

15436 9

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Cu DİFÜZYONUNUN CdTe FİLMLERİN
ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Fizikçi Nimet YILMAZ CANLI

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	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1 CdTe Yarıiletkenin Kristal Yapısı ve Özellikleri	2
2.2 Bakırın CdTe’de Difüzyonu ve Bakırla Katkılanmış CdTe’ün Özellikleri	3
2.3 Omik Kontaklar.....	5
2.4 Yarıiletkenlerde Difüzyon.....	6
2.4.1 Difüzyon Mekanizmaları	7
2.4.2 Difüzyon Kuralları	9
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	12
3.1 CdTe ve CdTe(Cu) Filmlerin Hazırlanması.....	12
3.2 CdTe ve CdTe(Cu) Yapıların X-Işınları Kırınım Analizi.....	13
3.3 Omik Kontakların Yapılması	14
3.4 CdTe Örneklerin İletkenlik Tipi Ölçümleri	16
3.5 CdTe ve CdTe(Cu) Örneklerin Yük Taşıyıcıları Konsantrasyonu ve Özdirenç Ölçümleri.....	17
3.6 Akım-Gerilim Karakteristikleri Ölçümleri	20
3.7 CdTe Filmlerin Optik Spektrumları	20
3.8 CdTe ve CdTe(Cu) Filmlerin Fotoiletkenlik Spektrumları.....	22
3.9 Termal Difüzyon ve Fotodifüzyon Deneyleri	23
4. BULGULAR.....	24
4.1 CdTe ve CdTe(Cu) Yapıların X-Işınları Kırınım Analizi.....	24
4.2 Bakır Difüzyonunun CdTe Örneklerin Elektriksel ve Optik Özelliklerine Etkisi	25
4.3 CdTe ve CdTe(Cu) Filmlerin Fotoiletkenlik Özellikleri	30
4.4 Bakır Fotodifüzyonunun CdTe Filmlerin Elektrik Özelliklerine Etkisi	30
4.5 Difüzyon Yöntemiyle Elde Edilen Düşük Dirençli CdTe(Cu) Filmlerin	

	Özellikleri.....	34
4.6	Bakırla Katkılı CdTe Filmlerin İletkenliğinin Sıcaklıkla Değişimi.....	35
5.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	39
KAYNAKLAR		41
ÖZGEÇMİŞ		44



SİMGE LİSTESİ

A	Alan
B	Manyetik Alan
d	Kalınlık , düzlemler arası mesafe
D	Difüzyon Katsayısı
e	Elektronun Yüğü
E _a	Akseptör Enerji Seviyesi
E _d	Donor Enerji Seviyesi
E _g	Yarıiletkenin Yasak Bant Genişliğı
$\vec{F}$	Kuvvet
h	Planck Sabiti
I	Akım
J	Akım Yoğunluğu
n	Kırılma İndisi, Elektronların Konsantrasyonu
p	Deliklerin Konsantrasyonu
q	Yük
R	Yansıma Katsayısı, Direnç
R _H	Hall Sabiti
t	Zaman
T	Optik Geçirgenlik, Mutlak Sıcaklık
$\vec{v}$	Hız
V	Gerilim
V _H	Hall Gerilimi
$\omega_{x,y,z}$	Kristal Boyutları
α	Soğurma Katsayısı
λ	Dalga Boyu
ρ	Özdirenç
μ	Mobilite
σ	İletkenlik
ν	Frekans
ϕ_b	Bariyer yüksekliğı
ϕ_m	Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ	Yarıiletkenin elektron alınganlığı

KISALTMA LİSTESİ

FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscope
SEM	Scanning Electron Microscope
XRD	X-ray Diffraction
TEMK	Termal elektro-motor kuvvet
CSS	Close-spaced sublimation



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 CdTe bileşiğinin çinko blendi kristal yapısı (Zanio,1978).....	2
Şekil 2.2 CdTe filmin SEM fotoğrafı (Sibinski, M.).....	2
Şekil 2.3 Atomların difüzyon mekanizmaları: (a) çift yerdeğiştirme, (b) halka yerdeğiştirme, (c) arayer, (d) vakansiyon ve (e) çinkonun GaAs'de dissosiyatif mekanizması (Caferov, 1998).....	8
Şekil 2.4 (1) Boşluk, (2) arayer ve (3) tane sınırları mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağlılığı (Caferov, 1998).....	11
Şekil 3.1 CdTe filmlerin CSS yöntemi ile elde edilme düzeneği.....	12
Şekil 3.2 Elektron-demeti buharlaştırma setinin şematik gösterimi.....	13
Şekil 3.3 Difraktometrenin diyagramı (Caferov, 1998).	14
Şekil 3.4 Yaklaşık omik kontakların akım gerilim karakteristiği (Caferov, 1998).	15
Şekil 3.5 Yarıiletkende (a) sıcaklığının ve (b) elektron konsantrasyonunun dağılımı.	17
Şekil 3.6 TEMK yöntemi ile (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik tiplerinin ölçüm devresi (Caferov, 1998).	17
Şekil 3.7 p-tipi yarıiletkende Hall olayı (Caferov, 1998).	18
Şekil 3.8 Hall Olayı ölçümlerinde dörtgen şekilli örnekte kontakların yerleşimi.	18
Şekil 3.9 Van der Pauw yöntemi ile öz direnç ölçümlerinde örnekte kontakların yerleşimi (Caferov, 1998).....	19
Şekil 3.10 Akım-gerilim karakteristiğinin ölçüm devresi.	20
Şekil 3.11 Paralel yüzeyli filmin içinde ışınların yansımalarının gösterimi: 1-yüzeye düşen ışın, 2-yüzeyden yansıyan ışın, 3-filmin yüzeyleri, 4-filmin kalınlığı, 5-filminden çıkan ışınlar, 6-mercek, 7-girişim olayının gerçekleştiği yerel düzlem (Caferov, 2000).....	21
Şekil 3.12 CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin fotoiletkenliğinin ölçüm devresi.....	22
Şekil 3.13 Termal ve fotodifüzyon deneylerinin yapıldığı düzenek.	23
Şekil 4.1a CdTe filmin X-ışınları kırınım desenleri.....	24
Şekil 4.1b CdTe(Cu) filmin X-ışınları kırınım desenleri.	25
Şekil 4.2 p-CdTe(Cu) filmin I-V karakteristiği.....	27
Şekil 4.3 n-CdTe (Cu) filmin direncinin ($T=150^{\circ}\text{C}$) termal tavlama süresiyle değişimi.	27
Şekil 4.4 (1) n-CdTe ve (2-5) n-CdTe(Cu) filmin termal tavlama ile optik geçirgenliğinin değişimi ($T=150^{\circ}\text{C}$).	28
Şekil 4.6a CdTe filmin optik soğurma spektrumu.....	29
Şekil 4.6b CdTe(Cu) filmin optik soğurma spektrumu.	29
Şekil 4.7 (1) p-CdTe ve (2) p-CdTe(Cu) filmlerin fotoiletkenlik spektrumları ($d_{Cu}=6\text{nm}$ için).....	30
Şekil 4.8 p-CdTe(Cu) filmin direncinin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta tavlama süresiyle değişimi ($T=100^{\circ}\text{C}$).	33
Şekil 4.9 p-CdTe filmde, bakırın (1) termal difüzyon ve (2) fotodifüzyon katsayısının sıcaklıkla bağımlılığı.	33
Şekil 4.10 p-CdTe(Cu) örneklerin öz direncinin bakır film kalınlığına bağlı değişimi.	35
Şekil 4.11 p-tipi CdTe(Cu) filmin iletkenliğinin sıcaklığa bağlılığı.	36
Şekil 4.12 CdTe(Cu) filmin optik soğurma spektrumu.	36
Şekil 4.13 CdTe(Cu) filmlerinin iletkenliğinin difüzyon sıcaklığıyla değişimi.	38

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Çinko blendi yapıdaki CdTe yarıiletkenin bazı fiziksel özellikleri.....	3
Tablo 4.4.1 Farklı tavlama sıcaklıklarında (60, 100, 150, 200°C) hesaplanmış termal ve fotodifüzyon katsayısı değerleri.	31
Tablo 4.5.1 CdTe’de farklı kalınlıklarda bakır difüzyonuyla CdTe(Cu) filmlerin öz direnç değerleri.	34
Tablo 4.6.1 Bakırla katkılanmış p-tipi CdTe(Cu) filmlerinin iletkenliğinin difüzyon sıcaklığıyla bağlantısı.	37



ÖNSÖZ

Tezimin konusunu belirleyip, bilgileriyle ve deneyimleriyle her aşamada bana yardımcı olan ve yönlendiren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Tayyar Caferov'a çok teşekkür ederim.

Bizlere uygun bir çalışma ortamı sağlayan dekanımız Sayın Prof. Dr. Durul Ören'e ve bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Emel Çıngı'ya teşekkür ederim.

Laboratuvarımızda kısa bir süre bulunan, deneysel çalışmalarında yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Ayaz Bayramov'a teşekkür ederim.

Fizik eğitimimin başlangıcında bana her an destek olan Karadeniz Teknik Üniversitesinden hocalarım, Sayın Prof. Dr. Ekrem Yanmaz'a, Sayın Prof. Dr. Mustafa Altunbaş'a, Sayın Doç.Dr. Belgin Küçükömeroğlu'na, X-ışınları ölçümelerini yapan Sayın Dr. Emin Bacaksız'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarında bilgileriyle bana yardımcı olan sabırla beni çalıştıran, Arş.Gör. Dr. S. Serkis Yeşilkaya'ya, Arş. Gör. Murat Çalışkan'a, hem deneysel çalışmalarım hem de tezimin yazımında bana yardımcı olan Arş. Gör. Süreyya Aydın'a, Arş. Gör. Çiğdem Oruç Luş'a, Arş. Gör. Fatih Ongül'e, teşekkür ederim.

Her zaman bana güvenen ve destek olan eşime ve aileme en içten dileklerimle teşekkür ederim.



ÖZET

CdTe filmler cam altlıkların yüzeyine vakumda yakın mesafeli süblimasyon (Close-Spaced Sublimation, CSS) yöntemi ile kaplandı. CdTe/Cu yapılar, Cu filmlerin oda sıcaklığındaki CdTe filmler üzerine elektron-demeti buharlaştırmasıyla üretildi.

Bakırın CdTe filmlerde difüzyon katsayısı termal ve fototavlama sürecine bağlı öz direnç eğrilerinden belirlendi. 60-200°C aralığında bakırın termal ve fotodifüzyon katsayısı $D_t=7.3 \times 10^{-7} \exp(-0.33/kT)$ ve $D_f=4.7 \times 10^{-8} \exp(-0.20/kT)$ olarak belirlendi. Bakırla katkılı n-tipi CdTe filmlerin 400°C'de tavlama ile p-tipine dönüşümü gözlemlendi ve öz direncin 10^9 kat azalması belirlendi.

Yakın mesafeli süblimasyon yöntemiyle elde edilen CdTe filmlerin kübik yapıda ve (111) yönünde büyüdüğü gözlemlendi. CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin örgü parametreleri sırasıyla $a=6.406 \text{ Å}$ ve $a=6.464 \text{ Å}$ olarak belirlendi.

CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin akım-gerilim karakteristikleri, fotoiletkenlik ve optik geçirgenlik spektrumları incelendi. CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin yasak bant aralığı $1.45 \pm 0.05 \text{ eV}$ olarak ölçüldü.

CdTe(Cu) örneklerin iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi deneylerinden bakırla uyarılmış $E_v+0.12 \text{ eV}$ 'luk enerji seviyesi belirlendi.

Anahtar kelimeler: CdTe filmler, Bakır, Difüzyon

ABSTRACT

CdTe films were deposited on glass substrates by close-spaced sublimation (CSS) technique. CdTe/Cu structures were fabricated by electron-beam evaporation of Cu films on CdTe surface at the room temperature.

The diffusion coefficient of Cu in CdTe films have been estimated from resistivity versus duration of thermal or photoannealing curves. In the temperature range 60-200°C the coefficient of thermal diffusion (D_t) and photodiffusion (D_{ph}) are described as $D_t=7.3 \times 10^{-7} \exp(-0.33/kT)$ and $D_{ph}=4.7 \times 10^{-8} \exp(-0.20/kT)$. It was observed that Cu-doped n-type CdTe films by annealing at 400°C was changed their conductivity from n-type to p-type and also determined the decrease of resistivity up to 9 orders of material.

CdTe films, which deposited on glass substrates by close-spaced sublimation technique, are observed as cubic structure and directed along (111) direction. The lattice parameters of CdTe and CdTe(Cu) films are found to be $a=6.406 \text{ \AA}$ and $a=6.464 \text{ \AA}$ respectively.

The current-voltage characteristics, photoconductivity, optical transmission spectra of CdTe and CdTe(Cu) films were investigated. CdTe and CdTe(Cu) films's energy band gap measured to be $1.45 \pm 0.05 \text{ eV}$.

The experiments from the temperature dependence of conductivity of p-type CdTe(Cu) samples, stimulated with Cu $E_v+0.12 \text{ eV}$ energy level were determined.

Keywords: CdTe Films, Copper, Diffusion.

1. GİRİŞ

Günümüzde CdTe geniş bant aralığı ve yüksek soğurma katsayısından dolayı yüksek verimli, düşük maliyetli ince film güneş pilleri için umulan en önemli fotovoltaiik malzemelerdendir. CdTe, direkt bant geçişli yarıiletkenidir ve oda sıcaklığında yasak enerji aralığı, $E_g=1.5$ eV değeri ile, güneş enerjisinden maksimum dönüşümü elde etmek için gerekli olan değere oldukça yakındır. CdTe ince film üretmede değişik teknolojiler ortaya çıkmıştır. Bunların sırasında yakın mesafeli süblimasyon (Close Space Sublimation, CSS) yöntemi ile gereken parametrelere sahip CdTe filmler üretilmektedir (Ohyama vd., 1997). Bu yöntemde sıcaklık farklılıkları çok az olan kaynak ve filmin büyüdüğü yüzey birbirine çok yakın tutularak malzemenin süblimasyon yoluyla büyümesi sağlanır.

Polikristal CdTe’de omik kontak oluşturmak zordur, çünkü p-tipi CdTe’den daha yüksek iş fonksiyonuna sahip metal yoktur. Bakır CdTe’de delik konsantrasyonunda artışı sağlayarak akseptör olarak davranmaktadır. CdTe/CdS güneş pillerinde sıkça omik kontak oluşumunda bakır kullanıldığında yüksek verimler elde edilmiştir (Dobson vd., 2000).

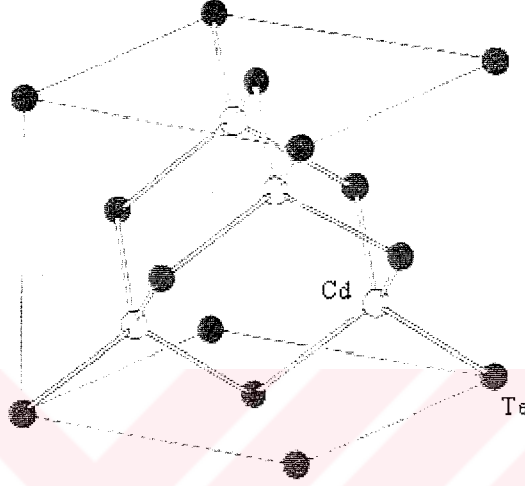
Bakır, CdTe güneş pillerinde kontakların omikliğini iyileştirmek için geniş alanda kullanılmaktadır. Cu’nun CdTe’de difüzyonu ve Cu’nun CdTe’de ışığın etkisi ile yayılması (fotodifüzyonu) literatürde çok az incelenmiştir. Ayrıca Cu’nun CdTe ince filmlerin karakteristiklerine etkisinde daha az çalışılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, bakırın termal ve ışıkla uyarılmış difüzyonunun (fotodifüzyonunun), ve bakırla katkılanmış CdTe ince filmlerin elektriksel ve optik özelliklerini incelemektir.

