri için çok elverişli malzemelerdir. Ayrıca, II-VI yarıiletken grubuna dahil bileşiklerin çoğu oldukça iyi elektriksel iletkenliğe sahip olup, enerji bant aralığında çok miktarda taşıyıcı iyon sürüklenmesine sahiptir [AKALTUN, 2006].

Buna ek olarak, nano kristal yapıya sahip malzemelerin kristal boyutlarının veya film kalınlığının değişmesi ile elektrik ve optik özelliklerinin kontrol edilebilmesi elektronik uygulamalarda yeni alanlar açmaktadır. Bu gruba dahil olan CdTe' da yüksek soğurma katsayısı ve bant yapısı itibari ile enerji dönüşüm uygulamalarında kullanılabilir. Buna ilaveten; yüksek verimli ince film transistör, ışık yayan diyot, gama ışın detektörü, opto elektronik aygıt üretimi, kızıl ötesi optik, ışığa bağımlı direnç uygulamaları, foto elektrokimyasal güneş pilleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılabilir [AKALTUN, 2006].

### 1.1 CdTe' nin Yapısı

CdTe ince filmleri geniş uygulama alanlarından dolayı son yıllarda dikkat çekici bir malzeme haline gelmiştir. Doğrudan bant aralığına sahip olması (1,48 eV) ve yüksek soğurma katsayısı nedeniyle ince film güneş pilleri ve elektro-optik

cihaz üretiminde umut vaat eden bir malzemedir. Ayrıca II-VI grubuna dahil olan bu ikili yarıiletken, p ve n olmak üzere her iki iletkenlik tipine de sahip olan tek malzemedir.

## 1.2 Önceki Çalışmalar

2001 yılında Hyeongnam ve Donghwan, CdS/CdTe birleşimli güneş hücrelerinde, CdS ısıtılmasının CdS mikroyapısına ve performansına etkisini incelemişlerdir. CdS Kimyasal çöktürme yoluyla tavlendiğinde CdS filmleri üzerinde boşluklar oluşmuş. Şekillerinde büyük boşluklar oluşmasına rağmen %20 H<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> ile tavllanmış CdS hücrelerinin performanslarını belirlemişlerdir. Bu boşluklar CdTe çöktürme sıcaklığında da oluşmuş. CdS tavlandıktan sonra yapılan gözlemlerde X-ray kırınım şekli ve optik geçirgenliğinde büyük bir değişiklik gözlenmediğini, %20 H<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> ile tavllanmış CdS güneş pillerinin ara yüzeylerinin tavllanması ve pasivasyon sonucunda en iyi performansı gösterdiğini söylemişlerdir [Hyeongnam, 2001].

2006 yılında Çalışkan, yakın mesafeli buharlaştırma yöntemi ile elde edilen CdTe filmlerin yapısal özellikleri XRD yöntemi ile araştırmıştır. Üretilen filmlerin kübik ve hekzagonal yapıda boyutları ortalama 0,1µm olan polikristal CdTe taneciklerden oluştuğunu belirlemiştir. Cam üzerine yaklaşık 4µm kalınlıkta kaplanan CdTe ince film yarıiletkeninin optik absorpsiyonun spektral değişiminden yasak enerji aralığı 1.5eV olarak belirlemiştir [Çalışkan, 2006].

2007 yılınca Zencir, yapmış olduğu çalışmada çok kristalli CdTe ince filmlerin optiksel özelliklerini incelemiş; optiksel band aralığı, zayıf soğurum bölgesinde Sellmeier fonksiyonuna uyarlanan kırılma indislerinin kuvvetli soğurum bölgesine aktarılarak elde edildiği doğrudan geçişlerin dikkate alınarak çizilen grafiklerde doğrusal bölgelerinden büyütülme işlemi gerçekleştirmiş ve filmler için band aralığını 1.53 eV olarak belirlemiştir. Vakumda büyütmenin doğal koşullarında kalınlık ve moleküler oranın bölgesel olarak değişimler gösterebileceğini söylemektedir [Zencir, 2007].

2007 yılında Deligöz, bazı ikili bileşiklerin yapısal, elektronik, elastik, termodinamik ve titreşimsel özelliklerinin AB INITIO yöntemiyle belirlenmesi adlı çalışmasında, CdS, CdS, CdTe ve CdF<sub>2</sub> bileşiklerinin enerji bant aralığının basınç altında değişimi incelemiş II-IV grubu yarıiletkenlerde enerji bant aralığı basınç

altında doğrusal bir değişim gösterdiğini belirlemiştir. CdS, CdTe ve CdTe bileşiklerinde değişimin artış oranı  $CdS \rightarrow CdTe \rightarrow CdTe$  şeklinde arttığını ve bu durumun bileşiği oluşturan elementlerin kütle oranları ile ilişkili olduğu söylemiştir [Deligöz, 2007].

2007 yılında Ördek, Hidrojen taşımalı buhar fazı epitaksi ( $H_2T$ -VPE) yöntemiyle büyütülen n-CdTe tek kristal ince filmlerin sıcaklığa bağlı Hall ölçümleri vasıtasıyla elektriksel özelliklerini incelemiştir. Çiftli kristal X- ışını kırınım desenleri ince filmlerin yüksek kaliteli kristal bir yapıya sahip olduklarını belirlemiştir. Büyütme sıcaklığı  $650\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altında büyütülen ince filmlerin elektriksel iletkenlik karakteri p- tipi olmasına karşın,  $650\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda büyütülenler n- tipi özellik sergilediğini tespit etmiştir [Ördek,2007].

2007 yılında Yılmaz, Isıl buharlaştırma yöntemi ile CdTe ince filmler cam altlıklar üzerinde  $-73\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $27\text{ }^\circ\text{C}$  altlık sıcaklıklarında üretmiş olduğu CdTe ince filmlere iki farklı durumda ısıl işlem uygulamış.  $-73\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $27\text{ }^\circ\text{C}$  altlık sıcaklıklarında üretilen CdTe ince filmlerin (111) yansıma düzlemleri doğrultusunda kübik yapıda büyüdüğünü. Bu filmlerin karakteristik (111) pik şiddetleri yukarıda bahsedilen işlemlerden sonra arttığını. CdTe ince filmlerinin özdirenç değerleri dört nokta yöntemi kullanılarak ölçüldüğünü.  $-73\text{ }^\circ\text{C}$  altlık sıcaklığında üretilen filmin özdirenç değeri  $1,4 \times 10^5\ \Omega \times cm$  iken, bu değer tavlama ile  $5 \times 10^7\ \Omega \times cm$ 'ye yükseldiğini. Fakat,  $CdCl_2$ /tavlama işlemi sonrası ise özdirenç değeri  $5 \times 10^6\ \Omega \times cm$  olarak bulunduğunu. Benzer sonuçlar  $27\text{ }^\circ\text{C}$  altlık sıcaklığında üretilen filmlerde de gözlemlendiğini belirlemiştir [Yılmaz, 2007].

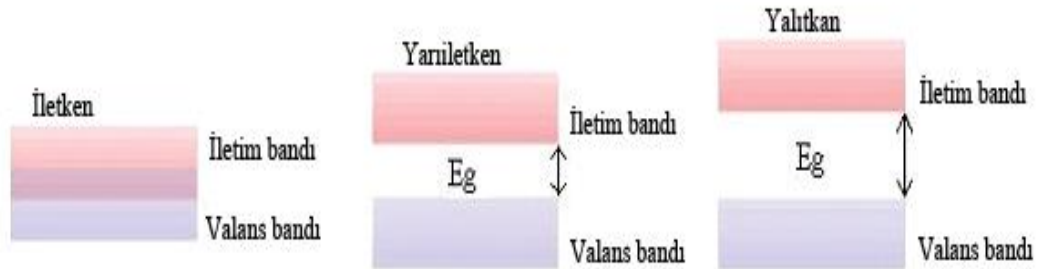
2011 yılında Katiyar ve arkadaşları, CdS ve CdTe nanokristalleri sulu kimyasal yolla sentezlemiştir. Optik soğurma spektrumları parçacık boyutları (çap), CdS ve CdTe için sırasıyla 7 ve 4 nm çapında olduğunu gözlemlemiştir. İndiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam alttaş olarak kullanmışlar ve bir spin kaplama yöntemi kullanılarak bu nanokristal malzemeleri ITO kaplı cam üzerine üretmişlerdir. Oda sıcaklığında fotoluminesans çalışmalarında CdS-CdTe ince filmlerin fotoluminesans ışık şiddetinde önemli bir azalma gözlemlemiştir. İnce film CdS-CdTe ışık yoğunluğuna bağımlı akım-gerilim ölçümleri fotovoltaj etki göstermiş; ışık şiddeti artışı ile akım yoğunluğu artmış, ancak, açık devre gerilimi herhangi bir değişiklik olmadığını tespit etmişlerdir [Katiyar, 2011].

2012 yılında Ikhmayies ve Ahmad-Bitar, CdS/CdTe güneş pilleri 200 nm kalınlığında SnO<sub>2</sub>:F cam alt tabaka üzerine spreylendirilerek piroliz tekniği ile büyütülmüşler. CdS üzerine ise, benzer bir teknik olan vakum buharlaştırma tekniği ile 500 nm kalınlığında ve 1-1,5 µm CdTe büyütülmüşlerdir. Bu hücreleri atmosferdeki azot ile 30 dakika 350 °C de ısıtılarak işleme tabi tutmuşlardır. CdS/CdTe ara yüzeyli iki farklı kalınlıktaki hücrelerin spectra tekniği ile fotoluminesans değerlerini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak arayüzey band aralık değişimlerinin dereceli ve düzgün olduğunu görmüşlerdir. Daha kalın olan CdTe tabakalı güneş pilinin fotovoltaj özelliklerinin CdS/CdTe ye göre daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir [Ikhmayies, 2012].

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Yarı İletkenler

Katı maddeleri, elektriksel iletkenliklerine göre iletken, yarıiletken ve yalıtkan maddeler olarak üç guruba ayırabiliriz. İletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar arasındaki fark, katıların bant teorisi ile açıklanabilmektedir. Elektronlar en düşük enerji seviyelerinden yukarıya doğru enerji seviyelerini doldururlar fakat bir katıda atomların dalga özelliklerinden dolayı bazı enerji seviyeleri yasaklanmıştır. Burada izin verilen enerji seviyeleriyle bantlar şekillenir.  $T = 0$  K' de tam doldurulan seviyeye valans bandı denir. Valans bandındaki elektronlar iletme katılmazlar. Valans bandının üstündeki ilk boş seviyeye ise iletim bandı denir.



**Şekil 2.1** Katıların bant modeli

Elektriksel iletkenlikleri iletkenler ile yalıtkanlar arasında bulunan materyallere ise yarıiletken madde denir. Enerji aralığı genellikle 1-2 eV mertebesinde olan maddelerdir.  $T = 0$  Kelvin sıcaklığında bütün elektronlar valans bandındadır ve iletim bandında hiçbir elektron yoktur. Bunun için yarıiletkenler, düşük sıcaklıklarda zayıf iletkenlerdir. Bununla beraber, normal sıcaklıklarda durum tamamen farklıdır [Aşkın 2011].

### 2.1.a Katkısız (Saf) Yarıiletkenler

Katkı atomu (safsızlık) veya örgü kusuru içermeyen yarıiletken malzemeler katkısız (saf) yarıiletken olarak adlandırılırlar. Saf yarıiletkenlerde 0 Kelvin sıcaklığında serbest yük taşıyıcıları bulunmamaktadır yani valans bandı elektronlar ile tam olarak doldurulmuş iletim bandı ise tamamen boştur. 0 Kelvin sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda ise valans bandından iletim bandına geçen elektrona karşılık valans bandında bir deşik oluşur. Yani saf yarıiletkenler de iletim bandındaki elektron konsantrasyonu ile valans bandındaki deşik konsantrasyonu eşittir. Saf yarıiletkenlerde Fermi seviyesinin, enerji aralığının hemen hemen ortasında bulunması ve yasak enerji aralığının küçük olması nedeniyle önemli sayıda elektron valans bandından iletim bandına uyarılır. İletim bandında birbirine yakın, çok sayıda boş seviye olduğundan uygulanan küçük bir potansiyel, elektronların enerjilerini kolayca iletim bandına çıkarabilir ve orta büyüklükte bir akım meydana getirebilirler. Katkısız yarıiletkenlere örnek olarak germanyum (Ge) ve silisyum (Si) verilebilir.

### 2.1.b Katkılı Yarıiletkenler

Bazı yarıiletkenlerde oda sıcaklığında iletkenlik, katkı atomlarının etkisiyle değişir. İletkenliği katkılarla sağlanan yarıiletkenlere katkılı yarıiletken denir. Katkılı bir yarıiletken, doping veya katkılama olarak bilinen bir işlemle, kristale katkı atomları eklenerek saf bir yarıiletkenden elde edilebilir.

