

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

CdS İNCE FİLMLERİNİN FARKLI YÖNTEMLERLE BÜYÜTÜLMESİ, YAPISAL,
ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

727533

Emin BACAŞIZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktora”
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07.11.2002
Tezin Savunma Tarihi : 20.12.2002

727533

TEZ YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Vagif NOVRUZOV
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mustafa ALTUNBAŞ
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ekrem YANMAZ
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Çetin ARIKAN

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

Trabzon 2002

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, farklı yöntemlerle üretilen CdS ince filmlerin yapısal, elektriksel ve optiksel özellikleri incelenerek CdS/CdTe güneş pillerinin üretimi için optimum şartlar belirlendi. Optimum şartlarda elde edilen CdS ince filmler üzerine CdTe polikristal malzemesi buharlaştırılarak CdS/CdTe güneş pilleri elde edildi ve bu güneş pillerinin karakteristik özellikleri incelendi. Deneysel çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği ve X-Işınları Floresans Laboratuvarlarında yapıldı.

Başta, beni tavsiyeleriyle bu konuya yönlendiren ve bana her türlü konuda tartışma fırsatı veren hocam Doç. Dr. Vagif Vovruzov'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tezimin hazırlanmasında yardımcı olan, tavsiyeleri ve yapıcı eleştiri yapan sayın hocalarım Prof. Dr. Mustafa Altunbaş ve Prof. Dr. Tayyar Caferov'a, çalışmalarım boyunca her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sayın hocalarım Prof. Dr. Ali İhsan Kobya ve Prof. Dr. Ekrem Yanmaz'a teşekkür ederim. Ayrıca tezimin yazılması ve düzenlenmesinde yardımını gördüğüm Doç. Dr. Uğur Çevik'e, SEM mikrograflarını çeken Doç. Dr. Saffet Nezir'e ve Fizik Bölümü'nün tüm elamanlarına teşekkür ederim.

Trabzon-2002

Emin Bacaksız

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XI
1.GENEL BİLGİLER.....	1
1.1.Giriş.....	1
1.2 Literatür Araştırması.....	4
1.2.1. Işınlamanın CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi ile İlgili Literatür Çalışması.....	4
1.2.2. İndiyum katkısının CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi ile İlgili Literatür Çalışması.....	4
1.2.3. p-tipi CdS filmlerinin ve p-n Eklemlerinin Hazırlanması ve İncelenmesi ile İlgili Literatür Çalışması.....	6
1.3. CdS İkili Bileşiğin Kristal Yapısı ve X-ışınları Kırınım Desenleri.....	6
1.4. CdS'nin Optik Özellikleri ve Yasak Enerji Aralığı.....	10
1.4.1. Doğrudan ve Dolaylı Band geçişleri.....	11
1.5. Epitaksiyel Katman Büyütme.....	14
1.6.CdS İnce Film Elde Etme Yöntemleri.....	15
1.6.1. Fiziksel Buharda Çökeltme Yöntemi.....	15
1.6.2. Kapalı Hacimde Çökeltme (Close-Space Sublimation) Yöntemi.....	16
1.6.3. Kimyasal Buharda Çökeltme Yöntemi.....	17
1.6.4. Çözeltide Büyütme Yöntemi.....	17
1.6.5. Kimyasal Püskürtme Yöntemi.....	18
1.6.6. Lazerle Buharlaştırma Yöntemi.....	19
1.7. Yarıiletkenlerde Difüzyon.....	20
1.7.1. Difüzyon Kuralları.....	21

1.7.2. Difüzyon Mekanizmaları.....	23
1.7.3. Heteroeklemlerde Difüzyon.....	24
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	25
2.1 Giriş.....	25
2.2. CdS İnce Filmlerin Elde Edilmesi.....	25
2.2.1. Kısmen Kapalı Hacimde Vakumda Buharlaştırma Yöntemiyle CdS İnce Filmlerin Elde Edilmesi.....	25
2.2.2. Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle CdS ve $Cd_{1-x}In_xS$ ($0 \leq x \leq 0,20$) İnce Filmlerin Elde Edilmesi.....	27
2.2.3. Cu-nCdS İkili Yapıların Elde Edilmesi.....	28
2.3. CdS/CdTe Güneş Pillerinin Elde Edilmesi.....	28
2.4. X-Işını Kırınım Analizi.....	29
2.5. Optik Özelliklerinin Ölçülmesi.....	30
2.6. Elektriksel Özdirenç ve Hall katsayısı Ölçümleri.....	32
2.7. Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	36
2.8. X-Işınları Floresans Analizi.....	38
2.9. Taramalı Elektron Mikroskobu Ölçümleri.....	40
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	42
3.1. Işınlanmanın CdS İnce Filmlerine ve CdS/CdTe Güneş Pillerine Etkisi.....	41
3.2. İndiyum Katkısının CdS İnce Filmlere ve CdS/CdTe Güneş Pillerine Etkisi.....	49
3.3. p-tipi CdS filmlerinin ve p-n Eklemlerinin İncelenmesi.....	61
4. SONUÇLAR.....	66
5. ÖNERİLER.....	68
6. KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	76

ÖZET

Bu çalışmada, farklı iki metot ile üretilen CdS ince filmlerin CdS/CdTe güneş pillerine etkisi araştırıldı. İlk olarak, CdS ince filmlerin sanki-kapalı “quasi-closed” hacimde çökeltirme sırasında beyaz ışıkla ışınlamanın, yapısal, fotoelektriksel ve optik özelliklerine etkileri araştırıldı. Elde edilen filmler, *c*-ekseni yönünde tercihli bir yönelmeye sahip olup, ışınlamanın şiddeti arttıkça (002) yansımasına ait pikin şiddeti de artmaktadır. CdS ince filmlerinin oda sıcaklığı öz direnç değerleri 10^7 - $10^4 \Omega \text{cm}$ aralığında bulundu. Temel soğurma bölgesindeki fotosensitivite ve geçirgenlik bölgesindeki geçirgenlik özelliği, ışınlama şiddeti arttıkça önemli ölçüde arttı. Pencere malzemesi olarak (1) karanlıkta, (2) 150 mW/cm^2 şiddetinde ışınlama yaparak üretilen CdS filmlerinin kullanıldığı CdS/CdTe güneş pillerinin, 100 mW/cm^2 değerindeki bir ışınlama altında, sırasıyla % 1,8 ve % 7,3 verimlerine sahip oldukları bulundu.

Bu çalışmada ayrıca, kimyasal püskürtme yöntemi ile üretilen CdS ince filmlerine In katkısının yapısal, elektriksel ve optik özelliklerine etkileri araştırıldı. In konsantrasyonunun artması ile CdS ince filmlerinin tercihli yöneliminin (002) düzlemlerinden (101) düzlemlerine kaydığı görüldü. In konsantrasyonunun artması ile öz direnç değerleri bir minimum değere kadar azaldı ve sonra tekrar arttı. Ayrıca, geçirgenlik spektrumunun kenarında küçük dalga boylarına doğru kaymalar gözlemlendi. Pencere malzemesi olarak (1) saf, (2) In katkı ($x=0,05$) yapılarak üretilen CdS filmlerinin kullanıldığını CdS/CdTe güneş pillerinin, 100 mW/cm^2 değerindeki bir ışınlama altında, sırasıyla % 3,5 ve % 6,4 verimlerine sahip oldukları bulundu.

Son olarak, oda sıcaklığında Cu-nCdS ikili yapılarının He-Ne lazer ışınlamıyla uyarılarak p-tipi CdS ince filmlerinin yeni bir oluşum tekniği incelendi. Lazer ışınlama süresine bağlı olarak, CdS filmlerinde bir p-n eklemine elde edilmesi veya filmlerin tümüyle p-tipine dönüşmesi; I-V karakteristikleri, fotovoltaj, sıcak uç ve Hall olayı ölçümlerinden faydalanarak belirlendi.

Anahtar Kelimeler: CdS/CdTe, p-n Eklem, Kısa Devre Akımı, Açık Devre Gerilimi

SUMMARY

The Production of CdS Thin Films and The Investigation of Their Structural, Electrical and Optical Properties

In this study, the effects of CdS thin films produced by two techniques on the CdS/CdTe solar cells have been investigated. CdS thin films were prepared by a quasi-closed volume and chemical spray pyrolysis methods.

First, the effects of white light illumination during the deposition of CdS thin films in a quasi-closed volume, on the structural, photoelectrical and optical properties were investigated. The films were highly *c*-axis oriented with an increasing intensity of (002) reflection as the illumination increases. The room temperature resistivity values of the CdS films decreased in the range of 10^7 - $10^4 \Omega \times \text{cm}$. The photosensitivity in the fundamental absorption region and the transparency in the transmission region considerably increased as the illumination increased. Under 100 mW/cm^2 insulation, the efficiencies of the CdS/CdTe solar cells based on window materials which were deposited: (1) dark; (2) under an illumination of 150 mW/cm^2 ; were found to be 1.8 % and 7.3 %, respectively.

In addition, we report the structural, electrical and optical properties of CdS thin films produced by spray pyrolysis as a function of In concentration. As the In concentration increased the preferred orientation of the films changed from the (002) plane to the (101) plane. The resistivity decreased with increasing In concentration, reached a minimum, and then increased with further increased in In concentration. In the transmittance spectra of CdS thin films shifts were observed towards lower wavelengths as the In concentration increased. Under 100 mW/cm^2 insulation, the efficiencies of the CdS/CdTe solar cells based on window materials which were deposited: (1) undoped; (2) In doped ($x=0,05$); were found to be 3.5% and 6.4 %, respectively

Finally, a new fabrication technique of p-type CdS thin films by He-Ne laser illumination of bilayer Cu-nCdS structures at room temperature was investigated. The formation of a p-n homojunction in CdS films or conversion of the film all over to the p-type, depending on the duration of laser illumination, was shown by I-V characteristics, the photovoltaic, the hot probe and Hall effects measurements.

Key Words: CdS/CdTe, p-n Junction, Short-Circuit Current, Open Circuit Voltage

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa no</u>
Şekil 1. Güneş'in aydınlatmasıyla ilgili dört spektrum.....	3
Şekil 2. Kübik yapının kristal yapısı.....	8
Şekil 3. Hekzagonal yapının kristal yapısı.....	8
Şekil 4. CdS polikristal tozunun x-ışınları kırınım deseni.....	9
Şekil 5. Yarıiletkenlerde (a) Doğrudan, (b) Dolaylı band geçişlerinin şematik gösterimi.....	12
Şekil 6. CdS ince filminin $\alpha^2 \sim h\nu$ değişimi.....	13
Şekil 7. Vakumda buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi.....	16
Şekil 8. Kapalı Hacimde Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi.....	17
Şekil 9. Kimyasal püskürtme yöntemin şematik gösterimi.....	19
Şekil 10. Lazerle Buharlaştırma Ünitesi.....	20
Şekil 11. Arayer mekanizmasıyla, arayer atom difüzyonunun yüzey merkezli kübik örgüde (100) düzleminde gösterimi.....	23
Şekil 12. Sıkı paket küreler düzlemi.....	24
Şekil 13. Kısmen kapalı hacimde buharlaştırma sisteminin şematik görünümü.....	26
Şekil 14. Varian NRC 840 Vakum Sistemi.....	27
Şekil 15. Rigaku D/Max-IIIc marka x-ışını difraktometresi.....	30
Şekil 16. (a) Fotoiletkenlik ölçmek için kullanılan düzenek (b) Fant yardımıyla modüle edilmiş ışık.....	32

Şekil 17. Van Der Pauw yöntemiyle öz direnç ölçümünde kontakların yerleştirilmesi.....	34
Şekil 18. Hall olayının geometrisi	35
Şekil 19. Aydınlanma altında bir güneş pilinin akım-voltaj karakteristiği.....	37
Şekil 20. CdS-CdTe güneş pilinin şematik gösterimi.....	37
Şekil 21. Akım-gerilim karakteristiği ölçü devresi.....	38
Şekil 22. X-ışınları floresans analiz sisteminin geometrisi.....	39
Şekil 23. X-ışınları floresans deney sisteminin blok diyagramı.....	40
Şekil 24. JOEL JSM-5610 Model Taramalı Elektron Mikroskobu.....	41
Şekil 25. CdS ince filmlerin x-ışınları kırınım desenleri, (1) karanlık, (2) 50 mW/cm ² , (3) 100 mW/cm ² ve (4) 150 mW/cm ²	43
Şekil 26. Işınlama şiddetinin fonksiyonu olarak CdS ince filmlerin öz direncinin değişim grafiği.....	44
Şekil 27. Işık şiddeti ile <i>c</i> örgü parametresi değişimi.....	45
Şekil 28. (1) karanlık, (2) 50 mW/cm ² , (3) 100 mW/cm ² ve (4) 150 mW/cm ² 'lik ışık şiddetinde büyütülen CdS ince filmlerin fotoiletkenlik spektrumu.....	46
Şekil 29. (1) karanlık, (2) 50 mW/cm ² , (3) 100 mW/cm ² ve (4) 150 mW/cm ² 'lik ışık şiddetinde büyütülen CdS ince filmlerin geçirgenlik spektrumu.....	46
Şekil 30. CdTe ince filmin x-ışınları kırınım deseni.....	47
Şekil 31. CdS/CdTe güneş pillerinin 100 mW/cm ² ışık kaynağı altında ölçülen akım yoğunluğu-voltaj eğrileri; (1) Karanlık, (2) 150 mW/cm ² ışınlama şiddetinde elde edilen CdS ince filmler için.....	48
Şekil 32. Cam altlık üzerinde büyütülen CdS ince filminin x-ışınları kırınım deseni.....	49
Şekil 33. Cam/SnO ₂ altlık üzerinde büyütülen CdS ince filminin x-ışınları kırınım deseni.....	50

Şekil 34. Cam/SnO ₂ altlık üzerinde büyütülen Cd _{1-x} In _x S (0≤x≤0,15) ince filmlerin x-ışınları kırınım deseni 1) % 0; 2) % 0,05; 3) % 0,10; 4) % 0,15.....	52
Şekil 35. Cd _{1-x} In _x S (0≤x≤0,15) ince filmlerin x-ışınları kırınım deseni 1) % 0; 2) % 0,05; 3) % 0,10; 4) % 0,15.....	53
Şekil 36. Cd _{1-x} In _x S (0≤x≤0,15) ince filmlerin In konsantrasyonu-öz direnç değişimi.....	54
Şekil 37. Cd _{1-x} In _x S (0≤x≤0,15) ince filmlerin taramalı elektron mikroskobu mikrografları 1) % 0; 2) % 0,05; 3) % 0,10; 4) % 0,15 ; 5) % 0,20.....	56
Şekil 38. Cd _{1-x} In _x S ince filmlerin fotoiletkenlik spektrumu, 1) saf CdS ve 2) x = 0,05 In	57
Şekil 39. Cam altlık üzerinde büyütülen Cd _{1-x} In _x S (0≤x≤0,15) ince filmlerin optik geçirme spektrumları 1) % 0, 2) % 0,05, 3) % 0,10, 4) % 0,15.....	59
Şekil 40. CdS/CdTe güneş pillerinin 100 mW/cm ² ışık kaynağı altında ölçülen akım yoğunluğu- voltaj eğrileri; (1) Saf, (2) In katkı (x=0,05) yapılan CdS ince film.....	60
Şekil 41. CdS ince filminin XRD deseni.....	61
Şekil 42. n-tipi CdS'in optik geçirme spektrumu.....	62
Şekil 43. Aydınlanmış Cu-CdS yapısında (T = 25°C, t = 10 dakika), CdS filmindeki Cu atomlarının konsantrasyon dağılımı.....	63
Şekil 44. İki dakika süreyle aydınlatılan Cu-CdS yapısında, (1) Karanlık, (2) Aydınlık, I-V karakteristikleri.....	64
Şekil 45. On dakika süreyle aydınlatılan Cu-CdS yapısında I-V karakteristiği.....	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1. II-VI. Grup elementlerin valans bandı elektron durumu ve iyonlaşma enerjileri.....	7
Çizelge 2. CdS ince filmlere ait d ve hkl değerleri.....	10
Çizelge 3. Bazı II-VI Grubu yarıiletken bileşiklerin özellikleri.....	15
Çizelge 4. CdS/CdTe güneş pillerinin 100 mW/cm^2 ışık kaynağı altında ölçülen karakteristik parametreleri.....	48
Çizelge 5. $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ($0 \leq x \leq 0,10$) ince filmlerde kübik ve hekzagonal faz oranları.....	51
Çizelge 6. İndiyum konsantrasyona bağlı olarak a ve c parametresinin değişimi.....	53
Çizelge 7. $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ince filmlerin EDX analizleri.....	55
Çizelge 8. CdS/CdTe güneş pillerinin 100 mW/cm^2 ışık kaynağı altında ölçülen akım karakteristik parametreleri.....	60

SEMBOLLER DİZİNİ

D	: Difüzyon katsayısı
E	: Enerji
E_g	: Yasak enerji
E_p	: Fotonun enerjisi
FF	: Doldurma faktörü
h	: Plank sabiti
I_{sc}	: Kısa devre akımı
J	: Akım yoğunluğu
k	: Boltzmann sabiti
$\mathbf{k}$	: Dalga vektörü
n	: Elektronların yoğunluğu
N	: Konsantrasyon
p	: Deliklerin yoğunluğu
P	: Güç
q	: Elektronun yükü
T	: Sıcaklık
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
α	: Soğurma katsayısı
ϵ	: Elektrik alanı
η	: Verim
λ	: Dalga boyu
μ_n	: Elektronların mobilitesi
μ_p	: Deliklerin mobilitesi
ν	: Frekans
ν_{fn}	: Fononun frekansı
ρ	: Özdirenc
σ	: İletkenlik

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yarıiletkenlerin tarihi, Fransız fizikçisi E. Becquerel ve İngiliz kimyacı olan Faraday'a kadar dayanır. 1839 yılında E. Becquerel, aynı elektrolitik çözelti içerisine daldırılmış olan iki elektrottan birinin üzerine foton düşürüldüğünde bu iki elektrot arasında bir potansiyel farkı meydana geldiğini gözledi. Bu foto-voltaik olay, güneş pilleri ile ilgili kapsamlı çalışmaların temelini oluşturdu. Foto-voltaik olay, bir yarıiletken tarafından ışık soğurulduğu zaman meydana gelir. Yarıiletken üzerine düşen fotonlar, enerjilerini yarıiletkenin valans bandındaki elektronlara transfer eder. Böylece yarıiletkenin valans bandındaki elektronlar, kazandıkları enerji ($h\nu \geq E_g$) ile iletkenlik bandına geçerek elektron-delik çifti oluştururlar. Özden (katkısız) yarıiletkenlerde fotonlar ile uyarılmış elektronlar valans bandındaki delikler ile rekombinasyon yaparlar. Bu rekombinasyon neticesinde kayıp olan enerji, ışın (foton) veya ısı (fonon) şeklindedir ve kullanılabilir bir elektriksel enerjiye dönüştürülemez. Foto-uyarılmış taşıyıcıların enerjisi, ancak kullanılabilir enerjiye güneş pili (p-n eklem) vasıtasıyla dönüştürülebilir. Güneş pili, aynı veya farklı iki kimyasal malzemeden oluşan, fakat farklı iletkenlik türüne (p ve n tipi) sahip yarıiletken kontaklardan oluşur. Güneş pili, foto-üretilmiş akımların toplandığı ön ve geri kontak ve foto-üretilmiş taşıyıcıları kontaklara transfer eden bir iç elektrik alanda oluşur (Oral, 1979).

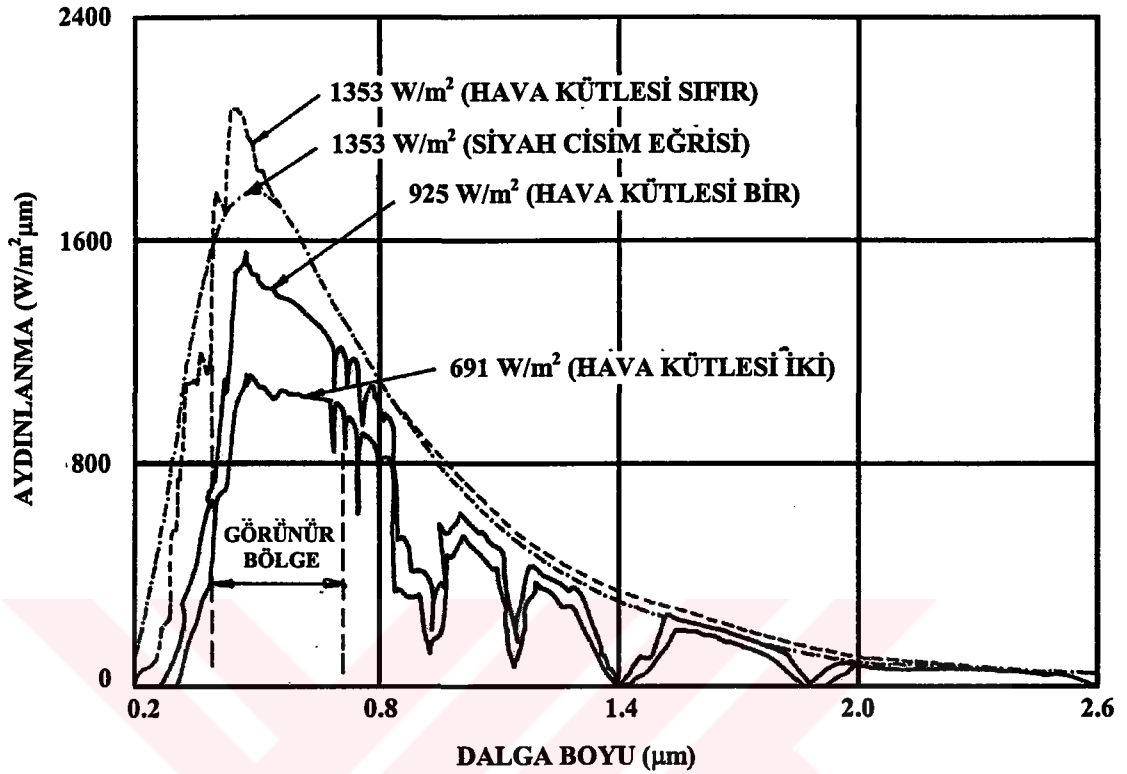
Yeryüzünde kullanılan enerji kaynaklarının (petrol rezervleri) 2020-2060 yılları arasında tükeneyeceği tahmin edilmektedir. Bu yüzden bilim adamları rüzgar enerjisi, nükleer enerji, elektrik enerjisi, güneş enerjisi ve güneş pilleri gibi alternatif enerji kaynakları üzerinde araştırmalar yapmaya yöneldiler. Bu enerji kaynakları arasında güneş pili önemli bir yere sahiptir. Çünkü, güneş pilleri düşük maliyet ile elde edilmesine rağmen sürekli güç sağlar ve bilinen akaryakıtların sebep olduğu hava kirliliğine sahip değildir.

Araştırmacılar günümüzde CdS/CdTe, CdS/InP, CdS/CuIn(Ga)Se₂ ve CdS/Cu_{2-x}S gibi değişik güneş pilleri üzerinde çalışmalar yapmaktadır (Schön vd., 2001; Alamri vd., 2000; Riad vd., 2001; Basol, 1993; Chandrasekhar vd., 1985). İdeal güneş pilinde soğurma

katmanı olarak kullanılan yarıiletken malzemenin enerji aralığının, optimum performans için, 1,4 eV civarında olması istenir. Çünkü, bu yasak enerji aralığına sahip yarıiletken malzemeler minimum kayıp ile güneş ışınlarını maksimum olarak soğurabilmektedirler. Şekil 1’de görüldüğü gibi, CdTe yarıiletkenin yasak enerji aralığı 300 K’de yaklaşık olarak 1,4 eV’dur. Bu yüzden, araştırmacılar 1970’li yılların başlarında beri n-CdS/p-CdTe güneş pilleri üzerinde çalışmalarını sürdürmektedirler. Cam/SnO₂ altlıklar üzerinde CdS/CdTe ince film güneş pili ilk kez Adirovich ve arkadaşları (Adirovich vd., 1969) tarafından yapıldı. CdS/CdTe ince film güneş pillerinde teorik verim değeri yaklaşık % 27 olmasına rağmen (Zweibel, 1995), deneysel çalışmalarda yöntemle bağlı olarak verim % 6-16 aralığında elde edilmektedir (Fraas vd., 1977; Aramoto vd., 1997).

CdS/CdTe ince film güneş pillerinin düşük verimli elde edilmesinin başlıca nedenleri, soğurma katmanı CdTe ve optik pencere katmanı CdS’ün üretilmesi esnasında oluşan doğal kusurlar (boşluklar ve arayer atomları) ve bu kusurların oluşturduğu komplekslerin sebep olduğu elektriksel ve optiksel kayıplardır. Bu kayıplar filmlerin hazırlanma yöntemine, katkı ve ısı işlemlere göre değişmektedir. Elektriksel kayıplara bağlı özellikler seri dirençler, yük taşıyıcıların yaşam süreleri, tane sınırı arasında oluşan kusurların yoğunluğu ve tane sınırlarının potansiyel engel yüksekliği sayılabilir. Eğer fotonlar cam/SnO₂/CdS katmanını geçip p-n eklemine ulaşarak yeterince elektron-delik çifti oluşturamıyorsa, bu bir optiksel kayıp olarak adlandırılır. Maliyeti düşük ve iyi omik kontak verdikleri için tercih edilen cam/SnO₂ altlıklar, gelen fotonların büyük bir kısmını yansıtıyorsa, yani gelen fotonları geçirmeyerek soğurma katmanına (CdTe) geçmesini engelliyorsa önemli bir optiksel kayıba neden olmaktadır.

Araştırmacılar, yüksek verimli CdS/CdTe güneş pilleri elde etmek için, üretim esnasında oluşan elektriksel ve optiksel kayıpları azaltma yöntemleri üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir. CdS/CdTe yapılar üzerine, buharlaştırma veya kimyasal yöntem ile CdCl₂ tuzu çökertilip 400-430°C’de hava ortamında 10-15 dakika tavlayarak elektriksel kayıpları kısmen önlemektedirler. CdCl₂ ortamında tavlanan CdS/CdTe güneş pillerinde, tane büyüklüklerinin arttığı, CdS ve CdTe katmanı arasında örgü uyumsuzluğunun sebep olduğu deformasyonların azaldığı ve açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) gibi elektriksel özelliklerin iyileştiği gözlenmektedir (Moitinho vd., 1998). Optiksel kayıplar ise, CdS optik pencere katmanının kalınlığını azaltarak (20-50 nm) ve cam/SnO₂ altlıklara F (flor) katkısı yapılarak (optik geçirgenliği yüksek) azaltılmaktadır (Tsuji vd., 2000).



Şekil 1. Güneş'in aydınlatmasıyla ilgili dört spektrum

CdS/CdTe güneş pillerinin, CdS optik pencere katmanının minimum elektrik ve optiksel kayıplar için, yüksek optik geçirgenliğe, düşük direnç ve yüksek yapısal yönelmelere sahip olması istenir. İstenilen özellikte CdS ince filmler, Zn ve In gibi değişik katkıları ve N_2 ortamında $400^\circ C$ sıcaklıkta tavlama yapılarak elde edilmektedir (Chu vd., 1995; Ramaiah, 1999).

