

154370

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KLORLU KATKILARIN CdTe FİLMLEİNİN
ELEKTRİK, FOTOELEKTRİK VE OPTİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Fizikçi Fatih ONGÜL

154370

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tayyar CAFEROV (YTÜ)

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1 CdTe İnce Filmlerinin Kristal Yapısı	2
2.2 CdTe'ün Bant Yapısı	5
2.3 CdTe Filmlerinin Elektrik Özellikleri	7
2.4 Metal-Yarıiletken Kontaklar	11
2.4.1 Schottky Kontakları	11
2.4.2 Omik Kontaklar	12
2.5 Heteroeklemler	15
2.6 Difüzyon Mekanizmaları ve Difüzyon Kuralları	16
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
3.1 CdTe Filmlerin Elde Edilme Yöntemleri	21
3.1.1 Yakın Mesafeli Süblimasyon (CSS)	23
3.1.2 Optik Geçirgenlik İnterferans Spektrometresi ile Kalınlık Ölçme Yöntemi	25
3.2 İletken (Ag, C)-CdTe Kontakların Hazırlanması	26
3.3 CdTe Filmlerinin Havada ve Oksijen Ortamında Tavlama	26
3.4 CdCl ₂ 'ün ve NaCl'ün CdTe Filmlerine Kaplanması	27
3.5 CdTe Filmlerinin Elektriksel Karakteristiklerinin Ölçümü	28
3.5.1 CdTe Filmlerinin İletkenlik ve Özdirenç Ölçümleri	28
3.5.2 Eklemlerin Akım-Gerilim Karakteristiklerinin Ölçümü	30
3.5.3 Yük Taşıyıcıları Konsantrasyonunun Ölçülmesi	31
3.6 CdTe Filmlerde İletkenlik-Sıcaklık Ölçümleri	33
3.7 CdTe Filmlerinin Fotoduyarlılık Spektrumlarının Ölçümü	34
3.8 CdTe Filmlerinin Optik Geçirgenlik Ölçümleri	35
4. BULGULAR	37

4.1	İletken (Ag, C)-CdTe Kontakların Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	37
4.2	Havada ve Oksijen Ortamında Tavlamanın CdTe Filmlerinin Elektriksel Özelliklerine Etkisi	40
4.3	CdCl ₂ 'ün CdTe Filmlerinin Elektriksel Özelliklerine Etkisi.....	41
4.4	CdCl ₂ Katkılanmış CdTe Filmlerin İletkenlik-Sıcaklık Ölçümleri	41
4.5	CdCl'ün p-CdTe/n-SnO ₂ Heteroeklemlerin Elektriksel Karakteristiklerine Etkisi	42
4.6	CdCl ₂ Difüzyonunun CdTe/SnO ₂ Eklemlerin Fotovoltaik Karakteristiklerine Etkisi	44
4.7	NaCl Difüzyonunun CdTe Filmlerinin Elektriksel Özelliklerine Etkisi	46
4.8	Farklı Ortamlarda Tavlamanın CdTe Filmlerinin Optik Özelliklerine Etkisi	49
5.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA	53
KAYNAKLAR.....		55
ÖZGEÇMİŞ.....		57



SİMGE LİSTESİ

A, S	Alan
a	Örgü Parametresi
d	Kalınlık
B	Magnetik Alan
D	Difüzyon Katsayısı
e	Elektronun Yükü
E _a	Akseptör Enerji Seviyesi
E _d	Donör Enerji Seviyesi
E _g	Yarıiletkenin Yasak Bant 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	Dalga Vektörü
N	Atomların Konsantrasyonu
n	Kırılma İndisi, Elektronların Konsantrasyonu
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 İşİ
φ	Kontak Potansiyeli

KISALTMA LİSTESİ

CSS	Close Space Sublimation
TEMK	Termal Elektro-Motor Kuvvet



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Elementlerin kabuk modeli, (a) Cd, (b) Te.	2
Şekil 2.2	CdTe bileşiğinin kübik çinko sülfür yapısı (Kennedy Zanio, 1978).....	4
Şekil 2.3	CdTe hegzagonal yapısı.	5
Şekil 2.4	(a) Direkt ve (b) İndirekt yarıiletkenlerde yasak bant aralığı yakınındaki bant yapısının gösterimi (Kittel, 1996).....	6
Şekil 2.5	Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji bant diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).....	11
Şekil 2.6	Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji bant diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).....	12
Şekil 2.7	Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).....	13
Şekil 2.8	Metal/p tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).....	13
Şekil 2.9	Yaklaşık omik kontakların akım-gerilim karakteristikleri, (a) Küçük doğrultmaya sahip omik kontak (b) Dirençli gerilime bağlı olan omik kontak (Caferov, 1998)..	15
Şekil 2.10	(a) İki ayrı yarıiletkenin temasa getirilmeden önce n-tipi, p-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı (b) keskin n-p heteroeklemin enerji bant diyagramı (Caferov, 2000).....	15
Şekil 2.11	Atomların difüzyon mekanizmaları, (a) çift yerdeğiştirme (b) halka yerdeğiştirme (c) arayer (d) vakansiyon (e) çinkonun GaAs'de dissosiyatif mekanizması (Caferov, 1998).....	17
Şekil 2.12	(1) Boşluk, (2) arayer ve (3) tane sınırları mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağımlılığı (Caferov, 1998).....	19
Şekil 3.1	Yüksek vakum setinin şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.2	CSS yöntemiyle CdTe filmin elde edildiği pota-altlık düzeneği.	23
Şekil 3.3	CdTe filmlerinin elde edildiği vakum setinin şematik gösterimi.	24
Şekil 3.4	(1) Kaynak ve (2) altlık sıcaklığının zamanla değişimi.	24
Şekil 3.5	Optik geçirgenlik spektrumu (Caferov, 2000).	25
Şekil 3.6	CdTe filmlerin havada tavlama düzeneği.....	26
Şekil 3.7	CdTe filmlerin oksijen ortamında tavlama düzeneği.	27
Şekil 3.8	Termal EMK yöntemiyle, (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik tiplerinin ölçüm devresi (Caferov, 1998).	28
Şekil 3.9	CdTe filmlerinin kontak alınması.	29
Şekil 3.10	CdTe filmlerin direnç ölçüm devre şeması.	29
Şekil 3.11	Akım-gerilim karakteristiği ölçümü için hazırlanan örnekler.....	30
Şekil 3.12	CdTe filmlerinin akım-gerilim karakteristiklerinin ölçüm devresinin şeması.	31
Şekil 3.13	p-tipi yarıiletkenlerde Hall olayı (Caferov, 1998).	31
Şekil 3.14	Hall Olayı ölçümlerinde dikdörtgen formlu örnekte kontakların yerleşimi.....	32
Şekil 3.15	CdTe/SnO ₂ eklemlerin fotoduyarlılık spektrumlarının ölçüm düzeneği.....	34
Şekil 3.16	“Orsam” lambasının şiddetinin spektral dağılımı.	35
Şekil 4.1	(1) Ag/n-CdTe/Ag ve (2) C/n-CdTe/C yapıların karanlıktaki J-V karakteristikleri.....	38
Şekil 4.2	(1) Ag/n-CdTe/Ag ve (2) C/n-CdTe/C yapıların aydınlıktaki J-V karakteristikleri.....	38
Şekil 4.3	Ag/p-CdTe/Ag ve (2) C/p-CdTe/C yapıların karanlıktaki J-V karakteristikleri.	39
Şekil 4.4	(1) Ag/p-CdTe/Ag ve (2) C/p-CdTe/C yapıların aydınlıktaki J-V karakteristikleri.....	39
Şekil 4.5	CdCl ₂ ile katkılanmış p-tipi CdTe filmin iletkenlik-sıcaklık grafiği.....	42
Şekil 4.6	CdTe-SnO ₂ heteroeklemin karanlıktaki J-V karakteristikleri (1) ve (2) CdCl ₂ ün difüzyonundan önce ve sonra.	43

Şekil 4.7	CdTe-SnO ₂ heteroeklemin aydınlıktaki J-V karakteristikleri (1) CdCl ₂ difüzyonundan önce, (2) ve (3) CdCl ₂ difüzyonundan sonra, CdTe tarafından aydınlatma ve SnO ₂ tarafından aydınlatma.	43
Şekil 4.8	CdTe-SnO ₂ eklemin CdCl ₂ ün difüzyonundan sonra fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristiği.	44
Şekil 4.9	CdCl ₂ ile katkılanmış CdTe/SnO ₂ eklemin, SnO ₂ tarafından aydınlatmada fotoduyarlılık spektrumu.	45
Şekil 4.10	CdCl ₂ ile katkılanmış CdTe/SnO ₂ eklemin, CdTe tarafından aydınlatmada fotoduyarlılık spektrumu.	45
Şekil 4.11	Ag/p-CdTe/Ag yapısının karanlıkta J-V karakteristikleri, (1) ve (2) NaCl difüzyonundan önce ve sonra.	47
Şekil 4.12	Ag/p-CdTe/Ag yapısının aydınlıkta J-V karakteristikleri, (1) ve (2) NaCl difüzyonundan önce ve sonra.	47
Şekil 4.13	Ag/p-CdTe/n-SnO ₂ yapısının karanlıkta J-V karakteristikleri, (1) ve (2) NaCl difüzyonundan önce ve sonra.	48
Şekil 4.14	Ag/p-CdTe/n-SnO ₂ yapısının aydınlıkta J-V karakteristikleri, (1) ve (2) NaCl difüzyonundan önce ve sonra.	48
Şekil 4.15	CdTe filmin soğurma katsayısının spektrumu.	49
Şekil 4.16	Havada tavlama (400 °C) sonra CdTe filmin soğurma katsayısının spektrumu.	50
Şekil 4.17	Oksijen ortamında tavlama (400 °C) sonra CdTe filmin soğurma katsayısının spektrumu.	50
Şekil 4.18	CdCl ₂ 'ün difüzyonundan, (1) önce ve (2) sonra p-CdTe filmin soğurma katsayısının spektrumları.	51
Şekil 4.19	NaCl'ün difüzyonundan, (1) önce ve (2) sonra p-CdTe filmin soğurma katsayısının spektrumları.	51
Şekil 5.1	p-CdTe/n-SnO ₂ heteroeklemin bant diyagramı.	54

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 CdTe yarıiletkenin bazı parametreleri.....	3
Çizelge 4.1 p ve n-tipi CdTe filmlerin üzerindeki Ag ve C kontakların kontak özdirençlerinin karşılaştırılması.....	37
Çizelge 4.2 p-tipi CdTe filmlerin, havada ve oksijen ortamında tavlama sonucunda özdirenç karşılaştırması.....	40
Çizelge 4.3 CdCl ₂ difüzyonundan önce ve sonra p-CdTe filmlerin özdirenci.	41
Çizelge 4.4 p-tipi CdTe filmlere NaCl difüzyonundan önce ve sonra özdirençlerin karşılaştırması.....	46
Çizelge 4.5 NaCl difüzyonundan önce ve sonra Ag/p-CdTe kontak özdirençlerinin karşılaştırması.....	47
Çizelge 4.6 İşlemlerle yasak bant değişimi.	52
Çizelge 5.1 p-CdTe ve n-SnO ₂ parametreleri.....	54



ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren ayrıca bir araştırmacının nasıl olması gerektiği konusunda beni eğiten hocam Sayın Prof.Dr. Tayyar Caferov'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Hocalarım, Fen Edebiyat Fakültesi Dekanı Sayın Prof.Dr. E. Durul Ören'e ve Fizik Bölüm Başkanı Sayın Prof.Dr. Emel Çıngı'ya uygun çalışma ortamı hazırladıkları için çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarında bana yardımcı olan, bilgi ve tecrübesini paylaşan Arş.Gör. Serkis Yeşilkaya'ya, elektronik devrelerin kurulmasıyla rahat ölçüm almamızı sağlayan Arş.Gör. Murat Çalışkan'a, diğer grup arkadaşlarım Arş.Gör. Süreyya Aydın, Arş.Gör. Çiğdem Oruç Luş, Arş.Gör. Nimet Yılmaz Canlı'ya oda arkadaşım Arş.Gör. Altan Bozdoğan'a desteklerinden dolayı ve ayrıca her zaman güvenen, maddi ve manevi destekleriyle hep yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.



ÖZET

Bu çalışmada CdCl₂, NaCl ve oksijen difüzyonunun CdTe ince filmlerinin elektrik, optik ve fotoelektrik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca Ag/CdTe ve C/CdTe eklemlerin omik karakteristikleri araştırıldı ve karşılaştırıldı. n-tipi ve p-tipi CdTe filmleri, temiz yada SnO₂ ile kaplı cam üzerine yakın mesafeli süblimasyon (CSS-close space süblimation) yöntemiyle büyütüldü. Elde edilen filmlerin öz direnci 10⁶-10⁷ Ωcm ve yasak bant aralığı E_g=1.50 eV olarak, sırasıyla iki-prob tekniğiyle ve optik soğurma spektrumlarından bulundu.

p-tipi CdTe filmlerin öz direncinin, oksijen difüzyonu neticesinde keskin azalması (yaklaşık olarak 34 kat) gözlemlendi. Bu olay, CdTe'nin kristal örgüsünde oksijen atomlarının, tellür boşluklarına (V⁺_{Te}) oturması neticesinde akseptör merkezlerinin (V⁻_{Cd}) konsantrasyonunun artması ile izah edildi.

Klorlu ortamda (CdCl₂ veya NaCl) tavlama neticesinde, p-tipi CdTe filmde deliklerin konsantrasyonunun artması gözlemlendi. CdCl₂ difüzyonunun NaCl difüzyonuna göre CdTe filmlerinde iletkenliği daha keskin arttırdığı bulundu ve meydana gelen akseptör tipli merkezlerin enerji düzeyi E_v+0.33 eV olarak ölçüldü.

Ag/p-CdTe ve C/p-CdTe kontakların akım-gerilim karakteristiklerin ölçümlerinden, Ag/p-CdTe eklemlerin kontak direnci daha düşük (9 kat) olduğu gözlemlendi. Bu olay, gümüşün CdTe filmlerinde akseptör katkısı özelliği göstermesi ile yorumlandı.

p-CdTe/n-SnO₂ heteroeklemlerin elektrik ve fotoelektrik karakteristikleri incelendi. Bu eklemlerin CdCl₂ difüzyonu neticesinde güneş pili özelliklerini gösterdiği (V_{oc}= 320 mV, I_{sc}=16 μA/cm², 100 mW/cm² ışınlama altında) tespit edildi. p-CdTe/n-SnO₂ pillerin enerji bant diyagramı çizildi ve elde edilen sonuçlar çizilen bant diyagramı ile yorumlandı.

Anahtar Kelimeler: CdTe filmler, CdCl₂, NaCl, O₂, C, Ag, difüzyon, eklemler.

ABSTRACT

In this study, the effect of the diffusion of CdCl₂, NaCl and oxygen on electrical, optical and photoelectrical properties of CdTe thin films has been investigated. Moreover, omic characteristics of the Ag/CdTe and C/CdTe junctions were examined and compared. n-type and p-type CdTe films were grown on clear glass and SnO₂ coated glass substrates by close space sublimation (CSS) method. The resistivity and band gap of the films determined by two-probe technique and optic absorption spectra as $\rho=10^6-10^7 \text{ }\Omega\text{cm}$ and $E_g=1.50 \text{ eV}$ respectively.

It was observed that diffusion of oxygen sharp decreased (about 34 times) the resistivity of the p-type CdTe films. This event is explained by the increasing concentration of acceptor centers (V_{Cd}^-) due to substitution of oxygen atom at tellur vacancies (V_{Te}^+).

Increase of hole concentration is observed in p-type CdTe films as a result of annealing in chloride environment (CdCl₂ or NaCl). CdCl₂ diffusion more sharply increased the NaCl diffusion and the energy level of occurred acceptor type centers measured as $E_V+0.33 \text{ eV}$.

From the current-voltage measurements of Ag/p-CdTe and C/p-CdTe junctions it is observed that contact resistance of Ag/p-CdTe junctions is lower (9 times). This event attributed to the acceptor doping property of Ag in CdTe films.

It was found that these junctions showed solar cell properties after CdCl₂ diffusion ($V_{\text{oc}}=320 \text{ mV}$, $I_{\text{sc}}=16 \text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ under $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ illumination). Energy band diagram of p-CdTe/n-SnO₂ cells were drawn and the results interpreted by this band diagram.

Keywords: CdTe films, CdCl₂, NaCl, O₂, C, Ag, diffusion, junctions.

1. GİRİŞ

Yarıiletkenler, sanayide geniş kullanım alanlarından dolayı bir çok araştırmaya konu olmaktadır. Bu araştırmalar değişik kristalik yapıda ve özellikte olan yarıiletkenleri ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır. CdTe ince filmleri bunlardan biridir.

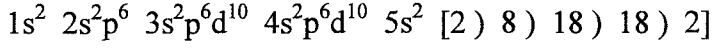
Yeryüzünde kullanılan enerji kaynakları hızla tükenmekte, diğer yandan bu kaynaklara olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bundan dolayı özellikle uzun ömürlü doğal bir kaynak olan güneş, alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Güneş pilleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarıiletken aygıtlardır. CdTe de güneş pili uygulamalarında önemli bir yer tutan yarıiletkenidir. CdTe'ün direkt geçişli bant yapısına sahip oluşu, yasak bant aralığının 1.45 eV olması, soğurma katsayısının yüksek olması, 1.45 eV üstündeki enerjinin %90'ını soğurmasına olanak sağlamaktadır. Bu özelliklerinden dolayı CdTe bileşik yarıiletkeninin güneş pili üretiminde öne çıkmasını sağlamıştır. Son yıllarda laboratuvar çalışmalarıyla CdTe/CdS güneş pillerinde %16 üzerinde verim sağlanmıştır. Bundan dolayı CdTe/CdS eklemlerin fotovoltaiik karakteristiklerinin iyileştirilmesi yönünde çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. CdS üzerine CdTe filmlerin kaplanması iki yöntem öne çıkmıştır elektrokaplama ve yakın mesafeli süblimasyon yöntemi (CSS close space sublimation). Yakın mesafeli süblimasyon yöntemi ile CdTe filmler çeşitli gaz ortamında büyütülmektedir, bunlardan biri de oksijen ortamıdır. Oksijen ortamında büyütülen CdTe filmlerin özelliklerine etkileri araştırılmış ancak hazırlanan CdTe filmlerin havada ve oksijen ortamında tavlamanın elektrik, optik ve fotoelektrik özelliklerine etkileri karşılaştırılmamıştır. CdTe/CdS güneş pillerinin hazırlanmasında, CdTe filmlerinin direncinin azaltılması için, pillerin CdCl₂ ortamında tavlama işlemi yapılmaktadır. Bu çalışmada klorlu bileşenlerin (CdCl₂, NaCl) difüzyonunun CdTe filmlerinin elektrik özelliklerine etkisi incelenmiştir. p-CdTe/n-CdS eklemlerinde, p-CdTe filmlerine (alt kontak) omik kontak yapmak çok zordur, çünkü p-tipi CdTe'ün termodinamik iş fonksiyonu (yaklaşık olarak 5.7 eV), omik kontak olarak kullanılan tüm metallerin iş fonksiyonundan daha büyüktür. Bu açıdan tezde Ag/CdTe ve C/CdTe eklemlerin elektrik omiklik karakteristikleri de araştırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

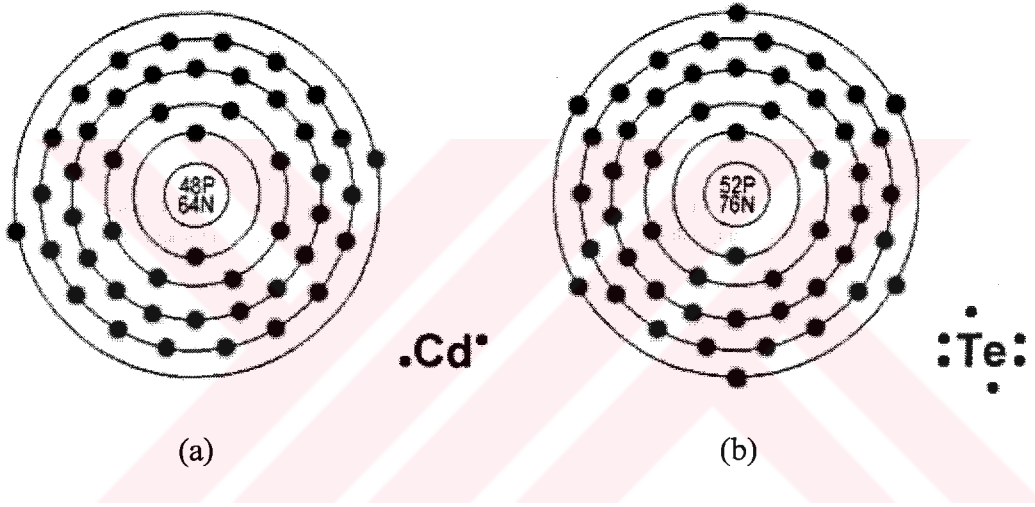
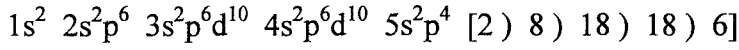
2.1 CdTe İnce Filmlerinin Kristal Yapısı

Cd periyodik tabloda II. grupta, Te periyodik tabloda VI. grupta yer alır

Cd'nin elektron konfigürasyonu:



Te'ün elektron konfigürasyonu:



Şekil 2.1 Elementlerin kabuk modeli, (a) Cd, (b) Te.

