

**PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN
In KATKILI Zn_xCd_{1-x}O FİMLERİNİN
ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİ**

Yeşim GÜRCAN
Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı
Eylül-2006

ÖZET

Doktora Tezi

PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN In KATKILI $Zn_xCd_{1-x}O$ FİMLERİNİN ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİ

Yeşim GÜRÇAN

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin ZOR
2006, 110 sayfa

Bu çalışmada, II-VI bileşiklerinden olan $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkıli $Zn_xCd_{1-x}O$ yarıiletken filmlerinin bazı elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir. Filmler püskürtme yöntemiyle (spray-pyrolysis) cam tabanlar üzerinde elde edilmişlerdir. X-ışını kırınım desenlerinden, elde edilen katkıli ve katkısız filmlerin kübik veya hekzagonal yapıda ve polikristal oldukları saptanmıştır. XRD sonuçları, tercihli yönelmelerin, CdO ve ZnO konsantrasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir. Filmlerin yasak enerji aralığının direkt bant geçişli olduğu ve değerlerinin 2.25-3.3eV arasında değiştiği belirlenmiştir. Bütün filmlerin n-tipi iletkenlik gösterdikleri belirlenmiş ve I-V karakteristiklerinden ohmik iletim mekanizmasına sahip oldukları gözlenmiştir. Hesaplanan iletkenlik değerlerinin katkısız ve katkıli $Zn_xCd_{1-x}O$ filmler için sırasıyla 5×10^3 - $3.7 \times 10^{-6} (\Omega cm)^{-1}$ ve 1.2×10^3 - $4 \times 10^{-3} (\Omega cm)^{-1}$ arasında değiştikleri bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bileşik Yarıiletkenler, Spray-Pyrolysis, Ohmik İletim, İletkenlik, Transparent İletken Oksitler (TCO), Optik Özellikler

ABSTRACT**Ph. D. Thesis****ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF In DOPED $Zn_xCd_{1-x}O$ FILMS PRODUCED BY THE SPRAY PYROLYSIS METHOD****Yeşim GÜRCAN****Anadolu University
Graduate School of Sciences
Physics Program****Supervisor: Prof. Dr. Muhsin ZOR
2006, 110 pages**

In this study, some of the electrical and optical properties of undoped and In doped $Zn_xCd_{1-x}O$ II-VI compound semiconductor films have been investigated. The materials have been produced on to the glass substrates by means of the spray-pyrolysis method. The x-ray diffraction spectra of the films showed that they are polycrystalline and sphalerite or hexagonal in structure. XRD results showed that the preferred orientation of crystallites depends on CdO and ZnO concentration. The material have exhibited direct band gap characteristics with band gap values lying in the range between 2.25-3.3eV. n-type conduction have been observed in all of the films and their I-V characteristics have shown ohmic conduction. The calculated values of conductivities of undoped and doped $Zn_xCd_{1-x}O$ films varied between $5 \times 10^3 - 3.7 \times 10^{-6} (\Omega cm)^{-1}$ ve $1.2 \times 10^3 - 4 \times 10^{-3} (\Omega cm)^{-1}$, respectively.

Keywords: Compound Semiconductors, Spray Pyrolysis, Ohmic Conduction, Conductivity, Transparent Conducting Oxides (TCO), Optical Properties

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, bilimsel katkıları gördüğüm ve tecrübelerinden yararlandığım saygıdeğer hocam sayın Prof. Dr. Muhsin ZOR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

X-ışınları kırınım desenlerinin çekilmesine izin veren Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'ne, optik absorpsiyon spektrumlarının çekilmesine izin veren Anadolu Üniversitesi Kimya Bölüm Başkanlığına teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında yardım ve desteklerini gördüğüm Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim üyeleri Yard. Doç. Dr. Metin KUL, Öğr. Gör. Dr. A. Şenol AYBEK, Yard. Doç. Dr. Sabiha AKSAY ve Arş. Gör. Evren TURAN'a ve bu aşamaya gelinceye kadar yetişmemde emeği geçen tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemi sağlayan rahmetli babama, destek ve sabrını esirgemeyen sevgili anneme teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmam süresince gösterdikleri anlayıştan dolayı eşim İsmet GÜRCAN'a ve kızlarım Ecem ve Sinem'e teşekkürlerimi sunarım.

Yeşim GÜRCAN

Eylül-2006

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. II-VI Bileşikleri.....	2
1.3. CdO ve ZnO Bileşiklerinin Özellikleri.....	6
1.4. Amaç.....	8
2. YARIİLETKENLER	9
2.1. Giriş.....	9
2.2. Katılarda Bant Oluşumu.....	10
2.3. Taşıyıcı Konsantrasyonu ve Has (Intrinsic) Yarıiletkenler	12
2.4. Katkılı (Impurity) Yarıiletkenler.....	17
2.5. Elektriksel İletkenlik ve Mobilite.....	23
3. FİLMLEİN ELDE EDİLMESİ	28
3.1. Giriş.....	28
3.2. Püskürtme (Spray Pyrolysis) Yöntemi.....	28
3.3. Zn _x Cd _{1-x} O Filmlerinin Elde Edilmesi.....	30
3.3.1. Çözeltilerin hazırlanması.....	31
3.3.2. Püskürtme kabini.....	31
3.3.3. Isıtıcı ve sıcaklık kontrolü.....	32

3.3.4. Püskürtme başlığı (Spray-Head).....	32
3.3.5. Püskürtme basıncı.....	34
3.3.6. Çözelti akış hızı.....	34
3.3.7. Deneyin yapılışı.....	34
3.4. Elde Edilen Filmlerin Kalınlıkları.....	36
4. X-IŞINI KIRINIM DESENLERİ	38
4.1. Giriş.....	38
4.2. X-Işını Kırınımı.....	38
4.3. Katkısız ve In Katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ Filmlerinin X-Işını Kırınım Desenleri.....	40
5. ABSORPSİYON	53
5.1. Giriş.....	53
5.2. Temel Absorpsiyon Olayı.....	53
5.2.1. Direkt bant geçişi.....	54
5.2.2. İndirekt bant geçişi.....	57
5.3. Katkısız ve In Katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ Filmlerinin Temel Absorpsiyon Spektrumları ve Yasak Enerji Aralıkları	58
6. DC İLETKENLİK	75
6.1. Giriş.....	75
6.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar.....	75
6.3. Ohmik Kontak.....	77
6.4 Metal-Yarıiletken-Metal Yapılarda Akım Taşınım Olayları.....	78
6.4.1. Richardson-Schottky emisyonu.....	78
6.4.2. Poole-Frenkel emisyonu.....	79
6.4.3. Tünel emisyonu.....	82
6.4.4. Space-Charge-Limited ve ohmik iletim.....	82

6.5. Katkısız ve In Katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ Filmlerinde	
Metal-Yarıiletken-Metal Yapıların Oluşturulması.....	89
6.6. Katkısız ve In Katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ Filmlerinin	
Akım-Voltaj Karakteristikleri.....	90
7. SONUÇ	102
KAYNAKLAR.....	104

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
1.1. Yüzey merkezli kübik (fcc) yapı.....	3
1.2. Kübik (Sphalerite) kristal yapı.....	4
1.3. Sıkı paketlenmiş hekzagonal yapı.....	4
1.4. Hekzagonal (wurtzite) yapı.....	5
1.5. Kübik yapıdaki NaCl bileşiği.....	7
1.6. Hekzagonal yapıdaki ZnO bileşiği.....	8
2.1. Atomlar arası uzaklığın fonksiyonu olarak karbonun enerji-bant diyagramı.....	11
2.2. Bir yarıiletkenin (a) $T=0K$ 'de (b) $T>0K$ 'de şematik enerji-bant diyagramı.....	12
2.3. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu.....	13
2.4. Has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi.....	17
2.5. Si kristaline As atomu katkılanması.....	18
2.6. Bir yarıiletkende donör enerji seviyesi.....	19
2.7. Si kristaline Ga atomu katkılanması.....	20
2.8. Bir yarıiletkende akseptör enerji seviyesi.....	21
2.9. Katkılı yarıiletkenlerde Fermi Enerji seviyeleri.....	22
(a) n-tipi (b) p-tipi	
2.10. Bir yarıiletkende elektrik alanının varlığında elektron ve hollerin hareket yönleri.....	24
3.1. Damlacık boyutuna bağlı çeşitli depozisyon yöntemleri.....	29
3.2. Püskürtme deney seti.....	30
3.3. Püskürtme yönteminde kullanılan ultrasonik püskürtme başlığı ile püskürtme konisinin şematik gösterimi.....	33
4.1. X-ışınlarının kristal tarafından kırınımına uğratılması.....	39
4.2. $250\pm^0C$ taban sıcaklığında $x=0$ için elde edilen CdO filminin x-ışını kırınım deseni.....	43
4.3. $250\pm^0C$ taban sıcaklığında $x=0$ için elde edilen %1 In katkılı CdO filminin x-ışını kırınım deseni.....	44

4.4.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.25 için elde edilen Zn _x Cd _{1-x} O filminin x-ışını kırınım deseni.....	45
4.5.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.25 için elde edilen %1 In katkılı Zn _x Cd _{1-x} O filminin x-ışını kırınım deseni.....	46
4.6.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.5 için elde edilen Zn _x Cd _{1-x} O filminin x-ışını kırınım deseni.....	47
4.7.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.5 için elde edilen %1 In katkılı Zn _x Cd _{1-x} O filminin x-ışını kırınım deseni.....	48
4.8.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.75 için elde edilen Zn _x Cd _{1-x} O filminin x-ışını kırınım deseni.....	49
4.9.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.75 için elde edilen %1 In katkılı Zn _x Cd _{1-x} O filminin x-ışını kırınım deseni.....	50
4.10.	250± ⁰ C taban sıcaklığında elde edilen ZnO filminin x-ışını kırınım deseni.....	51
4.11.	250± ⁰ C taban sıcaklığında elde edilen %1 In katkılı ZnO filminin x-ışını kırınım deseni.....	52
5.1.	Bir yarıiletkenin temel absorpsiyon spektrumu.....	55
5.2.	Bir yarıiletkenin direkt bant geçişinin şematik gösterimi.....	55
5.3.	Bir yarıiletkenin indirekt bant geçişinin şematik gösterimi.....	57
5.4.	Bir yarıiletkenin absorpsiyon katsayısının fotonun enerjisine göre değişiminden, yasak enerji aralığının belirlenmesi.....	59
5.5.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0 için elde edilen Zn _x Cd _{1-x} O filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) (αhv) ² ≈hv değişimi.....	63
5.6.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0 için elde edilen %1 In katkılı Zn _x Cd _{1-x} O filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) (αhv) ² ≈hv değişimi.....	64
5.7.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.25 için elde edilen Zn _x Cd _{1-x} O filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) (αhv) ² ≈hv değişimi.....	65

5.8.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.25 için elde edilen %1 In katkılı Zn _x Cd _{1-x} O filminin oda sıcaklığında (a)temel absorpsiyon spektrumu (b) (αhv) ² ≈hv değişimi.....	66
5.9.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.5 için elde edilen Zn _x Cd _{1-x} O filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) (αhv) ² ≈hv değişimi.....	67
5.10.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.5 için elde edilen %1 In katkılı Zn _x Cd _{1-x} O filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) (αhv) ² ≈hv değişimi.....	68
5.11.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.75 için elde edilen Zn _x Cd _{1-x} O filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) (αhv) ² ≈hv değişimi.....	69
5.12.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=0.75 için elde edilen %1 In katkılı Zn _x Cd _{1-x} O filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) (αhv) ² ≈hv değişimi.....	70
5.13.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=1 için elde edilen Zn _x Cd _{1-x} O filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) (αhv) ² ≈hv değişimi.....	71
5.14.	250± ⁰ C taban sıcaklığında x=1 için elde edilen %1 In katkılı Zn _x Cd _{1-x} O filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) (αhv) ² ≈hv değişimi.....	72
5.15.	Cd-Zn konsantrasyonuna göre katkısız Zn _x Cd _{1-x} O filmlerinin yasak enerji aralıkları değişimi.....	73
5.16.	Cd-Zn konsantrasyonuna göre In katkılı Zn _x Cd _{1-x} O filmlerinin yasak enerji aralıkları değişimi.....	73
6.1.	Metal-(n-tipi) yarıiletken kontağının enerji-bant diyagramı (φ _M > φ _S).....	76
6.2.	Metal-(n-tipi) Yarıiletken ohmik kontağının enerji-bant diyagramı (φ _M > φ _S).....	77
6.3.	Poole-Frenkel emisyonu.....	80
6.4.	Tuzak ve donör seviyeleri.....	81

6.5.	Sıg tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj karakteristiği.....	86
6.6.	Düzlemsel formda oluşturulan metal-yarıiletken-metal yapıların şematik yandan ve üstten gösterimi.....	89
6.7.	Au-CdO-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi.....	92
6.8.	%1 In katkılı Au-CdO:In-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi.....	93
6.9.	Au-Zn _{0,25} Cd _{0,75} O filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi.....	94
6.10.	%1 In katkılı Au-Zn _{0,25} Cd _{0,75} O:In-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi.....	95
6.11.	Au-Zn _{0,5} Cd _{0,5} O filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi.....	96
6.12.	%1 In katkılı Au-Zn _{0,5} Cd _{0,5} O:In-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi.....	97
6.13.	Au-Zn _{0,75} Cd _{0,25} O filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi.....	98
6.14.	%1 In katkılı Au-Zn _{0,75} Cd _{0,25} O:In-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi.....	99
6.15.	Au-ZnO filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi.....	100
6.16.	%1 In katkılı Au-ZnO:In-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi.....	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
1.1. Bazı II-VI bileşiklerine ait enerji bant aralıkları ve iletkenlik türleri (T=300K).....	3
2.1. Si ve Ge için bazı donörlerin iyonlaşma enerjileri(eV).....	19
2.2. Si ve Ge'daki bazı akseptörlerin iyonlaşma enerjileri.....	21
2.3. Bazı yarıiletkenlerin taşıyıcı mobilite değerleri(T=300K).....	26
3.1. $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin elde edilme özellikleri.....	36
3.2. Elde edilen $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin kalınlıkları.....	37
5.1. Katkısız ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin hesaplanan yasak enerji aralığı değerleri.....	74
6.1. Elde edilen metal-yarıiletken-metal yapılarda d ve ℓ değerleri.....	90
6.2. $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerine ait oda sıcaklığındaki iletkenlik değerleri.....	91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Kristalografik örgü parametresi
c	: Işık hızı
d	: İki metal kontak arasındaki mesafe
d_0	: Kristal düzlemleri arasındaki mesafe
e	: Elektronun yükü
E	: Elektrik alan
E_a	: Akseptör enerji seviyesi
E_c	: İletim bandının minimum enerji seviyesi
E_d	: Donör enerji seviyesi
E_F	: Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
E_f	: Son durum enerji seviyesi
E_g	: Yasak enerji aralığı
E_i	: İlk durum enerji seviyesi
E_t	: Tuzak enerji seviyesi
eV	: Elektron volt
$f(E)$:Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
h	: Planck sabiti
I	: Materyali geçen elektromagnetik dalganın şiddeti
I_0	: Materyale gelen elektromagnetik dalganın şiddeti
J	: Akım yoğunluğu
k	: Dalga vektörü
k_B	: Boltzmann sabiti
ℓ	: Elektrot boyu
m_e^*	: Elektronun etkin kütlesi
m_h^*	: Holün etkin kütlesi
m_0	: Serbest elektronun kütlesi
m	: Eğim
M	: Molarite
n	: İletim bandındaki elektron yoğunluğu

n_i	: Has yarıiletkende serbest taşıyıcı yoğunluğu
n_{eff}	: Etkin taşıyıcı yoğunluğu
N_c	: İletim bandındaki elektronun durum yoğunluğu
N_o	: İletim bandındaki birim enerji başına düşen tuzak yoğunluğu
N_t	: Tuzak yoğunluğu
p	: Valans bandındaki hol yoğunluğu
t_f	: Film kalınlığı
T	: Sıcaklık
v_e	: Elektronun sürüklenme hızı
v_h	: Holün sürüklenme hızı
V_A	: Uygulanan voltaj
V_{tr}	: Ohmik akımdan SCL akıma geçiş voltajı
V_{TFL}	: Tuzakların dolmasına karşı gelen voltaj
α	: Lineer absorpsiyon katsayısı
ϵ_0	: Boşluğun permitivitesi
ϵ_r	: Materyalin dielektrik sabiti
ϕ_{Bn}	: Engel yüksekliği
ϕ_M	: Metalin iş fonksiyonu
ϕ_S	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
λ	: Dalgaboyu
λ_g	: Gelen fotonun dalga boyu
μ	: Mobilite
ν	: Frekans
θ	: Bragg açısı
θ_0	: Serbest yüklerin tuzaklanmış yüklere oranı
ρ_f	: Film yoğunluğu
σ	: Elektriksel iletkenlik
σ_i	: Has yarıiletkenler için elektriksel iletkenlik
σ_k	: Katkılı yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1. Giriş

Yarıiletkenler günlük hayatımızda ve endüstrinin hemen bütün dallarında kullanılması nedeniyle önemlidir. Yarıiletken ince filmler 1950' li yıllardan beri çeşitli yöntemlerle elde edilmişlerdir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte ince filmlerin elde edilme yöntemleri de değişmiştir. Önceleri metal ince filmler seramik ve cam üzerinde dekorasyon olarak kullanılmıştır. Daha sonra ise gümüş tuzları kullanılarak cam yüzeyler üzerinde gümüş filmler elde edilmiştir. 19. Yüzyılda gerçekleşen bilimsel gelişmeler ile ince film elde etme yöntemleri de çeşitlenmiştir. İlk film, 1838' de "elektroliz" yöntemi ile elde edilmiştir. 1852' de, Bunsen "kimyasal reaksiyon" yöntemi ile ve Grove "glowe-discharge sputtering" yöntemi ile 1857' de Faraday asal gaz içerisinde buharlaştırma yolu ile metal film elde etmişlerdir. 1887' de, Nahrwold ilk defa vakum kullanarak "Joule ısıtması" ile platin ince film elde etme çalışmaları yapmıştır. 20. Yüzyılda ise Kundt aynı yolla metal filmler elde etmiştir [1].

Günümüzde modern cihazlar kullanılarak, elde edilen filmlerin kristal yapıları, elektriksel ve optik özellikleri incelenmektedir. Bu gelişmeyle ince filmlerin kullanım alanları da çeşitlenmiştir. Yapılan araştırmalar elektronik cihazların gelişmesine neden olmuştur [2].

Teknolojideki hızlı gelişme, enerji sorununu ortaya çıkarmıştır. Yeni enerji kaynakları bulmaya yönelik çalışmalar sonucu, sürekli bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi gündeme gelmiştir. Güneş pilleri üzerinde çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bunun sonucunda güneş pillerinde geniş bir kullanım alanı bulan yarıiletken ince filmler üzerindeki çalışmalar hızlanmıştır. Çünkü, tek kristal güneş pilleri, yarıiletken ince film güneş pillerine göre hem pahalı hem de yapım teknolojileri zordur. Genellikle fotovoltaiik güneş pillerinde Si; Ge ve GaAs gibi tek kristaller ile CdO, ZnO, CdS, CdSe, CdTe, InP, GaP, AgInS₂, CuInSe₂, CuInS₂, CuGa_xIn_{1-x}Se₂ ve Cd_{1-x}Zn_xS gibi ince film yarıiletkenleri yaygın olarak kullanılmaktadır [3,4,5].

Yarıiletken ince filmler; polikristal filmler, tek katlı epitaksiyel (homoepitaksiyel) filmler ve çok katlı epitaksiyel (heteroepitaksiyel) filmler

olmak üzere üç temel grupta elde edilmektedir. Tek katlı ve çok katlı epitaksiyel filmler ileri teknoloji kullanımı ile elde edilen maliyeti yüksek filmlerdir. Bu nedenle bilimsel çalışmalarda maliyeti düşük ve pratik olarak elde edilen polikristal filmler tercih edilmektedir. Polikristal filmler optik ve elektrik özellikleri nedeniyle güneş pili, yarıiletken dedektör gibi bir çok uygulama alanı olan basit ve farklı yöntemlerle elde edilen yarıiletken materyallerdir. Yapılan çalışmalarda kalınlığı 1 μm 'den küçük olan filmler ince film (thin film), büyük olanlar ise kalın film (thick film) olarak adlandırılır [6].

1.2. II-VI Bileşikleri

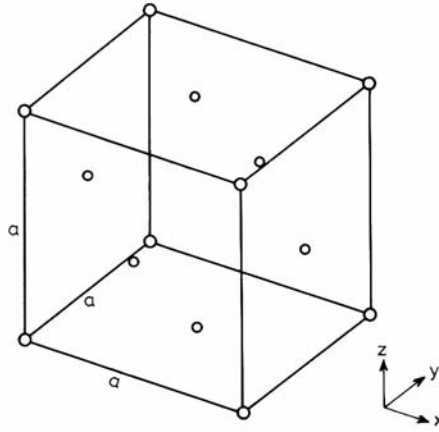
Periyodik cetvelin II grubu elementlerinden olan Zn, Cd, Hg ile VI grup elementleri O, S, Se ve Te ikili, üçlü ve hatta dördü bileşikler oluştururlar. Yüksek elektriksel iletkenlik ve optik geçirgenlik ZnO, CdO, InO gibi farklı ikili metal oksitler ve bunların cadmium zinc oxide, zinc indate, indium tin oxide gibi üçlü bileşikleri ile gerçekleştirilebilmektedir [12]. Bu grup bileşikler enerji bant aralıklarının 1.8-4eV arasında geniş bir bölgeyi kapsamaması nedeniyle, teknolojide ve bilimsel çalışmalarda kullanılmaktadır. Bunlar, güneş pilleri, kızılötesi dedektörler, elektrolüminesans diyotlar, lazerler, radyasyon dedektörleri, gibidir [7]. Bazı II-VI bileşiklerine ait enerji bant aralıkları ve iletkenlik türleri Çizelge 1.1'de verilmiştir.

II-VI bileşiklerinden olan yarıiletkenler, hem kübik (sphalerite) hem de hekzagonal (wurtzite) kristal yapıda kristallenmektedir [9,10,62].

Kübik yapıda ikili bileşiği oluşturan atomlarda biri, diğer türün dört atomu tarafından eşit uzaklıkta olacak şekilde çevrilmiştir. Komşu atomların yerleşim düzeni iç içe geçmiş iki yüzey merkezli kübik yapıdan oluşmaktadır. Her kübik yapı aynı tür atomlardan meydana gelmiştir. İki kübik örgü birbirine paralel olarak yönelmiş ve bir kübün köşesi, diğer kübün gövde merkezinden geçen köşegenin üzerinde ve köşegen uzunluğunun dörtte biri uzaklığında yerleşmiştir. Şekil 1.1'de yüzey merkezli kübik yapı (fcc), Şekil 1.2'de ise kübik (sphalerite) yapı gösterilmiştir.

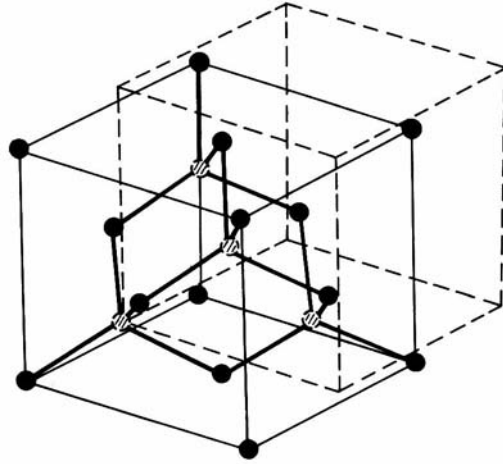
Çizelge 1.1. Bazı IIB-VIA bileşiklerine ait enerji bant aralıkları ve iletkenlik türleri (T=300K)
[8,10,11]

Materyal	İletkenlik tipi	Eg (eV)
CdO	n	2,45
CdS	n	2,42
CdSe	n	1.7
CdTe	n	1.47
ZnS	n	3.6
ZnO	n	3.2
ZnSe	n	2.67
ZnTe	p	2.25
ZnSSe	n	3.12
ZnCdS	n	2.8



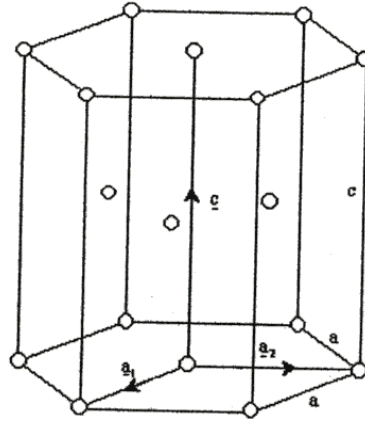
Şekil 1.1. Yüzey merkezli kübik (fcc) yapı[9]

Kübik kristal yapı, fcc örgü simetrisine sahiptir. Örgü sabiti, kübik örgünün kenar uzunluğu olan (a) kadardır. Kristalin birim hücre başına düşen atom sayısı ise $8/a^3$ 'dür.



Şekil 1.2. Kübik (sphalerite) kristal yapı[9]

Hekzagonal (wurtzite) yapıdaki atomların yerleşim düzeni ise kübik yapıya benzemektedir. Bu yapıda ise bir atom, diğer türün dört atomu tarafından tetrahedral olarak çevrilmiştir. Atomların yerleşim düzeni iç içe geçmiş iki sıkı-paketlenmiş hekzagonal örgüden oluşmuştur. Şekil 1.3’de sıkı-paketlenmiş hekzagonal yapı ve Şekil 1.4’te hekzagonal (wurtzite) yapı verilmiştir [9].



Şekil 1.3. Sıkı-paketlenmiş hekzagonal yapı[9]

Sıkı-paketlenmiş hekzagonal yapı bir atomu $(0,0,0)$ 'da ve diğeri $2\frac{a_1}{3} + \frac{a_2}{3} + \frac{c}{2}$ vektörünün ucunda yer alan iki temel atomlu hekzagonal bir uzay örgüsüdür. Şekil 1.3'te gösterilen ilkel dönüşüm vektörleri,

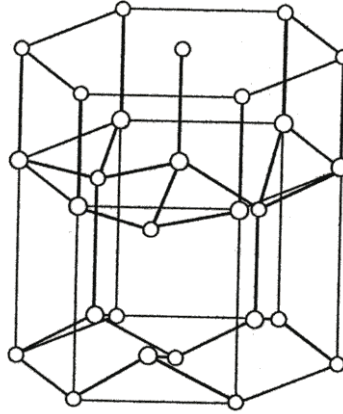
$$\underline{a}_1 = (a/2) (\hat{x} - \sqrt{3}\hat{y}) \quad (1-1)$$

$$\underline{a}_2 = (a/2) (\hat{x} + \sqrt{3}\hat{y}) \quad (1-2)$$

$$\underline{c} = c\hat{z} \quad (1-3)$$

ile verilmektedir. Orijin olarak hekzagonalin yüzey merkezi seçilmiştir. Hekzagonalin kenar uzunluğu a ve a/c ise $(8/3)^{1/2}=1.63$ 'tür.

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



Şekil 1.4. Hekzagonal (wurtzite) yapı[9]

Hem kübik hem de hekzagonal yapıdaki atomlar, tetrahedral örgü simetrisine göre dizilmişlerdir. Bu iki yapıda atomun en yakın komşusu olarak diğer türden dört tane atom, en yakın ikinci komşu olarak aynı tür atomdan on iki tane vardır. Hekzagonal yapıda c eksenini boyunca atomların yerleşim düzeni,

kübik yapıda $\langle 111 \rangle$ doğrultusu boyunca olan atomların yerleşim düzenine benzemektedir.

Kübik ve hekzagonal yapı arasındaki benzerlikten dolayı, II-VI bileşiklerinin enerji-bant yapıları da birbirine benzemektedir.

II-VI bileşikleri çeşitli yöntemlerle elde edilebilmektedirler. Bunlar kimyasal buhar depolama (CVD), sputtering, vakumda depolama, close-spaced buhar taşınımı, püskürtme yöntemi (spray pyrolysis), molecular beam epitaxy gibidir.

1.3. CdO ve ZnO Bileşiklerinin Özellikleri

Metal oksit ince filmler optik, termal, güneş enerjisi ve elektronik cihazlarda kullanım alanlarına sahiptir. Transparent iletken oksitlerden (TCO) olan CdO ve ZnO görünür bölgedeki yüksek geçirgenliklerinden dolayı önemli materyallerdir [65].

II-VI bileşiklerinden olan CdO yüksek iletkenlik ve 2.2eV ile 2.7eV arasında direkt bant geçişli yasak enerji aralığına sahip bir yarıiletkenidir [60,66]. Düşük bant aralığı nedeniyle fazla tercih edilmemekle birlikte, yüksek taşıyıcı mobilitesine sahip yarıiletken oksitlerden biri olması nedeniyle CdO dikkat çekici bir materyaldir [65]. CdO havada Cd'un yanmasıyla oluşur ve kırmızımsı kahverengine sahiptir[23]. Elektromagnetik spektrumun görünür bölgesinde yaklaşık %85 optik geçirgenliğe sahip bir materyaldir[11,26]. Fotodiyot, fototransistör, fotovoltak, sıvı kristal monitör, IR dedektör uygulamalarında tercih edilmektedir [23,24].

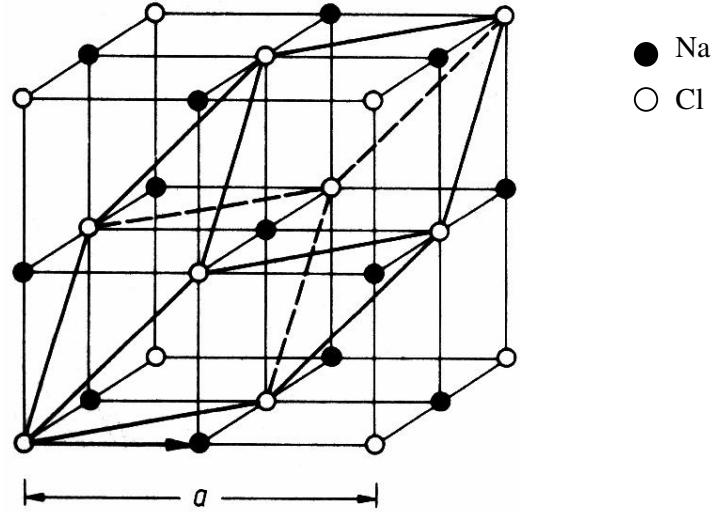
CdO filmleri; sputtering, kimyasal buhar depozisyonu, reaktif evaporasyon, termal oksidasyon, sol-gel ve püskürtme tekniği (spray pyrolysis) gibi film depozisyon teknikleri kullanılarak elde edilmektedir [11,67].

CdO n-tipi bir yarıiletkenidir ve elektriksel özellikleri ısı ileme veya uygun katkı ile değiştirilebilmektedir.

CdO bileşiği kübik yapıda kristallenmektedir ve yapısı NaCl ile aynıdır. (Şekil 1.5).

ZnO ise yüksek elektriksel iletkenliğe ve oda sıcaklığında yaklaşık 3.3eV'luk direkt bant geçişli yasak enerji aralığına sahip bir yarıiletkenidir. Bu materyal ince film olarak tüm görünür bölgede saydam özellik göstermektedir.

ZnO bileşiğinin kozmetik ürünleri, ilaç sanayi, varistör, gaz sensörü, yüzey akustik dalga cihazları (SAW) gibi değişik kullanım alanları vardır [25].



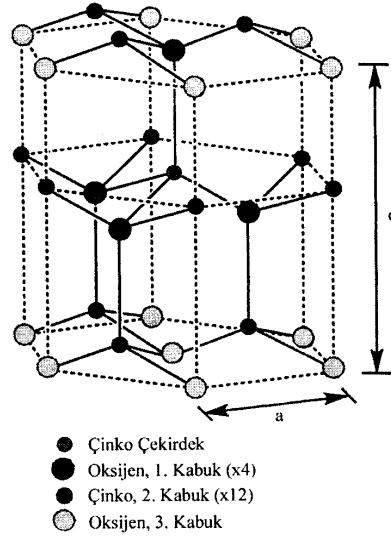
Şekil 1.5. Kübik yapıdaki NaCl bileşiği

ZnO filmleri de; vakum termal evaporasyon, DC ve AC magnetron sputtering, pulsed laser deposition, sol-gel, kimyasal buhar depozisyonu, dip-coating, reactive evaporasyon, püskürtme tekniği gibi yöntemler kullanılarak elde edilmektedir [27,28].

ZnO'de CdO gibi n-tipi bir yarıiletkenidir. Uygun katkı veya ısıtma işlemleriyle elektriksel özellikleri değiştirilebilmektedir.

ZnO bileşiği hegzagonal yapıda kristallenmektedir (Şekil 1.6).

ZnO bileşiği görünür bölgede yaklaşık %80-%90 optik geçirgenliğe sahiptir.



Şekil 1.6. Hekzagonal yapıdaki ZnO bileşiği[29]

Bu iki materyalin homojen karışımlarının da saf CdO ve ZnO'in optik ve elektriksel özelliklerinin arasında olması beklenmiştir. Bu özellik güneş pili uygulamaları için dikkat çekicidir[5].

1.4.Amaç

Bu çalışmadaki amacımız, pratik ve ekonomik bir yöntem olan püskürtme yöntemi ile II-VI bileşiklerinden olan $Zn_xCd_{1-x}O$ yarıiletken bileşiğini elde ederek bu filmlerin bazı optik ve elektriksel özelliklerini incelemektir. Bu amaçla, ilk olarak $x=0, 0.25, 0.50, 0.75$ ve 1 değerleri için $Zn_xCd_{1-x}O$ ve %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ yarıiletken filmleri spray pyrolysis yöntemi ile $250 \pm 5^\circ C$ taban sıcaklığında elde edilmiştir. İkinci olarak, x -ışını kırınım desenlerine bakılarak kristal yapıları incelenmiştir. Daha sonra elde edilen katkısız ve %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin, oda sıcaklığındaki optik absorpsiyon spektrumlarından yararlanarak yasak enerji aralıkları hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Son olarak filmlerin çeşitli sıcaklıklardaki dc elektriksel özellikleri incelenmiştir.

2. YARIİLETKENLER

2.1. Giriş

Katılar atomlarının dizilişlerine göre amorf yapı ve kristal yapı olmak üzere iki grupta toplanırlar. Bazı katıların atomları gelişigüzel dizilmiş olup, belirli bir düzene sahip değildirler. Bunlara amorf katılar denir ve oluşturdukları yapıya da amorf yapı adı verilir. Bazı katılarda ise, katıyı oluşturan atom, atom grupları ve moleküller, o katıya özgü belirli bir düzen içinde bir araya gelirler. Bu katılara da kristal denir ve oluşturdukları yapıya da kristal yapı adı verilir.

Katılar elektriksel ve optik özelliklerine göre de, yalıtkanlar, yarıiletkenler ve iletkenler olmak üzere üç grupta toplanırlar. Katıların enerji-bant teoremine göre, valans bandı tamamen dolu ve iletim bandı tamamen boş olan katılara yalıtkanlar adı verilir. Yalıtkanlarda bu iki bant arasındaki yasak enerji aralığının geniş olması nedeniyle, oda sıcaklığında elektronların valans bandından iletim bandına geçmeleri olanaksızdır. Valans ve iletim bantları üst üste binen katılara ise iletkenler adı verilir. Tüm metaller bu gruba girerler. Valans ve iletim bantları arasındaki yasak enerji aralığı yalıtkanlarda olduğu kadar geniş olmayan katılara da “yarıiletkenler” adı verilir. Yarıiletkenler, çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptirler.

Yarıiletkenlerin belirgin özelliklerinden biri $T=0K$ 'de yalıtkan olmalarıdır. Yasak enerji aralıkları öyle bir değere sahiptir ki, ısı uyarılmayla erime noktalarının altındaki sıcaklıklarda elektriksel iletkenlik gösterirler. Oda sıcaklığında yarıiletkenlerin özdirençleri $10^{-3} - 10^9 \Omega\text{cm}$, yalıtkanların $10^{14} - 10^{22} \Omega\text{cm}$, metallerin ise $10^{-6} \Omega\text{cm}$ mertebesindedir.

Özellikleri en iyi bilinen ve en çok kullanılan yarıiletkenler, periyodik tablonun IV. grubunda bulunan Ge ve Si materyalleridir. Bu grupta olan elmas yapıdaki karbon yalıtkandır ($E_g=5.5\text{eV}$). Gri kalay ise yarıiletkendir. Çünkü yasak enerji aralığı çok küçüktür.