Bu çalışmada, CdS/CdTe güneş pillerinde, optik pencere katmanı olarak kullanılan CdS ince filmlerin elektrik, fotoelektrik ve optiksel özelliklerini iyileştirmek ve foto-difüzyon yöntemi ile Cu-CdS ikili yapılarda p-tipi CdS ince filmler elde etmek amaçlandı. CdS ince film katmanının kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma ve kimyasal püskürtme yöntemi ile elde edilmesi planlandı. CdS ince filmler, kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma yöntemi ile üretilmesi esnasında altlıklar farklı şiddette beyaz ışınlarla maruz bırakılarak büyütüldüler. Kimyasal püskürtme yöntemi ile üretilen CdS ince filmler ise, değişik oranlarda indiyum katkısı yapılarak elde edildiler. Bu filmlerin elektrik, fotoelektrik ve optiksel özellikleri incelenerek, yüksek verimli güneş pilleri için optimum

değerler belirlendi. Değişik yöntem ve şartlarda üretilen CdS ince filmlerin, CdS/CdTe güneş pillerinin karakteristik özellikleri üzerine etkisi araştırıldı.

1.2. Literatür Araştırması

1.2.1. Işınlamanın CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi

CdS optik pencere katmanının büyütülmesi esnasında oluşan doğal kusurlar (boşluklar ve arayer atomları) ve bu kusurların oluşturduğu kompleksler, CdS/CdTe ince film güneş pillerinin karakteristik parametrelerini olumsuz yönde etkilemektedirler. Bu yüzden, CdS/CdTe güneş pillerinde CdS optik pencere katmanının mümkün olduğu kadar düşük kusur konsantrasyonunda üretilmesi gerekmektedir. Vakum buharlaştırma yöntemi ile üretilen CdS ince filmler yüksek altlık sıcaklığında yapıldığında kusur konsantrasyonu yüksektir. Bundan dolayı, CdS/CdTe ve CdS/CuInSe₂ güneş pillerinde kullanılan CdS optik pencere katmanı düşük altlık sıcaklığında yapılmasından dolayı kimyasal banyoda çökeltme yöntemi tercih edilmektedir (Zelaya-Angel vd., 1995). Ayrıca, düşük kusur konsantrasyonuna sahip II-VI grubu yarıiletkenler (yüksek buhar basıncına sahip), büyütülme sürecinde ışınlamaya maruz bırakılarak elde edilmektedirler. Araştırmacılar, CdS ince filmlerin karakteristik özelliklerini, foto-uyarılmış difüzyon yöntemi (Dzhafarov, 1997), yüzeyin ışınlara ile dağlanması (Zehner, 1980), püskürtme sürecinde yüzeyin lazer ışınlara maruz bırakılması (Kalafi vd., 1996) ve gaz fazında fotokimyasal sentez (Chean vd., 1997) gibi yöntemler kullanarak incelemiştir. Işığın etkisi ile CdS ince filmlerin yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinde değişiklikler gözlenmiştir.

1.2.2. İndiyum katkısının CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi

CdS/CdTe güneş pillerinde, CdS optik pencere katmanının direncini düşürmek ve optik geçirgenliğini artırmak için genellikle indiyum katkısı yapılmaktadır. Bu katkı ya termal difüzyon ya da kimyasal püskürtme yönteminde olduğu gibi doğrudan çözelti içerisine indiyum tuzu katılarak yapılmaktadır. Termal difüzyon yöntemiyle CdS veya CdTe ince filmlere katkı yapılması esnasında katkı atomları ile doğal kusurlardan oluşan kompleksler ve yabancı fazlar meydana gelmektedir. Bu yüzden, In atomlarının CdS'te

termal difüzyon yöntemiyle katkı yapılması, CdS/CdTe güneş pilinin karakteristik parametrelerini olumsuz yönde etkilediğinden dolayı tercih edilmemektedir.

Araştırmacılar, yüksek verimli CdS/CdTe ve CdS/CuInSe₂ güneş pilleri elde etmek için, optik pencere katmanı CdS'e indiyum katkısının etkisini değişik yöntemler ile incelediler. İndiyum katkısı sonucu CdS ince filmin direncinin azaldığı ve optik geçirgenliğinin arttığı bilinmektedir. Romeo ve arkadaşları (Romeo vd., 1978) vakumda buharlaştırma yöntemi ile, Cd:S ; 1:1,5 atomik konsantrasyonunda, CdS ince filmlerinin büyütülmesi esnasında % 1,5 In katkısı yaparak optik geçirgenlik değerini % 90 ve öz direnç değerini ise $\rho = 10^{-3} \Omega \times \text{cm}$ olarak elde ettiler. Ancak, indiyum atomlarının CdS'te dağılımında optimum bir konsantrasyon değeri göze çarpmaktadır. Dhere ve arkadaşları (Dhere vd., 1987) CdS ince filmlerde indiyum atomlarının konsantrasyonunun maksimum değerini 10^{20} cm^{-3} olarak belirlediler. İndiyum atomlarının konsantrasyonu bu değerden fazla olduğu zaman, CdIn₂S₄ fazı oluşmaktadır. Bu faz tane aralarına yerleşerek tanelerin birbirlerinden ayrılmasına sebep olmaktadır. Desnica ve arkadaşları (Desnica vd., 1999) CdS tek kristale "implantasyon" yöntemi ile indiyum katkısı yaparak, S ortamında değişik sıcaklık aralığında tavlama işlemi gerçekleştirdiler. 573-800°K sıcaklık aralığında tavlanan In+CdS ikili yapılarda, indiyum atomlarının konsantrasyonunun $n \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olduğunu ve indiyum atomlarının Cd boşluklarına (In_{Cd}) yerleştiklerini gösterdiler. 800°K üzerinde tavlanan In+CdS ikili yapılarda ise, indiyum atomlarının konsantrasyonunun $n \approx 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ olduğunu ve indiyum atomlarının Cd boşluklarına (In_{Cd}) yerleşmelerinin yanı sıra [$\text{In}_{\text{Cd}} + \text{V}_{\text{Cd}}$] kompleksinin oluştuğunu gözlediler.

Ramaiah ve arkadaşları (Ramaiah vd., 2000) kimyasal püskürtme yöntemi ile indiyum katkısının CdS ince filmlerin optiksel ve yapısal özelliklerine etkisini incelediler. İndiyum katkılanan CdS ince filmlerin hekzagonal yapıda kristalleştiğini ve yasak enerji aralıklarının sırasıyla saf ve indiyum katkılanmış filmlerde 2,35 ve 2,39 eV olduğunu tespit ettiler. Riyad ve arkadaşları (Riyad vd., 2000) kimyasal püskürtme yöntemi ile değişik oranlarda indiyum katkısı yaparak elde ettikleri CdS ince filmlerin fotoluminesans özelliklerini araştırdılar. CdS ince filmlerde üç temel band spektrumu (yeşil, sarı ve kırmızı) gözlediler. Bu band spektrumlarının emisyon şiddetlerinin indiyum konsantrasyonuna bağlı olduğunu gözlediler. Castillo ve arkadaşları (Castillo vd., 2000) kimyasal banyoda çökeltme yöntemi ile ürettikleri CdS ince filmlerin üzerine vakum ortamında indiyum buharlaştırarak In-CdS ikili yapılar elde ettiler. Bu ikili yapıları hava ortamında 250-350°C'de tavlarken yapısal, optik ve elektriksel özelliklerini incelediler.

In-CdS ikili yapıların hekzagonal yapıda kristalleştiğini, yasak enerji aralığının ve öz direnç değerlerinin düştüğünü tespit ettiler. Ayrıca, CdS ince filme indiyum difüzyonu sonrası tane çaplarının arttığını tespit ettiler. Zelaya-Angel ve arkadaşları (Zelaya-Angel vd., 1996) ise CdS ince filmlerini S_2 , S_2+Ar ve S_2+H_2+In ortamlarında tavlayarak faz geçişlerini araştırdılar. S_2 , S_2+Ar ortamında tavlanan CdS ince filmler kübik fazdan hekzagonal faza geçerken, S_2+H_2+In ortamında tavlanan CdS filmler ise yapısını koruyarak kübik yapıda kristalleştiklerini gözlediler.

1.2.3. p-tipi CdS filmlerinin ve p-n Eklemlerinin Hazırlanması ve İncelenmesi

CdS yarıiletkeni n-tipi bir iletkenliğe sahiptir. CdS yarıiletken bileşiğinde büyüme aşamasında oluşan alıcı merkezleri, CdS kompozisyonunun stokiyometriden sapmasının sebep olduğu doğal nokta kusurlarına (kükürt alt örgüsündeki boşluklar, araya sıkışan kadmiyum atomları vb.) atfedilmiştir. Katkı yaparak p-tipi CdS'ün büyütülmesi ve CdS(Cu)/CdS eklemlerin incelenmesi ile ilgili son yıllarda yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Zeenath vd., 1998; Abe vd., 2002; Kashiba vd., 2002). n-tipi CdS'ün, büyümeden sonra uygun safsızlıklarının ısı difüzyonuyla p-tipine dönüştürülmesi oldukça zor gerçekleşen bir süreçtir (Keito vd., 1995). Bakır, CdS'de oldukça hızlı difüzyona uğrayan alıcı safsızlığıdır ve bu sebeple bu yayınlar, bakırın CdS'deki difüzyonuyla ilgilidir. p-tipi CdS filmleri, lazer-koparma yöntemiyle CdS ve Cu hedeflerinin uygun bir karışımından elde edilmiştir. Bu filmlerdeki lüminesans ölçümleri, Cu'nın CdS'te dağılımı Tobayashi ve arkadaşları (Tobayashi vd., 1995) tarafından incelendi. CdS'te büyüme sonrası Cu'nın difüzyonu, p-tipine dönüşmeksizin, genellikle n-tipi malzemenin öz direncinin artmasına sebep olur.

1.3. CdS İkili Bileşiğin Kristal Yapısı ve X-ışınları Kırınım Desenleri

II-VI grubu yarıiletken bileşikler sırasıyla 2 ve 6 valans elektronuna sahiptirler ve valans elektronlarının durumları sırasıyla $(ns^2) ^1S_0$ ve $(n's^2)(n'p^4) ^3P_2$ şeklinde gösterilmektedir. Çizelge 1'den görüldüğü gibi, bu elektronların iyonlaşma enerjileri birbirlerine yakın olduğu için, II. Gruptaki s-seviyesine ve VI. Gruptaki p-seviyesine yerleşen serbest elektronlar yaklaşık olarak aynı derinliğe yerleşmektedirler. Öte yandan,

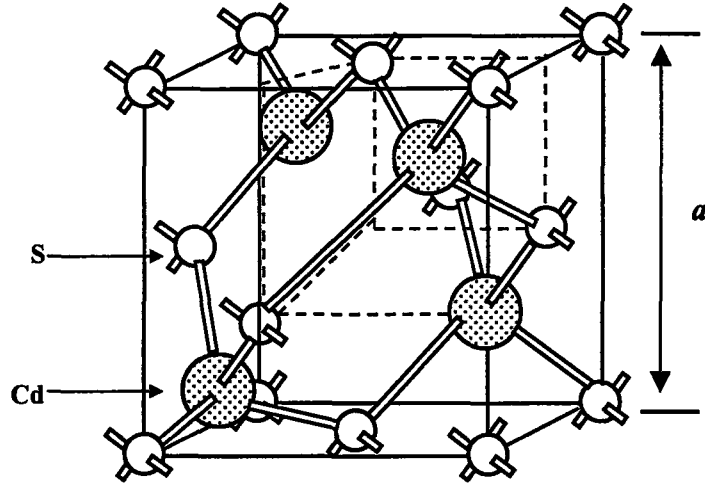
p-seviyesinin dalga fonksiyonu s-seviyesine kıyasla daha fazla dejenere (yozlaşma) olmaktadır. Eğer valans bandının, p-seviyesindeki elektronlarla oluştuğu göz önüne alınırsa valans bandının üç kat dejenere olduğu görülür. İletim bandı ise II. Grup elementlerin s-seviyesindeki elektronlardan oluşmaktadır (Stillbans, 1967).

Çizelge 1. II-VI. Grup elementlerin valans bandı elektron durumu ve iyonlaşma enerjileri

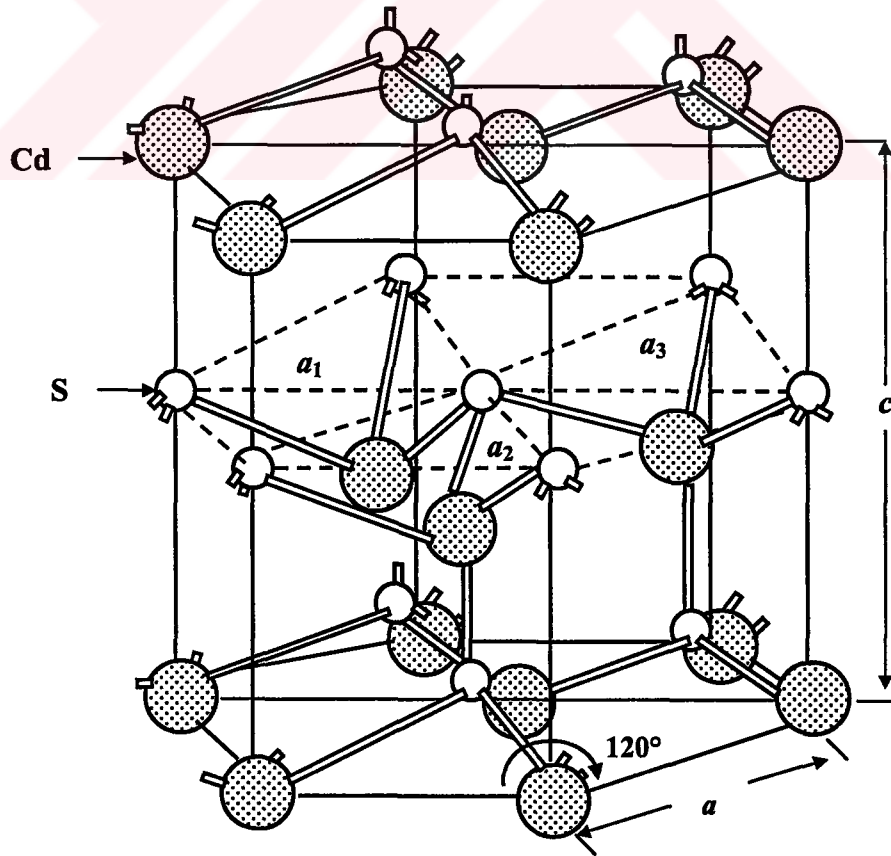
Element	Valans bandı elektron durumu	E_i (eV)
S-16	$(3s^2)3p^4$	10,357
Se-34	$(4s^2)4p^4$	9,75
Te-52	$(5s^2)5p^4$	9,01
Zn-30	$(4s^2)$	9,391
Cd-48	$(5s^2)$	8,991
Hg-80	$(6s^2)$	10,43

CdS yarıiletken bileşiği hem kübik hem de hekzagonal yapıda kristalleşmektedir. Kübik CdS'nin kristal yapısı Şekil 2'de verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, yapı biriminde iki atom vardır. Bu atomların koordinatları (000) ve $(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4})$ 'tür. Bu örgüde, her atom, kendisine eşit uzaklıkta tetrahedral köşelerinde bulunan dört komşu atoma sahiptir. Kübik CdS yapı, iki tane fcc (yüzey merkezli kübik) örgünün iç içe girmiş şekli olarak düşünülebilir. Genellikle periyodik cetvelin III-V. Grup elementlerinin oluşturduğu bileşikler kübik yapıda kristalleşmektedirler.

Hekzagonal CdS'in kristal yapısı Şekil 3'te verilmektedir. Hekzagonal yapıda da kübik yapıda olduğu gibi her atom kendisine eşit uzaklıkta tetrahedral köşelerde bulunan dört komşu atoma sahiptir. Bu yapının birim hücresinde dört tane atom vardır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, hekzagonal yapı iki sıkı paket örgünün iç içe girmiş hali şeklinde düşünülebilir. Bu sıkı paket, örgülerin birinde Cd atomlarının diğerinde ise S atomlarının yerleşmesinden ibarettir. Cd atomunun koordinatları (000), $(\frac{2}{3} \frac{1}{3} \frac{1}{2})$ ve S atomunun koordinatları $(00 \frac{3}{8})$, $(\frac{2}{3} \frac{1}{3} \frac{7}{8})$ olur (Sibinski, 2000).



Şekil 2. Kübik yapının kristal yapısı



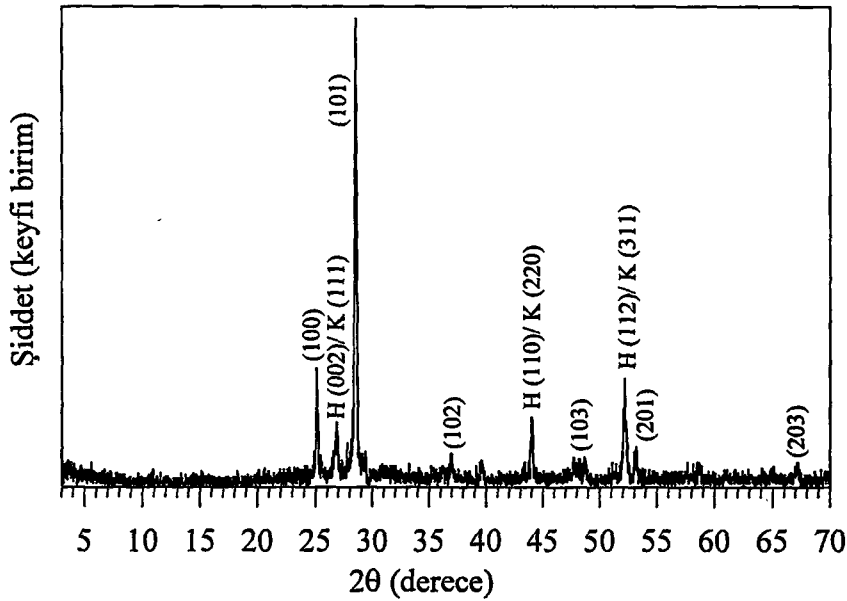
Şekil 3. Hekzagonal yapının kristal yapısı

Üretilen malzemelerin kristal yapılarını belirlemenin yollarından biri x-ışınları kırınım desenlerinin incelenmesidir. Bu desenlerden faydalanılarak, malzemenin kristal yapılı olup olmadığı, kristal yapılı ise türü, örgü parametreleri vs. hakkında bilgi edinmek mümkündür. Bragg kırınım yasası

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

kullanılarak örgü parametreleri hesaplanır.

Şekil 4'te CdS tozunun x-ışınları kırınım deseni ve Çizelge 2'de ise d (düzlemler arası mesafe) ve hkl (Miller indisleri) değerleri verilmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, hekzagonal fazın (002), (110) ve (112) yansıma düzlemlerinin sırasıyla kübik fazın (111), (220) ve (311) yansıma düzlemlerinin, kırınım açıları ve d düzlemler arası mesafeleri birbirine çok yakındır. Bu sebeple, bu fazları birbirinden ayırt etmek zordur. Ancak, bu konuda yapılan çalışmalar, hekzagonal fazın kararlı, kübik fazın ise kararsız faz olduğunu göstermektedir. (Morales vd., 1996; Ramaiah vd., 2001; Shakarchi vd., 2001).



Şekil 4. CdS polikristal tozunun x-ışınları kırınım deseni

Çizelge 2. CdS ince filmlere ait d ve hkl değerleri

CdS (Hekzagonal)		CdS (Kübik)	
d (nm)	(hkl)	d (nm)	(hkl)
0,3583	(100)	-	-
0,3357	(002)	0,336	(111)
0,3160	(101)	-	-
0,2450	(102)	-	-
0,2068	(110)	0,2058	(220)
0,1761	(112)	0,1757	(311)
0,1679	(004)	0,1680	(222)

1.4. CdS'nin Optik Özellikleri ve Yasak Enerji Aralığı

II-VI. Grubuna ait olan CdS (bulk ve ince film) yarıiletkenler, görünür dalga boyunda optoelektronik teknolojisinde geniş ölçüde kullanılmaktadır. CdS ince filmlerin karakteristik özellikleri mikro-yapıya, kalınlığa, Cd/S oranına, altlık ve buharlaştırma sıcaklığına bağlıdır (Jadhav vd., 2001). Örneğin, CdS ince filmlerin kalınlığının artması ile yüzeyden difüzyon yansımaları artar. Altlık sıcaklığının artması ile ise tane çapları ve yansıma düzlemlerinin şiddetlerinin büyümesinin sonucu difüzyon yansımaları küçülür. Ayrıca, CdS ince filmlerin büyütülmesi esnasında oluşan nokta kusurlar (arayer atomları, boşluklar) ve bu kusurlardan oluşan kompleksler yasak enerji aralığında derin seviyeler oluştururlar. Bu seviyeler stokiometri kaymaları, örgü kusurları ve yabancı atomlardan kaynaklanırlar ve yük taşıyıcılarının malzeme içerisinde taşınmasında önemli rol oynarlar (Cheng vd., 1984). CdS ve ZnS gibi geniş yasak enerji aralığına sahip yarıiletkenlerde temel soğurma sınırından büyük dalga boyundaki optik ve fotoelektrik özellikler nokta kusurlardan (boşluk ve arayer atomları) değil, bu nokta kusurların oluşturduğu komplekslerden kaynaklanır. Kompleksleri oluşturan kusurlar arasındaki karşılıklı etkileşmenin özellikleri klasik donör-akseptör (Coulomb etkileşmesi) etkileşmesinden farklıdır.

Yasak enerji aralığı, iletim bandının en düşük enerji seviyesi ile valans bandının en yüksek enerji seviyesi arasındaki enerji farkıdır. İletim bandının en düşük noktası iletim bant kenarı, valans bandının en yüksek noktası ise valans bant kenarı olarak adlandırılır.

Yarıiletkenler, valans bandından iletkenlik bandına elektron geçiş durumlarına göre, doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki gruba ayrılır.

1.4.1 Doğrudan ve Dolaylı Band geçişleri

Doğrudan band yapılı yarıiletkenlerde, iletkenlik band kenarının minimumu ile valans bandının üst kenarı enerji-momentum uzayında $k = 0$ değeriinde bulunmaktadır. Doğrudan band ve dolaylı band geçişleri şematik olarak Şekil 5'te verilmiştir. Doğrudan band yapılı yarıiletkende bir valans elektronu, enerjisi en az yasak enerji aralığının değeriine eşit veya daha büyük olan bir fotonu ($h\nu \geq E_g$) soğurması ile iletkenlik bandına geçer. Bu geçişte elektronlar dalga vektörlerini değıştirmeden geçerler ve $k = 0$ 'da momentum korunur.

$$\hbar \mathbf{k}_e + \hbar \mathbf{k}_h = 0 \quad (2)$$

Burada $\hbar \mathbf{k}_e$ ve $\hbar \mathbf{k}_h$ elektronların ve deliklerin kristal içeriisindeki sahip oldukları kristal momentumlarıdır. Doğrudan geçişte frekansı ν olan bir fotonun enerjisi,

$$h\nu = E_e - E_h \geq E_C - E_V \quad (3)$$

şeklinde verilir. Burada E_e ve E_h elektronların ve deliklerin iletkenlik ve valans bantları içeriisinde herhangi bir konumdaki enerjileri, E_C ve E_V ise $k = 0$ 'da sırasıyla iletkenlik bandının alt, valans bandının üst enerji seviyeleridir. Doğrudan band geçişinde enerji korunmaktadır.

Dolaylı band geçişleri, Si ve Ge yarıiletkenlerinde olduğu gibi, iletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu enerji-momentum uzayında aynı k değeriinde olmadığı durumda görülür. Bu durum, valans bandından iletim bandına bir elektronun momentumunu koruyarak geçiş yapabilmesi için, bir fononun soğurulmasını gerektirir. Bu durumda momentum korunumu,

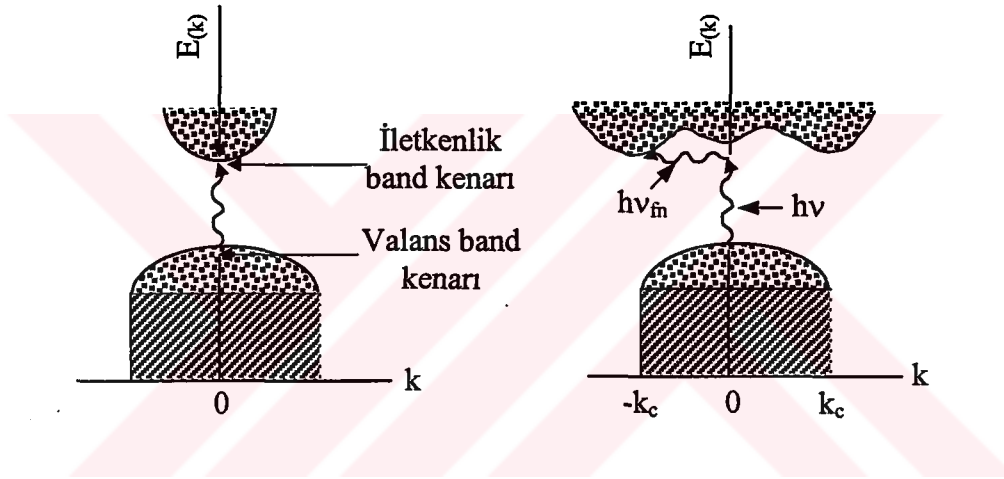
$$\hbar \mathbf{k} = \hbar \mathbf{k}_e \pm \hbar \mathbf{q} = 0 \quad (4)$$

biçiminde verilir (Kittel, 1996). Burada k fotonun, q fononun dalga vektörüdür. k_c ise k uzayında valans bandının maksimumu ile iletim bandının minimumu arasındaki farktır ($k_c = -q$).

Dolaylı geçişte fotonun enerjisi,

$$h\nu = E_g \pm h\nu_{fn} \quad (5)$$

biçiminde yazılabilir. Burada $h\nu_{fn}$ fononun enerjisidir. Artı işaretli durumda fonon oluşmakta, eksi işaretli durumda ise fonon soğurulmaktadır.