Yarıiletkende elektron veren katkı atomuna verici veya donör denir. İletkenliği donör katkısıyla karakterize olunan yarıiletkene elektron veya n-tipi yarıiletken denir. n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar ve azınlık yük taşıyıcıları deşiklerdir. Verici (donör) tipli katkı, yarıiletkenin yasak bandının içinde izin verilmiş enerji düzeyinin oluşmasına yol açar. Bu enerji düzeyi iletim bandının dibinden biraz aşağıda yerleşmektedir.

Yarıiletkenlerde elektronları alan katkı atomlarına alıcı veya akseptör denir ve iletkenliği alıcı tipli katkıyla belirlenen yarıiletken, deşik veya p-tipi yarıiletken olarak tanımlanır. p-tipi yarıiletkende çoğunluk yük taşıyıcıları deşiklerdir ve azınlık yük taşıyıcıları elektronlardır. Alıcı tipli katkı, yarıiletkenin yasak enerji aralığının içinde (valans bandının tavanının üstünde) enerji düzeyi ( $E_a$ ) oluşturur. Alıcı atomlarının iyonlaşmasıyla valans bandında serbest deşikler oluşur [Kara 2008].



## 2.2 Elektriksel İletkenlik

Bir maddenin elektriksel iletkenliği, o maddede atom başına düşen serbest elektrik yükü sayısı ile belirlenir. Serbest elektrik yükünün madde ortamında hareket edebilme yeteneğini ifade eden hareketlilik (mobilité) elektriksel iletkenliğin belirlenmesinde rol oynayan başka bir parametredir. Mobilité elektrik alan başına serbest elektrik yükünün hızı olarak tanımlanır [Yazıcı 2007].

Maddenin iletkenliğine özellikle elektron ve deşikler gibi ya da anyon ve katyon gibi farklı tür taşıyıcılardan katkı olabilir. İletkenlikle ilgili teorilerin amacı taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilité değerlerinin moleküler yapı tarafından nasıl belirlendiğini ve bunların sıcaklığa ve uygulanan alana göre nasıl değiştiğini açıklayabilmektir [Akgöz 2010].

### 2.2.1 Yarı İletkenlerde Elektriksel İletkenlik

Bir yarıiletkendeki elektriksel iletkenlik valans bandından iletim bandına uyarılmış elektronlar ve bu elektronların valans bandında bıraktıkları deşikler ile oluşur. Bu iletkenlik  $\sigma$  ile gösterilir ve

$$\sigma = q(\mu_n n_i + \mu_p p_i) \quad (2.1)$$

ile verilir [Schroder 1990]. Burada sırasıyla  $q$  elektronik yük,  $n_i$  ve  $p_i$  serbest elektronların ve deşiklerin gerçek yoğunluğu,  $\mu_n$  ve  $\mu_p$  de elektron ve deşik mobilitésidir. Eğer  $n$  tipi bir yarıiletkende, elektron yoğunluğunu da göz önüne alarak iletkenlik ifadesi yeniden yazılır ise;

$$\sigma = N_c q \mu_n e^{-(E_c - E_i)/kT} \quad (2.2)$$

elde edilir. Burada  $\mu$  elektronun mobilitésidir. Denklem (2.6)' dan yararlanarak  $N_c \propto T^{3/2}$  orantılı olduğunu görebiliriz. Aynı şekilde  $\mu$  ile  $T$  arasında da benzer bir ilişki bulunmaktadır. Eğer mobilité üzerindeki tek etki kristal etkileşmesi ise düşük sıcaklıklarda mobilitenin sıcaklığa bağımlılığı  $\mu \propto T^{3/2}$  şeklindedir.

Böylece iletkenlik

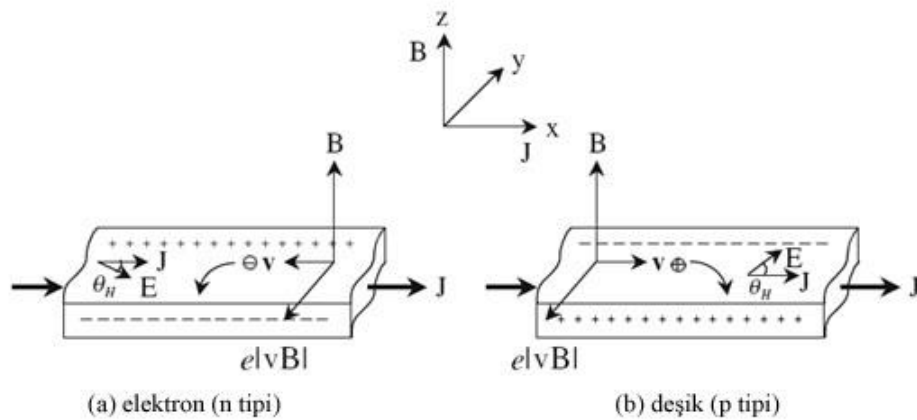
$$\sigma = Ce^{-(E_c - E_i)/kT} \quad (2.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $C$  sabit bir katsayıdır.  $\ln\sigma - 1/T$  grafiğinin eğimi aktivasyon enerjisini verir [Takanoglu 2011].

İletkenlik, sıcaklığın fonksiyonu olarak taşıyıcıların valans bandından iletim bandına uyarılmasıyla, yasak enerji aralığında bulunan tuzak seviyelerindeki taşıyıcıların termal uyarılmasıyla ve izinli seviyelerdeki serbest elektronların yakalanmasıyla gerçekleşmektedir [Bube 1960].

### 2.3. Hall Olayı

İletken bir malzeme üzerine, akıma dik olarak uygulanan manyetik alan, manyetik alana ve akıma dik bir elektrik alan ile sonuçlanır. Bu olay ilk olarak 1879 yılında E.H. Hall tarafından keşfedilmiş ve Hall etkisi adını almıştır. Bu etki yarıiletken ve metallerin elektronik özelliklerini belirlemek açısından oldukça önemlidir. Bu bölümde ilk olarak elektronların aynı hızda hareket ettiği basit bir yaklaşımla Hall etkisi açıklanacaktır [Chihiro Hamaguchi. 2009].



**Şekil 2.2** Yarıiletkenler için Hall etkisi. (a)  $n$  tipi bir yarıiletken için Hall alanı (b)  $p$  tipi bir yarıiletken için Hall alanı.

Şekil 2.2'deki gibi bir örnek üzerinden,  $x$ -ekseni boyunca, akım yoğunluğu  $J$  olan akım geçtiğinde, elektronların sürüklenme hızı  $v$  Lorentz kuvvetinden hesaplanabilir.

$$\mathbf{F} = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.4)$$

Burada  $-e$  elektron yükünü temsil eder. Eğer malzemedeki elektron yoğunluğu  $n$  ise  $J$  akım yoğunluğu

$$\mathbf{J} = n(-e)\mathbf{v} \quad (2.5)$$

şeklinde verilebilir. Eğer akım  $+x$  yönünde malzeme boyunca verilirse hız bileşeni  $v_x < 0$  olur ve böylece elektron  $-x$  yönünde sürüklenmeye başlar.  $z$  yönünde bir manyetik alan uygulandığında elektron için yazılan Lorentz kuvveti;

$$F_y = -e(v_x B_z) = -e|v_x| B_z < 0 \quad (2.6)$$

olarak verilir ve böylece elektron  $-y$  yönünde hareket etmeye zorlanır.

Hall olayı normalde akım geçişinin olmadığı  $z$  yönünde bir manyetik alan uygulanarak ölçülür, negatif yükler elektronlardan dolayı Şekil (2.2)'de gösterildiği gibi, yüzeyde toplanır ve hareketsiz pozitif yükler (donörler)  $-y$  yönünde manyetik alan uygulandığında malzemenin arka yüzeyinde birikirler. Uygulanan elektrik alan (Hall alanı)  $E_y < 0$  ise Lorentz kuvveti ile dengelenir ve kararlı bir duruma gelir. Yani

$F_y + (-e)E_y = 0$  olur. Uygulanan bu alan, Hall alanı olarak adlandırılır ve aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$E_y = v_x B_z = -\frac{B_z J_x}{ne} \equiv R_H J_x B_z \quad (2.7)$$

burada  $R_H$  Hall katsayısıdır. Elektronlar için Hall katsayısı,

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (2.8)$$

$E_x$  ve  $E_y$  arasındaki açı  $\theta_H$  yani Hall açısı,

$$\tan\theta_H = \frac{E_y}{E_x} = -\mu_e B_z = \omega_c \tau \quad (2.9)$$

yukarıdaki eşitlikte,

$$J_x = ne\mu_e E_x \quad (2.10)$$

$$v_x = -\mu E_x \quad (2.11)$$

ve

$$\omega_c = \frac{eB_z}{m^*} \quad (2.12)$$

$$\mu_e = \frac{e\tau}{m^*} \quad (2.13)$$

Burada  $\omega_c$  açısal siklotron frekansıdır. Hall olayı şematik olarak Şekil 2.2(a)'da negatif yük taşıyıcıları için ( $n$  tipi yarıiletkenler için elektronlar) 2.2(b)'de pozitif yük taşıyıcıları için ( $p$  tipi yarıiletkenler için deşikler) gösterilmiştir.  $+y$  yönündeki deşik sürüklenmesi  $+x$  yönünde bir deşik akımı üretir ( $v_x > 0$ ) ve deşikler üzerindeki lorentz kuvveti  $z$  yönünde uygulanan manyetik alan varlığında  $-y$  yönü boyunca etki eder, negatif ve pozitif yüklerin birikmesi ise  $+y$  ve  $-y$  yönlerinde olur. Bu yük birikimi  $+y$  yönünde Hall alanının artmasına neden olur ki, bu durum elektronlar için tam tersidir. Deşikler için Hall katsayısı yük yoğunluğu  $p$  olmak üzere

$$R_h = \frac{1}{pe} \quad (2.14)$$

şeklinde verilir.

Eğer, yarıiletken malzemenin  $y$  yönündeki genişliği  $w$ , ve  $z$  yönündeki kalınlığı  $t$  ise,  $y$  yönündeki Hall voltajı  $V_H = wE_y$  olur. Akım  $I_x = J_x wt$  ve (2.7) denkleminde Hall voltajı,

$$V_H = \frac{R_H}{t} I_x B_z \quad (2.15)$$

denklemini ile verilebilir.

Hall olayı ölçümlerinden Hall katsayısı  $R_h$  (2.14) formülü ile verilebilir ve elektron yoğunluğu  $n$  veya deşik yoğunluğu  $p$  (2.8) ve (2.14) denklemlerinden hesaplanabilir [Chihiro Hamaguchi. 2009].

Ayrıca belirtmelidir ki (2.8) ve (2.14) denklemlerinde verilen Hall katsayısı, taşıyıcı durulma zamanı  $\tau'$  nun taşıyıcı enerjisinden bağımsız olduğu varsayılarak türetilmiştir. Eğer durulma zamanı, taşıyıcı enerjisine bağlı ve etkin kütle skaler değilse, Hall katsayısı (2.8) denklemini yerine;

$$R_H = -\frac{r_H}{ne} \quad (2.16)$$

denklemini ile verilebilir. Burada  $r_H$  Hall katsayısının saçılma faktörüdür ve saçılma mekanizmaları ile taşıyıcıların dağılım fonksiyonunu belirler. İletkenlikten yararlanarak Hall katsayısı için denklem

$$|R_h| \sigma = \mu \quad (2.17)$$

şeklindedir. Bu eşitlik yalnızca  $r_H = 1$  olduğunda geçerlidir ve denklem (2.27)' de görüldüğü gibi genel kullanımı

$$|R_h| \sigma = r_H \mu \quad (2.18)$$

olarak verilir. Hall mobilitesi ise,

$$|R_h| \sigma = \mu_H \quad (2.19)$$

ile tanımlanır. Burada  $\mu_H$  Hall mobilitesidir. Yukarıda tanımlanan Hall mobilitesi sürüklenme mobilitesi ile aynı boyutlara sahiptir. Fakat aradaki fark  $r_H$  ile yada başka bir deyişle aşağıdaki eşitlik ile ayrılabilir [Chihiro Hamaguchi. 2009].

$$\frac{\mu_H}{\mu} = r_H \quad (2.20)$$

## 2.4 Fotoiletkenlik

Fotoiletkenlik, foton soğurulduğunda üretilen serbest taşıyıcıların sayısındaki artıştan sonuçlanan elektriksel iletkenlikteki değişme (artma veya azalma) olarak tanımlanır.

