

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

**SPRAY PYROLYSIS YÖNTEMİ İLE
ELDE EDİLEN In KATKILI CdZnS
FİLMLERİNİN ÖZELLİKLERİ**

Saliha ILICAN
Doktora Tezi

109798

Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı




Nisan-2001

Bu Tez Çalışması Devlet Planlama Teşkilatı Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: 97 K 120390


JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Saliha ILICAN' ın "SPRAY PYROLYSIS YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN In KATKILI CdZnS FİLMLEİNİN ÖZELLİKLERİ" başlıklı, Fizik Anabilim Dalındaki, Doktora tezi 4 Mayıs 2001 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Muhsin ZOR	
Üye	: Prof. M. Selami KILIÇKAYA	
Üye	: Yard. Doç. Dr. Metin KUL	

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
09.05.2001...tarih ve15/1.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Osman ÖZER
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

SPRAY PYROLYSIS YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN In KATKILI CdZnS FİMLERİNİN ÖZELLİKLERİ

SALİHA ILICAN

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin ZOR

2001

Spray-pyrolysis yöntemi ile 250, 275 ve 300°C taban sıcaklıklarında elde edilen In katkılı CdZnS filmlerinin elektriksel ve optiksel özellikleri incelenmiştir. X-ışını kırınım desenlerinden, elde edilen filmlerin hegzagonal $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ yapıda oldukları saptanmıştır. In katkısı arttıkça, piklerin küçük açılara kaydığı görülmüştür. Absorpsiyon spektrumu ölçümlerinden filmlerin direkt bant geçişli olduğu ve yasak enerji aralıklarının 2.72eV ile 3.04eV arasında değiştiği belirlenmiştir. Bütün filmler n-tipi iletkenlik göstermektedir. Oda sıcaklığındaki I-V ölçümleri iki farklı space-charge-limited iletim mekanizması göstermektedir. Bunlar ohmik bölgenin V^2 bölgesi tarafından ya da trap-filled-limited (TFL) bölgesi tarafından takip edilmesidir. İlki sığ tuzaklı durumu, ikincisi In katkısının artmasının sebep olduğu derin tuzaklı durumu göstermektedir. Filmlerin elektriksel iletkenlikleri (σ) 3×10^{-9} - $7 \times 10^{-7}(\text{ohmcm})^{-1}$ arasında, serbest taşıyıcı yoğunluğu (n_0) 2.5×10^9 - $4.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ arasındadır. Akım-sıcaklık karakteristiğinden 181-247K, 247-300K ve 300-320K sıcaklık bölgelerinde aktivasyon enerjileri sırası ile 0.017-0.059eV, 0.237-0.296eV ve 0.558-0.591eV olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bileşik Yarıiletkenler, Spray-Pyrolysis, Space-Charge-Limited İletim, Sığ ve Derin Tuzaklar, Aktivasyon Enerjisi

ABSTRACT**Ph.D. Thesis****THE PROPERTIES OF In DOPED CdZnS FILMS
PRODUCED BY THE SPRAY-PYROLYSIS METHOD****SALIHA ILICAN****Anadolu University****Graduate School of Natural and Applied Sciences****Physics Program****Supervisor: Prof. Dr. Muhsin ZOR****2001**

In doped CdZnS films have been produced by the spray-pyrolysis method at 250, 275, and 300°C substrate temperatures, and their electrical and optical properties have been investigated. X-ray diffraction spectra of the films showed that they are hexagonal and formed as Cd_{0.22}Zn_{0.78}S. The reflection peaks in the spectra shifted towards the smaller angles with the increase of the In concentration. The absorption spectra of the films showed that this compound is a direct band gap material whose band gap values varied between 2.72-3.04eV. All the films showed n-type conductivities. The I-V measurements at room temperature indicate that the conduction mechanism carried out by the space-charge-limited characteristics with two different properties. These are that the ohmic region is either followed by the V² region or by the trap-filled-limited (TFL) region. The former indicates the presence of the shallow traps, whereas the other indicates the presence of the deep traps which is attributed to the rather high In contents in the materials. The conductivity values (σ) varied between 3×10^{-9} - $7 \times 10^{-7}(\text{ohmcm})^{-1}$ with the free carrier densities (n_0) between 2.5×10^9 - $4.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$. The activation energies from the Arrhenius plots have been calculated to have values 0.017-0.059eV, 0.237-0.296eV, and 0.558-0.591eV in the temperature regions of 181-247K, 247-300K, and 300-320K, respectively.

Key Words: Compound Semiconductors, Spray-Pyrolysis, Space-Charge-Limited Conduction, Shallow and Deep Traps, Activation Energy

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan, bilimsel katkılarını gördüğüm ve tecrübelerinden yararlandığım saygıdeğer hocam sayın Prof. Dr. Muhsin Zor'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Optik absorpsiyon spektrumlarının çekilmesine izin veren Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölüm Başkanlığına; x-ışınları kırınım desenlerinin çekilmesine izin veren Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Seramik Mühendisliği Bölümü'ne ve x-ışını kırınım desenlerinin çekilmesine yardımcı olan Öğr. Gör. Gürsoy Arslan'a ve Seramik Mühendisliği Bölümü araştırma görevlilerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında yardım ve desteklerini gördüğüm Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyeleri Yard. Doç. Dr. A.Şenol Aybek, Yard. Doç. Dr. Metin Kul ve Yard. Doç. Dr. Sabiha Aksay'a teşekkür ederim

Çalışmam süresince destek ve yardımlarını gördüğüm canım anneme, sevgili babama ve kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım

Eşim Güner Ilıcan' a çalışmam süresince gösterdiği sabır ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Yarıiletken II-VI Grup İkili Bileşikleri.....	2
1.3. Bazı II-VI Bileşiklerinin Özellikleri.....	4
1.4. $Cd_xZn_{1-x}S$ Bileşiğinin Özellikleri.....	6
1.5. Amaç.....	7
2. YARIİLETKENLER.....	8
2.1. Giriş.....	8
2.2. Katılarda Bant Oluşumu ve Bant Yapısı.....	9
2.3. Taşıyıcı Yoğunluğu ve Has (Intrinsic) Yarıiletkenler.....	12
2.4. Katkılı (Extrinsic) Yarıiletkenler.....	17
2.5. Mobilite ve Elektriksel İletkenlik.....	21
3. FİMLERİN ELDE EDİLMESİ.....	25
3.1. Giriş.....	25
3.2. Spray-Pyrolysis Yöntemi.....	25
3.3. Spray-Pyrolysis Yöntemi ile In Katkılı CdZnS Filmlerinin Elde Edilmesi.....	27
3.3.1. Püskürtme kabini.....	27
3.3.2. Isıtıcı ve sıcaklık kontrolü.....	29

3.3.3. Püskürtme başlığı (spray head)	29
3.3.4. Püskürtme basıncı.....	31
3.3.5. Çözelti akış hızı.....	31
3.3.6. Çözeltilerin hazırlanması.....	31
3.4. Deneyin Yapılışı.....	33
3.5. Elde Edilen Filmlerin Kalınlıkları.....	35
3.6. Bölüm ile İlgili Tartışma.....	36
4. X-IŞINI KIRINIM DESENLERİ.....	37
4.1. Giriş.....	37
4.2. X-Işını Kırınımı.....	37
4.3. İn Katkılı CdZnS Filmlerinin X-Işını Kırınım Desenleri.....	39
4.4. Bölüm ile İlgili Tartışma.....	40
5. ABSORPSİYON.....	49
5.1. Giriş.....	49
5.2. Absorpsiyon Olayı.....	49
5.2.1. Temel absorpsiyon.....	50
5.2.1.1. Direkt bant geçişi.....	52
5.2.1.2. İndirekt bant geçişi.....	53
5.2.1.3. Bant kuyukları (tail) arası geçişler.....	56
5.2.2. Eksitonların absorpsiyonu.....	56
5.2.3. Serbest taşıyıcıların absorpsiyonu.....	58
5.2.4. Katkı atomlarının (impurity) absorpsiyonu.....	59
5.2.5. Sıcak elektron (hot electron) yardımıyla absorpsiyon	60
5.2.6. Eşelektronik tuzaklara (isoelectronic trap) bağlı absorpsiyon.....	61
5.2.7. Akseptör-donör arası geçişler.....	62
5.2.8. Bant içi (intraband) geçişler.....	62
5.2.9. Örgü absorpsiyonu.....	63
5.3. Absorpsiyon Yöntemi ile Yarıiletkenlerin Yasak Enerji Aralıklarının Belirlenmesi.....	64

5.4. In Katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ Filmlerinin Temel Absorpsiyon Spektrumları ve Yasak Enerji Aralıkları.....	65
5.5. Bölüm ile İlgili Tartışma.....	67
6. DC İLETKENLİK.....	75
6.1. Giriş.....	75
6.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar.....	75
6.3. Space-Charge-Limited (SCL) İletim ve Ohmik İletim.....	80
6.3.1. Sığ tuzaklı space-charge-limited (SCL) iletimi ve ohmik iletim.....	84
6.3.2. Derin tuzaklı space-charge-limited (SCL) iletimi ve ohmik iletim.....	87
6.4. Akımın Sıcaklık ile Değişimi ve Aktivasyon Enerjisi.....	88
6.5. In Katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ Filmlerinde Metal-Yarıiletken-Metal Yapıların Oluşturulması.....	91
6.6. In Katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ Filmlerinin Akım-Voltaj Karakteristikleri	92
6.6.1. Au-Au kontaklı filmlerin akım-voltaj karakteristikleri	93
6.6.2. In-In kontaklı filmlerin akım-voltaj karakteristikleri	100
6.7. Au-Au Kontaklı %1 In Katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ Filminin Akım-Voltaj ve Akım-Sıcaklık Karakteristiği.....	108
6.8. Bölüm ile İlgili Tartışma	113
7. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	115
KAYNAKLAR.....	119

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. a)Yüzey-merkezli kübik yapı b) kübik (sphalerite) kristal yapı (Nag, 1980)	2
Şekil 1.2. a)Hegzagonal sıkı-paketlenmiş kristal yapı b) wurtzite kristal yapı (Nag,1980)	3
Şekil 2.1. Atomlar arası uzaklığın fonksiyonu olarak elmasın enerji-bant diyagramı (McKelvey, 1966)	9
Şekil 2.2. Bir yarıiletkenin a) 0K'deki ve b) oda sıcaklığındaki iletim ve valans bantları (McKelvey, 1966)	11
Şekil 2.3. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu (Omar, 1975)	13
Şekil 2.4. a) İletim ve valans bantları b)dağılım fonksiyonu c)elektron ve hollerin durum yoğunluğu (Omar, 1975)	14
Şekil 2.5. Has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi	16
Şekil 2.6. Silisyum kristaline arsenik atomunun katılanması (Kittel, 1996)	17
Şekil 2.7. n-tipi bir yarıiletkenin a) 0K'de ve b) yüksek sıcaklıklarda bant yapısı (Allison,1990)	19
Şekil 2.8. Silisyum kristaline bor atomunun katılanması (Kittel, 1996)	18
Şekil 2.9. p-tipi bir yarıiletkenin (a) 0K'de (b) yüksek sıcaklıklarda bant yapısı (Allison, 1990)	19
Şekil 2.10. a) n-tipi yarıiletkenlerde b) p-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyeleri	20
Şekil 3.1 Damlacık boyutuna bağlı çeşitli depozisyon yöntemleri (Siefert, 1984)	26
Şekil 3.2. Spray-pyrolysis deney seti	28
Şekil 3.3. Spray-pyrolysis yönteminde kullanılan ultrasonik püskürtme başlığı (ultrasonic spray-head) ile püskürtme konisinin şematik gösterimi	30
Şekil 4.1. X-ışınlarının kristal tarafından kırınımına uğratılması	38

Şekil 4.2.	250 ± 5°C taban sıcaklığında Zn _{0.5} Cd _{0.5} S çözelti oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal Cd _{0.22} Zn _{0.78} S yapısına aittir	42
Şekil 4.3.	275 ± 5°C taban sıcaklığında Zn _{0.5} Cd _{0.5} S çözelti oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal Cd _{0.22} Zn _{0.78} S yapısına aittir	43
Şekil 4.4.	300 ± 5°C taban sıcaklığında Zn _{0.5} Cd _{0.5} S çözelti oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal Cd _{0.22} Zn _{0.78} S yapısına aittir	44
Şekil 4.5.	275 ± 5°C taban sıcaklığında %0.2 In katkılı Zn _{0.5} Cd _{0.5} S çözelti oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal Cd _{0.22} Zn _{0.78} S yapısına aittir	45
Şekil 4.6.	275 ± 5°C taban sıcaklığında %0.5 In katkılı Zn _{0.5} Cd _{0.5} S çözelti oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal Cd _{0.22} Zn _{0.78} S yapısına aittir	46
Şekil 4.7.	275 ± 5°C taban sıcaklığında %1 In katkılı Zn _{0.5} Cd _{0.5} S çözelti oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal Cd _{0.22} Zn _{0.78} S yapısına aittir	47
Şekil 4.8.	275 ± 5°C taban sıcaklığında %2 In katkılı Zn _{0.5} Cd _{0.5} S çözelti oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal Cd _{0.22} Zn _{0.78} S yapısına aittir	48
Şekil 5.1.	a) Bir yarıiletkende temel absorpsiyon olayı, b) Bir yarıiletkende temel absorpsiyon spektrumu	51
Şekil 5.2.	Bir yarıiletkende direkt bant geçişi	52
Şekil 5.3.	a) Bir yarıiletkende indirekt vadiler arası indirekt bant geçişi b) Direkt vadiler arası indirekt bant geçişi	54
Şekil 5.4.	Absorpsiyonun sıcaklıkla değişimi	55
Şekil 5.5.	p-tipi yarıiletkende bant tailleri arası geçiş	56
Şekil 5.6.	a) Eksiton b) Eksiton enerji seviyesi	57
Şekil 5.7.	İletim bandında serbest elektronun geçişi	58

Şekil 5.8.	Katkılı yarıiletkenlerde katkı atomlarının absorpsiyonu	59
	a) donörden iletim bandına	
	b) valans banttın akseptöre	
	c) valans banttın donöre	
	d) akseptörden iletim bandına geçişler	
Şekil 5.9.	Direkt bant geçişli bir yarıiletkende sıcak elektron yardımıyla absorpsiyon	61
Şekil 5.10.	Akseptörden donöre geçiş	62
Şekil 5.11.	Valans alt bant yapısı ve bant içi geçişler (Pankove, 1971)	63
Şekil 5.12.	$(\alpha hv)^n$ 'nin hv 'ye göre değişimi	64
Şekil 5.13.	$250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2 \propto hv$ değişimi	68
Şekil 5.14.	$275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2 \propto hv$ değişimi	69
Şekil 5.15.	$300 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2 \propto hv$ değişimi	70
Şekil 5.16.	$275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %0.2 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2 \propto hv$ değişimi	71
Şekil 5.17.	$275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %0.5 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2 \propto hv$ değişimi	72
Şekil 5.18.	$275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %1 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2 \propto hv$ değişimi	73
Şekil 5.19.	$275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %2 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2 \propto hv$ değişimi	74
Şekil 6.1.	Metal-n tipi yarıiletken kontağının enerji-bant diyagramı ($\phi_m > \phi_s$)	76

Şekil 6.2.	Metal-n tipi yarıiletkende ohmik kontak ($\phi_m < \phi_s$)	77
Şekil 6.3.	a) Donör tipi yüzey durumlarının metal-n tipi yarıiletken kondağındaki enerji-bant yapısına etkisi b) akseptör tipi yüzey durumlarının metal-n tipi yarıiletken kondağındaki enerji-bant yapısına etkisi	79
Şekil 6.4.	Tuzaksız bir materyalde ohmik bölgeden space-charge iletim bölgesine geçişi gösteren diyagram (Kao ve Hwang, 1979)	82
Şekil 6.5.	Sığ tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj karakteristiği	85
Şekil 6.6.	Derin tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj karakteristiği	87
Şekil 6.7.	Bir parçacığın bulunduğu yarı kararlı duruma göre daha yüksek enerjili durumdan geçerek kararlı hale gelmesi	88
Şekil 6.8.	n-tipi bir yarıiletkende iletkenliğin sıcaklıkla değişimi (Many ve ark.,1971)	89
Şekil 6.9.	Düzlemsel formda oluşturulan metal-yarıiletken-metal yapıların şematik olarak yandan ve üstten görünüşleri	91
Şekil 6.10.	Au-Au kontaklı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği	94
Şekil 6.11.	Au-Au kontaklı %0.5 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği	95
Şekil 6.12.	Au-Au kontaklı %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği	97
Şekil 6.13.	Au-Au kontaklı %2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği	99
Şekil 6.14.	In-In kontaklı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği	101
Şekil 6.15.	In-In kontaklı %0.2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği	102
Şekil 6.16.	In-In kontaklı %0.2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği	104
Şekil 6.17.	In-In kontaklı %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği	105
Şekil 6.18.	In-In kontaklı %2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda	107

sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği	
Şekil 6.19. Kriyostat ve DC voltaj kaynağı bağlantıları	109
Şekil 6.20. Au-Au kontaklı %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin 3×10^{-3} mbar basınç altında ve çeşitli sıcaklıklardaki akım-voltaj değişimi	110
Şekil 6.21. Au-Au kontaklı %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin çeşitli sabit voltajlardaki akım-sıcaklık değişimleri	111



ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Bazı yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı ve etkin kütle değerleri (300°K) (Omar, 1975)	11
Çizelge 2.2. Çeşitli yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki mobiliteleri (Omar, 1975; Lide, 1998)	22
Çizelge.3.1. Filmlerin elde edilme özellikleri ve kalınlıkları	35
Çizelge 5.1. Çeşitli taban sıcaklıklarında elde edilen filmlerin yasak enerji aralıkları	67
Çizelge 6.1. Bazı metallerin iş fonksiyonları (Lide, 1998)	75
Çizelge 6.2. Elde edilen metal-yarıiletken-metal yapılarda d , ℓ değerleri	92
Çizelge 6.3. Au-Au kontaklı In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin elektriksel özellikleri	98
Çizelge 6.4. In-In kontaklı In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin elektriksel özellikleri	106
Çizelge 6.5. Çeşitli sıcaklıklarda ve 3×10^{-3} mbar basınç altında Au-Au kontaklı %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin elektriksel iletkenlik değerleri	112
Çizelge 6.6. $275 \pm 5^\circ C$ taban sıcaklığında elde edilen Au-Au kontaklı %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin, çeşitli sabit voltajlar için aktivasyon enerji değerleri	112

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

- a : kristalografik örgü parametresi
 c : kristalografik örgü parametresi ; ışık hızı
 d : iki metal kontak arasındaki mesafe
 d_0 : kristal düzlemleri arasındaki mesafe
 e : elektronun yükü
 E : elektrik alan
 E_a : akseptör enerji seviyesi
 E_c : iletim bandının minimum enerji seviyesi
 E_d : donör enerji seviyesi
 E_{ex} : eksiton enerji seviyesi
 E_F : yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
 E_f : son durum enerji seviyesi
 E_g : yasak enerji aralığı
 E_i : ilk durum enerji seviyesi
 E_t : tuzak enerji seviyesi
 E_v : valans bandının minimum enerji seviyesi
 eV : elektron volt
 $f(E)$: Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
 $g_c(E)$: hol durum yoğunluğu
 $g_v(E)$: elektron durum yoğunluğu
 h : Planck sabiti
 I : materyali geçen elektromagnetik dalganın şiddeti
 I_0 : materyale gelen elektromagnetik dalganın şiddeti
 J : akım yoğunluğu
 k : dalga vektörü
 k_B : Boltzman sabiti
 ℓ : elektrot boyu
 $L(h\nu)$: absorpsiyon
 m_c^* : elektronun etkin kütlesi
 m_h^* : holün etkin kütlesi

m_0	: serbest elektronun kütlesi
m	: eğim
M	: molarite
n	: iletim bandındaki elektron yoğunluğu
$n(x)$: enjekte edilen serbest elektronların yoğunluğu
n_i	: has yarıiletkende serbest taşıyıcı yoğunluğu
n_{eff}	: etkin taşıyıcı yoğunluğu
$n_t(x)$: tuzaklı elektronların yoğunluğu
N_c	: iletim bandındaki elektronun etkin durum yoğunluğu
N_0	: iletim bandındaki birim enerji başına düşen tuzak yoğunluğu
N_t	: tuzak yoğunluğu
N_v	: valans bandındaki holün etkin durum 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_{bi}	: built-in potansiyel
V_{tr}	: ohmik akımdan SCL akımına geçiş voltajı
V_{TFL}	: tuzakların dolmasına karşı gelen trap-filled-limited voltajı
α	: lineer absorpsiyon katsayısı
ϵ_0	: boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_r	: materyalin dielektrik sabiti
$e\phi$: iş fonksiyonu
ϕ_{Bn}	: engel yüksekliği
ϕ_M	: metalin iş fonksiyonu
ϕ_S	: yarıiletkenin iş fonksiyonu
λ	: dalga boyu
λ_g	: gelen fotonun dalga boyu
μ	: mobilite
ν	: frekans

- θ : Bragg açısı
 θ_0 : serbest yüklerin tuzaklanmış yüklere oranı
 ρ : space-charge yoğunluğu
 ρ_f : film yoğunluğu
 σ : elektriksel iletkenlik
 σ_i : has yarıiletkenler için elektriksel iletkenlik
 σ_k : katkılı yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik
 τ : durulma zamanı
 χ : yarıiletkenin elektron afinitesi
 ΔE : aktivasyon enerjisi



1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1. Giriş

Günlük hayatımızda kullandığımız elektronik cihazların yapımında kullanılan diyot, transistör ve entegre devreler gibi parçalar birer yarıiletkendir. Teknolojide bu denli yer tutan yarıiletkenlere gittikçe daha fazla önem verilmektedir. Bu nedenle daha yüksek performanslı ve daha düşük maliyetli yarıiletkenler üretilmek istenmektedir. Bilimsel ve endüstriyel başarı ile teknolojik gelişmeler sonucu yıldan yıla daha küçük transistörlerin yapımı gerçekleştirilmiştir.

İlk film 1838 yılında elektroliz yoluyla elde edilmiştir. Daha sonra Grove 1852 yılında glow-discharge sputtering yöntemi ile, Faraday 1857 yılında asal gaz içerisinde buharlaştırma yolu ile, Nahrwold 1887 yılında Joule ısıtması yöntemi ile, Kundt 1888 yılında yine Joule ısıtması yöntemi ile metal filmler elde etmiştir. Ancak vakum cihazlarının gelişmesine kadar bütün bu çalışmalar yalnızca bilimsel birer çalışma olarak kalmıştır. Yarıiletken filmler farklı yöntemler ile elde edilmiştir. Ancak ucuz ve kolay bir yöntem olan spray-pyrolysis yöntemi ile ilk filmi elde etme çalışmaları 1940'lı yıllara dayanmaktadır. 1950'li yıllarda ise yarıiletken CdS ve CdSe üretilmiş ve yapılan araştırmalar canlanmaya başlamıştır (Zor, 1982; Shay, 1975; McGill ve ark., 1988).

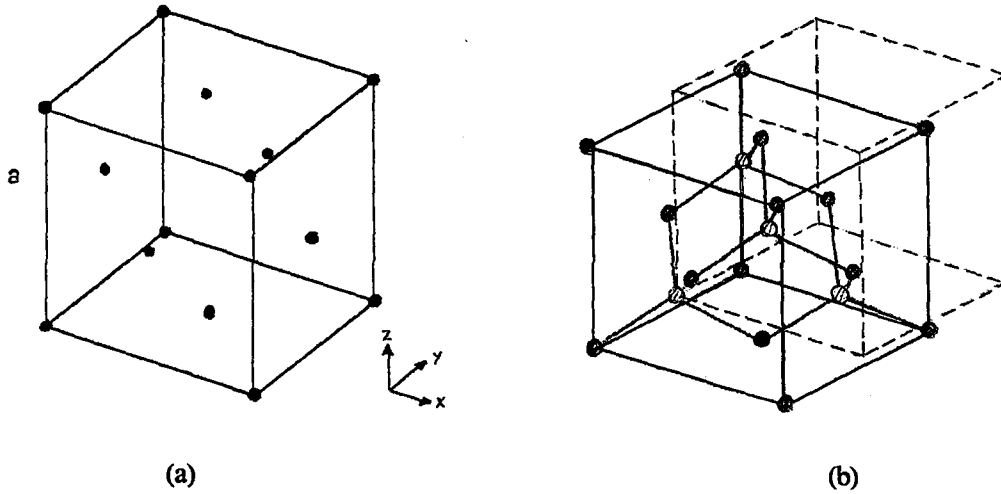
Teknolojideki hızlı gelişme ile beraber enerji sorunu ortaya çıkmaya başlamıştır. Çevre faktörü de göz önüne alınarak sürekli bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden faydalanma düşüncesi, güneş pili üzerine yapılan çalışmaları hızlandırmıştır. Bu durum ise, yarıiletken ince film güneş pilleri ile yapılan çalışmaları arttırmıştır. Yarıiletken ince film güneş pillerinin, tek kristal güneş pillerine göre daha kolay yapılması ve daha ucuz olması nedeni ile, güneş pillerinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Si, Ge, ve GaAs gibi tek kristalleri ile CdS, CdSe, CdTe, Cu₂S, InP, GaP, AgInS₂, CuInS₂ ve Cd_{1-x}Zn_xS gibi ince film yarıiletkenleri fotovoltaik güneş pillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Köse, 1993; Peker, 1999).

Yarıiletken ince filmler tek katlı epitaksiyel (homoepitaxial) filmler, çok katlı epitaksiyel (heteroepitaxial) filmler ve polikristal filmler olmak üzere üç temel grupta elde edilmektedir. Tek katlı ve çok katlı epitaksiyel filmler ileri teknolojinin kullanımı ile elde edilen maliyeti yüksek olan filmlerdir. Polikristal filmler ise, büyük yüzeyli cam ve mika gibi yalıtkan tabakalar üzerine büyütülebilen, optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle güneş pili, yarıiletken fotodedektör gibi bir çok uygulama alanı olan basit ve farklı yöntemlerle elde edilebilen yarıiletken materyallerdir (Aybek, 1996). Ayrıca yapılan çalışmalarda kalınlığı $1 \mu\text{m}$ 'den küçük olan filmler ince film (thin film), büyük olanlar ise kalın film (thick film) olarak adlandırılır.

1.2. Yarıiletken II-VI Grup İkili Bileşikleri

Periyodik tablonun II. grup elementleri olan Zn, Cd ve Hg ile VI. grup elementleri O, S, Se ve Te aralarında oniki tane ikili bileşik oluştururlar. Bu bileşikler ile yaygın bir şekilde çalışılmaktadır. II-VI grup ikili bileşiklerinin enerji bant aralığı $1.4-4 \text{ eV}$ arasında oldukça geniş bir aralıktır. Bu nedenle de farklı optiksel dalga boylarına sahip laserlerin yapımında kullanılmaktadır (Nag, 1980).

II-VI grup bileşikleri, hem kübik (sphalerite) hem de hegzagonal (wurtzite) kristal yapıda kristallenmektedir.

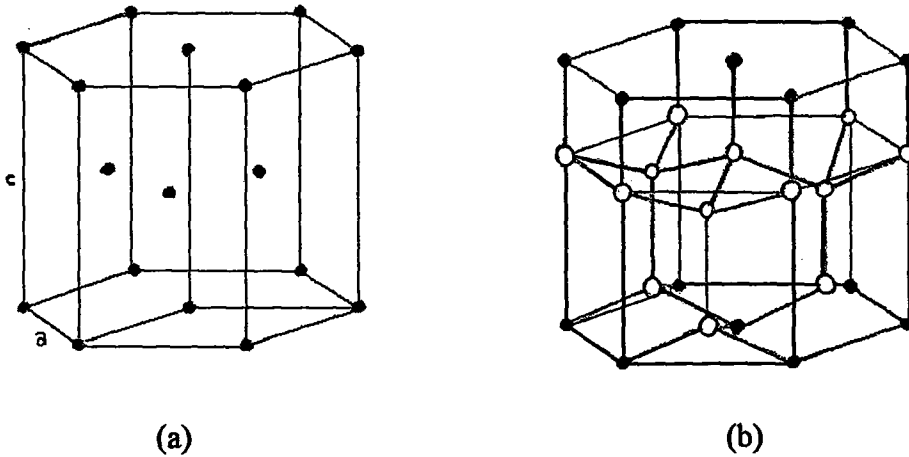


Şekil 1.1.a) Yüzey-merkezli kübik yapı b) kübik (sphalerite) kristal yapı (Nag, 1980)

Kübik yapıda, bir atom ikinci tür dört atomdan eşit uzaklıkta olacak şekilde yerleşmiştir. Atomların yerleşim düzeni iç içe geçmiş iki yüzey merkezli kübik yapıdan oluşmuştur. Her kübik örgü aynı cins atomlar tarafından oluşturulmuştur. İki kübik örgü diğerine paralel olacak şekilde ve bir kübün köşesi, köşegen uzunluğunun dörtte biri uzaklıkta diğer kübün köşegeni olacak şekilde örgü simetrisine göre yerleştirilmiştir. Şekil 1.1.a'da yüzey merkezli kübik yapı ve Şekil 1.1.b'de kübik kristal yapı görülmektedir.

Hegzagonal (wurtzite) yapıdaki atomların yerleşim düzeni kübik yapıya benzemektedir. Bu yapıda bir atom, diğer tür dört atom tarafından tetrahedral olarak çevrilmiştir. Fakat tetrahedronlar öyle yönelmişlerdir ki, atomların yerleşim düzeni iç içe geçmiş iki sıkı paketlenmiş hegzagonal örgüye uygundur. Wurtzite yapı iki atomlu sıkı- paketlenmiş hegzagonal yapı olarak düşünülebilir. Sıkı- paketlenmiş hegzagonal yapı ve wurtzite yapı Şekil 1.2.a ve Şekil 1.2.b de gösterilmektedir (Nag, 1980).

Kübik ve hegzagonal kristal yapının her ikisinde de atomlar tetrahedral örgü simetrisine göre dizilmişlerdir. Bu iki kristal yapı birbirine çok benzer yapı sergilemesine rağmen, piezoelektrik ve pyroelektrik özellikleri bakımından birbirinden farklıdırlar. Kübik ve hegzagonal kristal yapının enerji bant yapıları birbirine benzerlik gösterir (Nag, 1980).



Şekil 1.2.a) Hegzagonal sıkı-paketlenmiş kristal yapı b) wurtzite kristal yapı (Nag,1980)

II-VI grup bileşikleri kimyasal buhar depolama (CVD), sputtering, elektrodepozisyon, vakumda buharlaştırma, close-spaced buhar taşınımı, spray-pyrolysis, molecular beam epitaxy gibi çeşitli metotlarla elde edilebilirler.

II-VI grup bileşikleri, yarıiletkenlerin ve yarıiletken aygıtların üretiminde oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu bileşikler katot ışın tüplerinde pencere materyali olarak, elektrolüminesans cihazlarda, fotoiletkenlerde, güneş pillerinde, laser diyotlarda, ince film transistörlerinde, flash ve ultraviyole dedektörlerde kullanılmaktadırlar.

1.3. Bazı II-VI Bileşiklerinin Özellikleri

İlk olarak Chamberlin ve Skarman spray-pyrolysis yöntemi ile CdS bileşimini elde etmişlerdir. CdS sphalerite veya wurtzite kristal yapıda oluşabilir. Wurtzite kristal yapıda oluşan CdS için yasak enerji aralığı oda sıcaklığında 2.42eV, 0K'de 2.582eV, yoğunluğu 4.82gcm^{-3} ve örgü sabitleri $a=4.1348\text{Å}$ ve $c=6.477\text{Å}$ 'dur. Sphalerite kristal yapıda oluşan CdS için örgü sabiti 5.832Å ve yoğunluğu 4.826gcm^{-3} 'tür (Kittel, 1996; Lide, 1998).

CdS bileşiğinin oda sıcaklığındaki iletkenlik ve mobilite değerleri sırasıyla $10^{-4}(\text{ohm.cm})^{-1}$ - $10^2(\text{ohm.cm})^{-1}$ ve $10^{-3}\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ - $10^2\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ arasında değişmektedir (Ma ve Bube,1977). Yapılan bir çalışmada, oda sıcaklığında iletkenliği $10^{-1}(\text{ohm.cm})^{-1}$ olan CdS kristaline indiyum donör katkılındığında, iletkenliğinin $20(\text{ohm.cm})^{-1}$ değerine arttığı görülmüştür (Kwok ve Bube, 1973). CdS bileşiğine $3 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ In katkılındığında yasak enerji aralığı 2.42eV değerinden 2.6eV değerine çıkmaktadır. Aynı durumda, 10^3ohm.cm değerinden daha büyük olan öz direnci ise, $5 \times 10^{-3}\text{ohm.cm}$ değerine kadar azalmaktadır (Kim ve ark., 1993).

Cu_2S -CdS photovoltaik pil ile yapılan çalışmalar sonucunda elektron mobilitesi $90\text{cm}^2/\text{V.s}$, elektron yoğunluğu 10^{15} - 10^{16}cm^{-3} olarak bulunmuştur. CdS bileşiği In ve In-Ga alaşımı ile ohmik kontak yapmaktadır (Wu ve Bube, 1974).

CdS filmindeki Cd:S oranı arttıkça, öz direnç ve taşıyıcı konsantrasyonu azalmakta, mobilite ise artmaktadır (Kolhe ve ark., 1985).

CdS bileşiğindeki Cl, Br, I, Al, Ga ve In katkısı iyonizasyon enerjisi 0.03eV olan sıg donör; Cu ve Ag katkısı ise derin akseptör olarak yapıda bulunur (Wu ve Bube, 1974).

CdSe yarıiletken filmi son yıllarda, güneş pilleri, yüksek verimli ince film transistörleri, light-emitting diyotlar, elektrolüminesans cihazlar v.b. gibi potansiyel uygulamalarında kullanıldığından ve ilginç özellikleri nedeniyle oldukça fazla çalışılan II-VI yarıiletken bileşiklerinden biridir. CdSe filmleri kimyasal buhar depolama (CVD), sputtering, elektrodepozisyon ve vakumda buharlaştırma gibi metotlarla başarıyla elde edilmiştir (Baban ve ark., 2000).

CdSe sphalerite veya wurtzite kristal yapıda oluşabilir. Wurtzite kristal yapıda oluşan CdSe için yasak enerji aralığı oda sıcaklığında 1.74eV, 0K'de 1.84eV, elektron mobilitesi $900\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, hol mobilitesi $50\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, yoğunluğu 5.66gcm^{-3} ve örgü sabitleri $a=4.299\text{Å}$ ve $c=7.010\text{Å}$ 'dur. Sphalerite kristal yapıda oluşan CdSe için örgü sabiti 6.05Å ve yoğunluğu 5.674gcm^{-3} tür (Kittel, 1996; Lide, 1998).

CdTe bileşiği elektrodepozisyon, close-spaced buhar depolama gibi depolama metodları kullanılarak üretilmektedir (Basol ve ark., 1985). Wurtzite kristal yapıda oluşan CdTe için yasak enerji aralığı oda sıcaklığında 1.50eV, elektron mobilitesi $650\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ve örgü sabitleri $a=4.57\text{Å}$ ve $c=7.47\text{Å}$ 'dur. Sphalerite kristal yapıda oluşan CdTe için yasak enerji aralığı oda sıcaklığında 1.44eV, 0K'de 1.56eV, elektron mobilitesi $1200\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, hol mobilitesi $50\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, örgü sabiti 6.477Å ve yoğunluğu 5.86gcm^{-3} tür (Kittel, 1996; Lide, 1998).

ZnS bileşiği oda sıcaklığında oldukça geniş bir enerji aralığına sahip olduğundan mükemmel lüminesans özelliklere sahiptir. Buharlaştırma ve sputtering gibi depolama metodları ile ya da epitaksiyel büyütme metodları ile üretilen ZnS, wurtzite ya da zincblende kristal yapıda oluşabilir (Xin ve ark., 1999).

Wurtzite kristal yapıda oluşan ZnS için yasak enerji aralığı oda sıcaklığında 3.67eV, yoğunluğu 4.1gcm^{-3} ve örgü sabitleri $a=3.8140\text{Å}$ ve $c=6.2576\text{Å}$ 'dur. Sphalerite kristal yapıda oluşan ZnS için yasak enerji aralığı oda sıcaklığında 3.68eV, 0K'de 3.84eV, elektron mobilitesi $180\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, hol

mobilitesi $5\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ (400°C 'de), örgü sabiti 5.4093\AA ve yoğunluğu 4.079gcm^{-3} 'tür (Kittel, 1996; Lide, 1998).

ZnSe çeşitli depolama ve büyütme metodları ile üretilmekte ve zincblende yapıda kristallenmektedir. Yasak enerji aralığı oda sıcaklığında 2.58eV , 0K 'de 2.8eV , örgü sabiti 5.6676\AA , elektron mobilitesi $540\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, hol mobilitesi $28\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ve yoğunluğu 5.42gcm^{-3} 'tür (Kittel, 1996; Lide, 1998). Yüksek özdirençli ZnSe kristaline Mg ve Cu katkılanarak özdirenç azaltılabilir (Gnatyuk, 2000). Li katkılanan p-tipi ZnSe için iletkenlik $0.5(\text{ohm.cm})^{-1}$ ve hol mobilitesi $50\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ değerindedir (McGill ve ark., 1988).

Wurtzite kristal yapıda oluşan ZnTe örgü sabitleri $a=4.27\text{\AA}$ ve $c=6.99\text{\AA}$ 'dur. Sphalerite kristal yapıda oluşan ZnTe için yasak enerji aralığı oda sıcaklığında 2.26eV , örgü sabiti 6.101\AA , elektron mobilitesi $340\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, hol mobilitesi $100\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ve yoğunluğu 6.34gcm^{-3} 'tür (Kittel, 1996; Lide, 1998).

Son yıllarda II-VI grup bileşikleri ile ikili bileşiklerden başka üçlü ve dörtlü bileşiklerle de çalışmalar yapılmıştır.

1.4. $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ Bileşiğinin Özellikleri

CdZnS fotoiletken aletler, güneş pillerinde sıklıkla kullanılan II-VI grup yarıiletken bileşiğidir. Depolama yöntemlerinin hemen hemen hepsinde üretilebilir. $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ bileşiğindeki x değerine bağlı olarak 2.42eV - 3.67eV değerleri arasında direkt bant aralığına sahiptir ve x değeri azaldıkça yasak enerji aralığı artmaktadır.

Zn oranı arttıkça iletkenlik ve mobilite azalmakta, taşıyıcı yoğunluğu ise artmaktadır (Kwok ve Chau, 1979).

Zincblende ve wurtzite yapıda kristallenirler. X-ışınları analizleri sonucunda $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ bileşiğindeki ZnS oranının %70'den küçük olduğu durumlarda kristal yapı CdS bileşiğinin karakteristik yapısı olan hegzagonal yapıya sahiptir. Ancak ZnS oranı %80 olduğunda ise yapı ZnS bileşiğinin karakteristik yapısı olan kübik yapıya dönüşmektedir. O halde ZnS konsantrasyonunun %70 ile %80 arasında değiştiği bir noktada, $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$

bileşiminin kristal yapısı da hegzagonal formdan, kübik forma dönüşmektedir (Agnihotri ve Gupta, 1979).

$Cd_xZn_{1-x}S$ ($x=0.9$) yarıiletkenine %5 In katkılanmasıyla öz direnç 10^4 ohm.cm değerinden, yaklaşık olarak 10^2 ohm.cm değerinden daha küçük değerlere kadar azalır (Agnihotri ve Gupta, 1979).

1.5. Amaç

Bu çalışmanın amacı, CdZnS bileşimini ve bu bileşiğe %0.2, %0.5, %1 ve %2 oranlarında In katkılayarak en uygun taban sıcaklığında spray-pyrolysis yöntemi ile yarıiletken film elde etmektir. Elde edilen filmlerin x-ışını kırınım desenlerinden kristal yapıyı, oda sıcaklığındaki optik absorpsiyonlarından yasak enerji aralıklarını belirlemek, oda sıcaklığındaki I-V karakteristiklerinden iletim mekanizması, mobilite, iletkenlik gibi elektriksel özelliklerini belirlemek ve sıcaklık-akım grafiklerini çizerek aktivasyon enerjileri hakkında bilgi sahibi olmaktır.

Ayrıca; CdZnS bileşimine katkılanan indiyumun kristal yapıya, optiksel ve elektriksel özelliklerine etkisinin yanısıra, In-In ve Au-Au kontakların iletim mekanizmasına etkisinin de nasıl olacağını araştırılmasıdır.

2. YARIİLETKENLER

2.1. Giriş

Yarıiletkenler, iletkenlerden yalıtkanlara kadar uzanan bölgeyi kapsayan geniş bir bölgede bulunan ve çok çeşitli uygulama alanlarına sahip materyallerdir. Yarıiletkenler ile 1920'li yıllardan beri çalışılmakta olmasına karşın, aslında 1940'larda transistörün icat edilmesiyle hayata girmiştir. Bu icat ve buna bağlı gelişen cihazlar nedeniyle, yarıiletkenler katıhal fiziğinde en çok çalışılan konu olmuştur.

Yarıiletkenler katıların en ilginç ve en önemli sınıfını oluştururlar. İletkenler ve yalıtkanlardan elektrik ve optiksel özellikleri bakımından farklıdırlar. Yarıiletkenlerde iletkenlerdekini tersine, sıcaklık ve yabancı madde yoğunluğu arttıkça elektriksel öz direnç azalmaktadır. Yarıiletkenlerde sıcaklık arttıkça iletkenliğin de artmasına karşın, iletkenlerde sıcaklık arttıkça iletkenlik azalmaktadır. Bu durum, yarıiletkenleri iletkenlerden ayıran en belirgin özelliktir. Oda sıcaklığında yarıiletkenlerin öz dirençleri 10^{-2} - 10^9 ohm.cm arasındadır.

Yarıiletkenlerin belirgin özelliklerinden biri de mutlak sıfır sıcaklığında (OK'de) iyi bir yalıtkan olmalarıdır. Bu durumda iletim bandı tamamen boş olup, dolu valans bandından yasak enerji aralığı kadar ayrılmıştır. Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı 4eV değerinden küçüktür.

Günümüzde özellikleri en iyi bilinen ve en çok kullanılan yarıiletkenler periyodik tablonun IV. grup elementleri olan silisyum (Si) ve germanyum (Ge) materyalleridir. Yine bu grupta olan karbon elmas yapıda iken yalıtkan; kalay, gri kalay yapısında iken yarıiletkenidir. IV. grup elementleri kovalent kristallerdir.

Yarıiletkenlerin diğer önemli bir sınıfını da III-V grup ikili (binary) bileşikler oluşturur. Bu gruba GaAs, GaP, InSb, InAs örnek olarak verilebilir. Böyle bileşikler kübik (sphalerite) yapıda kristallenirler. III-V grup bileşiklerindeki bağlanma tipi de ağırlıklı olarak kovalenttir.