Cd

Kristal yapısı : Hegzagonal

Elektron Sayısı: 48

Proton Sayısı : 48

Valans Elektronları : $5s^2$

Te

Kristal yapısı : Hegzagonal

Elektron Sayısı: 52

Proton Sayısı : 52

Valans Elektronları : $5s^2p^4$

Periyodik tablonun II. grubunda bulunan kadmiyum ve VI. grubunda bulunan tellür elementleri aralarında kovalent ve iyonik bağ yaparak kadmiyum tellür (CdTe) bileşimini oluştururlar. Kovalent bağ son yörüngedeki valans elektronlarının ortak kullanımıyla kararlı bir hal oluşturan kuvvetli bir bağdır. CdTe iyonik bağ oranı 0.64 olarak verilmektedir. CdTe ince film şeklinde iken ya kübik çinko sülfid yapısında ya da hegzagonal yapıda bulunur.

Çizelge 2.1 CdTe yarıiletkenin bazı parametreleri.

Kristal yapısı	Kübik çinko sülfid
Örgü parametresi (a)	6.483 Å
Yasak enerji aralığı (E_g) T=300 K	1.44-1.5 eV
İletkenlik tipi	p veya n
Erime noktası	1092 °C
Yoğunluk (ρ)	5.85 g/cm ³
Kırılma indisi (n)	2.69
Lineer termal genişleme katsayısı	5.9x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Spesifik ısı	0.21 j/gK
Termal iletkenlik (25°C)	0.06 W/cmK
Dielektrik sabiti (ϵ)	9.65
Elektron mobilitesi (μ_e)	1100 cm ² /Vs
Elektron yaşam ömrü (τ_e)	3x10 ⁻⁶ s
Delik mobilitesi (μ_h)	100 cm ² /Vs
Delik yaşam ömrü (τ_h)	2x10 ⁻⁶ s
Elektron alınganlığı (χ)	4.3 eV

Kübik Çinko Sülfid Yapısı

Çinko sülfid yapısı, elmas yapısının çeyrek cisim köşegeni kadar ötelenmiş iki yüzey merkezli yapı olarak görülebilir. Birim hücreinde 4 atom bulunur. İlkel hücre küp olup, bu yüzey merkezli örgülerden birine Te atomları, diğerine Cd atomları yerleşir. (Kennety Zanio, 1978)

Te atomlarının koordinatları;

$$000, \dots, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$$

Cd atomlarının koordinatları;

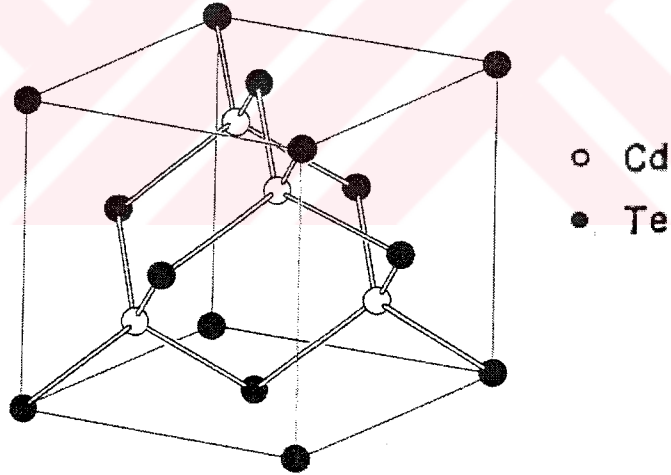
$$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}, \dots, \frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}, \dots, \frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}, \dots, \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$$

Her atomun çevresinde $\frac{\sqrt{3}a}{4}$ uzaklığında 4 atom bulunur.

a = örgü sabiti

CdTe'nün örgü sabiti 6.483 \AA 'dur.

Örgü sabiti kristal büyütülürken Cd veya Te zenginliğine göre çok az değişir. Cd zenginliğinde 6.480 \AA , Te zenginliğinde ise 6.488 \AA olabilir. Bizim çalışmalarda da kübik çinko sülfid yapısında olan CdTe filmler kullanılmıştır.



Şekil 2.2 CdTe bileşiğinin kübik çinko sülfid yapısı (Kennety Zanio, 1978).

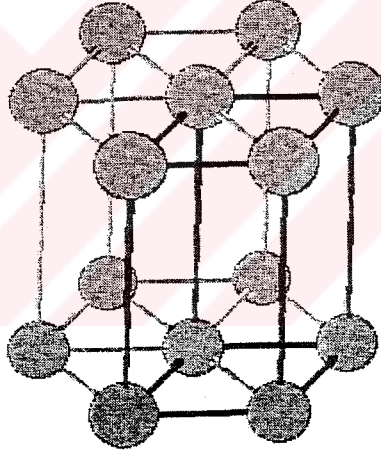
Sıkı Paketli Altıgen Yapı (Hegzagonal)

Bu yapıda, atomlar küreler biçiminde düşünülürse. Küreler önce bir düzlemde, her komşu altı küreye degecek şekilde sıkı paketlenmiş A tabakasına yerleştirilmektedir. Bu tabaka hem hegzagonal yapının taban düzlemine hem de yüzey merkezli yapının (111) düzlemine karşılık gelmektedir. İkinci bir B tabakası bunun üstüne ve alt tabakadaki 3 küreye degecek şekilde

yerleştirilir. Üçüncü tabakanın küreleri, en alttaki tabakanın bıraktığı boşluklar üzerine geliyorsa yüzey merkezli yapı elde edilmektedir. Tersine üçüncü tabakanın küreleri, birinci tabakanın kürelerinin tam üstüne gelecek şekilde yerleştirilirse hegzagonal yapı oluşmaktadır.

CdTe ince filminin kübik veya hegzagonal olması film büyütme şartlarına bağlıdır. Ani sıcaklık değişimleri sonunda, kadmiyumun veya tellürün aşırılığı yapıyı etkilemektedir ve hegzagonal yapıya geçirmektedir. Hegzagonal yapının örgü parametresi, $a=4.58 \text{ \AA}$, $c=7.50 \text{ \AA}$ 'dur.

Yüksek basınç altında CdTe, NaCl tarzında bir kristal yapıya sahip olur. 35 kbar basınçta $a=5.86 \text{ \AA}$ düşer. Birim küpün hacmi % 25 oranında azalır. Basınç 300 kbar'a arttırıldığında ise $a=5.62 \text{ \AA}$ 'a kadar azalır. Kristal yapısındaki bu değişme bileşiğin termal ve elektriksel özelliklerinde değişmesine neden olur. CdTe'ün elektriksel iletkenliği basınçla doğru orantılı olacak şekilde artış gösterir.

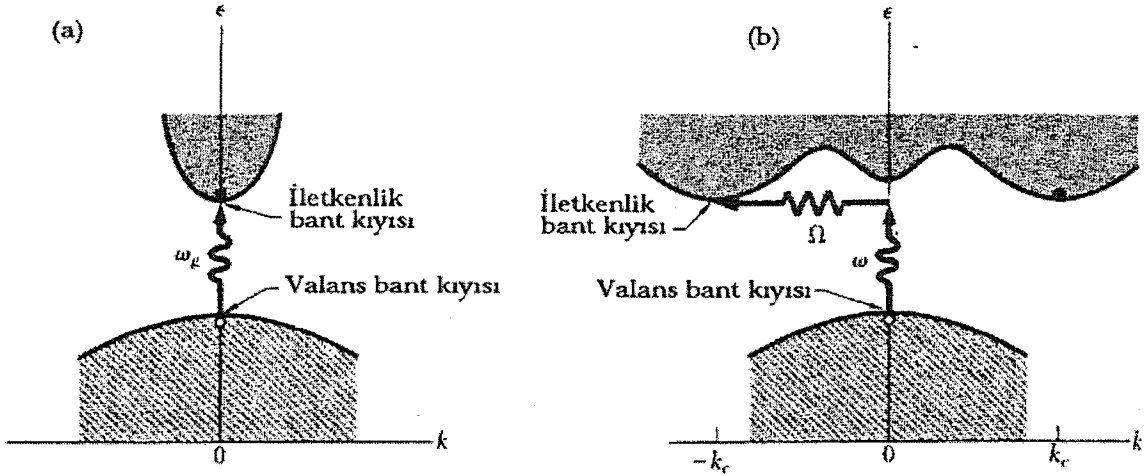


Şekil 2.3 CdTe hegzagonal yapısı.

2.2 CdTe'ün Bant Yapısı

CdTe yarıiletkeni direkt geçişli bant yapısına sahiptir. CdTe'ün bant aralığı 300 K da 1.44 eV, 0 K de 1.607 eV'dur. Direkt geçiş (doğrudan geçiş) olayında bir foton kristal tarafından soğurulurken bir elektron ve bir boşluk oluşturur. Sürekli optik soğurma bölgesinin eşik frekansı ν ise bant aralığı $E_g = h\nu$ ile tayin edilir. Direkt bantlı da iletkenlik bandının en dibindeki elektron ile valans bandının tavanındaki elektronun lineer momentumu ve bundan dolayı dalga vektörleri aynıdır.

İndirekt geçiş (dolaylı geçiş) ise valans bandının tavanındaki elektronun dalga vektörleri aynı değildir. Enerji ve momentum korunumunu sağlamak için üçüncü parçacığa ihtiyaç duyar. Böyle geçişler de fononun ya soğurulması ya da yayımı ile oluşur ($h\nu = E_g + h\Omega$).



Şekil 2.4 (a) Direkt ve (b) İndirekt yarıiletkenlerde yasak bant aralığı yakınındaki bant yapısının gösterimi (Kittel, 1996).

Direkt bant geçişinde eksiton oluşumu veya elektron-delik etkileşmesi ihmal edildiğinde, soğurma katsayısı α ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki ilişki,

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.1)$$

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

İndirekt bant geçişinde, soğurma katsayısı α ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki bağıntı,

$$\alpha = B(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2 \quad (2.2)$$

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

2.3 CdTe Filmlerinin Elektrik Özellikleri

Yarıiletkenler oda sıcaklığında 10^{-2} den 10^9 Ωcm 'e kadar ve sıcaklıkla hızla değişen elektrik öz dirençleriyle sınıflandırılır. Yarıiletkenler özden ve katkılı olmak üzere ikiye ayrılır. Özden yarıiletkenler katkısız ve kusursuz yarıiletkenlerdir. Mutlak sıfırda kovalent bağlarda hiçbir elektron eksikliği yoktur. Isının etkisiyle bazı kovalent bağların kopması ve eşit sayılı elektron delik çifti oluşması özden yarıiletkeni karakterize eder. Katkılı yarıiletkenler katkılarla iletkenliği belirlenen yarıiletkenlerdir. Yarıiletkende elektron veren katkı atomuna verici veya donör denir. İletkenliği donör katkısıyla karakterize olunan yarıiletkenlere n-tipi yarıiletken denir. n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardır. Yarıiletkenlerde elektronları alan katkı atomlarına alıcı veya akseptör denir. İletkenliği akseptör katkısıyla karakterize olunan yarıiletkenlere p-tipi yarıiletken denir. p-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları deliklerdir (Caferov, 2000).

CdTe hem n-tipi hem de p-tipi yarıiletken olarak kullanılır. Değişik yöntemlerle bu bileşiğe istenilen tip yarıiletken özelliği kazandırılır. CdTe'e fazla miktarda Cd katılması iletme katılan elektron miktarını artırır ve bileşik n-tipine dönüşür. Te fazla katılması durumunda boşluklar oluşacağından yarıiletkenin p-tipi olmasına sebep olur. n-tipi veya p-tipi yarıiletken oluşturmak için bir başka yöntem, dışarıdan başka elementlerin CdTe üzerine difüze edilmesidir. Altın, gümüş, bakır gibi metaller kullanılarak bileşiğin iletkenliği değiştirilebilir. Bu bileşiklerin Cd ile etkileşmesi durumunda boşluk miktarı artar ve malzeme p-tipi olur veya bu metaller kristalin arayer pozisyonlarına girerek yarıiletkeni n-tipi haline getirirler.

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 (Y. Yan vd., 2001).

CdTe 450-500 °C de tavlınırken 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 (V. 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 (V. Lyahovitskaya vd., 2000).

Yakın mesafeli süblimasyon (CSS) yöntemiyle CdTe film elde edilirken kaynak sıcaklığı 600-700 °C, altlık sıcaklığı 500-600 °C arasında değişmektedir. CdTe filmi O₂ ve He ortamında 1-200 Torr basınç altında kaplanır. CdTe filmin direnci yaklaşık olarak, O₂ ortamında kaplandığında 10⁵ Ωcm, He ortamında kaplandığında 10⁶ Ωcm olmaktadır. O₂ ortamında kaplanan filmin direnci He ortamında kaplanan filmin direncinden biraz daha düşüktür. O₂ ortamında kaplanan CdTe filmin analizleri sonucunda filmin yapısında O₂ olmadığı gözlenmiştir. Bu da O₂ nin Cd ile Te'e göre daha rahat reaksiyona girmesinden ve CdO oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Büyütülen filmde azalan Cd miktarı ile Cd boşluklar oluşmaktadır. O₂, Cd/Te oranının değişiminde etkilidir (Gil Young Chung vd., 1995).

CdTe içinde oksijen konsantrasyonu 1.47x10²⁰ 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 2x10¹⁹- 4x10²⁰ cm⁻³ arasında CdTe'ün direncini yavaşça düşürür [4x10⁶ Ωcm-1x10⁵ Ωcm], (A. Picos-Vega vd., 2001).

IA grubundaki Li, Na, K ve IB grubundaki Cu, Ag, Au gibi metaller CdTe filme katkılıandığında 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 (H. Wolf vd., 1999).

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 bulunduğu 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 (Cu_i-V_{Cd})⁻ akseptör durumundadır. Cu difüzyonundan sonra CdTe filmin katotoluminesans (CL) spektrumu Cu_{Cd} ve Cu_i⁺-V_{Cd} kompleksin oluştuğunu göstermiştir (M.J. Romero vd., 2003).

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 (J. Hamann vd., 1998).

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 azaltmak 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 (D.Kraft vd., 2001).

CdCl₂'ün CdTe difüzyonu sonucunda CdTe tanecik boyutunu arttırmaktadır. CdCl₂ konsantrasyonun artmasına bağlı olarak tanecik boyutu da artmaktadır. Tanecik boyutu 0.1µm iken 1 µm den daha büyük bir hal almaktadır (%5 wt CdCl₂ uygulandığında). CdCl₂ konsantrasyonun arttırılması aynı zamanda CdTe filmin tabaka direncini de düşürmektedir. Direncin düşmesi, CdCl₂'ün CdTe filmde tanecik büyümesinde yer almasından kaynaklanmaktadır. Tanecik boyutunun artması tanecik sınır potansiyelinin azalmasına ve taneciğin birbirleriyle iletimini iyileştirmektedir. %3 wt CdCl₂ konsantrasyonu uygulandığında CdTe tabaka direnci $15 \times 10^7 \Omega$ 'dan $9 \times 10^7 \Omega$ 'a kadar düşürmektedir. Yüksek CdCl₂ konsantrasyonunda Cl'nin baskın rol oynamasıyla p-tipi CdTe filmin direncini yükseltmektedir (P.D. Paulson, V. Dutta, 2000).

CdTe filme CdCl₂ uygulanmasıyla tanecik boyutunu arttırmakta, tanecik sınırını pasivize etmekte ve eklem bölgesinin yoğunluğunu arttırmaktadır. CdCl₂ aşırı derecede Cd katkılanmasından dolayı p-tipi iletkenlikle ilgisi olmamaktadır (Y. Marfaing, 2001).

CdCl₂ p-tipi CdTe'de $(Te_i^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ veya $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ yada her ikisi akseptör kompleksler oluşmaktadır. Bu kompleksler CdTe'ün p-tipi iletkenliğini arttırmakta ve direncini düşürmektedir (V. Valdna vd., 1999).

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).

CdTe, 10^{18} cm^{-3} konsantrasyonlu Cl ile kaplanılmakta, Na konsantrasyonu bundan daha düşük ise CdTe'ün n-tipi iletkenliği, Cl_{Te} donör ile belirlenmektedir. Bu yüksek seviyede Cl iyonizasyonuna bağlı olmaktadır ($E_D=14 \text{ meV}$). Na atomu özellikle Cd atomların yerini doldurduğunda akseptör form almaktadır (Na_{Cd}). Na konsantrasyonun artmasıyla donörler Na akseptörleriyle kompanse olmaktadır, bu da iletkenliğe katılan bir çok 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. İletkenlik azalmasına bağlı olarak zayıf bir fotoiletkenlik meydana gelmiştir. Na konsantrasyonun 10^{-18} cm^{-3} den küçük olduğu bölgede yüksek iletkenliğe sahip olduğundan karanlık durumu için fotoiletkenlik gözlenememiştir (M. Altosaar, vd., 2000).