Şekil 5. Yarıiletkenlerde (a) Doğrudan, (b) Dolaylı band geçişlerinin şematik gösterimi

GaAs, CdS, CdSe, ZnS ve InSb gibi malzemeler doğrudan geçişli band yapısına sahiptirler (Nag, 1980). Bu geçişler için, α soğurma katsayısı,

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (6)$$

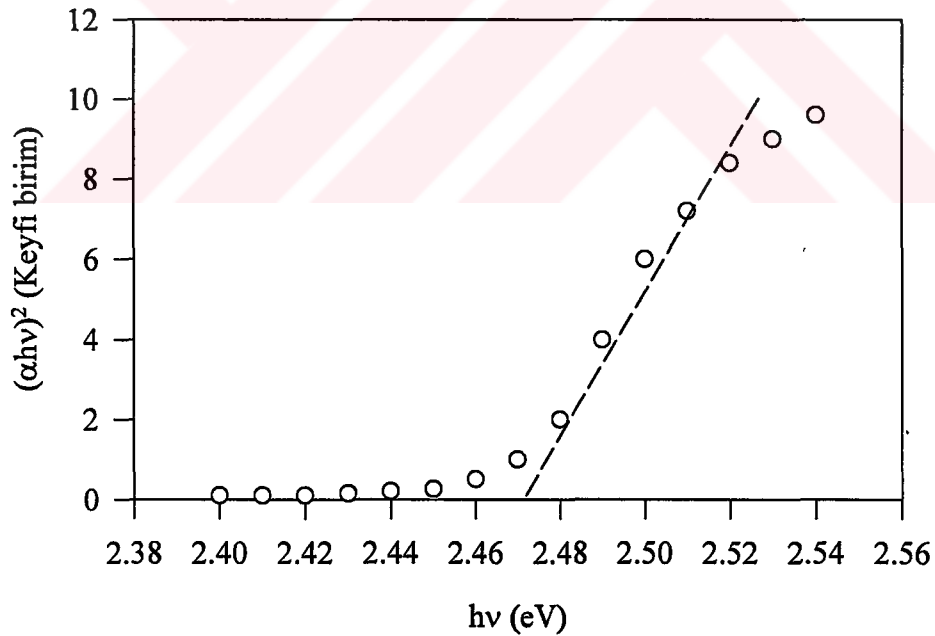
ile verilir. Burada A bir sabit ve E_g yasak enerji aralığıdır. Doğrudan geçişli bir yarıiletken için $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ ile değişim grafiği, düz bir çizgi olur ve onun $h\nu$ eksenini kestiği nokta vasıtasıyla E_g yasak enerji aralığı bulunur. Şekil 6'da CdS ince filmi için $(\alpha h\nu)^2$ 'nin, fotonun enerjisi ($h\nu$)'ye bağlılığı gösterilmektedir (Olive vd., 2001).

Dolaylı geçişlerde, soğurma sabitinin düşük olduğu bölgelerde, kuyruklanmalar olduğu gözlenir. Bu durumda geçişler, fonon soğurulmasıyla meydana gelir. Bu durumda $\alpha \sim h\nu$ bağımlılığı Denklem (6) ile verilemez. Dolaylı geçişler için soğurma katsayısı,

$$\alpha = B(h\nu - E_{gi} + E_p)^n / [\exp(E_p/kT) - 1] \quad (7)$$

ile verilir. Burada B fotonun enerjisinde bağımsız bir sabit, E_p fotonun enerjisi ve E_{gi} dolaylı band genişliğidir. Buradaki n, doğrudan band geçişli yarıiletkenler için 1/2 veya 3/2 ve dolaylı band geçişli yarıiletkenler için 2 veya 3 değerlerini alan bir sabittir (Mot vd., 1987).

Ayrıca, bu geçişlere ek olarak eksiton soğurulması, serbest yük taşıyıcılarının soğurulması ve katkılı atomlarının soğurulması da olmaktadır.



Şekil 6. CdS ince filminin $\alpha^2 \sim h\nu$ değışimi

1.5. Epitaksiyel Katman Büyütme

Deneyisel çalışmalar ve bunları destekleyen teorik çalışmalardan, çökeltme ile epitaksiyel katman elde etmek için, altlık ve filmin kristal yapısının (örgü türü ve örgü sabitleri) uygunluğu ile ısı genleşme katsayısının yaklaşık aynı değerde olması istenir. Eğer bu şartlar sağlanmaz ise, filmin büyütülmesi esnasında deformasyonlar meydana gelir. Ayrıca çökeltme esnasında altlığın durgun (altlıktaki filme difüzyon) olması gerekmektedir. Film çökeltme yöntemlerinden bağımsız olarak altlık seçiminin bazı şartları vardır.

Heteroeklem yapılar, epitaksiyel yöntem ile büyümesinde temel iki süreç ile tanımlanır. 1) Çökelen kristalin yüzey enerjisi altlığın yüzey enerjisinden büyük ise gerçekleşir; Çökelmeler rastgele çekirdeklenirler ve yüzeyden itibaren değişik doğrultuda büyürler ve kesişirler, böylece alt tane sınırları pürüzlenir. 2) Burada bir ilk katman oluşur ve bu ilk katman zorlanmamışsa, büyüme, ardışık katmanların çökeltmesi yoluyla devam eder. Böylece düzgün yüzeyler oluşur. Bununla birlikte, hetero-epitaksiyelde zorlanmamış bir katman elde etmek çok güçtür. Büyümenin şekli, katmanın zorlanma enerjisi ile yüzey enerjisinin birbirlerine göre büyüklüğüne bağlıdır. Eğer yüzey enerjisi, zorlanma enerjisinden büyük ise katman-katman büyüme devam eder. Fakat zorlanma enerjisi büyük ise, çökeltme ilk katman üzerinde adacıklar oluşarak gerçekleşir (Ahmed vd., 1999). Çizelge 3'te II-VI. Grubu yarıiletken bileşiklerin bazı temel özellikleri verilmektedir.

Altlığın sıcaklığı tayin edilirken, epitaksiyel çökeltme için mümkün olan en düşük altlık sıcaklığı seçilmelidir. Bu sıcaklığa, epitaksiyel sıcaklık denir. Epitaksiyel sıcaklığı, altlık film kompozisyonuna, altlık yüzeyinin hazırlanmasına, çökeltme hızına ve büyüme esnasında ortamdan kaynaklanan kirlenmelere bağlıdır. Diğer yandan, çekirdeklenme ve büyüme esnasındaki sıcaklık, ideal ve kusurlu yapılar arasındaki oranı önemli ölçüde azaltmak için, malzeme erime sıcaklığına ulaşamayacak kadar yüksek seçilebilir (Neumann vd, 1981).

Çizelge 3. Bazı II-VI. Grubu yarıiletken bileşiklerin özellikleri

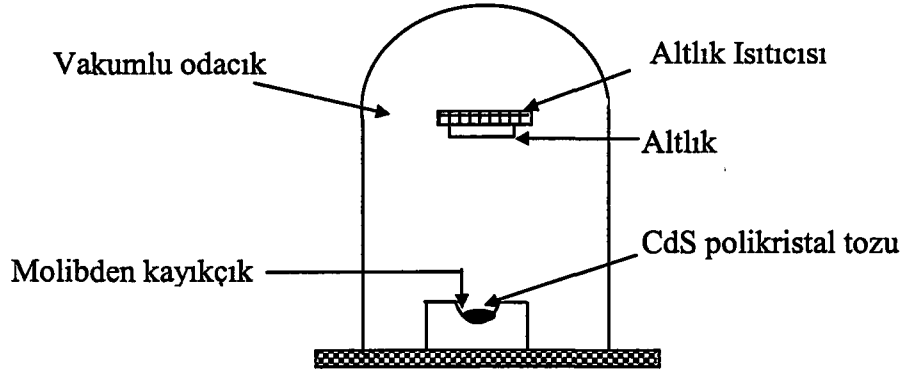
Malzeme	Enerji aralığı (eV)	İletkenlik tipi	Elektron çekiciliği (eV)	Kararlı faz	Örgü Parametresi (Å)	Erime sıcaklığı (°C)	Termal genleşme katsayısı ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
CdO	2,40	n	-	Halite	$a_0 = 4,71$	900	-
CdS	2,42	n	4,50	Hekzagonal	$a_0 = 4,1368$ $c_0 = 6,7163$	1473	$\perp 4,7$ $\perp 3,0$
CdSe	1,74	n	4,95	Hekzagonal	$a_0 = 4,238$ $c_0 = 7,01$	1239	$\perp 3,7$ $\parallel 3$
CdTe	1,45	n,p	4,28	Kübik	$a_0 = 6,481$	1092	4,9
ZnO	3,20	n	-	Hekzagonal	$a_0 = 3,25$ $c_0 = 5,207$	1975	$\perp 4,8$ $\parallel 2,9$
ZnS	3,66	n	3,90	Kübik Hekzagonal	$a_0 = 5,409$ $a_0 = 3,819$ $c_0 = 6,256$	1830	6,3
ZnSe	2,67	n,p	4,09	Kübik	$a_0 = 5,666$	1520	6,8
ZnTe	2,25	p	3,50	Kübik	$a_0 = 6,104$	1295	8,4

1.6 CdS İnce Film Elde Etme Yöntemleri

1.6.1. Fiziksel Buharda Çökeltme Yöntemi

İnce filmlerin vakumda altlık yüzeyine kaplanması üç süreçten oluşur: 1) kaplanan malzeme atomlarının üretimi ve altlığa doğru akışın yönlendirilmesi, 2) atomların vakum ortamında altlığa kadar geçişi, 3) atomların altlık yüzeyine çökmesi ve ince film tabakasının oluşması. Vakumda buharlaştırma yöntemi Şekil 7’de verilmektedir. Kayıkçıklar ısıtılarak CdS malzeme gaz haline geçirilir ve vakum ortamında altlık üzerine yönlendirilir. Bu yöntem ile kolay ve optiksel olarak düzgün CdS filmler elde edilmesine rağmen, çökeltme katmanı, dengedeki elementlerin buhar basınçlarına kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu için, stokiometriyi kontrol etmek zordur (Grosvenor vd., 1989). Eğer CdS filmler, $T_s = 250-300^{\circ}\text{C}$ altlık sıcaklığında yapılmış ise, fotoiletkenlik özellikleri iyidir

(Sakai vd., 1969); ancak, dirençleri çok büyük olduğu için güneş pili uygulamalarında tercih edilmezler.



Şekil 7. Vakumda buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi

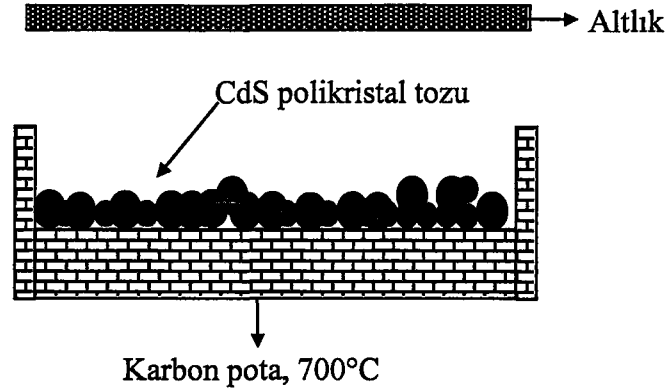
1.6.2. Kapalı Hacimde Çökeltme (Close-Space Sublimation) Yöntemi

Şimdiye kadar yapılan CdS/CdTe güneş pillerinde en yüksek verim bu yöntem ile elde edilmiştir (Brit vd, 1993; Aramoto vd, 1997). Chu ve arkadaşları (Chu vd., 1995), CdS ve CdTe malzemelerin buharlaştırılması esnasında meydana gelen parçalanma reaksiyonunun



şeklinde olduğunu gösterdiler. Şekil 8’de görüldüğü gibi, altlıklar kaynaktan yaklaşık 0,5-2 cm uzaklığa yerleştirilir. Elementlerin buharlarının altlık üzerinde yoğunlaşmaması için, altlıklar yüksek sıcaklıklarda (kaynak sıcaklığından düşük sıcaklıklarda) tutulurlar. Bu tekniğin en büyük avantajı çökeltme hızının büyük olmasıdır (1µm/dakika). Kapalı hacimde çökeltme (Close-space sublimation) yöntemi ile geniş yüzeylerde kolay ve ucuz maliyetli güneş pilleri elde edilmektedir. Bu yöntem ile düzgün stokiometride ve karanlıkta oldukça iyi iletkenliğe sahip CdS ince filmler elde edilmesine rağmen, filmlerin yüzey adhezyonu

iyi olmadığı için filmler homojen bir dağılıma sahip değildir (Bouchenaki vd., 1991).



Şekil 8. Kapalı Hacimde Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi (Bonnet vd., 2000).

1.6.3. Kimyasal Buharda Çökeltme Yöntemi

Kimyasal buharda çökeltme yöntemi (CVD), hem CdS hem de CdTe malzemelerini çökeltmede kullanılabilir. Bu yöntemde, Cd ve S atomları kimyasal reaksiyonlar ile altlığın yüzeyine çökertilerek CdS bileşiği elde edilir. Bu metodun bir versiyonu olan metal-organik kimyasal buharda çökeltme yöntemi (MOCVD), CdTe kaplamada yaygın bir şekilde kullanılır. Kadmiyum kaynağı olarak dimetil-kadmiyum ve Tellür kaynağı olarak disopropil-tellur (Sudharsanan vd., 1991) veya dietil-tellur (Bhimrathwala vd., 1987) gibi metalo-organik bileşikler kullanılır. Yavaş çökeltme hızına rağmen ($\sim 1 \mu\text{m/saat}$), bu teknik ile düşük maliyetli CdS/CdTe güneş pilleri elde edilir. CVP yöntemi ile hem stokiometri kontrolü hem de katkı malzemesi kolayca yapıldığı için ticari olarak güneş pilleri üretiminde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

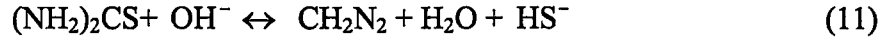
1.6.4. Çözeltide Büyütme Yöntemi

Bu yöntem CdS filmleri çökeltmede yaygın bir şekilde kullanılır (Barker vd., 1992). Bu yöntemde gerekli iyonlar çözelti içerisinde kimyasal yollarla oluşturulur. Eğer gerekli denge şartları sağlanırsa, bu kimyasal yollarla çözelti içerisinde

elde edilen iyonlar altlık üzerine toplanabilir ve çöktürülebilir. Örneğin kadmiyum iyonları $\text{Cd}(\text{OH})_2$ hidrolizi ile



ve sülfat iyonları ise tiürenin $((\text{NH}_2)_2\text{CS})$ alkali sıvı çözeltilerinden elde edilebilir:



Sülfat ve kadmiyum iyonlarının ürün konsantrasyonları CdS 'nin ürün çözünürlüğünü aştığı zaman, CdS altlık üzerine çökmeye başlar.

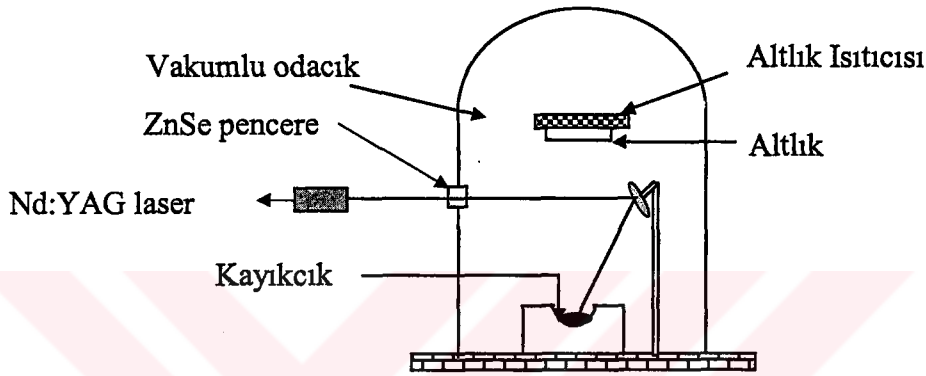


Bu metod, tellür'ün sentezindeki zorluklardan dolayı CdTe ince film üretiminde kullanılmaz. Bu yöntem ile güneş pilleri için, düşük kristal kusurlu, homojen ve arzu edilen kalınlıkta CdS ince filmler üretilebilmektedir (Hasoon vd., 1997).

1.6.5. Kimyasal Püskürtme Yöntemi

Kimyasal püskürtme yöntemi, kimyasal yöntemler içerisinde ince filmlerin elde edilmesinde en uygun yöntemlerden birisidir. Bu yöntem ile geniş alanlı, homojen ve ucuz maliyetli çeşitli ince filmler (CdS , SnO_2 , CdO , CuInSe_2 v.s) yapılmaktadır. Ticari üretim maliyeti ucuz olduğu için oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Kimyasal püskürtme yöntemi ünitesinin şematik gösterimi Şekil 9'da verilmektedir. Bu yöntem ile CdS ince filmler elde etmek için, kadmiyum kaynağı olarak CdCl_2 , CdSO_4 ve kükürt kaynağı olarak ise $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ tuzları kullanılmaktadır. Kimyasal püskürtme yöntemi ile elde edilen CdS filmlerin yüzey morfolojisi püskürtme hızına bağlıdır. Düşük püskürtme hızında sıkı paket ve küçük tane çaplı filmler elde edilir. Ayrıca diğer yöntemlerden farklı olarak, bu yöntem ile büyütülen CdS ince filmler pürüzlü yüzeye sahip olması nedeniyle geniş etkin alana

buharlaşan madde altlığa taşınmış olur (Stoessel vd., 1993). Lazerle buharlaştırma işleminde, CdS hedef malzeme çok kısa sürede altlık üzerinde ince katman oluşturduğu için stokiometri büyük oranda korunur. Diğer bir ifade ile CdS hedef malzeme parçalanmadan altlık üzerine kaplanır. Lazerle buharlaştırma yöntemi ile CdS ince film yapmanın en büyük avantajı, lazer ışınlarının enerjileri ayarlanılarak istenilen yansıma düzlemlerine sahip stokiometrik CdS ince filmlerin yapılabilmesidir (Ullrich vd., 2001).



Şekil 10. Lazerle Buharlaştırma Ünitesi

Bu yöntemin bazı dezavantajları vardır: (1) Hedef malzemeden yayınlanan sıvı madde film oluşumu esnasında işe karışır ve filmin yüzeyini etkiler; (2) Duman şeklinde buharlaşan madde, dar açılı bir koni oluşturarak, küçük yüzey alanlı bölgede çöktüğünden büyük yüzey alanlı filmlerin oluşumunda bazı karmaşıklıklar ortaya çıkar (Inam vd., 1988).

1.7. Yarıiletkenlerde Difüzyon

Sıcaklık yükseldikçe atomların ısı titreşimleri artar ve bazı atomlar, içinde bulunduğu ortamda bir konumdan diğer konuma atlayarak yer değiştirir. Atomsal yayılım veya difüzyon denen bu olayda, önce atomun çevre atomlar ile bağları kopar. Bu atom, daha sonra atomlar arası boşluklara geçerek, yeni konumunda çevre atomlar ile bağ kurar (Abdullaev vd, 1987). Bütün bunlar için gerekli aktivasyon enerjisi, difüzyon sisteminin bir özelliğidir ve deneysel olarak ölçülebilir.

1.7.1. Difüzyon Kuralları

I. Fick Kuralı:

Eğer homojen olmayan tek-fazlı bir alaşım tavlânırsa, madde konsantrasyon gradyanının azalacağı bir yönde bir davranış gösterecektir. Numune uzun süre tavlânırsa homojen hale geçecek ve maddenin net akısı duracaktır. Bu şekildeki bir sistemin akı denklemini elde etmek için, akının geçtiği alan ile konsantrasyon gradyanının geçtiği alanı orantılı almak uygundur. Örneğin, x-ekseni, konsantrasyon gradyanına paralel alınır ise J akı bileşeni, bu gradyant boyunca aşağıdaki şekilde verilir:

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (15)$$

Burada D difüzyon sabitidir. Bu denklem Fick'in birinci kuralı adını alır ve numunenin homojen olduğu durumda akının sıfıra gittiğini gösteren bir denel gerçeğe yaklaşır.

II. Fick Kuralı:

Denklem (15), konsantrasyon ve konsantrasyon gradyanı herhangi bir noktada zamanla değişmesi sebebiyle $t=0$ için geçerlidir. Konsantrasyonun zamanla değişme hızı akı gradyenti ile orantılıdır. Bu ifade süreklilik denklemi olarak adlandırılır ve aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \quad (16)$$

Denklem (15)'i Denklem (16)'dan yerine yazılırsa

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right) \quad (17)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem, II. Fick kuralı olarak adlandırılır.

Denklem (17), üç boyutlu vektör uzayında

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla J \quad (18)$$

şeklinde gösterilir. Bu denklem, maddenin korunumlu olduğu sistemlerde geçerlidir.

Eğer D, konumun bir fonksiyonu değil ise Denklem (17)

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (19)$$

olur. Konsantrasyon, basit birkaç başlangıç ve sınır şartları ile zamanın ve konumun fonksiyonu olarak, (yani $N(x,t)$), tayin edilebilir. Genelde D sabiti için, Denklem (19)'un çözümü iki biçimde ifade edilir. Difüzyon uzunluğu, başlangıç homojensizlik boyutundan daha kısa olduğunda $N(x,t)$ hata fonksiyonu ile basit bir şekilde ifade edilebilir.

II. Fick kuralının çözümleri başlangıç ve sınır şartlarına bağlıdır. Yarı sonsuz katıya sabit konsantrasyonlu kaynaktan difüzyon

$$\begin{aligned} N(0,t) &= N_0 \\ N(x,0) &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

bağıntıları ile verilir. II. Fick denkleminin çözümü

$$N(x,t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (21)$$

şeklindedir (Dzhafarov, 1992). Burada N_0 , numunenin yüzeyindeki ($x=0$) sabit konsantrasyondur.

Burada $\operatorname{erf}(z)$ Gauss hata fonksiyonudur ve aşağıdaki şekilde verilir:

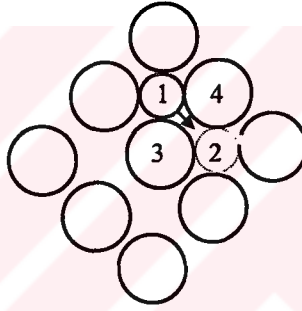
$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \quad (22)$$

1.7.2. Difüzyon Mekanizmaları

Yarıiletkenlerde atomların difüzyonu esas itibari ile üç mekanizma ile oluşur: (1) Arayer Mekanizması, (2) Boşluk Mekanizması ve (3) Karmaşık (dissosiyatif) Mekanizma

(1) Arayer Mekanizması: Örgü atomlarının hiçbirisi sürekli hareket etmemesine rağmen arayer atomları en yakın komşu arayerlere atlayabilirler. Bu şekildeki difüzyon mekanizmasına arayer mekanizması denir. Bir atom, arayer mekanizmasına göre, örgü içinde bir arayer konumundan diğer bir arayer konuma atlayarak difüzyona uğrar.

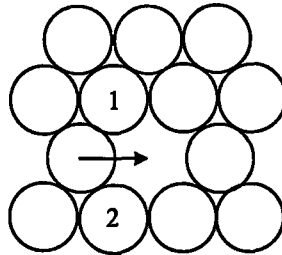
Atlama olmadan önceki bir atomun hareketini göz önüne alalım. Şekil 11, yüzey merkezli kübik örgünün içerisinde küresel paketlenmiş (100) düzlemindeki arayer atomlarını göstermektedir.



Şekil 11. Arayer mekanizmasıyla, arayer atom difüzyonunun yüzey merkezli kübik örgüde (100) düzleminde gösterimi

(2) Boşluk Mekanizması: Bütün kristallerde bazı örgü atomlarının yerleri boştur. Bu boş yerler boşluklar olarak adlandırılırlar. Herhangi bir anda atomlar en yakın komşu boş yerlere atlayabilirler. Bu şekildeki difüzyon mekanizmasına boşluk mekanizması denir.

Şekil 12, yüzey merkezli kübik örgüde bir boşluk ile komşu atomun hareketini engelleyen sıkıştırmanın yapısını göstermektedir.



Şekil 12. Sıkı paket küreler düzlemi

Eğer bozulmamış örgü, yarıçapı d olan sıkı paket kürelerden oluşmuş ise (1 ve 2 numaralı atomlar) sıkıştırılmış atomlar arasındaki mesafe $0,73d$ olur. Bu nedenle bir atomun hareketi için gerekli bozulma küçüktür.

(3) Karmaşık (dissosiyatif) Mekanizma: Arayer ve boşluk mekanizmalarının bileşimidir. Atom, örgü düğümünden arayer pozisyonuna geçer, arayer pozisyonları ile hareketinde sonra, yeniden başka bir boşluğa geçer (Shewmon, 1963).

1.7.3. Heteroeklemlerde Difüzyon

İki yarıiletkenin oluştuğu heteroeklem hazırlandığında katkı ve esas atomlar bir yarıiletkenin diğer yarıiletkenine difüz edebilir. Bu nedenle heteroeklemin yapısı, elektriksel ve fotoelektriksel özellikleri değişir. Epitaksiyal ve buharlaştırma yöntemleri ile heteroeklem hazırlandığında katkı atomları, büyütülen filmde altlığa veya altlıktan ince filme girme mekanizması ile oluşur (Dzhafarov, 1977). Bu mekanizmalar şu şekilde sıralanabilir:

- (1) Atomların filmde altlığa ve tersi olarak altlıktan filme direk difüzyonu,
- (2) Atomların altlıktan gaz haline geçmesi (buharlaşması) ve sonra büyütülen filme difüzyon etmesi,
- (3) Atomların filmde gaz haline geçmesi (buharlaşması) ve sonra altlığa difüzyon etmesi,

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

CdS ince filmlerin üretiminde genellikle vakumda buharlaştırma (Mohammed, Nory, 1998), kimyasal püskürtme (Baykul, Balcıoğlu, 2000), kimyasal banyoda çökeltme (Castillo vd, 1999) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile ince film yapmak için kullanılan ön maddeler, kullanılan yönteme göre, CdS polikristal tozu veya Cd ve S tuzları kullanılabilir. Örneğin, vakumda buharlaştırma yönteminde, CdS ince filmini oluşturmak için hedef madde olarak CdS polikristal tozu kullanılır. Kimyasal püskürtme ve kimyasal banyoda çökeltme yöntemlerinde ise CdCl_2 ve $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ tuzları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, CdS ince filmler, kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma yöntemi ile farklı ışık şiddetleri altında ve kimyasal püskürtme yöntemi ile indiyum katkı yapılarak büyütüldü. Işınlama ve indiyum katkısının CdS ince filme ve CdS/CdTe ince film güneş pillerinin karakteristik özelliklerine etkileri incelendi. Ayrıca bakırın CdS ince filmlerin karakteristik özelliklerine etkisi araştırıldı.