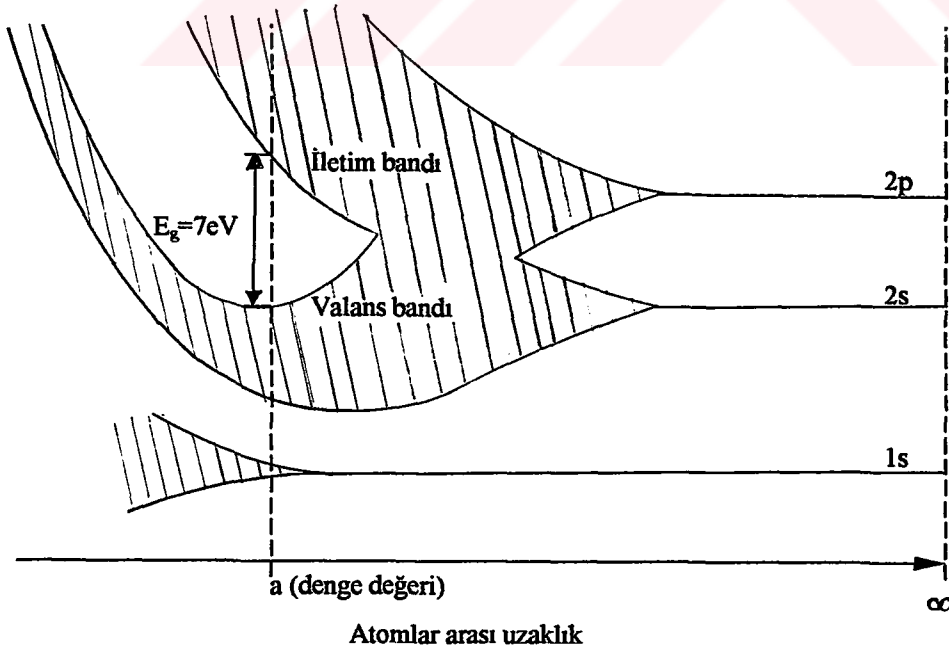
II-VI grup bileşiklerinde ise bağlanma iyonik ve kovalenttir. Bu bileşikler hem kübik (sphalerite) hem de hegzagonal (wurtzite) yapıda

kristallenirler. Bu grubun önemli bileşikleri CdS, CdZnS, ZnS, CdSSe bileşikleridir.

İkili bileşiklerden başka üçlü (ternary), dördü (quaternary) ve beşli (quinary) bileşiklerle de çalışmalar yapılmaktadır. Üçlü bileşiklere örnek olarak I-III-VI₂ bileşikleri (AgInS₂, CuGaSe₂ gibi), I₂-IV-VI₃ bileşikleri (Cu₂GeSe₃, Ag₂SnS₃), I₃-V-VI₄ bileşikleri (Cu₃SbS₄, Cu₃AsSe₄), I-IV₂-V₃ bileşikleri (CuSi₂P₃,), II-IV-V₂ bileşikleri (CdGeP₂, ZnSnAs₂), II-III₂-VI₄ bileşikleri (ZnGa₂Se₄, HgIn₂S₄), I₂-II-VII₄ bileşikleri (Cu₂HgI₄) ve III₂-IV-VI bileşikleri (Al₂SnTe, In₂GeSe) verilebilir.

2.2. Katılarda Bant Oluşumu ve Bant Yapısı

Atomlar birbirlerinden sonsuz uzaklıkta bulduklarında birbirlerinden bağımsızdır ve her bir atomun kendine ait enerji seviyesi vardır. Elektronlar bu enerji seviyelerinde Pauli dışarlama ilkesine göre dizilirler. Örneğin karbon (C) atomunun altı elektronu vardır. Karbon atomu için elektron konfigürasyonu $1s^2 2s^2 2p^2$ şeklindedir. En dış yörüngede ($n=2$) iki tanesi s seviyesinde ve iki tanesi p seviyesinde olmak üzere toplam dört tane valans elektronu bulunmaktadır.



**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Şekil 2.1. Atomlar arası uzaklığın fonksiyonu olarak elmasın enerji-band diyagramı (McKelvey, 1966)

Atomların bir katıyı oluşturacak şekilde bir araya geldikleri zaman neler olacağını bilmek gerekir. Serbest haldeki atomlar kristal yapıyı oluşturmak üzere birbirine yaklaştırıldığında, elektron dalga fonksiyonları en dış yörüngelerden başlayarak üst üste biner ve elektronlar aynı anda iki atoma birden ait olur. Böyle bir durum Pauli dışarlama ilkesine aykırı olduğundan, elektronlardan birinin kuantum şartlarının farklı olması gerekir. Bunun için de, elektronların enerji seviyelerinin yarılması gerekir. Bu yarılmış enerji seviyeleri arasındaki uzaklık 10^{-19} eV civarında çok küçük bir değerdedir. Bu nedenle, enerji bölgesi sürekli bir yapı gibi kabul edilerek enerji bandı adı verilir. Elektron durumlarının enerji dağılımı, atomlar arası uzaklığa bağlıdır. Karbon kristaline ait bant yapısının oluşumu Şekil 2.1’de verilmektedir.

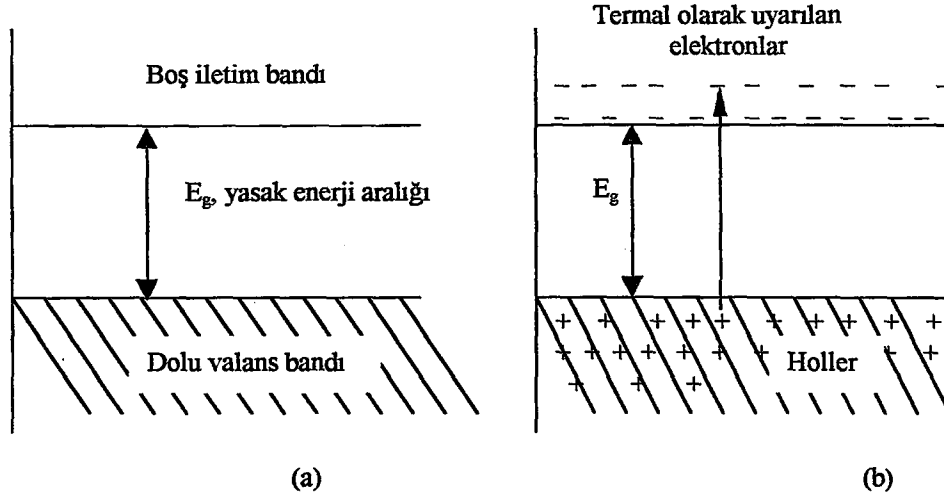
Elektronların dalga fonksiyonlarının kuvvetli etkileşmeleri sonucu olarak dış yörüngelere ait enerji bantları, iç yörüngelerdeki enerji bantlarından daha geniştir. İç yörüngelerdeki elektronlar komşu atomlardan daha az etkilenmekte ve böylece bu elektronların çekirdeğe bağlanma enerjileri daha büyük olmaktadır. Yarılmadan sonra dış bantlar üst üste binebilir. Genellikle dış bantlarda kuantum durumları ya boş ya da kısmen doludur. Bantlar oluşuktan sonra bantlar arasında elektron geçişleri başlar ve istatistiksel denge kuruluncaya kadar devam eder. Elektronlar ile tamamen dolu banda valans bant, bu bandın üzerindeki tamamen boş banda ise iletim bandı adı verilir. Elektronlar bu iki bant arasında bulunamazlar.

Bir yarıiletkende mutlak sıfır sıcaklığında tamamen dolu olan valans bandındaki elektronlar ışık veya termal yolla uyarıldıkları zaman üstteki iletim bandına geçerler ve geride hol (hole) adı verilen boşluk bırakırlar. Böylece elektriksel ilettime hem elektronlar hem de holler katkıda bulunurlar.

Bir yarıiletkenin OK’deki ve oda sıcaklığındaki en basit bant yapısı Şekil 2.2’de gösterilmektedir. İletim bandının alt sınır enerjisi E_c ,

$$E_c = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (2-1)$$

ile verilmektedir.



Şekil 2.2. Bir yarıiletkenin a) 0K'deki ve b) oda sıcaklığındaki iletim ve valans bantları (McKelvey, 1966)

Burada;

k , dalga vektörünü

m_e^* , elektronun etkin kütlelerini

E_g , yasak enerji aralığını göstermektedir.

Çizelge 2.1. Bazı yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı ve etkin kütle değerleri (300°K) (Omar, 1975)

Grup	Kristal	E_g (eV)	Etkin Kütle (elektron)	Etkin Kütle (hol)
IV	C	5.3		
	Si	1.1	$m_l=0.97; m_t=0.19$	0.5; 0.16
	Ge	0.7	$m_l=1.6; m_t=0.08$	0.3; 0.04
III-V	GaAs	1.4	0.07	0.09
	GaP	2.3	0.12	0.50
	GaSb	0.7	0.20	0.39
	InP	1.3	0.07	0.69
	InSb	0.2	0.01	0.18
II-VI	CdS	2.6	0.21	0.80
	CdSe	1.7	0.13	0.45
	CdTe	1.5	0.14	0.37
	ZnS	3.6	0.40	5.41
	ZnSe	2.7	0.10	0.60
	ZnTe	2.3	0.10	0.60
IV-VI	PbS	0.4	0.25	0.25
	PbSe	0.3	0.33	0.34
	PbTe	0.3	0.22	0.29

Burada m_l ve m_t boyuna (longitudinal) ve enine (transverse) etkin kütlelerini göstermektedir.

Valans bandının üst sınırı, sıfır enerji seviyesi seçilmiştir. Bu durumda valans band enerjisi E_v ise

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

ile verilir. Burada; m_h^* , holün etkin kütesini göstermektedir.

Çizelge 2.1'de oda sıcaklığında bazı yarıiletkenlerin bant aralığı ve etkin kütle değerleri verilmiştir.

2.3. Taşıyıcı Yoğunluğu ve Has (Intrinsic) Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerdeki elektron ve hollere genellikle serbest taşıyıcı ya da kısaca taşıyıcı denir. Taşıyıcıların sayısı, yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini belirleyen önemli bir özelliğidir. Taşıyıcıların sayısını belirlemek için basit istatistiksel sonuçlardan yararlanır. Bunlardan biri olan Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1} \quad (2-3)$$

ile verilir.

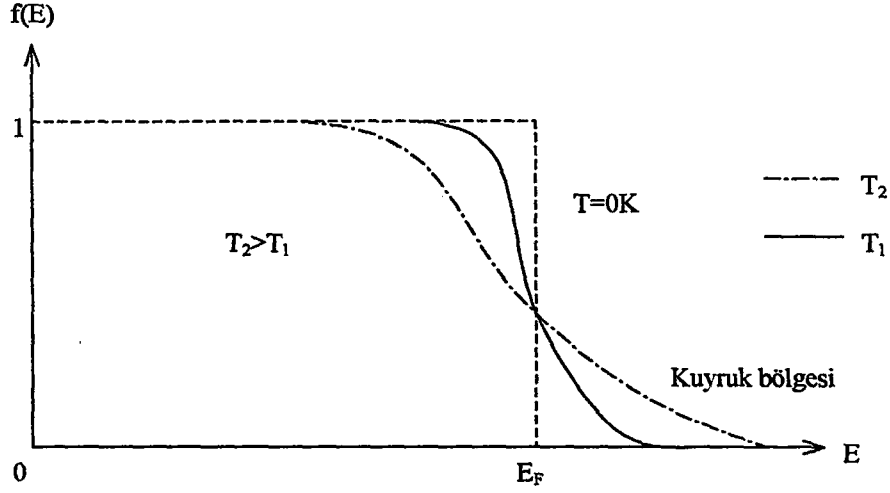
Burada; E_F , Fermi enerji seviyesini

k_B , Boltzmann sabitini göstermektedir.

Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu, sistem T sıcaklığında olduğunda elektronun E enerji seviyesinde bulunma olasılığını verir. Bu fonksiyonun E enerjisine göre değişimi Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

$T \rightarrow 0$ olduğu durumu ele alırsak, $E < E_F$ için $(E-E_F)/k_B T \rightarrow -\infty$ ve $E > E_F$ durumu için de $(E-E_F)/k_B T \rightarrow \infty$ olur. Böylece $f(E < E_F) = 1$ ve $f(E > E_F) = 0$ olur. Bu durum Şekil 2.3'te belirtilmiştir. Buna göre E_F nin altındaki tüm enerji seviyeleri dolu ve E_F nin üstündeki tüm durumlar ise boştur.

$T > 0K$ ve $E = E_F$ durumu için düşünülecek olursa, olasılık $f(E) = 1/2$ olacaktır. Yani olasılık yüzde ellidir.



Şekil 2.3. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu (Omar, 1975)

$(E-E_F) \gg kT$ olması durumunda ise, denklem (2-3) Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonuna dönüşür. Bu fonksiyon

$$f(E) = e^{-\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)} \quad (2-4)$$

bağıntısı ile verilir. Yarıiletkenlerde iletim bandındaki elektronlar ve valans bandındaki holler için bu dağılım fonksiyonu kullanılır.

İletim bandındaki elektronların yoğunluğunu hesaplayalım. $(E, E+dE)$ enerji aralığındaki durumların sayısı $g_e(E)dE$ 'ye eşit olup, burada $g_e(E)$ elektron durum yoğunluğudur. Bu durumların her birindeki bulunma olasılığı $f(E)$ ise; bu enerji aralığında bulunan elektronların sayısı da $f(E)g_e(E)dE$ 'ye eşit olacaktır. Tüm iletim bandındaki elektronların yoğunluğu ise,

$$n = \int_{E_c}^{E_{c1}} f(E)g_e(E)dE \quad (2-5)$$

olur. Burada;

E_c , iletim bandının alt enerji seviyesini

E_{c1} , iletim bandının üst enerji seviyelerini göstermektedir (Şekil 2.4) (Omar, 1975).

Elektron durum yoğunluğu,

$$g_e(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{1/2} \quad (2-6)$$

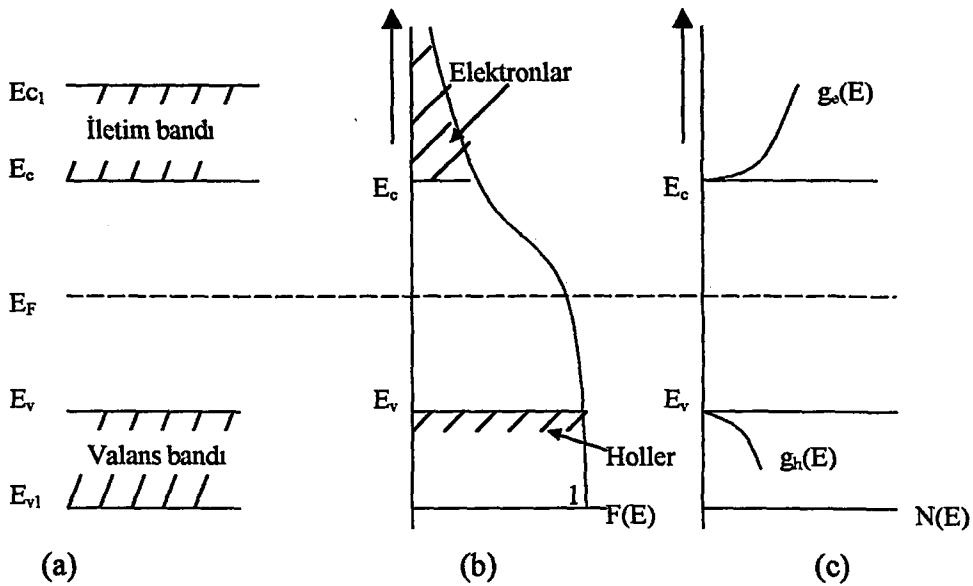
ile verilir. $E < E_g$ olursa, $g_e(E)$ belirsizliğe gider. Ancak, $E_g < E$ ise $g_e(E)$ sonludur.

Valans bandının üst sınırı sıfır enerji kabul edilerek, (2-5) denklemindeki E_c ve E_{c1} sınırları yerine sırasıyla E_g ve ∞ değerlerini kullanarak, (2-6) denklemini (2-5) denkleminde yerine yazarsak,

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{E_F/k_B T} \int_{E_g}^{\infty} (E - E_g)^{1/2} e^{-E/k_B T} dE \quad (2-7)$$

elde edilir ve bu integral sınır değerlerine göre alınırsa, elektron yoğunluğu,

$$n = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g - E_F}{k_B T}} = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{k_B T}} \quad (2-8)$$



Şekil 2.4. a) İletim ve valans bantları
b) Dağılım fonksiyonu
c) Elektron ve hollerin durum yoğunluğu (Omar, 1975)

olarak elde edilir. N_c iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu olarak tanımlanır. Ekspansiyon olmayan terim, ekspansiyonlu terime göre sıcaklıkla daha yavaş bir şekilde değişir (Nag, 1990; Omar, 1975).

Aynı şekilde valans bandında hollerin yoğunluğu ise,

$$p = \int_{E_v}^{E_{v1}} (1 - f(E)) g_v(E) dE \quad (2-9)$$

ile bulunur.

Burada;

$g_v(E)$, hol durum yoğunluğunu,

$g_v(E)dE$, holler için $(E, E+dE)$ enerji bölgesinde durumların sayısını

E_v , valans bandının alt enerji değerini

E_{v1} , valans bandının üst enerji değerini göstermektedir.

Buradan yarıiletkenin valans bandındaki hol yoğunluğu p ,

$$p = 2 \left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_F - E_v}{k_B T}} = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{k_B T}} \quad (2-10)$$

ile verilir (Omar, 1975).

Yarıiletkendeki holler ve elektronlar sadece termal uyarılmayla oluşturuluyorsa böyle yarıiletkenlere has yarıiletken denir. Has yarıiletkende elektron yoğunluğu ile hol yoğunluğu birbirine eşittir. Çünkü, valans bandındaki bir elektron ısı uyarılmayla iletim bandına çıkarsa valans bantta bu elektrona karşılık sadece bir tane hol oluşur. Bu nedenle iletim bandındaki elektron yoğunluğu (n) valans bandındaki hol yoğunluğuna (p) eşit ve çarpımları sabit olup

$$n = p \quad (2-11)$$

$$n.p = n_i^2(T) \quad (2-12)$$

ile verilir. Bu yasaya mass-action yasası denir (Sze, 1981). Burada n_i has yarıiletkenler için taşıyıcı yoğunluğudur. Elektron ve hollerin taşıyıcı yoğunluklarını (2-12) de yerine yazarsak,

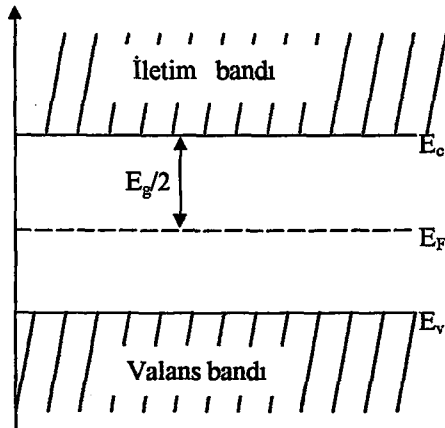
$$n_i(T) = 2 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} \quad (2-13)$$

elde edilir. Verilen bir yarıiletken için yasak enerji aralığı ve etkin kütleler hemen hemen sabit olarak kabul edildiği zaman toplam taşıyıcı yoğunluğu n_i sadece sıcaklığa bağlıdır.

Mutlak sıfır sıcaklıkta bir katının elektronlarının Pauli ilkesine uygun olarak bütün enerji seviyelerini doldurması durumunda en üstteki seviyeye E_F Fermi enerji seviyesi denir. Has bir yarıiletken için elektron ve hol yoğunluğu birbirine eşit olacağından, (2-8) ve (2-10) denklemleri (2-11) denkleminde yerine yazılırsa,

$$E_F = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} k_B T \left(\ln \frac{m_h^*}{m_e^*} \right) \quad (2-14)$$

elde edilir. Denklem sağı tarafındaki ikinci terim birincinin yanında ihmal edilirse, has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi Şekil 2.5'te görüldüğü gibi yasak enerji aralığının ortasında yer alır.



Şekil 2.5. Has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi ($E_v=0$ ve $m_e^* = m_h^*$ kabul edilerek çizilmiştir)

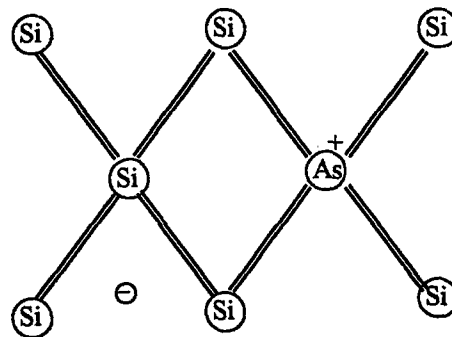
2.4. Katkılı (Extrinsic) Yarıiletkenler

Bir çok uygulamada has yarıiletkenin yanı sıra, sadece bir tek taşıyıcı tipinin etkin olacağı numunelere ihtiyaç vardır. Çünkü, yarıiletken içersine katılan katkı atomları ile elektriksel özelliklerini büyük ölçüde değiştirebiliriz. Bu nedenle katkılama işlemi oldukça önemlidir. Bir yarıiletken uygun katkı elementleri ile katkılıandığında çoğunluk taşıyıcıları ya holler ya da elektronlar olan bir numune elde edilir.

Katkı atomlarının IV. grup elementleri olan silisyum (Si) ve germanyumdaki (Ge) etkilerini inceleyelim. Bu iki element elmas kristal yapısındadır. Silisyumu ele alacak olursak, Si kristalinin her atomu komşu dört atomla kovalent bağlı olup valans elektronu dört tanedir. V. grup elementlerinin (P, As, Sb gibi) valans elektronu beş tanedir. Bu gruptan bir katkı elementi olan arsenik (As) örgünün atomlarından biriyle yer değiştirirse, dört kovalent bağı tamamladıktan sonra geriye bir valans elektronu kalır. Bu elektron bağ yapmaz, ancak çok zayıf bir kuvvetle As atomuna bağlıdır. As atomunun yapıya girmesiyle kristal fazladan bir elektron kazandığı için bu tip yarıiletkenlere n-tipi yarıiletken denir (Kittel, 1996). Şekil 2.6'da Si kristaline As atomunun katkılanması görülmektedir.

Kristale katkılanan atomlara elektron verici anlamında donör ve katkılanan atomların bulunduğu enerji seviyelerine de donör enerji seviyesi denir.

Donörün iyonlaşma enerjisinin hesabı Bohr atom modeli kullanılarak yapılır. Hidrojen atomunun birinci iyonizasyon enerjisi,



T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Şekil 2.6. Silisyum kristaline arsenik atomunun katkılanması (Kittel, 1996)

$$E_H = -\frac{e^4 m_e^*}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} = -13.6 \text{ eV} . \quad (2-15)$$

olarak ifade edilir.

Katkılı bir yarıiletkende, her bir fazladan yapıya giren elektron için bağlanma enerjisi ise

$$E_b = -\frac{13.6}{\epsilon_r^2} \left(\frac{m_e^*}{m_e} \right) \text{ eV} \quad (2-16)$$

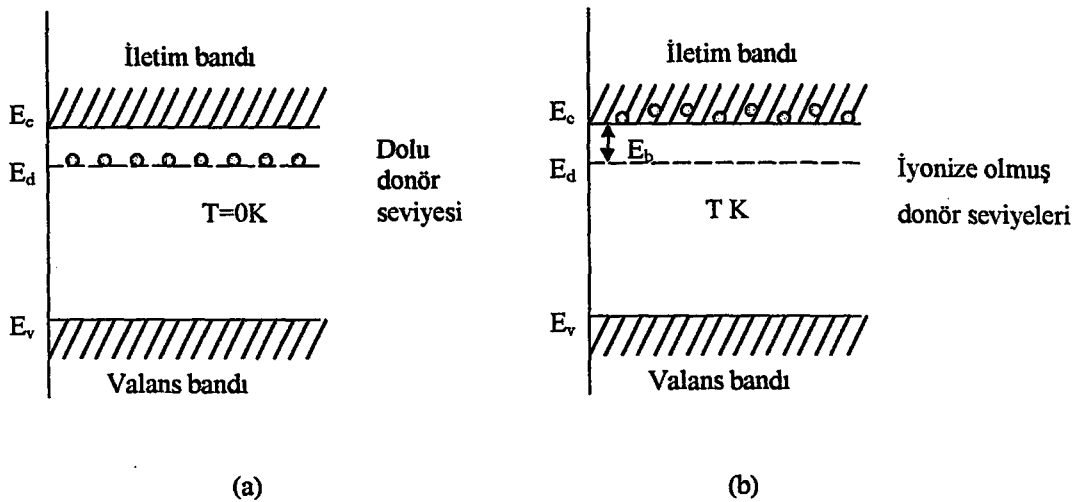
olarak elde edilir.

Burada; m_e , elektronun kütlesini

m_e^* , elektronun etkin kütlesini

ϵ_r , yarıiletkenin bağıl dielektrik sabitini göstermektedir.

Donörün enerji seviyesi, yasak enerji aralığında yer alır ve iletim bandının biraz aşağısında bulunur. Donör elektronları oda sıcaklığında iyonizedir ve iletim bandına çok az bir enerji ile uyarılırlar. Bu enerjiye katkılanan atomun iyonlaşma enerjisi denir (Allison, 1990). Şekil 2.7'de n-tipi bir yarıiletkenin 0K ve yüksek sıcaklıklardaki bant yapısı gösterilmektedir.

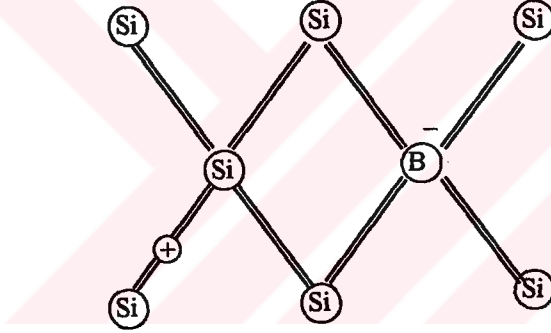


Şekil 2.7. n-tipi bir yarıiletkenin a) 0K'de ve b) yüksek sıcaklıklarda bant yapısı (Allison,1990)

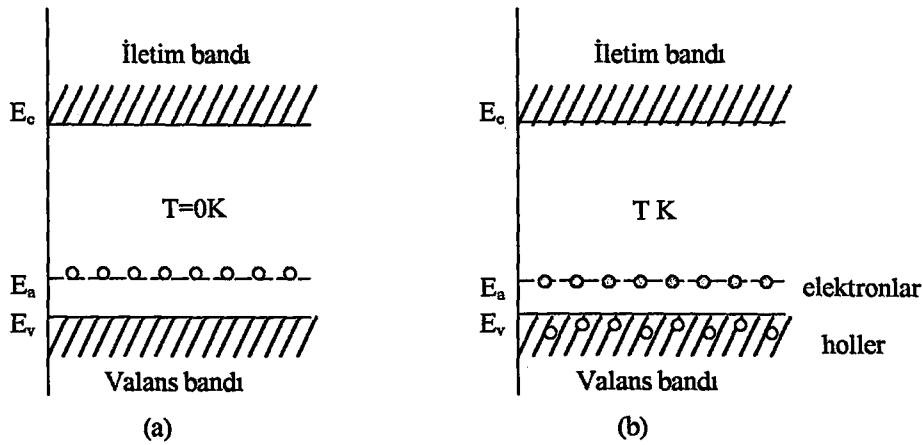
Silisyuma katılan donörlerin iyonizasyon enerjileri, P için 0.045eV, As için 0.049eV ve Sb için ise 0.039eV'tur. Germanyuma katılan donörlerin iyonizasyon enerjileri, P için 0.012eV, As için 0.0127eV ve Sb için ise 0.0096eV tur (Kittel, 1996).

Diğer bir katkı yarıiletken tipi de, IV. grup elementlerinden silisyum ve germanyuma, periyodik tablonun III. grup elementlerinin (B, Al, Ga, In gibi) katılanmasıyla elde edilir. Bu tip yarıiletkenlere de p-tipi yarıiletken denir.

Silisyum kristaline bor (B) atomu katılanması durumunu göz önüne alalım. Bor atomu üç tane valans elektronuna sahiptir ve silisyuma katıldığında elektron bağlarından biri boş kalır (Şekil 2.8). Bu boşluk yani hol bir diğer bağlanmadan kapılan bir elektronla doldurulabilir ve hol bu elektronun yerine geçer. Böylece hol kristal içerisinde hareket eder. Yani çoğunluk taşıyıcıları hollerdir.



Şekil 2.8. Silisyum kristaline bor atomunun katılanması (Kittel, 1996)



Şekil 2.9. p-tipi bir yarıiletkenin (a) 0K'de (b) yüksek sıcaklıklarda bant yapısı (Allison, 1990)

B, Al, Ga ve In gibi üç valanslı katkı atomları, komşu atomlarla kovalent bağı tamamlayabilmek için valans bandından elektron alıp geride bir boşluk bıraktıkları için alıcı anlamında akseptör olarak adlandırılırlar ve buldukları enerji seviyesine de akseptör enerji seviyesi denir. Akseptör seviyeleri Şekil 2.9'da gösterildiği gibi enerji aralığında yer alır ve valans bandına yakındır.

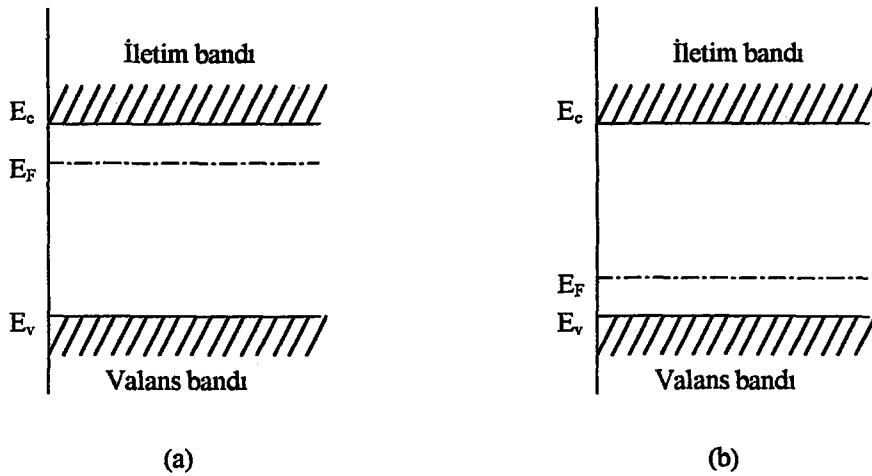
Bir akseptör iyonlaştığında bir boşluğun serbest kalması için enerji verilmesi gerekir. Enerji bant diyagramında görüldüğü gibi bir elektron enerji aldığı anda bandın üst tarafına çıkar, boşluk ise enerji aldığı anda aşağı iner.

Silisyuma katılan akseptörlerin iyonizasyon enerjileri, B için 0.045eV, Al için 0.057eV, Ga için 0.065 ve In için ise 0.157eV'tur. Germanyuma katılan akseptörlerin iyonizasyon enerjileri, B için 0.0104eV, Al için 0.0102eV, Ga için 0.0108 ve In için ise 0.0112eV'tur (Kittel, 1996).

Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi has yarıiletken durumdakinden farklıdır ve yeri katkı atomlarının yoğunluğuna ve cinsine göre değişir. n-tipi yarıiletkende iletim bandına, p-tipi yarıiletkende valans bandına yakındır (Şekil 2.10).

Katkılı yarıiletkenlerde aynı yarıiletken materyal için, n-tipi veya p-tipi olma durumuna göre, taşıyıcı yoğunlukları arasında

$$n_n p_n = n_p p_p = n_i^2 (T) \quad (2-17)$$



Şekil 2.10.a) n-tipi yarıiletkenlerde b) p-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyeleri

bağıntısı vardır. Bu bağıntı belirli bir sıcaklıkta elektron ve hol yoğunluklarının çarpımının sabit ancak, toplamlarının farklı olabileceğini ifade eder. Taşıyıcıların sayıları uygun katkı yapılarak, birbirlerine göre arttırılabilir veya azaltılabilir.

2.5. Mobilite ve Elektriksel İletkenlik

Yarıiletkenlerde sıkça kullanılan önemli bir nicelik ise mobilitedir. Bir yarıiletkene elektrik alan uygulandığında, elektron ve hollerin sürüklenme hızları, elektrik alanın büyüklüğü ile orantılıdır ve bu orantı sabiti mobilitedir. Yani, birim elektrik alan başına düşen yüklü parçacığın sürüklenme hızı mobilite olarak adlandırılır. Yarıiletkenlerdeki elektron ve hol mobiliteleri aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*} = \frac{v_e}{E} \quad (\text{elektronlar için}) \quad (2-18)$$

$$\mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h^*} = \frac{v_h}{E} \quad (\text{holler için}) \quad (2-19)$$

Burada;

τ_e , elektronun yarı ömrünü

τ_h , holün yarı ömrünü

v_e , elektronun sürüklenme hızını

v_h , holün sürüklenme hızını

E , uygulanan elektrik alanı göstermektedir.

Mobilite, yarıiletkenin cinsine, saflığına ve sıcaklığa bağlıdır. İyonize katkı atomlarının ve fononların bulunması, serbest yüklerin ortalama serbest yollarını küçültür ve çarpışma sayısını artırır. Bu durum mobilitenin azalmasına neden olur. Elektronun yarı ömrü büyük ve etkin kütlesi küçük olduğundan mobilitesi büyüktür (Omar, 1975). Çizelge 2.2'de oda sıcaklığında bazı yarıiletkenlerin elektron ve hol mobiliteleri verilmiştir.

Elektriksel iletkenlik, yarıiletkenlerin en ilgi çekici özelliklerinden biridir. Elektrik akımına hem elektronlar hem de holler katkıda bulunurlar. n-tipi bir yarıiletkene elektrik alanı uyguladığımız zaman, elektronlar elektrik alanın tersi yönünde hareket ederek net bir elektrik akımı oluştururlar. Bu elektriksel iletkenlik

$$\sigma_e = \frac{ne^2\tau_e}{m_e^*} \quad (2-20)$$

ile verilir.

Burada, n , elektronların taşıyıcı yoğunluğunu göstermektedir.

Denklem (2-18) ve (2-20) birleştirilirse, iletkenlik,

$$\sigma_e = ne\mu_e \quad (\text{elektronlar için}) \quad (2-21)$$

$$\sigma_h = pe\mu_h \quad (\text{holler için}) \quad (2-22)$$

bulunur. Denklemden de görüldüğü gibi elektriksel iletkenlik, taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite ile orantılıdır.

Elektrik alan uygulanan bir yarıiletkende, elektronların ve hollerin oluşturduğu toplam akım yoğunluğu olan J ,

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_e + \mathbf{J}_h = e(n\mu_e + p\mu_h)\mathbf{E} \quad (2-23)$$

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

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (2-24)$$

şeklinde yazılır. Bu eşitlik (2-23) ile kıyaslandığında, elektriksel iletkenlik,

Çizelge 2.2. Çeşitli yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki mobiliteleri (Omar, 1975; Lide, 1998)

Kristal	Mobilité ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	
	Elektron	Hol
C	1800	1600
Si	1350	475
Ge	3900	1900
GaAs	8500	400
InSb	80000	750
CdS	350	40
CdSe	600	—
CdTe	1200	50
ZnS	180	5 (400°C)
ZnSe	540	28
ZnTe	340	100

$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) \quad (2-25)$$

şeklinde yazılır. Has yarıiletkenler için $n=p=n_i$ olduğundan, (2-25) denklemi yeniden yazılırsa

$$\sigma_i = en_i(\mu_e + \mu_h) \quad (2-26)$$

ve (2-13) denkleminde verilen n_i ifadesi (2-26) denkleminde yerine yazılırsa

$$\sigma_i = 2e(\mu_e + \mu_h) \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} \quad (2-27)$$

elde edilir. Eksponansiyel terimin dışındakiler σ_{oi} ile gösterilirse, has yarıiletken için elektriksel iletkenlik,

$$\sigma_i = \sigma_{oi} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} \quad (2-28)$$

şeklinde bir bağıntı olarak elde edilir.

Katkılı yarıiletkenlerde ise elektriksel iletkenlik

$$\sigma_k = \sigma_{ok} e^{-\frac{E_k}{2k_B T}} \quad (2-29)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada; E_k , katkı atomlarının enerji seviyesini

σ_{ok} , yarıiletkenine bağlı bir sabiti göstermektedir.

Genelde bir yarıiletken için toplam elektriksel iletkenlik σ_t ,

$$\sigma_t = \sigma_{oi} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} + \sigma_{ok} e^{-\frac{E_k}{2k_B T}} \quad (2-30)$$

biçiminde yazılabilir. Yüksek sıcaklıklarda ilk terim etkili olur ve yarıiletken has yarıiletken özelliği taşır. Ancak düşük sıcaklıklarda ikinci terim etkili olur ve katkılı bölgeye geçiş olur.

Bu çalışmada elde edilen filmlerin iletkenlik tipleri pratik bir metot olan sıcak-uç (hot-probe) metodu kullanılarak incelenmiştir. Bu metotta yarıiletkenin yüzeyine aralarında belli bir uzaklık olmak üzere iki metal uç dokundurulur. Uçlardan biri ısıtılır, diğeri ise oda sıcaklığında bırakılır. Böylece yarıiletkenin ısınan bölgesindeki serbest yüklerin kinetik enerjisi artar ve soğuk bölgelere doğru hareket ederler. Isıtılan metal uca voltmetrenin pozitif ucu, diğeri metal uca ise voltmetrenin negatif ucu bağlandığında; voltmetrenin pozitif yönde sapması yarıiletkenin n-tipi olduğunu ve voltmetrenin negatif yönde sapması yarıiletkenin p-tipi olduğunu gösterir (Bar-Lev, 1993). Elde edilen bütün filmlerin iletkenliğinin n-tipi olduğu bu metot uygulanarak bulunmuştur.

3. FİLMLERİN ELDE EDİLMESİ

3.1. Giriş

Yarıiletken filmler farklı yöntemlerle elde edilmektedir. Ekonomik ve kolay bir yöntem olan spray-pyrolysis yöntemi ile ilk filmi elde etme çalışmaları 1940'lı yıllara dayanmaktadır. Mochel 1951 yılında hava yardımıyla SnCl_2 çözeltisini püskürterek SnO_2 filmlerini elde etmiştir. 1960'lı yıllarda Chamberlin ve Skarman spray pyrolysis yöntemiyle CdS filmini elde etmiştir. Bazı yarıiletken filmlerin ışığa duyarlı olması, bunların güneş pili olarak üretilmesini gündeme getirmiş ve de Ma, Fahrenburch ve Bube tarafından spray-pyrolysis yöntemi ile ilk güneş pilleri CdS/CdTe yapılmıştır (Aybek, 1996). 1970 yılından itibaren ise bu yöntemle üçlü, dördü ve beşli yarıiletken filmler elde edilmeye başlanmıştır.

3.2. Spray-Pyrolysis Yöntemi

Spray-pyrolysis yöntemi, kimyasal püskürtme, çözelti püskürtme ya da sıcak püskürtme yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Spray-pyrolysis yöntemi, elde edilecek filmler için hazırlanan sulu çözeltilerin karıştırılarak sıcak taban üzerine hava ya da azot gazı yardımı ile atomize edilerek püskürtülmesidir. Bu yöntemle elde edilen filmler polikristal yapıda oluşmaktadır. Bu yöntemin çok kullanılmasının nedeni basit ve ekonomik bir yöntem olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle spray-pyrolysis yöntemi ile film elde edilmesine ilgi artmaktadır.

Elde edilen filmlerin fiziksel özellikleri değişik parametrelere bağlıdır. Bunlar taban sıcaklığı, püskürtme hızı ve zamanı, taban ile püskürtme başlığı arasındaki mesafe, püskürtme başlığı tarafından püskürtülen çözelti damlacıklarının aerodinamiği, taşıyıcı gaz ve püskürtme işleminden sonraki soğutma hızıdır.

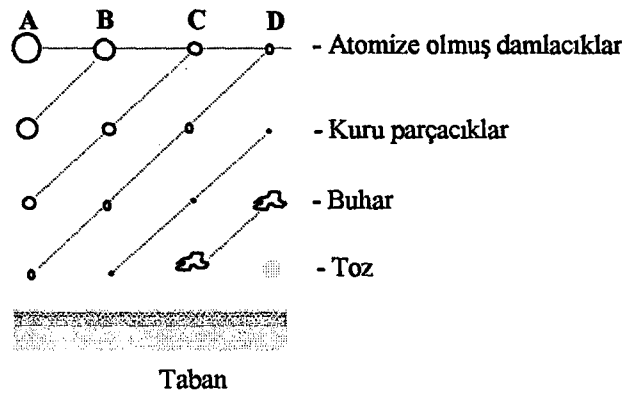
Çözelti damlacıklarının film oluşturacak tabana yaklaştığı zaman tamamen buharlaştırılmış olması ideal taşınma olarak tanımlanır. Bununla beraber damlacıkların oluşumunda uniform bir damlacık boyutu elde edilemeyebilir.

Herhangi bir nedenle damlacığın tabana ulaşamaması onların kütlelerine bağlıdır. Damlacıkların boyutlarının farklı olmasından dolayı farklı depozisyon yöntemleri vardır (Şekil 3.1).

Şekil 3.1'de A sürecinde, çözelti damlacıklarının boyutları oldukça büyüktür. Damlacıkların çevresinden absorpladığı ısı tabana ulaşmaya kadar buharlaşmasına yeterli değildir. Damlacık tabana çarptığında kuru bir çökelti bırakarak buharlaşır ve filmi oluşturacak kimyasal reaksiyon oluşmaz. Damlacığın taban üzerinde belirli bir yere buharlaşması sonucu tabanın sıcaklığı düşer. Böylece yüzeyi pürüzlü ve kötü bir film oluşur.

B sürecinde, çözelti damlacıklarının boyutu A sürecindekiyle göre daha küçüktür ve damlacık tabana ulaşmadan içerisindeki su buharlaşır ve tabana ulaşan damlacıkların bazıları da yoğunlaşır. Damlacıkların buharlaşması için gerekli ısı azdır. Bu süreçte oluşan filmlerin yüzeylerinde delik ve çatlaklar oluşur.

C sürecinde, çözelti damlacıklarının boyutları A ve B sürecindekiyle göre daha küçüktür. En uygun filmler bu süreçte elde edilir. Damlacıklar tabana ulaşmadan önce tamamen buharlaşarak heterojen bir reaksiyon meydana getirir. Bu heterojen reaksiyon olayı, yüzeyde oluşan reaksiyon moleküllerinin tabana difüzyonu, yüzeyde bir veya birden çok molekülün absorbe ve desorbe olması, molekülün örgü içerisinde birleşmesi, tabana ulaşan bazı moleküllerin yüzeyden uzaklaşması gibi fiziksel ve kimyasal olayları içerir.



Şekil 3.1 Damlacık boyutuna bağlı çeşitli depozisyon yöntemleri (Siefert, 1984)

D sürecinde, damlacıkların boyutları öyle küçüktür ki tabandan uzakta tabana ulaşmadan erir ve buharlaşırlar. Moleküller tabana toz halinde tutunduğundan film oluşumunu bozarlar ve bu süreçte de iyi bir film oluşamaz.

Bu süreçlerin hepsinde de polikristal film elde edilir, ancak en ideal film C sürecinde oluşmaktadır.

Spray-pyrolysis yönteminde taban olarak silisyumlu camlar ve metaller kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan metal tabanlar paslanmaz çelik, titanyum, tungsten, alüminyum gibi metallerdir. Ayrıca taban olarak payreks cam, seramik, plastik ve polimerler de kullanılmaktadır.

Spray-pyrolysis yöntemi ile film etmenin diğer yöntemlere göre bazı dezavantajları olmasına karşın; ekonomik ve kolay bir yöntem olmasının yanında elde edilecek filmlerin çözelti olarak hazırlanıp püskürtülmesinden dolayı, çözeltiye istenen miktarda katkı yaparak filmin fiziksel özelliklerini değiştirebilmek gibi avantajları da vardır.