Fotoiletkenlik işlemi, arka arkaya veya eş zamanlı olarak gerçekleşen olaylar dizisini içerir. Bu nedenle foto iletkenlik karşımıza karmaşık bir olgu olarak çıkar; fakat katıların fiziksel özelliklerinin anlaşılması açısından oldukça önemlidir.

Tarihsel olarak fotoiletkenlik konusu ilk olarak bir telgraf şirketinde elektrikçi olan Willoughby Smith tarafından araştırıldı. Willoughby Smith Xerografi'nin gelişiminde oldukça önemli olan selenyum (Se) elementi üzerine incelemelerde bulunmuştur. Smith, deniz altındaki telgraf kabloları testinde Se çubuğu bir resistör gibi kullanarak ışık sızdırmayan bir kutu içerisinde bir ışık kaynağı meydana getirip getirmediğini inceleyerek kabloların yük dirençlerini bulmuştur.

Katılarda fotoiletkenlik teorisi iki ana gruba ayrılabilir. Bunlardan birisi serbest taşıyıcıların tuzak seviyelerinde yakalanması veya tuzaklanmış taşıyıcıların serbest kalması ve nihayetinde bu taşıyıcıların yeniden birleşmesi kinetiği ile ilgilidir.

Fotoiletkenlik teorisinin ikinci kısmı ise; uygun kuantum mekaniksel dalga fonksiyonu yardımıyla geçişlerin (transition) hesaplanması ile ilgilidir. Bu geçişler

başlangıç ve sonuç hal dalga fonksiyonlarının doğasına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

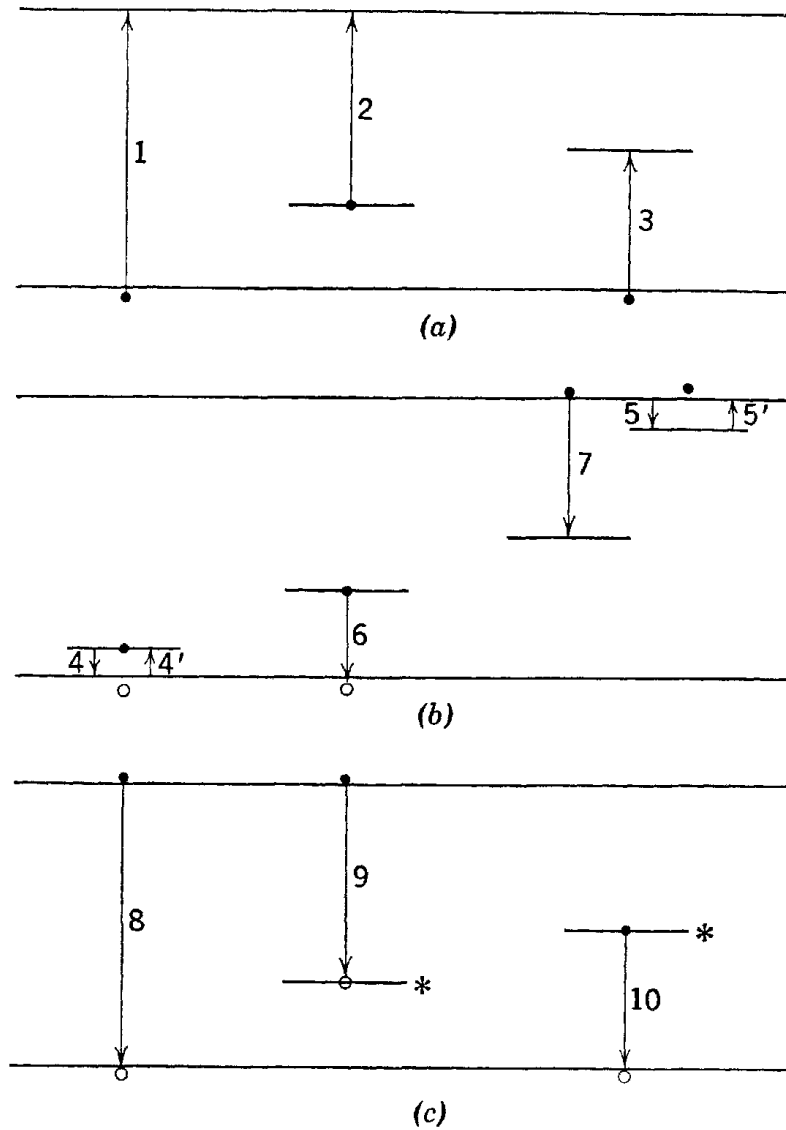
- Bir fotonun soğurulması ile oluşan banddan banda geçişler (ışığın bir katı içerisinde soğurulmasının temel süreci).
- Fononlar ve safsızlıklar arasındaki etkileşmeler sonucu oluşan band içi geçişler (bu geçişler mikroskobik mobilitiyi tayin eder).
- Yakalanma sürecini tanımlayan banddan lokalize seviyeye olan geçişler.
- Salınma sürecini tayin eden lokalize seviyeden banda ters geçişler.
- Lokalize seviyeden lokalize seviyeye geçiş (bu geçiş, amorf malzemelerde yeniden birleşme mekanizmalarının incelenmesinde etkindir).

Fotoiletkenlik materyalin kendi asal özellikleri ile doğrudan ilgilidir. Böyle materyallerde kristal tarafından enerji soğurulduğunda gelen dalga boyunda maksimum foto duyarlılık gösterirler [Kalkan 1994].

## **2.4.1 Yarıiletkenlerde Fotoiletkenlik**

### **2.4.1.1 Elektronik Geçişler**

Fotoiletken malzemelerde yaygın olarak görülen bazı geçişler enerji band diyagramı şemasında Şekil-2.3 de gösterilmiştir. Bu geçişler üç kısma ayrılabilir: 1- soğurma ve uyarma (Şekil-2.3.a) 2- tuzaklama ve yakalama (Şekil-2.3.b) ve 3- yeniden birleşme (Şekil-2.3.c)



**Şekil-2.3** Fotoiletkenlerde Yaygın Olarak Görülen Geçişler **(a)** soğurma ve uyarma **(b)** tuzaklama ve yakalama **(c)** yeniden birleşme

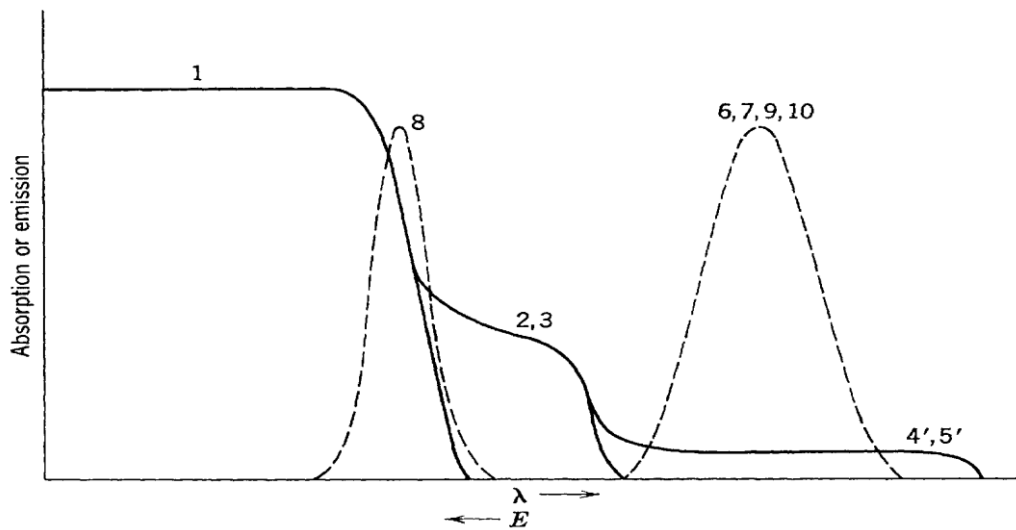
#### 2.4.1.1.a Soğurma ve Uyarma

Fotoiletkenlikle sonuçlanan üç mümkün soğurma geçişi vardır. Geçiş 1 kristalin kendi atomlarının soğurmasına karşılık gelir ve her bir foton soğurulduğunda serbest bir elektron ve serbest bir deşik meydana getirir. Geçiş 2 kristal içine lokalize olmuş kusurlara karşılık gelir, her foton soğurulması serbest elektron ve komşu kusura bağlı bir deşik meydana getirir. Geçiş 3 soğurulması valans banttaki doldurulmamış kusurlara çıkan elektron hareketine karşılık gelir, her bir foton soğurması serbest bir deşik ve komşu kusura bağlı bir elektron meydana getirir. Fakat (a) Eksiton oluşumuna neden olan, (b) temel düzey ile

kusurlardaki uyarılmış seviyeler arasındaki ve (c) izinli bantlar içinde yer alan geçişler ihmal edilir çünkü bu geçişler doğrudan serbest taşıyıcılar üretmezler.

İdealize bir soğurma spektrumu Şekil 2.4' de gösterilmiştir. Geçiş için gerekli minimum enerjide soğurma kenarı vardır. Bu minimum enerji 1. geçiş için bant aralığına karşılık gelir ve buna karşılık gelen dalga boyu soğurma sınırı olarak adlandırılır. Gereken minimum enerjiden daha büyük enerjili bir ışık için soğurma sürekli ve valans bandının dibinden iletkenlik bandının tepesine olan bir geçişe karşılık gelen belirli bir maksimum enerjinin üzerinde sabittir. Pek çok gerçek kristalde yüksek enerjili izin verilmiş bantlarla üst üste gelen bir iletkenlik bandı ve soğurma için maksimum enerji bulunmaz. Bu ilk yaklaşımla fotoiletkenlik soğurma gibi dalga boyu ile aynı bağlılığa sahiptir. Bir fotoiletkenin duyarlığı, fotoiletken içinde akım taşıyıcılarının uyarılması, üzerine düşürülen ışığın önce soğurulabilmesine bağlı olduğundan doğal olarak ışık dalga boyuna bağlılık gösterir. Fotoiletkenlik için en önemli soğurma, sınır soğurma veya temel soğurma denilen yasak band enerjisi civarındaki ışık soğurmasıdır.

Şekil-2.4 de düz çizgiler soğurma spektrumunu kesikli çizgiler ise emisyon spektrumlarını belirtir. (1) valans banttan iletim bandına soğurma geçişini (2, 5') kusur seviyelerinden iletim bandına soğurma geçişini (3, 4') valans banttan kusur seviyelerine soğurma geçişini (8) serbest elektron ve serbest deşikler arasındaki yeniden birleşme için emisyon geçişini (6, 7, 9, 10) kusur merkezindeki yeniden birleşme için emisyon geçişini temsil eder [Bube 1960].



**Şekil-2.4** Yarıiletkenlerde Soğurma ve Emisyon Spektrumları



#### 2.4.1.1.b Tuzaklama ve Yakalama

Yeterli enerji alarak soğurulan foton tarafından serbest bırakılan elektron ve deşikler bir tuzak tarafından yakalanana kadar serbest kalırlar. Yakalanma mekanizmalarını iki gruba ayırabiliriz. (1) yakalanma merkezleri; eğer yakalanan taşıyıcının termal olarak yeniden uyarılmış serbest bir seviyeye geçme olasılığı zıt işaretli bir taşıyıcıyla yeniden birleşme ihtimalinden daha fazla ise geçerlidir. (2) yeniden birleşme merkezleri, eğer yakalanan taşıyıcının serbest durumlardan yeniden uyarılmasına karşılık kusurlardaki ters işaretli bir taşıyıcıyla yeniden birleşme ihtimali daha fazla ise geçerlidir.

Şekil-2.4.b de elektron tuzaklarında elektronun tuzaklanması ve termal olarak salınması (geçiş 5 ve 5') ve deşik tuzaklarında deşiklerin tuzaklanması ve termal yolla salınması (elektron geçişleri 4 ve 4') ayrıca elektron yakalanması (geçiş 7) ve yeniden birleşme merkezinde deşik (elektron geçişi 6) gösterilmiştir.

Bir bant kenarı yakınında bulunan merkez enerji seviyesi yeniden birleşme merkezi yerine daha çok bir tuzak gibi davranır. Tuzaklar ve yeniden birleşme merkezleri arasındaki ayırım termal boşalma ve yeniden birleşme arasındaki göreceli olasılığa dayanarak belirtilir, kendi özgün doğaları altında değil kinetik koşullarda geçerlidir.