CdTe, büyütme sürecinde üretilen yüksek yoğunluklu kusurları içeren bileşik yarıiletkenidir. Bir çok kusur, bir çok teknik kullanılarak belirlenmiştir. Bant boşluğunda bir çok kesikli seviyeden oluşan birkaç bant 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 ($\text{V}_{\text{Cd}}^{-2}$) iki kere iyonize olmuş akseptör seviye olarak davranırlar. Bu seviyelerin aktivasyon enerjileri şöyle sunulur; 0.33 eV, 0.18 eV, 0.73 eV, 0.49 eV, 0.63 eV, 0.54 eV, 0.51 eV, 0.6 eV, 0.61 eV, 0.65 eV, 0.75 eV, 0.095 eV, 0.2 eV, 0.05 eV, 0.8 eV, 0.76 eV, 0.43-0.46 eV, 0.7 eV (X. Mathew, 2003).

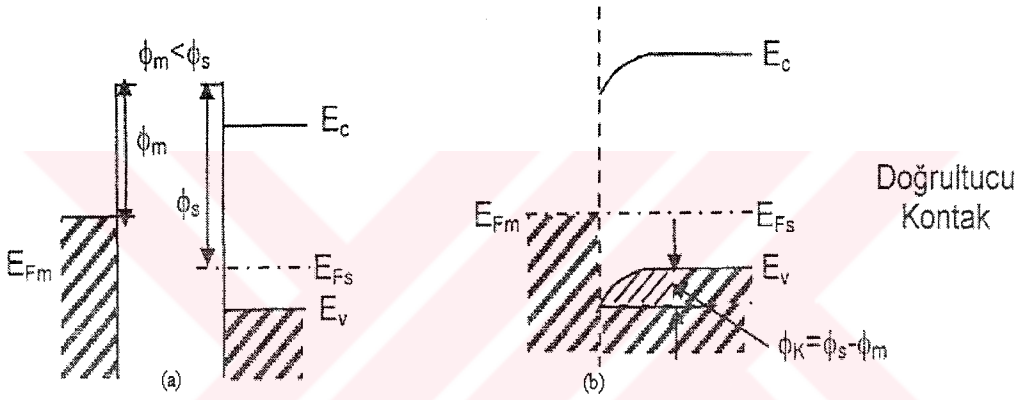
Böylece, literatürde CSS yöntemiyle CdTe film büyütme esnasında ortamdaki oksijenin film üzerindeki etkileri incelenirken, CdTe filmi elde edildikten sonra oksijen ortamında tavlamanın etkileri az incelenmiştir. Ayrıca, Ag/p-CdTe ve C/p-CdTe eklemlerin elektriksel karakteristikleri ve klorlu katkıların (CdCl_2 ve NaCl) difüzyonunun CdTe filmlerin ve p-CdTe/n- SnO_2 heteroeklemlerin özelliklerine etkisi hakkında bilgiler literatürde yeterli değildir.

$$L_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon\phi_K}{eN_d}} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada ε_0 elektrik sabiti, ε dielektrik katsayısı, e elektron yükü, N_d donörlerin konsantrasyonu ve ϕ_K kontak potansiyellerin farkıdır.

$$e\phi_K = \phi_m - \phi_s \quad (2.4)$$

Yarıiletkenin yüzey bölgesindeki elektron konsantrasyonu, içi bölgesindeki konsantrasyonundan daha azdır, bu nedenle yüzey bölgesinin direnci daha büyüktür. n-tipi yarıiletkenin yüzey bölgesindeki bu tür tabaka engel tabakası olarak adlandırılır.

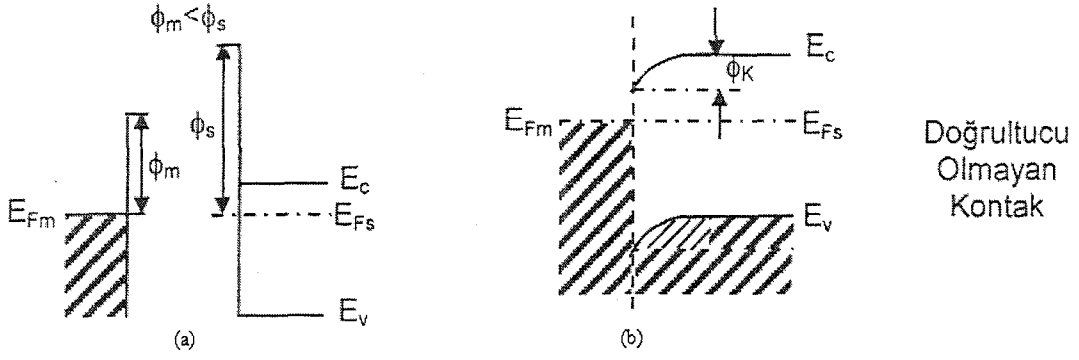


Şekil 2.6 Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji bant diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).

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.

2.4.2 Omik Kontaklar

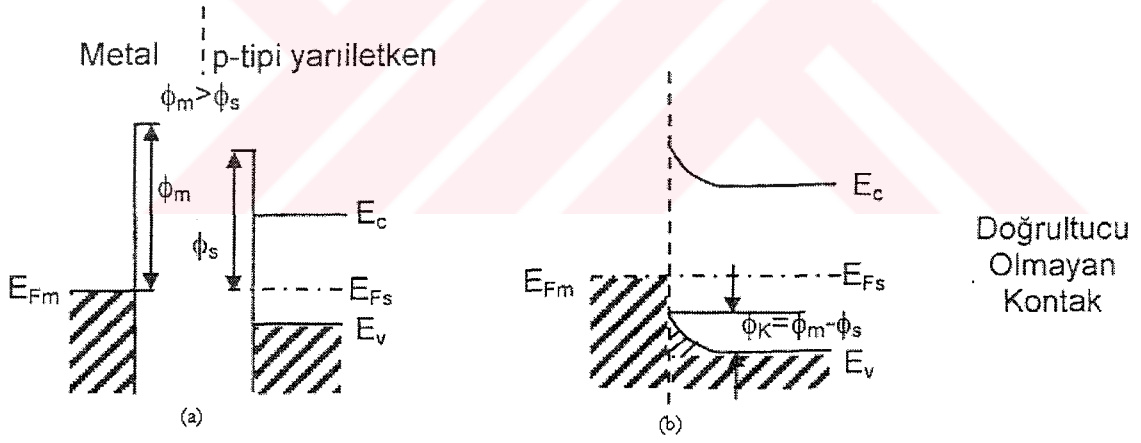
Metal ve yarıiletken temasa getirildiğinde yarıiletkenin yüzey bölgesinin direnci iç bölgelere nazaran küçük olması durumunda, yarıiletkenin yüzey bölgesinde anti-engel tabaka oluşur. Bu tür tabakalar omik kontakların temelini oluşturur.



Doğrultucu
Olmayan
Kontakt

Şekil 2.7 Metal/n-tipi yarıiletken omik kantağın enerji bant diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).

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. Böylece metal/n-tipi yarıiletken yapı doğrultucu olmayan (omik) kontak özelliği göstermektedir.



Doğrultucu
Olmayan
Kontakt

Şekil 2.8 Metal/p tipi yarıiletken omik kantağın enerji bant diyagramı, (a) temasta olmadığı durum (b) temas durumu (Caferov, 2000).

Metalin çıkış işi p-tipi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden büyük olduğu durumda ($\phi_m > \phi_s$), elektronların p-tipi yarıiletkenden metale daha kolay geçişleri neticesinde yarıiletkenin yüzey bölgesinde pozitif yüklerin konsantrasyonu artmakta yani direnci iç bölgelere nazaran daha küçük olmaktadır. Böylece metal/p-tipi yarıiletken yapı, doğrultucu olmayan (omik) kontak özelliği göstermektedir.

Yarıiletken devre elemanlarını elektronik devreye bağlamak yada onların karakteristiklerini ölçebilmek için bu devre elamanlara akım-gerilim karakteristiği lineer olan omik kontaklar yapılır.

Bir omik kontak aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Caferov, 1998).

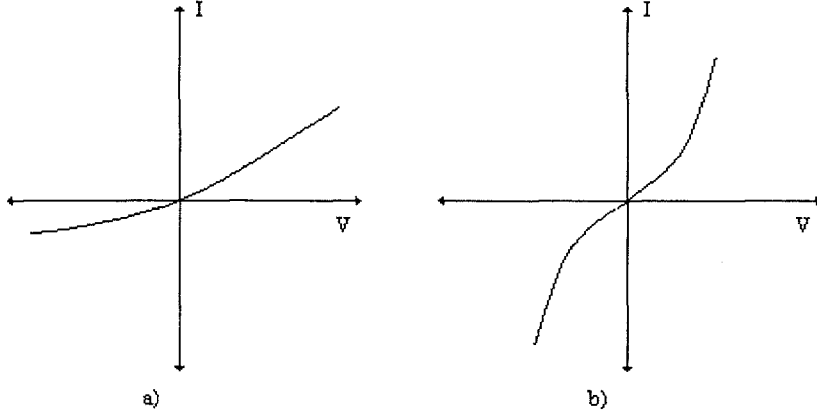
- a) Kontakların akım-gerilim karakteristiği lineer olmalı yani doğrultucu özellik göstermemelidir. Diğer bir ifadeyle kontak direnci akım yönüne bağlı olmamalıdır.
- b) Kontak direnci akımla orantılı olarak değişmemelidir.
- c) Kontak direnci yarıiletkenin direncinden çok küçük olmalıdır.
- d) Kontakta akım geçerken gürültü olmamalıdır.
- e) Kontak malzemesi yarıiletkenle mekanik olarak iyi birleşmelidir, yani yapışkanlığı yüksek olmalıdır.
- f) Kontak malzemesinin yarıiletken içinde azınlık taşıyıcıları salmaması gerekir.

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. Kontaklar yapıldıktan sonra yarıiletkenin elektrik özellikleri incelenebilir, metal-yarıiletken kantağın akım-gerilim karakteristiği kantağın omikliğinin göstergesidir. Denklem (2.5)'de verildiği gibi kantağa düşen gerilimin kontakta geçen akıma oranı omik kantağın direncini verir.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.5)$$

Kantağın direnci ne kadar az ise kontak o kadar iyi omik kontaklıdır. Omik kantağın direnci onun alanına bağlıdır bu nedenle farklı alanlı omik kontakların dirençlerini karşılaştırmada bu kontakları öz dirençleri kullanılmalıdır. Bu da kantağa düşen gerilimin kontakta geçen akım yoğunluğuna oranı ile verilir (2.6) ve birimi (Ωcm^2)'dir.

$$\rho = \frac{V}{J} \quad (2.6)$$



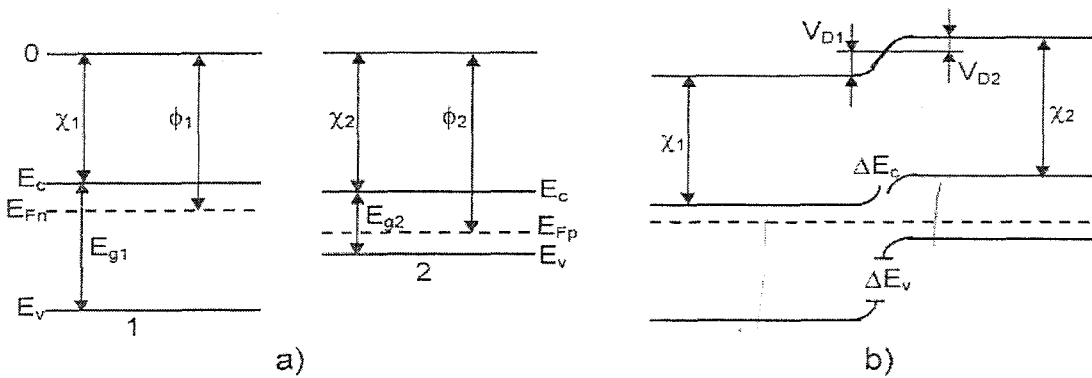
Şekil 2.9 Yaklaşık omik kontakların akım-gerilim karakteristikleri, (a) Küçük doğrultmaya sahip omik kontak (b) Direnci gerilime bağlı olan omik kontak (Caferov, 1998).

Deneyisel çalışmalarda tam lineer akım-gerilim karakteristikli metal-yarıiletken kontak yapmak zordur. Kontakın akım-gerilim karakteristiği lineer olmadığı takdirde 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.

2.5 Heteroeklemler

İki kimyasal farklı yarıiletkenin bir kristaldeki kontakı heteroeklem olarak tanımlanır. Heteroeklemler p-n, n-p, n-n ve p-p tipi olabilir.

İki farklı iletkenliğe sahip iki farklı yarıiletkenin (n-tipi ve p-tipi) temasa getirilmesiyle oluşan eklemler keskin heteroeklemler olarak adlandırılır.



Şekil 2.10 (a) İki ayrı yarıiletkenin temasa getirilmeden önce n-tipi, p-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı (b) keskin n-p heteroeklemin enerji bant diyagramı (Caferov, 2000).

Burada E_{g1} ve E_{g2} 1. ve 2. yarıiletkenin yasak bant genişliği, χ_1 ve χ_2 elektron alınganlığı, ϕ_1 ve ϕ_2 termodinamik iş fonksiyonudur. Yarıiletkenin elektron alınganlığı, elektronu iletim bandının dibinden vakum seviyesine geçirmek için gereken enerji ile belirlenir.

Eğer 2. yarıiletkenin termodinamik iş fonksiyonu 1. yarıiletkenin iş fonksiyonundan daha büyükse ($\phi_1 < \phi_2$), temasa getirildiğinde elektronlar 1. yarıiletkenden 2. yarıiletkene geçebilir. Neticede yarıiletkenlerin sınır bölgesinde difüzyon potansiyeli meydana gelmektedir.

$$V_D = V_{D1} + V_{D2} \quad (2.7)$$

Yarıiletkenlerin yasak bantlarının genişliklerinin farklı olması ($E_{g1} > E_{g2}$) nedeniyle, sınır bölgesinde iletim bandının dibinin (E_c) ve valans bandının tavanının (E_v) dağılımında kesinti oluşmaktadır.

$$\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1 \quad (2.8)$$

$$\Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} - \Delta E_c \quad (2.9)$$

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

2.6 Difüzyon Mekanizmaları ve Difüzyon Kuralları

Katılarda atomlar, ısının etkisiyle denge konumları etrafında küçük genlikli titreşimler yapmaktadır. Kristal içindeki atomlar herhangi bir anda aynı enerjiye sahip değildirler, çoğu atom ortalama enerji seviyesinde bulunur ve sıcaklık arttıkça ortalama enerji seviyesi ve bu seviyede bulunan atom sayısı artmaktadır. Eğer kristaldeki atomlar arası etkileşmelerin neticesinde herhangi bir atom yeterli enerjiye sahip olduğunda, denge konumundan komşu denge konumuna geçebilir. Bu şekilde atomların ısı etkisiyle bir denge konumundan diğerine atlamalarına “difüzyon” denir. Dolayısı ile atomların malzeme içinde taşınması difüzyon olayı olarak tanımlanır. Eğer taşınan atomlar, saf malzemenin kendi atomları ise olay “özdifüzyon”, katkı atomları yarıiletkende hareket ederse “difüzyon” olarak adlandırılır. Malzemelerin üretimi ve uygulamaları sırasında görülen kristal büyütülmesi, katılaşma, çökelme, yeniden kristalleşme, tane büyümesi, faz oluşması, faz geçişi gibi tüm bu işlemler büyük ölçüde atomların kütle içerisindeki difüzyonuna bağlıdır.

Difüzyon Mekanizmaları

Atomların kristal içinde bir denge konumundan diğerine geçişi beş farklı mekanizmayla gerçekleşebilir.

1-Çift yerdeğiştirme: İki komşu atom aynı anda yer değiştirmesidir. Bu mekanizmanın

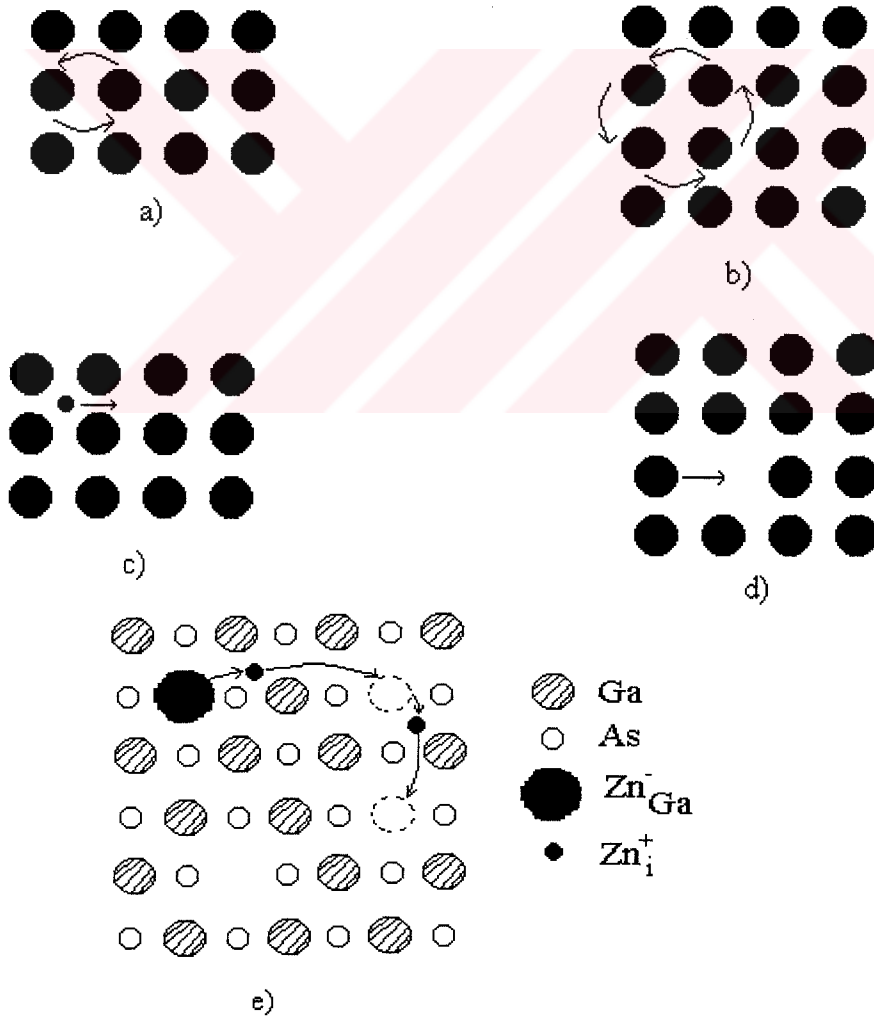
oluşma olasılığı oldukça küçüktür ve genellikle metallerde görülür (Şekil 2.11a).

2-Halka yerdeğiştirmesi: Halka şeklinde yerleşmiş dört atomun aynı zamanda dairesel olarak yerdeğiştirmesidir. Her atom bir örgü parametresi uzaklığı atlamaktadır (Şekil 2.11b).

3-Arayerle difüzyon: Atomun kristalin bir arayer pozisyonundan komşu arayer pozisyonuna atlamasıdır. Küçük yarıçaplı atomun taşınması arayer mekanizması ile oluşabilir (Şekil 2.11c).

4-Vakansiyon veya boşluklarla difüzyon: Atomun bir vakansiyondan başka vakansiyona atlamalarıdır (Şekil 2.11d).

5-Karmaşık veya dissosiyatif mekanizma: Atomun örgü düğümünden arayer pozisyonuna geçip arayer pozisyonunda hareketinden sonra yeniden başka bir vakansiyona geçmesidir (Şekil 2.11e).



