

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CdZnTe ve CdZnS İNCE FİLMLEİN
HAZIRLANMASI ve İNCELENMESİ**

Yüksek Fizikçi Fatih ONGÜL

**F.B.E. Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi: 16 Aralık 2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Emel ÇİNGİ (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hasan TATLİPİNAR (YTÜ)

Doç. Dr. Nevin KALKAN (İÜ)

Prof. Dr. Işık KARABAY (YTÜ)

Prof. Dr. Fatma TEPEHAN (İTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	2
2.1 AII-BVI (CdTe, CdS, ZnTe ve ZnS) Bileşenlerin Faz Diyagramları	2
2.2 AII-BVI (CdTe, CdS, ZnTe ve ZnS) Bileşenlerin Kristal Yapıları ve Band Diyagramları	5
2.3 AII-BVI (CdTe, CdS, ZnTe ve ZnS) Bileşenlerin Kristal Kusurları.....	10
2.4 AII-BVI (CdTe, CdS, ZnTe ve ZnS) Bileşenlerin Temel Özellikleri	14
2.5 CdTe ve CdS Örneklerinde Katkıların Difüzyonu	15
2.6 Katkıların ve Kusurların CdTe ve CdS'nin Elektrik Özelliklerine Etkisi	19
2.7 CdTe ve CdS'nin Optik ve Fotoelektrik Özellikleri.....	24
2.8 Metal/CdTe, CdS Eklemlerin Özellikleri	25
2.8.1 Metal/Yarıiletken Kontaklar ve Heteroeklemler	25
2.8.2 CdTe ve CdS Esaslı Eklemlerin Karakteristikleri	34
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
3.1 CdTe ve CdS Filmlerin Büyütme Yöntemleri	39
3.1.1 Yakın Mesafeli Süblimasyon (CSS).....	40
3.1.2 CdS Filmlerin Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle Hazırlanması.....	41
3.2 Filmlerinin Elektriksel Karakteristiklerinin Ölçümü.....	43
3.2.1 Filmlerinin İletkenlik Tipi Ölçümleri	43
3.2.2 Filmlerinin Özdirenç Ölçümleri	44
3.2.3 Filmlere Omik Kontakların Yapılması	45
3.3 Filmlerin XRD Yöntemiyle Analizi	46
3.4 Filmlerin Optik Soğurma Spektrumlarının Ölçümü	48
3.5 Filmlerin Fotoduyarlılık Spektrumlarının Ölçümü.....	49
3.6 Metal/CdTe, CdS Eklemlerin ve Heteroeklemlerin Hazırlanması	50
3.7 Difüzyon Deneyleri ve Katkı Atomlarının Konsantrasyon Dağılımının XRF	

Yöntemiyle Analizi.....	52
3.8 Metal/CdTe, CdS ve Heteroeklemlerin I-V Karakteristiklerinin Ölçümü ve Parametrelerinin Belirlenmesi	53
4. BULGULAR	55
4.1 CdTe ve CdS Filmlerin Yapısal, Elektrik ve Optik Özellikleri.....	55
4.1.1 CdTe Filmlerin Yapısal Özellikleri	55
4.1.2 CdTe Filmlerin Elektriksel Özellikleri	55
4.1.3 CdTe Filmlerin Optik Özellikleri	56
4.1.4 CdS Filmlerin Yapısal Özellikleri	57
4.1.5 Katkılanmamış CdS Filmlerin Elektriksel Özellikleri.....	59
4.1.6 Katkılanmamış CdS Filmlerin Optik Özellikleri.....	59
4.2 Zn Difüzyonunun CdTe Filmlerin Yapısal, Elektrik, Optik ve Fotoelektrik Özelliklerine Etkisi	60
4.2.1 Tavlamanın Zn/CdTe Yapıların XRD Desenlerine Etkisi.....	60
4.2.2 Tavllanmış Zn/CdTe Yapıların Optik Spektrumları.....	62
4.2.3 Zn Katkısının CdTe Filmlerde Difüzyon Katsayısının Sıcaklıkla Değişimi	65
4.2.4 CdZnTe/CdTe Eklemlerin I-V Karakteristikleri ve Fotoduyarlılık Spektrumları.	67
4.3 Zn Difüzyonunun CdS Filmlerin Yapısal, Elektrik, Optik ve Fotoelektrik Karakteristikleri	69
4.3.1 Tavlamanın Zn/CdS Yapıların XRD Desenlerine Etkisi.....	69
4.3.2 Tavllanmış Zn/CdS Yapılarda Zn Filmin Kalınlığının CdS'nin Örgü Parametrelerine Etkisi.....	70
4.3.3 CdS Filmlerinde Zn'nin Konsantrasyon Dağılımları ve Difüzyon Katsayıları	75
4.3.4 Tavllanmış Zn/CdS Yapıların Optik Soğurma Spektrumları	77
4.4 CdZnS Esaslı Güneş Pillerin Karakteristikleri	80
4.4.1 CdTe/CdS ve CdTe/CdZnS Pillerin Elektrik ve Fotovoltaik Karakteristikleri	80
4.4.2 CdS/CdTe ve CdZnS/CdS/CdTe Pillerin Elektrik ve Fotovoltaik Karakteristikleri	84
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	88
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	100

SİMGE LİSTESİ

A, S	Alan
a	Örgü Parametresi
d	Kalınlık
B	Magnetik Alan
D	Difüzyon Katsayısı
e	Elektronun Yüğü
E _a	Akseptör Enerji Seviyesi
E _d	Donör Enerji Seviyesi
E _g	Yarıiletkenin Yasak Band Genişliği
E _H	Hall Alanının Şiddeti
\vec{F}	Kuvvet
h	Planck Sabiti (6.62x10 ⁻³⁴ J.s), Yükseklik
I	Akım, Işık Şiddeti
I _{sc}	Kısa Devre Akımı
J	Akım Yoğunluğu
J _{sc}	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
k	Boltzman Sabiti, Dalga Vektörü
m	Kütle
N	Atomların Konsantrasyonu
n	Kırılma İndisi, Elektronların Konsantrasyonu, İdealite Faktörü
p	Deliklerin Konsantrasyonu
q	Yük
R	Yansıma Katsayısı, Direnç
R _H	Hall Sabiti
t	Zaman
T	Optik Geçirgenlik, Sıcaklık
\vec{v}	Hız
V	Gerilim, Boşluk (Vakansiyon)
V _H	Hall Gerilimi
V _{oc}	Açık Devre Gerilimi
α	Soğurma Katsayısı
ϵ	Dielektrik Sabiti
λ	Dalga Boyu
ρ	Özdirenç, Yoğunluk
μ	Mobilite
σ	İletkenlik
ν	Frekans
χ	Elektron Alınganlığı
ϕ	Termodinamik Çıkış İşi
φ	Kontak Potansiyeli

KISALTIMA LİSTESİ

AES	Auger Electron Spectroscopy
AFM	Atomic Force Microscope
AM	Air Mass
CBD	Chemical Bath Deposition
CSS	Close Space Sublimation
ECD	Electrochemical Deposition
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
EDXRF	Energy Dispersive X-Ray Fluorescence
Fcc	Face cubic center
FWHM	Full Width at Half Maximum
Hex	Hexagonal
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
PCD	Photochemical Deposition
PL	Photo Luminesans
SP	Spray Pyrolysis
TEMK	Termal Elektro-Motor Kuvvet
ZB	Zinc Blende
W	Wurtzite
XRD	X-Ray Diffraction

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Cd-Te'nin faz diyagramı (Brandes ve Brook, 1992).....	3
Şekil 2.2	Cd-S'nin faz diyagramı (Brandes ve Brook, 1992).....	3
Şekil 2.3	Zn-Te'nin faz diyagramı (Baker, 1992).	4
Şekil 2.4	1-Kübik çinko sülfid örgüsü (Zinc blende) ve 2-çinko sülfid örgüsünün brillouin bölgesi (Martienssen ve Warlimont, 2005).	7
Şekil 2.5	1-Hegzagonal wurtzite örgüsü ve 2-wurtzite örgüsünün brillouin bölgesi (Martienssen ve Warlimont, 2005).....	7
Şekil 2.6	Kübik çinko sülfid CdTe'nin band diyagramı (Martienssen ve Warlimont, 2005)..	8
Şekil 2.7	Hegzagonal wurtzite CdS'nin band diyagramı (Martienssen ve Warlimont, 2005).	8
Şekil 2.8	Kübik çinko sülfid ZnTe'nin band diyagramı (Martienssen ve Warlimont, 2005)..	9
Şekil 2.9	Kübik çinko sülfid ZnS'nin band diyagramı (Martienssen ve Warlimont, 2005)....	9
Şekil 2.10	a) Frenkel ve b) Schottky kusurların oluşması (Callister, 2001).....	10
Şekil 2.11	Noktasal kusurların gösterimi (Callister, 2001).	11
Şekil 2.12	a) Çizgisel ve b) vida dislokasyonların gösterimi (Yacobi, 2003).	12
Şekil 2.13	a) Çizgisel dislokasyon ve b) Kusursuz kristal örgüleri (Holt ve Yacobi, 2007)..	12
Şekil 2.14	a) Yönelimleri farklı olan küçük ve büyük açılı tane sınırı kusurlarının gösterimi ve b) kenar kusurları tarafından oluşan tane sınırı arasındaki açının gösterimi (Callister, 2001).	13
Şekil 2.15	Boşluk (1), arayer (2) ve tane sınırları (3) mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağımlılığı (Caferov, 1998).....	16
Şekil 2.16	(a) Direkt ve (b) İndirekt yarıiletkende yasak band aralığı yakınındaki band yapısının gösterimi (Yacobi, 2003).	25
Şekil 2.17	Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji band diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).....	26
Şekil 2.18	Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji band diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).....	26
Şekil 2.19	Vakum ortamında temiz yüzeyli metal için atom numarasına bağlı metal iş fonksiyonu (Sze, 2007).....	27
Şekil 2.20	Schottky diyodun akım-gerilim karakteristiği (Caferov, 2000).	28
Şekil 2.21	Termal dengede keskin p-n eklemi (Sze, 2007).	29
Şekil 2.22	p-n heteroeklemlerin; (a) n-tipi küçük band aralıklı için temastan önce, (b) temastan sonra termal dengede ve (c) p-tipi küçük band aralıklı için temastan önce, (d) temastan sonra termal dengede enerji band diyagramları (Sze, 2007)...	30
Şekil 2.23	Güneş pilinin eşdeğer devresi (Schroder, 2006).....	31
Şekil 2.24	Güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği (Bube, 1998).	32
Şekil 2.25	Güneş ışınımının AM 0 ve AM 1,5'deki spektrumu (ASTM).	33
Şekil 3.1	CdTe ve CdS filmlerinin CSS yöntemiyle elde edildiği vakum setinin şematik gösterimi.	41
Şekil 3.2	Kimyasal püskürtme yöntemiyle film kaplama düzeneğinin şematik gösterimi...	42
Şekil 3.3	Termal EMK yöntemiyle, (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik tiplerinin ölçüm devresi (Caferov, 1998).	43
Şekil 3.4	Van der Pauw yöntemi ile öz direnç ölçümlerinde örnekte kontakların yerleşimi (Caferov, 1998).....	44
Şekil 3.5	$f(R_1/R_2)$ düzelme fonksiyonu grafiği (Caferov, 1998).	44
Şekil 3.6	Yaklaşık omik kontakların akım-gerilim karakteristikleri, (a) Küçük doğrultmaya sahip omik kontak (b) Direnci gerilime bağlı olan omik kontak (Caferov, 1998).	45
Şekil 3.7	Difraktometrenin diyagramı (Caferov, 1998).....	47
Şekil 3.8	Optik geçirgenlik spektrumu (Caferov, 2000).....	49

Şekil 3.9	Eklemelerin fotoduyarlılık spektrumlarının ölçüm düzeneği.....	50
Şekil 3.10	“Osram” lambasının şiddetinin spektral dağılımı.....	50
Şekil 3.11	Termal tavlama düzeneğinin şematik gösterimi.....	51
Şekil 3.12	Metal/CdTe, CdS ve heteroeklemlerin akım-gerilim karakteristiklerinin ölçüm sistemi.....	53
Şekil 3.13	Metal/CdTe, CdS ve heteroeklemlerin akım-gerilim karakteristiklerinin ölçüm devre şeması.....	54
Şekil 4.1	Katkılanmamış kübik CdTe filmin x-ışını kırınım deseni.....	55
Şekil 4.2	Katkısız GaIn/CdTe/GaIn filmin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta akım-gerilim karakteristikleri.....	56
Şekil 4.3	CdTe filmin soğurma katsayısı spektrumu.....	57
Şekil 4.4	CSS yöntemiyle elde edilen hegzagonal CdS filmin x-ışını kırınım deseni.....	58
Şekil 4.5	SP yöntemiyle elde edilen hegzagonal CdS filmin x-ışını kırınım deseni.....	58
Şekil 4.6	Katkısız GaIn/CdS/GaIn filmin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta akım-gerilim karakteristikleri.....	59
Şekil 4.7	Katkılanmamış CdS filmin soğurma katsayısı spektrumu.....	60
Şekil 4.8	Katkısız CdTe filmin x-ışını kırınım deseni.....	61
Şekil 4.9	Zn/CdTe yapısının 500 °C 10 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım deseni.....	61
Şekil 4.10	(1) CdTe film ve (2) Zn/CdTe yapısının 500 °C’de 10 dak. termal tavlama sonrası x-ışını kırınım (111) desenlerinin karşılaştırması (a) $2\theta=10-70^\circ$ ve (b) $2\theta=22-28^\circ$ için.....	62
Şekil 4.11	(1) CdTe film ve (2) Zn/CdTe yapısının 500 °C’de 12 dak. termal tavlama sonucu soğurma katsayısı spektrumları.....	63
Şekil 4.12	CdZnTe yapısının yasak band genişliğinin, (1) 430, (2) 480, (3) 500 ve (4) 520 °C sıcaklıkları için tavlama sürelerine bağlı değişimi.....	64
Şekil 4.13	Zn’nin CdTe filmlerinde sıcaklığa bağlı difüzyon katsayısı değişimi.....	66
Şekil 4.14	pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin karanlıkta I-V karakteristiği.....	67
Şekil 4.15	pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta I-V karakteristikleri.....	68
Şekil 4.16	pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin sıcaklığa bağlı ters doyma akımı.....	68
Şekil 4.17	CdTe (1) ve CdZnTe (2) tarafından aydınlatmada pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin fotoduyarlılığın spektral dağılımları.....	69
Şekil 4.18	(a) CdS film ve (b) Zn/CdS yapısının 570 °C’de 5 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım desenleri; (c) $2\theta=26-30^\circ$ için (a) ve (b) desenlerin karşılaştırması... 70	70
Şekil 4.19	CdS (460 nm) filmin 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım deseni.....	71
Şekil 4.20	Zn (200nm)/CdS (460nm) yapısının 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım deseni.....	72
Şekil 4.21	Zn (300nm)/CdS (460nm) yapısının 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım deseni.....	72
Şekil 4.22	CdS (460 nm) filmin, Zn (200nm)/CdS (460nm) ve Zn (300nm)/CdS (460nm) yapılarının 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım desenlerinin karşılaştırması.....	73
Şekil 4.23	CdS (460 nm) filmin, Zn (200nm)/CdS (460nm) ve Zn (300nm)/CdS (460nm) yapılarının 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu $2\theta=20-35^\circ$ için x-ışını kırınım desenlerinin karşılaştırması.....	73
Şekil 4.24	(1) CdS film, Zn kalınlığı (2) 200 nm ve (3) 300 nm olan Zn/CdS yapısının 550°C’de 16 dak. termal tavlama sonucu soğurma katsayısı spektrumları.....	74
Şekil 4.25	CdS (460 nm) filmin, Zn (200nm)/CdS (460nm) ve Zn (300nm)/CdS (460nm) yapılarının 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu örgü parametrelerinin x	

	kompozisyonuna göre değişimi.	75
şekil 4.26	Termal tavlama sonucu Zn'nin CdS filmde konsantrasyon dağılımları. (1) 400 °C 20 dak. (kesiksiz teorik erfc-eğri) ve (2) 570 °C 4 dak.....	76
şekil 4.27	(1) CdS film ve (2) Zn/CdS ($d_{Zn}=275nm$, $d_{CdS}=2\mu m$) yapısının 570 °C de 3 dak. termal tavlama sonucu soğurma katsayısı spektrumları.	78
şekil 4.28	Zn/CdS yapısının yasak band genişliğinin 570 °C'de termal tavlama süresine bağlı değişimi.	78
şekil 4.29	(1) CdS film, Zn kalınlığı (2) 80 nm, (3) 140 nm ve (4) 210 nm olan Zn/CdS yapısının 540 °C'de 18 dak. termal tavlama sonucu soğurma katsayısı spektrumları.	79
şekil 4.30	Zn kalınlığına bağlı olarak Zn/CdS yapısının 540 °C'de 18 dak. tavlama sonucu yasak enerji aralığı değişimi.	80
şekil 4.31	pCdTe/nCdS pilin karanlıkta I-V karakteristiği.	81
şekil 4.32	pCdTe/nCdS pilin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta I-V karakteristikleri.	82
şekil 4.33	pCdTe/nCdZnS pilin karanlıkta I-V karakteristiği.	82
şekil 4.34	pCdTe/nCdZnS pilin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta I-V karakteristikleri.....	83
şekil 4.35	(1) pCdTe/nCdS ve (2) pCdTe/nCdZnS pillerin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri.	83
şekil 4.36	(1) pCdTe/nCdZnS ve (2) pCdTe/nCdS yapılarının fotoduyarlılık spektrumları.	84
şekil 4.37	nCdS/pCdTe pilin karanlıkta I-V karakteristiği.	85
şekil 4.38	nCdS/pCdTe pilin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta I-V karakteristikleri.	85
şekil 4.39	nCdZnS/CdS/pCdTe pilin karanlıkta I-V karakteristiği.	86
şekil 4.40	nCdZnS/CdS/pCdTe pilin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta I-V karakteristikleri... ..	86
şekil 4.41	(1) nCdS/pCdTe ve (2) nCdZnS/CdS/pCdTe pillerinin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri.	87
şekil 4.42	(1) nCdS/pCdTe ve (2) nCdZnS/CdS/pCdTe yapılarının fotoduyarlılık spektrumları.	87
şekil 4.43	pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin enerji band diyagramı.	91
şekil 4.44	nCdS/pCdTe heteroeklemin enerji band diyagramı.	92
şekil 4.45	nCdZnS/pCdTe heteroeklemin enerji band diyagramı.	92
şekil 4.46	nCdS/pCdTe heteroeklemin enerji band diyagramı.	93
şekil 4.47	nCdZnS/CdS/pCdTe heteroeklemin enerji band diyagramı.	93

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 II-VI grubu yarıiletkenlerin kristal yapıları.....	5
Çizelge 2.2 Yarıiletkenlerin yasak band genişlikleri.....	6
Çizelge 2.3 AII-BVI yarıiletkenlerin bazı parametreleri.....	14
Çizelge 4.1 Zn/CdTe yapısının 500 °C’de 10 dak. tavlama sonrası örgü parametresindeki değişim.....	62
Çizelge 4.2 Zn/CdTe yapısının farklı sıcaklıklarda tavlama sonrası yasak enerji aralığı ve kompozisyon değişimi.....	65
Çizelge 4.3 Farklı sıcaklıklarda CdTe filmde Zn’nin efektif difüzyon katsayıları.....	66
Çizelge 4.4 Tavlanmış Zn/CdS yapılarında Zn film kalınlığının CdS’nin örgü parametrelerine etkisi.....	71
Çizelge 4.5 Zn kalınlığına bağlı olarak Zn/CdS yapısının 540 °C’de 18 dak. tavlama sonucu yasak enerji aralığı ve kompozisyon değişimi.....	80
Çizelge 4.6 Yarıiletkenlerin bazı parametreleri.....	91

ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve ardından doktora tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, sabır ve özveri ile yardım eden ayrıca bir araştırmacının nasıl olması gerektiği konusunda beni eğiten hocam Sayın Prof.Dr. Tayyar Caferov'a saygılarımı sunar ve sonsuz teşekkür ederim.

Eğitimimde önemli yeri olan, her zaman yanımda olup bilgi ve tecrübesiyle beni destekleyen hocam Sayın Prof.Dr. Emel Çıngı'ya çok teşekkür ederim.

Tez izleme komitemde olan İstanbul Üniversitesinden hocam Prof.Dr. Nurten Öncan'a, Doç.Dr. Nevin Kalkan'a, üniversitemizden hocam Prof.Dr. Hasan Tatlıpınar'a ve 2007 tarihinde trajik uçak kazasında kaybettiğimiz rahmetle ve saygıyla andığımız hocamız Prof.Dr. F. Şenel Boydağ'a doktora çalışmam boyunca özverili katkılarından ve desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Bizi her zaman destekleyen, bilgi ve tecrübesini paylaşan hocalarım Prof.Dr. Işık Karabay'a ve Prof.Dr. Çetin Taşseven'e çok teşekkür ederim.

Katıhal Elektronik Laboratuvarındaki ustam Yrd.Doç.Dr. S.Serkis Yeşilkaya, Öğr.Gör.Dr. Murat Çalışkan, arkadaşım Yrd.Doç.Dr. Çiğdem O. Luş, kader arkadaşlarım Arş.Gör. Süreyya Aydın Yüksel ve Arş.Gör. Altan Bozdoğan'a; birçok paylaşımda bulunduğumuz arkadaşlarım Arş.Gör. Nimet Yılmaz Canlı, Arş.Gör. Ayşegül Çelik Bozdoğan, Arş.Gör. Asuman Aşıkoğlu, Arş.Gör. Ümit Alkan, Arş.Gör. Ayben K. Uysal, Arş.Gör. Dr. Ünsal Akdere, Arş.Gör. Dr. Baki Aksakal, Arş.Gör. Dr. Şeçkin Günay'a destekleri için çok teşekkür ederim.

Fizik eğitimim boyunca kendilerinden çok şey öğrendiğim ve öğrenmeye devam edeceğim üzerimde emeği olan bölümümüzdeki hocalarıma; birlikte uyum içinde çalıştığım Arş. Gör. arkadaşlarıma; öğrendiklerimi paylaşma fırsatı bulduğum saygı ve sevgilerini esirgemeyen öğrencilerime çok teşekkür ederim.

Her zaman güvenen, maddi ve manevi destekleriyle hep yanımda olan bugünlere getiren babam Özcan Ongül ve annem Güldane Ongül'e çok teşekkür ederim. Doğdukları günden beri hep yanımda olan kardeşlerim Filiz ve Hakan'a ayrıca yaramaz dinlencem yeğenlerim Yağız ve Yiğit'e teşekkür ederim.

ÖZET

CdZnTe VE CdZnS İNCE FİLMLEİN HAZIRLANMASI VE İNCELENMESİ

Bu çalışmada CdTe ve CdS filmlerine Zn'nin difüzyonu ile üçlü CdZnTe ve CdZnS fazları yeni elde etme teknolojisi geliştirildi. Elde edilen üçlü bileşikler ve bu üçlü bileşiklerle oluşturulmuş heteroeklemlerin yapısal, elektrik, optik, fotovoltatik parametreleri incelendi.

Zn/CdTe ve Zn/CdS yapılarının, Zn'nin erime sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda tavlama sıcaklığıyla üçlü fazların oluştuğu gözlenirken 400 °C'de tavlama sıcaklığıyla üçlü fazların oluşmadığı gözlemlendi. Üçlü fazların oluşmaması, tavlama sıcaklığının Zn'nin erime sıcaklığından (418 °C) düşük olması ile yorumlandı. Üçlü fazın oluşmasının, Zn katkısının filmlerde reaktif difüzyon mekanizması ile ilişkili olduğu ileri sürüldü.

Termal tavlama yapılan Zn/CdTe yapılarının x-ışını kırınım analizleri CdZnTe bileşiğinin oluştuğunu göstermektedir. Optik soğurma spektrum ölçümlerinden Zn/CdTe yapılarının tavlama sıcaklığına ve süresine bağlı olarak oluşan CdZnTe bileşiğinin yasak band genişliğinin 1,5 eV'den 1,66 eV'ye (520 °C) kadar arttığı gözlemlendi. Zn'nin CdTe filmlerine 430-520 °C aralığında difüzyonu optik soğurma spektrumları kullanılarak, Zn'nin CdTe filmlerinde sıcaklığa bağlı efektif difüzyon katsayısı $D=2,5 \cdot 10^{-3} \exp(-1,30\text{eV}/kT)\text{cm}^2/\text{s}$ olarak hesaplandı. Zn'nin n-tipi CdTe filme difüzyonu neticesinde elde edilen pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin fotovoltatik parametrelerinin açık devre gerilimi ($V_{oc}=140\text{ mV}$) ve kısa devre fotoakım yoğunluğu ($J_{sc}=0,5\text{ mAcm}^{-2}$) olduğu belirlendi. Fotoakım nispeten küçük değeri pCdZnTe/nCdTe heteroeklemindeki yüksek özdirenciyle ($10^{11}\ \Omega\text{cm}$) ilişkilendirildi.

CdS filme Zn difüzyonu ile oluşan CdZnS üçlü bileşiğinin örgü parametrelerinin Zn konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği x-ışını kırınım analizlerinden belirlendi. EDXRF analizinden Zn/CdS yapısının Zn'nin erime sıcaklığından düşük olan 400 °C'de tavlama sıcaklığıyla Zn'nin CdS filmde efektif difüzyon katsayısı $D=5 \cdot 10^{-14}\text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ olarak belirlendi ve bu sabit kaynaktan serbest katkı difüzyonu ile karakterize edildi. CdZnS bileşiğinin yasak band genişliği, Zn/CdS yapısının tavlama sıcaklığına, tavlama süresine ve Zn kalınlığına bağlı olarak arttığı gözlemlendi. CdS filmin yasak band genişliği 2,43 eV iken oluşturulan CdZnS üçlü bileşiğinin yasak band genişliğinin 2,71 eV'ye kadar arttığı optik soğurma spektrumlarından belirlendi. Bu değişken band yapısının yasak band genişliği filmin yüzeye yakın bölgede 2,71 eV iken iç bölgelere gittikçe 2,43 eV'ye kadar düşmektedir.

CdZnS/CdS/CdTe güneş pillerin akım-gerilim karakteristiklerinden fotovoltatik parametreleri $V_{oc}=500\text{ mV}$ $J_{sc}=4,1\text{ mA/cm}^2$ olarak ölçüldü. CdZnS/CdTe ve CdZnS/CdS/CdTe pillerin CdS/CdTe pillerine oranla fotovoltatik özelliklerinin daha yüksek ve fotoduyarlılık spektrumun daha geniş olması, CdZnS üçlü bileşiğinin CdS filme oranla daha geniş yasak band genişliğine ve geniş "pencere" özelliğine sahip olmasıyla ilişkilendirildi.

Anahtar Kelimeler: CdTe, CdS, CdZnTe, CdZnS filmler, Zn difüzyonu, heteroeklemler, güneş pilleri.

ABSTRACT

PREPARATION AND INVESTIGATION OF CdZnTe AND CdZnS THIN FILMS

In this study, a new technology was improved to obtain CdZnTe and CdZnS ternary phases by diffusion of Zn in CdTe and CdS films. The structural, electrical, optical and photovoltaic parameters of obtained ternary compounds and heterojunctions acquired by them have been investigated.

Obtaining to ternary phases of Zn/CdTe and Zn/CdS structures was observed by annealing at higher temperature than melting point of Zn not at 400 °C. It can be related annealing temperature, which is smaller than the melting point of Zn (418 °C). It was supposed that obtaining to ternary phases related to the reactive diffusion mechanism in films doped Zn.

X-ray diffraction study of Zn/CdTe structures exposed to thermal annealing indicates the formation CdZnTe compounds. Analysis of the absorption spectra of annealed Zn/CdTe structures, it is observed that the former (1,66eV) energy band gap of CdZnTe compounds is larger than that the latter (1,50 eV) related to annealing temperature and time. Using of optical absorption spectra, the temperature dependence of the effective diffusion coefficient of Zn in CdTe in the range of 430-520 °C is described as $D=2,5 \cdot 10^{-3} \exp(-1,30\text{eV}/kT)\text{cm}^2/\text{s}$. The open circuit voltage and short-circuit photocurrent density of a pCdZnTe/nCdTe heterojunction formed as a result of Zn diffusion into n-type CdTe film are determined $V_{oc}=140 \text{ mV}$ and $J_{sc}=0,5 \text{ mAcm}^{-2}$, respectively. The low value of the short-circuit photocurrent can be related to the high series resistance of the CdZnTe/CdTe heterjunction (of about $10^{11} \Omega\text{cm}$).

Lattice parameters of CdZnS ternary compounds formed as a result of Zn diffusion in CdTe thin films were changed related to Zn concentration from x-ray diffraction analysis. It is established that thermal annealing of Zn/CdS structure at temperature (400 °C) lower than the melting point of Zn results in concentration distribution of Zn in CdS film described by an erfc-curve ($D=5 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$) and characterizing the free impurity diffusion from a constant source. It is observed that band gap of CdZnS compound increases related to annealing temperature and time of Zn/CdS structure, and thickness of Zn on CdS. Analysis of the absorption spectrum of such films indicates formation CdZnS composition with the largest value of energy band gap up to 2,71 eV, exceeding the band gap of CdS (2,43 eV). The band gap of this variable band structure changes from 2,71 eV in the near surface region to 2,43 eV (CdS) in the film.

From current-voltage characteristics, photovoltaic parameters of CdZnS/CdS/CdTe solar cells were measured as $V_{oc}=500 \text{ mV}$ $J_{sc}=4,1 \text{ mA/cm}^2$. CdZnS/CdTe and CdZnS/CdS/CdTe solar cells have higher photovoltaic properties and wider photosensitivity spectrum than CdS/CdS solar cells. It is related to CdZnS ternary compound have larger energy band gap and window properties than CdS film.

Keywords: CdTe, CdS, CdZnTe, CdZnS films, Zn diffusion, heterojunction, solar cells.

1. GİRİŞ

Sanayide geniş kullanım alanına sahip olan yarıiletkenler birçok araştırmaya konu olmaktadır. Bu araştırmalar, teknolojik uygulamalarda kullanılmak amacıyla değişik kristalik yapıda ve özellikte olan yarıiletkenleri ortaya çıkarmak ve kullanım amacına uygun istenilen özelliklerin değiştirilmesini amaçlamaktadır.

Direkt geçişli band yapısına sahip olan $Cd_{1-x}Zn_xTe$ üçlü bileşiğinin yasak band genişliği 1,5 eV CdTe'den 2,3 eV ZnTe'ye Zn konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. CdZnTe üçlü bileşiği güneş pillerinde, foto dedektörlerde, ışık saçan diyotlarda, x-ışını ve gama-ışını dedektörleri gibi opto-elektronik düzeneklerde kullanılmak üzere yüksek potansiyele sahiptir. Güneş pili uygulamalarında, güneş spektrumundan maksimum dönüşüm için optimal yasak band genişliğine ve yüksek absorpsiyona sahip olması nedeniyle aktif malzeme olarak kullanılmaktadır.

$Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiğinin yasak band genişliği 2,43 eV CdS'den 3,7 eV ZnS'ye Zn konsantrasyonuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. CdZnS üçlü bileşiği, heteroeklem güneş pillerinde, foto dedektörlerde, fotoiletken düzeneklerde, opto-elektronik düzeneklerde kullanışlı bir malzemedir ve ayrıca yüksek yoğunluklu optik kaydedici, mavi hatta morötesi lazer diyot için ümit verici bir materyaldir. Güneş pili uygulamalarında, geniş yasak band aralığına ve doğal n-tipi iletkenliğe sahip olması nedeniyle p-tipi aktif malzemelerde pencere malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Sanayide geniş kullanım alanına sahip olan CdZnTe ve CdZnS üçlü bileşiği birçok yöntemle elde edilmektedir. CdZnTe üçlü bileşiğinin hazırlanmasında termal buharlaştırma, kimyasal iletim, elektrotta kaplama, sıcak duvar epitaksi, moleküler-bombardıman epitaksi, dikey Bridgman yöntemleri kullanılmaktadır. CdZnS üçlü bileşiğinin hazırlanmasında ise vakumda buharlaştırma, metal-organik buhar faz epitaksi, moleküler-bombardıman epitaksi, iyon-bombardıman kaplama gibi teknikler kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, yeni difüzyon yöntemiyle, yani ikili CdTe ve CdS filmlere Zn difüzyonu ile değişken band aralıklı üçlü CdZnTe ve CdZnS filmlerin elde edilmesi, onların yapısal, optik ve elektrik özelliklerinin incelenmesidir. Optik pencere rolünü oynayan CdZnTe ve CdZnS esaslı güneş pillerin hazırlanma teknolojisinin geliştirilmesi ve pillerin fotovoltaiik parametrelerin araştırılması tezin diğer biri amacıdır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 AII-BVI (CdTe, CdS, ZnTe ve ZnS) Bileşenlerin Faz Diyagramları

Faz diyagramları çözeltilerin, elementlerin ve bileşiklerin davranışlarıyla ilgili en önemli bilgi kaynaklarından birisidir. Faz diyagramları, özel uygulamalar için yeni alaşımların geliştirilmesinde istenilen mekanik, fiziksel, kimyasal özellikli alaşımların üretilmesi için ısı işlem prosedürlerinin belirlenmesinde ve bu alaşımların kullanımında oluşabilecek problemlerin çözümünde malzeme bilimiyle uğraşanlar için kullanışlıdır.

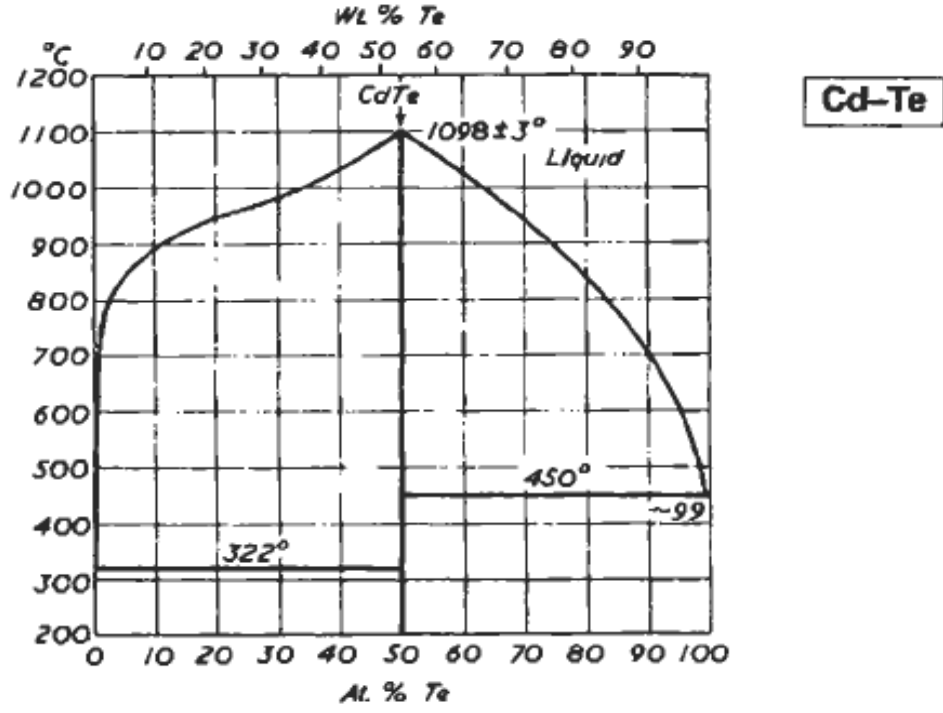
Bütün materyaller bulunduğu koşullara bağlı olarak gaz, sıvı veya katı durumda bir başka deyişle fazda olabilir. Durum değişkenleri kompozisyon, sıcaklık, basınç, manyetik alan ve elektrik alanı içermektedir. Durum değişkenlerinin sisteme etkilerini göstermek için diyagramlar kullanılmaktadır. Bunlar denge şartı altındaki sistemde görülen çeşitli fazlar arasındaki ilişkileri göstermek için yapılmıştır. Böyle diyagramlar yapı diyagramları, denge diyagramları veya faz diyagramları olarak isimlendirilmektedir. Faz diyagramları sistemdeki eleman sayısına bağlı olarak (birli, ikili, üçlü, vb.) isimlendirilir.

Birli diyagram, tek elemanlı bir sistemin sıcaklık ve basınç değişimi altındaki faz değişimlerini (katı, sıvı, gaz) gösteren bir veya iki boyutlu grafik olarak ifade edilebilir.

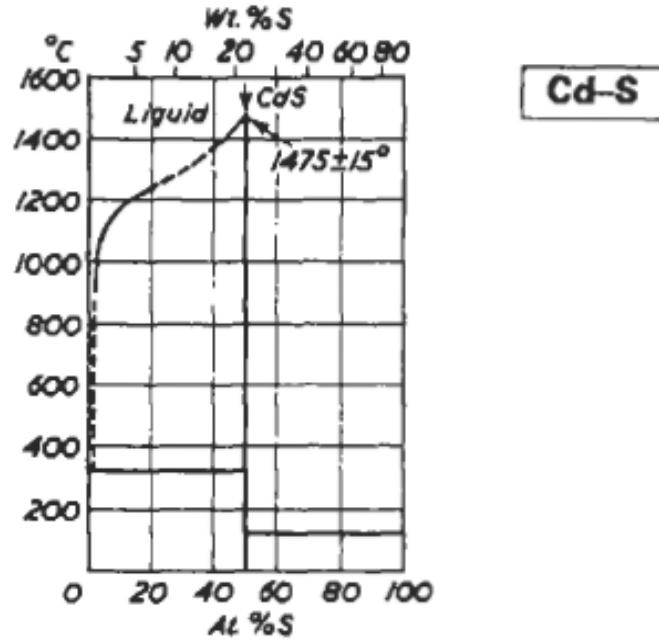
İkili diyagram, iki elemandan oluşmuş sistemin basınç, sıcaklık ve kompozisyonuna bağlı değişimi gösteren üç boyutlu (P-T-X) grafik olarak ifade edilebilir. Genelde bir atmosfer sabit basınçta düşünülerek üç boyutlu grafik, sıcaklık ve kompozisyona bağlı iki boyutlu (T-X) grafiğe indirgenir.

Üçlü diyagram, üç elemandan oluşmuş sistemin basınç, sıcaklık ve üçlü kompozisyonlarına bağlı değişimi gösteren grafik olarak ifade edilebilir ve iki boyutta denge durumlarını çizmek oldukça zor ve karmaşıktır. İkili sisteme bir eleman eklendiğinde ikili diyagrama yeni bir kompozisyon eksenini eklenerek üçlü diyagram oluşturulur. Üçlü diyagramların incelenmesi oldukça zor olduğu için sıcaklık veya basınç sabit tutularak iki boyutta inceleme yapılır. (Baker, 1992)

Kısaca faz diyagramları, sıcaklığın, basıncın ve kompozisyonun işleviyle faz kompozisyonu ve faz dengesi ile ilgili bilgi edinmemizi sağlar. II-VI grubu bazı bileşiklerin faz diyagramları verilmiştir (Şekil 2.1-2.3).

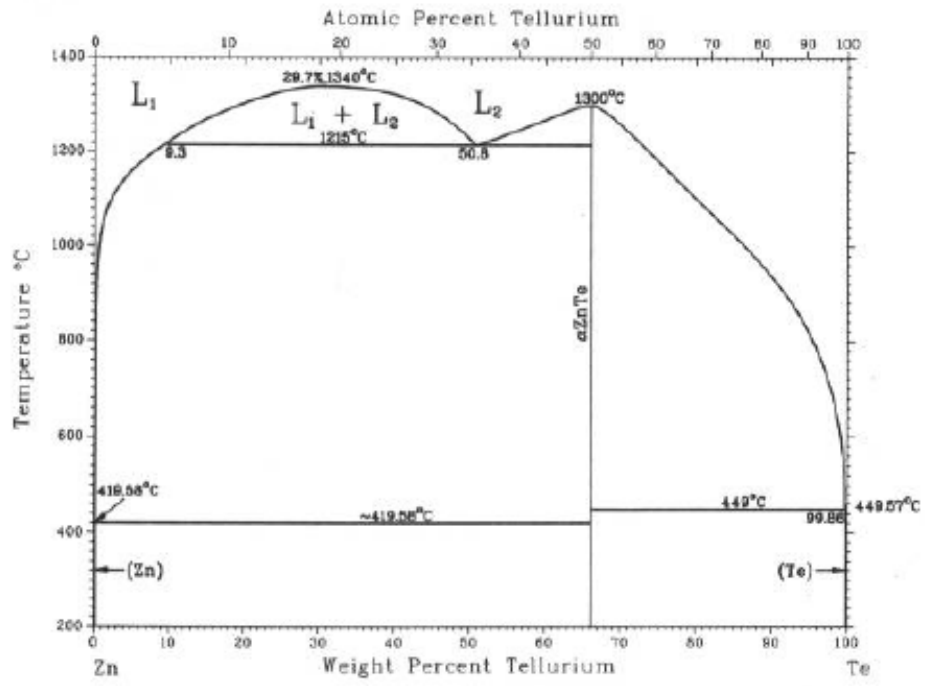


Şekil 2.1 Cd-Te'nin faz diyagramı (Brandes ve Brook, 1992).



Şekil 2.2 Cd-S'nin faz diyagramı (Brandes ve Brook, 1992).

Te-Zn



Şekil 2.3 Zn-Te'nin faz diyagramı (Baker, 1992).

2.2 AII-BVI (CdTe, CdS, ZnTe ve ZnS) Bileşenlerin Kristal Yapıları ve Band Diyagramları

Yarıiletkenlerin elektronik band yapısı hakkında genel bilgi birinci *Brillouin* bölgesi kullanılarak edinilebilir. Enerji band yapısı seçilen kristalografik yönelimler boyunca tanımlanır. Bandların kenarları üç boyutlu k uzayının sınırları kullanılarak tanımlanmıştır. Brillouin bölgesinin şekli kristal örgüsü geometrisiyle belirlenir ve bunun büyüklüğü örgü sabitine bağlıdır. Brillouin bölgesinin tanımlanmasında, bölgenin içindeki simetri noktaları için Yunan alfabesindeki terimler ve yüzeyler için Roma alfabesindeki terimler kullanılmıştır.

Γ , ters örgü uzayının merkezini belirtir. Λ [111] yönelimini ve L bu yönelim boyunca bölge sonunu ifade eder. Δ [100] yönelimini ve X bu yönelim boyunca bölge sonunu ifade eder. Σ [110] yönelimini ve K bu yönelim boyunca bölge sonunu ifade eder.

Çizelge 2.1 de II-VI grubu yarıiletkenlerin kristal yapıları kararlı durumları için verilmiştir. CdS bileşiği hegzagonal wurtzite yapısı dışında kübik yapıda da kristalleşmektedir. ZnS bileşiği kübik çinko sülfid yapısının dışında hegzagonal wurtzite yapısında da kristalleşmektedir.

Çizelge 2.1 II-VI grubu yarıiletkenlerin kristal yapıları.