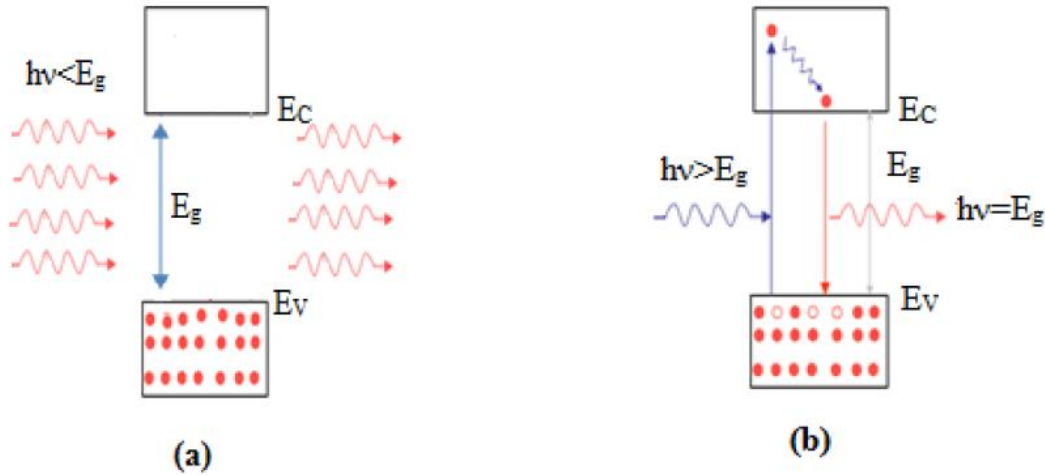
Eğer yakalama işlemi geçiş 6 ve 7 ile bağlantılı ise elektronik enerji kaybı fotonlardan kaynaklanır ve lüminesans emisyonunda gözlenen geçiş Şekil-2.4 te gösterilmektedir.

#### 2.4.1.1.c Yeniden Birleşme

Şekil-2.3.c de gösterilen üç basit yeniden birleşme geçişi vardır. Serbest elektronların doğrudan serbest deşiklerle geçiş 8 e göre yeniden birleşirler fakat bu geçişin olma olasılığı çok düşüktür. Genellikle 8 geçişleri ışımalıdır yani kaybedilen enerji fotonlar tarafından yayımlanır bu enerjide yaklaşık olarak yasak enerji aralığına eşittir. Yeniden birleşme ayrıca yeniden birleşme merkezleri aracılığı ile normal bir şekilde de oluşabilir; ya elektron deşik içeren uyarılmış bir merkezde yakalanabilir (geçiş 9) ya da deşik, elektron içeren uyarılmış bir merkezde yakalanabilir (geçiş 10). Ayrıca geçiş 9 ve 10 ışımalı geçişlerdir [Bube 1960].

## 2.5 Optik Soğurma

Bir yarıiletken üzerine foton gönderildiğinde, kırılma, yansıma, saçılma ve soğurma gibi olaylar meydana gelebilir. Yarıiletken malzemeye gelen fotonlarla maddenin atomlarının elektronlarının etkileşmesi sonucu ortaya çıkan enerji aktarımı temel soğurma olayıdır. Temel soğurma, yarıiletkenlerin bant yapılarını tayin etmenin en yaygın ve temel bir metodudur [Ilıcan, Çağlar vd., 2005].



**Şekil 2.5 (a)** Enerjisi bant aralığının altında olan fotonlar için **(b)** Enerjisi bant aralığının üstünde olan fotonlar için soğurma olayı [Sarı, 2008]

Şekil 2.5'de görüldüğü gibi yarıiletken malzemeye belirli dalga boylarında foton gönderildiğinde; enerjisi bant aralığı enerjisinden büyük fotonların engellendiği, enerjisi bant aralığı enerjisinden küçük fotonların diğer tarafa geçebildiği gözlenir. Burada  $h\nu \geq E_g$  olan fotonların yarıiletken tarafından soğurulduğu açıktır [Streetman ve Banerjee 2006].

Soğurma olayı incelendiğinde, valans bandı birçok elektrona sahiptir ve iletim bandı da elektronların uyarılabileceği birçok boş seviyeye sahiptir, bu durumda fotonun soğurulma ihtimali yüksektir. Optik soğurmayla iletim bandına uyarılan elektronlar başlangıçta, hâlihazırda iletim bandında bulunan bant elektronlarından daha fazla enerjiye sahiptir. Bu şekilde uyarılan elektronlar enerji kaybeder ve diğer bant elektronlarıyla bir denge durumuna ulaşır. Soğurma olayında oluşan elektron ve deşik, ekstra çoğunluk taşıyıcı olarak adlandırılır. Bu şekilde oluşan elektron ve deşikler dengede olmadıklarından, kısa süre de tekrar birleşerek kararlı hale gelirler[Gölcür, 2012].

Yarıiletken malzemeye gönderilen  $h\nu \leq E_g$  enerjili fotonlar valans bandından elektron uyaramazlar. Saf bir yarıiletkene  $E_g$ 'den daha küçük enerjili fotonlar gönderildiğinde ihmal edilebilir bir soğurma olur. Bu olay, maddelerin neden bazı dalga boyları için şeffaf özellik gösterdiğini açıklamaktadır.

Kalınlığı  $t$  olan numuneye  $I_0$  şiddetli foton gönderilirse bu foton,  $I$  şiddeti ile numuneyi geçecektir.  $I$  ve  $I_0$  arasındaki ilişki LAMBERT-BEER yasasıyla;

$$I = I_0 e^{-\alpha t} \quad (2.21)$$

ile verilir. Burada  $\alpha$  soğurma katsayısıdır [Vij. D. R, 1998].

Ayrıca soğurma maksimum olduğunda numuneyi geçen ışının şiddeti sıfır olacaktır.

### 3. DENEYSEL YÖNTEM

#### 3.1 Giriş

Bu bölümde katkılı ve katkısız CdTe ince filmlerin üretimi ve karakterizasyon yöntemlerinden bahsedilmiştir. CdTe ince filmleri hazırlanan CdTe polikristalleri kullanılarak termal buharlaştırma yöntemi ile cam alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Büyütülen ince filmler üzerine yapılacak ölçümler için numuneler üzerine İndiyum buharlaştırarak kontak işlemleri yapılmıştır.

#### 3.2 Kristal Sentezlenmesi

##### 3.2.1 Büyütme Tüplerinin Temizlenmesi

Öncelikle numunelerin sinterleneceği büyütme tüplerinin seçimi önemlidir. Büyütme tüplerinin içerisindeki malzemeler ile kimyasal reaksiyona girmemesi için, tüplerin erime sıcaklığı sinterlenecek kimyasalların erime sıcaklığından yüksek ve termal iletimi yüksek olmalıdır.

Seçilen kuartz büyütme tüpleri 10 mm iç yarıçapa, 90 mm uzunluğa ve 1mm duvar kalınlığına sahiptir. Kuartz tüpleri kullanarak, kristal oluşturmadan önce tüplerin üzerindeki yağ, toz ve metalik kirlilerden arındırmak önemlidir. Aksi halde kristal içerisinde kirlilik oluşacak ve malzemenin yapısını önemli ölçüde değiştirecektir. Temizleme işleminde öncelikle tüplerin yüzeyindeki toz ve yağ tabakasını kaldırmak için, tüpler deterjan ve sıcak su ile yıkanmıştır. Daha sonra tüpleri kimyasal kirliliklerden arındırmak için sırası ile, tüpler 4 saat %40'luk HNO<sub>3</sub> (nitrik asit) çözeltisinde bekletilmiş ve hemen ardından tekrar deterjan ile temizlenip saf su ile durulanmıştır. 30 dakika da izopropil alkolde bekleyen tüpler son olarak içindeki olası gazları dışarı çıkartmak için 10<sup>-5</sup> torr vakum altında ısıtılmıştır [Takanoglu, 2011].

### 3.2.2 Numunelerin Hazırlanması ve Sinterleme

İnce filmleri hazırlanacak malzemelerin, polikristali %99.99 oranında saflığa sahip kadmiyum, teleryum kullanılarak saf CdTe polikristali oluşturulmuştur.

Stokiyometrik oranlarda tartılarak hazırlanan saf CdTe için 3g Te'ye karşılık 4,27 g Cd kullanılmıştır. Atomik ağırlıklarına göre tartılan elementler, daha sonra büyütme tüplerine ayrı ayrı yerleştirilmiştir. Sinterleme işlemine başlamadan önce büyütme tüpleri içerisindeki hava  $10^{-5}$  torr vakum altında kapatılmıştır.

Ağız tamamen kapatılan tüpler, Protherm marka yatay bir fırın içerisine konularak sinterleme işlemine başlanmıştır. Tüpler Selenyumun yüksek buhar basıncından dolayı çok yavaş bir şekilde kristallenme sıcaklığı olan 1120 °C'ye 48 saatte ısıtılmıştır. Isıtma işlemi sırasında büyütme tüpleri, çalkalanmak suretiyle homojenlik sağlanmıştır. Kristal oluşumu tamamlandıktan sonra tüpler 12 saatte oda sıcaklığına soğutulmuştur. Daha sonra büyütme tüpleri kırılarak hazırlanan polikristaller çıkartılmıştır. Külçe olarak çıkarılan kristal agat havan yardımı ile dövülerek toz haline getirilmiştir [Takanoğlu, 2011]..

### 3.3 İnce Film Depolama

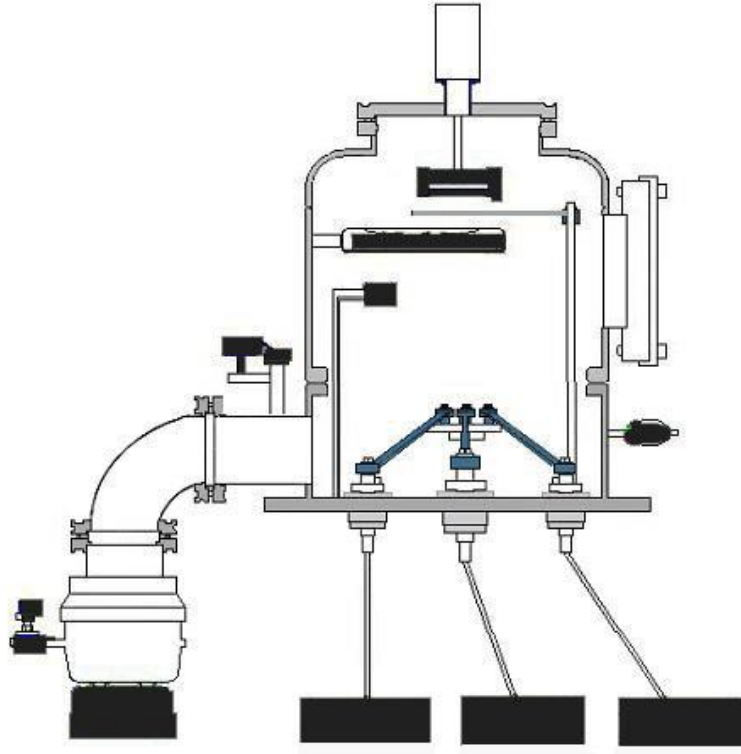
#### 3.3.1 Altaşların Temizlenmesi

Üzerine film büyütülecek olan cam altaşların temizliği oldukça önemlidir. Büyütülen filmlerin kalitesi için cam altaşların üzerinde toz, parmak izi, yağ yani organik yada metalik herhangi bir kirlilik bulunmamalıdır. Cam temizliği için bir miktar potasyum di kromat az bir suda çözülmüş, daha sonra üzerine sülfirik asit eklenerek bir çözelti hazırlanmıştır. 10x12,5 mm ebatlarında kesilen camlar bu çözelti içerisinde 1 gün bekletilerek üzerindeki kirliliklerden arındırılmıştır. Daha sonra camlar üzerindeki tabakaları kaldırmak için, altaşlar saf su ile durulanmıştır. Durulanan camlar en son aseton ile temizlenerek büyütme hazır hale getirilmiştir.

### 3.3.2 Termal Buharlaştırma Yöntemi İle İnce Film Depolama

Sinterleme sonrası toz hale getirilen CdTe'nin ince film depolama işlemleri, Vaksis Pvd-Handy serisi ısısal buharlaştırma sistemi ile yapılmıştır.

Temel buharlaştırma sistemi vakumu  $10^{-5}$  torr basınca indiren bir turbo pompa, 3 adet tungsten numune potası, işlem sırasında film kalınlığını ölçebilen bir kalınlık ölçer, örnek tutucu, işlem sırasında istenilen seviyede ve zamanda film depolamak için kullanılan bir kesici ve bir adet ısıtıcıdan oluşmaktadır. Isısal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1** Termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi.