Şekil 2.11 Atomların difüzyon mekanizmaları, (a) çift yerdeğiştirme (b) halka yerdeğiştirme (c) arayer (d) vakansiyon (e) çinkonun GaAs'de dissosiyatif mekanizması (Caferov, 1998).

Difüzyon Kuralları

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.

$$J = -D \frac{dN}{dx} \quad (2.10)$$

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

$$D = \alpha a^2 \nu \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilir. a örgü parametresi, ν atomların kristaldeki titreşim frekansı ve α bir sabittir. α ’nın değeri basit örgüde 1/3, hacim merkezli kübik örgüde 1/8 ve yüzey merkezli kübik örgüde 1/12’dir. Difüzyon katsayısı atomların kristaldeki hareket hızını ifade eder ve birimi cm^2/s dir. Atomların yarıiletkenlerdeki difüzyon katsayısı yüksek sıcaklıklarda ($500\text{ }^\circ\text{C}$ - $1000\text{ }^\circ\text{C}$) yaklaşık 10^{-6} - 10^{-14} cm^2/s aralığında değişmektedir.

Difüzyonun İkinci Kuralı

Bu kurala göre konsantrasyonun zamanla değişim hızı, konsantrasyonun ikinci türevine bağlıdır. Eşitlik (2.12)’deki süreklilik denklemi difüzyonun birinci kuralına (Eşitlik 2.10) uygulanırsa, difüzyonun ikinci kuralını ifade eden (2.13) eşitliği elde edilir.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (2.13)$$

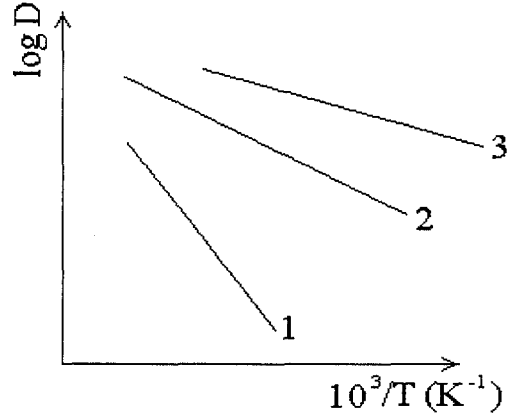
Katılarda difüzyon katsayısı, sıcaklık arttıkça artmaktadır. Difüzyon katsayısının sıcaklıkla bağıntısına Arrhenius eşitliği denir. Vakansiyon mekanizmasıyla kristalde hareket eden atomlar için Arrhenius eşitliği (2.14) şeklinde verilir.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{G}{kT}\right) \quad (2.14)$$

$$G = G_f + G_m \quad (2.15)$$

Eşitlikteki G difüzyonun aktivasyon enerjisi, vakansiyon oluşma aktivasyon enerjisi (G_f) ve

atomun potansiyel engelini aşma potansiyel enerjisinin (G_m) toplamıdır, D_0 üstel fonksiyon çarpanıdır. Şekil 2.12 atomların difüzyon katsayısının sıcaklığa bağlılığını göstermektedir.



Şekil 2.12 (1) Boşluk, (2) arayer ve (3) tane sınırları 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

$$N(x, 0) = 0 \quad (2.16)$$

$$N(0, t) = N_0 \quad (2.17)$$

bağıntıları ile verilir. Difüzyonun ikinci kuralı (2.13) çözümü

$$N(x, t) = \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.18)$$

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

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \quad (2.19)$$

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

$$N(x,0) = Q \quad x = 0 \quad (2.20)$$

$$N(x,0) = 0 \quad x > 0 \quad (2.21)$$

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

Difüzyonun ikinci kuralı (2.13) çözümü

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (2.22)$$

şeklindedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 CdTe Filmlerin Elde Edilme Yöntemleri

Kullanılan malzemenin ve işçiliğin azaltılması, teknolojisinin basitleştirilerek maliyetin düşürülmesi yönünde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, yarıiletken malzemenin film şeklinde kaplanması yöntemi çekici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır.

Kadmiyum tellürün (CdTe) tek kristal ve ince film şeklinde büyütülmesini karşılaştıracak olursak;

CdTe tek kristal olarak büyütülmesinde:

- a) Maliyeti yüksektir,
- b) İleri teknoloji gerektirmektedir,
- c) Tek kristal olarak elde etmenin zorlukları fazla ve zaman alıcı bir işlemdir,
- d) Geniş yüzeylere uygulanamaz olması bir dezavantajdır.

CdTe ince film olarak büyütülmesinde:

- a) Az madde kullanılması,
- b) Maliyetinin düşük olması,
- c) Kolay metotlarla daha çabuk elde edilmesi,
- d) Geniş yüzeylere uygulanabilir olması,
- e) İstenilen bir biçimde çok farklı malzemeler üzerine kaplanabilmesi,
- f) Ağırlık başına yüksek güç temin edilebilir olması,

CdTe ince film olarak kullanımının kolay ve uygun olması araştırmalarda ön plana çıkmasına sebep olmuştur.

CdTe'ün ince film olarak kaplanmasında üç yöntem ön plana çıkmıştır.

- 1) Kimyasal taşıma,
- 2) Elektrokaplama,
- 3) Vakumda buharlaştırma,
 - 3a) Bileşiğin direkt olarak buharlaştırılması,
 - 3b) Elementlerin yakın mesafeli süblimasyonu.

Kimyasal Taşıma

Kapalı tüp sisteminde CdTe'ün kimyasal yöntemle ince film olarak elde edilmektedir.

Cd:Te:I dan oluşan gaz formunda kapalı tüp içerisinde reaksiyona girerek CdTe filmi elde edilmektedir.

Bu reaksiyon denklemi



şeklindedir.

CdI_2 ve Te_2 yüksek sıcaklıkta gaz halinde tüp içerisinde reaksiyona girerek, CdTe şekline altlık üzerine çöker. I_2 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 (Kennety Zanio, 1978).

Elektrokaplama

Elektrokaplama yöntemi ise Cd ve Te iyonu taşıyan elektrolitten akım geçirilerek, CdTe yarıiletkeninin katotta büyümesi sağlanır. Elektrokaplama geniş alanlı ince film üretiminde ekonomik, basit ve başarılı bir yöntemdir. CdTe elektrokaplama genel olarak asidik ortamda yapılır (1.4-2) PH.

Reaksiyon denklemi,



şeklindedir. Bu reaksiyon iki aşamada gerçekleşir.



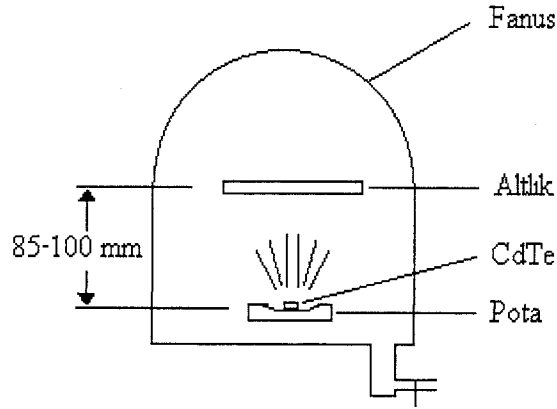
Sülfürik asit içerisinde Cd konsantrasyonu 1M ve Te konsantrasyonu TeO_2 10^{-3} M olan çözelti hazırlanır. Elektrolitin sıcaklığı 70 °C de sabitlenerek elektrolitten akım geçmesi sağlanır. Bunun içinde potansiyeli 1.1 ile 0.7 Volt arasında bir gerilim uygulanır ve CdTe şeklinde altlık üzerine çökmesi sağlanır. Filmin kalınlığı Faraday Yasaları ile ayarlanır.

Çok ucuz ve basit olan bu yöntemle büyüyen CdTe denetimi yakın mesafeli süblimasyon yönteminde olduğu kadar kolay değildir (C. Lepiller, vd., 2000).

Bileşiğin Direkt Olarak Buharlaştırması

CdTe tek kristali yüksek vakum ortamında buharlaştırılarak altlık üzerine ince film şeklinde çökmesiyle elde edilmektedir (Şekil 3.1).

İnce film genellikle 10^{-4} – 10^{-9} Torr'luk basınç ortamında vakumda hazırlanmaktadır. Vakum, kapalı bir gaz basıncının normal atmosfer basıncından daha düşük olduğu ortama denilmektedir.



Sekil 3.1 Yüksek vakum setinin şematik gösterimi.

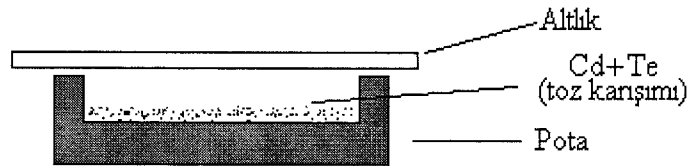
CdTe ve altlık arasındaki mesafe yaklaşık olarak 85–100 mm olarak ayarlanmaktadır.

CdTe bileşiği vakumda ısıtılarak erimesi ve sonrada buharlaştırılması sağlanmaktadır. Isının etkisiyle buharlaşan CdTe molekülleri altlık üzerine yönelmekte ve altlık üzerine çökerek CdTe'ün film olarak büyütülmesi gerçekleşmektedir.

3.1.1 Yakın Mesafeli Süblimasyon (CSS)

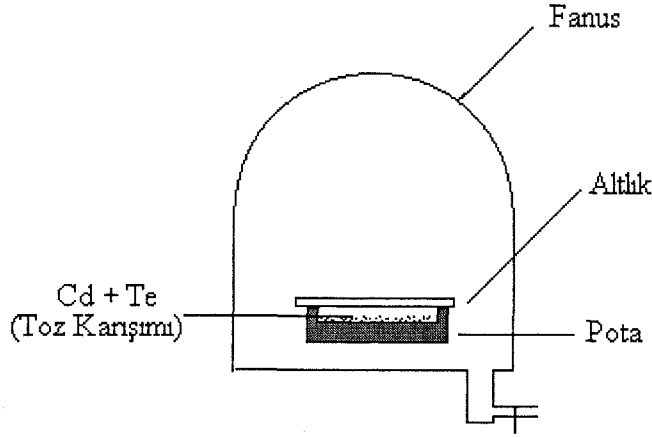
Bu yöntemle sıcaklık farklılıkları çok az olan kaynak ve filmin büyütüldüğü yüzey birbirine çok yakın tutularak malzemenin süblimasyon yoluyla büyümesi sağlanır.

Kadmiyum ve tellür elementlerinden oluşan toz karışım hazırlanır, (Cd+Te) toz karışımın oranı genellikle $Cd/Te=0.6$ 'dır. Erime sıcaklığı çok yüksek olan bir pota içerisine yerleştirilir. Karbonun erime sıcaklığı $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmasından dolayı karbon, pota olarak daha sık kullanılır. Potanın üstüne filmin buharlaştırılacağı altlık konur. Kaynak (Cd+Te toz karışımı) ile altlık mesafesi yaklaşık 1–2 mm civarındadır (Şekil 3.2).



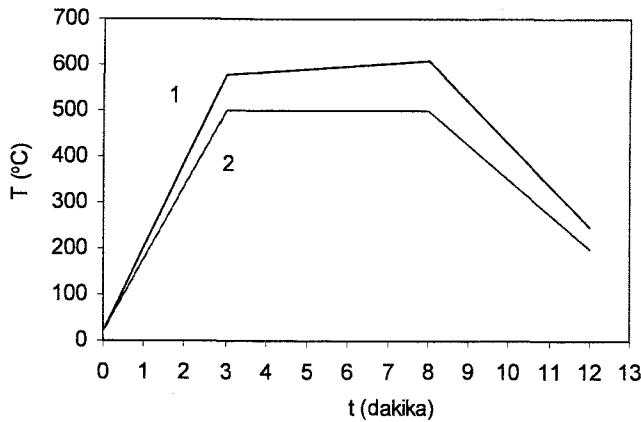
Şekil 3.2 CSS yöntemiyle CdTe filmin elde edildiği pota-altlık düzeneği.

CdTe ince film olarak büyütülmesi düşük vakum ortamında gerçekleşir, fanus içerisindeki basınç yaklaşık 10^{-1} Torr civarındadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 CdTe filmlerinin elde edildiği vakum setinin şematik gösterimi.

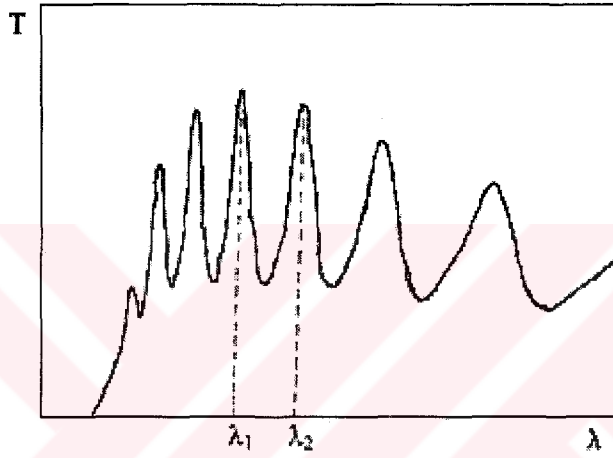
Vakum setinin (Leybold-Heraeus) içerisine düzeneğimiz yerleştirilir, vakum aleti çalıştırılarak fanus içerisindeki hava boşaltılır. Karbon potaya uygulanan gerilimle pota içerisinden akım geçmesi sağlanır, akım geçtikçe pota ısınır (Şekil 3.4), ısınan pota içerisindeki malzeme yeterli sıcaklıkta buharlaştırılarak altlık üzerine çöker ve altlık üstüne CdTe, ince film olarak kaplanmış olur. Çalışmalarda altlık malzemesi olarak 1mm kalınlıklı $1 \times 2 \text{ cm}^2$ alanlı optik cam ve cam üzerine kaplı hazır SnO_2 iletken tabaka kullanılmıştır. Filmlerin kaplanacakları altlıkların temizliği buharlaştırma için önemlidir. Altlık malzemeleri metanol içerisinde bekletildikten sonra saf su ile yıkanır, 70°C de etüvde kurutulduktan sonra potaya yerleştirilir. Bu işlemlerden sonra CdTe altlık üstüne buharlaştırılır. Film kalınlığını buharlaştırma süresiyle ayarlanır. Hazırlanan CdTe filmlerin kalınlığı $1-5 \mu\text{m}$ arasındadır.



Şekil 3.4 (1) Kaynak ve (2) altlık sıcaklığının zamanla değişimi.

3.1.2 Optik Geçirgenlik İnterferans Spektrometresi ile Kalınlık Ölçme Yöntemi

Film kalınlığının ölçümü için kullanılan bir yöntemdir. İnce film iki paralel yüzeyden oluşmuştur. Üst yüzeye gönderilen ışın hem yüzeyden yansır hem de kırılarak içine girer ve diğer yüzeyden de kırılmaya uğrayarak çıkar. Paralel iki yüzeyden yansıyan ışınların girişimi bu yöntemin temelini oluşturur. Filmin alt ve üst yüzeylerinden yansıyarak çıkan ışınlar paralel olmakta ve mercek üzerine düşen ışınlar odak düzleminde yer almış ekran üzerinde toplanmaktadır. Üst üste gelen ışınların ekran üzerinde yollarının farkı değeri ile maksimum veya minimum gözlenmektedir.



Şekil 3.5 Optik geçirgenlik spektrumu (Caferov, 2000).

İnce filmde girişim olayı gerçekleştiğinde, optik geçirgenlik spektrumunda maksimum ve minimumlardan oluşan girişim desenleri elde edilmektedir (Şekil 3.5). Bu spektrumdaki iki ardışık maksimum veya minimum noktaların dalga boyları belirlenmekte. Optik geçirgenlik spektrumundan belirlenen λ_1 ve λ_2 dalga boylarının ve ince filmin kırılma indisinin aşağıdaki denkleme konulmasıyla film kalınlığı hesaplanmaktadır.

$$\frac{1}{2nd} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \quad (3.5)$$

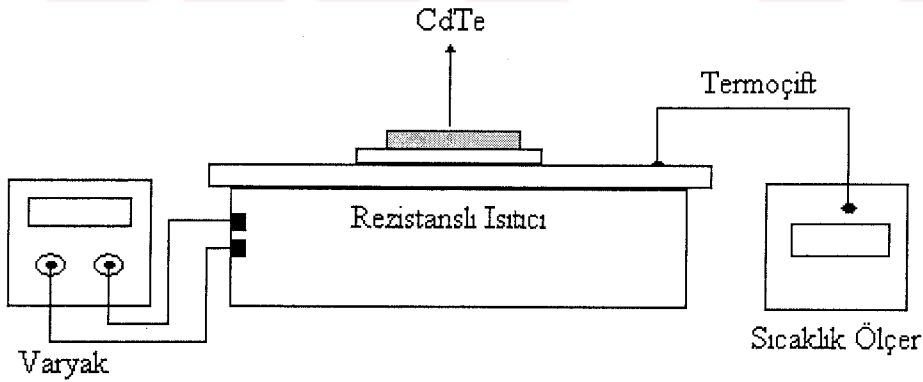
Burada d filmin kalınlığı ve n kırılma indisidir. Bu yöntemle ya film kalınlığını (bilinen kırılma indisi için) yada kırılma indisini (bilinen film kalınlığı için) bulmak mümkündür. CdTe filmlerin kalınlıkları bu yöntem ile hesaplanmıştır ve hesaplarda CdTe'nin kırılma indisi $n=2.69$ olarak alınmıştır.

3.2 İletken (Ag, C)-CdTe Kontakların Hazırlanması

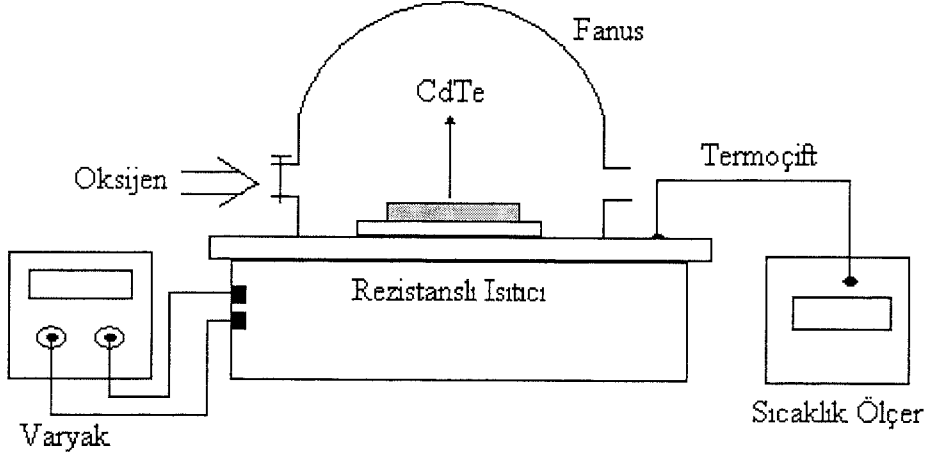
CdTe filmlerin elektriksel ölçümleri için Ag ve C kontaklar yapılmıştır. Gümüş (macun) CdTe filmlerin yüzeyine küçük alanlı olmak üzere ($R=1-2$ mm çaplı), damla yöntemiyle yapılmıştır. Ag macunun kuruması ve içerisindeki malzemenin uçması için 70 °C de kısa süre tavlama yapılmıştır. C kontak yapmak için, CdTe filmlerin yüzeyine kontak alanı bırakılacak şekilde maske hazırlanmıştır ($R=1.5$ mm çaplı) ve C elektron demeti ile yüksek vakumda (10^{-5} Torr) (Leybold-Heraeus PD-180) film yüzeyine kaplanmıştır. Buharlaştırma sürecinde örnekler üzerine kaplanan C kalınlığı, kalınlık ölçer (Deposition Controller Inficon-Leybold) kullanılarak kontrol edilmiştir.