Yarıiletken	Kristal Sistemi	Kristal Yapısının Tipi	Örgü Parametreleri(nm)
CdTe	fcc	Zinc blende	$a = 0,646$
CdS	fcc	Zinc blende	$a = 0,582$
CdS	hex	Wurtzite	$a = 0,41348$ $c = 0,67490$
ZnTe	fcc	Zinc blende	$a = 0,60882$
ZnS	fcc	Zinc blende	$a = 0,54053$

Çinko sülfid yapısı (Şekil 2.4), birbirinden çeyrek cisim köşegeni uzunluğu kadar ötelenmiş iki yüzey merkezli kübik örgü yapısı olarak görülebilir. Birim hücrelerinde 4 atom bulunur. İlkel hücre küp olup, bu yüzey merkezli örgülerden birine AII atomları, diğerine BVI atomları yerleşir.

AII atomlarının koordinatları;

$$(000), \left(0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right), \left(\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}\right), \left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0\right)$$

BVI atomlarının koordinatları;

$$\left(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right), \left(\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}\right), \left(\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}\right), \left(\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}\right)$$

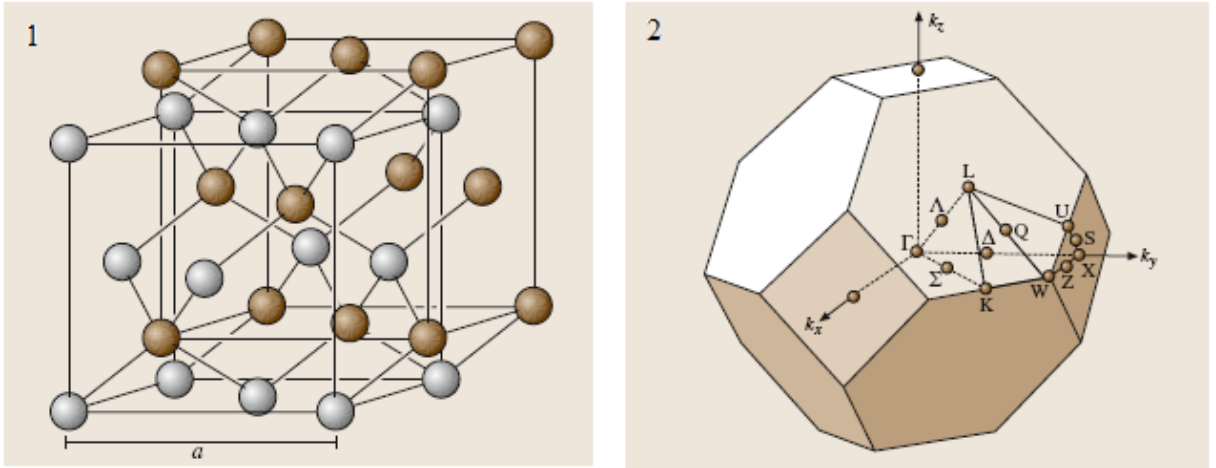
olmak üzere her atomun çevresinde $\frac{\sqrt{3}a}{4}$ uzaklığında 4 atom bulunur. İlkel hücrede dört AB molekülü bulunur.

Hegzagonal yapısında (Şekil 2.5), atomlar önce bir düzlemde A katmanına yerleşmektedir. Bu katman hem hegzagonal yapının taban düzlemine hem de yüzey merkezli yapının (111) düzlemine karşılık gelmektedir. Diğer atomlar ikinci bir B katmanı bunun üstüne ve alt katmandaki 3 atomun üstüne yerleşmektedir. Atomlar üçüncü tabakanın birinci katmanın tam üstüne gelecek şekilde yerleşmesiyle hegzagonal yapı oluşmaktadır. Birim hücre (000)'da bir A atomu ve $\left(\frac{2}{3} \frac{1}{3} \frac{1}{2}\right)$ 'de bir B atomu olan bir yapı birimine sahiptir. Atomsal dolgu faktörü 0,74'tür. Birim hücrenin a ve c olmak üzere iki örgü parametresi vardır. c/a'nın ideal oranı 1,633'dür.

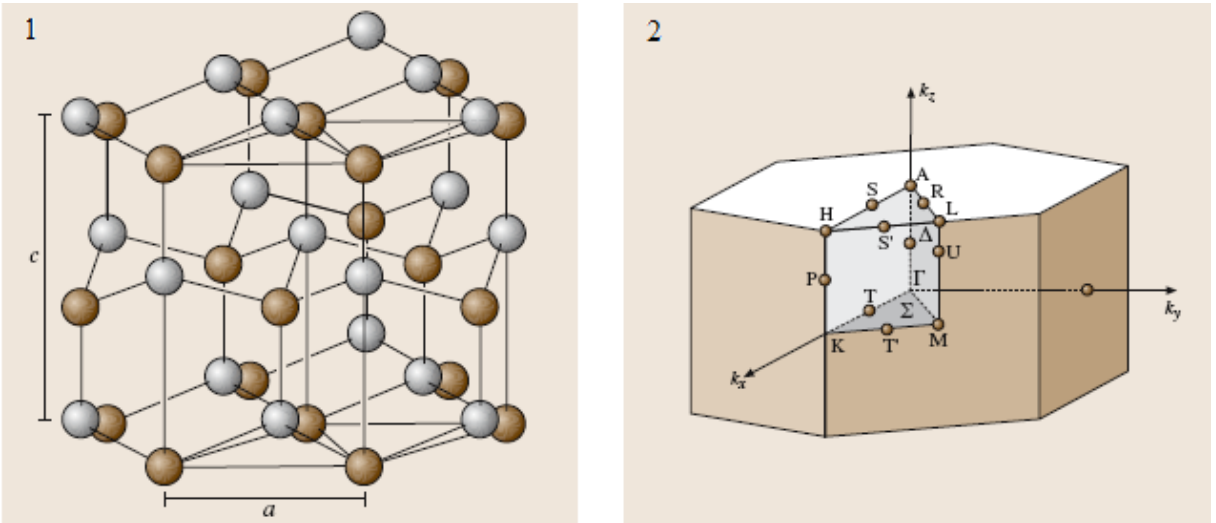
AII-BVI yarıiletkenlerinden CdTe, CdS, ZnTe ve ZnS'nin Brillouin bölgesinin merkezindeki (Γ) en küçük enerji aralığı yasak band genişliğini vermektedir (Çizelge 2.1) ve bu yarıiletkenler direkt geçişli band yapısına sahiptir (Şekil 2.6-2.9).

Çizelge 2.2 Yarıiletkenlerin yasak band genişlikleri.

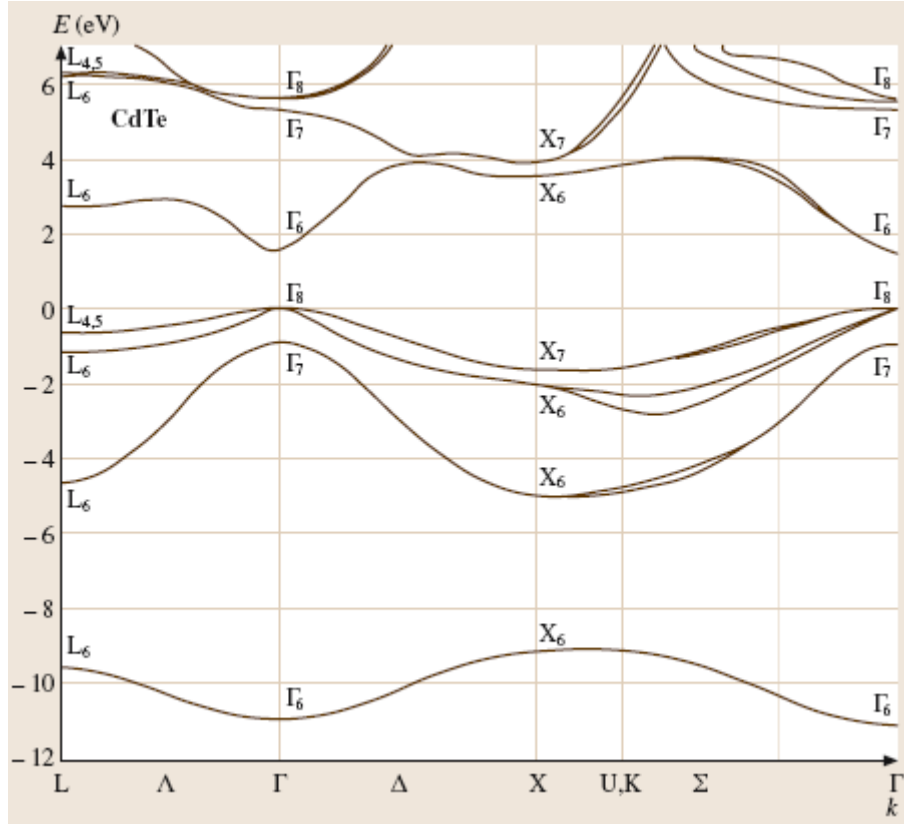
Yarıiletken	E_g (eV)	Yarıiletken	E_g (eV)
CdTe	1,5	ZnTe	2,3
CdS	2,43	ZnS	3,7



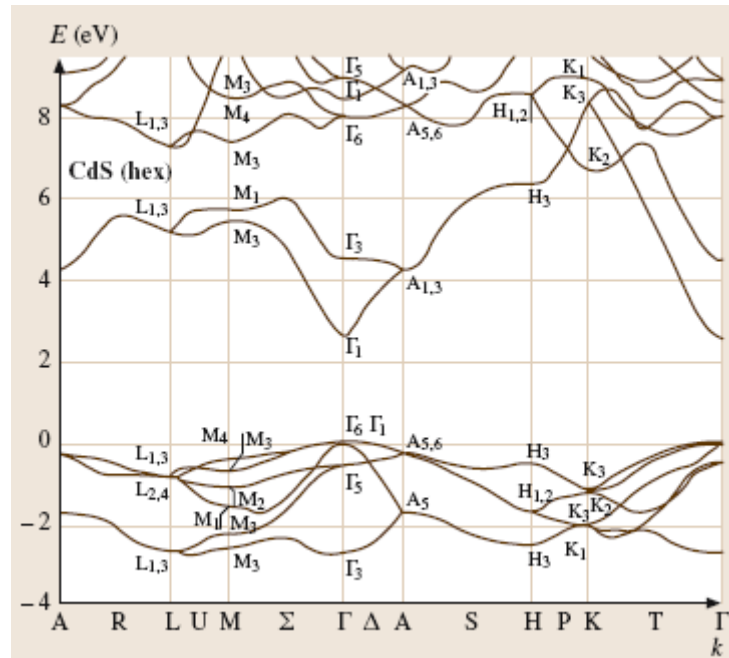
Şekil 2.4 1-Kübik çinko sülfid örgüsü (Zinc blende) ve 2-çinko sülfid örgüsünün Brillouin bölgesi (Martienssen ve Warlimont, 2005).



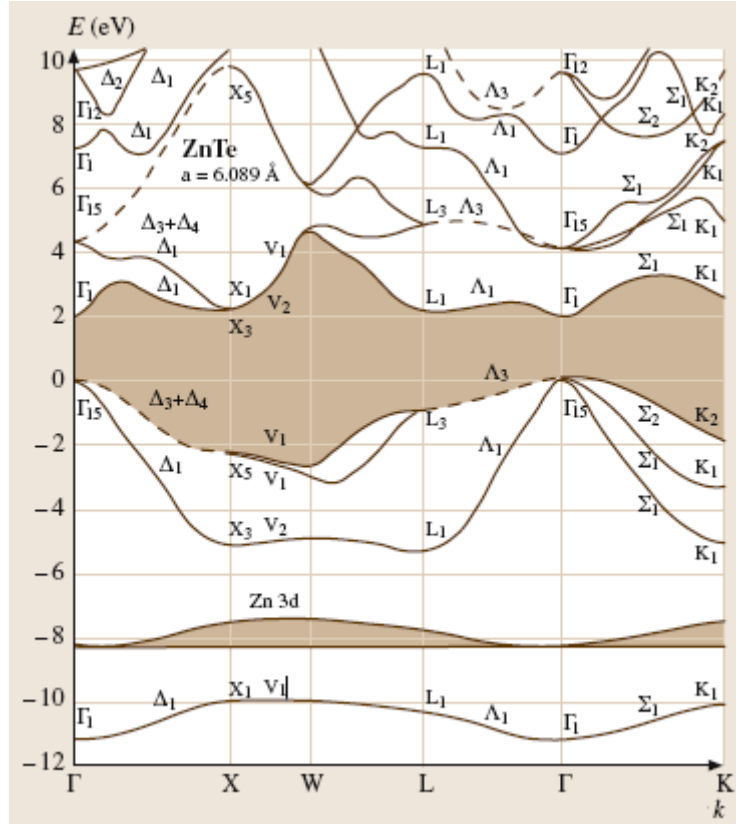
Şekil 2.5 1-Hegzagonal wurtzite örgüsü ve 2-wurtzite örgüsünün Brillouin bölgesi (Martienssen ve Warlimont, 2005).



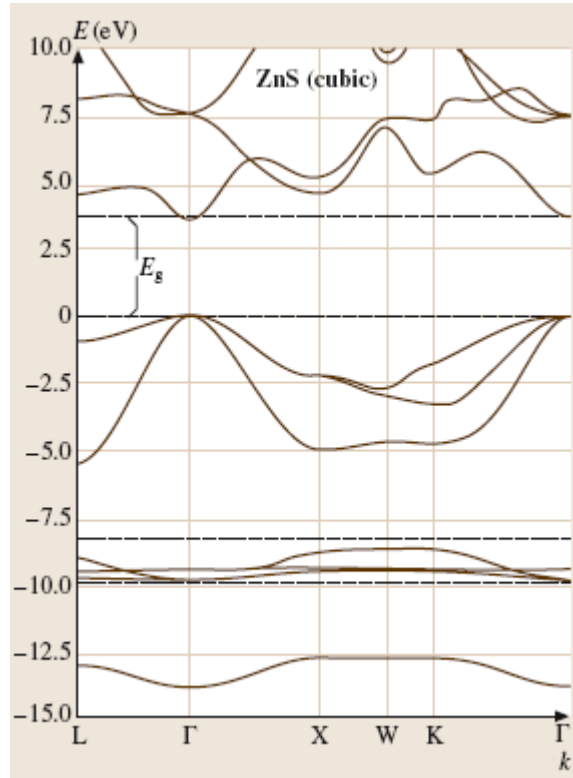
Şekil 2.6 Kübik çinko sülfür CdTe'nin band diyagramı (Martienssen ve Warlimont, 2005).



Şekil 2.7 Hegzagonal wurtzite CdS'nin band diyagramı (Martienssen ve Warlimont, 2005).



Şekil 2.8 Kübik çinko sülfür ZnTe'nin band diyagramı (Martienssen ve Warlimont, 2005).



Şekil 2.9 Kübik çinko sülfür ZnS'nin band diyagramı (Martienssen ve Warlimont, 2005).

2.3 AII-BVI (CdTe, CdS, ZnTe ve ZnS) Bileşenlerin Kristal Kusurları

Yarıiletkenler çeşitli kusurlar içermektedir ve bu kusurlar büyütme ve diğer işlemler sürecinde oluşabilir. Yapısal kusurlar sıfır boyutlu noktasal kusurlar, bir boyutlu çizgisel kusurlar, iki boyutlu yüzeysel kusurlar ve üç boyutlu hacimsel kusurlar şeklinde sınıflandırılabilir. Yarıiletkendeki kusurlar çeşitli birleşimlerinden oluşabilir ve birbirlerini etkileyebilirler. Bu tip kusurlardan sadece düşük oluşma enerjisine sahip noktasal kusurlar termal dengede oluşabilirler ve böylece belli ısılarda kristal içerisinde hazır bulunurlar. Diğer yüksek boyutlu kusurlar yarıiletkenin büyütme süreci esnasında meydana gelirler.

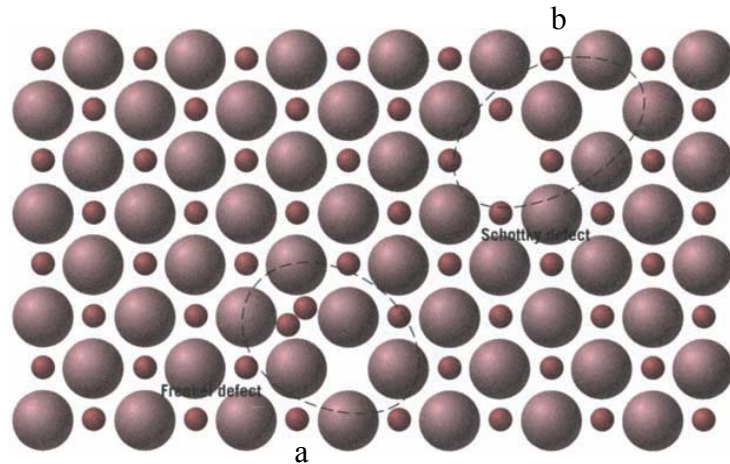
Kristal örgüsünün atom boyutundaki düzensizlikleri boşluklar, arayer atomları ve bunlardan oluşmuş kompleksler noktasal kusurlar olarak tanımlanır. Kristal örgüsünde boşluk ve arayer atomunun meydana gelmesiyle oluşan bu tür çift kusurlar Frenkel kusurları ve kristal örgüsünde tek boşluklar da Schottky kusurları olarak tanımlanır (Şekil 2.10). Dengedeki kusurların konsantrasyonu Frenkel tipli kusurlar için

$$N_F = \sqrt{N_o N_i} \exp\left(-\frac{G_v}{2kT}\right) \quad (2.1)$$

Schottky tipli kusurlar için

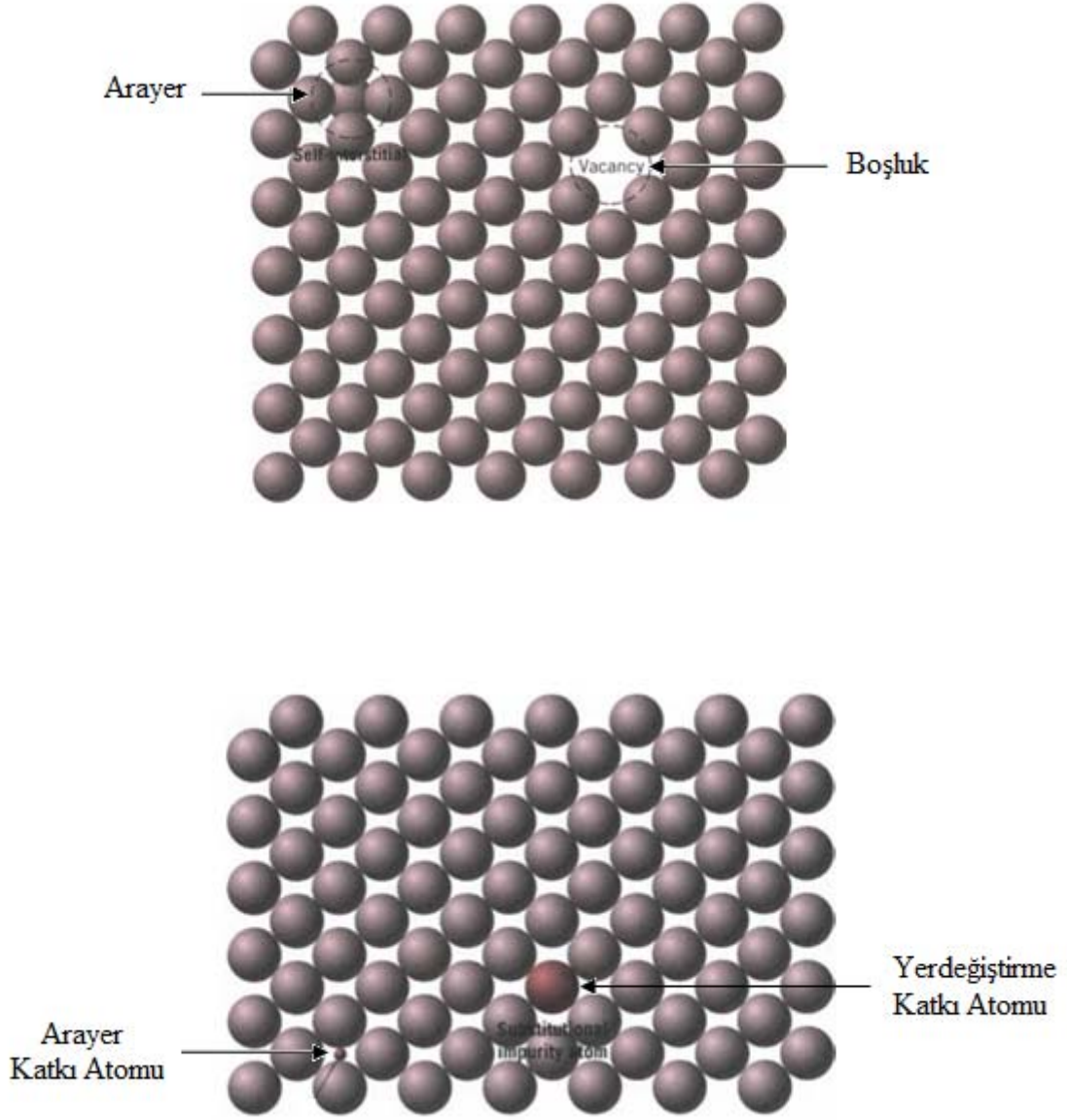
$$N_S = N_o \exp\left(-\frac{G_v}{2kT}\right) \quad (2.2)$$

denklemleriyle verilir. Burada N_o kristalde birim hacimdeki boşlukların konsantrasyonu, N_i arayer pozisyonundaki atomların konsantrasyonu, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve G_v boşlukların serbest oluşma enerjisidir.



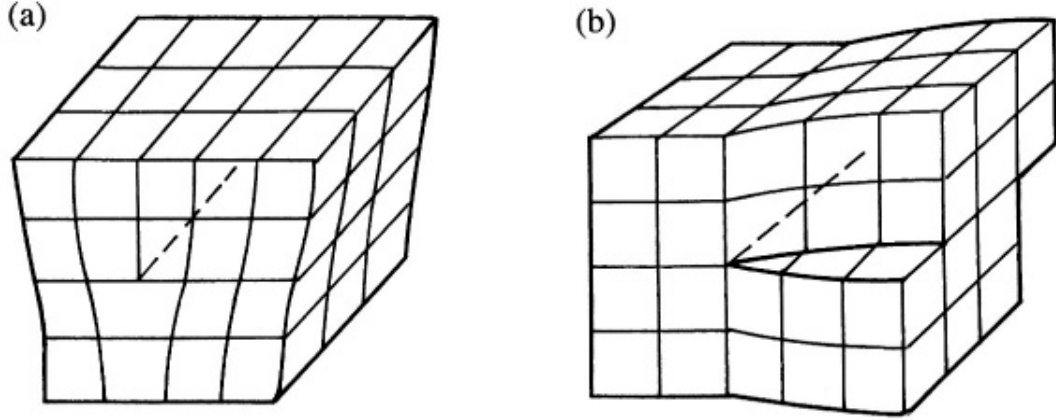
Şekil 2.10 a) Frenkel ve b) Schottky kusurların oluşması (Callister, 2001).

Yarıiletken içerisindeki katkı atomları boşluklara veya arayer pozisyonuna yerleştiğinde katkı atomlarının yarıçapları ve elektron yapıları kristalin ana atomlarından farklı olmasından dolayı katkılar örgüde deformasyon yani kusurlar oluşturmaktadır.

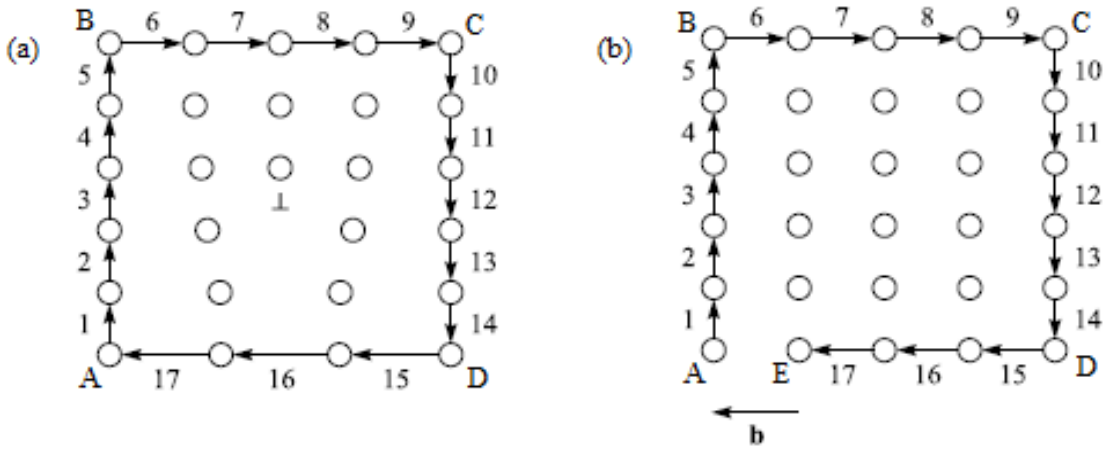


Şekil 2.11 Noktasal kusurların gösterimi (Callister, 2001).

Çizgisel kusurlar, yarıiletkenlerin elektrik ve optik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen kusurlardandır. Çizgisel kusurların iki tipi, kenar ve vida dislokasyonlardır (Şekil 2.12). Kenar dislokasyonu kristal içerisinde araya giren fazla düzlemin kenarı etrafındaki kusurlardır. Vida dislokasyonu ise kristal içerisinde heliks şeklindeki biçimsel bozuklukları içermektedir.



Şekil 2.12 a) Çizgisel ve b) vida dislokasyonların gösterimi (Yacobi, 2003).

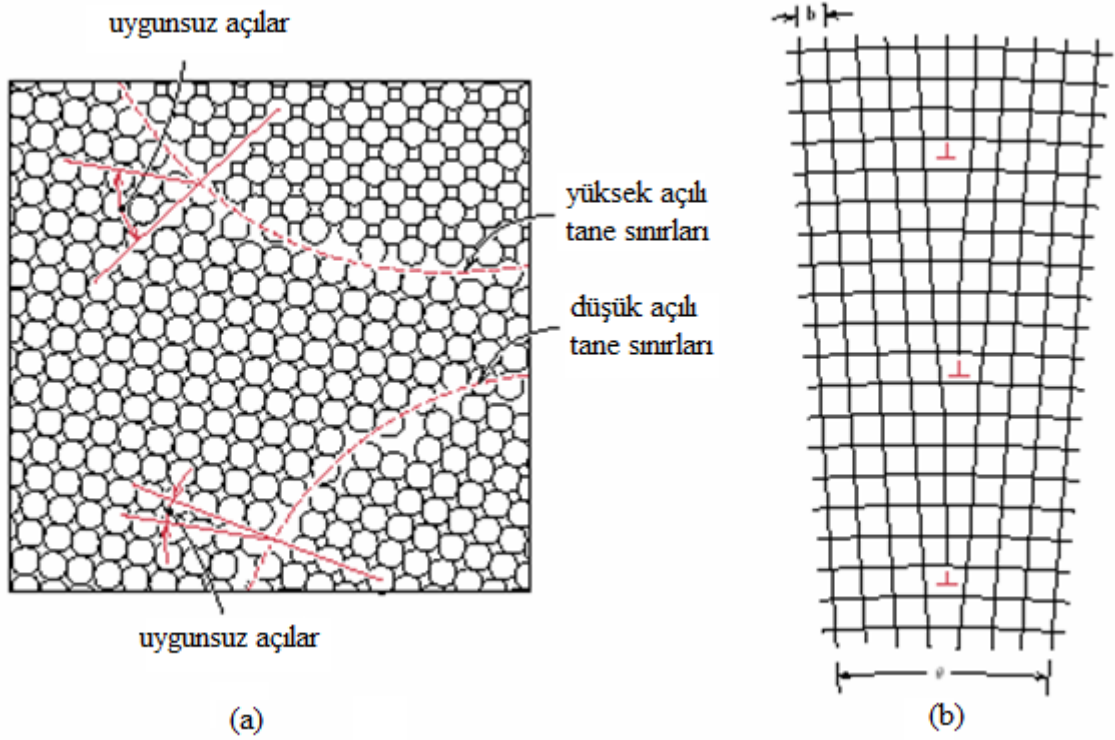


Şekil 2.13 a) Çizgisel dislokasyon ve b) Kusursuz kristal örgüleri (Holt ve Yacobi, 2007).

Dislokasyon etrafında, yer değiştirmeler nedeniyle atomların düzensiz yerleşmeleri görülmektedir. Dislokasyonların büyüklükleri Burgers devresi ve Burgers vektörü ile verilir. Dislokasyon etrafında örgü geçiş vektörü ile çizilen ABCDA kapalı devrede tekrar başladığı konuma getirilirken izlenen adım sayısı kadar kusursuz bir kristalde aynı adım sayısı kadar örgü geçiş vektörü ile çizilen devre ABCDE tekrar başladığı konuma gelmez ve son konumdan başladığı konuma çizilen vektör Burgers vektörü olarak tanımlanır (Şekil 2.13). Burgers vektörü dislokasyon eksenine dik ise kenar dislokasyonu, paralel ise vida dislokasyonudur.

Yüzeysel kusurlar, yarıiletkenin içerisine yerleşen atomların durumuyla yüzeye yerleşen atomların durumunun aynı olmamasından kaynaklanmaktadır. Yüzeydeki atomların serbest atomik bağları vardır ve bu nedenle enerjileri içteki atomlardan daha fazladır. Yüzeydeki

atomlar bağı tamamlayabilmek için yeniden düzenlenir. Çok kristalli malzemeler yani polikristal yarıiletkenler birçok kristal ya da taneden oluşmuştur. Taneler birbirinden farklı kristalografik yönelimlere sahiptir, bu nedenle atomlar arası uyumsuzluk vardır. Tanelerin karşılaştığı yerler tane sınırları kusurlarını oluşturmaktadır (Şekil 2.14). Tane sınırlarında enerji seviyesi yüksektir ve bu nedenle sınırlarda tepkime hızları daha büyüktür. Tane sınırlarında atomların difüzyon katsayısı iç bölgelerine nazaran daha büyüktür (Caferov, 1998). İki tane arasındaki açı 10° 'den küçük ise küçük açılı tane sınırı, 10° 'den büyük (genellikle $20-30^\circ$) ise büyük açılı tane sınırı söz konusu olur.



Şekil 2.14 a) Yönelimleri farklı olan küçük ve büyük açılı tane sınırı kusurlarının gösterimi ve b) kenar kusurları tarafından oluşan tane sınırı arasındaki açının gösterimi (Callister, 2001).

Hacimsel kusurlarda kristal içerisindeki boşlukların ve dislokasyonların kümelenmesinden kaynaklanan üç boyutlu kusurlardır. Yarıiletken kullanılan elektronik düzeneklerde, yarıiletkenin özelliklerine etkisi olan kusurlar kontrol altında tutulması istenmektedir. Birçok çalışma büyütme sürecinde bu kusurları pasivize etmeyi amaçlamıştır. Yarıiletkende bulunan kusurlar yasak band içerisinde enerji seviyelerinin oluşmasına yol açmaktadır. Ayrıca bu kusurlar yarıiletkenin optik ve elektriksel özellikleri üzerinde önemli rol oynamaktadır.

2.4 AII-BVI (CdTe, CdS, ZnTe ve ZnS) Bileşenlerin Temel Özellikleri

AII-BVI yarıiletkenlerinden CdTe, CdS, ZnTe ve ZnS'nin bazı fiziksel özellikleri çizelge olarak verilmiştir.

Çizelge 2.3 AII-BVI yarıiletkenlerin bazı parametreleri.

Özellik	CdTe	CdS	ZnTe	ZnS
Kristal Yapısı	ZB	WZ/ZB	ZB	ZB/WZ
Çinko Blendi Örgü Parametresi (ZB) 300 K a_0	0,648 nm	0,512 nm	0,610 nm	0,541 nm
Wurtzite Örgü Parametresi (WZ) 300 K				
$a_0=b_0$	-	0,4135 nm	0,427 nm	0,3811 nm
c_0	-	0,6749 nm	0,699 nm	0,6234 nm
c_0/a_0	-	1,632	1,637	1,636
Kararlı Fazı (300 K)	ZB	WZ&ZB	ZB	ZB&WZ
Çinko Blendi En Yakın Komşu Uzaklığı 300 K	0,281 nm	0,252 nm	0,264 nm	0,234 nm
Çinko Blendi Yoğunluğu 300 K (g/cm ³)	5,86	4,87	5,65	4,11
Wurtzite Yoğunluğu 300 K (g/cm ³)	-	4.82	-	3.98
Erime Noktası (°C)	1041 ZB	1750 WZ	1240 WZ	1850 ZB
Termal İletkenlik (W cm ⁻¹ K ⁻¹)	0,01	0,2	0,18	0,27
Spesifik Isı Kapasitesi (J/gK)	0,21	0,47	0,16	0,47
Lineer Termal Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ K ⁻¹)				
Çinko Blendi	5,1	3	8	-
Wurtzite	-	4,5	-	6,9
Dielektrik Sabiti				
Çinko Blendi	10,2		8,7	8,9
Wurtzite	-	9,83		9,6
Kırılma İndisi				
Çinko Blendi	2,72	-	2,72	2,368
Wurtzite	-	2,529	-	2,378
Yasak Enerji Aralığı E_g 300 K (eV)				
Çinko Blendi	1,475	2,50	2,394	3,68
Wurtzite		2.50		3,911
Afinite χ (eV)	4,3	4,4	3,53	3,9
Elektron Hall Mobilitesi 300 K (cm ² /Vs)	500	350	340	165
Deşik Hall Mobilitesi 300 K	60	50	100	5

2.5 CdTe ve CdS Örneklerinde Katkılarının Difüzyonu

Katılarda atomlar, ısının etkisiyle denge konumları etrafında küçük genlikli titreşimler yapmaktadır. Atomların ısı etkisiyle bir denge konumundan diğerine atlamalarına dolayısı ile malzeme içinde taşınmasına difüzyon denir. Difüzyonun kuralları 1855’de Fick tarafından verilmiştir ve iki temel kuralı vardır.

Difüzyonun Birinci Kuralı: Homojen katılarda atomların serbest difüzyon akışı, konsantrasyon gradyenti ile orantılıdır.

$$J = -D \frac{dN}{dx} \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte J parçacıkların difüzyon akışı, N atomların konsantrasyonu, D difüzyon katsayısıdır. (-) işareti atomların akış yönünün, konsantrasyon gradyentinin küçüldüğü yönde gerçekleştiğini göstermektedir. Difüzyon katsayısı,

$$D = \alpha a^2 \nu \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir. a örgü parametresi, ν atomların kristaldeki titreşim frekansı ve α kristal örgüsüne bağlı boyutsuz katsayıdır. Difüzyon katsayısı atomların kristaldeki hareket hızını ifade eder ve birimi cm^2/s dir.

Difüzyonun İkinci Kuralı: Fick’in ikinci kuralına göre konsantrasyonun zamanla değişim hızı, konsantrasyonun ikinci türevine bağlıdır. Eşitlik (2.3)’deki süreklilik denklemi difüzyonun birinci kuralına (Eşitlik 2.3) uygulanırsa, difüzyonun ikinci kuralını ifade eden (2.4) eşitliği elde edilir.

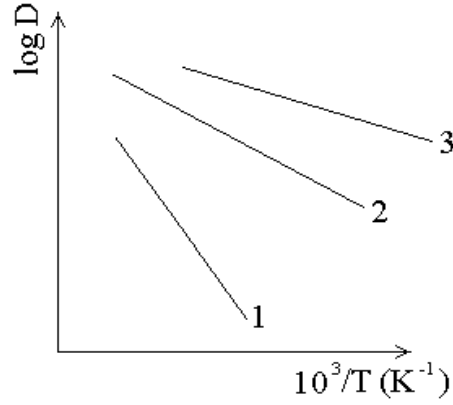
$$\frac{\partial N}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

Katılarda difüzyon katsayısı, sıcaklık arttıkça artmaktadır. Difüzyon katsayısının sıcaklıkla bağıntısı Arrhenius eşitliği ile verilir.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (2.7)$$

Eşitlikteki Q aktivasyon enerjisi, D_0 üstel fonksiyon çarpanıdır. Şekil 2.15 atomların difüzyon katsayısının sıcaklığa bağlılığını göstermektedir.



Şekil 2.15 Boşluk (1), arayer (2) ve tane sınırları (3) mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağlılığı (Caferov, 1998).

Belirli bir örneğin içinde, koordinat ve zamana bağlı olan konsantrasyon dağılımını çıkarmak için ikinci difüzyon kuralını çözmek gerekir, bunun çözümleri başlangıç ve sınır şartlarına bağlıdır. Yarı sonsuz örneğe sabit konsantrasyonlu kaynaktan difüzyon şartları

$$N(x, 0) = 0 \quad (2.8)$$

$$N(0, t) = N_0 \quad (2.9)$$

bağıntıları ile verilir. Difüzyonun ikinci kuralı (2.6) çözümü

$$N(x, t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.10)$$

şeklindedir. Burada N_0 , örnek yüzeyindeki ($x=0$) sabit konsantrasyon, $\operatorname{erf}(z)$ Gauss hata fonksiyonudur.

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \quad (2.11)$$

Son derece ince filmde difüzyon, herhangi bir zaman sonra filmin atomlarının numunenin içine tamamen difüze olmasıdır. Difüzyon şartları

$$N(x,0) = Q \quad x = 0 \quad (2.12)$$

$$N(x,0) = 0 \quad x > 0 \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. Bura Q numunenin yüzeyinde birim alana yerleşen atomların sayısıdır.

Difüzyonun ikinci kuralı (2.6) çözümü

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (2.14)$$

şeklindedir (Abdullaev, 1987).

Reaktif Difüzyon: Difüzyon süreci sonucunda difüzyon bölgesinde yeni bir faz meydana çıkması reaktif difüzyon ile karakterize edilir. Reaktif difüzyon sonucu difüzyon bölgesinde ana maddeden farklı fiziksel ve yapısal özellikleri sahip madde oluşur. Yeni bir fazın oluşumu birçok sebebe bağlı olabilir. Reaktif difüzyon yavaştır ve bu iki sebebe bağlıdır. Difüzyon atomlarının maddedeki atomlarla bağ yapmasından dolayı difüzyon akışı yavaştır. İkincisi ise difüzyon bölgesinde oluşan yeni fazın kalınlığı zamanla artar ve difüzyon atomları maddeye girmeden önce yeni fazı geçmek zorundadır. Reaktif difüzyonun teorik analizi ilk olarak Frenkel ve Sergeev tarafından çalışıldı (Boltaks, 1960).

CdTe polikristallerde katkı difüzyonu tanecik sınırları, tanecik içinde arayer ve boşluklar yolu ile kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı polikristallerde katkı difüzyonu üç difüzyon katkısıyla; tanecik sınırı boyunca (D_{gb}), arayer (D_i) ve boşluklar (D_v) ile karakterize edilir ($D_{gb} > D_i > D_v$). CdTe filmde Au'nun sıcaklığa bağlı difüzyon katsayısı $D = 4,4 \cdot 10^{-7} \exp(-0,54eV/kT) \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. CdTe filmlerde Au difüzyonunun mekanizmasını tanecik sınırları boyunca hızlı aynı anda tanecik içine girişi ve Cd boşluklarına oturmasıyla açıklanmıştır (Dzhafarov ve Çalışkan, 2007).

CdTe filmlerde hem termal hem de foto tavlama için Cu'nun efektif difüzyon katsayısı termal ve foto tavlama ile filmlerdeki öz direnç değişim eğrilerinden belirlenmiştir. Termal difüzyonun (D_t) ve foto difüzyonun (D_{ph}) 60-200 °C sıcaklıkları arasında sıcaklığa bağlı difüzyon katsayıları $D_t = 7,3 \cdot 10^{-7} \exp(-0,33eV/kT)$ ve $D_{ph} = 4,7 \cdot 10^{-8} \exp(-0,20eV/kT)$ olarak belirlenmiştir. CdTe filmde Cu'nun 100 °C de difüzyon katsayısı termal tavlama için $D_t = 3,310^{-11} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ iken foto tavlama ile $D_{ph} = 9 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ olmaktadır. Foto difüzyon ile Cu'nun CdTe filmde efektif difüzyon katsayısı termal difüzyondan birkaç kez daha büyüktür (Dzhafarov vd., 2005).

Metalik iyonlar Cu ve Ag elektrik alan etkisi altında p tipi CdTe içine sürüklenebilir. Bu materyalde metalik katkıların difüzyon mekanizmasını anlamak için teorisi Andrev ve vd. tarafından geliştirilen, çeşitli sıcaklıklarda zamana bağlı kapasitans eğrilerinden difüzyon

katsayılarını $D_{Cu}=9 \cdot 10^{-9} \exp(-0,17\text{eV}/kT)$, $T>320 \text{ K}$ için $D_{Ag}=6,5 \cdot 10^{-6} \exp(-0,22\text{eV}/kT)$ ve $T<320 \text{ K}$ için $D_{Ag}=5,5 \cdot 10^{-5} \exp(-0,905\text{eV}/kT)$ olarak belirlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda Ag'nin belirlenen yüksek aktivasyon enerjisi bu sıcaklıklarda komplekslerin oluşmasından, arayer Ag ve akseptör yer değiştirme arasında reaksiyon çiftinden kaynaklanmış olabileceği ileri sürülmüştür (Wortlick, 2000).

Ag/CdS yapıların aydınlatma (300 mWcm^{-2} , $30 \text{ }^\circ\text{C}$) ve aydınlatma olamadan CdS altlıkta Ag konsantrasyon dağılımını radiotracer tekniği kullanarak belirlenmiştir. Konsantrasyon dağılımının sabit kaynaktan katkı difüzyonu karakteristiğine uyumundan, $30 \text{ }^\circ\text{C}$ de foto uyarımla CdS filmde Ag'nin difüzyon katsayısı $D \approx 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Oda sıcaklığında foto uyarmanın CdS filmde Ag difüzyonuna etkisi $150 \text{ }^\circ\text{C}$ de CdS de Ag'nin termal difüzyonuna eşit olduğunu belirlenmiştir (Dzhafarov vd.,1999).

Cu/CdS yapılarının, yeni teknik olarak oda sıcaklığında He-Ne lazer ışınlanmasıyla p tipi CdS filmlerin elde edilmesini sağlayarak, Cu/CdS yapısının oda sıcaklığında 10 dak. He-Ne lazer ışınlanmasıyla CdS filmde Cu atomlarının konsantrasyon profilini efektif difüzyon katsayısını $D=8 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ olarak belirlenmiştir (Dzhafarov vd., 1999).

Li, Cu ve Ag'nin CdS kristallerine difüzyonunu $570\text{-}720 \text{ K}$ sıcaklıkları arasında dış elektriksel alan ($50\text{-}300 \text{ V/m}$) uygulanarak, hegzagonal CdS kristallerinde farklı kristalografik yönelimlerinde Li, Cu ve Ag'nin difüzyon parametreleri karşılaştırılmıştır. CdS kristalinde Li'nin difüzyonunun kristalografik yönelimine bağlı olmadığı ve aktivasyon enerjisinin $0,27\text{-}0,32 \text{ eV}$ olarak ölçüldüğü belirtilmiştir. Cu ve Ag'nin difüzyon parametrelerinin hegzagonal CdS kristalin c eksenine paralel ($D_{//}$) ve c eksenine dik (D_{\perp}) olarak değiştiği belirlenmiştir. Cu'nun difüzyonunda $D_{\perp} > 10 D_{//}$ olduğu ve aktivasyon enerjilerinin ise $0,95\text{-}1 \text{ eV}$ aralığında olduğu gösterilmiştir. Ag'nin difüzyonu D_{\perp} 'nin $D_{//}$ den birkaç kez küçük olduğu aktivasyon enerjilerinin ise sırasıyla $1,35\text{-}1,4 \text{ eV}$ ve $1,05\text{-}1,1 \text{ eV}$ aralıklarında olduğu gösterilmiştir (Borkovska vd., 2002).