Katkılı ve katkısız polikristallerin termal buharlaştırma işlemi  $4 \times 10^{-5}$  torr vakum altında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ısıtıcı açılarak, cam alttaşlar  $300^{\circ}\text{C}$ ' de ısıtılarak kaplama işlemi sıcak yüzey üzerine yapılmıştır. Tungsten potalar üzerinden yaklaşık 50-60 A. civarında akım geçirmek sureti ile bot içersine yerleştirilen, toz halindeki polikristalin buharlaşması sağlanmıştır. Buharlaşma hızı yaklaşık olarak 20-25 Å/s değerlerine ulaştığı anda kesici açılarak, aynı orandaki buharlaşma hızı ile alttaşlar kaplanmıştır. Yaklaşık 7

5 dakika sonra istenilen kalınlığa ulaşan filmlerin depolama işlemi, kesici kapatılarak sonlandırılmıştır.

### 3.4 Tavlama İşlemi

Tavlama işlemi; malzemenin özelliğine bağlı olarak değişik sıcaklıklarda, vakum veya azot gazı ortamında belirli süre ısıtılması olayıdır. Bu işlemin amacı büyüme veya kaplama esnasında yapıda meydana gelen kusurların uzaklaştırılması ve daha düzenli bir yapı elde edilmesidir. Bu çalışmada hem saf hem de In katkılı CdTe ince filmleri oksitlenmelere karşı vakum ( $10^{-5}$  torr) ortamında 400 °C'de 1 saat bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında elektrik ve optik özellikleri incelenecek örnekler tablo 3.1'deki gibi adlandırılmıştır.

**Tablo 3.1** Hazırlanan numunelerin isimlendirilmesi

Yapılan isimlendirme	Numune ismi
CdTe_cold	Tavlanmamış CdTe ince filmi
CdTe_400	400 °C sıcaklığında tavlanmış CdTe ince filmi

### 3.5 Kontak Alma İşlemleri

Elde edilen filmlerin elektrik ve optik özelliklerine bakabilmek için üzerlerine In buharlaştırarak farklı geometrilerde kontaklar alınmıştır. In buharlaştırmadan önce filmlerin boyutuna uygun olarak Van-der Pauw ve şerit kontak geometrisine göre bakır levhalardan maskeler oluşturulmuştur. Yapılan maskeler filmlerin üzerine yüzeylerini çizmeyecek şekilde yerleştirildikten sonra termal buharlaştırma yöntemiyle filmler ve alınacak kontaklar arasındaki iletişimi sağlamak amacıyla  $10^{-5}$  torr vakum altında In buharlaştırılmıştır. Buharlaştırılan İndiyum'un film üzerine iyi bir şekilde oturması ve omik kontakın gerçekleşmesi için, In buharlaştırılmış filmler 100 °C'de yaklaşık 5 dakika süresince azot ortamında ısıtılmıştır. Şekil 3.2'de Van der Pauw ve şerit kontak geometrilerinde oluşturulan filmler verilmiştir.



**Şekil 3.2** Van der Pauw ve şerit kontak geometrisinde kontak alınmış ince filmler.

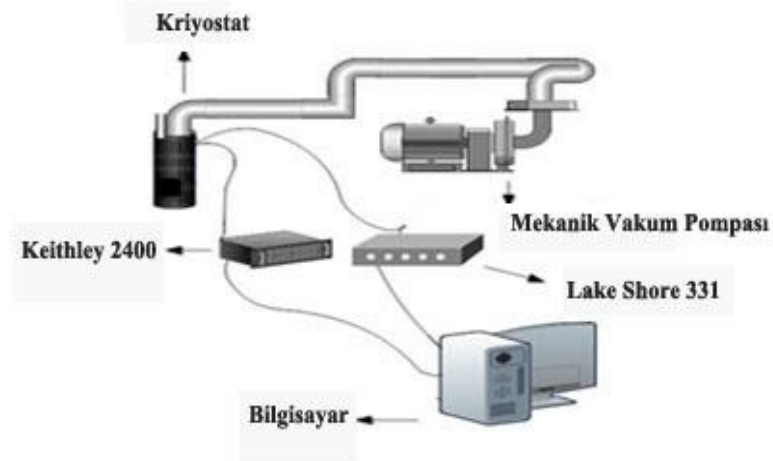
### 3.6 Elektriksel Karakterizasyon Ölçümleri

#### 3.6.1 Sıcaklığa Bağlı Direnç Ölçümleri

Bu bölümde tavlınmamış ve 400 °C de tavlınmış CdTe ince filmlerinin tavlamaya bağılı olarak dirençlerinin sıcaklıkla değışimi incelenmiştir. 400 °C de tavlınmış filmler ile tavlınmamış filmler 80 – 400 K sıcaklıkları arasında 10 K sıcaklık aralıklarıyla dirençlerinin değışimleri incelenmiştir. Numuneler Janis marka azot soğutmalı kriyostat içine 4 nokta şerit kontak alınarak yerleştirilmiş, sıcaklık kontrolü ise LakeShore 331 sıcaklık kontrol ünitesi ile sağlanmıştır. Elektriksel ölçümler, sabit bir akım-voltaj kaynak-ölçüm cihazı olan Keithley 2400 sourcemeter yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Elektriksel ölçümü yapılacak In buharlaştırılmış örneklere ince teller, yine In kullanılarak havya yardımı ile tutturulmuştur. Şekil 3.3 de deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi verilmiştir. Yapılan kontaktların omikliği değışik akım değerlerinde ileri ve ters yönde akım uygulanmak sureti ile kontrol edildikten sonra ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Verilen akıma karşılık her sıcaklıkta gerilim değerleri ölçülerek, filmlere ait direnç, öz direnç ve iletkenlik değerleri hesaplanarak sıcaklığa bağılı değışimleri incelenmiştir[Takanoğlu, 2011].





**Şekil 3.3** Deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi [Takanoglu, 2011].

### 3.7 Optik Ölçümler

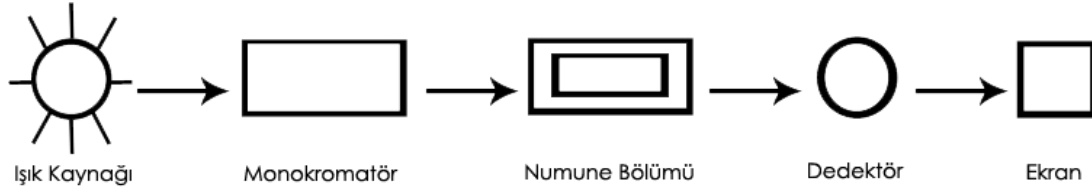
#### 3.7.1 Optik Soğurma Ölçümleri

Spektrometre tek renkli gelen ışığı spektral olarak dalga boylarına ayırarak elektriksel sinyallere dönüştüren malzeme analizi yapabilen bir cihazdır. Ölçülen büyüklük genellikle ışığın şiddetidir. Bağımsız değişken ise ışığın dalga boyudur ve genellikle nanometre mertebesindedir.

Soğurma spektrumu ölçümleri, oda sıcaklığında her iki numune içinde, UNICO marka SQ 2802 UV/VIS spektrometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan spektrometrenin tarama bölgesi 190 nm-1100 nm arasındadır. Ayrıca spektrometrede ışık kaynağı olarak halojen lamba, dalga boyunu çevresel etkenlerden ve istenmeyen ikincil radyasyonlardan izole etmek için bir monokromatör, numunenin konacağı bir yuva, iletilen ışığı alan ve onu elektriksel sinyale çeviren bir dedektör ve soğurulan veya geçen ışığı göstermek üzere bir dijital ekran olmak üzere beş kısımdan oluşmaktadır. Şekil 3.4' de spektrometrenin iç yapısı şematik olarak gösterilmiştir.

Spektrometreye yerleştirilen ince filmlerin üzerine düşecek şekilde oda sıcaklığında ışık kaynağından 190 – 1100 nm dalga boylarında 0,5 nm aralıklarla ışık gönderilmiştir. Tek renkli ışık monokromatör yardımı ile istenilen dalga boyuna

çevrilerek numunelere gönderilmiştir. Numuneden çıkan ışık dedektör yardımı ile toplanarak malzemelere ait soğurma spektrumları elde edilmiştir [Takanoğlu, 2011].



**Şekil 3.4** Spektrometrenin şematik olarak gösterimi.

### 3.8 Yüzey Yapısı ve Elementel Analiz

Termal buharlaştırma tekniği kullanılarak üretimi yapılan II-III-VI grubu CdInTe ve CdIn<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> yarıiletken bileşik ince filmlerin yüzey yapısı ve kompozisyonunu incelemek için enerji dağılım X-ışını spektrometresi enerji dağılım spektrometresi (EDS) üniteli taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

Günümüz teknolojisi yeni malzemelerin elde edilmesi ve mevcut malzemelerdeki gelişmelerden önemli derecede etkilenmektedir. Malzemelerin faz dağılımı, tane boyutu ve şekli, homojenlik, malzeme içeriği, farklı bölgeler, gözenekli yapı gibi makro ve mikro özellikleri SEM ve EDS kullanılarak incelenebilir. Birçok inceleme ikincil elektron sinyalleri kullanılarak numune yüzeyinin büyütülmesi ile başlar. Geri saçılan sinyallerle bileşik malzemeler ve düzgün dağılımın önemli olduğu malzemeler incelenebilir. Daha sonra elementel bileşimi belirlemek amacıyla mikroanaliz (kimyasal analiz) kullanılabilir. Bu yolla çok küçük boyutlardaki parçacıklar ve ince tabakalar kapsamlı bir şekilde analiz edilebilir. Elektron mikroskopları numunelerin çok küçük ölçeklerde karakterizasyonu için yüksek enerjili elektronlar kullanan cihazlardır.

Enerji dağılım spektrometresinin (EDS) eklenmesi ile SEM' de kimyasal analiz numune üzerine odaklanan elektron demetinin yarattığı X-ışınları sinyallerinin şiddet dağılımı ve enerjilerinin ölçülmesi ile gerçekleştirilir (Akyüz, 2005).

### 3.8.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Taramalı elektron mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir [Flegler,1993].

Taramalı elektron mikroskobu optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Şekil 3.6'da SEM cihazı şematik olarak gösterilmiştir. Optik kolon kısmında elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası ve ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler bulunur.

Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune  $10^{-4}$  Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışınları toplayan detektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır [Brundle, 1992,Gölcür, 2012].

### 3.8.2 Enerji dağılım spektrometresi (EDS)

EDS tekniği ile yüzeydeki bileşiklerin ya da elementlerin nicel ve nitel analizi yapılmaktadır. Ancak bu teknik taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile birleştirilmiş haldedir. Taramalı elektron mikroskobu tekniğinde elektron demeti kullanılır. Buna göre SEM'de, katı numune yüzeyi ızgara şeklinde sıralı düzende yüksek enerjili bir elektron demetiyle taranır. Tarama neticesinde yüzeyden çeşitli tür sinyaller oluşturulur. Bunlar geri saçılmış ve ikincil elektronlar ve elektron mikroprob analizde kullanılan X-ışını emisyonudur. EDS ise elektron bombardımanına maruz bırakılan katı numunenin verdiği X-ışını emisyonunu

ölçer. Yüzeydeki türlere göre söz konusu X-ışını emisyonunun enerjisi ya da dalga boyu farklılık gösterir [Özkan, 2010, Gölcür, 2012].

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

X-ışınları kırınımı (X-Ray Diffraction; XRD), X-ışınları tarafından oluşturulan kırınım deseninden atomik düzeyde bilgi edinmek için kullanılmaktadır. X-ışınları ölçümleri kristale zarar vermeksizin yapısı hakkında bilgi veren güçlü bir yöntemdir. X-ışınlarının dalgaboyu, 1 Å civarındadır ve bu da bir kristal içindeki atomlar arası mesafe mertebesinde. Kristallerin atom dizilişlerinin incelenmesinde bu yüzden X-ışınlarına ihtiyaç duyulur. X-ışınları kırınım desenlerinden, bir katıdaki düzlemler arasındaki mesafe (atomların oluşturduğu sıralar), tek kristalin veya taneciğin yönelimi, bilinmeyen bir malzemenin kristal yapısı, tanecik boyutu ve şekli hakkında bilgi elde edilebilir.

X-ışını kırınımı, basit bir ifadeyle bir kristal düzlemine gönderilen X-ışınlarının kristalin atom düzlemlerine çarparak yansması olayıdır. Ancak buradaki yansıma ışığın bir ayna düzleminden yansması olayından çok farklıdır. Kırınım olayında, gelen X-ışınları kristal yüzeyinin altındaki atom düzlemlerine ulaşır, yani kırınım yüzeysel bir olay değildir. Düzensiz yapıda (amorf) bir kristal düzlemine gelen X-ışını demeti kristal düzlemlerine herhangi bir açıyla çarparsa, kırınım gerçekleşmez. Çünkü kristal düzlemlerinden yansıyan X-ışınlarının aldıkları yolların uzunlukları farklı olduğundan, söz konusu ışınlar arasında faz farkı oluşur ve bu ışınlar birbirlerini yok ederler. Bunun sonucu olarak herhangi bir kırınım (difraksiyon) piki gözlenmez[Gölcür, 2012].