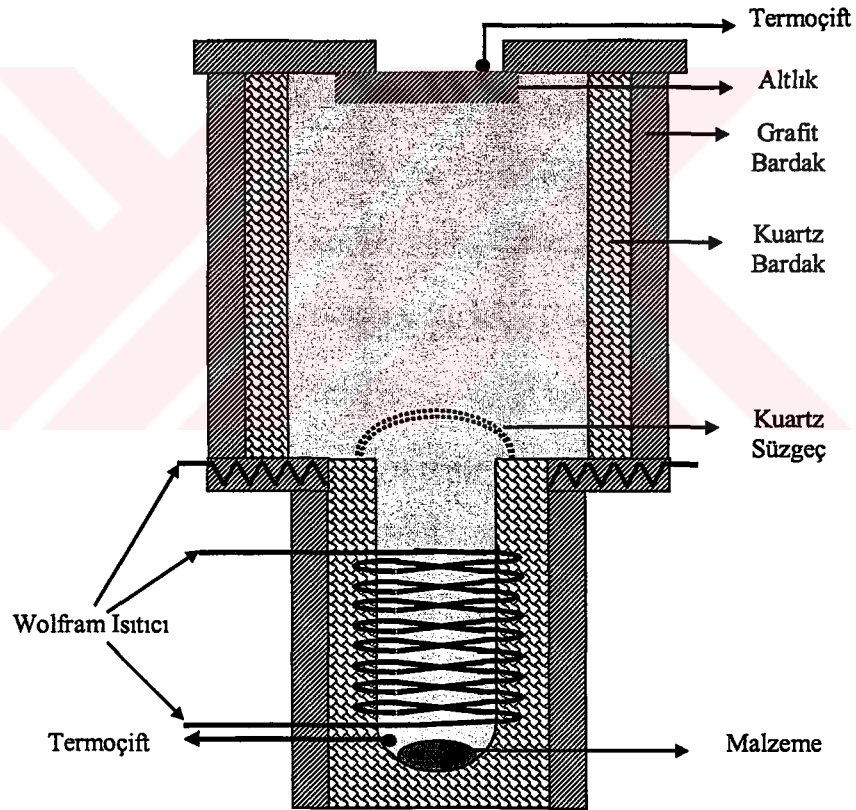
2.2. CdS İnce Filmlerin Elde Edilmesi

Bu çalışmada kullanılan CdS (%99,99) polikristal tozları, $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ ve CdCl_2 malzemeleri “Aldrich Chemical Co.” dan temin edildi. Altlık olarak $8 \times 8 \text{ mm}^2$ boyutlarında adi cam ve SnO_2 kaplanmış camlar kullanıldı. Bu altlıklar alkol ile temizlenerek, üzerinde buharlaştırılmaya hazır hale getirildi. CdS ince filmler farklı iki yöntem ile elde edildi.

2.2.1. Kısmen Kapalı Hacimde Vakumda Buharlaştırma Yöntemiyle CdS İnce Filmlerin Elde Edilmesi

İlk olarak, cam ve SnO_2 altlıklara alüminyum folyadan maskeler yapıldı. Elde edilecek olan filmin kalınlığına bağlı olarak 0,2-0,3 gr CdS polikristal tozları tartılarak, Şekil 13’te gösterilen kuartz bardağın içerisine konuldu. Şekil 13’teki sistemde, Wolfram tellerden yapılmış iki ısıtıcıdan biri altlıkları ısıtmak, diğeri ise malzemeyi buharlaştırmak

için kullanıldı. Bu sistem daha sonra Şekil 14'te gösterilen Varian 840 buharlaştırma ünitesinin içine yerleştirildi. Vakum sistemi çalıştırılarak, vakumun yaklaşık 10^{-3} Torr olması beklendi ve ardından altlık ısıtıcısı ısıtmaya başlandı. Altlık sıcaklığı 200°C 'ye ulaştığında, altlıklar beyaz ışığın; (1) karanlık, (2) 50 mW/cm^2 , (3) 100 mW/cm^2 ve (4) 150 mW/cm^2 'lik ışık şiddetlerine maruz bırakılarak, CdS polikristal tozları buharlaştırılmaya başlandı. Işığın etkisiyle, altlık sıcaklığının $3\text{-}5^{\circ}\text{C}$ arttığı, yüzeye dokundurulan bir bakır-konstant termočift ile tespit edildi. Buharlaştırma esnasında malzemenin bulunduğu kuartz tüpün sıcaklığı 850°C 'de tutularak 20 dakika beklendi (Dzhafarov vd., 2000). CdS polikristal tozları tümüyle buharlaştırıldıktan sonra, vakum sistemi oda sıcaklığına kadar soğutuldu. Elde edilen filmlerin sarı renkte ve parlak oldukları gözlemlendi.



Şekil 13. Kısmen kapalı hacimde buharlaştırma sisteminin şematik görünümü



Şekil 14. Varian NRC 840 Vakum Sistemi

2.2.2. Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle CdS ve $Cd_{1-x}In_xS$ ($0 \leq x \leq 0,20$)

İnce Filmlerin Elde Edilmesi

CdS ve $Cd_{1-x}In_xS$ ince filmlerin kimyasal püskürtme yöntemiyle üretilmesinde, saf suda çözülmüş $CdCl_2$, $(NH_2)_2CS$ ve $InCl_3$ tuzlarının 0,025 mol/litre konsantrasyonundaki çözeltileri kullanıldı. Hazırlanmış çözelti, $400^\circ C$ altlık sıcaklığında, cam ve cam/ SnO_2 altlıklar üzerine, Şekil 9'daki deney sistemi kullanılarak püskürtüldü. Çözeltinin pH değeri 6,5 olarak ölçüldü. Filmlerin homojen olarak üretilmesi için, altlıklar, püskürtme esnasında sabit hızlı adım motoru kullanılarak 10 devir/dak. hız ile döndürüldü. Deney sisteminde, üretimde kullanılan çözeltinin püskürtme hızını 5 ml/dak.'ya ayarlayarak, filmlerin kalınlığının dakikada 50 nm olması sağlandı. Püskürtme işlemi tamamlandıktan sonra, CdS ve $Cd_{1-x}In_xS$ filmlerin, oksitlenmelerinin önlenmesi için Al_2O_3 plakalar üzerine alınarak hızlıca soğutuldu. Elde edilen filmlerin sarı renkte ve parlak oldukları gözlemlendi.

2.2.3. Cu-nCdS İkili Yapıların Elde Edilmesi

p-tipi CdS ince filmler elde etmek için, kısmen kapalı hacimde vakumda buharlaştırma yöntemi ile elde edilen CdS ince filmlerin üzerine, birbirine yakın olarak yerleştirilmiş dairesel biçimdeki iki yarı-geçirgen bakır filmi buharlaştırıldı. Bakır filmler Mo kayıkçıklar kullanılarak vakumda yapıldı. Böylece tek bir altlığın yüzeyinde iki tane benzer Cu-nCdS yapısı elde edildi. Sonra, Cu-nCdS yapılardan biri bakırlı taraftan He-Ne lazeriyle aydınlatıldı ($\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$, $P = 15 \text{ mW}$), bu arada ikinci komşu yapı ise ışık kaynağında korundu (aydınlanmamış yapı) (Dzhafarov vd., 1999). Oluşabilecek ısının daha iyi bir şekilde uzaklaştırılabilmesi için, Cu-nCdS yapıların yüzeyleri genellikle bir hava akımı ile soğutuldu. Cu-CdS yapıların yüzey sıcaklıkları, yüzeye dokundurulan bir bakır-konstant termocifti ile ölçüldü. Aydınlatma sürecinden sonra Cu-nCdS yapılar, kesilerek birbirinde ayrıldı. Cu-CdS yapılarının elektriksel karakteristiklerinde Cu'nun yüzey difüzyonu etkisinden kaçınmak için, yapıların yan kenarlarındaki bakır, HNO_3 ile dağlanarak temizlendi. Bu süreçler ve ölçümler sırasında, aydınlatılmamış numunenin kontrol dışı alacağı ışığın azaltılması için gerekli önlemler alındı. Cu'nun difüzyon dağılımının incelenmesi Dzhafarov ve arkadaşlarının (Dzhafarov vd., 1998) yaptığı çalışma yöntemiyle yapıldı.

2.3. CdS/CdTe Güneş Pillerinin Elde Edilmesi

Kısmen kapalı hacimde vakumda buharlaştırma yöntemiyle (1) karanlık ve (2) 150 mWcm^{-2} 'lik ışık şiddetlerine maruz bırakılarak büyütülen CdS ince filmler üzerine, aynı yöntem ile 200°C altlık sıcaklığında CdTe polikristal malzemesi çöktürülerek CdS/CdTe güneş pilleri elde edildi. CdTe katmanının p-tipine dönüştürmek için, CdS/CdTe yapılar 400°C 'de 10 dakika hava ortamında tavlandı. Tavlandıktan sonra, CdTe yüzeyinde oluşan oksitler % 1'lik Br+metanol çözeltisinde dağlanarak kaldırıldı (Moitinho vd., 1998). CdTe ince filmlere omik kontak olarak Au metali vakumda buharlaştırıldı. Farklı ışınlama şiddetinde büyütülen CdS optik pencere katmanının, CdS/CdTe güneş pillerinin karakteristik özellikleri üzerine etkisi araştırıldı.

Kimyasal püskürtme yöntemi ile (1) saf ve (2) $x = 0,05$ In katkı yapılarak büyütülen CdS ince filmler üzerine, kısmen kapalı hacimde vakumda buharlaştırma yöntemi ile CdTe polikristal malzemesi buharlaştırılarak CdS/CdTe güneş pilleri elde edildi. Tavlama,

dağlama ve omik kontak kısmen kapalı hacimde üretilen CdS/CdTe güneş pilleri ile aynı şekilde yapıldı. Saf ve $x = 0,05$ In katkı yapılarak büyütülen CdS optik pencere katmanının CdS/CdTe güneş pillerinin karakteristik özelliklerine etkisi araştırıldı.

2.4. X-Işını Kırınım Analizi

X-ışınları kırınım desenlerinden yararlanılarak, bir malzemenin kristal yapısı hakkında bilgi edinilebilir ve örgü parametreleri hesaplanabilir.

Kısmen kapalı hacimde üretilen CdS, CdTe ince filmlerin ve kimyasal püskürtme yöntemi ile üretilen $Cd_{1-x}In_xS$ ince filmlerin x-ışınları kırınım desenleri Rigaku D/Max-III C difraktometresinde (Şekil 15) ölçüldü. Ölçümler esnasında difraktometredeki bakır hedefe 35 kV'luk gerilim ve 30 mA'lık akım uygulanarak elde edilen CuK_{α} ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) x-ışınları kullanıldı. Ölçümler, oda sıcaklığında, $3^{\circ} \leq 2\theta \leq 70^{\circ}$ aralığı boyunca $0,02^{\circ}$ 'lik adımlar ile yapıldı.

II-VI yarıiletken bileşikler grubunda bulunan, CdS ve CdTe malzemeler hem hekzagonal hem de kübik yapıda kristalleşmektedirler. Kübik yapıda kristalleşen CdS ve CdTe ince filmler için, a örgü parametresi,

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (23)$$

bağıntısından faydalanılarak bulundu. Hekzagonal yapıda kristalleşen CdS ince filmler için ise,

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (24)$$

bağıntısı kullanıldı. Burada d , düzlemler arası mesafeyi, h, k, l ise örgü düzlemlerini göstermektedir.



Şekil 15. Rigaku D/Max-IIIc marka x-ışını difraktometresi

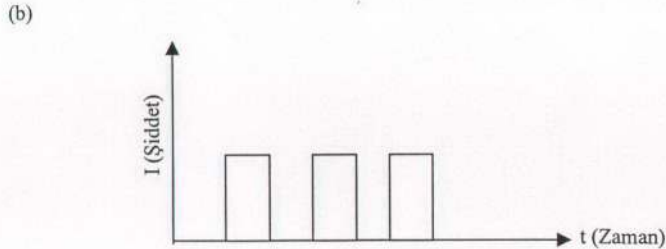
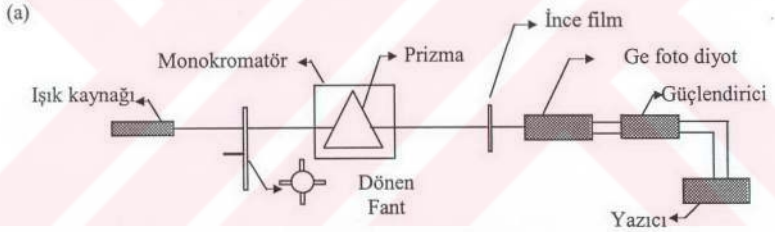
2.5. Optik Özelliklerinin Ölçülmesi

Optiksel ölçüm, yarıiletken malzemelerin band yapılarını tayin etme yollarının en önemlisini oluşturur. Yarıiletken malzemeler fotonlar ile uyarıldıkları zaman, yarıiletken malzemelerin valans bandından iletim bandına elektronik geçişler oluşur. Bu geçişler vasıtasıyla yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralığı bulunur. Optiksel ölçümler aynı zamanda örgü titreşimleri çalışmalarında da kullanılabilir. Yarıiletken malzemelerde optik özelliklerini belirlemede geçirgenlik sabiti T ölçülen önemli niceliklerden biridir. Geçirgenlik sabiti dalga boyunun fonksiyonu olarak ölçülerek T - λ eğrileri elde edilir. T geçirme ekseninin dalga boyunu kestiği nokta aracılığıyla dalga boyu (λ) belirlenir. Aşağıda verilen eşitlikte λ değeri yerine yazılarak, yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı bulunur.

$$E_s = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} eV \quad (25)$$

Ayrıca, yarıiletken malzemelerin fotoiletkenlik ölçümleri vasıtasıyla da yasak enerji aralığı, malzemede var olan kusur ve kusur kompleksleri hakkında bilgi edinilebilir.

Kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma ve kimyasal püskürtme yöntemi ile indiyum katkılanarak üretilen CdS ince filmlerin optik geçirgenliği spektrumları, oda sıcaklığında 400-1100 nm dalga boyu aralığında ölçüldü. Ölçümler, 'Lambda 2' Perkin-Elmer spektrometresi kullanılarak ölçüldü. Fotoiletkenlik ölçümlerinde ise 190-2400 nm dalga boyu aralığında "Grating Monochromator Model 77250" kullanıldı. Ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 16'da gösterilmiştir. Işık kaynağından çıkan beyaz ışık, fant yardımıyla modüle edildikten sonra monokromatöre girer. Monokromatörden atımlar şeklinde çıkan, monokromatik ışık, filmin üzerine düşer. Filmden geçen ışık, Ge fotodiyot gücünü artırarak yazıcıya ulaşır.



Şekil 16. (a) Fotoiletkenlik ölçmek için kullanılan düzenek
(b) Fant yardımıyla modüle edilmiş ışık

2.6. Elektriksel Özdirenç ve Hall katsayısı Ölçümleri

Yarıiletken malzemelerin, özdirenç ölçümlerinden yararlanarak elektriksel özellikleri hakkında bilgi edinilmektedir. Bu yolla, yarıiletken malzemelerin donör ve akseptör enerji seviyeleri belirlenebilir. Özdirenç (ρ), elektrik alanı ile akım yoğunluğu arasındaki orantı sabiti olarak tanımlanır:

$$\varepsilon = \rho J \quad (26)$$

İletkenlik cinsinden özdirenç değeri yerine yazılırsa

$$J = \sigma \varepsilon \quad (27)$$

olur. Yarıiletken malzemelerde taşıyıcı olarak hem delikler hem de elektronlar var ise özdirenç değeri

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (28)$$

eşitliği ile tanımlanır.

Yarıiletken malzemelerin özdirenç ölçümleri değişik yöntemler ile yapılmaktadır. Bu yöntemlerin içerisinde en kullanışlılarında birisi Van der Pauw yöntemidir. Van der Pauw yöntemi, serbest formlu düzlemsel plaka şeklindeki numunelerin ölçümlerinde geniş olarak kullanılmaktadır. Kısmen kapalı hacimde vakumda buharlaştırma ve kimyasal püskürtme yöntemleri ile üretilen CdS ince filmlerin özdirenç ölçümleri Van der Pauw yöntemi ile yapıldı. Özdirenç ölçümleri için, ince filmlerin kenarlarının dört noktasına vakumda indiyum buharlaştırılarak omik kontak yapıldı (Şekil 17).

Önce 1 ve 4 kontaklarından akım (I_{14}) geçirilir, 2 ve 3 kontakları arası gerilim farkı (V_{23}) ölçülür ve aşağıdaki eşitlik ile direnç (R_1) hesaplanır

$$R_1 = \frac{V_{23}}{I_{14}} \quad (29)$$

Daha sonra, 1 ve 2 kontaklarından akım (I_{12}) geçirilir, 3 ve 4 kontakları arası gerilim farkı (V_{34}) ölçülür ve R_2 direnci

$$R_2 = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (30)$$

eşitliğinden bulunur.

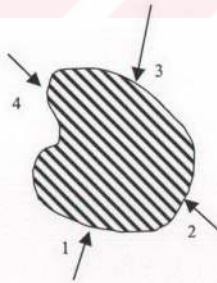
Van der Pauw [Pauw, 1958] yönteminin teorisine göre özdirenç,

$$\rho = \left[\frac{\pi d}{\ln 2} \right] \left[\frac{(R_1 + R_2)}{2} \right] f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (31)$$

bağıntısından hesaplanmaktadır. Burada d filmin kalınlığı, $f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ ise,

$$f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) = 1 - 0,3466 \left[\frac{(R_1 - R_2)}{(R_1 + R_2)} \right]^2 \quad (32)$$

ile tanımlanan Van der Pauw fonksiyonudur.



Şekil 17. Van der Pauw yöntemiyle özdirenç ölçümünde kontakların yerleştirilmesi

Bir metal **B** manyetik alanı içine yerleştirildiğinde ve içinden **j** akım yoğunluğu geçirildiğinde aşağıdaki bağıntı ile verilen enine bir **E_H** elektrik alanı meydana gelir:

$$\mathbf{E}_H = R_H \mathbf{B} \times \mathbf{j} \quad (33)$$

Bu Hall olayıdır ve R_H Hall sabiti olarak bilinir.

Deneyin geometrisi Şekil 18'de gösterilmiştir. Olayın başlangıcı manyetik alan içinde iletim elektronlarına etkiyen $-\mathbf{e}\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ Lorentz kuvvetidir. Şekil 18, x yönünde **j** akımına karşılık gelen elektronların **v** sürüklenme hızının yönünü göstermektedir. Lorentz kuvveti elektronları aşağıya doğru saptırma eğilimi gösterir ve bu da metalin alt yüzünde negatif yük yoğunluğunun hızla birikimine sebep olur. Sonuçta $-y$ yönünde meydana gelen **E_H** elektrik alanı, uçlarında elektriksel bağlantıları olan uzun bir çubukta olduğu gibi, akımın x yönünde akmasının devamına neden olur.

Böylece, $v_y = 0$ olan kararlı durumda, bu geometride elektronların hareket denkleminin x ve y bileşenleri

$$\begin{aligned} m_e v_x / \tau &= -e E_x \\ 0 &= -e(E_y - v_x B) \end{aligned} \quad (34)$$

biçimindedir. Denklem (34)'deki ikinci ifadeden v_x 'in değeri ($J_x = -en v_x$) yazılırsa

$$E_y = v_x B = \frac{j_x B}{(-ne)} \quad (35)$$

elde edilir. Denklem (33) ile karşılaştırarak

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (36)$$

sonucuna ulaşılır. Böylece Hall katsayısı negatif olmalı ve serbest elektron konsantrasyonunun doğrudan ölçümünü vermelidir. İki tip taşıyıcı bulunduran bir yarıiletken, hesaplama daha karmaşıktır. Bununla birlikte, taşıyıcının bir tipinin

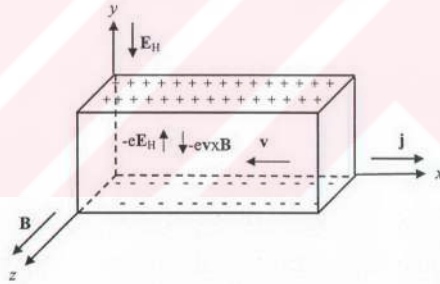
yoğunluğu çoğunlukla ötekinden daha büyüktür ve böylece Denklem (36)'daki hesaplamayı

$$\text{n-tip yarıiletkeninde (n} \gg \text{p)} \quad R_H = -\frac{1}{ne}$$

$$\text{p-tip yarıiletkeninde (p} \gg \text{n)} \quad R_H = +\frac{1}{pe} \quad (37)$$

ifadeleri doğrudan kullanabiliriz. Hall olayının işareti, böylece, çoğunluk yük taşıyıcının işareti ile belirlenir, ve R_H nin ölçülmesi taşıyıcı konsantrasyonunun belirlemesini mümkün kılar (Hook, 1991).

Kısmen kapalı hacimde vakumda buharlaştırma yöntemi ile üretilen CdS ve p-(Cu)CdS ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonları Hall ölçümleri yapılarak bulundu.



Şekil 18. Hall olayının geometrisi

2.7. Akım-Gerilim Karakteristikleri

Günümüzde değişik amaçlarla kullanılmak üzere güneş enerjisi, rüzgar enerjisi gibi çeşitli yöntemler ile enerji üretilmektedir. Üstelik bunlardan yüksek çevrilme verimi ile enerji elde edilmektedir. Enerji üretme yöntemlerine rakip olabilmek için, CdS/CdTe güneş pillerinin elektriksel karakterizasyonunun doğru bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

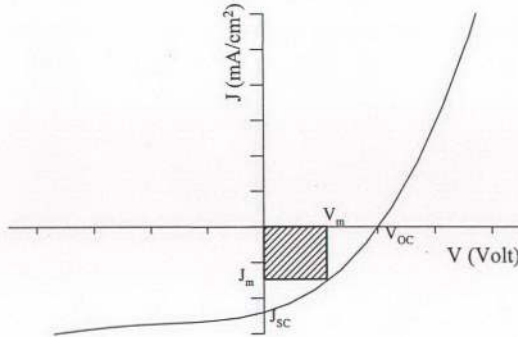
Pillerin elektriksel karakterizasyonu J-V (akım yoğunluğu-voltaj), C-V (kapasitans-voltaj), direnç, kuantum verimi gibi ölçümleri içerir. Bu ölçümler sonucunda pilin verimini etkileyen elektriksel kayıplar belirlenerek, gelecekte yapılacak çalışmalarda, bu kayıpları azaltılarak pilin verimi iyileştirilebilir. J-V karakteristik ölçümleri, pillerin karakterizasyonunda kullanılan en yaygın tekniktir. Bu teknikte Şekil 19'da görüldüğü gibi pilin akım yoğunluğu (J) voltajın (V) fonksiyonu olarak genellikle, karanlık ve aydınlanma şiddetleri altında ölçülür. Aydınlanma altında ölçülen J-V eğrisinde, V_{oc} (açık devre gerilimi), J_{sc} (kısa devre akım yoğunluğu) ve $P_{maks.}$ (Maksimum çıkış gücü) bulunur. Burada, şekilde görülen taralı alan yardımıyla $P_{maks.} = V_m \times J_m$ bulunur. Bu çıkış güç verimi $V_{oc} \times J_{sc}$ 'ye bölünerek, FF doldurma faktörü

$$FF = \frac{J_m \times V_m}{J_{oc} \times V_{oc}} \quad (38)$$

eşitliği ile hesaplandı. Buradan

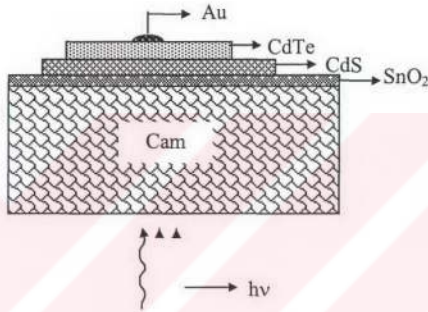
$$\eta = \frac{FF \times J_{oc} \times V_{oc}}{P} \quad (39)$$

bağıntısı kullanılarak verim hesaplandı. Burada P aydınlatılan ışığın gücüdür (Sze, 1969).

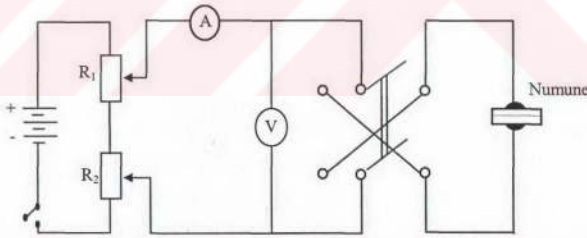


Şekil 19. Aydınlanma altında bir güneş pilinin akım-voltaj karakteristiği

Kısmen kapalı hacimde ve kimyasal püskürtme yöntemi ile üretilen CdS/CdTe güneş pillerinin akım-gerilim karakteristikleri $P = 100 \text{ mW/cm}^2$ ışık şiddetinde aydınlık ortamda ölçüldü. Şekil 20'de görüldüğü gibi, CdS/CdTe güneş pilinde aydınlatma cam/SnO₂/CdS altlık yüzeyinde yapıldı. Her iki yöntem ile elde edilen CdS/CdTe güneş pillerine, omik kontak CdTe yüzeye Au buharlaştırılarak elde edildi. Ayrıca, Cu-CdS yapıların akım-gerilim karakteristiği, karanlıkta ve 100 mW/cm^2 'lik aydınlanma şiddeti altında ölçüldü. Akım-gerilim ölçü sisteminin devre şeması Şekil 21 ile verilmektedir.



Şekil 20. CdS-CdTe güneş pilinin şematik gösterimi



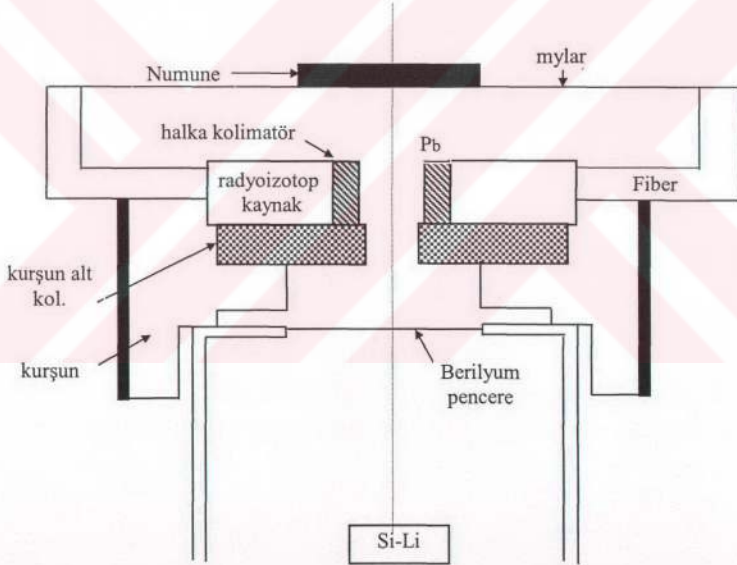
Şekil 21. Akım-gerilim karakteristiği ölçü devresi

Akım-gerilim karakteristik eğrilerinden faydalanılarak CdS/CdTe güneş pillerinin verimleri hesaplandı.

2.8. X-Işınları Floresans Analizi

X-ışınları floresans tekniği, yayınlanan karakteristik x-ışınının dalga boyu veya enerjisinin ölçülmesiyle, element hakkında bilgi verir. Bu metod önce, yayınlanmış karakteristik çizginin enerjisinin veya dalga boyunun ölçülmesiyle verilen bir elementin, nitel analiznin tayininin yapılmasını sağlar ve sonra bu çizginin şiddetinin ölçülmesiyle de elementel konsantrasyon tayin edilebilir (kantitatif) (Çevik, 1994).

Bu çalışmada kullanılan deney sisteminde, Şekil 22'de de görüldüğü gibi, Si(Li) sayacını istenmeyen dış radyasyondan korumak için kurşun kolimatör kullanıldı. Numuneyi uyarmada, kaynaktan direkt olarak dedektöre gelebilecek radyasyonu önlemek için kurşun bir kolimatör içerisine yerleştirilmiş olan halka kaynak kullanıldı.