CdS tek kristalinde Cu, Ag ve Au'nun düşük sıcaklıklarında difüzyon katsayılarını $160 \text{ }^\circ\text{C}$ de Cu için $D_{Cu}=2,1 \cdot 10^{-3} \exp(-0,96\text{eV}/kT)$ J.L Sullivan, $100 \text{ }^\circ\text{C}$ de Ag için $D_{Ag}=2,6 \cdot 10^{-5} \exp(-0,96 \text{ eV}/kT)$ J.P Sorbier ve N. Sanguinetti ve $500 \text{ }^\circ\text{C}$ de Au için $D_{Au}=91 \exp(-2,1\text{eV}/kT)$ J.L Sullivan tarafından belirlenmiştir. CdS kristalinde bu metallerin yüksek difüzyonunun CdS'de ara yer hareketinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Desnica-Frankoviç vd., 1999).

2.6 Katkıların ve Kusurların CdTe ve CdS'nin Elektrik Özelliklerine Etkisi

Katkı ve kusurlar yarıiletkenlerin elektriksel ve optik özellikleri üzerinde önemli rol oynamaktadırlar. Yarıiletkenlerin büyütme sürecinde veya dış etkenlerle oluşmuş kusurlar ayrıca dışarıdan katkılarla yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri değiştirilebilmektedir. Çeşitli kusurların ve katkıların bulunması yarıiletkenin yasak bandı içerisinde çeşitli enerji düzeylerin oluşmasına neden olur buda yarıiletkenin elektriksel özelliklerini etkilemektedir.

CdTe, büyütme sürecinde üretilen yüksek yoğunluklu kusurları içeren bileşik yarıiletkenidir. Birçok kusur, birçok teknik kullanılarak belirlenmiştir. Band boşluğunda birçok kesikli seviyeden oluşan birkaç band oluşturduğu gözlemlenmiştir. Cd tabanlı bileşiklerin çoğu bakımından, Cd boşluklarının materyalde ön baskın kusur oldukları bilinmektedir. Bu boşluklar hem tekli hem de çiftli yüklenen durumlar sunarlar ve orta boşluğun yanında kusur durumları üretirler. Literatürlerde sığ ve derin tuzaklar hakkında ayrılıklar vardır. Sığ ve derin seviyelerin arasını ayırt etmek için kesin bir çizgi çekmek zor olsa da 0,2 eV'dan fazla aktivasyon enerjisine sahip olan tuzak seviyeleri derin bir seviye olarak düşünülür ve 0,2 eV'dan düşük olan enerjili seviyeler sığ seviye olarak düşünülür. CdTe de Cd boşlukları (V_{Cd}^{-2}) iki kere iyonize olmuş akseptör seviye olarak davranırlar (Mathew, 2003).

CdTe ince filmi hızlı büyütmede her zaman yüksek yoğunluklu çizgisel kusurlar oluşur. Yüksek yoğunluklu çizgisel kusurlara sahip CdTe p-tipi iletkenlikle belirlenir. Çizgisel kusurlar noktasal kusurlara şekil vermede etkilidir ve p-tipi CdTe de V_{Cd} baskın akseptör olarak ortaya çıkar (Yanfa vd., 2001).

CdTe 450-500 °C de tavlânrken ortam içerisine gaz haline Cd verilir ve doymuş buhar basıncı yükselir. Cd, CdTe örgüsünün içine difüze olur. Bu difüzyonun sonucunda Cd arayer durumunda ve diğer yandan Cd boşluklarına dolar. Cd boşluklarına oturan Cd (V_{Cd}) akseptör konsantrasyonunu azaltmakta ve donör konsantrasyonunu artırmaktadır. Bundan dolayı CdTe n-tipi iletkenliğe sahip olur (Lyahovitskaya vd., 2000).

Te gaz halinde ortama verilerek doymuş Te buhar basıncı oluşturulur ve örgüden Te elementinin buharlaşmasına izin verilmez. Örgü içerisinde Te karşısındaki Cd'un buharlaşma yapması mümkündür. Cd'un buharlaşması Cd boşluklarını yani V_{Cd} akseptör konsantrasyonunu artırır aynı zamanda Te zenginliği oluşturur. Bundan dolayı CdTe'ün elektriksel iletkenliği p-tipi olur (Lyahovitskaya vd., 2000).

IA grubundaki Li, Na, K ve IB grubundaki Cu, Ag, Au gibi metaller CdTe filme

katkılandığında Cd boşluklarına oturarak akseptör enerji seviyeleri oluşturmaktadır. CdTe iletkenliğini p-tipi yapmak veya yük taşıyıcı konsantrasyonunu arttırmak için akseptör katkılarıdır. IA ve IB gurubundaki metallerin, CdTe içerisinde arayer pozisyonunda donör katkı olarak kendini gösterir (Wolf vd., 1999).

CdTe'e katkılanan Al, In, Cl, Br, I donör N, P, S, As katkıları ise akseptör özellik göstermektedir. Periyodik cetvelin I. grubundaki elementlerin Cd boşluklarına oturması (Li_{Cd} , Na_{Cd} , Cu_{Cd}) ve periyodik cetvelin V. grubundaki elementlerin ise Te boşluklarına oturması (N_{Te} , P_{Te} , As_{Te} , S_{Te}) CdTe de akseptör katkılarıdır. Elementine bağlı olarak n ve p tipi katkılama sınırı 10^{17} - 10^{19} cm^{-3} aralığında olabilir (Marfaing, 2001).

I. grup elementi Ag eğer Cd boşluğuna (Ag_{Cd}) oturursa CdTe içinde akseptördür. Fotoluminesans (PL) araştırmalarından CdTe içinde akseptör enerji seviyesi 108 meV olarak belirtilmiştir. Ag difüzyonu CdTe içine yapıldığında Cd boşluğuna oturmanın dışında arayer pozisyonunda bulunabilir veya kompleks kusurlar da oluşturabilir. Ag katkılanmasından sonra zamanla Hall konsantrasyonunun düştüğü PL şiddetleri ölçümlerinden belirlenmiştir (Hamann vd., 1998).

CdTe içinde oksijen konsantrasyonu $1,47 \cdot 10^{20}$ cm^{-3} olduğunda oksijen akseptör özelliği gösterir. Burada öncelikle O^{-2} nin Te^{-2} yerine girerek akseptör düzeyleri oluşturmasıdır. Bunun sonucunda Te boşluk konsantrasyonu (V_{Te}) azalır. Bu ise CdTe filme p-tipi özelliği kazandırır. Oksijen konsantrasyonunun $2 \cdot 10^{19}$ - $4 \cdot 10^{20}$ cm^{-3} arasında CdTe'ün direncini yavaşça düşürür ($4 \cdot 10^6$ Ωcm^{-1} 10^5 Ωcm), (Picos-Vega vd., 2001).

p-tipi CdTe'e Cl katkılanması direncinin artmasına sebep olmaktadır. Cd gazı ortamında, Cl katkılanması p-tipi CdTe'de iletkenlik tipini değiştirmektedir. Cl katkısının, p-tipi CdTe'de n-tipine dönüştürmesinin sebebi doymuş Cd gazı ortamında tavlanması ile Cl atomlarının donör katkılanmasıdır (Hwa-Yuh Shin Cherng-Yuan Sun, 1998).

$CdCl_2$ 'ün CdTe difüzyonu sonucunda CdTe tanecik boyutunu arttırmaktadır. $CdCl_2$ konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak tanecik boyutu da artmaktadır. Tanecik boyutu $0,1\mu m$ iken $1\mu m$ den daha büyük bir hal almaktadır (%5 wt $CdCl_2$ uygulandığında). $CdCl_2$ konsantrasyonunun artırılması aynı zamanda CdTe filmin tabaka direncini de düşürmektedir. Direncin düşmesi, $CdCl_2$ 'ün CdTe filmde tanecik büyümesinde yer almasından kaynaklanmaktadır. Tanecik boyutunun artması tanecik sınır potansiyelinin azalmasına ve taneciğin birbirleriyle iletiminin iyileşmesini sağlamaktadır. %3 wt $CdCl_2$ konsantrasyonu uygulandığında CdTe tabaka direnci $15 \cdot 10^7$ Ω 'dan $9 \cdot 10^7$ Ω 'a kadar düşürmektedir. Yüksek

CdCl_2 konsantrasyonunda Cl 'nin baskın rol oynamasıyla p-tipi CdTe filmin direncini yükseltmektedir (Paulson ve Dutta, 2000).

CdTe filme CdCl_2 uygulanmasıyla tanecik boyutunu artırmakta, tanecik sınırını pasivize etmekte ve eklem bölgesinin yoğunluğunu arttırmaktadır. CdCl_2 aşırı derecede Cd katkılanmasından dolayı p-tipi iletkenlikle ilgisi olmamaktadır (Marfaing, 2001).

CdCl_2 p-tipi CdTe 'de $(\text{Te}_i^{2-} - \text{Cl}_{\text{Te}}^+)^-$ veya $(\text{V}_{\text{Cd}}^{2+} - \text{Cl}_{\text{Te}}^+)^-$ ya da her ikisi akseptör kompleksler oluşmaktadır. Bu kompleksler CdTe 'ün p-tipi iletkenliğini arttırmakta ve direncini düşürmektedir (Valdna vd., 1999).

Cl ve Na katkılı CdTe de, Na konsantrasyonu Cl konsantrasyonundan daha düşük ise CdTe 'nin n-tipi iletkenliği, Cl_{Te} donör ile belirlenmektedir. Buda yüksek seviyede Cl iyonizasyonuna bağlı olmaktadır. Na atomu özellikle Cd atomların yerini doldurduğunda akseptör form almaktadır (Na_{Cd}). Na konsantrasyonun artmasıyla donörler Na akseptörleriyle kompanse olmaktadır, bu da iletkenliğe katılan birçok elektronun azalmasında etkili olmaktadır. Bununla birlikte donör-akseptör çifti de oluşturabilmektedir. İletkenlik- Na konsantrasyonuna bağlı grafikten Na ve Cl 'ün eşit yoğunluklu olduğu bölgede iletkenliğin keskin azaldığı ve Na konsantrasyonun artırılmasıyla iletkenliğin nispeten sabit olduğu gözlenmektedir (Altosaar vd., 2000).

İletkenliği p-tipi olan CdTe , yüksek termodinamik iş fonksiyonuna sahip olduğundan omik kontak almak için CdTe yüzeyi yüksek p-konsantrasyonlu hale getirilir. Bunun için en çok Cu kullanılır. CdTe 'e Cu kaplanıp tavlansından sonra Cu , CdTe içine difüze olur. CdTe içinde Cu arayerde bulunduğunda Cu_i^+ donör özelliği gösterir. Cu , Cd boşluğuna oturduğunda Cu_{Cd} akseptör durumundadır. Cu_{Cd} aktivasyon enerjisi 280-340 meV'dur. Arayerdeki Cu , Cd boşluğu ile kompleks oluşturduğunda $(\text{Cu}_i - \text{V}_{\text{Cd}})^-$ akseptör durumundadır. Cu difüzyonundan sonra CdTe filmin katotoluminesans (CL) spektrumu Cu_{Cd} ve $\text{Cu}_i^+ - \text{V}_{\text{Cd}}$ kompleksin oluştuğunu göstermiştir (Romero vd., 2003).

p-tipi CdTe 'ün iş fonksiyonu yüksek olduğundan omik kontak yapmak için çıkış işi yüksek metal bulmak zordur, bu yüzden omik kontak alınmaktan çok yüzeyin p tipliğini arttırarak metal- CdTe kontak potansiyel engel genişliğini azalmak suretiyle tünel geçiş sağlanmasıyla iletim sağlanmış olur. NP asidinin CdTe yüzeyine uygulanmasıyla asit yüzeyden tercihli olarak Cd atomunu söker, bununla beraber mikro-gözenekli temel Te tabakası oluşturması yanında tanecik sınırlarını genişletir. NP asidinin uygulanmasıyla p- CdTe yüzeyi Te bakımından zenginleştirilerek omik kontak oluşturulmaya çalışılmaktadır (Kraft vd., 2001).

CdS de arayer pozisyonundaki Cd (I_{Cd}) ve S boşlukları (V_S) baskın donör tipi, Cd boşlukları (V_{Cd}) ve arayer S (I_S) ise akseptör tipi kusurlardır. Katkılanmamış CdS'in n tipi olmasından dolayı V_S ve I_{Cd} konsantrasyonun V_{Cd} ve I_S konsantrasyonundan daha büyük olduğu beklenmektedir. n tipi CdS filmler, çözelti içerisindeki In/Cd iyon konsantrasyon oranına göre (10^{-6} -0) hazırlanarak 450 °C de N_2 ortamında ısıl işlem uygulandıktan sonra filmin özellikleri araştırılmıştır. n tipi en kaliteli CdS filmlerin In/Cd iyon konsantrasyon oranının 10^{-5} olduğunda elde edildiğini belirtmişlerdir (Riyad ve Ahmed-Bitar, 2000).

Kimyasal çökertme ve yakın mesafeli süblimasyon yöntemleriyle kaplanan CdS filmlere 400°C de 5 dak. $CdCl_2$ buharı uygulandıktan sonra $CdCl_2$ 'nin filmler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. CSS yöntemiyle kaplanan CdS filmlerin hegzagonal yapıda ve iyi bir şekilde kristallendiği ve $CdCl_2$ 'nin bu filmler üzerinde büyük bir etki göstermediği gözlemlenmiştir. Fakat CBD yöntemiyle kaplanan filmlerde $CdCl_2$ uygulandıktan sonra kübik yapının hegzagonal yapıya geçiş yaptığı ve iyi bir şekilde kristallenme sağlarken tanecik boyutunun da arttırdığını ve ayrıca düzlemsel kusur yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir (Moutinho vd., 2003).

Kimyasal çökertme yöntemiyle (CBD) cam üzerine CdS filmler dış sabit manyetik altında büyütülmeleri sonucunda, uygulanan dik manyetik alanın artırılmasıyla daha düşük dirençli, daha kalın ve daha küçük tanecik boyutuna sahip filmler elde edilmiştir. Buda tam anlamıyla anlaşılmasına rağmen altlık yüzeyinde S iyonlarına nispeten Cd iyonlarının konsantrasyonunun daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Virgil vd., 1998).

CdS filmler cam altlıklar üzerine altlığa dik sabit manyetik alan altında CBD yöntemiyle büyütülmüştür. Büyütme esnasında uygulanan manyetik alanın filmler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karanlıktaki akımın $1/kT$ 'ye göre deneysel ölçüm sonuçlarından aktivasyon enerji seviyeleri belirlenmiştir. Büyütme sürecinde manyetik alan uygulanmamış örnekte 0,68 eV, manyetik alan altında 0,040 ve 0,077 T ise sırasıyla 0,14 ve 0,21 eV aktivasyon enerji seviyeleridir. Bu enerji seviyeleri Cd iyonunun fazlalığı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Büyütme esnasında manyetik alan uygulanmasıyla hall taşıyıcı konsantrasyonu $1,8 \cdot 10^{17}$ den $1,2 \cdot 10^{21} m^{-3}$ 'e artmıştır ve ayrıca örneğin direnci düşmüştür (Virgil vd., 1998).

Kimyasal çökertme yöntemiyle hazırlanan CdS filmlerin 0,025 M tiosülfat Ag^+ kompleks solüsyonuna 60 s daldırılmasıyla filmin yüzey kompozisyonu değiştirilmiştir. CdS filmin Ag^+ iyon değişim solüsyonuna daldırılmasıyla Cd^{+2} iyonları yerine Ag^+ iyonların yerleşmesiyle yüzey bölgesinde Ag_2S yapısı oluşmaktadır. Filmde Ag_2S 'in dağılım profili eksponansiyel

eğri ile açıklamıştır. Atomik absorpsiyon spektroskopisi sonuçlarından CdS filmde Ag_2S 'in konsantrasyonun % 4,5 olduğu hesaplanmıştır (Rustava ve Ristov, 2001).

Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle soda-lime cam altlıklar üzerine kaplanan CdS filmler düşük konsantrasyonlu (0,2g/500ml) $\text{AgHO}_3\text{-H}_2\text{O}$ çözeltisine farklı sürelerde daldırılmasıyla Ag katkılanmıştır. Yüksek dirençli CdS filmlerin ($10^6 \Omega\text{cm}$) bu çözeltiye daldırma süresine bağlı olarak direncin düştüğünü (4 dak. 2,6 Ωcm) belirlemişlerdir. Ag katkılanmış CdS filmlerin 400 °C de 1 saat tavllanmasıyla yüzey bölgesinde Ag_2S yapısının oluştuğunu XRD analizlerinden belirlemişlerdir. p-tipi Ag_2S yapısının oluşması öz direncin yükselmesine (29,4 Ωcm) ve CdS filmin iletkenlik tipinin değişmesine sebep olduğunu gözlemlemişlerdir (Rehman vd., 2003).

CdS filme Ag'nin fotodifüzyonu sonucu yüzeye yakın bölgede elektron konsantrasyonu $1,3 \cdot 10^{16}$ dan $1,85 \cdot 10^{16}$ ya kadar artmaktadır. Fotodifüzyonla elektron konsantrasyonundaki bu artış Ag'nin CdS filmde donör davranışından kaynaklandığını ifade etmişlerdir (Dzhafarov vd., 1999).

I. grup katkıların (Li, Na, Cu ve Ag) kimyasal püskürtme yöntemiyle hazırlanan CdS filme difüzyonu n tipi örneğin direncini arttırmıştır. CdS filme Li ve Na difüzyonu sonucunda fotoiletkenliğin 550 nm ve yeşil band emisyonu 510-550 nm deki şiddetlerin artması Cd boşluklarıyla orantılı olduğunu ayrıca Cu ve Ag difüzyonu sonucunda ise bu bandlardaki şiddetlerin azalmasını yüklü Cd boşluklarıyla difüze olmuş katkıların donör-akseptör etkileşmesinden dolayı olduğu gözlenmiştir (Bidadi vd., 1996).

CdS filmin büyütme sürecinde F katkılanarak F katkılı CdS filmler elde edilmiştir. F katkılı filmlerin katkılanmamış filmlere oranla yasak band genişliğinin 2,41 eV dan 2,49 eV arttığı yani maviye kaydığını, düşük yansıtma ve düşük absorpsiyona sahip olduğunu belirlemişlerdir. Buda CdS/CdTe güneş pillerinde daha çok fotonun CdS filmi geçerek CdTe de absorblanmasıyla güneş pili verimliliğini arttırdığını belirlemişlerdir. F katkılanması bandaki derin enerji seviyelerin tanecik sınırlarında pasivizasyon etkisi oluşturmuştur. AFM ölçümlerinden F katkılı filmlerin küçük tanecik boyutlu ve büyük homojenliğe sahip olduğu gözlenmiştir (Podesta vd., 2006).

Kimyasal banyo yöntemiyle kaplanan filmlere, In 10-40 nm kalınlığında kaplanarak 250-350 °C de havada 1 ile 4 saat tavlmasıyla CdS filme In difüze ettirilmiştir. XRD ölçümlerinden tavlama sırasında filmlerin yüzeyinde In_2O_3 tabakasının oluştuğu ve bu oksit filmin difüzyon bariyeri oluşturduğu fotoelektron spektroskopisinden belirlenmiştir. CdS filme In difüzyonu

ile CdS filmin tabaka direncinin azaldığı (750 Ω) iletkenliğin arttığı (50 $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) gözlenmiştir. In katkılı CdS filmlerin optik geçirgenlik spektrumlarından dikkati çekecek bir şekilde yasak band genişliğinin arttığı (>2,5 eV) belirlenmiştir (George vd., 1996).

Kimyasal çökertme yöntemiyle elde edilen CdS filmlerin yüzeyine In kaplanarak oluşturulan In/CdS yapı 250-400 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkları arasında tavlansarak In difüzyonu ve oksidasyonu açıklanmaya çalışılmıştır. In/CdS yapısının tavlansıyla yüzeyde In_2O_3 tabakasının olduğu XRD ölçümlerinden belirlenmiştir. Bu oksit tabakasının kaldırılmasıyla CdS filmin direncinin yaklaşık 10^{-1} - 10^{-2} Ωcm olduğu gözlenmiştir (Castillo vd., 2000).

CdS de In konsantrasyonu 10^{16} ile 10^{20} cm^{-3} arasında değişmektedir. Sülfür basıncı altında termal tavlama sırasında In donör varlığı kendiliğinden oluşan çift iyonize Cd boşluklarına [V_{Cd}] neden olur. Soğutma sırasında bu boşluklar In donörlerle çift oluştururlar. In_{Cd} atomları donör iken [$\text{In}_{\text{Cd}}-\text{V}_{\text{Cd}}$] çifti akseptördür. Termal tavlama sonucu [$\text{In}_{\text{Cd}}-\text{V}_{\text{Cd}}$] çiftinin oluşması materyalin direncinin artmasına sebep olmaktadır (Desnica vd., 1999).

2.7 CdTe ve CdS'nin Optik ve Fotoelektrik Özellikleri

Yarıiletkenin elektrik ve optik özellikleri, kimyasal kompozisyonu, kristalik yapısı, katkı, kusurlar ve yarıiletkenin yapısıyla ilişkilidir. Yarıiletkenlerde optik soğurma birkaç mekanizmayla gerçekleşebilir ve tüm bu katkıların toplamıdır. Yarıiletkenlerde temel optik soğurma, gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak band genişliğine eşit veya büyük olması halinde valans bandındaki elektron iletim bandına geçmesiyle elektron-delik çiftinin oluşmasıdır. Bu tür geçişler direkt (doğrudan) ve indirekt (dolaylı) olmak üzere iki şekilde gerçekleşir.

Direkt geçişte, iletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu aynı dalga vektörüne sahiptir ve dolayısıyla lineer momentumları aynıdır (Şekil 2.16 a). Bu durumda soğurma katsayısı (α) ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki ilişki,

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.15)$$

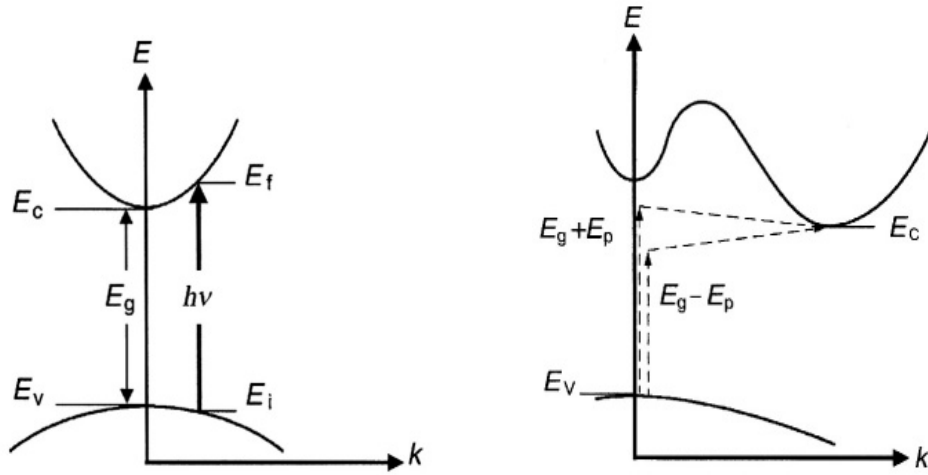
şeklindedir ve $(h\nu - E_g)^{1/2}$ ifadesini sıfır yapan değer, yarıiletkenin yasak band genişliğini vermektedir.

İndirekt geçişte, iletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu aynı dalga vektörüne sahip değildir (Şekil 2.16 b). Bundan dolayı momentum korunumu için fononun

soğurulması ya da yayılımı gerekmektedir. İndirekt geçişte, soğurma katsayısı α ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki bağıntı,

$$\alpha = B(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2 \quad (2.16)$$

ifadesi ile verilir. Burada, E_{fn} fononun enerjisidir, \pm fononun soğurulması veya yayılımı ile bağıntılıdır. $(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2$ ifadesini sıfır yapan değer, yarıiletkenin yasak band genişliğini vermektedir. Band aralığını belirlemede en çok kullanılan yöntem optik geçirgenlik spektrumudur.



Şekil 2.16 (a) Direkt ve (b) İndirekt yarıiletkende yasak band aralığı yakınındaki band yapısının gösterimi (Yacobi, 2003).

2.8 Metal/CdTe, CdS Eklemlerin Özellikleri

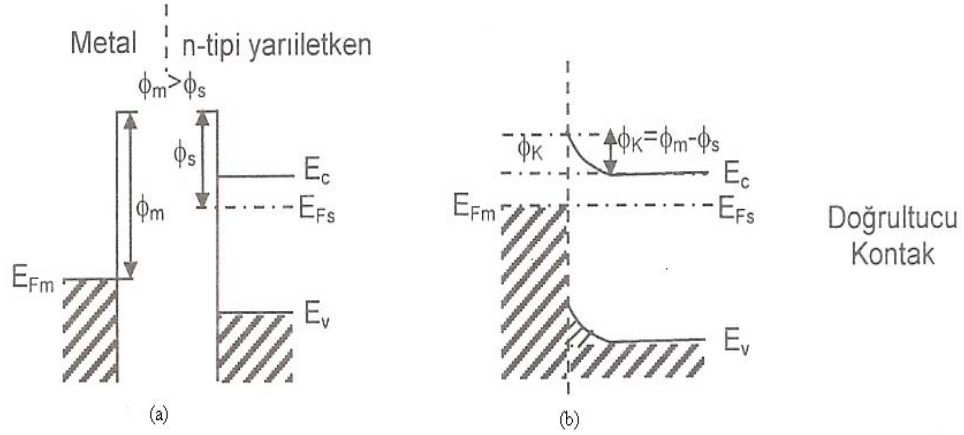
2.8.1 Metal/Yarıiletken Kontaklar ve Heteroeklemler

p-n homoeklemler, metal/yarıiletken eklemler ve heteroeklemler mikroelektronik devre elemanlarının temelini oluşturmaktadır ve elektronik, optoelektronik düzeneklerde, güneş pillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Metal ile yarıiletken temasa getirildiğinde, metal ile yarıiletkenin termodinamik çıkış işlerinin büyüklüklerine ve yarıiletkenin tipine bağlı olarak Schottky veya omik kontaklar oluşmaktadır.

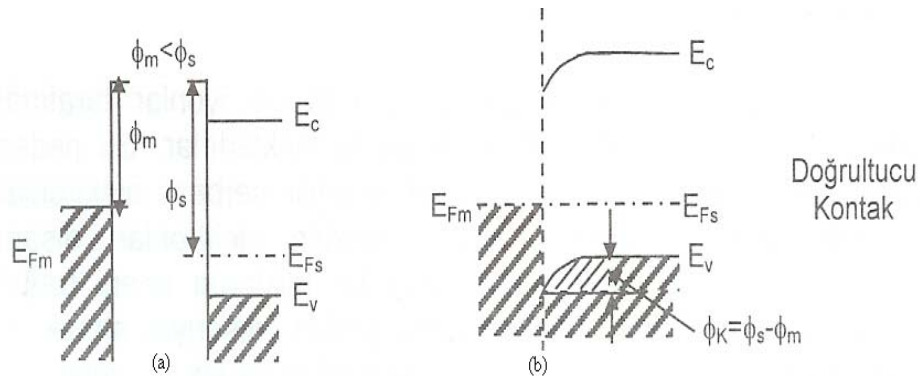
Metal ve n-tipi yarıiletken temasa getirildiğinde, yarıiletkenin çıkış işi (ϕ_s), metalin çıkış

işinden (ϕ_m) daha küçük olması durumunda ($\phi_m > \phi_s$), elektronlar yarıiletken metale geçmektedir. Bu geçişlerin sonucunda n-tipi yarıiletkenin yüzey bölgesindeki elektron konsantrasyonu, içi bölgesindeki konsantrasyonundan daha az olması nedeniyle yüzey bölgesinin direnci daha büyük olmaktadır. Bu tür metal/n-tipi yarıiletken kontaklar doğrultucu özelliği göstermektedir.



Şekil 2.17 Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji band diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).

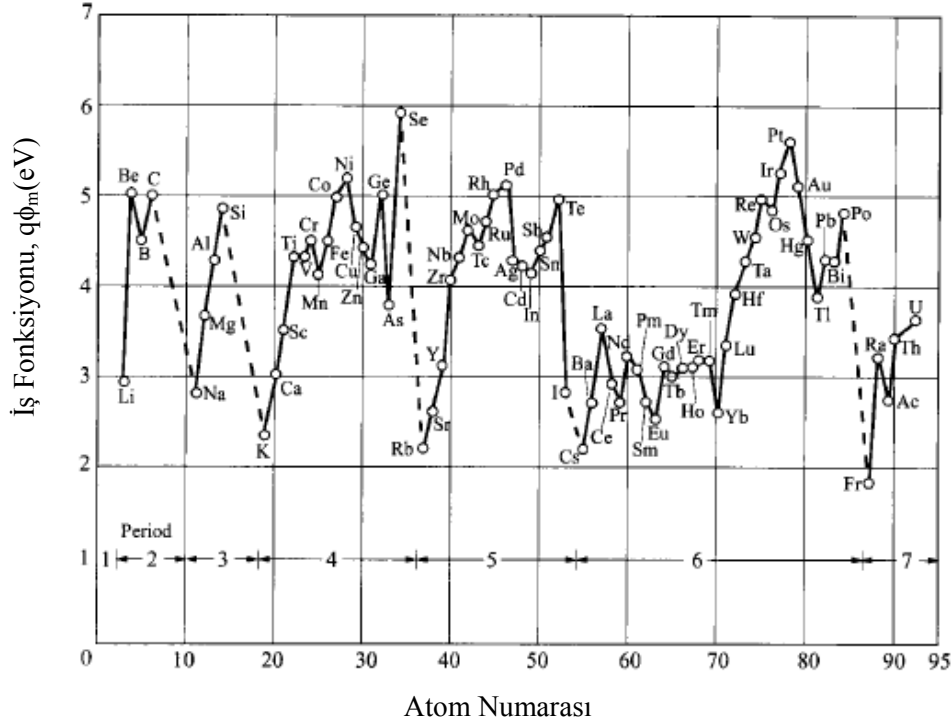
Metalin çıkış işi p-tipi yarıiletkenin çıkış işinden küçük olduğu durumda ($\phi_m < \phi_s$), elektronların metalden yarıiletkene daha kolay geçişleri neticesinde, p-tipi yarıiletkenin kontak bölgesinde pozitif yüklü taşıyıcıların konsantrasyonu azalmakta ve bu tabakanın direnci büyümektedir. Bu tür metal/p-tipi yarıiletken kontaklar doğrultucu özelliği göstermektedir.



Şekil 2.18 Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji band diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).

Doğrultucu metal/yarıiletken kontakların (Schottky diyot) temel özelliği kontak direncinin

dışarıdan uygulanan gerilime bağlı olmasıdır. Dışarıdan uygulanan gerilim $V>0$ ise yarıiletken den metale geçen elektronlar için potansiyel engel yüksekliği gerilimle azalmaktadır ve akım gerilim ile eksponansiyel olarak artmaktadır. Dışarıdan uygulanan gerilim $V<0$ ise potansiyel engel yüksekliği artmakta ve akım çok zayıf olarak geçmektedir.



Şekil 2.19 Vakum ortamında temiz yüzeyli metal için atom numarasına bağlı metal iş fonksiyonu (Sze, 2007).

Schottky diyotun akım-gerilim karakteristiği;

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

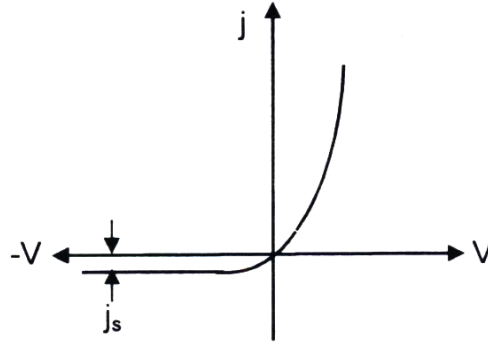
ile verilir. Burada doyma akım yoğunluğu,

$$J_s = \dot{A} T^2 \exp\left(-\frac{\phi_b}{kT}\right) \quad (2.18)$$

ile verilir, ϕ_b potansiyel engel yüksekliğidir ve \dot{A} Richardson sabitidir.

$$\dot{A} = \frac{4\pi e m_n k^2}{h^3} \quad (2.19)$$

Burada e elektronun yükü, m elektronun kütlesi, k Boltzman sabiti ve h Planck sabitidir.



Şekil 2.20 Schottky diyodun akım-gerilim karakteristiği (Caferov, 2000).

Denklem (2.18)'den engel yüksekliği,

$$\phi_b = kT \ln \left(\frac{\dot{A} T^2}{J_s} \right) \quad (2.20)$$

formülü ile hesaplanır.

Sıcaklıkla doyma akım yoğunluğunun değişiminden de engel yüksekliği hesaplanabilir.

Denklem (2.18)

$$\ln \left(\frac{J_s}{T^2} \right) = \ln \dot{A} - \frac{\phi_b}{kT} \quad (2.21)$$

şeklinde düzenlenebilir. Denklem 2.21'in $1/kT$ 'ye göre türevini alarak

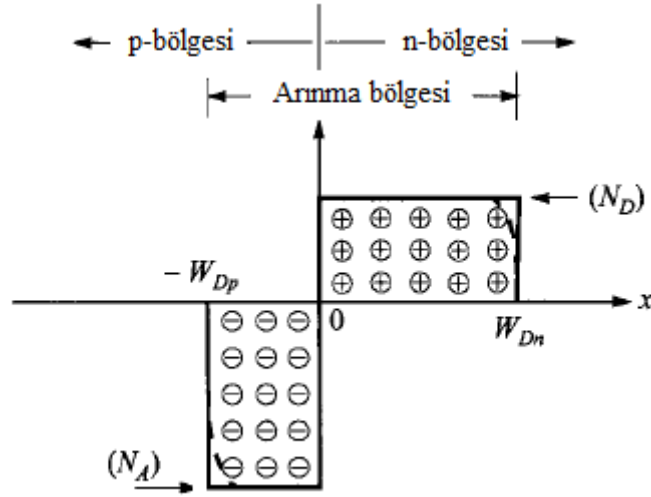
$$\frac{\partial \ln \left(\frac{J_s}{T^2} \right)}{\partial \left(\frac{1}{kT} \right)} = -\phi_b \quad (2.22)$$

elde edilir. Çizilen $\ln(J_s/T^2)-(1/T)$ grafiğinin eğimi $-\phi_b$ 'yi verir. Böylece farklı sıcaklıklarda ölçülen doyma akım yoğunluklarından elde edilen $\ln(J_s/T^2)-(1/T)$ grafiğinin eğiminden engel yüksekliği hesaplanabilir.

Yarıiletken devre elemanlarını elektronik devreye bağlamak ya da onların karakteristiklerini ölçebilmek için bu devre elamanlara akım-gerilim karakteristiği lineer olan omik kontaklar yapılır. Kontak için metal seçiminde; n-tipi yarıiletkende kullanılan metalin çıkış işi yarıiletkenin çıkış işinden daha küçük olmalıdır, p-tipi yarıiletken için metalin çıkış işi yarıiletkenin çıkış işinden daha büyük olmalıdır. Bunun yanında n-tipi yarıiletken için

kullanılan metal bu yarıiletkende donör özelliği göstermelidir, p-tipi yarıiletken için metal bu yarıiletkende akseptör özelliği göstermelidir (Caferov, 1998).

p-n homoeklemler zıt iletkenlik tipine sahip olan aynı iki yarıiletkenlerin temasıyla oluşturulurken p-n heteroeklemler ise zıt iletkenlik tipine sahip olan iki farklı yarıiletkenin temasıyla oluşturulurlar. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler birbirleriyle temasa getirildiğinde yüklerin konsantrasyon gradyenti nedeniyle p-tipi yarıiletkenden n-tipi yarıiletkene deliklerin ve karşıt yönde n-tipi yarıiletkenden p-tipi yarıiletkene elektronların difüzyonu neticesinde p bölgesi sınırında hacimsel negatif yük ve n bölgesi sınırında hacimsel pozitif yük bölgesi oluşmaktadır (Şekil 2.21). Bu süreç termik dengeye gelene kadar devam eder. Sistem dengeye ulaştığı zaman eklemde her iki tarafındaki fermi seviyeleri çakışık olur. Böylece birbirinden ayrılmış yükler eklemde güçlü elektriksel alan meydana getirmektedir (Caferov, 2000). Bir yarıiletkendeki safsızlık akseptör safsızlığından N_A donör safsızlığına N_D keskin bir şekilde değişiyorsa buna keskin eklem denir (Sze, 2007).



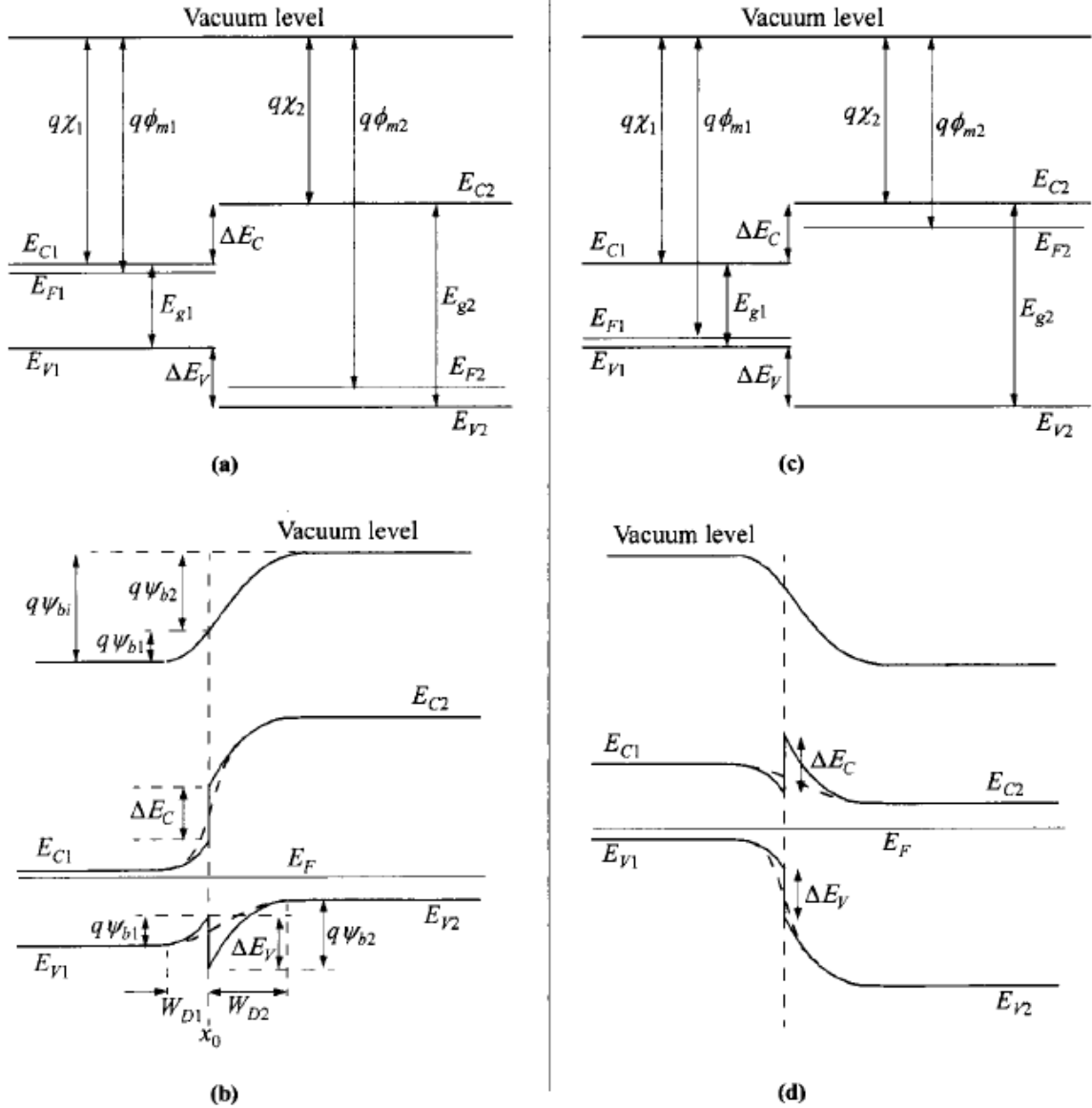
Şekil 2.21 Termal dengede keskin p-n eklemi (Sze, 2007).

Yarıiletkenlerin yasak bandlarının genişliklerinin farklı olması ($E_{g1} > E_{g2}$) nedeniyle sınır bölgesinde iletim bandının dibinin (E_c) ve valans bandının tavanının (E_v) dağılımında kesinti oluşmaktadır (Şekil 2.22). Denklem 2.23'deki q elektronun yükü ve χ çıkış işidir.

$$\Delta E_c = q(\chi_1 - \chi_2) \quad (2.23)$$

$$\Delta E_v = E_{g2} - E_{g1} - \Delta E_c \quad (2.24)$$

İletim bandının dibindeki kesinti (ΔE_c) ve valans bandının tavanındaki kesinti (ΔE_v) dir.



Şekil 2.22 p-n heteroeklemlerin; (a) n-tipi küçük band aralıklı için temastan önce, (b) temastan sonra termal dengede ve (c) p-tipi küçük band aralıklı için temastan önce, (d) temastan sonra termal dengede enerji band diyagramları (Sze, 2007).