3.3 CdTe Filmlerinin Havada ve Oksijen Ortamında Tavlama

CdTe filmlere ısı işlem uygulanarak tavlama gerçekleştirilir. CdTe filmler havada ve oksijen ortamında, ortam sıcaklığı 400 °C de sabitlenerek 30 dakika boyunca tavlama yapılır. Şekil 3.6'da gösterilen düzenden görüldüğü gibi, örnekler rezistanslı ısıtıcı üzerinde havada tavlama yapılır. Şekil 3.7 de gösterilen düzende, fanus içine yerleştirilen örneklere dışarıdan oksijen verilerek oksijen ortamında tavlama sağlanır. Tavlama sonucunda filmlerde tip değişikliği saptandı. n-tipi CdTe filmlerin tavlama sonrası p-tipi oldukları belirlendi.



Şekil 3.6 CdTe filmlerin havada tavlama düzeneği.



Şekil 3.7 CdTe filmlerin oksijen ortamında tavlama düzeneği.

3.4 CdCl₂'ün ve NaCl'ün CdTe Filmlerine Kaplanması

CdCl₂'ün CdTe Filmlerine Çökertilmesi

CdCl₂'ün, CdTe filmlerinde elektrik, fotoelektrik ve optik özelliklerine etkilerini incelemek için cam/CdTe, cam/SnO₂/CdTe yapılarındaki örneklere CdCl₂ kaplandı. Kaplama için CdCl₂ ve metanol çözeltisi hazırlandı. Toz halindeki CdCl₂ (1.25 gr) metanol (100 ml) içerisine dökülerek ısıtıcı üzerinde 55 °C sıcaklığa gelene kadar karıştırıldı ve doymuş CdCl₂-metanol çözeltisi elde edildi. CdCl₂-metanol çözeltisi 55 °C'ye ulaştıktan sonra 15 dakika boyunca bu sıcaklıkta sabit tutuldu. Hazırlanan çözümden pipet yardımıyla CdTe filmlerin üzerine damla yöntemiyle kaplandı ve kurutularak metanolün uçmasıyla CdCl₂'nin film üzerine çökmesi sağlandı. CdCl₂ ile kaplanan örnekler 400 °C de 30 dakika havada tavlama verildi. Tavlama sonunda CdCl₂ kalıntıları saf su ile örnek üzerinden silindi.

NaCl'ün CdTe Filmlerine Kaplanması

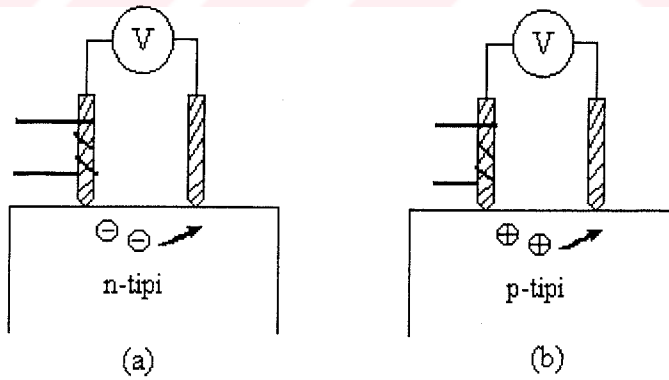
NaCl'ün CdTe filmlerinde elektrikselle karakteristiğine ve optik özelliklerine etkilerini incelemek üzere cam/CdTe, cam/SnO₂/CdTe yapılarındaki örneklere, toz halinde bulunan NaCl'ün preslenerek tablet haline getirilmesinden sonra elektron demetiyle vakumda (10⁻⁵ Torr) buharlaştırma yöntemi kullanılarak (Leybold-Heraeus PD-180) kaplandı. Buharlaştırma sürecinde örnekler üzerine kaplanan NaCl'ün kalınlığı, kalınlık ölçer (Deposition Controller Inficon-Leybold) kullanılarak kontrol edildi (d= 30 nm). NaCl kaplanmış örneklere 400-430 °C de 30 dakika tavlama verildi ve tavlama sonrası NaCl, kalıntıları örnek üzerinden silinerek kaldırıldı.

3.5 CdTe Filmlerinin Elektriksel Karakteristiklerinin Ölçümü

3.5.1 CdTe Filmlerinin İletkenlik ve Özdirenç Ölçümleri

İletkenlik Tipi Ölçümleri

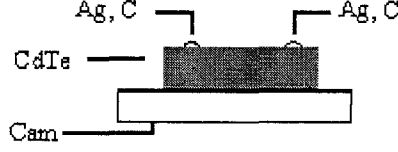
CdTe filmlerinin iletkenlik tipi ölçümlerinde termal elektro-motor kuvvet (TEMK) yöntemi kullanıldı. Yarıiletken homojen olmayacak şekilde ısıtıldığında çoğunluk yük taşıyıcıları (n-tipinde elektronlar, p-tipinde pozitif yüklü delikler) daha sıcak bölgede artacaktır. Bu konsantrasyon gradyeninin oluşmasından dolayı çoğunluk yük taşıyıcıları sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hareketlenecektir. Çoğunluk yük taşıyıcıların difuzyonu 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 3.8 termal elektro-motor kuvveti yöntemiyle yarıiletkenin yük taşıyıcılarının tipini bulmak için kullanılan devreler gösterilmektedir. Bu yöntemde iki prop kullanılır. Probuñ 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 3.8 Termal EMK yöntemiyle, (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik tiplerinin ölçüm devresi (Caferov, 1998).

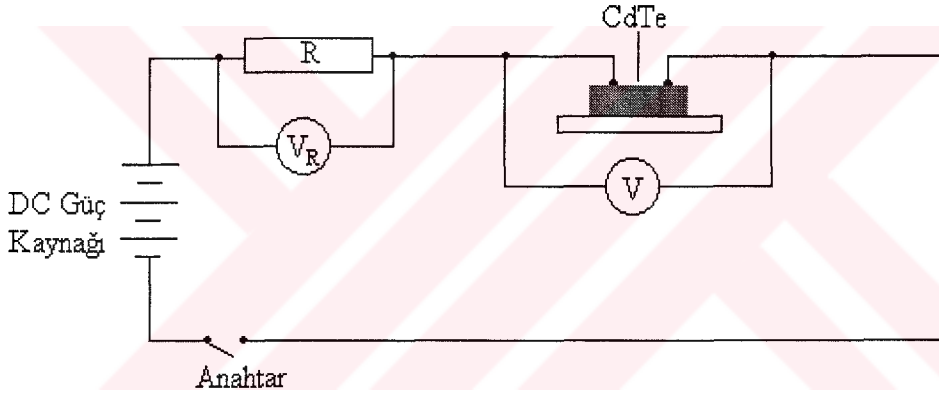
CdTe Filmlerinin Direnç ve Özdirenç Ölçümleri

CdTe filmlerinin direnç ölçümleri için CdTe filmleri üzerinden iki kontak alındı (Şekil 3.9). Kontak olarak gümüş veya karbon kullanıldı.



Şekil 3.9 CdTe filmlerinin kontak alınması.

Hazırlanan örnek Şekil 3.10’da gösterilen düzeneğe yerleştirilerek oda sıcaklığında karanlıkta ve 50 Watt’lık halojen lamba ile aydınlıkta (örneğin üzerine düşen ışık şiddeti $P=100 \text{ mW/cm}^2$) direnç ölçümü yapıldı.



Şekil 3.10 CdTe filmlerin direnç ölçüm devre şeması.

Bu çalışmada CSS yöntemiyle elde edilen CdTe filmlerin direnci yüksek olduğundan ($R \approx 10^5 - 10^7 \Omega \text{cm}$), özdirenç ölçümlerinde Şekil 3.10 da gösterilen ölçüm devresi kullanıldı.

Değeri bilinen direnç ($R=10 \text{ M}\Omega$) örneğe seri bağlandı ve DC güç kaynağından sırasıyla 500, 1000, 1500 V uygulandı ve değeri bilinen dirence bağlı voltmetre ile üzerindeki gerilim okundu. Ohm yasasından örnekten geçen akım

$$I = \frac{V_R}{R} \text{ (A)} \quad (3.6)$$

formülü ile hesaplandı. Örneğe bağlı voltmetre ile örnek üzerindeki gerilim okundu, (3.6) formülü ile örneğin direnci hesaplandı. Bu işlem örneklerin direnci, ölçü aletlerinden

okunamadığı durumda yani çok yüksek dirençli örneklerde uygulandı. CdTe filmlerin kontak direnci aşağıdaki formül ile hesaplandı.

$$J = \frac{I}{S} \text{ (A/cm}^2\text{)} \quad (3.7)$$

$$\rho = \frac{V}{J} \text{ (\Omega cm}^2\text{)} \quad (3.8)$$

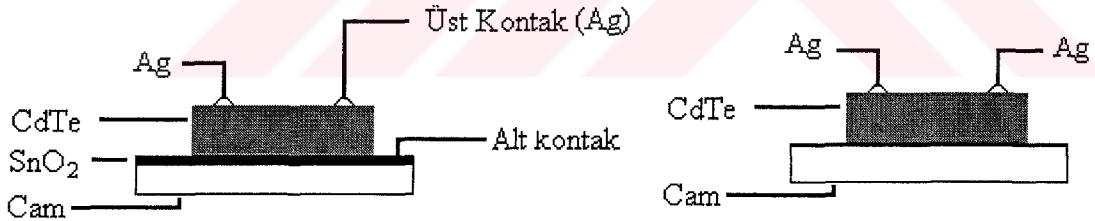
Bu da kontağa düşen gerilimin kontakta geçen akım yoğunluğuna oranı ile verilir. Burada S kontak alanıdır. CdTe filmlerin öz direnci

$$\rho = \frac{R.S}{\lambda} \text{ (\Omega cm)} \quad (3.9)$$

denklemleriyle hesaplandı.

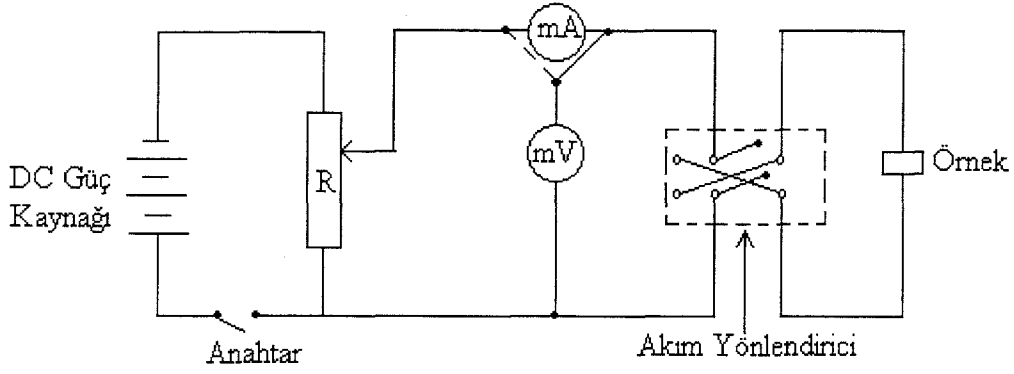
3.5.2 Eklemlerin Akım-Gerilim Karakteristiklerinin Ölçümü

CdTe/metal, SnO₂/CdTe/metal yapılar, elektriksel ölçümlerde kullanılmak üzere (Şekil 3.11) hazırlandı. Metal üst kontak olarak Ag alındı. Altlık üzerine yerleştirilen örneklerin metal kontaktlarına sıvı gümüş ile tutturulmuş ince bakır tel ile akım-gerilim karakteristiği ölçüm devresine bağlantı yapıldı (Şekil 3.12).



Şekil 3.11 Akım-gerilim karakteristiği ölçümü için hazırlanan örnekler.

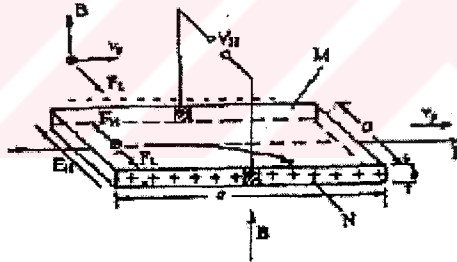
Hazırlanan örneklerde Ag/CdTe/Ag, Ag/CdTe/SnO₂ kontaktlar arasındaki akım-gerilim karakteristikleri karanlıkta ve 50 Watt'lık halojen lamba ile aydınlıkta (örneğin üzerine düşen ışık şiddeti P=100 mW/cm²), oda sıcaklığında ölçülmüştür. Şekil 3.12 akım-gerilim karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan devrenin şemasını göstermektedir.



Şekil 3.12 CdTe filmlerinin akım-gerilim karakteristiklerinin ölçüm devresinin şeması.

3.5.3 Yük Taşıyıcıları Konsantrasyonunun Ölçülmesi

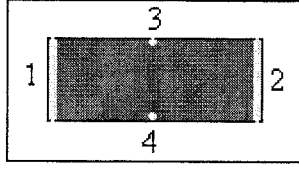
1879 yılında Hall, altın örnekten akım geçirirken, aynı anda bir manyetik alana yerleştirdiğinde, örneğin iki zıt kenar yüzeyi arasında bir gerilim oluştuğunu keşfetmiştir. Bu olay, Hall olayı olarak tanınır ve manyetik alanda hareket eden elektrik yüklerine Lorentz kuvvetinin etkisi ile ilgilidir.



Şekil 3.13 p-tipi yarıiletkende Hall olayı (Caferov, 1998).

Manyetik alanda boşluklar Lorentz kuvvetinin etkisiyle örneğin N yüzeyi yönünde hareketlenirler. Bu yüzeye karşı, M yüzeyinde ise negatif yüklü parçacıklar toplanırlar. Böylece, yarıiletkenin N ve M yüzeylerinde yük dengesi bozulur ve bu yüzeyler arası Hall gerilimi (V_H) veya Hall elektrik alanı (E_H) oluşur. Pozitif yüklü boşluklara etki eden Hall alanının kuvveti F_H ile manyetik kuvveti (F_B) birbirine zıt yöndedir (Şekil 3.13). Bu kuvvetler eşitlendiğinde ($F_B = F_H$), başka yük taşıyıcıları kenar M ve N yüzeylerinde son bulur ve manyetik alan başka yük taşıyıcıların hareketine etki göstermez.

Hall gerilimi ölçümü için hazırlanan örnekler iki formda olabilir 1) Ölçümlerin örnek geometrisinin dikdörtgen olması durumunda yapılması, 2) Serbest formlu örnekler için ölçüm alınması (Van der Pauw Yöntemi).



Şekil 3.14 Hall Olayı ölçümlerinde dikdörtgen formlu örnekte kontaktların yerleşimi.

Dikdörtgen formlu örneklerde yapılan Hall ölçümlerinde, Şekil 3.14'de görüldüğü gibi örneğin kenarlarına dört omik kontak yapılır. $B = 0$ iken ve $B \neq 0$ iken 1-2 kontaktlarından akım (I_{12}) geçirilir ve 3-4 kontaktları arası potansiyel farkı $V_{34}(0)$ ve $V_{34}(B)$ okunur. Hall gerilimini hatasız ölçmek için 3 ve 4 kontaktları arasında oluşan parazit gerilimleri ortadan kaldırmak gerekir. Parazit gerilimlerin çoğu elektrik akımının ve manyetik alanın yönüne bağlıdır. Bu nedenle ölçümler iki akım yönü ve iki manyetik alan yönü olmak üzere toplam dört kez yapılır ve $V_{34}(I^+, B^+)$, $V_{34}(I^-, B^+)$, $V_{34}(I^+, B^-)$, $V_{34}(I^-, B^-)$ değerleri bulunur. Sonuç olarak 3 ve 4 kontaktları arası hatasız Hall gerilimi değeri

$$V_{34} = \frac{1}{4} [V_{34}(I^+, B^+) + V_{34}(I^-, B^+) + V_{34}(I^+, B^-) + V_{34}(I^-, B^-)] \quad (3.10)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

$$V_H = V_{34}(B) - V_{34}(0) = R_H \frac{I_{12} B}{b} \quad (3.11)$$

bağıntısı ile verilir. Burada b (kalınlık), örneğin manyetik alan doğrultusundaki boyutudur. Bu ölçümde omik kontak alanları çok küçük olmalı ve örneğin tam kenarına yapılmalıdır.

Katkılı yarıiletkenler için, Hall sabiti, yük taşıyıcılarının konsantrasyonu ve mobilitesi

$$R_H (cm^3 C^{-1}) = 10^8 \frac{V_H b}{IB} \quad (3.12)$$

$$n, p (cm^{-3}) = \frac{6.25 \times 10^{18}}{R} \quad (3.13)$$

$$\mu (cm^2 V^{-1} s^{-1}) = R \sigma \quad (3.14)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Burada birimler V (mV), I (mA), b (cm), B (Gauss).

3.6 CdTe Filmlerde İletkenlik-Sıcaklık Ölçümleri

CdTe filmlerde katkıların iyonlaşma enerjisini ve filmin yasak bant genişliğini bulmak için iletkenlik-sıcaklık ölçümleri yapıldı. CSS yöntemiyle cam altlıklar üzerine kaplanan CdTe filme CdCl₂ kaplandı 400 °C de tavlandıktan sonra CdCl₂ yüzeyden silindi ve üzerinden Ag kontaklar alındı. Hazırlanan örnek, iletkenlik ölçüm sistemine bağlandı ve örnek üzerine, sıcaklık değerini okumak için termoçift yerleştirildi. Sıcaklığı kontrol edilebilir ısıtıcı içerisine konulan örnek, bilgisayara bağlantı olan Keithley marka multimetreler ile otomatik olarak sıcaklıkla iletkenlik değişimi ölçüldü*. Daha sonra $\log\sigma-10^3/T$ (K⁻¹) grafikleri çizildi.

Yük taşıyıcılarının konsantrasyonunun (n) sıcaklıkla değişimi, mobilitenin sıcaklıkla değişiminden birkaç kat fazla olduğundan yük konsantrasyonun sıcaklıkla değişimini iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişiminden belirlenebileceği kabul edilir. Düşük sıcaklıklarda yarıiletkenin iletkenliği katkılarla belirlendiğinde katkı atomların yada kusurların iyonlaşma enerjisi aşağıdaki denklemler ile belirlenebilir (Caferov, 1998).

$$\Delta E_a = -2k \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} = tg\varphi \quad (3.15)$$

$$\Delta E_a \approx 0.4tg\varphi \quad (3.16)$$

Burada $tg\varphi$, $\left(\log \sigma - \frac{10^3}{T(K)}\right)$ grafiğinin eğimidir.