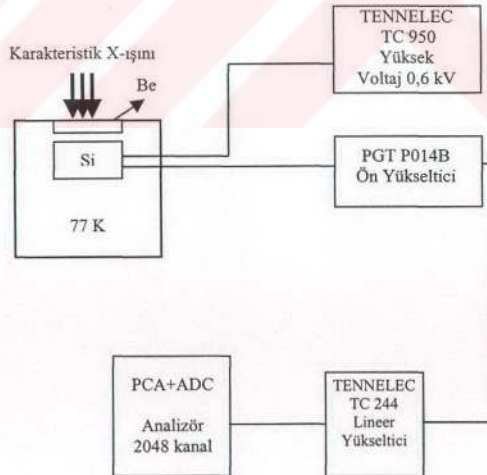


Şekil 22. X-ışınları floresans analiz sisteminin geometrisi

Karakteristik x-ışınlarını ve numuneden saçılmış radyasyonu saymak için 5,9 keV'de yarı maksimumdaki tam genişliği (FWHM) 156 eV olan bir Si(Li) sayacı kullanıldı. Si(Li)'den çıkan pulslar önce ön yükselticiden ve daha sonra lineer yükselticiden

geçirilerek çok kanallı (8192 kanallı) puls yükseklik analizöründe (MCA) kaydedildi. Şekil 23'te deney sisteminin blok diyagramı görülmektedir. Sayma işlemlerinde MCA'nın 2048 kanalı kullanıldı. Cu atomlarını uyarmak için koherent enerjisi 59,5 keV olan Am-241 halka kaynağı kullanıldı.

Cu-CdS yapıların He-Ne lazer ile tavlınması esnasında, Cu atomları CdS ince filme difüz etmektedir. CdS ince filmde Cu atomlarının konsantrasyon dağılımını ölçmek için X-ışını floresans metodu kullanıldı. CdS ince filmin kalınlığı boyunca Cu atomlarının konsantrasyonunu analiz etmek için, önce CdS ince film üzerinden serbest Cu atomları elmas pasta kullanılarak çıkarıldı. Sonra CdS ince film yüzeyinden yaklaşık olarak 0,2µm kalınlığında katmanlar çıkarıldı. Her film çıkarmadan önce ve sonra numuneden çıkan karakteristik x-ışınları sistemde sayılarak 8,04 keV'de CuK_α pikinin şiddetinde meydana gelen değişim ölçüldü. Her sayımda CuK_α pikinin net alanı, zamana bölünerek normalizasyon yapıldı. Bakır pikinin şiddetinin sayısından bakır atomlarının (bakır konsantrasyonuna) sayısına geçmek için, CdS ince film üzerine saf Cu buharlaştırılarak kalibrasyon yapıldı. Daha sonra numune içindeki Cu konsantrasyonunun kalınlıkla dağılımının hesabına geçildi.



Şekil 23. X-ışınları floresans deney sisteminin blok diyagramı

2.9. Taramalı Elektron Mikroskobu Ölçümleri

Kimyasal Püskürtme Yöntemi ile üretilen $Cd_{1-x}In_xS$ ($0 \leq x \leq 0,20$) ince filmlerin mikroyapılan ve yüzey morfolojileri hakkında bilgi edinmek için JEOL JSM-5610 model taramalı elektron mikroskobu (Şekil 24) ile mikrografları çekildi. Büyütme oranları 500 ile 3000 olarak seçildi. İnce filmlerin yüzeyinde oluşan yeni fazların kompozisyonu hakkında bilgi bu sistemde mevcut olan x-ışını spektrometresi (EDX) ile incelendi.

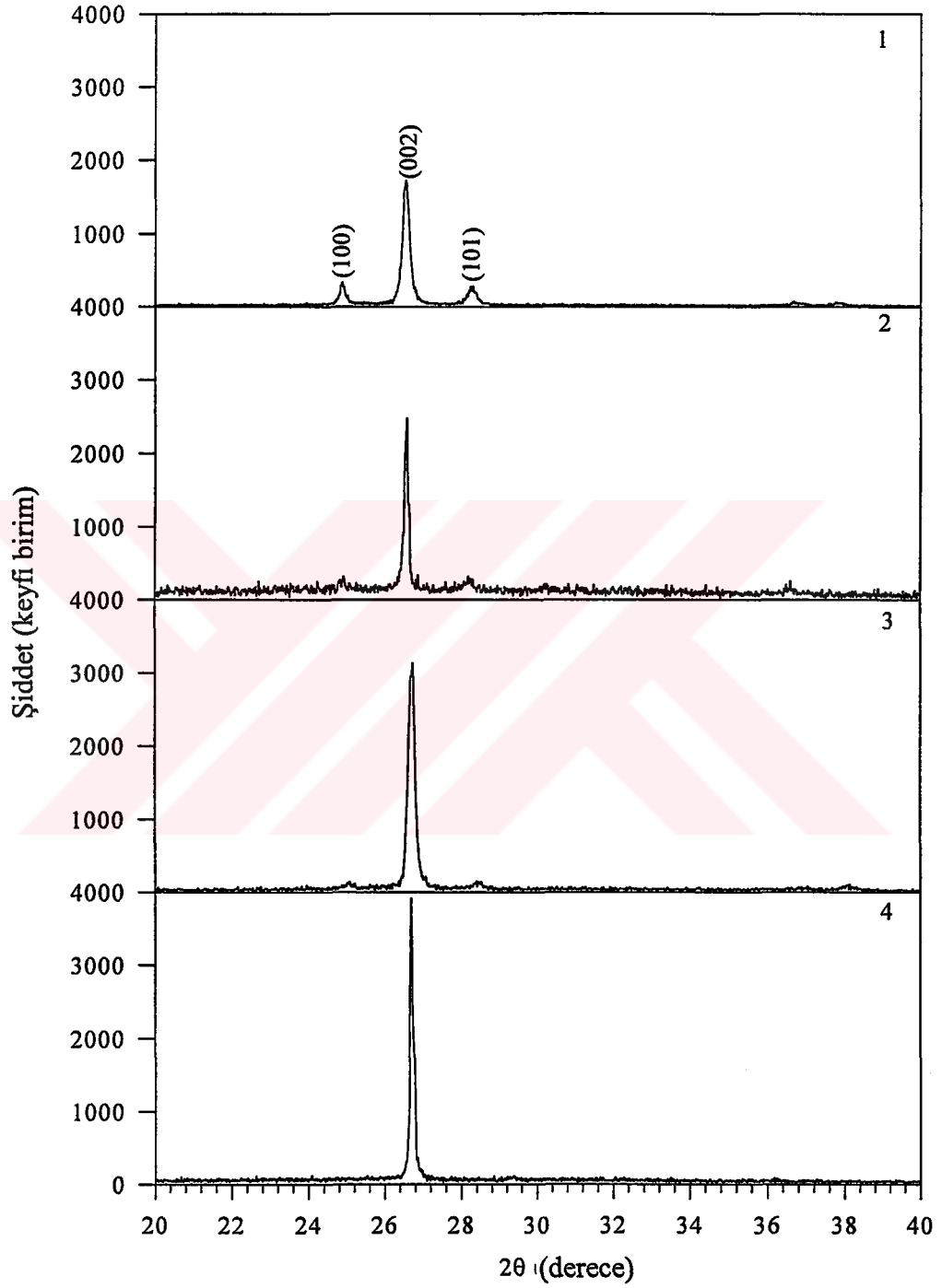


Şekil 24. JOEL JSM-5610 Model Taramalı Elektron Mikroskobu

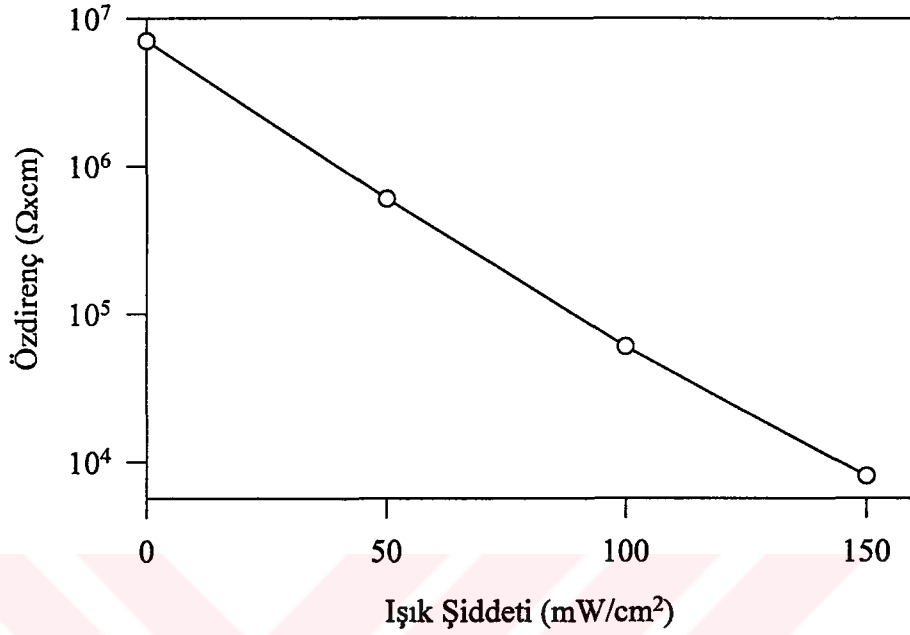
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Işınlanmanın CdS İnce Filmlerine ve CdS/CdTe Güneş Pillerine Etkisi

Şekil 25'te kısmen kapalı hacimde vakumda buharlaştırma yöntemiyle, (1) karanlık, (2) 50 mW/cm^2 , (3) 100 mW/cm^2 ve (4) 150 mW/cm^2 lik ışık şiddetleri altında, üretilen CdS ince filmlerin x-ışınları kırınım desenleri verildi. Şekilde görüldüğü gibi, ışık şiddeti altında elde edilen CdS ince filmler altlığa dikey doğrultuda, c-ekseni yönünde, büyüdü. Karanlıkta elde edilen CdS filme ait, (1) nolu şekilde (002) yansıma düzlemi pikinin yanı sıra (100) ve (101) düzlemlerine ait küçük pikler de görüldü. Bu filmde oluşan piklerin uygulanan beyaz ışığın şiddetinin artması ile şiddetleri azalarak kaybolduğu görüldü. Ayrıca, ışık şiddetinin artmasıyla (002) yansıma düzleminin şiddetinde belirgin bir artış gözlemlendi. Bu artış, ışığın etkisiyle Cd ve S atomlarının yüzey hareketliliğinin artışıyla açıklanabilir. Işık özellikle yüksek buhar basıncına sahip CdS, ZnTe gibi yarıiletken bileşiklerin karakteristik özellikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir (Chu vd, 1995). Işığın etkisi ile filmler hem büyük hızla hem de düşük sıcaklıklarda büyütülmektedir (İrrine vd, 1987; Mitchell vd, 1978; Dzhafarov, 1993). Kalafi ve arkadaşları (Kalafi vd, 1996) kimyasal püskürtme yöntemi ile CdS ince filmleri büyütülme esnasında farklı dalga boyunda, aynı şiddette ışınlar maruz bırakarak büyüttüler. Bizim çalışmamızın aksine, maruz bırakılan ışığın dalga boyunun küçülmesi ile (002) düzlemine ait piklerin şiddetlerinde azalma ve (101) pikinin şiddetinde artma gözlemlendi. Ullrich ve arkadaşları (Ullrich vd, 1998) lazer ile buharlaşma yöntemi ile farklı lazer enerjilerinde CdS ince filmler ürettir. Kalafi ve arkadaşlarının elde ettikleri sonuçlara benzer sonuçlar elde ettiler. Cheon ve arkadaşlarının (Cheon vd, 1997) kimyasal banyoda CdS'ün çöktürülmesi esnasında ışınlanmaya maruz bırakarak elde ettikleri CdS ince filmlerin x-ışınları kırınım desenleri, bizim çalışmamız ile uyum içerisindedir. Bu çalışmada ışık şiddetinin artması ile CdS ince filmlerin (002) yansıma düzlemi şiddetinde artmalar gözlemlenmiştir. Bu farklılığın sebebi, muhtemelen, CdS ince filmlerin farklı yöntemler ile büyütülmesi esnasında, farklı yüzey hareketliliği sahip olmasından kaynaklanabilir. Şekil 25'de ışık şiddetinin artması ile (002) düzlemine ait merkez pikin konumu biraz sağa doğru kaydığı ve yarı maksimumdaki tam genişliğin (FWHM) küçüldüğü görüldü.



Şekil 25. CdS ince filmlerin x-ışınları kırınım desenleri, (1) karanlık, (2) 50 mW/cm², (3) 100 mW/cm² ve (4) 150 mW/cm²



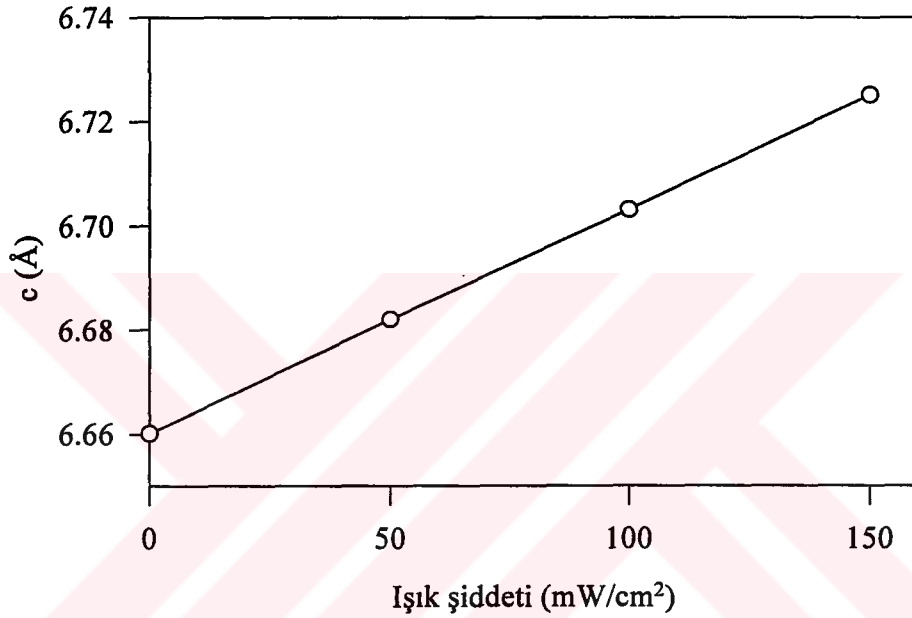
Şekil 26. Işınlama şiddetinin fonksiyonu olarak CdS ince filmlerin özdirencinin değişim grafiği

Işık şiddetinin artması ile pikin sağa kayması ve yarı maksimumdaki tam genişliğin (FWHM) küçülmesi tane çaplarının büyüdüğünü göstermektedir (Bayhan, 1998).

Şekil 26'da CdS ince filmlerin uygulanan ışık şiddetinin fonksiyonu olarak özdirencinin değişim eğrisi verildi. Şekilde görüldüğü gibi, ışık şiddetinin artması ile özdirenç değerleri küçüldü. Özdirençteki bu azalma, CdS ince filmlerin hekzagonal kristal yapısının tek yönde büyümesi sonucu taneler arası potansiyel engelin azalması ve iletkenliğin daha iyi olması ile açıklandı (Perrin vd, 1996). Şekil 27'de ise CdS ince filmlerin uygulanan ışık şiddeti ile c örgü parametresinin değişimi verildi. Bu şekilde ışık şiddetinin artması ile filmlerin (002) yansıma düzlemi doğrultusunda büyümesinin bir sonucu, c örgü parametresinin değeri artmaktadır.

Şekil 28'de farklı ışık şiddetleri altında üretilen CdS ince filmlerin fotoiletkenlik spektrumları gösterilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi, özden (intrinsic) soğurma bölgesindeki fotoiletkenlik beyaz ışığın şiddetinin artması ile arttı. 150 mW/cm²'lik ışık şiddeti altında yapılan CdS ince filmlerin fotoiletkenlik şiddeti (4 nolu eğri), karanlıkta hazırlanandan (1 nolu eğri) yaklaşık 2 kat daha büyüktür. Aynı zamanda, ışık şiddetinin

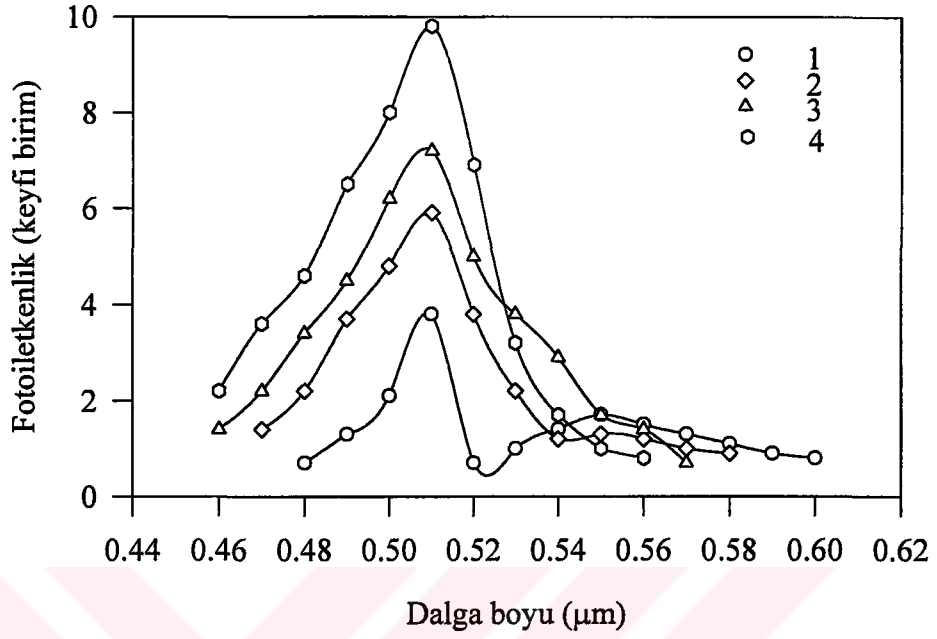
artmasıyla piklerin genişliklerinde artmalar görüldü. Karanlıkta hazırlanan (1 nolu eğri) CdS ince filminin yaklaşık $\lambda=0,55 \mu\text{m}$ civarındaki pikinin geniş olması, filmin büyütülmesi esnasında oluşan $[V_{Cd}^- + Cd_i^+]^0$, $[V_{Cd}^{2-} + Cd_S^{2+}]^0$ gibi doğal kusurlardan kaynaklanmaktadır (Bidadi vd, 1996). Bu pikin, ışık şiddetinin artması ile küçük dalga boylarına kayarak kaybolduğu görüldü.



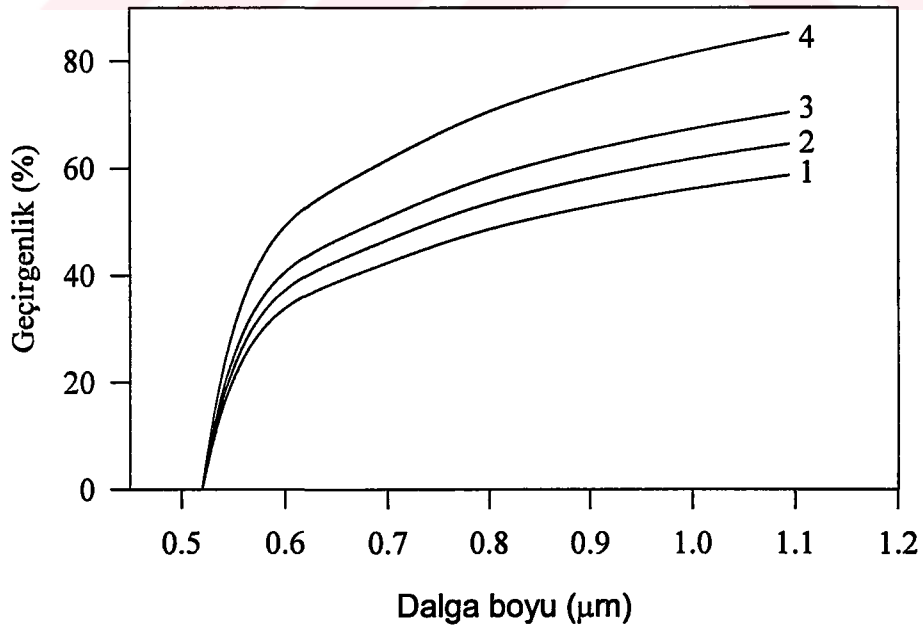
Şekil 27. Işık şiddeti ile c örgü parametresi değişimi

Şekil 29, n-tipi CdS filminin geçirme spektrumunu göstermektedir. Spektrumun kenarının $\lambda \approx 515 \text{ nm}$ 'ye yerleştiği, bunun da CdS'in temel soğurma kenarına ($E_g \approx 2,41 \text{ eV}$) karşılık geldiği bilinmektedir. Bu şekilde gösterildiği gibi, ışık şiddetinin büyümesi ile geçirgenlik önemli bir derecede arttı. Işık şiddetinin artması ile CdS ince filmler düz ve homojen bir şekilde elde edildi. Bu geçirme spektrumundaki artış yüzeyin difüzyon yansımalarının azalması ile açıklanabilir. Bu karakteristiğe sahip CdS ince filmler, yüksek verimli güneş pilleri elde etmek için pencere katmanı olarak kullanılmaktadır.

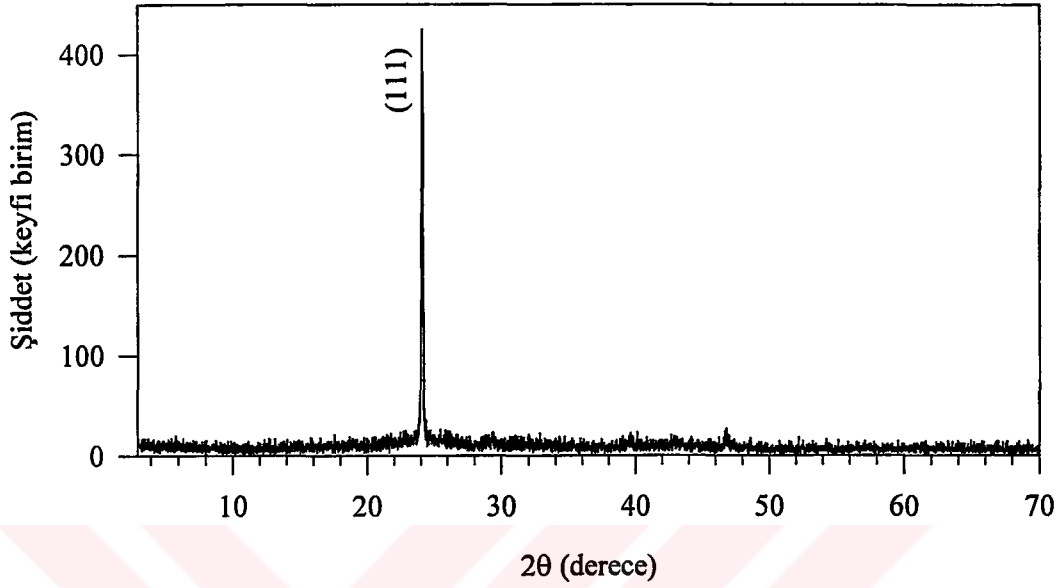
Kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma yöntemi ile elde edilen CdTe ince filminin x-ışınları kırınım deseni Şekil 30 ile verildi. CdTe ince filmi (111) yansıma düzlemleri doğrultusunda kübik yapıda büyüdüğü görüldü. Kübik yapıda büyüyen CdTe ince filminin örgü parametresi $a = 4,38 \text{ Å}$ olarak hesaplandı.



Şekil 28. (1) karanlık, (2) 50 mW/cm², (3) 100 mW/cm² ve (4) 150 mW/cm²'lik ışık şiddetinde büyütülen CdS ince filmlerin fotoiletkenlik spektrumu



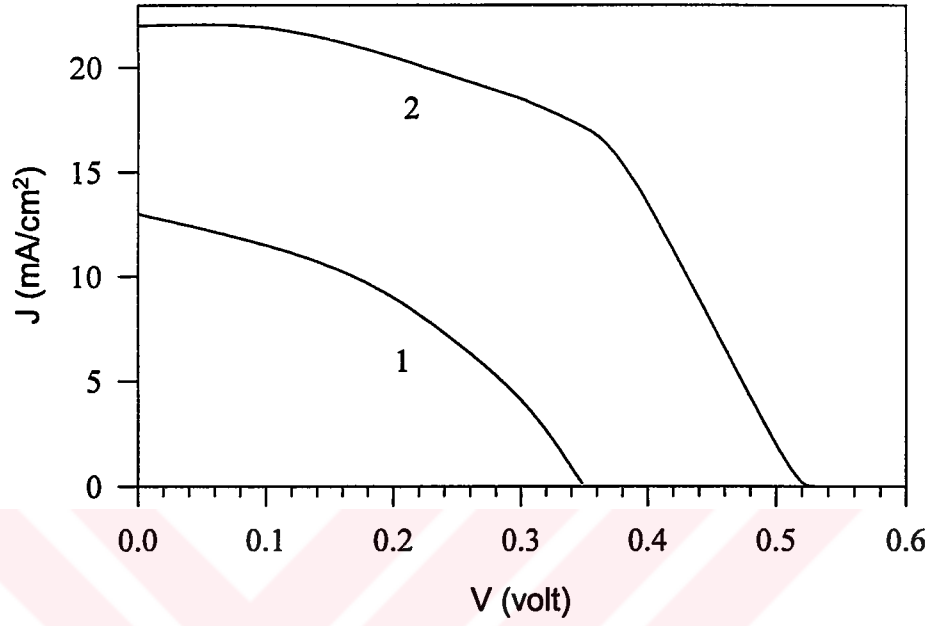
Şekil 29. (1) karanlık, (2) 50 mW/cm², (3) 100 mW/cm² ve (4) 150 mW/cm²'lik ışık şiddetinde büyütülen CdS ince filmlerin geçirgenlik spektrumu



Şekil 30. CdTe ince filmin x-ışınları kırınım deseni

Şekil 31’de, (1) karanlıkta ve (2) 150 mW/cm^2 ışık şiddetinde büyütülen CdS ince filmler üzerinde üretilen CdS/CdTe güneş pillerinin, 100 mW/cm^2 ışık kaynağı altında ölçülen, akım yoğunluğu-voltaj eğrileri verildi. Karanlıkta üretilen CdS ince film üzerinde elde edilen CdS/CdTe güneş pilinin verimi (η) % 1,8 iken, 150 mW/cm^2 ışınlama şiddeti altında büyütülen CdS ince film üzerinde yapılan CdS/CdTe güneş pilinin veriminin (η) % 7,3 olduğu görüldü.