3.3. Spray-Pyrolysis Yöntemi ile In Katkılı CdZnS Filmlerinin Elde Edilmesi

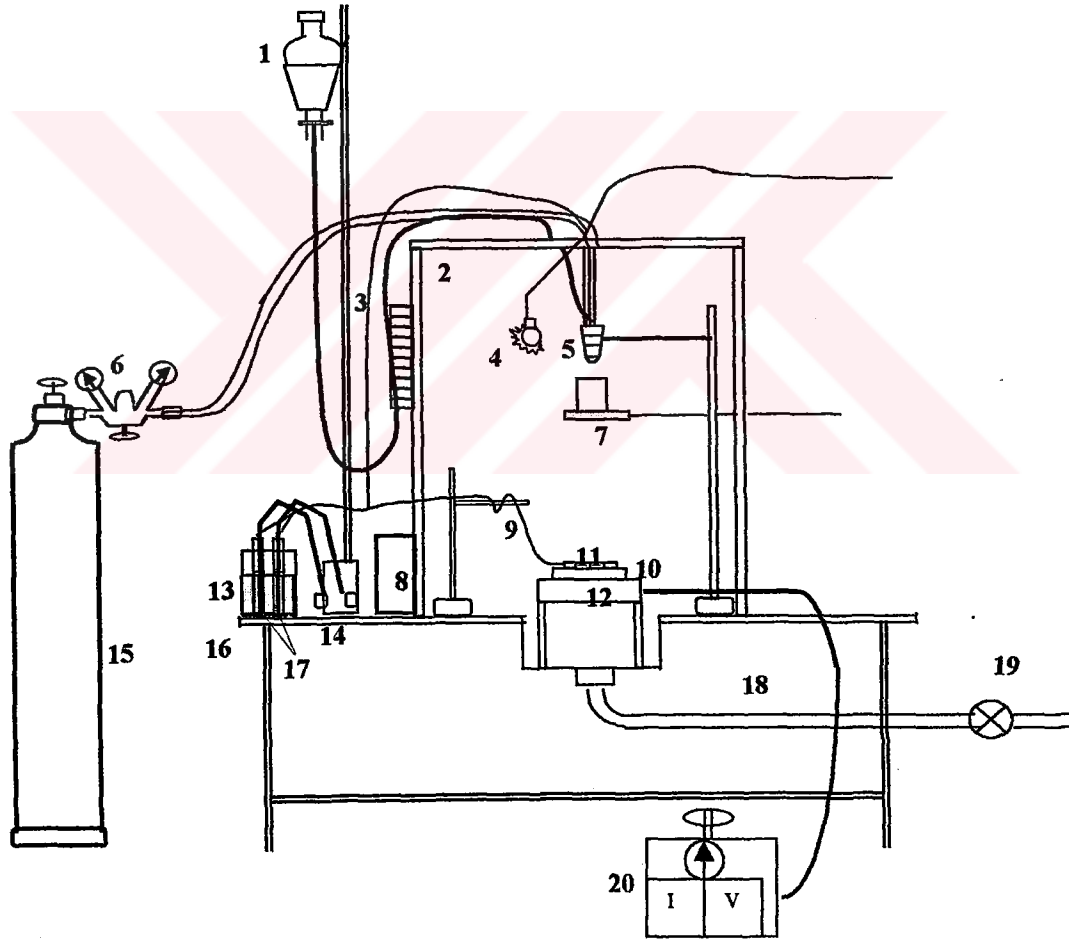
In katkılı CdZnS filmleri Şekil 3.2'de gösterilen spray-pyrolysis deney setinde elde edilmiştir. Burada (1) çözelti kabını, (2) püskürtme odasını, (3) ayarlanabilir flowmetreyi, (4) elektrik lambası, (5) püskürtme başlığını (spray-head), (6) azot gazı ve püskürtme basıncı göstergelerini, (7) püskürtme başlarken ve sona erdiğinde damlaları önleyici sürgülü kabı, (8) spray-head kontrol ünitesini, (9) demir-konstantan termokuplu, (10) bakır bloğu, (11) payreks cam tabanları, (12) ısıtıcıyı, (13) buzlu su kabını, (14) dijital multimetreyi, (15) azot gazı tüpünü, (16) masayı, (17) civalı deney tüplerini, (18) püskürtme odasından dışarı atık gaz çıkışını, (19) vantilatörü ve (20) ayarlanabilir akım kaynağını (varyağı) göstermektedir.

3.3.1. Püskürtme kabini

Şekil 3.2'de görülen püskürtme kabini $80 \times 80 \times 80 \text{cm}^3$ ebatlarında 2cm kalınlığında suntadan yapılmış ve çelik masa üzerine sabitlenmiştir. Ön yüzünde

açılıp kapanabilen bir pencere vardır. Kabinin altında bulunan bir lavabo ve buna bağlanan aspiratör ile püskürtme sırasındaki atık gazlar dışarıya atılmaktadır.

Kabinin üstünden çözelti ve azot gazını taşıyan hortumlar ve elektrik lambasının kablosu için giriş yeri, sol yüzeyinde istenmeyen çözelti damlacıklarını almak için hazırlanan metal bir blok üzerine kesilen kurutma kağıtları için giriş yeri ve termokupl giriş yerleri ve sağ yüzeyinde sürgülü kap ile ısıtıcıya giren elektrik kabloları için giriş yeri bulunmaktadır. Püskürtme odasının içerisinden dışarıya ısı kaybını önlemek için kabinin içi alüminyum folyo ile kaplanmıştır.



Şekil 3.2. Spray-pyrolysis deney seti

3.3.2. Isıtıcı ve sıcaklık kontrolü

Isıtıcı olarak muhafazalı direnç teli ve 5kW'lık ayarlanabilen bir varyak kullanılmıştır. Direnç telini muhafaza etmek için ytong bloklar kullanılmıştır. Cam tabanlara ısı transferini sağlamak için 15x15x1,5 cm³ ebadında yüzeyi düz bakır blok direnç teli üzerine yerleştirilmiştir. Ytongların arası ısı kaybını önlemek için direnç telinin şekline göre biçimlendirilmiştir.

Cam tabanlar üzerindeki sıcaklığını ölçmek için Eskord EDM-1341 model Digital Multimeter bağlanmış ve demir-konstantan termokupl kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için demir-konstantanın gerilim sıcaklık tablosundan yararlanılmış ve 0°C referans sıcaklığı buzlu su ve civadan oluşan bir sistemle sağlanmıştır.

3.3.3. Püskürtme başlığı (spray-head)

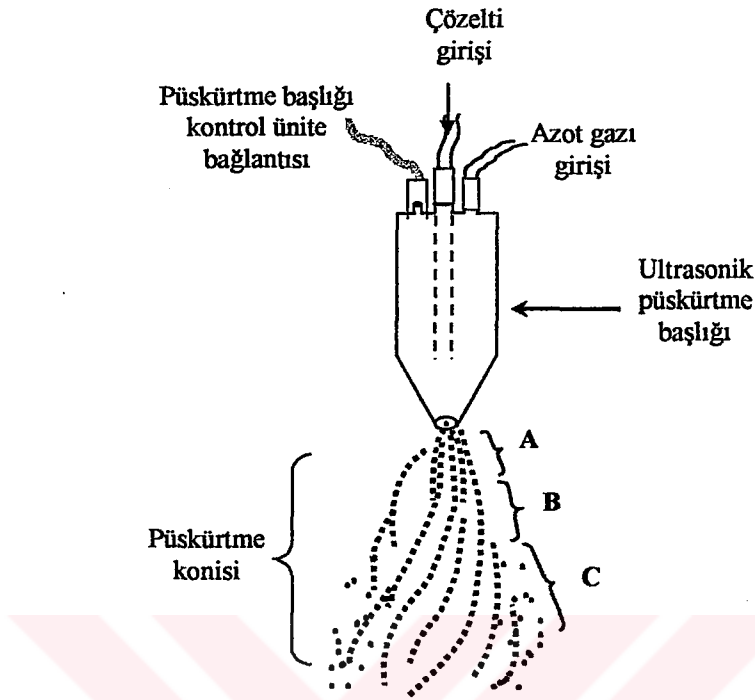
Püskürtme başlığı, püskürtülecek çözeltiyi atomize etmek için kullanılır. Püskürtme işlemi sırasında püskürtme gazının yardımıyla, püskürtme başlığının ucunda oluşan vakumla, çözeltinin atomize edilmesini sağlar. Spray-pyrolysis yönteminde, püskürtme işlemi payreks camdan veya paslanmaz çelikten yapılmış püskürtme başlığı ile yapılmaktadır. Şekil 3.3'te paslanmaz çelikten yapılmış Lechler Ultrasonik Atomizer US1 marka püskürtme başlığı ve aerodinamiği gösterilmiştir. Deneyde taşıyıcı gaz olarak azot gazı kullanılmıştır.

Damlacıklar tabana ulaşınca kadar değişik safhalardan geçer. Bu safhalar Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

A bölgesinde, çözelti azot gazı tarafından ivme kazandırılır. Akış girdaplı ve koni şeklindedir. Damlacıklar sıkışık halde bulunurlar.

B sürecinde, azot gazı girdaplı akış yapan çözeltiyi kesme kuvvetleri uygular ve sonuçta atomize damlacıklar oluşur. Damlacıkların hızı, A bölgesindekilere göre düşüktür.

C bölgesi tabana daha çok yakındır. Bu yüzden istenmeyen bir durum ortaya çıkarmaktadır. Bu bölgenin oluşumu, püskürtücü ucundaki aşınma veya çözeltilerin bıraktığı tortulardan kaynaklanmaktadır. Böylece, bunların oluşumu



Şekil 3.3. Spray-pyrolysis yönteminde kullanılan ultrasonik püskürtme başlığı (ultrasonic spray-head) ile püskürtme konisinin şematik gösterimi

neticesinde, bu bölgede, akış bozulmaktadır ve düşük hızlı damlacıklar görülmektedir (Zor,1982). Bu nedenle çözeltinin akıtıldığı hortumda ve püskürtme başlığında oluşan tortuları önlemek için, her püskürtme sonunda, çözeltinin akıtıldığı hortum ve püskürtme başlığı, saf su geçirilerek temizlenmelidir. Bu bölgedeki damlacıkların hızı A ve B bölgelerindeki damlacıkların hızlarından daha düşüktür. Bu nedenle, çözelti geniş bir yüzeye dağılmaktadır ve daha küçük parçalara ayrılmaktadır.

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

Filmler elde edilirken püskürtme başlığı ile sıcak taban arasındaki mesafe 28 cm olarak seçilmiştir.

3.3.4. Püskürtme basıncı

Çözeltinin atomize edilmesini sağlayan basıncı 0.2kgcm^{-2} olan azot (N_2) gazıdır. Azot gazı basıncı, azot tüpü üzerinde bağlantılı ve el ile kontrol edilebilen $(0-1)\text{kgcm}^{-2}$ aralıklı bir manometre yardımı ile istenilen değerde sabit tutulmuştur. Azot gazı miktarı da, azot tüpü ile bağlantılı olan $(0-300)\text{kgcm}^{-2}$ aralıklı diğer bir manometreden kontrol edilmiştir. Basınç değerlerinin artırılması cam tabanların hızlı soğumasına, azaltılması da bozuk film oluşumuna sebep olmaktadır.

3.3.5. Çözelti akış hızı

Çözelti akış hızı elde edilecek filmlerin kalitesi açısından oldukça önemlidir. Püskürtülecek çözeltilerin akış hızları, deneme yanılma yolu ile belirlenmiştir. Çözelti akış hızlarının artırılması gözenekli filmlerin oluşmasına ve azaltılması ise enerji ve zaman kaybına neden olmuştur. Kullanılan spray-pyrolysis deney setinde çözelti akış hızını istediğimiz değerde tutan bir flowmetre kullanılmıştır. En uygun akış hızı ise yapılan denemeler sonucunda 3.57 mldak^{-1} olarak seçilmiştir.

3.3.6. Çözeltilerin hazırlanması

Filmlerin içerisinde bulunması istenilen Cd, Zn, S ve In elementlerini içeren bileşiklerin kimyasal tuzları, deiyonize su içerisinde ayrı ayrı çözülerek belirli molaritelerde çözeltiler hazırlanmıştır.

Her çözelti hazırlanırken homojenliği sağlamak için bileşikler ilk önce 50ml deiyonize su içerisinde karıştırıcıda karıştırılarak çözülmüşlerdir. Daha sonra çözelti 950ml deiyonize su ilavesiyle 1000ml'ye tamamlanmıştır. Hazırlanan çözeltiler ayrı ayrı temizlenmiş cam şişelere süzgeç kağıdından süzülerek konulmuştur.

i) CdCl₂.H₂O çözeltisinin hazırlanması

Kadmiyum (Cd) kaynağı olarak formül tartısı 201.32 g mol⁻¹ olan CdCl₂.H₂O tuzu kullanılmıştır. %98'lik CdCl₂.H₂O tuzu suda kolay çözünen bir bileşiktir. Çözelti 0.05M konsantrasyonunda ve 1000ml'lik deiyonize su içerisinde 10.0660g CdCl₂.H₂O tuzu çözülerek hazırlanmıştır.

ii) ZnCl₂ çözeltisinin hazırlanması

Çinko (Zn) kaynağı olarak ZnCl₂ tuzu kullanılmıştır. %98'lik ZnCl₂ tuzunun formül tartısı 136.28 g mol⁻¹ olup, suda kolay çözünen bir bileşiktir. Çözelti 0.05M konsantrasyonunda ve 1000ml'lik deiyonize su içerisinde 6.8140g ZnCl₂ tuzu çözülerek hazırlanmıştır.

iii) H₂NCSNH₂ (thiourea) çözeltisinin hazırlanması

Sülfür (S) kaynağı olarak H₂NCSNH₂ tuzu kullanılmıştır. %99'lük H₂NCSNH₂ tuzunun formül tartısı 76.11g mol⁻¹ olup, suda kolay çözünen bir bileşiktir. Çözelti 0.05M konsantrasyonunda ve 1000ml'lik deiyonize su içerisinde 3.8055g (NH₂)₂CS tuzu çözülerek hazırlanmıştır.

iv) InCl₃ çözeltisinin hazırlanması

İndiyum (In) kaynağı olarak %100'lük InCl₃ tuzu kullanılmıştır. InCl₃ tuzunun formül tartısı 221.19g mol⁻¹ olup, sıcak suda kolay çözünen bir bileşiktir. Çözelti 0.01M konsantrasyonunda ve 1000ml'lik deiyonize su içerisinde 2.2119g InCl₃ tuzu çözülerek hazırlanmıştır.

In katkılı CdZnS filmlerini elde etmek için hazırlanan çözeltilerden uygun hacimlerde alınarak karıştırılmıştır. Örneğin 240ml Cd_{0.5}Zn_{0.5}S sulu çözeltisi hazırlamak için; 0.05M CdCl₂.H₂O sulu çözeltisinden 60ml, 0.05M ZnCl₂ sulu çözeltisinden 60ml ve 0.05M (NH₂)₂C sulu çözeltisinden 120ml alınarak bir beherde karıştırılmıştır. Bu çözeltilere örneğin %1 oranında In katkılamak için ise hazırlanan bu 240ml Cd_{0.5}Zn_{0.5}S sulu çözeltisine 0.01M InCl₃ sulu çözeltisinden 12ml ilave edilmiştir.

Hazırlanan çözeltilerde renk değişimi veya çökeltinin olup olmadığına bakmak için, istenen konsantrasyon oranında karıştırılan çözelti bir cam şişede bir

gün bekletilmiştir. Çözeltilerin hiçbirinde herhangi bir değişim gözlenmediğinden, çözeltiler püskürtmeye hazır hale getirilmiştir.

3.4. Deneyin Yapılışı

Çeşitli kullanımlar için elde edilecek filmler için, $11 \times 26 \text{ mm}^2$ ve $11 \times 6 \text{ mm}^2$ ebatlarında düzgün olarak kesilmiş olan 1 mm kalınlığında Objektträger marka mikroskop lamaları taban olarak kullanılmıştır. Bu camlar önce sabunlu saf su ile kaynatılmış ve daha sonra saf su ile durulanıp alkolden geçirilerek temizlenmiştir. Temizlenen cam tabanlar daha sonra kullanılmak üzere petri kaplarına yerleştirilmiştir.

Her püskürtme işleminden önce cam tabanların konulduğu bakır blok temizlenmiştir. Bakır blok yerine yerleştirildikten sonra püskürtme başlığı ile taban arasındaki mesafe istenilen değere ayarlanmış ve bir şakül yardımı ile merkezlenmiştir. Bu ayarlama tamamlanınca bakır blok üzerine temizlenmiş camlar merkezde olacak şekilde düzgün ve aralıksız olarak dizilmişlerdir.

Sıcaklık kontrolü için cam ile demir-konstantan termokupl arasına sıcaklık temasını sağlamak için indiyum konulmuştur. Termokuplun ucunu püskürtme başlığından sıçrayacak çözelti parçacıklarından korumak için, yüzeyi ısıya dayanıklı olan yanmaz teflon bant ile kapatılmıştır. Püskürtülen çözeltinin termokupla sıçrayarak ani sıcaklık değişimlerine neden olup, gerçek taban sıcaklığının okunmasına engel olacağı düşünülerek; teflon bandı örtecek şekilde büyük bir mikroskop camı yerleştirilmiştir.

Püskürtme öncesinde püskürtme başlığının ucundan çözelti damlacıklarının cam tabanlara düşmesini önlemek için sürgülü kap püskürtme başlığının tam altına gelecek şekilde sürülmüştür. Bu işlemler bittikten sonra püskürtme odasının penceresi kapatılarak sistem deney için hazır hale getirilmiştir. Önceden ayrı ayrı hazırlanmış olan çözeltilerden belli hacimlerde alınarak ayırma hunisinde karıştırılmış ve ayırma hunisi püskürtme kabininden daha yüksek bir konuma yerleştirilmiştir.

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 termokuplun referans uçları civa ile temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu deney tüplerinden bir başka kablo da dijital multimetreye bağlanmıştır.

Bütün hazırlıklar tamamlandıktan sonra ısıtıcının anahtarı açılıp, sıcaklık multimetreden kontrol edilmeye başlanmıştır. Cam tabanların sıcaklığı istenilen sıcaklığa ulaşınca kadar ısıtma işlemine devam edilmiştir. Taban sıcaklığı istenilen değerden yaklaşık 30°C daha yüksek bir değere getirilmiştir. Çünkü ilk püskürtme anında, püskürtülen çözeltilerin sıcaklığı taban sıcaklığından küçük olduğundan tabanda ani sıcaklık düşmeleri olmaktadır. Püskürtme işlemi süresince sıcaklık, varyak yardımı ile dengede tutulmaya çalışılmıştır. Ancak $\pm 5^\circ\text{C}$ 'lik sapmalara engel olunamamıştır.

İstenilen sıcaklık değerine ulaşıldıktan sonra azot gazının basıncı 0.2kgcm^{-2} değerine ayarlanmış ve çözeltiler çıkış anahtarı açılıp çözeltiler akış hızı flowmetreden 3.57mldak^{-1} değerine getirilmiştir. Püskürtme başlığı altındaki sürgülü kap geri çekilerek deneye başlanmıştır. Püskürtme boyunca atık gazların dışarı atılabilmesi için aspiratör açık tutulmuştur.

Püskürtme işlemi boyunca azot gazı basıncı, çözeltiler 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, ısıtıcı devre dışı bırakılıp, sürgülü kap püskürtme başlığının altına getirilmiştir. Sonra azot gazı ve çözeltilerin anahtarı kapatılmıştır. Bu halde elde edilen filmler birkaç saat soğumaya bırakılmıştır. Soğuma sırasında da atık gazların dışarı çıkması için aspiratör bir müddet açık bırakılmıştır.

Soğuma işlemi bittikten sonra elde edilen filmlerden homojen görümlü olanlar seçilip, üzerlerine metal elektrot kaplanmak üzere petri kaplarına konulmuştur.

CdZnS filmleri $250 \pm 5^\circ\text{C}$, $275 \pm 5^\circ\text{C}$ ve $300 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklıklarında elde edilmiştir. Ancak elde edilen filmler için uygun taban sıcaklığı $275 \pm 5^\circ\text{C}$ seçilmiştir ve %0.2, %0.5, %1, %2'lik indiyum katkı değerlerinde üretilen filmler ise $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilmişlerdir.

3.5. Elde Edilen Filmlerin Kalınlıkları

Cam tabanlar üzerinde elde edilen filmlerinin kalınlıkları tartı metodu ile bulunmuştur. Tartım işlemi maksimum 210gr tartabilen 0.1mg hassasiyetli AND HM-200 model elektronik terazi ile yapılmıştır. İlk olarak filmler cam taban ile tartılmış ve daha sonra cam taban üzerindeki film nitrik asitte tamamen çözüldükten sonra cam taban saf sudan geçirilmiştir. Boş ve temiz olan cam tabanlar tekrar tartılmıştır. İki tartı arasındaki fark cam taban üzerinde oluşan filmin kütlesini vermektedir. Filmlerin kalınlıkları

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

formülü ile bulunmuştur. Burada;

Δm : filmin kütlesini,

ρ_f : filmin yoğunluğunu,

s: cam tabanın yüzey alanını göstermektedir.

Elde edilen filmlerin kalınlıkları Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge.3.1. Filmlerin elde edilme özellikleri ve kalınlıkları

Materyal	Taban sıcaklığı (°C)	Azot gazı basıncı (kg/cm ²)	Çözelti akış hızı (ml/dk)	Püskürtme yüksekliği (cm)	Püskürtme süresi (dk)	Filmlerin kalınlıkları (µm)
CdZnS	250 ± 5	0.2	3.57	28	60	6.10
CdZnS	275 ± 5	0.2	3.57	28	45	7.21
CdZnS	300 ± 5	0.2	3.57	28	35	4.14
%0.2 In katkılı CdZnS	275 ± 5	0.2	3.57	28	45	2.88
%0.5 In katkılı CdZnS	275 ± 5	0.2	3.57	28	45	3.21
%1 In katkılı CdZnS	275 ± 5	0.2	3.57	28	45	3.46
%2 In katkılı CdZnS	275 ± 5	0.2	3.57	28	45	4.41

Gerekli görülen bazı bölümlerin sonuna, bölümlerin bütünlüğünü sağlamak ve konuyu daha iyi anlamak için ayrı bir alt başlık altında bölüm ile ilgili tartışma eklenmiştir.

3.6. Bölüm ile İlgili Tartışma

Bütün çözelti karışımları $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ olarak hazırlanıp filmler elde edilmiştir. Ancak 4.Bölümde ayrıntılı olarak bahsedileceği üzere x-ışınları kırınım desenlerinden bütün filmlerin $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ yapısında olduğu görülmüştür. Bu nedenle elde edilen filmler ile ilgili bütün hesaplamalarda x-ışınları kırınım desenleri sonuçları dikkate alınarak $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ oranı kullanılmıştır. Ancak indiyum katkılı filmler ile ilgili olarak x-ışınları kırınım desenlerinde indiyum ile ilgili herhangi bir pike rastlanılmamış ve indiyum katkılı filmler çözelti karışım oranı olan %0.2, %0.5, %1 ve %2 olarak alınmıştır.

Çizelge 3.1’de verilen film kalınlıklarının hesaplanması için gerekli olan film yoğunluk değeri $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ film yapısına göre yapılmıştır. Bunun için CdS bileşiğinin yoğunluğu $4.82gcm^{-3}$ ve ZnS bileşiğinin yoğunluğu ise $3.98gcm^{-3}$ olarak alınmış ve In katkısının film yoğunluğuna etkisi ihmal edilerek $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin yoğunlukları $4.16gcm^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Böylece filmlerin kalınlıkları hesaplanırken, film yoğunluğu $4.16gcm^{-3}$ olarak alınmıştır.

4. X-IŞINI KIRINIM DESENLERİ

4.1. Giriş

Üç boyutlu uzayda periyodik olarak tekrarlanan bir desenin atomlarından meydana gelmiş bir katı olarak tarif edilebilen kristal yapı, materyali oluşturan atom, atom grupları ve moleküllerin üç boyutlu uzayda belirli bir geometrik düzende sıralanarak bir araya gelmesi ile oluşur.

Kristal katıların yapısı hakkındaki bilgiler, numunenin dış görünüşünün makroskopik veya mikroskopik incelenmesi ile elde edilir. Görünür ışığın dalga boyu, kristalin atom ve molekülleri arasındaki boşluklarla kıyaslandığında oldukça büyük olduğundan, numunenin yüzeyini görünür ışıkla aydınlatılarak yapı hakkında bilgi elde edilemez. Materyale gönderilen ışığın dalga boyunun kristal içindeki boşluklarla aynı boyutta olması kristal hakkında bilgi elde etmeyi kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle dalga boyları atomik boyutla kıyaslanabilecek kadar küçük olan x-ışınları kullanılmaktadır.

İlk olarak Max von Laue 1912 yılında bir kristali x-ışınları kullanarak incelemiştir. Dalga boyu x-ışının dalga boyu kadar küçük olan nötronlar veya elektronlar kullanılarak da kristalin yapısı hakkında bilgi sahibi olunabilir. Fakat en fazla kullanılan yöntem x-ışını kırınım desenleridir (Blakemore, 1969).

4.2. X-Işını Kırınımı

Materyallerin kristal yapıları ile ilgili çalışmalarda x-ışınlarının kırınımından yararlanılmaktadır. Bir x-ışınının enerjisi, dalga boyu ile ters orantılıdır ve enerjisi $E=hc/\lambda$ 'dır. Dalga boyu ise 0.1Å ile 100Å arasında değişir. Kristal çalışmalarında 0.2 Å ile 2.5 Å arasındaki dalga boylu x-ışınları kullanılır. Bu çalışmada dalga boyu 1.54 Å olan $Cu_{K\alpha}$ olan tek dalga boylu x-ışınları kullanılmıştır.

X-ışınlarının kristalde kırınıma uğraması için belirli geometrik şartların gerçekleşmesi gerekmektedir. Bir kristale x-ışını gönderildiği zaman, kristaldeki atomlara ait elektronlar aynı frekansta titreşmeye zorlanırlar. Böylece, kristaldeki

elektronlar, her yönde aynı dalga boyunda ışın yayınlılar. Kristaldeki her atomun bütün elektronları, x-ışınlarının saçılmasına katkıda bulunurlar ve küresel dalga şeklinde aynı faz ile aynı frekansta ışımaya yaparlar. Aynı frekansta ışımaya yapan bu örgü noktalarındaki atomlar birer kaynak gibi davranırlar. Bu ışımalar bazı yönlerde birbirlerini kuvvetlendirirken bazı yönlerde ise zayıflatırlar. Yani, bu ışımalar kuvvetlendirici ve zayıflatıcı girişim yaparlar. Girişim ile kuvvetlenmiş ışınlar, fotoğraf filmi üzerinde desen oluştururlar.

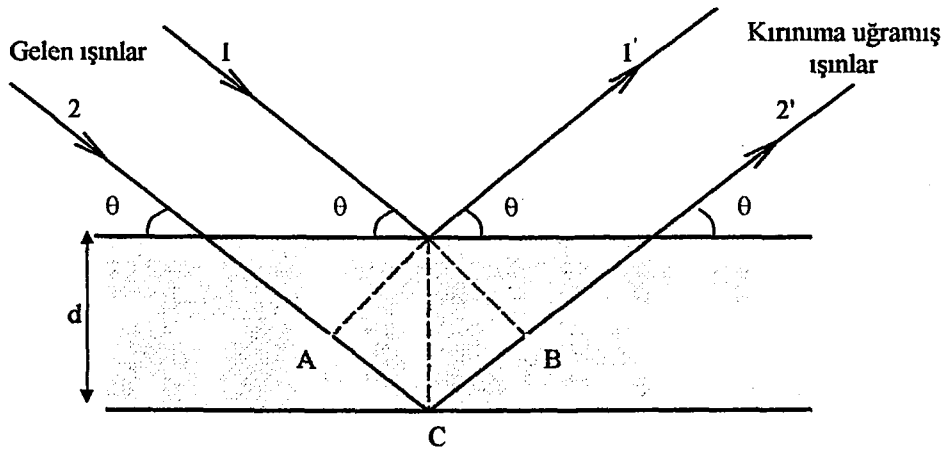
Kristal yapının incelenmesinde Bragg yasasından yararlanılır. Kristalin paralel düzlemlerine θ açısı yaparak gelen tek dalga boylu x-ışınlarının kırılmadığı kabul edilirse, kristale giren x-ışınları Şekil 4.1'de gösterildiği gibi düzlemlerden θ açısı yaparak yansıyacaktır.

Bu ışınlar yol farkından dolayı birbirlerini kuvvetlendirici veya zayıflatıcı yönde etkilerler. Girişim kuvvetlendirici ise 1 nolu ve 2 nolu ışınlar arasındaki yol farkı, dalga boylarının tam katlarına eşit olmalıdır.

$$\text{Yol Farkı} = \overline{AC} + \overline{CB} = d \sin \theta + d \sin \theta \quad (4-1)$$

ile verilir. Yani,

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



Şekil 4.1. X-ışınlarının kristal tarafından kırınım uğratılması

olur. Bu eşitlik Bragg yasası olarak bilinir.

Burada;

d , kristal düzlemleri arası uzaklığı,

n' , tam sayıyı

λ , ışının dalga boyunu göstermektedir.

X-ışınları kristalografisinde genellikle $n'=1$ alınır. Çünkü kırınımına uğrayan ışının şiddeti hızla azalmaktadır.

X-ışını kırınım verileri çeşitli yöntemler kullanılarak belirlenir. Bu yöntemler arasındaki farklılıklar, kullanılan numune ve ışıktan kaynaklanmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan toz yönteminde, toz haline getirilmiş kristal örnekleri pek çok sayıda olacak şekilde bir arada toplanır. Sonra üzerlerine belirli bir doğrultudan tek dalga boyulu x-ışını demeti düşürülür. Bragg açısı değişkendir (Kul,1996; Köksal ve ark., 1999). Bu çalışmada, toz yöntemi kullanılarak x-ışını kırınım desenleri elde edilmiştir.

4.3. In Katkılı CdZnS Filmlerinin X-ışını Kırınım Desenleri

In katkılı CdZnS filmlerinin x-ışını kırınım desenleri Rigaku X-Ray Spektrophotometresinde $\lambda=1.54\text{\AA}$ dalga boyulu $\text{Cu}_{K\alpha}$ ışını kullanılarak $20^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ sınır değerlerinde incelenmiştir. Bu desenlerin incelenmesi ile filmlerin yapısı hakkında bilgi elde edilebilir.

Filmlerin kırınım desenleri incelendiğinde pik şiddetleri ve genişlikleri filmler arasında farklılıklar ortaya çıkarmaktadır. Şiddetleri büyük ve genişlikleri küçük olan pikler kristallenmenin iyi, şiddetleri küçük ve genişlikleri büyük olan pikler kristallenmenin iyi olmadığını göstermektedir.

Şekil 4.2'de $250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında, Şekil 4.3'te $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında, Şekil 4.4'te $300 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen CdZnS filminin x-ışını kırınım desenleri görülmektedir. $250 \pm 5^\circ\text{C}$ ve $300 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen aynı yapıdaki filme göre, $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen filmlerin pik genişliklerinin az olması bu sıcaklıkta kristallenmenin iyi olduğu anlamına gelmektedir. Bu yüzden In katkılı diğer filmler $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilmiştir. Kırınım deseninden bu filmin polikristal yapıda

olduğu belirlenmiştir ve hegzagonal yapıda $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ bileşiğine ait pikler tespit edilmiştir.

Şekil 4.5 $275 \pm 5^\circ C$ taban sıcaklığında elde edilen %0.2 In katkılı CdZnS filminin x-ışını kırınım desenini, Şekil 4.6 $275 \pm 5^\circ C$ taban sıcaklığında elde edilen %0.5 In katkılı CdZnS filminin x-ışını kırınım desenini, Şekil 4.7 $275 \pm 5^\circ C$ taban sıcaklığında elde edilen %1 In katkılı CdZnS filminin x-ışını kırınım desenini ve Şekil 4.8 $275 \pm 5^\circ C$ taban sıcaklığında elde edilen %2 In katkılı CdZnS filminin x-ışını kırınım desenini göstermektedir. Kırınım desenlerinden bu filmlerin polikristal yapıda olduğu belirlenmiştir ve hegzagonal yapıda $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ bileşiğine ait pikler tespit edilmiştir. Bu yapıda indiyum ile ilgili hiç bir pike rastlanmamıştır.

4.4. Bölüm ile İlgili Tartışma

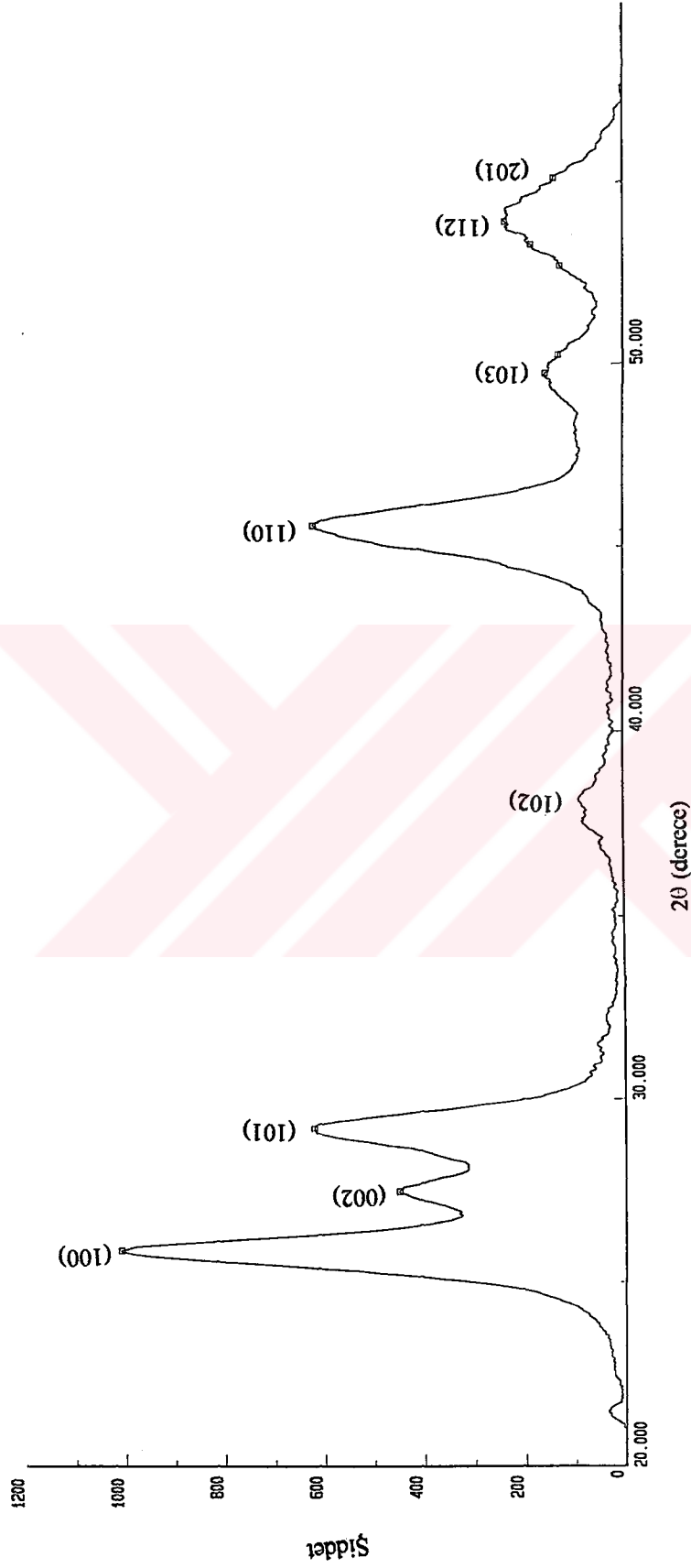
Çözeltilerin $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ olarak hazırlanması sonucu elde edilen bütün filmlerde kristal yapının $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ olarak karşımıza çıkması oldukça ilginçtir ve bundan sonraki bölümlerde bileşik hegzagonal yapıda $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ olarak ele alınacaktır. Yapılan bir çalışmada, ZnS oranının %70'e kadar olan oranla elde edilen $Cd_{1-x}Zn_xS$ filmlerinin hegzagonal yapıda ve ZnS oranının %80'den fazla oranla elde edilen $Cd_{1-x}Zn_xS$ filmlerinin kübik yapıda olduğu tespit edilmiştir (Agnihotri ve Gupta, 1979). Ayrıca $Zn_xCd_{1-x}S$ yarıiletken bileşiği için, $x > 0.85$ değerlerinden sonra hegzagonal yapıdan kübik yapıya geçiş olduğu belirtilmiştir (Brinkman, 1988).

$Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmi üç farklı taban sıcaklığında elde edilmiş ve en uygun taban sıcaklığı $275 \pm 5^\circ C$ olarak tespit edilmiştir. Bu taban sıcaklığında elde edilen filme ait x-ışınları kırınım deseni pikleri oldukça dardır. Diğer taban sıcaklığındaki filmlere ait pikler ise daha yayvandır.

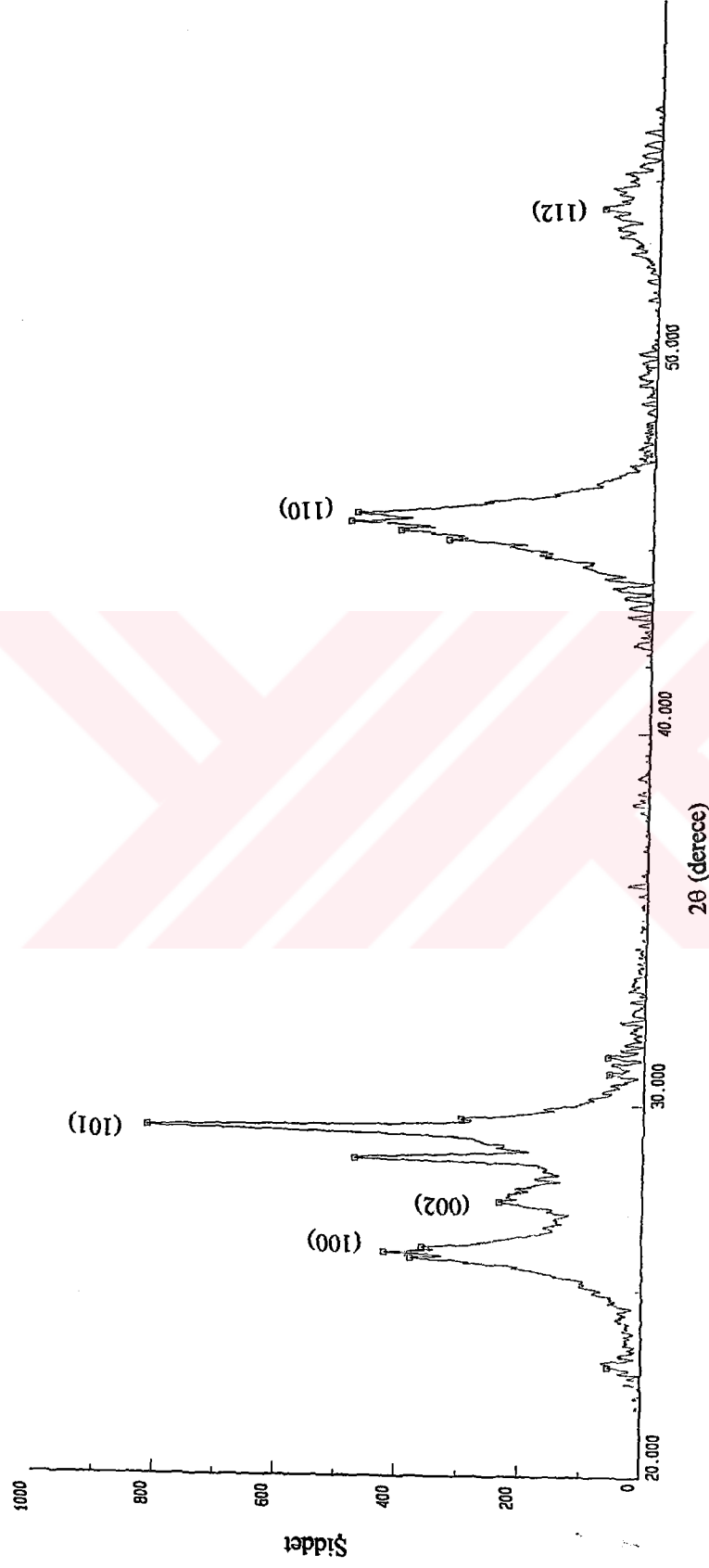
In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin x-ışını kırınım desenlerinin hemen hemen hepsinde aynı derecelerde aynı piklere rastlanılmıştır. Bu piklerden bazıları şiddetli bazıları ise zayıftır. Ancak dikkat çeken nokta, indiyum katkılı bileşiklerde indiyum ile ilgili herhangi bir pike rastlanmamasına karşın, piklerin indiyum katkısı arttıkça sola doğru yani küçük açığa kaymalarıdır. Bunun

nedenin bileşik içersindeki indiyumdan kaynaklandığı; çinko, kadmiyum ve kükürte göre büyük çaplı olan indiyum atomlarının katkının artmasıyla beraber düzlemler arası mesafenin de artmasının küçük açılara kayma ile sonuçlanacağı düşünülmektedir. In katkı oranları çözeltiye olan katkı oranlarını göstermektedir. X-ışınlarından bu oran belirlenememiştir.