X-ışını demetinin atom düzlemlerine Bragg açısı olarak bilinen belirli bir açı ile çarpması durumunda ise yansıyan ışınlar tarafından alınan yol, dalga boyunun ( $\lambda$ ) tam katlarına eşit olacağından, ışınlar aynı faza sahip olur. Kırınıma uğrayan, yani atom düzlemlerinden yansıyan X-ışınlarının aynı fazda olması durumunda kırınım deseni oluşur. Kırınım deseni elde edebilmek için; X-ışınlarının atom düzlemlerine çarpma açısı ( $\theta$ ), atom düzlemleri arasındaki uzaklık ( $d$ ) ve gelen X-ışınlarının dalga boyu ( $\lambda$ ) arasında belirli bir bağıntının bulunması gerekir. Bir X-ışını demetinin birbirine paralel atom düzlemlerine  $\theta$  açısı altında çarpması durumunda kırınım meydana gelir. Yani kristal düzlemi, düzenli tek kristal yapısında ise, X-ışınları kristal düzleminden aynı fazda saçılır. Bunun sonucu

olarak kırınım gözlenir. Burada farklı kristal düzlemlerinden yansıyan ışınların dedektöre geldiğinde aynı faz içinde olması gerekir. Bunun gerçekleşebilmesi için X-ışınının kristal düzlemleri arasında aldığı yol farkının  $\lambda$  dalga boyuna veya  $\lambda$ 'nın tam katlarına eşit olması gerekir. Bu nedenle;

$$2d \sin\theta = n \lambda \quad (3.1)$$

bağıntısı elde edilir. Burada;  $\theta$  Bragg açısı (gelen ışınlarla atom düzlemlerinin yaptığı açı) ve  $\lambda$  (kullanılan X-ışınının dalga boyu) bilinirse  $d$  (atom düzlemleri arasındaki uzaklık) hesaplanabilir. Bragg kanunu olarak bilinen bu bağıntı X-ışını kırınımı için gerekli koşulu ifade eder. Şekil 3.8'de kırınımın meydana gelişi şematik olarak gösterilmiştir [Şişman İ.,2006, Taylor J.,1991].

## 4. ANALİZ VE YORUMLAR

### 4.1 CdTe İnce Filmlerinin Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi

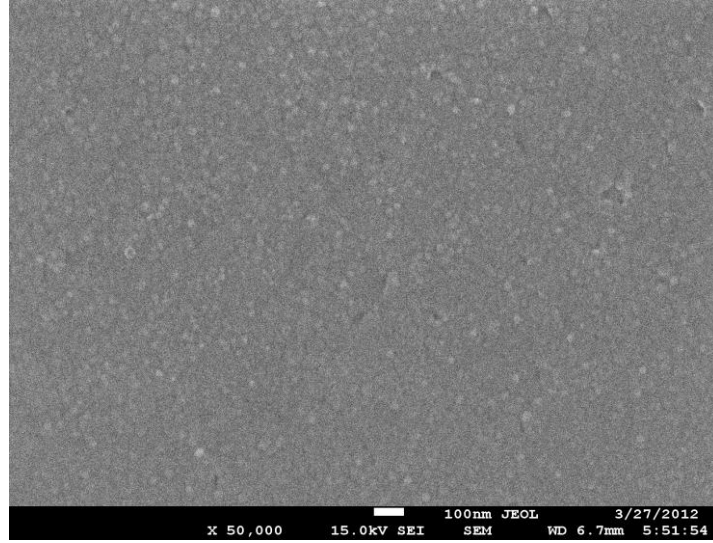
#### 4.1.1 SEM ve EDS Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) malzemelerin mikro yapılarının incelenmesinde kullanılmaktadır. Örneklerin SEM görüntüsünün elde edilmesinde JSM-7600 F model JEOL marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

Üretilen ince filmlerinin 15 kV hızlandırma gerilimi ile 50 000 büyütme oranında SEM görüntüleri Şekil 4.1 (a) ve (b) 'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 4.1** Soğuk taban (a) ve 400 °C tavlanan (b) CdTe ince filmlerinin SEM görüntüleri

Elde edilen SEM görüntülerinden üretilen ince filmlerin homojen yapıda olduğu, yüzeylerinde çatlak veya boşluklar olmadığı ve nano-boyuttaki taneciklerin düzgün küresel şekilli olduğu görülmektedir.

EDS tekniği ile soğuk alttaş üzerine depolanan ve 400 °C' de tavlanan CdTe ince filmlerinin yüzeyindeki elementlerin nitel analizleri yapılmıştır. Bu teknik yardımı ile üretilen ince filmler üzerindeki bileşiğin oluşma biçimi, Cd:Te oranı ve kirlilik atomlarının yapıda olup olmadığı araştırılmıştır. Elementsel analiz sonucunda üretilen ince filmler içerisinde Cd ve Te atomları dışında başka kirlilik atomlarına rastlanmamış ve yaklaşık olarak 1:1 oranında stokiyometriye uygun CdTe ikili bileşiğinin cam alttaşlar üzerine depolandığı gözlenmiştir. Tablo 4.1' de soğuk alttaş üzerine depolanan Tablo 4.2' de ise 400 °C' de tavlanan CdTe ince filmlerinin EDS analizleri verilmiştir.

**Tablo 4.1** : Soğuk alttaş üzerine depolanan CdTe ince filminin EDS analizi

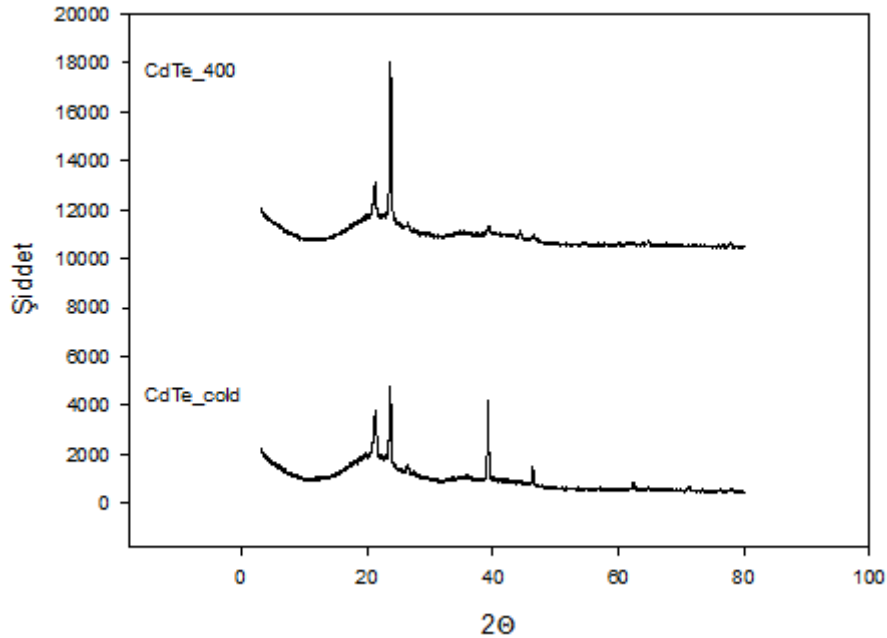
Element	Yüzdece Ağırlık %	Atomik Ağırlık %
Cd	45,19	48,35
Te	54,81	51,65

**Tablo 4.2** : 400 °C' de tavlanan CdTe ince filmlerinin EDS analizi

Element	Yüzdece Ağırlık %	Atomik Ağırlık %
Cd	44,56	47,71
Te	55,44	52,29

#### 4.1.2 XRD Analizi

XRD analizleri yardımı ile üretilen filmlerin tavlamaya bağlı olarak yapısal özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Filmlerin X-ışını kırınım desenleri  $\lambda=1,54$  Å dalga boyulu X-ışını demeti kullanılarak 3°-80° aralığında elde edilmiştir. Elde edilen X-ışını kırınım desenlerindeki piklerin şiddetleri ve değerlerine göre üretilen filmlerin kristalleşmeleri, hangi yapıya sahip oldukları ve tanecik boyutu analizleri yapılmıştır. Pik şiddetlerinin şiddetlerinin yüksek olduğu açılar değerlerinde filmlerin kristalleşmesinin iyi olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.2' de üretilen CdTe ince filmlerin XRD sonuçları verilmiştir.

**Şekil 4.2** Soğuk taban ve 400 °C tavlanan CdTe ince filmlerinin XRD sonuçları

XRD metodu kullanılarak ince filmlerin tanecik büyüklükleri aşağıda verilen Scherrer formülü kullanılarak hesaplanabilmektedir.



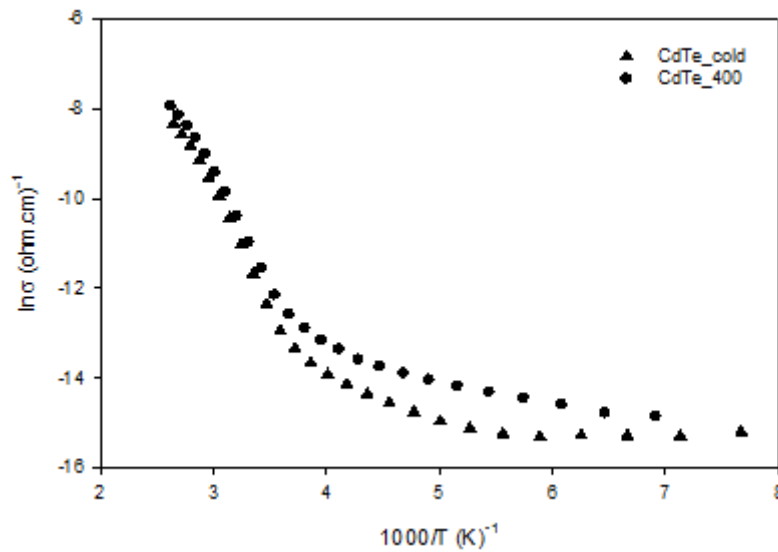
$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

Burada  $D$ , kristal büyüklüğü;  $\lambda$ , kullanılan X-ışını kaynağının dalga boyu;  $\beta$ , radyan cinsinden kırınım pikinin yarı maksimum genişliği,  $\theta$ , XRD pikinin Bragg kırınım açısı ve  $K$ , tanecik büyüklüğü hesaplanan film ile ilgili bir sabittir. Yukarıdaki denklem ve XRD sonuçları kullanılarak filmlerin tanecik boyutları soğuk alttaş üzerine depolanan CdTe ve 400 °C tavlanan CdTe ince filmleri için sırasıyla 22 ve 30 nm olarak hesaplanmıştır. Soğuk alttaş üzerine depolanan filmler tavlандıkça tanecik büyüklüğünün arttığı yani filmlerin amorf yapıdan daha polikristal yapıya geçtiği belirlenmiştir.

## 4.2 Elektriksel Ölçümler

Bu bölümde üretilen ince filmlerin sıcaklığa bağlı olarak iletim mekanizmaları incelenmiş ve tuzak seviyeleri belirlenerek elektriksel iletkenliği 80-380 K sıcaklık aralığında belirlenmiştir. Üretilen numuneler üzerindeki In kontakların omikliği, oda sıcaklığında  $I$ - $V$  ölçümleri ile belirlenmiştir.

CdTe\_cold ve 400 °C' de 30 dakika tavllanmış CdTe\_400 ince filmlerinin elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.3' de verilmiştir. Her iki numune içinde iletkenliğin sıcaklığa üstel olarak bağımlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3 Üretilen CdTe İnce filmlerinin iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi

CdTe ince filmlerinin elektriksel iletkenlik değişimi değişik sıcaklık bölgelerinde etkili olan akım mekanizmalarının araştırılması amacıyla incelendi. İletim mekanizmalarının tespiti için iletkenlik verileri,

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (4.2)$$

ile verilen genel elektriksel iletkenlik ifadesine göre analiz edildi. Bu ifadeye göre, Şekil 4.5'te gösterilen  $\ln(\sigma)-(1000/T)$  grafiğinin lineer olduğu her değişik sıcaklık bölgesi o sıcaklık aralıklarındaki  $E_a$  aktivasyon enerjilerini verecektir. Tablo 4.3' de üretilen CdTe ince filmlerinin bazı elektriksel parametreleri verilmiştir.