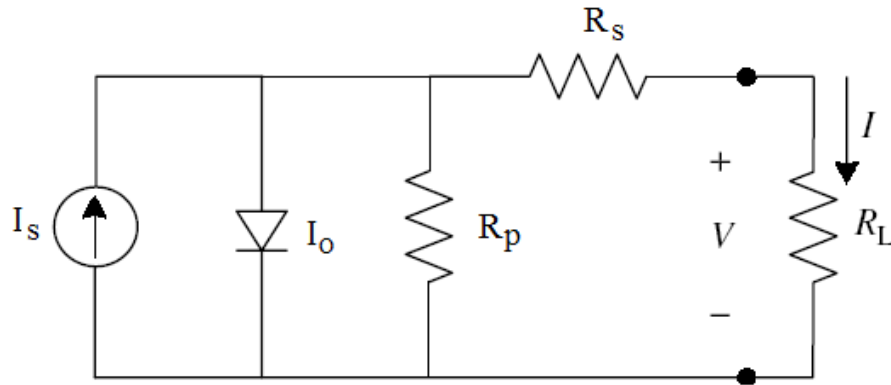
Güneş pilleri p-n homoeklemler, Schottky eklemler ve heteroeklemler oluşturularak hazırlanmaktadır. Güneş piline temel oluşturan çalışmalar 1839 yılında Fransız Fizikçi Edmund Becquerel tarafından fotovoltajik olayın keşfiyle başlar. Becquerel, bir elektrolit içine batırılmış iki elektrottan birinin üzerine ışık düştüğünde ışık ile orantılı olarak iki elektrot arasında potansiyel farkı oluştuğunu gözledi. Güneş pilleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarıiletken aygıtlardır. Bu aygıtların temel çalışma prensibi, yarıiletkenin yasak band genişliğine eşit ve daha büyük enerjiye sahip fotonların yarıiletkende soğurulmasıyla oluşan elektron ve deliklerin eklem bölgesindeki yüksek elektriksel alan ile

çoğunlukta olduğu bölgelere sürüklenmesiyle eklemde akım oluşmasına dayanmaktadır. Güneş pilleri fotonlar tarafından meydana getirilen akımı (I_s) geçirecek durumda olan bir diyot üzerine paralel bağlı sabit akım kaynağı gibi davranır (Şekil 2.23). Ekleme dışarıdan bağlanan bir RL direnci ile birleştirilirse I_s akımıyla diyot akımı I_o arasındaki fark I kadar kısmı dış devreden akar böylece ışık enerjisi elektrik enerjisine çevrilmiş olur. Shunt direnci (R_p), eklemde arınma bölgesi boyunca mevcut olan kristal kusurları veya pillerin kenarlarındaki yüzey sızıntıları sonucunda oluşabilir. Seri direnç (R_s), p veya n bölgelerin yüksek dirençli olması ve kontakların iyi olmamasından kaynaklanmaktadır. Shunt ve seri dirençler güneş pili karakteristiğini olumsuz yönde etkileyen komponentlerdir ve dış devreden akan akım Denklem 2.25 ile verilir. Güneş pillerinde $n=1$, $R_s \approx 0$ ve $R_p \approx \infty$ en ideal durum göz önüne alındığında denklem 2.25'den Denklem 2.26 elde edilir.

$$I = I_s - I_o \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.25)$$

Burada I dış devre akımı, I_s diyot akımı, I_o doyma akımı, q elektronun yükü, V uygulanan gerilim, R_s seri direnç, R_p paralel direnç, n idealite faktörü, k Boltzman sabiti ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

$$I = I_s - I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.26)$$



Şekil 2.23 Güneş pilinin eşdeğer devresi (Schroder, 2006).

Kısa devre durumunda $V=0$ ise tüm akım dış yükten geçer ve kısa devre akımı (I_{sc}) ile karakterize edilir. Devre açık olduğu zaman ($I=0$) durumunda açık-devre gerilimi (V_{oc}) ile karakterize edilir (Şekil 2.24).

Açık devre gerilimi,

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_s}{I_o} + 1\right) \quad (2.27)$$

şeklinde verilir.

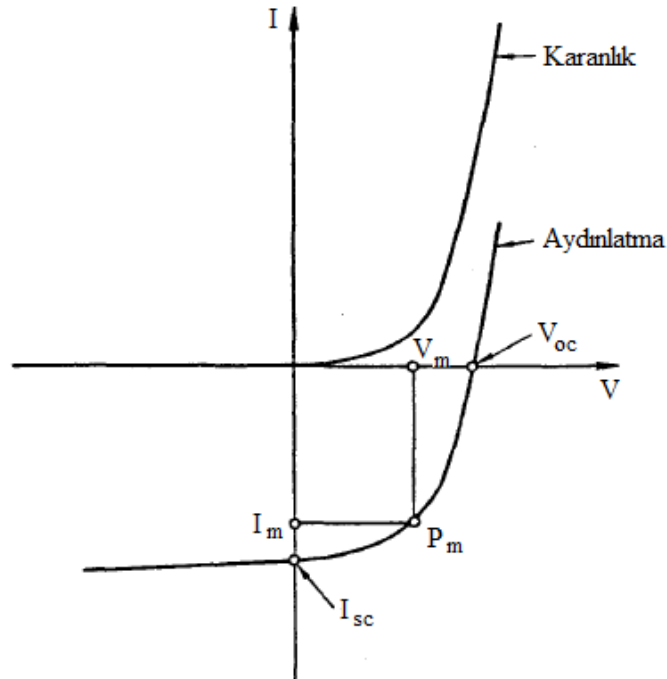
Açık devre veya kısa devre şartlarında güç üretimi olmaz. P_{max} maksimum gücü, karakteristikte IV çarpımının maksimum olduğu noktaya ulaşıldığında elde edilir. Bu nokta I_m ve V_m değerlerinin kesiştiği noktadır. Bu maksimum güç noktası karakteristikte en büyük alanlı dörtgeni temsil eder. Pillerden alınacak maksimum gücü tanımlayan fill faktörü bu nokta kullanılarak hesaplanır (Denklem 2.28).

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.28)$$

Güneş pillerinin en önemli parametresi, enerjinin dönüşüm oranını belirleyen verimdir ve

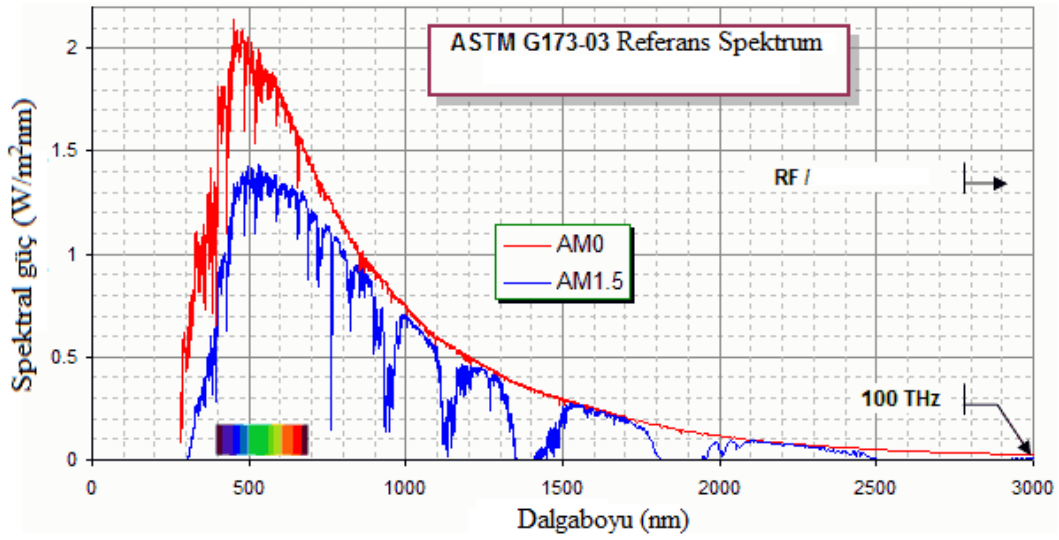
$$\eta = \frac{P_c}{P_g} = FF \frac{I_{sc} V_{oc}}{P_{ışık}} \quad (2.29)$$

şeklinde verilir.



Şekil 2.24 Güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği (Bube, 1998).

Güneş ışını atmosferden geçerken kısmen soğurur. Güneş spektrumunun kızılötesi bölgesinde, düşük konsantrasyonlu H₂O, CO₂, N₂, CH₄ gazları ve tozlar absorpsiyona neden olurken spektrumun morötesi bölgesinde ozon ve oksijen absorpsiyona neden olmaktadır (Şekil 2.25). Bu nedenle güneş ışınlarının atmosferden geçiş yolu uzadıkça absorpsiyonda artmaktadır. Atmosfer kalınlığına l_0 , güneş ışınlarının atmosferden geçiş uzunluğu l ve yeryüzünün normali ile yaptığı açı α olduğunda $l=l_0\cos\alpha$ eşitliğinde l/l_0 oranı AM (hava kütle) katsayısı olarak isimlendirilir. Atmosfer dışında spektrum AM 0 ile güneş ışınlarının yeryüzü normali ile yaptığı açı 0° iken AM 1 ve 48° iken AM 1,5 ile tanımlanır. Enerji spektrumu AM 1,5 ($100\text{mW}/\text{cm}^2$) güneş pillerinin efektif ölçümlerinde standart spektrum olarak kullanılmaktadır (Würfel, 2005).



Şekil 2.25 Güneş ışınımının AM 0 ve AM 1,5'deki spektrumu (ASTM).

Becquerel'in yaptığı çalışmaların ışığında 1873'te Willoughby Smith selenyumda fotoiletkenliği keşfetti. Willoughby Smith'in çalışmalarını 1877'de W.G. Adams ve R.E. Day isimli bilim insanları sürdürdü. Bu ikilinin yaptığı çalışmalarda katı selenyumda fotovoltajik etki gözlemlenildi. 1914 yılına kadar selenyum ve bakır oksit güneş pilinde % 1 verime ulaşıldı. Yarıiletken fotovoltajik modern çağı 1954 de Chapin, Fuller ve Pearson silisyum güneş pilinde % 6 verim elde etmesiyle başladı (Chapin vd., 1954) ve Verlinden vd. 1958 yılında % 8'e 1988 yılında ise % 14 kadar verimi arttırıldı. 1954 yılında Reynolds ince filmlerden oluşmuş Cu_xS/CdS heteroeklem güneş pilinde % 6 verime ulaştı ve daha sonra verim % 9 (Bragagnolo vd., 1980) üzerinde arttırılmasına rağmen sistemin kararlılığı büyük bir problem idi. GaAs esaslı p-n homoeklem pillerde Jenny'nin 1956'da ulaştığı % 4'lük verim, gelişen teknolojiyle birlikte % 30'un üzerine çıkarılmıştır (Bube, 1998).

2.8.2 CdTe ve CdS Esaslı Eklemlerin Karakteristikleri

İlgi çeken ince film heteroeklem güneş pillerinden bazıları $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$, InP/CdS , $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2/\text{CdS}$ ve CdTe/CdS 'dir. Reynolds ince filmlerden oluşmuş $\text{Cu}_x\text{S}/\text{CdS}$ heteroeklem güneş pilinde % 6 verime ulaştı (1954) ve daha sonra verimin % 9 (Bragagnolo vd., 1980) üzerinde artırılmasına rağmen sistemin kararlılığı büyük bir problemdi. Cd katkılanmış InP tek kristal üzerine vakum kaplama yöntemiyle kaplanan CdS tabakası ile oluşturulan n-CdS/p-InP heteroeklem güneş pilinde % 12,5 verim Wagner ve arkadaşları tarafından 1975 de rapor edildi. InP üzerine CdS bir açık tüp $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ akım sisteminde kimyasal buhar biriktirme kullanılarak CdS/InP güneş pilinin verimi % 15'e kadar arttırıldı (Shay vd., 1977; Bettini vd., 1977, 1978). Vakumda buharlaştırma yöntemiyle tümü ince film şeklinde hazırlanan $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ % 6,6 verimli ve aynı yöntemle hazırlanan $\text{CuInS}_2/\text{CdS}$ % 3,2 verimli piller imal edildi. (Kazmerski vd., 1975, 1976; Kazmerski, 1977). Kimyasal püskürtme yöntemiyle kaplanan $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ heteroeklem güneş pilinde maksimum % 4-5 verim elde edildiği 1996 yılında Verner tarafından bildirildi (Bube, 1998).

II-VI yarıiletkenlerinden (ZnS, ZnSe, ZnTe, CdSe, CdS ve CdTe) sadece ZnSe ve CdTe hem n-tipi hem de p-tipi formda hazırlanabilmektedir. ZnTe yüksek iletkenliğe sahip p-tipi formda hazırlanabilmektedir. II-VI yarıiletkenlerinden p-n eklem hazırlanırken özellikle CdTe ve ZnTe absorblayıcı malzemesi olarak tercih edilirken pencere malzemesi olarak n-tipi yüksek iletkenliğe sahip CdS ve ZnO tercih edilmektedir (Bube, 1998). CdTe yarıiletkeni güneş spektrumuna uygun yasak enerji aralığı, direkt geçişli band yapısı, yüksek absorpsiyon katsayısı ve düşük maliyetli ince film olarak üretiminin kolay olması nedeni ile güneş pili absorblayıcı malzemesi olarak tercih edilmektedir. CdS yarıiletkeni n-tipi düşük dirençli, geniş yasak enerji aralıklı, yüksek optik geçirgenliği, uygunsuzluk parametresinin düşük oluşu ve yüzey pasivizasyonunu sağlaması nedenleriyle CdS/CdTe heteroekleminde pencere malzemesi olarak kullanılmaktadır (Zanio, 1978).

CdS/CdTe güneş pili 4 tabakadan oluşmaktadır. Optik geçirgen oksit iletken tabaka (TCO) ön kontak olarak kullanılmaktadır. Yüksek optik geçirgenliğe, düşük dirence ve sıcaklığa karşı kararlılığa sahip olması tercih edilir. TCO tabaka olarak SnO_2 , In_2O_3 (ITO), Cd_2SnO_4 (CTO), ZnO (ZTO) kullanılmaktadır. Pencere malzemesi olarak CdS, optik soğurucu malzeme olarak CdTe ve son olarak CdTe üstüne arka omik kontak yapılmaktadır (Romeo vd., 2004).

CdS/CdTe güneş pillerinde verimliliği etkileyen birçok faktör vardır, bunlardan biride yüksek iş fonksiyonuna sahip p-tipi CdTe iyi omik kontak elde edilememesidir. p-CdTe üzerine omik

kontakt yapabilmek için iş fonksiyonu 5,7 eV'den büyük bir metale ihtiyaç vardır fakat böyle metaller mevcut olmadığı için arka kontakta Schottky bariyeri oluşmaktadır. Schottky bariyerini kaldırmak amacıyla p-CdTe yüzeyi katkılama veya kimyasal aşındırma yöntemleri ile düşük dirençli yüksek p-tipi iletkenliğe sahip tabaka oluşturulduktan sonra omik kontak yapılmaktadır. p-tip CdTe yarıiletkenine Ni, Au, Cu, Ag, Mo, C, Cr, Sb, Li ve Pt gibi metaller omik kontak olarak kullanılmıştır.

Gu vd. (1975), Jager ve Seipp (1981) CdTe yüzeyini $K_2Cr_2O_7:H_2SO_4$ kimyasal çözelti ile aşındırdıktan sonra Au veya Au-Ni kullanarak düşük dirençli kontak elde etmişlerdir. p tipi CdTe yüzeyini $K_2Cr_2O_7:H_2SO_4$ aşındırma ile benzer sonuçlar CuAu alaşımı kullanarak Anthony vd. (1982) tarafından belirlenmiştir. İş fonksiyonu CdTe'den daha büyük olan p tipi HgTe, Chu vd. (1998) tarafından kontak malzemesi olarak kullanılmıştır. Mondal vd. (1991, 1992) ve Tang vd. (1996) ZnTe:Cu film kaplanarak CdTe filmle de kontak olarak kullanmışlardır (Bube, 1998).

Au, Cu veya Hg gibi metallerin kaplanıp ısıl işlem uygulanmasıyla CdTe'de p+ arayüzey tabakası, sırasıyla Au_2Te , Cu_2Te veya HgCdTe oluşturularak omik kontak olarak uygulanmıştır. Bernner tarafından kaplama tekniği geliştirilen Ni-P alaşımın p tipi CdTe'ye kaplanıp ısıl işlem uygulanmasıyla omik kontak oluşturulmuştur. P'nin CdTe'ye difüzyonu ile düşük dirençli kontak elde etmişlerdir (Miles vd., 1996).

CdTe'de difüzyonu hızlı olduğu bilinmekte olan Cu içeren materyaller birçok çalışmada CdTe'ye arka kontak olarak yapılmaktadır. Cu difüzyonu CdTe yüzeyinde p-katkısı sağlayarak omik kontağı iyileştirerek CdS/CdTe güneş pillerinde verimliliği arttırmasına rağmen uzun vadede CdTe'den ekleme doğru difüzyonundan dolayı pilin verimliliğini azaltmakta ve kararlılığında önemli etken olmaktadır. (Dobson vd., 2000; Bartzner vd., 2001; Romeo vd., 2000-2004). Cu içermeyen kontak çalışmaları arasında Sb ve Sb_2Te_3 öne çıkmaktadır (Romeo vd., 2000). Sb_2Te_3 p-tipi iletkenliğe ve düşük dirence sahip olduğundan CdTe'ye omik kontak olarak kullanılmaktadır ayrıca CdTe içine difüzyonu olmamasından dolayı pillerde yüksek kararlılık sağlamaktadır. CdTe yüzeyine herhangi bir aşındırma işlemi uygulanmadan direkt olarak kaplanan Sb_2Te_3 omik kontak ile yüksek verimli ve kararlı pil elde etmişlerdir. (Romeo vd., 2004).

CdS/CdTe ince film güneş pillerinde Bonnet ve Rabenhorst (1972), Tyan ve Perez-Albuerne (1982) ve Ferekides vd. (1993) sırasıyla % 6, %10 ve % 15,8 verim elde ettiklerini yayınlarında rapor etmişlerdir (Romeo vd., 2004). CdS/CdTe ince film güneş pillerinde

%16,5 ile en yüksek verim X. Wu'nun liderliğindeki grup tarafından bildirilmiştir. Borosilicate cam üzerine $\approx 0,3 \mu\text{m}$ kalınlığında Cd_2SnO_4 (CTO), $\approx 0,2 \mu\text{m}$ kalınlığında ZnSnO_4 (ZTO) kaplandıktan sonra kimyasal banyo yöntemiyle (CBD) $\approx 0,1 \mu\text{m}$ kalınlığında CdS film, yakın mesafeli süblimasyon (CSS) yöntemiyle CdTe film kaplanmış ve CdTe yüzeyine $430 \text{ }^\circ\text{C}$ de 15 dakika CdCl_2 buharı uygulandıktan sonra CuTe:HgTe katkılanıp Ag arka kontak yapılarak CTO/ZTO/CdS/CdTe güneş pili hazırlanmıştır. CTO/ZTO/CdS/CdTe güneş pilinde % 16,5 ($V_{oc}=845 \text{ mV}$, $J_{sc}=25,88 \text{ mA/cm}^2$, $FF=\% 75,51$ ve alan= $1,032 \text{ cm}^2$) verim ile CdTe güneş pillerindeki en yüksek verim rapor edilmiştir (Wu, 2001).

n tipi iletkenliğe sahip CdS yarıiletkenlere omik kontak olarak Ag, Al, Au, Au-In, Ga, In ve Ga-In metalleri kullanılmaktadır bu metal ve alaşımlar arasında özellikle In ve Ga-In ön plana çıkmaktadır. n tipi CdTe yarıiletkenine ise In ve Ga-In kontak omik karakter göstermektedir.

Au metali ile n tipi iletkenliğe sahip CdTe, CdS ve ZnSe yarıiletkenleri temasta olduğunda schottky diyot elde edilmektedir. Au/n-CdS schottky diyotu ile ilgili birçok çalışma vardır. Mathew (2003), yaptığı çalışmada n-CdTe yarıiletkenine Au metalini kaplayarak elde edilen schottky diyotun fotovoltaik parametrelerini, aydınlıkta açık devre gerilimin $V_{oc}=0,37 \text{ V}$ ve kısa devre akımının $I_{sc}=5,6 \cdot 10^{-5} \text{ A}$ olduğunu doluluk oranını $FF=0,5$ olarak ölçmüştür.

Bridgeman yöntemiyle büyütülmüş In katkılı CdTe tek kristali üzerine ZnTe tek kristalden buhar faz epitaksiyel yöntemiyle ZnTe kaplanarak CdTe/ZnTe elde etmişlerdir. CdTe/ZnTe eklemin akım-gerilim karakteristiklerinden, oluşma, rekombinasyon ve difüzyon akımları eklemin ara yüzey tarafından kontrol edildiği gösterilmiştir. Geçiş bölgesinin uzunluğunun CdTe tarafında $0,004 \mu\text{m}$ ve ZnTe tarafında $4,81 \mu\text{m}$ olmaktadır. Band diyagramlarından valans bandındaki deşiklerin (hole) hareketi için düşük bariyer ($0,02 \text{ eV}$) olmasına karşın iletkenlik bandındaki elektronların hareketi için yüksek bariyer ($0,77 \text{ eV}$) olması elektronların geçişini engellemektedir (Khan, 1994).

Magnetron sıçratma yöntemiyle ZnTe filmleri CdTe yüzeyine kaplanmış ve CdTe/ZnTe arayüzey enerji band diyagramları XPS yöntemiyle belirlenmiştir. CdTe/ZnTe arasında iletkenlik band kesintisi ($0,91 \text{ eV}$) ve valans band kesintisi ($0,1 \text{ eV}$) sonucunda valans bandındaki deşikler (hole) için bariyer olmamasına karşın iletkenlik bandındaki elektronlar için yüksek bariyer olması CdTe güneş pilleri için bir avantajdır (Spath vd, 2005).

CdTe yüzey pasivizasyonunu engellemek amacıyla CdTe tek kristal yüzeyine elektron bombardımanı yöntemiyle ZnTe kaplanarak ZnTe/CdTe yapısı oluşturulmuştur. ZnTe/CdTe yapısı $600 \text{ }^\circ\text{C}$ de 120 dak. ısıl işlem uygulanması sonucu tek kristal CdTe yüzeyinde

$Cd_{0,75}Zn_{0,25}Te$ film oluştuğunu AES yöntemiyle belirlemişlerdir (Kim vd., 2000).

$CdTe$ ve ZnO tozu karıştırılarak oluşturulan kompozit, kuartz tüp içerisine yüksek vakumda yerleştirilerek uygulanan ısı işlem ($950, 1100\text{ }^{\circ}C$) sonucu $CdTe/ZnO$ arasında $CdZnTe$ oluştuğunu belirlemişler ve fotovoltaik uygulamalar için iyi bir materyal olabileceğini ileri sürmüşlerdir. (Brune ve Wagner, 2003).

Vakumda buharlaştırma yöntemi ile corning cam üzerine $1\text{ }\mu m$ kalınlığında $Cd_{0,8}Zn_{0,2}Te$ film kaplanmıştır. XPS analizlerinden filmin yüzeyinin oksitlendiği, özellikle oksit ve Te sinyallerinin olduğu gözlenmiştir. Filmin yüzeyi 10 nm kadar kaldırıldıktan sonra $0,8$ 'lik oran gözlenmiştir. Optik geçirgenlik ve soğurma katsayısından filmin direkt geçişli ve yasak band genişliğini ise $1,6\text{ eV}$ olduğu belirlenmiştir. Raman saçılması deneyleri filmin yüzeyi kümeleşmiş Te olduğunu göstermiştir (Prabakar vd., 2003).

Termal buharlaştırma yöntemiyle Cd zengin $CdTe$ film $1,5\text{ }\mu m$ kalınlığında altlık üzerine ve $CdTe$ film yüzeyine de aynı yöntemle $0,1\text{ }\mu m$ kalınlığında ince Zn tabakası kaplanılmıştır. $Zn/CdTe$, çeşitli sıcaklık ve sürelerde tavlandıktan sonra spektral duyarlılık ölçümlerini oda sıcaklığında alınmıştır. Tavlama sıcaklığı $100\text{ }^{\circ}C$ 'den büyük sıcaklıklarda tavlendiğinde atmosferik oksijenin örneğin özelliklerinde önemli rol oynadığı belirlenmiştir. $CdTe$ yüzeyinde Zn'nin oksidasyonu ve $CdTe$ içine difüz eden oksijenden dolayı $2,5\text{ eV}$ yasak band genişliğine ve yapısal değişikliğe sebep olmaktadır. Tavlama sıcaklığı $100\text{ }^{\circ}C$ 'den ve tavlama süresi 30 dak. küçük olan tavlama sıcaklığı ve sürelerinde $1,74$ den $2,05\text{ eV}$ yasak band genişlikli $CdZnTe$ oluştuğu belirlenmiştir. $CdZnTe/CdTe$ heteroeklemi, $100\text{ }^{\circ}C$ ve 30 dak. tavlama koşulları altında oluşturulmuş ve fotovoltaik parametreleri ölçümlerinden verimin $\% 4,4$ olduğu belirlenmiştir (Bakr, 2002).

$HgCdTe$ 'nin epitaksiyel büyütme için altlık $CdZnTe$ alaşımın x kompozisyonunu belirlemek için tahribatsız optik tekniklerinin karşılaştırılması rapor edilmiştir. Yüksek çözünürlüklü difraktometre, fotoyansıtma ve fotoluminesans ölçümleriyle örgü parametreleri belirlenen bu yöntemler karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak yeni fotoluminesans uyarma tekniği ile tabakanın tamamının kompozisyon değişimi belirlenmiştir (Tobin, 1995)

$CdZnS/CdS$ 'nin $1,4\text{ K}$ de fotoluminesans ölçümlerinden mavi-morötesi spektral bölgede temel uyarım emisyonunun keskin şiddetli olduğu gösterilmiştir. $CdZnS$ kalınlığı azaldıkça fotoluminesans piklerinin yüksek enerji bölgesine kaydığı belirlenmiştir. Tüm Cd kompozisyon aralığında, band süreksizliği tahmin edilmektedir (Yokogawa vd., 1994).

ZnS'nin % 0 dan 100 mole değişen oranıyla ZnS ve CdS toz karışımından değişken x kompozisyon parametrelili $Zn_xCd_{1-x}S$ kaynak materyali hazırlanmıştır. Direnci düşürmek için In katkılı $Zn_xCd_{1-x}S$ tozu % 6 mol $In_2(SO_4)_3$ karıştırılarak 600 °C de 30 dak. sinterlenerek tablet haline getirmişlerdir. Hazırlanan tablet belli sıcaklıktaki altlık üzerine elektron bombardımanı yöntemiyle $Zn_xCd_{1-x}S$ film olarak kaplanmıştır. Optik soğurma spektrumlarından $Zn_xCd_{1-x}S$ filmlerin yasak band genişliğinin CdS den ZnS'e kadar x kompozisyonuna bağlı olarak değiştiiği belirlenmiştir. Van der Pauw yöntemiyle $Zn_xCd_{1-x}S$ filmlerin direnci, $x=0$ için $10^{-2} \Omega cm$ ve $x=0,4$ için $10^2 \Omega cm$ olan dirençleri x kompozisyonuna bağlı olarak değiştiiği belirlenmiştir (Kuroyanagi, 1994).

$Zn_xCd_{1-x}S$ ince filmleri, birinde CdS tozu ve diğerinde ZnS tozu bulunan eő eksenli iki potalı kaynak kullanılarak buharlaştırma yöntemiyle hazırlanmıştır. Zn konsantrasyonu EDS yöntemiyle belirlendi ve $x=0,38$ için $Zn_{0,38}Cd_{0,62}S$ ince filmin yasak band genişliği 2,88 eV olarak verilmiştir. Yansıtma katsayısı ve filmin kalınlığı geçirgenlik spektrumun girişim bölgesinin geçirgenlik verileri kullanılarak hesaplanmıştır (Torres vd., 1996).

CdZnS/CdS/CdTe güneş pilli yapılarında pencere ve soğurucu tabakalar sırasıyla CBD ve CSS yöntemleri kullanılarak oluşturulmuştur. $Cd_{1-x}Zn_xS$ tabakası, CBD yöntemiyle ZnS/CdS çoklu tabakalar halinde kaplanarak oluşturulmuştur. CdZnS/CdS/CdTe güneş pilinin spektral duyarlılığı ve kısa dalgaboyu bölgesi CdS/CdTe güneş pilinden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. CdZnS tabakası içeren CdTe güneş pilinde % 10 verim elde etmişlerdir (Oladeji vd., 2000).

$Cd_{1-x}Zn_xS$ ve CdTe filmleri sırasıyla CBD ve CSS yöntemleriyle kaplanarak hazırlanan CTO/ZTO/ $Cd_{1-x}Zn_xS$ /CdTe güneş pilinin, CdTe yüzeyine $CdCl_2$ uygulandıktan sonra HgTe:CuTe katkılanıp arka kontak alınarak fotovoltatik parametreleri incelenmiştir. $Cd_{1-x}Zn_xS$ filmin, Zn konsantrasyonu XPS yöntemiyle % 7-8 olarak ve x konsantrasyon parametresi 0,08 için 2,49 eV yasak band genişliği belirlenmiştir. $Cd_{0,92}Zn_{0,08}S$ pencere malzemeli CdTe güneş pilinde % 15,7 verim elde etmişlerdir. $Cd_{1-x}Zn_xS$ tabakasında düşük Zn konrantrasyonunun ve $Cd_{1-x}Zn_xS$ ile CdTe katmanları arasındaki difüzyonun neticesinde yüksek V_{oc} ve FF sebep olduğunu ileri sürmüşlerdir (Zhou vd., 2004).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 CdTe ve CdS Filmlerin Büyütme Yöntemleri

Mikroelektronik ve optoelektronik endüstrinin temelini oluşturan ince filmler teknolojide önemli bir yer tutmaktadır. Güneş pillerinde kullanılan malzemenin azaltılması dolayısıyla maliyetlerinin düşürülmesi ve malzemenin geniş yüzeyler üzerine kaplanabilmesi yarıiletkenleri ince film şeklinde kaplama yöntemleri ön plana çıkmıştır. İnce filmler, farklı üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, bir taban üzerine kalınlıkları nanometreden birkaç mikrometreye kadar değişen ince bir tabaka halinde oluşturulmaktadır. İnce filmlerin oluşması için kullanılan metotlar oluşum işleminin doğasına bağlı olarak iki guruba ayrılabilir, bunlar fiziksel ve kimyasal metotlardır.

CdTe kimyasal taşıma yöntemiyle ince film olarak elde edilebilmektedir. Halojenler, kimyasal reaksiyon ile CdTe'nin oluşturulmasında ve taşınmasında kullanılmaktadır. Cd:Te:H:Cl açık tüp sistemiyle (Weinstein vd., 1965) ve Cd:Te:In (Alferov vd., 1964), Cd:Te:N:H:Cl (Paorici vd., 1972, 1973) kapalı tüp sistemiyle CdTe'nin büyütülmesi başarılmıştır (Zanio, 1978). Cd:Te:I'dan oluşan gaz formunda kapalı tüp içerisinde reaksiyona girerek CdTe filmi elde edilmektedir. CdI₂ ve Te₂ yüksek sıcaklıkta gaz halinde tüp içerisinde reaksiyona girerek, CdTe şeklinde altlık üzerine çöker. I₂ ise tamamıyla daha sıcak bölgeye hareket eder. Bu yöntemle CdTe film GaAs altlık üzerine kaplanırken kaynak sıcaklığı 850 °C'dir. Film olarak kaplama yaklaşık saatte 4µm'dir (Zanio, 1978).

Elektrokaplama yöntemi ise Cd ve Te iyonu taşıyan elektrolitten akım geçirilerek, CdTe bileşiğinin katotta büyümesi sağlanır. CdTe elektrokaplama genel olarak asidik ortamda yapılır (1.4-2 pH). Sülfürik asit içerisine Cd konsantrasyonu 1M ve Te konsantrasyonu TeO₂ 10⁻³ M olan çözelti hazırlanır. Elektrolitin sıcaklığı 70 °C'de sabitlenerek elektrolitten akım geçmesi sağlanır. Bunun içinde potansiyeli 1,1 ile 0,7 Volt arasında bir gerilim uygulanır ve CdTe film şeklinde altlık üzerine çökmesi sağlanır. Filmin kalınlığı Faraday Yasaları ile ayarlanır (Lepiller vd., 2000).

Vakum ortamında (10⁻⁴–10⁻⁹ Torr) büyütülen ince filmlerin kalitesi altlığın özelliklerine, altlığın sıcaklığına, kaplama oranına, kaynağın kompozisyonuna, vakumun kalitesine ve buharlaştırma tekniğine bağlı olmaktadır. Bileşiğin direkt olarak büyütülmesi elementlerin buharlaştırılmasıyla CdTe'nin hazırlanmasında daha popüler bir metottur (Kennety Zanio, 1978). CdTe bileşiğinin vakumda erimesi ve sonrada buharlaştırılması sağlanmaktadır.

Buharlaşan CdTe molekülleri altlık üzerine yönelmekte ve altlık üzerine çökerek CdTe'nin film olarak büyütülmesi gerçekleşmektedir. Elementlerin buharlaştırılması yönteminde ayrı kaynaklardaki Cd ve Te elementlerin aynı anda buharlaştırılmasıyla CdTe filmler büyütülmektedir (Justi vd., 1973).

Termal buharlaştırma yöntemiyle CdS filmler, içinde yüksek saflıkta CdS tozu ve kaplı tantalum tabakası içeren kuartz tüpün rezistanslı ısıtıcıyla ısıtılmasıyla CdS tozunun buharlaştırılmasıyla kaplanmaktadır. CdS buharlaştırma sürecinde saçılmaları engellemek amacıyla kuartz tüpün dirseği kuartz fiber yün tıpaç ile kapatılmaktadır. Buharlaştırma vakum ortamında $1,3-2 \cdot 10^{-3}$ Pa gerçekleştirilmektedir. CdS filmlerin kalınlığı ve kaplama oranı kuartz kalınlık ölçme sistemiyle kontrol edilmektedir (Ashour vd., 1995).

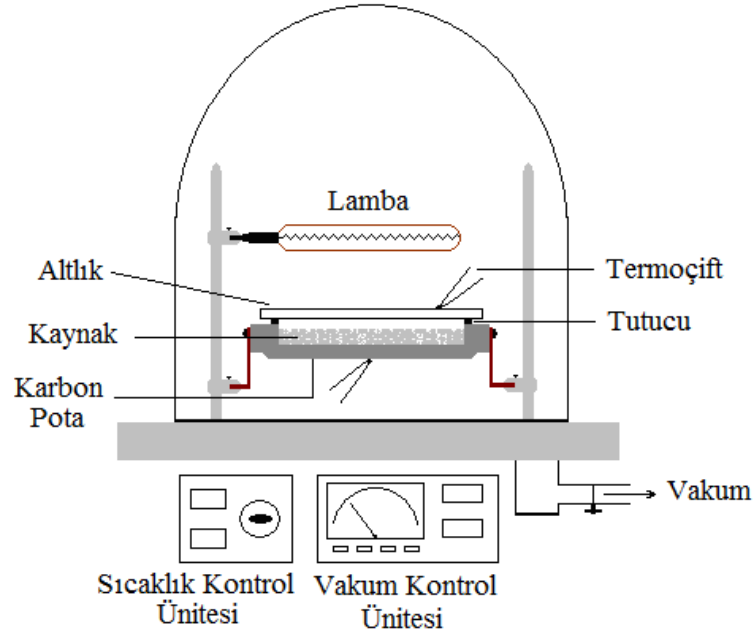
Düşük basınçlı metalorganik kimyasal buhar kaplama yönteminde gaz kontrol sistemi ve reaksiyon tüpü içeren deney sistemi kullanılmaktadır. Kaynak maddeleri dimetil kadmiyum (DMCd) ve dietil sülfat (DES) oda sıcaklığında her ikisi de sıvı haldedirler ve uygun buhar konsantrasyonu elde etmek için $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sıvı halde bulunan nitrojen aracılığıyla kaynak maddelerinden geçirilmesiyle reaktör içine sokulmaktadır. Reaktant gazları kütle akış kontrol sistemiyle kontrol edilmektedir. Reaktör basıncı kaplama esnasında 560 Torr da tutulmaktadır. Reaksiyon karışımının bileşimi nitrojenin akış oranıyla belirlenmektedir. CdS filmler, sıcaklıkları $250-400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki altlıklara 30-90 dak. süreyle kaplanmaktadır (Uda vd., 2003).

CdS filmlerin, kimyasal banyo kaplama (CBD) tekniğinde Cd ve S iyonları içeren bileşiklerin asidik ortamda kimyasal reaksiyona girerek oluşmuş CdS moleküllerin, bu çözelti içerisine daldırılan altlık üzerine çökmesiyle kaplanmaktadır. Kaplanan filmlerin fiziksel özellikleri çözeltinin pH'ına ve sıcaklığına, kimyasal reaksiyon için Cd ve S iyonları sağlayan maddelerin çözelti içerisindeki konsantrasyonuna ve altlığın çeşidine bağlı olmaktadır. CdS filmin kimyasal banyo yöntemiyle kaplanmasında KOH, CdCl₂, NH₄NH₃ ve CS(NH₂)₂ reaktif maddeler içeren asidik çözelti hazırlanmaktadır ve bu çözeltinin pH'ı yaklaşık 10'dur. Kaplama sırasında çözeltinin sıcaklığı $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de tutulmaktadır (Ramirez-Bon vd., 1997).

3.1.1 Yakın Mesafeli Süblimasyon (CSS)

Bu yöntemle sıcaklık farklılıkları çok az olan kaynak ve filmin büyütüldüğü yüzey birbirine çok yakın tutularak malzemenin süblimasyon yoluyla büyümesi sağlanır (Okamoto vd., 2001). Kaplanması istenen bileşiğin tozu (CdTe veya CdS) erime sıcaklığı ($3500 \text{ }^{\circ}\text{C}$) çok

yüksek olan ve malzemelerle etkileşmeye girmeyen karbon pota içerisine yerleştirildi. Her bileşik için ayrı bir pota hazırlandı. Kaynakla ile altlık mesafesi 2-3 mm olacak şekilde altlık pota üstüne koyuldu. Kaplama, vakum setinde (Leybold-Heraeus) düşük vakum ortamında (10^{-1} Torr) gerçekleştirildi. Vakum ortamındaki sistemde, karbon potaya ve altlık ısıtıcısı olarak kullanılan lambaya ayrı kontrollü gerilim uygulanarak istenilen değerlere kadar ısıtıldılar. Isıtılan pota içerisindeki malzeme yeterli sıcaklıkta buharlaştırılarak altlık üzerine çökmesiyle ince film olarak elde edildi. Film kalınlığı buharlaştırma süresiyle ayarlandı. Çalışmalarda altlık malzemesi olarak 1mm kalınlıklı $1 \times 2-4$ cm² alanlı optik cam ve cam üzerine kaplı hazır SnO₂ iletken tabaka kullanılmıştır. Filmlerin kaplanacakları altlıkların temizliği buharlaştırma için önemli olduğundan altlık malzemeleri metonol içerisinde bekletildikten sonra saf su ile yıkandı ve 70 °C'de etüvde kurutulduktan sonra potaya yerleştirildi.



Şekil 3.1 CdTe ve CdS filmlerinin CSS yöntemiyle elde edildiği vakum setinin şematik gösterimi.

3.1.2 CdS Filmlerin Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle Hazırlanması

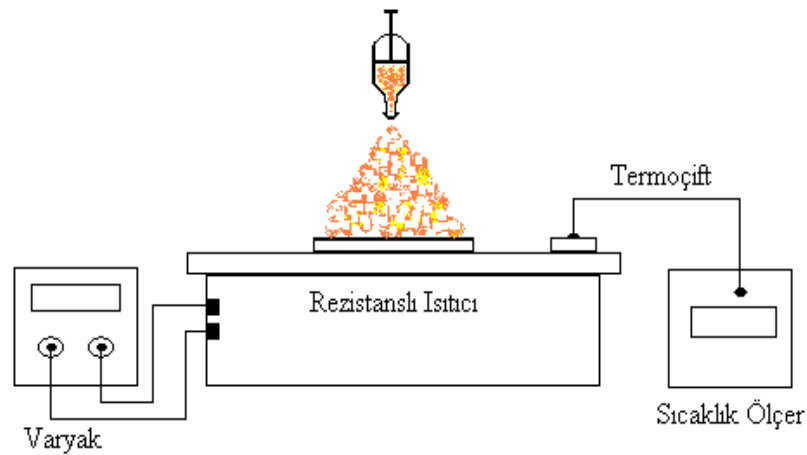
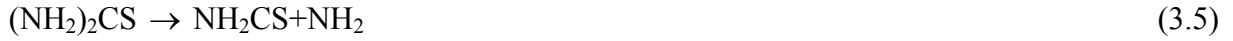
Bu çalışmada CdS filmler yakın mesafeli süblimasyon yöntemi dışında kimyasal püskürtme yöntemiyle hazırlandı. Kimyasal püskürtme yöntemiyle, yakın mesafeli süblimasyon yöntemine oranla daha fazla aynı şartlarda hazırlanmış filmler elde edilebilmektedir. Kimyasal püskürtme yöntemini, çözelti içerisindeki Cd ve S dışındaki diğer bileşenlerin

yüksek sıcaklıktaki altıktaki buharlaşıp CdS'nin altlık üzerine çökmesi esasına dayanmaktadır. Kimyasal çözelti, saf su içerisinde CdCl₂ (Cd kaynağı) ve (NH₂)₂CS (S kaynağı) konularak çözelti molaritesi 0,05 olacak şekilde hazırlandı. Bu çözelti içerisindeki bileşenlerin tamamen çözünmesi için 50-55 °C'de ısıtıldı ve aynı zamanda karıştırıldı. Çözelti içerisindeki çözünmemiş katı parçacıkların çökmesi için bir gün süreyle oda sıcaklığında bekletildi. Çözelti havalı püskürtme kabına boşaltıldı. Isıtıcı üzerine yerleştirilmiş altlıklar 400 °C'ye kadar ısıtıldı ve bu altlıklar üzerine 30-40 cm uzaklıktan havalı püskürtme cihazı ile çözelti püskürtülerek Cd ve S dışındaki diğer bileşenlerin buharlaşmasıyla CdS filmler kaplandı.

CdCl₂'den Cd'nin ayrılması aşağıdaki reaksiyon zinciriyle olmaktadır.



(NH₂)₂CS'den S elde edilmesini sağlayan reaksiyon zinciri ise şöyledir;



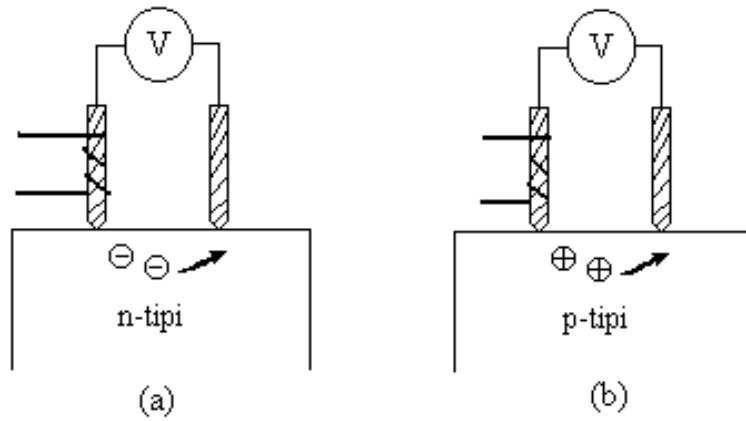
Şekil 3.2 Kimyasal püskürtme yöntemiyle film kaplama düzeneğinin şematik gösterimi.

Bu yöntemle 0,4 – 3 µm kalınlıklı CdS filmleri cam üzerinde elde edildi.