Yüksek sıcaklıklarda özden yarıiletkenler için iletkenliğin sıcaklıkla değişim grafiğinden ($\log\sigma-10^3/T$ (K⁻¹)) yasak bant genişliği bulunabilir.

$$\sigma = A \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (3.17)$$

$$E_g = -2k \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} = tg\varphi \quad (3.18)$$

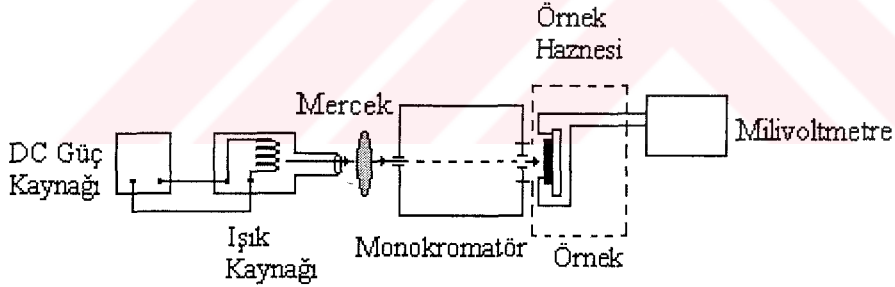
$$E_{g0} \approx 0.4tg\varphi \quad (3.19)$$

* Düzenek M. Çalışkan tarafından bilgisayar bağlantılı hale getirilmiştir.

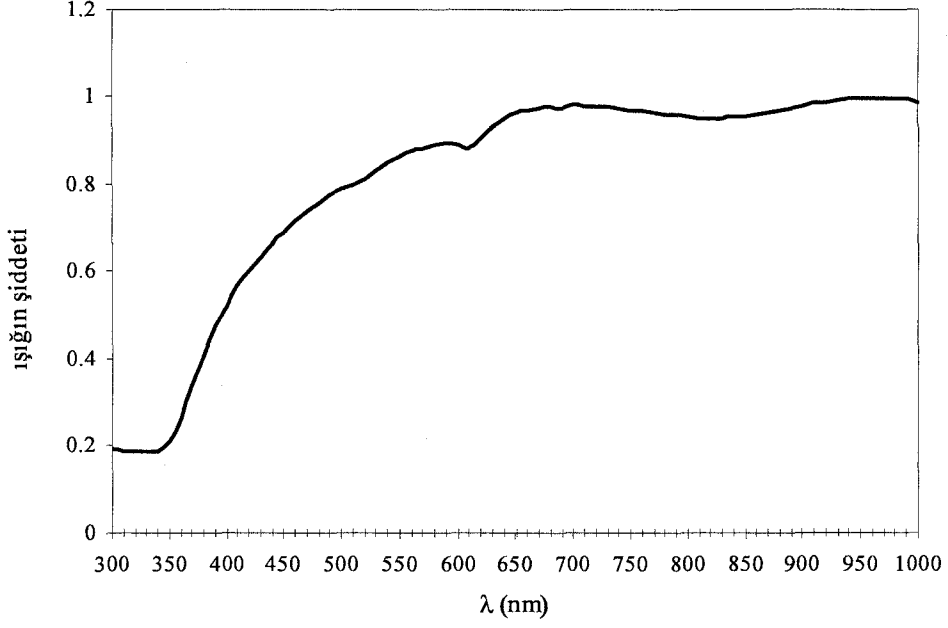
Bu çalışmalarda katkılı CdTe filmlerin iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi 300-673 K aralığında ölçüldü.

3.7 CdTe Filmlerinin Fotoduyarlılık Spektrumlarının Ölçümü

CdTe/SnO₂ eklemlerin fotoduyarlılık dağılım spektrumları $\lambda=300-1000$ nm dalgaboyları aralığında oda sıcaklığında incelendi. Fotoduyarlılığın spektral dağılımı ölçümlerinde “Oriel” marka monokromatör kullanıldı. “Osram” marka halojen lambadan saçılan ışık monokromatörün girişine odaklanmakta ve monokromatörden çıkan monokromatik ışık demeti örneğin yüzeyine düşürülmektedir. Şekil 3.15’de ölçüm düzeneği gösterilmektedir. Işığın etkisiyle örnekte oluşan fotoiletkenlik milivoltmetre (Thurlby 1503 digital multimeter) ile ölçüldü. Her ölçümde örneklerin monokromatöre eşit uzaklıkta bulunmalarına ve eşit miktarda ışık almalarına özen gösterildi. Örneklerin dış ortamdan ışık almaları engellendi. Bu ölçümlerin sonucunda örneğin fotoiletkenlik-dalgaboyu spektrumları elde edildi. Si detektörü kalibre edildi. Örneklerin fotoiletkenlik-dalgaboyu spektrumları monokromatör lambasının spektrumuna oranlanarak çizildi. “Osram” lamba şiddetinin spektral dağılımı, Si detektörü (bpw 34) kullanılarak ölçüldü (Şekil 3.16).



Şekil 3.15 CdTe/SnO₂ eklemlerin fotoduyarlılık spektrumlarının ölçüm düzeneği.



Şekil 3.16 “Orsam” lambasının şiddetinin spektral dağılımı.

3.8 CdTe Filmlerinin Optik Geçirgenlik Ölçümleri

CdTe filmlerin optik geçirgenlik ölçümleri, “Perkin Elmer Lambda 2S” spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. CdTe filmlerinin elde edilmişinden sonra her aşamada $\lambda=300-1100$ nm dalgaboyu aralığında optik spektrumları incelenmiştir. Örneğin optik geçirgenlik spektrumundan soğurma katsayısı (α) aşağıdaki denklemden hesaplandı,

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1-R^2 \exp(-2\alpha d)} \quad (3.20)$$

eğer $\alpha d \gg 1$ ise

$$T = \frac{I}{I_0} = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (3.21)$$

şeklini alır. Denklem (3.21) de verilen T örneğin optik geçirgenliği, I_0 örneğe gelen ışık şiddeti, I örnekten çıkan ışık şiddeti, d CdTe filmin kalınlığı, α soğurma katsayısı, R yansıtma katsayısıdır.

Yansıtma katsayısı ise

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (3.22)$$

formülü kullanılarak hesaplandı. Bizim hesaplamalarımızda $n = 2.69$ olarak kullanılmıştır.

2.2. Bölümde bahsettiğimiz gibi, direkt bantlı yarıiletkenin soğurma spektrumları denklem (2.1)'e uymaktadır. Bu nedenle CdTe filmler direkt (doğrudan) geçişli bant yapısına sahip olduğundan, optik geçirgenlik spektrumundan elde edilen $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ grafikleri çizildi ve bu grafiklerden CdTe filmin yasak bant aralığı bulundu.



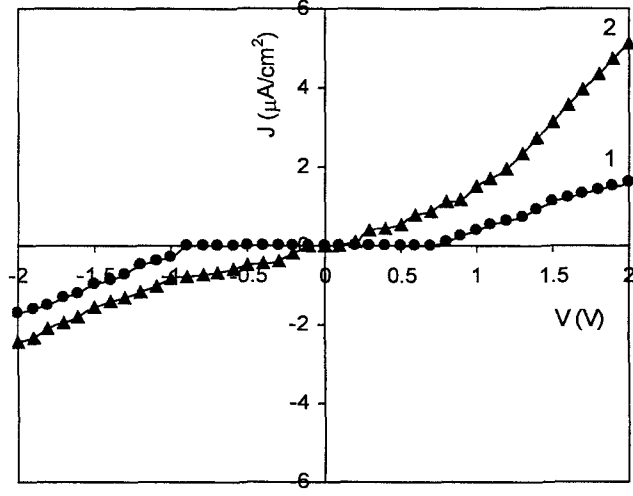
4. BULGULAR

4.1 İletken (Ag, C)-CdTe Kontakların Akım-Gerilim Karakteristikleri

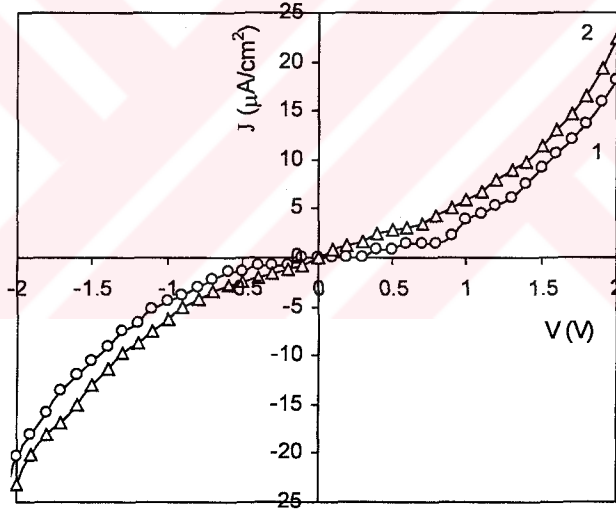
Yakın masafeli süblimasyon yöntemiyle elde edilen CdTe filmler, Cd+Te toz karışımın kompozisyonuna bağlı olarak hem n-tipi hem de p-tipi olabilmektedir. Havada veya oksijen ortamında 400 °C de 30 dakika tavlama ile n-tipi örnekler p-tipine dönüşmektedir. Hazırlanan n-tipi ve p-tipi CdTe filmlerin yüzeyinden Ag ve C kontaklar alınıp Ag/CdTe/Ag ve C/CdTe/C yapıların akım-gerilim karakteristikleri ölçüldü. Bu yapıların kontak özdirençleri hesaplandı ve Çizelge 4.1 de karşılaştırıldı. p-tipi CdTe film için Ag kontağın uygun olduğu görüldü.

Çizelge 4.1 p ve n-tipi CdTe filmlerin üzerindeki Ag ve C kontakların kontak özdirençlerinin karşılaştırılması.

Kontak	Karanlık $\rho \times 10^{-5} (\Omega \text{cm}^2)$	Aydınlık $\rho \times 10^{-5} (\Omega \text{cm}^2)$
Ag/n CdTe	6.6	0.5
Ag/p CdTe	0.2	0.1
C/n CdTe	4	1.1
C/p CdTe	1.8	0.45

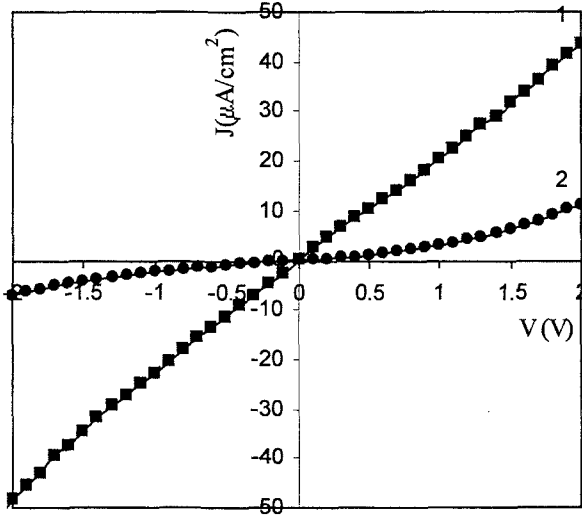


Şekil 4.1 (1) Ag/n-CdTe/Ag ve (2) C/n-CdTe/C yapıların karanlıktaki J-V karakteristikleri.

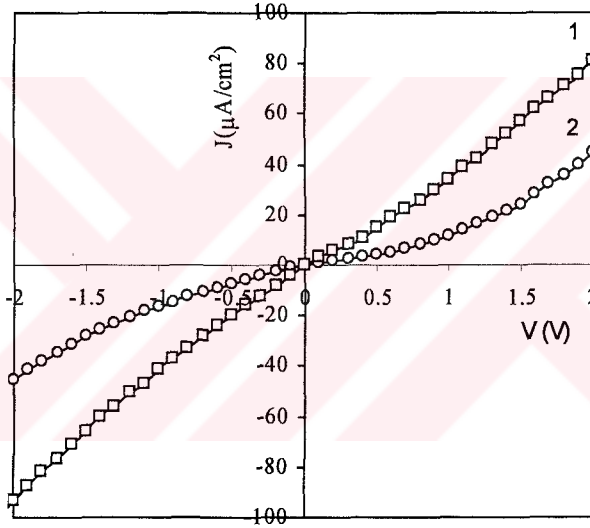


Şekil 4.2 (1) Ag/n-CdTe/Ag ve (2) C/n-CdTe/C yapıların aydınlıktaki J-V karakteristikleri.

Hazırlanan Ag/n-CdTe/Ag ve C/n-CdTe/C yapıların karanlık ve aydınlık ortamda akım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri ölçümleri karşılaştırıldığında, C kontağın, Ag kontağa göre, düşük dirençli olduğu görüldü. C kontağın Ag kontağa oranla kontak öz direncininin 1.5 kat daha düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.3 Ag/p-CdTe/Ag ve (2) C/p-CdTe/C yapıların karanlıktaki J-V karakteristikleri.



Şekil 4.4 (1) Ag/p-CdTe/Ag ve (2) C/p-CdTe/C yapıların aydınlıktaki J-V karakteristikleri.

Hazırlanan p-tipi CdTe filmlerde Ag/CdTe/Ag ve C/CdTe/C yapıların karanlık ve aydınlık ortamda akım yoğunluğu-gerilim karakteristik ölçümleri karşılaştırıldığında, Ag kontağın C kantağa göre daha iyi sonuç verdiği görülmekte. Kontak öz dirençleri karşılaştırıldığında Ag kantağın C kantağa oranla 9 kat daha düşüktür. Ayrıca Ag/CdTe/Ag yapıların ışığa daha duyarlı olduğu gözlenmektedir (Çizelge 4.1). p-tipi CdTe filmlerinde Ag kantağın omik özellik gösterdiği görülmektedir. Bundan dolayı çalışmalarımızda hep Ag kontak kullanılmıştır. Bu olayı, Ag'nin CdTe filmlerinde akseptör özelliğine sahip olmasıyla yorumlamak mümkündür.

4.2 Havada ve Oksijen Ortamında Tavlamanın CdTe Filmlerinin Elektriksel Özelliklerine Etkisi

Havada veya oksijen ortamında tavlama ile n-tipi CdTe filmlerin iletkenlik tipi değişmektedir. CSS yöntemiyle elde edilen filmlerden n-tipi iletkenliğe sahip olan CdTe filmler, 400 °C de 30 dakika havada veya oksijen ortamında tavlama ile iletkenlik tipinin değiştiği ve p-tipi iletkenliğe sahip olduğu termal elektro-motor kuvvet (TEMK) yöntemiyle ölçümler sonucu gözlenmiştir. İletkenlik tipinin değişiminin sebebi, ortamdaki oksijen atomlarının CdTe filmlere difüzyonu sonucunda akseptör özelliği göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Aynı şartlarda hazırlanan p-tipi CdTe filmi ikiye bölündü örneklerden biri havada, diğeri ise oksijen ortamında aynı sıcaklık (400 °C) ve aynı sürede (30 dakika) tavlandı. Tavlama öncesi ve tavlama sonrası özdirençleri ölçüldü. Tavlamanın p-tipi CdTe filmlerin özdirençlerini düşürdüğü gözlemlendi (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 p-tipi CdTe filmlerin, havada ve oksijen ortamında tavlama sonucunda özdirenç karşılaştırması.

İşlem	İletkenlik tipi	Karanlık $\rho \times 10^{-6} (\Omega \text{cm})$	Aydınlık $\rho \times 10^{-6} (\Omega \text{cm})$
Tavlamadan Önce	p	12.4	1.77
Havada Tavlama	p	4.5	0.07
Oksijen Ortamında Tavlama	p	0.37	0.06

Havada tavlama sonrası örneğin karanlıktaki özdirençinin yaklaşık 3 kat azaldığı, oksijenle tavlama sonrası ise örneğin karanlıktaki özdirençinin 33 kat azaldığı gözlenmiştir. Oksijenle tavlama, havada tavlama oranla örnek özdirençini yaklaşık 11 kat daha fazla düşürmüştür. Oksijenle tavlanan örneklerin özdirençinin, havada tavlanan örneklerin özdirençlerine oranla, daha fazla düşürmesinin sebebi ortamdaki oksijen miktarının artmasıyla yorumlandı. CdTe film içine difüz olan oksijen miktarı artmış ve Te boşluklarına (V_{Te}^+) oturarak p-tipi iletkenliğini artırmıştır.

4.3 CdCl₂'ün CdTe Filmlerinin Elektriksel Özelliklerine Etkisi

CSS yöntemiyle cam üzerine kaplanan CdTe filmler n-tipi ve p-tipi olarak hazırlandı. CdCl₂ difüzyonu, 400 °C de 30 dakika havada tavlama ile yapıldı ve sonra CdCl₂ saf su ile örnek yüzeyinden silindi. Hazırlanan örneklerde CdCl₂ difüzyonundan önce ve sonra TEMK yöntemiyle tip ölçümleri yapıldı ve n-tipi CdTe filmin tipinin değişimi gözlemlendi. Hazırlanan p-tipi CdTe filmlerin, CdCl₂ difüzyonundan önce ve sonra delik konsantrasyonları Hall olayı ile ölçüldü. CdCl₂ difüzyonu neticesinde deliklerin konsantrasyonu $p_0=3.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 'den $p_1=4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ kadar artışı ölçüldü. Yani deliklerin konsantrasyonunu 12 kat artmıştır. Aynı şekilde CdCl₂ difüzyonu ile p-tipi CdTe filmlerin öz direnci karanlıkta 25 kat, aydınlıkta ise 140 kat azalmıştır (Çizelge 4.3). Bu olay CdCl₂ difüzyonu CdTe filmlerinde akseptör tipi merkezlerin oluşması ile yorumlandı.

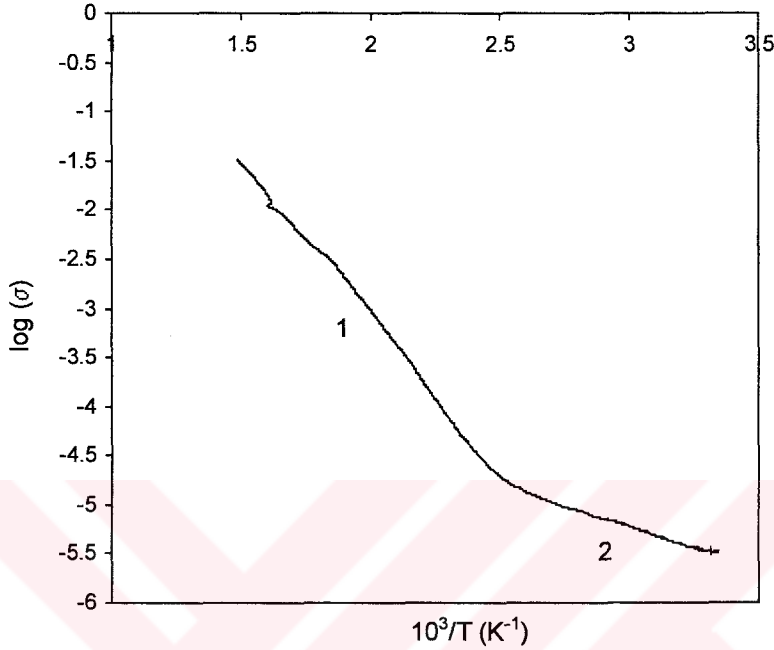
Çizelge 4.3 CdCl₂ difüzyonundan önce ve sonra p-CdTe filmlerin öz direnci.