**Tablo 4.3** Üretilen ince filmlerin oda sıcaklığına ölçülen elektriksel parametreleri

Numune	$\sigma_{295\text{ K}}$ ( $\Omega\text{-cm}$ ) <sup>-1</sup>	$E_{a1}$ (meV)	$E_{a2}$ (meV)
CdTe	$8,5 \times 10^{-6}$	64,92	419,31
CdTe_400	$1,73 \times 10^{-5}$	41,91	402,42

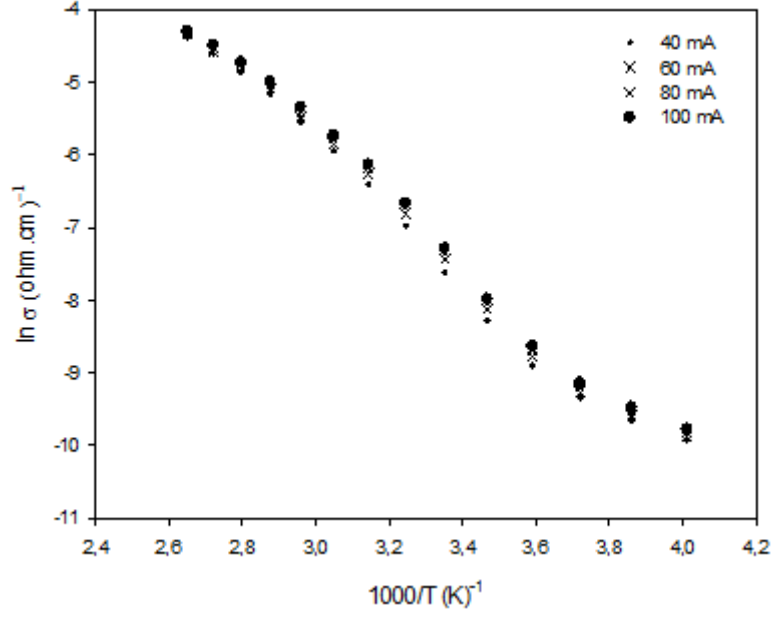
Şekil 4.3'den de görüleceği gibi artan sıcaklık ile iletkenliğin artması tipik yarı iletken özelliği göstermektedir. Karanlık iletkenlik ölçümlerinden, filmlerin düşük ve yüksek sıcaklık bölgelerinde 2 farklı tuzak seviyesine rastlanmıştır. Bu tuzak seviyeleri tavlınmamış numune için düşük sıcaklıklarda 64 meV, yüksek sıcaklık bölgesinde ise 419 meV olarak gözlenmiştir. 400°C' de tavlınmış filmler için ise düşük sıcaklık bölgesinde 41 meV, yüksek sıcaklık bölgesinde ise 402 meV olarak bulunmuştur. Ayrıca numunelerin iletkenliğinin tavlamaya bağlı olarak arttığı gözlenmiştir.

### 4.3 Optik Ölçümler

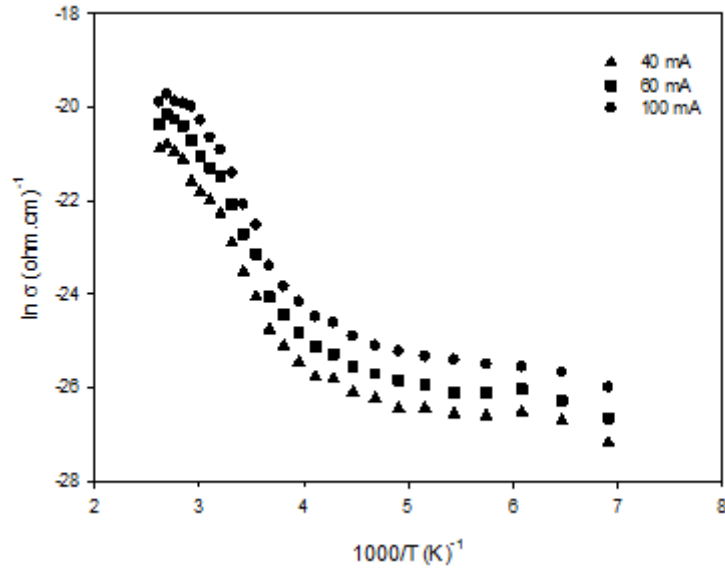
#### 4.3.1 Fotoiletkenlik Ölçümleri

Elektriksel iletkenlik ölçümlerinde yarıiletken davranış gösteren CdTe ince filmlerinin ışığa karşı duyarlılığını ölçmek için sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ölçümü 200-350 K aralığında yapılmıştır ve ölçüm sırasında numuneye 60 V/cm elektrik

alan uygulanmıştır. CdTe ince filminin değişik ışık şiddetlerindeki iletkenliklerinin sıcaklığa bağlılığı Şekil 4.4 (a) ve (b) 'de  $\ln(\sigma)-(1000/T)$  grafiği ile verilmiştir.



(a)

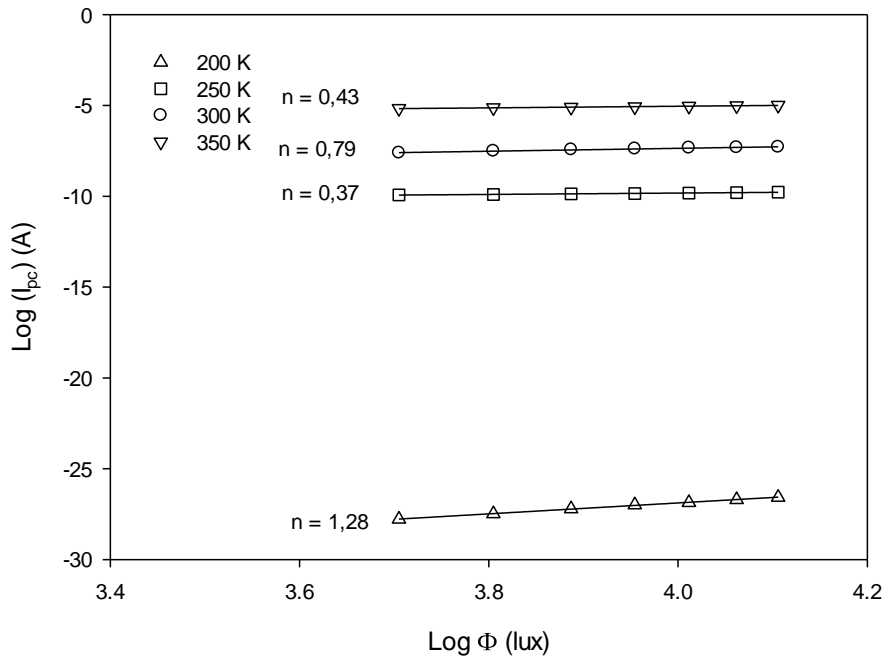


(b)

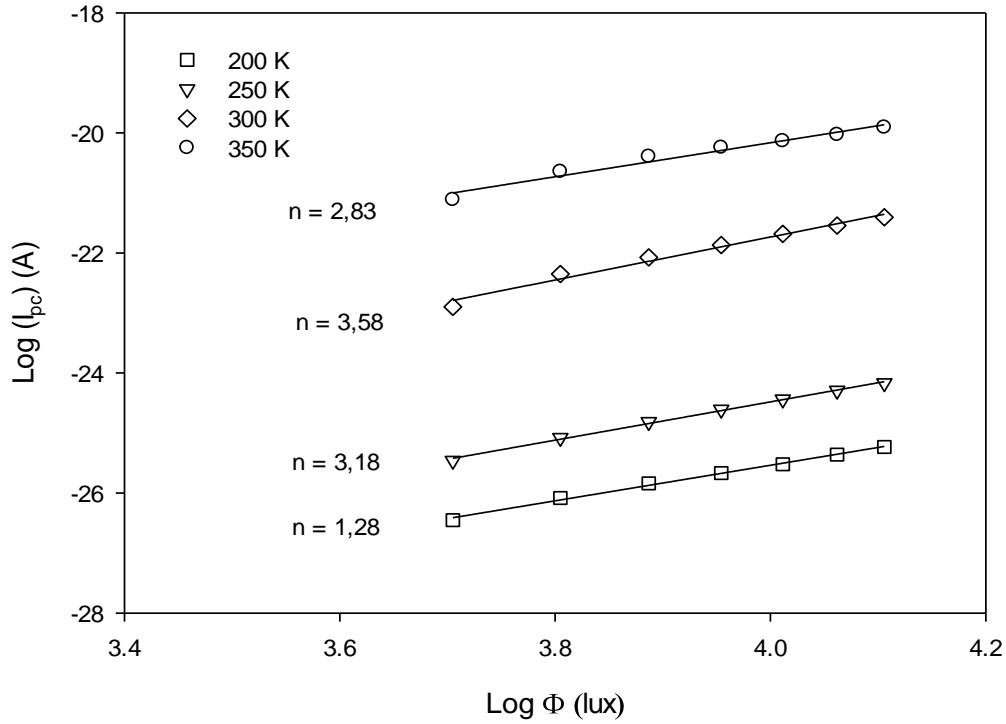
**Şekil 4.4** (a) Soğuk taban üzerine büyütülmüş ve (b) 400 °C tavlanan CdTe İnce filmlerinin farklı aydınlatma şiddetlerinde iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimleri.

Fotoiletkenlik  $\Delta\sigma$ , karanlıkta ölçülmüş iletkenliğin aydınlıktaki iletkenlikten çıkarılması ile bulunur. Şekil 4.4, CdTe numunelerinin foto-iletkenliğinin sıcaklığa göre değişimini değişik ışık şiddetleri için göstermektedir. Işık şiddetine bağlı fotoiletkenlik ölçümlerinden malzemenin ışığa duyarlı olduğu ve artan ışık şiddeti ile iletkenliğin arttığı gözlenmiştir.

Fotoiletkenliğin ışık şiddetine bağımlılığı dengede olmayan foto-taşıyıcıların yeniden birleşme mekanizmaları ile açıklanır. Bu yeniden birleşme merkezlerinin karakteristiği, fotoakım-ışık şiddeti bağımlılığının değişik sıcaklıklarda ölçülmesi ile elde edilebilir. Teoride, fotoakımla ışık şiddeti arasındaki bağıntı  $I_{ph} \sim \Phi^n$  olarak verilir (Bube, 1960). Burada n kuvveti, dengede olmayan taşıyıcıların yeniden birleşme mekanizmasının bir fonksiyonudur. (Gölcür, 2012) Fotoakım-ışık şiddeti değişimi CdTe\_cold ve CdTe\_400 örnekleri için 200, 250, 300 ve 350K sıcaklıklarında karşılaştırmalı olarak Şekil 4.5 (a) ve (b)' de verilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 4.5 (a)** Soğuk taban ve **(b)** 400 °C tavllanmış CdTe İnce filmlerinin Fotoiletkenliklerinin aydınlatma şiddeti ile değişimleri.

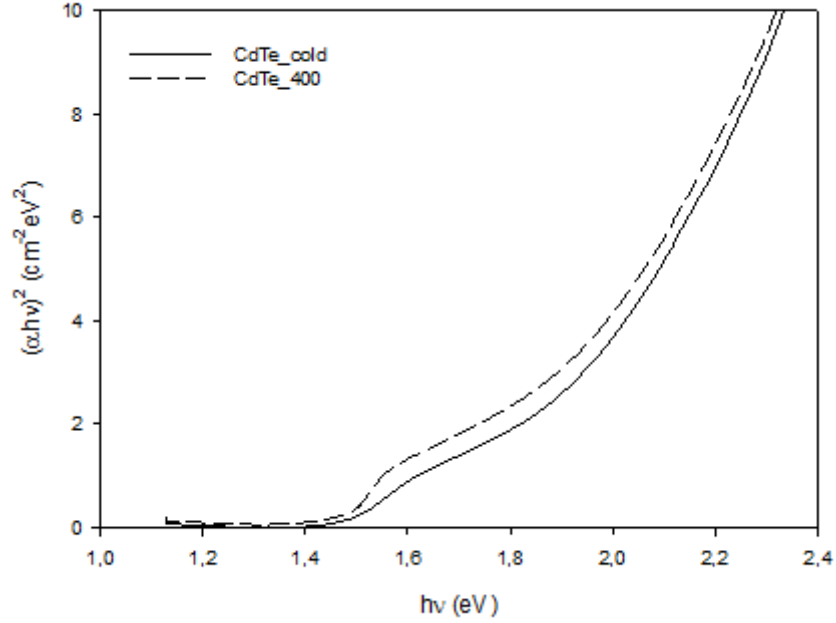
Sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ölçümlerinden malzemenin foto duyarlılığının ve taşıyıcı ömrünün artan sıcaklık ile artış gösterdiği belirlenmiştir. n değerinin 1 ile 1,5 arasında değiştiği bulunmuştur. n'in artan sıcaklık ile artış göstermesi, taşıyıcı ömrünün ve buna bağlı olarak malzemenin foto duyarlılığının arttığının bir göstergesidir.

#### 4.3.2 Optik Soğurma Ölçümleri

Üretilen ince filmler için oda sıcaklığında soğurma spektrumları incelenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda tavlamanın ince filmlerin yasak enerji aralığına etkileri araştırılmıştır.

Bant aralığı  $E_g$ ' yi tespit etmek için genellikle kullanılan yöntem;  $(\alpha E)^n$  e karşılık foton enerjisi  $E$ ' nin grafiğini çizmektir. Grafiğin lineer olduğu kısma karşı gelen doğrunun eksenini kestiği noktanın enerji değeri, o numunenin yasak enerji aralığı değerini verir. Buradaki n katsayısı elektronik geçişlerin tipini belirleyen bir

katsayı olup, 1/2, 3/2, 2 ve 3 değerlerine sahip olabilmektedir. 1/2 ve 3/2 izinli ve yasaklanmış doğrudan geçişleri, 2 ve 3 ise izinli ve yasaklanmış dolaylı geçişlere karşı gelmektedir. Şekil 4.6' da üretilen ince filmlerin oda sıcaklığında ölçülen optik soğurma ölçümleri verilmiştir.



**Şekil 4.6** Üretilen ince filmlerin oda sıcaklığındaki soğurma ölçümleri

Şekil 4.6' dan da görüleceği gibi filmler yarı iletken özelliği göstermekte olup direk band aralıkları 1,8 ve 1,69 eV olarak bulunmuştur. Tavlama sonucunda band aralığındaki kayma ve yapının düzelmesi açık bir şekilde görülmektedir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen II - VI yarıiletken grubuna ait olan katkısız CdTe ince filmlerinin, kristal yapısı, elektrik ve optik özellikleri, XRD, sıcaklığa bağlı iletkenlik, fotoiletkenlik ve oda sıcaklığında soğurma yöntemleri ile araştırılmıştır. Ayrıca örneklerin tavlama işlemine bağlı olarak, yapılarındaki değişimi incelemek için üretilen filmler 400 °C' de 1 saat tavllanmışlardır.

SEM görüntülerinden üretilen ince filmlerin homojen yapıda olduğu, yüzeylerinde çatlak veya boşluklar olmadığı ve nano-boyuttaki taneciklerin düzgün küresel şekilli olduğu görülmektedir.

EDS tekniği ile soğuk alttaş üzerine depolanan ve 400 °C' de tavlanan CdTe ince filmlerinin yüzeyindeki elementlerin nitel analizleri yapılmıştır. Elementsel analiz sonucunda üretilen ince filmler içerisinde Cd ve Te atomları dışında başka kirlilik atomlarına rastlanmamış ve yaklaşık olarak 1:1 oranında stokiyometriye uygun CdTe ikili bileşiğinin cam alttaşlar üzerine depolandığı gözlenmiştir.

XRD analizleri sonucunda üretilen filmlerin stokiyometrik bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Ortaya çıkan piklerin şekil ve pozisyonlarından filmlerin polikristal olduğu ve kristal yapının kübik yapıda olduğu tespit edilmiştir. Tavlamaya bağlı olarak ise filmlerin daha düzenli bir yapıya geçiş yaptığı gözlenmiştir.

Sıcaklığa bağlı iletkenlik ölçümlerinden filmlerin tipik yarıiletken davranışı sergilediği ve iletkenliğin sıcaklığa üstel olarak bağlı olduğu gözlenmiştir. Tavlamaya bağlı olarak, saf numuneye göre filmlerin özdirençlerinin azaldığı, iletkenliklerinin ise arttığı belirlenmiştir. Ayrıca düşük ve yüksek sıcaklık bölgelerinde filmlerin 2 farklı tuzak seviyesine sahip olduğu belirlenmiştir.

Işık şiddetine bağlı fotoiletkenlik ölçümlerinden malzemenin ışığa duyarlı olduğu ve artan ışık şiddeti ile iletkenliğin arttığı gözlenmiştir.

Sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik ölçümlerinden malzemenin foto duyarlılığının ve taşıyıcı ömrünün artan sıcaklık ile artış gösterdiği belirlenmiştir.

Oda sıcaklığında yapılan optik soğurma ölçümlerinden filmlerin doğrudan bant geçişine sahip olduğu ve tavlamaya bağlı olarak yasak enerji aralıklarının 1,8 eV'den 1,69 eV' ye düştüğü gözlenmiştir.



## KAYNAKLAR

Akgöz A. (2010) **Polianilin-Pomza Kompozitinin Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fizik Bölümü*, Denizli

AKALTUN Yunus. (2006) **CdSe, ZnSe ve CdxZn1-xSe Yarıiletken İnce Filmlerinin SILAR Tekniği İle Büyütülmesi Yapısal, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi** Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum

Akyüz, İ.,2005: **CdO Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri Üzerine Al Katkılama ve Tavlama İşlemlerinin Etkileri**, Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.

Aşkın F., Şahutoğlu G. (2011) **Labview de Dalga Boyuna Bağlı Fotoiletkenlik Ölçümleri İçin Gerekli Programın Yazılımı ve Uygulanması**, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fizik Bölümü*, Denizli

Brundle, C.R., Eves, C.A., Wilson, Jr.S., 1992: **Ebcyclopedia of Materials Characterizatın**, Butterworrrth - Heinemam, ISBN [0-7506-9168-8].

Boz B. (2010) **Co Katkılı TIGaS<sub>2</sub> Kristalinin Yapısal, Elektrik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi** Yüksek Lisans Tezi *Pamukkale Üniversitesi Fizik Bölümü*, Denizli

Bube, R. H. (1960) **Photoconductivity of Solids**, *John Wiley & Sons*, New Jersey, 460s.

Chihiro Hamaguchi, (2009) **Basic Semiconductors Physics**, Springer Osaka 287-291

ÇALIŞKAN, M., (2006), **Au/CdTe ve Ag/CdTe Eklemlerin Yapısal ve Opto-Elektronik Özellikleri**, (Doktora Tezi), *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,

DELİGÖZ, E., (2007), **Bazı İkili (CdS, CdSe, CdTe, CdF<sub>2</sub>, AlBi, BBi) Bileşiklerin Yapısal, Elektronik, Elastik, Termodinamik ve Titreşimsel Özelliklerinin AB INITIO Yöntemle İncelenmesi**, (Doktora Tezi), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

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

Gölcür D. (2012), **CdInTe İnce Filmlerinin Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi *Pamukkale Üniversitesi Fizik Bölümü*, Denizli

HYEONGNAM K., Donghwan K., (2001), **Influence Of Cds Heat Treatment On The Microstructure Of CdS And The Performance Of CdS/CdTe Solar Cells**, Solar Energy Materials and Solar Cells, 67, 297-304.

IKHMAYİES S. J., Ahmad-Bitar R. N., (2012), **Interface Photoluminescence of the SnO<sub>2</sub>:F/CdS:In/CdTe Thin Film Solar Cells** Prepared Partially by the Spray Pyrolysis Technique, Journal of Luminescence, 132, 502-506.

İlcan, S., Çağlar, Y. ve Çağlar, M., (2005): **ZnO Yarıiletken Filmlerinin Yasak Enerji Aralıkları**, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9. Cilt, 1. Sayı, 48-55 s.

KATİYAR R.K., Sahoo S., Gaur A.P.S., Singh A., Morell G., Katiyar R.S., (2011), **Studies of Photovoltaic Properties of Nanocrystalline Thin Films of CdS–CdTe**, Journal of Alloys and Compounds, 509, 10003-10006.

KALKAN N. (1994); **TlInS<sub>2</sub> Tek Kristallerinin Fotoiletkenlik Özellikleri** Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fizik Bölümü*, İstanbul

KARA K. 2008; **Atmalı Filtreli Katodik Vacum Ark Depolama Yöntemi İle P-TİPİ ZnO ( ÇİNKO OKSİT ) Üretimi Ve Yapısal Özellikleri** Yüksek Lisans Tezi *Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü*, Adana

ÖRDEK, C., (2007), **CdTe Kristalinde Taşıyıcı Yoğunluğunun Etkin İki Seviye Modeli İle Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Muğla

Özkan, M., (2010): **Termoiyonik 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.

Sarı, H., 2008: **Yarıiletkenler ve Optik Özellikler**, Yüksek Lisans Ders Notları, *Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü*, Ankara.

Streeman, B.G. and Banerjee, S.K., 2006: **Solid State Electronic Devices**, Prentice-Hall, 581 s.

Şişman, İ., 2006: **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.

Takanoğlu D.(2011) **Katkısız ve Katkılı CdTe ince filmlerinin Optik Ve Elektrik Özelliklerinin Araştırılması**, Yüksek Lisans Tezi **Pamukkale Üniversitesi Fizik Bölümü**, Denizli

Taylo, J.R., Zafaritos, C.D., 1996: (Çev. Bekir Karaoğlu) **Fizik ve Mühendislikte Modern Fizik**, Bilgi Tek Yayıncılık, İstanbul, 455s.

Vij. D. R. (1998) **Luminescence of Solids**, Plenum Press, New York, 427

Yazıcı, D. (2007) **Fosfin Metal Komplekslerinin Fiziksel Özellikleri**, Yüksek Lisans Tezi, **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana

YILMAZ, S., (2007), **Düşük Aıtlık Sıcaklıklarında Üretilen CdTe İnce Filmlere CdCl<sub>2</sub>'ün Etkisinin İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon**

ZENCİR, B., (2007), **Çok Kristalli Cdte İnce Filmlerinin Optiksel Özellikleri: Optiksel Sabitlerin “Zarf Yöntemiyle” Saptanması**, Yüksek Lisans Tezi, **Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla**

**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:</b> 2011 BSP 003
<b>Proje Başlığı:</b> Katkısız ve Katkılı CdTe İnce Filmlerin Elektrik ve Fotoelektrik Özelliklerinin Araştırılması
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Arş. Gör. Dr Yusuf ÖZCAN
<b>Projenin Yürütüldüğü Birim:</b> FEN-EDEBİYAT FAKÜLTESİ FİZİK BÖLÜMÜ
<b>Varsa, Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b>
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 01.03.2011-
<b>Özet</b> <p>Bu çalışmanın ana amacı; optik ve elektriksel özellikleri açısından iletken ve yalıtkanlara göre farklı özellikler taşıyan ve endüstrideki kullanım açısından her geçen gün daha fazla önem kazanan yarı iletken ince filmlerin optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesidir. Periyodik tablonun II-VI. grup elementlerinden oluşan II-VI bileşikleri ise IV. grup elementlerine göre daha yeni yarı iletken malzemelerdir. Mevcut ve ucuz ham maddelerden yüksek saflıkla elde edilebilmesi, uygun metotlarla kaliteli polikristal tabakalar halinde üretilebilir olması, diğer gruptaki yarı iletkenlere göre üstünlük sağlamaktadır.</p> <p>Son yıllarda periyodik cetvelin II-VI grubu bileşiklerinden olan tek kristallerin optik lüminesans ve iletkenlik özellikleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu bileşikler geniş bir bant aralığına sahip olup, mor üstünden kırmızı altı spektrumuna kadar olan görünür bölgede ışımaya yaparak çok iyi bir lüminesans özelliği göstermektedir. Bu nedenle foto ve katodolüminesans ölçümleri için çok elverişli malzemelerdir. Ayrıca, II-VI grubuna dahil bileşiklerin çoğu elektrik enerjisini oldukça iyi iletmekte olup, enerji bant aralığında çok miktarda taşıyıcı iyon sürüklenmesine sahiptir. Bu nedenle kadmiyum bileşiklerinin teknolojiye elektrolüminesans, diyot, lüminesans, ekran ve güneş pili yapımında kullanılabilmesi için geniş araştırma ve incelemeler yapılmaktadır.</p>

Yarı iletken teknolojisinde, klasik Si, GaAs, InP gibi külçe yarı iletkenler dışında, gerek opto elektronik, gerekse yarı iletken aygıt üretiminde ihtiyaca uygun yeni yarı iletken ince filmlerin üretilmesi ve bu filmlerin üretim teknikleri konusundaki çalışmalar önem kazanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İnce Film, CdTe, Elektriksel Karakterizasyon, Optik Karakterizasyon

**Varsa, Projeden Yapılan Yayınlar:** . Y. ÖZCAN, D. TAKANOĞLU, CdTe İnce Filmlerinin Yapısal, Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, II. Adım Fizik Günleri, Pamukkale Üniversitesi Fizik Bölümü. DENİZLİ, Nisan 26 – 27 – 28, 2012