3.2 Filmlerinin Elektriksel Karakteristiklerinin Ölçümü

3.2.1 Filmlerinin İletkenlik Tipi Ölçümleri

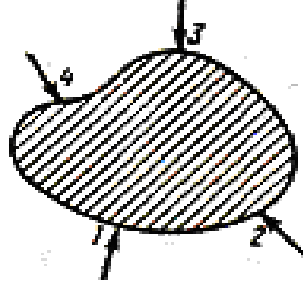
Filmlerinin iletkenlik tipi ölçümlerinde termal elektro-motor kuvvet (TEMK) yöntemi kullanıldı. Yarıiletken homojen olmayacak şekilde ısıtıldığında çoğunluk yük taşıyıcıları (n-tipinde elektronlar, p-tipinde pozitif yüklü delikler) daha sıcak bölgede artacaktır. Bu konsantrasyon gradyentinin oluşmasından dolayı çoğunluk yük taşıyıcıları sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hareketlenecektir. Çoğunluk yük taşıyıcıların difüzyonu neticesinde sıcak bölgede ters yüklü (n-tipinde pozitif yüklü donör iyonları, p-tipinde negatif yüklü akseptör iyonları) hacimsel yük meydana getirecekler, böylece sıcak uç ve soğuk uç bölgeleri arasında termal elektro-motor kuvvet (TEMK) oluşacaktır. Şekil 3.3 termal elektro-motor kuvveti yöntemiyle yarıiletkenin yük taşıyıcılarının tipini bulmak için kullanılan devreler gösterilmektedir. Bu yöntemde iki prop kullanılır. Probun biri yaklaşık (T_1) 200–300 °C kadar ısıtılır, ikinci probun sıcaklığı (T_2) oda sıcaklığında tutulmaktadır. Bu iki prop arasında oluşan termal elektro-motor kuvvet, voltmetre (Thurlby 1503 digital multimeter) ile işareti belirlenmektedir. Deneysel ölçümlerde, yarıiletkenin iletkenlik tipini bulmak için öncelikle belirli tipe sahip yarıiletken termal elektro-motor kuvvet ölçümüyle devredeki voltmetrenin kalibrasyonu yapılır ve sonra incelenen örneğin tipi belirlenmektedir.



Şekil 3.3 Termal EMK yöntemiyle, (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik tiplerinin ölçüm devresi (Caferov, 1998).

3.2.2 Filmlerin Özdirenç Ölçümleri

Filmlerin özdirençleri Van der Pauw metodu kullanılarak ölçüldü. Van der Pauw metodu, serbest formlu düzlemsel plaka şeklindeki örneklerin özdirenç ölçümlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ölçümler için, örnek kenarının dört noktasına omik kontaklar yapıldı (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Van der Pauw yöntemi ile özdirenç ölçümlerinde örnekte kontakların yerleşimi (Caferov, 1998).

Örneğin 1 ve 4 kontaklarından akım (I_{14}) geçirilirken 2 ve 3 kontakları arasındaki potansiyel farkı (V_{23}) ölçülerek Ohm yasasından R_1 direnci hesaplandı ve daha sonra 1 ve 2 kontaklarından akım (I_{12}) geçirilerek 3 ve 4 kontakları arasındaki potansiyel farkı (V_{34}) ölçülerek R_2 direnci hesaplandı. Van der Pauw yöntemiyle örneklerin özdirenci, örneğin R_1 , R_2 direnç değerleri kullanılarak (3.8) bağıntısından hesaplandı.

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (3.8)$$

Burada d örneğin kalınlığı, $f(R_1/R_2)$ düzelme fonksiyonudur (Şekil 3.5).



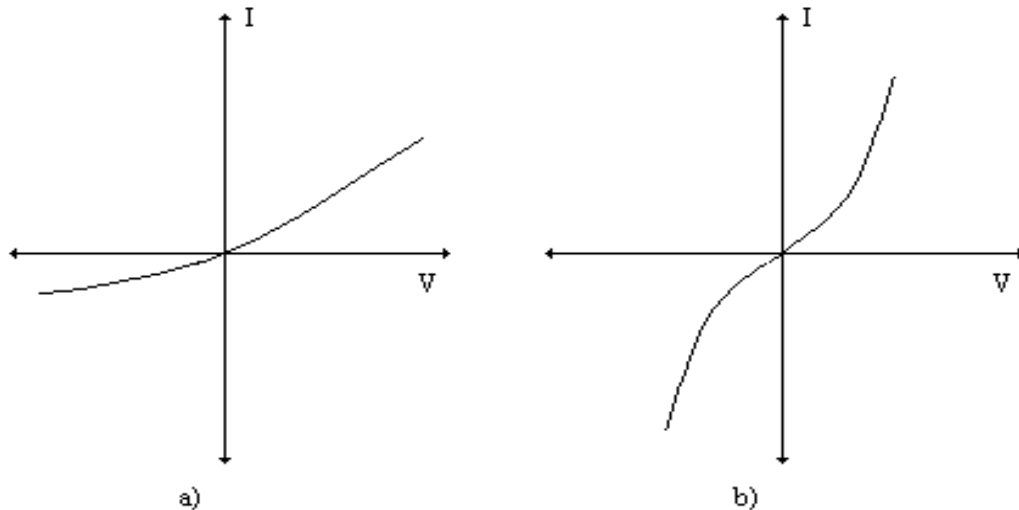
Şekil 3.5 $f(R_1/R_2)$ düzelme fonksiyonu grafiği (Caferov, 1998).

Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle büyütülen CdTe filmlerin yüksek öz dirence (10^6 - $10^7 \Omega\text{cm}$) sahip olduğu tespit edildi. Katkılanmamış CdS filmlerin öz direnci 10^2 - $10^4 \Omega\text{cm}$ aralığında değişmektedir.

3.2.3 Filmlere Omik Kontaktların Yapılması

Metal ve yarıiletken temasa getirildiğinde yarıiletkenin yüzey bölgesinin direnci iç bölgelere nazaran küçük olması durumunda, yarıiletkenin yüzey bölgesinde anti-engel tabaka oluşur. Metalin çıkış işi n-tipi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden küçük olduğu durumda ($\phi_m < \phi_s$) elektronların metalden yarıiletkene daha kolay geçişleri neticesinde yarıiletkenin yüzey bölgesinde elektron konsantrasyonu daha büyük yani direnci iç bölgelere nazaran daha küçük olur. Metalin çıkış işi p-tipi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden büyük olduğu durumda ($\phi_m > \phi_s$), elektronların p-tipi yarıiletkeninden metale daha kolay geçişleri neticesinde yarıiletkenin yüzey bölgesinde pozitif yüklerin konsantrasyonu artmakta yani direnci iç bölgelere nazaran daha küçük olmaktadır. Bu tür metal/p-tipi yarıiletken yapılar, doğrultucu olmayan (omik) kontak özelliği göstermektedir.

Yarıiletken devre elemanlarını elektronik devreye bağlamak ya da onların karakteristiklerini ölçebilmek için bu devre elemanlarına akım-gerilim karakteristiği lineer olan omik kontaklar yapılır. Bir omik kontakın direnci; akım yönüne bağlı olmamalıdır, akımla orantılı olarak değişmemelidir, yarıiletkenin direncinden çok küçük olmalıdır.



Şekil 3.6 Yaklaşık omik kontaktların akım-gerilim karakteristikleri, (a) Küçük doğrultmaya sahip omik kontak (b) Direnci gerilime bağlı olan omik kontak (Caferov, 1998).

Deneysel çalışmalarda tam lineer akım-gerilim karakteristikli metal-yarıiletken kontak yapmak zordur. Kontakın akım-gerilim karakteristiği lineer olmadığı durumda kontakın doğrultma derecesi akımın doğru ve ters yönlerdeki değerlerinin oranı ile belirlenmektedir ve bu akımların oranı kontakın doğrultma katsayısı olarak tanımlanır. İdeal omik kontakın doğrultma katsayısı 1'dir (Caferov, 1998).

Yüksek özdirence ve iş fonksiyonuna sahip olan p-tipi CdTe filmlerde omik kontak alabilmek amacıyla p-CdTe filmlerin yüzeyi HNO₃+H₃PO₄ (NP) asit ile kimyasal aşındırma yapılarak p⁺ yüzeyi oluşturulmuştur. p-CdTe filmlerin elektriksel ölçümleri için kimyasal aşındırma yapıldıktan sonra omik kontak olarak GaIn alaşımı kullanılmıştır.

Düşük özdirence sahip n-tipi CdS filmlere omik kontak olarak GaIn alaşımı kullanılmıştır.

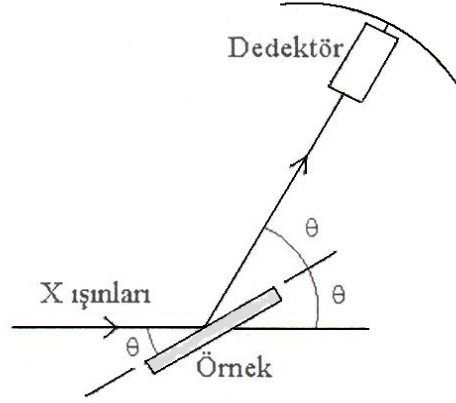
3.3 Filmlerin XRD Yöntemiyle Analizi

X-Işınları 1895 yılında Roentgen tarafından keşfedilmiştir. Elektrik alanında hızlanmış elektronların cismin atomları ile çarpışması sonucunda atomun iç kabuğunda elektron dışarı atılır, yerine daha üst kabukta bulunan elektron geçer ve böylece x-ışınları oluşur. X-ışınlarının dalgaboyu kristallerdeki iki komşu atom arasındaki uzaklıkla kıyaslanabilir olduğundan kristal örgüleri üç boyutlu bir kırınım ağı gibi davranarak kristalde x-ışınları kırınım olayı gerçekleşir. X-ışınları kırınımı bilinmeyen materyalleri belirlemede, kristallerin yapısını, örgü parametrelerini ve yönelmesini belirlemede kullanılan önemli deneysel bir tekniktir. X-ışınları kırınımının temeli Bragg Yasası ile verilmektedir. Bragg Yasasına göre, örgünün atomik tabakalarından yansıyan ışınlar arasında yapıcı girişim şartı

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (3.9)$$

ile verilir. Burada λ kristal örgüsüne düşen x-ışınlarının dalga boyu, θ örgüye düşen x-ışınları ile örgünün yüzeyi arasındaki açı, d kristaldeki düzeyler arası uzaklık ve n yansıma derecesidir.

Difraktometre ile kristalden yansıyan ışınların şiddeti açıya bağlı olarak taranarak kristalin x-ışınları kırınım deseni belirlenir.



Şekil 3.7 Difraktometrenin diyagramı (Caferov, 1998).

CdTe, CdS filmleri ve Zn/CdTe, Zn/CdS yapılarının tavlamadan sonra oluşan CdZnTe, CdZnS üçlü bileşiklerin XRD ölçümleri Cu K_{α} x-ışınları kullanılarak Philips Panalitical Diffractometer ile yapıldı. Kristal düzlemleri arasındaki mesafe (d) Bragg Yasasına göre XRD ölçüm cihazı tarafından hesaplanmıştır. Örneklerin ölçüm sonucu ile elde edilen XRD desenindeki pikler Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) verilen referans pikleri ile karşılaştırılarak örneklerin kristal yapısı ve Miller indisleri (hkl) belirlendi.

CdTe ve CdZnTe filmlerin kübik yapıya sahip olduğu belirlendi ve örgü parametreleri $\pm 0,003 \text{ \AA}$ hata ile

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (3.10)$$

eşitliğiyle hesaplandı.

CdS ve CdZnS filmlerin hegzagonal yapıya sahip olduğu belirlendi ve örgü parametreleri

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.11)$$

eşitliğiyle hesaplandı.

Filmlerin ortalama tanecik boyutu Debye-Scherrer formülü ile belirlendi.

$$d_{tb} = K\lambda / D \cos\theta \quad (3.12)$$

Burada λ Cu K_{α} X-ışınlarının dalga boyu ($\lambda=1,5405 \text{ \AA}$), D maksimum şiddetin yarı genişliğinin açısal değeridir, θ Bragg açısıdır ve K boyutsuz sabittir.

3.4 Filmlerin Optik Soğurma Spektrumlarının Ölçümü

Filmlerin optik geçirgenlik ölçümleri, “Perkin Elmer Lambda 2S” spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. CdTe, CdS filmleri elde edildikten sonra ve termal tavlama ile Zn'nin bu filmlere difüzyonu sonrası oluşan CdZnTe, CdZnS üçlü bileşikler her aşamada $\lambda=300-1100$ nm dalga boyu aralığında optik geçirgenlik spektrumları incelenmiştir. Filmlerin optik geçirgenlik spektrumundan soğurma katsayısı (α) aşağıdaki denklemden hesaplandı,

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1-R^2 \exp(-2\alpha d)} \quad (3.13)$$

eğer $\alpha d \gg 1$ ise

$$T = \frac{I}{I_0} = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (3.14)$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{T} \right] \quad (3.15)$$

şeklini alır. Denklem 3.13-3.15’de verilen T örneğin optik geçirgenliği, I_0 örneğe gelen ışık şiddeti, I örnekten çıkan ışık şiddeti, d filmin kalınlığı, α soğurma katsayısı, R yansıtma katsayısıdır.

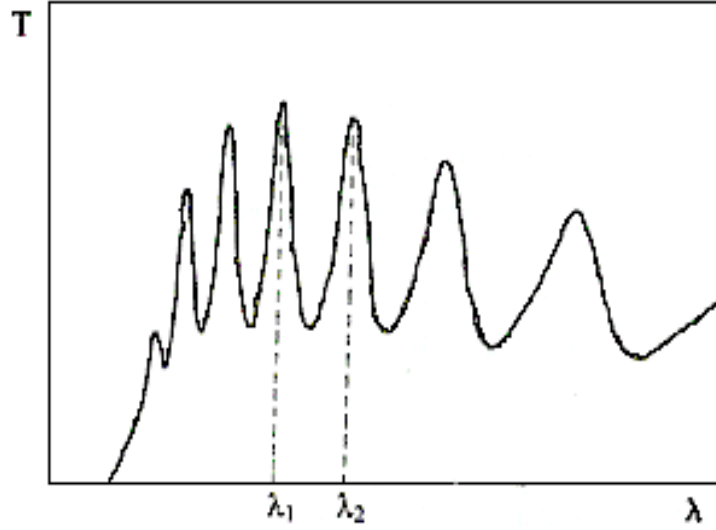
Yansıtma katsayısı ise

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (3.16)$$

formülü kullanılarak hesaplandı.

CdTe ve CdS filmlerin kalınlığı (d), optik geçirgenlik spektrumlarından elde edilen girişim desenlerinin iki ardışık maksimum veya minimum noktalarına karşılık gelen dalga boyları (λ_1 ve λ_2) belirlendikten sonra (Şekil 3.8) bu değerlerin ve kırılma indisinin (n) Denklem 3.17’ye konulmasıyla hesaplanmaktadır.

$$\frac{1}{2nd} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \quad (3.17)$$

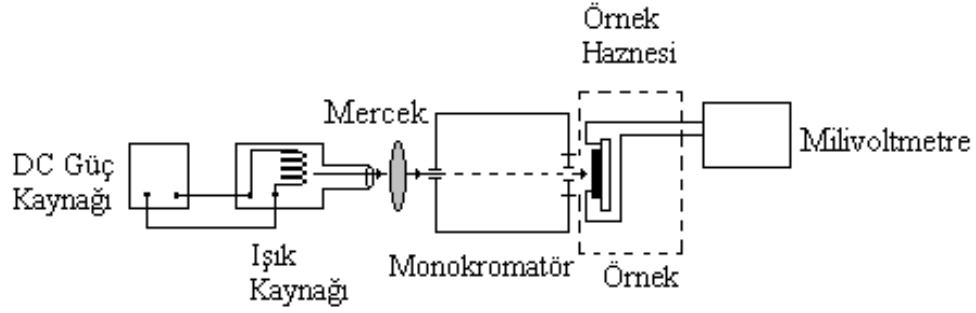


Şekil 3.8 Optik geçirgenlik spektrumu (Caferov, 2000).

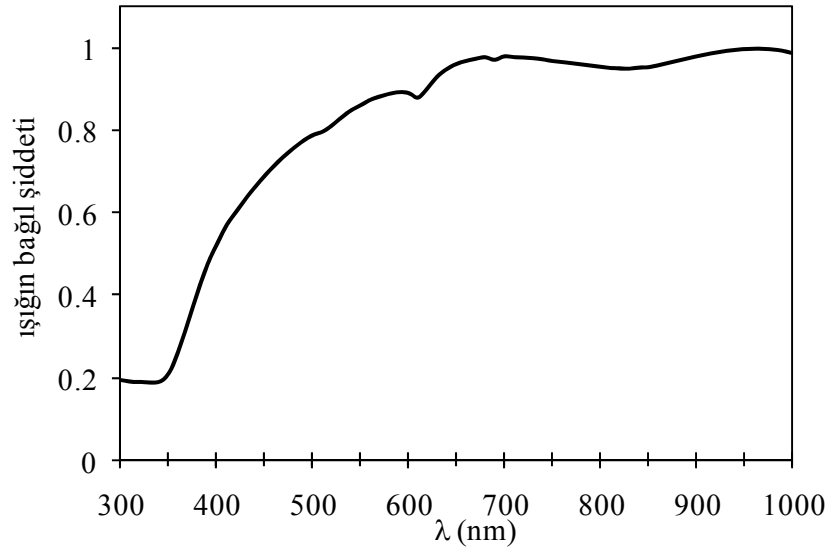
Filmlerin dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik ölçümlerinden, dalga boyuna bağlı soğurma katsayısı hesaplandı (Denklem 3.15) ve direkt geçişli band yapısına sahip olduğundan $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ grafikleri çizildi. Çizilen bu optik soğurma spektrum eğrisinin lineer kısmından alınan eğimin enerji eksenini kestiği değerden filmin yasak band genişliği belirlendi.

3.5 Filmlerin Fotoduyarlılık Spektrumlarının Ölçümü

Eklemlerin fotoduyarlılık dağılım spektrumları, $\lambda=300-1000$ nm dalgaboyları aralığında oda sıcaklığında “Oriol” marka monokromatör kullanılarak incelendi. “Osram” marka halojen lambadan saçılan ışık mercekle monokromatörün girişine odaklandı ve monokromatörden çıkan monokromatik ışık demeti örneğin yüzeyine düşürüldü ayrıca örnek haznesi ile örneklerin dış ortamdan ışık almaları engellendi. Örneğin üzerine düşürülen monokromatik ışığın etkisiyle eklemden oluşan fotogerilim ya da fotoakım “Thurlby 1503 digital multimeter” ile ölçüldü. Şekil 3.9’de ölçüm düzeneği gösterilmektedir. Monokromatik ışık demetinin dalga boyuna bağlı olarak eklemden oluşan fotogerilim ya da fotoakım spektrumları elde edildi. Örneklerin fotogerilim-dalgaboyu spektrumları monokromatör lambasının spektrumuna oranlanarak çizildi. “Osram” lamba şiddetinin spektral dağılımı, Si detektörü (bpw 34) kullanılarak ölçüldü (Şekil 3.10).



Şekil 3.9 Eklemlerin fotoduyarlılık spektrumlarının ölçüm düzeneği.



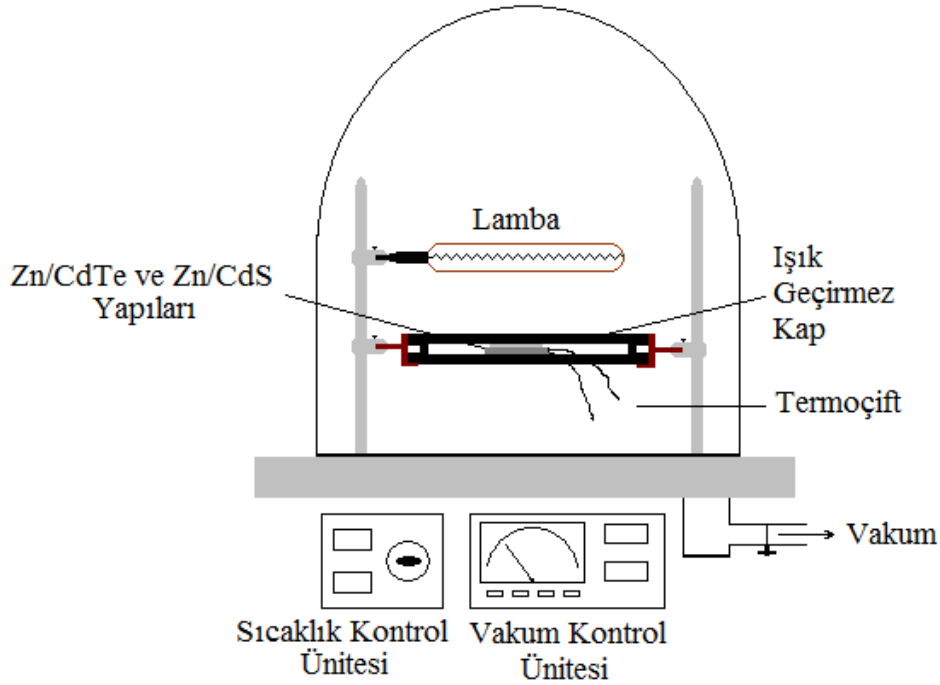
Şekil 3.10 “Osram” lambasının şiddetinin spektral dağılımı.

3.6 Metal/CdTe, CdS Eklemlerin ve Heteroeklemlerin Hazırlanması

Hazırlanan CdTe ve CdS filmlerin yüzeyine metal kaplanmadan önce filmlerin yüzeyindeki kirliliğin giderilmesi için metilalkol ile silinip etüvde 50 °C’de kısa bir süre kurutuldu. Filmlerin yüzeyine istenilen alanda metal kaplanabilmesi amacıyla 1 cm² alanlı kare şeklinde maskeler hazırlandı. Metal (Zn) elektron demeti ile yüksek vakumda (10⁻⁵ Torr) Leybold-Heraeus PD-180 vakum cihazında filmlerin yüzeyine kaplandı. Buharlaştırma sürecinde örnekler üzerine kaplanan metal kalınlığı, kalınlık ölçer (Deposition Controller Inficon-Leybold) kullanılarak kontrol edildi. CdTe filmlerin yüzeyine 40-100 nm, CdS filmlerin

yüzeyine ise 80-275 nm Zn, elektron demeti ile yüksek vakumda kaplanarak Zn/CdTe ve Zn/CdS yapıları elde edildi.

Zn/CdTe ve Zn/CdS yapıların tavlama amacıyla vakum setinin içerisine termal tavlama düzeneği kuruldu. Termal tavlama, ısı kaynağı olarak halojen lamba kullanıldı ve sıcaklık uygulanan gerilimle kontrol edildi. Tavlama sürecinde ışığın etkisini engellemek amacıyla ışık geçirmeyen ve örneklerle etkileşmeye girmeyen kap kullanıldı. Tavlama sıcaklığı örneklerin yanına yerleştirilmiş termoçift ile belirlendi. Termal tavlama düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.11'da verilmiştir. Vakum ortamında termal tavlama ile Zn'nin filmlere difüzyonu sağlandı. Zn/CdTe ve Zn/CdS yapıları vakumda termal tavlama sıcaklığına ve süresine bağlı olarak CdZnTe ve CdZnS üçlü bileşikleri elde edildi.



Şekil 3.11 Termal tavlama düzeneğinin şematik gösterimi.

Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle SnO₂ kaplı cam üzerine büyütülen n tipi CdTe filmin yüzeyine Zn kaplanarak Zn/nCdTe yapısı elde edildi. Zn/nCdTe yapısı vakumda tavlama ile pCdZnTe/nCdTe eklemi elde edildi.

Kimyasal püskürtme yöntemiyle SnO₂ kaplı cam üzerine kaplanan CdS filmlerden birinin yüzeyine Zn kaplandı. CdS/SnO₂ ve Zn/CdS/SnO₂ yapıları vakumda termal tavlama yapıldıktan sonra yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle bu yapılara aynı şartlarda CdTe film kaplanarak CdTe/CdS/SnO₂ ve CdTe/CdZnS/SnO₂ heteroeklemleri elde edildi.

Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle aynı şartlarla SnO₂ kaplı cam üzerine kaplanan p-tipi CdTe filmlerin yüzeyine, kimyasal püskürtme yöntemiyle CdS filmler kaplanarak CdS/CdTe/SnO₂ heteroeklemleri oluşturuldu. Bu heteroeklemlerden birinin yüzeyine Zn kaplanarak Zn/CdS/CdTe/SnO₂ yapısı oluşturuldu ve vakumda termal tavlama yapılarak CdZnS/CdS/CdTe/SnO₂ heteroeklemleri elde edildi.

3.7 Difüzyon Deneyleri ve Katkı Atomlarının Konsantrasyon Dağılımının XRF Yöntemiyle Analizi

X-ışının floresansı (XRF) spektroskopisi uyarılmış atomdan yayınlanan X-ışınının dedekte edilmesine dayanan elementel analizde kullanılan bir yöntemdir. XRF iki aşamalı süreçten oluşur. Yüksek enerjili x-ışınları ile uyarılan atomun iç yörüngesinden elektron kopartılarak dışarı atılır ve iç yörüngesinde kararsız bir boşluk oluşur. İkinci aşamada atomun iç yörüngesindeki boşluk üst yörüngeden bir elektronla doldurulduğunda bu iki yörünge arasındaki enerji kadar x-ışını yayınlanır. Bu süreçler sonucunda yayınlanan x-ışınına XRF x-ışını floresans adı verilir. Yayınlanan x-ışını enerjisi elementin karakteristiğidir ve enerjisi iki yörünge arasındaki enerji seviyelerinin farkına eşittir. Her element elektron enerji seviyelerine bağlı olarak farklı enerjilerde x-ışını yayınlamasından dolayı XRF elementlerin kimlikleri hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Malzemeden yayılan x-ışınının şiddeti malzeme içindeki elementin konsantrasyonuna bağlı olduğundan dolayı XRF elementlerin konsantrasyonu hakkında bilgi edinmemizi sağlar.

XRF yöntemiyle CdS filmlerde Zn konsantrasyon profili Spectro MIDEX-M ile ölçüldü. Zn/CdS yapıları tavlama öncesi XRF yöntemiyle Zn atomlarının K_α pik şiddetleri (impuls) belirlendi. Birim zamanda ölçülen impulsa (Imp/s) karşılık gelen Zn atom sayısı hesaplandı ve kalibrasyon katsayısı (atom.s/Imp) belirlendi. Zn/CdS yapısı tavlandıktan sonra filmlerden çok ince tabakalar (x) çıkarılarak XRF ile Zn K_α pik şiddetleri ölçüldü. Yüzey atom sayısı Q (Imp/cm²s)-x grafiğinin eğimleri (dQ/dx) kalibrasyon katsayısıyla çarpımıyla filmlerde Zn konsantrasyon dağılımı belirlendi.

Zn'nin konsantrasyon dağılımından sabit kaynaktan katkı difüzyonunun dağılımı

$$N(x,t)=N_0\left(1-\operatorname{erf}\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3.18)$$

bağıntısıyla belirlenir (Caferov, 1998). Burada N(x,t) katkı konsantrasyonu, N₀ örnek yüzeyindeki (x=0) sabit konsantrasyonu, erf(z) Gauss hata fonksiyonudur.

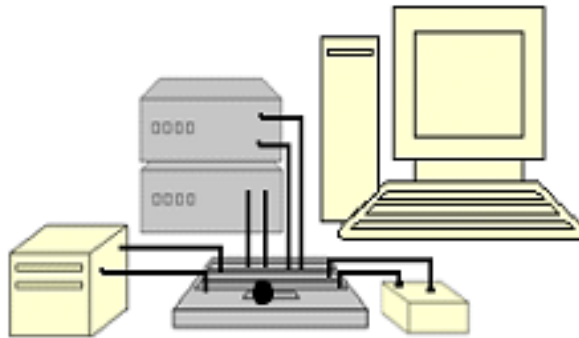
Katılarda difüzyon katsayısı, Arrhenius kuralına uygun eksponansiyel olarak değişim gösterir.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{G}{kT}\right) \quad (3.19)$$

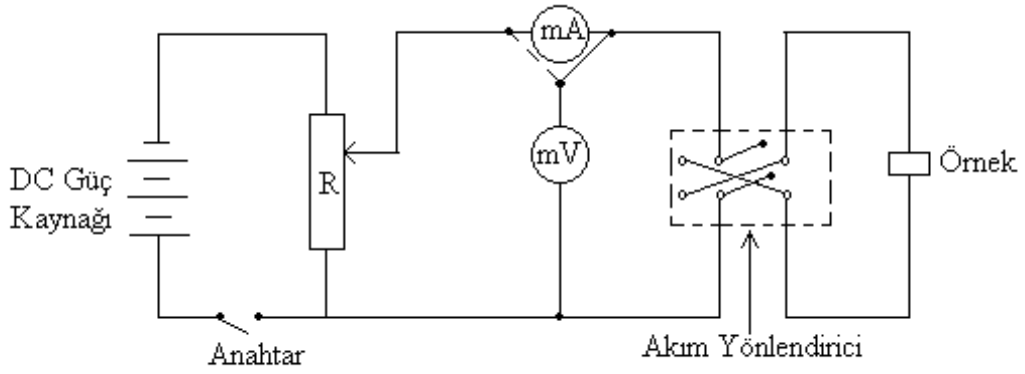
Eşitlikteki G difüzyonun aktivasyon enerjisi, D_0 atomların titreşim frekansı ve atlama mesafesi ile bağlı olan üstel fonksiyonun çarpanıdır.

3.8 Metal/CdTe, CdS ve Heteroeklemlerin I-V Karakteristiklerinin Ölçümü ve Parametrelerinin Belirlenmesi

Metal/CdS, CdTe ve Heteroeklemlerin (pCdZnTe/nCdTe, CdTe/CdS/SnO₂, CdTe/CdZnS/SnO₂, CdS/CdTe/SnO₂ ve CdZnS/CdS/CdTe/SnO₂) akım-gerilim karakteristiklerini belirleyebilmek amacıyla alt kontak olarak SnO₂ ve üst kontak olarak da GaIn omik kontak alındı. Örneklerin alt ve üst kontaktlarına tutturulmuş ince bakır tel ile akım-gerilim ölçüm devresine bağlantı yapıldı. Akım-gerilim ölçüm devresine bağlı dijital akımölçer (Keithley) ve dijital gerilimölçer (Keithley) bilgisayara bağlanarak istenilen gelimler arasında otomatik olarak örneklerin akım-gerilim karakteristiği ölçüldü. Örneklerin akım-gerilim karakteristikleri karanlıkta ve tungsten-halojen lamba ile aydınlatmada (örneğin üzerine düşen ışık şiddeti $P=100 \text{ mW/cm}^2$), oda sıcaklığında ölçülmüştür. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 akım-gerilim karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan ölçüm sistemini ve devrenin şemasını göstermektedir.



Şekil 3.12 Metal/CdTe, CdS ve heteroeklemlerin akım-gerilim karakteristiklerinin ölçüm sistemi.



Şekil 3.13 Metal/CdTe, CdS ve heteroeklemlerin akım-gerilim karakteristiklerinin ölçüm devre şeması.

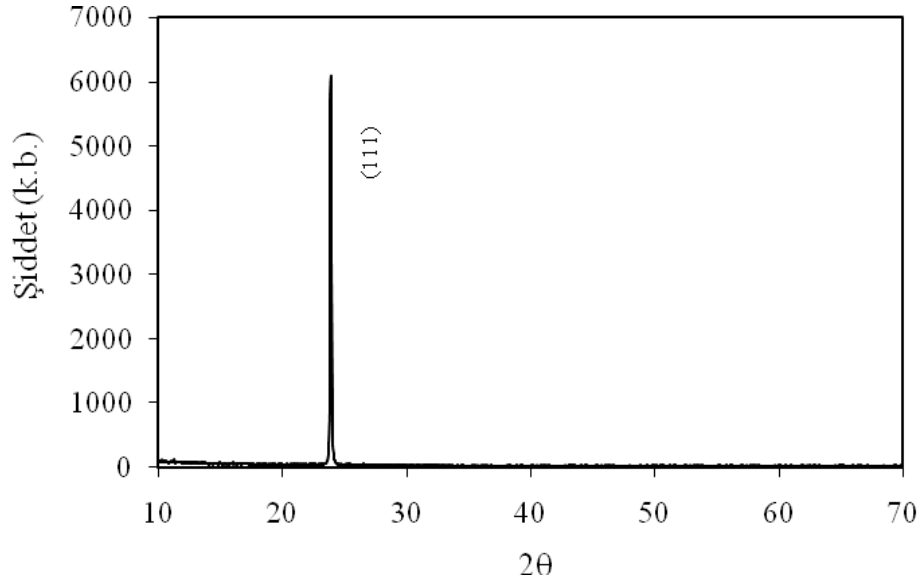
Örneklerin akım-gerilim karakteristiklerinden, aydınlatma altında açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri, karanlıkta doğru ve ters yöndeki akım oranlarından doğrultma katsayısı belirlendi. Örneklerin karanlıkta ters yöndeki akım-gerilim karakteristiğinden doyma akımı (J_s) ve doyma akımının sıcaklıkla değişiminden (ϕ_b) potansiyel engel yüksekliği hesaplandı.

4. BULGULAR

4.1 CdTe ve CdS Filmlerin Yapısal, Elektrik ve Optik Özellikleri

4.1.1 CdTe Filmlerin Yapısal Özellikleri

Yakın mesafeli süblimasyon (CSS) yöntemiyle elde edilen CdTe filmlerin x-ışını kırınım (Cu K_{α} $\lambda=1,5405$ Å için) analizi Philips Panalitcal Diffractometer ile yapıldı. CdTe filmlerin x-ışını kırınım deseninden (Şekil 4.1) kübik yapıda kristalleştiği ve $2\theta=23,9066^{\circ}$ de (111) düzleminde yönelme gösterdiği belirlendi. X-ışını kırınım ölçüm verilerinin (111) düzlemleri arasındaki mesafe ($d=3,722$ Å) değeri kullanılarak (3.10) formülünden örgü parametresi $a=6,4472$ Å olarak belirlendi. Debye-Scherrer formülünden (3.12), (111) yönelimindeki pikin FWHM ($2\theta=0,1476^{\circ}$) değeri kullanılarak ortalama tanecik boyutu 61 Å olarak hesaplandı.

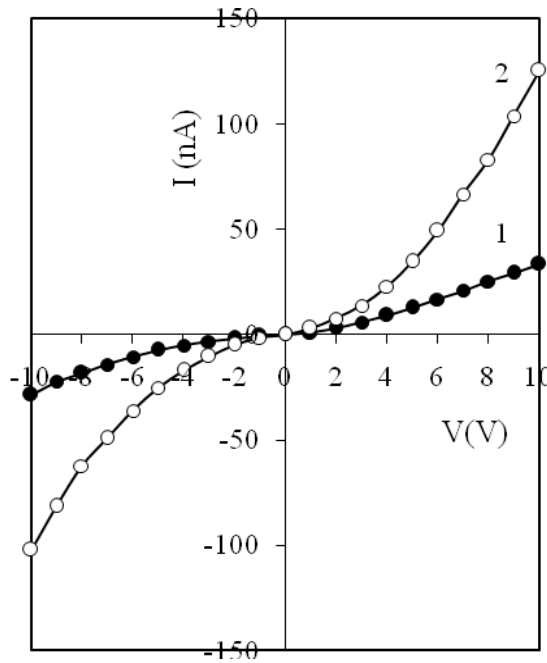


Şekil 4.1 Katkılanmamış kübik CdTe filmin x-ışını kırınım deseni.

4.1.2 CdTe Filmlerin Elektriksel Özellikleri

Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle elde edilen CdTe filmler, CdTe toz karışımındaki Cd-Te kompozisyonuna ve kaplama şartlarına bağlı olarak hem n-tipi hem de p-tipi olabilmektedir. Havada veya oksijen ortamında $400-450$ °C'de 30 dakika tavlama ile n-tipi örnekler p-tipine dönüşmektedir. Filmlerin iletkenlik tipleri, termal elektro-motor kuvvet

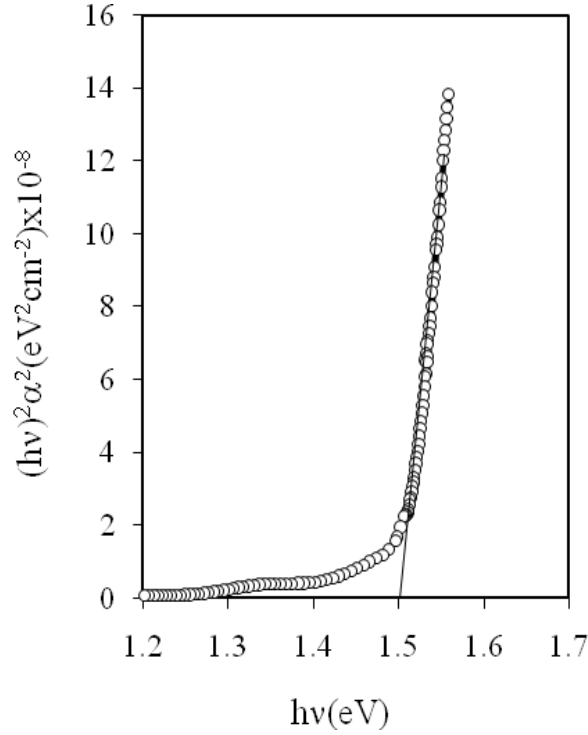
(TEMK) yöntemi ile belirlendi. Yüksek öz dirence ve iş fonksiyonuna sahip olan p-tipi CdTe filmlerde omik kontak alabilmek amacıyla p-CdTe filmlerin yüzeyi $\text{HNO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4$ (NP) asit ile kimyasal aşındırma yapılarak p^+ yüzeyi oluşturulmuştur. p-CdTe filmlerin elektriksel ölçümleri için kimyasal aşındırma yapıldıktan sonra omik kontak olarak Ga-In alaşımı kullanılmıştır. GaIn/CdTe/GaIn yapısının akım-gerilim karakteristiği karanlıkta ve tungsten-halojen lamba ile aydınlatma altında ölçüldü. GaIn/CdTe/GaIn yapısının akım-gerilim karakteristiğinden p-CdTe filmlerde Ga-In alaşımının yaklaşık omik karakter gösterdiği belirlendi (Şekil 4.2). Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle büyütülen CdTe filmlerin yüksek öz dirence (10^6 - $10^7 \Omega\text{cm}$) sahip olduğu tespit edildi.



Şekil 4.2 Katkısız GaIn/CdTe/GaIn filmin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta akım-gerilim karakteristیکleri.

4.1.3 CdTe Filmlerin Optik Özellikleri

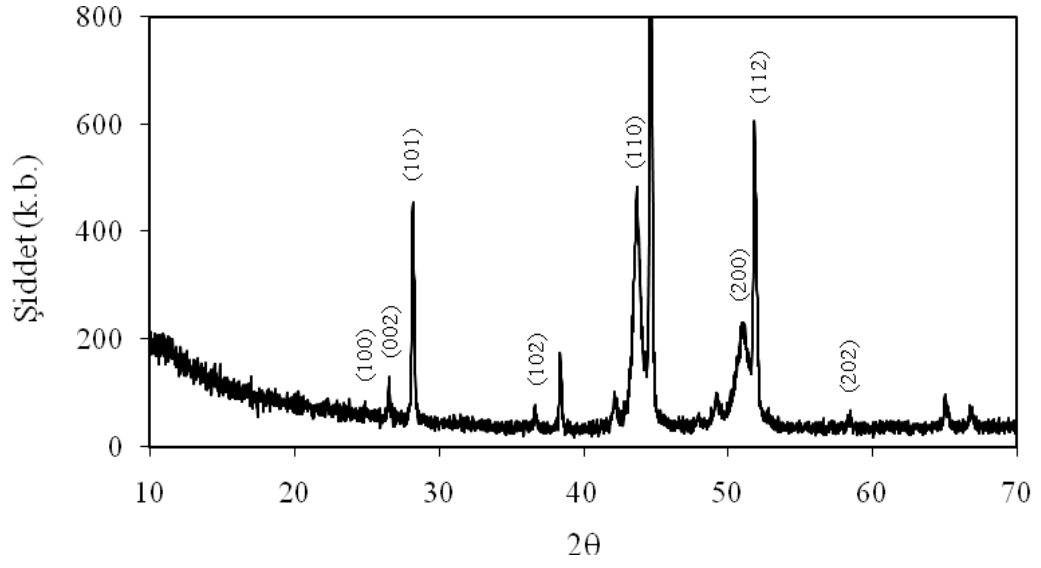
CdTe filmlerin optik geçirgenlik spektrumları “Perkin Elmer Lambda 2S” spektrometresi kullanılarak 300-1100 nm dalgaboyu aralığında oda sıcaklığında ölçüldü. Optik geçirgenlik spektrumundan dalgaboyuna bağlı soğurma katsayısı hesaplandı (Denklem 3.15) ve enerjiye bağlı soğurma katsayısı spektrumu çizildi (Şekil 4.3). Optik soğurma spektrum eğrisinin lineer kısmından alınan eğimin, enerji eksenini kestiği değer filmin yasak band genişliğini vermektedir. Direkt band yapısına sahip CdTe filmlerin, optik soğurma spektrumundan yasak band genişliği $E_g=1,50 \text{ eV}$ ($T=300 \text{ K}$) olarak belirlendi.



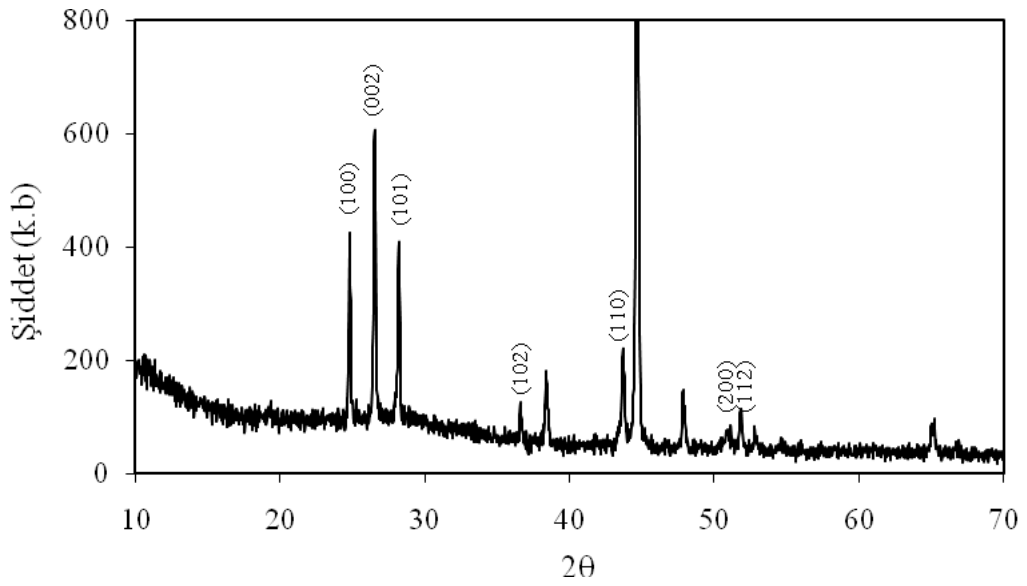
Şekil 4.3 CdTe filmin soğurma katsayısı spektrumu.