CdS/CdTe güneş pillerinin karakteristik parametreleri Çizelge 4’te verilmektedir. Bu çizelgede görüldüğü gibi, karanlıkta üretilen CdS üzerinde elde edilen güneş pilinin karakteristik parametreler, 150 mW/cm^2 ’lik ışık şiddetinde büyütülen CdS üzerine yapılan güneş pillerinden daha düşüktür. Bu farklılıklar üretim sırasında ışınlamayla seri dirençlerin küçülmesi ve yüksek optiksel geçirme değerleri ile açıklanabilir.



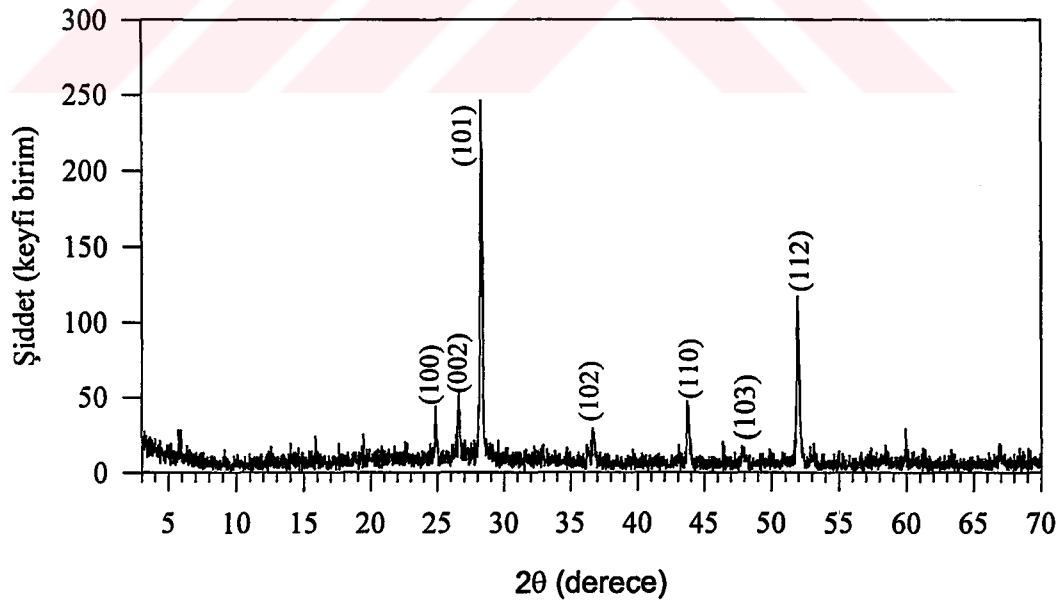
Şekil 31. CdS/CdTe güneş pillerinin 100 mW/cm^2 ışık kaynağı altında ölçülen akım yoğunluğu-voltaj eğrileri; (1) Karanlık, (2) 150 mW/cm^2 ışınlama şiddetinde elde edilen CdS ince filmler için

Çizelge 4. CdS/CdTe güneş pillerinin 100 mW/cm^2 ışık kaynağı altında ölçülen karakteristik parametreleri

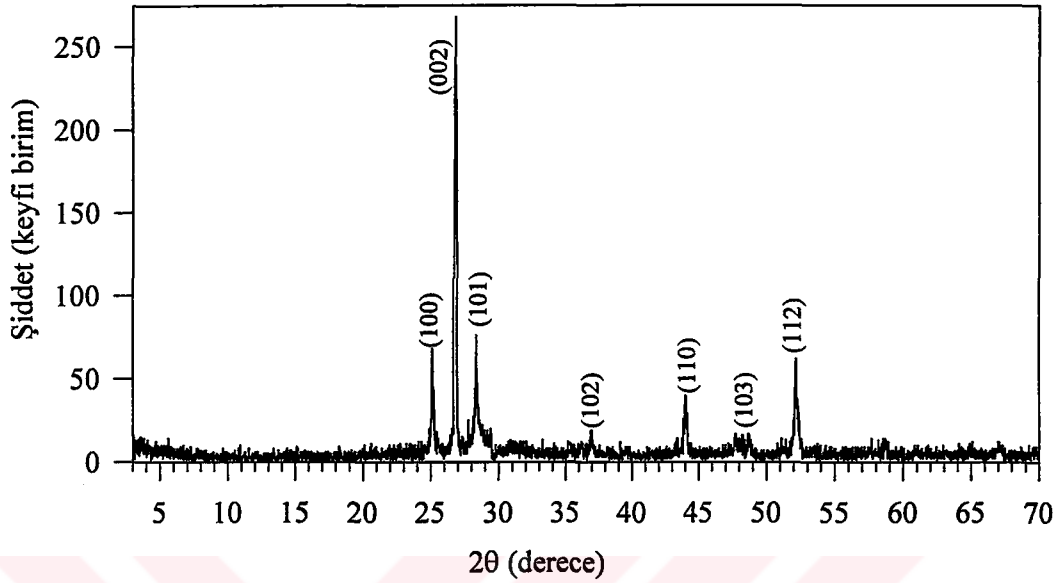
CdS/CdTe'nin parametreleri	Aydınlanma (100 mW/cm^2)	
	Karanlık	150 mW/cm^2
V_{oc} (Volt)	0,35	0,52
J_{sc} (mA/cm^2)	14	22
FF	0,41	0,64
η (%)	1,8	7,3

3.2. İndiyum Katkısının CdS İnce Filmlere ve CdS/CdTe Güneş Pillerine Etkisi

Şekil 32 ve 33’de kimyasal püskürtme yöntemiyle sırasıyla cam ve cam/SnO₂ altlıklar (400°C altlık sıcaklığında) üzerinde üretilen CdS ince filmlerin $3^{\circ} \leq 2\theta \leq 70^{\circ}$ aralığında x-ışınları kırınım desenleri verildi. Cam amorf yapıya sahip iken, cam/SnO₂ hekzagonal yapıda ve (002) yansıma düzlemleri doğrultusunda yönelime sahiptir. Şekil 32 ve 33’de görüldüğü gibi cam üzerinde büyütülen CdS ince filmler (101) düzleminde *c* eksenine paralel büyürken, cam/SnO₂ altlıklar üzerinde büyütülen CdS filmler (002) düzleminde *c* eksenine dikey büyümektedir. Bu sonuçlar altlığın türünün filmlerin büyütülmesinde, altlık üzerinde elde edilmek istenen ince filmin yapısal özelliklerini birinci derece etkilediğini gösterir. Ayrıca, CdS optik pencere katmanı *c* eksenine dik (002) yansıma düzleminde hekzagonal yapıda büyümesi, CdS/CdTe güneş pillerinin karakteristik parametrelerini iyileştirmektedir (Kaur vd, 1980).



Şekil 32. Cam altlık üzerinde büyütülen CdS ince filminin x-ışınları kırınım deseni



Şekil 33. Cam/SnO₂ altlık üzerinde büyütülen CdS ince filminin x-ışınları kırınım deseni

Şekil 34’de cam/SnO₂ altlıklar üzerinde büyütülen, Cd_{1-x}In_xS (0≤x≤0,15) ince filmlerin 20°≤2θ≤55° aralığında x-ışınları kırınım desenleri verildi. Şekilde görüldüğü gibi, en şiddetli pik, 2θ = 26,96° de gözükmemektedir ve bu CdS bileşiğinin karakteristik (002) pikidir. CdS bileşiğinin diğer karakteristik (100), (101), (102), (110), (103) ve (112) pikleri sırasıyla 2θ = 25,26°, 2θ = 28,48°, 2θ = 37,04°, 2θ = 44,10°, 2θ = 48,10° ve 2θ = 52,32° de görülmektedir. Zelaya-Angel ve arkadaşlarının (Zelaya-Angel vd, 1996) yaptığı çalışmanın aksine (kübik), bu çalışmada Cd_{1-x}In_xS ince filmler kübik ve hekzagonal fazın karışımı olarak büyüdü. Short ve Steward tarafında önerilen, aşağıdaki denklem yardımıyla CdS ince filmlerde kübik ve hekzagonal faz yüzdeleri nicel olarak hesaplandı (Short, Steward, 1959).

$$H = \frac{1,96R}{0,96R + 1} \quad (40)$$

Burada R, (103) pik şiddetinin (110) pik şiddetine oranıdır. Çizelge 5’ten Cd_{1-x}In_xS ince filmlerin kübik ve hekzagonal faz yüzde oranları verilmektedir. Çizelge 5’ten görüldüğü gibi, In atomlarının konsantrasyonunun artması ile hekzagonal fazın yüzde oranı arttı. Ancak,

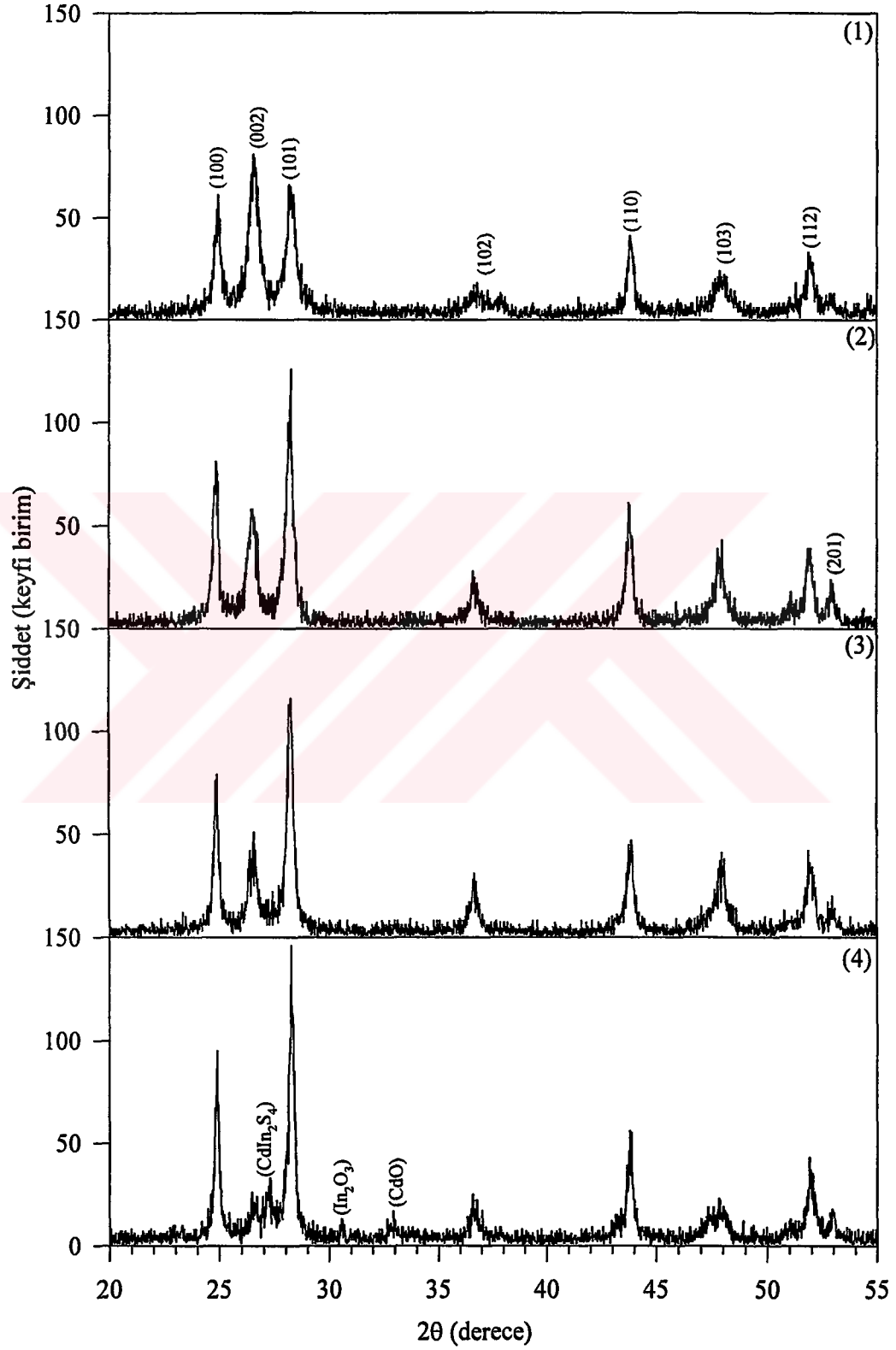
Şekil 34’de x-ışınları kırınım desenlerinde görüldüğü gibi $x = 0,15$ In oranında itibaren CdIn_2S_4 , CdO ve In_2O_3 yabancı fazların oluşmasından dolayı, bu formül ile faz yüzdeleri nicel olarak hesaplanamadı (Patil vd, 1999).

Çizelge 5. $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ($0 \leq x \leq 0,10$) ince filmlerde kübik ve hekzagonal faz oranları

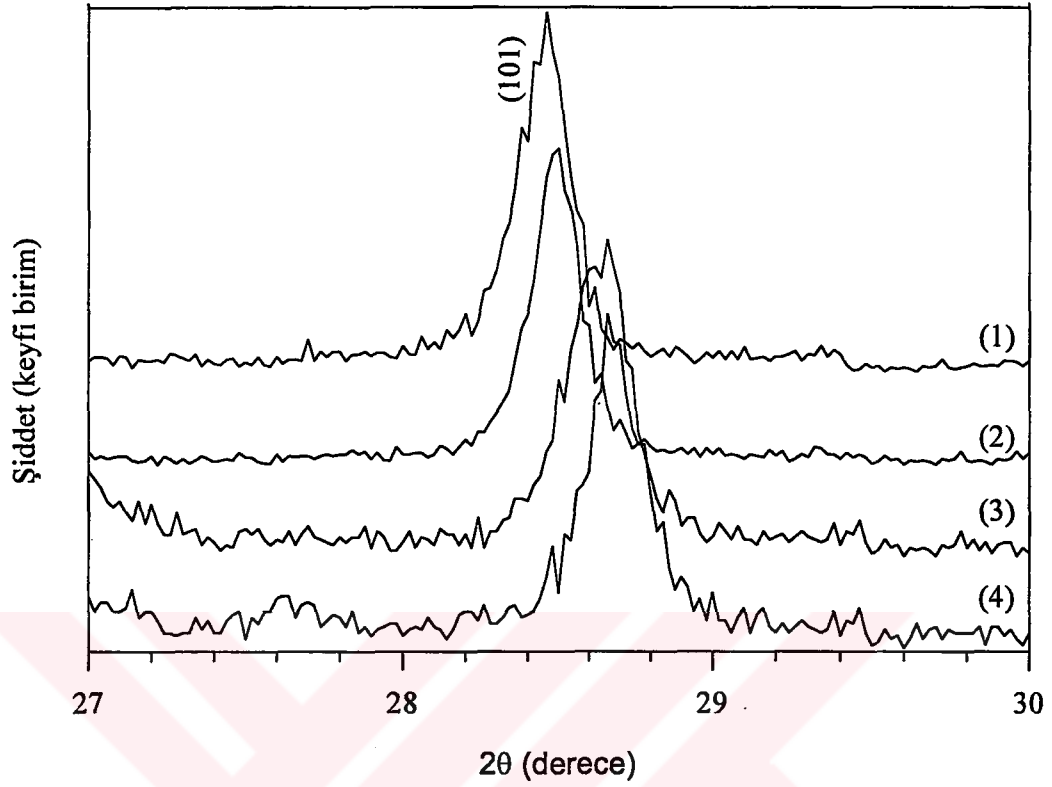
CdS ince film	Kristal Yapı	
	Kübik	Hekzagonal
Saf	% 29,2	% 70,8
0,05 In	% 17,1	% 82,9
0,10 In	% 11	% 89

Yul Kim ve arkadaşları (Yul Kim vd, 1993) CdS polikristal tozuna değişik oranlarda In ilave ederek ve bunları aynı anda vakumda buharlaştırarak CdS(In) ince filmler elde ettiler. Bu çalışmanın x-ışınları kırınım desenleri, bizim çalışmamızın x-ışınları kırınım desenleri ile uyum içerisindedir. In atomlarının konsantrasyonunun artmasıyla (002) yansıma düzlemi şiddeti küçüldü ve (101) yansıma düzlemi şiddeti arttı. In atomlarının konsantrasyonunun artması ile (002) düzlemi şiddetinin (101) düzlemi şiddetine oranı lineer olarak azaldı. $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ince filmlerde In atomlarının konsantrasyonunun ($x = 0,15$) artmasıyla CdIn_2S_4 , CdO ve In_2O_3 fazlarının oluştuğu görüldü.

Şekil 35’te In atomlarının konsantrasyonunun artması ile karakteristik (101) pikin merkezi konumunun değişimi verildi. In atomlarının konsantrasyonunun artması ile karakteristik pikin merkezi büyük açılara doğru kaydı. Bu kayma In atomlarının CdS’ün örgüsü içine girmesinden kaynaklanan örgü deformasyonunun bir sonucu olabilir. Ayrıca iyonik yarıçap farklılıkları kristal örgü içerisinde deformasyonlar oluşturabilir (Palafox vd, 1998).



Şekil 34. Cam/ SnO_2 altlık üzerinde büyütülen $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ($0 \leq x \leq 0,15$) ince filmlerin x-ışınları kırınım deseni 1) % 0; 2) % 0,05; 3) % 0,10; 4) % 0,15



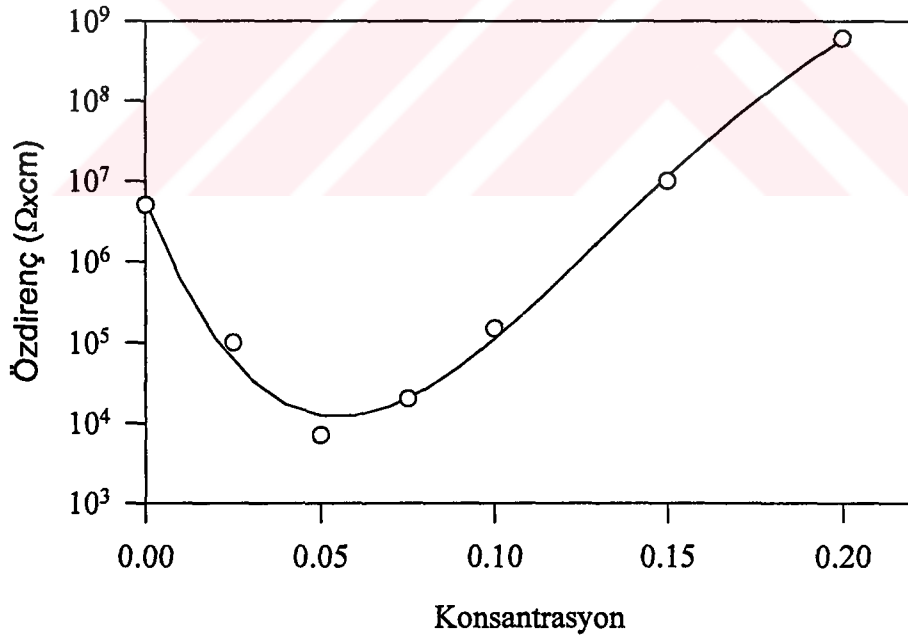
Şekil 35. $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ($0 \leq x \leq 0,15$) ince filmlerin x-ışınları kırınım deseni 1) % 0; 2) % 0,05; 3) % 0,10; 4) % 0,15

Çizelge 6’da In katkılanan CdS ince filmlerin, indiyum konsantrasyonuna bağlı olarak a ve c parametrelerinin değişimi verildi. In atomlarının konsantrasyonunun artması ile a ve c parametrelerinde lineer olarak azalmalar görüldü. Yarıiletken malzemelerin örgü parametreleri azalırken, yasak enerji aralığının arttığı bilinmektedir (Lozada-Moreles vd, 1998)

Çizelge 6. In konsantrasyona bağlı olarak a ve c parametresinin değişimi

$\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ($0 \leq x \leq 0,15$)	a (Å)	C (Å)
$x = 0$	4,10	6,64
$x = 0,05$	4,09	6,63
$x = 0,10$	4,08	6,61
$x = 0,15$	4,05	6,58

Şekil 36’da In konsantrasyonu ile öz direncin değişimi eğrisi verildi. Şekilden de görüldüğü gibi, In atomlarının konsantrasyonunun artması ile öz direnç önce düştü, sonra tekrar yükseldi. $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ince filmlerinde en düşük direnç yaklaşık $x = 0,05$ oranı civarında $10^4 \Omega\text{cm}$ olarak ölçüldü. In atomlarının konsantrasyonunun artması ile öz direnç değerinin küçülmesi, In atomlarının CdS bileşiğine katkı etkisiyle açıklanabilir. CdS ince filmlerin büyütülmesi esnasında oluşan doğal kusurlar (Cd boşlukları, S boşlukları vs.) taşıyıcıların taşınmasında bir potansiyel engel oluştururlar. Düşük, In atom konsantrasyonunda ($x \leq 0,05$) In atomları kadmiyum boşluklarına yerleşerek, bu kusur yoğunluğunu azaltmaktadır. Yani, CdS bileşiğine In katkısı neticesinde, tane sınırlarında potansiyel engellerin azalmasının sonucu olarak öz direnç değerleri küçülmektedir. Öz direnç değerinin bir minimum değerden sonra tekrar artması ise tane sınırlarında arasında oluşan CdIn_2S_4 fazı ve $[\text{In}_{\text{Cd}}+\text{V}_{\text{Cd}}]$ kusur kompleksinin oluşması ile açıklanmaktadır (Palafox vd, 1998; Mohamed vd, 2002).



Şekil 36. $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ($0 \leq x \leq 0,15$) ince filmlerin In konsantrasyonu-öz direnç değişimi

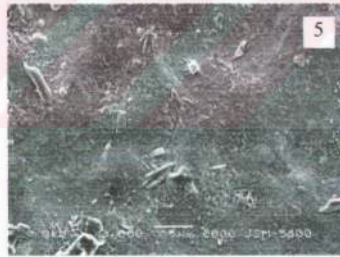
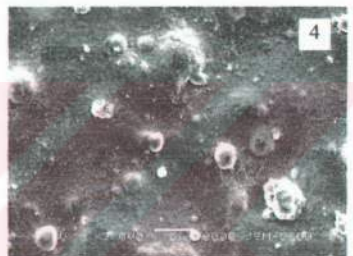
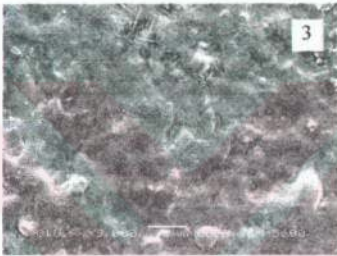
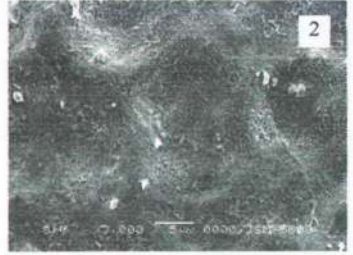
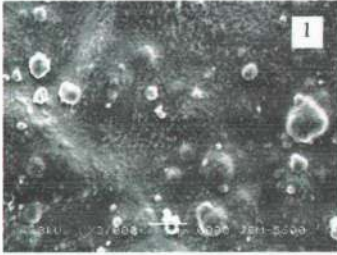
Çizelge 7’de $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ince filmlerin EDX analizleri verildi. Çizelgedeki teorik ve deneysel veriler arasında farklılıklar görülmektedir. Filmlerin büyütülmesi esnasında çözeltiye eşit miktarda S katılmasına rağmen, deneysel verilerde S azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi, muhtemelen In atomlarının S boşluklarına yerleşmesinden

kaynaklanmaktadır (Takashi vd, 2001). Ayrıca, Cd, S ve In atomlarının yüzdeleri karşılaştırıldığında, deneysel veriler ile teorik veriler arasında da belirgin bir fark göze çarpmaktadır. Benzer sonuçları, Ramaiah ve arkadaşları (Ramaiah vd, 1998) CdS ince filmleri, farklı Cd:S oranlar kullanarak kimyasal püskürtme yöntemi ile elde ettiler. Çözeltide Cd:S oranını 1:1 olarak hazırladıklarında filmlerde bu oranı 1:0,7 buldular. Ancak, çözeltide Cd:S oranını 1:3 hazırladıkları zaman filmlerde 1:1 oranını elde ettiler. Bunun nedeni, atomlar altlık üzerinde yoğunlaşarak yapıyı oluştururken yapıya girmemiş serbest atomlar farklı saçılma sıcaklıklarına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü, kimyasal püskürtme yönteminde, serbest Cd ve S atomlarının altlıkta saçılma sıcaklığı sırasıyla 470°K ve 370°K dir. Bu yüzden Cd:S oranını veya altlık sıcaklığını ayarlayarak yapıyı oluşturan bileşiklerin konsantrasyonlarını ayarlamak mümkün olmaktadır.

Çizelge 7. $Cd_{1-x}In_xS$ ince filmlerin EDX analizleri

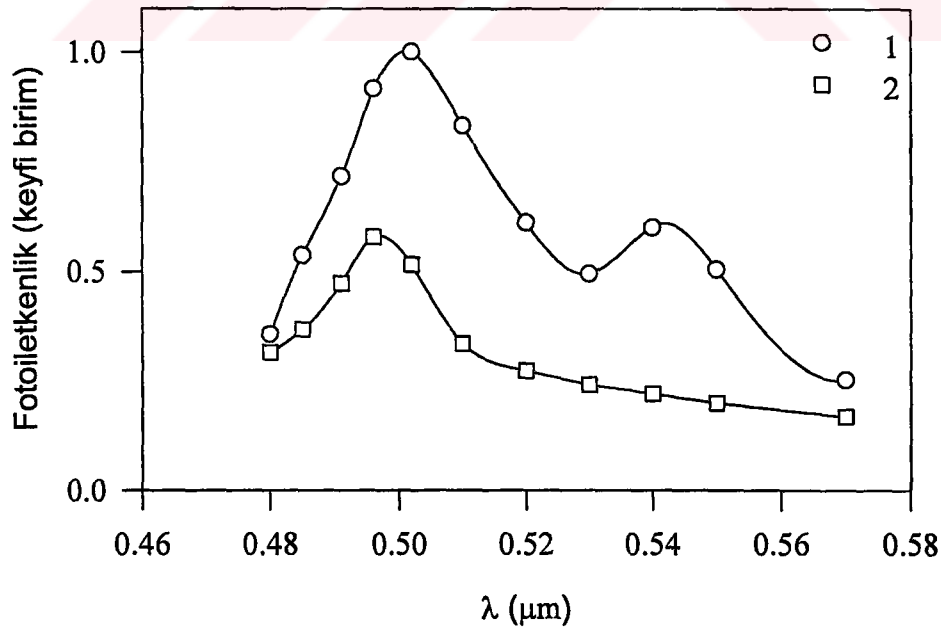
$Cd_{1-x}In_xS$ ($0 \leq x \leq 0,15$)	In (%)		Cd (%)		S (%)	
	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel
x = 0	-	-	77,8	83,7	22,1	16,2
x = 0,05	4	14,7	73,8	70,5	22,1	14,6
x = 0,10	7,9	19,5	69,9	62,3	22,1	12,2
x = 0,15	12	32	66	56,6	22,1	10,8

Şekil 37’de In katkılanan CdS ince filmlerin taramalı elektron mikrografları (SEM) görülmektedir. Bu şekillerde görüldüğü gibi, In atomlarının konsantrasyonuna bağlı olarak filmlerin yüzey morfolojisinde değişiklikler görülmektedir. x = 0,05 In katkı yapılan CdS ince filmin yüzey morfolojisinin daha homojen olduğu ve x = 0,20 In katkı yapılan ince filmin yüzey morfolojisi tamamen iğne yapıya dönüştüğü görülmektedir.