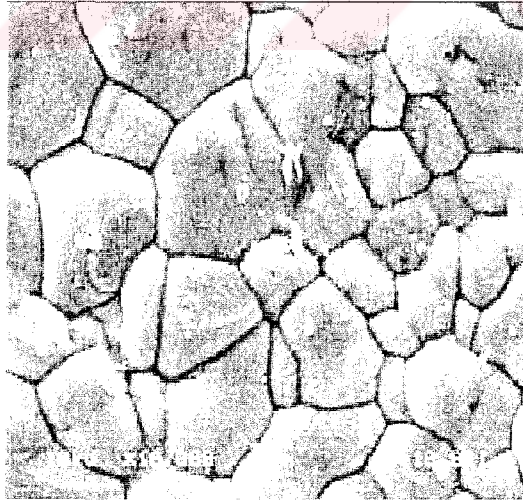
2. GENEL BİLGİLER

2.1 CdTe Yarıiletkenin Kristal Yapısı ve Özellikleri

CdTe II-VI grubu yarıiletkendir, p-tipi ve n-tipi olarak elde edilebilir. Çinko blendi yapısı CdTe için şekil 2.1’de gösterilmiştir. CdTe yarıiletkene ait bazı özellikler çizelge 2.1’de verilmiştir. Şekil 2.2’de CdTe filmin SEM fotoğrafı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 CdTe bileşiğinin çinko blendi kristal yapısı (Zanio,1978).



Şekil 2.2 CdTe filmin SEM fotoğrafı (Sibinski, M.)

Çizelge 2.1 Çinko blendi yapıdaki CdTe yarıiletkenin bazı fiziksel özellikleri.

Parametreler	
Örgü Parametresi a_0 (300 K)	0.648 nm
En Yakın Komşu Uzaklığı (300 K)	0.281 nm
Yoğunluk (300 K)	5.86 g/cm ³
Erime Noktası	1041 °C
Termal İletkenlik	6.28 W m ⁻¹ K ⁻¹
Lineer Termal Genleşme Katsayısı	5.86 x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Dielektrik Sabiti	9.65
Kırılma İndisi	2.72
Yasak Enerji Aralığı, E_g (300 K) direkt	1.475 eV
Elektronların Hall Mobilitesi (300 K)	1050 cm ² /V.s
Deliklerin Hall Mobilitesi (300 K)	100 cm ² /V.s
Termodinamik iş fonksiyonu (p-CdTe)	5.7 eV
Elektron alınganlığı (CdTe)	4.3 eV
İş fonksiyonu (Cu)	4.65 eV
İş fonksiyonu (Ag)	4.64 eV

2.2 Bakırın CdTe’de Difüzyonu ve Bakırla Katkılanmış CdTe’ün Özellikleri

CdTe, güneş pili uygulamalarında en önde gelen ince film malzemelerden biridir (Chopra ve Das, 1983). CdTe/CdS güneş pillerinde değişken katkıların varlığı, teknolojik problem gösterir. Bakır ince film CdTe/CdS güneş pillerinin özelliklerini geliştirmek için, arka kontak yada ara malzeme olarak kullanılır (Dobson vd., 2000). Bakır, CdTe’de omik kontak oluşturmak için kullanılmıştır (Uda vd., 1998, Chou vd., 1996). Cu’nun tek kristal CdTe’de donör durumu gösteren arayer iyonu (Cu_i^+) olarak varolduğu (Bakry vd., 1991) yada

0.28-0.34 eV aktivasyon enerjisiyle derin akseptör (Cu_{Cd}^-) durumunu oluşturmak için Cd atomu yerinde bulunduğu düşünülmektedir (Monemar vd., 1986 Chomonal vd., 1983). Cu_{Cd} akseptör merkezinin aktivasyon enerjisi yaklaşık 0.15 eV'dur. (Laurenti vd., 1988). Ayrıca bakır, ($\text{Cu}_i^+ + \text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$) ve ($\text{Cu}^+ - \text{Cu}_{\text{Cd}}$) komplekslerini oluşturabilir. Cu_i^+ ve V_{Cd} içeren kompleksler nispeten derin akseptörlerdir (Monemar vd., 1986). Bakır CdTe'de en hızlı difüze eden katkıdır, bu yüzden Cu içeren arka kontakta pil kavşağına Cu difüzyonu güneş pilleri yapımı süresince güneş pilinin fotovoltaiik karakteristiklerini değiştirebilir (Chopra ve Das 1983, Dobson vd., 2000). Başlangıçta pilin fill faktörü ve açık devre gerilimine kar getirmiş, ama sonradan verim Cu difüzyonu yüzünden düşmüştür. Tek kristal CdTe'de ve başka II-VI bileşiklerde Cu hareketi iki difüzyon duruma karakterize edilmiştir. En hızlı difüzyon durumu Cu_i^+ (bakır arayer durumunda) olarak Cu_{Cd} (bakır Cd'un yerinde) ve diğer kompleksler daha yavaş hareket eden parçacıklar olarak kararlaştırılmıştır. Bakırın CdTe/CdS pillerde rolü ikilidir. Bir taraftan, bakırın arka kontak ara yüzey yakınında CdTe'nin p-katkısını arttırarak, daha iyi omik kontak oluşumuna yardım ettiği genelde kabul edilmiş, diğer taraftan bakırın polikristal CdTe film içinden pil kavşağına difüze olma yeteneği yüzünden, pillerin degradasyonu için olası en önemli eleman olduğu düşünülmüştür (Dobson vd., 2000). Bununla beraber, CdTe/CdS pillerin degradasyon mekanizması halen iyi anlaşılmamıştır.

Bakırın tek kristal CdTe'de difüzyonu, 263-323 K aralığında kapasitans ölçümlerinde, Cu difüzyonun aktivasyon enerjisi 0.24 eV olarak belirlenmiştir (Wartlick vd., 2000). Bakır katkılı CdTe tek kristal, oda sıcaklığında lüminesans özelliklerinde önemli değişiklik sergilemiştir (Grecu ve Compaan, 2000). Cu_{Cd} ve ($\text{Cu}_i^+ + \text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$) durumlarının her ikisinin azaldığı ve ışısız rekombinasyon merkezlerinin ileri sürüldüğü önerilmiştir.

CdTe tek kristal içine Cu difüzyonu 200°C'de ısıtılarak gözlemlenmiştir (Soo vd., 2000). Bakır difüzyonu yerel yapı değişiklikleriyle ilişkili olarak Cu atomlarının yeniden dağılımına sebep olur. Belirtmek gerekir ki, bakırın termal difüzyonu araştırmalarının çoğu, tek kristal CdTe filmlere odaklanmıştır. Bundan başka CdTe ince filmde ve CdTe(Cu)/CdS güneş pilleri degradasyonunda bakırın termal ve foto uyarılmış difüzyonunda veriler literatürde de sınırlı kalmıştır (Dobson vd., 2000).

Bakırla katkılama çoğunlukla CdCl_2 ısıtıl işleminden sonra yapılmıştır. Bakır CdTe'nin temizlenmiş yüzeyine kaplanmış yada CdTe yüzeye arka kontak olarak uygulanmıştır. Bakır CdTe'nin içine $T=220-270^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında birkaç dakikalık tavlama süresince difüze olmuştur. Bakır akseptör katkı olarak kullanıldığında katkının iki yararlı sonucu V_{oc} arttırması

ve arka kontak direnci azaltması olarak gösterilmiştir (Donald T. Morgan).

Bakırın tek kristal CdTe’de hızlı difüze edici olduğu düşünüldü (Oda sıcaklığında, $D \sim 3 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$). CdTe’de bakırın arayer iyonu olarak (Cu_i^+) var olduğu basit donör durumunu yada Cd’un yerinde bulunan akseptör durumunu oluşturduğu bildirildi (Dobson 2002 ve Woodbury 1968).

Bakır aynı zamanda ($\text{Cu}_i^+ - \text{Cu}_{\text{Cd}}$) ve ($\text{Cu}_i^+ - \text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$)² komplekslerini oluşturabilir. Araştırmacılar tek kristal CdTe’de Cu difüzyonu için yavaş ve hızlı durumları belirlediler (Woodbury, 1968). En hızlı difüzyon durumu Cu_i^+ olarak kararlaştırılmıştır (Lyubomirsky vd., 1997, Jones vd., 1992). Bakır, CdTe/CdS güneş pillerinin elektriksel özelliklerini geliştirmek için arka kontak olarak kullanıldı (Kuribayashi vd., 1983, Chou vd., 1995).

Böylece, yukarıdaki literatür özetinden görünür ki bakırla katkılanmış CdTe filmleri CdTe/CdS güneş pillerinin üretiminde kullanılmaktadır. Fakat bakır difüzyonunun CdTe filmlerin özelliklerine etkisi az araştırılmıştır ve bu konuda çok az yayın vardır.

2.3 Omik Kontaklar

CdTe’de metal arka kontağın rolü, filmin direncini artırmadan elektriksel bağlantıyı sağlamaktır. P-tipi CdTe omik kontak yapmak için bilinen zor malzemedir. Bariyer yüksekliği $\phi_b = \chi + E_g - \phi_m$ (ϕ_m , metalin iş fonksiyonu, χ , yarıiletkenin elektron alınganlığı) ile verilir ve CdTe’ün yüksek bant aralığı, ve elektron alınganlığından dolayı, düşük bariyer oluşturmak için yüksek iş fonksiyonuna sahip metale ihtiyaç vardır. Metallerin çoğu yüksek iş fonksiyonuna sahip değildir. $\phi_b = \phi_s - \phi_m$ denkleminde göre metalin iş fonksiyonu ne kadar büyükse bariyer yüksekliği o kadar küçülür (Edwards, 1998). p-tipi CdTe’ün iş fonksiyonunun büyük olması nedeniyle bu malzemeye omik kontak yapmak zordur. İlk olarak metal/yarıiletken bariyer yüksekliği (Brillson 1993, Grovenor 1989) klasik Anderson Modeline göre seçilmektedir. Bu modele göre p-tipi malzemede yarıiletkenin iş fonksiyonu, kontak malzemesinden düşük olmalıdır. Eğer bu olası olmazsa, bariyer yüksekliği, düşük kontak direnci sağlamak için minimum olmalıdır (Brillson L.J 1983, S.M.Sze 1981). Çünkü p-CdTe’ün termodinamik iş fonksiyonu (oldukça geniş yaklaşık 5.7 eV), güneş pillerine kullanımına izin vermekte yeterince katkılanmıştır (Bube,1998). Kontak yapmak için, bariyer yüksekliğini yeterince azaltabilecek, ideal omik kontak yapabilecek hiçbir metal yoktur (Janik

vd., 1983).

p-tipi CdTe'de omik kontak oluşturabilmek için kullanılan metallerin iş fonksiyonu 5.7 eV'dan büyük olmalıdır, (Bartzner vd., 2001) fakat böyle metaller yoktur, bu yüzden arka kontakta Schottky bariyeri oluşmuştur. Bu problemin üstesinden gelebilmek için kimyasal aşındırma ile yüksek p-tipi katkılı CdTe yüzey oluşturulmuştur (Sorlund vd., 1996, Ferekides vd., 1997) ve ara yüzey yüksek taşıyıcı konsantrasyonu uygulanmıştır. Sonuçta bariyer genişliği azalmış ve yarı omik tünel bariyeri oluşmuştur. Cu genelde ara malzeme yada katkı olarak arka kontakta kullanılmıştır. Yüksek katkılı yüzey tabakalar yapmanın bir yolu, (seviyeler $\geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ sıkça kullanılmıştır.) kontak kaplamasından önce uygun yüzey işlemi uygulanmaktadır. Yüzey uygulaması kimyasal aşındırmayla yapılmıştır. Çeşitli kimyasal aşındırmalarla p+ tabaka sağlanabilir. Kimyasal aşındırmada çoğunlukla brom methanol, nitrik ya da fosforik asit kullanılmıştır. (Dobson, 2000). Asit uygulaması yüzeyin p-tipliliğini arttırarak ve böylece bantların bükülmesini sağlayarak omik kontağı iyileştirmek için kullanılmıştır. Aşındırılmış yüzeyde Cd atomu konsantrasyonu azalmış ve Te ile zengin tabaka yaratılmıştır. Te fazlalığı CdTe'ün p-tipi özelliğini arttırdığı için, bu yüzeye yapılan kontak direnci daha düşük ve omik olmaktadır (Gessert vd., 1983).

CdTe/CdS güneş pillerinin degradasyon mekanizmalarını saptamak, ömürlerini tahmin etmek ve dayanıklılığını araştırmak için değişik şartlar altında araştırmalar yapılmıştır. Bu durumlar genelde 50-200°C sıcaklık içermektedir. Araştırma, aydınlatma altında yada karanlıkta, elektriksel gerilimler, atmosfer (hava, vakum vb.) ve araştırma sürekliliği değişimleri ile pil durumu akım-gerilim tekniği kullanılarak izlenmiştir (Hiltner vd., 1998, Birkmire vd., 1998). Bu yaklaşım tarzı farklı tiplerde pillerin davranışında hızlı ve basit karşılaştırmaya izin verir, arka kontak malzeme değişiklikler içerebilir.

CdTe yüzey işlemi, kontak uygulamadan önce P^+ yüzey tabakası oluşturmak için CdTe'de düşük dirençli kontaklar araştırılmıştır. P^+ yüzey tabakası Fermi seviyesinin aşağıya düşmesine neden olmuştur. Böyle yüzeyler düşük bariyerler gösterir ve geçişler tünel yoluyla olmaktadır (Bube, 1998, Niles vd., 1995).

2.4 Yarıiletkenlerde Difüzyon

Difüzyon, atomların yada moleküllerin katılarda ve akışkanlarda termal olarak uyarılmış hareketi olarak tanımlanabilir. Bu tip hareket ilk kez Robert Brown tarafından 1827'de gözlenmiştir. Brownian hareketinin matematiksel formülü 1905 ve 1906'da Albert Einstein

tarafından yapıldı. Difüzyon olgusunu bileşik yarıiletkenlerde anlamakta temel merak, yarıiletken aletin elektriksel özellikleri p-n kavşak yada omik kontakın termal kararlılığına bağlı olabildiğindendir. Difüzyon aynı zamanda katkı atomlarının yarıiletkene katılması anlamına gelir. Başka bir deyişle parçacıkların termal enerjilerinden kaynaklanan yeniden dağılımı da difüzyon olarak adlandırılır. Parçacıkların net akışı yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona doğrudur. Atomların hareketi örgüye sınırlandırılmış kristalik katılarda, difüzyon hızı difüzyon mekanizması ile bağlı olabilir. Eğer kristalde atomların etkileşmesi neticesinde atom yüksek enerji kazanırsa, bu atom komşu atomlarla bağlarını koparabilir ve yeni denge durumuna geçebilir. Zaman geçtikçe bu süreç tekrarlanmaktadır. Böylece atomların ısı etkisiyle bir denge konumundan diğerine atlaması difüzyon olarak adlandırılır. Eğer kristalde kendi atomları difüzyon atlamaları yapıyorsa bu olay öz difüzyon olarak adlandırılır. Katkı atomu herhangi bir malzemede difüzyon hareketi yaparsa bu olay difüzyon olarak adlandırılır.

Yarıiletkenlerde katıların difüzyonu, örgü atomları ve katkı atomlarının kimyasal özelliklerine bağlı olan birkaç farklı difüzyon mekanizması içerir. Örneğin katkı atomlarının büyüklüğü ve yükü, yarıiletkendeki kusurların konsantrasyonu, Fermi seviyesinin durumu ve esnek örgünün kristalik yapısı ve tüm faktörler difüzyonu etkileyebilir.

2.4.1 Difüzyon Mekanizmaları

Atomların kristalde bir denge konumundan diğer denge konumuna atlaması farklı mekanizmalar ile verilmektedir. Atomların kristaldeki bir denge konumundan diğerine atlama yörüngesi ile bağlı, katılardaki muhtemel difüzyon mekanizmaları şunlar olabilir: a) Çift yerdeğiştirmesi, b) halka yerdeğiştirmesi, c) arayer yerdeğiştirmesi, d) vakansiyon yerdeğiştirmesi, e) karmaşık (dissosiyatif) yerdeğiştirme.