III-V bileşikleri de yarıiletkenlerin diğer önemli bir sınıfını oluştururlar. Bu bileşikler periyodik tablonun üçüncü ve beşinci grup elementlerinin bileşik oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle elde edilirler. Bu

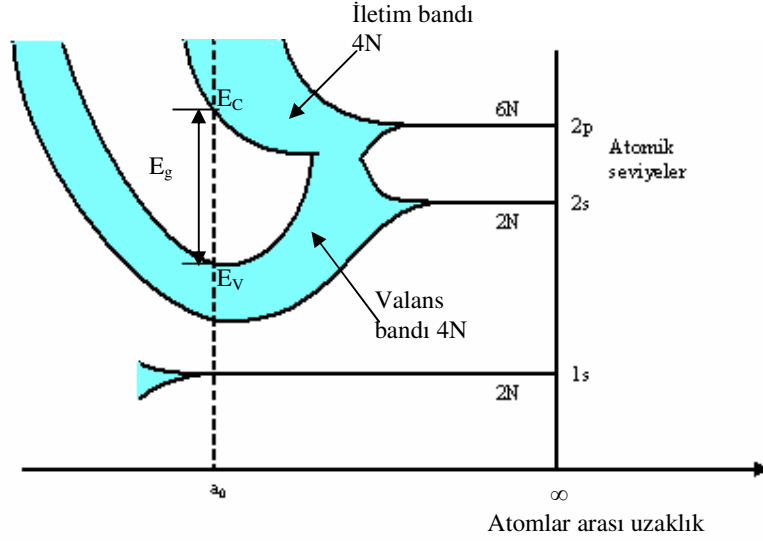
gruba InSb, GaAs, GaP ve InAs örnek verilebilir. III-V bileşikleri kübik (sphalerite) yapıda kristallenirler, bağlanma tipi de ağırlıklı olarak kovalenttir.

Diğer bir grup yarıiletkenleri ise II-VI bileşikleri oluştururlar. II-VI bileşiklerinde bağlanma iyonik ve kovalenttir. Bu bileşikler hem kübik hem de hekzagonal yapıda kristallenirler. Bu grubun bileşiklerine CdO, ZnO, CdS, ZnS, CdZnS ve CdSSe örnek verilebilir [13,14].

2.2. Katılarda Bant Oluşumu

Katılardaki enerji bantları birçok atomun bir araya gelmesi sonucu oluşur. Birbirlerinden sonsuz uzaklıkta bulunan atomlar bağımsızdırlar ve her bir atomun kendine ait bir enerji seviyesi vardır. Bu enerji seviyelerindeki elektronlar, Pauli dışarlama ilkesine göre dizilirler. Örneğin karbon (C) atomunun 6 elektronu vardır. Karbon atomu için elektron konfigürasyonu $1s^2 2s^2 2p^2$ şeklindedir. En dış yörüngede s durumunda 2 tane ve p durumunda 2 tane olmak üzere 4 tane valans elektronu bulunmaktadır.

Serbest haldeki atomlar kristali oluşturmak için birbirlerine yaklaştığında, en dış yörüngelerden başlayarak elektronların dalga fonksiyonları üst üste biner [15]. Elektronlar aynı anda iki atoma birden ait olurlar. Böyle bir durum Pauli dışarlama ilkesine aykırı olduğundan elektronlardan birinin kuantum durumlarının farklı olması gerekir. Böylece başlangıçta bağımsız olan atomların elektron enerji seviyeleri, birbirlerine yaklaştığında yarılmalara uğrarlar. Yarılmış olan enerji seviyeleri arasındaki fark 10^{-19} eV civarındadır. Bu uzaklığın çok küçük olması nedeniyle, yarılmış olan seviyelerin oluşturduğu enerji aralığı sürekli bir yapı olarak kabul edilerek enerji bandı adını alır. Elektron durumlarının enerji dağılımı, atomlar arası uzaklığa bağlıdır. Şekil 2.1'de karbon kristali için bant yapısının oluşumu gösterilmiştir.

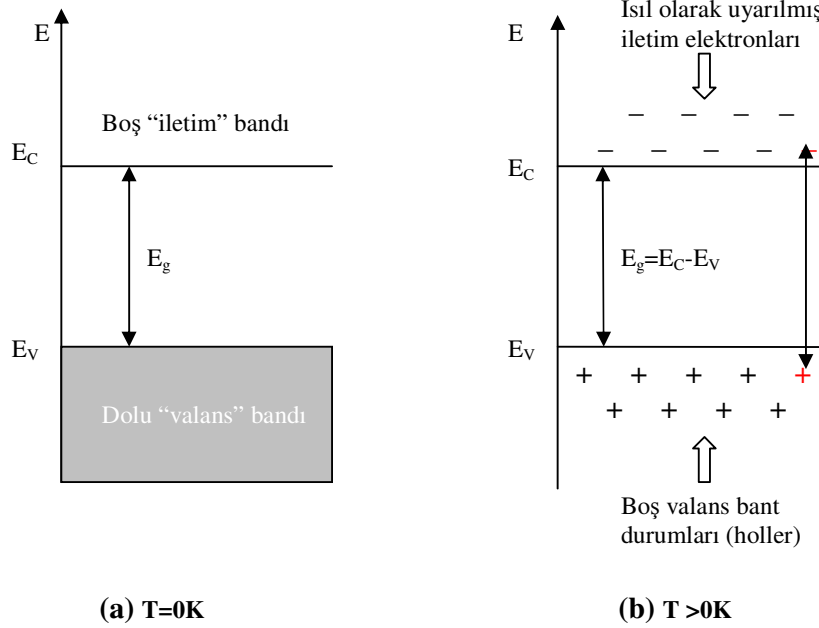


Şekil 2.1. Atomlar arası uzaklığın fonksiyonu olarak karbonun enerji-bant diyagramı [16]

Elektronların dalga fonksiyonlarının kuvvetli etkileşmeleri sonucu, dış yörüngelere ait enerji bantları iç yörüngelerdeki enerji bantlarından daha geniştir. Çünkü iç yörüngelerdeki elektronlar komşu atomlardan daha az etkilenmektedirler. Yarılmadan sonra dış bantlar üst üste binebilir. Genellikle dış bantlarda kuantum durumları ya boş ya da kısmen doludur. Bantlar oluşuktan sonra bantlar arasındaki elektron geçişleri Pauli dışarlama ilkesine göre başlar ve istatistiksel denge kuruluncaya kadar devam eder. Böylece alt bantlar üst banttaki elektronlarla doldurulur. Dolu banda “valans bandı”, üstteki boş banda ise “iletim bandı” adı verilir. İletim bandı ile valans bandı arasında elektronların bulunamadığı enerji aralığına, yasak enerji aralığı (E_g) denir.

Mutlak sıcaklıkta ($T=0K$), bir yarıiletken, elektronik durumları tamamen dolu valans bandı ile bu banttan yasak enerji aralığı kadar yukarıda tamamen boş bir iletim bandı vardır. $T=0K$ 'de yarıiletken mükemmel bir yalıtkan gibi davranır. Çünkü bu sıcaklıkta yarıiletkenin bütün elektronları valans bandında bulunduğu için iletim gözlenmez (Şekil 2.2.a). Sıcaklık $T=0K$ 'den itibaren yükseltirse, en az yasak enerji aralığı kadar ısı enerjisi kazanan elektronlar valans bandından iletim bandına geçerler (Şekil 2.2.b). İletim bandına geçen elektronlar valans bandında hol adı verilen boşluklar bırakırlar. Holler valans bandında boş kuantum durumları meydana getirirler.

Bu boş kuantum durumları valans bandındaki başka elektronlar tarafından doldurulurlar ve bu elektronlar geldikleri yerlerde yeni holler oluştururlar. Holler ile elektronlar yer değiştirmiş olurlar. Böylece valans bandında holler hareket etmiş olurlar. Bu durum devam ettikçe valans bandındaki holler ile iletim bandındaki elektronlar serbest taşıyıcı gibi hareket ederek iletme katkıda bulunurlar. Yani elektriksel iletkenliğe hem elektronlar hem de holler katkıda bulunmuş olurlar.



Şekil 2.2. Bir yarıiletkenin (a) $T=0K$ 'de (b) $T > 0K$ 'de şematik enerji-bant diyagramı [16]

2.3. Taşıyıcı Konsantrasyonu ve Has (Intrinsic) Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerdeki holler ve elektronlar genellikle serbest taşıyıcı veya kısaca taşıyıcı olarak adlandırılır. Bir yarıiletkendeki taşıyıcıların yoğunluğu, elektriksel iletkenliği belirlediği için önemli bir özelliktir. Taşıyıcı yoğunluğunu belirlemek için basit istatistiksel sonuçlardan yararlanılır. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu, sistem T sıcaklığında olduğunda elektronun E enerji seviyesini işgal etme olasılığını verir. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu

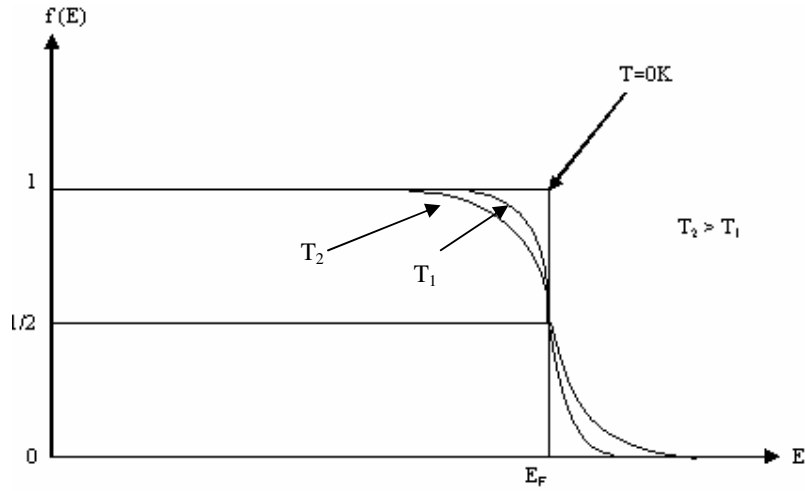
$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}} \quad (2-1)$$

bağıntısı ile verilir. Burada;

E_F , Fermi enerji seviyesi

k , Boltzmann sabitidir.

Bu fonksiyonun E enerjisine göre değişimi Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu [17]

Şekil 2.3'e göre sıcaklık arttıkça Fermi enerji seviyesinin altındaki daha küçük enerjili işgal edilmemiş bölge daha büyük olmaktadır. Yani yüksek enerjili durumların işgal edilmesi, sıcaklık arttığı için artmaktadır. Sıcaklık göz önüne alınmazsa, ($E=E_F$) Fermi enerji seviyesinde $f(E)=1/2$ 'dir. Yani Fermi enerji seviyesinin işgal edilme olasılığı $1/2$ 'ye eşittir. Denklem (2-1), ($E-E_F$) \gg kT olması durumunda Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonuna dönüşür. Yani,

$$f(E) = e^{-\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)} \quad (2-2)$$

olur. Yarıiletkenlerde, iletim bandındaki elektronların ve valans bandındaki hollerin konsantrasyonu için denklem(2-2)'den yararlanılır. ($E, E+dE$) enerji

bölgesindeki durumların sayısı $g_c(E)dE$ 'ye eşittir, burada $g_c(E)$ elektron durum yoğunludur. Bu durumların her birindeki işgal edilme olasılığı $f(E)$ ise, bu enerji bölgesinde bulunan elektronların yoğunluğu $f(E)g_c(E)dE$ 'dir. İletim bandındaki elektronların yoğunluğu n ,

$$n = \int_{E_{c1}}^{E_{c2}} f(E)g_c(E)dE \quad (2-3)$$

bağıntısı ile verilir. Burada;

E_{c1} ve E_{c2} , iletim bandının alt ve üst enerji değerleridir.

İletim bandındaki durum yoğunluğu,

$$g_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{1/2} \quad (2-4)$$

bağıntısı ile verilir. $E < E_g$ ise $g_c(E)$ sıfıra gider. $E_g < E$ ise $g_c(E)$ sınırlıdır. Denklem (2-4)'ü denklem (2-3)'te yerine yazarsak, iletim bandındaki elektron yoğunluğu

$$n = 2 \left(\frac{2m_e^* kT}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

$$n = N_c e^{-(E_c - E_F)/kT} \quad (2-5)$$

bağıntısı ile verilir. Burada;

N_c , iletim bandındaki etkin durum yoğunluğunu

m_e^* , elektronun etkin külesini

h , Planck sabitini göstermektedir.

Valans bandındaki hol yoğunluğu ise,

$$p = \int_{E_{V_1}}^{E_{V_2}} (1-f(E))g_V(E)dE \quad (2-6)$$

bağıntısı ile verilir. Burada;

$g_V(E)$, valans bandındaki hol durum yoğunluğu

$g_V(E)dE$, holler için $(E,E+dE)$ enerji bölgesindeki durum yoğunluğunu

E_{V_1} ve E_{V_2} , valans bandının üst ve alt enerji değerlerini verir.

Bu durumların her birinin işgal edilme olasılığı $(1-f(E))$ olduğu için, bu enerji bölgesinde bulunan hol yoğunluğu $(1-f(E))g_V(E)dE$ 'ye eşittir. Böylece yarıiletkenlerde valans bandındaki hol yoğunluğu p ,

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_F - E_V)/kT}$$

$$p = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT} \quad (2-7)$$

bağıntısıyla verilir. Burada;

N_V , valans bandındaki etkin durum yoğunluğu

m_h^* , holün etkin kütesini göstermektedir [13,16].

Bir yarıiletkende, valans bandındaki bir elektronun ısı uyarılmayla yasak enerji aralığını aşarak iletim bandına çıkması sonucu, valans bandında bu elektrona karşılık sadece bir tane hol oluşur. Bu durumda elektron ve hol yoğunlukları birbirine eşit olacaktır. Böyle yarıiletkenlere has yarıiletken adı verilir. İletim bandındaki elektron yoğunluğu (n) ve valans bandındaki hol yoğunluğu (p) birbirine eşit ve çarpımları sabit olup,

$$n=p \quad (2-8)$$

$$np=n_i^2(T) \quad (2-9)$$

ile verilir. Bu ifadeye “mass-action” yasası denir. Burada;

n_i , has yarıiletkenler için taşıyıcı yoğunluğudur.

Elektron ve hollerin taşıyıcı yoğunlukları için bulunan bağıntıları denklem (2-9)'da yerine yazarsak, taşıyıcı yoğunluğu $n_i(T)$,

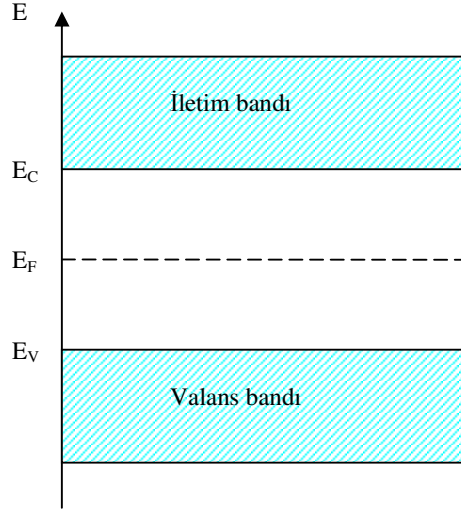
$$n_i(T) = 2 \left[\frac{2\pi(m_e^* m_h^*)^{1/2} kT}{h^2} \right]^{3/2} e^{-E_g/2kT} \quad (2-10)$$

bağıntısı ile verilir. Taşıyıcı yoğunluğu, elektron ve holün etkin kütlelerine, yasak enerji aralığına ve sıcaklığa bağlıdır. Verilen bir yarıiletken için etkin kütleler ve yasak enerji aralığı hemen hemen sabit olarak kabul edildiği zaman taşıyıcı yoğunluğu $n_i(T)$ sadece sıcaklığa bağlıdır.

Bir katının elektronlarının mutlak sıfır sıcaklıkta Pauli ilkesine uygun olarak bütün enerji seviyelerini doldurması durumunda en üstteki seviyeye Fermi enerji seviyesi (E_F) denir. Has yarıiletkenler ($n=p$) için Fermi enerji seviyesi, denklem (2-5) ve denklem (2-7), denklem (2-8)'de yerine yazılırsa,

$$E_{F_i} = \frac{1}{2} E_g + \frac{1}{2} kT \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right)^{3/2} \quad (2-11)$$

bağıntısı ile verilir. Has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi, elektron ve hol etkin kütlelerinin eşit olduğu durumda Şekil 2.4'te görüldüğü gibi yasak enerji aralığının ortasında yer alır. Etkin kütlelerin farklı olduğu durumda ise bir banda doğru kayma gösterir.



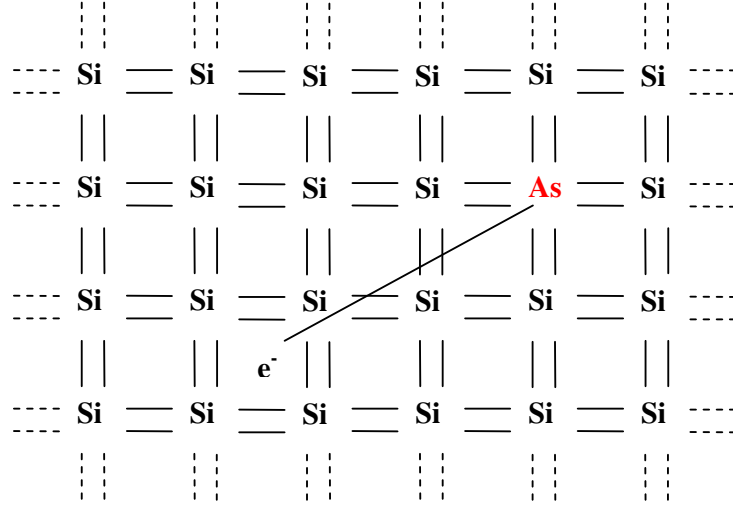
Şekil 2.4. Has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi

2.4. Katkılı (Impurity) Yarıiletkenler

Has yarıiletkenlerde elektronların ve hollerin yoğunluğu birbirine eşittir. Fakat bir çok uygulamada sadece bir tek taşıyıcı tipinin etkin olacağı numunelere ihtiyaç vardır. Yarıiletkenlerde katkılama işlemi önemlidir. Bir yarıiletken uygun katkı maddeleri ile katkıldığında çoğunluk taşıyıcıları elektronlar veya holler olan bir numune elde edilebilir [13,16].

Periyodik tablonun IV. grup elementlerinden olan Si ve Ge elmas kristal yapısındadırlar. Si kristalinin her atomu komşu dört atomla kovalent bağlı olup valans elektronu dört tanedir. As, P, Sb, N gibi V. grup elementlerinin valans elektronu sayısı ise beştir. Bir katkı elementi olarak bu gruptan arsenik (As) atomu kullanıldığında arsenik atomunun dört elektronu, Si atomunun dört elektronu ile kovalent bağ yapar. Geriye bir valans elektronu kalır. Bu elektron bağ yapmaz, ancak çok zayıf bir kuvvetle As atomuna bağlıdır. As atomu ortamdan temin edebileceği ısı enerjisi ile kolayca iyonlaşabilir. As atomunun beşinci elektronu, kristal içinde arsenik atomundan bağımsız hareket edebilmektedir. As atomunun yapıya girmesi ile Si kristali

ekstra bir elektron kazanmıştır. Şekil 2.5'te silisyum kristaline arsenik atomunun katkılanması görülmektedir.



Şekil 2.5. Si kristaline As atomu katkılanması

Böyle kristallere elektron yoğunluğu hol yoğunluğundan fazla olduğu için n-tipi yarıiletken adı verilir [18,19]. Kristale katkılanan atomlara elektron verici anlamında donör ve katkılanan atomların bulunduğu enerji seviyelerine de donör enerji seviyesi denir. Katkılı yarıiletkende donör enerji seviyesi ise,

$$E_d = \left[\frac{1}{\epsilon_r} \right]^2 \left[\frac{m_c^*}{m_c} \right] E_H \quad (2-12)$$

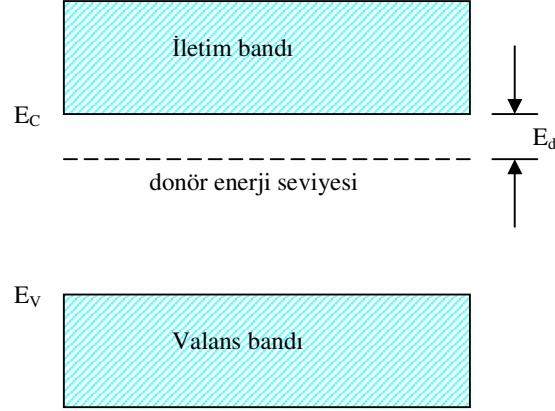
bağıntısı ile verilir. Burada,

ϵ_r , yarıiletkenin bağlı dielektrik sabiti

E_H , 13.6eV olan hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisidir.

Donör enerji seviyesi enerji aralığında iletim bandının biraz aşağısında bulunur (Şekil 2.6). n-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi, katkı yoğunluğuna bağlı olarak yasak enerji aralığının orta kısmından iletim bandına doğru kayma yapar. Küçük bir enerjiyle donör atomlarının iyonlaşmasıyla

birlikte donör elektronları iletim bandına geçerler. Bu enerjiye katkı atomunun iyonlaşma enerjisi denir [13,19].



Şekil 2.6. Bir yarıiletkeninde donör enerji seviyesi[18]

Çizelge 2.1’de Si ve Ge kristallerine katılan donörlerin iyonlaşma enerjileri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Si ve Ge için bazı donörlerin iyonlaşma enerjileri (eV) [6]

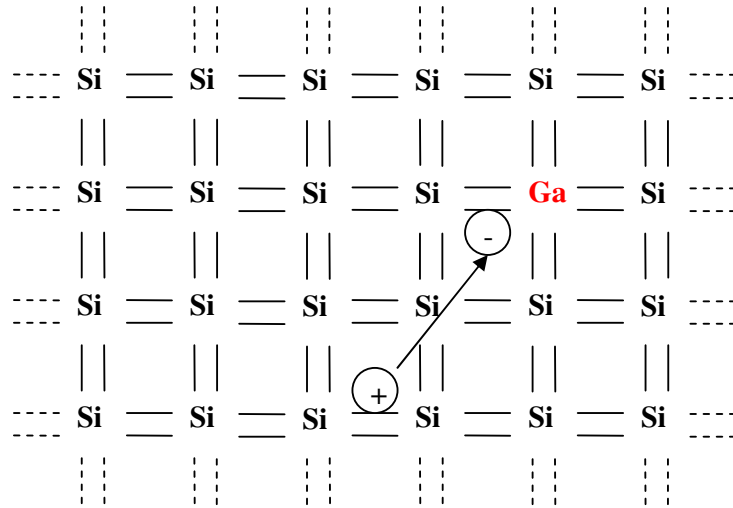
Katkı	Si (eV)	Ge (eV)
Li	0,033	-
P	0,044	0,012
As	0,049	0,013
Sb	0,039	0,096
Bi	0,069	-

Diğer bir yarıiletken tipi de, IV. grup elementlerinden Si ve Ge kristaline III. Grup elementlerinden Al, B, Ga, In katılanmasıyla elde edilir. Bu tip yarıiletkenlere de p-tipi yarıiletken denir.

Si kristaline galyum (Ga) atomunun katılanması durumunu göz önüne alalım. Ga atomu 3 valans elektronuna sahiptir ve silisyuma katılanması

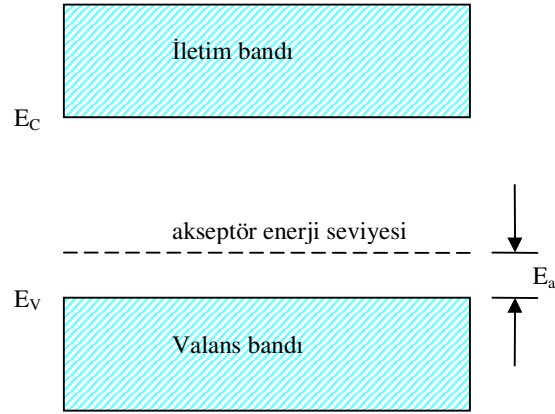
durumunda elektron bağlarından biri boş kalır (Şekil 2.7). Bu boşluk (hol) diğer bağlanmadan kapılan bir elektronla doldurulabilir ve hol elektronun yerine geçer. Böylece valans bandında bir hol oluşmuş olur ve bu hol kristal içerisinde hareket eder. Buna karşılık iletim bandına elektron çıkmaz. Al, B, Ga ve In gibi üç valans elektronuna sahip katkı atomları, komşu atomlarla kovalent bağı tamamlayabilmek için valans bandından elektron alıp geride bir boşluk bıraktıklarından alıcı anlamında akseptör olarak adlandırılır. Akseptör atomlarının yarıiletken içerisinde buldukları enerji seviyesine de akseptör enerji seviyesi denir.

Bir akseptörün iyonlaşmasıyla bir boşluğun serbest kalabilmesi için enerji verilmesi gerekir. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi akseptör seviyeleri enerji aralığında valans bandına yakındır. p-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi, katkı yoğunluğuna bağlı olarak yasak enerji aralığında valans bandına doğru bir kayma yapar.



Şekil 2.7. Si kristaline Ga atomunun katkılanması

Çizelge 2.2’de Si ve Ge kristaline katkılanan bazı akseptörlerin iyonlaşma enerjileri verilmektedir [13].



Şekil 2.8. Bir yarıiletkende akseptör enerji seviyesi [18]

Çizelge 2.2. Si ve Ge'daki bazı akseptörlerin iyonlaşma enerjileri (eV)[6]

Katkı	Si (eV)	Ge (eV)
Ba	0,045	0,010
Al	0,057	0,010
Ga	0,065	0,011
In	0,16	0,011

Donör enerji seviyelerine benzer olarak akseptör enerji seviyeleri,

$$E_a = \left[\frac{1}{\epsilon_r} \right]^2 \left[\frac{m_h^*}{m_h} \right] E_H \quad (2-13)$$

bağıntısı ile verilmektedir.

Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi, n-tipi yarıiletkende iletim bandına, p-tipi yarıiletkende ise valans bandına yakındır. Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi,

$$E_F = E_{F_i} + kT \sinh^{-1} \left[\frac{N_D - N_A}{2n_i} \right] \quad (2-14)$$

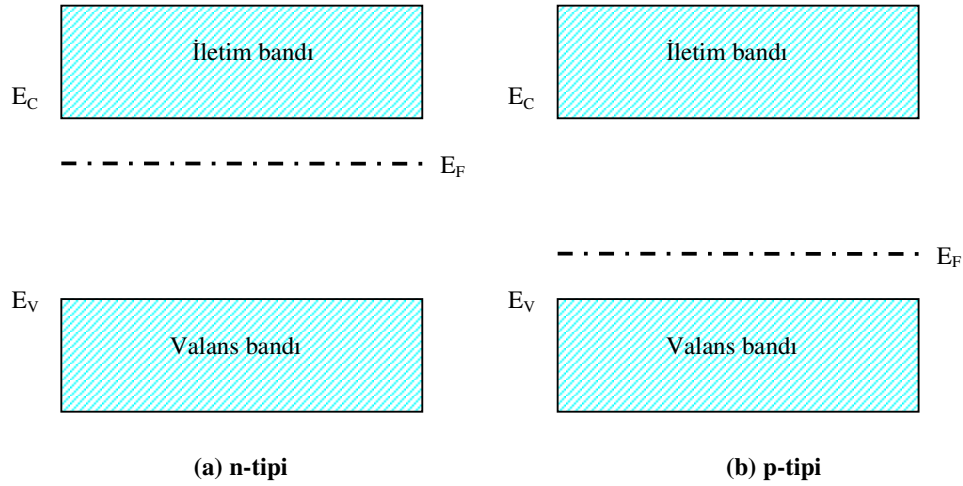
bağıntısı ile verilir. Burada,

N_D , donör yoğunluğu

N_A , akseptör yoğunluğu

E_{F_i} , has yarıiletkenlerdeki Fermi enerji seviyesidir.

Bu bağıntıya göre, $(N_D - N_A)$ net katkı yoğunluğuna da bağlı olarak, katkı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi, n-tipi yarıiletkende iletim bandına p-tipi yarıiletkende ise valans bandına daha yakındır. Şekil 2.9'da katkı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesinin yeri gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Katkı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyeleri (a) n-tipi (b) p-tipi

Aynı yarıiletken materyal için katkı yarıiletkenlerde, n-tipi veya p-tipi durumuna göre, taşıyıcı yoğunlukları arasında,

$$n_n p_n = n_p p_p = n_i^2(T) \quad (2-15)$$

bağıntısı vardır. Bu bağıntı belirli bir sıcaklıkta elektron ve hol yoğunluklarının çarpımının sabit, toplamlarının farklı olabileceğini ifade eder. Elektron ve hol

yoğunlukları uygun katkılama yapılarak arttırılabilir veya azaltılabilir [13,19].

Bu çalışmada, elde edilen $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin iletkenlik tipinin belirlenmesinde, basit ve pratik bir yöntem olan sıcak-uç (hot-probe)yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, yarıiletkenin yüzeyine, aralarında belirli bir mesafe olmak üzere, iki metal uç (probe) dokundurulur. Daha sonra uçlardan biri oda sıcaklığında bırakılırken, diğeri ısıtılır. Yarıiletkenin ısınan bölgesindeki serbest yükler, sahip oldukları termal hızla soğuk bölgelere hareket ederler. Uçlara bir voltmetre bağlanarak pozitif uç ısıtılırsa, voltmetrenin pozitif yönde sarması yarıiletkenin n-tipi olduğunu, negatif yönde sarması ise yarıiletkenin p-tipi olduğunu gösterir [14,20]. Elde edilen filmlere bu yöntemin uygulanması sonucunda n-tipi iletkenlik özellikleri gösterdikleri belirlenmiştir. Bu sonuç literatürdeki sonuçlar ile uyum içindedir [5,26,62,66,68-71].

2.5. Elektriksel İletkenlik ve Mobilite

Yarıiletkenlerde elektriksel iletim, hem valans bandındaki holler hem de iletim bandındaki elektronlar ile oluşmaktadır. Buna göre, elektronların ve hollerin oluşturduğu akım yoğunluğu, kendi yükleriyle hızlarının çarpımına eşittir. \vec{E} elektrik alanı uygulanan bir yarıiletkende elektronların ve hollerin oluşturduğu toplam akım yoğunluğu \vec{J} ,

$$\vec{J} = \vec{J}_e + \vec{J}_h = -en\vec{v}_e + ep\vec{v}_h \quad (2-16)$$

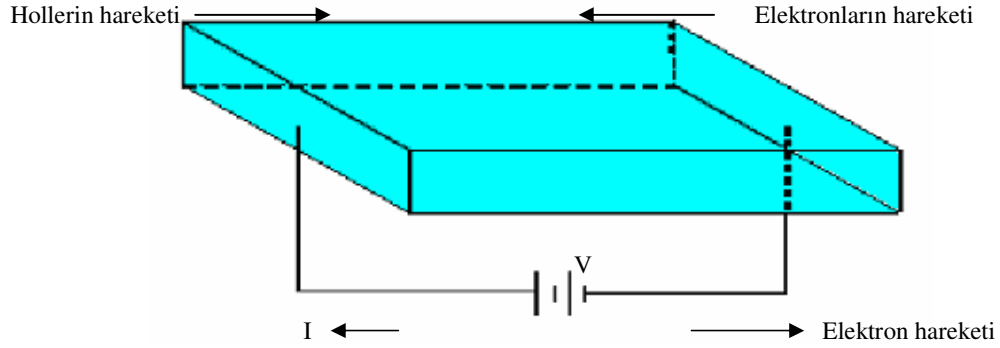
bağıntısı ile verilir. Burada,

-e, n, \vec{v}_e sırasıyla elektron yükünü, yoğunluğunu ve sürüklenme hızını

+e, p, \vec{v}_h sırasıyla hol yükünü, yoğunluğunu ve sürüklenme hızını

göstermektedir. Şekil 2.10'da elektrik alanı uygulandığında bir yarıiletkenindeki elektronların ve hollerin hareket yönleri gösterilmektedir.

Şekil 2.10'a göre elektronlar elektrik alanla ters yönde hareket ederlerken holler elektrik alan ile aynı yönde hareket ederler.



Şekil 2.10. Bir yarıiletkende elektrik alanının varlığında elektron ve hollerin hareket yönleri[17]

Elektrik alanı uygulanan bir yarıiletkende, elektronların ve hollerin sürüklenme hızları, elektrik alanının büyüklüğü ile orantılıdır ve mobilite olarak adlandırılır. Mobilite, birim elektrik alan başına yüklü parçacıkların hızıdır. Elektrik alanı uygulanan bir yarıiletkende, elektronların ve hollerin toplam mobiliteleri μ ,

$$\mu = \mu_e + \mu_h = \frac{v_e}{E} + \frac{v_h}{E} \quad (2-17)$$

bağıntısı ile verilir. Mobilite yarıiletkenin saflığına, cinsine ve sıcaklığa bağlıdır [13,21]. Yarıiletkenlerde mobilitayı etkileyen iki tür saçılma mekanizması vardır. Örgü saçılması atomların termal hareketleri ile ilgilidir ve sıcaklığa bağımlılığı,

$$\mu_1 \propto T^{-3/2} \quad (2-18)$$

ile verilir. Sıcaklık düştükçe örgü titreşimleri azalacak ve mobilite artacaktır. Diğer bir saçılma mekanizması ise iyonize impurity saçılmasıdır. İyonize impurity saçılmasının sıcaklığa bağımlılığı,

$$\mu_1 \propto T^{3/2} \quad (2-19)$$

şeklindedir. Katkılı yarıiletkenlerde katkı atomlarının konsantrasyonu artarken, yük taşıyıcılarının ortalama serbest yolları azaldığında mobilite düşmektedir. Çizelge 2.3’de çeşitli yarıiletkenlerin oda sıcaklığında elektron ve hol mobiliteleri verilmiştir.

Bir yarıiletken elektrik alanı uygulandığında, elektronların ve hollerin oluşturduğu toplam akım yoğunluğu \vec{J} ,

$$\vec{J} = \vec{J}_e + \vec{J}_h = e(n\mu_e + p\mu_h)\vec{E} \quad (2-20)$$

ile verilir. Elektriksel iletkenlik, birim elektrik alan başına akım yoğunluğu olarak tanımlandığı için,

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (2-21)$$

ile verilir. Bu eşitlik denklem (2-20) ile karşılaştırıldığında, elektriksel iletkenlik,

$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) \quad (2-22)$$

şeklinde yazılır [13]. Bu bağıntıya göre iletkenlik, yük taşıyıcılarının yoğunluğuna ve mobilitesine bağlıdır.

Has yarıiletkenler için elektron ve hol yoğunluklarının eşit olduğu göz önüne alınarak elektriksel iletkenlik ifadesi yeniden yazılacak olursa,

$$\sigma_i = en_i (\mu_e + \mu_h) \quad (2-23)$$

ve denklem (2-10)’da verilen n_i ifadesi denklem (2-23)’te yerine yazılırsa,

$$\sigma_i = 2e(\mu_e + \mu_h) \left[\frac{2\pi(m_e^* m_h^*)^{1/2} kT}{h^2} \right]^{3/2} e^{-E_g/2kT} \quad (2-24)$$

elde edilir. Exponansiyel terimin dışındakiler σ_{oi} ile gösterilirse,

$$\sigma_i = \sigma_{oi} e^{-E_g/2kT} \quad (2-25)$$

elde edilir. Burada σ_{oi} yarıiletkenin yapısına bağlı bir sabittir [13,22].

Çizelge 2.3 Bazı yarıiletkenlerin taşıyıcı mobilite değerleri (T=300K) [13]

Kristal	Mobilite, cm ² /V.s (elektron)	Mobilite, cm ² /V.s (hol)
C	1800	1600
Si	1900	500
Ge	3900	1900
GaP	110	75
InSb	80000	750
CdS	340	18
CdSe	600	
ZnS	120	5
ZnSe	530	16
ZnO	200	180

Katkılı yarıiletkenlerde ise elektriksel iletkenlik,

$$\sigma_k = \sigma_{ok} e^{-E_k/kT} \quad (2-26)$$

bağıntısı ile verilir. Burada;

E_k , katkı atomlarının enerji seviyesi

σ_{ok} , katkılı yarıiletkene bağlı bir sabittir.

Herhangi bir yarıiletken için toplam elektriksel iletkenlik σ_t ,

$$\sigma_t = \sigma_{oi} e^{-E_g/2kT} + \sigma_{ok} e^{-E_k/kT} \quad (2-27)$$

bağıntısı ile verilir. Burada E_g ve E_k , farklı sıcaklık bölgelerinde farklı büyüklüklere sahiptir. Bu nedenle denklem (2-27)'in sağ tarafındaki birinci terim yüksek sıcaklıklarda, ikinci terim ise düşük sıcaklıklarda etkin olmaktadır.