Şekil 37. $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ($0 \leq x \leq 0,20$) ince filmlerin taramalı elektron mikroskobu mikrografları 1) % 0; 2) % 0,05; 3) % 0,10; 4) % 0,15; 5) % 0,20

Şekil 38’de saf CdS ve $x = 0,05$ oranında In katkı yapılarak büyütülen CdS ince filmlerin oda sıcaklığında (300 K) fotoiletkenlik spektrumları verildi. CdS ince filmlerde In atomlarının konsantrasyonlarının artmasıyla ($x > 0,05$) ışığa duyarlılık kayboldu ve bu nedenle fotoiletkenlik spektrum ölçüleri alınamadı. Bu şekilden de görüldüğü gibi, In katkı yapılmayan CdS ince filmde $\lambda = 0,51 \mu\text{m}$ (öz-fotoiletkenlik) ve $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ dalga boylarında pikler görülürken, In katkılanan CdS ince filmin sadece $\lambda = 0,51 \mu\text{m}$ dalga boyunda pik görüldü. Ayrıca, şekilden In katkılanan ($x = 0,05$) CdS ince filmde foto-akım değerinin de azaldığı görülmektedir (Riyad, Bitar, 2000). Bunun sebebi, CdS ince filmlerin büyütülmesi esnasında oluşan ışığa duyarlı katyon boşluklarından (Cd boşlukları) kaynaklanmaktadır. Bu boşlukların oluşturduğu kusur ve kusur kompleksleri kristal yapıda hızlı (s) ve düşük hızlı (r) rekombinasyon merkezleri meydana getirmektedir. Saf CdS ince filmlerde katyon boşluklarının ($\lambda = 0,55 \mu\text{m}$) oluşturduğu rekombinasyon merkezlerinin düşük hızlı (r) olduğu düşünülmektedir. CdS ince filmde In atom konsantrasyonunun artmasıyla katyon boşluklarının konsantrasyonu azaldığı için, $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ dalga boyundaki pik kayıp olmaktadır.



Şekil 38. $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ince filmlerin fotoiletkenlik spektrumu, 1) saf CdS ve 2) $x = 0,05$ In

Ayrıca, In atom konsantrasyonunun artmasıyla kristal yapıda hızlı rekombinasyon (s) merkezlerinin konsantrasyonunun da azaldığı düşünülmektedir. Muhtemelen s-merkezlerinin konsantrasyonunun azalmasının sebebi, CdIn_2S_4 fazının oluşmasıdır (Bleil vd. 1964)

Şekil 39'da In katkılanarak büyütülen CdS ince filmlerin geçirgenlik spektrumları verilmektedir. Burada görüldüğü gibi, In atomlarının konsantrasyonunun artmasıyla CdS ince filmlerin şiddetlerinde lineerlikte sapmalar ve yasak enerji aralığında bir miktar artma görüldü. Düşük In atom konsantrasyonunda ($x=0,05$), In atomları Cd boşluklarına yerleşerek geçirgenlik spektrumunda artmalara neden olurken, yüksek In atom konsantrasyonunda ($x \geq 0,10$) ise yabancı fazların ve kusur komplekslerinin oluşması sonucu geçirgenlik spektrumunda azalmalara sebep olmaktadır (Desnica vd, 1999).

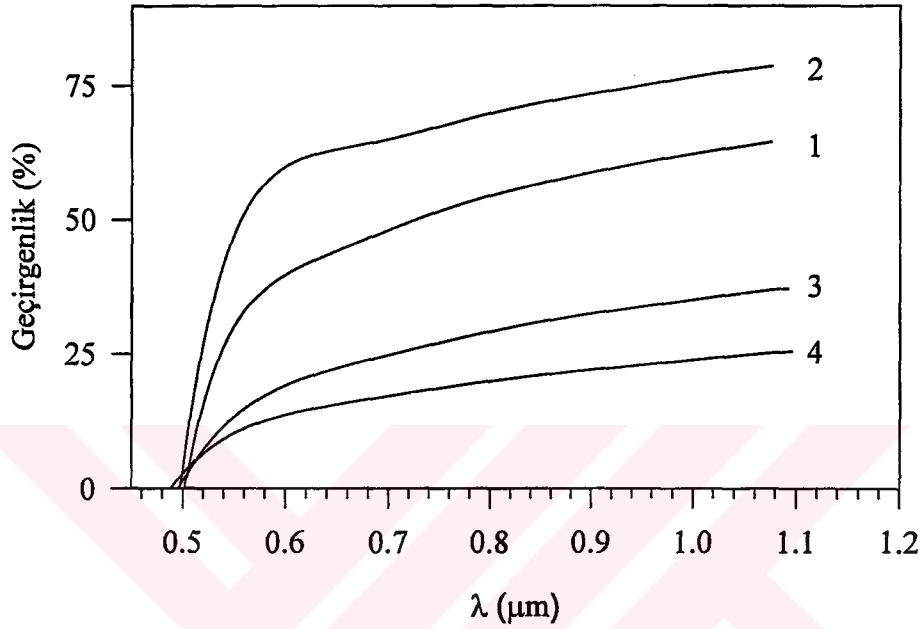
In atomlarının konsantrasyonunun artması ile $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ince filmlerin yasak enerji aralığının bir miktar büyüdüğü görüldü. In katkısının özden karakterdeki CdS malzemesini n-tipine dönüştürdüğü bilinmektedir (George vd, 1996). CdS'e, In katkısının bir sonucu olarak iletkenlik bandının biraz altında (0,03 eV) donör seviyeleri oluşmaktadır. In katkı konsantrasyonu arttığı zaman, dejenere olmuş bir yarıiletken donör seviyeleri iletkenlik bandı ile çakışır. Sonuç olarak, yarıiletkenin optik band genişliğinde bir artma gözlenir. Bu olay Burstein kayması olarak bilinir. Elektron konsantrasyonu (n) ile enerji kayması (ΔE_g) arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\Delta E_g = \left(\frac{h^2}{8m_e^*} \right) \left(\frac{3}{\pi} \right)^{2/3} n^{2/3} \quad (41)$$

Eğer elektron konsantrasyonu, iletkenlik bandındaki elektronların durum yoğunluğunu (N_C) aşarsa, elektronlar daha yüksek enerjili durumları doldurmaya başlar. Sadece daha yüksek enerjili fotonlar soğurulur (Burstein, 1954)

Optik geçirgenlik spektrumundan hesaplanan ΔE_g enerji kayması değerleri kullanılarak Denk.37'deki taşıyıcı konsantrasyonları hesaplandı. $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ince filmlerde In atomlarının $x = 0,05$, $0,10$ ve $0,15$ oranlarında sırasıyla taşıyıcı konsantrasyonları $1,5 \times 10^{18}$, 3×10^{18} ve 10^{19} cm^{-3} değerlerinde bulundu ($m^* = 0,2m_0$, Tyagi, 1991). Dhere ve arkadaşları (Dhere, 1987) sıcak duvar yöntemiyle In katkısı yaparak ürettikleri CdS ince filmlerde taşıyıcı konsantrasyonu 10^{20} cm^{-3} olduğu zaman, CdIn_2S_4 fazının meydana

geldiğini tespit ettiler. Bizim kimyasal püskürtme yöntemi ile indiyum katkı yaparak ürettiğimiz $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ince filmlerde bu değer 10^{19} cm^{-3} olarak bulundu.

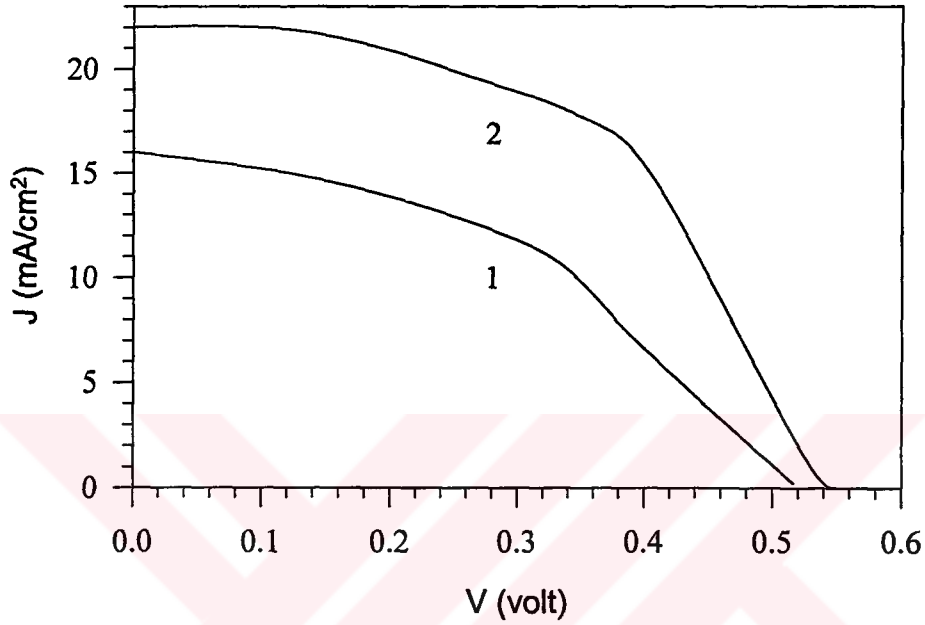


Şekil 39. Cam altlık üzerinde büyütülen $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{S}$ ($0 \leq x \leq 0,15$) ince filmlerin optik geçirme spektrumları 1) % 0, 2) % 0,05, 3) % 0,10, 4) % 0,15

Şekil 40'da, (1) saf (özden) ve (2) In katkı yapılarak ($x=0,05$) büyütülen CdS ince filmler üzerinde üretilen CdS/CdTe güneş pillerinin, 100 mW/cm^2 ışık kaynağı altında ölçülen, akım yoğunluğu-voltaj eğrileri verilmektedir. Saf CdS ince film üzerinde elde edilen pilin verimi (η) % 3,6 iken, In katkı yapılarak ($x = 0,05$) büyütülen film üzerinde üretilen pilin verimi (η) % 6,4 olarak hesaplandı.

CdS/CdTe güneş pillerinin karakteristik parametreleri Çizelge 8'de verildi. Bu çizelgeden görüldüğü gibi, In katkı yapılarak ($x=0,05$) büyütülen CdS ince film üzerinde üretilen pilin karakteristik parametreleri saf CdS ince film üzerinden elde edilenden daha yüksektir. Pilin karakteristik parametrelerindeki bu iyileşme, In+CdS ikili yapıdaki yapıya girmeyen serbest In atomlarının soğurma katmanına (CdTe) difüz ederek pilin seri dirençlerini küçültmesinin bir sonucudur. Ayrıca, optik geçirgenlik spektrum eğrisinden de görüldüğü gibi, In katkı yapılarak ($x=0,05$) büyütülen CdS ince filmin optik geçirgenlik spektrumu şiddeti ve yasak enerji aralığı daha büyüktür. CdS/CdTe güneş pillerinde, optik

pencere katmanı CdS'ün optik geçirgenlik ve yasak enerji aralığının büyük olması, pilin çalışma aralığını büyütür (Boiko vd, 1997).



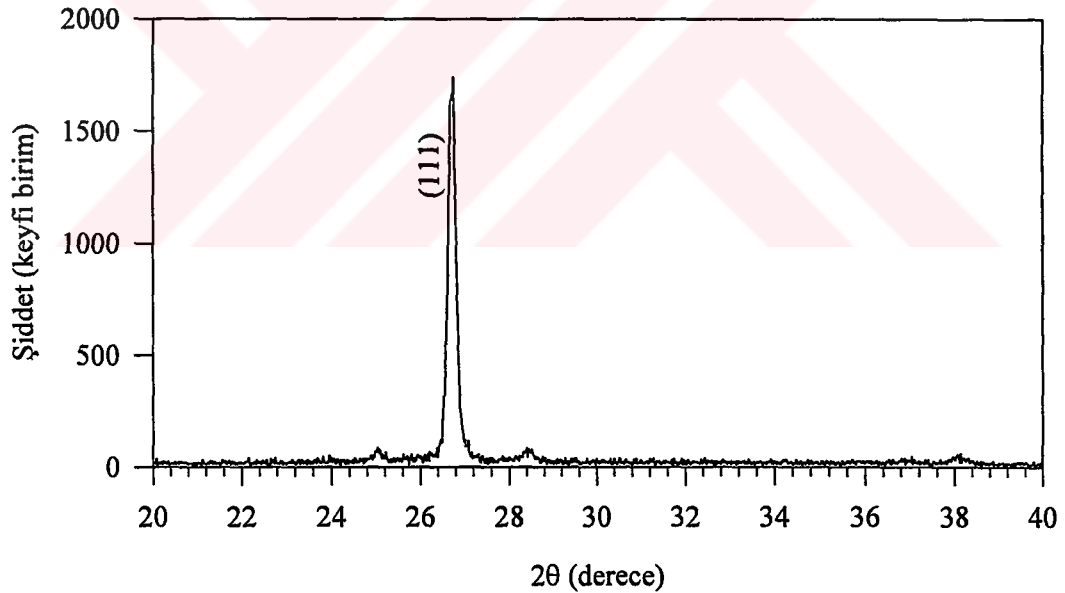
Şekil 40. CdS/CdTe güneş pillerinin 100 mW/cm^2 ışık kaynağı altında ölçülen akım yoğunluğu- voltaj eğrileri; (1) Saf, (2) In katkı ($x=0,05$) yapılan CdS ince film

Çizelge 8. CdS/CdTe güneş pillerinin 100 mW/cm^2 ışık kaynağı altında ölçülen akım karakteristik parametreleri

CdS/CdTe'nin parametreleri	CdS ince film	
	Saf	Katkı ($x=0,05$ In)
V_{oc} (Volt)	0,52	0,54
J_{sc} (mA/cm^2)	16	22
FF	0,42	0,53
η (%)	3,5	6,4

3.3. p-tipi CdS filmlerinin ve p-n Eklemlerinin İncelenmesi

Şekil 41’de 250°C altlık sıcaklığında, kısmen kapalı hacimde vakumda buharlaştırma yöntemi ile üretilen CdS ince filmin x-ışınları kırınım desenini göstermektedir. Şekil 41’de görüldüğü gibi, CdS ince filmin $2\theta = 26,58^\circ$ de kübik yapıda karakteristik (111) yansıma düzlemi piki görülmektedir. Kübik kristal yapıda büyüyen CdS’in örgü parametresi $a = 5,812 \text{ Å}$ bulundu. Daha sonra CdS ince film üzerine Cu buharlaştırarak elde edilen Cu-CdS ikili yapılar, Cu’lu yüzeyde He-Ne lazeri ile $t = 10$ dakika aydınlatma yapıldıktan sonra XRD ölçümleri yapıldı. CdS ince film ve Cu-CdS ikili yapıların XRD desenlerinin benzer olduğu tespit edildi. Bu XRD çalışmaları, Cu’ın sadece CdS içine difüz ettiğini ve S ile kimyasal reaksiyon girerek Cu_xS gibi yeni bileşikler oluşturmadığı görüldü (Marhew vd, 1995).

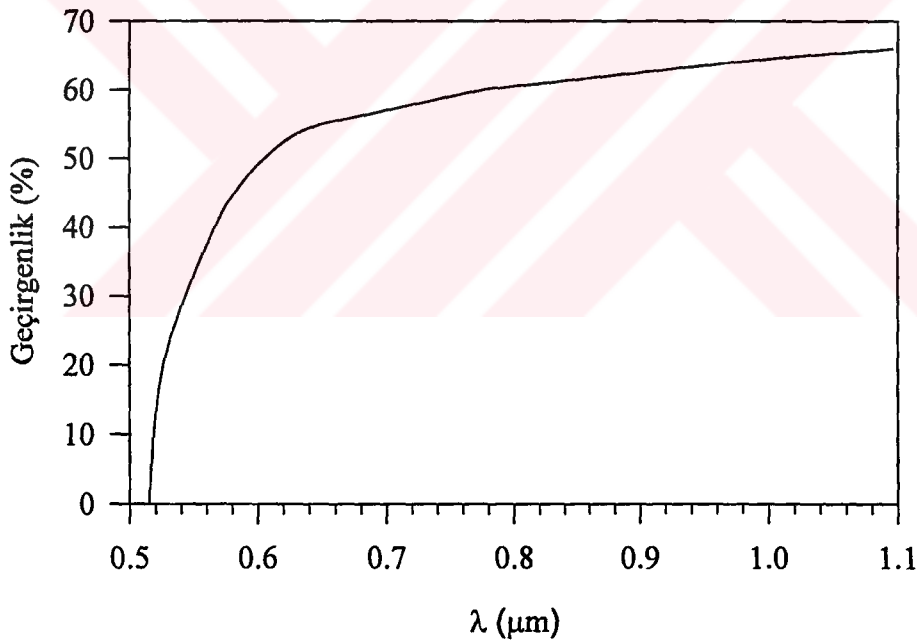


Şekil 41. CdS ince filminin XRD deseni

Hall ölçümleri, kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma yöntemiyle büyütülen 2-3 μm kalınlığındaki n-tipi polikristal CdS filmlerinin elektron konsantrasyonunun $n \approx 3 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ olduğunu gösterdi. CdS filminin kalınlığı boyunca iletkenlik tipi dağılımının sıcak uç ölçümleri, 2 dakika He-Ne lazeri ile aydınlatılan Cu-CdS ikili yapıların yüzeye yakın bölgesinin, tümüyle p-tipi olduğunu gösterdi. Böyle örneklerin Hall olayı ve öz direnç

ölçümleri, p-tipi CdS filmlerinin, delik konsantrasyonunun ve öz direnç değerlerinin $p=6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ve $\rho=2 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$ olduğunu gösterdi. Muhtemelen Cu atomları S boşlukları yüzünde oluşan donörleri kompenze ederek, CdS'ün iletkenliğini p-tipine dönüştürmektedir (Koshiwaba vd, 1992).

Şekil 42, n-tipi CdS filminin geçirme spektrumunu göstermektedir. Spektrumun kenarının $\lambda \approx 515 \text{ nm}$ 'ye yerleştiği, bunun da CdS'in temel soğurma kenarına karşılık geldiği görülmektedir ($E_g \approx 2,41 \text{ eV}$). 10 dakika kadar lazerle aydınlatılmış olan Cu-CdS yapıları için elde edilen spektrumun kenarı da yaklaşık 515 nm'ye yerleşmiştir; ancak geçirgenlik n-tipi CdS filminden daha küçüktür.

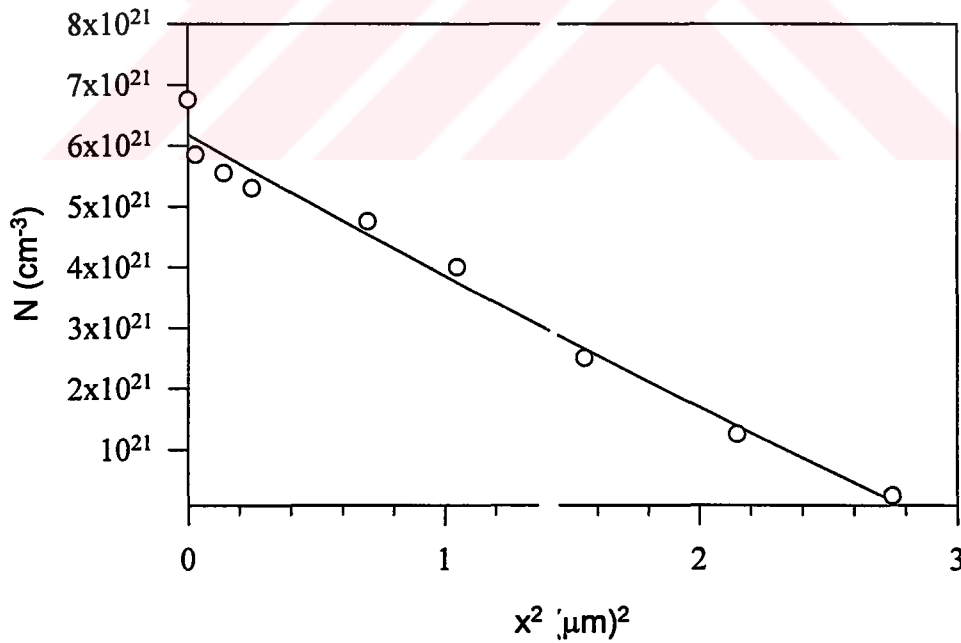


Şekil 42. n-tipi CdS'in optik geçirme spektrumu

Oda sıcaklığında, He-Ne lazeriyle 10 dakikalık sürede aydınlanan Cu-CdS yapısının CdS filmindeki konsantrasyon profili Şekil 43'te verildi. Şekildeki sürekli eğri, ince bir katmandan kaynaklanan bakır difüzyonunun hesaplanmış konsantrasyon profilini temsil etmektedir (Abdulluev vd, 1987):

$$N(x,t) = \frac{N_s}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \quad (42)$$

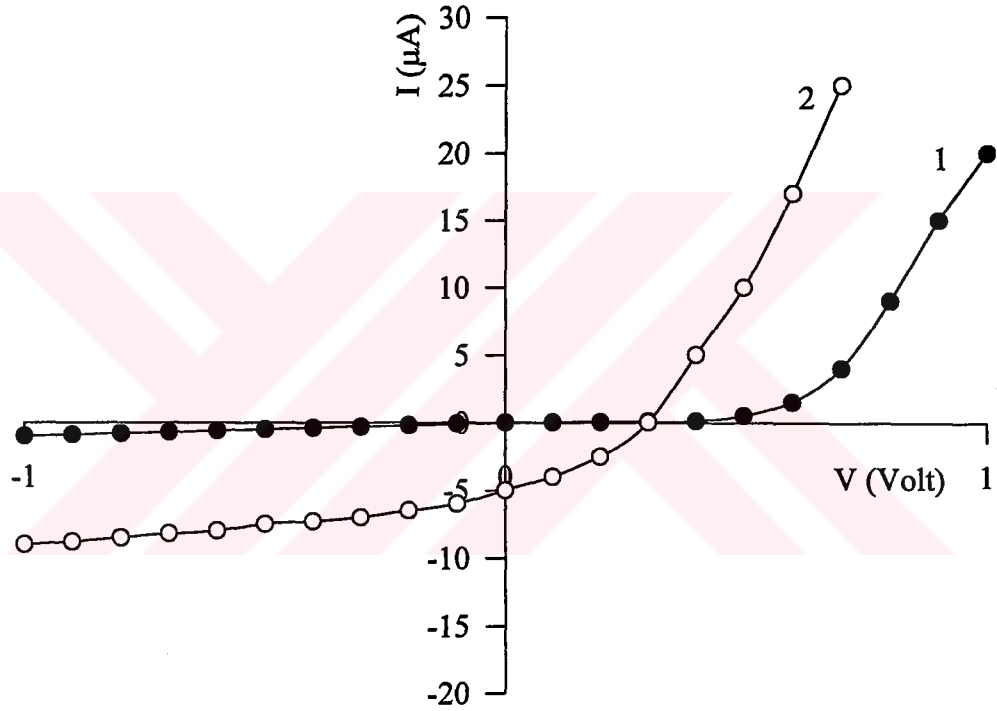
Burada $N(x,t)$ safsızlık konsantrasyonu, N_s başlangıç anında ($t=0$) safsızlığın yüzeydeki konsantrasyonu, D difüzyon katsayısı ve t ise difüzyon süresidir. Şekil 43'deki Cu konsantrasyonu dağılımına ait deneysel veri, 25°C 'deki $D = 8 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ etkin difüzyon katsayısı için elde edilen teorik eğri tarafından yeteri kadar iyi bir şekilde temsil edilmektedir. CdS'teki Cu'ın foto-uyarılmış difüzyonu için D 'nin bu değeri, aynı sıcaklıkta bakırın ısı difüzyonundaki değerinden ($D=1,4 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$) önemli ölçüde büyüktür (Boltaks vd, 1972). Toplam kalınlığın iki veya üç katmanının, yaklaşık $0,2-0,3 \mu\text{m}$, uzaklaştırılmasının ardından, aydınlanmamış Cu-CdS yapılarındaki Cu konsantrasyonu profilinin ölçülmesi, Cu konsantrasyonunun belirlenmesi için EDX yönteminin duyarlık limitinden daha küçük olduğunu gösterdi. Bir diğer deyişle, aydınlanmamış bir yapıdaki Cu'ın girme derinliği, aydınlanmış yapıdaki yaklaşık olarak onda biri kadardır.



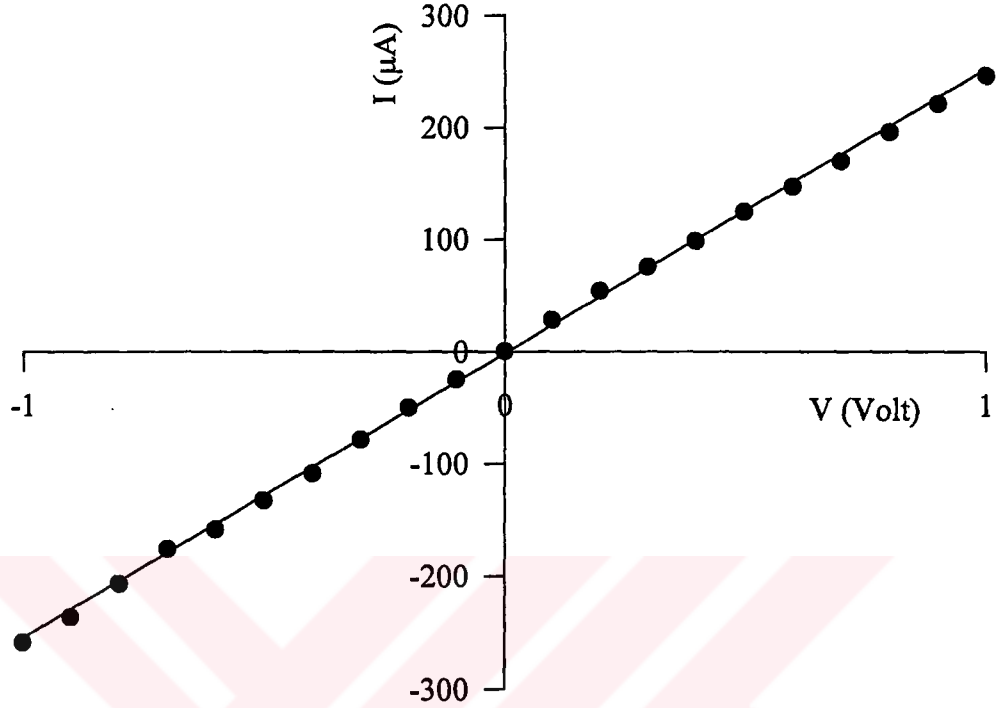
Şekil 43. Aydınlanmış Cu-CdS yapısının da ($T = 25^\circ\text{C}$, $t = 10$ dakika), CdS filmindeki Cu atomlarının konsantrasyon dağılımı

Şekil 44 ve 45, sırasıyla, başlangıçta bir He-Ne lazeriyle 2 dakika ve 10 dakika sürelerle aydınlanmış olan Cu-CdS yapılarının karanlık akım-voltaj karakteristiklerini

göstermektedir. Aydınlanma süresindeki artmanın, I-V karakteristiğinde, doğrultucu karakterden (Şek.44) omik karaktere (Şek.45) doğru bir değişimle sonuçlandığı görülmektedir. Şekil 44 ve 45’de verilen Cu-CdS yapılarının I-V karakteristiklerinin, HNO_3 ile dağlamayla CdS’in yüzeyinde hala kalmış olabilen Cu filminin de çıkarılması sonucunda, hemen hemen değişmediğine dikkat edilmelidir.