İşlem	Karanlık $\rho \times 10^{-5} (\Omega \text{cm})$	Aydınlık $\rho \times 10^{-5} (\Omega \text{cm})$
CdCl ₂ difüzyonundan önce	500	11
CdCl ₂ difüzyonundan sonra	20	0.08

4.4 CdCl₂ Katkılanmış CdTe Filmlerin İletkenlik-Sıcaklık Ölçümleri

CSS yöntemiyle cam altlıklar üzerine kaplanan CdTe filme CdCl₂ kaplandı, 400 °C de tavlandıktan sonra CdCl₂ yüzeyden silindi ve üzerinden Ag kontaklar alındı. Hazırlanan örnek, sıcaklığı kontrol edilebilir ısıtıcıya yerleştirildi. Bilgisayara bağlantısı olan Kithely marka multimetre ve yüksek direnç ölçüm sistemiyle sıcaklıkla direnç değişimi ölçüldü. Sıcaklık, oda sıcaklığından 350-400 °C ye kadar artırıldı. İletkenlik-sıcaklık grafiği çizildi ve çizilen grafik üzerinden iki eğim belirlendi (Şekil 4.5). Yüksek sıcaklık bölgesindeki eğimden (1) CdTe filmin yasak bant genişliği hesaplandı, $E_g=1.5 \text{ eV}$. Düşük sıcaklık bölgesindeki eğimden (2) CdCl₂'nin etkisiyle oluşan akseptör merkezlerinin aktivasyon enerjisi 0.33 eV olarak hesaplandı. 0.33 eV'luk aktivasyon enerjili akseptör merkezlerini, Cd boşlukları ile (V_{Cd}) yorumlamak mümkündür. Difüzyon neticesinde CdCl₂ parçalanır ($\text{CdCl}_2 \rightarrow \text{Cd} + 2\text{Cl}$). Cd, filmdeki kadmiyum boşluğuna (V_{Cd}) oturabilir ve iki tane Cl ise tellür boşluğuna (V_{Te}^+)

oturabilir. Neticede, klor atomlarının sayısının Cd atomlarının sayısından iki kat yüksek olduğundan, CdTe filminde (V_{Cd}^-) boşluklarının sayısı, (V_{Te}^+) sayısına göre artar. Literatürdeki V_{Cd}^- bağlı enerji düzeyi (0.33 eV) bu sonucu desteklemektedir (X. Mathew, 2003).

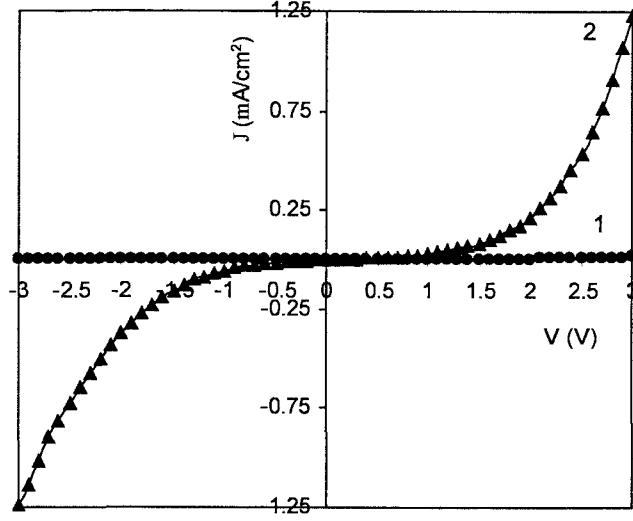


Şekil 4.5 CdCl₂ ile katkılanmış p-tipi CdTe filmin iletkenlik-sıcaklık grafiği.

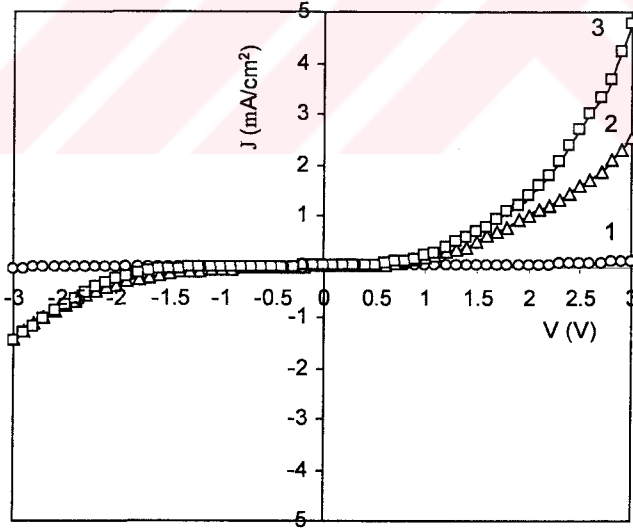
4.5 CdCl₂'ün p-CdTe/n-SnO₂ Heteroeklemlerin Elektriksel Karakteristiklerine Etkisi

CSS yöntemiyle n-tipi yarıiletken tabaka (SnO₂) üzerine CdTe filmler büyütüldü ve p-tipi olmayan örneklerin iletkenliği tavlama ile p-tipine çevrildi. p-CdTe/n-SnO₂ eklemine Ag üst omik kontak olarak yapıldı. Ag/CdTe/SnO₂ eklemine CdCl₂ difüzyonundan önce ve sonra, karanlık ve aydınlık durumlar için, akım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri incelendi. p-CdTe/n-SnO₂ heteroeklemin CdCl₂ difüzyonundan sonra, karanlık durumu için akımın doğru yönde yaklaşık 20 kat arttığı (Şekil 4.6), CdTe tarafından aydınlatmada doğru yönde 6 kat, SnO₂ tarafından aydınlatmada ise akımın 12 kat arttığı gözlenmektedir (Şekil 4.7). SnO₂ tarafından aydınlatmanın CdTe tarafından aydınlatmaya oranla akımın 2 kat fazla olması, SnO₂ tarafından aydınlatmada ekleme daha yüksek enerjili fotonların ulaşmasından kaynaklanıyor. p-CdTe/n-SnO₂ heteroeklemin açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) CdCl₂ difüzyonundan önce $V_{oc}=30$ mV, $J_{sc}=2.54$ μ A/cm² ölçülürken, CdCl₂ difüzyonundan sonra $V_{oc}=320$ mV, $J_{sc}=16$ μ A/cm² olarak ölçülmüştür. CdCl₂'nin etkisiyle

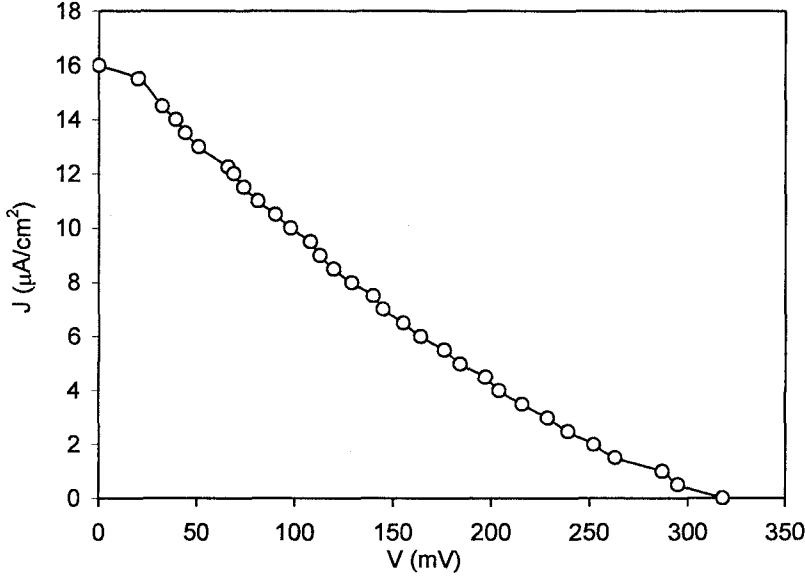
açık devre gerilimi 11 kat, kısa devre akım yoğunluğu 6.5 kat arttığı gözlenmiştir. CdCl_2 difüzyonundan sonra p-CdTe/n-SnO₂ heteroeklemin güneş pili karakteristiği gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.6 CdTe-SnO₂ heteroeklemin karanlıktaki J-V karakteristikleri (1) ve (2) CdCl_2 'ün difüzyonundan önce ve sonra.



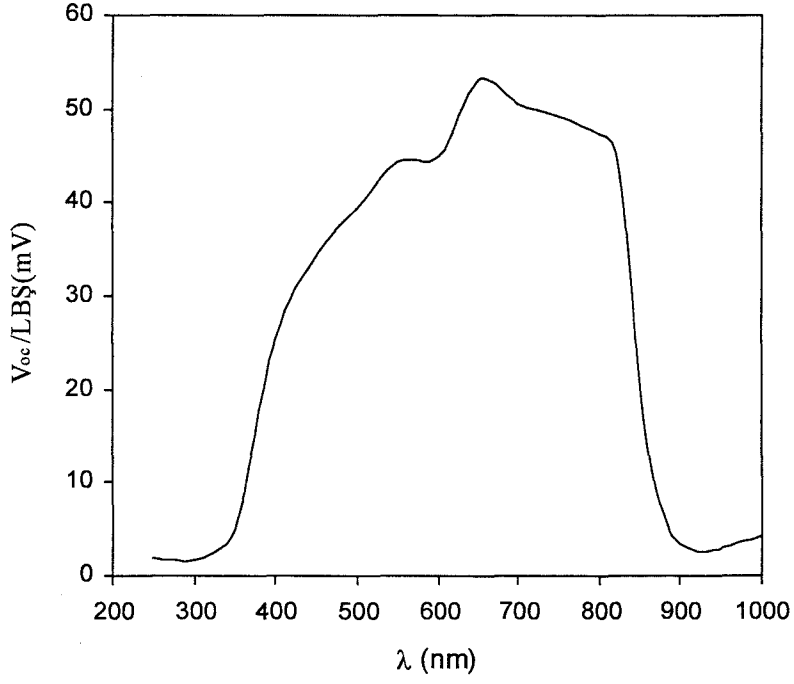
Şekil 4.7 CdTe-SnO₂ heteroeklemin aydınlıktaki J-V karakteristikleri (1) CdCl_2 difüzyonundan önce, (2) ve (3) CdCl_2 difüzyonundan sonra, CdTe tarafından aydınlatma ve SnO₂ tarafından aydınlatma.



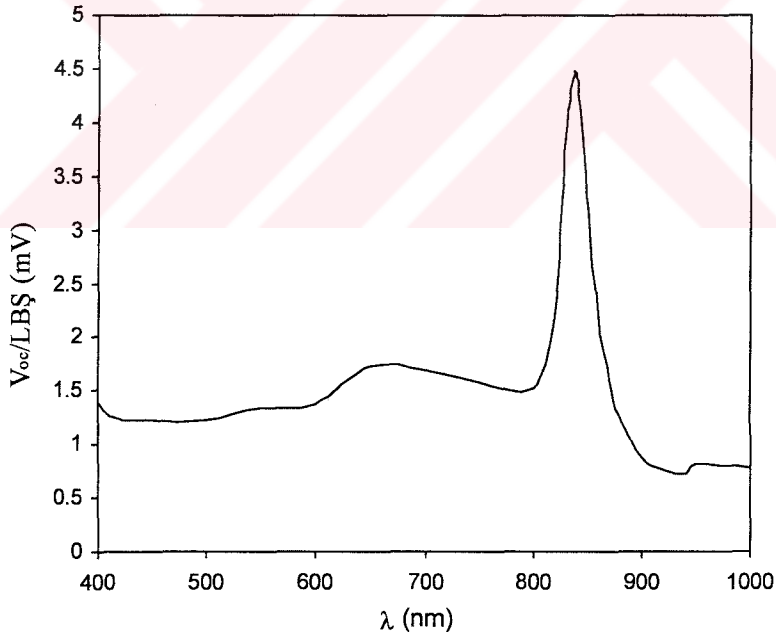
Şekil 4.8 CdTe-SnO₂ eklemine CdCl₂'ün difüzyonundan sonra fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristiği.

4.6 CdCl₂ Difüzyonunun CdTe/SnO₂ Eklemlerin Fotovoltaik Karakteristiklerine Etkisi

Yarıiletken tabaka n-tipi SnO₂ ile p-tipi CdTe filmin arasında heteroeklem oluştuğu, ölçümler sonucu gözlemlenmiştir. CdTe/SnO₂ eklemine fotoduyarlılık dağılım spektrumları $\lambda=300-1000$ nm arasında CdCl₂ difüzyonundan önce ve difüzyonundan sonra ölçüldü. Fotoiletkenlik-dalgaboyu spektrumları monokromatör lambasının bağıl şiddetine (LBS) oranlanarak çizildi. CdCl₂ difüzyonundan önce CdTe/SnO₂ eklemine çok zayıf fotoduyarlılık gözlenirken, CdCl₂ difüzyonundan sonra CdTe/SnO₂ eklemine fotoduyarlılığın artışı gözlenmiştir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 karşılaştırıldığında, CdTe/SnO₂ eklemi SnO₂ tarafından aydınlatıldığında hem yüksek fotoduyarlılığı hem de daha geniş fotoduyarlılık bölgesi görünmektedir. SnO₂'nin yasak bant aralığı (3.7 eV), CdTe'ün yasak bant aralığından daha büyük olacağından, SnO₂ tarafından ışınlamada heteroekleme daha yüksek enerjili fotonlar ulaşabilir. Neticede spektral duyarlılık bölgesi hem genişler hem de artar.



Şekil 4.9 CdCl₂ ile katkılanmış CdTe/SnO₂ eklemin, SnO₂ tarafından aydınlatmada fotoduyarlılık spektrumu.



Şekil 4.10 CdCl₂ ile katkılanmış CdTe/SnO₂ eklemin, CdTe tarafından aydınlatmada fotoduyarlılık spektrumu.

4.7 NaCl Difüzyonunun CdTe Filmlerinin Elektriksel Özelliklerine Etkisi

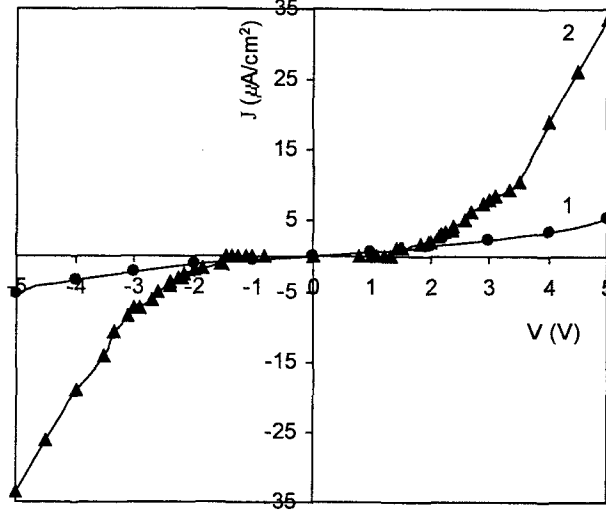
Burada NaCl'ün CdTe filmlerin ve Ag/CdTe eklemlerin elektriksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. CSS yöntemiyle cam üzerine kaplanan CdTe filmler p-tipi olarak hazırlandı. Hazırlanan örnekler elektron demetiyle yüksek vakumda NaCl buharlaştırıldı ve 400 °C de 30 dakika havada tavlandıktan sonra NaCl kalıntıları yüzeyinden silindi. Hazırlanan örneklerde NaCl difüzyonundan önce ve sonra TEMK yöntemiyle tip ölçümleri yapıldı ve NaCl'ün tip değişikliği sağlamadığı gözlemlendi. Hazırlanan p-tipi CdTe filmlerin NaCl difüzyonuyla p-CdTe filmin özdirençteki değişimleri incelendi. NaCl difüzyonundan sonra p-tipi CdTe filmlerin özdirenci karanlıkta ve aydınlıkta 8 kat azalmıştır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 p-tipi CdTe filmlere NaCl difüzyonundan önce ve sonra özdirençlerinin karşılaştırması.

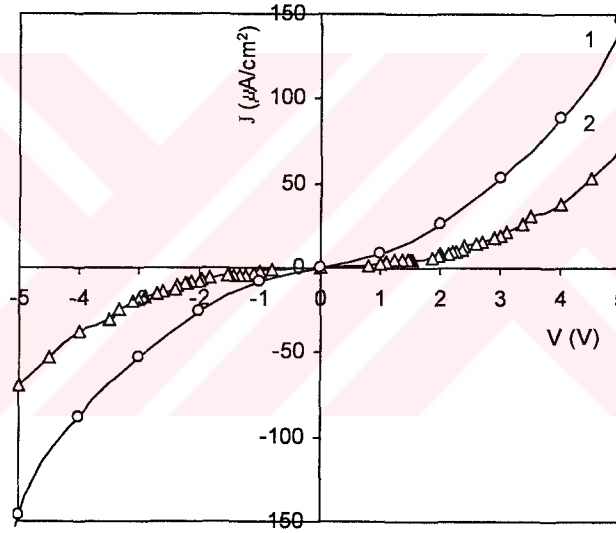
İşlem	Karanlık $\rho \times 10^{-6} (\Omega \text{cm})$	Aydınlık $\rho \times 10^{-6} (\Omega \text{cm})$
NaCl difüzyonundan önce	18.1	0.65
NaCl difüzyonundan sonra	2.2	0.08

Ag/CdTe ekleminde, NaCl difüzyonunun kontak özdirencine etkisi incelenmiştir. NaCl difüzyonundan sonra alınan kontakların karanlıktaki kontak özdirenci 7 kat azalmış fakat aydınlıktaki kontak özdirenci 2 kat artmıştır (Çizelge 4.5). Ag/CdTe/Ag eklemin akım yoğunluğu-gerilim karakteristiklerinden, NaCl difüzyonundan sonra karanlıkta akımın yaklaşık 5 kat arttığı fakat aydınlıktaki akımın 3 kat azaldığı görüldü (Şekil 4.11 ve 4.12).

CSS yöntemiyle yarıiletken tabaka (SnO_2) üzerine kaplanan CdTe filmler elde edildi ve p-tipi olmayan örneklerin iletkenliği tavlama ile p-tipine çevrildi. p-CdTe/n- SnO_2 heteroeklemine Ag omik kontak yapıldı. Ag/CdTe/ SnO_2 arasında NaCl difüzyonundan önce ve sonra karanlık, aydınlık durumlar için akım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri incelendi. Ag/p-CdTe/n- SnO_2 heteroeklemin NaCl difüzyonundan sonra karanlık durumu için akımın doğru yönde yaklaşık 2 kat arttığı, aydınlatmada ise 1.5 kat azaldığı gözlenmektedir (Şekil 4.13 ve 4.14). Böylece NaCl difüzyonunun p-tipi CdTe filmlerde özdirenci düşürdüğü gözlenirken fotovoltaj karakteristiklerini yani ışığa duyarlılığını olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir.



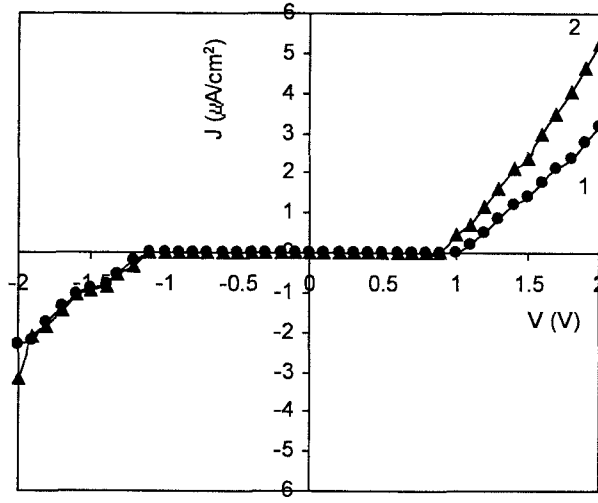
Şekil 4.11 Ag/p-CdTe/Ag yapısının karanlıkta J-V karakteristikleri, (1) ve (2) NaCl difüzyonundan önce ve sonra.



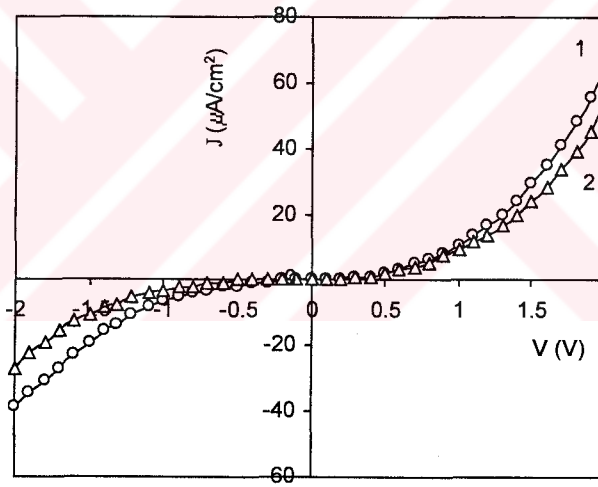
Şekil 4.12 Ag/p-CdTe/Ag yapısının aydınlıkta J-V karakteristikleri, (1) ve (2) NaCl difüzyonundan önce ve sonra.

Çizelge 4.5 NaCl difüzyonundan önce ve sonra Ag/p-CdTe kontak öz dirençlerinin karşılaştırması.

İşlem	Karanlık $\rho \times 10^{-5} (\Omega \text{cm}^2)$	Aydınlık $\rho \times 10^{-5} (\Omega \text{cm}^2)$
NaCl difüzyonundan önce	9.4	0.35
NaCl difüzyonundan sonra	1.4	0.72



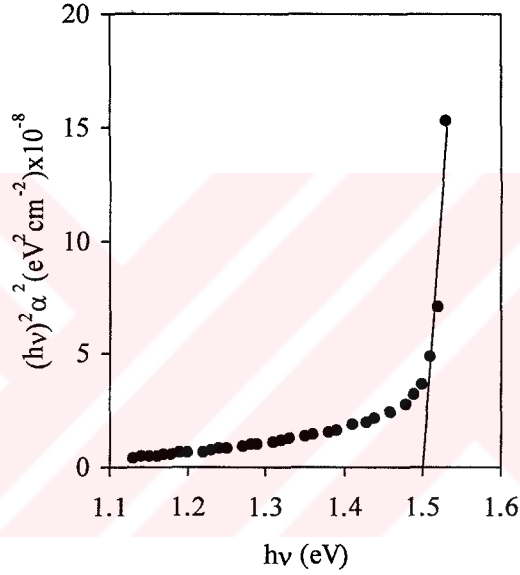
Şekil 4.13 $\text{Ag}/\text{p-CdTe}/\text{n-SnO}_2$ yapısının karanlıkta J-V karakteristikleri, (1) ve (2) NaCl difüzyonundan önce ve sonra.



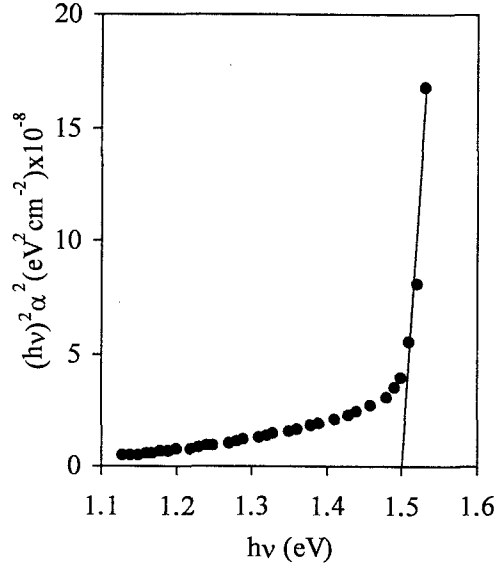
Şekil 4.14 $\text{Ag}/\text{p-CdTe}/\text{n-SnO}_2$ yapısının aydınlıkta J-V karakteristikleri, (1) ve (2) NaCl difüzyonundan önce ve sonra.

4.8 Farklı Ortamlarda Tavlamanın CdTe Filmlerinin Optik Özelliklerine Etkisi

Yapılan çalışmalarda CdTe filmler, işlem görmeden önce ve işleme tabi tutulduktan sonra (havada veya oksijen ortamında tavlama, CdCl₂ ve NaCl difüzyonu) optik ölçümleri alındı. Optik ölçümlerden soğurma katsayısının karesinin (α^2) foton enerjisine ($h\nu$) bağlı değişimi çizildi. Yapılan spektrum analizinde temiz CdTe filmin direkt bant yapısı gösterdiği gözlemlendi. Şekil 4.15'de görüldüğü gibi, eğrinin lineer kısmından alınan teğetin enerji eksenini kestiği noktanın enerjisi, CdTe filmin yasak bant genişliğini vermektedir. Grafik üzerinde de görüldüğü üzere CdTe filmin yasak bant genişliği yaklaşık olarak 1.5 eV belirlendi.

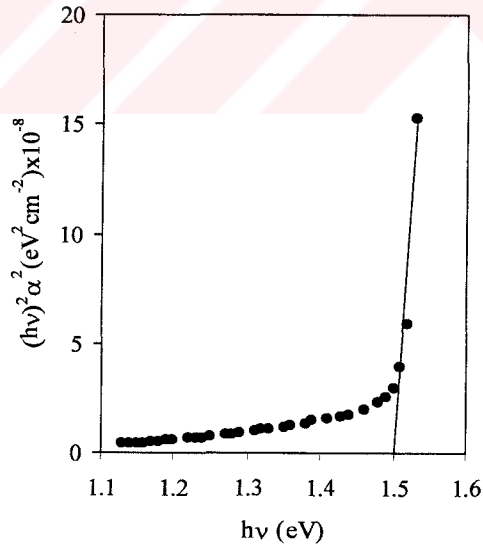


Şekil 4.15 CdTe filmin soğurma katsayısının spektrumu.



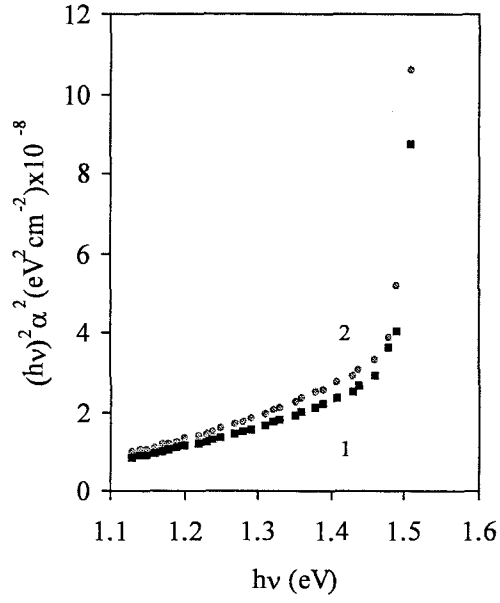
Şekil 4.16 Havada tavlamadan (400 °C) sonra CdTe filmin soğurma katsayısının spektrumu.

CdTe filmin 400 °C de havada tavllanmasıyla yasak bant genişliğinin değişmediği ve tavlama sonrası soğurmanın çok az artış olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.16).



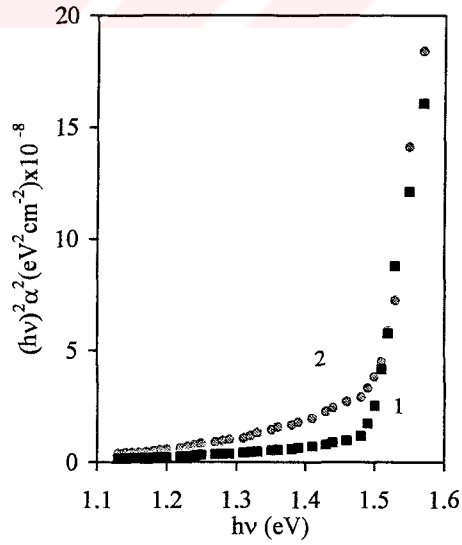
Şekil 4.17 Oksijen ortamında tavlamadan (400 °C) sonra CdTe filmin soğurma katsayısının spektrumu.

CdTe filmin 400 °C de oksijen ortamında da tavllanmasıyla yasak bant genişliğinin değişmediği ve tavlama sonrası soğurmanın çok az artış olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.18 CdCl_2 'ün difüzyonundan, (1) önce ve (2) sonra p-CdTe filmin soğurma katsayısının spektrumları.

CdCl_2 'ün p-tipi CdTe filmlerin optik özelliklerine etkisi ile filmlerin yasak bant genişliğini değiştirmedeği gözlenmiştir (Şekil 4.18). CdTe filmlerine CdCl_2 difüzyonundan sonra soğurmanın artış gösterdiği gözlenmiş ve bu sonuç p-tipi CdTe filmlerde yük taşıyıcılarının konsantrasyonunun artmasına bağlanmıştır.



Şekil 4.19 NaCl 'ün difüzyonundan, (1) önce ve (2) sonra p-CdTe filmin soğurma katsayısının spektrumları.

NaCl'ün p-tipi CdTe filmlere difüzyonu neticesinde CdCl₂ için olduğu gibi yasak bant aralığının değişmediği ve soğurma katsayısında artış olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.19).

Farklı işlemlere ve katkı difüzyonuna maruz kalmış p-CdTe filmlerin, optik soğurma spektrumlarından elde edilen yasak bant aralıkları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi, bu işlemler neticesinde yasak bant aralığı değişmemektedir.

Çizelge 4.6 İşlemlerle yasak bant değişimi.

İşlem	E _g (eV), önce	E _g (eV), sonra
Havada tavlama	1.5	1.5
Oksijen ortamında tavlama	1.5	1.5
CdCl ₂ difüzyonu	1.47	1.47
NaCl difüzyonu	1.49	1.49

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle büyütülen n-tipi yada p-tipi CdTe filmlerin yüksek öz dirence (10^6 - $10^7 \Omega\text{cm}$) sahip olduğu tespit edildi. Optik soğurma spektrumlarından CdTe filmlerin oda sıcaklığındaki yasak bant genişliği $E_g=1.50 \text{ eV}$ olarak ölçüldü.

Literatürde karbon, omik kontak olarak elektriksel ölçümlerde kullanılmaktadır fakat gümüş hakkında bilgiler çok azdır. Bu çalışmada C/n-CdTe, C/p-CdTe, Ag/n-CdTe, Ag/p-CdTe kontakların akım-gerilim karakteristikleri incelendi ve Ag/p-CdTe, C/n-CdTe kontakların daha düşük kontak direncine (C/p-CdTe, Ag/n-CdTe kontaklarına göre) sahip oldukları ölçüldü. Ag/p-CdTe kontak direnci, C/p-CdTe kontak direncinden yaklaşık olarak 9 defa daha düşüktür.

Hava ve oksijen ortamında tavlamanın CdTe filmlerin öz direncine etkisi incelendi. Hem hava ortamında hem oksijen ortamında tavlamanın neticesinde ($400 \text{ }^\circ\text{C}$ 30 dakika) p-tipi CdTe filmin direncini sırasıyla 3 defa ve 34 defa azalması gözlemlendi. Oksijen ortamında tavlamanın neticesinde CdTe filmin direncinin keskin azalması, oksijenin V_{Te}^+ boşluklarına oturması ve bu nedenle akseptör tipi V_{Cd}^- boşluklarının artması ile yorumlandı.

Hall olayı ve öz direnç ölçümlerinden CdCl_2 'ün p-CdTe filmlerine difüzyonu neticesinde öz direncin azalması ($50 \times 10^6 \Omega\text{cm}$ den $2 \times 10^6 \Omega\text{cm}$ 'e kadar) ve deliklerin konsantrasyonunun artması ($3.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ den $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 'e kadar) gözlemlendi. Bu olay CdCl_2 difüzyonu filmlerde akseptör tipi merkezlerin oluşması ile yorumlandı. p-tipi CdTe'ün iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi ölçümlerinden, oluşan akseptör tipli merkezlerin enerji düzeyi $E_v+0.33 \text{ eV}$ ve CdTe'ün yasak bant aralığı $E_g=1.50 \text{ eV}$ olarak bulundu.

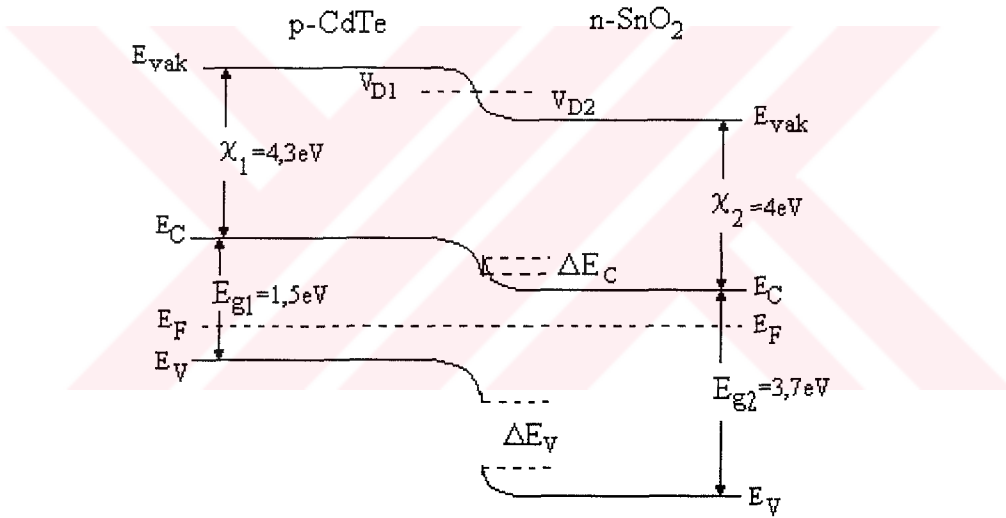
Benzer şekilde NaCl 'ün difüzyonu ile p-tipi CdTe filmlerinde öz direncin, CdCl_2 difüzyonuna göre daha az (8 defa) azalması gözlemlendi. Böylece Cl'lu katkıların sırasında CdTe filmlerin direncinin azalması için CdCl_2 difüzyonunun kullanılması daha uygundur.

CdCl_2 'ün, Ag/p-CdTe/n- SnO_2 heteroeklemlerine difüzyonu neticesinde fotoduyarlılığın $\lambda=350$ - 900 nm bölgesinde oluşması ve eklemin güneş pili davranışı (açık devre gerilimi 320 mV , kısa devre akım yoğunluğu $16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) gösterdiği tespit edildi. Bu eklemlerde fotoduyarlılığın oluşması CdCl_2 difüzyonu ile CdTe filmlerinde, yukarıda bahsettiğimiz gibi akseptör seviyelerinin meydana gelmesi ile yorumlamak mümkündür. p-tipi CdTe ve n-tipi SnO_2 yarıiletkenler için Çizelge 5.1 de verilen parametreleri kullanarak Şekil 5.1 de p-CdTe/n- SnO_2 heteroeklemlerin enerji bant diyagramı çizilmiştir. Burada sınır bölgesindeki

iletim bandının ve valans bandının kesikleri sırasıyla $\Delta E_c=0.3$ eV, $\Delta E_v=1.9$ eV'dur. p-CdTe/n-SnO₂ pilin düşük akım yoğunluğu iletim bandındaki sınır bölgesindeki oluşan yük taşıyıcıları için pik şeklindeki engelin etkisiyle yorumlamak mümkündür.

Çizelge 5.1 p-CdTe ve n-SnO₂ parametreleri.

Parametreler	CdTe	SnO ₂
Yasak bant genişliği (E_g)	1.5 eV	3.7 eV
Çıkış fonksiyonu (χ)	4.3 eV	4 eV
Termodinamik çıkış işi (ϕ)	5.7 eV	4.5 eV



Şekil 5.1 p-CdTe/n-SnO₂ heteroeklemin bant diyagramı.

Oksijen, CdCl₂ veya NaCl difüzyonunun CdTe filmlerinin optik soğurma spektrumlarına etkisi ($\lambda=300-1100$ nm) oda sıcaklığında araştırılmıştır. CdCl₂ ve NaCl difüzyonu neticesinde yasak bant aralığının değişmemesi ve soğurma katsayısının arttığı gözlenmiştir. Bu soğurma katsayısının artması, meydana gelen akseptör merkezlerinin iyonlaşması ile yorumlanabilir.

KAYNAKLAR

- Altosaar, M., Kukk, P.-E., Mellikov, E., (2000), Point Defects in Cl and Na Doped CdTe Monograin Powders, *Thin Solid Films*, 361-362, 443-445.
- 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.
- Chung, G.Y., Park, S.C., Cho, K. and Ahn, B.T., (1995), Electrical Properties of CdTe Films Prepared by Close-Space Sublimation with Screen-Printed Source Layers, *J. Appl. Phys.* 78 (9).
- Hamann, J., Burchard, A., Deicher, M., Filz, T., Ostheimer, V., Schmitz, C., Wolf, H. and Wichert, Th., (1998), Identification of Ag-Acceptor Related Photoluminescence in ¹¹¹Ag Doped CdTe, *Applied Physics Letters*, 72, 23.
- Hwa-Yuh Shin, Cherng-Yuan Sun, (1998), Photoluminescence Spectra of Cl-Doped CdTe Crystals, *Journal of Crystal Growth*, 186, 354-361.
- Kittel, C., (1996), *Katılmal Fiziğine Giriş, İngilizce 6. Basımdan Çeviri*, Güven Kitap Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ., İstanbul.
- Kraft, D., Thiben, A., Campo, M., Beerbom, M., Mayer, T., Klein, A. and Jaegermann, W., (2001), Electronic Properties of Chemically Etched CdTe Thin Films: Role of Te for Back-Contact Formation, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 668.
- Lepiller, C., Cowache, P., Guillemoles, J.F., Gibson, N., Özsan, E., 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., 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.
- Mathew, X., (2003), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 76, 225-242.
- Picos-Vega, A., Arizpe-Chavez, H., Zelaya-Angel, O., Ramirez-Bon, R. and Espinoza-Beltran J., (2000), Presence of Oxygen in the Lattice of CdTe Thin Films, *Journal of Applied Physics*, 89, 11.
- Poulson, P.D., 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.
- Romero, M.J., Metzger, W., Gessert, T.A., Albin, D.S. and 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.
- Valdna, V., Buschmann, F., Mellikov, E., (1996), Conductivity Conversion in CdTe Layers, *Journal of Crystal Growth*, 161, 164.

Wolf, H., Filz, T., Hamman, J., Lany, S., Ostheimer, V., Wichert, Th., (1999), Defect Complexes Induced by Diffusion of Group I Acceptors into CdTe, Physica B, 273-274, 843-847.

Yanfa, Y., Al-Jassim, M.M., Demuth, T., (2001), Energetics and Effect of Planar Defects in CdTe, American Institute of Physics.

Zanio, K., (1978), Semiconductors and Semimetals, Volume 13, Cadmium Telluride.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] www.geocities.com

[2] www.environmentalchemistry.com

[3] www.webelements.com

[4] www.evproducts.com



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	2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü Katıhal Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum

2001-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi