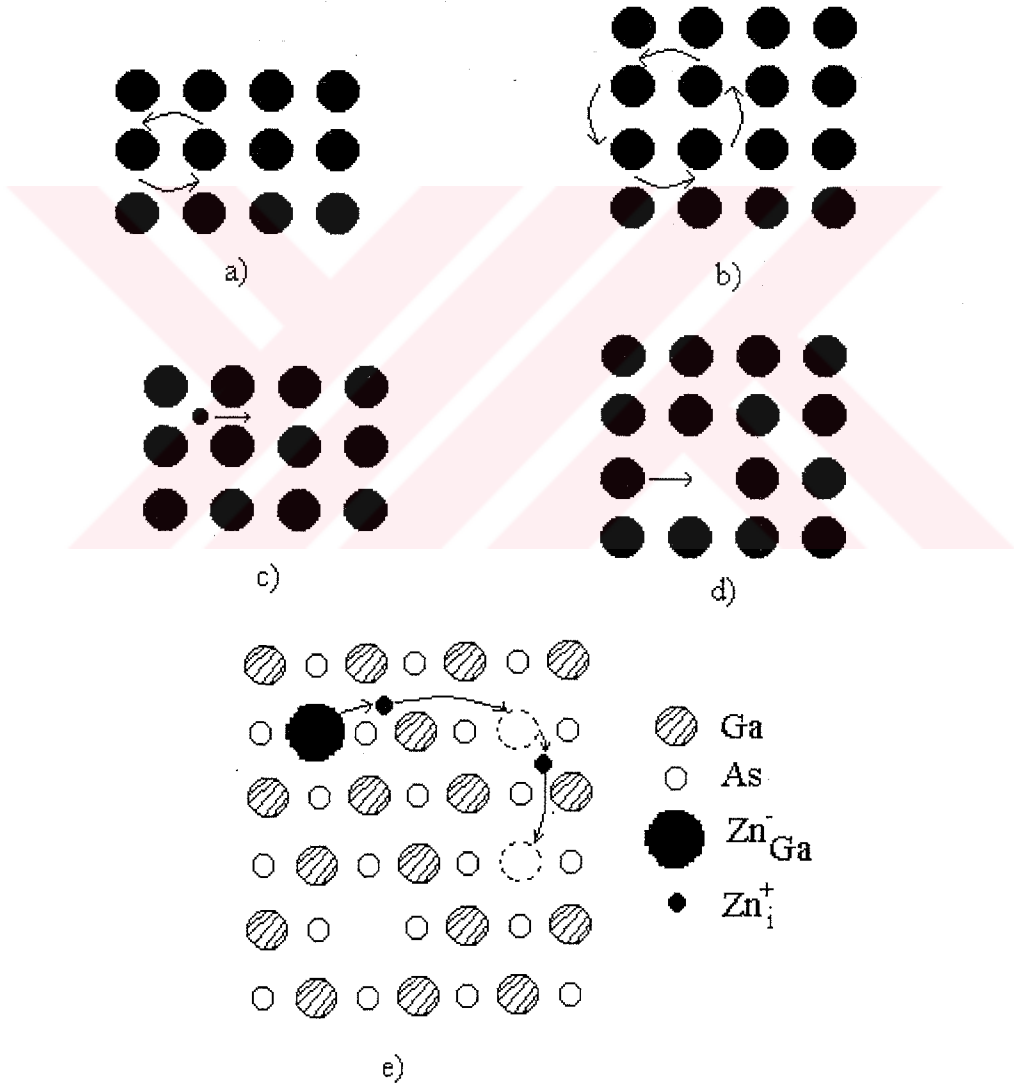
En basit difüzyon mekanizması iki komşu atomun aynı anda yer değiştirmesidir. Atomların çift yerdeğiştirme hareketleri için kristal kusurlarına gerek yoktur. Atomların çift yerdeğiştirme hareketlerinin oluşması çok küçüktür, genellikle metallerde görülür (Şekil 2.3a).

Eğer halka şeklinde yerleşmiş dört atom aynı zamanda hareketlenirse, bu durumda halka yerdeğiştirme mekanizması oluşur. Halka mekanizmasında her atom bir örgü parametresi uzaklığa atlamaktadır. Kristallerde böyle hareketlerin oluşma ihtimalide küçüktür (Şekil 2.3b).

Atomun kristalin bir arayer pozisyonundan komşu arayere atlamaları ile arayer mekanizması oluşmaktadır. Sıkı paket olmayan yapılarda, küçük yarıçaplı atomun taşınması arayer mekanizması ile olabilir (Şekil 2.3c).

Atomun bir vakansiyondan komşu vakansiyona atlaması vakansiyon mekanizması olarak ifade edilir (Şekil 2.3d).

Dissosiyatif mekanizması arayer ve vakansiyon mekanizmalarının bileşimidir. Atom, örgü düğümünden arayer pozisyonuna geçer, arayer pozisyonları ile hareketinden sonra, yeniden başka bir vakansiyona geçer. Çinkonun dissosiyatif mekanizma yöntemi ile GaAs yarıiletkeninde hareketleri şekil Şekil 2.3e’de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Atomların difüzyon mekanizmaları: (a) çift yerdeğiştirme, (b) halka yerdeğiştirme, (c) arayer, (d) vakansiyon ve (e) çinkonun GaAs’de dissosiyatif mekanizması (Caferov, 1998).

2.4.2 Difüzyon Kuralları

Difüzyon kuralları ilk kez 1855 yılında Adolf Fick tarafından verilmiştir. Bu kurallar FICK'in 1. ve 2. kuralları olarak tanımlanır.

1. Fick Kuralı: Difüzyonun 1. kuralı parçacıkların difüzyon akışı J (J , bir saniyede birim alandan geçen parçacıkların sayısıdır) ve onların konsantrasyon gradyenti $\frac{\partial N}{\partial x}$ ile (N , malzemenin birim hacminde yerleşen parçacıkların sayısıdır) bağlantısını göstermektedir.

$$J = -D \frac{dN}{dx} \quad (2.1)$$

(2.1) denklemi, difüzyonun birinci kuralı olarak tanımlanır. Görüldüğü gibi atomların serbest difüzyon akışı, konsantrasyon gradyenti ile orantılıdır. Bu eşitlikte J difüzyon akışı, N atomların konsantrasyonu, D difüzyon katsayısıdır. (-) işareti atomların akış yönünün, konsantrasyon gradyentinin küçüldüğü yönde gerçekleştiğini göstermektedir. Difüzyon katsayısı,

$$D = \alpha a^2 \nu \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Atomların difüzyon katsayısı, (2.2) örgü parametrelerine (veya atomların atlama uzaklığına) ve ortalama atlama frekansına (ν) bağlıdır. a örgü parametresi, ν atomların kristaldeki titreşim frekansı ve α bir sabittir. a '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/sn 'dir. Atomların yarıiletkenlerdeki difüzyon katsayısı yüksek sıcaklıklarda (500°C - 1000°C) yaklaşık 10^{-6} - $10^{-14} \text{ cm}^2/\text{sn}$ aralığında değişmektedir.

2. Fick Kuralı : Eşitlik (2.3)'teki süreklilik denklemi 1. Fick Kuralında (2.1) kullanılırsa, 2. Fick kuralını ifade eden (2.4) eşitliği elde edilir.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

(2.4) eşitliği konsantrasyonun zamanla değişim hızının, konsantrasyonun ikinci türevine

bağıllığını göstermektedir. Belirli bir örnekte, koordinat ve zamana bağlı olan $N(x,t)$ konsantrasyon dağılımını çıkartmak, ikinci difüzyon denklemini (2.4) çözmek demektir. Bunun için sabit konsantrasyonlu kaynaktan yarı sonsuz boyutlu örneğin yüzeyinden içine doğru atomların difüzyonu gözönüne alınır. 2. Fick kuralının çözümleri başlangıç ve sınır şartlarına bağlıdır. Yarı sonsuz örneğe sabit konsantrasyonlu kaynaktan difüzyon.

$$N(x,t)=0 \quad (2.5)$$

$$N(0,t)=N_0 \quad (2.6)$$

bağıntıları ile verilir. (2.5) denklemi ilk anda ($t=0$) örneğin içine düşen atomların konsantrasyonunun sıfır olduğunu göstermektedir. Sınır koşulu (2.6) örneğin yüzeyinde ($x=0$) konsantrasyonun zamana göre değişmediğini göstermektedir. 2. Fick denkleminin çözümü

$$N(x,t)=N_0(1-\text{erf}\frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \quad (2.7)$$

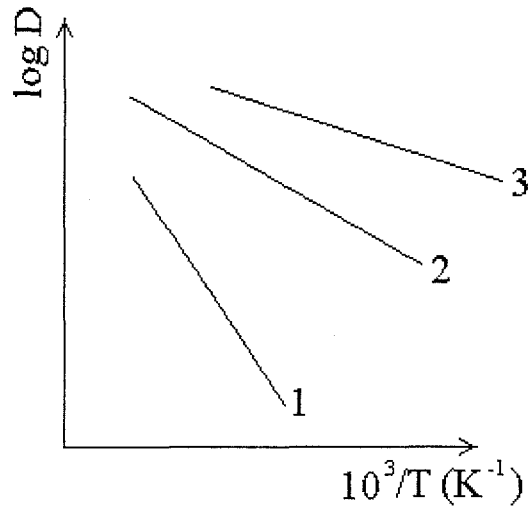
şeklindedir (Caferov, 1998). Burada N_0 örnek yüzeyindeki ($x=0$) sabit konsantrasyon, erf (z) Gauss hata fonksiyonudur.

$$\text{erf } z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \quad (2.8)$$

Difüzyon katsayısının sıcaklıkla bağıntısına Arrhenius eşitliği denir. Katılarda difüzyon katsayısı, Arrhenius kuralına uygun eksponansiyel olarak değişim gösterir.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{G}{kT}\right) \quad (2.9)$$

Eşitlikteki G difüzyonun aktivasyon enerjisi, D_0 atomların titreşim frekansı ve atlama mesafesi ile bağlı olan üstel fonksiyonun çarpanıdır. Şekil 2.4 atomların difüzyon katsayısının sıcaklığa bağıllığını göstermektedir. Şekil 2.4 farklı mekanizma ile tek kristalde (1,2) ve polikristalde (3) hareket eden atomların difüzyon katsayısının sıcaklığa bağıllığını göstermektedir. Difüzyon katsayısının en küçük değerleri ve en büyük aktivasyon enerjisi boşluk mekanizması ile hareket eden atomlar için gösterilmektedir. Tane sınırları ile difüzyona uğrayan atomlar en büyük D ve en küçük G parametrelerine sahiptir. Arayer yolları ile hareket eden atomlar için difüzyon parametreleri boşluk ve tane sınırları ile difüze olan atomların parametrelerinin arasında yerleşmektedir.



Şekil 2.4 (1) Boşluk, (2) arayer ve (3) tane sınırları mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağılılığı (Caferov, 1998).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 CdTe ve CdTe(Cu) Filmlerin Hazırlanması

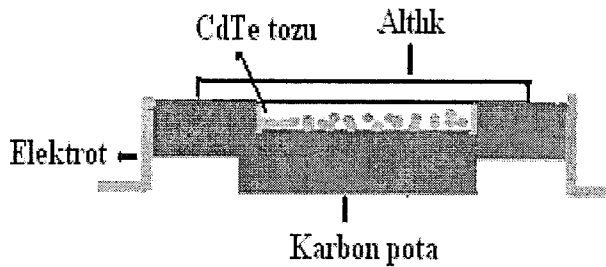
CdTe filmler yakın mesafeden süblimasyon (Close-space sublimation, CSS) yöntemi ile hazırlanmıştır (Şekil 3.1).

CdTe filmler, basıncı 10^{-1} torr'a düşürülmüş vakum sisteminde hazırlandı. Karbon potaya CdTe tozu konuldu, potadan akım geçirilerek CdTe'ün potadan 2mm mesafede bulunan cam altlık üzerine buharlaşması sağlandı.

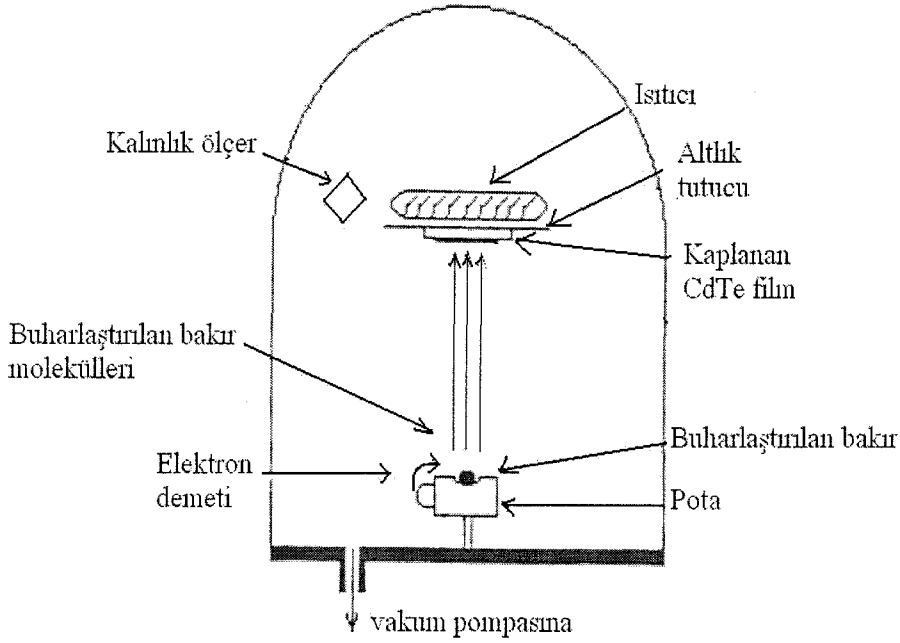
Cu katkılı CdTe filmler, Cu'nun termal ve fotodifüzyonuyla hazırlandılar. CdTe üzerine 6-72 nm kalınlığındaki Cu filmi vakumda elektron demeti buharlaştırma yöntemiyle kaplandı (Şekil 3.2). Cu tablet HNO_3 ile temizlendikten sonra kütlesi tartılarak şekil 3.2'de gösterilen "Leybold" marka elektron-demeti buharlaştırma setinde potaya yerleştirildi. Buharlaştırma yöntemiyle kaplama yapıldıktan sonra CdTe/Cu filmler, vakum ortamında farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtılarak Cu'nun CdTe film üzerine difüzyonu sağlandı. Isıtma sırasında örneğin yanına yerleştirilen termocuiftle sıcaklık kontrol edildi. Kaplanan filmin kalınlığı, deney setindeki kalınlık ölçerle ("Leybold Inficon" 752-500-G₂ Deposition Controller), örneğin yanına yerleştirilen cam plaka ve buharlaştırılan metalin kütlesi (3.1) kullanılarak hesaplandı.

$$d = \frac{\Delta m}{2\pi\rho h^2} \quad (3.1)$$

Burada ρ , metalin yoğunluğu (Cu'da 8.93g/cm^3), Δm , buharlaştırılan metalin kütlesi, h , buharlaştırılan metalin CdTe filme uzaklığıdır.



Şekil 3.1 CdTe filmlerin CSS yöntemi ile elde edilme düzeneği.



Şekil 3.2 Elektron-demeti buharlaştırma setinin şematik gösterimi.

3.2 CdTe ve CdTe(Cu) Yapıların X-Işınları Kırınım Analizi

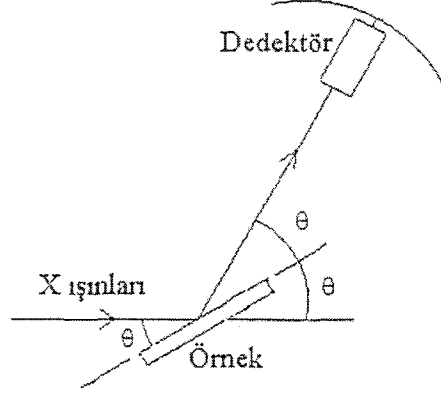
X-Işınları 1895 yılında Roentgen tarafından keşfedilmiştir. Elektrik alanında hızlanmış elektronların cismin atomları ile çarpışması sonucunda atomun iç kabuğunda elektron dışarı atılır, yerine daha üst kabukta bulunan elektron geçer ve böylece X-ışınları oluşur. X-ışınlarının dalga boyu 10^{-2} – 10 nm arasında değişir, katıların örgü parametrelerine yakın olması nedeniyle X-ışınları kırınım olayı kristalik yapıya sahip yapının örgü parametresini ölçmek için kullanılır. Bragg Yasasına göre, örgünün atomik katmanlarından yansıyan ışınlar arasından

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (3.2)$$

koşulu sağlandığında X-ışınları spektrumunda maksimum pikler oluşmaktadır. Burada λ kristal örgüsüne düşen X-ışınlarının dalga boyu, θ örgüye düşen X-ışınları ile örgünün yüzeyi arasındaki açı, d kristaldeki düzeyler arası uzaklık ve n yansıma derecesidir. CdTe, CdTe(Cu) yapıların X-ışınları kırınım analizinde* “RigakuD/Max-IIIC” difraktometresi kullanıldı. Şekil 3.3’de bu difraktometrenin basit diyagramı görülmektedir. CdTe, CdTe(Cu) yapıların örgü parametrelerini bulmak için X-ışını kırınım desenleri incelendi.

* XRD ölçümleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Laboratuvarında yapılmıştır.

Örneğin birbirine paralel düzlemlerinden yansıyan ve sonra üst üste gelen ışınların şiddetleri dedektör ile ölçüldü. Örnek θ açısı kadar dönerken dedektör 2θ kadar dönmektedir. Açıya bağlı olarak yansıyan ışınların şiddeti taranarak X-ışınlarının kırınım desenleri bulundu.



Şekil 3.3 Difraktometrenin diyagramı (Caferov, 1998).

Elde edilen kırınım desenlerinden (hkl) indisleri bulunduktan sonra CdTe ve CdTe(Cu) yapıların örgü parametreleri

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + l^2 + k^2}{a^2} \quad (3.3)$$

denklemini kullanılarak hesaplandı. Burada d atom düzlemleri arasındaki uzaklıktır, a örgü parametresidir.

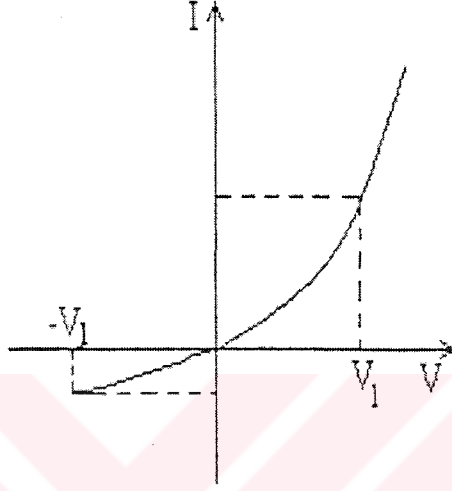
3.3 Omik Kontakların Yapılması

Yarıiletken malzemeler, elektriksel parametrelerin ölçümleri için özel yöntemle hazırlanırlar. Zımparalama ve yıkama işlemleri bittikten sonra örnekler omik kontaklar yapılır. (Caferov, 1998). Omik kontakların özellikleri aşağıdaki koşullara uymalıdır.

- Kontakların akım gerilim karakteristiği doğrultucu olmamalıdır, yani kontak direnci akımın yönüne bağlı olmamalıdır.
- Kontak direnci akımın değeri ile bağlı olmamalıdır.
- Kontak direnci yarıiletkenin direncinden çok küçük olmalıdır.
- Kontaktan akım geçerken gürültü olmamalıdır.
- Kontak malzemesi yarıiletkenle mekanik olarak iyi birleşmelidir.

Kontağa düşen gerilimin kontakta geçen akıma oranı omik kontakta direnci olarak tanımlanır. $R=V/I$ kontak direnci ne kadar az ise kontak o kadar omiktir. Omik direnç kontakta alanına bağlıdır.

Deneysel çalışmalarda tam doğrusal akım gerilim karakteristikli kontak yapmak zordur. Kontakta akım gerilim karakteristiği doğrusal olamazsa kontakta doğrultma derecesi akımın doğru ve ters yönlerde ki değerlerinin oranı ile belirlenmektedir.



Şekil 3.4 Yaklaşık omik kontakların akım gerilim karakteristiği (Caferov, 1998).

Bu akımların oranı kontakta doğrultma katsayısı olarak tanımlanır. İdeal omik kontakta doğrultma katsayısı 1'dir. Kontak için metalin seçiminde aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır.

- n-tipi yarıiletken için kullanılan metalin çıkış işi yarıiletkenin çıkış işinden daha küçük olmalıdır; p- tipi yarıiletken için, metalin çıkış işi yarıiletkeninkinden daha büyük olmalıdır.
- n-tipi yarıiletken için kullanılan metal, yarıiletken için donör özelliği göstermeli; p-tipi yarıiletken için akseptör özelliği göstermelidir.

Kontaklar yapıldıktan sonra elektrik özellikleri incelenmelidir. Bunun için birkaç yöntem kullanılabilir. Metal-yarıiletken kontakta akım gerilim karakteristiği kontakta omikliğini göstergesidir.

Eritme yöntemi ile yapılmış kontaklar omik karakteristikleri ve mekanik dayanıklılıkları yönünden en iyi kontaklardır. Bu yöntemle kurşun, indiyum, alüminyum, kalay ve altın alaşımları omik malzemeler olarak kullanılmaktadır. n-tipi yarıiletken için omik kontak malzemesi gibi kullanılan alaşımların bileşiminde donör katkıları ve p-tipi yarıiletken için kullanılan alaşımlarda akseptör katkıları bulunmaktadır.

3.4 CdTe Örneklerin İletkenlik Tipi Ölçümleri

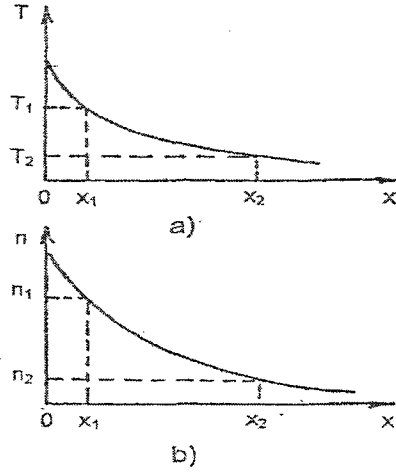
Yarıiletken örneklerin iletkenlik tipini (n-tipi veya p-tipi) bulmak için birkaç yöntem kullanılır. Bunlardan birincisi Hall sabitinin (R_H) işaretine bağlıdır. n-tipi yarıiletken için Hall sabitinin işareti negatiftir, p-tipi yarıiletken için Hall sabitinin işareti pozitifdir. Termoelektrik ölçümlerle yarıiletkenin iletkenlik tipini bulmak daha kolay olduğu için CdTe örneklerin iletkenlik tipine bakarken termal elektro-motor kuvveti (TEMK) yöntemi kullanıldı.

Yarıiletkenlerde termoelektrik olay şu şekilde gerçekleşmektedir. Örneğin n-tipi yarıiletken homojen olmayacak şekilde ısıtıldığında, $T_1(x_1) > T_2(x_2)$ (Şekil 3.5a), elektronların konsantrasyonu daha sıcak bölgede artmakta, x ekseninin pozitif yönünde elektronların konsantrasyon gradyenti oluşmakta ve bu nedenle elektronlar daha sıcak bölgeden daha soğuk bölgeye doğru hareketlenmektedir (Şekil 3.5b). n-tipi yarıiletkende elektronların daha sıcak bölgeden soğuk bölgelere difüzyonu neticesinde, daha sıcak bölgede pozitif hacimsel yük (pozitif yüklü donör iyonlarından oluşmuş), ve daha soğuk bölgede elektron konsantrasyonunun fazlalığından oluşmuş negatif yük meydana gelmektedir. Böylece sıcaklık gradyenti şartında ısınan yarıiletkende, x_1 ve x_2 noktaları arasında termal elektro-motor kuvveti (TEMK) oluşmaktadır. Eğer yarıiletkenin bu noktaları kapalı devre şekline getirilirse, bu takdirde devreden termoelektrik akımı geçmektedir.

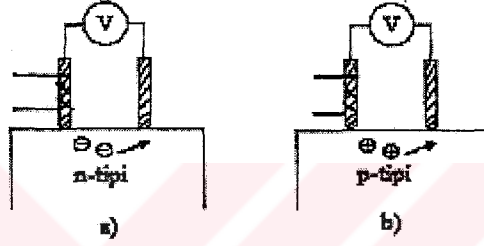
p-tipi yarıiletkende, tersine, pozitif yüklü deliklerin daha sıcak bölgeden daha soğuk bölgelere difüzyonu nedeniyle, daha sıcak bölgede hacimsel negatif elektrik yükü oluşmaktadır. Uygun bir milivoltmetre yardımı ile örneklerin iletkenlik tipi belirlenir (Şekil 3.6).

Deneyssel ölçümlerde yarıiletken örneklerin iletkenlik tipini bulmak için önce tipi bilinen bir yarıiletkenin TEMK ölçümü ile devredeki voltmetrenin kalibrasyonu yapılır ve sonra incelenen örneğin tipi belirlenir.

TEMK yöntemiyle düşük öz dirençli katkılı yarıiletkenlerin tipini belirlemek için daha uygundur. Özden yarıiletkenlerin iletkenlik tipi, daha yüksek mobilitesi olan yük taşıyıcılarının (elektronların) mobilitesi ile belirlenmektedir.



Şekil 3.5 Yarıiletken (a) sıcaklığının ve (b) elektron konsantrasyonunun dağılımı.



Şekil 3.6 TEMK yöntemi ile (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik tiplerinin ölçüm devresi (Caferov, 1998).

3.5 CdTe ve CdTe(Cu) Örneklerin Yük Taşıyıcıları Konsantrasyonu ve Özdirenç Ölçümleri

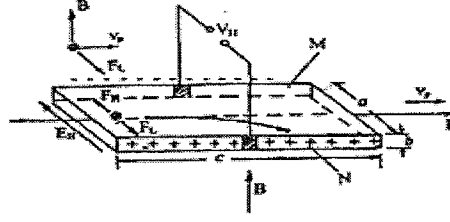
Hall olayından faydalanarak bir yarıiletkenin yük taşıyıcıları konsantrasyonu, işareti ve mobilitesi bulunabilir. Hall olayı manyetik alanda hareket eden elektrik yüklerine Lorentz kuvvetinin etkisi ile ilgilidir. Katkılı yarıiletkenler için, Hall sabiti ve yük taşıyıcılarının konsantrasyonu,

$$R_H (cm^3 C^{-1}) = 10^8 \frac{V_H d}{IB} \quad (3.4)$$

$$n, p (cm^{-3}) = \frac{6.25 \times 10^{18}}{R_H} \quad (3.5)$$

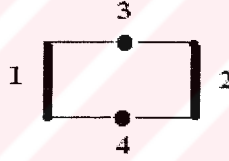
eşitlikleri ile verilir. Şekil 3.7’de gösterildiği gibi p-tipi yarıiletkene manyetik alan uygulandığında, pozitif yüklü deliklere Lorentz kuvvetinin etkisi aşağıdaki ifade ile verilmektedir.

$$F_L = e\eta B \quad (3.6)$$



Şekil 3.7 p-tipi yarıiletkende Hall olayı (Caferov, 1998).

Manyetik alanda delikler 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 deliklere etki eden Hall alanının kuvveti F_H ile Lorentz kuvveti (F_L) birbirine zıt yöndedir (Şekil 3.7). Bu kuvvetler eşitlendiğinde ($F_L = F_H$), başka yük taşıyıcıları kenar M ve N yüzeylerinde son bulur ve manyetik alan başka yük taşıyıcıların hareketine etki göstermez.

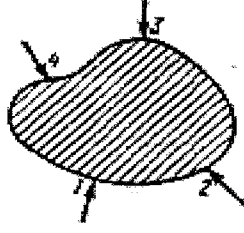


Şekil 3.8 Hall Olayı ölçümlerinde dörtgen şekilli örnekte kontakların yerleşimi.

Dörtgen şeklindeki bir örneğin Hall olayı ölçümlerinde kontakların yerleşimi şekil 3.8'deki gibi olabilir. 1 ve 2 kontaklarından akım geçerken 3 ve 4 kontakları arasında Hall gerilimi ölçülür. Ölçümler iki akım yönü ve iki manyetik alan ($B = 6400$ gauss) yönü olmak üzere toplam dört kez yapılır ve $V_H(I^+, H^+)$, $V_H(I^-, H^+)$, $V_H(I^+, H^-)$, $V_H(I^-, H^-)$ değerleri bulunur. Sonuç olarak 3 ve 4 kontakları arası hatasız Hall gerilimi değeri (3.7) ile verilir.

$$V_H = \frac{1}{4} [V_H(I^+, H^+) + V_H(I^-, H^+) + V_H(I^+, H^-) + V_H(I^-, H^-)] \quad (3.7)$$

ile hesaplanabilir. Bu değer (3.4) eşitliğine konmasından R_H Hall sabitinin değeri bulunur.



Şekil 3.9 Van der Pauw yöntemi ile öz direnç ölçümlerinde örnekte kontakların yerleşimi (Caferov, 1998).

Van der Pauw metodu, düzlemsel plaka şeklindeki örneklerin öz direnç ölçümlerinde geniş olarak kullanılmaktadır. Bu ölçümler için, örnek kenarının dört noktasında kontaklar yapılır (Şekil 3.9). Bu yöntemle ile öz direnç ölçümünde, dörtgen şekilli örneğin önce 1 ve 4 kontaklarından akım (I_{14}) geçirilir, 2 ve 3 kontakları arası gerilim farkı (V_{23}) ölçülür. Buradan Ohm bağıntısı ile R_1 direnci hesaplanır. Daha sonra, 1 ve 2 kontaklarından akım (I_{12}) geçirilerek 3 ve 4 kontakları arası gerilim (V_{34}) ölçülür. Buradansa R_2 , direnci hesaplanır. Van der Pauw yönteminine göre direncin R_1 , R_2 değerleri (3.8) denkleminde kullanılarak CdTe(Cu) filmin öz direnci hesaplandı.

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

ile verilir. Bu denklemde d örneğin kalınlığı, Burada $f(R_1/R_2)$ düzeltme fonksiyonudur. Bu yöntemle örneklerin öz direnci yüksek doğrulukla ölçülmektedir.

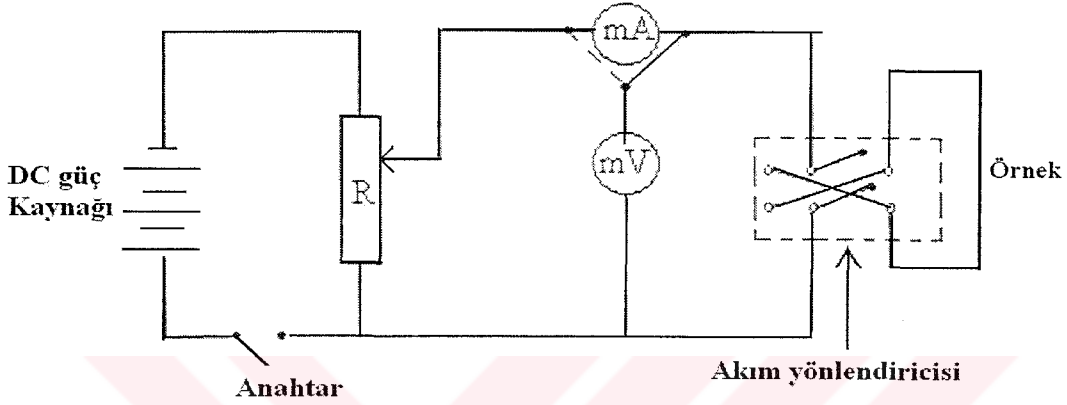
Bakırla katkılı CdTe filmlerde, CdTe filmlerin yasak bant aralığı ve Cu katkısının aktivasyon enerjisini bulmak amacıyla, CdTe(Cu) filmler ısıtılırken iletkenlik değişimleri ölçüldü. Ölçülen σ değerlerinden $\log \sigma - 10^3/T$ (K^{-1}) grafiği çizildi. Bu grafikten yüksek sıcaklıktaki bölgesinden CdTe filmin yasak bant aralığı ve düşük sıcaklıktaki bölgesinden Cu'nun aktivasyon enerjisi aşağıdaki formülleri kullanarak bulundu.

$$E_g = 0.4tg\varphi_1 \quad (3.9)$$

$$\Delta E_a \approx 0.4tg\varphi_2 \quad (3.10)$$

3.6 Akım-Gerilim Karakteristikleri Ölçümleri

CdTe(Cu) örneklerin elektriksel ölçümlerinde kontak olarak gümüş macun kullanılmıştır. Bakırla katkılı CdTe(Cu) örneklerin akım-gerilim karakteristikleri karanlıkta ve aydınlıkta (örneğin üzerin düşen ışık şiddeti $P=100 \text{ mW/cm}^2$), oda sıcaklığında bakılmıştır. Akım-gerilim karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan düzenek şekil 3.10'da gösterildi. Bu düzenek kullanılarak çizilen CdTe(Cu) örneklerin akım gerilim karakteristiklerinden örneğin doğrultma derecesi ve ışığa duyarlı olup olmadığı bulundu.



Şekil 3.10 Akım-gerilim karakteristiğinin ölçüm devresi.

3.7 CdTe Filmlerin Optik Spektrumları

Optik geçirgenlik (T) ile optik soğurma katsayısı (α) arasındaki bağıntı,

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{[(1-R)^2 \exp(-\alpha d)]}{[1 - R^2 \exp(-2\alpha d)]} \quad (3.11)$$

ile verilir. Burada I_0 ve I sırasıyla filmin yüzeyine düşen ve filmten çıkan ışının şiddeti, R yansıma katsayısı (CdTe için $R=0,213$) ve d örneğin kalınlığıdır. Eğer $\alpha d > 1$ ise

$$T = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (3.12)$$

olarak yazılabilir. Bu ifadeden soğurma katsayısı

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{T} \right] \quad (3.13)$$

CdTe için $R=0,213$ olduğundan $(1-R)^2=0,62$ olur ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{0.62}{T} \right] \quad (3.14)$$

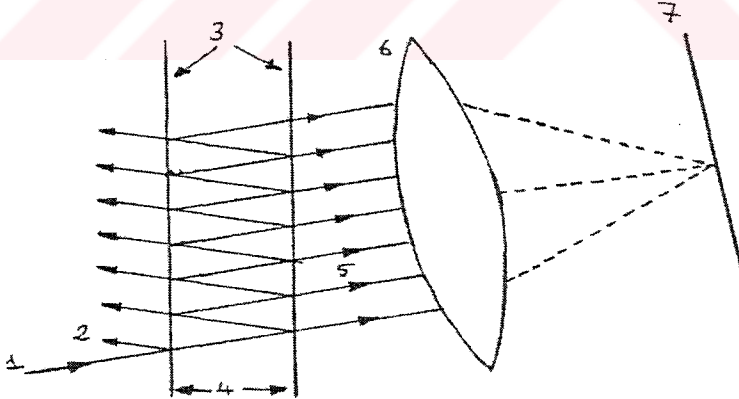
Işığın dalga boyu (λ) ile fotonların enerjisi (E) arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$E(\text{eV}) = \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (3.15)$$

3.14 ve 3.15 eşitlikleri kullanılarak CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin soğurma katsayıları ve fotonların enerjisi hesaplandı. Hesaplanan bu değerlerle $(\alpha^2(h\nu)^2 - E)$ grafikleri çizildi. Soğurma katsayısı-fotonların enerjisi eğrileri kullanılarak CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin yasak bant genişlikleri bulundu.

CdTe ve CdTe(Cu) örneklerin tavlamadan önce ve tavlamadan sonra $\lambda=500-1100$ nm dalga boyu aralığında optik geçirgenlik ölçümleri "Perkin Elmer Lamda 2S" spektrometresi kullanılarak yapılmıştır.

CdTe filmlerin kalınlığını bulmak için ince filmin iki paralel yüzeylerinden yansıyan ışınların girişimi kullanılmıştır. İki yüzeyi birbirine paralel olan ince filmin içinde, ışınların çok sayıda yansımaları ve üst üste gelmeleri Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Paralel yüzeyli filmin içinde ışınların yansımalarının gösterimi: 1-yüzeye düşen ışın, 2-yüzeyden yansıyan ışın, 3-filmin yüzeyleri, 4-filmin kalınlığı, 5-filminden çıkan ışınlar, 6-mercek, 7-girişim olayının gerçekleştiği yerel düzlem (Caferov, 2000).

Filmin iki paralel yüzeyi arasında çok sayılı yansımalar meydana geldiği takdirde, filmin optik geçirgenliği 3.12 denklemi ile ifade edilir. Filmin yansımaya katsayısı R ile kırılma indisi n arasındaki bağıntı,

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

ile verilir. Çok sayıdaki yansımadan sonra ince filmde çıkan ışınların girişim koşulu

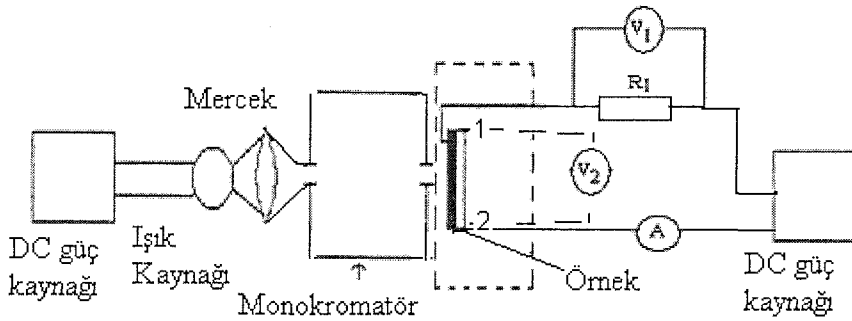
$$\frac{1}{2nd} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \quad (3.17)$$

olarak ifade edilir. Burada λ_1 ve λ_2 filmin optik geçirgenlik girişim tayfındaki iki komşu maksimum (veya minimum) noktaların dalga boylarıdır, d filmin kalınlığıdır. Buradan CdTe filmlerin kalınlığı bulundu (3.17 eşitliği ile).

3.8 CdTe ve CdTe(Cu) Filmlerin Fotoiletkenlik Spektrumları

Karanlıkta ve aydınlıkta, örneğin üzerindeki direnç, 1-2 kontaklar arası gerilim (V_2) ve örnekten geçen akım ($I = V_1/R_1$) ölçüldü. Farklı dalga boyundaki ışıkla uyarılmış fotoiletkenlik ($I_f = I_{ayd} - I_{karanlık}$) hesaplandı ve örneğin fotoiletkenlik spektrumu çizildi.

CdTe ve CdTe(Cu) örneklerin fotoiletkenliğinin spektral dağılım ölçümleri oda sıcaklığında $\lambda = 300-1000$ nm dalga boyu aralığında incelendi. Şekil 3.12 ölçüm devresini göstermektedir. Bu ölçümlerde, Oriel marka monokromatör kullanıldı. “Osram” lambasından saçılan ışık, merceklerle monokromatörün girişine odaklanmakta ve monokromatörden çıkan monokromatik ışık demeti örneğin yüzeyine düşürülmektedir. CdTe filmlerin dirençleri çok büyük olduğu için, (akımı küçük olduğu için, $I \sim 10^{-6}$ A) ölçümler seri bağlı (seri bağlı direnç $20 \text{ M}\Omega$) direnç devresinde yapıldı (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin fotoiletkenliğinin ölçüm devresi.

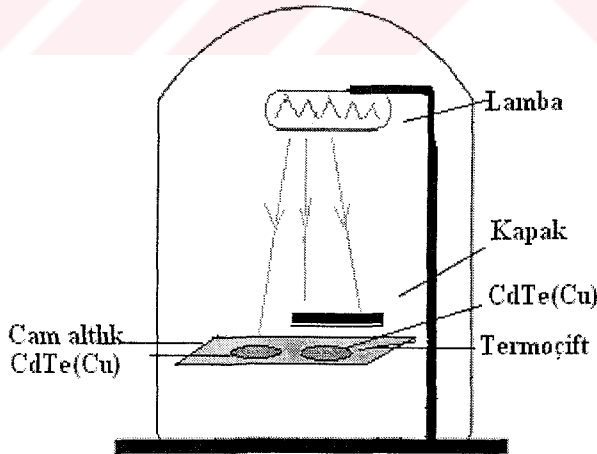
3.9 Termal Difüzyon ve Fotodifüzyon Deneyleri

Cu/CdTe yapıların karanlıkta (termal difüzyon) ve aydınlıkta (fotodifüzyon) elektrik ve optik özelliklerini araştırmak için, Cu/CdTe yapılar sabit sıcaklıklarda (60, 100, 150, 200°C) tungsten-halojen lambayla vakumda (yaklaşık 1.3 Pa) karanlıkta (termal tavlama) ve aydınlatmayla (fototavlama) seri olarak tavlandı. Cu/CdTe yapıların aydınlatma altında ve karanlıktaki yüzey sıcaklığı termoçift kullanılarak ölçüldü. Sonra oda sıcaklığında, her tavlamadan sonra optik geçirgenlik ve öz direnç ölçümleri yapıldı.

Karanlıkta ve aydınlıkta (ρ -t eğrileri) tavlamaların süreyle bağımlı öz direnç değerleri, bakırın CdTe filmlerde difüzyon katsayılarını belirlemekte kullanıldı. Bu örneklerin difüzyon katsayıları

$$D=A(d\rho/dt^{0.5})^2 \quad (3.18)$$

formülü ile hesaplandı. Termal ve fotodifüzyon deneylerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.13’de gösterilmektedir. CdTe/Cu yapı ortadan ikiye bölünerek 1. parçası ışıkla ($P=100 \text{ mW/cm}^2$) uyarılarak difüzyonu sağlandı, 2. parçasının ise üzeri kapatılarak termal tavlama ile difüzyonu sağlandı, örneğin öz direncinin zamanla değişim ölçümleri ($T=\text{sabit}$) alındı.

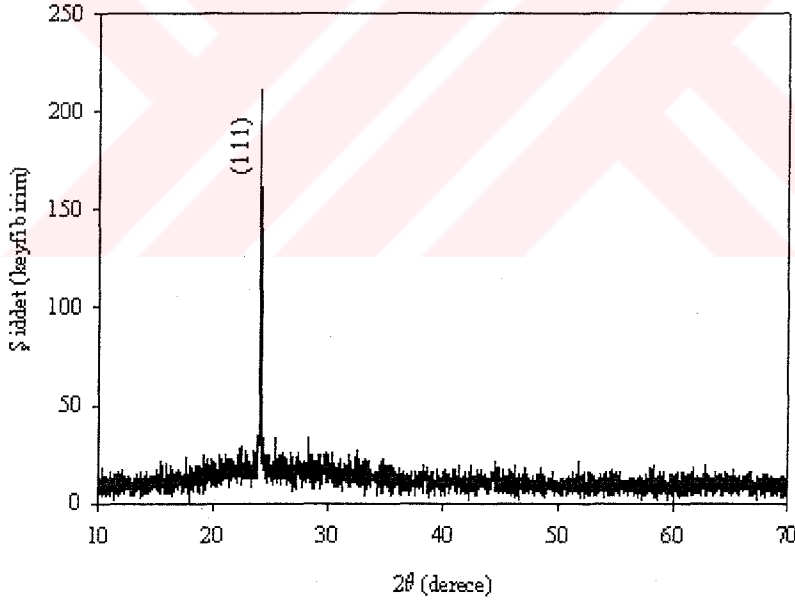


Şekil 3.13 Termal ve fotodifüzyon deneylerinin yapıldığı düzenek.

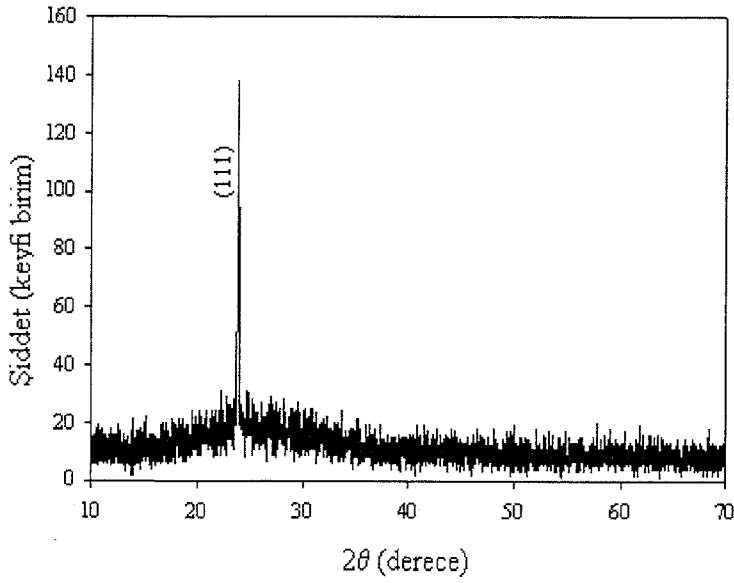
4. BULGULAR

4.1 CdTe ve CdTe(Cu) Yapıların X-Işınları Kırınım Analizi

X-ışınları kırınım metodu ile CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin kristal yapısı incelendi. CdTe filmlerin tek keskin pik (111) verdiği gözlemlendi (Şekil 4.1a). 400°C’de 30 dakika tavlanmış Cu katkılı CdTe(Cu) film için de tek pik (111) gözlemlendi, ancak bu pikin (111) şiddeti yaklaşık olarak CdTe’inkinden 1.4 kez daha küçüktür. Cu katkılı CdTe filmin X-ışını kırınım deseninde de katılanmamış CdTe gibi aynı yerde tek bir pikin gözlenmesi, Cu katkısının yeni bir faz oluşumuna yol açmadığını göstermektedir (Şekil 4.1b). Kübik CdTe’ün örgü parametresi $a=6.406 \text{ \AA}$ ve CdTe(Cu) filmin örgü parametresi $a=6.464 \text{ \AA}$ olarak belirlendi. Burada CdTe(Cu) filmin örgü sabitinin büyük olmasının nedeni, bakırla yada bakırın kompleksi ile uyarılmış CdTe(Cu)’de kristal örgüsünün genişlemesiyle örgüyü zorlaması ile açıklanabilir.



Şekil 4.1a CdTe filmin X-ışınları kırınım desenleri



Şekil 4.1b CdTe(Cu) filmin X-ışınları kırınım desenleri.

4.2 Bakır Difüzyonunun CdTe Örneklerin Elektriksel ve Optik Özelliklerine Etkisi

Bakır CdTe’de akseptör özelliği gösteren katkı gibi davranır (Dobson vd., 2000). Bu yüzden p-tipi bakırla katkılanmış CdTe filmin direncini düşürmesi, n-tipi CdTe filmin direncini arttırması beklenir. CdTe’e termal ve fotodifüzyon yöntemiyle Cu katkısı yapılarak CdTe filmin elektrik ve optik özelliklerine etkisi incelendi. Temiz CdTe örneklerin oda sıcaklığında elektriksel özellikleri deneysel metotlarla belirlendi. Yapılan ölçümlerden örneklerin iletkenlik tipi, yük taşıyıcılarının konsantrasyonu, öz direnci ve mobilitesi hesaplandı. CSS yöntemiyle elde edilen n-tipi CdTe filmlerin öz direnci $\rho=0.8-20 \times 10^7 \Omega \text{cm}$, $n=2 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, olarak ölçüldü. Difüzyon yöntemiyle bakırla katkılanmış p-tipi CdTe filmlerin elektrik parametreleri $\rho=0.5 \Omega \text{cm}$, $p=3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $\mu=39 \text{cm}^2/\text{V.s}$ ($d_{\text{Cu}}=72 \text{nm}$ için) olarak bulundu.

Ag/CdTe(Cu)/Ag yapının akım–gerilim karakteristiği karanlıkta ve aydınlıkta (örneğin üzerine düşen ışık şiddeti $P=100 \text{mW/cm}^2$), oda sıcaklığında ölçülmüştür. Bakır difüzyonunun n-tipi CdTe filmin elektrik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bunun için n-CdTe filmin bakır difüzyonundan önce öz direnci $0.8 \times 10^7 \Omega \text{cm}$ ’den ($T=400^\circ\text{C}$ ’de $t=30$ dak, $d_{\text{Cu}}=35 \text{nm}$) bakır difüzyonundan sonra p-tipi CdTe(Cu) filmin öz direnci $1.1 \times 10^2 \Omega \text{cm}$ ’e

düşmüştür. CdTe(Cu) filmin I-V karakteristiğinden görüldüğü gibi Ag/CdTe(Cu)/Ag yapı omik davranış gösterdi (Şekil 4.2). Bu omik kontakın doğrultma derecesi 1 bulundu.

Bakırın difüzyon katsayısını bulmak için belli bir sıcaklıkta (60, 100, 150 yada 200°C), farklı zamanlarda, ($\Delta t = 1$ dak. aralıklarla) Cu/n-CdTe iki tabakalı örnekler karanlıkta tavlama maruz kaldılar ve her tavlama sonrasında CdTe filmin öz direnci ölçüldü. Şekil 4.3'de n-CdTe(Cu) filmin $T=150^\circ\text{C}$ 'de termal tavlama süresiyle direnç değişim grafiğini göstermektedir. Görüldüğü gibi Cu, CdTe'de akseptör katkısı olduğundan n-tipi CdTe'de elektron konsantrasyonunu azaltarak n-CdTe(Cu) filmin direncini artırır. Her tavlama sıcaklığı için direnç-tavlama zamanı grafiğinden bakırın CdTe filmlerde difüzyon katsayısı hesaplandı. Bakırın CdTe filmlerde difüzyon katsayısı ile ilgili veriler 4.4 bölümde sunulmuştur.

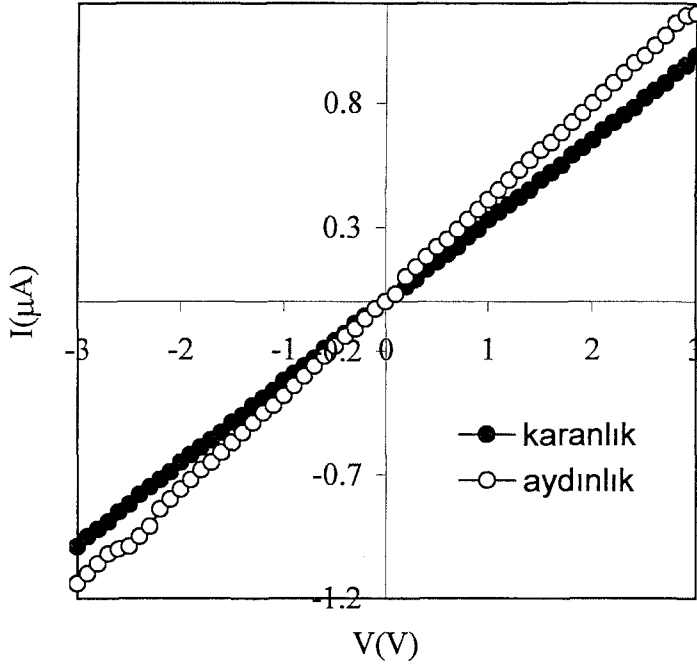
Bakır katkısının CdTe filmlerin elektrik özelliklerine etkisinin incelenmesinden başka, bakırın optik geçirgenliğine de etkisi araştırıldı. Bunun için önce temiz n-tipi CdTe filmin optik geçirgenlik spektrumu ölçüldü. Daha sonra CdTe'ün üzerine Cu filmini kaplayarak Cu/nCdTe ikili yapının karanlıktaki tavlama süresi ile ($T = 150^\circ\text{C}$ $\Delta t = 1$ dak.) geçirgenlik spektrumları seri olarak incelendi (Şekil 4.4). Şekil 4.4 den elde edilen bakırla katkılanmış n-CdTe(Cu) filmin optik geçirgenliğinin ($\lambda = 1100$ nm için) tavlama sürecine bağlı grafiği şekil 4.5'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, ilk başta, optik geçirgenlikteki azalma CdTe yüzeyinin bakırla kaplanması nedeniyle, Cu içeren yüzeyden yansımanın artması nedeni ile ilişkilidir. Sonraki tavlama CdTe(Cu) yapıda Cu'nun n-CdTe içine difüze etmesiyle optik geçirgenlikte artmaya neden oldu. Cu difüzyonu n-tipi CdTe'de çoğunluk yük taşıyıcıları olan elektronların konsantrasyonunu azaltarak, yani serbest elektronlarla soğurmaya azaltarak CdTe filmin optik geçirgenliğini arttırmaktadır. Temiz CdTe filmin ve bakırla katkılanmış CdTe filmin yasak bant aralıkları, filmlerin soğurma spektrumlarından bulundu.

Şekil 4.6a temiz CdTe filmin optik soğurma spektrumunu gösterir. Optik soğurma katsayısının (α) foton enerjisine ($h\nu$) bağlı grafiğinin analizi direkt bant yarıiletkenler için beklenen davranışı gösterir.

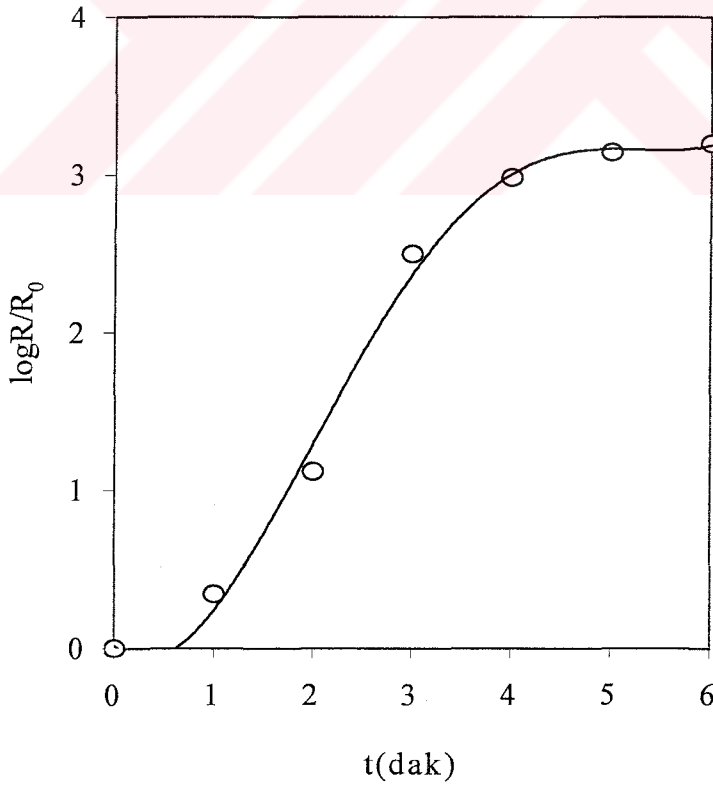
$$\alpha^2(h\nu)^2 = B(h\nu - E_g) \quad (4.1)$$

Buradan CdTe ve CdTe(Cu) filmde $E_g = 1.45 \pm 0.05$ eV bulundu. Bakır katkısı CdTe(Cu)

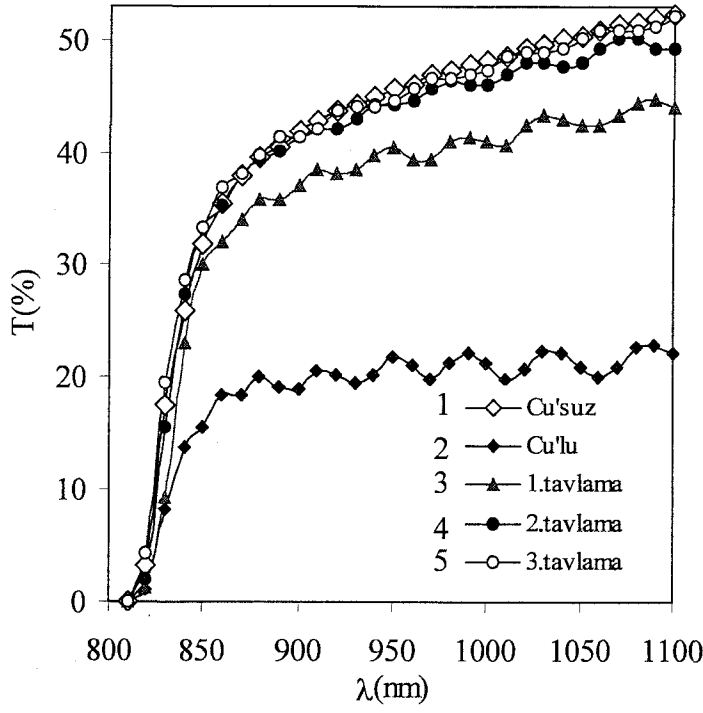
filmin yasak bant aralığını değiştirmemiştir.



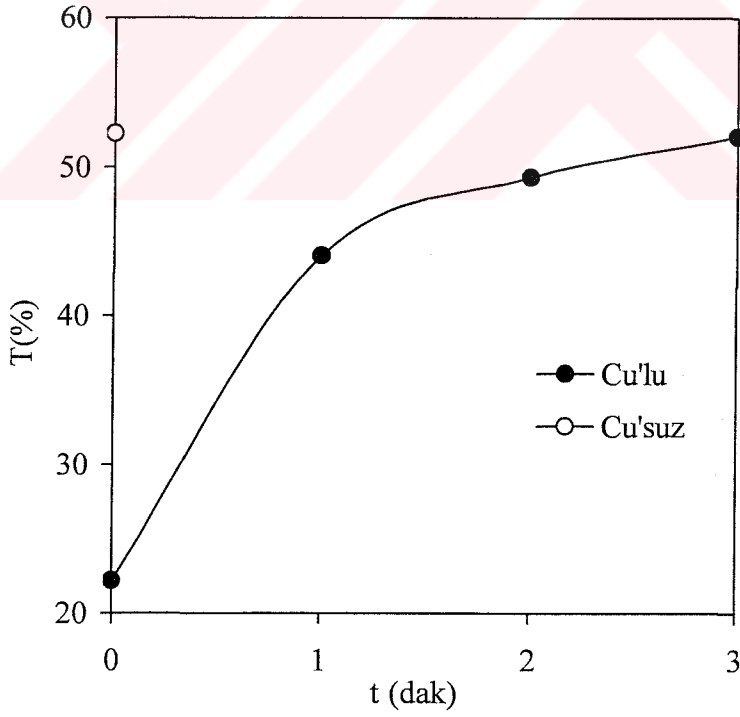
şekil 4.2 p-CdTe(Cu) filmin I-V karakteristiği.



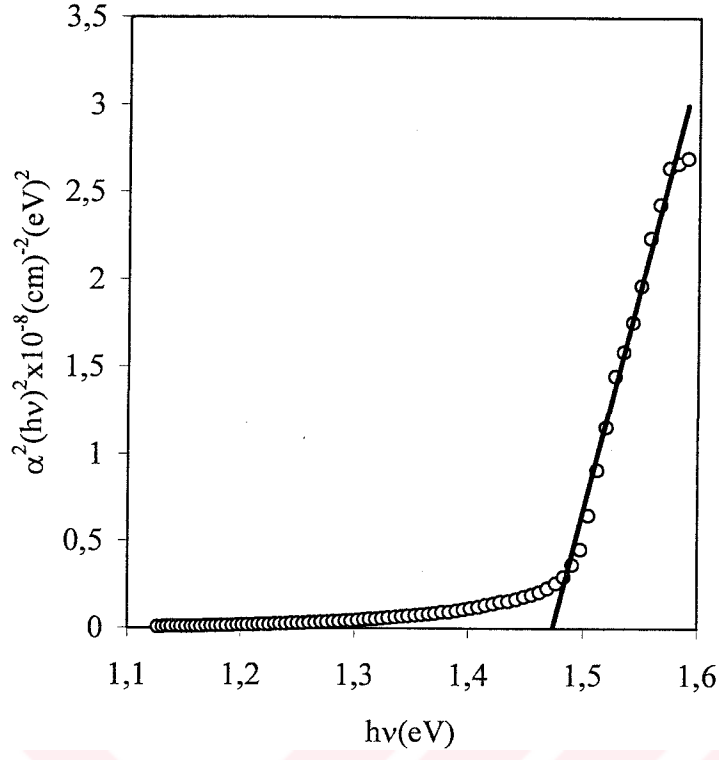
şekil 4.3 n-CdTe (Cu) filmin direncinin ($T=150^\circ\text{C}$) termal tavlama sũresiyle değişimi.



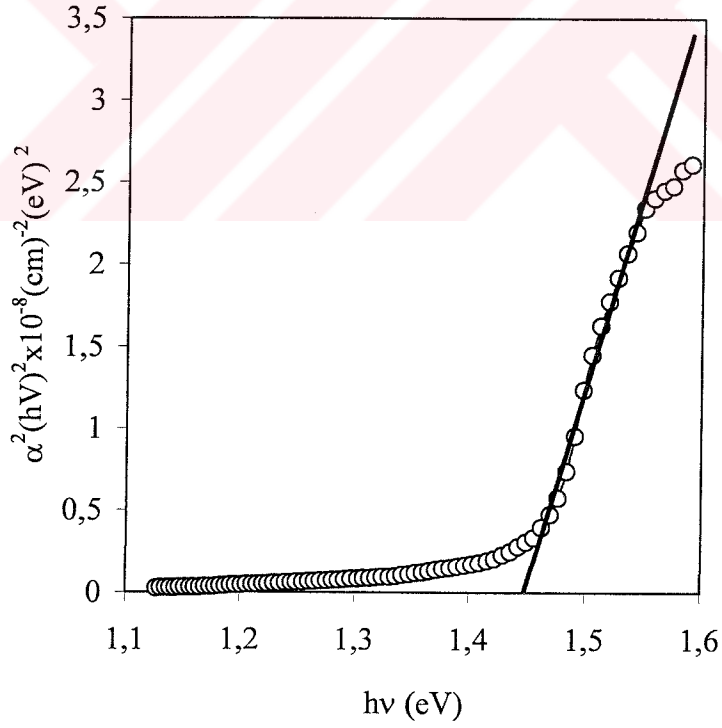
Şekil 4.4 (1) n-CdTe ve (2-5) n-CdTe(Cu) filmin termal tavlama ile optik geçirgenliğinin değişimi ($T=150^{\circ}\text{C}$).



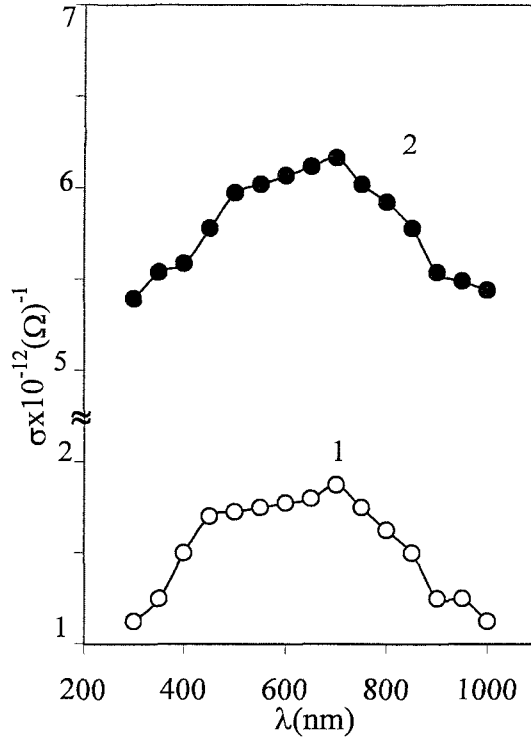
Şekil 4.5 n-CdTe(Cu) filmin $T=150^{\circ}\text{C}$ 'de termal tavlama ile optik geçirgenliğinin değişimi ($\lambda = 1100 \text{ nm}$ için).



Şekil 4.6a CdTe filmin optik soğurma spektrumu.



Şekil 4.6b CdTe(Cu) filmin optik soğurma spektrumu.



Şekil 4.7 (1) p-CdTe ve (2) p-CdTe(Cu) filmlerin fotoiletkenlik spektrumları ($d_{Cu}=6nm$ için).

4.3 CdTe ve CdTe(Cu) Filmlerin Fotoiletkenlik Özellikleri

CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin fotoiletkenlik karakteristikleri oda sıcaklığında $\lambda = 300-1000$ nm dalga boyu aralığında incelendi. p-CdTe (1) ve p-CdTe(Cu) (2) ($d_{Cu}=6nm$) filmlerin fotoiletkenlik spektrumları şekil 4.7’de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi Cu katkısıyla CdTe filmde görünür bölgede fotoduyarlılık artmıştır. Bu artışı akseptör tipli bakır katkısının ışığın etkisi ile foto deliklerin oluşması ile yorumlamak mümkündür.

4.4 Bakır Fotodifüzyonunun CdTe Filmlerin Elektrik Özelliklerine Etkisi

4.2 bölümünde, karanlıktaki termal tavlama ile uyarılmış bakır difüzyonunun n-tipi CdTe filmlerin elektrik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu bölümde, ışığın etkisi ile (fotodifüzyonun) ve termal tavlama ile bakır difüzyonunun p-tipi CdTe filmlerin elektrik karakteristiklerine etkisi incelenmektedir. Fototavlama ve termal tavlama ölçümlerinden farklı sıcaklıklar için elde edilen bakırın p-tipi CdTe filmlerinde difüzyon katsayıları verilmektedir.

Cu/pCdTe yapılar sabit sıcaklıklarda (60, 100, 150, 200°C) termal ve fototavlama maruz bırakıldı ve oda sıcaklığında öz direnç ölçümleri, fototavlama ile öz direnç değişim hızı termal tavlama dan daha yüksek olduğunu göstermiştir. Örneğin, p-CdTe(Cu) filmin 100°C’de termal ve fototavlama zamanının dirence bağlı grafiği şekil 4.8’de gösterildi. Görüldüğü gibi her iki tip tavlama da direncin azalması, tavlama zamanının artmasıyla ilişkilidir. Daha sonra eğriler doyuma ulaşıyor. Bununla beraber, p-CdTe(Cu) filmlerden fototavlama maruz bırakılan örnek, termal tavlama verilen örnekten daha yüksek hızla direnci azalmıştır. Bakırın termal ve foto uyarılmış difüzyon katsayısını belirlemek için,

$$D=A(dp/dt^{0.5})^2 \quad (4.2)$$

denkle mi kullanılarak, $D_t=3.3 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ ve $D_{ph}=9 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ ($T=100^\circ\text{C}$ için) olarak hesaplandı.

Bakırın termal ve fotodifüzyonu için, p-tipi CdTe’de 60-200°C aralığında difüzyon katsayısının değerleri tablo 4.4.1’de, difüzyon katsayısının sıcaklıkla bağımlılığı şekil 4.9’da gösterildi.

Tablo 4.4.1 Farklı tavlama sıcaklıklarında (60, 100, 150, 200°C) hesaplanmış termal ve fotodifüzyon katsayısı değerleri.

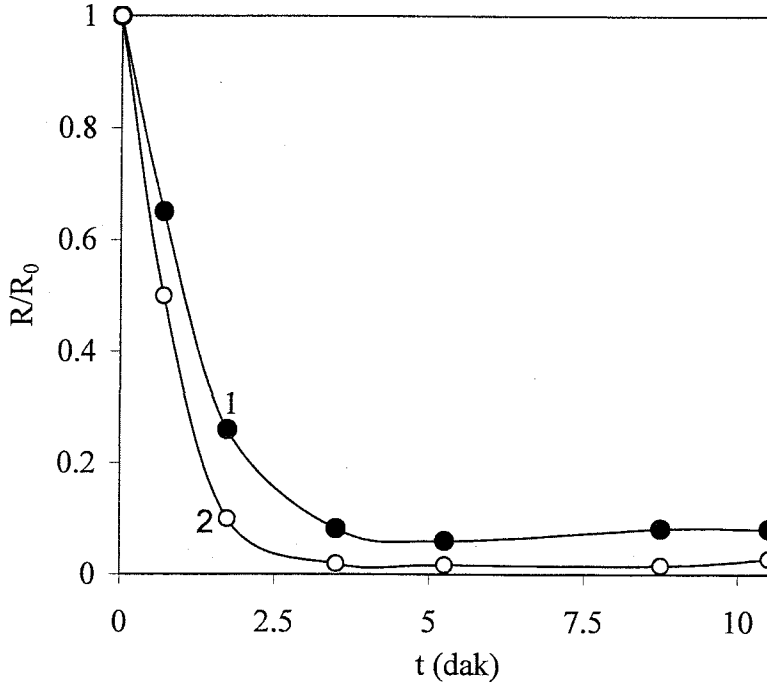
Tavlama sıcaklığı (°C)	$D_t \times 10^{-11} (\text{cm}^2/\text{s})$	$D_f \times 10^{-11} (\text{cm}^2/\text{s})$
60	1.7	6
100	3.3	9
150	14	20
200	17	30

Görüldüğü gibi Cu'nun fotodifüzyon katsayısı, termal difüzyon katsayısından 2-4 kez daha büyüktür ve difüzyon katsayılarının sıcaklıkla bağıntısı şu şekilde verilir

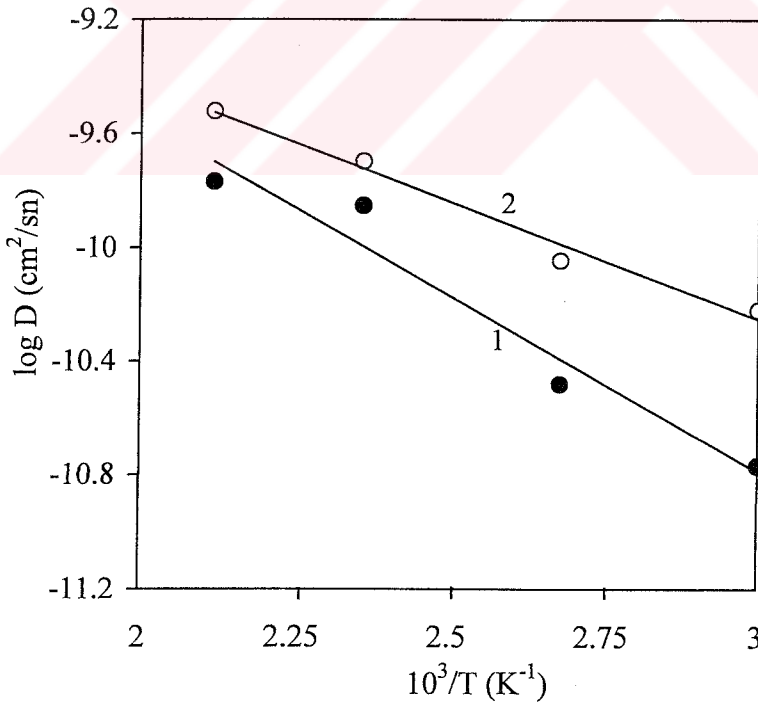
$$D_t = 7.3 \times 10^{-7} \exp(-0.33/kT) \quad (4.3)$$

$$D_f = 4.7 \times 10^{-8} \exp(-0.20/kT) \quad (4.4)$$

(4.3) ve (4.4) denklemlerinden görüldüğü gibi termal difüzyon için aktivasyon enerjisi (0.33 eV) fotodifüzyon aktivasyon enerjisinden (0.20 eV) daha büyüktür. Düşük aktivasyon enerjisinin nedeni buradaki bakırın difüzyonu tercihen tanecik sınırları içine ve aynı zamanda taneciklerin içine difüzyonu ile olabilir. Polikristal CdTe'de tane sınırlarıyla difüzyona uğrayan atomlar en büyük difüzyon katsayısı (D) ve en küçük aktivasyon enerjisi değerlerine sahiptirler. Aydınlatma altında bakır difüzyonunun daha hızlı olması, bakırın ışıkla uyarılmış iyonlaşmasına bağlanabilir. İyonlaşmış küçük yarıçaplı bakır, daha kolay arayerlere hareketlenmektedir. Bu da arayer bakır akışının artmasına sebep olabilir. Bu çalışmada Cu'nun CdTe'deki termal difüzyonu için bulunan aktivasyon enerjisi (0.33 eV), literatürde verilen aktivasyon enerjisi değerine (0.24 eV) yakındır.



Şekil 4.8 p-CdTe(Cu) filmin direncinin (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta tavlama süresiyle değişimi ($T=100^{\circ}\text{C}$).



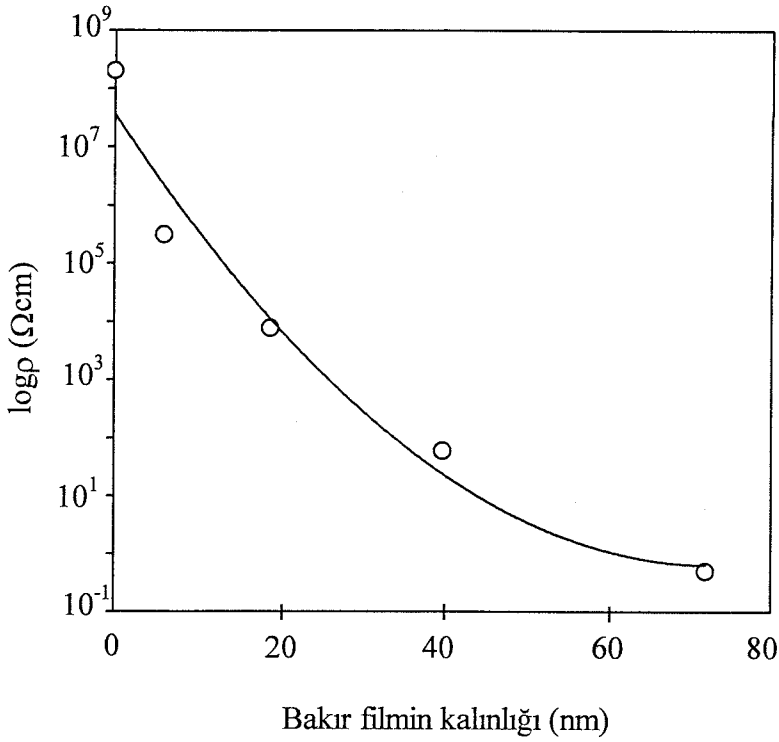
Şekil 4.9 p-CdTe filmde, bakırın (1) termal difüzyon ve (2) fotodifüzyon katsayısının sıcaklıkla bağımlılığı.

4.5 Difüzyon Yöntemiyle Elde Edilen Düşük Dirençli CdTe(Cu) Filmlerin Özellikleri

Cu difüzyonundan önce n-CdTe filmin öz direnci $\rho_0=0.8-20 \times 10^7 \Omega \text{ cm}$ olarak belirlendi. CdTe filmin yüzeyine kaplanmış farklı kalınlıklarda bakır filmlerin $T=400^\circ\text{C}$ 'de $t=30$ dakika tavlama süresinde, termal difüzyonu neticesinde p-tipi CdTe'ün öz direnç değişimi tablo 4.5.1'de ve şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10'dan görüldüğü gibi CdTe'de Cu film kalınlığı arttıkça, artan Cu konsantrasyonu p-CdTe filmde çoğunluk yük taşıyıcıları olan deliklerin konsantrasyonu artmakta ve CdTe filmin öz direnci 10^9 kat düşmektedir.

Tablo 4.5.1 CdTe'de farklı kalınlıklarda bakır difüzyonuyla CdTe(Cu) filmlerin öz direnç değerleri.

Cu filmin kalınlığı (nm)	Öz direnç ($\Omega \text{ cm}$)
Cu'suz	2×10^8
6	3×10^5
19	7.7×10^3
40	6×10^{-1}
72	5×10^{-1}



Şekil 4.10 p-CdTe(Cu) örneklerin öz direncinin bakır film kalınlığına bağlı değişimi.

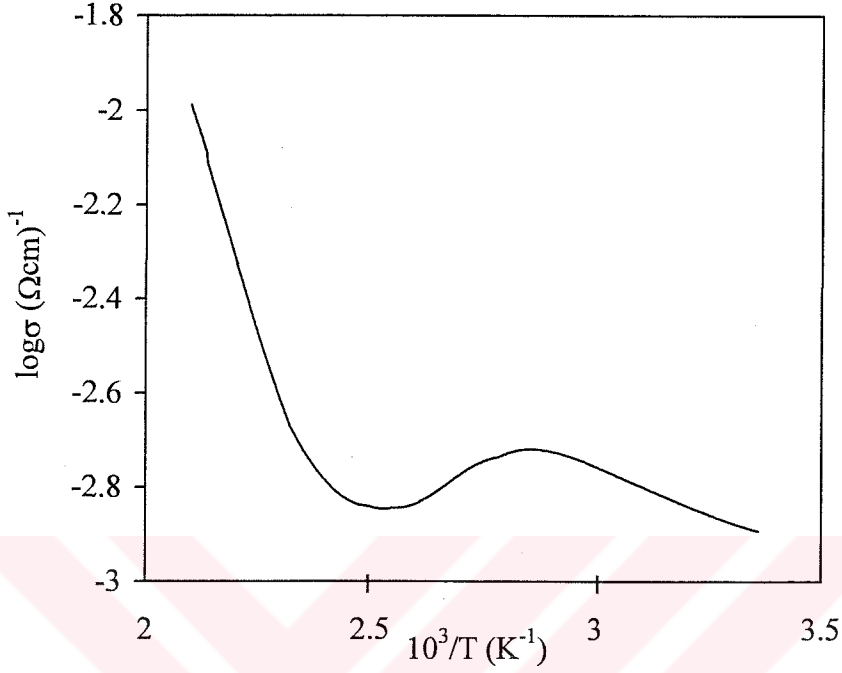
4.6 Bakırla Katkılı CdTe Filmlerin İletkenliğinin Sıcaklıkla Değişimi

Bakırın p-tipi CdTe filmin yasak bandında oluşturduğu enerji düzeylerini bulmak için 300-470K sıcaklık aralığında iletkenliğinin sıcaklıkla değişim ölçümleri yapıldı*. Optik geçirgenlik spektrumu 2.5 μm -25 μm aralığında "Mattson 1000" Fourier Transform Infrared (FTIR) spektrometre kullanılarak belirlendi.

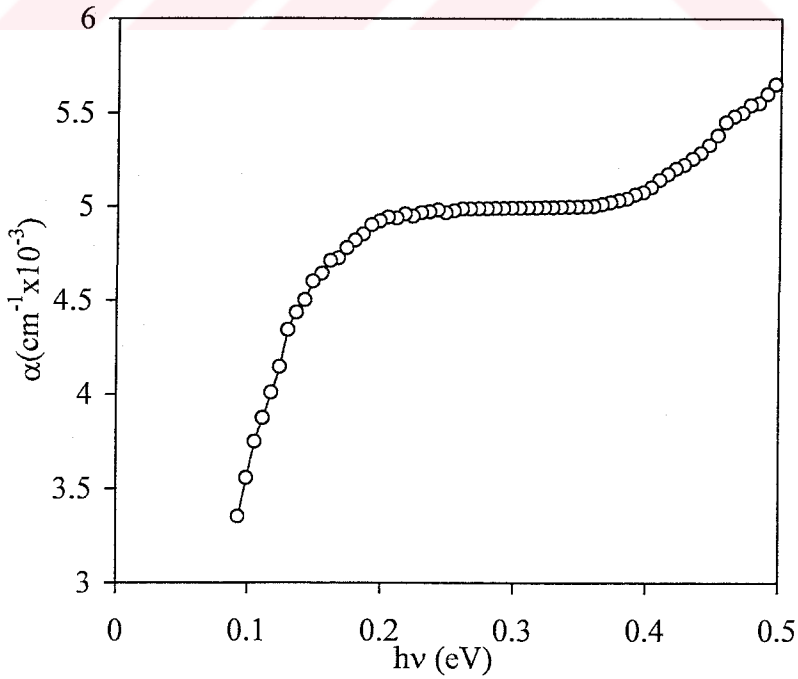
Bakırla katkılanmış örnekler, bakırın n-CdTe filmlerine vakumda termal difüzyonu ile yapıldı ($T=400^\circ\text{C}$, $t=30$ dak, $d_{\text{Cu}}=50$ nm). Bakır difüzyonu neticesinde p-tipi CdTe filmler elde edildi. Şekil 4.11 400°C'de bakırla katkılanmış ($d_{\text{Cu}}=50$ nm) p-tipi CdTe(Cu) filmin iletkenlik-sıcaklık bağımlılığını gösterir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, iletkenlik-sıcaklık ($\log \sigma - 10^3/T$) grafiği iki eğimle karakterize olmaktadır. Düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık bölgelerinden, denklem 3.9 ve 3.10 kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjileri 0.12 ve 1.49 eV olarak hesaplandı. 0.12 eV'luk enerji düzeyi, bakır ya da bakır kompleksleriyle yasak bantta oluşmuş akseptör düzeyi ile bağlı olabilir. Yüksek enerjili aktivasyon enerjisi $E_g=1.49$ eV, CdTe filmin yasak bant aralığını karakterize etmektedir. Belirtmek gerekir ki, aynı koşullarda (400°C)

* $\sigma - T$ ölçümleri deney düzeneği Arş.Gör. M.Çalışkan tarafından hazırlandı.

tavlanmış bakırsız CdTe ince filmin sıcaklığa bağlı iletkenlik eğrisinde sadece $E_g = 1.50$ eV'luk eğri gösterdi. Şekil 4.12 400°C'de bakırla katkılı CdTe(Cu) filmin soğurma spektrumunu gösterir. Soğurma kenarı (yaklaşık 0.10 eV) şekil 4.11'de $\log \sigma - 10^3/T$ eğrisinde belirlenen akseptör enerji seviyesiyle uyumlu (0.12 eV) olduğu gözlemlendi.



Şekil 4.11 p-tipi CdTe(Cu) filmin iletkenliğinin sıcaklığa bağlılığı.

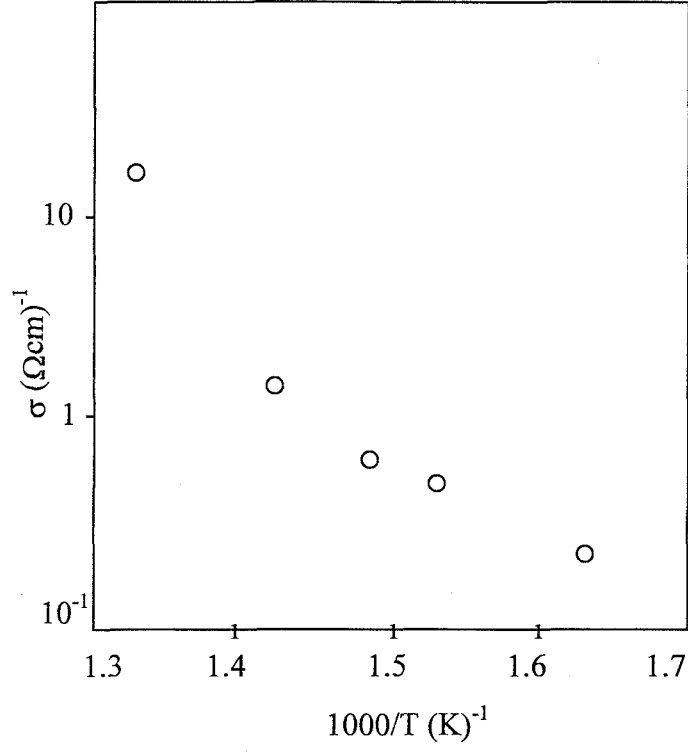


Şekil 4.12 CdTe(Cu) filmin optik soğurma spektrumu.

Bakır difüzyon sıcaklığının CdTe filmin öz direncine etkisini incelemek için farklı sıcaklıklarda (340, 380, 400, 430, 480°C) bakırla katkılanmış filmlerin öz direnci ölçüldü. Bunun için örneklerin üzerine aynı kalınlıklarda ($d_{Cu}=55$ nm) bakır filmi kaplandı ve tavlama 30 dakikalık sürelerle vakumda yapıldı. Tablo 4.6.1 ve Şekil 4.13'den görüldüğü gibi difüzyon sıcaklığı arttıkça iletkenlik artmaktadır.

Tablo 4.6.1 Bakırla katkılanmış p-tipi CdTe(Cu) filmlerinin iletkenliğinin difüzyon sıcaklığıyla bağlantısı.

Tavlama sıcaklığı (°C)	Tavlama sıcaklığı (K)	Özdirenç (Ωcm)	İletkenlik (Ωcm) ⁻¹
340	613	4.38	0.23
380	653	2	0.5
400	673	1.54	0.65
430	703	0.68	1.47
480	753	0.065	15.4



Şekil 4.13 CdTe(Cu) filmlerinin iletkenliğinin difüzyon sıcaklığıyla değişimi.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

CdTe filmler cam altlıkların üzerine Yakın Mesafeli Süblimasyon Yöntemiyle (CSS) kaplandı. CdTe(Cu) filmler, oda sıcaklığında CdTe yüzeyine Cu filmlerin elektron demetiyle buharlaştırılmasının ve ardından vakumda termal veya fotodifüzyonuyla üretildi.

CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin optik soğurma spektrumu incelendi. CdTe filmlerin optik soğurma katsayısının foton enerjisine bağlı grafiğinin analizi direkt bantlı yarıiletkenler için beklenen davranışı gösterdi ve CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin yasak enerji aralığı $E_g=1.45\pm0.05$ eV olarak belirlendi. Ayrıca bakırla katkılanmış filmde ölçülen 0.12 eV'luk enerji düzeyi, bakır veya bakırın kompleksleri ile oluşmuş akseptör enerji düzeyi olarak yorumlandı.

CdTe ve CdTe(Cu) örneklerin fotoiletkenlik spektrumları $\lambda=300-1000$ nm dalga boyu aralığında oda sıcaklığında incelendi. p-CdTe(Cu) filmin fotoiletkenliğinin p-CdTe örneklerin fotoiletkenliğinden daha büyük olduğu gözlemlendi. Bu olay akseptör tipi bakır katkısının fotoiyonlaşması ile yorumlandı.

n-tipi CdTe ve n-CdTe(Cu) filmlerin 150°C'de karanlıkta seri termal tavlamlarından önce ve sonra optik geçirgenlik spektrumları ölçüldü. Optik geçirgenliğin tavlama süresiyle artması bakırın CdTe filmin içine difüzyonu ile bağlantılı olduğu tespit edildi. 60-200°C aralığında bakırın p-CdTe filmlerinde termal difüzyonu ve fotodifüzyonu incelendi. p-CdTe/Cu örnekler sabit sıcaklıklarda termal ve fototavlama maruz bırakıldı ve tavlama süresine bağlı direnç değişimleri ölçüldü. Fototavlama deneylerindeki CdTe(Cu) filmlerinin direncinin azalma hızı, termal tavlama direncin azalma hızından daha büyük olduğu gözlemlendi. Bu olay, bakır difüzyonunun CdTe filmlerin direncine etkisiyle yorumlandı.

Bu deneylerden bakırın p-tipi CdTe'de 60-200°C aralığında, Cu'nun termal difüzyon ve fotodifüzyon katsayıları,

$$D_t=7.3\times10^{-7}\exp(-0.33/kT) \quad (5.1)$$

$$D_f=4.7\times10^{-8}\exp(-0.20/kT) \quad (5.2)$$

olarak hesaplandı.

Bakırın fotodifüzyon katsayısının (D_f), termal difüzyon katsayısından (D_t) yaklaşık olarak 2-4 kez daha büyük olması, bakır atomlarının ışığın etkisi ile iyonlaşması ile yorumlanabilir. Çünkü iyonlaşmış küçük yarıçaplı bakır daha kolay arayer pozisyonlara hareketlenmektedir.

X-ışınları kırınım metodu ile CdTe ve CdTe(Cu) filmlerin kristal yapısı incelendi. CdTe filmlerin tek keskin pik (111) verdiği gözlemlendi. 400°C’de 30 dakika tavlanmış Cu katkılı CdTe(Cu) film için de tek pik (111) gözlemlendi, ama bu pikin (111) şiddeti yaklaşık olarak temiz CdTe’inkinden 1.4 kez daha küçüktür. Kübik CdTe’ün örgü parametresi $a=6.406 \text{ \AA}$ ve bakırla katkılanmış CdTe(Cu) filmin örgü parametresi $a=6.464 \text{ \AA}$ olarak belirlendi. Cu katkılı CdTe’de örgü sabitinin büyük olmasının sebebi, bakırla veya bakır kompleksi ile uyarılmış kristal örgüsünün genişlemesi ile yorumlanmaktadır.

p-tipi CdTe ince filmlere (400°C’de) Cu difüzyonu öz direncin keskin azalmasına neden oldu. Bununla beraber, CdTe yüzeyi üzerinde Cu film kalınlığının artmasıyla (6 nm’den 72 nm’ye) Cu’la katkılı p-tipi CdTe filmin öz direncinin azalması (yaklaşık olarak 10^9 kat) gözlemlendi. Difüzyon yöntemi ile (400°C, 30 dak, $d_{Cu}=72 \text{ nm}$) bakırla katkılanmış p-CdTe(Cu) filmin elektrik parametreleri $\rho=0.5 \Omega \text{ cm}$, $p=3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $\mu=39 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ olarak ölçüldü.

Bakırla katkılı p-tipi CdTe(Cu) filmin iletkenlik-sıcaklık ölçümlerinden iki aktivasyon enerjisi 1.49 eV ve 0.12 eV bulundu. Bunlardan 1.49 eV’luk enerji CdTe’ün yasak bant genişliğini ve 0.12 eV’luk enerji bakırla ilgili $E_v+0.12 \text{ eV}$ enerji düzeyinden meydana gelmektedir. Aynı sonuçlar bakırla katkılanmış CdTe filmin optik geçirgenlik spektrumlarından belirlendi.

KAYNAKLAR

- Abdullaev, G. B., Dzhafarov, T. D., (1987), "Atomic Diffusion in Semiconductor Structures", Harwood Academic, New York.
- Abou-Elfotouh, F. A., Moutinho, H. R., Bakry, A. M., T. J. Coutts, and L.L. Kazmerski, (1991), *Solar Energy Mater. Sol. Cells* 30, 151.
- Aramato, T., Kumazawa S., Higuchi, H., Arita, T., Shibutani, S., Nishio, T., Nakajima J., Tsuji M., Hanafusa A., Hibino, T., Omura, K., Ohyama H., Muranzo, M., (1997), *Jpn. J. Appl. Phys.* 36, 6304.
- Bartzner, D. L., Romeo, A., Zogg, H., Wendt, R., Tiwari, A. N., (2001), "The CdTe thin film solar cell improved back contact", *Thin Solid Films*, 387, 151.
- Bartzner, D. L., Romeo, A., Zogg, H., Wendt, R., Tiwari, A. N., (2000), "A Study of the back contacts on CdTe /CdS solar cells", *Thin Solid Films*, 361, 463.
- Berding, M. A., (1999), *Appl. Phys. Lett.* 74, 552.
- Birkmire, R., Hegedus, S., B. Mc. Candless., (1998), Final Technical Report. Subcontract No. XAK-7-17609-01. NREL, Golden, CO.
- Brillson (Ed) , L. J., (1993) *Contacts to semiconductors: Fundamentals and technology*, Noyes Publication, New Jersey.
- Bube, R. H., (1998), *Photovoltaic Materials*, Imperial College Press, London.
- Caferov, T. D., (1998), *Yarıiletken Fiziği-1*, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- Caferov, T. D., (2000), *Katıhal Elektroniği*, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- Castaldini, A.,Cavalini, A.,Faaboni, B., (1998), "Deep energy levels in CdTe and CdZnTe", *J. Apply Phys.* 83,2121.
- Chopra, K. L. and Das, S. R., (1983), *Thin Film Solar Cells*, Plenum Press, New York.
- Chou, H.C., Rohatgi, A., Thomas, E. W., Kamra, S., Bhat, A. K., (1995), *J. Electrochem. Soc.* 142, 254.
- Chou, H. C., Rohatgi, A., Jokerts, N.M., Thomas E. W.,Kamra, S., (1996), *J. Electron. Mater.* 25, 1093.
- Dobson, K. D., Visoly-Fisher, I., Hodes, G., Cahen, D., (2000), "Stability of CdTe/CdS thin-film solar cells", *Solar Energy Mater. Solar Cells* 62, 295.
- Dzhafarov, T. D., Yeşilkaya, S. S., Yılmaz Canlı, N., Çalışkan, M., (2004), "Diffusion and influence of Cu on properties of CdTe thin films and CdTe/CdS cells", *Solar Energy Mater. Solar Cells* (Baskıda).

- Dzhafarov, T. D., Serin, M., Oren, D., Sungu, B., Sadigov M. S., (1999), J. Phys. D:Appl. Phys. 32, L5.
- Dzhafarov, T. D., Altunbas M., Kopya, A. I., Novruzov, V., Bacaksız, E., (1999), J. Phys. D: Appl. Phys. 32, L1.
- Dzhafarov, T. D., Comert, H., Altunbas, M., Alver, U., Küçükömeroğlu T., Kopya, A. I., (1995), J. Alloys and Compounds 221, 264.
- Dzhafarov, T. D., (1984), Photostimulated Atomic Processes in Semiconductors, Energoatomizdat, Moscow.
- Fahrenbruch, A. L., (1987), Solar Cells 399.
- Feng, Z. C., Chou, H. C., Rohatki, A., Lim G. K., A. T. S. Wee, Kan K. L., (1996), J. Appl. Phys. 79, 2151.
- Gessert, T. A., (1996), PhD Thesis NREL, Golden, Co.
- Grecu, D., Compaan, A. D., Jayamaha, V. D., Rose, H. J., (2000), "Photoluminescence of Cu-doped CdTe and related stability issues in CdS/CdTe solar cells", App. Phys. 88, 2490.
- Kuribayashi K., Matsumoto H., Uda H., Komatsu Y., Nakano A., Ikegami S., (1983), Jpn. J. Appl. Phys. 22, 1828.
- Grecu, D., Compaan, A. D., (1999), "Photoluminescence study of Cu diffusion and electromigration in CdTe", Appl. Phys. Lett. 75, 361.
- Herndon, M.K, Gupta, A.,Kaynadov (1999), App. Pys. Letter 3503.
- Janic, E., Triboulet, J., (1983), Phys. D:Appl. Phys. 16, 2333.
- Jones, E. D., Stewart, N. M., Mullin, J. B., (1992), J. Crystal Growth 117, 244.
- Krause-Rberg R., Leipner, H.S., Abgarjan, T., A. Polity, (1998), Appl. Phys. A. 66, 599.
- Laurenti, J. P. Bastite, G. Rouzeyke, M. and Triboulet, R., (1988), Solid State Commun. 67, 1127.
- Lyubomirsky, I., Cahen, D., (1999), Electrochem. Solid State Lett. 2, 154.
- Lyubomirsky, I., Gartsman, K.,Cahen, D., (1998), J. Appl. Phys. 83, 4678.
- Lyubomirsky, I., Rabinal, M. K., Cahen, D., (1997), J. Appl. Phys. 81, 6684.
- Monemar, B., Molva E. and Le Si Dang., (1986), Phys. Rev. B 33 1134.
- Neumark, G. F., (1997), Mater . Sci. Eng. Rep. R21, 1.

Narayanswamy, C., M. Sc Thesis, University of Toledo, (1999).

Price, K.J., Grecu, D., Shvydka, D., Compaan, A.D., (2000), "Photoluminescence of CdTe : Cu and CdS/Cu", 28th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 658.

Romero, M. J., Metzger, W., Gessert, T.A., Albin, D.S., (2003), "Spatially Resolved Cathodoluminescence of the CdTe Thin Films and solar Cells". NREL.

Sze, S.M., (1981), Physics of Semiconductor Devices, John Wiley and Sons, Newyork.

Swank, R. W., (1967), " Surface properties of II-VI compounds" Phys. Rev: 844.

Soo, Y. L., Huang S., Kim, S., Kioseoglou, G., Kao, Y. H. Compaan A. D., Grecu, D., Albin, D., (2000), "Effects of heat treatment on diffusion of Cu atoms into CdTe single crystals", Appl. Phys. Lett. 76, 3729.

Uda, H., Ikegami, S., Sonamura, H., (1998), Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 50, 141.

Wartlick, B. O., Blanchard, C., Barbot, J. F., (2000), "Study of silver and copper diffusion in p-type $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ and CdTe by capacitance measurements". Mater. Sci. Eng. B71 254.

Woodbury, H. H., Aven, M., (1968) J. Appl. Phys. 39, 5485.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 27.03.1979

Doğum yeri Trabzon

Lise 1993-1997 Mehmet Çelikel Anadolu Lisesi

Lisans 1997-2001 Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

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

Çalıştığı kurumlar

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