Şekil 44. İki dakika süreyle aydınlatılan Cu-CdS yapısında, (1) Karanlık, (2) Aydınlik, I-V karakteristikleri



Şekil 45. On dakika süreyle aydınlatılan Cu-CdS yapısında I-V karakteristiği

Yukarıda sunulan veriler; Cu-CdS yapısının kısa bir süre (2 dakika) lazer ışınıyla aydınlatılmasının sonucunda, CdS filminde bir p-n eklemine oluştuğunu; CdS filminin tümünün iletkenlik tipinin, oda sıcaklığındaki 10 dakikalık bir aydınlanma sonucu, n-tipinden p-tipine dönüştüğünü açıkça göstermektedir.

CdS'teki p-n eklemi, zayıf bir fotovoltajik olay gösterdi (Şek.44). Bu hücrenin kısa-devre fotoakım yoğunluğu ve açık-devre voltajı sırasıyla, $J_{sc}=90 \mu A/cm^2$, $V_{oc}=150 mV$ değerindedir. p-n eklemine fotoakımın (J_{sc}) spektral dağılım ölçümleri, fotosensitivitenin, $\lambda = 500-550 nm$ bölgesini kapsadığını gösterdi; bu da CdS'in temel soğurma karakteristiğidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, CdS/CdTe güneş pillerinde optik pencere katmanı olarak kullanılan CdS ince filmler “kısmen kapalı hacimli vakum buharlaştırma yöntemi” ile üretilmesi esnasında farklı şiddette ışınlamalara maruz bırakılarak ve kimyasal püskürtme yöntemi ile üretilmesi esnasında ise In katkı yapılarak büyütüldüler. Işınlama ve In katkısının CdS ince filmlerin ve CdS/CdTe güneş pillerinin karakteristik özelliklerine etkisi incelendi. Ayrıca, oda sıcaklığında CdS’te bir p-n ekleminin ve p-tipi CdS’in oluşumu üzerinde, Cu-nCdS ikili yapılarının He-Ne lazeriyle aydınlatılmasının etkileri araştırıldı. Elde edilen sonuçları aşağıda verildi:

i) Işınlamanın CdS İnce Filmlerine ve CdS/CdTe Güneş Pillerine Etkisi

- Çeşitli ışınlama şiddetlerinde elde edilen CdS ince filmler c-ekseni boyunca büyüdü ve ışınlamanın şiddetinin artması ile (002) yansıma düzlemlerinin şiddetleri arttı.

- CdS ince filmlerin öz dirençleri ışınlama şiddetinin artması ile $10^7 \Omega \times \text{cm}$ ’den $10^4 \Omega \times \text{cm}$ ’ye düştü.

- Işınlama şiddetinin artması ile fotoiletkenlik ve geçirgenlik spektrum değerlerinde önemli artışlar oldu.

- Karanlıkta üretilen CdS ince film üzerinde elde edilen CdS/CdTe güneş pilinin verimi %1,8 iken, 150 mW/cm^2 ışınlama şiddeti altında büyütülen CdS ince film üzerinde yapılan CdS/CdTe güneş pilinin verimi %7,3 yükseldi.

ii) In katkısının CdS ince filme ve CdS/CdTe güneş pillerine etkisi

- In atomlarının konsantrasyonunun artması ile (002) yansıma şiddetinde azalma ve (101) yansıma şiddetinde artma gözlemlendi. In katkılanan ($x > 0,1$) CdS ince filmlerde CdIn_2S_4 , CdO ve In_2O_3 fazlarının oluştuğu görüldü.

- In konsantrasyonunun artması ile öz direnç değerlerinin ($x < 0,05$) önce küçüldüğü ve sonra tekrar arttığı gözlemlendi.

- In konsantrasyonunun artması ile CdS ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumlarında lineerlikte sapmalar görüldü. In atomlarının konsantrasyonunun artması ile CdS ince filmlerin yasak enerji aralığında bir büyüme gözlemlendi.

- Saf CdS ince film üzerinde elde edilen CdS/CdTe güneş pilinin verimi (η) % 3,5 iken, indiyum katkılanarak ($x = 0,05$) büyütülen film üzerinde üretilen pilin verimi (η) % 6,4 olarak bulundu.

iii) p-tipi CdS filmlerinin ve p-n Eklemlerinin İncelenmesi

- Oda sıcaklığında He-Ne lazeriyle aydınlanan Cu-CdS yapısında, Cu atomları CdS filmine, $D=8 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$ katsayısına sahip olarak, difüz ederler. Bu değer, aynı sıcaklıktaki ısı difüzyon sonucu ortaya çıkan difüzyon katsayısından ($D=1,4 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ sn}^{-1}$) önemli ölçüde büyüktür.

- Aydınlanmış ve aydınlanmamış Cu-CdS yapılarının XRD çalışmaları CuS gibi yeni bileşiklerin oluşmadığını göstermedi.

- Cu-nCdS yapılarında, kısa süreli lazerle hızlandırılmış bakır difüzyonunun, yapıda doğrultucu karakterin ve fotovoltatik karakteristiklerin ortaya çıkmasına neden oldu; bu durum, yüzeyde kalan bakırın uzaklaştırılmasından sonra da hemen hemen değişmedi.

- Aydınlatılmış Cu-CdS yapılarında sıcak-uç ve Hall olayı ölçümleri, aydınlanma süresine bağlı olarak, CdS filminde bir p-n ekleminin veya p-tipi CdS filminin oluştuğunu gösterdi.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada CdS ince filmler, kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma yöntemi ile üretilmesi esnasında beyaz ışığın farklı şiddetlerine maruz bırakılarak büyütüldüler. CdS gibi II-VI grubuna ait olan diğer CdTe ve ZnTe gibi yarıiletken bileşiklerin de, farklı şiddette veya farklı dalga boyunda ışınlarla maruz bırakılarak büyütülmesi faydalı olacaktır. Çünkü, ışınlama yüksek buhar basıncına sahip yarıiletken bileşiklerin elektrik, fotoelektrik ve optik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca p-tipi CdS ince filmler, oda sıcaklığında Cu-nCdS ikili yapının He-Ne lazer ışınıyla difüzyon işlemine uğratılması sonucu üretildi. He-Ne lazer ışınımına maruz bırakılan Cu-nCdS filmlerde bir p-n eklemine olduğu I-V karakteristik ölçüleri ile belirlendi. Ancak, CdS'teki p-n eklemi zayıf fotovoltaiik olay gösterdi. Bu p-n eklemine fotovoltaiik parametrelerini iyileştirmek ve Ag-nCdS gibi ikili yapıların lazer ışınıyla difüzyon yapılarak üretilmesi ve karakteristik özelliklerinin incelenmesi planlanmaktadır.

Bilim adamları güneş pilleri ile çalışmalarında düşük maliyetli, geniş alanlara sahip ve yüksek verimli pillerin üretimini amaçlarlar. İnce film üretim yöntemleri arasında en uygun yöntem kimyasal püskürtme yöntemidir. Bu yöntem ile düşük maliyetli, geniş alanlı ve yüksek verimli CdS/CdTe güneş pilleri yapılmaktadır. Ancak, bununla ilgili çalışmaların detayları genellikle patent türü yayınlar olduğundan dolayı bilinmemektedir. Kimyasal püskürtme ve kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma yöntemleri kullanılarak CdS/CdTe ve CdS/CuInSe₂ güneş pilleri üretilmesi düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abdulluev, G.B., Dzhafarov, T.D., 1987, Atomic Diffusion in Semiconductor Structures New York:Harwood academic.
- Abe, T., Kashiwaba, Y., Baba, M., Imai, J., Sasaki, H., 2001, XPS Analysis of p-type Cu-Doped CdS Thin Films, Applied Surface Science, 175-176, 549-554.
- Abe, T., Sato, J., Ohashi, S., Watanabe, M., Kashiwaba, Y., 2002, Light Emission of a CdS(Cu)/CdS Thin Films Diode, Phys. Stat. Sol.(b), 229, 1015-1018.
- Adirovich, E. İ., Yuaborand, Y.M., Yagudaev, G.R., 1969, Photoelectric Effects in Films Diodes with CdS-CdTe Heterojunctions, Fiz. Tekn. Popuprodnikov, 3, 81-85.
- Ahmed, M.U., Irvine ,S.J.S., Stafford, A., 1999, Importance of Initial Nucleation Step on Low Temperature Photoassisted MOVPE Growth, J. Mater. Sci: Mater. In Elect., 10, 595-600.
- Alamri, S.N., Brinkman, A.W., 2000, The effect of the Transparent Conductive Oxide on the Performance of the Thin Film CdS/CdTe Solar Cells, J. Phys. D: Appl. Phys., 33, L₁-L₅.
- Al-Shakarchi, E.K., 2001, Computational Study for the Structural Change of the System CdTe_{1-x}S_x, Turk J.Phys., 25, 355-362.
- Aramoto, T., Kumazawa, S., Higuchi, H., Arita, T., Shibutani, T., Nishio, T., Nakajima, J., Tsuji, M., Hanakusa, A., Hibino, T., Omura, K., Ohyama, H., Murozono, M., 1997, % 16 Efficient Thin films CdS/CdTe Solar Cells, Jpn J. Appl. Phys., 36, 6304-6305.
- Barker, J., Binns, S.P., Johnson, D.R ., Marshall, R.J., Oktik, S., Özsan, M.E, Patterson, M.H., Ransome, S.J.R., Robert, S., 1992, Electrodeposited CdTe for Thin Film Solar Cells, International Journal of Solar Energy, 12, 79-84.
- Basol, B., 1993, Preparation Techniques for Thin Films Solar Cells, Jpn. J. Appl. Phys., Suppl. 32-3, 35-40.
- Bayhan, M., 1998, Structural and Optical Characterisation of Vacuum Deposited CdTe Thin Films, Tr.J of Physics, 22, 929-937
- Baykul, M.C., Balcıoğlu, A., AFM and SEM Studies of CdS Thin Films Produced by an Ultrasonic Spray Pyrolysis Method, Microelectronic Engineering, 51-52, 703-713.

- Bidadi, H., Kalafi, M., Tajalli, H., Bairamov, A.I., Dzhaferov, T.D., 1996, Diffusion and Interaction of Group I Impurities with Vacancies in CdS Thin Films, Opt. Mat., 6, 27-33.
- Bleil C, Broser I, 1964, Exciton Emission and Energy Transport in Cadmium Sulfide Crystals, J. Phys. Chem. Solids, 25, 11-22
- Boiko, B.T., Khripunov, G.S., Yurchenko, V.B., Ruda, H.E., 1997, Photovoltaic Properties in CdS/CdTe Thin Film Heterosystems with Graded-Gap Interfaces, Solar Energy Materials and Solar Cells, 45, 303,308.
- Boltaks B I, 1972, Diffusion and Point Defects in Semiconductors, Leningrad: Nauka
- Bonnet, D., 2000 Manufacturing of CSS CdTe Solar Cells, Thin Solid films, 361-362, 547-552.
- Bouchenaki, C., Ullrich, B., Zielinger, J.P., Chartier, P., 1991, Preparation Characterization and Bistable Photoconductivity Properties of Thin CdS Layers, J. Opt. Soc. Am., B8, 691-700.
- Britt, J., Ferekides, C., 1993, Thin Film CdS/CdTe Solar Cell with 15.8% Efficiency, Applied Physics Letters , 62 (22), 2851-2852.
- Burstein, E., 1954, Anomalous Optical Absorption Limit in InSe, Phys. Rev., 93, 632-633.
- Castillo, S.J., Mendoza-Galvan, A., Ramirez, R., Espinoza-Beltran, F.J., 2000, Structural, Optical and Electrical Characterization of In/CdS/Glass Thermally Annealed System, Thin Solid Films, 373, 10-14.
- Castillo, S.J., Sotelo Lerma, M., Ramirez-Bon, R., Espinoza-Beltran F.J., 1999, Thermal Annealing of Bilayer of Evaporated In on Chemically Deposited CdS Thin Films, Superficies Vacio, 8, 73-75.
- Çevik, U., 1994, Doğu Karadeniz Tip Tortularının X-Işınları Floresans Yöntemi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimler Enstitüsü, Trabzon
- Chandrasekhar, S., Martinuzzi, S., Nataren, F.Z., 1985, Improved Efficiency of CdZnS Thin Films Solar Cells, Can J. Phys., 63, 716-718.
- Chean, J., Zink, J.I., 1997, Gas Phase Photochemical Synthesis of II-VI Metal Sulfide Films and In Situ Luminescence Spectroscopic Identification of Photofragments, J. Am. Chem. Soc., 119, 3838-3839.
- Cheng, L.J., Nguyen, T.T, Shuyu, C.M., Basol, B.M., Yoo, H.I., 1984, Characterization of CdS/CdTe and CdS/CuInSe₂ Thin Film Solar Cells, IEEE, 851-854.
- Chu, T.L., Chu, S.S., 1995, Thin Film II-VI Photovoltaics, Solid-State Electronics 38 (3) 533-549.

- Desnica, U.V., Desnica-Frankovic, I.D., Magerle, R., Deicher, M., 1999, Compensating Defect and Electrical Activation of Donors in CdS, Physica B, 273- 274, 907-910.
- Dhere, N.G., Moutinho, H.R., and Dhere, R.G, 1987, Morphology and Electrical Properties In-Doped CdS Thin Films, J. Vac. Sci. Technol., A5(4), 1556-1559.
- Dzhafarov T.D, 1977, Atomic Diffusion in Semiconductor Epitaxial Structur, Physica Status Solidi A-Applied Research, 42(1), 11-45.
- Dzhafarov, T.D., 1987, Photostimulated Atomic Processes in Semiconductors, Energoatomizdat:Moskow.
- Dzhafarov, T.D., 1992, Radiation-Stimulated Diffusion in Semiconductor, Energoatomizdat:Moskow.
- Dzhafarov, T.D., Bairamov, A.I., Novruzov, V.D., Nadzhafov, H.I., Rzakuliev, N.A., 1993, Thin Film Cu₂S-CdS and Cu₂S-Cd_{1-x}Zn_xS Solar Cells, Japan J. Appl. Phys., 32, 527-528.
- Dzhafarov, T.D., Sadıgov, M.S., Bacaksız, E., Ören, D., Karabay, I., 1998, Effect of Copper Diffusion on Photovoltaic Characteristics of CuGaSe₂-GaAs Cells, Solar Mater. Solar Cells, 52, 135-140
- Dzhafarov, T.D., Serin, M., Ören, D., Sungu, B., Sadıgov, M.S., 1999, The Effect of Ag Photodiffusion on Characteristics of Ag-CdS Diode Structure, J. Appl.Phys., 32, L5-L8.
- Dzhafarov, T.D., Novruzov, V.D., Bairamov, A. I., 2000, nCdS-pCdTe Thin Films Solar Cells, Institute of Physics, Azerbaijan Academy of Science, 6, No:2, 12-16.
- Ebothe, J., Chartier, P., Cong, H.N., 1988, Electro-Optical Properties of Thin CdS Films by Photo-current Analysis Solid-liquel Junctions, Thin Solid Films, 138(1), 1-8.
- Fraas, L.M., Ma, Y., 1977, CdS Thin Films for Terrestrial Solar Cells, Journal Crystal Growth, 39, 92-107.
- George, P.J., Sanchez-Juarez, A and Nair, P.K, 1996, Modification of Electrical, Optical and Crystalline Properties of Chemically Deposited CdS Films by Thermal Diffusion of İndium and Tin, Semicond. Sci. Technol., 11, 1090-1095.
- Grosvenor, C.R.M., Microelectronic Materials, 1989, Institute of Physics Publishing, Bristol,
- Hasoon, F.S., Al-Jassim, M.M., Swartzlander, A., Sheldon, P., 1997, The Morphology of CdS Thin Films Deposited on SnO₂-Coated Glass Substates, Presented at the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conferance, September 29-Oktober 3, Anaheim, California

Hook, J.R and Hall H.E, 1997, Katıhal Fiziği, Literatür Yayınları

Inam, A., Hedge, M.S., Wu, X.D., Andnkatesan, T., England, P., Miceli, P.F., Chase, E.W., Chang, C.C., Tarascon, J.M., and Watchman, J.B., 1988, As-Deposited High T_c and J_c Superconducting Thin Films Made at Low temperature, Appl. Phys. Lett., 53, 908-916.

Irrine, J.C., Mullin, J B., 1987, Epitaxial Photochemical Deposition of II-VI Semiconductors, J. Vac. Sci. Technol., A5, 2100-2105.

Jadhavv, U.S., Kale, S.S., Lokhande, C.D., 2001, Effect of Cd:S Ratio on the Photoconducting Properties of Chemically Deposited CdS Films, Materials Chemistry and Physics, 69, 125-132.

Kalafi, M., Bidadi, H., Sobhaian, S., Bayramov, A.I., Salmanov, V.M, 1995, Influence of Laser Irradiation During the Deposition Process on the Properties of CdS Films, Thin Solid Films, 265, 119-122.

Kashiwaba, Y., Isojima, K., Ohta, K., 2002, Improvement in the Efficiency of Cu-Doped CdS/non-doped CdS Photovoltaic Cells Fabricated by an all-Vacuum Process, Solar Energy Materials and Solar Cells, in press.

Kaur, I., Pandya, D.K and Chopra K.L, 1980, Growth-kinetics and Polymorphism of Chemically Deposited CdS Films, J.Electrochemical Soc., 127, 943-948.

Keitoku, S., Izumi, H., Ono, H., Ohto, M., 1995, Preparation of p-type CdS Thin Films by Lazer Applied, Jpn J. Appl. Phys., 34, p. L138-L140.

Kittel C, 1996, Katıhal Fiziğine Giriş, Çeviri: Bekir Karaoğlu, Bilgi Tek Yayıncılık, İstanbul

Kobayashi, T., Ullrich, B., Ezumi, H., Keitoku, S., 1995, Luminescance Properties of p-type CdS Thin Films Prepared by laser Ablation, Materials Science and Engineering B, 35, Issue 1-3, 117-126

Koshiwaba, Y., Kanno, I., Ikeda, T., 1992, p-type Characteristics of Cu-Doped CdS Thin Films, Japan Journal of Aplied Physics Part-1 Regular Papers Short Notes and rewiew Papers, 31, 1170-1175.

Lozada-Morales, R., Zelaya-Angel, O., 1996, Photoluminesce Analysis of CdS Thin Films Under Phase Transition, Thin Solid Films, 281-282, 386-389.

Mathew, S., Mukerjec, P.S., Vijakumar, K.P., 1995, Characterization of Spray Pyrolyzed CdS Thin Film Doped with Cu, Japan Journal of Aplied Physics Part-1 Regular Papers Short Notes and rewiew Papers, 34 , 4940-4944.

Mitchell, K., Fahrenbruch, A.L., Bube. R.H., 1975, Structure and Elektrical Properties of CdS and CdTe Thick Films for Solar Cells Applications, J. Vac. Sci. Technol., 12, 909-911.

- Mohammed, W.F., Nory, A.M., 1998, The Photo-Electric and Properties of Vacuum Deposited CdS Thin Films, Renewable Energy, 14, 1-4, 129-134.
- Mohamed, W.F., Ahmed, M., Yousif, S., 2002, The Electrical Properties of Post-Deposition Annealed and as-Deposited In-Doped CdTe Thin Films, Renewable Energy, 26, 285-294.
- Mott, N.F., Davis, E.A., 1987, Electronic Processes in Non-crystalline Materials, Clarendon Press, Oxford
- Moutinho, H.R., Al-Jassim, M.M., Levi, D.H., Kazmerski, L.L., 1998, Effects of CdCl₂ Treatment on the Recrystallization and electro-Optical Properties of CdTe Thin Films, J. Vac. Sci. Technol., A16, 1251-1257.
- Nag, B.R., 1980, Elektrontransport in Compound Semiconductors, Springer Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- Neumann, H., Kühn, G., Schumann, B., 1981, Multicomponent Tetrahedral Compound for Solar Cells, Prog. Cryst. Growth Charact., 3, 151-159.
- Oliva, A.I., Solis-Canto, O., Castro-Rodriguez, R., Quintana, P., 2001, Formation of the Band Gap Energy on CdS Thin Films Growth by Two Different Techniques, Thin Solid Films, 391, 28-35.
- Oral, Muzaffer., 1979, Güneş Pilleri, E.Ü Yayınları.
- Patil, L.A., Wani, P.A., Amalnerkar, D.P, 1999, CuCl₂ Assisted Cubic to Hexagonal Phase Transformation of CdS, Materials Chemistry and Physics, 61, 260-265.
- Perrin, A., Guilloux-Viri, M., Castel, X., Le Paven-Thiref, C., 1996, Growth and Characterization of HTCS Thin Films for Microelectronics Devices, Microelectronics Journal, 27, 343.
- Ramaiah, K.S., 1999, Electrical Properties of In Doped CdS Thin Films, Journals of Materials Science: Materials Electronics, 10, 291-294.
- Ramaiah, K.S., Pilkington, R.D., Hill, A.E., Tomlinson, R.D., Bhatnagar, A.K 2001, Structural and Optical Investigations on CdS Thin Film Grown by Chemical Bath Technique, Materials Chemistry and Physics, 68, 22-30.
- Ramaiah, K.S., Raja, V.S., Sharon, M., 1998, Optical and Structural Investigations on Spray Deposited CdS Films, Journal of Materials Science-Materials in Electronics, 9, 261-265.
- Riad, A.S., Darwish, S., Afify, H.H., 2001, Transport Mechanism and Photovoltaic Characterizations of Spray Deposited CdS on InP in Heterojunction Devices, Thin Solid Films, 391, 109-116.
- Riyad, N., Bitar, A., 2000, Effect of Doping and Heat Treatment on the Photoluminescence of CdS Films Deposited by Spray Pyrolysis, Renewable Energy, 19, 576-586.

- Romeo, N., Sberveglieri, C., and Torricans, L., 1978, Growth and Properties of Low Resistivity CdS Thin Films, Thin Solid Films, 55, 413-419.
- Sze, S.M., 1969, Physics of Semiconductor Devices, New York
- Sakai, Y., Okimura, H., 1969, Properties of Photoconductive CdS Evaporated Films, Jpn. J. Appl. Phys., 3, 144.
- Schön, J.H., Schenker, O., Batlogg, B., 2001, Solution Procesed CdS Thin Film Transistors, Thin Solid films, 385, 271-274.
- Shewmon, P.G., 1963, Diffusion in Solids, Newyork
- Short, M.A., Steward, E.G, 1959, Am. Mineral, 44, 189.
- Sibinski M., 2000, Applications of ICSV T Technology in Manufacturing Thick-Layer CdTe Solar Cells, IMAPS Poland Conference
- Stillbans, L.C., 1967, Yariletkenler Fiziği, Moskow
- Stoessel, C.H., Bunshah, R.F., Prakash, S., Fetterman, H.R ., 1993, Thin Film Processing of High-T_c Süperconductors, J.Süperconductivity, 6, 1-15.
- Su, B., Choy, K.L., 2000, Microstructure and Properties of the CdS Thin Films Prepared by Electrostatic Spray Assisted Vopour Deposition Method, Solid Thin Films, 359, 160-164.
- Sudharsanan, R., Rohatgi, A., 1991, Investigation of Metalorganic Chemical Vapor Deposition Grown CdTe/CdS Solar Cells, Solar Cells, 31, 143-150.
- Tyagi, M.S., 1991, Introduction to Semiconductor Materials and Devices, John Wiley and Sons, New York
- Tsuji, M., Aramoto T., Kumazawa, S., Higuchi, H., Arita, T., Shibutani, S., Nishio, T., Nakajima, J., Hanafusa, A., Hibino, T., Omura, K., Ohyama, H., Murozono, M., 1997, 16.0% efficient thin-film CdS/CdTe solar cells, Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers, 36 (10), 6304-6305.
- Ullrich, B., Sakai, H., Segawa,Y., 2001, Optoelectronic Properties of Thin Film CdS Formed by Ultraviolet and İnfrared Pulsed-Lazer Deposition, Thin Solid Films, 385, 220-224.
- Ullrich, B., Sakai, H.N., Duhskina, M., Wzumi, H., Keito, S., Kobayashi, T., 1998, The Influence of the Laser Fluence onthe Transmission Features of CdS Thin Films Formed by Laser Ablications, , Microelectronic. Eng., 43-44, 695.
- Van der Pauw, L. J, 1958, A Method of Mesasuring The Resistivity and Hall Coefficient on Lamellae of Arbirary Shape, Philips Technical Reiew, 20, 2, 220-224.

- Zeenath, N.A., Varkey, K.P., Vijayakumar, K.P., 1998, Electrical Studies on trap levels Present in n- and p-Type Spray Pyrolysed Thin Films, J.Phys.:Condens. Matter, 10, 2053-2063.
- Zehner, D.M., White, C.W., Owndy, L., 1980, Preparation of Atomically Clean Silicon Surfaces by Pulsed Laser Irridation, J. Appl. Phys. Letters, 36(1), 56-59.
- Zelaya-Angel, O., Esparza-Garcia, A.E., Falcony, C., Lozada-Morales, R., 1995, Photoluminescence Effects Associated with Thermally Induced Crystalline Structure Changes in CdS Films, Solid State Commnication, 94, 81-85.
- Zelaya-Angel, O., Hernandez, L., De Melo, O., Alvarado-Gil, J. J., Lozada-Morales, R., Falcony, C., and Vargas, H., 1996, Band-gap shift in CdS: phase transition from cubic to hexagonal on thermal annealing, Vacuum, vol.46, 1083-1085.
- Zweibel, K., 1995, Thin Films- Past, Present, Future, Prog. Photovoltaic Cells, 3, 279-293.



ÖZGEÇMİŞ

Öğr.Gör. Emin Bacaksız

Kahramanmaraş'ın Elbistan ilçesine bağlı Kullar köyünde 1971 yılında doğdu. İlkokulu kendi köyünde, ortaokul ve liseyi Muş'ta Devlet Parasız Yatılı Okulunda okudu. 1989 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde başladığı lisans eğitiminden 1993 yılında mezun oldu. Aynı bölümde, 1993 yılında yüksek lisans eğitime başladı. 1997 yılında "Bakır difüzyonunun $\text{CuGaSe}_2\text{-GaAs}$ güneş pillerinin karakteristiklerine etkisi" adlı yüksek lisans tezini tamamladı.

Evli ve bir kızı olan Emin Bacaksız İngilizce bilmektedir.