3. FİMLERİNİN ELDE EDİLMESİ

3.1. Giriş

Spray pyrolysis yöntemiyle ince film elde etme çalışmalarının başlangıcı 1951 yılında Mochel tarafından yapılmıştır. Mochel SnO₂ filmlerini SnCl₂ çözeltisini hava yardımıyla püskürterek elde etmiştir. 1960'lı yıllarda Chamberlin ve Skarman, spray pyrolysis yöntemiyle geniş yüzeyli CdSe ve CdS filmlerini elde etmişlerdir[1,10,30].

1970 yılından itibaren ise bu yöntemle üçlü, dörtlü ve beşli yarıiletken filmler elde edilmeye başlanmıştır.

3.2. Püskürtme (Spray Pyrolysis) Yöntemi

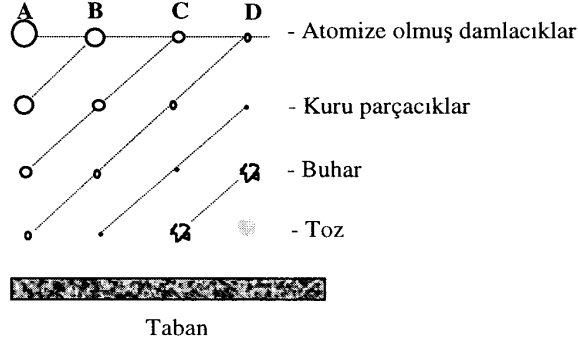
Püskürtme yöntemi, film elde edilmesi için hazırlanan sulu çözeltilerin karıştırılarak sıcak tabanlar üzerine azot gazı veya hava yardımıyla atomize edilerek püskürtülmesidir. Bu yöntem kullanılarak elde edilen filmlerin kalitesi diğer yöntemlerle (sputtering, vakumda buharlaştırma v.b) elde edilenlere göre daha düşüktür. Bu yöntemin tercih edilmesinin nedeni ekonomik ve basit olmasından kaynaklanmaktadır.

Elde edilen filmlerin fiziksel özellikleri değişik parametrelere bağlıdır. Bunlar püskürtme hızı ve süresi, taban sıcaklığı, taban ile püskürtücü arasındaki mesafe, püskürtücü tarafından püskürtülen çözelti damlacıklarının aerodinamiğidir.

Çözelti damlacıklarının film oluşturacak tabana yaklaştığı zaman tamamen buharlaştırılmış olması ideal taşınma olarak tanımlanır. Bununla beraber damlacıkların oluşumunda uniform bir damlacık boyutu elde edilemeyebilir. Herhangi bir nedenle damlacığın tabana ulaşmaması onların kütlelerine bağlıdır. Damlacıkların boyutlarının farklı olmasından dolayı farklı depozisyon yöntemleri vardır (Şekil 3.1).

Şekil 3.1'de A sürecinde, çözelti damlacıklarının boyutu çok büyüktür. Damlacıkların çevreden absorpladığı ısı, tabana ulaşmaya kadar buharlaşmasına yeterli değildir. Böylece damlacık tabana çarptığında kuru bir

çökelti bırakarak buharlaşır. Bu süreçte tabanın sıcaklığı düşer ve kötü bir film oluşur.



Şekil 3.1. Damlacık boyutuna bağlı çeşitli depozisyon yöntemleri [31]

B sürecinde, çözelti damlacıklarının boyutu A sürecine göre daha küçüktür. Tabana ulaşan parçacıkların bir bölümü buharlaşır ve bir bölümü de yoğunlaşır. Bu süreçte de film yüzeyinde delikler ve çatlaklar ortaya çıkar.

C sürecinde, çözelti damlacıklarının boyutu A ve B sürecindekilere göre daha küçüktür. En uygun filmler bu süreçte elde edilir. Damlacıklar tabana ulaşmadan içerisindeki su buharlaşarak heterojen bir reaksiyon meydana getirir ve tabana yapışır. Bu reaksiyon olayı dört safhadan oluşur. Bunlar;

- 1) reaksiyon moleküllerinin tabana difüzyonu
- 2) yüzeyde bir veya birden çok molekülün absorbe olması
- 3) örgü içerisinde birleşme
- 4) tabana ulaşan bazı moleküllerin yüzeyden uzaklaşması

gibi fiziksel ve kimyasal olayları içerir.

D sürecinde ise damlacıkların boyutları çok küçük olduğundan tabana ulaşmadan buharlaşırlar. Moleküller tabana toz halinde tutunduğundan film oluşumunu bozarlar[31].

Bu dört sürecin hepsinde de polikristal film elde edilir, fakat en ideal film C sürecinde elde edilir.

Püskürtme yönteminde taban olarak silisyumlu camlar, çelik, titanyum, tungsten, alüminyum gibi metaller de kullanılır. Ayrıca pyrex camlar,

3.3.1. Çözeltilerin hazırlanması

$Zn_xCd_{1-x}O$ ve %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin içerisindeki elementleri oluşturan kimyasal tuzlar deiyonize su içerisinde çözülerek belirli molaritelerde hazırlanmışlardır.

Cd kaynağı olarak formül tartısı 266.52 g/mol olan $(CH_3COO)_2Cd \cdot 2H_2O$ (Cadmium asetat dihidrate) kullanılmıştır. Çözelti 0,1 M konsantrasyonunda ve 500 ml deiyonize su içerisinde 13,5979 g çözülecek şekilde hazırlanmıştır.

Zn kaynağı olarak formül tartısı 219.49 g/mol olan $(CH_3COO)_2Zn \cdot 2H_2O$ (Zinc asetat dihidrate) kullanılmıştır. Çözelti 0.1 M konsantrasyonunda ve 500 ml deiyonize su içerisinde 11.1985 g çözülecek şekilde hazırlanmıştır.

In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinde ise In kaynağı olarak %100 'lük $InCl_3$ tuzu kullanılmıştır. $InCl_3$ tuzunun formül ağırlığı 221.19 g/mol olup, sıcak suda kolay çözünen bir bileşiktir. Çözelti 0.01 M konsantrasyonunda ve 500 ml deiyonize su içerisinde 1.10595 g $InCl_3$ tuzu çözülerek hazırlanmıştır.

Hazırlanan çözeltiler ayrı ayrı temizlenmiş şişelere süzgeç kağıdından süzülerek konmuştur.

3.3.2. Püskürtme kabini

Şekil 3.2'de görülen püskürtme kabini 2cm kalınlığında $80 \times 80 \times 80 \text{cm}^3$ ebatlarındadır ve çelik masa üzerine sabitlenmiştir. Ön yüzünde açılıp kapanabilen pencere vardır. Kabinin altında bulunan lavabo ve buna bağlı aspiratör ile püskürtme sırasında çıkan atık gazlar dışarı atılmaktadır.

Kabinin üstünde azot gazı ve çözelti taşıyan hortumlar ve elektrik lambasının kablosu için giriş yeri, sol tarafında termokupl giriş yeri ve sağ yüzeyinde sürgülü giriş kabı yeri ile ısıtıcının elektrik kabloları için giriş yeri bulunmaktadır. Püskürtme kabininin içinden dışarıya ısı kaybını önlemek için kabinin içi alüminyum folyo ile kaplanmıştır.

3.3.3. Isıtıcı ve sıcaklık kontrolü

Isıtıcı olarak direnç teli ve 5kW'lık ayarlanabilen varyak kullanılmıştır. Direnç telini korumak için ytong bloklardan yararlanılmıştır. Cam tabanlara ısı transferini sağlamak için direnç teli üzerine $15 \times 15 \times 1 \text{ cm}^3$ ebadında yüzeyi düz bir bakır blok yerleştirilmiştir. Ytonglar arasına ısı kaybını önlemek için ısı kalkanı konulmuştur. Cam taban olarak Objektträger marka mikroskop camları kullanılmıştır.

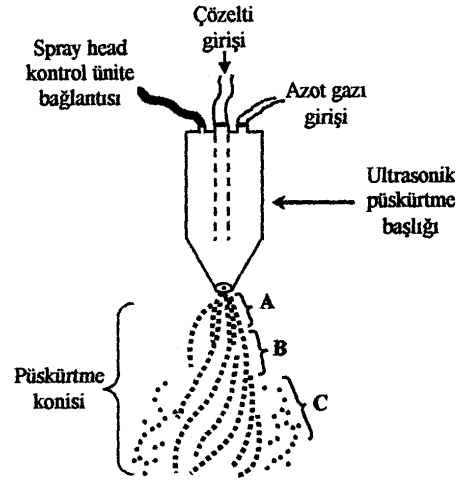
Cam tabanlar üzerindeki sıcaklığı ölçmek için Eskord EDM-1341 model multimetre bağlanmış ve demir-konstantan termokupl kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için demir-konstantan termokupluna ait gerilim sıcaklık tablosundan yararlanılmıştır. 0°C referans sıcaklığı buzlu su ve civa'dan oluşan bir sistemle sağlanmıştır.

3.3.4. Püskürtme başlığı (Spray-Head)

Püskürtme başlığı, püskürtülecek çözeltiyi atomize etmek için kullanılır. Püskürtme işlemi sırasında püskürtme gazı yardımıyla, püskürtme başlığının ucunda oluşan vakumla, çözeltinin atomize edilmesini sağlar. Bu çalışmada paslanmaz çelikten yapılmış Lechler Ultrasonik Atomizer US1 marka püskürtme başlığı kullanılmıştır. Şekil 3.3'te paslanmaz çelikten yapılmış püskürtme başlığı ve aerodinamiği gösterilmiştir. Deneyde taşıyıcı gaz olarak azot kullanılmıştır.

Püskürtücüden çıkan damlacıklar cam tabana ulaşınca kadar değişik safhalardan geçer. Bu safhalar Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

A bölgesinde, çözelti azot gazı tarafından başlığın ucundan ivmelendirilir. Akış girdaplı ve koni şeklindedir. Damlacıklar sıkışık haldedirler.



Şekil 3.3. Püskürtme yönteminde kullanılan ultrasonik püskürtme başlığı ile püskürtme konisinin şematik gösterimi

B bölgesinde, azot gazı girdaplı akış yapan çözeltiyi kesme kuvveti uygular ve sonuçta atomize damlacıklar oluşur. Bu bölgede damlacıkların hızı , A bölgesinden daha düşüktür.

C bölgesi tabana daha yakın olduğundan bu bölgede istenmeyen bir durum ortaya çıkar. Bu bölgenin oluşumu, püskürtücü ucundaki aşınma veya çözeltinin bıraktığı tortudan kaynaklanmaktadır. Bu durumda akış bozulmakta ve düşük hızlı damlacıklar görülmektedir. Bu nedenle her püskürtme sonunda , çözeltinin akıtıldığı hortum ve püskürtme başlığı, saf su geçirilerek temizlenmelidir. C bölgesindeki damlacıkların hızı, A ve B bölgesindeki damlacıkların hızından daha düşüktür. Böylece, çözelti geniş bir yüzeye dağılmakta ve daha küçük parçalara ayrılmaktadır.

Damlacıkların sıcak tabana ulaştığı anda, kimyasal ayrışmanın olduğu pyrolysis meydana gelir.

$Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmler elde edilirken püskürtücü ile sıcak taban arasındaki mesafe 25 cm seçilmiştir.

3.3.5. Püskürtme basıncı

Çözeltinin atomize olmasını sağlayan, basıncı 0.2 kg/cm^2 olan azot gazıdır. Azot gazı basıncı, azot tüpü üzerine bağlantılı ve el ile kontrol edilebilen $0-1 \text{ kg/cm}^2$ aralıklı bir manometre yardımı ile istenilen değerde sabit tutulmuştur. Azot gazı miktarı ise, azot tüpü ile bağlantılı $0-300 \text{ kg/cm}^2$ aralıklı diğer bir manometreden kontrol edilmiştir. Azot basıncı değerinin artırılması cam tabanların hızlı soğumasına, azaltılması da bozuk film oluşumuna sebep olmaktadır.

3.3.6. Çözelti akış hızı

Çözelti akış hızı elde edilecek filmlerin kalitesini etkilemektedir. Çözelti akış hızının artırılması gözenekli filmlerin oluşmasına, azaltılması ise enerji ve zaman kaybına sebep olmaktadır. Çözelti akış hızını istenen değerde tutmak için bir flowmetre kullanılmıştır. Yapılan çalışmada çözelti akış hızı $\sim 2.5 \text{ ml/dak}$ olarak ayarlanmıştır.

3.3.7. Deneyin yapılışı

$\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ ve In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmlerini elde etmek için $11 \times 13 \text{ mm}^2$ ebatlarında kesilmiş 1mm kalınlığında Objekttrager marka mikroskop camları taban olarak kullanılmıştır. Camlar önce sabunlu su ile kaynatılmış ve daha sonra deiyonize su ile durulanıp alkolden geçirilerek temizlenmiştir. Cam tabanlar tartılarak daha sonra kullanılmak üzere petri kaplarına yerleştirilmiştir.

Her püskürtme işleminden önce cam tabanların üzerine yerleştirildiği bakır blok temizlenmiştir. Bakır blok şakül yardımı ile merkezlenmiş ve püskürtme başlığı ile taban arasındaki mesafe istenilen değere ayarlanmıştır. Daha sonra temizlenmiş camlar bakır blok üzerine merkezde olacak şekilde yerleştirilmişlerdir.

Sıcaklık kontrolü için cam tabanlardan birisinin üzerine demir-konstantan termokupl yerleştirilmiştir. Termokupl ile cam taban arasındaki

sıcaklık temasını iyi bir şekilde sağlamak için ikisi arasına indiyum konulmuştur. Termokupl'ın ucunu püskürtme başlığından sıçrayacak çözeltilerden korumak için üst yüzeyi ısıya dayanıklı olan yanmaz teflon bant ile kapatılmıştır. Bu bandın üstüde mikroskop camı ile kapatılmıştır. Sürgülü bir kap püskürtme öncesinde ve sonrasında püskürtme başlığından damlayabilecek çözeltinin cam tabanlar üzerine düşmesini engelleyecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra püskürtme odasının penceresi kapatılarak sistem hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan çözelti püskürtme odasından daha yüksek bir konuma yerleştirilmiş çözelti deposuna konulmuştur.

Sıcaklık kontrolü için 0°C referans sıcaklığı buzlu su ile sağlanmıştır. Buzlu suyun bulunduğu kabın içine, içi civa dolu iki deney tüpü, deney tüplerinin içine de termokupl'ın referans uçları civa ile temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu deney tüplerinden çıkan bir başka kabloda dijital multimetreye bağlanmıştır.

Hazırlıklar tamamlandıktan sonra ısıtıcının anahtarı açılarak, sıcaklık multimetre ile kontrol edilmiştir. Cam tabanlar istenilen sıcaklığa ulaşmaya kadar ısıtma işlemine devam edilmiştir. Taban sıcaklığı istenilen değerden yaklaşık 50°C daha yüksek bir değere getirilmiştir. Çünkü ilk püskürtme anında, püskürtülen çözeltinin sıcaklığı taban sıcaklığından küçük olduğundan tabanda ani sıcaklık düşmeleri olmaktadır. Püskürtme işlemi süresince sıcaklık, varyak yardımı ile dengede tutulmaya çalışılmıştır.

İstenilen taban sıcaklığı değerine ulaşıldığında azot gazının basınç ayarı yapılmış ve çözelti çıkış anahtarı açılarak flowmetreden çözelti akış hızı ayarlanmıştır. Püskürtme başlığının altındaki sürgülü kap çekilerek deneye başlanmıştır. Atık gazların dışarı atılabilmesi için püskürtme boyunca aspiratör sürekli çalıştırılmıştır.

Püskürtme işlemi süresince, çözelti akış hızı, taban sıcaklığı ve 0°C referans sıcaklığı sürekli kontrol edilmiştir. Filmlerin elde edilme özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Püskürtme işlemi bittikten sonra sürgülü kap püskürtme başlığının altına getirilip azot gazı kapatılmıştır. Çözeltinin akışını durdurmak için anahtar kapatılıp, ısıtıcı devre dışı bırakılmıştır. Elde edilen filmler soğumaya

birakılmıştır. Soğuma sırasında da atık gazların dışarı atılması için bir süre aspiratör açık bırakılmıştır.

Çözeltinin aktığı hortumda ve püskürtme başlığında kalan çözelti damlacıkları, sistemden deiyonize su geçirilerek temizlenmiştir.

Filmler soğuduktan sonra homojen görümlü olanlar seçilip, elektrot kaplanmak üzere petri kaplarına yerleştirilmiştir.

$Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmleri $250\pm 5^\circ C$ taban sıcaklığında elde edilmiştir.

Çizelge 3.1 $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin elde edilme özellikleri

Filmler	Taban sıcaklığı ($^\circ C$)	Azot gazı basıncı (kg/m^2)	Çözelti akış hızı (ml/dk)	Püskürtme yüksekliği (cm)	Püskürtme süresi (dk)
x=0 için $Zn_xCd_{1-x}O$	$250\pm 5^\circ C$	0,2	2.5	25	25
x=0 için %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$	$250\pm 5^\circ C$	0,2	2.5	25	25
x=0.25 için $Zn_xCd_{1-x}O$	$250\pm 5^\circ C$	0,2	2.5	25	25
x=0.25 için %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$	$250\pm 5^\circ C$	0,2	2.5	25	25
x=0.5 için $Zn_xCd_{1-x}O$	$250\pm 5^\circ C$	0,2	2.5	25	25
x=0.5 için %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$	$250\pm 5^\circ C$	0,2	2.5	25	25
x=0.75 için $Zn_xCd_{1-x}O$	$250\pm 5^\circ C$	0,2	2.5	25	25
x=0.75 için %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$	$250\pm 5^\circ C$	0,2	2.5	25	25
x=1 için $Zn_xCd_{1-x}O$	$250\pm 5^\circ C$	0,2	2.5	25	25
x=1 için %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$	$250\pm 5^\circ C$	0,2	2.5	25	25

3.4. Elde Edilen Filmlerin Kalınlıkları

Cam tabanlar üzerinde elde edilen $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin kalınlıkları tartı metodu ile bulunmuştur. Tartım işlemi maksimum

210g tartabilen 0.0001g hassasiyetli AND HM-200 model elektronik terazi ile yapılmıştır. Seçilen homojen görünümlü filmler tekrar tartılmıştır. İki tartı arasındaki fark cam üzerinde oluşan filmin kütesini vermektedir. Filmlerin kalınlıkları

$$t_f = \frac{\Delta m}{s \rho_f} \quad (3-1)$$

formülü ile bulunmuştur. Burada;

Δm , filmin kütesini

ρ_f , filmin yoğunluğunu

s cam tabanın yüzey alanını göstermektedir.

Film kalınlıkları hesaplanırken In katkısının film yoğunluğuna etkisi ihmal edilmiştir. Elde edilen filmlerin kalınlıkları Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Elde edilen $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin kalınlıkları

Filmler	Taban sıcaklığı ($^{\circ}C$)	Film kalınlığı (μm)
CdO	$250 \pm ^{\circ}C$	0.47
%1 In katkılı CdO	$250 \pm ^{\circ}C$	0.66
$Zn_{0.25}Cd_{0.75}O$	$250 \pm ^{\circ}C$	1.02
%1 In katkılı $Zn_{0.25}Cd_{0.75}O$	$250 \pm ^{\circ}C$	0.92
$Zn_{0.5}Cd_{0.5}O$	$250 \pm ^{\circ}C$	1.45
%1 In katkılı $Zn_{0.5}Cd_{0.5}O$	$250 \pm ^{\circ}C$	0.67
$Zn_{0.75}Cd_{0.25}O$	$250 \pm ^{\circ}C$	1.71
%1 In katkılı $Zn_{0.75}Cd_{0.25}O$	$250 \pm ^{\circ}C$	1.71
ZnO	$250 \pm ^{\circ}C$	1.63
%1 In katkılı ZnO	$250 \pm ^{\circ}C$	0.81

4. X-IŞINI KIRINIM DESENLERİ

4.1. Giriş

Kristal katıların yapısı hakkında bilgi edinmek için, numunenin dış görünüşünün mikroskobik ve makroskobik olarak incelenmesi gerekir. Görünür ışık kullanılarak yapı hakkında bilgi edinilemez. Çünkü görünür ışığın dalga boyu, kristalin atom ve molekülleri arasındaki boşluklarla kıyaslandığında oldukça büyüktür.

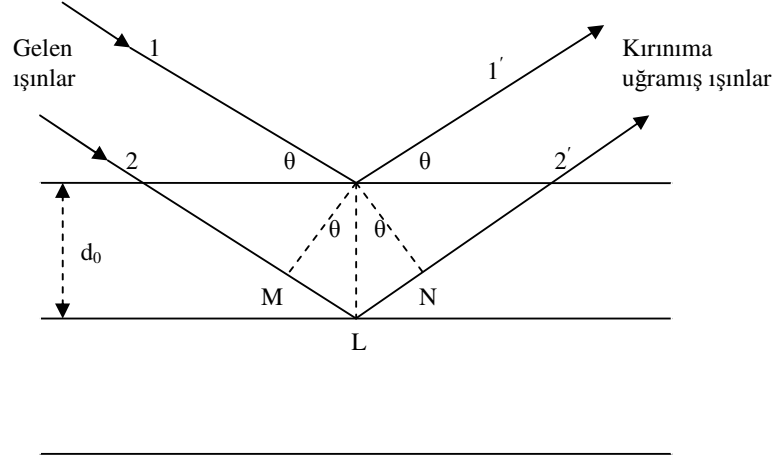
X-ışını kırınım desenlerini kullanarak kristal yapının varlığı ve kristal yapı içerisindeki atomların dizilişleri, ilk defa 1912 yılında Max von Laue tarafından incelenmiştir. X-ışınlarının dalga boyları atomik boyutla kıyaslanabilecek kadar küçüktür. Bu nedenle kristal yapı hakkında bilgi elde etmeyi kolaylaştırır[14,32].

4.2. X-Işını Kırınımı

Materyallerin kristal yapıları ile ilgili çalışmalarda x-ışınlarından yararlanılmaktadır. Bir x-ışınının enerjisi $E=hc/\lambda$ 'dır ve dalga boyu ile ters orantılıdır. Dalga boyu ise 0.1 \AA ile 100 \AA arasındadır. Kristal ile ilgili çalışmalarda 0.01 \AA ile 10 \AA arasındaki dalga boylu x-ışınları kullanılır.

X-ışınlarının kristalde kırınıma uğraması için belirli geometrik şartların gerçekleşmesi gerekmektedir. Kristal üzerine düşürülen x-ışınları, kristaldeki atomlara ait elektronları aynı frekansta titreşmeye zorlarlar. Böylece kristaldeki elektronlar, her yönde aynı dalga boyunda ışın yayınlırlar. Kristaldeki atomların bütün elektronları, x-ışını saçılmasına katkıda bulunurlar ve küresel dalga şeklinde aynı faz ile aynı frekansta ışımaya yaparlar. Aynı frekansta ışımaya yapan örgü noktalarındaki bu atomlar birer kaynak gibi davranırlar. Bu ışımalar bazı yönlerde birbirini kuvvetlendirirken bazı yönlerde de zayıflatırlar. Yani, ışımalar yapıcı ve yıkıcı girişim yaparlar. Girişim ile kuvvetlenmiş ışınlar, fotoğraf filmi üzerinde desen oluştururlar.

Kristal yapının incelenmesinde Bragg yasasından yararlanılır. Bu yasaya göre, monokromatik x-ışınları kristalin aralarındaki uzaklık d_0 olan paralel düzlemlerine θ açısı yaparak gelir. Kristale giren x-ışınlarının kırılmadığı kabul edilirse, x-ışınları atomların oluşturduğu düzlemlerden θ açısı yaparak yansiyacaktır. Bu durum Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. X-ışınlarının kristal tarafından kırınımına uğratılması

Bu ışınlar yol farkı nedeniyle birbirlerinin zayıflatıcı veya kuvvetlendirici yönde etkileyebilirler. Şekil 4.1’den görüldüğü gibi girişim kuvvetlendirici ise 1 ve 2 nolu ışınlar arasındaki yol farkı, dalgalıplarının tam katlarına eşit olmalıdır. O halde, yol farkı,

$$\text{Yol Farkı} = \overline{ML} + \overline{LN} = d_0 \sin \theta + d_0 \sin \theta \quad (4-1)$$

ile verilir. Buradan,

$$2d_0 \sin \theta = n\lambda \quad (4-2)$$

elde edilir. Bu eşitlik Bragg yasası olarak bilinir. Burada,

d_0 , kristal düzlemleri arasındaki mesafe

n , yansıma mertebesi

λ , ışının dalga boyudur.

X-ışınları kristalografisinde genellikle $n=1$ alınır. Çünkü kırınım uğrayan ışının şiddeti hızla azalır.

X-ışını kırınım verileri çalışma prensipleri Bragg yasasına dayanan üç değişik kırınım yöntemi kullanılarak belirlenebilir. Bu yöntemler arasındaki farklılıklar kullanılan ışın ve numuneden kaynaklanır. Bu yöntemler; döner kristal yöntemi, toz yöntemi ve Laue yöntemidir. Döner kristal yönteminde, numune olarak tek kristal ve sabit dalgaboylu ışınlar kullanılır. Bu yöntemde Bragg açısı θ için değişen değerler elde edilir. Toz yönteminde, polikristal ya da toz haline getirilmiş numuneler ile tek dalgaboylu ışınlar kullanılır. Bragg açısı θ değişkendir. Laue yönteminde ise, numune olarak tek kristal ve değişen dalgaboylu ışınlar kullanılır. Bu yöntemde Bragg açısı θ sabit tutulur. Bu üç yöntemden sadece toz yöntemi polikristal yapıdaki materyallerin incelenmesinde kullanılır. Bu yöntemde kırınım desenleri, ışınların şiddetine ve değişen açılara bağlı olarak elde edilir. d_0 mesafesi, elde edilen piklerin açı değerlerine göre hesaplanır ve kristal yapı belirlenir. Elde edilen kırınım desenlerinde piklerin dar ve keskin olması kristallenmenin iyi olduğu anlamına gelir.

Püskürtme yöntemi ile elde edilen $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin kristal yapıları incelenirken, toz kristal yöntemi ile belirlenen x-ışını kırınım desenlerinden yararlanılmıştır.

4.3. Katkısız ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ Filmlerinin X-ışını Kırınım Desenleri

Katkısız ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin x-ışını kırınım desenleri Rigaku Rint 2000 serisi X-Ray Diffractometer model x-ışını cihazında $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$ dalga boylu CuK_{α} ışını kullanılarak $30^{\circ} \leq 2\theta \leq 70^{\circ}$ sınırlarında değerlerinde incelenmiştir. Bu desenlerin incelenmesinden, filmlerin kristal yapısı hakkında bilgi edinilebilir.

Filmlerin kırınım desenleri incelendiğinde, şiddetleri büyük ve genişlikleri dar olan pikler kristallenmenin iyi, şiddetleri küçük ve genişlikleri büyük olan piklerde kristallenmenin iyi olmadığı anlamına gelmektedir. Bu

çalışmada elde edilen Katkısız ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin x-ışını kırınım desenlerinde, piklerin üzerinde parantez içinde ilgili düzlemlerin Miller indisleri belirtilmiştir.

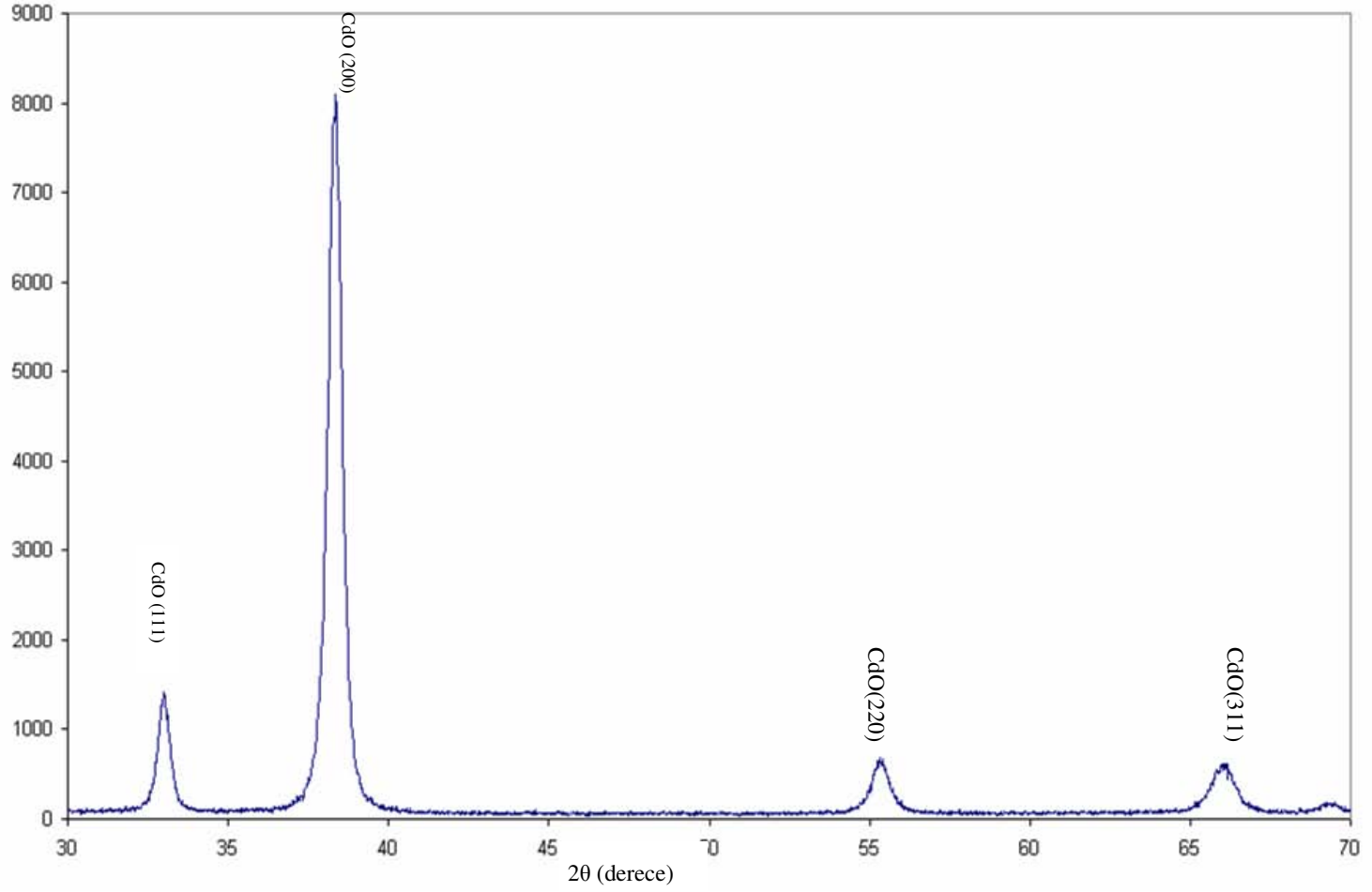
Katkısız ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin x-ışını kırınım desenlerinden hekzagonal ve kübik yapılar gözlenmiştir. $x=0$ için CdO filminde sadece kübik faz görülmüştür ve en şiddetli pik (2 0 0) pikidir. $x=0$ için %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmde ise (1 1 1) pikinin şiddeti artarken (2 0 0) pikinin şiddetinde azalma gözlenmiştir. $x=0.25$ için elde edilen katkısız ve %1 In katkılı filmlerde yine baskın olarak CdO pikleri gözlenmektedir ve (1 1 1) piki en şiddetli piktir. Ancak bu filmler için elde edilen x-ışını kırınım deseninde ZnO piklerinin belirginleşmeye başladığı da gözlenmiştir. $x=0.5$ için elde edilen katkısız ve %1 In katkılı filmlerde yine CdO pikleri baskın olarak gözlenmiştir. ZnO katkısının artmasıyla CdO (111) pikinin şiddetinde azalma belirlenmiştir. $x=0.75$ için elde edilen katkısız ve %1 In katkılı filmlerde CdO piklerinden sadece (1 1 1), (2 0 0) ve (2 2 0) pikleri gözlenmiştir. Ancak bu piklerin şiddetleri çok düşüktür. ZnO piklerinin şiddetleri ise biraz artmıştır. Ancak bu pikler keskin ve şiddetli olarak gözlenmemiştir. Son olarak $x=1$ için elde edilen katkısız ve %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinde sadece ZnO pikleri gözlenmiştir. En şiddetli pikler (100) ve (101) pikleridir. In katkısı ile piklerin şiddetinde azalma gözlenmiştir.

%1 In katkılı filmlerde pikler sola doğru çok az da olsa kayma göstermiştir. Bunun nedeninin bileşikler içerisindeki In'dan kaynaklandığı ve büyük çaplı olan In atomlarının katkılanmasıyla düzlemler arası mesafenin de artmasının küçük açılara kayma ile sonuçlanacağı düşünülmektedir.

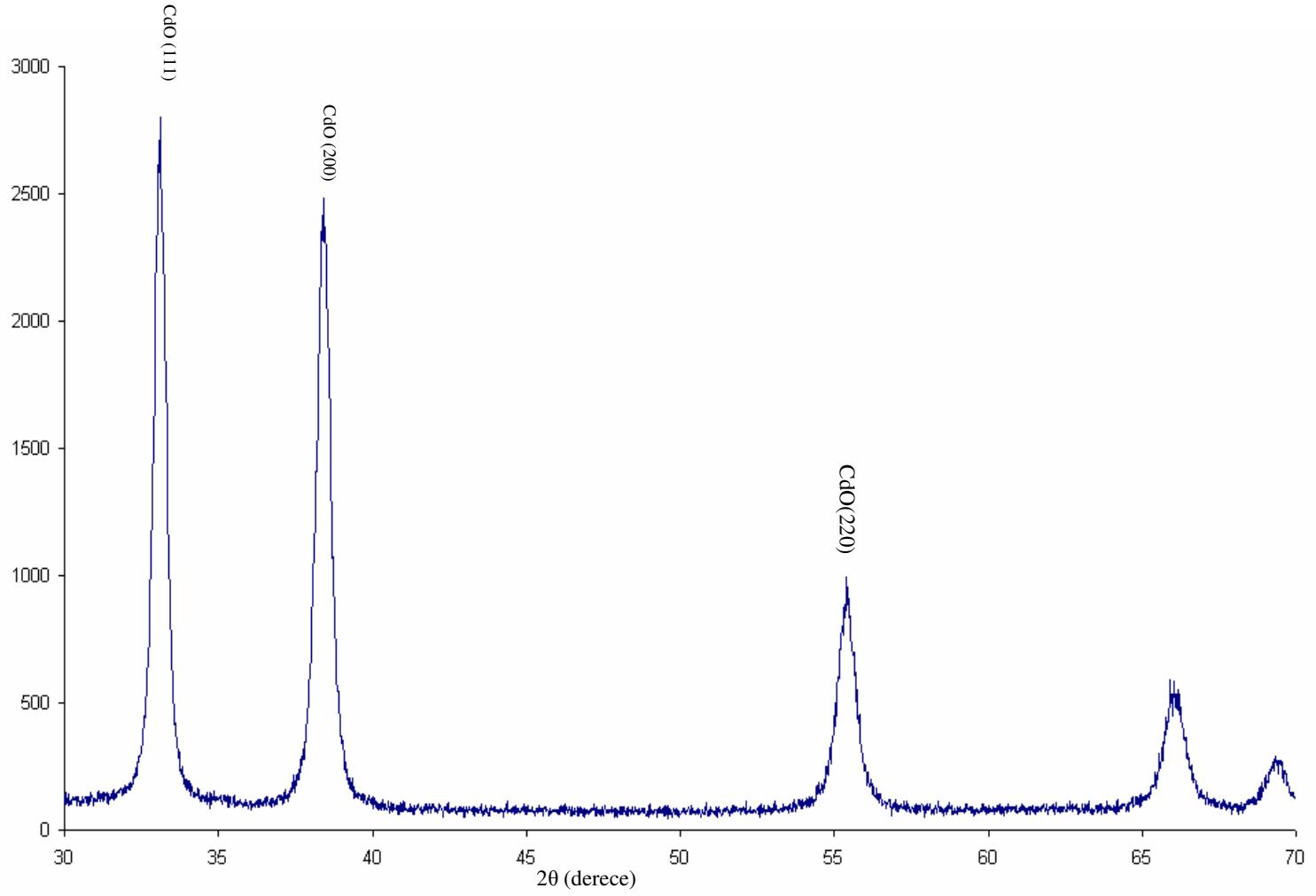
$250\pm 5^{\circ}C$ taban sıcaklığında elde edilen filmler için Şekil 4.2'de $x=0$ için katkısız CdO filmine ve Şekil 4.3'te yine $x=0$ için %1 In katkılı CdO yarıiletken filmine ait x-ışını kırınım deseni görülmektedir. Şekil 4.4 $x=0.25$ için katkısız ve Şekil 4.5'te ise $x=0.25$ %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ yarıiletken filmlerinin x-ışını kırınım desenleri verilmiştir. Şekil 4.6'da $x=0.5$ için katkısız $Zn_xCd_{1-x}O$ filminin ve Şekil 4.7'de $x=0.5$ için elde edilen %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filminin x-ışını kırınım deseni görülmektedir. $x=0.75$ için Şekil 4.8'de katkısız ve Şekil 4.9'da ise %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin x-ışını kırınım desenleri verilmiştir.

Şekil 4.10'da $x=1$ için elde edilen katkısız ve Şekil 4.11'de ise %1 In katkılı ZnO yarıiletken filminin x -ışını kırınım desenleri görülmektedir.

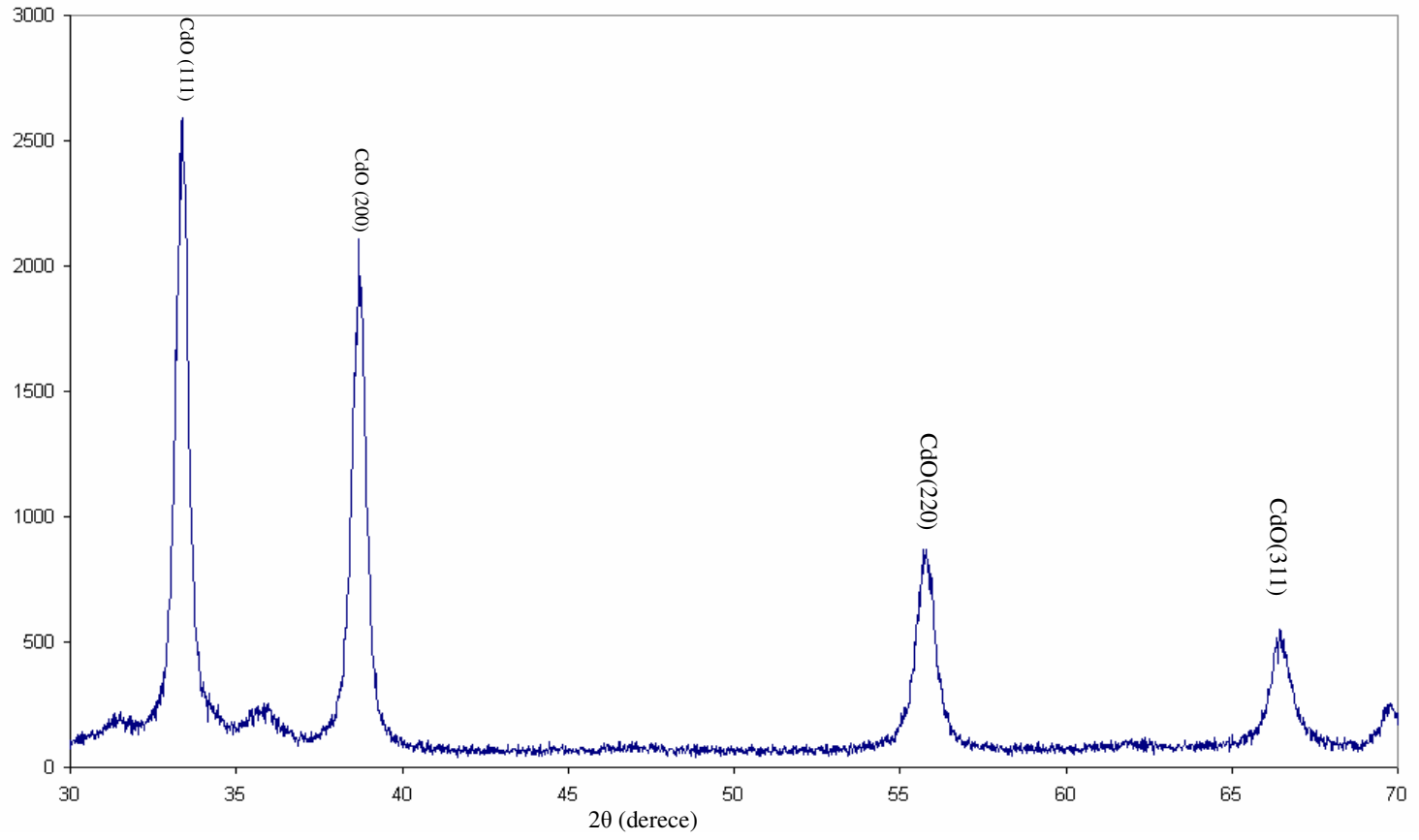
$x=0$ ile $x=0.5$ değerleri arasında CdO pikleri baskın olarak gözlenirken, $x=0.75$ için bu durum farklıdır. ZnO konsantrasyonunun artması x -ışını kırınım desenlerinde CdO piklerinin şiddetinin düşmesine neden olmuştur. Aynı durum CdO konsantrasyonunun artması ile ZnO içinde geçerlidir. $Zn_xCd_{1-x}O$ ve %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin x -ışını kırınım desenlerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlar ile uyum içindedir [5,26,60,63,64].



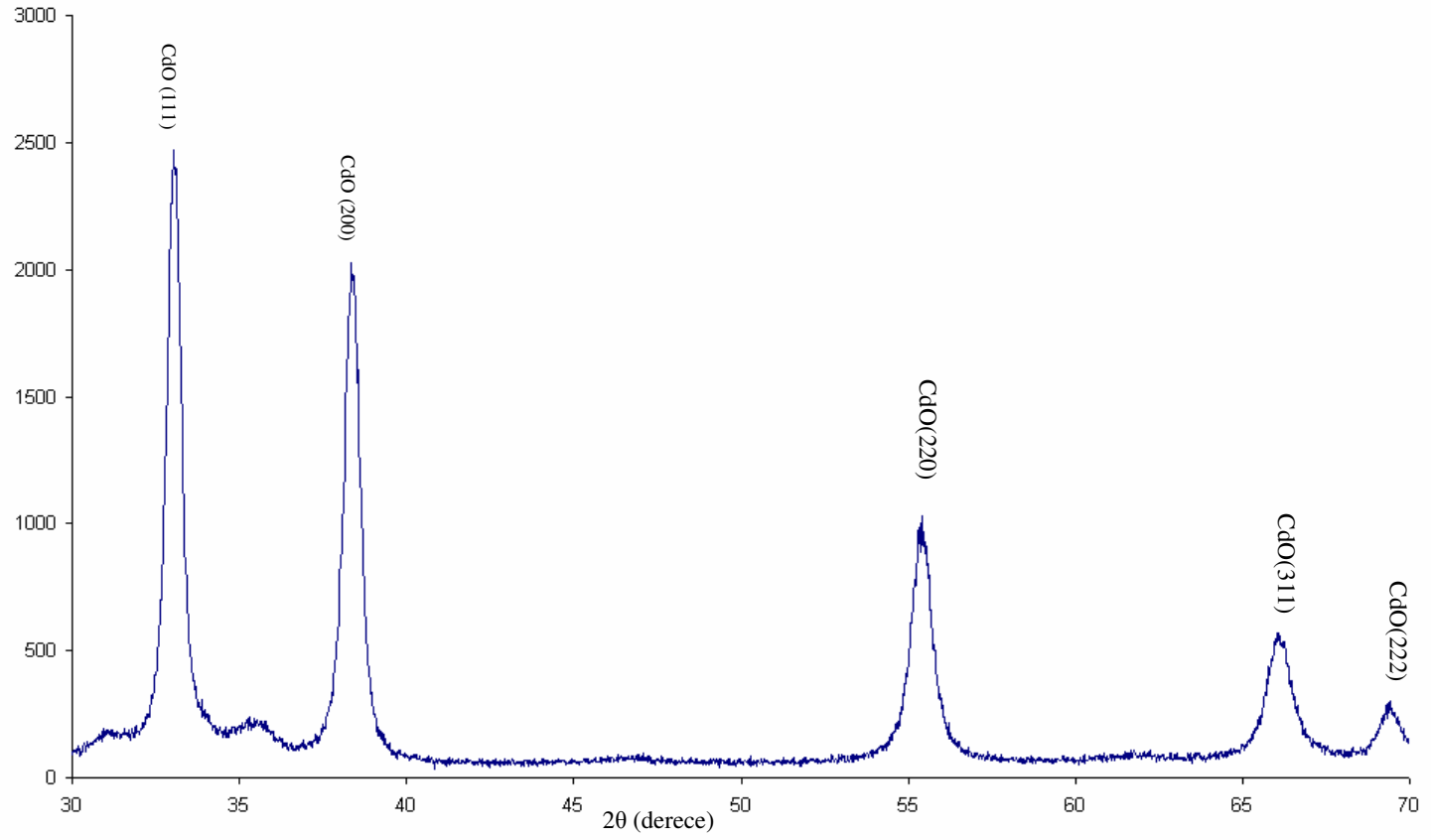
Şekil 4.2. $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0$ için elde edilen CdO filminin x-ışını kırınım deseni



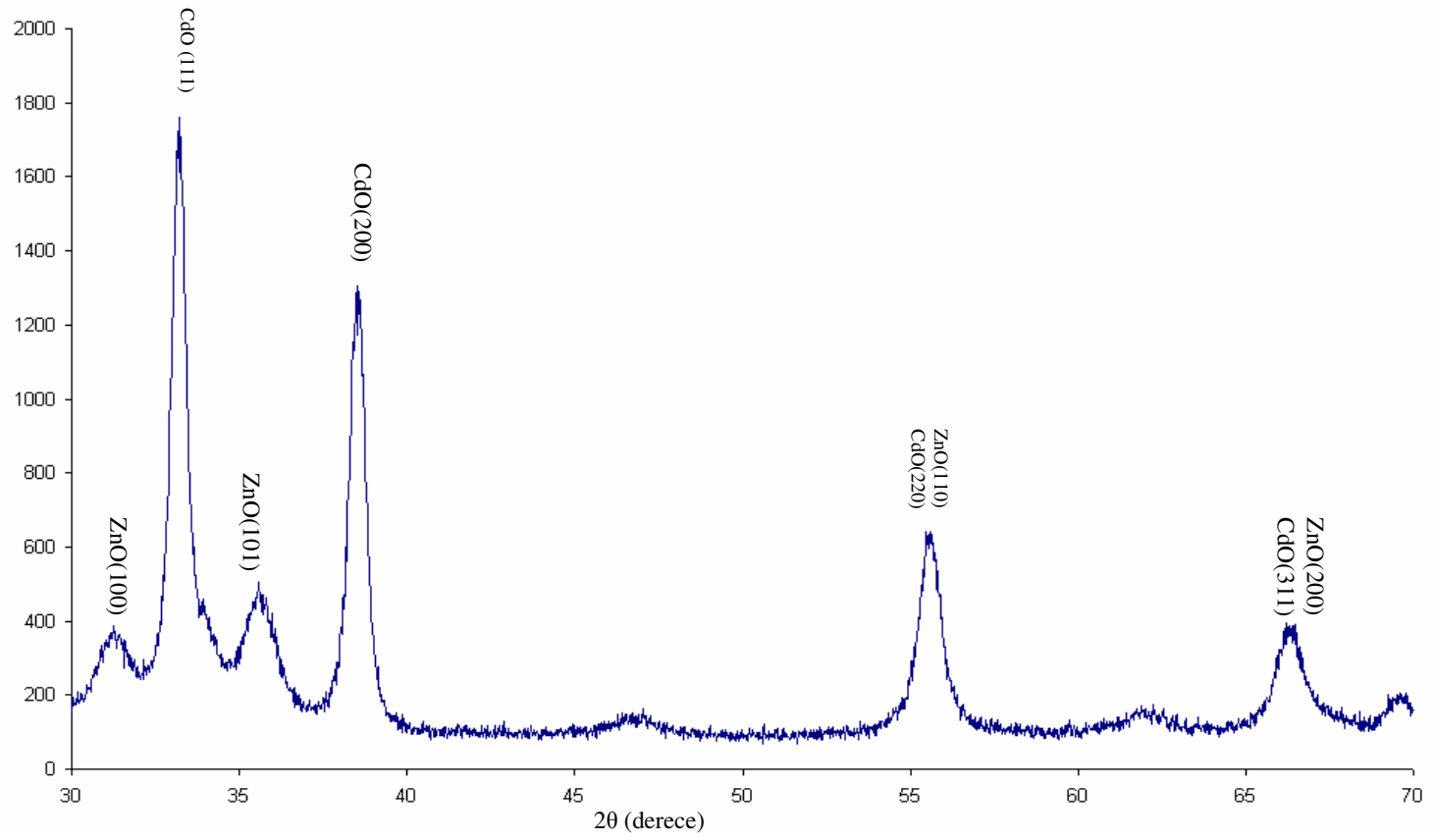
Şekil 4.3. $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0$ için elde edilen %1 In katkılı CdO filminin x-ışını



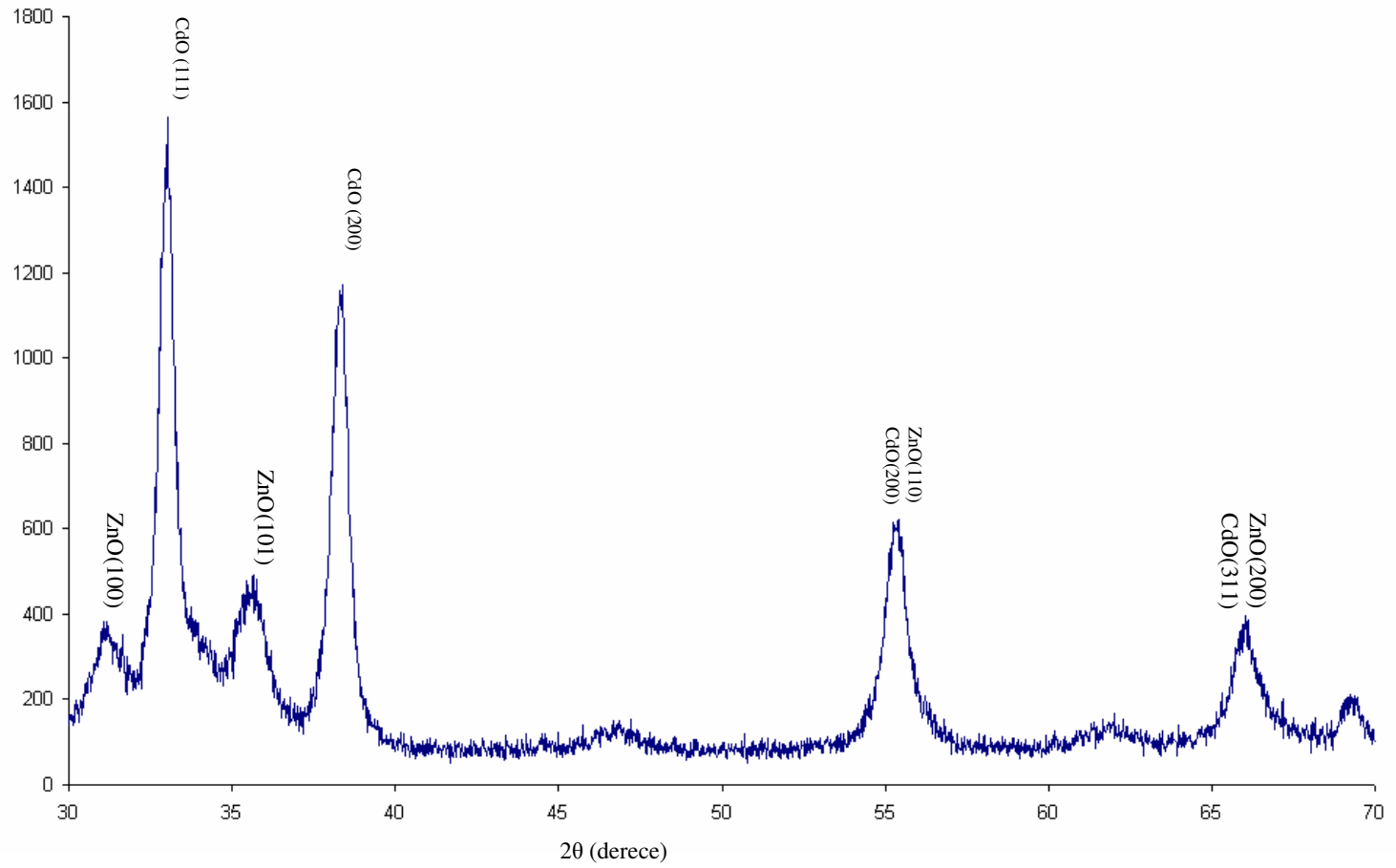
Şekil 4.4. $250\pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.25$ için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin x-ışını kırınım deseni



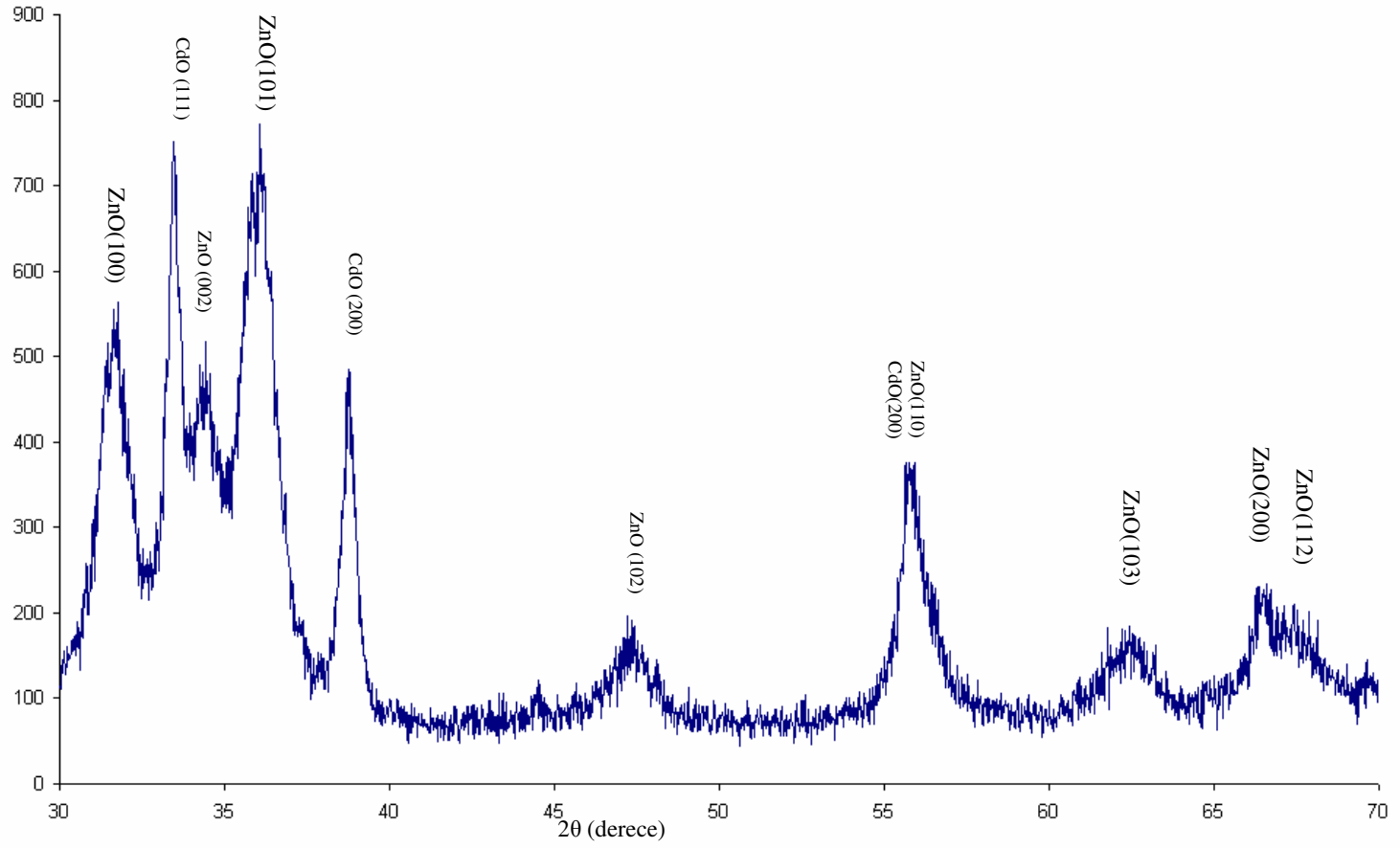
Şekil 4.5. $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.25$ için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin x-ışını kırınım deseni



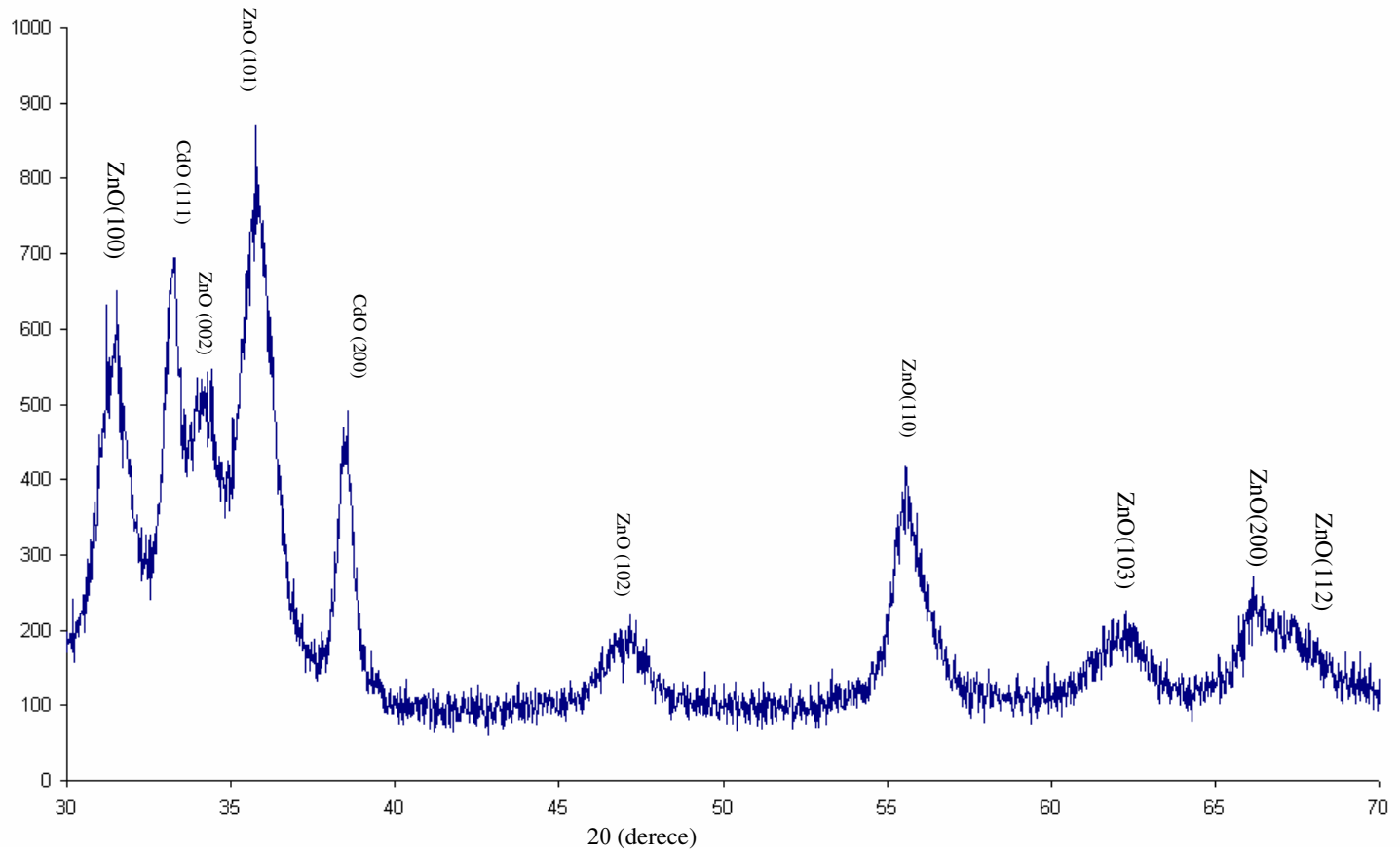
Şekil 4.6. $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.5$ için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin x-ışını kırınım deseni



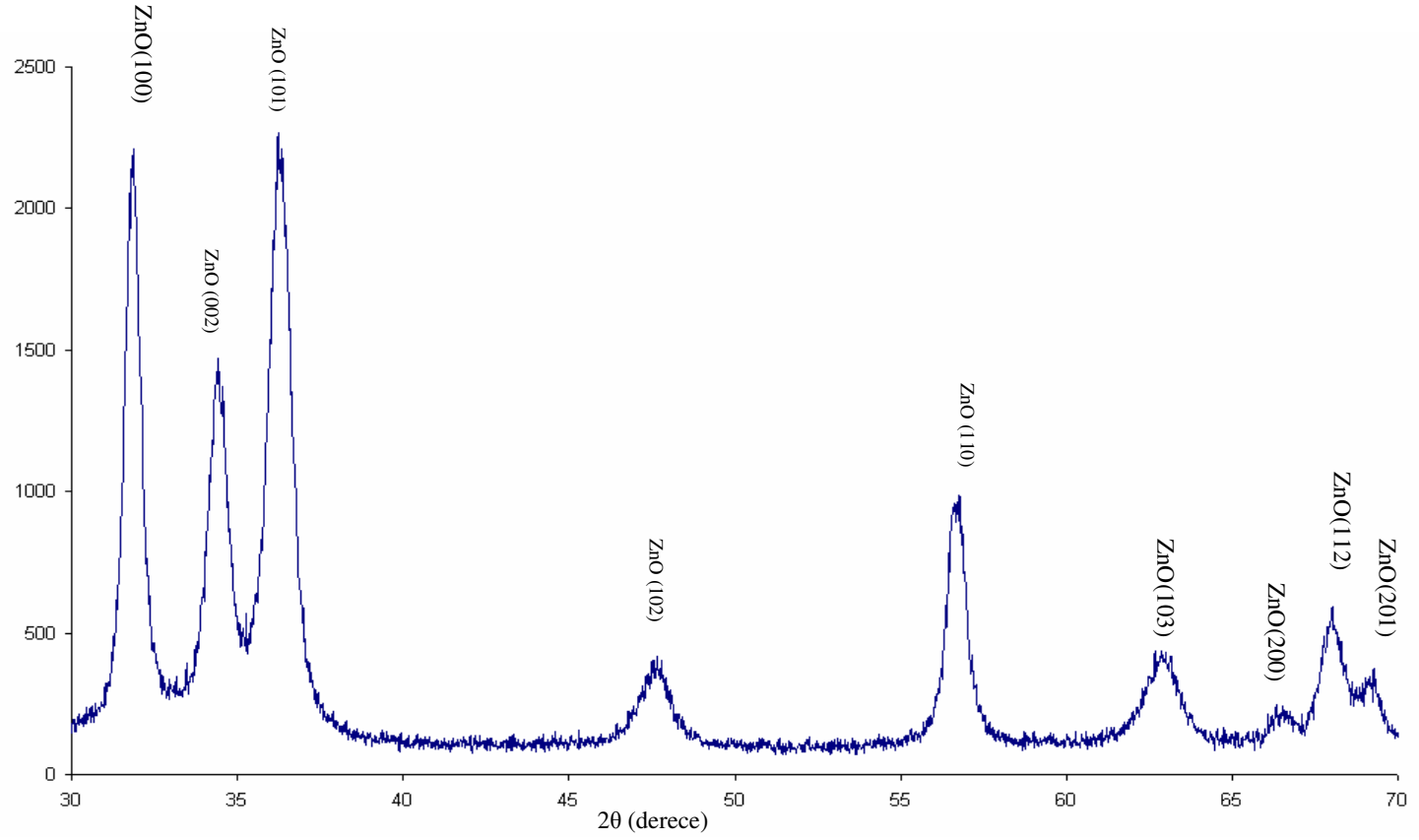
Şekil 4.7. $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.5$ için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin x-ışını kırınım deseni



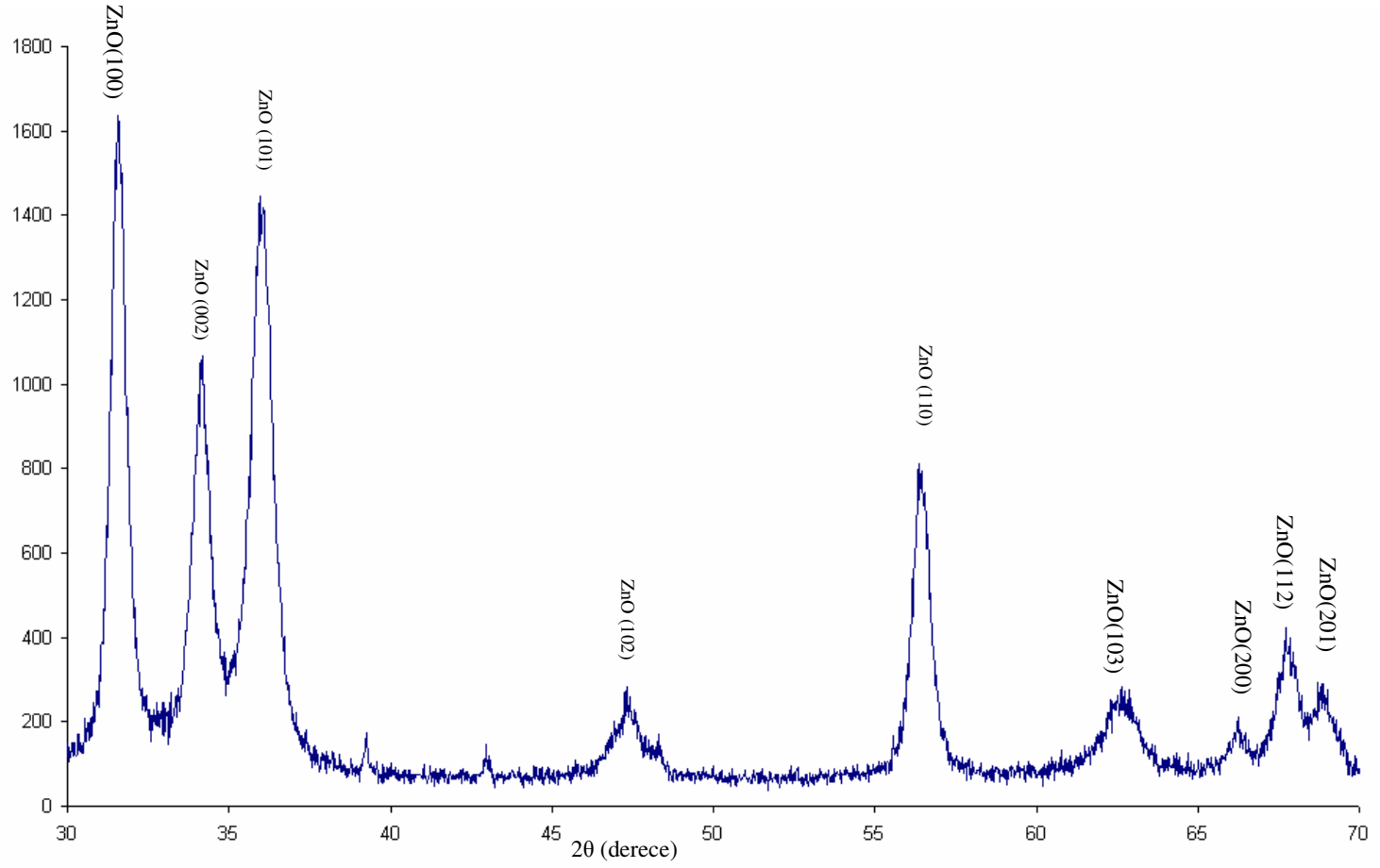
Şekil 4.8. $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.75$ için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin x-ışını kırınım deseni



Şekil 4.9. $250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.75$ için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin x-ışını kırınım deseni



Şekil 4.10. $250\pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=1$ için elde edilen ZnO filminin x-ışını kırınım deseni



Şekil 4.11. $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=1$ için elde edilen %1 In katkılı ZnO filminin x-ışını kırınım deseni

5. ABSORPSİYON

5.1. Giriş

Absorpsiyon, bir materyale gelen elektromagnetik dalganın materyalde bulunan elektriksel yükler ile etkileşmesi sonucu ortaya çıkan enerji kaybı olarak adlandırılır. Bu enerji kaybı materyalin atomları tarafından kullanılır. Yarıiletkenlerin bant aralıklarını belirlemek için kullanılan en yaygın ve en basit metot optik absorpsiyon yöntemidir. Absorpsiyon işleminde enerjisi belli bir foton, bir elektronu düşük enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine uyarır.

Kalınlığı x olan bir materyal üzerine gelen I_0 şiddetindeki bir ışın ile materyali geçen ışın şiddeti I arasında,

$$I=I_0 e^{-\alpha x} \quad (5-1)$$

bağıntısı vardır. Burada,

- I , x kalınlıklı materyalden geçen elektromagnetik dalganın şiddetini
- I_0 , materyale gelen elektromagnetik dalganın şiddetini
- α , lineer absorpsiyon katsayısını göstermektedir.

Lineer absorpsiyon katsayısı α , materyalin yapısına, kalınlığına ve elektromagnetik dalganın dalga boyuna bağlıdır. Denklem (5-1)'den görüldüğü gibi lineer absorpsiyon katsayısı büyüdükçe materyali geçen ışın şiddeti de o derece azalacaktır[15].

5.2. Temel Absorpsiyon Olayı

Yarıiletkenlerde en önemli absorpsiyon olayı, bir elektronun bir foton soğurarak valans bandından iletim bandına geçmesiyle oluşur. Bu olay, temel absorpsiyon olayı olarak adlandırılır. Absorpsiyonda hızlı bir artış olarak kendini gösteren temel absorpsiyon yarıiletkenin enerji aralığının belirlenmesinde kullanılır[15].

Temel absorpsiyon olayında, bir elektron, materyale gelen ışın demetinden bir foton absorplayarak valans bandından iletim bandına geçer. Bu geçiş sonucunda valans bandında bir hol oluşur. Bu geçişin gerçekleşebilmesi için materyal üzerine düşen foton enerjisinin, en az yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya bu değerden daha büyük olması gerekir. Bu nedenle gelen fotonun frekansı ν ,

$$\nu \geq E_g/h \quad \text{veya} \quad \nu \geq \nu_0 \quad (5-2)$$

olmalıdır. Burada;

E_g , yasak enerji aralığı

h , Planck sabiti

c , ışık hızıdır.

$\nu_0 = E_g/h$ frekansına ise absorpsiyon sınırı adı verilir.

Bir yarıiletken için temel absorpsiyon spektrumu Şekil 5.1'de görülmektedir. Şekil 5.1'den görüldüğü gibi λ_g ($\lambda_g = hc/E_g$) dalgaboyuna yakın dalgaboylarından itibaren absorpsiyonda sürekli bir artış gözlenir ve λ_g 'den sonra bir denge değerine ulaşır.

Yarıiletken materyal λ_g dalgaboyundan küçük dalgaboylarında kuvvetli bir soğurucu, büyük dalgaboylarında ise hemen hemen geçirgen özellik gösterir. Bu iki bölgeyi ayıran sınır temel absorpsiyon sınırı olarak adlandırılır.

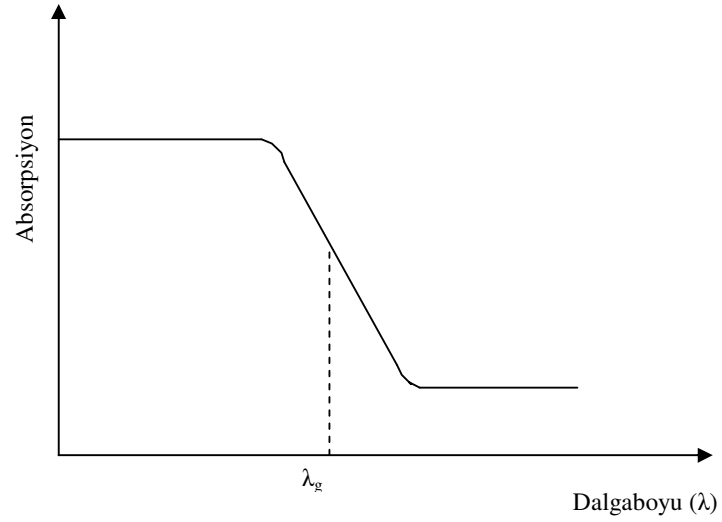
Yarıiletkenlerde temel absorpsiyon sınırında direkt ve indirekt olmak üzere iki tür geçiş olayı vardır.

5.2.1. Direkt bant geçişi

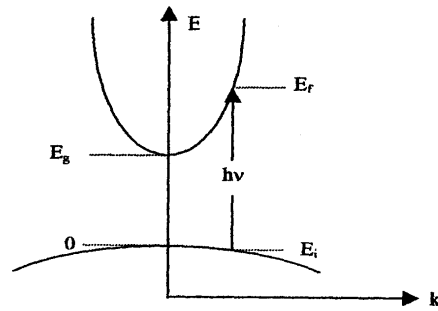
Yarıiletkenin iletim bandının minimumu ile valans bandının maksimumu enerji-momentum uzayında aynı \vec{k} değerinde ise geçişler direkt olmaktadır ($\Delta\vec{k} = 0$). Valans bandından iletim bandına direkt bant geçişi Şekil 5.2'de görülmektedir. Şekil 5.2'ye göre yarıiletkende E_i , ilk durum ve E_f , son durum enerji seviyesi ise,

$$E_f = hv - E_i \quad (5-3)$$

ile verilmektedir.



Şekil 5.1. Bir yarıiletkende temel absorpsiyon spektrumu



Şekil 5.2. Bir yarıiletkende direkt bant geçişinin şematik gösterimi

Parabolik bantlarda,

$$E_f - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c^*} \quad (5-4)$$

ve

$$E_i = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (5-5)$$

ile verilir. Burada;

m_e^* , elektronun etkin kütesini

m_h^* , holün etkin kütesini göstermektedir.

Denklem (5-4) ve denklem (5-5) denklem (5-3)'te yerine yazılırsa,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (5-6)$$

bağıntısı elde edilir. Direkt geçişlerde eksiton oluşumu veya elektron-hol etkileşimi dikkate alınmazsa absorpsiyon katsayısı α , gelen fotonun enerjisine,

$$\alpha(h\nu) = A^* (h\nu - E_g)^n \quad (5-7)$$

eşitliğiyle bağlıdır. Burada A^* sabiti,

$$A^* \approx \frac{q^2 \left(2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{3/2}}{nch^2 m_e^*} \quad (5-8)$$

bağıntısı ile verilir. Direkt bant geçişinde α ile $h\nu$ arasındaki bağıntı,

$$\alpha h\nu \approx (h\nu - E_g)^n \quad (5-9)$$

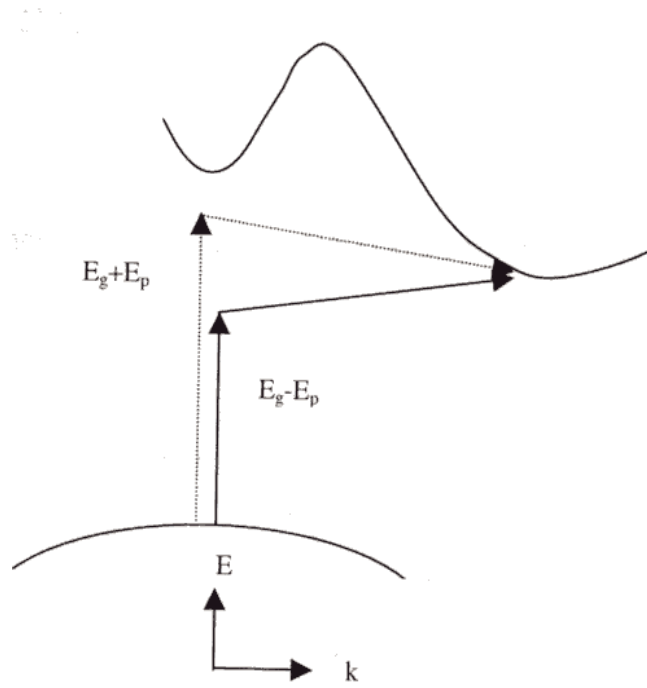
ile verilir. Burada;

n , $1/2$ (izinli geçiş) veya $3/2$ (izinsiz geçiş) değerlerini alabilen bir sabittir.

Denklem (5-9)'da $\alpha\hbar\nu$ 'yü sıfır yapan değer yarıiletkenin yasak enerji aralığını vermektedir[33,34].

5.2.2. İndirekt bant geçişi

Yarıiletkenin valans bandının maksimumu ile iletim bandının minimumu enerji-momentum uzayında aynı \bar{k} değerine karşılık gelmiyorsa $(\Delta\bar{k}) \neq 0$, bu tür geçişlere indirekt geçiş adı verilir. İndirekt bant geçişi Şekil 5.3'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Bir yarıiletkende indirekt bant geçişinin şematik gösterimi

İndirekt geçişlerde enerji korunur fakat momentumun korunumu için bir fononun absorpsiyonu veya emisyonu gereklidir. Bu iki geçiş,

$$\hbar\nu_a = E_f - E_i - E_p \text{ (Fonon absorpsiyonu durumunda)} \quad (5-10)$$

$$h\nu_e = E_f - E_i + E_p \text{ (Fonon emisyonu durumunda)} \quad (5-11)$$

ile verilir. Burada;

E_p , fonon enerjisidir.

Fonon absorpsiyonlu geçiş için absorpsiyon katsayısı,

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^n}{\exp\left[\frac{E_p}{kT}\right] - 1} \quad (h\nu > E_g - E_p \text{ için}) \quad (5-12)$$

ile verilir. Fonon emisyonlu geçiş için absorpsiyon katsayısı,

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^n}{1 - \exp\left[-\frac{E_p}{kT}\right]} \quad (h\nu > E_g + E_p \text{ için}) \quad (5-13)$$

ile verilir. Hem fonon absorpsiyonu hem de fonon emisyonu olduğu zaman α ile ν arasındaki bağıntı,

$$\alpha h\nu \approx \frac{(h\nu - E_g + E_p)^n}{\exp\left[\frac{E_p}{kT}\right] - 1} + \frac{(h\nu - E_g - E_p)^n}{1 - \exp\left[-\frac{E_p}{kT}\right]} \quad (5-14)$$

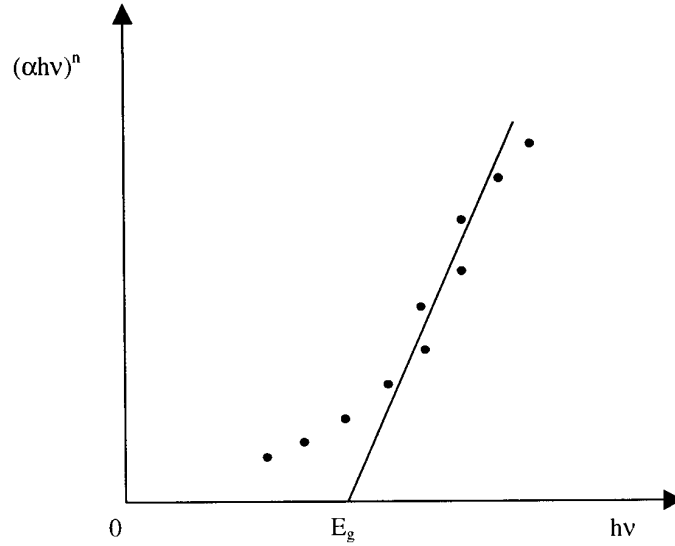
ile verilir. Burada;

n , indirekt geçişli bir yarıiletken için 2 (izinli geçiş) veya 3 (izinsiz geçiş) değerlerini alabilen bir sabiti göstermektedir[33,34].

5.3. $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ Filmlerinin Temel Absorpsiyon Spektrumları ve Yasak Enerji Aralıkları

Katkısız ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin yasak enerji aralıklarının belirlenmesinde optik absorpsiyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde

$(\alpha h\nu)^n$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi çizilir (Şekil 5.4). Grafiğin lineer olduğu kısma karşı gelen doğrunun $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^{1/n}=0$ 'da kestiği noktanın enerji değeri o materyalin yasak enerji aralığı değerini verir. n değeri 2 ise materyal direkt bant aralığına sahiptir, n değeri $1/2$ ise materyal indirekt bant aralığına sahiptir.



Şekil 5.4. Bir yarıiletkende absorpsiyon katsayısının fotonun enerjisine göre değişiminden yasak enerji aralığının belirlenmesi

Püskürtme yöntemi ile elde edilen filmlerin oda sıcaklığındaki absorpsiyon spektrumları tarama bölgesi 200-900nm arasında olan Shimadzu UV-2101 PC UV-VIS Scanning Spectrophotometer cihazından elde edilmiştir.

Katkısız ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin oda sıcaklığında elde edilen absorpsiyon spektrumlarından yararlanılarak ve denklem (5-9) kullanılarak $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre grafikleri çizilmiştir. Direkt geçişlerin gözlemlendiği bölgelerde bir doğru elde edileceğinden bu doğrunun $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^2=0$ 'da kestiği noktanın $(h\nu-E_g)=0$ ve $h\nu=E_g$ enerji değerinden yarıiletkenin yasak enerji aralığı tayin edilmiştir. Bu hesaplamalar denklem (5-9) ve denklem (5-14)'deki mümkün olan bütün n değerleri için yapılmıştır. Elde edilen filmlerin direkt bant geçişli oldukları ve yasak enerji aralıklarının 2.25-3.3eV arasında değiştii belirlenmiştir.

Şekil 5.5'te $250\pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0$ değeri için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 600nm dalga boyundan başlayarak 490nm dalga boyuna doğru yavaş bir artış göstermiştir. (Şekil 5.5.a). Şekil 5.5.b'deki grafiğin lineer kısmının $h\nu$ eksenini kestiği nokta yasak enerji aralığını verecektir. Bu yasak enerji aralığı $E_g=2.38\text{eV}$ olarak bulunmuştur.

Şekil 5.6'da $250\pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0$ değeri için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 700nm dalga boyundan başlayarak 515nm dalga boyuna doğru yavaş bir artış göstermiştir (Şekil 5.6.a). Şekil 5.6.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 2.25eV bulunmuştur.

Şekil 5.7'de ise $250\pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.25$ değeri için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 550nm dalga boyundan başlayarak 450nm dalga boyuna kadar keskin bir artış göstermiştir (Şekil 5.7.a). Şekil 5.7.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 2.4eV olarak bulunmuştur.

Şekil 5.8'de ise $250\pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.25$ değeri için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 600nm dalga boyundan başlayarak 480nm dalga boyuna kadar artış göstermiştir (Şekil 5.7.a). Şekil 5.8.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 2.32eV olarak bulunmuştur.

Şekil 5.9.'da ise $250\pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.5$ değeri için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 600nm dalga boyundan başlayarak 450nm dalga boyuna kadar artış göstermiştir (Şekil 5.9.a). Şekil 5.9.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 2.51eV olarak bulunmuştur.

Şekil 5.10.'da ise $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.5$ değeri için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 600nm dalga boyundan başlayarak 455nm dalga boyuna kadar artış göstermiştir (Şekil 5.10.a). Şekil 5.10.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 2.52eV olarak bulunmuştur.

Şekil 5.11.'de ise $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.75$ değeri için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 550nm dalga boyundan başlayarak 430nm dalga boyuna kadar keskin bir artış göstermiştir (Şekil 5.11.a). Şekil 5.11.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 2.61eV olarak bulunmuştur.

Şekil 5.12.'de ise $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.75$ değeri için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 550nm dalga boyundan başlayarak 450nm dalga boyuna kadar artış göstermiştir (Şekil 5.12.a). Şekil 5.12.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 2.52eV olarak bulunmuştur.

Şekil 5.13.'te ise $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=1$ değeri için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans yaklaşık 400nm dalga boyundan başlayarak 380nm dalga boyuna kadar keskin bir artış göstermiştir (Şekil 5.13.a). Şekil 5.13.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 3.13eV olarak bulunmuştur.

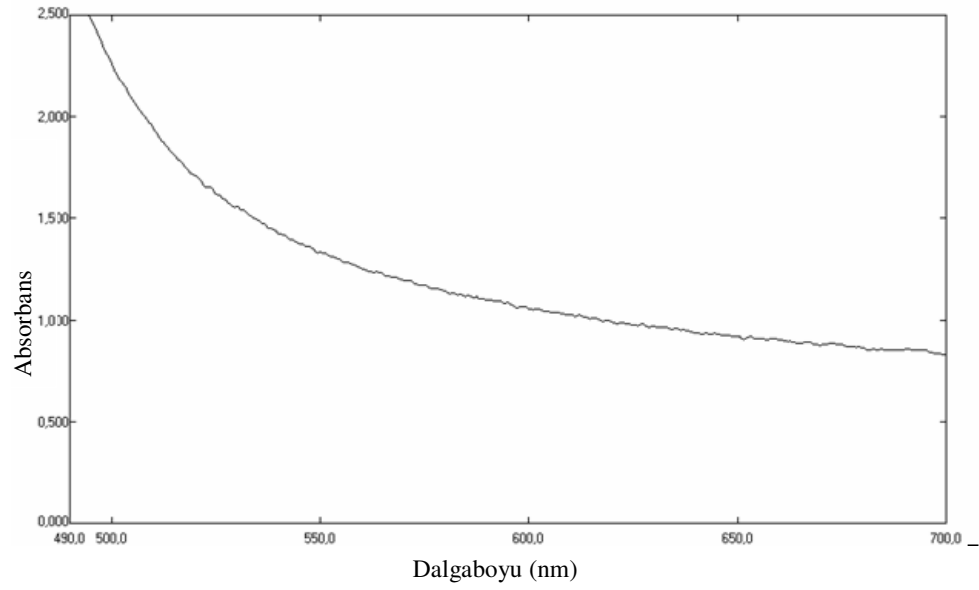
Şekil 5.14.'de ise $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=1$ değeri için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans yaklaşık 390nm dalga boyundan başlayarak 365nm dalga boyuna kadar keskin bir artış göstermiştir (Şekil 5.14.a). Şekil 5.13.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 3.3eV olarak bulunmuştur.

Yasak enerji aralığı CdO için 2.2-2.7eV ve ZnO için yaklaşık 3.3eV'tur [60,61,72,73]. Bu iki materyalin belli oranlarda karışımı kullanılarak

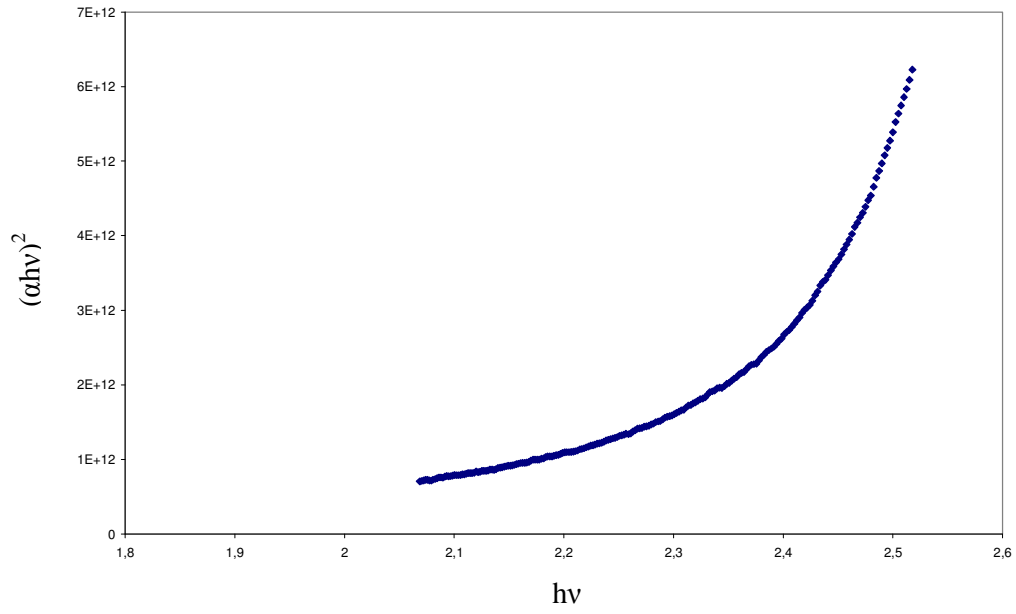
elde edilen filmlerin yasak enerji aralığının da saf CdO ve ZnO için verilen değerler arasında olması beklenir. Yapılan çalışmada yasak enerji aralıkları 2,25 – 3,3 eV arasında değişmiştir.

%1 In katkılı filmlerde yasak enerji aralığında genelde artış gözlenmiştir. Şekil 15’de katkısız ve Şekil 16’da %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin Cd-Zn konsantrasyonuna göre değişimleri görülmektedir.

Çizelge 5.1’de katkısız ve %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin yasak enerji aralıkları verilmiştir. Bu sonuçlar yapılan çalışmalar ile uyum içindedir [60-61].

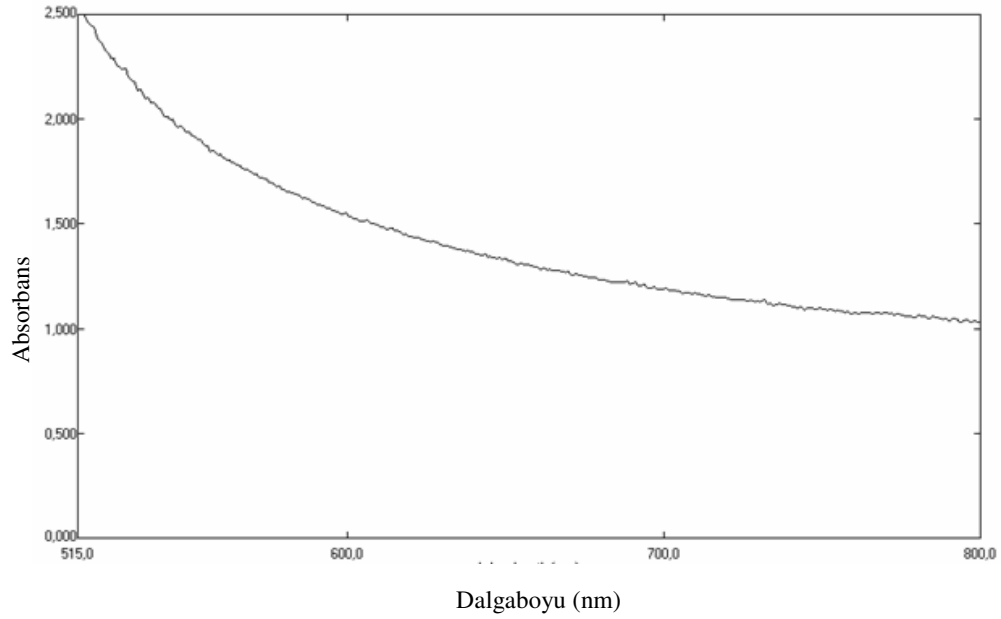


(a)

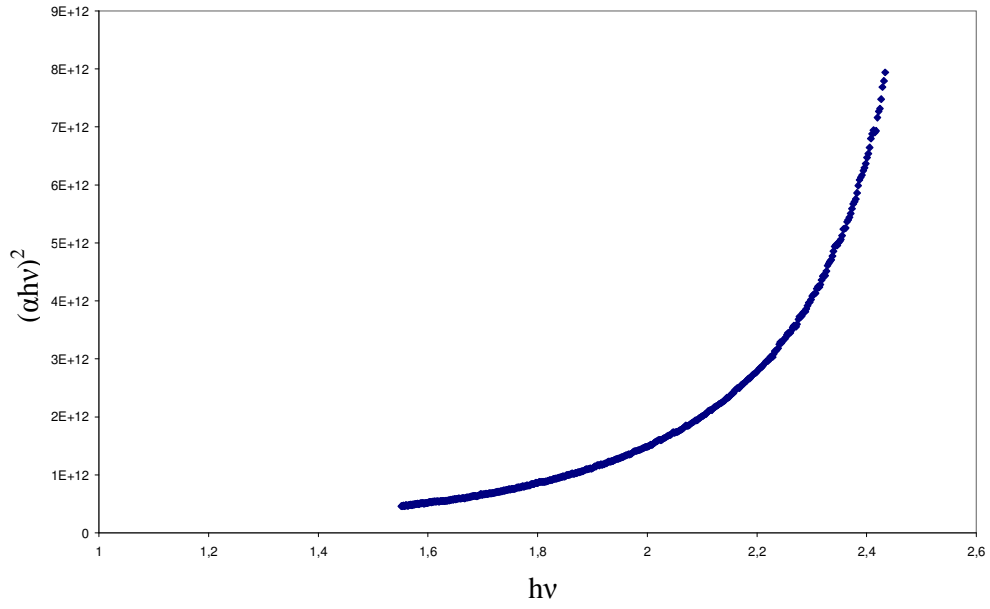


(b)

Şekil 5.5. $250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0$ için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2 \approx h\nu$ değişimi

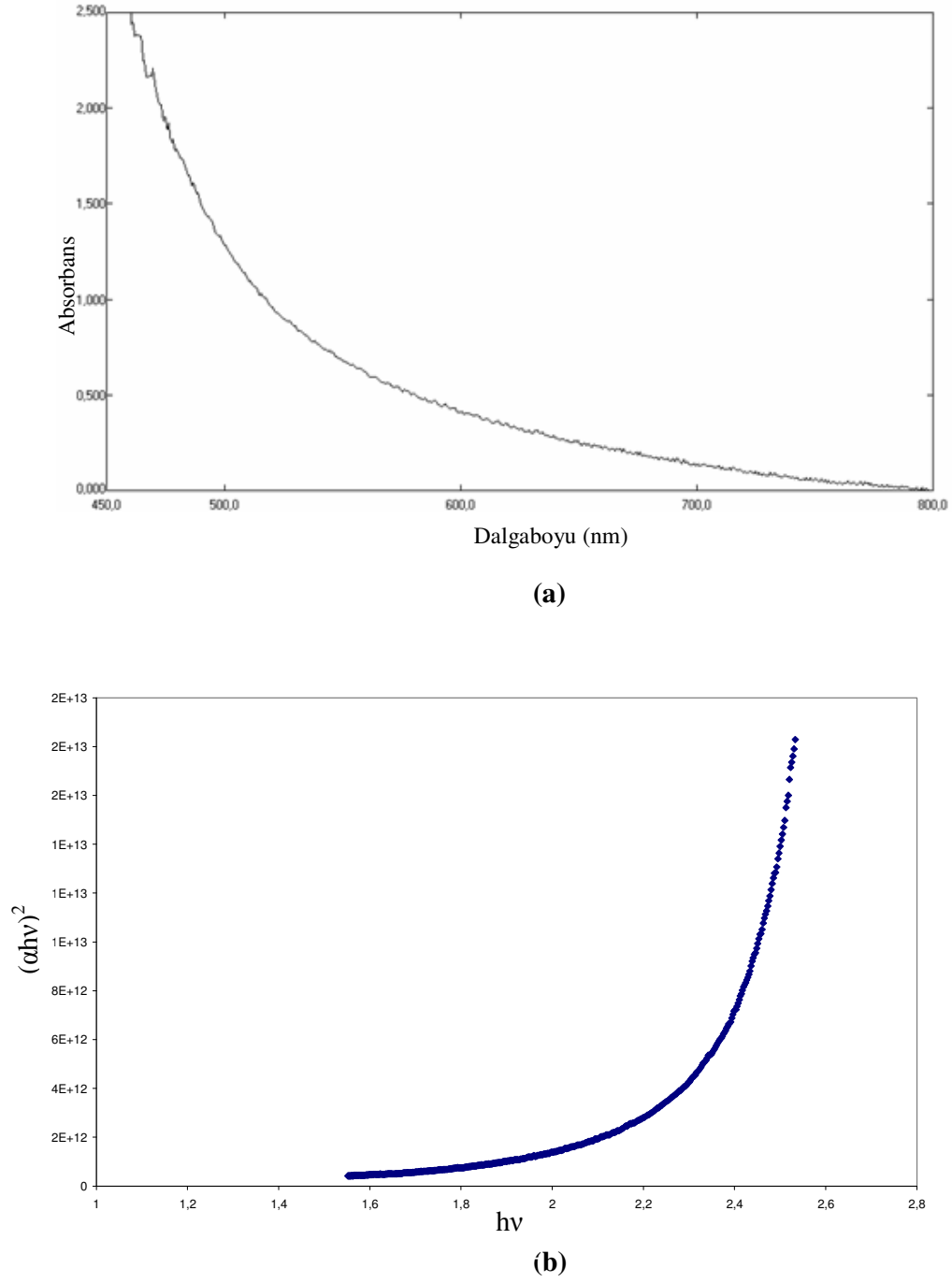


(a)

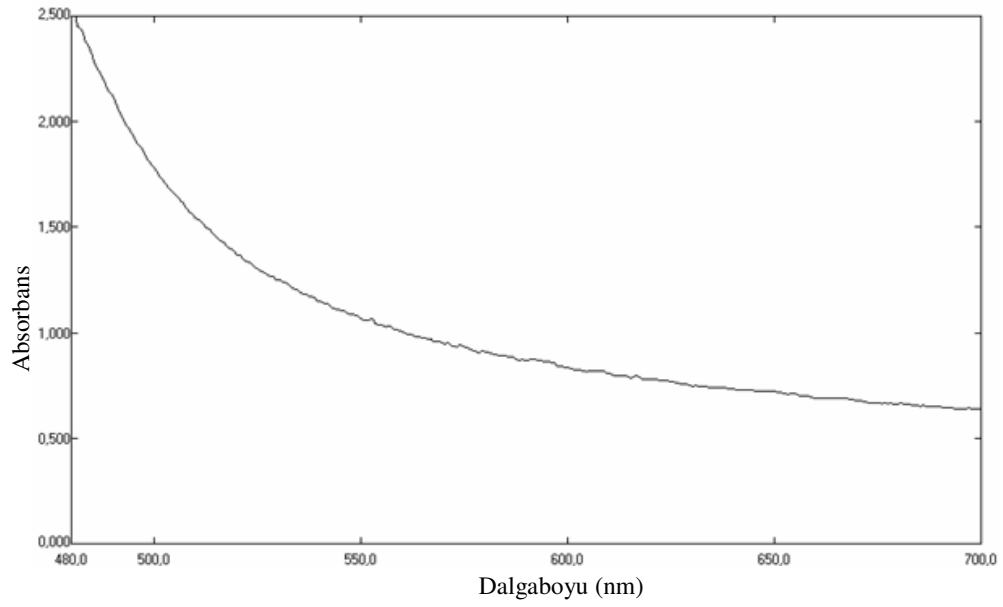


(b)

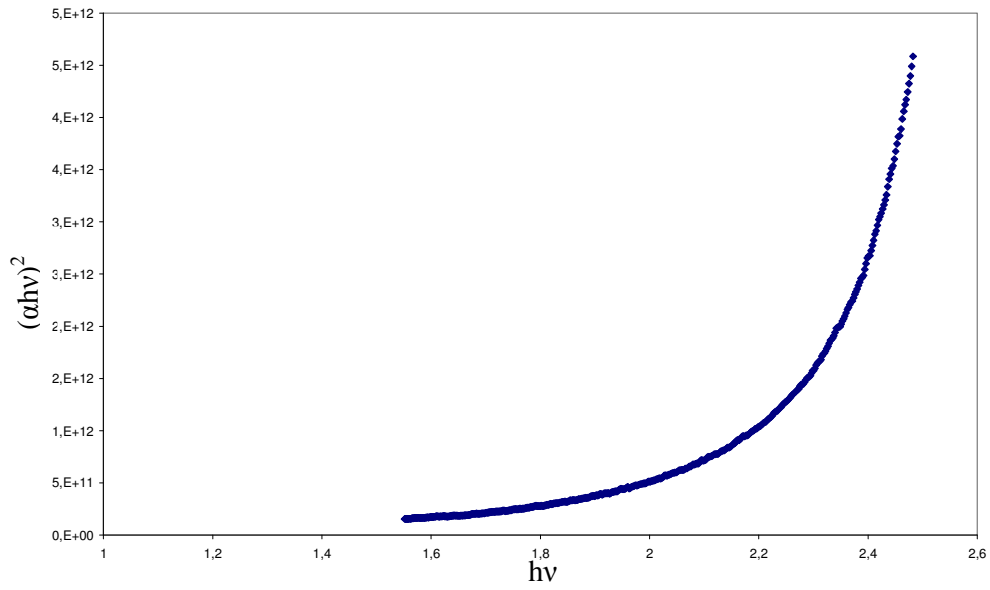
Şekil 5.6. 250±5⁰C taban sıcaklığında x=0 için elde edilen %1 In katkılı Zn_xCd_{1-x}O filminin oda sıcaklığında (a)temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2 \approx h\nu$ değişimi



Şekil 5.7. $250 \pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.25$ için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığında (a)temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2 \approx hv$ değişimi

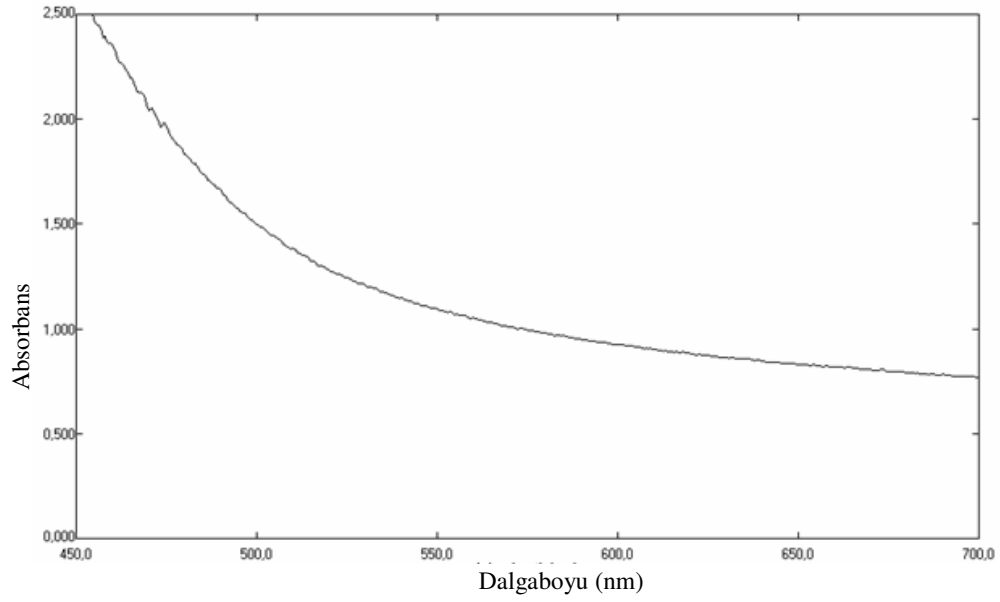


(a)

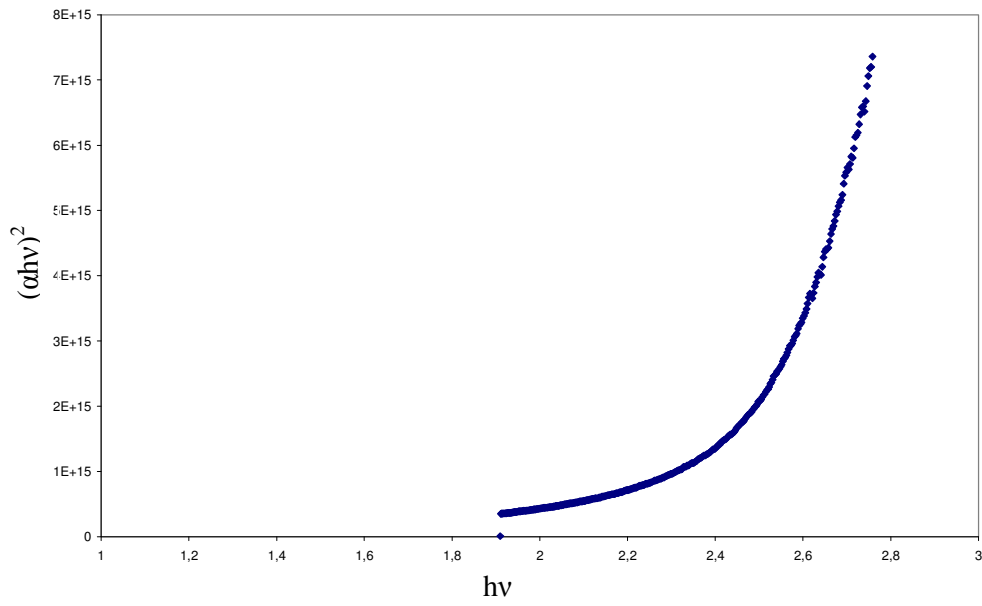


(b)

Şekil 5.8. $250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.25$ için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2 \approx h\nu$ değişimi

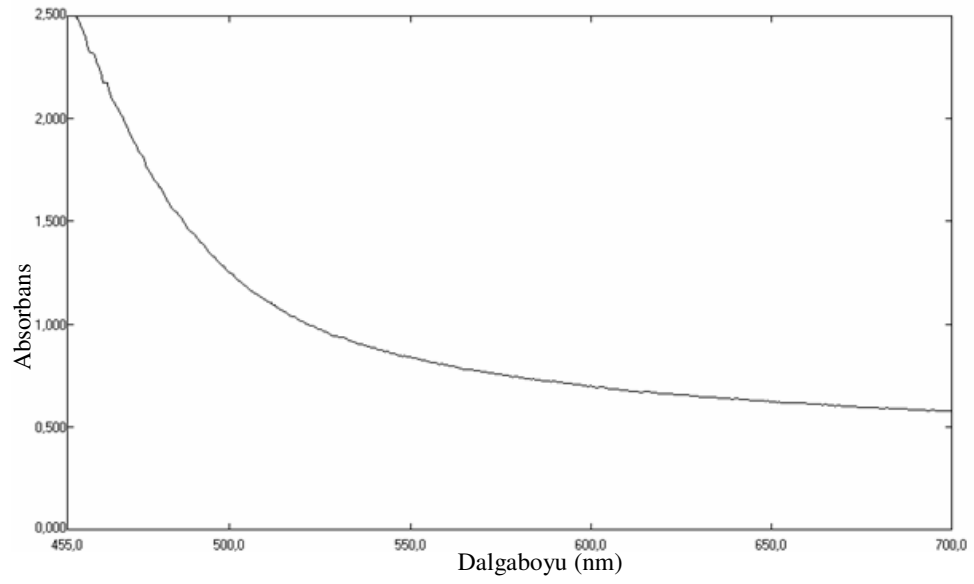


(a)

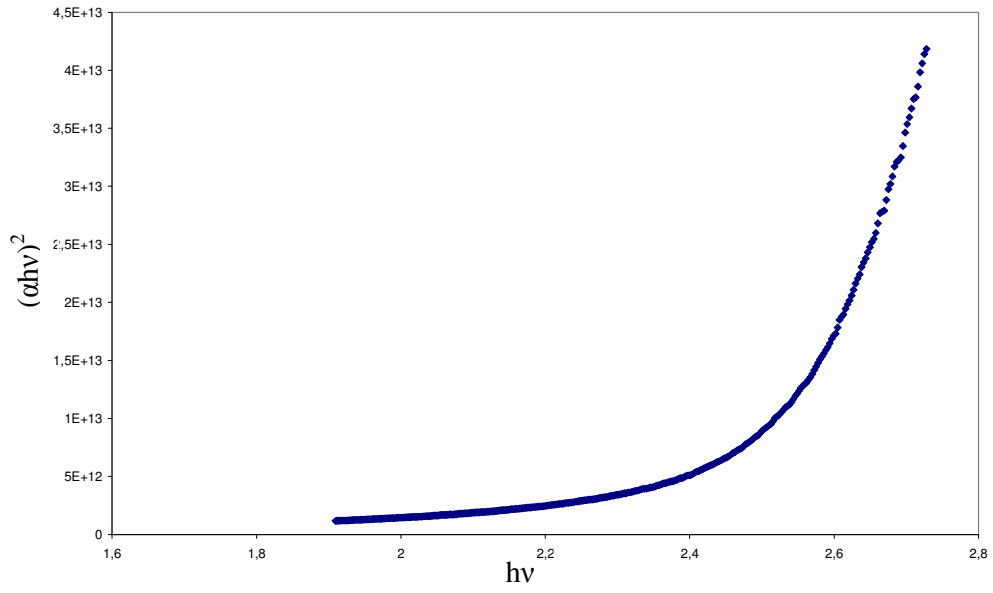


(b)

Şekil 5.9. $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.5$ için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2 \approx hv$ değişimi