4.1.4 CdS Filmlerin Yapısal Özellikleri

Yakın mesafeli süblimasyon (CSS) ve kimyasal püskürtme (SP) yöntemiyle elde edilen CdS filmlerin x-ışını kırınım ($\text{Cu K}_\alpha \lambda=1,5405 \text{ \AA}$ için) analizleri Philips Panalitical Diffractometer ile yapıldı. Her iki yöntemle hazırlanan CdS filmlerin x-ışını kırınım deseninden (Şekil 4.4-4.5) hegzagonal yapıda kristalleştiği belirlendi. X-ışını kırınım ölçüm verilerinin düzlemler arasındaki mesafe değerleri kullanılarak Denklem 3.11'den CdS filmlerin örgü parametreleri hesaplandı. Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle elde edilen CdS filmlerin örgü parametreleri $a=4,107 \text{ \AA}$ ve $c=6,725 \text{ \AA}$ olarak hesaplandı. Bu çalışmada X-ışın kırınım ölçümlerinden elde edilen örgü parametresini hatası $\pm 0,003 \text{ \AA}$ 'dır. Kimyasal püskürtme yöntemiyle elde edilen CdS filmlerin örgü parametreleri $a=4,143 \text{ \AA}$ ve $c=6,717 \text{ \AA}$ olarak hesaplandı. Yakın mesafeli süblimasyon ve kimyasal püskürtme yöntemiyle elde edilen CdS filmlerin yapısal analizlerinden aynı yapısal özelliklere sahip olduğu gözlemlendi.



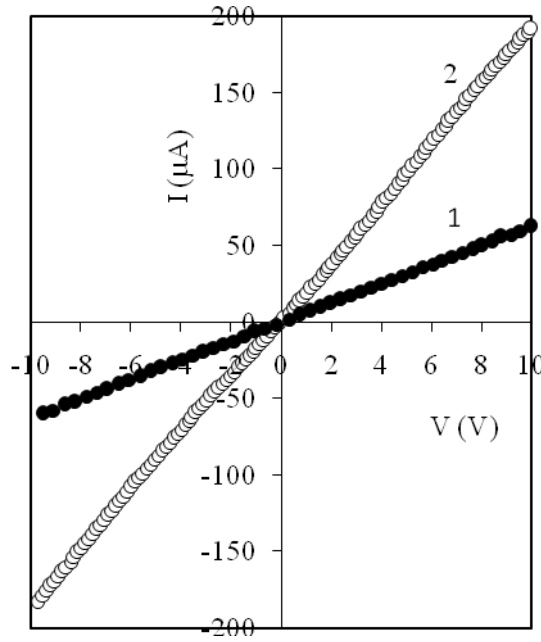
Şekil 4.4 CSS yöntemiyle elde edilen hegzagonal CdS filmin x-ışını kırınım deseni.



Şekil 4.5 SP yöntemiyle elde edilen hegzagonal CdS filmin x-ışını kırınım deseni.

4.1.5 Katkılanmamış CdS Filmlerin Elektriksel Özellikleri

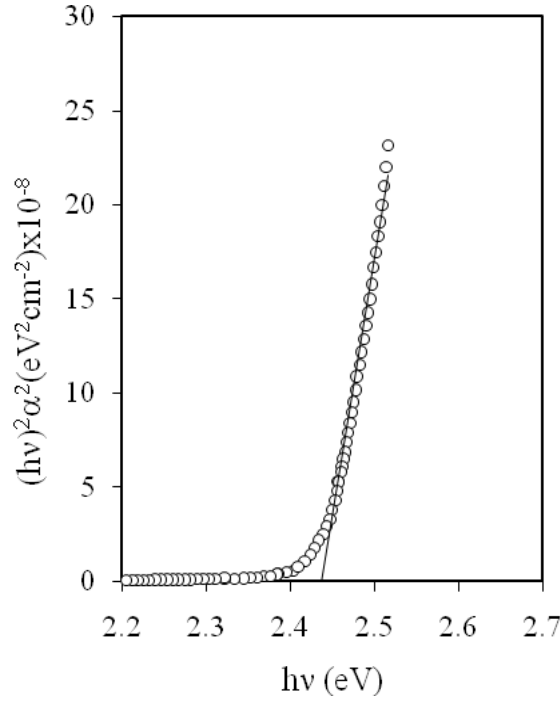
Katkılanmamış CdS filmlerin elektriksel ölçümlerinde üst kontak olarak Ga-In alaşımı kullanılmıştır. InGa/CdS/InGa yapısının karanlıkta ve aydınlatma altında akım-gerilim ölçümlerinden, Ga-In alaşımının katkılanmamış n-tipi CdS filmlerinde iyi omik kontak oluşturduğu gözlenmektedir (Şekil 4.6). Katkılanmamış CdS filmlerin öz direnci 10^2 - 10^4 Ω cm aralığında değişmektedir.



Şekil 4.6 Katkısız GaIn/CdS/GaIn filmin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta akım-gerilim karakteristikleri.

4.1.6 Katkılanmamış CdS Filmlerin Optik Özellikleri

Yakın mesafeli süblimasyon ve kimyasal püskürtme yöntemiyle elde edilen CdS filmlerin optik geçirgenlik spektrumları "Perkin Elmer Lambda 2S" spektrometresi kullanılarak 300-1100 nm dalgaboyu aralığında ölçüldü. Optik geçirgenlik spektrumundan dalgaboyuna bağlı soğurma katsayısı Denklem 3.15'den hesaplandı ve enerjiye bağlı soğurma katsayısı spektrumu çizildi (Şekil 4.7). Optik soğurma spektrum eğrisinin lineer kısmından alınan eğimin enerji eksenini kestiği değer filmin yasak band genişliğini vermektedir. Direkt band yapısına sahip katkısız CdS filmlerin soğurma katsayısı spektrumundan yasak band genişliği $E_g=2,43$ eV olarak belirlendi.

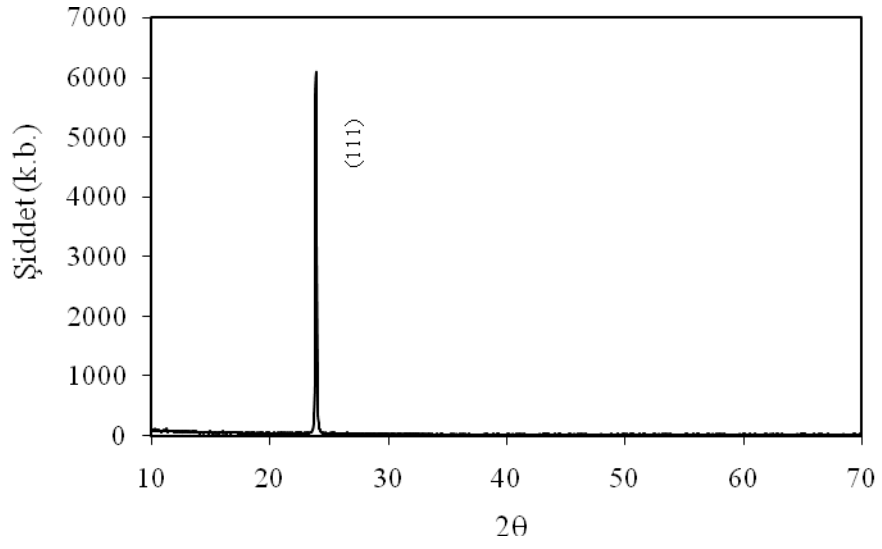


Şekil 4.7 Katkılanmamış CdS filmin soğurma katsayısı spektrumu.

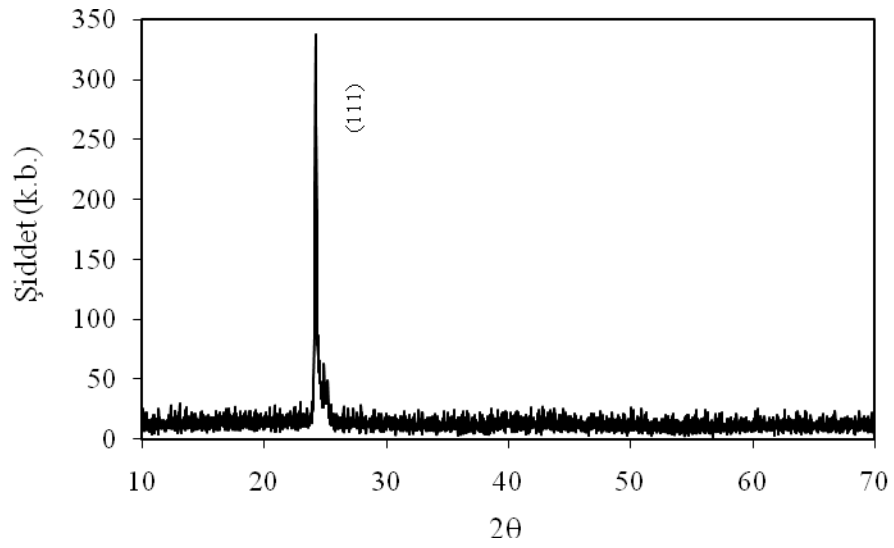
4.2 Zn Difüzyonunun CdTe Filmlerin Yapısal, Elektrik, Optik ve Fotoelektrik Özelliklerine Etkisi

4.2.1 Tavlamanın Zn/CdTe Yapıların XRD Desenlerine Etkisi

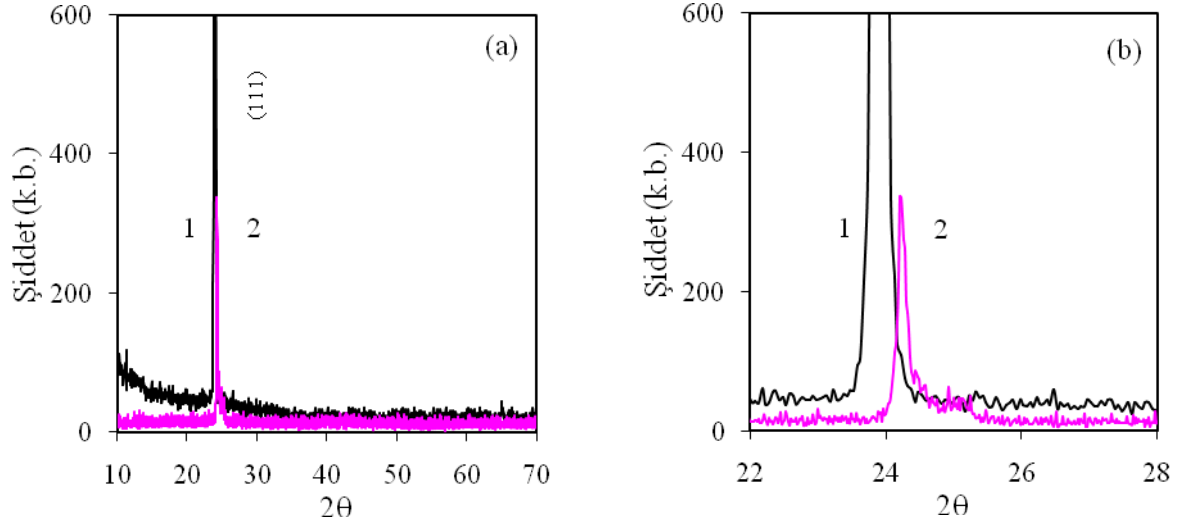
CdTe filmin ve Zn/CdTe ($d_{Zn}=45$ nm, $d_{CdTe}=1,4$ μ m) yapısının 500 °C’de 10 dak. vakumda termal tavlama sonrası x-ışını kırınım analizlerinden kübik yapıda olduğu belirlendi (Şekil 4.8-4.9). X-ışını kırınım desenleri karşılaştırıldığında, katkısız CdTe filmin (111) yönelimindeki pik pozisyonu $2\theta=23,91^\circ$ ’de, tavllanmış Zn/CdTe yapısının (111) yönelimindeki pik pozisyonu ise küçük kaymayla $2\theta=24,22^\circ$ ’de gözlemlendi (Şekil 4.10). Pik pozisyonundaki bu değişim Zn/CdTe yapısının tavllanmasıyla $Cd_{1-x}Zn_xTe$ bileşiğine dönüşmesinden kaynaklanabilir. X-ışını kırınım ölçüm verilerinden düzlemler arasındaki mesafe değerleri ($d=3,722$ Å ve $d=3,672$ Å) kullanılarak 3.10’den katkısız CdTe filmin ve Zn/CdTe yapısının tavllanmasıyla oluşan CdZnTe filmin örgü parametreleri sırasıyla $a=6,447$ Å (CdTe) ve $a=6,360$ Å (CdZnTe) olarak hesaplandı. CdTe ve CdZnTe filmlerin ortalama tanecik boyutu (111) yönelimindeki piklerinin FWHM ($2\theta=0,1476^\circ$ ve $2\theta=0,1940^\circ$) değerleri kullanılarak Debye-Scherrer formülünden (3.12) sırasıyla 61 nm ve 46 nm olarak hesaplandı. Zn/CdTe’nin tavlama sonrası örgü parametrelerindeki değişimi Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.8 Katkısız CdTe filmin x-ışını kırınım deseni.



Şekil 4.9 Zn/CdTe yapısının 500 °C 10 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım deseni.



Şekil 4.10 (1) CdTe film ve (2) Zn/CdTe yapısının 500 °C’de 10 dak. termal tavlama sonrası x-ışını kırınım (111) desenlerinin karşılaştırması (a) $2\theta=10-70^\circ$ ve (b) $2\theta=22-28^\circ$ için.

Çizelge 4.1 Zn/CdTe yapısının 500 °C’de 10 dak. tavlama sonrası örgü parametresindeki değişim.

	(111) 2θ (°)	d (Å)	a (Å)	FWHM	d_{tb} (nm)
CdTe	23,91	3,722	6,447	0,1476	61
CdZnTe	24,22	3,672	6,360	0,1940	41

Tavllanmış Zn/CdTe yapısının CdTe filme oranla pik pozisyonundaki ve örgü parametresindeki bu değişim Zn/CdTe yapısının tavllanmasıyla $Cd_{1-x}Zn_xTe$ üçlü bileşiğine dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Zn/CdTe yapısının 500 °C’de 10 dak. vakumda tavllanmasıyla CdTe filme Zn’nin reaktif difüzyonu sonucu $Cd_{1-x}Zn_xTe$ üçlü bileşiğinin oluştuğu x-ışını kırınım analizinden belirlendi.

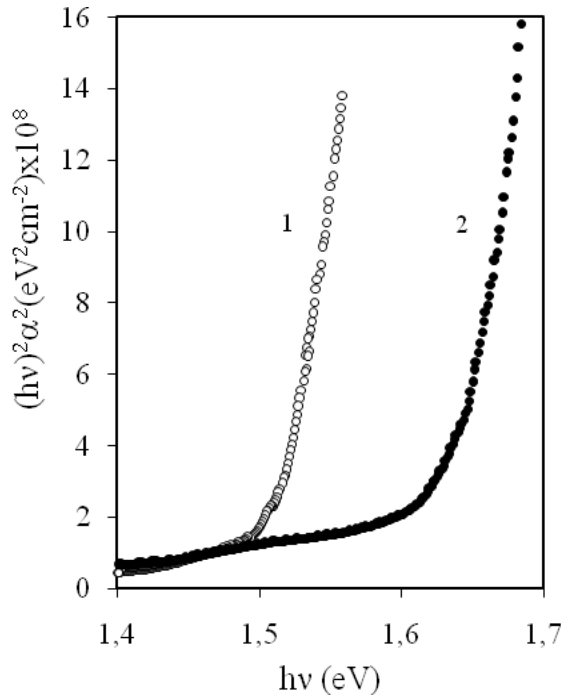
4.2.2 Tavllanmış Zn/CdTe Yapıların Optik Spektrumları

Katkısız CdTe filmlerin ve Zn/CdTe yapılarının tavlama sonrası optik geçirgenlik spektrumları 300-1100 nm dalgaboyu aralığında ölçüldü. Optik geçirgenlik spektrumundan enerjiye bağlı soğurma katsayısı spektrumları çizildi. Katkısız CdTe filmin ve Zn/CdTe yapısının 500 °C’de 12 dak. tavlama sonrası optik absorpsiyon spektrumlarından, Zn/CdTe yapısının tavlama sonrası ortalama yasak band genişliğinin ($E_g=1,65$ eV), katılanmamış CdTe filmin yasak band genişliğine ($E_g=1,5$ eV) oranla arttığı belirlendi (Şekil 4.11). Yasak

band genişliğinin artışı Zn/CdTe yapısının tavllanmasıyla Zn'nin CdTe filme reaktif difüzyonu sonucu CdZnTe üçlü bileşiğin oluşmasıyla ilişkilidir. CdTe filmin soğurma spektrum eğrisi tek eğim ile karakterize edilirken, CdZnTe filmin soğurma spektrum eğrisi ise tek eğim ile karakterize edilemez, bu nedenle ortalama yasak band genişliği ile karakterize edilir (Şekil 4.11-2). CdTe filme Zn'nin difüzyonu sonucu, filmin yüzeyinden içeriye doğru Zn konsantrasyonunun gradyenti oluşmaktadır ve buna bağlı olarak oluşan $Cd_{1-x}Zn_xTe$ üçlü bileşiğin yasak band genişliğinin de gradyenti oluşmaktadır. Zn/CdTe yapısının tavllanmasıyla Zn'nin reaktif difüzyonu sonucu oluşan $Cd_{1-x}Zn_xTe$ üçlü bileşiğin yasak band genişliği, Zn'nin konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. $Cd_{1-x}Zn_xTe$ üçlü bileşiğinin yasak band genişliği ile Zn kompozisyonu (x) arasındaki (Tobin, 1995)

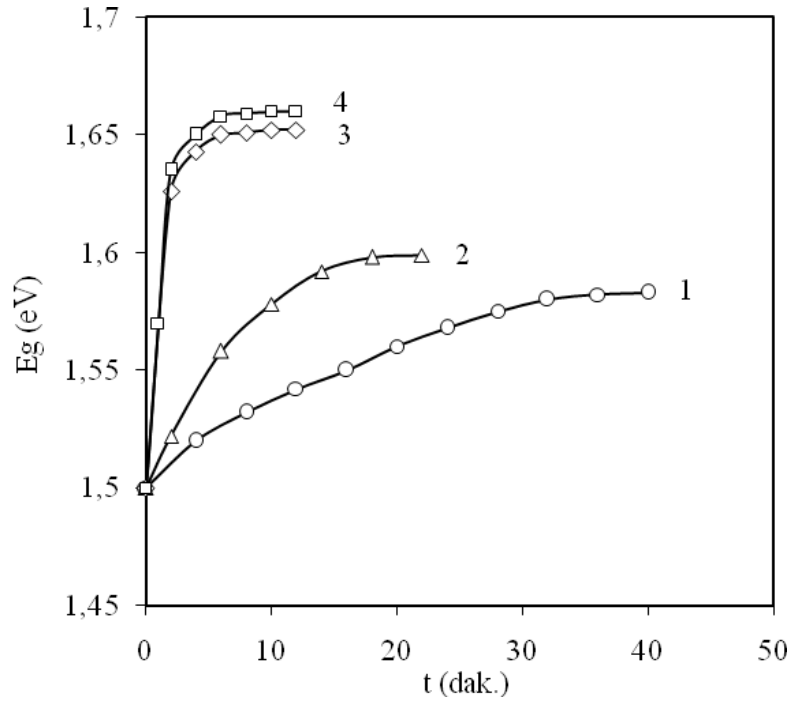
$$E_g = 1,5045 + 0,631x + 0,128x^2 \quad (x=0 \text{ CdTe } 1,5 \text{ eV ve } x=1 \text{ ZnTe } 2,3 \text{ eV}) \quad (4.1)$$

bağıntısından; 500 °C'de CdTe filme Zn difüzyonu sonucu oluşan $Cd_{1-x}Zn_xTe$ üçlü bileşiğinin kompozisyon değeri $x=0,22$ olarak belirlendi ($Cd_{0,78}Zn_{0,22}Te$). $Cd_{1-x}Zn_xTe$ üçlü bileşiğin yasak band genişliği Zn'nin x kompozisyonuna bağlı olarak CdTe'nin ($E_g=1,5 \text{ eV}$) yasak band genişliğinden ZnTe'nin ($E_g=2,3 \text{ eV}$) yasak band genişliğine kadar değişir.



Şekil 4.11 (1) CdTe film ve (2) Zn/CdTe yapısının 500 °C'de 12 dak. termal tavlama sonucu soğurma katsayısı spektrumları.

Zn/CdTe yapısının termal tavlama sıcaklığına, termal tavlama süresine ve Zn kalınlığına bağlı olarak, CdTe filme Zn difüzyonuyla oluşan $Cd_{1-x}Zn_xTe$ üçlü bileşiğin yasak band genişliğinin değişimi incelendi. Zn/CdTe yapısı sabit sıcaklıklarda birkaç dakika aralıklarda tavlandı ve her tavlama sonrası soğurma katsayısı spektrumundan yasak band genişliği belirlenerek tavlama süresiyle yasak band genişliği arasındaki ilişki belirlendi. Zn/CdTe yapılarının, 430°C ($d_{CdTe}=3\mu m$, $d_{Zn}=96nm$), 480 °C ($d_{CdTe}=3\mu m$, $d_{Zn}=70nm$), 500 °C ($d_{CdTe}=1,44\mu m$, $d_{Zn}=45nm$) ve 520 °C ($d_{CdTe}=4,9\mu m$, $d_{Zn}=70nm$) sıcaklıklarında birkaç dakika aralıklarla tavlama ile oluşan CdZnTe üçlü bileşiğinin yasak band genişliğinin tavlama sıcaklığına ve süresine bağlı değişimi Şekil 4.12’de gösterildi. Zn/CdTe yapılarının termal tavlama sıcaklığı (430-520 °C) ve doyum zamanına kadar tavlama süresi arttıkça oluşan CdZnTe üçlü bileşiğin yasak band genişliğinin arttığı gözlemlendi. Zn/CdTe yapısının 400 °C’de 60 dak. tavlama sonucu yasak band genişliğinin değişmediği optik absorpsiyon analizlerinden belirlendi. Zn/CdTe yapılarının farklı sıcaklıklarda tavlama sonrası yasak enerji aralığı ve kompozisyon değişimi Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 CdZnTe yapısının yasak band genişliğinin, (1) 430, (2) 480, (3) 500 ve (4) 520 °C sıcaklıkları için tavlama sürelerine bağlı değişimi.

Çizelge 4.2 Zn/CdTe yapısının farklı sıcaklıklarda tavlama sonrası yasak enerji aralığı ve kompozisyon değişimi.

Tavlama Sıcaklığı (°C)	Tavlama Süresi (dak.)	CdTe (µm)	Zn (nm)	E _g (eV)	X
430	40	3	96	1,58	0,12
480	22	3	70	1,6	0,15
500	12	1,44	45	1,65	0,22
520	12	4,9	70	1,66	0,24

Böylece Zn/CdTe yapıların Zn'nin erime noktasının üstündeki sıcaklıklarda vakumda tavlama ile, Zn'nin CdTe filme reaktif difüzyonuyla oluşan CdZnTe üçlü bileşiğinin yasak band genişliği; termal tavlama sıcaklığına, termal tavlama süresine ve Zn kalınlığına bağlı olarak değiştiği belirlendi. Zn/CdTe yapılarının termal tavlama sıcaklığı ve doyum zamanına kadar tavlama süresi arttıkça oluşan CdZnTe üçlü bileşiğinin yasak band genişliğinin arttığı gözlemlendi.

4.2.3 Zn Katkısının CdTe Filmlerde Difüzyon Katsayısının Sıcaklıkla Değişimi

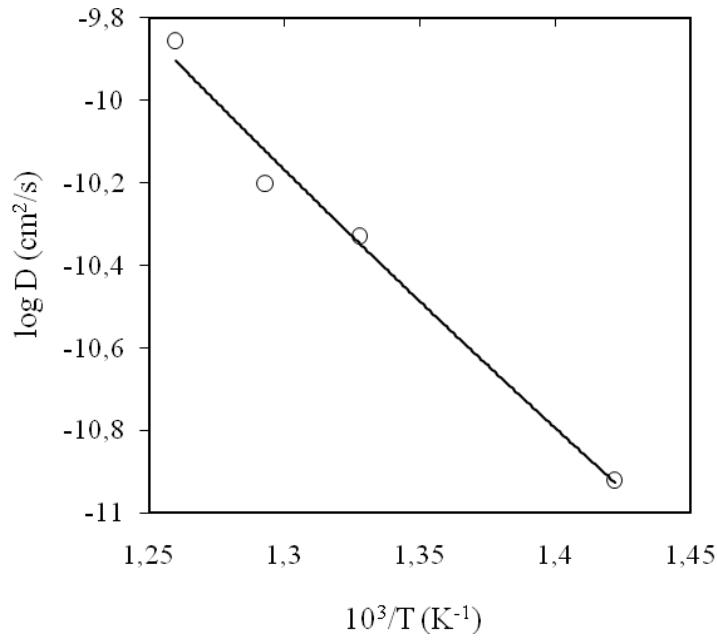
Zn/CdTe yapıların termal tavlama ile CdZnTe üçlü bileşiğinin oluşması, CdTe filme Zn difüzyonunun reaktif karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Reaktif difüzyon serbest katkı difüzyonu ile karşılaştırıldığında, reaktif difüzyon düşük difüzyon katsayısı ve yüksek katkı konsantrasyonu ile karakterize edilir. Zn/CdTe yapısının tavlama ile Zn'nin reaktif difüzyonu sonucu oluşan Cd_{1-x}Zn_xTe üçlü bileşiğinin yasak band genişliği Zn'nin konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. CdZnTe bileşiğinin yasak enerji aralığının Zn/CdTe yapısının tavlama sürelerine bağlı (E_g-t) eğrilerinden CdTe filmde Zn'nin efektif difüzyon katsayısı (D)

$$D = 0,8h^2 \left\{ \frac{d \left[\frac{E_g(t) - E_{gs}}{E_{gs}} \right]}{d(t^{0.5})} \right\}^2 \quad (4.2)$$

bağıntısı kullanılarak belirlendi (Abdullaev, 1987; Dzhaferov, 1991). Burada E_g(t), t süresince difüzyon sonrası CdZnTe filmin yasak band genişliğidir. E_{gs} ise (E_g-t) eğrisinde doyma başlangıcına tekabül eden doyma zamanındaki (t_s>t) CdZnTe filmin yasak band genişliğinin

maksimum değeridir ve h ise CdTe filmin kalınlığıdır. CdTe filmde Zn'nin efektif difüzyon verileri, 430-520 °C sıcaklıkları arasında Denklem 4.2 kullanılarak elde edildi ve Zn katkısının CdTe filmlerde sıcaklıkla difüzyon katsayısı değişimi belirlendi (Şekil 4.13). CdTe filme Zn difüzyon katsayısı

$D=2,5 \cdot 10^{-3} \exp(-1,30\text{eV}/kT)$ cm²/s olarak hesaplandı. Zn'nin CdTe filmlere 430-520 °C sıcaklıkları arasında efektif difüzyon katsayıları Çizelge 4.3'de verildi.



Şekil 4.13 Zn'nin CdTe filmlerinde sıcaklığa bağlı difüzyon katsayısı değişimi.

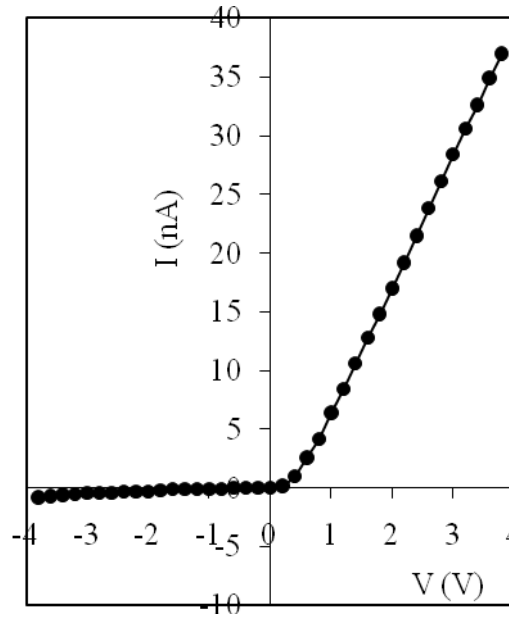
Çizelge 4.3 Farklı sıcaklıklarda CdTe filmde Zn'nin efektif difüzyon katsayıları.

T (°C)	$10^3/T$ (K)	D (cm ² /s)
430	1,422	$1,2 \cdot 10^{-11}$
480	1,328	$4,7 \cdot 10^{-11}$
500	1,293	$6,3 \cdot 10^{-11}$
520	1,26	$1,4 \cdot 10^{-10}$

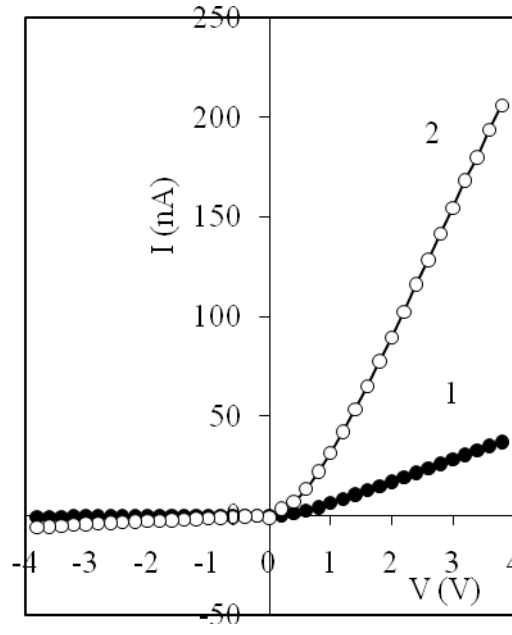
Böylece CdTe filmde Zn'nin efektif difüzyon katsayısı 430-520°C sıcaklığı aralığında $1,2 \cdot 10^{-11}$ 'den $1,4 \cdot 10^{-10}$ cm²s⁻¹'e arttığı gözlenmiştir.

4.2.4 CdZnTe/CdTe Eklemlerin I-V Karakteristikleri ve Fotoduyarlılık Spektrumları

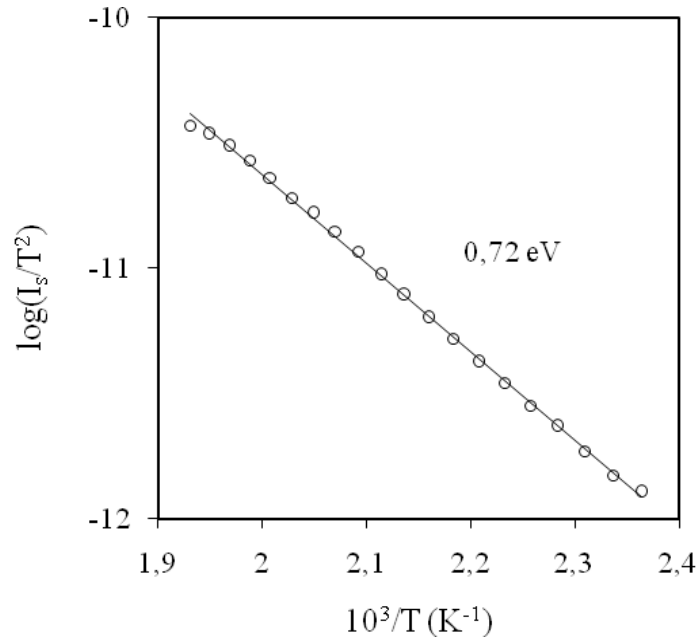
Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle SnO₂ kaplı cam üzerine büyütülen n tipi CdTe filmin yüzeyine Zn kaplanarak Zn/nCdTe yapısı elde edildi. Zn/nCdTe yapısı 550 °C'de 2 dak. vakumda tavlama ile pCdZnTe/nCdTe yapısı elde edildi. CdTe filmde Zn katkısının akseptör etkisi gösterip iletkenlik tipini değiştirdiği termal elektro-motor kuvvet (TEMK) yöntemiyle belirlendi. Yüksek dirençli p-tipi CdZnTe filme iyi omik kontak almak amacıyla yüzeyi HNO₃+H₃PO₄ (NP) asit ile kimyasal aşındırma yapılarak p⁺ yüzeyi oluşturuldu ve In-Ga omik kontak yapıldı. pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin akım-gerilim karakteristiği karanlıkta ve tungsten-halojen lamba ile aydınlatma (100 mW/cm²) altında belirlendi (Şekil 4.15). pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin doğrultma katsayısı 3V için 75 olarak hesaplandı. pCdZnTe/nCdTe heteroekleminde açık devre gerilimi V_{oc}=140 mV ve kısa devre akım yoğunluğu J_{sc}=0,5 mA/cm² olarak ölçüldü (Şekil 4.15). Doyma akımının sıcaklıkla değişim deney verilerinden yararlanılarak çizilen log(I_s/T²)-(10³/T) grafiğinin (Şekil 4.16) eğimi kullanılarak denklem 2.22'den potansiyel engel yüksekliği φ_b=0,72 eV olarak hesaplandı. pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin CdTe ve CdZnTe tarafından aydınlatma altında fotoduyarlılık dağılım spektrumları 300-1000 nm dalgaboyları aralığında oda sıcaklığında incelendi. CdZnTe tarafından aydınlatma altında fotoduyarlılık dağılım spektrumunun CdTe tarafından aydınlatmaya oranla daha geniş olduğu gözlemlendi (Şekil 4.17).



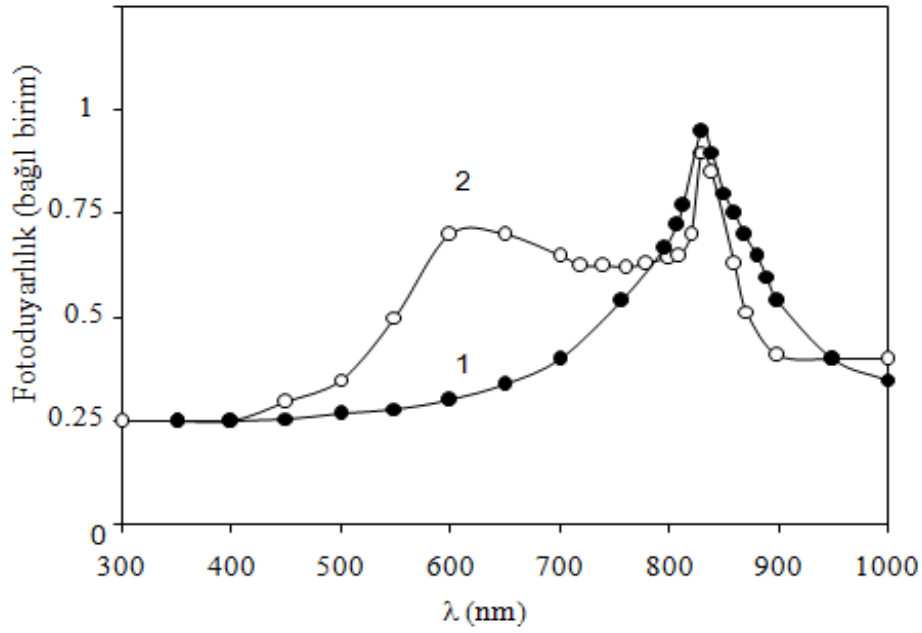
Şekil 4.14 pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin karanlıkta I-V karakteristiği.



Şekil 4.15 pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta I-V karakteristikleri.



Şekil 4.16 pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin sıcaklığa bağlı ters doyma akımı.



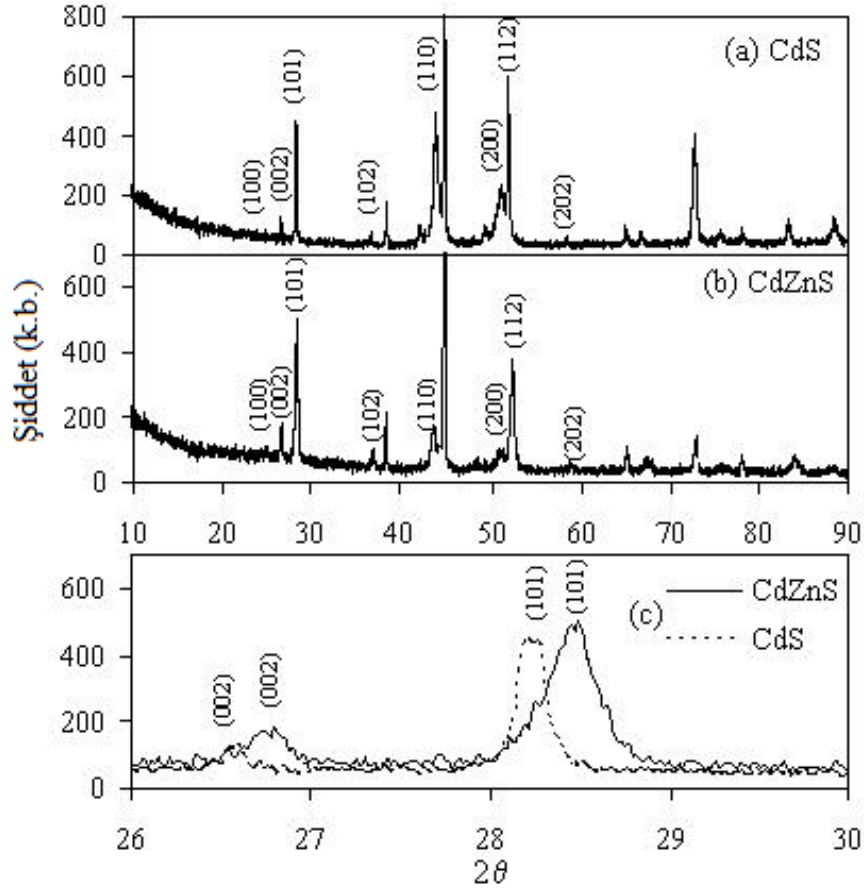
Şekil 4.17 CdTe (1) ve CdZnTe (2) tarafından aydınlatmada pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin fotoduyarlılığın spektral dağılımları.

pCdZnTe/nCdTe heteroeklemi diyot özelliği göstermektedir ve böylece CdZnTe tarafından 500-900 nm dalgaboyu aralığında ışığa duyarlı fotodiyot olarak kullanılabilir.

4.3 Zn Difüzyonunun CdS Filmlerin Yapısal, Elektrik, Optik ve Fotoelektrik Karakteristikleri

4.3.1 Tavlamanın Zn/CdS Yapıların XRD Desenlerine Etkisi

Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle cam üzerine 2 µm kalınlığında büyütülen CdS filmin yüzeyine 275 nm kalınlığında Zn kaplanarak Zn/CdS yapısı oluşturuldu. Katkısız CdS filmin ve Zn/CdS yapısının 570 °C'de 5 dak. tavlama sonrası x-ışının kırınım analizinden hegzagonal yapıda olduğu belirlendi (Şekil 4.18 a-b). XRD desenleri karşılaştırıldığında CdS filmin (101) yönelimindeki pik pozisyonunun ($2\theta=28,1938^\circ$), Zn/CdS yapısının tavlamadan sonra oluşan CdZnS filmin (101) yönelimindeki pik pozisyonuna ($2\theta=28,4748^\circ$) kaydığı gözlemlendi (Şekil 4.18 c). XRD verilerinden düzlemler arasındaki mesafe değerleri kullanılarak 3.11'den CdS ($a=4,107 \text{ \AA}$ ve $c=6,725 \text{ \AA}$) ve CdZnS ($a=3,316 \text{ \AA}$ ve $c=6,335 \text{ \AA}$) filmlerin örgü parametreleri hesaplandı. CdS ve CdZnS filmlerin ortalama tanecik boyutu Debye-Scherrer formülünden (Denklem 3.12) sırasıyla 77 nm ve 52 nm olarak hesaplandı.



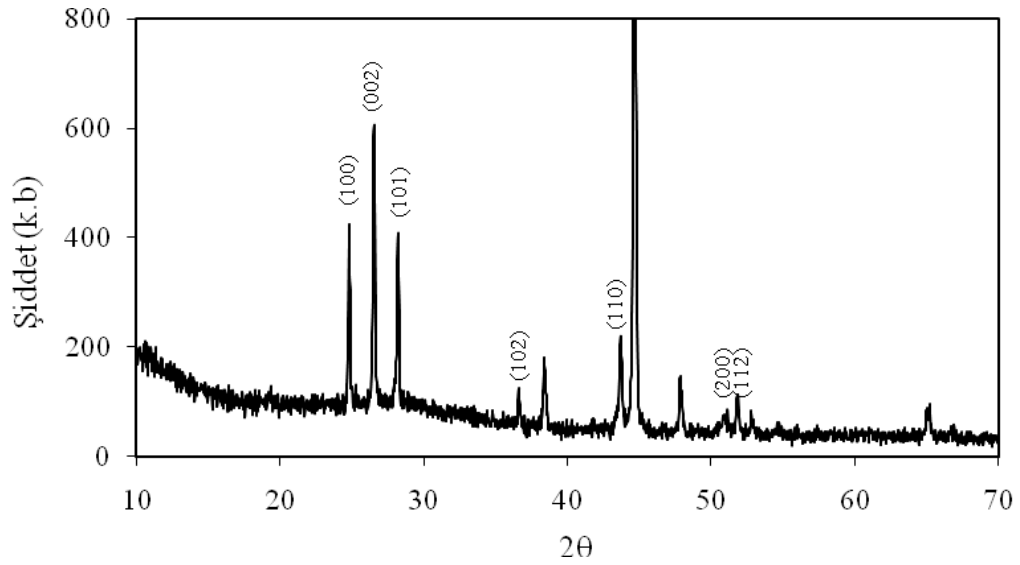
Şekil 4.18 (a) CdS film ve (b) Zn/CdS yapısının 570 °C’de 5 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım desenleri; (c) $2\theta=26-30^\circ$ için (a) ve (b) desenlerin karşılaştırması.

4.3.2 Tavllanmış Zn/CdS Yapılarda Zn Filmin Kalınlığının CdS’nin Örgü Parametrelerine Etkisi

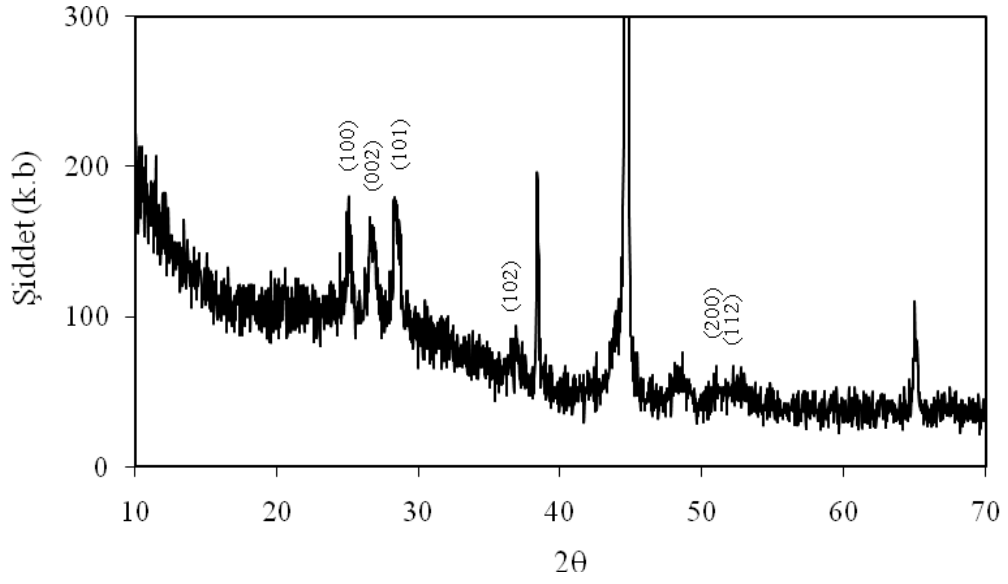
Zn’nin reaktif difüzyonu sonucu oluşan $Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiğin örgü parametrelerinin x kompozisyonuna bağlı olarak değişimini incelemek amacıyla, aynı kalınlıklı CdS filmlerin yüzeyine farklı kalınlıkta Zn kaplanarak oluşturulan Zn/CdS yapılarının aynı sıcaklık ve sürede tavlama sonrası yapısal ve optik absorpsiyon analizi yapıldı. Kimyasal püskürtme yöntemiyle cam altlıklar üzerine 460 nm kalınlığında kaplanan CdS filmlerine 200 nm ve 300 nm kalınlığında Zn kaplandı. Katkısız CdS film, 200 nm Zn kalınlıklı Zn/CdS ve 300 nm kalınlıklı Zn/CdS yapıları 550 °C’de 16 dak. vakumda termal tavlama yapıldı. Termal tavlama sonrası CdS filmin, Zn (200nm)/CdS ve Zn (300nm)/CdS yapıların x-ışını kırınım desenleri Şekil 4.19-4.21’de verildi. X-ışını kırınım analizinden (100), (002), (101) pik yönelimleri, (101) için tanecik boyutları ve örgü parametreleri Çizelge 4.4’de verildi.