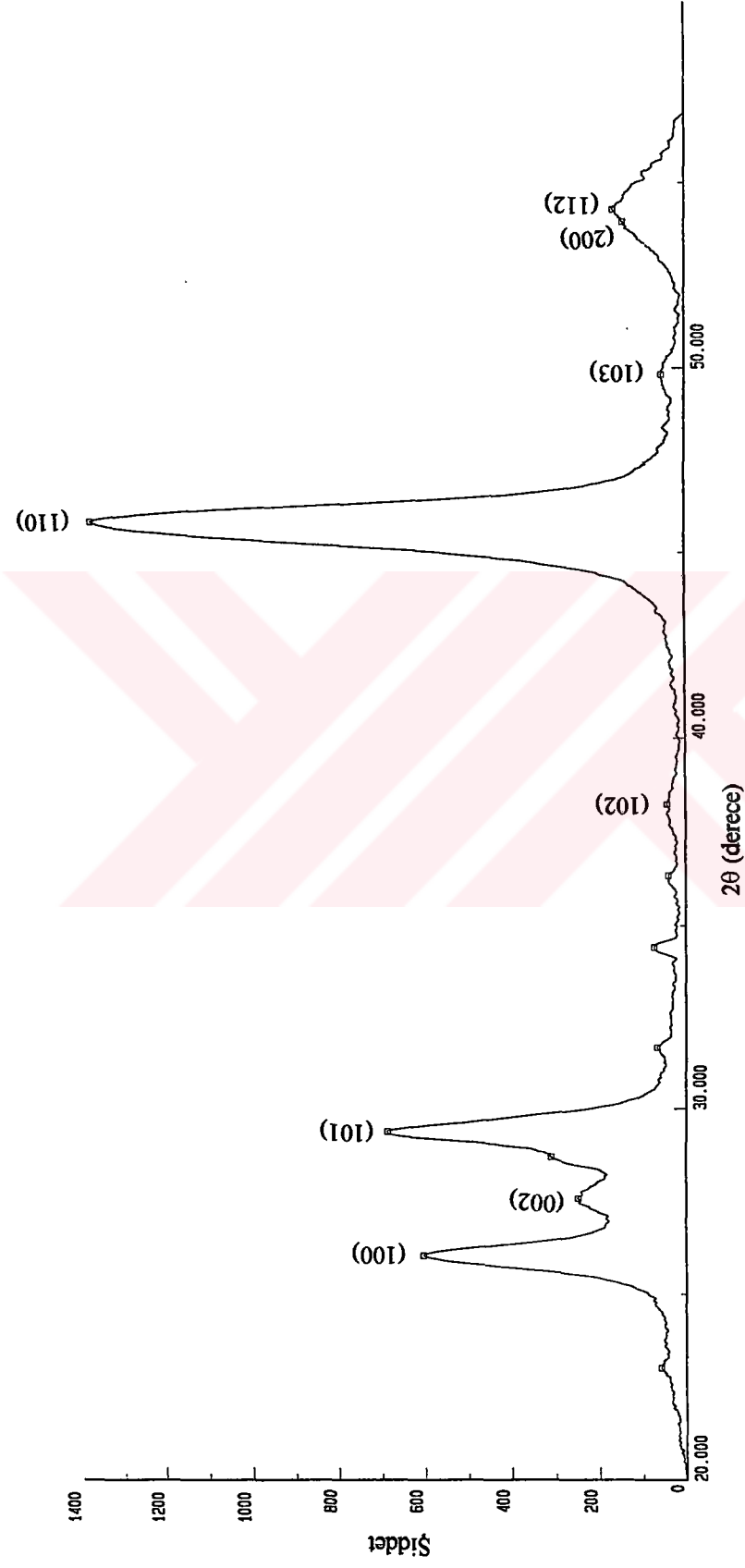




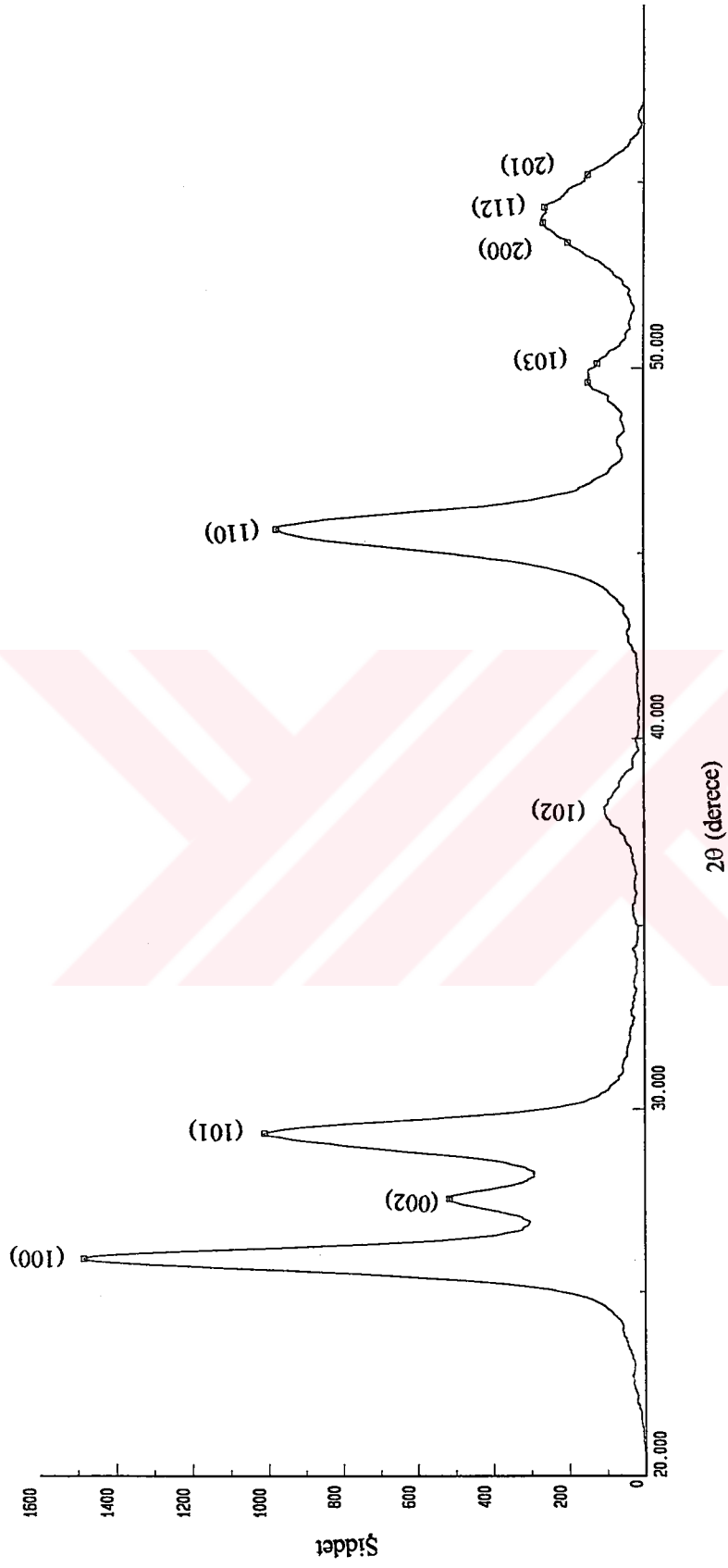
Şekil 4.2. $250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ çözeltili oramı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal $\text{Cd}_{0.52}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ yapısına aittir



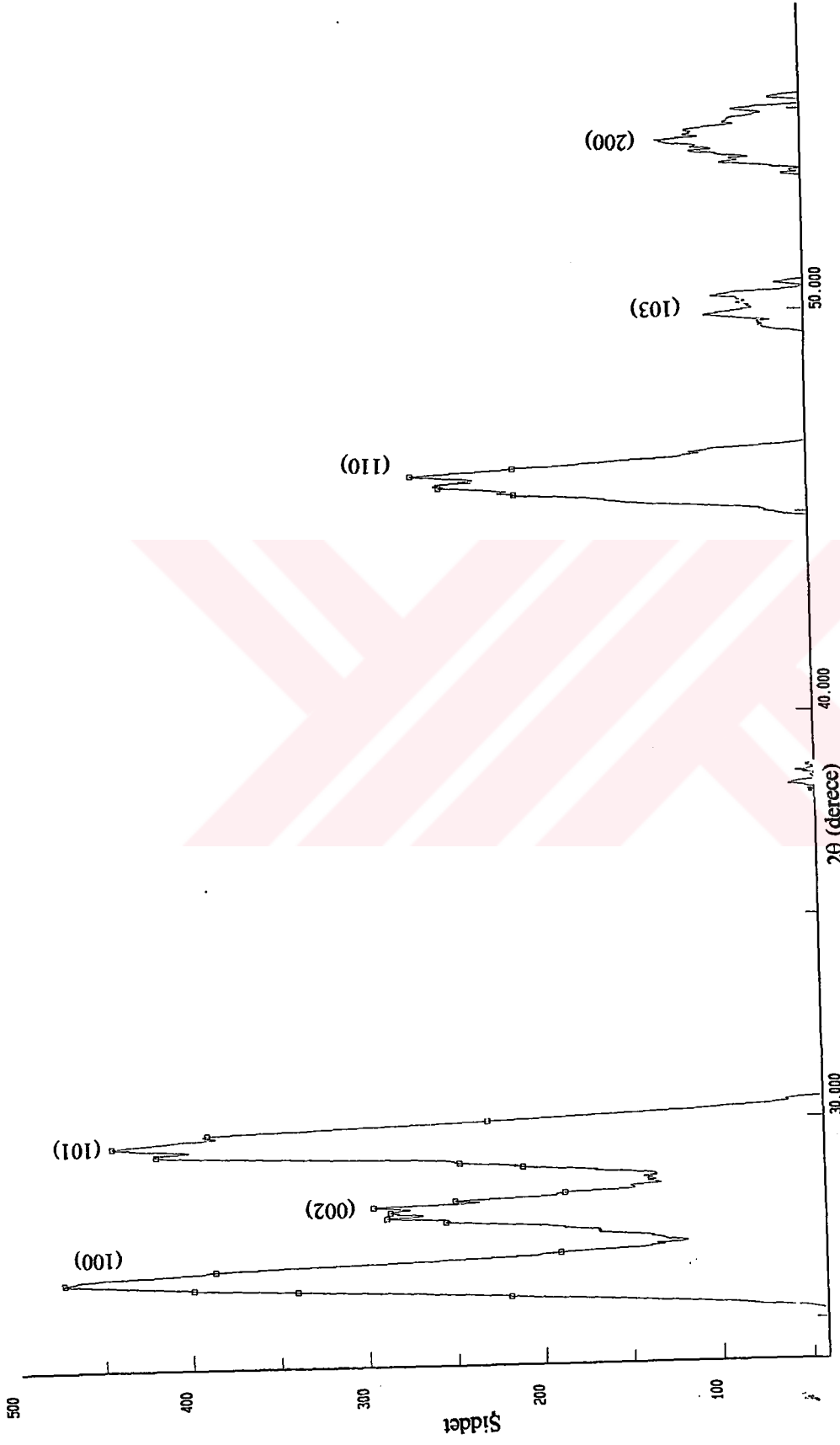
Şekil 4.3. $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ çözelti ortam ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ yapısına aittir



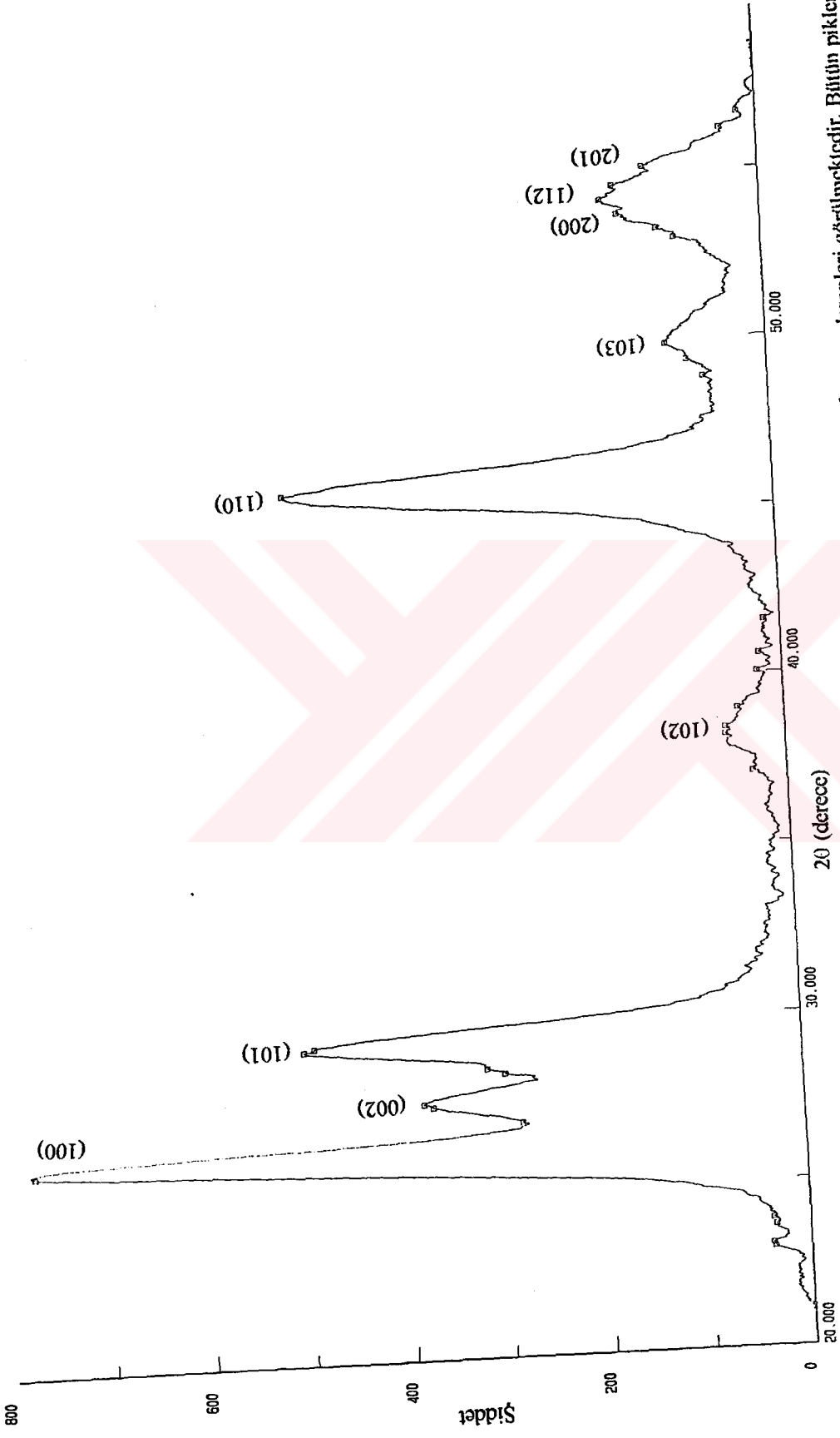
Şekil 4.4. $300 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ çözelti oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ yapısına aittir



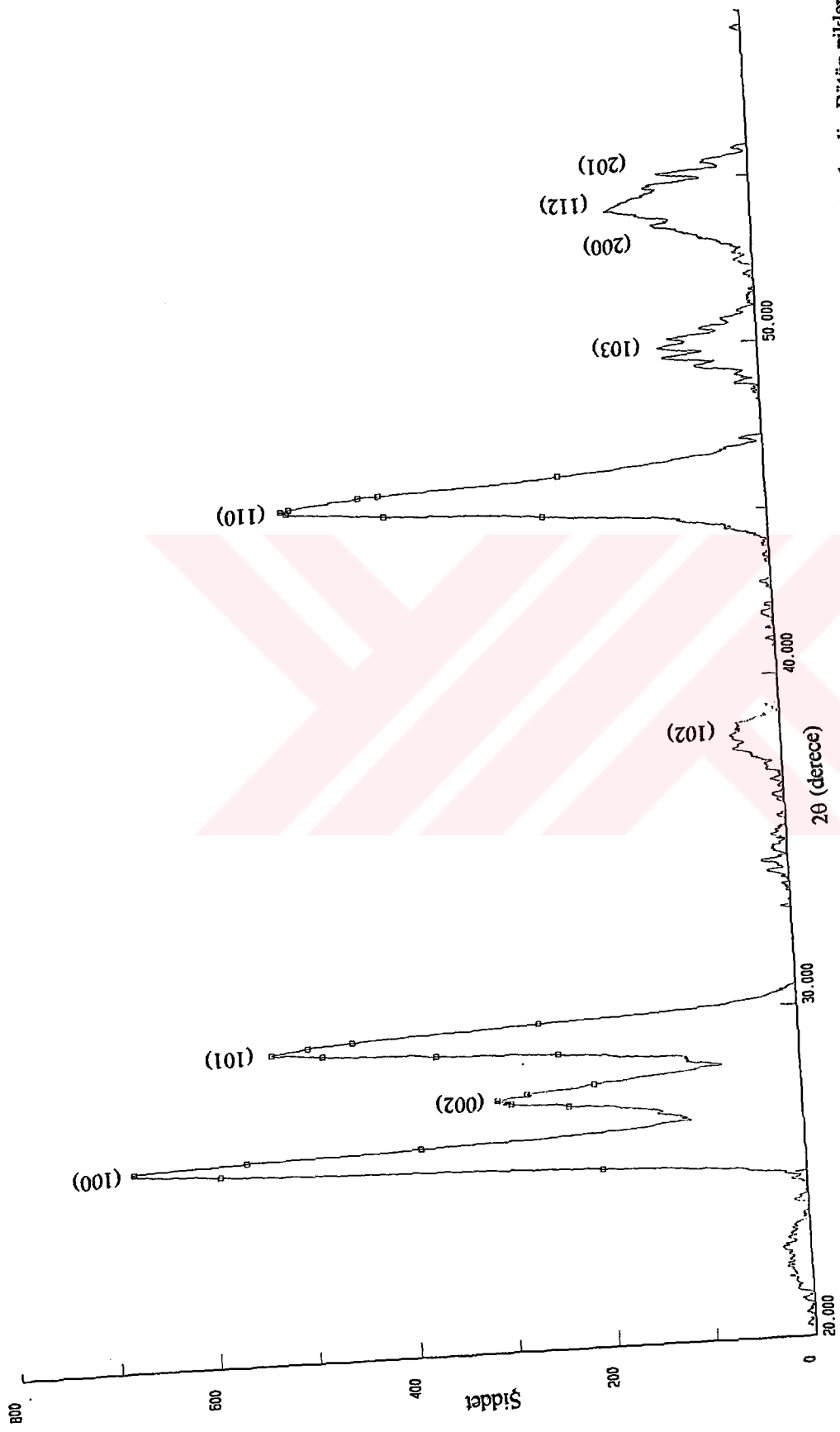
Şekil 4.5. $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında %0.2 In katkılı $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ çözelti oranı ile elde edilen filmın x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ yapısına aittir



Şekil 4.6. $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında %0.5 In katkılı $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ çözelti oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ yapısına aittir



Şekil 4.7. 275 ± 5°C taban sıcaklığında %1 In katkılı $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ çözültü oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal $Cd_{0.25}Zn_{0.75}S$ yapısına aittir



Şekil 4.8. $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında %2 In katkılı $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ çözelti oranı ile elde edilen filmin x-ışınları kırınım desenleri görülmektedir. Bütün pikler hegzagonal $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ yapısına aittir

5. ABSORPSİYON

5.1. Giriş

Çeşitli dalga boylarında ışın içeren bir demet, yarı saydam bir ortamdan geçirilirse, içinden bazı dalga boylarının kaybolduğu görülür. Buna ışının absorplanması denir. Materyaldeki moleküller bu ışınları absorplar ve materyali geçen ışın demeti ise bize materyal hakkında bilgi verir. Kullanılan malzeme tek bir atomdan oluşmadığından spektrumlar geniş bir absorpsiyon bandı halinde olacaktır.

Kalınlığı w olan materyale I_0 şiddetli ışın gönderilirse, bu ışın I şiddeti ile materyali geçecektir. Böylece I_0 ile I arasında eksponansiyel olarak,

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

şeklinde bir bağıntı olacaktır. Burada;

- I_0 : materyale gelen ışının şiddeti
- I : materyali geçen ışının şiddeti
- α : lineer absorpsiyon katsayısı
- w : materyalin kalınlığı

olarak tanımlanır. Absorpsiyonun maksimum olduğu durumda materyali geçen ışının şiddeti sıfır ($I = 0$) olacaktır.

5.2. Absorpsiyon Olayı

Yarıiletken materyalin bant yapısını öğrenmenin en kestirme ve belki de en basit yolu absorpsiyon spektrumlarını çekmektir. Yarıiletken materyallerin bant yapısı gereği gelen ışının absorplanması farklı şekillerde gerçekleşmektedir.

Bunlar:

- a) temel absorpsiyon olayı,
- b) eksitonların absorpsiyonu,
- c) serbest taşıyıcıların absorpsiyonu,
- d) katkı atomlarının (impurity) absorpsiyonu,

- e) sıcak elektron (hot electron) yardımıyla absorpsiyon,
- f) eşelektronik tuzaklara (isoelectronic trap) bağlı absorpsiyon,
- g) akseptör-donör arası geçişler,
- h) bant içi (intraband) geçişler,
- i) örgü absorpsiyonudur.

Bu absorpsiyon olaylarından bazıları aynı anda birlikte gerçekleşebilir. Absorpsiyon spektrumlarını incelemek materyalin bant yapısı hakkında bilgi vereceğinden, dc özellikleri incelemede de ipucu olacaktır. Çünkü absorpsiyon spektrumları ışın ile, dc ölçümler ise akım ile uyarmayla gerçekleşmektedir.

5.2.1. Temel absorpsiyon

Banttın bantta geçişi temsil eden temel absorpsiyon olayı, valans bandındaki bir elektronun materyale gelen ışından bir foton absorplayarak iletim bandına geçmesi olarak adlandırılabilir (Şekil 5.1.a). Bunun için fotonun enerjisinin yasak enerji aralığına en az eşit veya ondan büyük olması gerekir. Gelen fotonun frekansı ν ise,

$$\nu \geq E_g / h \quad (5-2)$$

şeklinde yazılabilir. Gelen fotonun dalga boyu λ_g ise,

$$\lambda_g \leq hc / E_g \quad (5-3)$$

olmalıdır. Burada;

h: Planck sabitini

c: ışık hızını göstermektedir.

Gelen ışının absorplama sınırı ise fotonun ν_0 frekansında gerçekleşir ve

$\nu_0 \geq E_g / h$ frekansı absorpsiyon sınırı olarak adlandırılır.

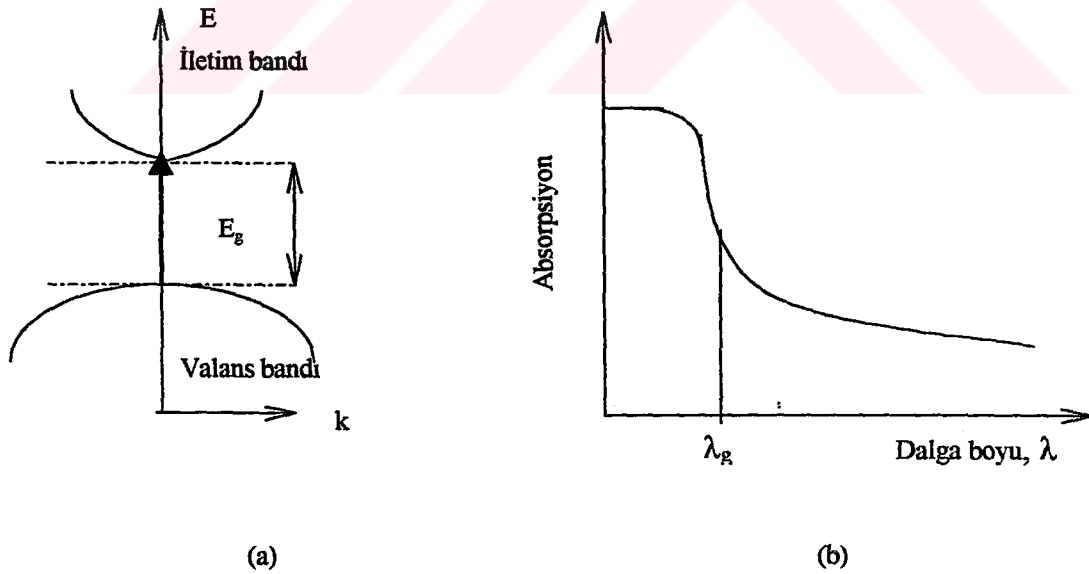
Absorpsiyon spektrumunda temel absorpsiyon hızlı bir artış olarak kendini gösterdiğinden, yarıiletkenin enerji aralığının belirlenmesinde kullanılır (Bube, 1970).

Şekil 5.1.b'de yarıiletken için temel absorpsiyon spektrumu görülmektedir. Şekil 5.1.b'den görüldüğü gibi λ_g dalga boyuna yakın dalga boylarından itibaren absorpsiyonda sürekli bir artış gözlenir ve λ_g 'den sonra bir denge değerine ulaşır. Yarıiletken materyal λ_g dalga boyundan küçük dalga boylarında kuvvetli bir absorplayıcı, λ_g dalga boyundan büyük dalga boylarında ise hemen hemen geçirgen özellik gösterir. Bu iki bölgeyi ayıran sınır, temel absorpsiyon sınırı olarak adlandırılır.

Temel absorpsiyon sınırında yarıiletkenlerde,

- a) direkt bant geçişi
- b) indirekt bant geçişi

olmak üzere iki tür geçiş olayı vardır. Ayrıca bant kuyrukları (tail) arasında da geçişler olabilir.



Şekil 5.1. a) Bir yarıiletkende temel absorpsiyon olayı

b) Bir yarıiletkende temel absorpsiyon spektrumu

5.2.1.1. Direkt bant geçişi

İletim bandının minimumu ile valans bandının maksimumu enerji-momentum uzayında aynı k değerinde ise ($\Delta k = 0$) bu tür geçişlere direkt bant geçişi denilmektedir.

Direkt bant geçişi gelen fotonun enerjisinin, yarıiletkenin enerji aralığına eşit olduğu durumda Şekil 5.2'de 1 geçişi olarak; gelen fotonun enerjisinin, yarıiletkenin enerji aralığından büyük olduğu durumda ise Şekil 5.2'de 2 geçişi olarak görölmektedir.

E_i ilk durum, E_f son durum enerji seviyesi ise,

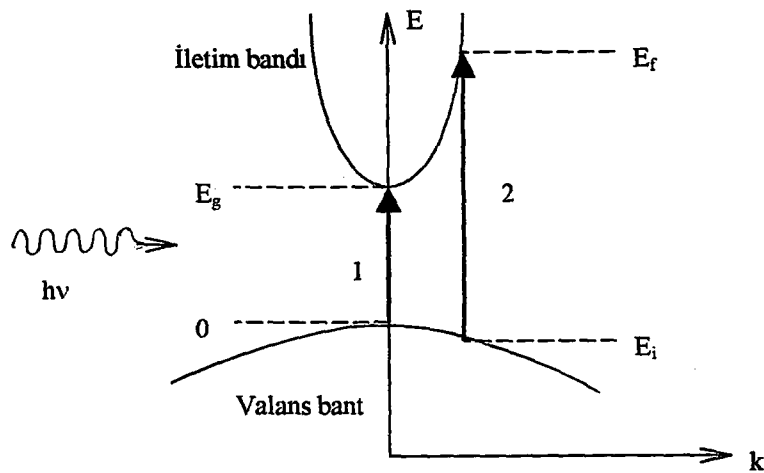
$$E_f = h\nu - |E_i| \quad (5-4)$$

olarak ifade edilir. Parabolik bantlarda ise

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

ve

$$E_i = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (5-6)$$



Şekil 5.2. Bir yarıiletkende direkt bant geçişi

şeklinde yazılabilir. Burada;

m_e^* : elektronun etkin kütesini

m_h^* : holün etkin kütesini göstermektedir.

(5-5) ve (5-6) denklemleri (5-4) denkleminde yerine yazılırsa,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (5-7)$$

elde edilir.

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

$$\alpha(h\nu) = A^* (h\nu - E_g)^n \quad (5-8)$$

ifadesiyle bağlıdır. Buradaki A^* değeri,

$$A^* \approx \frac{q^2 \left(2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{3/2}}{nch^2 m_e^*} \quad (5-9)$$

ile verilir. n değeri ise izinli direkt geçişler için 1/2, izinsiz direkt geçişler için ise 3/2 değerlerini alabilen bir sabittir (Pankove, 1971).

5.2.1.2. İndirekt bant geçişi

Yarıiletkende iletim bandının minimumu ile valans bandının maksimumu enerji-momentum uzayında aynı k değerine karşılık gelmiyorlarsa ($\Delta k \neq 0$) bu tür geçişlere indirekt bant geçişi denilmektedir (Şekil 5.3).

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

$$h\nu_e = E_f - E_i + E_p \quad (\text{fonon emisyonu için}) \quad (5-10)$$

$$h\nu_a = E_f - E_i - E_p \quad (\text{fonon absorpsiyonu için}) \quad (5-11)$$

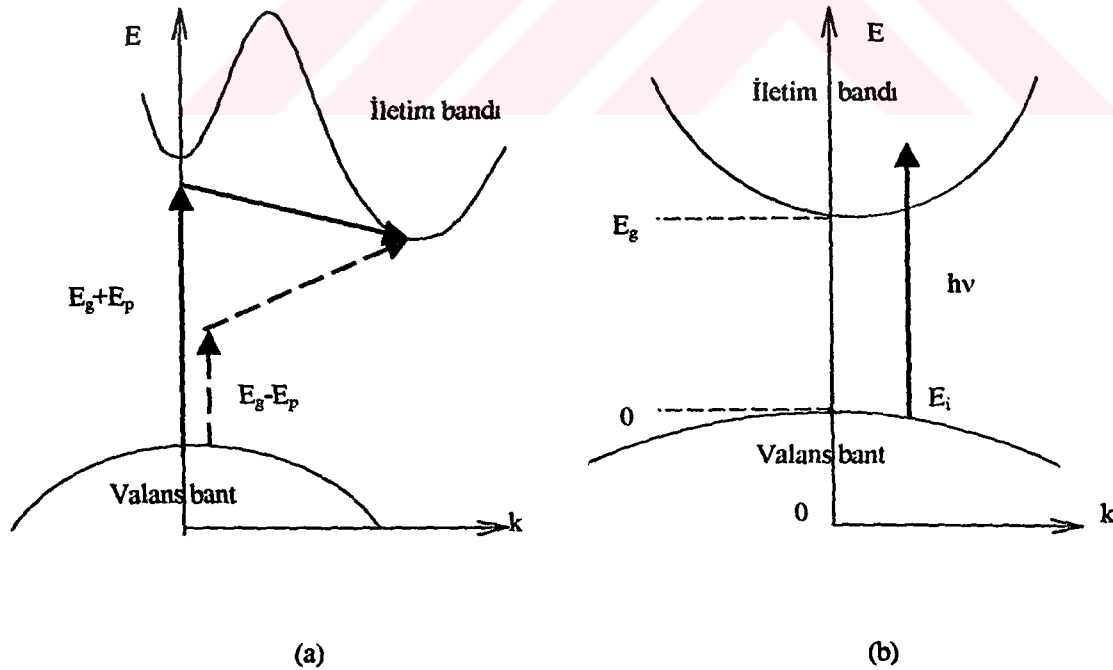
ile verilir.

Fonon absorpsiyonlu geçiş için absorpsiyon katsayısı, $h\nu > E_g - E_p$ durumu için

$$\alpha_s(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^n}{\exp \frac{E_p}{kT} - 1} \quad (5-12)$$

ile verilir.

Fonon emisyonlu geçiş için absorpsiyon katsayısı, $h\nu > E_g + E_p$ durumu için,



Şekil 5.3. a) Bir yarıiletkende indirekt vadiler arası indirekt bant geçişi

b) Direkt vadiler arası indirekt bant geçişi

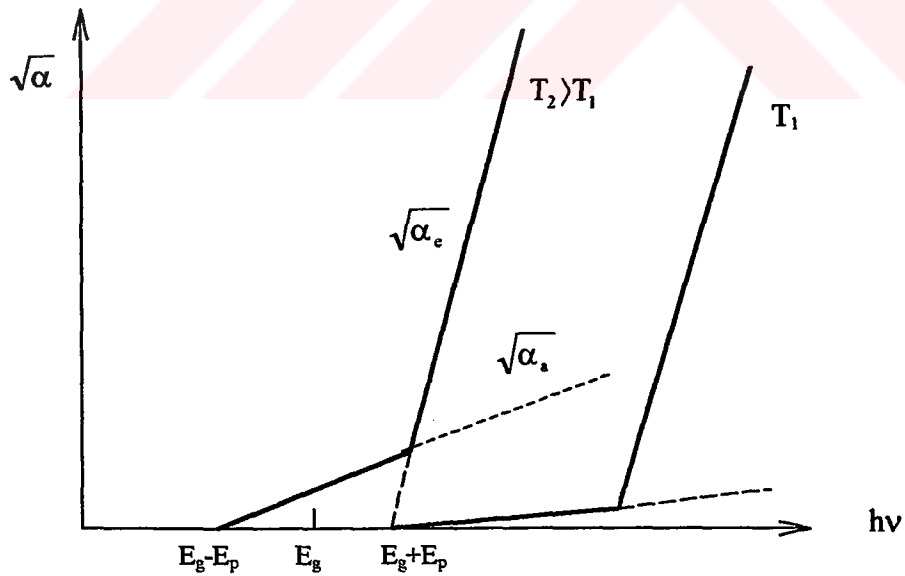
$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^n}{1 - \exp\left(-\frac{E_p}{kT}\right)} \quad (5-13)$$

ile verilir. Burada, indirekt vadiler arası indirekt geçişler (Şekil 5.3.a) için $n=2$, direkt vadiler arası indirekt geçişler (Şekil 5.3.b) için $n=3$ alınır. Hem fonon emisyonu hem de fonon absorpsiyonun olması durumunda,

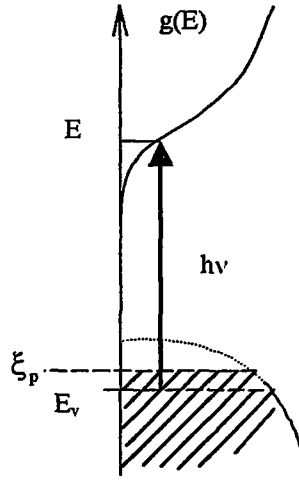
$$\alpha(h\nu) = \alpha_a(h\nu) + \alpha_e(h\nu) \quad (5-14)$$

ile verilir.

Çok düşük sıcaklıklarda fonon yoğunluğu küçük olacağından, α_a da küçük olacaktır. α_a ve α_e absorpsiyon katsayıları sıcaklığa bağlıdır. Absorpsiyon katsayısı α 'nın karekökünün, $h\nu$ 'ye lineer olarak bağlılığı Şekil 5.4'te verilmektedir. Böyle bir grafikte $\alpha=0$ için elde edilen değerler $E_g - E_p$ ve $E_g + E_p$ değerleridir.



Şekil 5.4 Absorpsiyonun sıcaklıkla değişimi



Şekil 5.5. p-tipi yarıiletkende bant tailleri arası geçiş

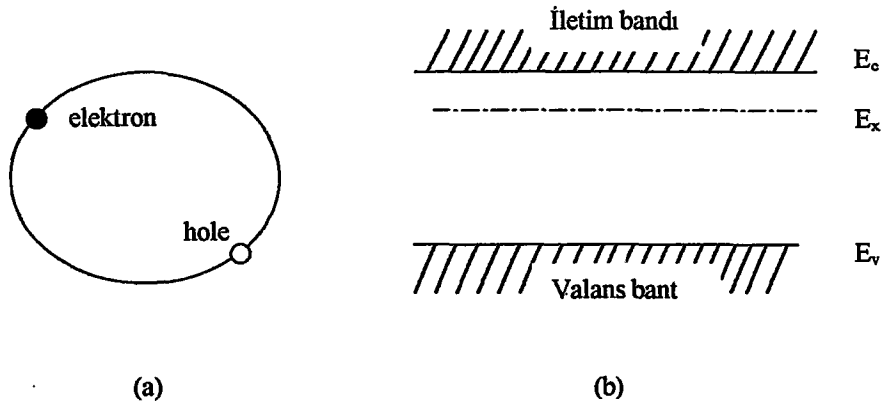
5.2.1.3. Bant kuyrukları (tail) arası geçişler

Bir yarıiletkende katkı atomları, deformasyon potansiyeli (örgüdeki kristal atomlarının yer değiştirmesi) gibi olaylardan dolayı bantların yasak enerji aralığı içine sarkmasına neden olurlar. Bu oluşuma bant kuyruğu (band tailing) denir.

Şekil.5.5'ten de görüldüğü gibi, p-tipi bir yarıiletkende iletim bandı aşağı doğru sarkar ve $h\nu$ fotonun absorplanması, yasak enerji aralığından daha küçük bir enerjide bile gerçekleşebilir. Bu yüzden absorpsiyon düşük foton enerjilerinde gözlenebilir. n-tipi yarıiletkenlerde ise valans bandı yukarı doğru sarkma gösterir. Valans bandındaki bu sarkma iletim bandındaki sarkmaya oranla daha fazladır.

5.2.2. Eksitonların absorpsiyonu

Yarıiletkenlerin iletim bandındaki bir elektronla, valans bandındaki bir hole serbesttirler. Bu iki yük taşıyıcısı birbirini Coulomb etkileşmesiyle çekerek bir bağ oluşturarak birbirlerinin etrafında dönerler (Şekil 5.6.a). Bu şekilde serbest bir elektron ile serbest bir holün birbirine bağlanmasına eksiton adı verilir (Pankove, 1971). Mobiliteleri oldukça yüksektir.



Şekil 5.6.a) Eksiton
b) Eksiton enerji seviyesi

Eksiton bağlanma enerjisi yaklaşık 0.01 eV'tur ve eksiton enerji seviyeleri iletim bandının alt sınırına çok yakındır (Şekil 5.6.b).

Direkt enerji aralıklı eksiton absorpsiyonunda gerekli olan fotonun enerjisi $h\nu$,

$$h\nu = E_g - E_x \quad (5-15)$$

ile verilir. Burada;

E_x : eksitonun bağlanma enerjisini göstermektedir.

İndirekt yasak enerji aralığına sahip yarıiletkenlerde ise momentumu korumak için fononlar gereklidir.

Fonon absorpsiyonu için

$$h\nu = E_g - E_p - E_x \quad (5-16)$$

Fonon emisyonu için

$$h\nu = E_g + E_p - E_x \quad (5-17)$$

yazılabilir.

Eksiton absorpsiyon spektrumundan materyalin direkt veya indirekt yasak enerji aralığına sahip olduğu hakkında bir fikir elde edebiliriz. Direkt yasak

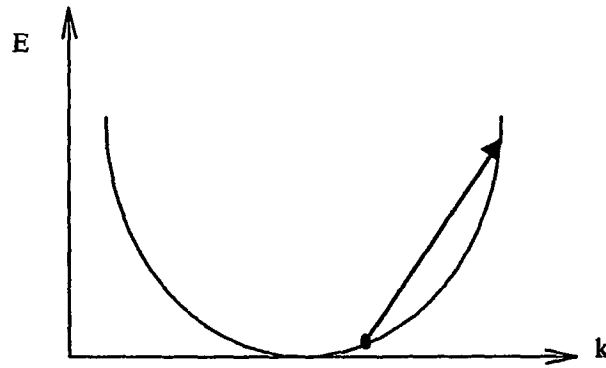
enerji aralığına sahip bir yarıiletkenin eksiton absorpsiyonu dar bir pik şeklinde olurken, indirekt yasak enerji aralığına sahip bir yarıiletkenin absorpsiyonu basamaklar şeklindedir (Pankove, 1971; Omar, 1975). Bir eksitonun absorplanması durumunda, temel absorpsiyon sınırında bir pik gözlenir (Omar, 1975).

Oda sıcaklığında eksitonlar ayrıştığından sıcaklık düştükçe pik daha belirgin olmaktadır. Ayrıca katkının artırılması da piki daha belirgin hale getirir. Elektrik alan uygulanması durumunda ise pikler kaybolur (Pankove, 1971).

5.2.3. Serbest taşıyıcıların absorpsiyonu

Serbest taşıyıcı bant içinde serbestçe hareket eden taşıyıcı anlamına geldiğinden; iletim bandındaki serbest taşıyıcılar elektronlar, valans bandındaki serbest taşıyıcılar ise hollerdir. Bir foton absorplamak için, elektron aynı bant içinde yüksek enerji durumuna geçiş yapabilir (Şekil 5.7).

Ancak böyle bir geçişte momentumu da korumak gerekecektir. O halde ya fononlarla etkileşim yaparak, ya da iyonlaşan katkı maddeleriyle çarpışarak bu enerji sağlanabilir. Drude Teorisine göre bir yarıiletkene elektrik alan uygulanırsa, serbest taşıyıcı absorpsiyonu, gelen ışının λ dalga boyuna bağlı olarak λ^p ile büyür. Burada $1.5 < p < 3.5$ arasında değişir. Absorpsiyon akustik fononlarla ilgili ise $p=1.5$, optik fononlarla ilgili ise $p=2.5$, iyonize olmuş safsızlıklar ile çarpışmasıyla ilgili ise $p=3$ ya da $p=3.5$ alınabilir. Böylece serbest taşıyıcı absorpsiyonu,



Şekil 5.7. İletim bandında serbest elektronun geçişi

$$\alpha_f = A\lambda_{1.5} + B\lambda_{2.5} + C\lambda_{3.5} \quad (5-18)$$

ile verilir. Burada A, B, C birer sabittir. Burada hangisinin baskın olacağı safsızlık konsantrasyonuna bağlıdır (Pankove, 1971).

Klasik olarak serbest taşıyıcı absorpsiyonu için absorpsiyon katsayısı

$$\alpha_f = \frac{Nq^2\lambda^2}{m^*8\pi^2nc^3\tau} \quad (5-19)$$

ile verilir. Burada;

N: taşıyıcı yoğunluğunu

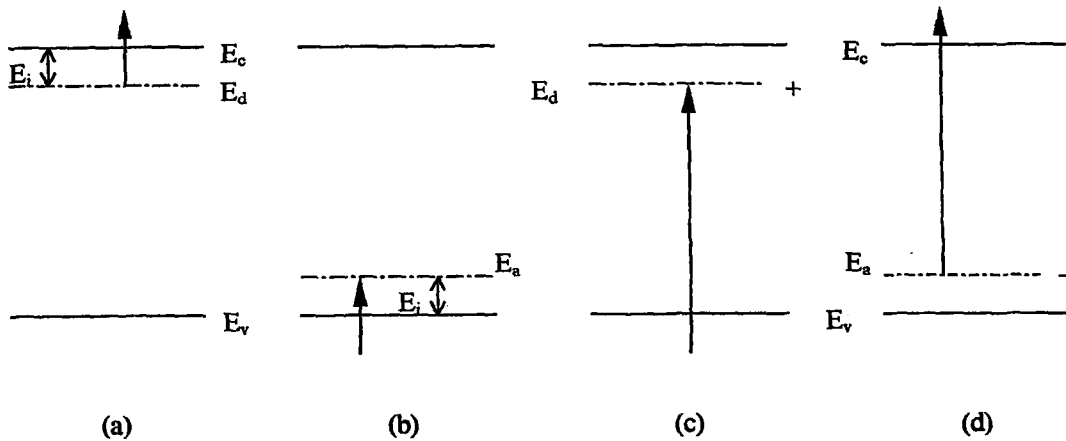
n: kırılma indisini

τ : durulma zamanını göstermektedir.

Absorpsiyon katsayısı, katkı maddesine bağlıdır.

5.2.4. Katkı atomlarının (impurity) absorpsiyonu

Katkılı bir yarıiletkenle yasak enerji aralığından daha küçük enerjili bir foton gönderilirse ($h\nu < E_g$), katkı atomlarının absorpsiyonu dört değişik şekilde meydana gelir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Katkılı yarıiletkenlerde katkı atomlarının absorpsiyonu

- donörden iletim bandına
- valans banttan akseptöre
- valans banttan donöre
- akseptörden iletim bandına geçişler

Şekil 5.8.a'da nötr bir donör, enerjisi en az elektron katkı atomunun iyonlaşma enerjisi olan E_i kadar bir foton absorplar ($h\nu \geq E_i$) ve iletim bandına geçer. Şekil 5.8.b ise valans bandından nötr bir akseptöre elektron geçişini göstermektedir.

Şekil 5.8.c'de valans bandından iyonize olmuş donöre geçiş söz konusudur. Burada ise iyonize olmuş donör, valans banttan bir elektron alarak nötr donör haline gelir. Şekil 5.8.d ise bir elektronun iyonize olmuş akseptörden iletim bandına olan geçişini göstermektedir. İyonize olmuş akseptör iletim bandına bir elektron vererek nötr olur. Her iki olayda da temel absorpsiyona yakın bir absorpsiyon gözlenir ve özellikle oda sıcaklığında birbirinden ayırt etmek oldukça zordur. Ancak düşük sıcaklıklarda yasak enerji aralığı büyüdüğünden bu absorpsiyonun gözlenme olasılığı artar. Böyle bir geçiş için a ve b ye göre daha fazla enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji $h\nu \geq E_g - E_i$ olmalıdır.

Bant ile katkı atom seviyeleri arasındaki geçişlerde $E_i < E_g$ olduğundan absorpsiyon spektrumu bir omuz şeklinde kendini gösterir.

5.2.5. Sıcak elektron (hot electron) yardımıyla absorpsiyon

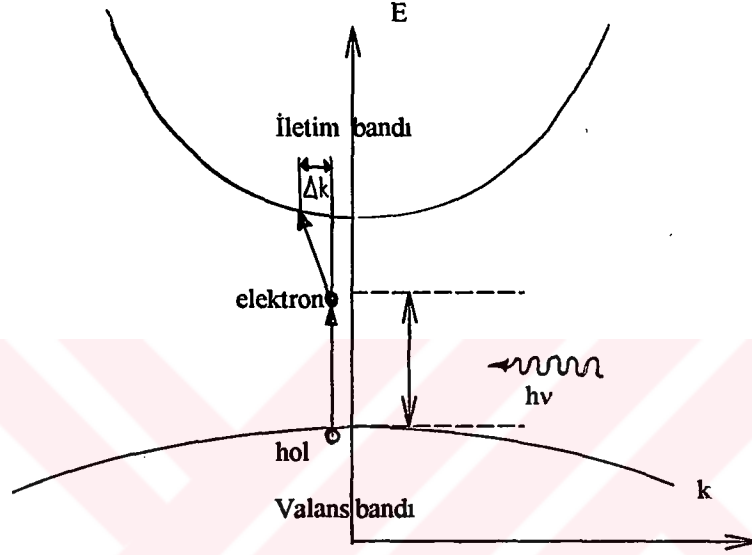
Bir bant içerisinde bulunan elektron yine aynı bant içerisinde daha üst enerji seviyesine çıkarsa enerjisi arttığından dolayı bu elektrona sıcak elektron (hot electron) adı verilir.

Direkt bant geçişinde $h\nu < E_g$ olduğunda bazı durumlarda, $h\nu$ fotonunun absorplanması için yani yasak enerji aralığını geçmesi için gerekli olan enerji sıcak elektrondan karşılanır. Bu durum Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

$h\nu$ fotonunun enerjisi yasak enerji aralığından küçük olduğundan foton absorplanamaz. Sıcak elektronlar iletim bandının en üst enerji seviyelerinde bulunan elektronlardır. Olayın gerçekleşmesi için sıcak elektronun yeterince enerjiye sahip olması gerekir. Sıcak elektronlar ya sistemin sıcaklığını bölgesel değil, bütün olarak arttırarak ya da küçük bir elektrik alan uygulanarak gözlenirler. İletim bandındaki sıcak elektron enerjisini yasak enerji aralığındaki elektrona vererek, yine iletim bandı içerisindeki alt enerji seviyesine düşer ve böylece yasak enerji aralığındaki elektron iletim bandına çıkmış olur. Ancak

direkt bantlı geçişlerde sıcak elektron yardımıyla absorpsiyonun gerçekleşebilmesi için yarıiletkenin oldukça has yarıiletken olması gerekmektedir. Çünkü safsızlıklar çarpışmalara neden olur ve elektronun ömrünü kısaltır.

İndirekt bant geçişlerinde ise, momentumun korunması mümkün değildir. Çünkü büyük bir momentum gereklidir. Bu yüzden indirekt yasak enerji aralığına sahip yarıiletkenlerde sıcak elektron yardımıyla absorpsiyon gözlenemez (Pankove, 1971).

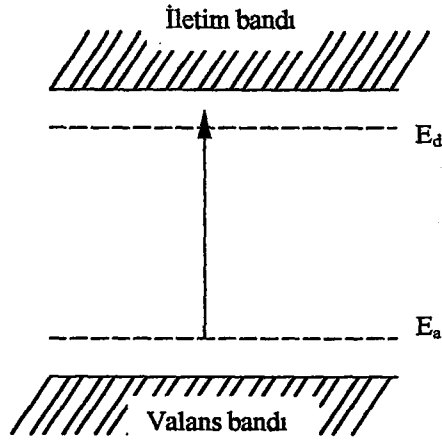


Şekil 5.9. Direkt bant geçişli bir yarıiletkende sıcak elektron yardımıyla absorpsiyon

5.2.6. Eşelektronik tuzaklara (isoelectronic trap) bağlı absorpsiyon

Eşelektronik merkezler kristaldeki bir atomun, aynı değerlikli bir başka atomla yer değiştirmesiyle oluşur. Örneğin GaP'daki fosfor atomu azot atomu ile (ya da GaP'daki galyum atomu, bizmut atomu ile) yer değiştirebilir. Eşelektronik tuzak bir eksiton gibi bağlanabilir. Bu olayı kısaca açıklayalım: GaP'daki azot eşelektronik tuzağı, bir elektronu tuzaklayabilecek kadar iyi lokalize olmuş bir potansiyeldir. Böylece uygun yüklemeye, Coulomb alanın etkisiyle bir holü çeker. Ve iki tuzaklanmış taşıyıcı şeklindeki bir eksiton eşelektronik tuzağı oluşturur.

Bağlanma enerjileri katkılara bağlıdır. En büyük bağlanma enerjileri en yakın çiftler arasında olur.



Şekil 5.10. Akseptörden donöre geçiş

5.2.7. Akseptör-donör arası geçişler

Hem donörün hem de akseptörün iyonize olması durumunda bu iki enerji seviyesi arasında geçiş söz konusu olabilir.

Şekil 5.10 iyonize olmuş akseptörden, iyonize olmuş donöre geçişi göstermektedir. Bu durumda yarıiletkenine gelen fotonun enerjisi,

$$h\nu = E_g - E_d - E_a \quad (5-20)$$

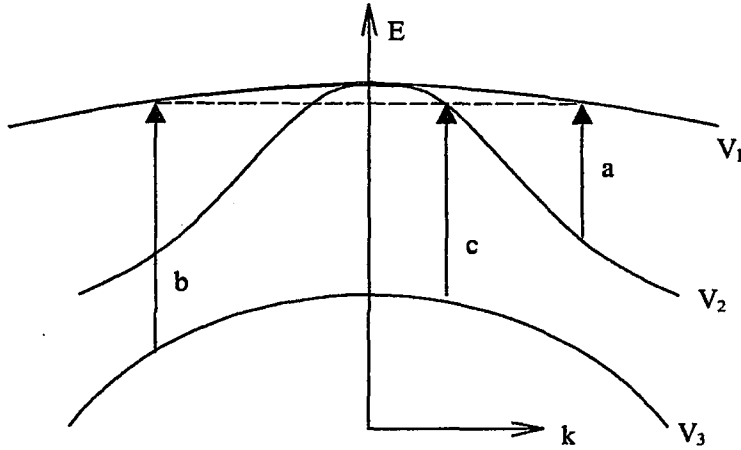
ile verilir.

5.2.8. Bant içi (intraband) geçişler

Çoğu p-tipi yarıiletkenin valans bandı, spin-orbit etkileşmesiyle ayırt edilen üç alt banttandır. Bu alt bant yapıları Şekil 5.11'de gösterilmiştir. V_1 ağır-hol bandı V_2 hafif-hol bandından daha yayvandır. p-tipi yarıiletkenlerde valans bandının üst kısmına hol geçişi üç farklı şekilde olmaktadır. Bunlar;

a) V_2 hafif-hol bandından V_1 ağır-hol bandına geçiş (Şekil 5.11'deki a geçişi),

b) V_3 yarılan bandından (split-off band) V_1 ağır hol bandına geçiş (Şekil 5.11'deki b geçişi),



Şekil 5.11. Valans alt bant yapısı ve bant içi geçişler (Pankove, 1971)

c) V_3 yarılan bandından V_2 hafif-hol bandına geçiş (Şekil 5.11'deki c geçişi), şeklinde olmaktadır.

Katkı miktarı veya sıcaklık değiştirildiğinde piklerin konum ve şiddetleri de değişmektedir.

n-tipi yarıiletkenlerde ise, iletim alt bantları arasında geçişler olmaktadır. Elektron konsantrasyonu arttıkça absorpsiyon artmaktadır.

5.2.9. Örgü absorpsiyonu

Yarıiletken bileşikler, farklı elementlerin atomları arasındaki elektrik dipollerinin bir kümesidir. Dipoller elektromanyetik alandan enerji absorplar ve dipolün titreşim modu radyasyonun frekansına eşit olduğunda maksimum eşleşme (coupling) radyasyonu olur.

Örgü sabiti a çok küçük ise, fononların h/a momentumu yanında fotonların h/λ momentumu ihmal edilebilecek kadar küçük olur. Bu nedenle, momentum korunumunu sağlayabilmek için iki ya da daha fazla fononun yayınlanması gerekecektir. Yarıiletkenler iki enine optik moda (TO), iki enine akustik moda (TA), bir boyuna optik moda (LO) ve bir boyuna akustik moda (LA)

sahiptirler. Ancak seçici kurallar fononların birlikte değerlendirilmesine engel olurlar.

Sıcaklık değişse bile enerji değerleri hemen hemen aynı değerde kalırlar. Ancak absorpsiyon katsayısı sıcaklık arttıkça artmaktadır.

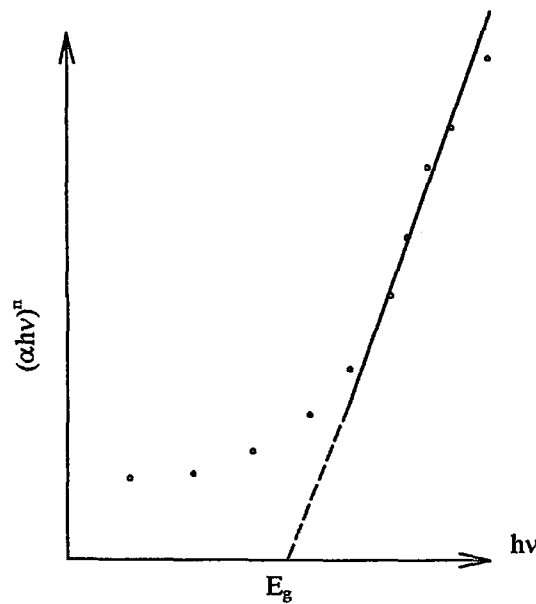
5.3. Absorpsiyon Yöntemi ile Yarıiletkenlerin Yasak Enerji Aralıklarının Belirlenmesi

Yasak enerji aralığının belirlenmesinde en çok kullanılan yöntem temel absorpsiyon spektrumudur. Absorpsiyon katsayısı ile yasak enerji aralığı arasındaki bağıntı,

$$\alpha(h\nu) \approx (h\nu - E_g)^n \quad (5-21)$$

ile verilmiştir.

Bu yöntemde $(\alpha h\nu)^n$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi çizilir (Şekil 5.12). Grafiğin lineer olduğu kısma karşı gelen doğrunun $h\nu$ eksenini kestiği noktanın $((\alpha h\nu)^n = 0$ 'da) enerji değeri o materyalin yasak enerji aralığı değerini verir. Materyal $n=2$; 3 ise direkt bant aralığına, $n=1/2$; 3/2 ise indirekt bant aralığına sahip olacaktır.



Şekil 5.12. $(\alpha h\nu)^n$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi

5.4. In Katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S Filmlerinin Temel Absorpsiyon Spektrumları ve Yasak Enerji Aralıkları

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

Elde edilen In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filmlerinden oda sıcaklığında alınan absorpsiyon spektrumlarından yararlanılarak ve eşitlik (5-21) kullanılarak; $n=1/2, 3/2, 2, 3$ alınmak üzere $(\alpha hv)^n$ 'nin (hv) 'ye karşı grafikleri çizilmiştir. $n=2$ için en uygun grafikler elde edildiğinden, geçişler direkt geçişlerdir. Direkt geçişlerin gözlemlendiği bölgelerde bir doğru elde edileceğinden bu doğrunun $(\alpha hv)^2=0$ eksenini kestiği nokta $(hv-E_g=0$ ve $hv=E_g)$ yarıiletkenin yasak enerji aralığını verir.

Şekil 5.13'te $250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve sağ üst köşede de $(\alpha hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi (b) görülmektedir. Absorbans 465nm dalga boyundan başlayarak 433nm dalga boyuna doğru hızlı bir artış göstermiştir. Bu absorpsiyon sınırının dışında 465nm dalga boyundan daha büyük dalga boylarında materyal hemen hemen geçirgen, 433nm dalga boyundan küçük dalga boylarında ise kuvvetli bir absorplayıcı olarak davranış gösterir (Şekil 5.13.a). Şekil 5.13.b'deki grafiğin lineer kısmının hv eksenini kestiği nokta yasak enerji aralığını verecektir. Bu yasak enerji aralığı $E_g=2.84\text{eV}$ olarak bulunmuştur.

Şekil 5.14'te $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve sağ üst köşede de $(\alpha hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi (b) görülmektedir. Absorbans 460nm dalga boyundan başlayarak 424nm dalga boyuna doğru hızlı bir artış göstermiştir. Şekil 5.14.b'deki grafiğin lineer kısmının hv eksenini kestiği nokta yasak enerji aralığını verecektir. Bu yasak enerji aralığı $E_g=2.90\text{eV}$ olarak bulunmuştur.

Şekil 5.15'te $300 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve sağ üst köşede de $(\alpha hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi (b) görülmektedir. Absorbans 480nm dalga boyundan başlayarak 435nm dalga boyuna doğru yavaş bir artış

göstermiştir. Şekil 5.15.b'deki grafiğin lineer kısmının hv eksenini kestiği nokta yasak enerji aralığını verecektir. Bu yasak enerji aralığı $E_g=2.72\text{eV}$ olarak bulunmuştur.

Şekil 5.16'da $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %0.2 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu (a) ve sağ üst köşede de $(\alpha hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi (b) görülmektedir. Absorbans 460nm dalga boyundan foton enerjisine bağlı olarak 401nm dalga boyuna doğru çok keskin bir şekilde artmıştır. Şekil 5.16.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 3.04eV olarak bulunmuştur.

Şekil 5.17'de $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %0.5 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu ve $(\alpha hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 460nm dalga boyundan foton enerjisine bağlı olarak 425nm dalga boyuna kadar hızlı bir artış gözlenmiştir. Şekil 5.17.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 2.88eV olarak bulunmuştur.

Şekil 5.18'de $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %1 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu ve $(\alpha hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 460nm dalga boyundan foton enerjisine bağlı olarak 417nm dalga boyuna kadar keskin bir artış gözlenmiştir. Şekil 5.18.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 2.94eV olarak bulunmuştur.

Şekil 5.19'da $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %2 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığındaki temel absorpsiyon spektrumu ve $(\alpha hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi görülmektedir. Absorbans 460nm dalga boyundan foton enerjisine bağlı olarak 424nm dalga boyuna kadar hızlı bir artış gözlenmiştir. Şekil 5.19.b'deki grafikten yasak enerji aralığı 2.91eV olarak bulunmuştur.

Elde edilen filmlerin 2.72eV ile 3.04eV arasında değişen yasak enerji aralıkları Çizelge 5.1'de verilmektedir. Bütün filmler direkt bant aralığına sahiptir.

Çizelge 5.1. Çeşitli taban sıcaklıklarında elde edilen filmlerin yasak enerji aralıkları

Materyal	Taban Sıcaklığı (°C)	Yasak Enerji Aralığı (eV)
$Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	$250 \pm 5^{\circ}C$	2.84
$Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	$275 \pm 5^{\circ}C$	2.90
$Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	$300 \pm 5^{\circ}C$	2.72
%0.2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	$275 \pm 5^{\circ}C$	3.04
%0.5 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	$275 \pm 5^{\circ}C$	2.88
%1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	$275 \pm 5^{\circ}C$	2.94
%2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	$275 \pm 5^{\circ}C$	2.91

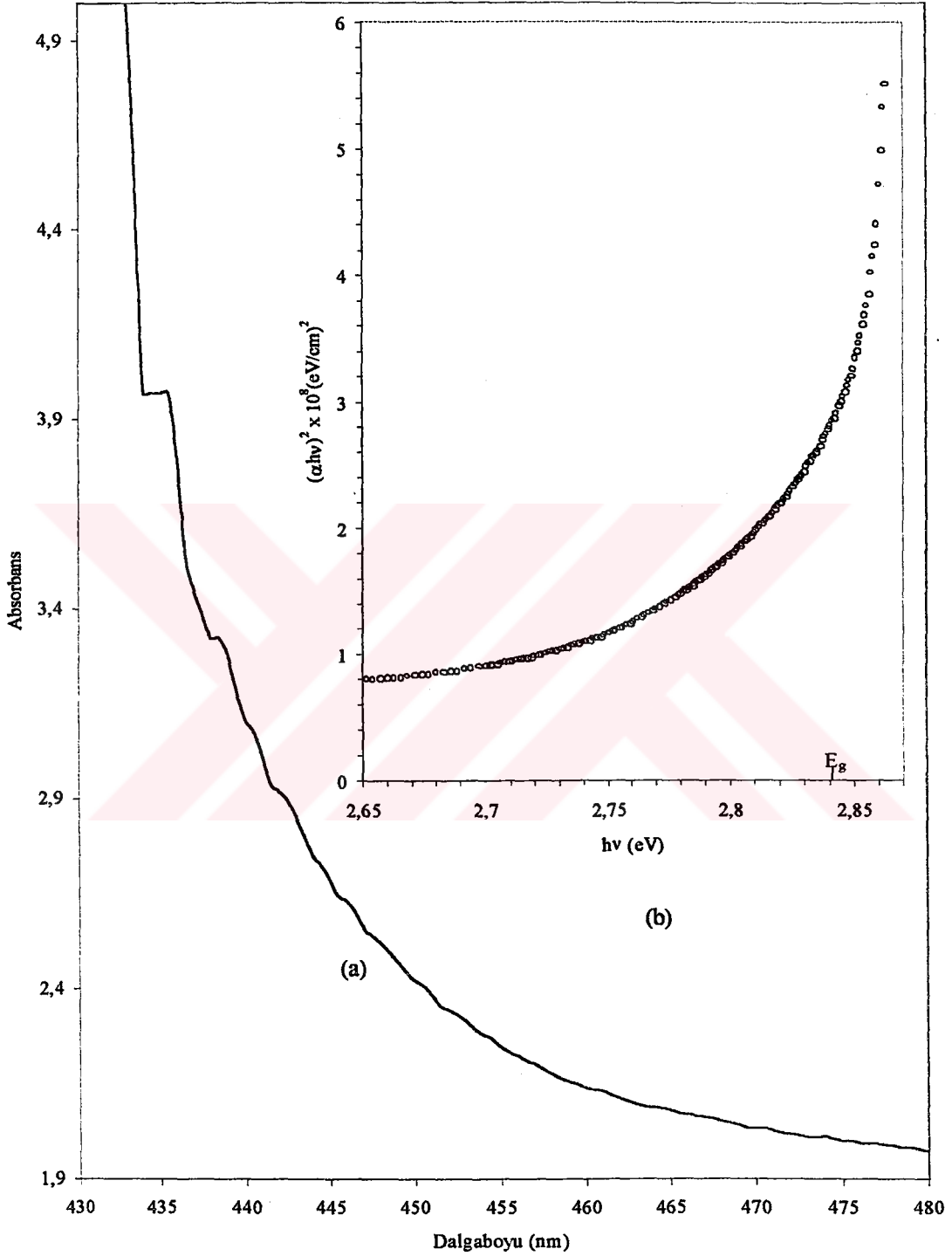
5.5. Bölüm ile İlgili Tartışma

Elde edilen filmlerin absorpsiyon spektrumlarındaki basamaklar bir eğri çizilerek düzeltilmiştir. Bu eğri yalnızca $250 \pm 5^{\circ}C$ taban sıcaklığında elde edilen $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin temel absorpsiyon spektrumunda (Şekil 5.13) gösterilmiştir. Oluşan bu basamaklar absorpsiyon cihazından kaynaklanmaktadır. Bu düzeltme eğrisi üzerindeki değerler dikkate alınarak $(\alpha hv)^2$ 'nin hv 'ye göre grafikleri çizilmiştir. Elde edilen filmler direkt bant aralığına sahiptir.

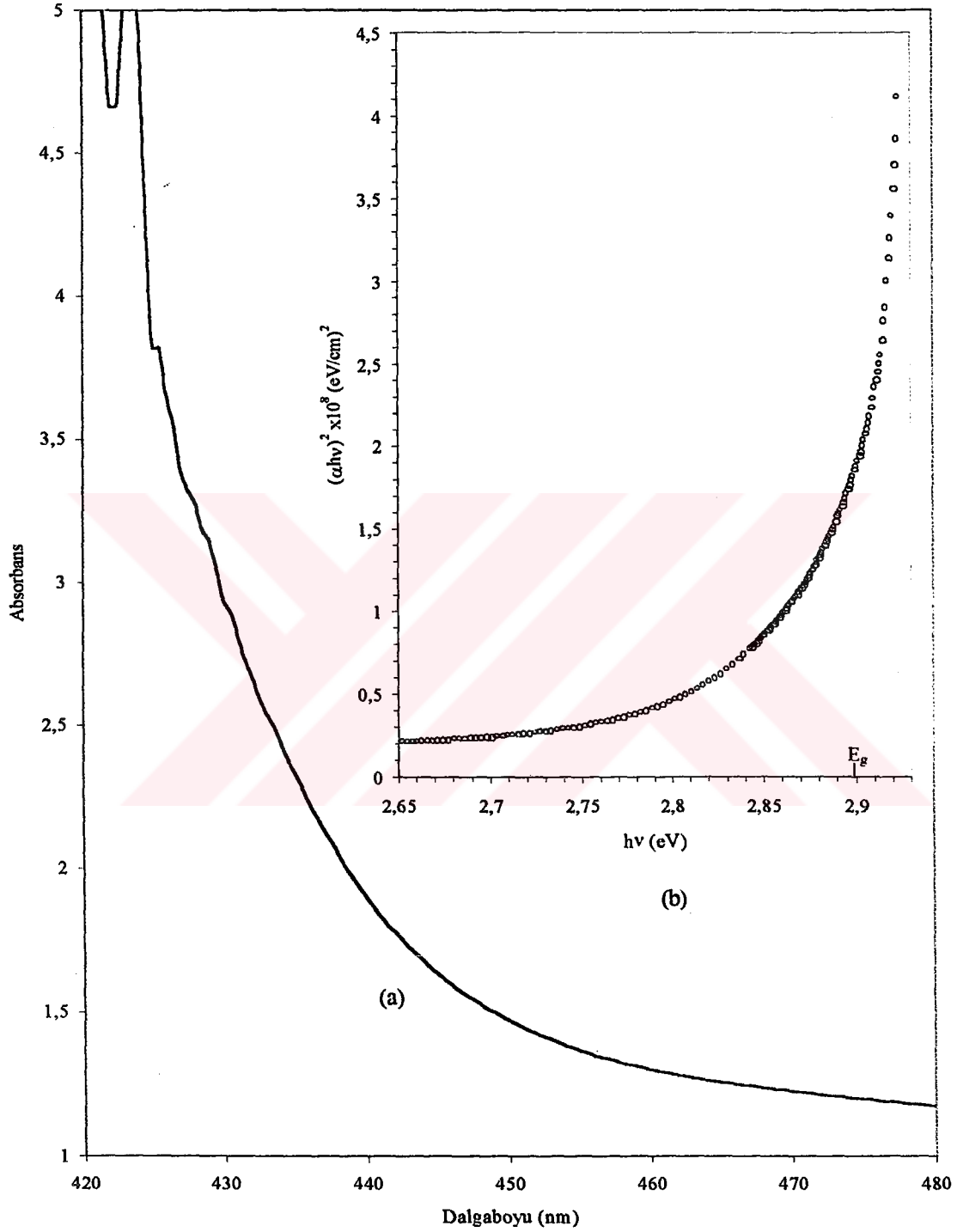
En uygun yapıdaki filmin $275 \pm 5^{\circ}C$ taban sıcaklığında oluştuğuna 4.Bölümde değinilmişti. $250 \pm 5^{\circ}C$ taban sıcaklığında elde $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin yasak enerji aralığı 2.84eV ve $300 \pm 5^{\circ}C$ taban sıcaklığında elde edilen $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin yasak enerji aralığı ise 2.72eV olup, bu her iki değer de $275 \pm 5^{\circ}C$ taban sıcaklığında elde edilen $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin yasak enerji aralığı olan 2.90eV değerinden daha düşüktür.

$Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmi için bulunan yasak enerji aralıkları yapılan çeşitli çalışmalarla da uyum içindedir (Agnihotri ve Gupta, 1979; Yamaguchi, 1999).

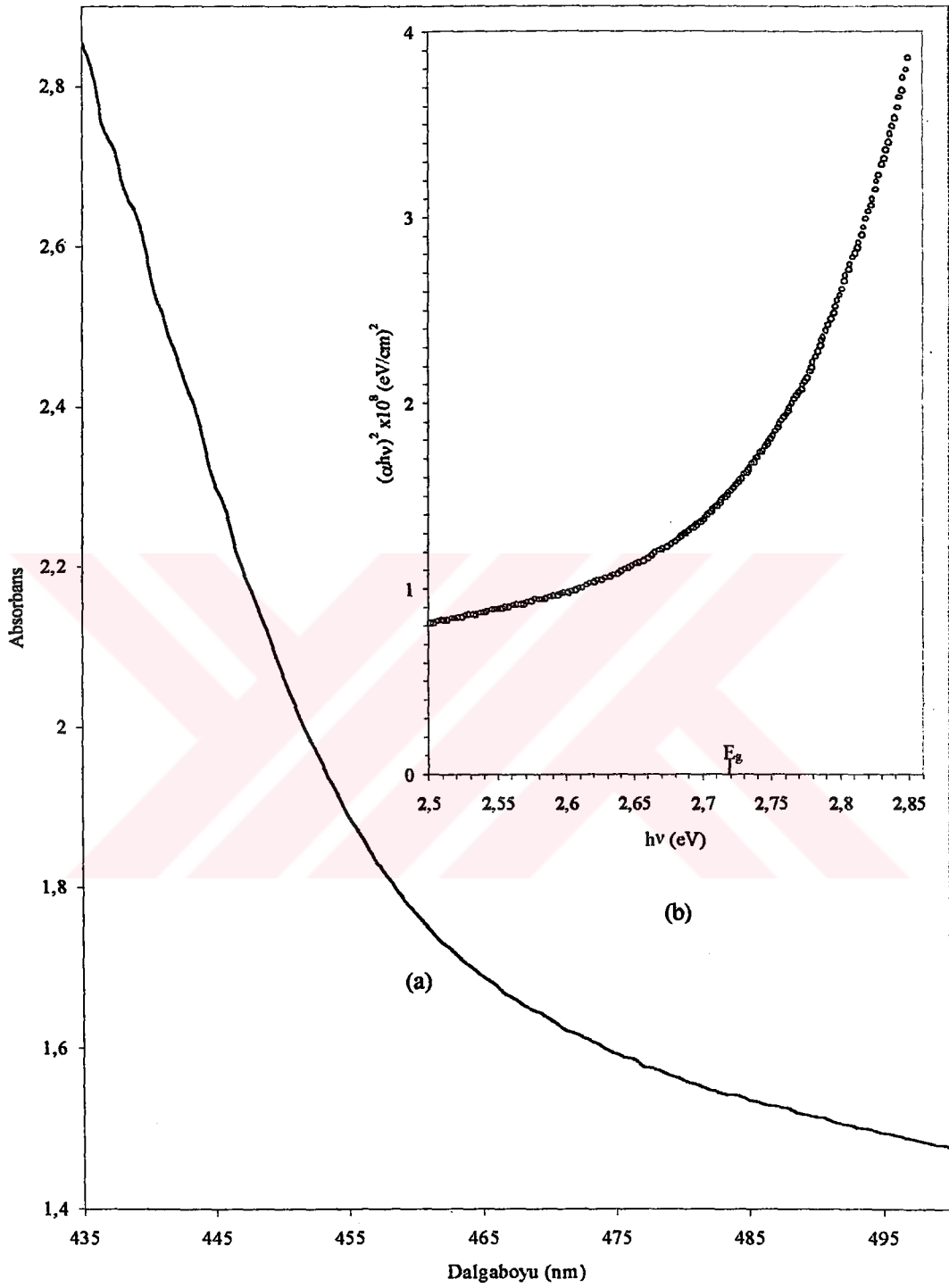
Elde edilen $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin yasak enerji aralıkları In katkısı ile değişmektedir.



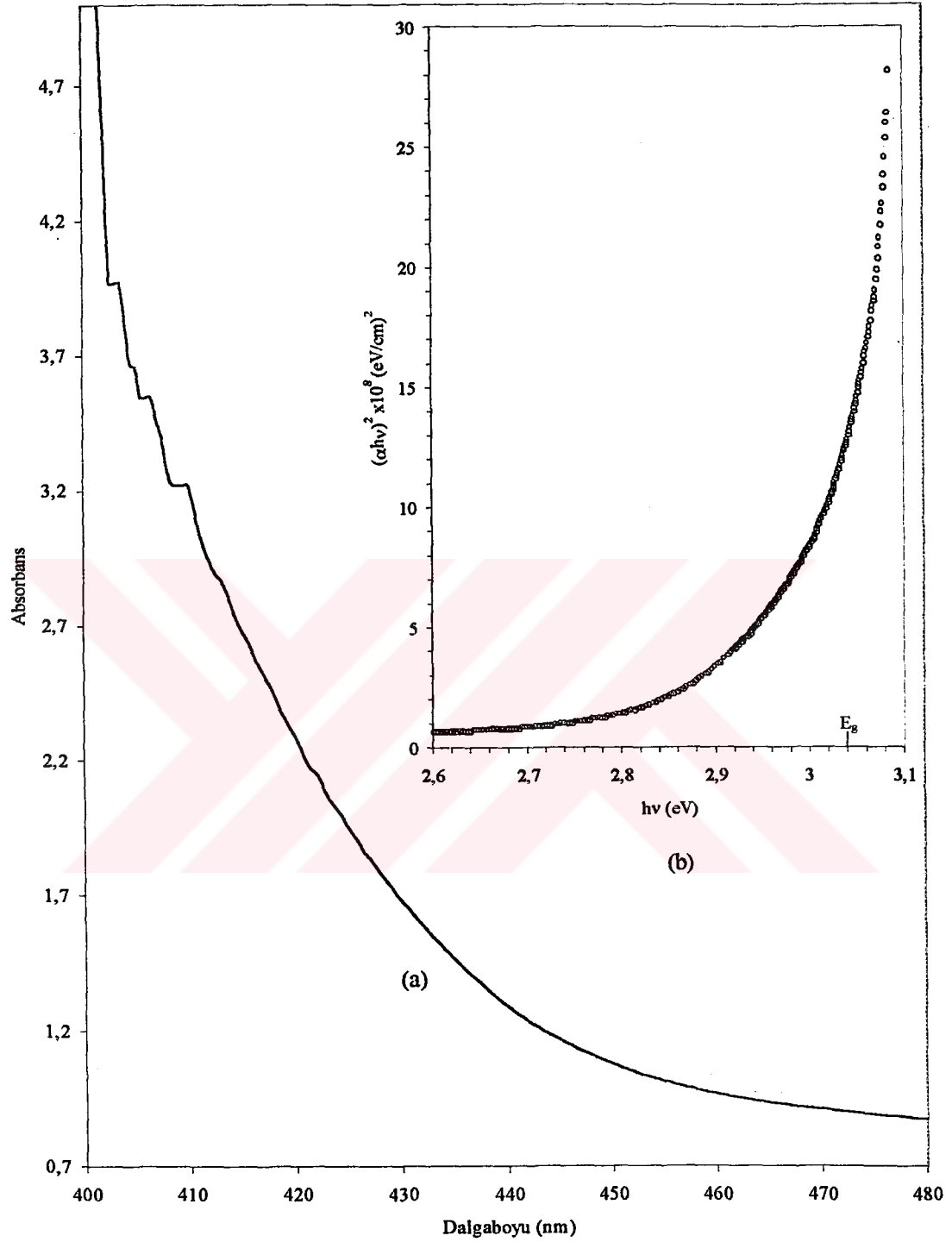
Şekil 5.13. $250 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında
 (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2$ 'nin hv 'ye göre değişimi



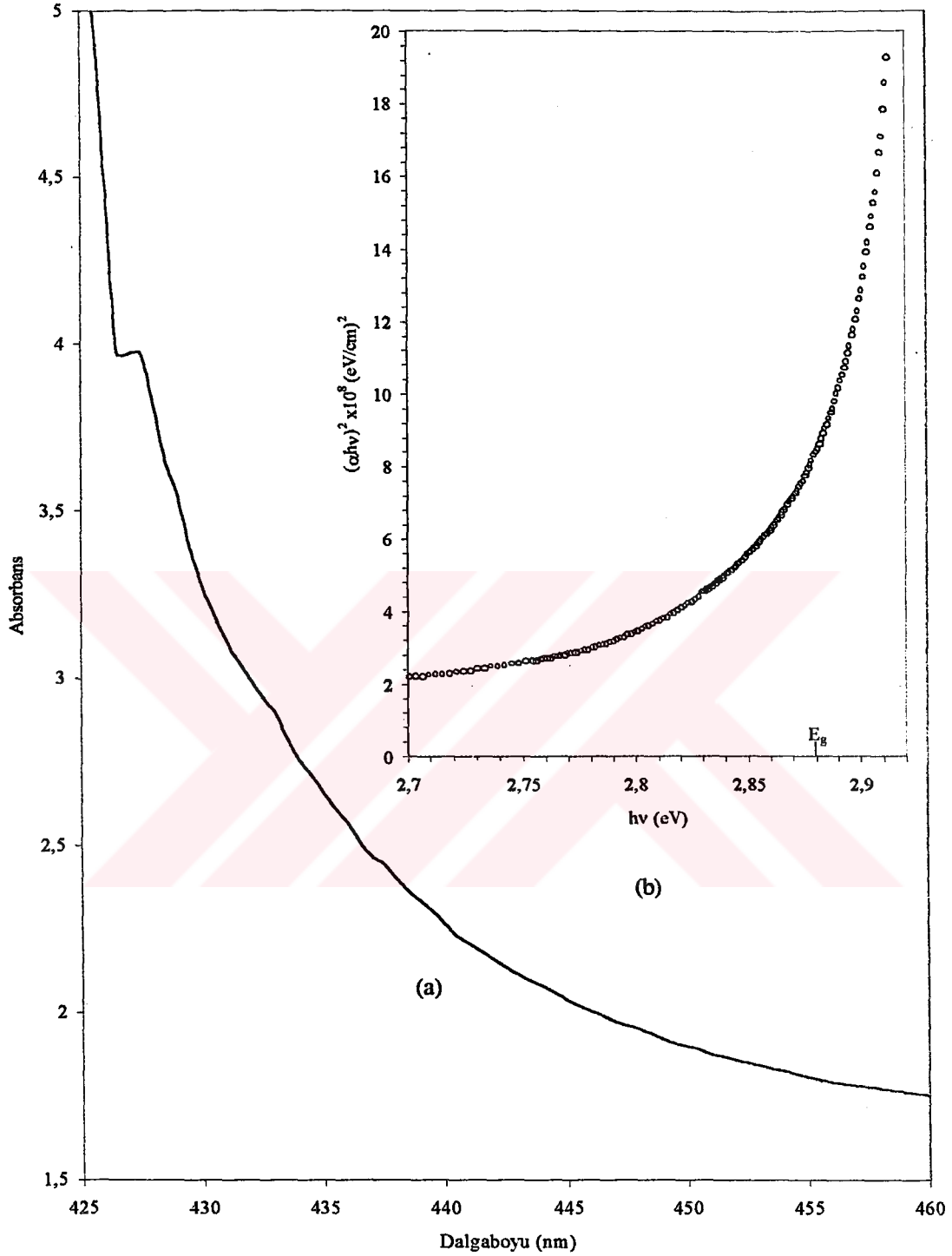
Şekil 5.14. $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında
 (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi



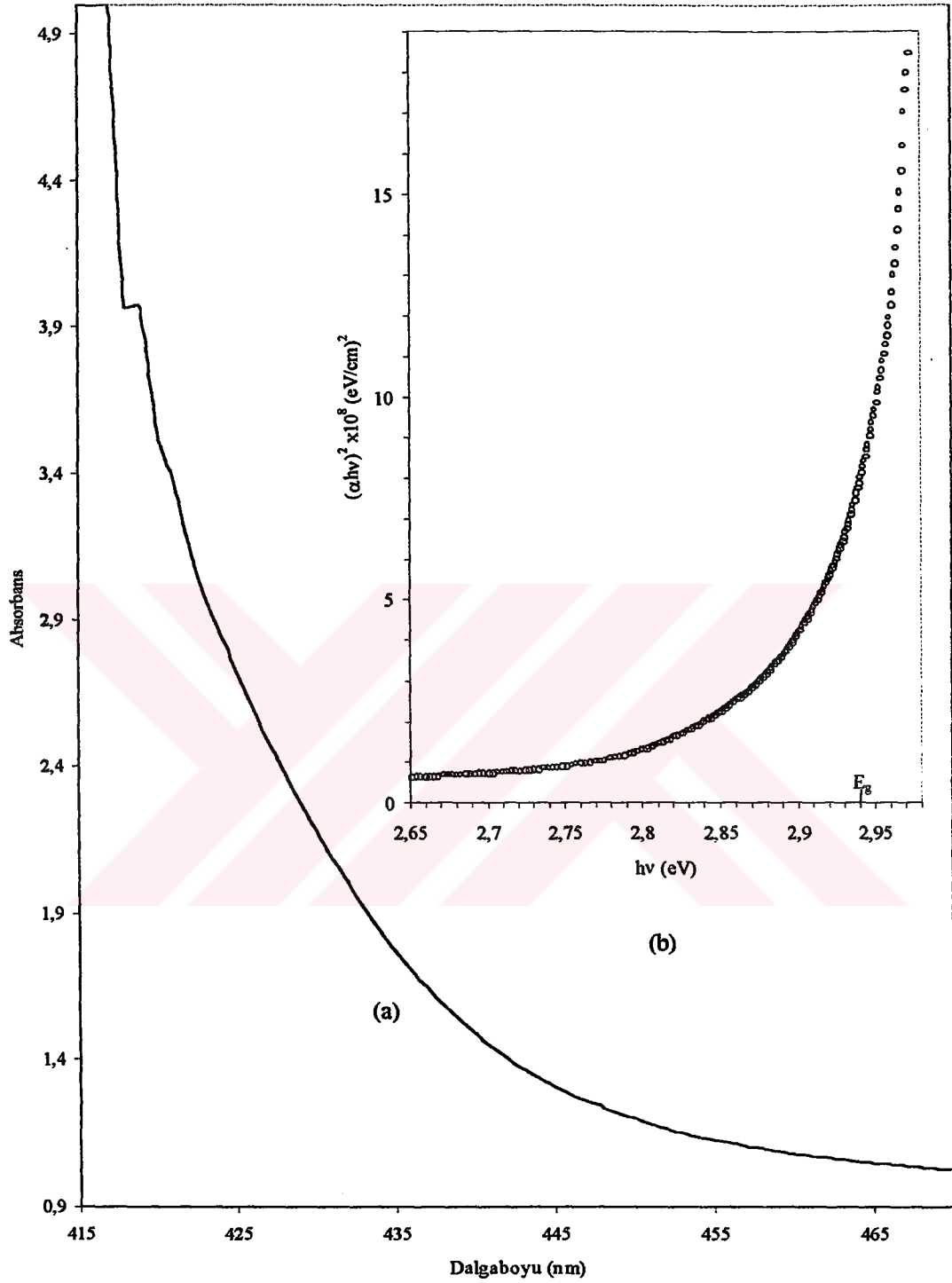
Şekil 5.15. $300 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında
 (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi



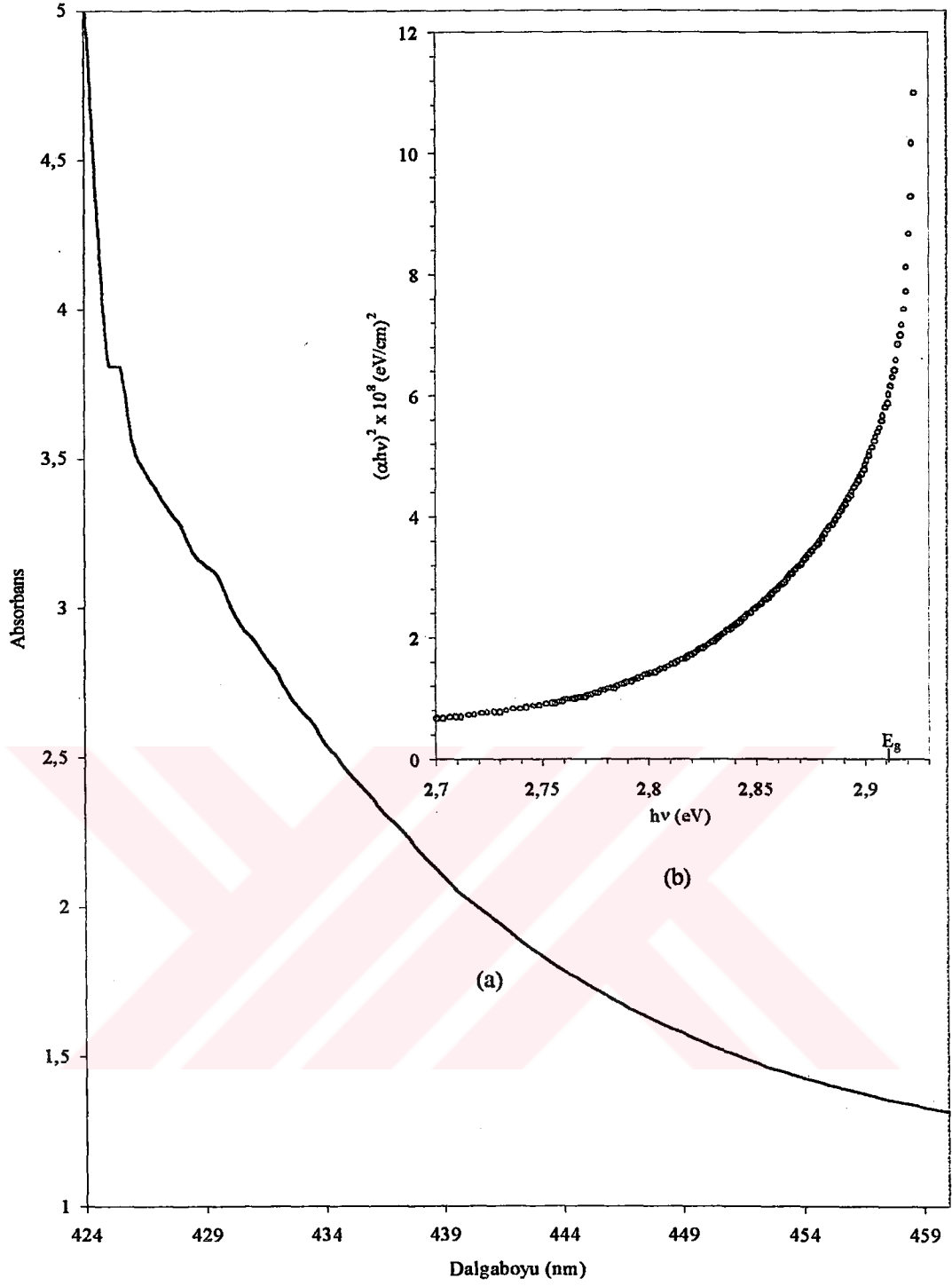
Şekil 5.16. $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %0.2 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi



Şekil 5.17. $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %0.5 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2$ 'nin hv 'ye göre değişimi



Şekil 5.18. $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %1 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha hv)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi



Şekil 5.19. $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen %2 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığında (a) Temel absorpsiyon spektrumu (b) $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi

6. DC İLETKENLİK

6.1. Giriş

Metal-yarıiletken-metal yapı oluşturularak yapılan elektriksel ölçümler sonucunda, yarıiletkenin iletim tipi bulunur ve iletim tipinden yararlanılarak da yarıiletkenin serbest taşıyıcı yoğunluğu, tuzak enerji seviyesi, tuzak yoğunluğu, taşıyıcı mobilitesi, bağıl dielektrik sabiti ve iletkenliği hakkında bilgi sahibi olunabilir.

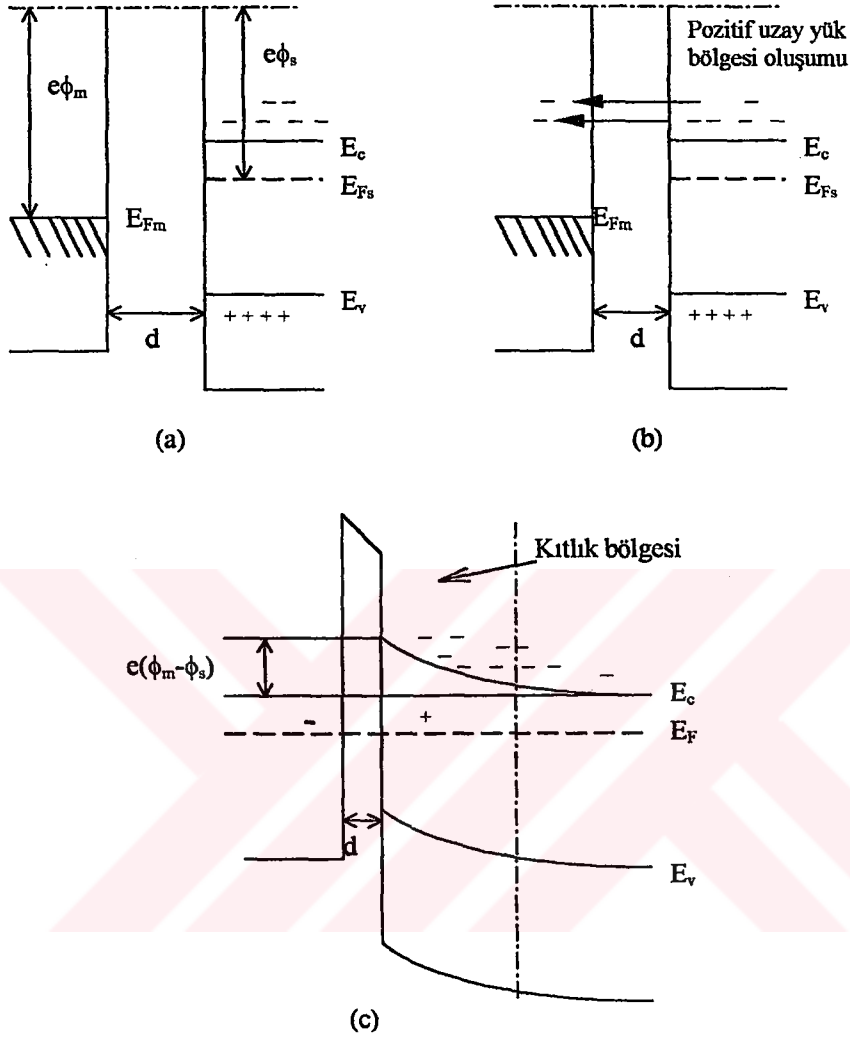
Metal kontak olarak farklı iş fonksiyonuna sahip altın, gümüş, bakır, alüminyum ve indiyum gibi metaller kullanılır. İş fonksiyonu, materyalden bir elektron koparabilmek için gerekli minimum enerji miktarı olup, ϕ ile sembolize edilir. Bazı metallerin iş fonksiyonu değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

6.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar

İş fonksiyonları farklı yarıiletken ile metal kontak yapıldığında, materyaller arasında geçici bir akım oluşur. Yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük veya küçük olmasına göre iki şekilde metal-yarıiletken kontak oluşur. Şekil 6.1'de metal ile n tipi yarıiletken arasındaki kontak görülmektedir.

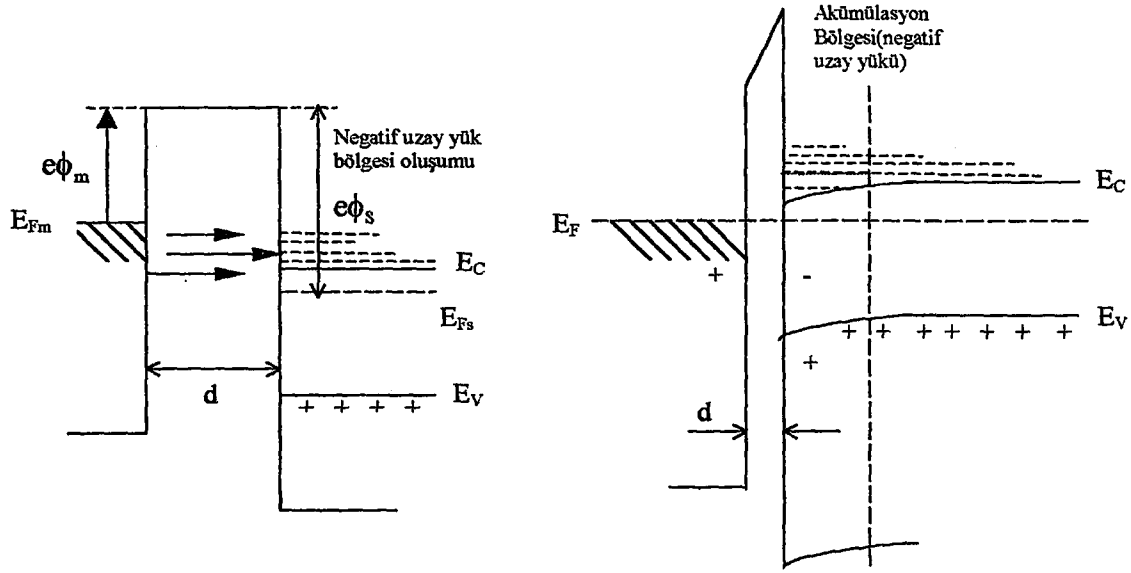
Çizelge 6.1. Bazı metallerin iş fonksiyonları (Lide, 1998)

Metal	İş fonksiyonu (eV)
Gümüş (Ag)	4.64
Altın (Au)	5.47
İndiyum (In)	4.09
Bakır (Cu)	5.10
Platin (Pt)	5.64
Alüminyum (Al)	4.20
Demir (Fe)	4.67



Şekil 6.1. Metal-n tipi yarıiletken kontağının enerji-bant diyagramı ($\phi_m > \phi_s$)

Şekil 6.1.a'dan görüldüğü gibi başlangıçta elektron geçişi olmayacaktır. Çünkü iki materyal arasındaki uzaklık elektronların tünellemesine izin vermeyecek kadar büyüktür. Şekil 6.1.b'deki gibi metal-yarıiletken arasındaki uzaklık çok çok küçültülürse, elektronlar metale engelden tünelleyerek geçeceklerdir. Böylece yarıiletkenin Fermi enerjisi metale göre azalacak ve iki materyalin Fermi enerjisi eşitlenecektir. Yarıiletkenin kontak potansiyel farkından dolayı elektrik alanı artacaktır. Böylece yarıiletkenin iç kısımlarında, iletim bandının alt sınırında durgun olan bir elektronun potansiyel enerjisi yüzeydeki bir elektronun potansiyel



Şekil 6.2. Metal-n-tipi yarıiletkende ohmik kontak ($\phi_m < \phi_s$)

enerjisinden $e(\phi_m - \phi_s)$ değeri kadar farklı olacaktır. Bu nedenle yarıiletkenin yüzeyinde iletim ve valans bant sınırları Şekil 6.1.c'deki gibi Fermi enerji seviyesine göre kavis çizeceklerdir. Böylece materyallerin Fermi enerji seviyeleri çakıştığında yarıiletkenin ara yüzeyi yakınında net taşıyıcı yoğunluğu iç kısımlardaki değerine göre azalır ve bölge pozitif yüklenir. Metal ara yüzeyi ise negatif yüklenir.

Metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olması durumunda ($\phi_m < \phi_s$) ise metal ile yarıiletken arasında ohmik kontak oluşur. Ohmik kontak, metal-yarıiletken arasında ihmal edilebilir düzeyde dirence sahip olan kontak türüdür ve yarıiletkenin akım-voltaj özelliğini bozmaz. Şekil 6.2'de metal ile n tipi yarıiletken arasındaki ohmik kontak görülmektedir.

Şekil 6.2'de metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçüktür. Metal ve yarıiletken arasındaki d mesafesinde bir akım gözlenmez. Ancak metal ve yarıiletken kontak durumuna getirildiği zaman bir engel de oluşmaz. Metalden yarıiletkene elektron akışı meydana gelir ve yarıiletken ara yüzeyinde elektron yoğunluğunun büyük olduğu akümülayon (accumulation) yani yığılma bölgesi oluşur. Metal ara yüzeyinde ise elektronların bıraktığı boşluklardan kaynaklanan pozitif yükler artar. Yarıiletken ara yüzeyinde mevcut olan elektron deposu

yarıiletkene ihtiyacı kadar yükü kolayca verebilir. Böyle özelliğe sahip kontak, ohmik kontak olarak adlandırılır. Ohmik kontak serbest taşıyıcılara bir engel oluşturmaz. Ohmik kontağı geçen taşıyıcılar, uygulanan voltajın büyük bir bölümünde ohm kanununa uyarlar.

Ohmik kontak, p-tipi yarıiletkende oluşturulacak ise, metalin iş fonksiyonun yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olması gerekir.

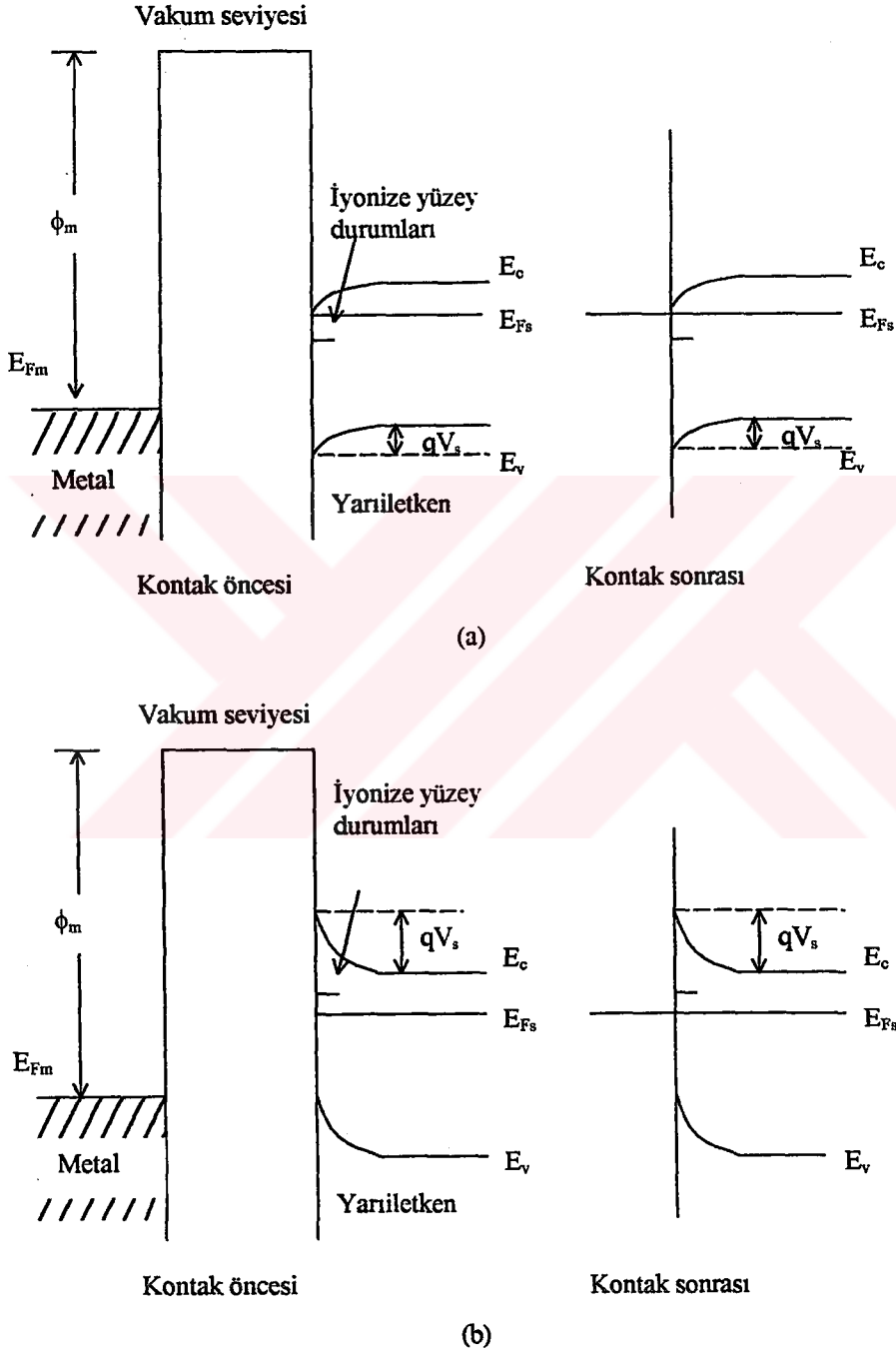
Düzlemsel olarak oluşturulan metal-yarıiletken-metal yapılarda lokalize durumlar, yüzeye yakın bölgede, yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini etkilemektedir. Yarıiletken yüzeyinde yabancı atomlar veya oksit tabakası lokalize durumlarda artışa yol açar. Bunlar yüzey durumları olarak adlandırılmaktadır. Bu yüzey durumları elektron verebilir veya elektron yakalayabilirler. Elektron verici yüzey durumları donör tipi, elektron alıcı yüzey durumları akseptör tipi olarak adlandırılmaktadır (Many ve ark., 1971; Kao ve Hwang, 1979).

Yüzey durumlarından yarıiletkenin iletim bandına olan yük transferi denge sağlanıncaya kadar devam eder. Enerji bantlarındaki kıvrılmanın derinliği yüzeyden itibaren yaklaşık 1000\AA 'dur (Many ve ark., 1971).

Yüzey durumları metal-yarıiletken kontakların enerji-bant yapısını etkilemektedir. Yüzey durumları Fermi enerji seviyesine göre uygun bir yerde ise enerji bantları metal-yarıiletken kontağı oluşturulmadan önce de kıvrılacaktır. Şekil 6.3'te yüzey durumlarının metal-yarıiletken kontağındaki enerji-bant yapısına etkisi gösterilmiştir.

Şekil 6.3.a'da donör tipi yüzey durumlarının ve Şekil 6.3.b'de akseptör tipi yüzey durumlarının olduğu durum gösterilmiştir. Metal yarıiletken kontağı oluşurken ısı denge sağlandığı ve metal ile yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri çakıştığı zaman yarıiletkenin enerji bantları biraz daha fazla kıvrılacaktır. Bu kıvrımın nedeni, metalden yüzey durumlarına gelen elektronlardan kaynaklanmaktadır. Böylece kontak potansiyelin neden olduğu elektrik alanı, uzay yüklerinden ziyade yüzey durumlarında son bulur. Bu durum yüzey durum yoğunluğunun yeterince büyük olması şartıyla, metal yarıiletken arasındaki mesafenin belirli bir değerine kadar etkin

olmaktadır ve böylece, yarıiletken yüzey, dış alanlardan yarıiletkenin iç kısımlarını perdeleyen ince metal bir film gibi davranmaktadır (Many ve ark., 1971).



Şekil 6.3.a) Donör tipi yüzey durumlarının metal-n tipi yarıiletken kontağındaki enerji-bant yapısına etkisi b) akseptör tipi yüzey durumlarının metal-n tipi yarıiletken kontağındaki enerji-bant yapısına etkisi

Metal-yarıiletken-metal kontaklarda iletim çoğunluk taşıyıcılarına bağlıdır. Yarıiletken bir materyalde belli voltaj ve sıcaklık bölgesinde farklı iletim olayları baskın olabilir. Bu çalışmada incelenen In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinde ohmik ve space-charge-limited akımları gözlenmiştir.

6.3. Space-Charge-Limited (SCL) İletim ve Ohmik İletim

Space-charge-limited (SCL) akımlar ohmik kontak özelliğindeki metal-yarıiletken-metal yapılar da gözlenmektedir. SCL akımının meydana gelmesi için yarıiletkene yeteri kadar taşıyıcının gönderilmesi gerekir. Kontak bölgesine uygulanan bir elektrik alan akümü lasyon bölgesinden yarıiletkene gerektiği kadar elektron enjekte eder. Bu durum elektrik alanın büyüklüğüne bağlı olup, elektrik alanı yeterince büyükse elektron materyal içerisine, uzay yüküyle sınırlandırılmış bir akım formunda enjekte edilir. Bu akım SCL akımı olarak tanımlanır. SCL akımları genel olarak materyalin bulk özellikleriyle baskınlık gösterir.

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

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{e[n(x) + n_t(x)]}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (6-1)$$

ile verilir (Kao ve Hwang 1979).

Burada;

$n(x)$, enjekte edilen serbest elektronların yoğunluğunu,

$n_t(x)$, tuzaklı elektronların yoğunluğunu,

ρ , space-charge yoğunluğunu,

ϵ_0 , boşluğun bağıl dielektrik sabitini ve

ϵ_r , materyalin bağıl dielektrik sabitini göstermektedir.

Akım yoğunluğu ise

$$J = e\mu_e n(x)E(x) = \sigma E(x) \quad (6-2)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada;

μ_e : elektronun mobilitesini,

σ : materyalin iletkenliğini göstermekte ve

$$E(x) = \frac{V(x)}{x} \text{ eşitliği ile verilmektedir.}$$

Tuzaklı elektronların yoğunluğu $n_t(x)$,

$$n_t(x) = \int_{E_t}^{E_u} h(E, x) f(E) dE \quad (6-3)$$

ile verilir .

Burada;

E_u , tuzak enerji seviyesinin üst sınırını,

$f(E)$, Fermi-Dirac dağılım fonksiyonunu göstermektedir ve

$h(E, x) = N_t(E)S(x)$ ile tanımlanmakta olup, $N_t(E)$ ile $S(x)$ ise tuzakların enerji ve uzaysal dağılım fonksiyonlarıdır.

Enjekte edilen serbest elektronların yoğunluğu $n(x)$ ise,

$$n(x) = N_c e^{-\frac{E_{Fe}}{kT}} \quad (6-4)$$

ile verilir. Burada;

N_c : iletim bandındaki etkin durum yoğunluğunu [$1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (Lampert ve Mark, 1970)],

E_{Fe} , elektronlar için quasi-Fermi seviyesini göstermektedir.

Tuzaksız durumda $n_t(x) = 0$ olacaktır. Bu durumda, denklem (6-1) ve denklem (6-2) birleştirilip, E elektrik alanın x değişkenine göre integrali alınırsa,

$$E(x) = \left(\frac{2J}{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_e} \right)^{1/2} x^{1/2} \quad (6-5)$$

elde edilir. Akım ve voltaj arasındaki bağıntıda (6-5) denklemi yerine yazılıp, integrali alınırsa,

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

ve

$$V = \frac{2}{3} \left(\frac{2J}{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_e} \right)^{1/2} d^{3/2} \quad (6-7)$$

ve buradan akım yoğunluğu

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

elde edilir.

Burada;

d , iki metal kontak arasındaki mesafeyi göstermektedir.

Bu denklem "Mott-Gurney square law" olarak bilinir (Lampert ve Mark, 1970; Kao ve Hwang, 1979; Zor ve Hogarth, 1987).

Bu durumda uygulanan düşük voltajlarda ohm kanunu denklem (6-2) ile verilmektedir. Voltajı arttırmaya başlarsak enjekte edilen serbest elektron yoğunluğu artar ve n_0 serbest elektron yoğunluğuna yaklaşır. Bu ana kadar ohm kanunundan önemli bir sapma yoktur. Ohmik iletimden SCL iletimine geçişin olduğu noktada akım yoğunlukları eşit olacağından denklem (6-2) ile denklem (6-8) birleştirilirse,

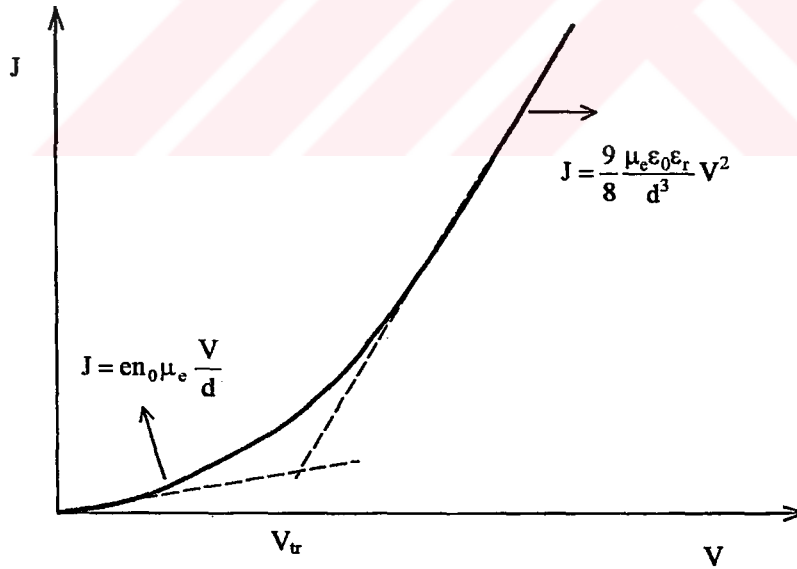
$$en_0\mu_e \frac{V}{d} = \frac{9}{8} \frac{\mu_e \epsilon_0 \epsilon_r V^2}{d^3} \quad (6-9)$$

ifadesi yazılabilir. Tuzaksız yapı için ohmik iletimden SCL iletimine geçiş voltajı V_{tr} ,

$$V_{tr} = \frac{8}{9} \frac{en_0 d^2}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (6-10)$$

elde edilir (Lampert ve Mark, 1970, Kao ve Hwang, 1979). Tuzaksız bir materyalde ohmik bölgeden space-charge iletim bölgesine geçiş Şekil 6.4'te gösterilmiştir.

Kristaller saf halde bulunmadıklarından yapılarında kusurlar ve safsızlıklar bulunur. Bu safsızlıklara ait enerji seviyeleri de, enerji aralığında yer alarak elektron tuzakları gibi davranırlar. İletim bandındaki elektronlar da bu seviyelere düşerler. Tuzaklar, Fermi enerji seviyesinin üstünde ise sığ tuzak (shallow trap), Fermi enerji seviyesinde veya altında ise derin tuzak (deep trap) adını alır. Bu durumda SCL iletimini sığ tuzaklar ve derin tuzaklar için ayrı ayrı incelemek yerinde olacaktır.



Şekil 6.4. Tuzaksız bir materyalde ohmik bölgeden space-charge iletim bölgesine geçişi gösteren diyagram (Kao ve Hwang, 1979)

6.3.1. Sığ tuzaklı space-charge-limited (SCL) iletimi ve ohmik iletim

Denklem (6-8) yarıiletken materyalde tuzakların olmadığı veya tamamen dolu olduğu durumu tanımlar. Bu tuzakların kaynağı küçük bağlanma enerjisine sahip sığ seviyede bir donör grubu olabilir. Tuzakların var olduğu durumda serbest taşıyıcı yoğunluğunun, toplam taşıyıcı (serbest ve tuzaklı) yoğunluğuna oranı

$$\theta_0 = \frac{n_0}{n_0 + n_t} = \frac{N_c}{N_t} \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T}\right) \quad (6-11)$$

ile verilir (Simmons, 1971).

Burada;

N_t : tuzak yoğunluğunu,

E_t : iletim bandı altındaki tuzak enerji seviyesini göstermektedir.

Tuzaksız durum için $n_t=0$ ve $\theta_0=1$ olacaktır. Tuzakların varlığında ise θ_0 birden küçük hatta çok çok küçük olur. Sığ tuzaklar SCL akımını etkileyecektir. Bu durumda akım yoğunluğu denklem (6-8)'den θ_0 çarpanı kadar farklı olacaktır ve

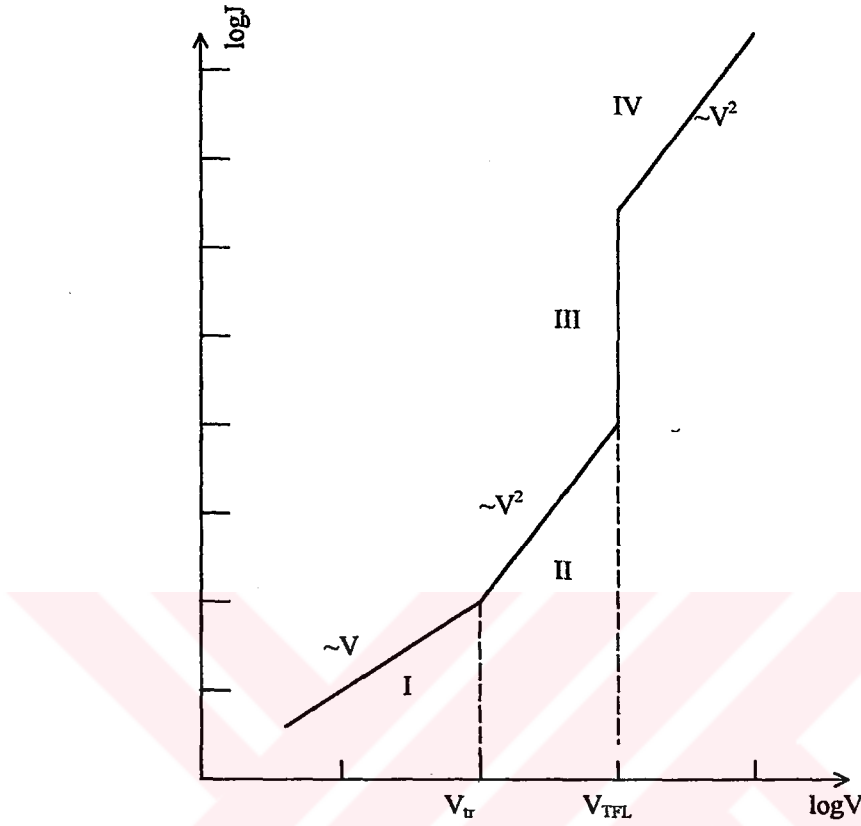
$$J = \frac{9}{8} \frac{\mu_e \epsilon_0 \epsilon_r \theta_0}{d^3} V^2 \quad (6-12)$$

ile verilir.

Ohmik bölgeden SCL iletime geçiş voltajı da denklem (6-10)'dan θ_0^{-1} çarpanı kadar farklı olacaktır. Yani bu geçiş voltajı,

$$V_{tr} = \frac{8}{9} \frac{en_0 d^2}{\epsilon_0 \epsilon_r \theta_0} \quad (6-13)$$

olarak elde edilir. V_{tr} ayrıca sıcaklığa bağlıdır (Lampert ve Mark, 1970, Kao ve Hwang, 1979).



Şekil 6.5. Sığ tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj karakteristiği

Bir yarıiletkenin akım-voltaj karakteristiği $I \propto V^m$ ye göre $m=1$ olduğu zaman ohmik iletim, $m \approx 2$ olduğunda ise SCL iletim özelliği gösterir. Sığ tuzaklı SCL iletimi için, enerji bant diyagramı ve akım-voltaj karakteristiği Şekil 6.5'te verilmiştir.

Şekil 6.5'te verilen I. bölgeye göre düşük voltajlarda, serbest taşıyıcılar kristal içine enjekte edilen serbest taşıyıcılardan daha fazladır. Akım ohm kanununa uyar ve akım yoğunluğu (6-2) denklemi ile verilmektedir. Bu bölge ohmik bölge olarak adlandırılır.

Şekil 6.5'te verilen II. bölgeye göre voltajı arttırdığımızda, enjekte edilen serbest taşıyıcıların sayısı daha fazla olur. I. bölgeden II. bölgeye geçiş voltajı V_{tr} denklem(6-13) ile verilmektedir. Bu nedenle, bu bölgede tuzaklar etkili olup, serbest

taşıyıcılar boş tuzaklar tarafından yakalanmaktadır. Bu bölgede akım V^2 ile değişmektedir.

Şekil 6.5'te verilen III. bölgeye göre voltajı daha da arttırdığımızda, SCL akımındaki artışla beraber tuzaklar dolmaya başlar. Uygulanan voltaj öyle bir değere ulaşır ki, bütün tuzaklar doldurulur. Bu bölgede ölçülen maksimum akım, tuzakların tamamının dolmasına karşılık gelen V_{TFL} (trap-filled-limited) voltajıdır. V_{TFL} voltajından itibaren akım yoğunluğunda keskin bir artış gözlenir. Akım değerindeki bu keskin artış, θ_0^{-1} çarpanı kadar olacaktır.

Şekil 6.5'te verilen IV. bölgeye göre ise, TFL bölgesindeki bu artıştan sonra akım, trap-free square law'a uyar. Fermi enerji seviyesi ise tuzak enerji seviyesine yaklaşır. Tuzakların tamamının dolduğu durumda serbest taşıyıcı yük yoğunluğu eN_t 'ye eşittir. Buna göre, kontaklar arasına uygulanan E elektrik alanı x'e bağlı olarak, ve $N_t \gg n$ durumunda, taşıyıcıların dx mesafesindeki sayısı,

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{eN_t}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (6-14)$$

ile verilir ve integrali alınırsa,

$$E(x) = \frac{eN_t x}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (6-15)$$

elde edilir. Buradan SCL bölgesinden TFL'ye geçiş voltajı olan V_{TFL} ,

$$V_{TFL} = \int_0^d E(x) dx \quad (6-16)$$

$$V_{TFL} = \frac{eN_t d^2}{2\epsilon_r \epsilon_0} \quad (6-17)$$

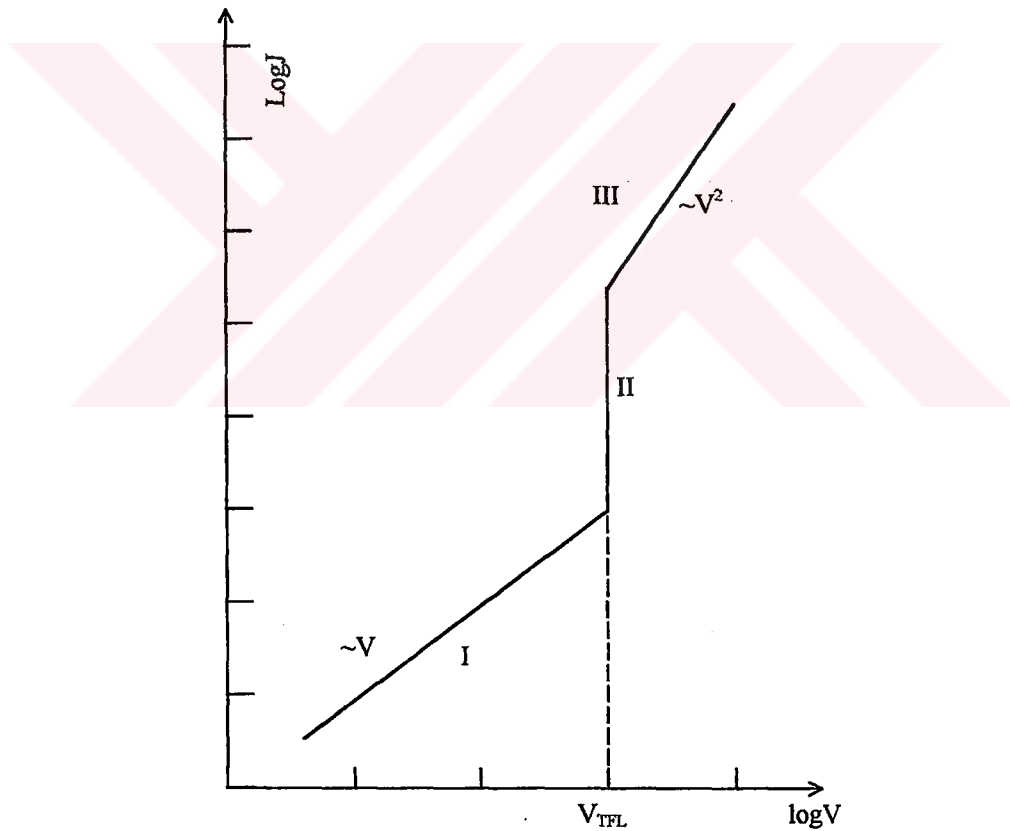
olarak elde edilir (Lampert ve Mark, 1970; Kao ve Hwang, 1979).

Burada;

d , kontaklar arası mesafeyi göstermektedir.

6.3.2. Derin tuzaklı space-charge-limited (SCL) iletimi ve ohmik iletim

Tuzak enerji seviyeleri derin yani, Fermi enerji seviyesinde ya da Fermi enerji seviyesinden daha aşağıda ise akım-voltaj grafiğinde ohmik bölgeden sonra TFL bölgesi gelir (Şekil 6.6). Derin tuzaklı SCL iletimin söz konusu olduğu durumdaki V_{TFL} voltajı, $N_t - n_0 \gg n$ durumunda, sıg tuzaklı SCL iletimine benzer şekilde



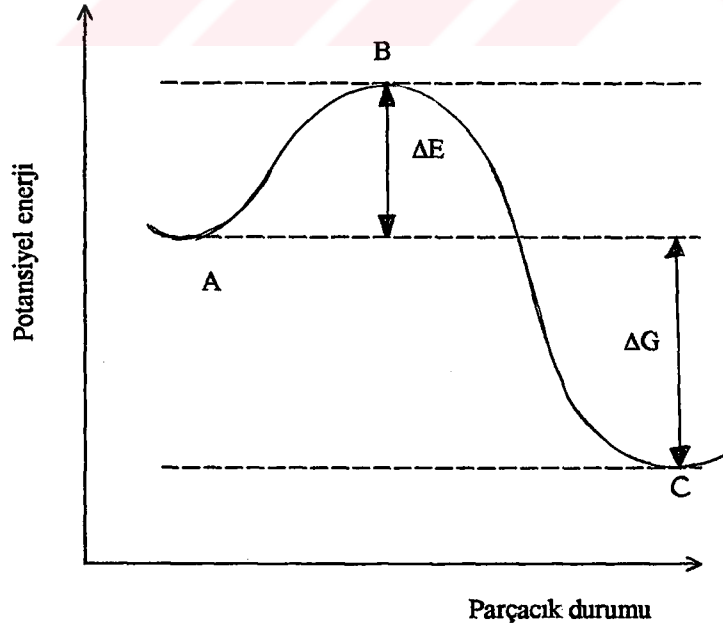
Şekil 6.6. Derin tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj karakteristiği

$$V_{TFL} = \frac{e(N_t - n_0)d^2}{2\epsilon_r\epsilon_0} \quad (6-18)$$

olarak elde edilir (Lampert ve Mark, 1970; Kao ve Hwang, 1979).

6.4. Akımın Sıcaklık ile Değişimi ve Aktivasyon Enerjisi

Bir atom veya parçacık, fiziksel veya kimyasal değişimler sırasında içinde bulunduğu yarı kararlı durumdan, yüksek enerjili bir durumdan geçerek, daha kararlı bir duruma geçebilir. Bu durum Şekil 6.7'de gösterilmektedir. A durumundaki bir parçacık kararsız B durumundan geçerek, daha kararlı C durumuna gelebilir. Bunun için ilk önce kararsız duruma geçişi sağlayacak kadar ΔE enerjisini alması gerekir. Bu enerji aktivasyon enerjisi olarak adlandırılır. C durumu en düşük enerjili durumdur. İlk durumdan son duruma geçerken parçacık ΔG kadar net bir enerjiyi herhangi bir şekilde dışarıya verir. Aktivasyon enerjisinden daha büyük veya eşit enerjilere sahip parçacıklar, buldukları yarı kararlı durumdan kararlı duruma potansiyel enerji



Şekil 6.7. Bir parçacığın bulunduğu yarı kararlı duruma göre daha yüksek enerjili durumdan geçerek kararlı hale gelmesi

bariyerini aşarak geçeceklerdir. Elektriksel iletkenlik sıcaklığa eksponansiyel olarak,

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left[-\frac{\Delta E}{k_B T}\right] \quad (6-19)$$

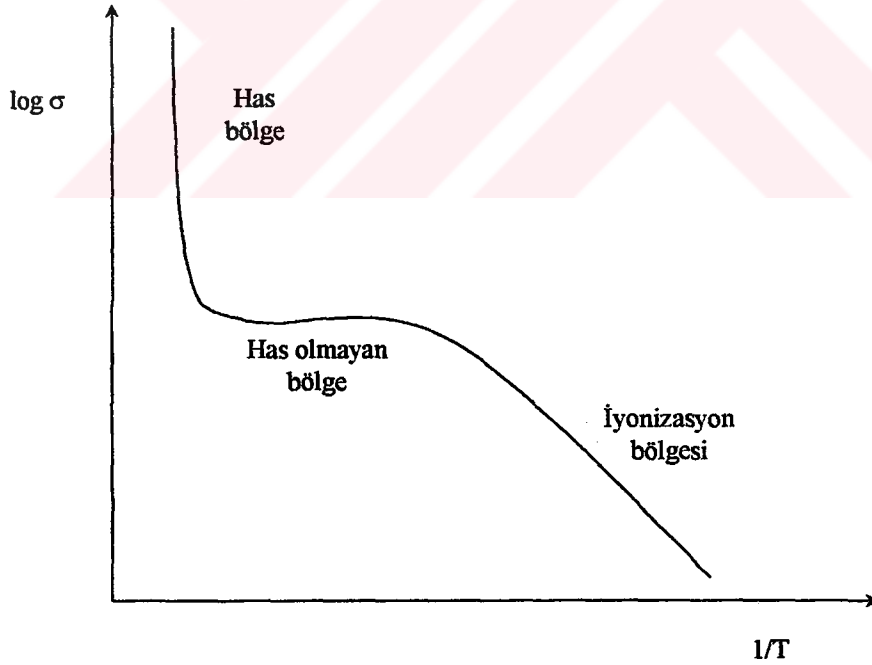
ifadesiyle bağlıdır.

Burada,

ΔE : aktivasyon enerjisini

σ_0 : yarıiletkene bağlı bir sabiti göstermektedir.

Sıcaklık arttığı zaman elektron konsantrasyonu artmakta ve dolayısıyla iletkenlik de artmaktadır. Bu durum Şekil 6.8'de görülmektedir. Denklem (6-2)'ye göre iletkenlik akım yoğunluğu ile, dolayısıyla da akım ile doğru orantılı olarak değişir. O halde iletkenlik-sıcaklık arasındaki ilişkiyi veren (6-19) denklemini, akım-sıcaklık için de yazabiliriz.



Şekil 6.8. n-tipi bir yarıiletkende iletkenliğin sıcaklıkla değişimi (Many ve ark., 1971)

$$I = I_0 \exp\left[-\frac{\Delta E}{k_B T}\right] \quad (6-20)$$

Denklem (6-20)'nin her iki tarafının logaritması alınırsa,

$$\log I = \log I_0 - 0.435 \frac{\Delta E}{k_B} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (6-21)$$

eşitliği elde edilir. $\log I$ 'nın $1/T$ 'ye karşı grafiği lineerdir. Bu doğrunun eğimi bize aktivasyon enerjini verecektir.

Tüm sıcaklık bölgelerindeki iletkenliğin sıcaklığa karşı değişimini, çoğunluk taşıyıcılarının donörler olduğu n-tipi bir yarıiletken için inceleyelim. Bu durum Şekil 6.8'de gösterilmiştir.

Mutlak sıfır sıcaklıkta hiçbir iletim yoktur ve sistem bir yalıtkan olarak davranır. Düşük sıcaklıklarda ($T \neq 0$) ise, valans bandından iletim bandına geçiş ihmal edilebilir derecede azdır. İletim sadece iyonize olmuş donörler tarafından sağlanır. Bu nedenle bu bölgeye iyonizasyon bölgesi denilir.

Sıcaklık biraz daha arttırılmaya devam edilirse, yine valans bandından iletim bandına geçişler ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak, sıcaklık artışıyla beraber donör enerji seviyelerindeki elektronlar iletim bandına geçecek enerjiyi bulabilirler ve donör seviyesindeki elektronlar tükeninceye kadar iletim bandına geçişler devam eder. Bu tip iletkenlik has olmayan (extrinsic) iletkenliktir.

Yüksek sıcaklıklardaki iletim valans bandındaki elektronların iletim bandına çıkması ile gerçekleşir ve bu tip iletkenliğe has (intrinsic) iletkenlik denilir. Elektronların yasak enerji aralığını geçip iletim bandına çıkması için, en az yasak enerji aralığına eşit olacak bir enerjiye ihtiyaç vardır. Bu yüzden bu tür bir iletim ancak yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda yeterli ısıl enerji nedeni ile çok sayıda elektron valans bandından iletim bandına geçecektir. Yani, yüksek sıcaklıklardaki iletim yarıiletkenin yapısal özelliği olan has iletkenlik şeklinde olur (Pierret, 1996).

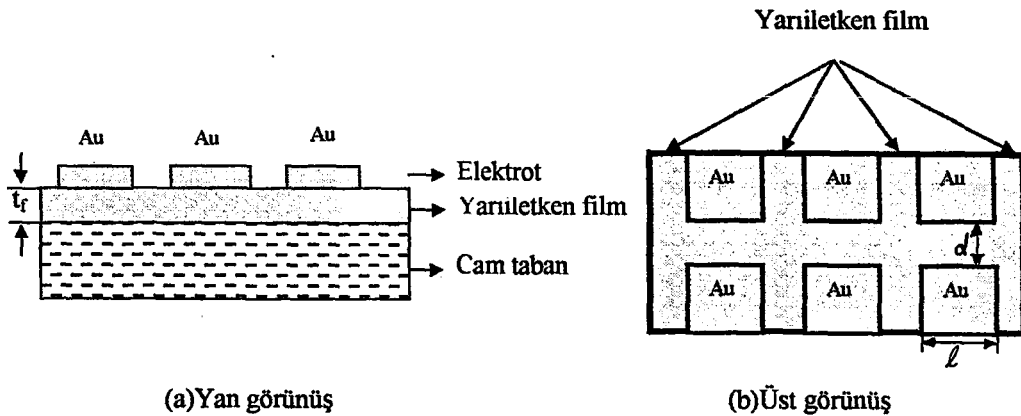
6.5. In Katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ Filmlerinde Metal-Yarıiletken-Metal Yapıların Oluşturulması

Elde edilen filmlere vakumda kimyasal buhar depolama yöntemi ve havya ile olmak üzere iki farklı yöntem ile kontak yapılmıştır.

Birinci yapı Şekil 6.9'daki gibi düzlemsel formda oluşturulmuştur. Şekildeki t_f , cam taban üzerine kaplanan filmin kalınlığını, d elektrotlar arası uzaklığı, ℓ elektrot boyunu göstermektedir.

In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerine metal kontak kaplama işlemi Leybold Heraus 300 Univex model vakumda kimyasal buhar depolama deney setinde yapılmıştır. Cihazın üzerinde bulunan monitör, kaplanacak kontak metalin kalınlığını göstermektedir. Elde edilen filmlere metal-yarıiletken-metal yapıların oluşturulması için, iki metal kontak arasındaki yarıiletken bölge, alüminyum folyo ile kaplanmıştır. Kontak olacak kısım ise açıkta bırakılmıştır. Açıkta kalan bu kısma altın buharlaştırılmıştır. Böylece Au-yarıiletken-Au yapı oluşturulmuştur. Filmler üzerinde oluşturulan altın kontak kalınlığı yaklaşık 4700Å 'dur.

Diğer yöntemde ise, In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerine metal kontak kaplama işlemi havya ile yapılmıştır. Bu işlem yapılırken bölge iyice ısıtılmış ve erime noktası düşük olduğundan (155°C) indiyum metali kullanılmıştır. Böylece In-yarıiletken-In yapı elde edilmiştir.



Şekil 6.9. Düzlemsel formda oluşturulan metal-yarıiletken-metal yapıların şematik olarak yandan ve üstten görüntüleri

Ölçümler için hazır hale gelen materyaller kapalı kutularda muhafaza edilmişlerdir. Elde edilen metal-yarıiletken-metal yapılarda elektrotlar arası uzaklık d , elektrot boyu ℓ değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Elde edilen metal-yarıiletken-metal yapılarda d , ℓ değerleri

Materyal	Metal kontaklar	ℓ (mm)	d (mm)
$Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	In-In	8.0	1.20
	Au-Au	5.0	1.68
%0.2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	In-In	8.5	2.36
	Au-Au	-----	-----
%0.5 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	In-In	10.0	1.80
	Au-Au	4.0	2.00
%1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	In-In	10.0	1.40
	Au-Au	4.5	2.20
%2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	In-In	9.0	1.28
	Au-Au	5.0	2.20

6.6. In Katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ Filmlerinin Akım-Voltaj Karakteristikleri

Elde edilen In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ yapısındaki filmlerin, oda sıcaklığındaki akım-voltaj değişimi ölçümleri Hewlett Packard 4140B model pA meter/DC voltage Source ölçüm cihazından elde edilmiştir. Cihazın ölçüm aralığı, uygulanan voltaj değerleri için 0-100V ve akım değerleri için 10^{-14} - 10^{-2} A arasında değişmektedir. Oda sıcaklığında alınan bu ölçümler karanlıkta ve atmosfer basıncı altında alınmıştır.

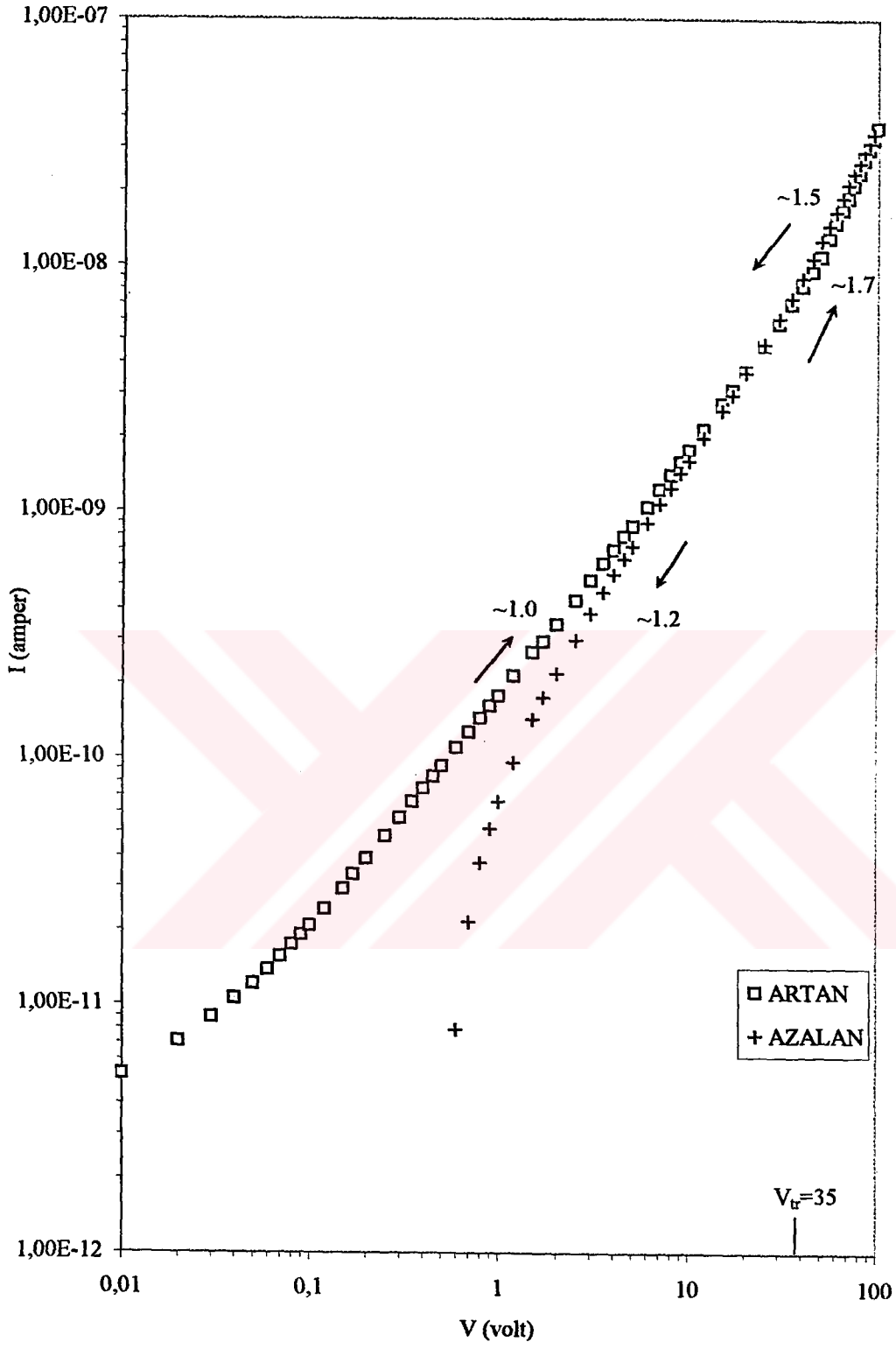
Uygulanan voltaj kademeli olarak artırılırken her bir voltaj değerinde yaklaşık 1 dk beklendikten sonra akım değeri okunmuştur. Aynı şekilde azalan voltaj değerlerindeki akımlar da okunurken birer dakika beklenmiştir.

6.6.1. Au-Au kontaklı filmlerin akım-voltaj karakteristikleri

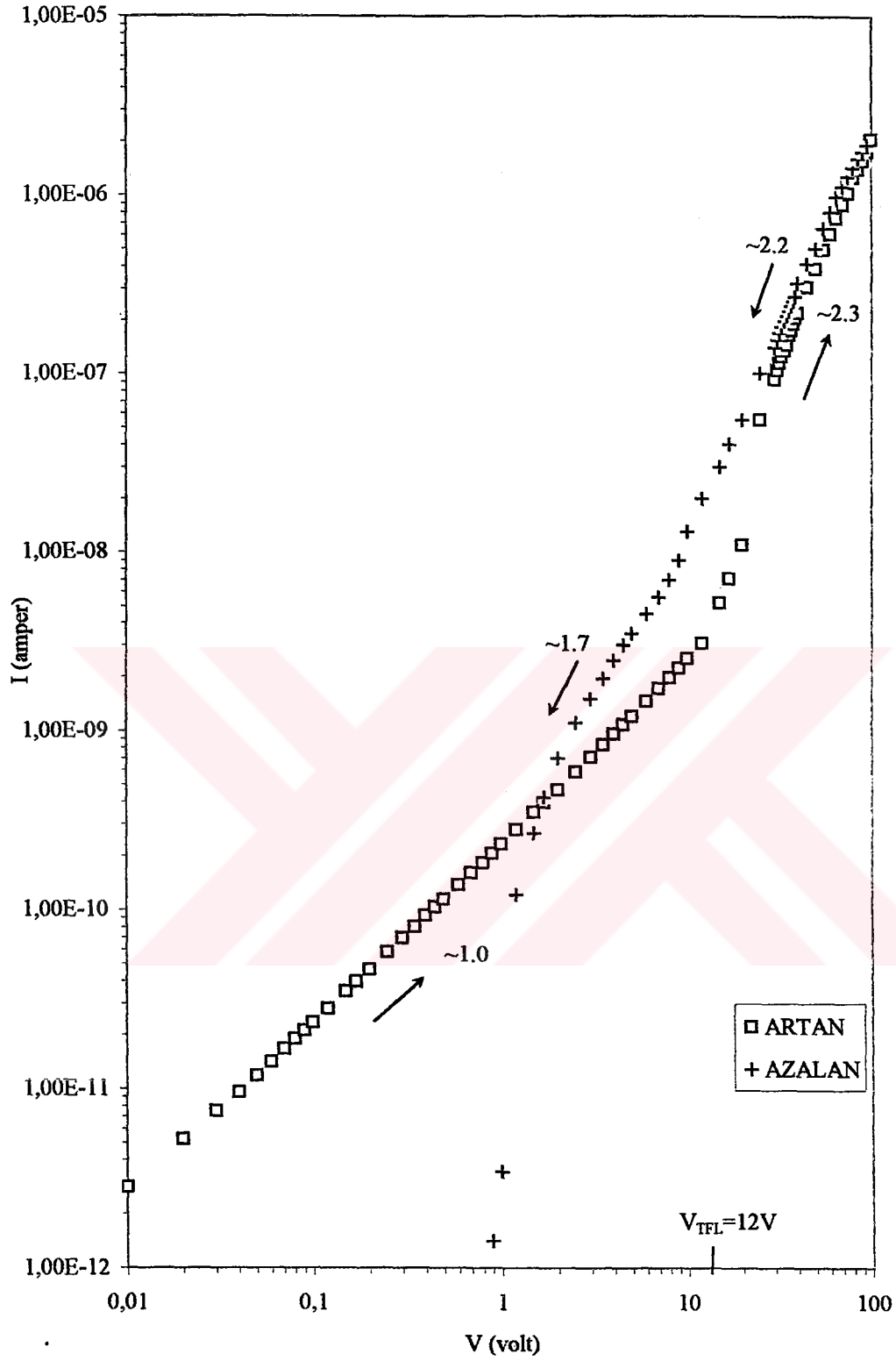
Akım-voltaj grafiklerinden yararlanarak oda sıcaklığında materyalin serbest taşıyıcı yoğunluğu, iletkenliği, tuzak yoğunluğu ve enerjisi hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, elde edilen filmler için bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r=9$ (Lide, 1998), iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu $N_c=1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (Jonscher, 1983) ve elektron mobilitesi $\mu=9 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olarak alınmıştır. Yapılan bir çalışmada da mobilite değeri $1-10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olarak bulunmuştur (Chynoweth, 1979).

Şekil 6.10'da Au-Au kontaklı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin akım-voltaj grafiği görülmektedir. Uygulanan artan ve azalan voltajlar, akım-voltaj grafiklerinde farklı şekillerle gösterilmiştir. Au-Au kontaklı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filmine 0.01V değerinden başlayarak artan voltajlar uygulanmıştır. Artan voltaj değerlerine göre bu grafiği incelediğimizde, 0.2V ile 35V arasında akımın voltajla $I \sim V^{1.0}$ ile değiştiği ohmik iletimin etkin olduğu görülmektedir. Ohmik iletim bölgesini akımın $I \sim V^{1.7}$ ile değiştiği SCL iletim bölgesi izlemektedir. SCL iletim bölgesinde yükler tuzaklanırken, enjekte edilen yüklerin sayısı artmaktadır ve bundan dolayı da SCL iletim bölgesindeki akımı, serbest yükler ve enjekte edilen yükler oluşturmaktadır. Ohmik bölgeden SCL iletime geçiş ise $V_t=35\text{V}$ değerinde gerçekleşmektedir. Spray-pyrolysis yöntemiyle elde edilen bu materyalde, tuzaklardan arınmış bir yapının elde edilebilmesi imkansız gibidir. Au-Au kontaklı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin sığ tuzaklı yapıya sahip olduğu Şekil 6.10'dan da görülmektedir. Ancak, bu materyaldeki tuzak yoğunluğu ve tuzak enerji seviyesi, TFL bölgesi gözlenemediği için, sığ tuzaklı SCL iletimi için olan akım-voltaj karakteristiğini ifade eden denklemlerden elde edilememiştir.

Au-Au kontaklı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığında ve atmosfer basıncındaki, Şekil 6.10'da verilen akım-voltaj grafiğinden yararlanarak ve denklem (6-2) kullanılarak elektriksel iletkenlik değeri $\sigma=8.30 \times 10^{-8} (\text{ohm-cm})^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Serbest taşıyıcı yoğunluğu yine (6-2) denkleminde $n_0=5.76 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Bulunan değerler Çizelge 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.10. Au-Au kontaklı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği



Şekil 6.11. Au-Au kontaklı %0.5 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği

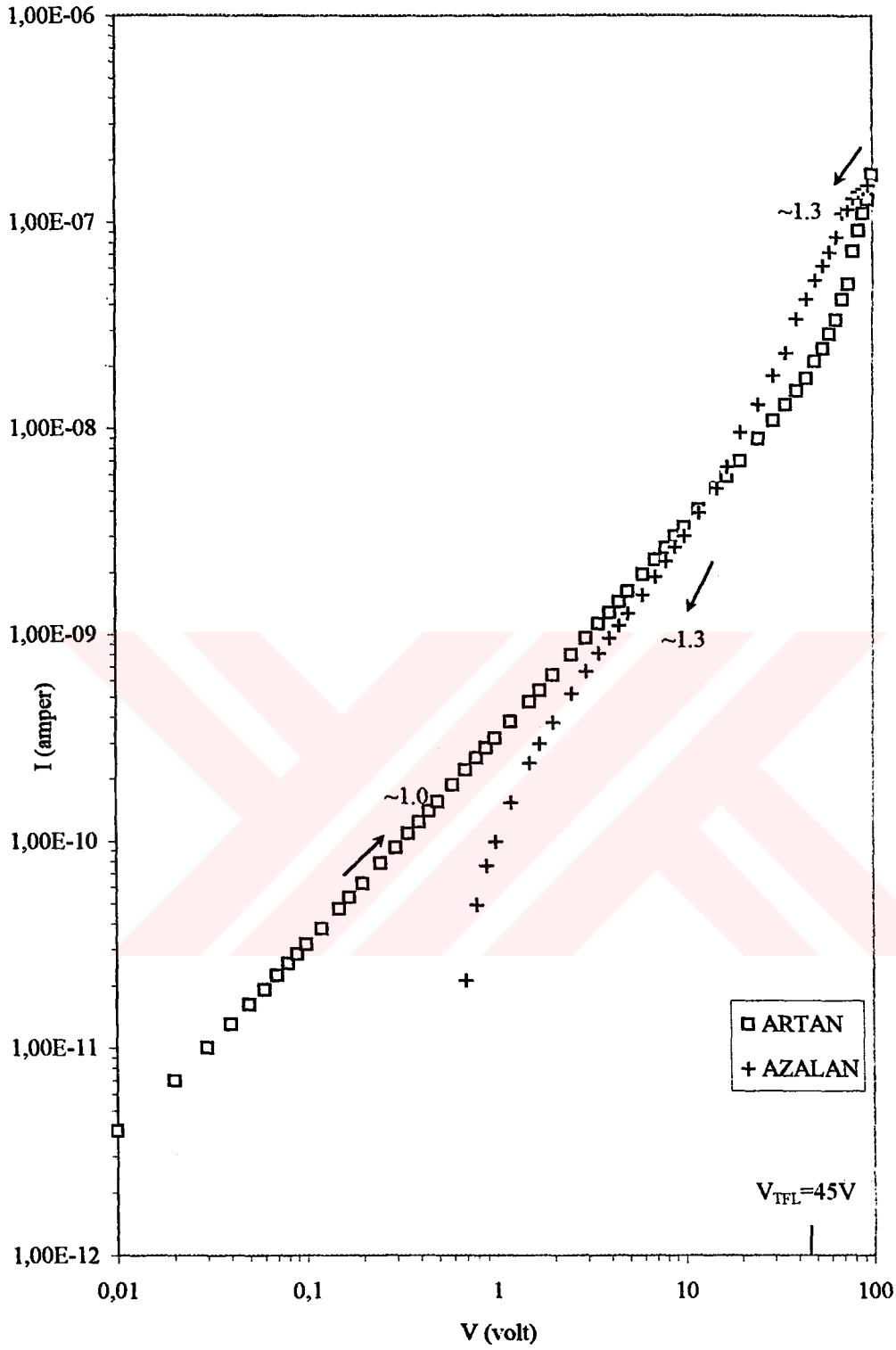
Au-Au kontaklı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmine azalan voltaj uygulanıldığında ise akım-voltaj grafiği, artan voltaj uygulanıldığında akım-voltaj grafiğine benzer şekilde SCL ve ohmik iletim bölgelerinden oluşmaktadır. Yani azalan voltaj uygulanmasıyla, iletme katkıda bulunan serbest taşıyıcılar ve tuzaklanan yükler hemen hemen eski enerji seviyelerine dönmektedir. 2V-23V arasında akımın voltaja bağlılığı $I \sim V^{1.2}$ olup ohmik, 23V-100V arasında ise bu bağlılık $I \sim V^{1.5}$ olup SCL iletim göstermektedir.

Au-Au kontaklı %0.5 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin akım-voltaj grafiği Şekil 6.11'de görülmektedir. Bu grafiği artan voltaj değerlerine göre incelediğimizde, 0.01V ile 12V arasında ohmik iletimin etkin olduğu görülmektedir. Ohmik bölgeyi akımda hızlı bir artışın olduğu (12V-30V arası) TFL bölgesi izlemektedir. Yani Fermi enerji seviyesi civarında bulunan derin tuzaklar mevcuttur (Şekil 6.6). Bu bölgede tuzaklar hızlı bir şekilde dolmaktadır. TFL bölgesini ise $I \sim V^{2.3}$ olan trap-free SCL bölgesi izlemektedir.

Azalan voltaj uygulanıldığında ise, 10V-100V arasında akımın voltaja bağlılığı $I \sim V^{2.2}$ şeklinde olup, tuzaklar hızlı bir şekilde boşalmaktadır. 2V-10V arasında ise bu bağlılık $I \sim V^{1.7}$ şeklindedir ve tuzaklardaki elektronların salınmaları daha yavaş bir şekilde olmaktadır.

Au-Au kontaklı %0.5 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin elektriksel iletkenlik değeri $\sigma = 3.58 \times 10^{-7} (\text{ohm-cm})^{-1}$ ve serbest taşıyıcı yoğunluğu $n_0 = 2.49 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.11'de verilen akım-voltaj grafiğinden $V_{TFL} = 12V$ olarak belirlenmiştir. V_{TFL} değerinin (6-18) denkleminde yerine yazılmasıyla, tuzak yoğunluğu $N_t = 2.52 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Tuzak enerjisi denklem (6-11) kullanılarak, $E_t = 0.539 \text{eV}$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 6.12'de Au-Au kontaklı %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin akım-voltaj grafiği görülmektedir. Artan voltaj değerlerine göre bu grafiği incelediğimizde, 0.01V ile 45V arasında akımın voltaja $I \sim V^{1.0}$ ile bağlı olduğu ohmik iletimin etkin olduğu görülmektedir. Ohmik bölgeyi akımda hızlı bir artışın olduğu TFL bölgesi izlemekte olup, derin tuzaklı SCL iletiminin mevcut olduğunu söyleyebiliriz. Bu bölgede tuzaklar hızlı bir şekilde dolmaktadır.



Şekil 6.12. Au-Au kontaktlı %1 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği

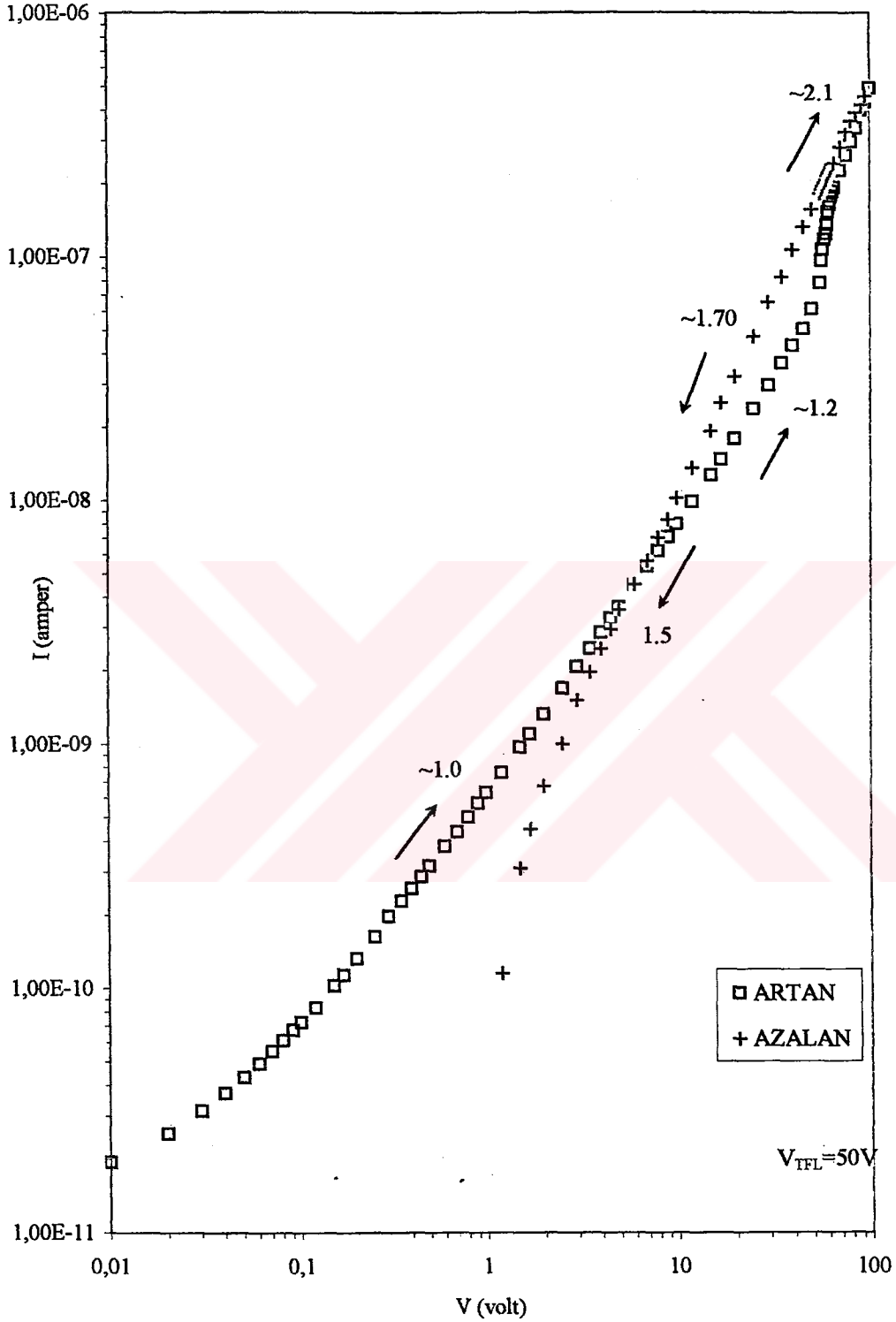
Au-Au kontaklı %1 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin elektriksel iletkenlik değeri $\sigma=4.44 \times 10^{-7} (\text{ohm-cm})^{-1}$ ve serbest taşıyıcı yoğunluğu $n_0=3.08 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Bu filmin TFL voltajı Şekil 6.12'deki akım-voltaj grafiğinden $V_{\text{TFL}}=45\text{V}$ olarak tespit edilmiş ve tuzak yoğunluğu $N_t=3.17 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Tuzak enerjisi ise denklem (6-11) kullanılarak, $E_t=0.506\text{eV}$ olarak hesaplanmıştır. Bu filme azalan voltaj uygulandığında ise, 70V-100V arasında akımın voltaja bağlılığı $I \sim V^{1.3}$ şeklindedir ve daha sonra 70V değerinden 20V değerine kadar tuzaklar boşalmaktadır. Daha sonra yine akım voltaj bağlılığı 2V-20V arasında $I \sim V^{1.3}$ şeklinde olmaktadır.

Au-Au kontaklı %2 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin akım-voltaj grafiği Şekil 6.13'te görülmektedir. Bu grafiği artan voltaj değerlerine göre incelediğimizde, 0.2V ile 10V arasında ohmik iletimin etkin olduğu görülmektedir. Ohmik bölgeyi akımın biraz daha hızlı arttığı akım-voltaj değişiminin $I \sim V^{1.2}$ olan bölge izlemektedir. 50V değerinden sonra TFL bölgesi gözlenmekte ve tuzaklar dolmaktadır. Daha sonra akımın voltaj ile $I \sim V^{2.1}$ olarak değiştiği trap-free SCL bölgesi gelmektedir. Au-Au kontaklı %2 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin de derin tuzaklı bir yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz. Bu filme azalan voltaj uygulandığında ise, 10V-100V arasında akımın voltaja bağlılığı $I \sim V^{1.7}$ şeklinde ve 0.1V-10V arasında $I \sim V^{1.5}$ şeklinde olmaktadır. Yani tuzaklardan elektronların salınmaları yavaş olmaktadır.

Bu filmin elektriksel iletkenliği $\sigma=6.29 \times 10^{-7} (\text{ohm-cm})^{-1}$ ve serbest taşıyıcı yoğunluğu $n_0=4.37 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ ve Şekil 6.13'te verilen akım-voltaj grafiğinden belirlenen $V_{\text{TFL}}=50\text{V}$ değeri kullanılarak tuzak yoğunluğu $N_t=6.65 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. ve tuzak enerjisi $E_t=0.470\text{eV}$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.3. Au-Au kontaklı In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filmlerinin elektriksel özellikleri

Materyal	$n_0 (\text{cm}^{-3})$	$\sigma (\text{ohm cm})^{-1}$	$N_t (\text{cm}^{-3})$	$E_t (\text{eV})$
$\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$	5.76×10^9	8.30×10^{-8}	-----	-----
%0.5 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$	2.49×10^{11}	3.58×10^{-7}	2.52×10^{11}	0.539
%1 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$	3.08×10^{11}	4.44×10^{-7}	3.17×10^{11}	0.506
%2 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$	4.37×10^{11}	6.29×10^{-7}	4.47×10^{11}	0.470



Şekil 6.13. Au-Au kontaklı %2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği

6.6.2. In-In kontaklı filmlerin akım-voltaj karakteristikleri

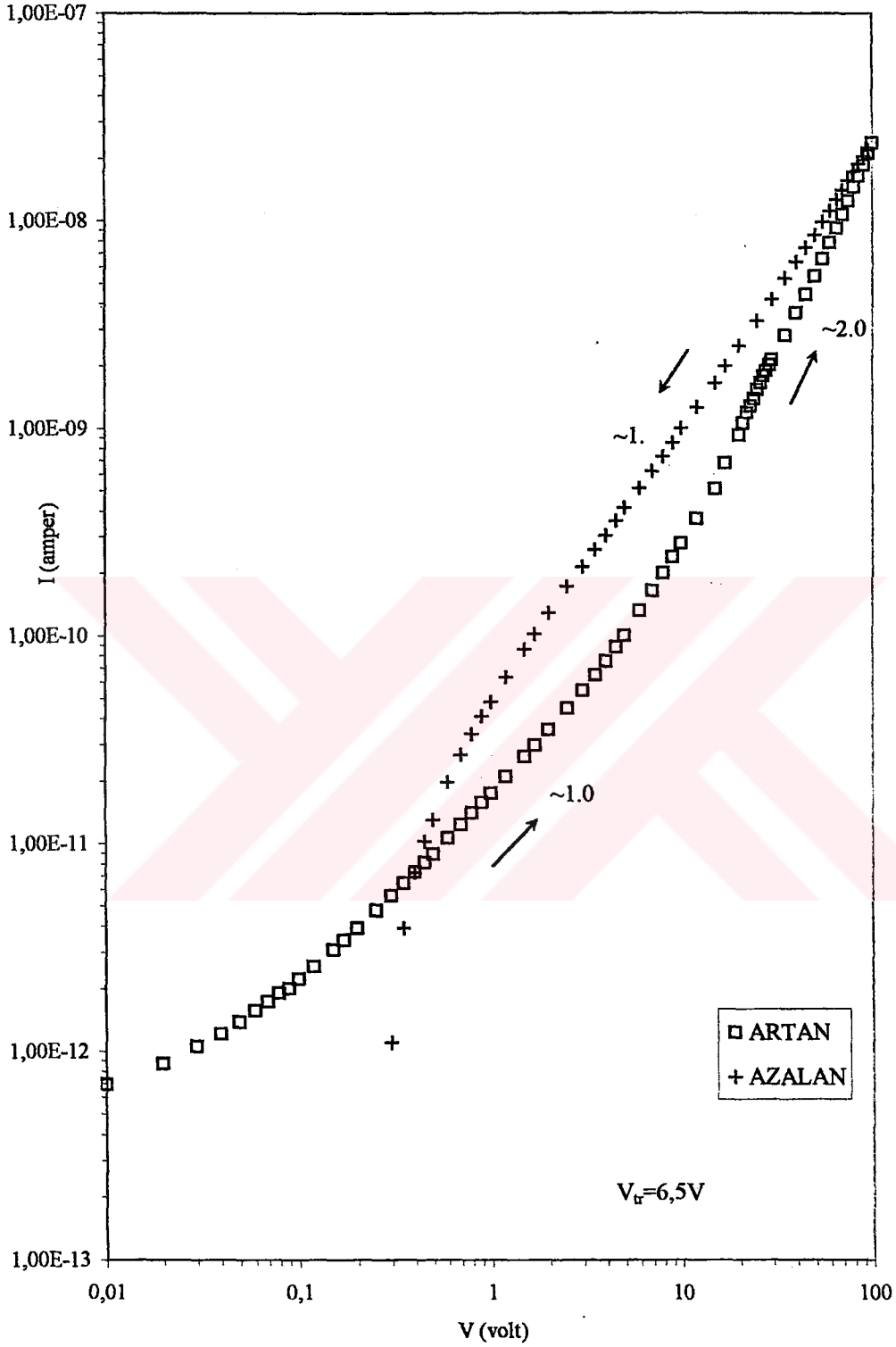
Akım-voltaj grafiklerinden yararlanarak oda sıcaklığında materyalin serbest taşıyıcı yoğunluğu, iletkenliği, tuzak yoğunluğu ve enerjisi hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, elde edilen filmler için bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r=9$, iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu $N_c=1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ve elektron mobilitesi $\mu=9 \text{cm}^2/\text{Vs}$ olarak alınmıştır.

Şekil 6.14'te In-In kontaklı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin akım-voltaj grafiği görülmektedir. Uygulanan artan ve azalan voltajlar, akım-voltaj grafiklerinde farklı şekillerle gösterilmiştir. In-In kontaklı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filmine 0.01V değerinden başlayarak artan voltajlar uygulanmıştır. Artan voltaj değerlerine göre bu grafiği incelediğimizde, 0.1V ile 6.5V arasında ohmik iletimin etkin olduğu görülmektedir. Ohmik iletim bölgesini V^2 bölgesi izlemektedir. Bu bölgede yükler tuzaklanırken, enjekte edilen yüklerin sayısı artmaktadır ve bundan dolayı da SCL iletim bölgesindeki akımı, serbest yükler ve enjekte edilen yükler oluşturmaktadır. Ohmik bölgeden SCL iletime geçiş ise $V_{tr}=6.5\text{V}$ değerinde gerçekleşmektedir.

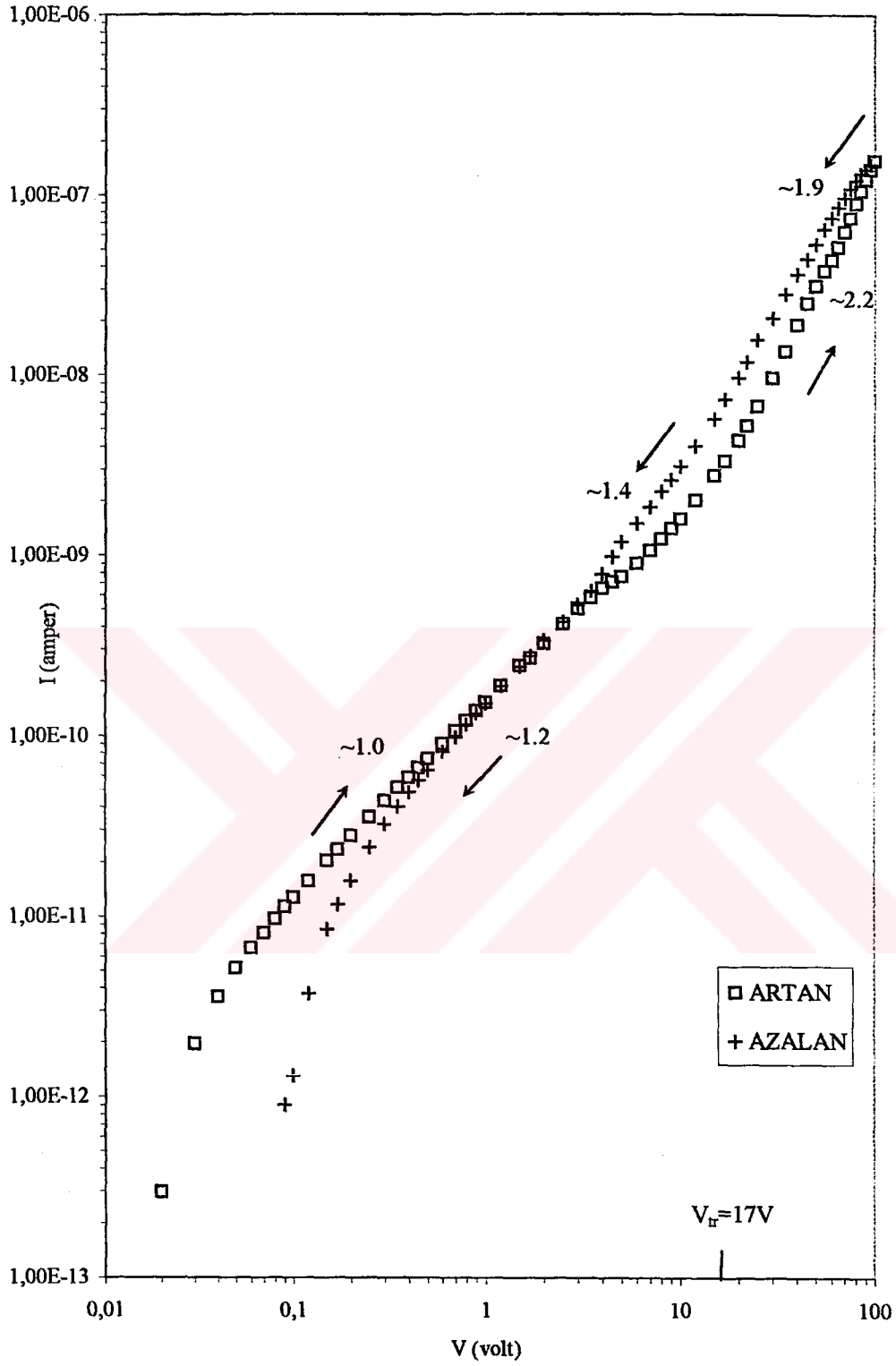
Şekil 6.14'teki akım-voltaj grafiğinden yararlanarak ve denklem (6-2) kullanılarak elektriksel iletkenliği $\sigma=3.62 \times 10^{-8} \text{(ohm-cm)}^{-1}$ ve serbest taşıyıcı yoğunluğu $n_0=2.51 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. In-In kontaklı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminde ohmik bölgeyi V^2 bölgesinin takip ettiği sığ tuzaklı yapı mevcuttur. Ancak tuzakların dolduğu TFL bölgesi gözlenememiştir ve bu nedenle de materyaldeki tuzak yoğunluğu ve tuzak enerji seviyesi sığ tuzaklı SCL iletimi için olan akım-voltaj karakteristiğini ifade eden denklemlerden elde edilememişlerdir. Bulunan değerler Çizelge 6.4'te verilmiştir.

In-In kontaklı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filmine azalan voltaj uygulandıığında, 0.8V-100V arasında akımın voltaja bağıllığı $I \sim V^{1.3}$ olmaktadır. Bu durumda sığ tuzaklardaki elektronların oldukça yavaş salındıklarını söyleyebiliriz.

In-In kontaklı %0.2 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin akım-voltaj grafiği Şekil 6.15'te görülmektedir. 0.08V ile 17V arasında ohmik iletim görülmektedir. Ohmik iletim bölgesini akımın $I \sim V^{2.2}$ ile değiştiği SCL iletim bölgesi izlemektedir. Ohmik



Şekil 6.14. In-In kontaklı Cd_{0,22}Zn_{0,78}S filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği

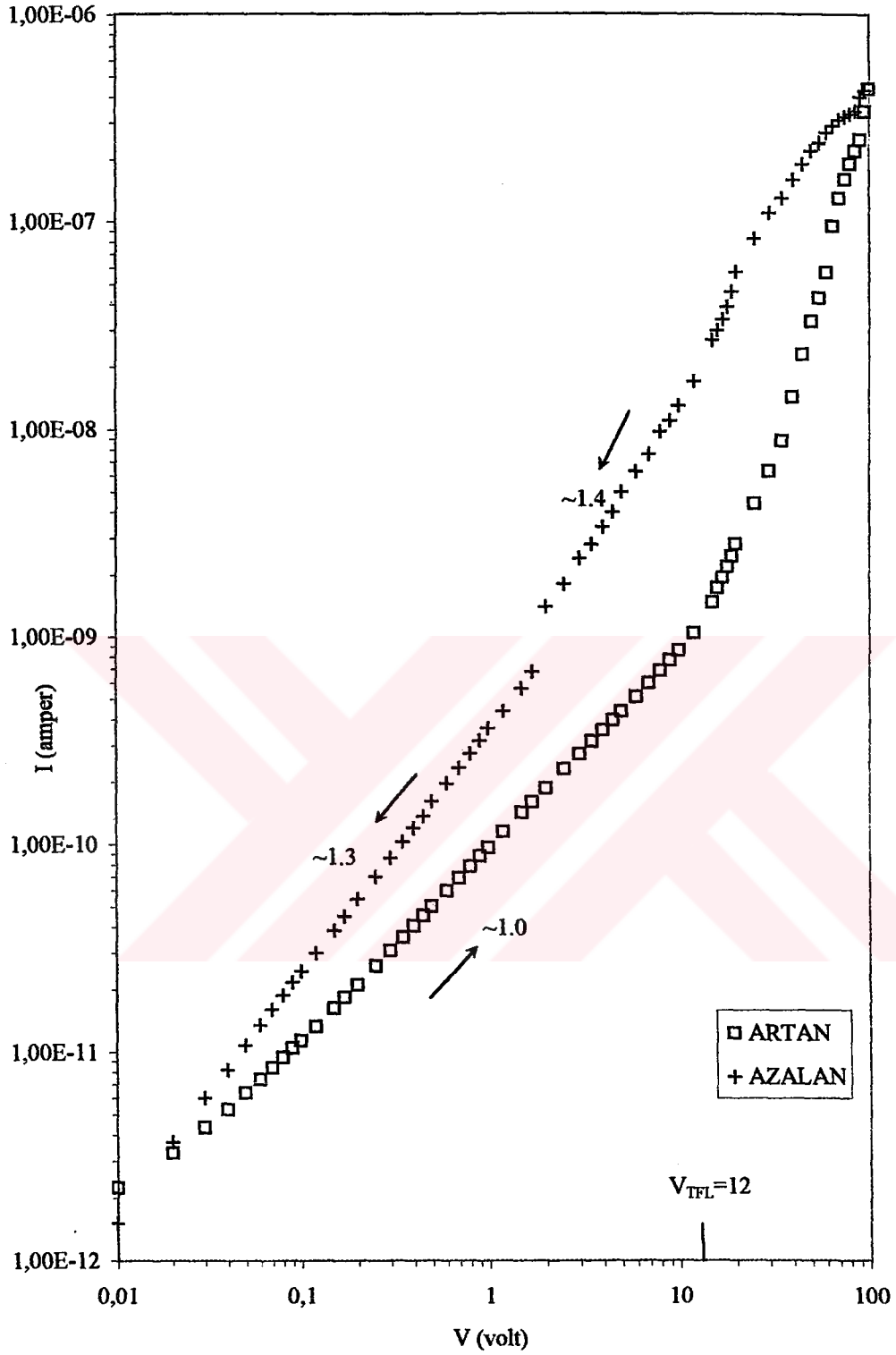


Şekil 6.15. In-In kontaktlı %0.2 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği

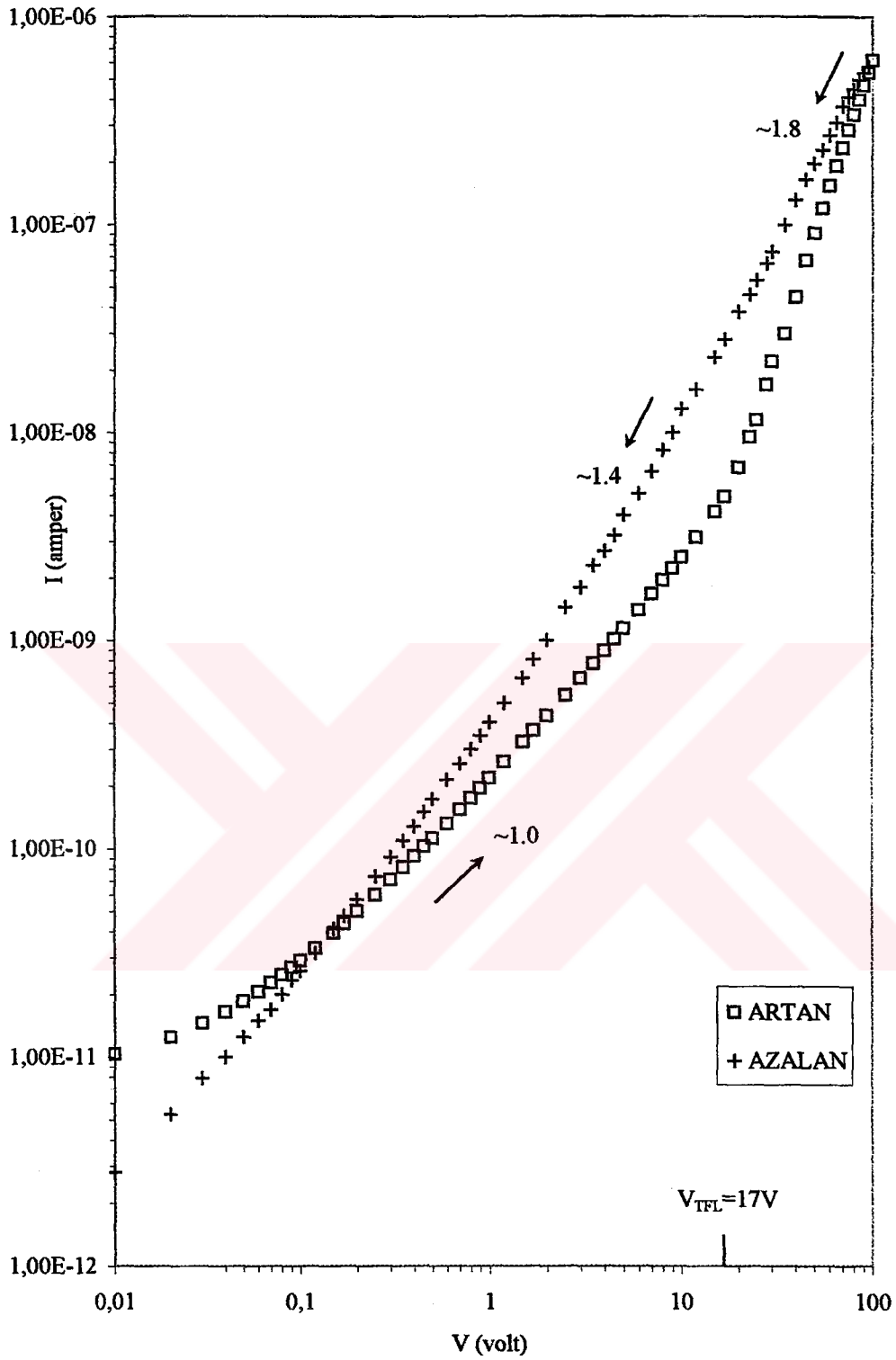
bölgeden SCL iletimine geçiş ise $V_{tr}=17V$ değerinde gerçekleşmektedir. In-In kontaklı %0.2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin de sığ tuzaklı yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz. Bu filme azalan voltaj uygulanıldığında ise, 10V-100V arasında akımın voltaja bağlılığı $I \sim V^{1.9}$, 1V-10V arasında $I \sim V^{1.4}$ ve de 0.3V-1V arasında ise $I \sim V^{1.2}$ şeklindedir. Bu film için serbest taşıyıcı yoğunluğu $n_0=1.03 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ ve elektriksel iletkenlik değeri de $\sigma=1.48 \times 10^{-7} (\text{ohm-cm})^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Ancak TFL bölgesi gözlenemediğinden tuzak yoğunluğu ve enerjisi hesaplanamamıştır.

Şekil 6.16'da In-In kontaklı %0.5 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin akım-voltaj grafiği görülmektedir. Bu grafiği artan voltaj değerlerine göre incelediğimizde, 0.1V ile 12V arasında, ohmik iletim görülmektedir. Bu ohmik bölgeyi TFL bölgesi izlemektedir. Derin tuzaklı SCL iletim gözlenen bu film için, elektriksel iletkenlik değeri $\sigma=5.42 \times 10^{-8} (\text{ohm-cm})^{-1}$ ve serbest taşıyıcı yoğunluğu $n_0=3.76 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Denklem (6-18)'den yararlanarak derin tuzakların yoğunluğu $N_t=4.13 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ve (6-11) denkleminde derin tuzakların enerjisi $E_t=0.656 \text{eV}$ olarak hesaplanmıştır. Bu filme azalan voltaj uygulanıldığında ise; tuzaklardaki boşalma, artan voltaj durumundaki tuzakların dolmasından çok daha yavaş olmaktadır.

Şekil 6.17'de In-In kontaklı %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin akım-voltaj grafiği görülmektedir. 0.8V ile 17V arasında ohmik iletim görülmektedir. Ohmik bölgeyi akımda hızlı bir artışın olduğu TFL bölgesi izlemekte olup, bu durumda derin tuzaklı SCL iletiminin mevcut olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 6.17'deki akım-voltaj grafiğinden TFL voltajı $V_{TFL}=17V$ olarak tespit edilmiştir. Bu film için elektriksel iletkenlik değeri $\sigma=8.82 \times 10^{-8} (\text{ohm-cm})^{-1}$, serbest taşıyıcı yoğunluğu $n_0=6.13 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, tuzak yoğunluğu $N_t=7.00 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ve tuzak enerjisi $E_t=0.611 \text{eV}$ olarak hesaplanmıştır. Bu filme azalan voltaj uygulanıldığında ise, derin tuzaklardaki elektronlar yavaş bir şekilde salınmaktadırlar.



Şekil 6.16. In-In kontaktlı %0.5 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği



Şekil 6.17. In-In kontaklı %1 In katkılı Cd_{0,22}Zn_{0,78}S filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği

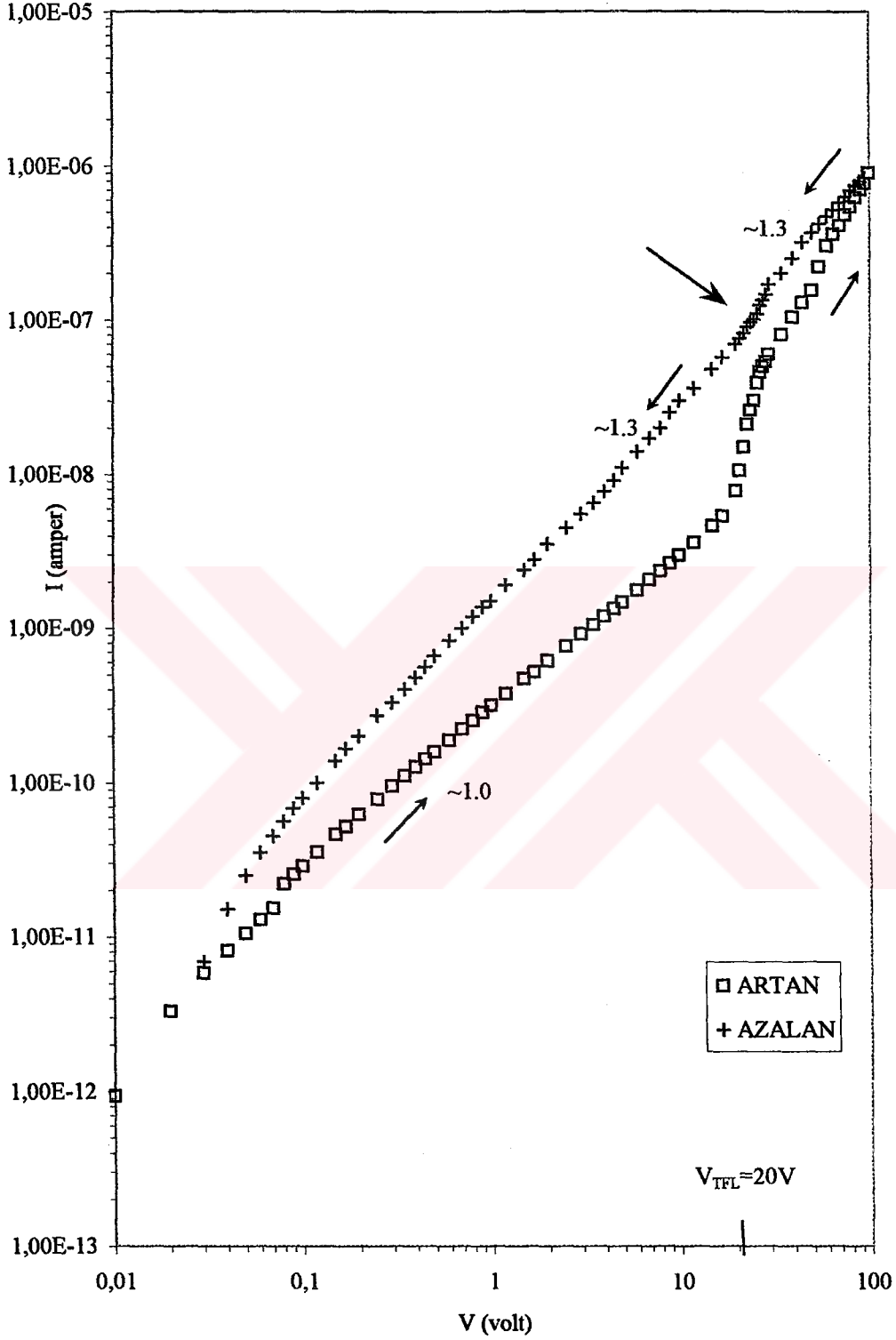
Şekil 6.18’de In-In kontaklı %2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin akım-voltaj grafiği görülmektedir. 0.09V ile 20V arasında ohmik iletim gözlenmektedir. 20V değerinden sonra akımda hızlı artışın olduğu TFL bölgesi gözlenmekte ve tuzaklar dolmaktadır. Daha sonra akımın V^2 ile değiştiği trap-free SCL iletim bölgesi gelmektedir.

Bu filme azalan voltaj uygulandığında ise, 35V-100V arasında akımın voltaja bağlılığı $I \sim V^{1.3}$ ile değişmektedir. Daha sonra Şekil 6.18’de ok ile gösterilen ve akımın daha hızla düştüğü bir bölge gelmektedir. Ancak 20V-35V arasındaki tuzaklardaki bu boşalma, tuzakların dolmasına göre daha yavaş olmaktadır. 0.2V-20V arasında ise akımın voltaja bağlılığı yine $I \sim V^{1.3}$ şeklinde devam etmektedir.

Şekil 6.18’deki, In-In kontaklı %2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin oda sıcaklığında ve atmosfer basıncındaki akım-voltaj grafiğinden $V_{TFL}=20V$ olarak belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlik değeri $\sigma=1.00 \times 10^{-7}(\text{ohm cm})^{-1}$, serbest taşıyıcı yoğunluğu $n_0=6.94 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, tuzakların yoğunluğu $N_t=8.16 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ve tuzak enerjisi $E_t=0.568 \text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.4. In-In kontaklı In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin elektriksel özellikleri

Materyal	$n_0 (\text{cm}^{-3})$	$\sigma (\text{ohm cm})^{-1}$	$N_t (\text{cm}^{-3})$	$E_t (\text{eV})$
$Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	2.51×10^9	3.62×10^{-9}	-----	-----
%0.2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	1.03×10^{11}	1.48×10^{-7}	-----	-----
%0.5 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	3.76×10^{10}	5.42×10^{-8}	4.13×10^{10}	0.656
%1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	6.13×10^{10}	8.82×10^{-8}	7.00×10^{10}	0.611
%2 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$	6.94×10^{10}	1.00×10^{-7}	8.16×10^{10}	0.568



Şekil 6.18. In-In kontaklı %2 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği

6.7. Au-Au Kontaktlı %1 In Katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S Filminin Akım-Voltaj ve Akım-Sıcaklık Karakteristiği

Elde edilen Au-Au kontaktlı %1 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filminin, 65-320K sıcaklık aralığında akım-voltaj değişimi ölçümleri uygulanan voltaj değerleri için 0.6V-100V ve akım değerleri için 10⁻¹⁴A-10⁻¹⁰A arasında, Hewlett Packard 4140B model pA meter/DC voltage Source ve Oxford Instruments 43305 Cryostat ölçüm cihazlarında karanlıkta elde edilmiştir. Numune kriyostata yerleştirilmiş ve kriyostattan çıkan Au-coaxial kablolarla dc voltaj kaynağına bağlantısı yapılmıştır. Çevrenin manyetik ve elektrik etkilerini engellemek için Au-coaxial kablolar, kriyostat ve dc voltaj kaynağı arasında bağlantı kablosu olarak kullanılmıştır. Kriyostat ve dc voltaj kaynağı bağlantıları Şekil 6.19'da gösterilmiştir.

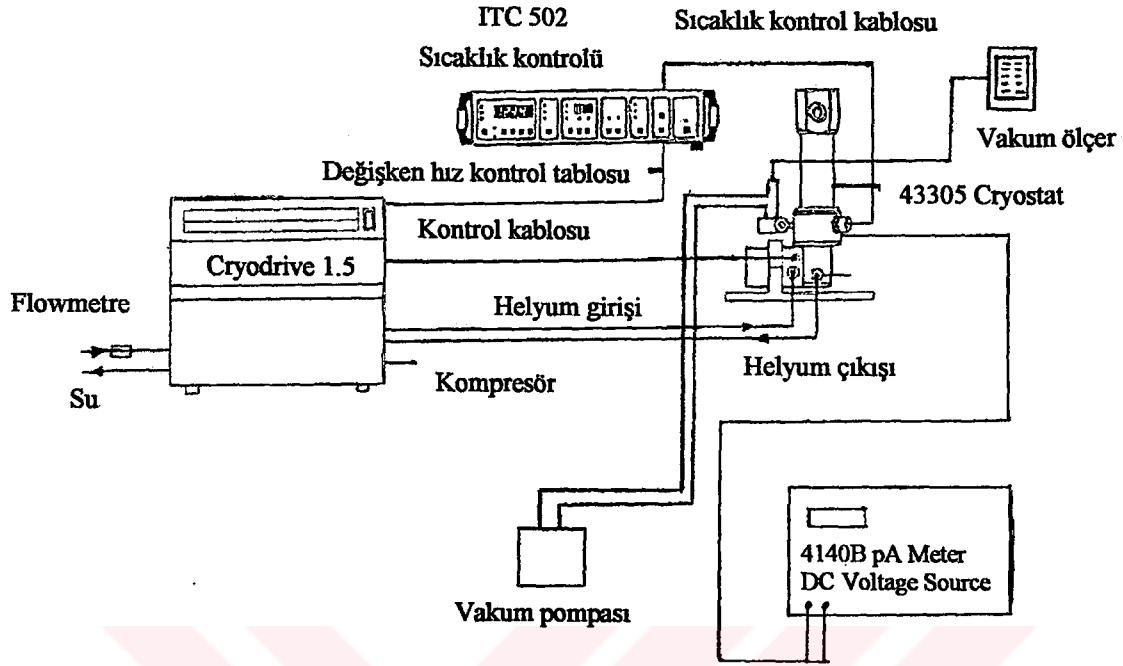
Sıcaklık düşürülmeden önce kriyostatın içi 2x10⁻² mbar basıncına kadar düşürülmüştür. Bu arada filmler kısa devre halinde bırakılmıştır. Başlangıç basınç değerine ulaşıldıktan sonra (yaklaşık bir saat) sıcaklık düşürülmeye başlanmıştır. Düşük sıcaklıklarda yapılan ölçümlerde basınç değeri yaklaşık 3x10⁻³ mbar kadardır.

Sıcaklık ölçümlerinde Au%3Fe-chromel thermocouple ve referans sıcaklığı için de sıvı azot kullanılmıştır.

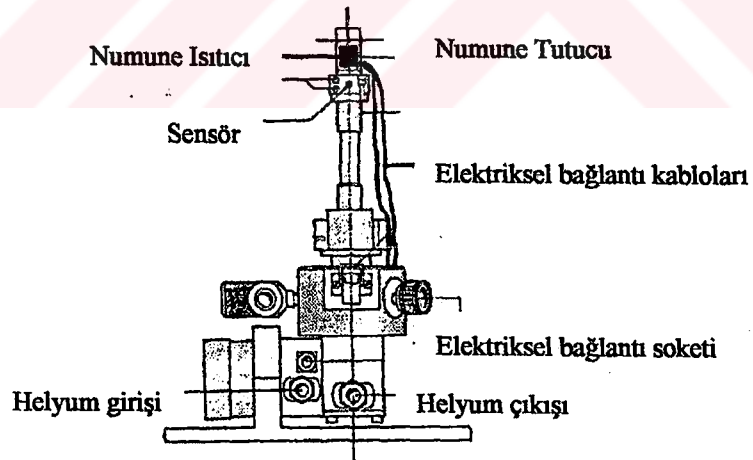
Kriyostatta istenilen sıcaklık değerine ulaşıldıktan sonra ölçümler alınmaya başlanmıştır. Her bir sıcaklık değerinde ölçüm almaya başlamadan önce 15 dk. beklenmiştir. Uygulanan voltaj kademeli olarak arttırılırken her bir voltaj değerinde yaklaşık 1 dk beklendikten sonra akım değeri okunmuştur.

Au-Au kontaktlı %1 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filmi için Şekil 6.20'de verilen çeşitli sıcaklıklardaki akım-voltaj değişimlerinden yararlanarak, çeşitli sabit voltajlarda akım-sıcaklık değişimleri Şekil 6.21'de verilmiştir.

Ayrıca 3x10⁻³mbar basınç altındaki akım-voltaj karakteristikleri bütün sıcaklık değerlerinde ohmik iletim göstermektedir. Şekil 6.20'de verilen akım-voltaj grafiklerinden elektriksel iletkenlikleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.5). İletkenliğin sıcaklıkla doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. %1 In katkılı Cd_{0.22}Zn_{0.78}S filmi için atmosfer basıncındaki ve 3x10⁻³ mbar basınç altındaki, oda sıcaklığında ölçülen

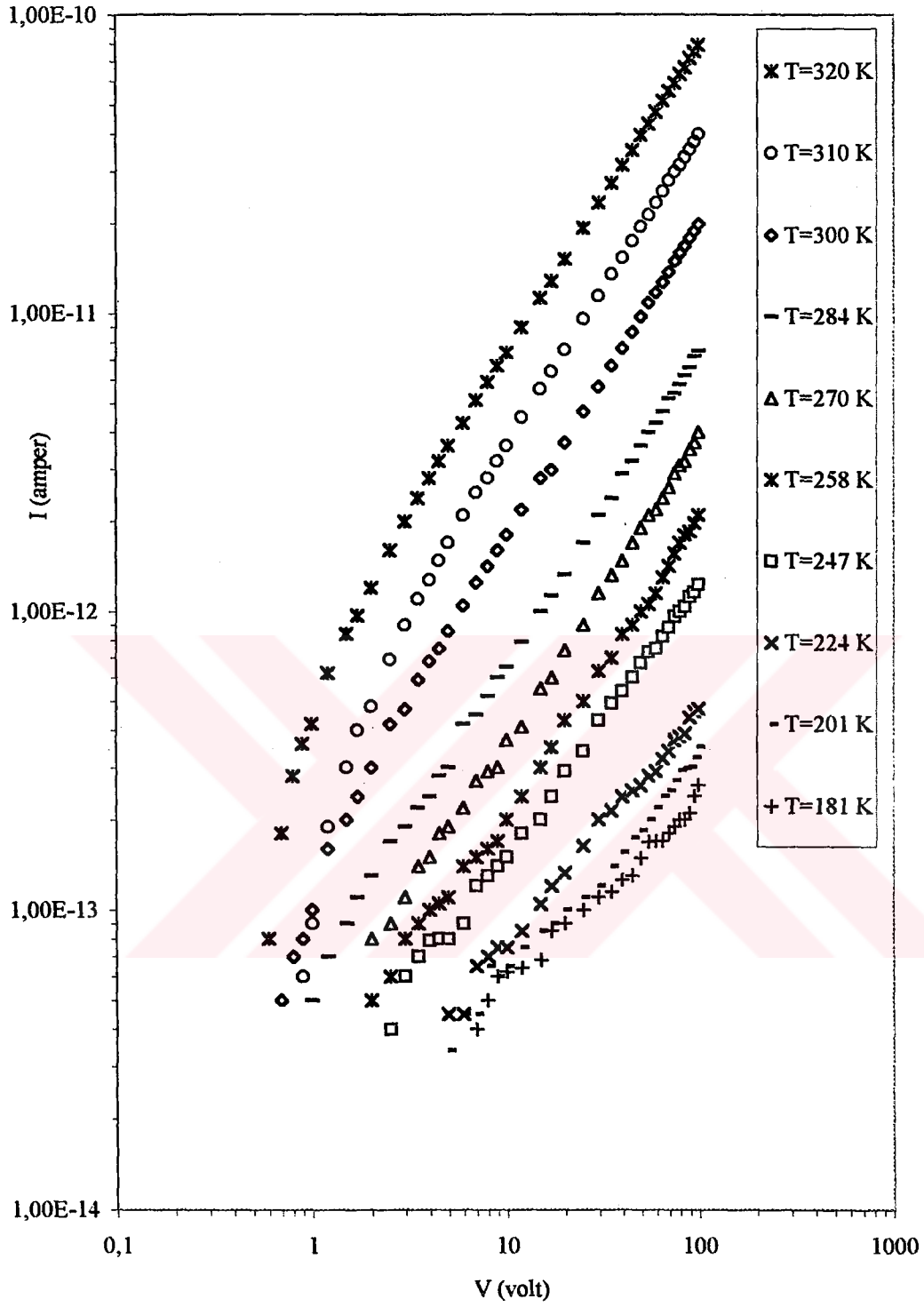


(a)

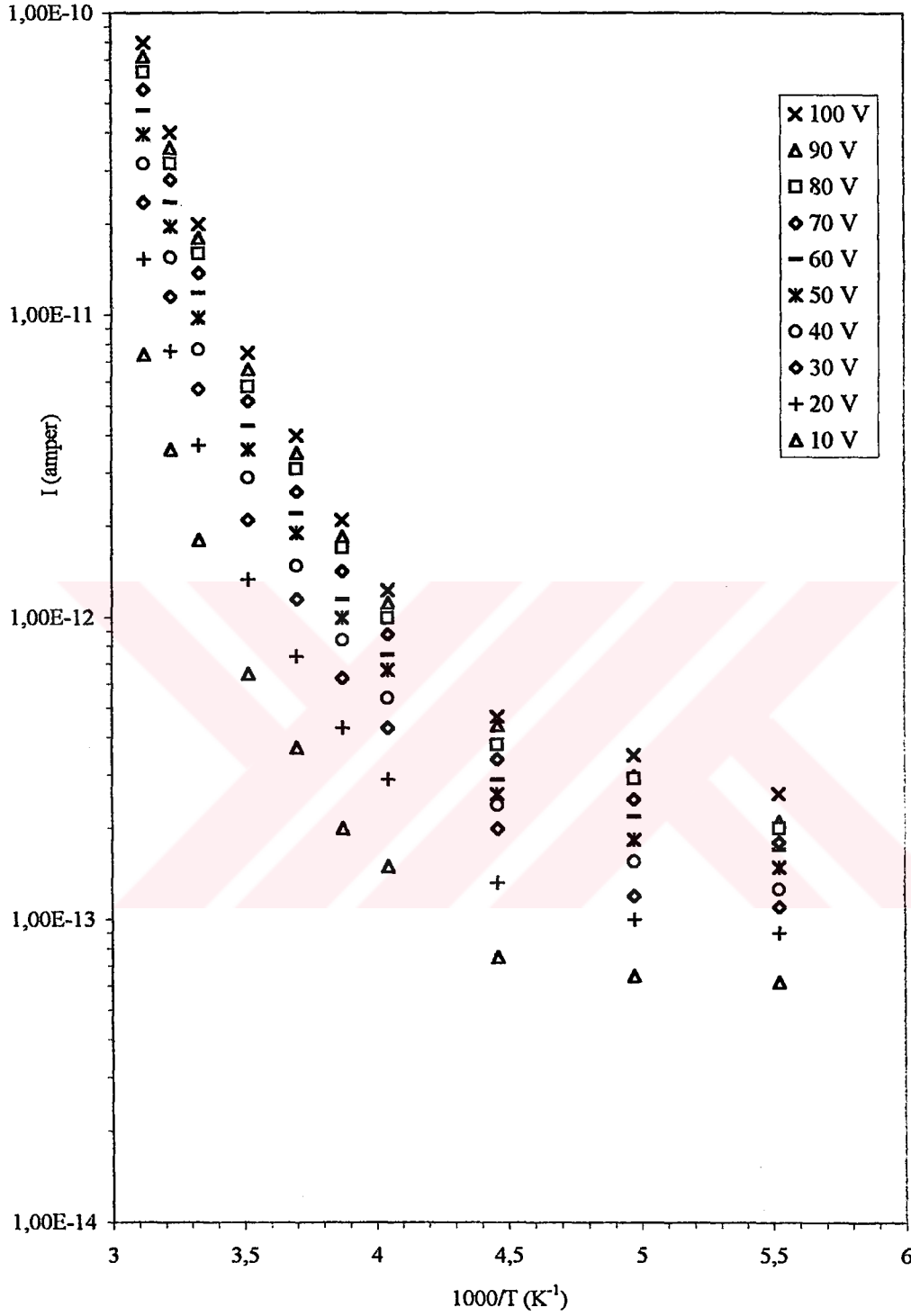


(b)

Şekil 6.19. Kriyostat ve DC voltaj kaynağı bağlantıları



Şekil 6.20. Au-Au kontaklı kontaklı %1 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin 3×10^{-3} mbar basınç altında ve çeşitli sıcaklıklardaki akım-voltaj değişimi



Şekil 6.21. Au-Au kontaklı kontaklı %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin çeşitli sabit voltajlardaki akım-sıcaklık değişimleri

elektriksel iletkenlik değerleri karşılaştırıldığında basıncın etkisinin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Basıncı uygulandığında iletkenlik azalmaktadır.

Ayrıca iletim mekanizmalarında da farklılık vardır. Atmosfer basıncı altında gözlenen SCL bölgesi, basınç altında kaybolmakta ve yalnızca ohmik bölge görülmektedir. Böylece basınç altında alınan ölçümlerde filmlerdeki tuzaklı yapı görülememektedir.

Çizelge 6.5. Çeşitli sıcaklıklarda ve 3×10^{-3} mbar basınç altında Au-Au kontaklı %1 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin elektriksel iletkenlik değerleri

Sıcaklık (K)	σ (ohmcm) ⁻¹
320	7.2×10^{-10}
310	3.4×10^{-10}
300	1.9×10^{-10}
284	6.4×10^{-11}
270	3.3×10^{-11}
258	1.9×10^{-11}
247	1.1×10^{-11}

Çizelge 6.6. $275 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında elde edilen Au-Au kontaklı %1 In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filminin, çeşitli sabit voltajlar için aktivasyon enerji değerleri

DC VOLTAJ (volt)	(181K-247K) ΔE_1 (eV)	(247K-300K) ΔE_2 (eV)	(300K-320K) ΔE_3 (eV)
10	0.017	0.237	0.575
20	0.031	0.250	0.588
30	0.052	0.260	0.591
40	0.053	0.274	0.570
50	0.047	0.278	0.591
60	0.043	0.291	0.585
70	0.053	0.295	0.570
80	0.052	0.288	0.568
90	0.059	0.294	0.558
100	0.049	0.296	0.574

Şekil 6.21'den görüldüğü gibi çeşitli sabit voltajlarda 181K-320K sıcaklık aralığında akım sıcaklıkla artmıştır. Bu materyal için elde edilen akım-sıcaklık grafiğinden yararlanılarak, çeşitli sabit voltaj değerleri için, düşük sıcaklıklarda (181K-247K ve 247K-300K aralıkları) ve yüksek sıcaklıklarda (300K-320K) aktivasyon enerji değerleri denklem (6-21) kullanılarak hesaplanmıştır ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6'ya göre çeşitli sabit voltaj değerleri için 181K-247K sıcaklık aralığındaki aktivasyon enerjileri 0.017eV-0.059eV değerleri arasında, 247K-300K sıcaklık aralığındaki aktivasyon enerjileri 0.237eV-0.296eV ve 300K-320K sıcaklık aralığındaki aktivasyon enerjileri 0.558eV-0.591eV değerleri arasında değişmektedir.

6.8. Bölüm ile İlgili Tartışma

In-In ve Au-Au kontaklı In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmleri için elde edilen ölçüm sonuçlarından her bir materyal için oda sıcaklığında atmosfer basıncı altında akım-voltaj değişim grafikleri çizilmiştir (Şekil 6.10-Şekil 6.18). Çizilen akım-voltaj grafiklerinden metal kontaklı In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinde ohmik ve SCL iletim mekanizmaları gözlenmiştir. Diğer iletim mekanizmalarına, Scottky ve Poole-Frenkel gibi, uyum sağlayıp sağlamadığı, bu iletim mekanizmalarına ait akım-voltaj grafikleri çizilerek denenmiştir. Ancak elde edilen akım-voltaj grafiklerinden bu iletim mekanizmaları için beklenen sonuçlara ulaşamamıştır.

İletkenlik hesaplarında, akım yoğunluğu film kalınlığı kullanılarak yapılmıştır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filminin iletkenliği mertebe olarak literatürle uyum içindedir. Bir çalışmada (Cd,Zn)S ince filminin öz direnci $[Zn]/([Zn]+[Cd])$ oranına göre $4-8 \times 10^7$ (ohmcm) arasında bulunmuştur (Yamaguchi ve ark., 1999).

Elde edilen filmler için çizilen akım-voltaj grafikleri incelendiğinde kontak materyalin etkisi görülmektedir. Kontak materyal olarak indiyumun kullanıldığı In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinde, ilettime kontak materyali indiyumun etkisi görülmektedir. Kontak materyalin ne kadar ilettime katkısı olduğu tespit

edilemeyeceğinden, In-In kontaklı In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin iletkenlikleri In katkısıyla doğru orantılı olarak ilişkilendirilememiştir. Oysa Au-Au kontaklı aynı filmlerin akım-voltaj grafiklerinden elde edilen iletkenlik değerleri In katkısıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. İndiyum kontaklar lehim yöntemiyle ve filmlere daha iyi ve düzgün kontak yapabilmek amacıyla ısıtılarak yapılmıştır. İndiyumun bu işlem sırasında yarıiletken difüzyon etme olasılığı da düşünülmekte ve iletimin artması, kontak materyalinin de katkı materyali gibi davranmasına bağlanılmaktadır.

$Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ yapısındaki filmlerin n-tipi iletkenlik özelliği gösterdiği dikkate alınrsa, düşük sıcaklıklarda hesaplanan aktivasyon enerjileri bu yarıiletkende bulunan donörlerin iyonlaşma enerjileri olarak değerlendirilebilir. Spray-pyrolysis yöntemi ile elde edilen numuneler polikristal olduğu için donör enerji seviyelerinin tek bir enerji seviyesinde değil de, yasak enerji aralığında belli bir bölgede dağıldıkları söylenebilir. Yüksek sıcaklıklarda hesaplanan aktivasyon enerjileri ise, düşük sıcaklıktaki donör seviyelerine göre daha derinde (0.558eV-0.591eV arasında) yer almaktadır. Derin tuzaklı SCL iletim özelliği gösteren %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmi için tuzak enerjisi Au-Au kontaklı durum için $E_t=0.506eV$ ve In-In kontaklı durum için $E_t=0.611eV$ olarak hesaplanmıştır. Bu durum da dikkate alınarak yüksek sıcaklıktaki aktivasyon enerjisi, bu yarıiletkende bulunan tuzakların enerji seviyeleri olarak değerlendirilebilir.

In katkısı arttıkça materyalin elektriksel iletkenliğinin ve serbest taşıyıcı yoğunluğunun artmakta olduğu söylenebilir. In katkılayarak yapılan diğer çalışmalarda da katkı arttıkça özdirencin azaldığı dolayısıyla da iletkenliğin arttığı görülmüştür (Agnihotri ve Gupta,1979).

Ayrıca sıcaklık ve basınç da iletkenliğe etki etmektedir. %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmi için, sıcaklık 247K'den 320K değerine yükseltildiğinde, elektriksel iletkenliğin de $1.1 \times 10^{-11}(\text{ohmcm})^{-1}$ değerinden $7.2 \times 10^{-10}(\text{ohmcm})^{-1}$ değerine arttığı görülmektedir. Basınç 3×10^{-3} mbar değerine düşürüldüğünde ise, iletkenlik $4.44 \times 10^{-7}(\text{ohmcm})^{-1}$ değerinden $1.9 \times 10^{-10}(\text{ohmcm})^{-1}$ değerine azalmaktadır. Basıncın iletkenliğe ve iletim mekanizmasına etkisi çok fazladır.

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, CdZnS filmleri cam tabanlar üzerinde $250\pm 5^\circ\text{C}$, $275\pm 5^\circ\text{C}$ ve $300\pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklıklarında elde edilmişlerdir. En iyi film oluşumunun $275\pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında olduğu gözlenmiştir. Diğer sıcaklıklarda oluşan filmlerin tabana iyi tutunmadıkları gözlenmiştir. Bu nedenle indiyum katkılı CdZnS filmleri de $275\pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında ve indiyum katkısının %0.2, %0.5, %1 ve %2 olduğu durumlar için elde edilmiştir. Elde edilen filmlerin elektriksel ve optiksel özellikleri incelenmiştir.

Bütün çözelti karışımları $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$ olarak hazırlanıp filmler elde edilmiştir. Ancak x-ışınları kırınım desenlerinden bütün filmlerin hegzagonal (wurtzite) $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ olarak polikristal yapıda olduğu görülmüştür. Bu nedenle elde edilen filmler ile ilgili bütün hesaplamalarda x-ışınları kırınım desenleri sonuçları dikkate alınarak Cd:Zn oranı 0.22:0.78 olarak kullanılmıştır. Yapılan bir çalışmada da, ZnS oranının %70'e kadar olan oranla elde edilen $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin hegzagonal yapıda ve ZnS oranının %80'den fazla oranla elde edilen $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin kübik yapıda olduğu tespit edilmiştir (Agnihotri ve Gupta, 1979). Ayrıca $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ yarıiletken bileşiği için, $x > 0.85$ değerlerinden sonra hegzagonal yapıdan kübik yapıya geçiş olduğu belirtilmiştir (Brinkman, 1988).

In katkılı $\text{Cd}_{0.22}\text{Zn}_{0.78}\text{S}$ filmlerinin x-ışını kırınım desenlerinin hepsinde hemen hemen aynı derecelerde aynı piklere rastlanılmıştır. Bu piklerden bazıları şiddetli bazıları ise zayıftır. Ancak dikkat çeken nokta, indiyum katkılı bileşiklerde indiyum ile ilgili herhangi bir pike rastlanmamasına karşın, piklerin indiyum katkısı arttıkça sola doğru yani küçük açılara kaymalarıdır. Bunun nedeninin bileşik içersindeki indiyumdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Şöyle ki; çinko, kadmiyum ve kükürte göre büyük çaplı olan indiyum atomlarının katkısının artmasıyla, düzlemler arası mesafelerin de artacağı ve bu durumun da küçük açılara kayma ile sonuçlanacağı düşünülmektedir. In katkı oranları, çözelti karışım oranı olan %0.2, %0.5, %1 ve %2 olarak alınmıştır.

In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin kalınlıklarının $2.88 \mu m$ ile $7.21 \mu m$ arasında olduğu saptanmıştır. Elde edilen filmlerin, sıcak uç (hot-prope) yöntemi ile n-tipi iletim özelliği gösterdikleri belirlenmiştir.

In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmleri oda sıcaklığında elde edilen temel absorpsiyon spektrumlarından yararlanarak, $(\alpha hv)^2 \approx hv$ değişimleri çizilmiş ve filmlerin direkt bant geçişli oldukları belirlenmiştir. Bu grafiklerden yararlanarak elde edilen In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin yasak enerji aralıkları $2.72 eV$ ile $3.04 eV$ arasında hesaplanmıştır. Bu sonuçlar literatürdeki değerler ile uyum içindedir.

In katkısının, x-ışınları spektrumundan düzlemler arası uzaklığa arttırıcı olarak etkisinin görülmesi sonucu, yasak enerji aralığını da etkileyebileceği söz konusudur. Muhtemelen bundan dolayıdır ki, yasak enerji aralıkları farklılık arz etmektedir.

In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin dc elektriksel iletkenlik özelliklerini belirleyebilmek için, düzlemsel formda metal-yarıiletken-metal yapılar oluşturulmuştur. Bu yapıları oluşturmak için, kontak metali olarak altın (Au) ve indiyum (In) kullanılmıştır. Au kontak metali, yarıiletken film üzerine düzlemsel formda buharlaştırılmış; In kontak metali ise havya yardımı ile yapılmıştır.

Elde edilen numunelerin akım-voltaj karakteristikleri genel olarak ele alındığında iki önemli durum ortaya çıkmaktadır. Bunlar; ohmik bölgenin V^2 bölgesi tarafından takip edilmesi ile ohmik bölgeyi doğrudan doğruya trap-filled-limited (TFL) bölgesinin takip etmesidir. Birinci durum sığ tuzaklı durum, ikinci durum ise derin tuzaklı durum olarak değerlendirilmektedir. Sığ tuzaklı durumların etkin olduğu akım-voltaj karakteristiği katkısız ve az katkılı durumlarda görülmektedir. Derin tuzaklı durum ise katkı oranının yüksek olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Yani, In oranının yüksek olması ile, Fermi enerji düzeyi civarında derin tuzak olarak adlandırdığımız tuzak yoğunluğunun etkin ve de yoğun olarak bulunduğu anlaşılmaktadır. Tuzakların yapısı hakkında kesin bir şey ifade etmek yanıltıcı olabilir ancak, In katkısının önemli bir etkisinin olduğunu da açık olarak belirtmeliyiz.

Filmlere azalan voltaj uygulandığında, artan voltaj uygulandığı duruma benzer akım-voltaj grafikleri elde edilmiştir. Yani tuzakların boşalması hemen

hemen aynı voltaj değerlerinde olmaktadır. Ancak bu voltaj değerlerine karşı gelen akım değerleri genelde daha büyük değerlerdedir. Bu da, taşıyıcıların tuzaklardan salınmalarının tam ve hızlı olmadığı, yavaş olduğu anlamına gelmektedir.

Elde edilen filmler için çizilen akım-voltaj grafikleri incelendiğinde kontak materyalin etkisi görülmektedir. Kontak materyal olarak indiyumun kullanıldığı In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinde, iletme kontak materyal indiyumun da katkısı gözükmemektedir. Kontak materyalin ne kadar iletme katkısı olduğu tespit edilemeyeceğinden, In-In kontaklı In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmlerinin iletkenlikleri In katkısıyla doğru orantılı olarak ilişkilendirilememiştir. Oysa Au-Au kontaklı aynı filmlerin akım-voltaj grafiklerinden elde edilen iletkenlik değerleri In katkısıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. İndiyum kontaklar havayla ve filmlere daha iyi ve düzgün kontak yapabilmek amacıyla ısıtılarak yapılmıştır. İndiyumun bu işlem sırasında yarıiletken difüzyon etme olasılığı da düşünülmekte ve iletimdeki değişim buna bağlanılmaktadır.

Akım-voltaj grafiklerinden yapılan hesaplamalar sonucunda, iletkenlik değerleri 3.62×10^{-9} ile $6.29 \times 10^{-7} (\text{ohm-cm})^{-1}$ arasında değişmektedir. Serbest taşıyıcı yoğunlukları, $2.51 \times 10^9 - 4.37 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$, tuzak yoğunlukları $4.13 \times 10^{10} - 4.47 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ ve tuzak enerjileri de 0.470-0.656eV arasında değişmektedir. In katkısı arttıkça materyalin elektriksel iletkenliğinin ve serbest taşıyıcı yoğunluğunun artmakta olduğu söylenebilir. In katkılarak yapılan diğer çalışmalarda da iletkenlik katkısıyla beraber artmıştır.

Basınç ve sıcaklığın iletkenliğe etkisi %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmi için incelenmiştir. Atmosfer basıncındaki ve $3 \times 10^{-3} \text{mbar}$ basınç altındaki iletkenlik değerleri oda sıcaklığında karşılaştırılırsa, $4.44 \times 10^{-7} (\text{ohmcm})^{-1}$ değerinden $1.9 \times 10^{-10} (\text{ohmcm})^{-1}$ değerine düştüğü görülmüştür. Sıcaklığı 247K değerinden 320K sıcaklık değerine arttırdığımızda ise iletkenliğin de $1.1 \times 10^{-11} (\text{ohmcm})^{-1}$ değerinden $7.2 \times 10^{-10} (\text{ohmcm})^{-1}$ değerine arttığı görülmektedir (Çizelge 6.5).

Ayrıca farklı basınç altındaki akım-voltaj karakteristikleri karşılaştırıldığında, iletim mekanizmalarında da farklılık görülmektedir. Atmosfer basıncı altında gözlenen SCL bölgesi, basınç altında kaybolmakta ve yalnızca

ohmik bölge görülmektedir. Böylece basınç altında alınan ölçümlerde filmlerdeki tuzaklı yapı görülememektedir.

$Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ yapısındaki filmlerin n-tipi iletkenlik özelliği gösterdiği dikkate alınır, düşük sıcaklıklarda hesaplanan aktivasyon enerjileri bu yarıiletkenlerde bulunan donörlerin iyonlaşma enerjileri olarak değerlendirilebilir. Spray-pyrolysis yöntemi ile elde edilen numuneler polikristal olduğu için donör enerji seviyelerinin tek bir enerji seviyesinde değil de, yasak enerji aralığında belli bir bölgede dağıldıkları söylenebilir. Çünkü TFL bölgeleri, bir voltaj aralığında meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıklarda (300K-320K) hesaplanan aktivasyon enerjileri ise, düşük sıcaklıktaki (181K-300K) donör seviyelerine göre daha derinde (0.558eV-0.591eV arasında) yer almaktadır. Ohmik ve derin tuzaklı SCL iletim özelliği gösteren %1 In katkılı $Cd_{0.22}Zn_{0.78}S$ filmi için tuzak enerjisi Au-Au kontaklı durum için $E_t=0.506eV$ ve In-In kontaklı durum için $E_t=0.611eV$ olarak hesaplanmıştır. Bu durum da dikkate alınarak yüksek sıcaklıktaki aktivasyon enerjisi, bu yarıiletkenlerde bulunan derin tuzakların enerji seviyeleri olarak değerlendirilebilir.

Aktivasyon enerjisi uygulanan voltaja herhangi bir bağıntıyla bağlanamamıştır. Yani voltaja pek de bağlı olmayan bir durum söz konusudur.

KAYNAKLAR

AGNIHOTRI, O.P. ve GUPTA, B.K. (1979) *Cd_{1-x}Zn_xS Films for Low Cost Solar Cells*, Jap. J. Appl. Phys., **18**, 317-320.

ALLISON, J. (1990) *Electronic Engeneering Semiconductors and Devices*, McGraw-Hill Book Company, UK.

AYBEK, A.Ş. (1996) *Zn(In₂S₃)S Yarüiletken Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.

BABAN, C., RUSU, G.G., NICOLAESCU, I.I., RUSU, G.I. (2000) *Optical Properties of CdSe Films Deposited by the Quasi-Closed Volume Technique*, J. Phys.: Condens. Matter, **12**, 7687-7697.

BAR-LEV, A. (1993) *Semiconductor and Electronic Devices*, Prentice Hall, UK.

BASOL, B.M. (1985) *Thin Films of Mercury Cadmium Telluride for Solar Cell Applications*, Solar Cells, 279-284.

BLAKEMORE, J.S. (1969) *Solid State Physics*, W.B. Saunders Company, U.S.A.

BRINKMAN, A.W. (1988) *Electrical and Structural Properties of Wide Bandgap II-VI Semiconducting Compounds in Growth and Optical Properties of Wide-Gap II-VI Low-Dimensional Semiconductors*, Ed: MCGILL, T.C., TORRES, C.M.S., GEBHARDT, W., NATO ASI Series, Plenum Press, New York, 97-107.

BUBE, R.H. (1970) *Photoconductivity of Solids*, John Wiley & Sons, Inc., London.

GNATYUK, V.A. (2000) *Photoconductivity of ZnSe Crystals under High Excitation Rates*, Semicond. Sci. Technol., **15**, 523-528.

KAO, K.C. and HWANG, W. (1979) *Electrical Transport in Solids*, International Series in the Science of the Solid State, Pergamon Press, Cilt 14.

KIM, S.Y., KIM, D.S., AHN, B.T., IM, H.B. (1993) *Structural, Electrical and optical properties of In-doped CdS Thin Films Prepared by Vacuum Coevaporation*, Thin Solid Films, **229**, 227-231.

KITTEL, C. (1996) *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley & Sons, Inc., USA.

KOLHE, S., KULKARNI, S.K., TAKWALE, M.G. ve BHIDE, V.G. (1985) *The Electrical Conduction in Sprayed CdS Films*, Solar Energy Materials, **13**, 203-211.

KÖKSAL, F., DİNÇER, M., ALTUNBAŞ, M. ve BAŞARAN, E. (1999) *Katıhal Fiziği*, Literatür Yayıncılık, İstanbul.

KÖSE, S. (1993) *Spray Pyrolysis Metodu ile Elde Edilen $Cd_{1-x}Zn_xS$ Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.

KUL, M. (1996) *$Cd(In_2S_3)S$ Yarıiletken Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.

KWOK, H.B. ve BUBE, R.H. (1973) *Thermoelectric and Photothermoelectric Effects in Semiconductors: CdS Single Crystals*, J. Appl. Phys., **44**, 138-144.

KWOK, H.L. ve CHAU, Y.C. (1980) *Carrier Density and Mobility in $Cd_xZn_{1-x}S$ Chemically Sprayed Films*, Thin Solid Films, **66**, 303-309.

LAMPERT, M.A. ve MARK, P. (1970) *Current Injection in Solids*, Academic Press, USA.

LAMPKIN, C.M. (1979) *Aerodynamics of Nozzles Used in Spray Pyrolysis*, Prog. in Cryst. Growth and Charact., **1**, 405-416.

LIDE, D.R. (1998) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 78th Edition, CRC Press, New York.

MA, Y.Y. ve BUBE, R.H.(1977) *Properties of CdS Films Prepared by Spray Pyrolysis*, J. Electrochem. Soc. : Solid-State Science and Technology, **124**, 1430-1435.

MANY, A., GOLDSTEIN, Y. ve GROVER, N.B. (1971) *Semiconductor Surfaces*, North-Holland Publishing Company, Netherlands.

McKELVEY, J.P. (1966) *Solid State and Semiconductor Physics*, Harper & Row Ltd., London.

NAG, B.R. (1980) *Electron Transport in Compound Semiconductors*, Springer-Verlag, Germany.

OMAR, M.A. (1975) *Elementary Solid State Physics: Principles and Applications*, Addison-Wesley Publishing Company, USA.

PANKOVE, J.I. (1971) *Optical Processes in Semiconductors*, Solid State Physical Electronics Series, Princeton Press, N.J.

PEKER, D. (1999) *CuAl_xIn_{1-x}S₂ Yarıiletken Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.

PIERRET, R.F. (1996) *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison-Wesley Publishing Company, USA.

SHAY, J.L. ve WERNICK, J.H. (1975) *Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties and Applications*, Pergamon Press, Oxford.

SIEFERT, W. (1984) *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.

SIMMONS, J.G. (1971) *Theory of Metallic Contacts on High Resistivity Solids-I. Shallow Traps*, J. Phys. Chem. Solids, **32**, 1987-1999.

SZE, S.M. (1981) *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., USA.

WU, C. ve BUBE, R.H. (1974) *Thermoelectric and Photothermoelectric Effects in Semiconductors: Cadmium Sulfide Films*, J. Appl. Phys., **45**, 648-660.

XIN, Z., PEATY, R.J., RUTT, H.N. ve EASON, E.W. (1999) *Epitaxial Growth of High-Quality ZnS Films on Sapphire and Silicon by Pulsed Laser Deposition*, Semicond. Sci. Technol., **14**, 695-698.

YAMAGUCHI, T., YAMAMOTO, Y., TANAKA, T. ve YOSHIDA, A. (1999) *Preparation and Characterization of (Cd,Zn)S Thin Films by Chemical Bath Deposition for Photovoltaic Devices*, Thin Solid Films, **343-344**, 516-519.

ZOR, M. (1982) *Spray-Pyrolysis ile Elde Edilen AgInS₂ Bileşiminin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Doçentlik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

ZOR, M. ve HOGARTH, C.A. (1987) *High Field Electrical Conduction in Thin Films of Polypropylene*, phys. stat. sol. (a), **99**, 513-519.