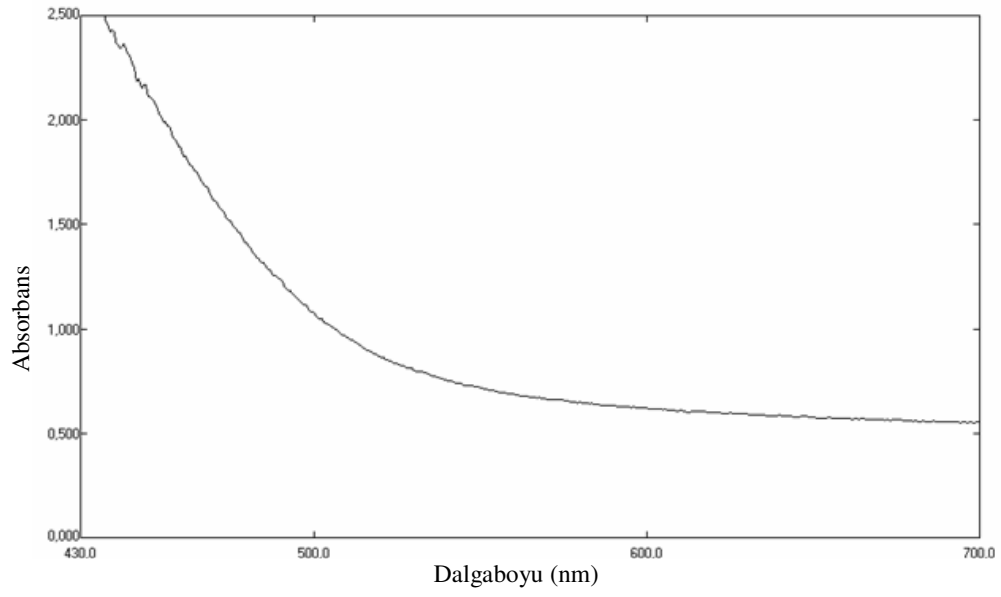


(a)

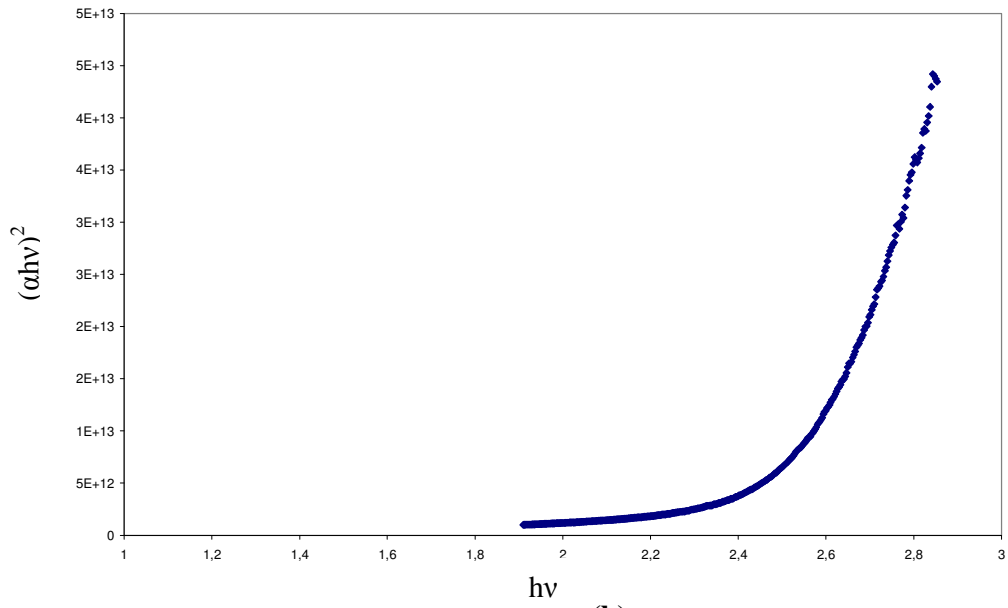


(b)

Şekil 5.10. $250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.5$ için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2 \approx h\nu$ değişimi

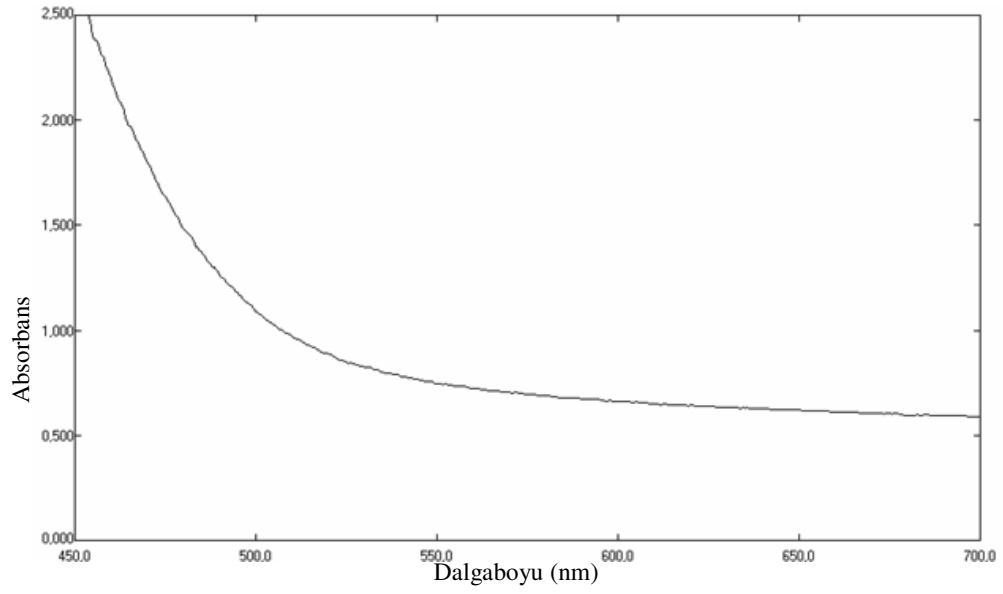


(a)

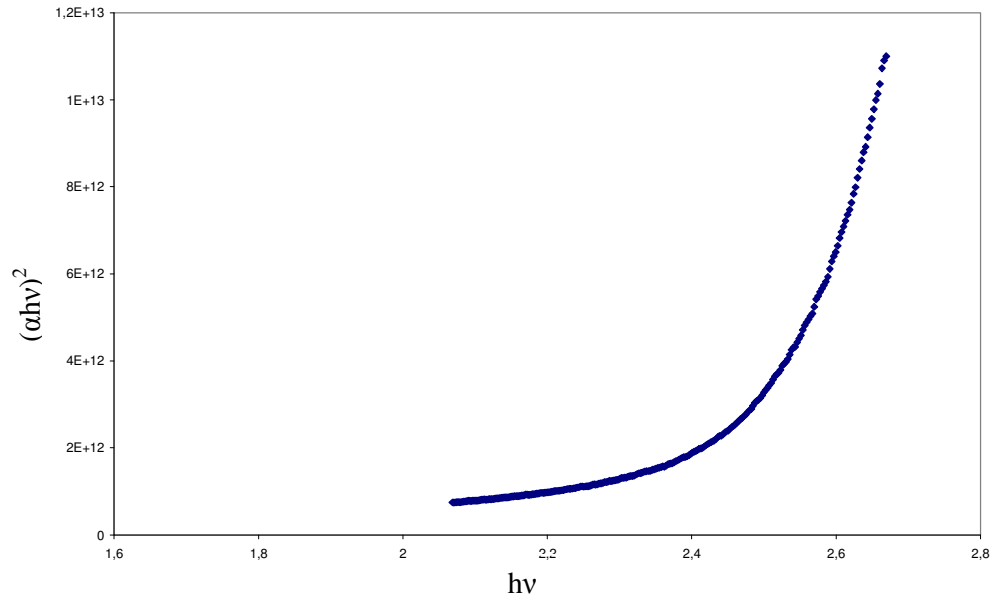


(b)

Şekil 5.11. $250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.75$ için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2 \approx h\nu$ değişimi

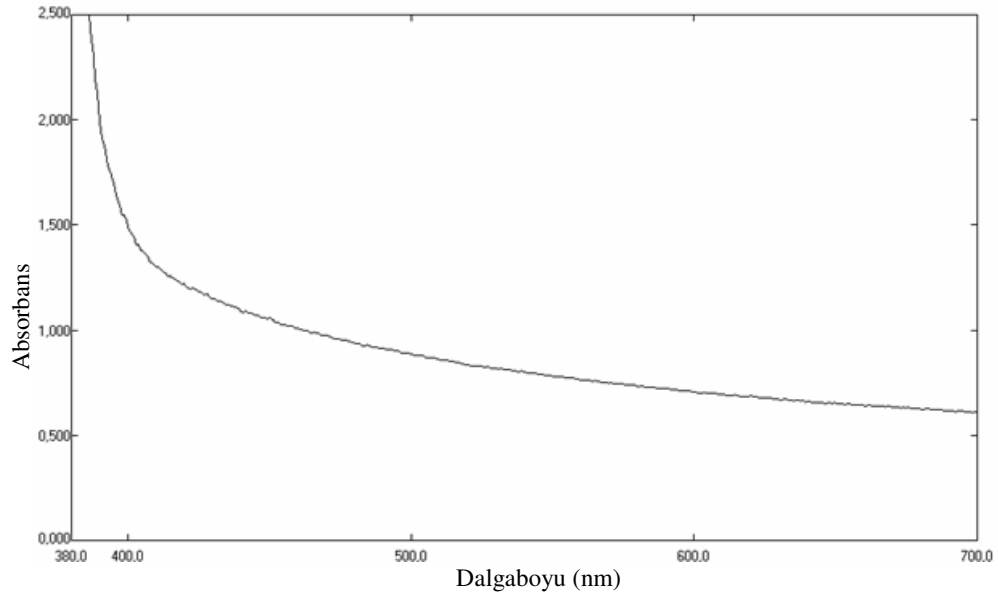


(a)

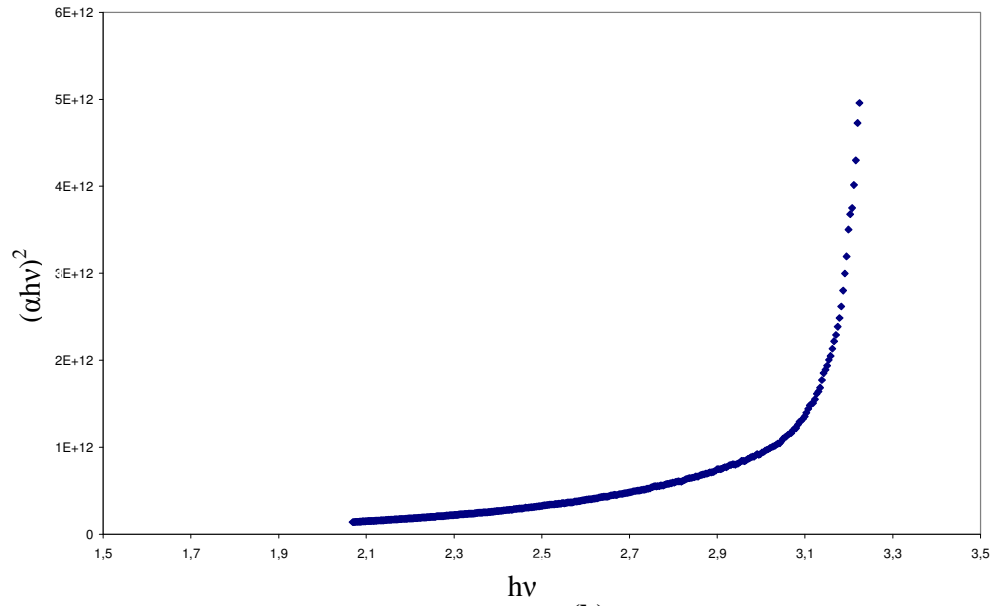


(b)

Şekil 5.12. $250 \pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=0.75$ için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2 \approx h\nu$ değişimi

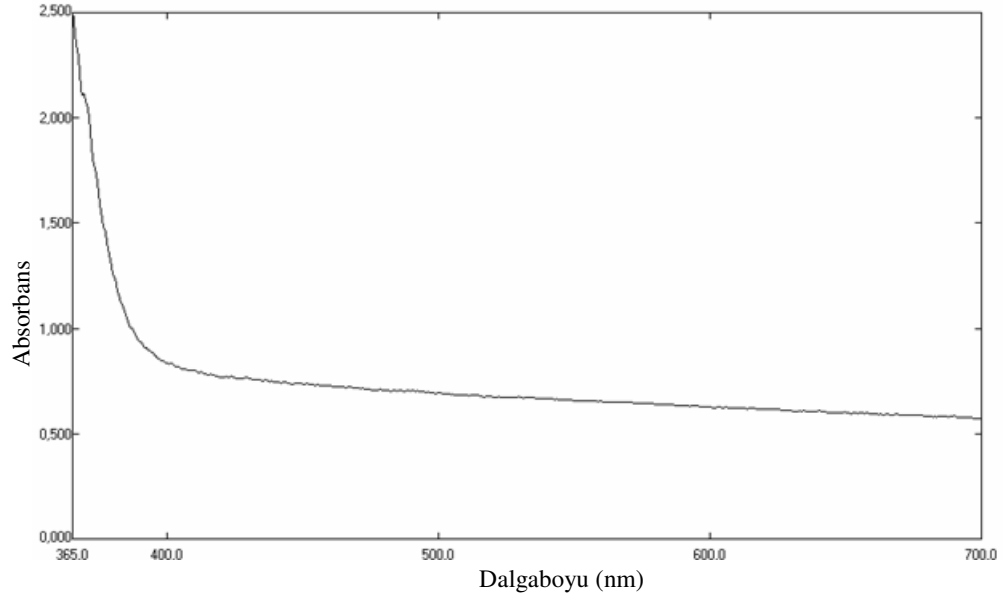


(a)

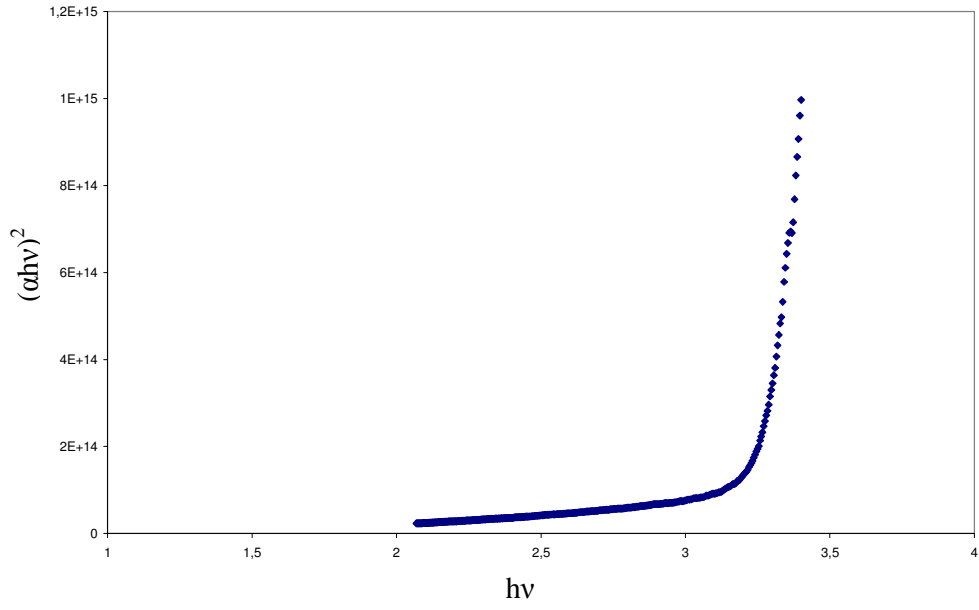


(b)

Şekil 5.13. $250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $x=1$ için elde edilen $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2 \approx h\nu$ değişimi

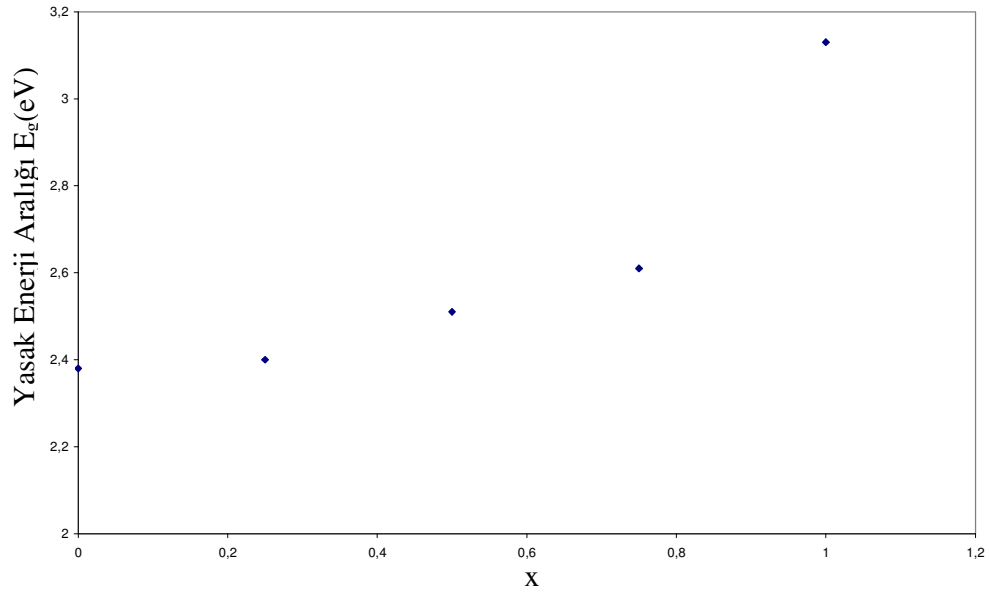


(a)

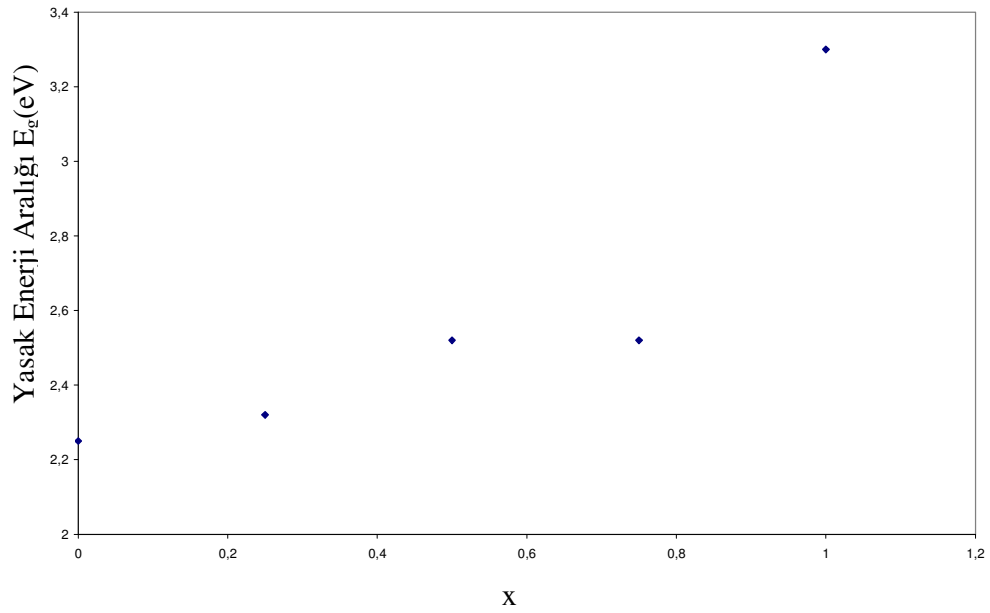


(b)

Şekil 5.14. $250 \pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında $x=1$ için elde edilen %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filminin oda sıcaklığında (a) temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2 \approx hv$ değişimi



Şekil 5.15. Katkısız $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin Cd-Zn konsantrasyonu ile yasak enerji aralıkları değişimi



Şekil 5.16. In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin Cd-Zn konsantrasyonu ile yasak enerji aralıkları değişimi

Çizelge 5.1. Katkısız ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin hesaplanan yasak enerji aralığı değerleri

Filmler	Yasak Enerji Aralığı E_g (eV)	
	Katkısız	% 1 In Katkılı
CdO	2.38	2.25
$Zn_{0.25}Cd_{0.75}O$	2.4	2.32
$Zn_{0.5}Cd_{0.5}O$	2.51	2.52
$Zn_{0.75}Cd_{0.25}O$	2.61	2.52
ZnO	3.13	3.3

6. DC İLETKENLİK

6.1. Giriş

Bir yarıiletkenin elektriksel özellikleri hakkında bilgi edinebilmek için yarıiletken üzerinde metal elektrotlar yardımıyla metal-yarıiletken-metal yapılar oluşturulmalıdır. Metal kontak olarak farklı iş fonksiyonlarına sahip gümüş, alüminyum, altın, bakır, indiyum gibi metaller kullanılır. Materyalden bir elektron koparabilmek için gerekli minimum enerji miktarına iş fonksiyonu adı verilir ve $e\phi$ ile sembolize edilir[8]. Bu değer Gümüş (Ag) için 4.26eV, Alüminyum (Al) için 4.28eV, Altın (Au) için 5.1eV, Nikel (Ni) için 5.15eV'tur[18].

Metal-yarıiletken-metal yapıların oluşturulması ile yarıiletken materyallerin akım-voltaj karakteristikleri elde edilebilir ve yarıiletkenin iletim özelliği belirlenebilir. Belirlenen iletim özelliğine bağlı olarak yarıiletkenin serbest taşıyıcı yoğunluğu, tuzak enerji seviyesi, tuzak yoğunluğu, taşıyıcı mobilitesi ve iletkenliği hakkında bilgi edinilebilir.

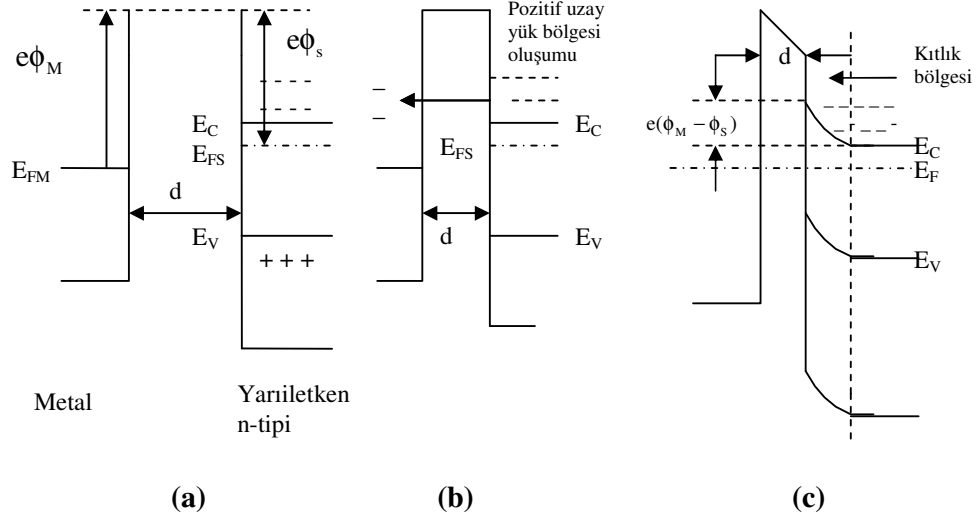
6.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Metal- yarıiletken kontaklarla ilgili ilk çalışmalar, 1874 yılında Braun tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, metal-yarıiletken-metal şeklinde oluşturulan yapıların direnci uygulanan voltajın polaritesine bağlı olduğu ve yüzey şartlarının da direncin belirlenmesinde etkin olduğu gözlenmiştir[18].

İş fonksiyonları farklı bir yarıiletken ve metal, kontak yapıldığında, yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan küçük veya büyük olmasına göre, iki şekilde metal-yarıiletken kontak oluşur. Şekil 6.1'de metal-yarıiletken (n-tipi) arasındaki kontak görülmektedir. Burada metalin iş fonksiyonu $e\phi_M$, yarıiletkenin iş fonksiyonu $e\phi_S$ 'den büyüktür.

Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu için, metalin Fermi enerji seviyesi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesinden

$e(\phi_M - \phi_S)$ kadar aşağıda olacaktır. Metal ile yarıiletken arasındaki uzaklık elektronların tünellemesine izin vermeyecek kadar büyük olduğunda bu durumda elektron geçişi söz konusu değildir (Şekil 6.1.a).

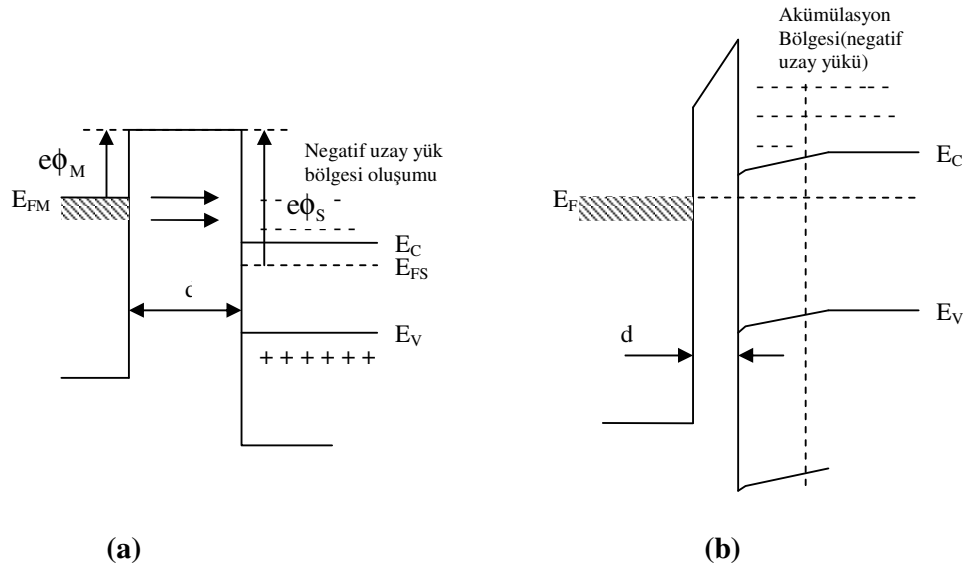


Şekil 6.1. Metal-(n-tipi) yarıiletken kontakının enerji-bant diyagramı ($\phi_M > \phi_S$)

Metal-yarıiletken arasındaki uzaklık elektronların yarıiletkenden metale geçmesini sağlayacak kadar azaltılırsa, elektronlar metale tünelleyerek geçeceklerdir (Şekil 6.1.b). Elektron geçişi metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder. Dolayısıyla yarıiletkenin iç kısımlarında, iletim bandının alt sınırında durgun olan bir elektronun potansiyel enerjisi yüzeydeki bir elektronun potansiyel enerjisinden $e(\phi_M - \phi_S)$ değeri kadar farklı olacaktır. Bu nedenle yarıiletkenin yüzeyindeki iletim ve valans bant sınırları Fermi enerji seviyesine göre kavis çizeceklerdir (Şekil 6.1.c). Materyallerin Fermi enerji seviyeleri eşitlendiğinde yarıiletkenin ara yüzeyi yakınında net taşıyıcı yoğunluğu iç kısımlardaki değerine göre azalır. Bu bölgeye uzay-yük bölgesi (kıtık bölgesi) adı verilir. Metal ve n-tipi yarıiletken ara yüzeyleri sırasıyla negatif ve pozitif olarak yüklenir[8,35].

6.3. Ohmik kontak

Ohmik kontak, metal ile yarıiletken arasında ihmal edilebilecek kadar küçük empedansa sahip kontak olarak tanımlanmaktadır. Ohmik kontakın materyalin akım-voltaj karakteristiğini etkilememesi gerekmektedir. Dolayısıyla ohmik kontak serbest taşıyıcı geçişine engel olmayacaktır[8,36]. Bu tür kontaklar, yarıiletkenin taşıyıcı tipine göre oluşturulmaktadır. Eğer ohmik kontak metal-(n-tipi) yarıiletkende belirlenmiş ise, bu durumda yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan büyüktür ($\phi_s > \phi_M$). Ohmik kontak metal-(p-tipi) yarıiletkende belirlenmiş ise, metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyüktür ($\phi_M > \phi_s$). Şekil 6.2’de metal-(n-tipi) yarıiletken arasındaki ohmik kontak görülmektedir.



Şekil 6.2. Metal-(n-tipi) yarıiletken ohmik kontakının enerji-bant diyagramı ($\phi_s > \phi_M$)

Şekil 6.2.a’da görüldüğü gibi, metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçüktür. Metal ile yarıiletken arasındaki d mesafesi oldukça büyük olduğu için elektron geçişi olmaz ve dolayısıyla bir akım gözlenmez.

Şekil 6.2.b'de ise iki materyal arasındaki d mesafesi elektronların metalden yarıiletkene geçmesine izin verecek kadar azaltılmıştır. Dolayısıyla metalden yarıiletkene elektron akışı meydana gelir ve yarıiletken tarafında elektron yoğunluğunun büyük olduğu yığılma bölgesi oluşur. Metal tarafında ise elektronların bıraktığı boşluklardan kaynaklanan pozitif yükler artar. Yarıiletken tarafında oluşan bu elektron deposu (akümülyasyon bölgesi) yarıiletkene ihtiyacı kadar yükü kolayca verebilir. Böyle bir özelliğe sahip olan kontak, ohmik kontak olarak adlandırılır. Ohmik kontak serbest taşıyıcılara engel oluşturmaz. Ohmik kontağı geçen taşıyıcılar, uygulana voltajın büyük bir bölümünde Ohm kanununa uyarlar [22,35].

6.4. Metal-Yarıiletken-Metal Yapılarda Akım Taşınım Olayları

Metal-yarıiletken-metal yapılarda gözlenen iletim mekanizmaları şunlardır: a) Richardson-Schottky emisyonu, b)Poole-Frenkel emisyonu, c) Tünel emisyonu, d)Space-charge-limited ve omik iletimdir. Metal-yarıiletken-metal yapılarda iletim, çoğunluk taşıyıcılarına bağlıdır. Verilen bir yarıiletken için her bir iletim olayı belli bir voltaj ve sıcaklık bölgesinde baskın olabilmektedir.

6.4.1. Richardson-Schottky emisyonu

Sıcaklık ve elektrik alan şiddeti elektron emisyonunun meydana gelmesinde önemli rol oynamaktadır. Schottky etkisi, metal elektrottan metal-yalıtkan ara yüzeyindeki potansiyel engel üzerinden ısıl aktivasyonla yarıiletkenin iletim bandına elektronların emisyonunu kapsar. Elektrik alan uygulandığında akım yoğunluğu,

$$J = AT^2 \exp\left[-\frac{\phi - \beta_s E^{1/2}}{kT}\right] \quad (6-1)$$

ile verilmektedir. Burada β_s ,

$$\beta_s = \left[\frac{e^3}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (6-2)$$

ile verilir. Denklem (6-1) ve denklem (6-2)'de,

A, Richardson sabiti

ϕ , potansiyel engel

$\beta_s E^{1/2}$, elektrik alanından dolayı ϕ potansiyel engelini Schottky düşmesini

ϵ_r , yalıtkanın bağıl dielektrik sabitini

ϵ_0 , serbest uzayın permitivitesini göstermektedir.

Eğer elektronların ortalama serbest yolları yalıtkanlardaki gibi çok küçükse bu durumda akım yoğunluğu,

$$J = 2e \left[\frac{2\pi mkT}{h^2} \right]^{3/2} \mu \exp \left[-\frac{\phi - \beta_s E^{1/2}}{kT} \right]$$

ile verilir. Burada,

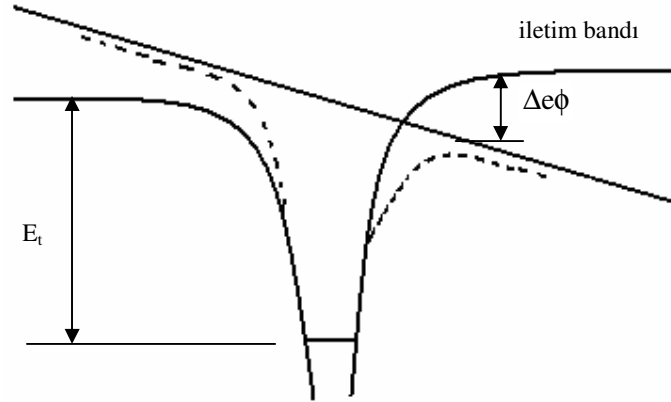
h, Planck sabiti

μ , taşıyıcıların mobilitesini göstermektedir. Schottky emisyonu düşük sıcaklıklarda gözlenir [37].

6.4.2. Poole-Frenkel emisyonu

1938'de Frenkel tarafından önerilen Poole-Frenkel emisyonu, Schottky emisyonunun benzeridir. Poole-Frenkel emisyonunda elektronlar, dışarıdan bir elektrik alan uygulanmasıyla, Coulomb potansiyel engelindeki azalmayla birlikte, metal-yalıtkan ara yüzeyinde rastgele yerleşmiş tuzaklardan yarıiletkenin iletim bandına ısıl olarak geçerler.

Şekil 6.3'te Coulomb potansiyel engeli, elektrik alan uygulanmadan önce düz çizgiyle gösterilmiştir. Elektrik alan uygulanınca Coulomb potansiyel engeli Δe_ϕ kadar azaltılmıştır ve kesikli çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Poole-Frenkel emisyonu

Poole-Frenkel emisyonundaki tuzak pozitif olarak yüklenmiş olmalıdır. Pozitif yüklü bir tuzak, donör veya akseptör merkezi olabilir. Nötral bir tuzak ise, Poole-Frenkel emisyonu oluşturmaz [38,39].

Poole-Frenkel emisyonunda, sığ (shallow) tuzakları kapsayan yarıiletken filmlerde J-V karakteristiği,

$$J = J_0 \exp\left(\frac{\beta_{PF} E^{1/2}}{kT}\right) \quad (6-3)$$

ile verilir. Burada E yerine, V/d ifadesi yazılırsa,

$$J = J_0 \exp\left(\frac{\beta_{PF} V^{1/2}}{kTd^{1/2}}\right) \quad (6-4)$$

bağıntısı elde edilir.

Şekil 6.4'te görüldüğü gibi, tuzaklama ve donör merkezlerini içeren yarıiletken filmlerde ise, J-V karakteristiği,

$$J = J_0 \exp\left(\frac{\beta_{PF} V^{1/2}}{2kTd^{1/2}}\right) \quad (6-5)$$

bağıntısı ile verilir. Burada β_{PF} ve J_0 ,

$$\beta_{PF} = \left[\frac{e^3}{\pi \epsilon_r \epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (6-6)$$

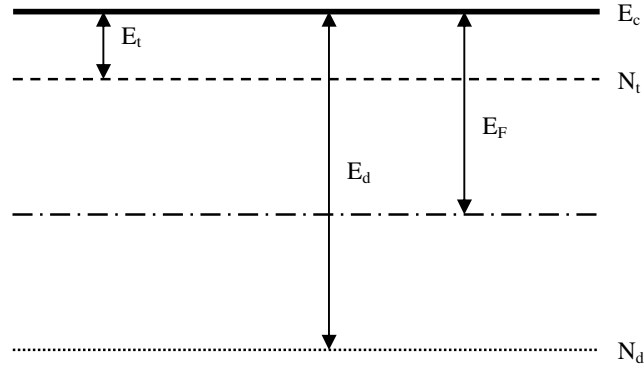
$$J_0 = e \mu N_c \left[\frac{N_d}{N_t} \right]^{1/2} E \exp \left[- \frac{E_d + E_t}{2kT} \right] \quad (6-7)$$

bağıntısı ile verilir. Burada,

N_d/N_t , donör merkezleri yoğunluğunun tuzak merkezleri yoğunluğuna oranı

E_d ve E_t , iletim bandının altından itibaren donör ve tuzak merkezlerinin enerji seviyelerini göstermektedir [37,38].

Poole-Frenkel ve Schottky emisyonlarında, iletkenliğin uygulanan alanın kuvvetine olan fonksiyonel bağımlılığı aynıdır. Yani $\ln \sigma$ 'ya karşı çizilen $V^{1/2}$ grafiğinin eğimi β_s veya β_{PF} değerini verir. Bu değer teorik olarak bulunan β_s ve β_{PF} değerleri ile karşılaştırılır. Hangi değer β_{teorik} değerine uyuyorsa iletim mekanizması hakkında karar verilir.



Şekil 6.4. Tuzak ve donör enerji seviyeleri

6.4.3. Tünel emisyonu

Metal-yarıiletken bir kontakta, metalin Fermi enerji seviyesinde bulunan elektronlar kontak potansiyel engelini tünelleyerek yarıiletkenin iletim bandına geçerler. Bu akım taşınım yöntemi tünel akımı olarak da adlandırılır. Tünel akımı düşük sıcaklıklarda, uygulanan elektrik alanına bağlı olarak çok katkılı yarıiletkenlerde görülmektedir. Tünel akım yoğunluğu J ,

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (6-8)$$

ile verilir. Burada;

J_s , doyum akım yoğunluğu

n , idealite faktörünü göstermektedir ve

$$n = \frac{q}{kT} \frac{\partial V}{\partial(\ln J)} \quad (6-9)$$

bağıntısı ile verilir [8].

6.4.4. Space-Charge-Limited ve ohmik iletim

Paralel düzlem elektrotlar arasındaki Space-charge-limited (SCL) akım teorisi ilk olarak 1940'da Mott ve Gurney tarafından verilmiştir. 1956'da Lampert ve birkaç bilim adamı SCL akım teorisini geliştirmişlerdir [39]. SCL akımı ohmik kontak özelliği taşıyan metal-yarıiletken-metal yapılarda gözlenmektedir. SCL akımının meydana gelmesi için yarıiletkene yeteri kadar taşıyıcının gönderilmesi gerekir.

Metal-yarıiletken-metal yapıya bir dış elektrik alan uygulandığında, alanın etkisiyle serbest yükler tuzaklara yakalanırsa Poisson denklemi,

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{en_0}{\epsilon_0\epsilon_r} \quad (6-10)$$

bağıntısı ile verilir [40,41,42]. Burada;

E, elektrik alan

n_0 , birim hacimdeki serbest taşıyıcı yoğunluğudur.

Akım yoğunluğu J ise,

$$J = e\mu_n n_0 E(x) \quad (6-11)$$

ile ifade edilir. Burada;

μ_n , elektronun mobilitesidir.

Denklem (6-10) ve denklem (6-11) birleştirilerek E elektrik alanı x'e göre çözüldüğünde,

$$E(x) = \left[\frac{2J}{\epsilon_0\epsilon_r\mu_n} \right]^{1/2} x^{1/2} \quad (6-12)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklemden akım yoğunluğu ile voltaj arasında bir ilişki kurulabilir.

$$V(x) = \int_0^d E(x) dx \quad (6-13)$$

$$J = \frac{9}{8} \frac{\mu_n \epsilon_0 \epsilon_r}{d^3} V^2 \quad (6-14)$$

bağıntısı elde edilir. Burada;

d, iki metal kontak arasındaki mesafedir.

Denklem (6-14) Mott ve Gurney square law olarak bilinir[36,40,43,44].

Bu ifade SCL akım yoğunluğu olarak tanımlanırsa,

$$J \approx V^m \quad (6-15)$$

yazılır. Burada, $m=1$ durumunda ohmik iletim ve $m \approx 2$ durumunda ise SCL iletimi beklenir.

Denklem (6-14) yarıiletken materyalde tuzakların olmadığı veya tamamen dolu olduğu durumları tanımlar. Bu tuzakların kaynağı küçük bağlanma enerjisine sahip sığ seviyede bir donör grubu olabilir. Fermi-Dirac istatistiğinden yararlanarak serbest yüklerin tuzaklanmış yüklere oranı,

$$\theta_0 = \frac{N_c}{N_t} \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) \quad (6-16)$$

bağıntısı ile verilir. Burada;

N_c , iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu

N_t , tuzak yoğunluğu

E_t , Yarıiletkenin iletim bandının altındaki tuzak enerji seviyesini göstermektedir.

$\theta_0 \ll 1$ ise, sığ tuzaklar SCL akımını etkileyecektir.

Düşük voltaj uygulandığında ohm kanunu,

$$J = en_0\mu_n \left(\frac{V}{d}\right) \quad (6-17)$$

bağıntısı ile verilir. Uygulanan voltaj artırılırsa, enjekte edilen serbest elektron yoğunluğu artar ve n_0 serbest elektron yoğunluğuna yaklaşır. Ohmik iletimden SCL iletme geçişin olduğu noktada akım yoğunlukları eşit olur. Dolayısıyla,

$$en_0\mu_n \frac{V}{d} = \frac{9}{8} \frac{\mu_n \epsilon_0 \epsilon_r V^2}{d^3} \quad (6-18)$$

ifadesi yazılabilir. Buradan, ohmik iletimden SCL iletme geçiş voltajı V_{tr} ,

$$V_{tr} = \frac{8 en_0 d^2}{9 \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (6-19)$$

bağıntısı ile verilir [36,40].

Denklem (6-16)'un denklem (6-10)'un içine katılmasıyla,

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon_r} n_0 \left[\frac{1}{\frac{N_c}{N_t} \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right)} \right] \quad (6-20)$$

bağıntısı elde edilir. Denklem (6-20) ve denklem (6-11) birlikte çözümlerse,

$$E(x) = \left[\frac{2J}{\mu_n \epsilon_0 \epsilon_r \theta_0} \right]^{1/2} x^{1/2} \quad (6-21)$$

bağıntısı elde edilir. Denklem (6-21), denklem (6-13)'te yerine yazılır ve J akım yoğunluğu cinsinden çözümlerse,

$$J = \frac{9 \epsilon_0 \epsilon_r \mu_n \theta_0}{8 d^3} V^2 \quad (6-22)$$

bağıntısı elde edilir. Burada θ_0 ,

$$\theta_0 = \frac{n}{n + n_t} \quad (6-23)$$

ile verilir. Tuzaksız (trap-free) durum için $n_t=0$ ve $\theta_0=1$ olur. Tuzaklı durumda ise, θ_0 daima 1'den küçüktür [36].

Enjekte edilen serbest taşıyıcı yoğunluğu (n), hacimde oluşturulan serbest taşıyıcı yoğunluğunu (n_0) aşarsa, SCL iletimi baskın olacaktır. Sığ

B-C bölgesinde enjekte edilen serbest taşıyıcıların yoğunluğu hacimde oluşturulan taşıyıcı yoğunluğundan fazladır. A-B bölgesinden B-C bölgesine geçiş voltajı V_{tr} , denklem (6-24) ile verilmektedir. Bu bölgede tuzaklar etkilidir ve serbest taşıyıcılar boş tuzaklar tarafından yakalanmaktadır. Bu bölgede akım V^2 ile değişmektedir.

C-D bölgesinde SCL akımındaki artışla birlikte tuzaklar dolmaya başlar. Uygulanan voltaj öyle bir değere ulaşır ki, bütün tuzaklar doldurulur. Bu bölge tuzak doluluk sınırı (Trap-Filled-Limited) olarak adlandırılır. C-D bölgesinde tuzakların tamamın dolmasına karşılık gelen V_{TFL} voltajında, akım yoğunluğunda $1/\theta_0$ çarpanı kadar keskin bir artış gözlenir.

D-E bölgesinde ise, akım TFL bölgesindeki artıştan sonra, trap-free square law'a uyar. Fermi enerji seviyesi tuzak enerji seviyesine yaklaşır. Tuzaklar tamamen dolduğunda serbest taşıyıcı yük yoğunluğu eN_t 'ye eşittir. Buna göre kontaklar arasında E elektrik alanı uygulandığında ve $N_t \gg n$ durumunda, dx mesafesindeki taşıyıcı yoğunluğu,

$$eN_t = \frac{dE}{dx} \epsilon_r \epsilon_0 \quad (6-26)$$

şeklinde olacaktır. E(x) elektrik alanı ise,

$$E(x) = eN_t x / \epsilon_r \epsilon_0 \quad (6-27)$$

elde edilir. Kontaklar arasındaki mesafe d ise, kontaklar arasındaki geçiş voltajı V_{TFL} ,

$$V_{TFL} = \int_0^d E(x) dx$$

$$V_{TFL} = \frac{eN_t d^2}{2\epsilon_r \epsilon_0} \quad (6-28)$$

bağıntısı ile verilir [40, 44, 45].

Tuzak seviyelerinin exponansiyel dağılımına sahip n-tipi bir yarıiletken için SCL akım-voltaj karakteristiği,

$$J = e\mu_n N_c (\epsilon_r \epsilon_0 / eN_{t(e)})^l V^{l+1} / d^{2l+1} \quad (6-29)$$

ile verilir. Burada;

N_c , iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu

$N_{t(e)}$, exponansiyel dağılımda tuzak seviyelerinin toplam yoğunluğu

$l = T_t / T$

T_t , tuzak dağılımını karakterize eden bir sıcaklık parametresidir.

Exponansiyel tuzak dağılımı $N(E)$ ise,

$$N(E) = \frac{N_{t(e)}}{kT_t} \exp\left(-\frac{E}{kT_t}\right) \quad (6-30)$$

ile verilir. Burada;

$N(E)$, iletim bandının E kadar aşağısında birim enerji bölgesi başına düşen tuzak yoğunluğudur.

Eğer $T_t < T$ ise, dağılımın üstündeki tuzaklar boştur. Bu durumda tuzaklar sığ seviyede olur ve SCL iletimi denklem (6-22) ile verilir [40].

Materyallerin yasak enerji aralığındaki tuzak dağılımı, akım-voltaj karakteristiklerini etkilemektedir. Tuzak enerji seviyeleri derin, yani Fermi enerji seviyesinde ya da Fermi enerji seviyesinden daha aşağıda ise, bu durumda ohmik bölgeden sonra (TFL) trap-filled-limited bölgesi gelir. Tuzakların dolması Fermi enerji seviyesinin iletim bandına yaklaşmasını sağlar. Akım ifadesi trap free (V^2) yasasına uyar.

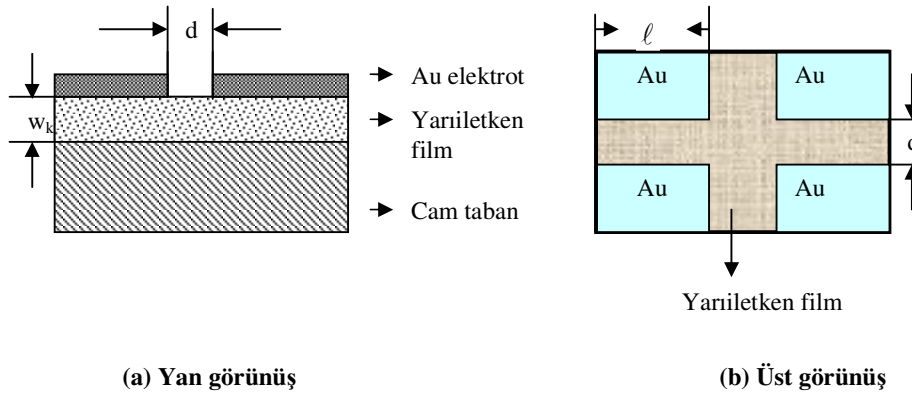
Tuzak enerji seviyelerinin sığ olduğu durumda ise, ohmik bölgeden sonra tuzakların etkisindeki SCL bölgesi gelecektir. Dolayısıyla, quasi-Fermi enerji seviyesi tuzak enerji seviyesi ile çakıştığında, önce akımda keskin bir artış daha sonra trap-free bölgesi gözlenecektir.

Tuzak dağılımı exponansiyel ise, bu durumda ohmik iletim bölgesini, tuzakların dolmaya başladığı SCL iletim bölgesi izler. Voltaja bağımlılık V^m

şeklinde olacaktır ve m değeri 1 ile 2 arasında kalacaktır. Bu bölgeden sonraki bölgede ise tuzakların tamamen dolmasıyla m değeri iki'den daha büyük olacaktır [44].

6.5. $Zn_xCd_{1-x}O$ ve In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ Filmlerinde Metal-Yarıiletken-Metal Yapıların Oluşturulması

Metal-yarıiletken-metal yapıların oluşturulması, yarıiletken materyallerin dc iletkenlik özellikleri hakkında bilgi edinebilmek için gereklidir. Filmler üzerinde metal elektrotlar Şekil 6.6'daki gibi düzlemsel formda, Leybold Heraus 300 Univex model vakumda kimyasal buhar depolama deney setinde yapılmıştır.



Şekil 6.6. Düzlemsel formda oluşturulan metal-yarıiletken-metal yapıların şematik yandan ve üstten gösterimi

Şekil 6.6'da, w_k ; cam taban üzerine kaplanan yarıiletken filmin kalınlığını, d ; elektrotlar arasındaki mesafeyi ve l ; elektrot boyunu göstermektedir.

Metal-yarıiletken-metal yapılar oluşturulurken, iki metal kontak arasında kalan yarıiletken bölge alüminyum folyo ile kapatılmıştır. Açıkta kalan kısımlara vakumda kimyasal buhar depolama tekniği ile, 10^{-5} torr basınçta

2500Å kalınlığında altın elektrot kaplanarak metal-yarıiletken-metal yapılar oluşturulmuştur. Elde edilen metal-yarıiletken-metal yapılarda elektrotlar arası uzaklık d ve elektrot boyu ℓ değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Elde edilen metal-yarıiletken-metal yapılarda d ve ℓ değerleri

Materyal	Taban sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Metal Kontaklar	d (mm)	ℓ (mm)
$x=0$ için $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$	$250\pm^{\circ}\text{C}$	Au-Au	4.2	4.1
$x=0$ için %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$	$250\pm^{\circ}\text{C}$	Au-Au	4.9	4
$x=0.25$ için $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$	$250\pm^{\circ}\text{C}$	Au-Au	4	3.9
$x=0.25$ için %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$	$250\pm^{\circ}\text{C}$	Au-Au	4.5	4.1
$x=0.5$ için $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$	$250\pm^{\circ}\text{C}$	Au-Au	4.1	3.1
$x=0.5$ için %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$	$250\pm^{\circ}\text{C}$	Au-Au	4	3.2
$x=0.75$ için $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$	$250\pm^{\circ}\text{C}$	Au-Au	4.5	4.3
$x=0.75$ için %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$	$250\pm^{\circ}\text{C}$	Au-Au	4	3.9
$x=1$ için $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$	$250\pm^{\circ}\text{C}$	Au-Au	3.9	3.9
$x=1$ için %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$	$250\pm^{\circ}\text{C}$	Au-Au	5	3.1

6.6. Katkısız ve In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ Filmlerinin Akım-Voltaj Karakteristikleri

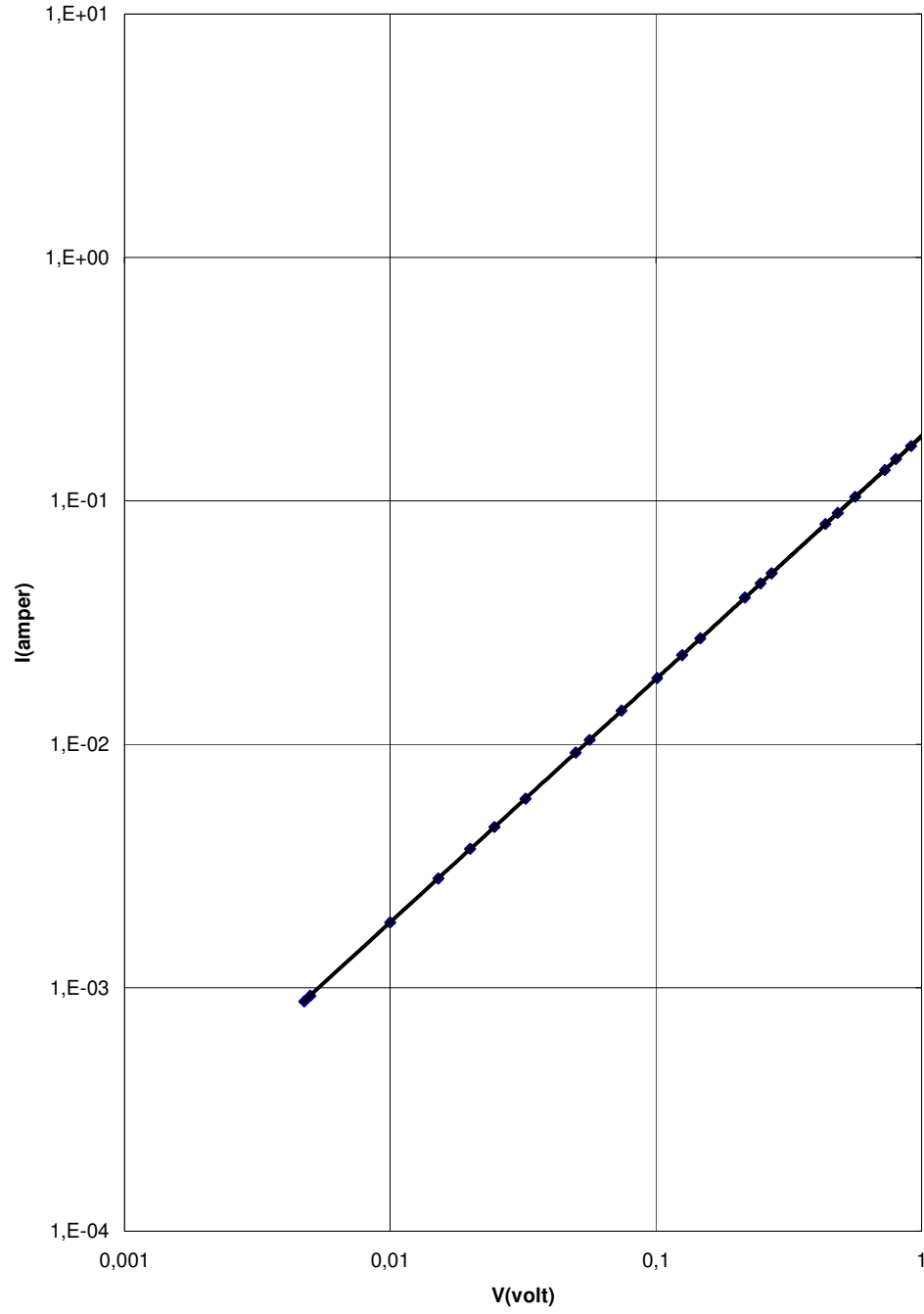
$250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen katkısız ve In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmlerinin oda sıcaklığında akım-voltaj karakteristikleri incelenmiştir. Ölçümler Hewlett Packard 4140 pA meter/DC Voltage Source ölçüm cihazı kullanılarak karanlık ortamda elde edilmiştir. DC Voltaj kaynağının ölçüm aralığı, uygulanan voltaj değerleri için 0.01-100V ve akım değerleri için 10^{-14} - 10^{-2}A arasında değişmektedir.

$250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığındaki katkısız ve In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmleri için oda sıcaklığında elde edilen ölçüm sonuçlarından akım-voltaj değişim grafikleri çizilmiştir (Şekiller 6.7-16). Çizilen akım-voltaj grafiklerinden Au-Au kontaklı filmlerde, akım-voltaj karakteristiklerini belirlemek için I-V grafiklerinin eğimleri bulunmuştur. Şekil 6.7-16'dan da görüldüğü gibi grafiklerin eğimleri $m \approx 1$ 'dir. $I \propto V^m$ 'e göre $m \approx 1$ ise materyalin iletim tipi ohmiktir. Böylece elde edilen filmler ohmik iletim özelliği göstermektedir. Dolayısıyla elde edilen katkısız ve In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmlerinde, iletimi serbest yüklerin oluşturduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle, hesaplar ve yorumlar, materyallerin ohmik iletim özelliği gösterdiği kabul edilerek yapılmıştır.

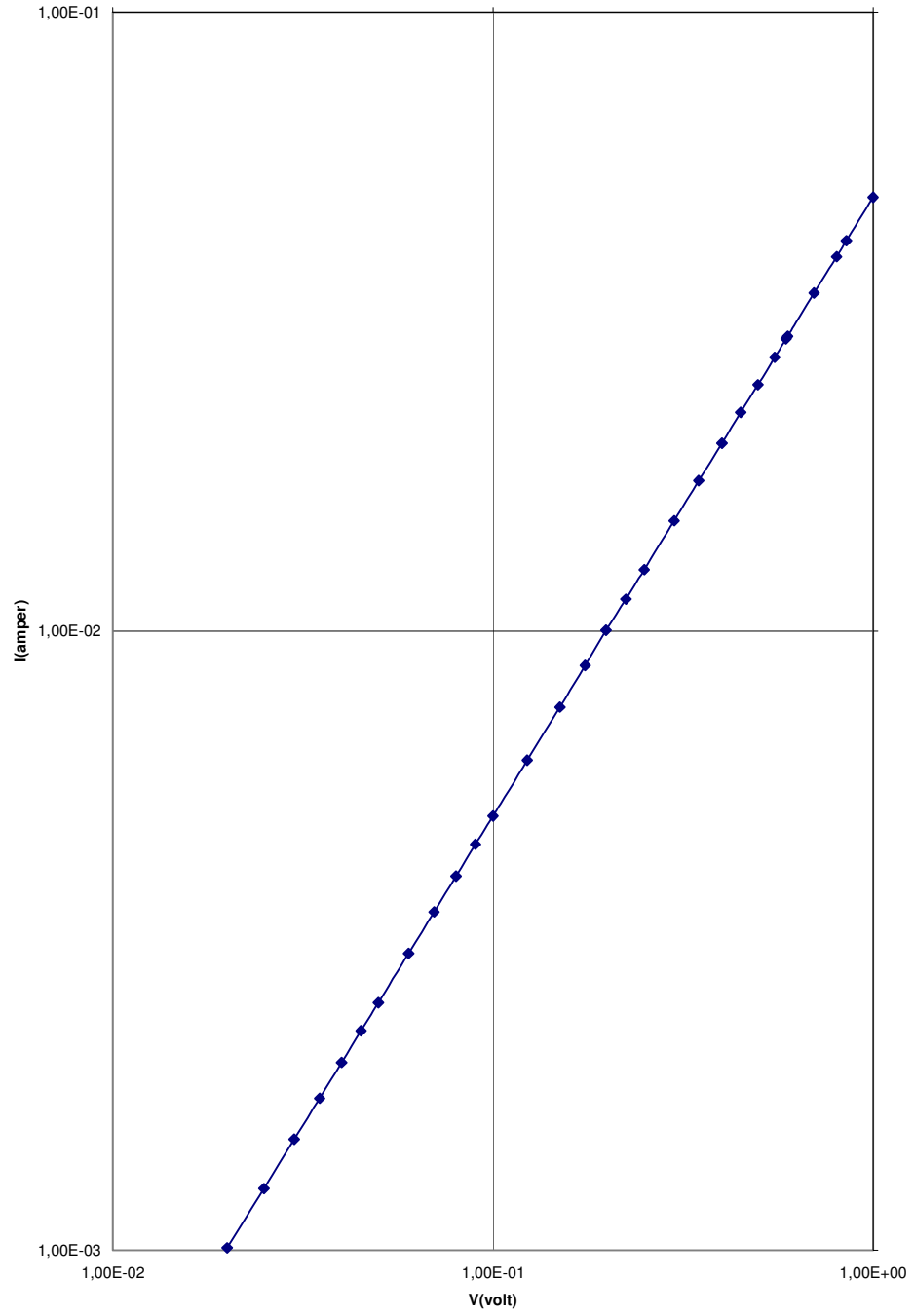
CdO ve ZnO filmler için iletkenlik değerleri uygun katkı ve ısı işlemler sonucunda artırılabilir. Yapılan çeşitli çalışmalarda iletkenlik oda sıcaklığında CdO için 10^{-2} - 10^4 (ohm-cm) $^{-1}$ ve ZnO için 10^{-2} - 10^3 (ohm-cm) $^{-1}$ mertebesinde bulunmuştur [11,27,46,47,48,49,50,51,52-54,55-59]. İletkenlik değerleri, akım-voltaj grafiklerindeki ohmik bölgeden yararlanılarak denklem (2-21)'den hesaplanmıştır. Bulunan değerler Çizelge 6.2'de verilmiştir. ZnO konsantrasyonu arttıkça iletkenlikte azalma gözlenmiştir. In katkısı ise genelde iletkenlikte artışa neden olmuştur.

Çizelge 6.2. $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ ve In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmlerine ait oda sıcaklığındaki iletkenlik değerleri

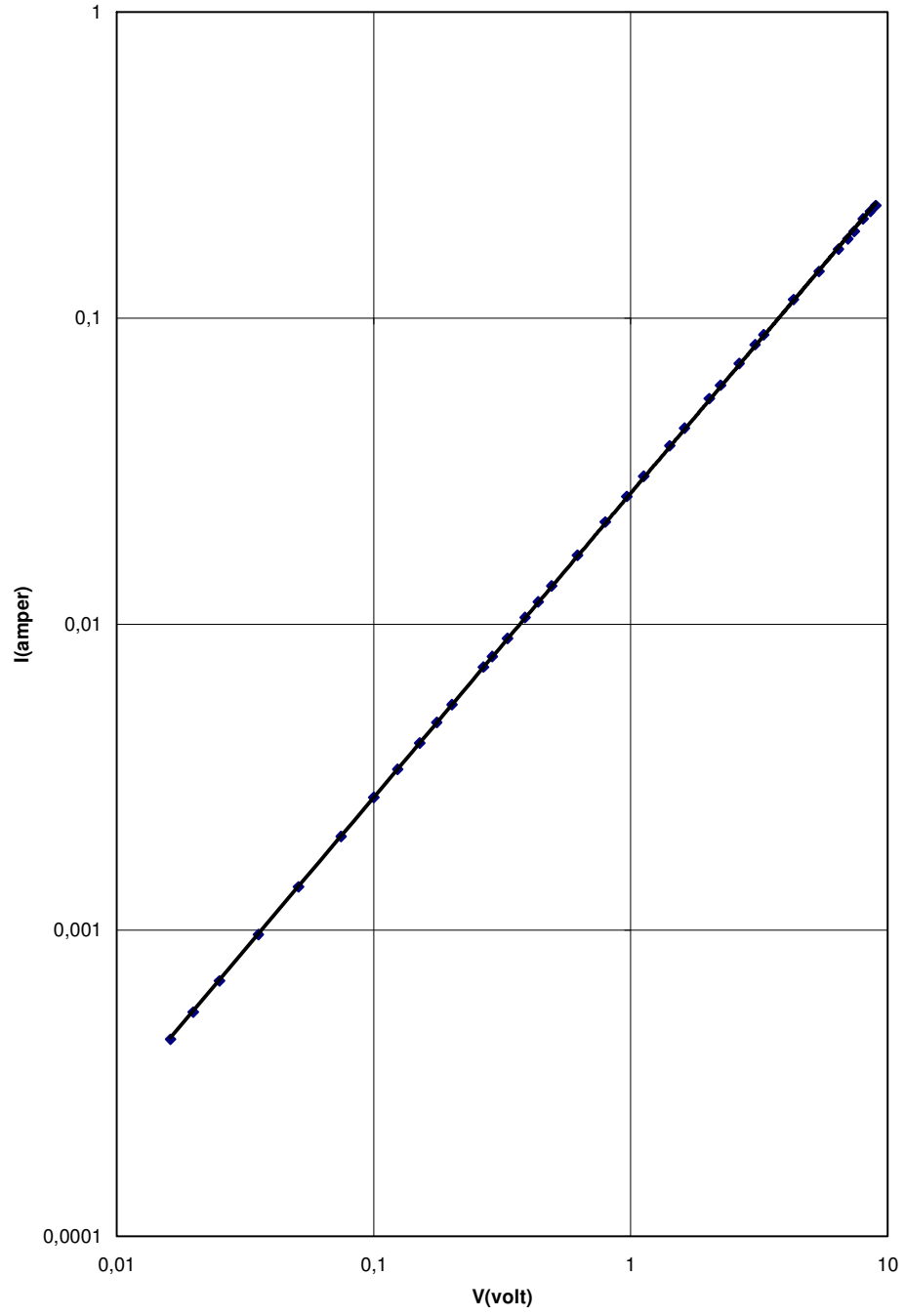
Materyal	σ (ohm-cm) $^{-1}$	
	Katkısız	%1 In Katkılı
Au-CdO-Au	5×10^3	1.2×10^3
Au- $\text{Zn}_{0.25}\text{Cd}_{0.75}\text{O}$	2.7×10^2	6.1×10^2
Au- $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{O}$ -Au	24	32.4
Au- $\text{Zn}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{O}$ -Au	6.1×10^{-3}	3.6×10^{-3}
Au-ZnO-Au	3.7×10^{-6}	4×10^{-3}



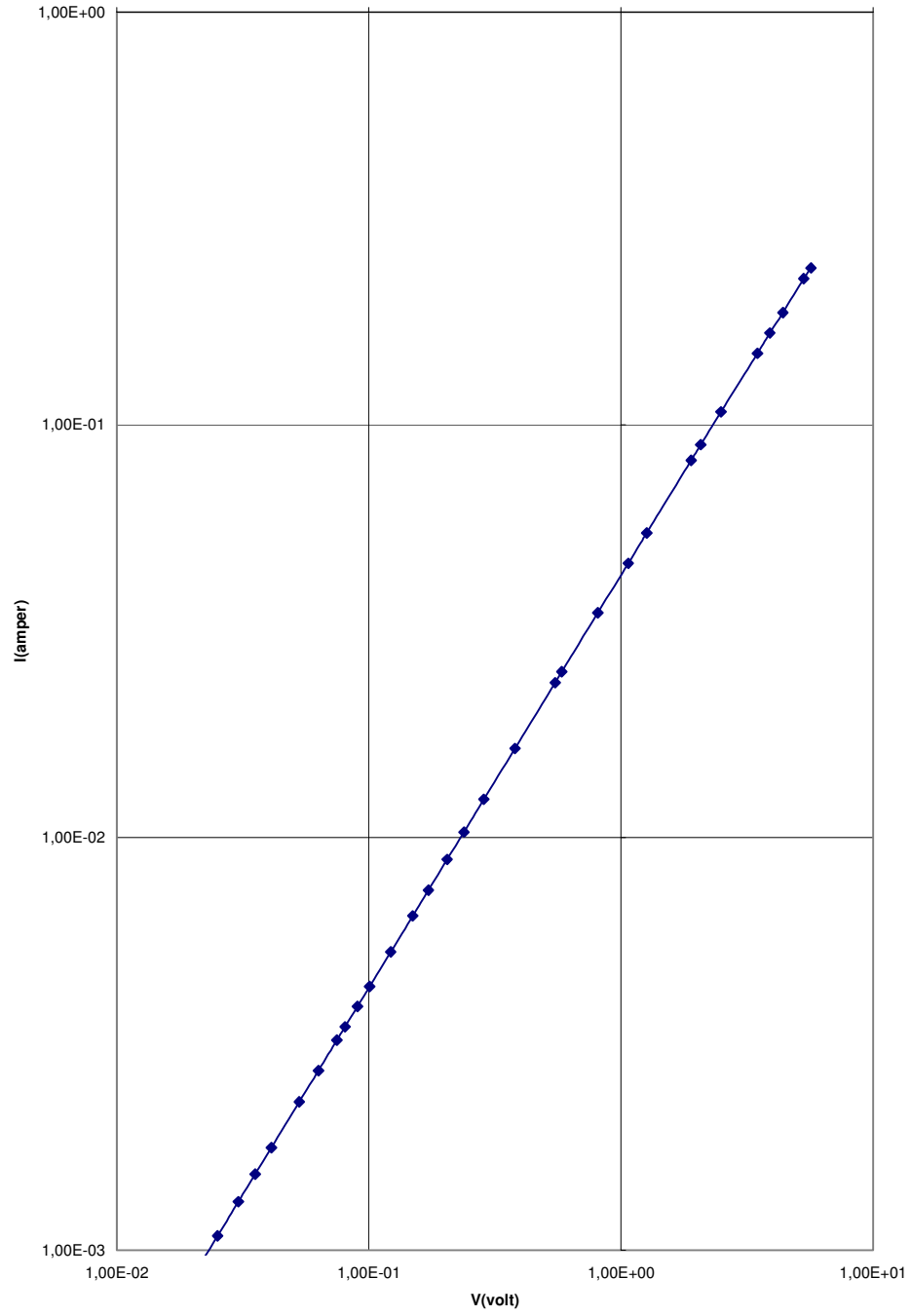
Şekil 6.7. Au-CdO-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi



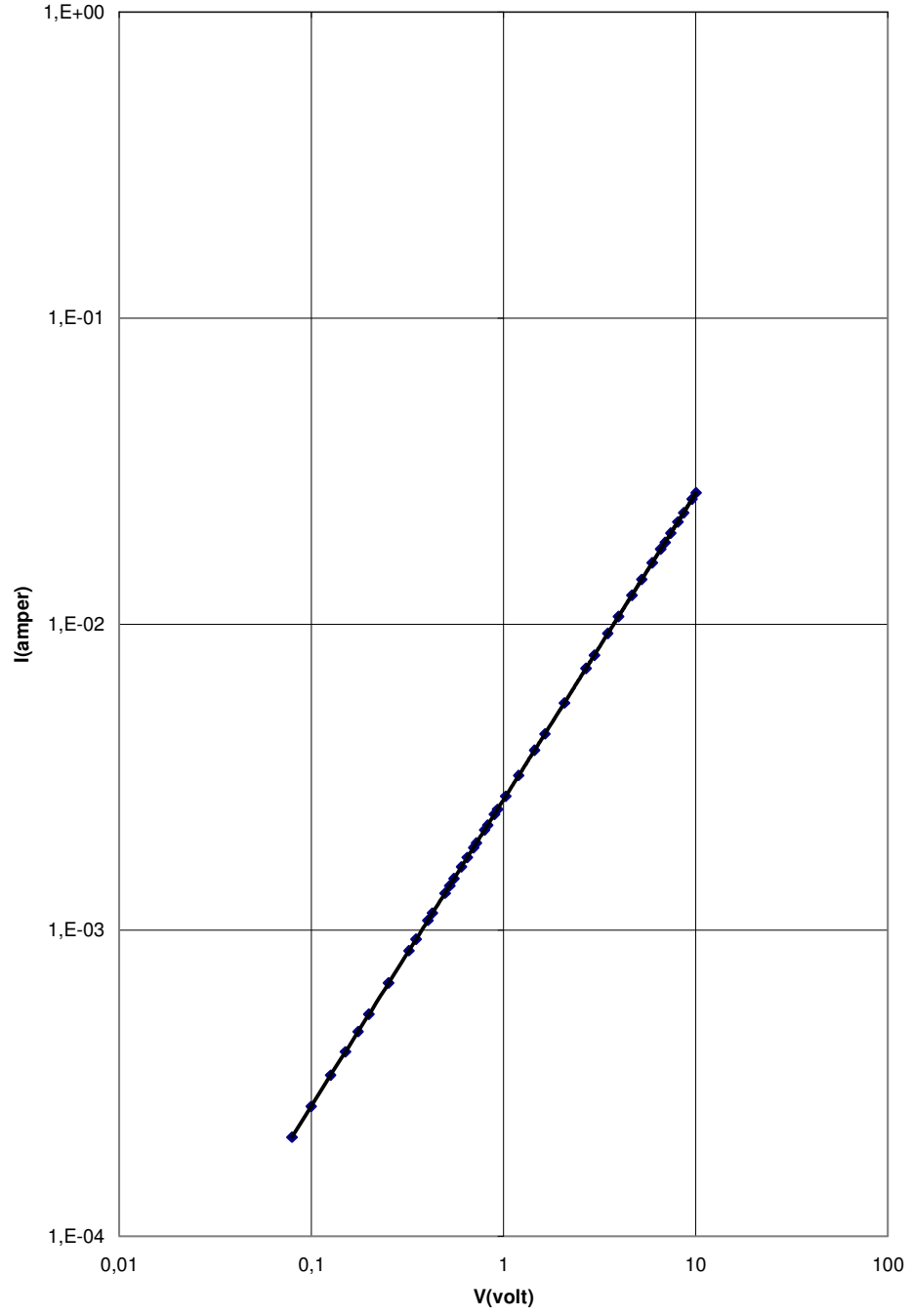
Şekil 6.8. %1 In katkılı Au-CdO:In-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi



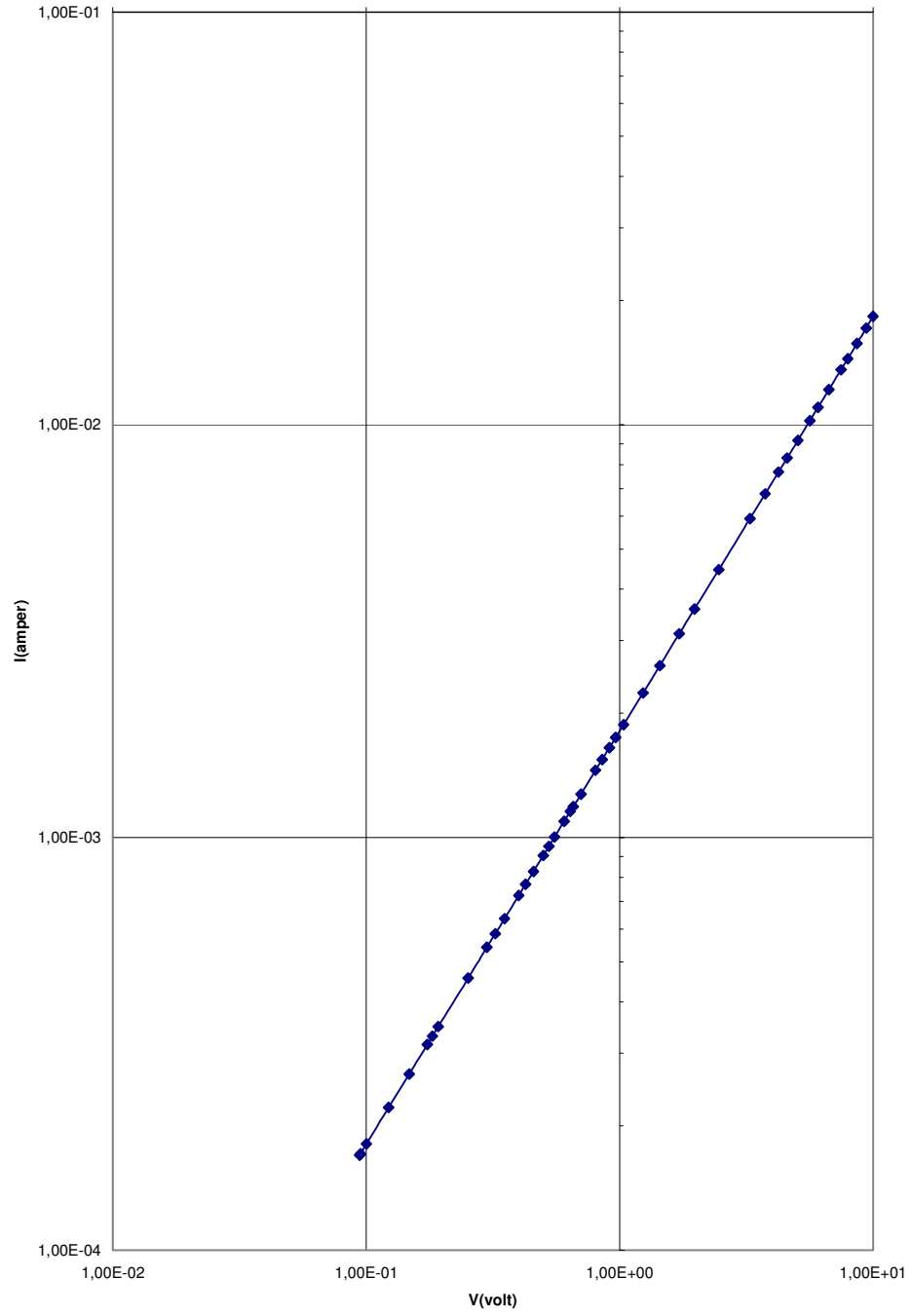
Şekil 6.9. Au-Zn_{0.25}Cd_{0.75}O-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi



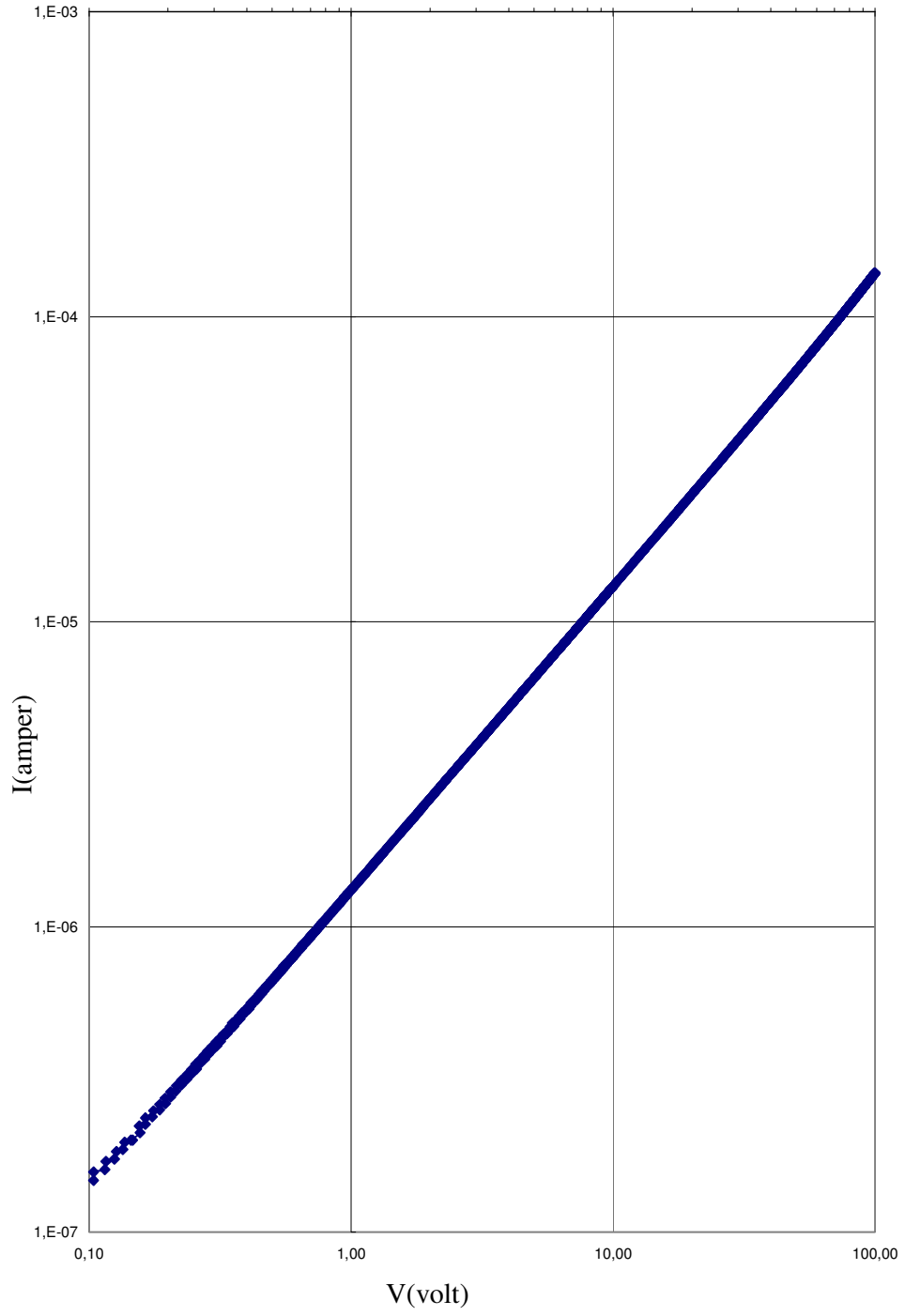
Şekil 6.10. %1 In katkılı Au-Zn_{0.25}Cd_{0.75}O:In-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi



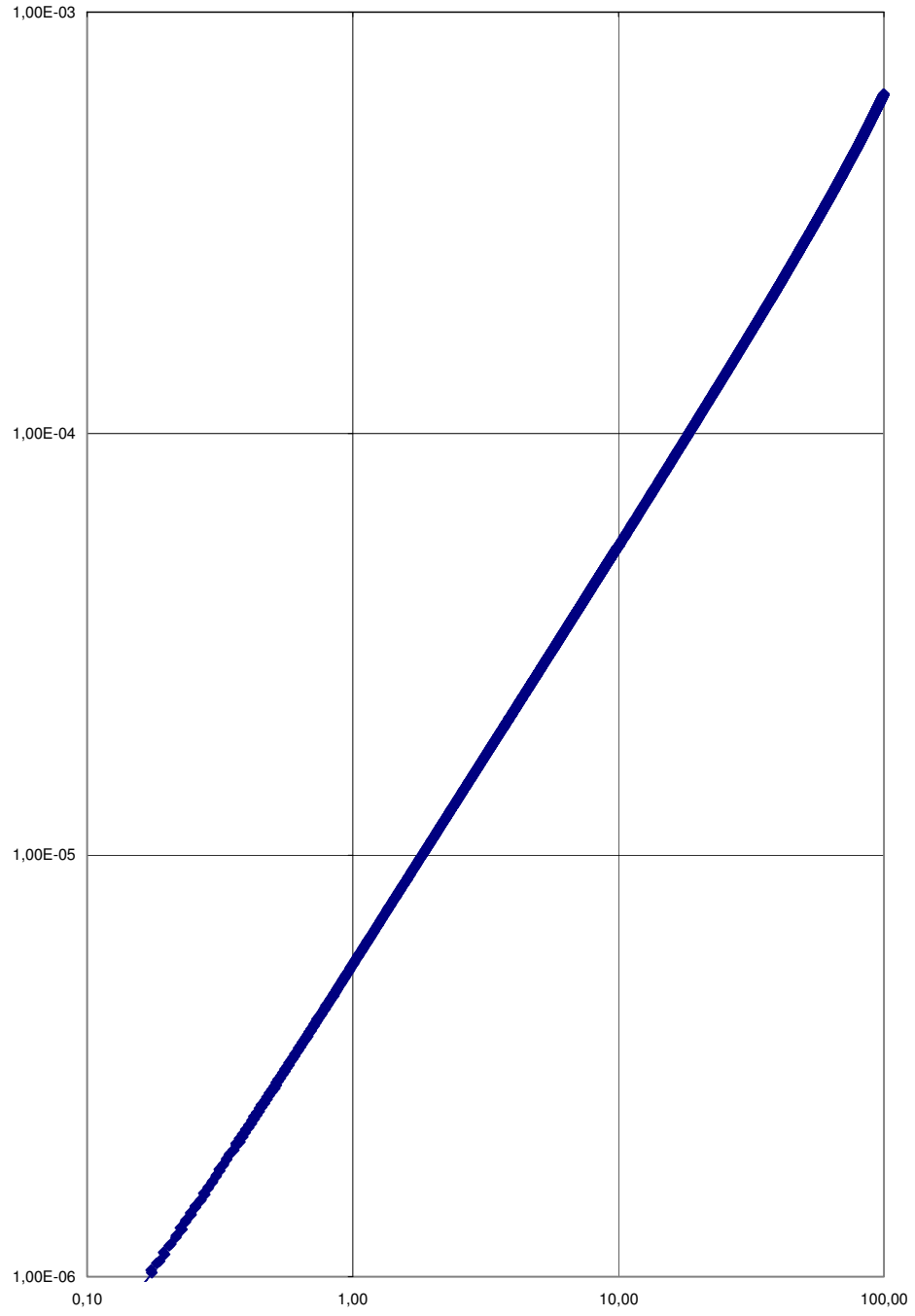
Şekil 6.11. Au-Zn_{0.5}Cd_{0.5}O-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi



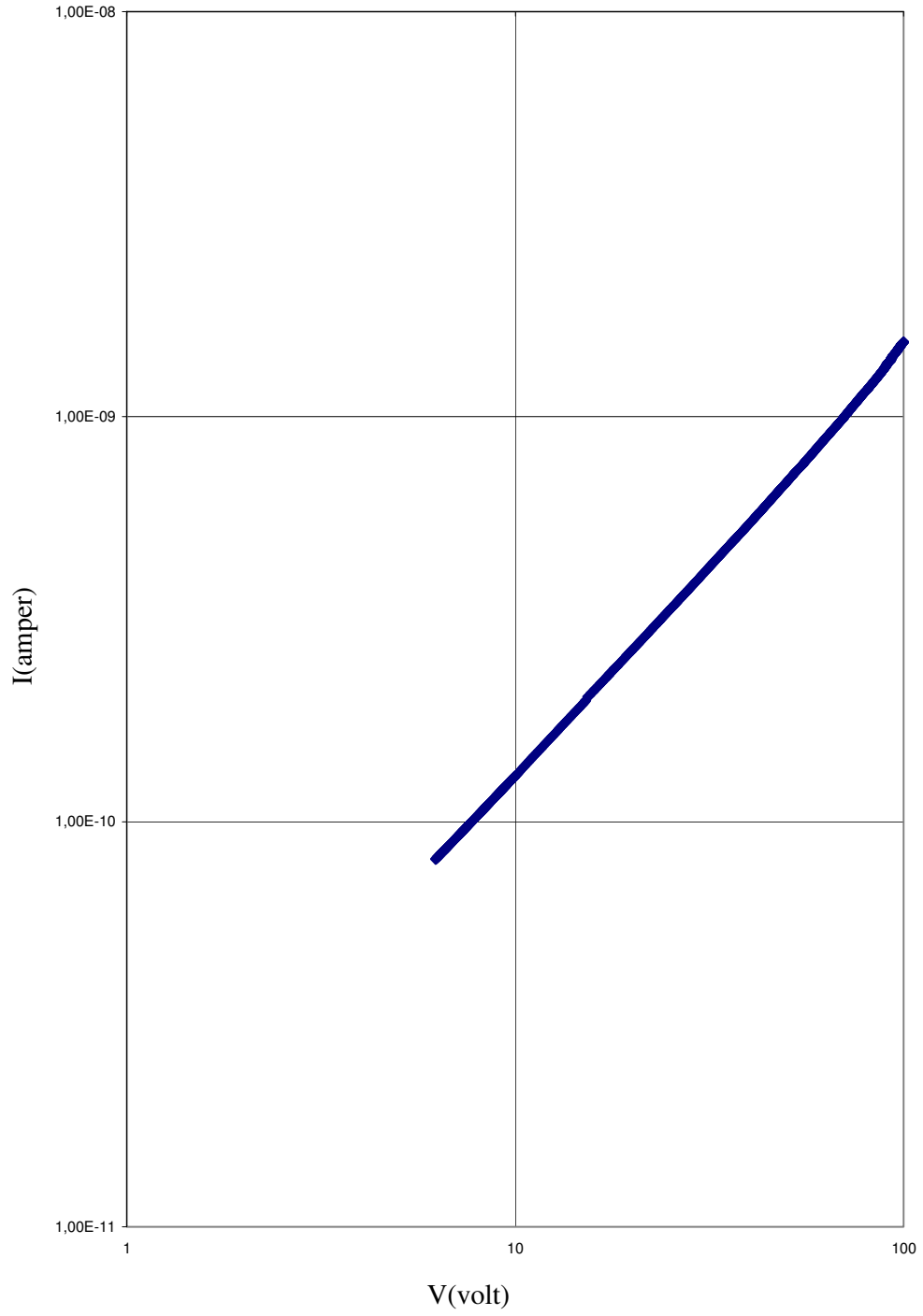
Şekil 6.12. %1 In katkılı Au-Zn_{0.5}Cd_{0.5}O:In-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi



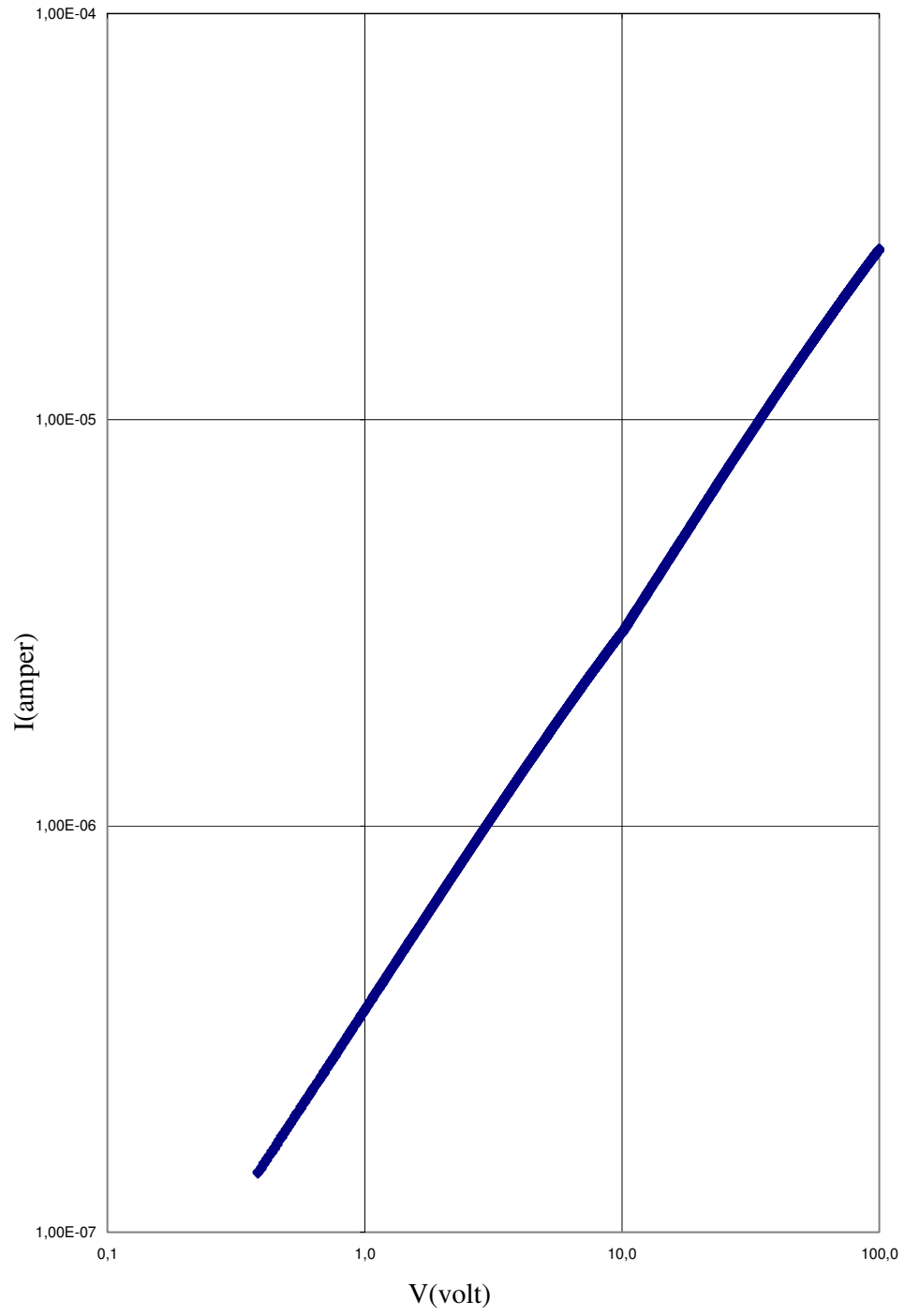
Şekil 6.13. Au-Zn_{0.75}Cd_{0.25}O-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi



Şekil 6.14. %1 In katılı Au-Zn_{0.75}Cd_{0.25}O:In-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi



Şekil 6.15. Au-ZnO-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi



Şekil 6.16. %1 In katkılı Au-ZnO-Au filmine ait oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi

7. SONUÇ

Bu çalışmada, püskürtme yöntemi kullanılarak $250\pm 5^{\circ}\text{C}$ taban sıcaklığında katkısız ve %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmleri elde edilmiştir. Elde edilen filmlerin elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir.

Katkısız ve %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmlerinin x-ışını kırınım desenlerinden, elde edilen filmlerin polikristal olduğu, kübik (sphalerite) veya heksagonal (wurtzite) yapıda oldukları belirlenmiştir. Taban sıcaklığı ve başlangıç çözeltisinin konsantrasyonu elde edilen filmlerin yapısında önemli bir etkiye sahiptir. $x=0$ için $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmde sadece kübik faz görülmüştür ve (2 0 0) piki en şiddetli piktir. %1 In katkılanması ile (1 1 1) pikinin şiddeti artarken (2 0 0) pikinin şiddetinde azalma gözlenmiştir. $x=0.25$ için elde edilen katkısız ve %1 In katkılı filmlerde yine baskın olarak CdO pikleri gözlenmektedir. Ancak bu filmler için elde edilen x-ışını kırınım deseninde ZnO piklerinin belirginleşmeye başladığı da gözlenmiştir. $x=0.5$ için elde edilen katkısız ve %1 In katkılı filmlerde yine CdO pikleri baskın olarak gözlenmiştir. ZnO katkısının artmasıyla CdO piklerinin şiddetinde azalma belirlenmiştir. $x=0.75$ için elde edilen katkısız ve %1 In katkılı filmlerde CdO piklerinden sadece (1 1 1), (2 0 0) ve (2 2 0) gözlenmiştir. Ancak bu piklerin şiddetleri çok düşüktür. ZnO piklerinin şiddetleri ise biraz artmıştır. Ancak bu pikler keskin ve şiddetli olarak gözlenmemiştir. Son olarak $x=1$ için elde edilen katkısız ve %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmlerinde sadece ZnO pikleri gözlenmiştir. En şiddetli pik (101) pikidir. In katkısı ile piklerin şiddetinde azalma gözlenmiştir.

%1 In katkılı filmlerde pikler sola doğru çok az da olsa kayma göstermiştir. Bunun nedeninin bileşikler içerisindeki In'dan kaynaklandığı ve büyük çaplı olan In atomlarının katkılanmasıyla düzlemler arası mesafenin de artmasının küçük açılara kayma ile sonuçlanacağı düşünülmektedir.

$\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmlerinin kalınlıkları tartı yöntemiyle bulunmuş ve kalınlıklarının $0.47-1.71\mu\text{m}$ arasında olduğu saptanmıştır. Elde edilen filmlerin, sıcak uç yöntemi ile n-tipi iletim özelliği gösterdiği belirlenmiştir.

Katkısız ve %1 In katkılı $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ filmlerinin oda sıcaklığında elde edilen absorpsiyon spektrumlarından yararlanılarak $(\alpha hv)^2 \approx (hv)$ değişimleri

Çizilmiş ve filmlerin direkt bant geçişli oldukları belirlenmiştir. Bu grafiklerden yararlanarak katkısız ve %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin yasak enerji aralıklarının 2.25-3.3eV arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar literatür ile uyumludur [60,62,63,65-75].

Elde edilen filmlere In katkılanması bu filmlerin yasak enerji aralıklarında genelde artışa neden olmuştur.

Katkısız ve %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin dc iletkenlik özelliklerini belirleyebilmek için, düzlemsel formda metal-yarıiletken-metal yapılar oluşturulmuştur. Bu yapıları oluşturmak için, kontak metali olarak altın (Au) kullanılmıştır. Kontak metaller, yarıiletken film üzerinde düzlemsel formda buharlaştırılmışlardır. Kullanılan kontak materyalinin dc elektriksel ölçümlere bir etkisi olmamıştır.

Düzlemsel formda oluşturulan Au-Au kontaklı $Zn_xCd_{1-x}O$ ve %1 In katkılı $Zn_xCd_{1-x}O$ filmlerinin akım-voltaj grafikleri çizilmiştir. Çizilen akım-voltaj grafiklerinden filmlerin ohmik iletim özelliği gösterdiği saptanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Zor, M., *Spray-Pyrolysis ile Elde Edilen AgInS₂ Bileşiminin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Doçentlik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye (1982).
- [2] Kul, M., *Cd(In₂S₃)S Yariletken Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye (1996).
- [3] Peker, D., *CuAl_xIn_{1-x}S₂ Yariletken Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye (1999).
- [4] Köse, S., *Spray Pyrolysis Metodu ile Elde Edilen Cd_{1-x}Zn_xS Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye (1993).
- [5] Gandarilla, F.C., Acevedo, A.M., Vicil, O., Garduno, M.H., Vaillant, L. ve Puente, G.C., *Micro Structural Characterization of Annealed Cadmium-Zinc Oxide Thin Films Obtained by Spray Pyrolysis*, Materials Chemistry and Physics, **78**, 840-846 (2002)
- [6] Çağlar, M., *Püskürtme Yöntemiyle Elde Edilen In Katkılı ZnO Filmlerinin DC ve Optik Özellikleri*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye (2002).
- [7] Jain, M., *II-VI Semiconductor Compounds*, World Scientific Publishing Co., Singapore (1993).
- [8] Sze, S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley International Edition, New York (1981).
- [9] Nag, B.R., *Electron Transport in Compound Semiconductors*, Springer Verlag, New York (1980).
- [10] Fahrenbruch, A.L., *II-VI Compounds in Solar Conversion*, J. Crystal Growth, **39**, 73-91 (1977).
- [11] Reddy, K.T.R., Shanthini, G.M., Johnston, D. ve Miles, R.W., *Highly Transparent and Conducting CdO Films Grown by Spray Pyrolysis*, Thin Solid Films, **427**, 397-400 (2003).

- [12] Sadao, A., *Optical Properties of Crystalline and Amorphous Semiconductors Materials and Fundamental Principles*
- [13] Omar, M.A., *Elementary Solid State Physics*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Menlo Park, California (1975).
- [14] Durlu, T.N., *Katthal Fiziğine Giriş*, Bilim Yayınları, Ankara (1992)
- [15] Pankove, J.I., *Optical Processes in Semiconductor*, Princeton Pres., New Jersey (1971).
- [16] Mc Kelvey, J.P., *Solid State and Semiconductor Physics*, Harper and Row Pres., New York (1966).
- [17] Streetman, B.G., *Solid State electronic Devices*, Prentice Hall Int., Englewood Cliffs, New Jersey (1980).
- [18] Neamen, D.A., *Semiconductor Physics and Devices*, Irwin Book Team (1997).
- [19] Allison, J., *Electronic Engineering Semiconductors and Devices*, Mc Graw-Hill Book Company, London (1990).
- [20] Pierret, R.F., *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison-Wesley Publishing Co., New York (1996).
- [21] Kittel, C., *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley and Sons. Inc., New York (1986).
- [22] Bar-Lev, A., *Semiconductor and Electronic Device*, Prentice- Hall International London (1984).
- [23] Bhosale, C.H., Kambale, A.V., Kokate, A.V. ve Rajpure, K.Y., *Structural, Optical and Electrical Properties of Chemically Sprayed CdO Thin Films*, Materials Science and Engineering B 122 67-71 (2005).
- [24] Gurumurugan, K., Mangalaraj, D., Narayandass, SA.K., Nakanishi, Y. ve Hatanaka, Y., *Composition Studies on CdO Thin Films Formed by Spray Pyrolysis and Sputtering*, Applied Surface Science 113/114 422-425 (1997).
- [25] Iwata, K., Tampo, H., Yamada A., Fons, P., Matsubara, K., Sakurai, K., Ishizuka, S. ve Niki, S., *Growth of ZnO and Device Applications*, Applied Surface Science 244 504-510 (2005).

- [26] Vigil, O., Vaillant, L., Cruz., F., Santana, G., Morales-Acevedo, A. ve Contreras-Puente, G., *Spray Pyrolysis Deposition of Cadmium-Zinc Oxide Thin Films*, Thin Solid Films **361-362** 53-55 (2000).
- [27] Oktik, S., Russell, G.J. ve Brinkman, A.W., *Properties of ZnO Layers Deposited by "photo-assisted" Spray Pyrolysis*, Jurnal of Crystal Growth, **159** 195-199 (1996).
- [28] Messaouidi, C., Sayah, D. ve Lefdil, M.A., *Transparent Conducting Undoped and Indium Doped Zinc Oxide Film Prepared by Spray Pyrolysis*, Phys. Stat. Sol. (a), **151**, 93-97 (1995).
- [29] Tran, N.H., Hartman, J. ve Lamb, R.N., *Structural Order of Nanocrystalline ZnO Films*, J. Phys. Chem.B, **103**, 4264-4268 (1999).
- [30] Aybek, A.Ş., *Zn(In₂S₃)S Yariletken Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye (1996).
- [31] Siefert, W., *Properties of Thin In₂O₃ and SnO₂ Films Prepared by Corona Spray- Pyrolysis and a Discussion of the Spray Pyrolysis Process*, Thin Solid Films, **121**, 275-282 (1984).
- [32] Blakemore, J.S., *Solid State Physics*, Cambridge University Press., Cambridge (1985).
- [33] Vigil, O., Cruz,F., Morales-Acevedo, A., Contreras-Puente, G., Vaillant, L. ve Santana, G., *Structural and Optical Properties of Annealed CdO Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis*, Materials Chemistry and Physics, **68** 249-252 (2001).
- [34] Mott, N.F. ve Davis, E.A., *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*, Clarendon Pres, London (1971).
- [35] Bube, R.H., *Photoconductivity of Solids*, John Wiley nd Sons. Inc., London (1970).
- [36] Kao, K.C. ve Hwang, W., *Electrical Transport in Solids*, Pergamon Pres, Manitoba, Canada (1979).
- [37] Hogarth, C.A. ve Zor, M., *Observations of the Anomalous Poole-Frenkel Effect in Al- Polyethylene-Al Thin Film Structures*, Phys. Stat. Sol.(a), **98**, 611-616 (1986).

- [38] Simmons, J.G., *Poole-Frenkel and Schottky Effect in Metal-Insulator-Metal Systems*, Phys. Rev., **155** 657-660 (1967).
- [39] Murgatroyd, P.N., *Theory of Space-Limited Current Enhanced by Frenkel Effect*, J. Phys.D Appl. Phys. **3** 151-156 (1970).
- [40] Lampert, M.A. ve Mark, P., *Current Injection in Solids*, Academic Pres, New York (1970).
- [41] Solymar,L. ve Walsh, D., *Lectures on the Electrical Properties of Matrerials*, Oxford (1970).
- [42] Martin,T.L. ve Leonard,W.F., *Electrons and Crystals*, Brooks/Cole Publishing Company New York (1970).
- [43] Mott, N.F. ve Gurney, R.W., *Electronic Processes in Ionic Crystals*, Oxford University Pres., London (1940).
- [44] Zor, M. ve Hogarth, C.A., *High-Field Electrical Conduction in Thin Films of Polyethylene*, Phys. Stat. Sol. (a), **99** 513-519 (1987).
- [45] Buget, U., *Metal Semiconductor Contacts and Related Phenomena*, University of Gaziantep, Gaziantep, Turkey (1992).
- [46] Addonizi O, M.L., Antonaia, A., Cantele, G. ve Privato, C.,*Transport Mechanisms of RF Sputtered A- Doped ZnO Films by H₂ Process Gas Dilution*, Thin Solid Films, **349** 93-99 (1999).
- [47] Sanchez-Juarez, A., Tiburcio-Silver, A., Ortiz, A., Zironi, E.P. ve Ripkards, J., *Electrical and Optical roperties of Fluorine-Doped ZnO Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis*, Thin Solid Films, **333** 196-202 (1998).
- [48] Goyal, D.J., Agashe, C., Takwale, M.G., Marathe, B.R. ve Bhide, V.G., *Development of Transparent and Conductive ZnO Films by Spray Pyrolysis*, Journal of Materials Science, **27** 4705-4708 (1992).
- [49] Major, S., Banerjee, A. ve Chorpa, K.L., *Highly Transparent and Conducting Indium-Doped Zinc Oxide Films by Spray Pyrolysis*, Thin Solid Films, **108** 333-340 (1983).
- [50] Gould, R.D. ve Carter, B.A., *Electrical Conduction and Trapping Distributions in ZnO and ZnO-Sn Composite Varistors*, J. Phys. D:Appl. Phys., **16** L201-L206 (1983).

- [51] Ambia, M.G., Islam, M.N. ve Obaidulhakim, M., *The Effects of Deposition Variables on the Spray Pyrolysis of ZnO thin Film*, Journal of Materials Science, **29** 6575-6580 (1994).
- [52] Nunes, P., Fortunato, E. ve Martins, R., *Influence of the Post-Treatment on the Properties of ZnO Thin Films*, Thin Solid Films, **383** 277-280 (2001).
- [53] Nunes, P., Fortunato, E., Tonello, P., Fernandes, F.B., Vilarinho, P. ve Martins, R., *Effects of Different Dopant Elements on the Properties of ZnO Thin Films*, Vacuum, **64** 2781-2785 (2002).
- [54] Nunes, P., Fortunato, E. ve Martins, R., *Influence of the Annealing Conditions on the Properties Of ZnO Thin Films*, International Journal of Inorganic Materials, **3**, 1211-1213 (2001)
- [55] Weibenrieder, K.S. ve Muller, J., *Conductivity Model for Sputtered ZnO-Thin Film Gas Sensors*, Thin Solid Films, **300**, 30-41 (1997)
- [56] Ghosh, S., Sakkar, A., Chaudhuri, S. ve Pal, A.K., *Grain Boundary Scattering in Aluminium-Doped ZnO Films*, **205**, 64-68 (1991).
- [57] Aktaruzzaman, A.F., Sharma, L. ve Malhotra, L.K., *Electrical, Optical and Annealing Characteristics of ZnO:Al Films Prepared by Spray Pyrolysis*, Thin Solid Films, **198**, 67-74 (1991)
- [58] Major, S., Banerjee, A. ve Chorpa, K.L., *Optical and Electronic Properties of Zinc Oxide Films Prepared by Spray Pyrolysis*, Thin Solid Films, **125**, 179-185 (1985)
- [59] Olvera, M.L., Maldonado, A., Asomoza, R., Solorza, O. ve Acosta, D.R., *Characteristics of ZnO:F Thin Films Obtained by Chemical Spray Effect of the Molarity and the Doping Concentration*, Thin Solid Films, **394**, 242-249 (2001)
- [60] Tabet-Derraz, H., Benramdane, N., Nacer, D., Bouzidi, A. ve Medles, M., *Investigations of $Zn_xCd_{1-x}O$ Thin Films Obtained by Spray Prolysis*, Solar Energy Materials and Solar Cells, **73**, 249-259 (2002).
- [61] Chopra, K.L. ve Ranjan Das, S., *Thin Film Solar Cells*, Plenum Press, New York (1993).

- [62] Ma, D, Huang, J., Ye, Z., Wang, L. ve Zhao, B., *Relationship between Photoluminescence and Structural Properties of Sputtered Zn_{1-x}Cd_xO Films on Si Substrates*, *Optical Materials*, **25**, 367-371 (2004).
- [63] Yu, Y.S., Kim, G.Y., Min, B.H. ve Kim, S.C., *Optical Characteristics of Ge Doped ZnO Compound*, *Journal of the European Ceramic Society*, **24**, 1865-1868 (2004)
- [64] Kawamura, K., Maekawa, K., Yanagi, A., HIRANO, M., HOSONO, H., *Observation of Carrier Dynamics in CdO Thin Films by Exciton with Femtosecond Laser Pulse*, **445**, 182-185 (2003)
- [65] Ma, D.W., Ye, Z.Z, Huang, J.Y., Zhu, L.P., Zhao, B.H. ve He, J.H., *Effect of Post-Annealing Treatments on the Properties of Zn_xCd_{1-x}O Films on Glass Substrates*, *Materials Science and Engineering B*, **111**, 9-13 (2004)
- [66] Vigil, O, Cruz, F., Santana, G., Vaillant, L., Morales-Acevedo, A. ve Contreras-Puente, G., *Influence of Post-Thermal Annealing on the Properties of Sprayed Cadmium-Zinc Oxide Thin Films*, *Applied Surface Science*, **161**, 27-34 (2000)
- [67] Maity, R. ve Chattopadhyay, K.K., *Synthesis and characterization of Aluminum-Doped CdO Thin Films by Sol-Gel Process*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **90**, 597-606 (2006)
- [68] Ghosh, P.K., Maity, R. ve Chattopadhyay, K.K., *Electrical and Optical Properties of Highly Conducting CdO:F Thin Film Deposited by Sol-Gel Dip Coating Technique*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **81**, 279-289 (2004)
- [69] Lokhande, B.J., Patil, P.S. ve Uplane, M.D., *Studies on Cadmium Oxide Sprayed Thin Films Deposited Through Non-Aqueous Medium*, *Materials Chemistry and Physics*, **84**, 238-242 (2004)
- [70] Jayakrishnan, R. ve HODES, G., *Non-Aqueous Electrodeposition of ZnO and CdO Films*, *Thin Solid Films*, **440**, 19-25 (2003)
- [71] Ma, D., Ye, Z., Wang, L., Huang, J. ve Zhao, B., *Deposition and Characteristics of CdO Films with Absolutely (200)-Preferred Orientation*, *Materials Letters*, **58**, 128-131 (2003)

- [72] Mason, T.O., Kammler, D.R., Ingram, B.J., Gonzalez, G.B., Young, D.L. ve Coutts, T.J., *Key Structural and Defect Chemical Aspects of Cd-In-Sn-O Transparent Conducting Oxides*, *Thin Solid Films*, **445**, 186-192 (2003)
- [73] Ayouchi, R., Leinen, D., Martin, F., Gabas, M., Dalchiale, E. ve Ramos-Barrado, J.R., *Preparation and Characterization of Transparent ZnO Thin Films Obtained by Spray Pyrolysis*, *Thin Solid Films*, **426**, 68-77 (2003)
- [74] Castaneda, L., Garcia-Valenzuela, A., Zironi, E.P., Canetas-Ortega, J., Terrones, M. ve Maldonado, A., *Formation of Indium-Doped Zinc Oxide Thin Films Using Chemical Spray Techniques: The Importance of Acetic Acid Content in the Aerosol Solution and Substrate Temperature for Enhancing Electrical Transport*, *Thin Solid Films*, **503**, 212-218 (2006)
- [75] Machado, G., Guerra, D.N., Leinen, D., Ramos-Barrado, J.R., Marotti, R.E. ve Dalchiale, E.A., *Indium Doped Zinc Oxide Thin Films Obtained by Electrodeposition*, *Thin Solid Films*, **490**, 124-131 (2005)