Çizelge 4.4 Tavllanmış Zn/CdS yapılarında Zn film kalınlığının CdS'nin örgü parametrelerine etkisi.

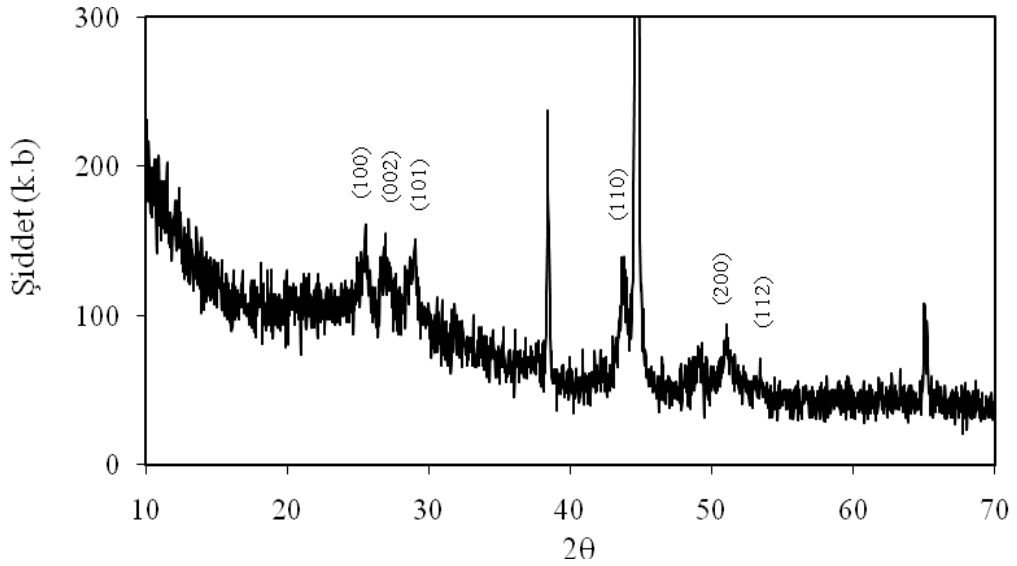
Termal Tavlama	(100) 2 θ	(002) 2 θ	(101) 2 θ	a (Å)	c (Å)	d (nm)
CdS	24,8360	26,5382	28,1984	4,143	6,717	77
Zn(200nm)/CdS	25,1266	26,7614	28,4890	4,099	6,663	16
Zn(300nm)/CdS	25,4850	26,9419	28,9439	4,027	6,619	13



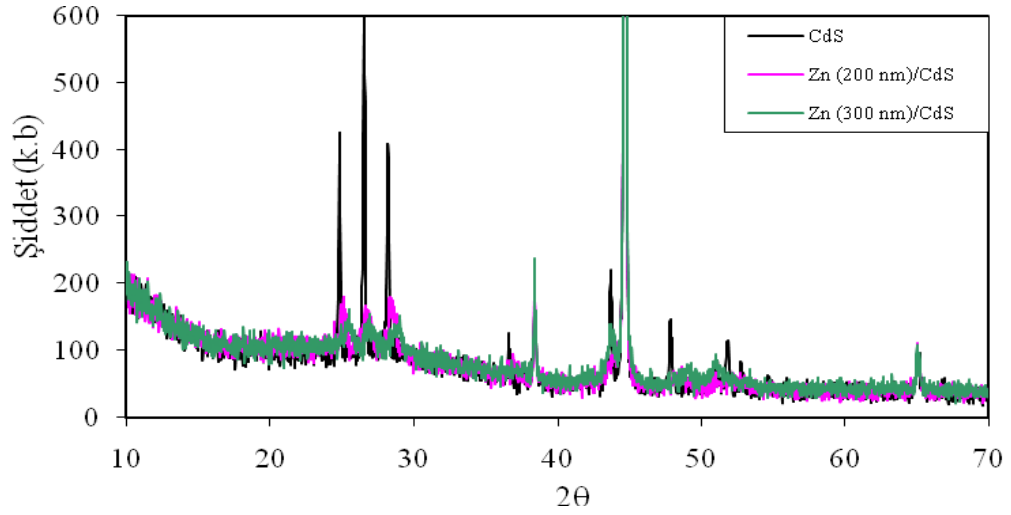
Şekil 4.19 CdS (460 nm) filmin 550 °C'de 16 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım deseni.



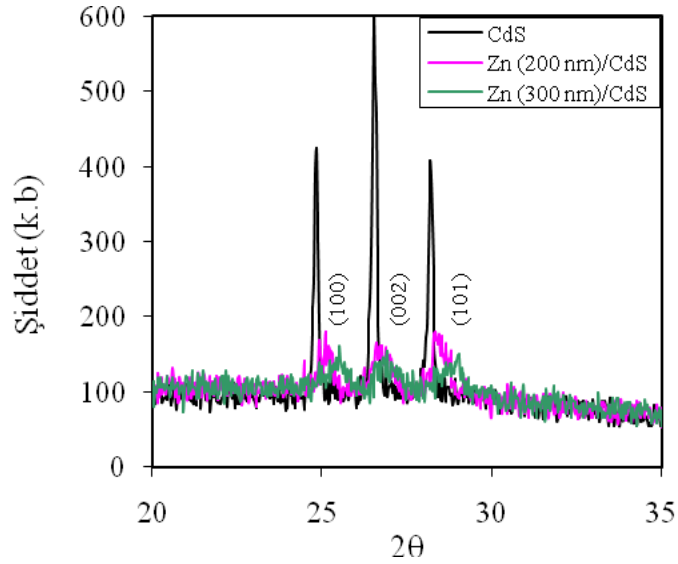
Şekil 4.20 Zn (200nm)/CdS (460nm) yapısının 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım deseni.



Şekil 4.21 Zn (300nm)/CdS (460nm) yapısının 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım deseni.



Şekil 4.22 CdS (460 nm) filmin, Zn (200nm)/CdS (460nm) ve Zn (300nm)/CdS (460nm) yapılarının 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu x-ışını kırınım desenlerinin karşılaştırması.

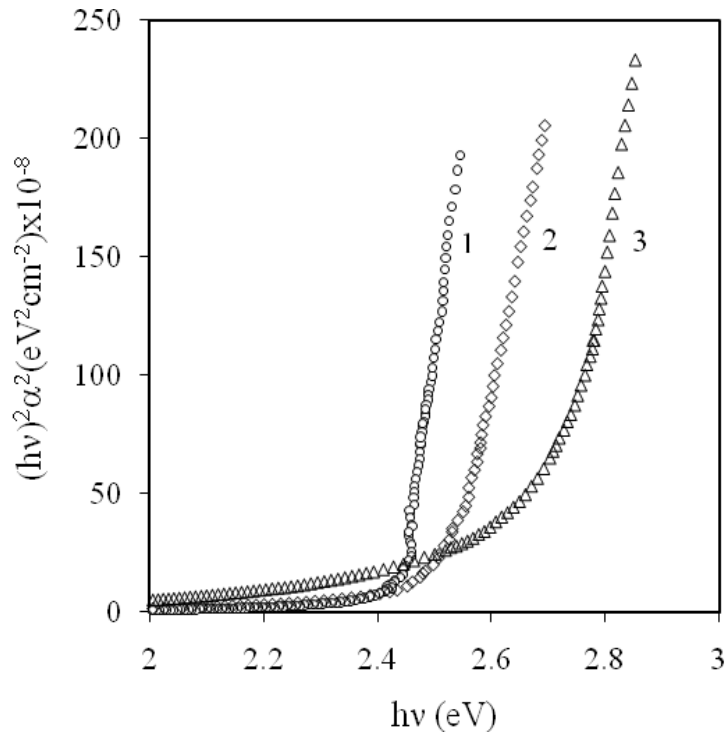


Şekil 4.23 CdS (460 nm) filmin, Zn (200nm)/CdS (460nm) ve Zn (300nm)/CdS (460nm) yapılarının 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu $2\theta=20-35^\circ$ için x-ışını kırınım desenlerinin karşılaştırması.

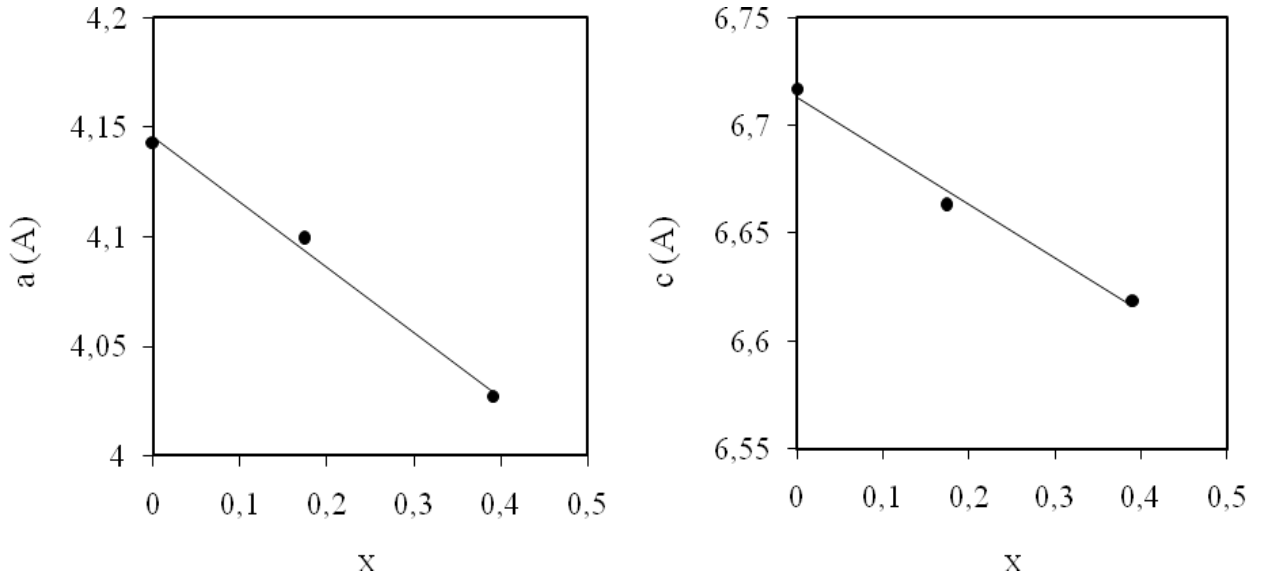
Tavlanmış (550 °C’de 16 dak.) CdS filmin, Zn (200nm)/CdS ve Zn (300nm)/CdS yapıların optik absorpsiyon spektrumlarından (Şekil 4.24) yasak band genişlikleri sırasıyla 2,43 eV, 2,52 eV ve 2,71 eV olarak belirlendi. Zn’nin reaktif difüzyonu sonucu oluşan $Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiğinin yasak band genişliği ile x kompozisyonunu arasındaki

$$E_g(x) = E_g(CdS) + [E_g(ZnS) - E_g(CdS) - b]x + bx^2 \quad (4.3)$$

bağıntısından (Kwok, 1983); Zn (200nm)/CdS ve Zn (300nm)/CdS yapılarının tavlama sonu oluşan $Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiklerindeki x kompozisyon değerleri sırasıyla 0,174 ve 0,391 olarak belirlendi. Denklem 4.3’deki bükülme parametresi (bowing parameter) b’nin değeri 0,91 eV olarak verilmiştir (Kuroyanagi, 1994). $Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiklerinin örgü parametrelerinin x kompozisyon değerine göre değişimi Şekil 4.25’de verildi.



Şekil 4.24 (1) CdS film, Zn kalınlığı (2) 200 nm ve (3) 300 nm olan Zn/CdS yapısının 550°C’de 16 dak. termal tavlama sonucu soğurma katsayısı spektrumları.

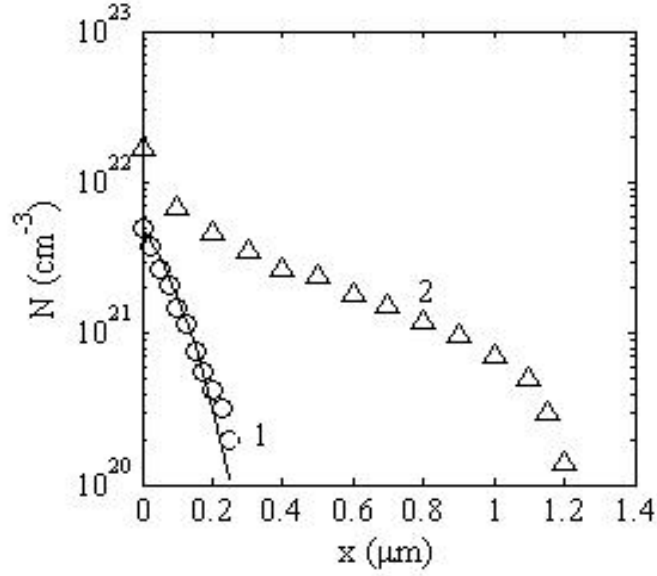


Şekil 4.25 CdS (460 nm) filmin, Zn (200nm)/CdS (460nm) ve Zn (300nm)/CdS (460nm) yapılarının 550 °C’de 16 dak. termal tavlama sonucu örgü parametrelerinin x kompozisyonuna göre değişimi.

X-ışını kırınım desenlerinden (Şekil 4.22-4.23) ve Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi Zn/CdS yapıların tavlama ile oluşan $Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiğinin x kompozisyonuna bağlı olarak (100), (002), (101) piklerinin 2θ değerleri artarken, örgü parametrelerinin değerleri azalmıştır.

4.3.3 CdS Filmlerinde Zn’nin Konsantrasyon Dağılımları ve Difüzyon Katsayıları

CdS filmlerde Zn konsantrasyon dağılımı, EDXRF (Spectro MIDEX-M) ölçüm verileri kullanılarak belirlendi. Zn/CdS yapıları tavlama öncesi ($x=0$) EDXRF yöntemiyle Zn atomlarının K_{α} pik şiddetleri (impuls) belirlendi. Tavlama yapılmış Zn/CdS yapısından peş peşe çok ince tabakalar (0,025-0,1 μm kalınlıklı) çıkarılarak EDXRF ile Zn K_{α} pik şiddetleri ölçüldü ve bu ölçümlerden CdS filmde Zn’nin konsantrasyon dağılımı belirlendi. Zn/CdS yapısı 400 ve 570 °C’de tavlama yapılarak CdS filmde Zn konsantrasyon verileri elde edildi (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 Termal tavlama sonucu Zn'nin CdS filmde konsantrasyon dağılımları. (1) 400 °C 20 dak. (kesiksiz teorik erfç-eğri) ve (2) 570 °C 4 dak.

Şekil 4.26'den görüldüğü gibi Zn/CdS yapısının (1) 400 °C'de 20 dak. ve (2) 570 °C'de 4 dak. tavlama sonucu Zn'nin CdS filmde konsantrasyon dağılımları farklı karakteristiktir. Zn/CdS yapısının 400 °C'de 20 dak. tavlama sonrası CdZnS üçlü bileşiğinin oluşmadığı x-ışını kırınım ve optik absorpsiyon analizlerinden belirlendi. Zn/CdS yapısının 400 °C'de tavllanmasıyla CdZnS üçlü bileşiğin oluşmaması termal tavlama sıcaklığının Zn'nin erime sıcaklığının (418°C) altında olmasına bağlıdır. Bu nedenle Zn/CdS yapısının 400 °C'de tavllanmasıyla CdS filmde Zn'nin konsantrasyon dağılımı

$$N(x,t)=N_0\left(1-\operatorname{erf}\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (4.4)$$

sabit kaynaktan serbest katkı difüzyon dağılım karakteristiği ile belirlenir (Denklem 4.4). CdS filmde Zn konsantrasyon dağılımının (400 °C) deneysel verileri denklem ile verilen teorik eğriye yaklaşık olarak uymaktadır ve bunun için efektif difüzyon katsayısı $D=5 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ olarak belirlendi. Zn/CdS yapısının yüksek sıcaklıkta 570 °C'de 4 dak. tavllanmasıyla CdS filmde Zn konsantrasyon dağılımı (Şekil 4.26-2), denklemdeki gibi sabit kaynaktan katkı difüzyonu ile tanımlanamaz, aşamalı form olan reaktif difüzyon ile karakterize edilir. Yüksek sıcaklıkta katkı difüzyon süreci reaktif karaktere sahip olduğundan, x-ışını kırınım desenlerinden ve optik absorpsiyon spektrumlarında da belirlendiği gibi CdZnS üçlü bileşiği oluşur. Zn/CdS yapısı tavlama ile CdZnS/CdS yapısına dönüşür ve difüzyon süresince CdZnS üçlü bileşiği CdS filmin içine doğru hareket eder. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ üçlü bileşiğin x kompozisyonu

örneğin yüzeyinden içine doğru değişkenlik gösterir ve bu nedenle değişken band yapısıyla karakterize edilir.

Böylece Zn/CdS yapısının 400 °C’de tavllanmasıyla Zn’nin CdS filmde difüzyon dağılım karakteristiği sabit kaynaktan serbest katkı difüzyonunu ile belirlenip, Zn’nin CdS filmde efektif difüzyon katsayısı $D=5 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ olarak belirlendi.

4.3.4 Tavllanmış Zn/CdS Yapıların Optik Soğurma Spektrumları

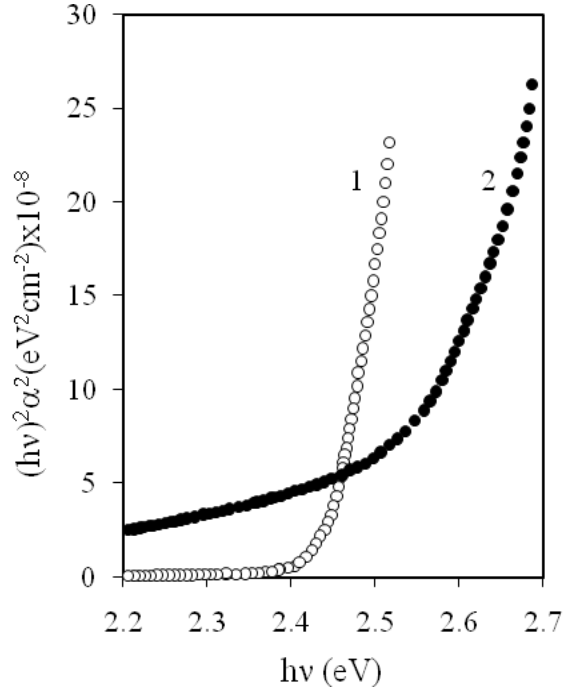
Katkısız CdS filmlerin ve Zn/CdS yapılarının tavlama sonrası optik geçirgenlik spektrumları 300-1100 nm dalgaboyu aralığında ölçüldü. Optik geçirgenlik spektrumundan enerjiye bağlı soğurma katsayısı spektrumları çizildi ve spektrum eğrisinin lineer kısmından alınan eğimin enerji eksenini kestiği değerden yasak band genişlikleri belirlendi. CdS filmin optik absorpsiyon spektrum eğrisi tek eğim ile karakterize edilip yasak band genişliği $E_g=2,43 \text{ eV}$ olarak belirlendi (Şekil 4.27-1). 570 °C’de 3 dak. tavlanan Zn (275nm)/CdS (2µm) yapısının optik absorpsiyon spektrum eğrisi tek eğim ile karakterize edilemez ancak değişken eğimlerle karakterize edilebilir (Şekil 4.27-2). Bu eğrinin yüksek enerji bölgesindeki ve orta enerji bölgesindeki eğri parçasının lineer kısımlarından alınan eğim, enerji eksenini sırasıyla 2,55 eV ve 2,43 eV’de kesmektedir. Böylece 570 °C de tavllanmış Zn/CdS yapısının yasak band genişliği örneğin yüzey bölgesindeki en büyük değerden (CdZnS) $E_g=2,55 \text{ eV}$, örneğin daha iç bölgesindeki (CdS) $E_g=2,43 \text{ eV}$ ’ye kadar değişir. Zn/CdS yapısında düşük enerji absorpsiyonu ($h\nu < 2,4 \text{ eV}$) tavlama süresince yapıda kusurların atmasıyla ilişkilendirilebilir.

Zn/CdS yapısının 570 °C de termal tavlama süresine bağlı olarak oluşan CdZnS üçlü bileşiğinin optik absorpsiyon spektrumunun yüksek enerji bölgesinden belirlenen yasak band genişliğinin değişimi Şekil 4.28’de gösterildi. Zn/CdS yapısının tavlama süresi arttıkça oluşan CdZnS üçlü bileşiğin yasak band genişliği doyma zamanına kadar artmıştır ($t > t_s = 4 \text{ dak}$). Bu şekildeki E_g -t davranışı, CdS filme Zn’nin reaktif difüzyonu sonucu oluşan $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ üçlü bileşiğinden kaynaklanmaktadır.

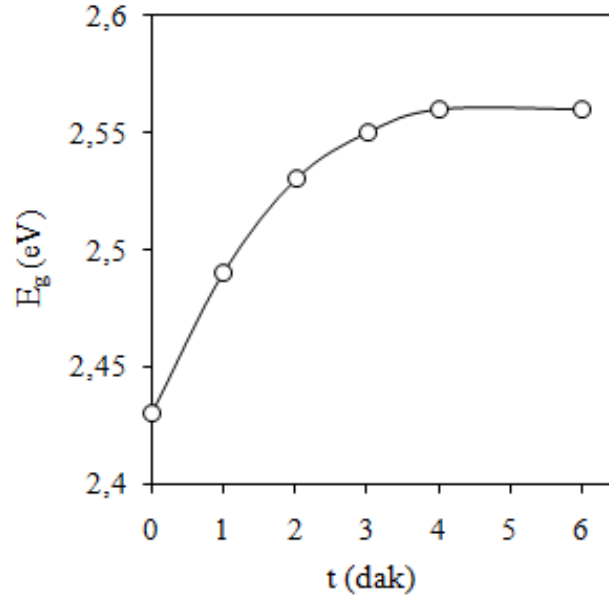
$\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ üçlü bileşiğinin yasak band genişliği ile (x) kompozisyonu arasındaki

$$E_g(x) = E_g(\text{CdS}) + [E_g(\text{ZnS}) - E_g(\text{CdS}) - b]x + bx^2 \quad (4.5)$$

bağıntısından; 570 °C’de 6 dak. Zn’nin CdS filme difüzyonu sonucu oluşan $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ üçlü bileşiğinin ($E_g=2,56 \text{ eV}$) kompozisyon değeri $x=0,23$ olarak belirlendi ($\text{Cd}_{0,77}\text{Zn}_{0,23}\text{S}$). Denklemden b’nin değeri 0,91 eV olarak verilmiştir (Kuroyanagi, 1994).



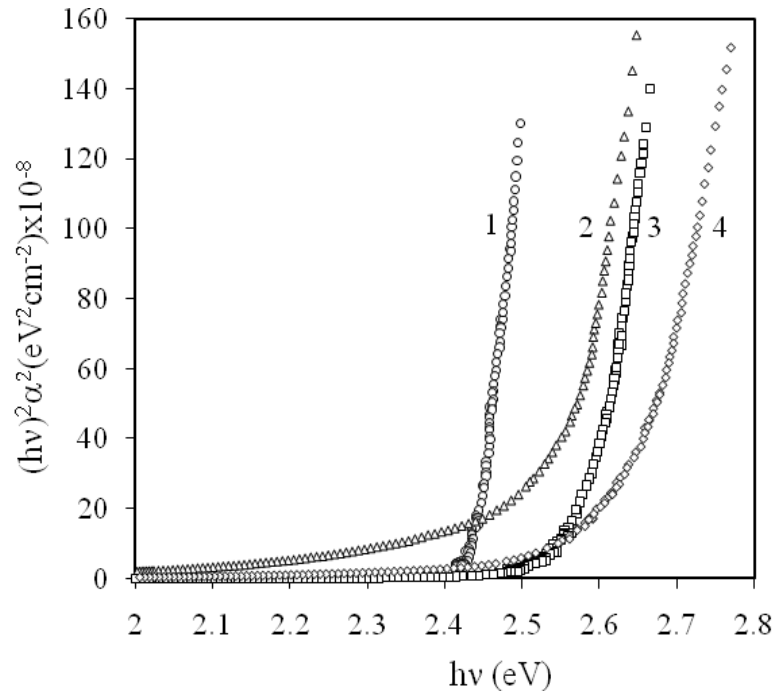
Şekil 4.27 (1) CdS film ve (2) Zn/CdS ($d_{Zn}=275\text{nm}$, $d_{CdS}=2\mu\text{m}$) yapısının 570 °C de 3 dak. termal tavlama sonucu soğurma katsayısı spektrumları.



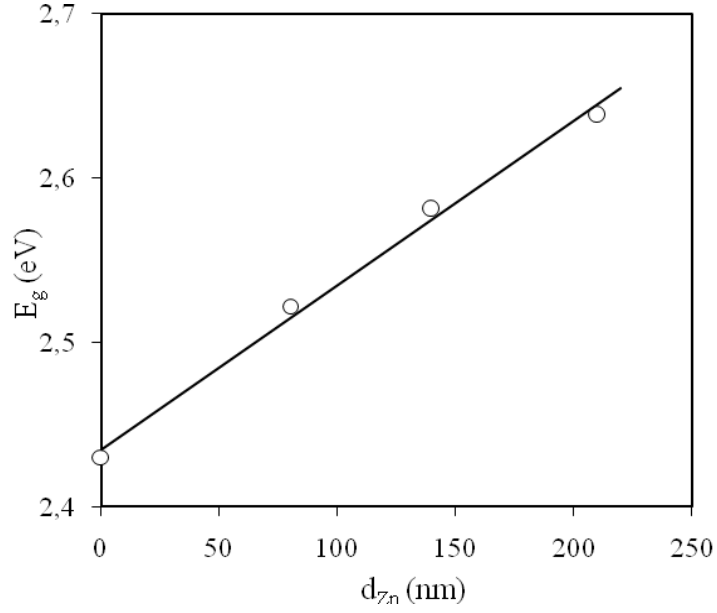
Şekil 4.28 Zn/CdS yapısının yasak band genişliğinin 570 °C’de termal tavlama süresine bağlı değişimi.

CdS filme Zn'nin reaktif difüzyonu sonucu oluşan $Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiğin x kompozisyonu Zn atomlarının miktarı ile belirlenir. Böylece Zn/CdS yapısının sabit sıcaklık ve sürede tavllanmasıyla oluşan $Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiğin yasak band genişliği difüzyon öncesi CdS filmin yüzeyindeki Zn kalınlığına bağlı olmalıdır. CdS filmin ($d_{CdS}=0,63\mu m$) ve farklı Zn kalınlıklı ($d_{Zn}=80, 140$ ve $210nm$) Zn/CdS ($d_{CdS}=0,63\mu m$) yapılarının $540^\circ C$ 'de 18 dak. termal tavlama sonrası optik absorpsiyon spektrumları Şekil 4.29'de gösterilmiştir. Buradan görüldüğü gibi sabit sıcaklıkta ve aynı sürede tavlanan Zn/CdS yapılarında CdS filmin yüzeyindeki Zn kalınlığı arttıkça absorpsiyon spektrum sınırı yüksek enerji bölgesine kaymaktadır. Zn/CdS yapısının tavllanmasıyla, CdS filme Zn'nin reaktif difüzyonu sonucu oluşan $Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiği yasak band genişliği, Zn'nin konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir.

Sabit sıcaklık ve sürede tavlanan Zn/CdS yapılarında CdS filmin yüzeyindeki Zn kalınlığına bağlı olarak oluşan CdZnS üçlü bileşiğinin yasak band genişliği Şekil 4.29'daki optik absorpsiyon spektrumlarından belirlenerek Şekil 4.30 hazırlandı. Zn kalınlığı 0 ile 210 nm arasında değişen Zn/CdS yapısının, vakumda $540^\circ C$ 'de 18 dak. termal tavlama sonucu oluşan $Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiğin yasak band genişliğinin Zn kalınlığına bağlı olarak 2,43 eV'den 2,64 eV'ye kadar arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.29 (1) CdS film, Zn kalınlığı (2) 80 nm, (3) 140 nm ve (4) 210 nm olan Zn/CdS yapısının $540^\circ C$ 'de 18 dak. termal tavlama sonucu soğurma katsayısı spektrumları.



Şekil 4.30 Zn kalınlığına bağılı olarak Zn/CdS yapısının 540 °C’de 18 dak. tavlama sonucu yasak enerji aralığı değişimi.

Çizelge 4.5 Zn kalınlığına bağılı olarak Zn/CdS yapısının 540 °C’de 18 dak. tavlama sonucu yasak enerji aralığı ve kompozisyon değişimi.

CdS (nm)	Zn (nm)	E_g	x
630	0	2,43	0
630	80	2,52	0,174
630	140	2,58	0,253
630	210	2,64	0,321

Böylece Zn/CdS yapılarının tavlınması neticesinde oluşan $Cd_{1-x}Zn_xS$ üçlü bileşiğin yasak band genişliği, tavlama süresine ve Zn konsantrasyonuna bağılı olarak artmıştır.

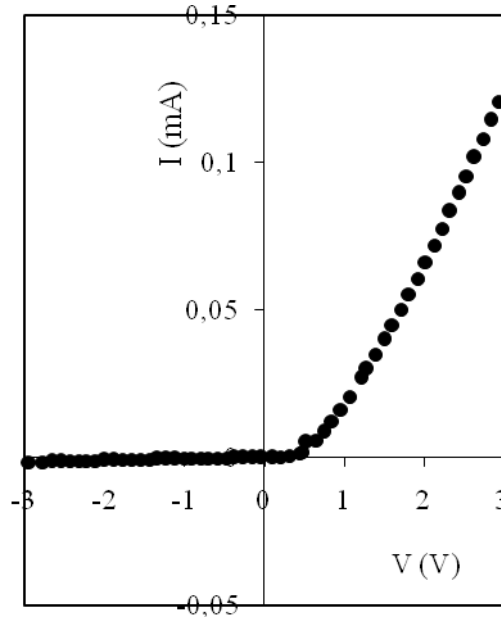
4.4 CdZnS Esaslı Güneş Pillerin Karakteristikleri

4.4.1 CdTe/CdS ve CdTe/CdZnS Pillerin Elektrik ve Fotovoltaik Karakteristikleri

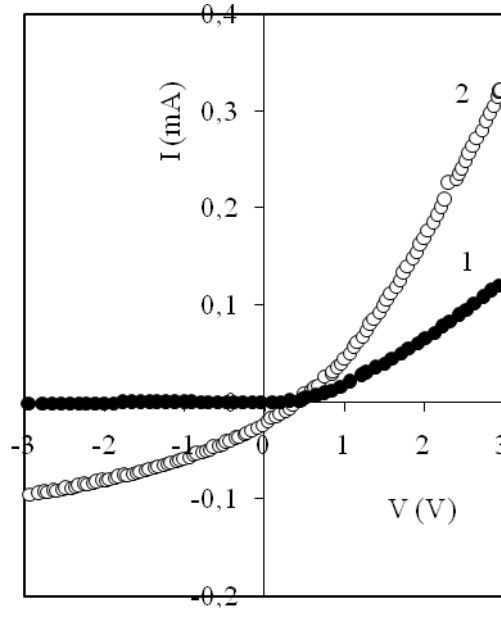
Kimyasal püskürtme yöntemiyle SnO_2 kaplı cam üzerine kaplanan CdS filmlerden birinin yüzeyine Zn kaplandı. CdS/ SnO_2 ve Zn/CdS/ SnO_2 yapıları 550 °C’de 15 dak. vakumda termal tavlama yapıldı. Tavlanan Zn/CdS/ SnO_2 yapısı, Zn’nin CdS filme reaktif difüzyonu sonucu

CdZnS/SnO₂ yapısına dönüştü. Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle CdS/SnO₂ ve CdZnS/SnO₂ yapılarına aynı şartlarda CdTe film kaplanarak CdTe/CdS/SnO₂ ve CdTe/CdZnS/SnO₂ heteroeklem güneş pilleri elde edildi. CdTe/CdS ve CdTe/CdZnS heteroeklem güneş pillerin akım-gerilim karakteristiği (Şekil 4.31-4.35) ve fotoduyarlılığın spektral dağılım (Şekil 4.36) ölçümleri yapıldı.

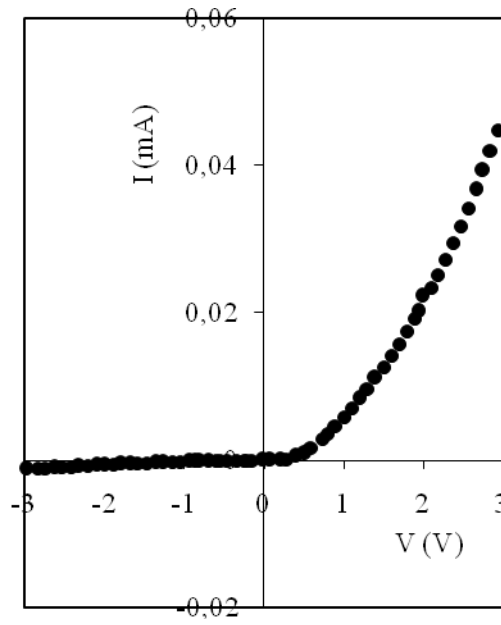
CdTe/CdZnS güneş pilinin akım-gerilim karakteristikleri CdTe/CdS güneş piline oranla, doğru yönde aydınlık altındaki akım değeri artarken, karanlıktaki akım değeri azalmıştır. CdTe/CdS güneş pilinde açık devre gerilimi $V_{oc}=400$ mV ve kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc}=2,1$ mA/cm², CdTe/CdZnS güneş pilinde ise açık devre gerilimi $V_{oc}=425$ mV ve kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc}=2,9$ mA/cm²'dir (Şekil 4.35). CdTe/CdS ve CdTe/CdZnS yapıların spektral duyarlılıkları Şekil 4.36'da verilmiştir. CdTe/CdZnS güneş pilinin fotoduyarlılığın kısa dalgaboyu sınırı CdTe/CdS güneş piline oranla 508 nm'den (2,44 eV) 487 nm'ye (2,54 eV) kaymıştır.



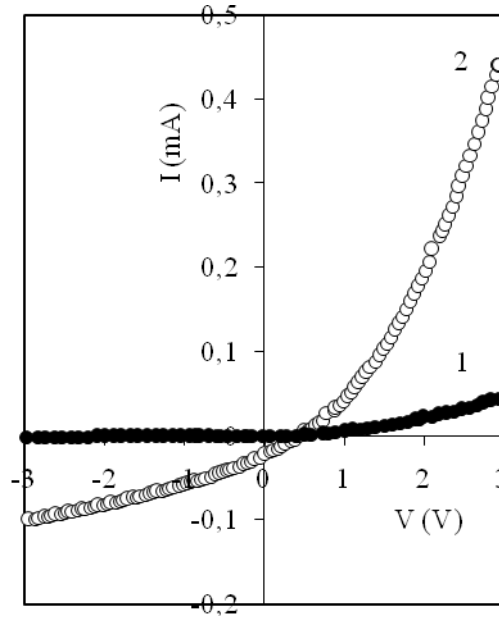
Şekil 4.31 pCdTe/nCdS pilin karanlıkta I-V karakteristiği.



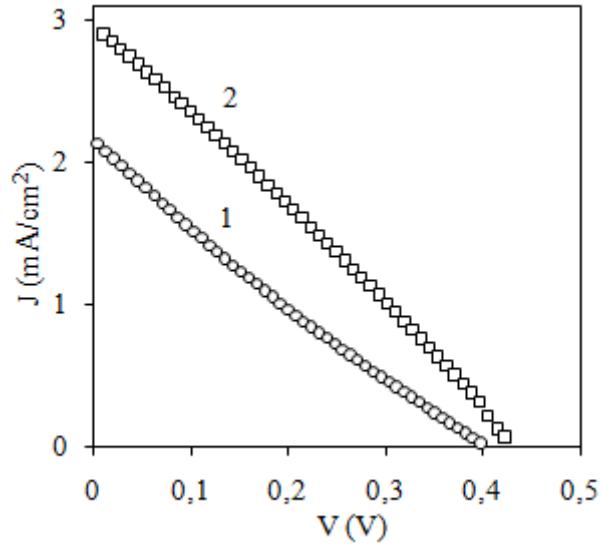
Şekil 4.32 pCdTe/nCdS pilin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta I-V karakteristikleri.



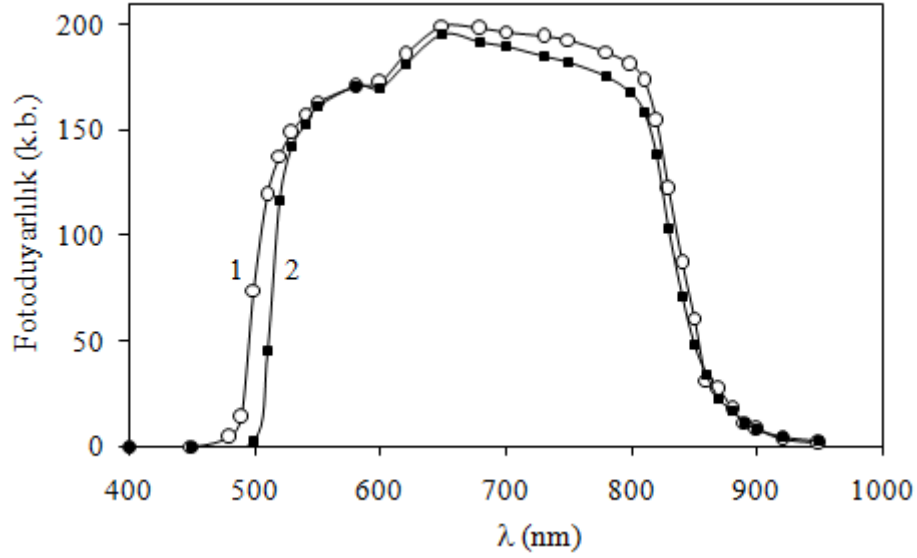
Şekil 4.33 pCdTe/nCdZnS pilin karanlıkta I-V karakteristiği.



Şekil 4.34 pCdTe/nCdZnS pilin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta I-V karakteristikleri.



Şekil 4.35 (1) pCdTe/nCdS ve (2) pCdTe/nCdZnS pillerin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri.



Şekil 4.36 (1) pCdTe/nCdZnS ve (2) pCdTe/nCdS yapılarının fotoduyarlılık spektrumları.

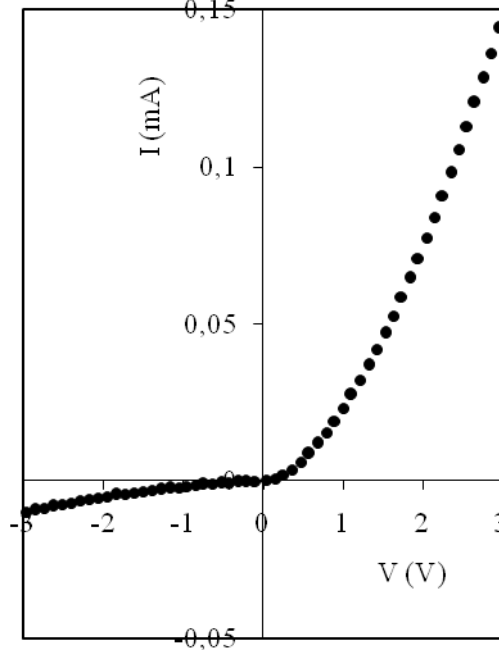
Böylece CdS filme Zn'nin reaktif difüzyonu sonucu oluşan CdTe/CdZnS heteroeklemin fotovoltajik parametreleri, CdTe/CdS heteroeklemin parametrelerinden daha yüksektir ve fotoduyarlılık spektrumu daha geniştir. Buda daha geniş yasak banda sahip olan CdZnS'nin ($E_g=2,54$ eV), CdS filme nazaran ($E_g=2,43$ eV) geniş “pencere” özelliğine sahip olmasına bağlıdır.

4.4.2 CdS/CdTe ve CdZnS/CdS/CdTe Pillerin Elektrik ve Fotovoltajik Karakteristikleri

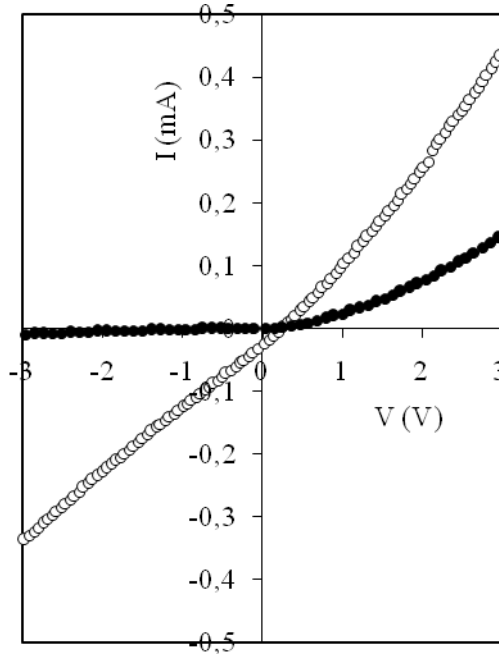
Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle SnO_2 kaplı cam üzerine aynı şartlarla kaplanan p-tipi CdTe filmlerin ($d_{\text{CdTe}}=1,5-2$ μm) yüzeyine, kimyasal püskürtme yöntemiyle CdS filmler ($d_{\text{CdS}}=3,15$ μm) kaplanarak CdS/CdTe/ SnO_2 yapıları oluşturuldu. Bu yapılardan birinin yüzeyine 260 nm Zn kaplanarak Zn/CdS/CdTe/ SnO_2 yapısı oluşturuldu. CdS/CdTe/ SnO_2 ve Zn/CdS/CdTe/ SnO_2 yapıları, 550 °C'de 11 dak. vakumda termal tavlama yapıldı. Zn difüzyonu sonucu oluşan CdZnS/CdS/CdTe pilin ve CdS/CdTe pilin akım-gerilim karakteristiği (Şekil 4.36-4.40) ve fotoduyarlılığın spektral dağılımı (Şekil 4.42) ölçümleri yapıldı.

CdZnS/CdS/CdTe pilinin akım-gerilim karakteristikleri, CdS/CdTe piline oranla doğru yönde karanlıktaki ve aydınlık altındaki akım değerleri biraz azalmıştır. CdS/CdTe pilinde açık devre gerilimi $V_{oc}=250$ mV ve kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc}=3,5$ mA/cm^2 , CdZnS/CdS/CdTe

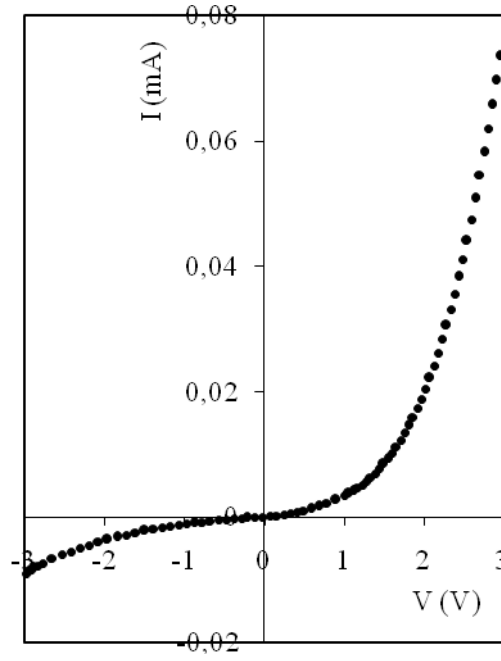
pilinde ise açık devre gerilimi $V_{oc}=500$ mV ve kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc}=4,1$ mA/cm²'dir (Şekil 4.41). CdS/CdTe ve CdZnS/CdS/CdTe yapıların spektral duyarlılıkları Şekil 4.42'de verilmiştir. CdZnS/CdS/CdTe pilinin fotoduyarlılığı CdS/CdTe piline oranla artmıştır.



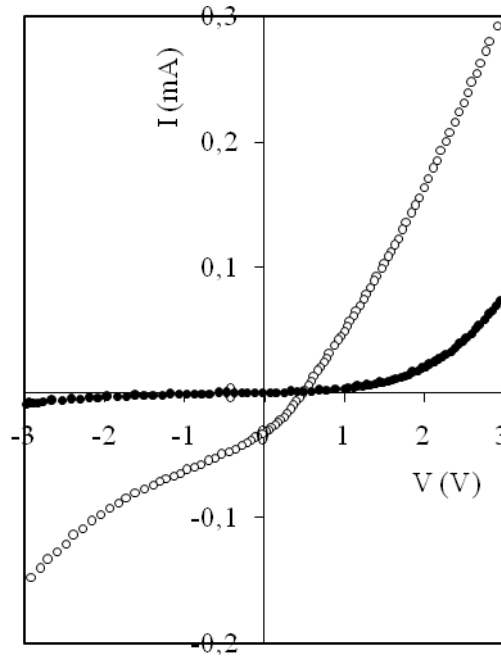
Şekil 4.37 nCdS/pCdTe pilin karanlıkta I-V karakteristiği.



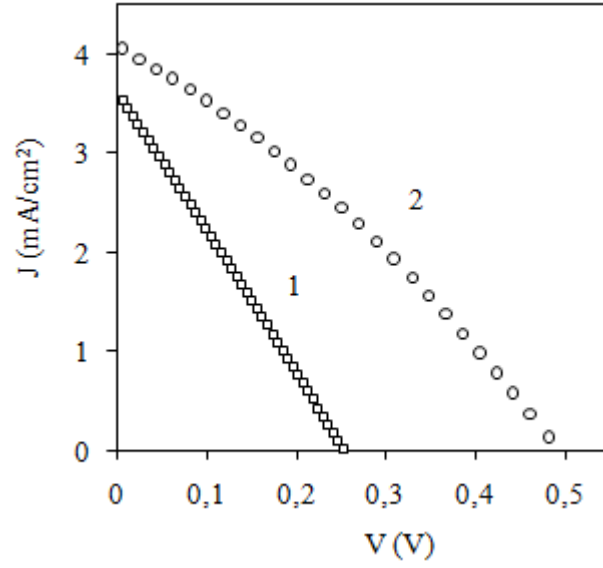
Şekil 4.38 nCdS/pCdTe pilin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta I-V karakteristikleri.



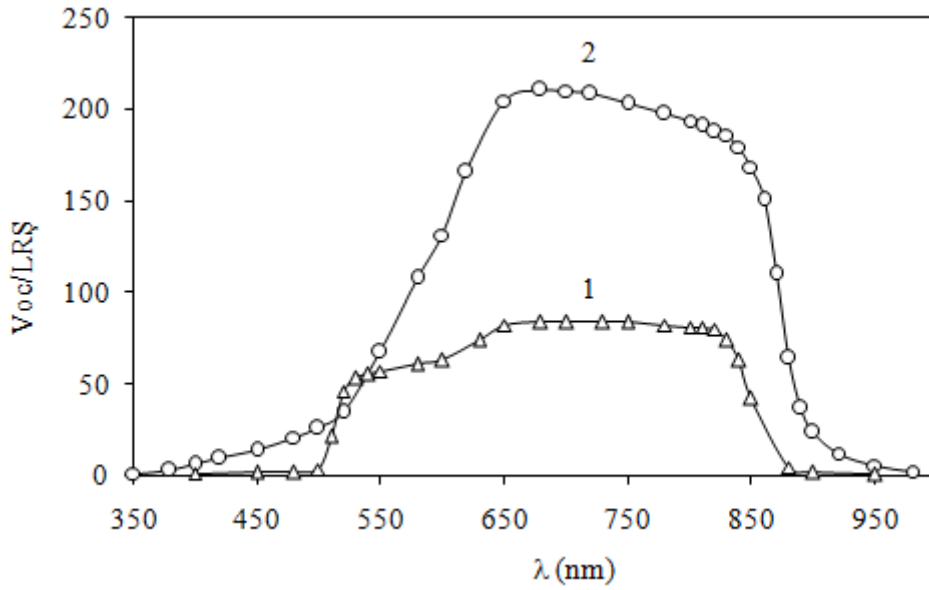
Şekil 4.39 nCdZnS/CdS/pCdTe pilin karanlıkta I-V karakteristiği.



Şekil 4.40 nCdZnS/CdS/pCdTe pilin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta I-V karakteristikleri.



Şekil 4.41 (1) nCdS/pCdTe ve (2) nCdZnS/CdS/pCdTe pillerinin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri.



Şekil 4.42 (1) nCdS/pCdTe ve (2) nCdZnS/CdS/pCdTe yapılarının fotoduyarlılık spektrumları.

Şekil 4. 42 den görüldüğü gibi CdZnS/CdS/CdTe heteroeklemlerin fotoduyarlılık spektrumu CdS/CdTe heteroeklemlerine nazaran daha geniş spektral bölgede (400-950 nm) gözükmetedir. Böylece CdZnS/CdS/CdTe/SnO₂ pillerin fotovoltatik parametrelerinin ($V_{oc}=500$ mV, $J_{sc}=4,1$ mA/cm²), CdS/CdTe/SnO₂ pillerinden daha yüksek olması ($V_{oc}=250$ mV, $J_{sc}=3,5$ mA/cm²) CdZnS filmlerin daha iyi optik pencere özelliği göstermesindedir.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

1. Zn-CdTe

Bu çalışmada ilk defa CdTe filmlerine Zn'nin difüzyonu ile üçlü CdZnTe fazların yeni elde etme teknolojisi geliştirildi. Elde edilen CdZnTe filmlerin ve CdZnTe/CdTe eklemim yapısal, elektrik, optik, fotovoltaiik parametreleri incelendi. X-ışını kırınım analizinden Zn'nin CdTe filme difüzyonu neticesinde CdTe'nin yüzey bölgesinde CdZnTe fazın oluştuğu belirlendi.

Ayrıca daha düşük sıcaklıkta (400 °C) Zn/CdTe yapıların tavllanmasıyla üçlü fazın oluşmadığı gözlemlendi. Üçlü fazının oluşmamasının sebebi bu sıcaklığın (400 °C) Zn'nin erime sıcaklığından (418 °C) daha düşük olması ile yorumlandı.

Optik soğurma spektrum ölçümlerinden elde edilen CdZnTe bileşiğinin yasak band genişliği tavlama sıcaklığına bağlı olarak 1,5 eV'den 1,66 eV'ye kadar arttığı gösterildi. CdZnTe fazın oluşması, Zn katkısının CdTe'de reaktif difüzyon mekanizması ile bağlı olduğu ileri sürüldü. 400-520°C sıcaklıkları arasında Zn'nin CdTe filmlerine difüzyonu optik soğurma spektrumları kullanılarak incelendi. 430-520 °C sıcaklıkları arasında Zn'nin CdTe filmlerinde difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi uygun olarak değiştiği gözlemlendi $D=2,5 \times 10^{-3} \exp(-1,30 \text{ eV}/kT) \text{ cm}^2/\text{s}$.

pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin akım-gerilim karakteristikleri incelendi ve bu eklemlerin güneş spektrumuna fotoduyarlılık özellikleri oldukları gösterildi. 550 °C'de 2 dak. süre ile Zn'nin CdTe filme difüzyonu neticesinde elde edilen pCdZnTe/nCdTe pilin fotovoltaiik parametrelerinin açık devre gerilimi $V_{oc}=140 \text{ mV}$ ve kısa devre fotoakım yoğunluğu $J_{sc}=0,5 \text{ mAcm}^{-2}$ olduğu belirlendi. Fotoakım nispeten küçük değeri pCdZnTe/nCdTe heteroeklemindeki yüksek özdirenciyle ($10^{11} \Omega \text{ cm}$) ilişkilendirildi.

pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin enerji band diyagramını çizmek için gereken parametreler Çizelge 4.3'de verilmiştir ve bu parametreler kullanılarak eklemim enerji-band diyagramı Şekil 4.49'da verilmiştir.

Bu band diyagramından görüldüğü gibi eklemimdeki engel yüksekliği 0,48 eV'dir. pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin sıcaklığa bağlı ters doyma akımından elde edilen engel yüksekliği 0,72 eV'dir (Şekil 4.16). Bu engel yüksekliğinin değeri ideal (kusursuz) heteroeklemler için hesaplanan engel yüksekliğinin farkını CdZnTe-CdTe sınırında meydana gelen ve rekombinizasyon merkezi haline gelen kusurlarla ilişkilidir.

2. Zn-CdS

Zn'nin CdS filmlere difüzyonu ile üçlü CdZnS fazları yeni elde etme teknolojisi geliştirildi. X-ışını kırınım analizlerinden CdS filmin yüzey bölgesinde CdZnS üçlü bileşiğinin oluştuğu belirlendi. CdZnS filmlerin yapısal, elektrik ve optik özellikleri incelendi.

Zn/CdS yapılarının, Zn'nin erime sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda tavllanmasıyla CdZnS üçlü bileşiği oluştuğu gözlenirken 400 °C'de tavllanmasıyla CdZnS fazının oluşmadığı gözlemlendi. CdZnS fazının oluşmaması, Zn/CdS yapısının tavlama sıcaklığının Zn'nin erime sıcaklığından (418 °C) daha düşük olması ile yorumlandı.

CdS filme Zn difüzyonu ile oluşan CdZnS üçlü bileşiğinin örgü parametrelerinin Zn konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği x-ışını kırınım analizlerinden belirlendi. Zn/CdS yapısının Zn'nin erime sıcaklığından düşük ve daha yüksek sıcaklıklarda tavlınmaları sonucu Zn'nin CdS filmde konsantrasyon dağılımlarının farklı karakteristikte olduğu EDXRF analiz verileri kullanılarak belirlendi. Zn/CdS yapısının 400 °C'de tavllanmasıyla Zn'nin CdS filmde difüzyon dağılım karakteristiği, sabit kaynaktan serbest katkı difüzyonuna uyduğu gözlemlendi. CdS filmde Zn konsantrasyon dağılımının (400 °C) deneysel verileri kullanılarak oluşturulan teorik eğriden Zn'nin CdS filmde efektif difüzyon katsayısı $D=5 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ olarak belirlendi. Zn/CdS yapısının yüksek sıcaklıkta (570 °C) tavllanmasıyla CdS filmde Zn konsantrasyon dağılımı aşamalı form olan reaktif difüzyon ile karakterize edilebileceği ileri sürüldü.

Optik soğurma spektrum ölçümlerinden belirlenen CdZnS bileşiğinin yasak band genişliği, Zn/CdS yapısının tavlama sıcaklığına, tavlama süresine ve Zn kalınlığına bağlı olarak arttığı gözlemlendi. CdZnS bileşiğinin yasak band genişliği bu değişkenlere bağlı olarak 2,43 eV'den 2,71 eV'ye kadar değiştiği gösterildi.

CdZnS/CdTe, CdZnS/CdS/CdTe ve CdS/CdTe pillerin akım-gerilim karakteristikleri ve fotoduyarlılık spektrumları incelendi. CdZnS/CdTe heteroekleminin CdS/CdTe heteroeklemine oranla fotovoltik özelliklerinin; açık devre gerilimi 400 mV'den 425 mV'ye ve kısa devre akım yoğunluğu 2,1 mA/cm²'den $J_{sc}=2,9 \text{ mA/cm}^2$ 'ye kadar arttığı gösterildi. CdZnS/CdTe pilin fotoduyarlılığın kısa dalgaboyu sınırı CdS/CdTe heteroeklemine oranla 508 nm'den (2,44 eV) 487 nm'ye (2,54 eV) kaydığı belirlendi. CdZnS/CdS/CdTe pilin fotovoltik parametrelerinin ($V_{oc}=500 \text{ mV}$, $J_{sc}=4,1 \text{ mA/cm}^2$), CdS/CdTe heteroeklemin fotovoltik parametrelerinden daha yüksek olduğu ($V_{oc}=250 \text{ mV}$, $J_{sc}=3,5 \text{ mA/cm}^2$) gösterildi. CdS filme Zn'nin reaktif difüzyonu sonucu oluşan CdZnS/CdTe ve CdZnS/CdS/CdTe

heteroeklemlerin fotovoltaik parametreleri, CdS/CdTe pilin parametrelerinden daha yüksek ve fotoduyarlılık spektrumun daha geniş olması, CdZnS üçlü bileşiğinin CdS filme oranla daha geniş yasak band genişliğine ve geniş “pencere” özelliğine sahip olmasıyla ilişkilendirildi. Çizelge 4.3’de verilen parametreler kullanılarak heteroeklemlerin enerji-band diyagramları çizilmiştir (Şekil 4.50-4.53).

Yarıiletkenlerde iletkenlik tipine bağlı olarak Çizelge 4.3’deki değerlerden yararlanarak Fermi seviyesinin yeri; n-tipi yarıiletkenlerde,

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_g - E_F}{kT}\right) \Rightarrow E_g - E_F = kT \ln\left(\frac{N_c}{n}\right) \quad (4.6)$$

p-tipi yarıiletkenlerde,

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F}{kT}\right) \Rightarrow E_F = kT \ln\left(\frac{N_v}{p}\right) \quad (4.7)$$

denklemlerinden hesaplandı. Burada N_c iletim bandındaki ve N_v valans bandındaki etkin durum yoğunluklarıdır. Denklemdaki n elektronların iletim bandındaki konsantrasyonu ve p deliklerin valans bandındaki konsantrasyonudur. Yarıiletkenlerin iletkenlik tipine ve öz dirençlerine bağlı olarak n ve p konsantrasyonları, n-tipi yarıiletkenlerde

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ne\mu_n} \Rightarrow n = \frac{1}{\rho e\mu_n} \quad (4.8)$$

p-tipi yarıiletkenlerde,

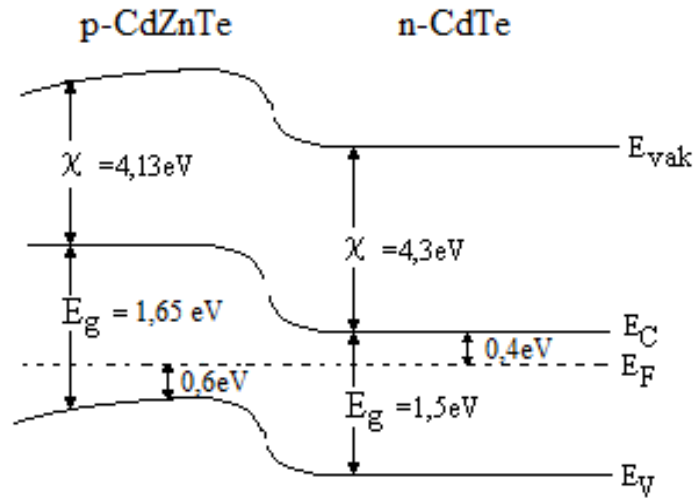
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{pe\mu_p} \Rightarrow p = \frac{1}{\rho e\mu_p} \quad (4.9)$$

denklemlerinden belirlendi. Burada ρ öz direnç ve μ mobilitedir.

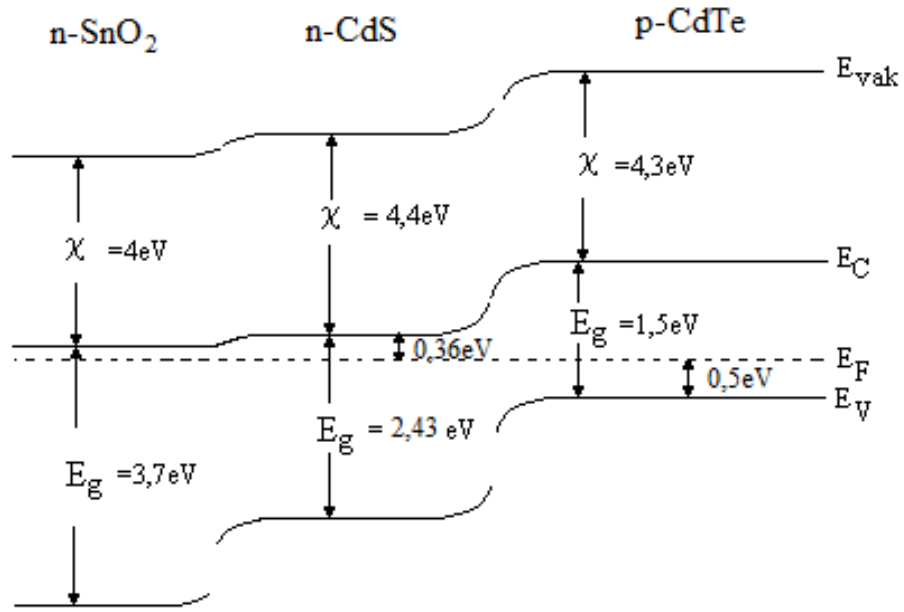
CdTe’nin çıkış işinden ZnTe’nin çıkış işine x kompozisyon değerine bağlı olarak yaklaşık lineer değiştiği düşünülerek CdZnTe üçlü bileşiğinin çıkış işi belirlendi. CdZnS üçlü bileşiğinin çıkış işi, CdS’nin çıkış işinden ZnS’nin çıkış işine x kompozisyon değerine bağlı olarak yaklaşık lineer değiştiği düşünülerek belirlendi. CdZnTe ve CdZnS fermi seviyesi ise yasak band genişliğinin artmasıyla aynı oranda fermi seviyesinin arttığı düşünülerek belirlendi.

Çizelge 4.6 Yarıiletkenlerin bazı parametreleri.

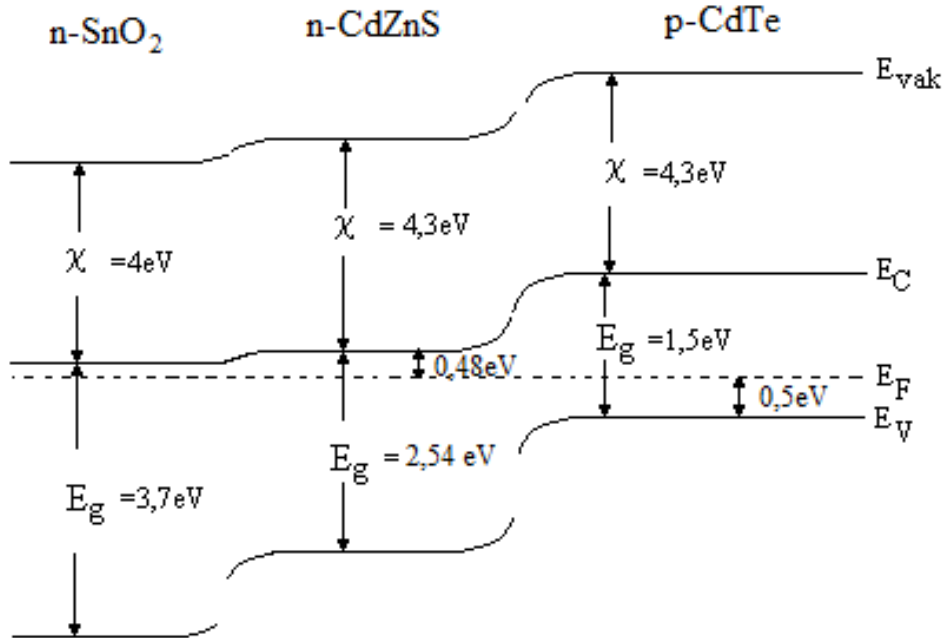
Yarıiletken	E_g (eV)	χ (eV)	μ_n (cm ² /Vs)	μ_p (cm ² /Vs)	N_c (cm ⁻³)	N_v (cm ⁻³)	E_F (eV)
CdTe	1,5	4,3	500	60	$7,5 \cdot 10^{17}$	$1,8 \cdot 10^{18}$	(n) $E_c-0,4$ (p) $E_v+0,5$
CdS	2,43	4,4	350	50	$1,8 \cdot 10^{19}$	$2,4 \cdot 10^{19}$	(n) $E_c-0,36$
ZnTe	2,3	3,53	340	100			
ZnS	3,7	3,9	165	5			
SnO ₂	3,7	4					



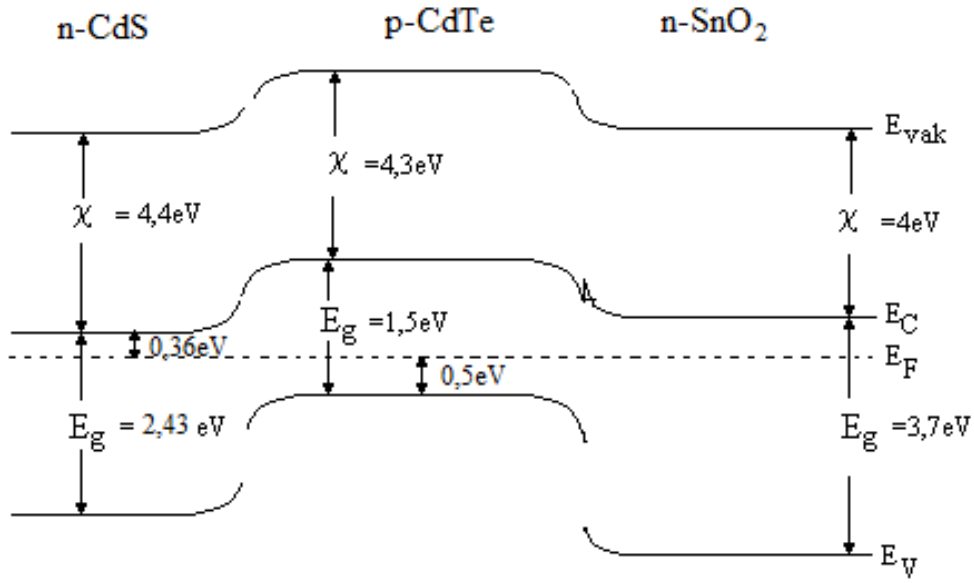
Şekil 4.43 pCdZnTe/nCdTe heteroeklemin enerji band diyagramı.



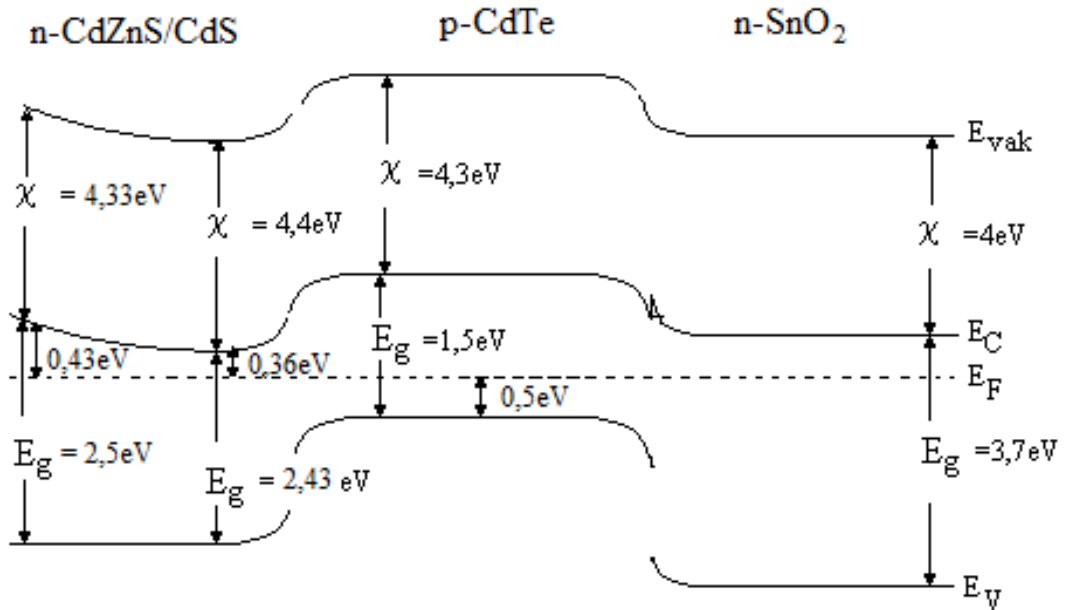
Şekil 4.44 nCdS/pCdTe heteroeklemin enerji band diyagramı.



Şekil 4.45 nCdZnS/pCdTe heteroeklemin enerji band diyagramı.



Şekil 4.46 nCdS/pCdTe heteroeklemin enerji band diyagramı.



Şekil 4.47 nCdZnS/CdS/pCdTe heteroeklemin enerji band diyagramı.

Böylece bu çalışmada üçlü CdZnTe ve CdZnS bileşenlerin yeni elde etme difüzyon teknolojisi geliştirilmiştir. Hazırlanan CdZnTe ve CdZnS yarıiletkenlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. CdZnTe ve CdZnS esaslı güneş pillerin hazırlanma teknolojisi işlenmiştir ve pillerin fotovoltajik parametreleri araştırılmıştır. CdZnS/CdS/CdTe güneş pillerin fotovoltajik parametrelerinin ($V_{oc}=500\text{mV}$, $J_{sc}=4,1 \text{ mA/cm}^2$) CdS/CdTe pillerin parametrelerinden ($V_{oc}=250\text{mV}$, $J_{sc}=3,5\text{mA/cm}^2$) daha yüksek olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdullaev, G.B. ve Dzhafarov, T.D., (1987), *Atomic Diffusion in Semiconductor Structures*, Harwood Academic Publishers, New York.
- Altosaar, M., Kukk, P.E. ve Mellikov, E., (2000), "Point Defects in Cl and Na Doped CdTe Monograin Powders", *Thin Solid Films*, 361-362: 443-445.
- Ashour, A., El-Kadry, N. ve Mahmoud, S.A., (1995), "On The Electrical and Optical Properties of CdS Films Thermally Deposited by a Modified Source", *Thin Solid Films*, 269: 117-120.
- ASTM (2003) G-173-03. *Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation*; American Society for Testing Materials (ASTM) International, West Conshohocken.
- Baker, H., (1992), *ASM Handbook Alloy Phase Diagrams Volume 3*, ASM International, American Technical Publishers, Ohio.
- Bakr, N.A., (2002), "Characterization of a CdZnTe/CdTe Heterostructure System Prepared by Zn Diffusion into a CdTe Thin Film", *Journal of Crystal Growth*, 235: 217–223.
- Bartzner, D. L., Romeo, A., Zogg, H., Wendt, R. ve Tiwari, A. N., (2001), "The CdTe Thin Film Solar Cell Improved Back Contact", *Thin Solid Films*, 387: 151.
- Bidadi, H., Kalafi, M., Tajalli, H., Bairamov, A.I. ve Dzhafarov, T.D., (1996), "Diffusion and Interaction of Group I Impurities with Vacancies in CdS Thin Films", *Optical Materials*, 6: 27-33.
- Boltaks B.I., (1960), *Diffusion in Semiconductors*, Academic Press, New York.
- Borkovska, L.V., Khomenkova, L.Yu., Korsunskaya, N.E., Markevich, I.V. ve Sheinkman, M.K., (2002), "Some Peculiarities of Impurity Diffusion in CdS Crystals", *Phys. Stat. Sol. (b)* 229, 1: 269–273.
- Brandes, E.A ve Brook, G.B, (1992), *Smithells Metal Reference Book, Seventy Edition*, Butterworth-Heinemann, The Bath Press, Great Britain.
- Brune, A. ve Wagner J.B., (2003), "Studies of Virtually Insoluble Systems with Large Interfacial Area: CdTe–ZnO", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 77: 113–124.
- Bube, Richard H.,(1998), *Properties of Semiconductor Materials-Vol.1, Photovoltaic Materials*, Imperial College Press, London.
- Caferov, T., (1998), *Yarıiletken Fiziği-1*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.
- Caferov, T., (2000), *Yarıiletken Elektroniği*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.
- Callister, W.D., (2001), *Fundamentals Of Materials Science And Engineering An Interactive*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Castillo, S.J., Mendoza-Galvan, A., Ramirez-Bon, R., Espinoza-Beltran, F.J., Sotelo-Lerma, M., Gonzalez-Hernandez, J. ve Martinez, G., (2000), "Structural Optical and Electrical Characterization of In/CdS/Glass Thermally Annealed System", *Thin Solid Films*, 37, 10-14.

- Chung, G.Y., Park, S.C., Cho, K. ve Ahn, B.T., (1995), "Electrical Properties of CdTe Films Prepared by Close-Space Sublimation with Screen-Printed Source Layers", *J. Appl. Phys.* 78: 9.
- Dobson, K. D., Visoly-Fisher, I., Hodes, G. ve Cahen, D., (2000), "Stability of CdTe/CdS Thin-Film Solar Cells", *Solar Energy Mater. Solar Cells* 62: 295-325.
- Desnica-Frankovic, I.D., Desnica, U.V., Stötzler, A. ve Deicher, M., (1999), "Study of Microscopic Mechanisms of Electrical Compensation of Donors in CdS by Fast Difusors (Cu, Ag, or Au)", *Physica B*, 273-274: 887-890.
- Desnica, U.V., Desnica-Frankovic, I.D., Magerle, R., Burchard, A. ve Deicher, M., (1999), "Experimental Evidence of the Self-Compensation Mechanism in CdS", *Journal of Crystal Growth*, 197: 612-615.
- Dzhafarov, T.D., (1991), *Radiation Stimulated Diffusion in Semiconductors*, Moscow: Energoatomizdat.
- Dzhafarov, T.D., Altunbaş, M., Kopya A.İ., Novruzov, V. ve Bacaksız, E., (1999), "Formation of p-Type CdS Thin Films by Laser-Stimulated Copper Diffusion", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 32: 125–128.
- Dzhafarov, T.D. ve Caliskan, M., (2007), "Influence of Au Diffusion on Structural Electrical and Optical Characteristics of CdTe Thin Films", *J. of Phys. D: Appl. Phys*, 40: 4003-4009.
- Dzhafarov, T.D. ve Ongul, F., (2005), "Modification of CdTe Thin Films by Zn Reactive Diffusion", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 38: 3764-3767.
- Dzhafarov, T.D., Ongul, F. ve Karabay I., (2006), "Formation of CdZnS Thin Films by Zn Diffusion", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 39: 3221-3225.
- Dzhafarov, T.D., Serin, M., Ören, D., Süngü, B. ve Sadıgov, M.S., (1999), "The Effect of Ag Photodiffusion on Characteristics of Ag–CdS Diode Structures", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 32: 5–8.
- Dzhafarov, T.D., Yesilkaya S.S., Yilmaz, Canli, N., ve Caliskan, M., (2005), "Diffusion and Influence of Cu on Properties of CdTe Thin Films and CdTe/CdS Cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 85: 371–383.
- George, P.J., Sanchez, A., Nair, P.K. ve Huang, L., (1996), "Properties of Chemically Deposited CdS Thin Films Converted to n-Type by Indium Diffusion", *Journal of Crystal Growth*, 158: 53-60.
- Hamann, J., Burchard, A., Deicher, M., Filz, T., Ostheimer, V., Schmitz, C., Wolf, H. ve Wichert, Th., (1998), "Identification of Ag-Acceptor Related Photoluminescence in ¹¹¹Ag Doped CdTe", *Applied Physics Letters*, 72: 23.
- Holt, D.B. ve Yacobi, B.G., (2007), *Extended Defect in Semiconductors Electronic Properties Device Effects and Structures*, Cambridge University Press, New York.
- Hwa-Yuh Shin ve Cherg-Yuan Sun, (1998), "Photoluminescence Spectra of Cl-Doped CdTe Crystals", *Journal of Crystal Growth*, 186, 354-361.
- Khan, R. H., (1994), "Interface Properties of a CdTe-ZnTe Heterojunction", *J. Phys. D Appl. Phys.* 27: 2190-2193.

- Kim, Y.H., Kim, I.J., Lee, S.D., Oh, K.N., Hong, S.K., Kim, S.U. ve Park, M.J., (2000), "A Study on Photoluminescence of Interface Layer of ZnTe/CdTe Heterostructure", *Journal of Crystal Growth* 214/215, 225-228.
- Kraft, D., Thiben, A., Campo, M., Beerbom, M., Mayer, T., Klein, A. ve Jaegermann, W., (2001), "Electronic Properties of Chemically Etched CdTe Thin Films: Role of Te for Back-Contact Formation", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 668.
- Kuroyanagi, A., (1994), "Zn_xCd_{1-x}S thin films grown by ion-beam deposition", *Thin Solid Films*, 249: 91-94.
- Kwok, H. L., (1983), "A Study of Ultra-Thin Cu_xS-Cd_yZn_{1-y}S Polycrystalline Solar Cells", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 16: 2367.
- Lepiller, C., Cowache, P., Guillemoles, J.F., Gibson, N., Özsan, E. ve Linkont, D., (2000), "Fast Electrodeposition Route for Cadmium Telluride Solar Cells", *Thin Solid Films*, 361-362: 118-112.
- Lyahovistskaya, V., Chernyak, L., Greenberg, J., Kaplan, L. ve Cahen, D., (2000), "n and p-Type Post-Growth Self-Doping of CdTe Single Crystals", *Journal of Crystal Growth*, 214/215: 1155-1157.
- Marfaing, Y., (2001), "Impurity Doping and Compensation Mechanisms in CdTe", *Thin Solid Films*, 387: 123-128.
- Markvart, T. ve Castaner, L., (2003), *Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications*, Elsevier, Oxford.
- Martienssen, W. ve Warlimont, H., (2005), *Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data*, Springer, Germany.
- Mathew, X., (2003), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 76: 225-242.
- Mathew, X., (2003), "Opto-electronic properties of an Au/CdTe device", *Semiconductor Science and Technology*, 18: 1-6.
- Miles, R.W., Ghosh, B., Duke, S., Bates, J.R., Carter, M.J., Datta, P.K. ve Hill, R., (1996), "Formation of Low Resistance Contacts to p-CdTe by Annealing Autocatalytically Deposited Ni-P Alloy Coatings", *Journal of Crystal Growth*, 161: 148-152.
- Morales-Acevedo, (2006), "Thin film CdS/CdTe solar cells: Research perspectives", *Solar Energy*, 80: 675-681.
- Moutinho, H.R., Albin, D., Yan, Y., Dhere, R.G., Li, X., Perkins, C., Jiang, C.S., To, B. ve Al-Jassim, M.M., (2003), "Deposition and Properties of CBD and CSS CdS Thin Films for Solar Cell Application", *Thin Solid Films*, 436: 175-180.
- Muneeb-Ur-Rehman, Aqili, A.K.S., Shafique, M., Ali, Z. ve Maqsood, A., (2003), "Properties of Silver-Doped CdS Thin Films Prepared by Closed Space Sublimation (CSS) Techniques", *Journal of Materials Science Letters*, 22: 127-129.
- Okamoto, T., Kitamoto, S., Yamada, A. ve Konagai, M., (2001), "Native Defect Control of CdTe Thin Film Solar Cells by Close Spaced Sublimation", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40: 3089-3092.

- Oladeji, I.O. Chow, L., Ferekides, C.S., Viswanathan, V. ve Zhao, Z., (2000), "Metal/CdTe/CdS/Cd_{1-x}Zn_xS/TCO/Glass: A New CdTe Thin Film Solar Cell Structure", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 61: 203-211.
- Prabakar, K., Narayandass, Sa.K. ve Mangalaraj, D., (2003), "Structural, Optical and Raman Scattering Studies on Polycrystalline Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te Thin Films Prepared by Vacuum Evaporation", *Physica B*, 328: 355–362.
- Picos-Vega, A., Arizpe-Chavez, H., Zelaya-Angel, O., Ramirez-Bon, R. ve Espinoza-Beltran J., (2000), "Presence of Oxygen in the Lattice of CdTe Thin Films", *Journal of Applied Physics*, 89: 11.
- Podesta, A., Armani, N., Salviati, G., Romeo, N., Bosio, A. ve Prato, M., (2006), "Influence of the Fluorine Doping on the Optical Properties of CdS Thin Films for Photovoltaic Applications", *Thin Solid Films*, 511–512: 448–452.
- Poulson, P.D., ve Dutta, V., (2000), "Study of in-Situ CdCl₂ Treatment on CSS Deposited CdTe Films and CdS/CdTe Solar Cells", *Thin Solid Films*, 370: 299-306.
- Ramirez-Bon, R., Sandoval-Inda, N.C., Espinoza-Beltran, F.J., Sotelo-Lerma, M., Zelaya-Angel, O. ve Falcon, C., (1997), "Structural Transition of Chemically Deposited CdS Films on Thermal Annealing", *J. Phys.: Condens. Matter*, 9: 10051–10058.
- Ristova, M. ve Ristov, M., (2001), "XPS Profile Analysis on CdS Thin Film Modified with Ag by an Ion Exchange", *Applied Surface Science*, 181: 68-77.
- Riyad N. ve Ahmad-Bitar, (2000), "Effect of Doping and Heat Treatment on the Photoluminescence of CdS Films Deposited by Spray Pyrolysis", *Renewable Energy*, 19: 579-586.
- Romeo, N., Bosio, A., Tedeschi, R. ve Canevari, V., (2000), "Back Contacts to CSS CdS/CdTe Solar Cells and Stability of Performances", *Thin Solid Films*, 361-362: 327-329.
- Romeo N., Bosio A., Canevari V. ve Podesta A. (2004), "Recent Progress on CdTe/CdS Thin Film Solar Cells", *Solar Energy*, 77: 795–801.
- Romero, M.J., Metzger, W., Gessert, T.A., Albin, D.S. ve Al-Jassim, M.M., (2003), "Spatially Resolved Cathodoluminescence of CdTe Thin Films and Solar Cells", *NCPD and Solar Program Review Meeting, NREL/CD-520-33586*, 405.
- Schroder, Dieter K., (2006), *Semiconductor Material and Device Characterization*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey.
- Spath, B., Fritsche, J., Sauberlich, F., Klein, A. ve Jaegermann W., (2005), "Studies of Sputtered ZnTe Films as Interlayer for the CdTe Thin Film Solar Cell", *Thin Solid Films*, 480–481: 204–207.
- Sze, M. S. ve Kwog K. N., (2007), *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey.
- Tobin, S. P., (1995), "A Comparison of Techniques for Nondestructive Composition Measurements in CdZnTe Substrates", *Journal of Electronic Materials*, 24: 697-705.
- Torres, J., Cisneros, J.I., Gordillo, G. ve Alvarez, F., (1996), "A Simple Method to Determine the Optical Constants and Thicknesses of Zn_xCd_{1-x}S Thin Films", *Thin Solid Films*, 289: 238-241.

- Uda, H., Yonezawa, H., Ohtsubo, Y., Kosaka, M. ve Sonomura, H., (2003), "Thin CdS Films Prepared by Metalorganic Chemical Vapor Deposition", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 75: 219–226.
- Valdna, V., Buschmann, F. ve Mellikov, E., (1996), "Conductivity Conversion in CdTe Layers", *Journal of Crystal Growth*, 161: 164.
- Vigil, O., Rodriguez Y., Zelaya-Angel, O., Vazquez-Lopez, C., Morales-Acevedo, A. ve Vazquez-Luna, J.G., (1998), "Properties of CdS Thin Films Chemically Deposited in the Presence of a Magnetic Field", *Thin Solid Films*, 322: 329–333.
- Vigil, O., Zelaya-Angel, O., Rodriguez, Y. ve Morales-Acevedo, A., (1998), "Electrical Characterization of Chemically Deposited CdS Thin Films under Magnetic Field Application", *Phys. Stat. Sol.*, 167: 143-150.
- Wolf, H., Filz, T., Hamman, J., Lany, S., Ostheimer, V. ve Wichert, Th., (1999), "Defect Complexes Induced by Diffusion of Group I Acceptors into CdTe", *Physica B*, 273-274: 843-847.
- Wu, X., Dhere, R.G., Albin, D.S., Gessert, T.A., DeHart, C., Keane, J.C., Duda, A., Coutts, T.J., Asher, S., Levi, D.H., Moutinho, H.R., Yan, Y., Moriarty, T., Johnston, S., Emery, K., ve Sheldon, P., (2001), "High-Efficiency CTO/ZTO/CdS/CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells, National Renewable Energy Laboratory (NREL)", Program Review Meeting Lakewood, Colorado, 520-31025.
- Würfel, P., (2005), *Physics of Solar Cells From Principles to New Concepts*, Wiley-VCH Verlag GmbH&Ko KGaA, Weinheim.
- Yakobi, B.G., (2003), *Semiconductor Materials An Introduction to Basic Principles*, Kluwer Academic Publishers, New York.
- Yanfa, Y., Al-Jassim, M.M. ve Demuth, T., (2001), *Energetics and Effect of Planar Defects in CdTe*, American Institute of Physics.
- Yokogawa T, Ishikawa T, Merz J L ve Taguchi T, (1994), "Spectroscopic Characterization of Band Discontinuity in Freestanding CdZnS/ZnS Strained-Layer Superlattices", *Journal of Applied Physics*, 75: 2189-2193.
- Zanio, K., (1978), *Semiconductors and Semimetals, Volume 13, Cadmium Telluride*, Academic Press, New York.
- Zhou, J., Wu, X., Teeter, G., To, B., Yan, Y., Dhere, R.G. ve Gessert, T. A., (2004), "CBD-Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films and Their Application in CdTe Solar Cells", *Phys. Stat. Sol. (b)*, 241: 775–778.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 15.08.1977

Doğum yeri Ankara

Lise 1991-1994 İnegöl Lisesi

Lisans 1995-2000 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fak.
Fizik Bölümü

Yüksek Lisans 2001-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Bölümü Katıhal Anabilim Dalı

Doktora 2004-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Bölümü Katıhal Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum

2001-Devam ediyor
Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü