

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

CdS İNCE FİLM ÖRNEKLERİNİN SOĞUK ALTLIK ÜZERİNDE
ÜRETİLMESİ, YAPISAL, ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Murat TOMAKİN

HAZİRAN 2008
TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**CdS İNCE FİLM ÖRNEKLERİNİN SOĞUK ALTLIK ÜZERİNDE
ÜRETİLMESİ, YAPISAL, ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Murat TOMAKİN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor (Fizik)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26.05.2008
Tezin Savunma Tarihi : 27.06.2008**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa ALTUNBAŞ
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ekrem YANMAZ
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Emin BACAKSIZ**

Enstitü Müdür V.: Doç. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında ‘Doktora Tezi’ olarak gerçekleştirildi.

Bu çalışmada, kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma yöntemiyle düşük altlık sıcaklıklarında (oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda) üretilen CdS ince filmlerin bazı yapısal, elektriksel ve optik özellikleri incelendi. Deneysel çalışmalar Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarı’nda yapıldı.

Başta, Doktora öğrenciliğimin her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Mustafa ALTUNBAŞ’a en içten dileklerle teşekkür ederim. Doktora Tez çalışmalarında deneysel ve teorik bilgi yönünden yararlandığım Prof. Dr. Ekrem YANMAZ’a, Doç. Dr. Vagıf NOVRUZOV’a, Yrd. Doç. Dr. Emin BACAKSIZ’a, Yrd. Doç. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU’na ve Yrd. Doç. Dr. Şükrü ÇELİK’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sayın hocalarım Prof. Dr. Nazmi Turan OKUMUŞOĞLU ve Prof. Dr. Ali İhsan KOBYA’ya teşekkür ederim.

Bu zamana kadar her türlü desteğini esirgemeyen ANNEME, BABAMA ve sevgili EŞİME en içten teşekkürlerimi sunarım.

Murat TOMAKİN

Trabzon 2008

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Yarıiletkenler Hakkında Genel Bilgi	2
1.2.1. Elektriksel İletkenlik.....	3
1.2.2. Hall Olayı	4
1.3. II-VI Bileşiklerinin Doğal Yapısı	7
1.3.1. II-VI Bileşiklerinin Kristal Yapıları	7
1.3.1.1. Örgü Konumları.....	7
1.3.1.2. Kristal Yapılar	8
1.3.2. II-VI Bileşiklerinin Optik Özellikleri	10
1.4. Literatür Araştırması.....	12
1.4.1. Isıl İşlemin CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi	12
1.4.2. Katkı Atomlarının CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi	13
1.4.3. Üretim Tekniğinin CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi.....	14
1.4.4. Kontak Malzemesinin CdS/CdTe Güneş Pillerine Etkisi.....	14
1.4.5. Tane Boyutunun CdS/CdTe Güneş Pillerine Etkisi	15
1.5. İnce Film Elde Etme Yöntemleri.....	16
1.5.1. Fiziksel Buharda Çökeltme Yöntemi	16
1.5.2. Kapalı Hacimde Çökeltme (Close-Space Sublimation) Yöntemi	18
1.5.3. Lazerle Buharlaştırma Yöntemi.....	19
1.5.4. Kimyasal Püskürtme Yöntemi	20
1.5.5. Kimyasal Banyo Yöntemi	21
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	22

2.1.	Giriş	22
2.2.	İnce Film Üretim Düzenine Hazırlanması.....	23
2.3.	Kaynak-Altık Mesafesini Değiştirerek Örnek Hazırlanması	25
2.4.	Değişik Altık Sıcaklıklarında Örnek Hazırlanması	27
2.5.	Değişik Altık Sıcaklıklarında Hazırlanan Örneklerin Tavlanması.....	27
2.6.	X-ışını Kırınım Analizi.....	27
2.6.1.	Örneklerin Örgü Parametrelerinin Hesaplanması.....	28
2.6.2.	Örneklerin Parçacık Boyutunun Hesaplanması	29
2.7.	Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri	29
2.8.	Optik Özelliklerin Ölçülmesi.....	30
2.8.1.	Örneklerin Yasak Enerji Aralığının Hesaplanması	31
2.8.2.	Örneklerin Kalınlığının Hesaplanması	31
2.9.	Elektriksel Özelliklerin Ölçülmesi	32
2.9.1.	CdS İnce Film Örneklerinin İletim Mekanizmasının İncelenmesi.....	33
2.9.2.	Hall Katsayısı Ölçümü.....	34
2.10.	Cu/CdS Schottky Diyot Yapımı	35
2.10.1.	Cu/CdS Schottky Diyotunda Akım Taşıma Mekanizmasının İncelenmesi.....	35
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
3.1.	Örnek Büyütülmesinde Kullanılan CdS Tozunun X-ışını Kırınım Deseni	40
3.2.	Kaynak-Altık Mesafesinin CdS İnce Filmleri Üzerine Etkisi.....	41
3.2.1.	Yapısal Özelliklerin İncelenmesi.....	41
3.2.2.	Optik Özelliklerin İncelenmesi.....	44
3.2.3.	Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi	46
3.3.	Altık Sıcaklığının CdS İnce Filmler Üzerine Etkisi	47
3.3.1.	Yapısal Özelliklerin İncelenmesi.....	47
3.3.2.	Optik Özelliklerin İncelenmesi.....	53
3.3.3.	Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi	56
3.4.	İnce Film Örneklerinin Değişik Sıcaklıklarda Tavlanması	61
3.4.1.	Yapısal Özelliklerin İncelenmesi.....	61
3.4.2.	Optik Özelliklerin İncelenmesi.....	72
3.4.3.	Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi	76
3.5.	Cu/CdS Schottky Diyot Yapısının İncelenmesi	76
4.	SONUÇLAR.....	84
5.	ÖNERİLER	85

6.	KAYNAKLAR.....	86
	ÖZGEÇMİŞ.....	92

ÖZET

Bu çalışmada, güneş pillerinde optik pencere katmanı olarak kullanılan CdS ince filmlerine düşük altlık sıcaklığının etkisi araştırıldı. Ayrıca Cu/CdS/SnO₂ Schottky diyot yapısına düşük altlık sıcaklığının etkisi incelendi. İlk olarak, kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma yöntemiyle cam altlıklar üzerinde 300, 250, 200, 150 ve 100 K altlık sıcaklıklarında CdS ince filmleri elde edildi. Bu filmlerin bazı yapısal, elektriksel ve optik özellikleri incelendi. Cu/CdS/SnO₂ Schottky diyot hazırlamak için ise 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında SnO₂ kaplı cam altlıklar üzerinde CdS ince filmleri üretildi.

Elde edilen bu filmlerin tümünde hekzagonal yapıya ait olan (002) yansıma düzlemi etkin bir şekilde görüldü. Soğuk altlıklar üzerinde üretilen örneklerin daha kalın olmalarına rağmen parçacık boyutunun (~34,5 nm), oda sıcaklığında üretilen örneğe (~38,2 nm) göre yaklaşık % 10 kadar daha küçük olduğu görüldü. Bununla birlikte, altlık sıcaklığının azalmasıyla örneklerin *c* örgü parametrelerinin 6,662 Å'dan 6,711 Å'a ve yasak enerji aralığının 2,40 eV'tan 2,42 eV'a arttığı belirlendi. Örneklerde taşıyıcı yoğunluğunun, altlık sıcaklığından önemli ölçüde etkilendiği ve oda sıcaklığında üretilen örneğin yaklaşık 100 kat daha yüksek taşıyıcı yoğunluğuna (~ 5×10¹⁷ cm⁻³) sahip olduğu görüldü. Oda sıcaklığında üretilen örneklerde yüksek sıcaklıklarda (250 K - 300 K) tünelleme türü iletim mekanizması baskın iken düşük altlık sıcaklığında üretilen örneklerde termiyonik emisyon türü iletim mekanizmasının baskın olduğu belirlendi.

200 K altlık sıcaklığında üretilen CdS örneği kullanılarak hazırlanan Schottky diyotun engel yüksekliğinin (0,64 eV), 300 K altlık sıcaklığında üretilen CdS örneği kullanılarak hazırlanan Schottky diyotun engel yüksekliğine (0,57 eV) göre daha fazla olduğu görüldü. Her iki diyotun ideallik çarpanlarının 1'den büyük olduğu (300 K için 5,4; 200 K için 3,1) belirlendi. Bu diyotlar için genel olarak tünelleme türü iletim mekanizmasının baskın olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: CdS, Soğuk Altlık, Schottky Diyot, Akım Taşıma Mekanizması

SUMMARY

Preparation of CdS Thin Films on Cold Substrate and Investigation of Structural, Electrical and Optical Properties

In this study, the effect of the cold substrate temperature on the CdS thin films, which are used as optical window in solar cells, have been investigated. Also the effect of the cold substrate temperature on Cu/CdS/SnO₂ Schottky diode structure has been investigated. CdS thin films were prepared on glass substrate by vacuum evaporation in quasi-closed volume. The substrate temperatures were selected as 300, 250, 200, 150 and 100 K. The structural, electrical and optical properties of these thin films were investigated. For preparation of Schottky diode structure on SnO₂ coated glass substrate the CdS thin films were produced at substrate temperature 300 K and 200 K.

CdS thin films have hexagonal crystal structure. Miller indices corresponding to the peaks in the pattern were determined as (100), (002) and (004). Reflection from (002) plane was the most intense for all samples. Although the thickness for the samples prepared at relatively low temperature (1.6 μm) is higher than that of the sample prepared at 300 K (1.0 μm) the former had approximately 10 % smaller particle size. It is determined that lattice parameter *c* increased from 6.662 Å to 6.711 Å with decreasing substrate temperature. Also it is observed that band gaps of samples increased from 2.40 eV to 2.42 eV as the substrate temperature was decreased. The carrier concentration (~ 5×10¹⁷ cm⁻³) of the sample prepared at 300 K is found to be larger than that of the one prepared at cold substrate (~ 5×10¹⁵ cm⁻³). Tunnelling mechanism was found to be the dominant conduction mechanism above 250 K for the sample prepared at 300 K. However, thermionic emission mechanism was the dominant conduction mechanism above 250 K for samples prepared at cold substrates (200 K, 100 K).

The Schottky diode, Cu/CdS/SnO₂, produced at a substrate temperature of 200 K had a larger barrier height (0.64 eV) than that of the Schottky diode (0.57 eV) produced at 300 K. All diodes have larger ideality (5.4 for 300 K, 3.1 for 200 K) factor than 1. Tunnelling was the dominant conduction mechanism for these diodes.

Key Words: CdS, Cold Substrate, Schottky Diode, Current Transport Mechanism

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Değerlik bandının tepesine ve iletim bandının dibine yakın elektronlar için dağılım bağıntıları.....	3
Şekil 2.	Değerlik bandındaki boşluklar için dağılım bağıntısı.....	3
Şekil 3.	Hall olayının geometrisi	6
Şekil 4.	Dörtlü örgü konumları	9
Şekil 5.	Wurtzite yapısı.....	9
Şekil 6.	Çinko-blende yapısı.....	10
Şekil 7.	Doğrudan ve dolaylı geçiş	11
Şekil 8.	Vakumda buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi.....	17
Şekil 9.	Kapalı hacimde buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi	18
Şekil 10.	Lazerle buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi	19
Şekil 11.	Kimyasal püskürtme yönteminin şematik gösterimi	20
Şekil 12.	Kimyasal banyo yönteminin şematik gösterimi	21
Şekil 13.	Yüksek vakum sistemi (Varian NRC 840).....	23
Şekil 14.	İnce film üretim düzeneği.....	24
Şekil 15.	Şekil 14'teki (4) numaralı parçanın ayrıntılı görüntüsü	25
Şekil 16.	(a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm ve (d) 9 cm kaynak-altlık mesafeleri için çökeltme süresince altlık sıcaklığında meydana gelen değişim	26
Şekil 17.	Kaynak-altlık mesafesinin 9 cm'ye ayarlanması	26
Şekil 18.	Tavlama sırasında sıcaklığın zamana göre değişimi	27
Şekil 19.	X-ışını difraktometresi (Rigaku D/Max-IIIC).....	28
Şekil 20.	Taramalı elektron mikroskobu (ZEISS EVO 50).....	30
Şekil 21.	UV-Visible spektrofotometresi (Shimadzu UV-1601).....	31
Şekil 22.	Özdirenç ölçümü için kullanılan devrenin şematik gösterimi.....	32
Şekil 23.	Hall voltajı ölçümü için kullanılan devrenin şematik gösterimi.....	34
Şekil 24.	a) Tam temastan önceki metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı, b) temas ettirildikten sonraki enerji bant diyagramı.....	36
Şekil 25.	Metal - n-tipi yarıiletken enerji bant diyagramı: a) düşük katkılı durumlarda ($N_d \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) termoiyonik emisyon, b) orta düzeyde katkılı durumlarda ($10^{17} < N_d < 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) termoiyonik alan emisyonu, c) yüksek katkılı durumlarda ($N_d > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) alan emisyonu	38
Şekil 26.	CdS Tozunun X-ışını kırınım deseni	40

Şekil 27.	(a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm ve (d) 9 cm'lik kaynak-altlık mesafesinde hazırlanan örneklerin X-ışını kırınım desenleri.....	42
Şekil 28.	Kaynak-altlık mesafesine göre parçacık boyutunun değişimi.....	43
Şekil 29.	Kaynak-altlık mesafesine göre c örgü parametresinin değişimi.....	43
Şekil 30.	(a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm ve (d) 9 cm'lik kaynak-altlık mesafesinde hazırlanan örneklerin optik geçirgenlik eğrileri	44
Şekil 31.	(a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm ve (d) 9 cm'lik kaynak-altlık mesafesinde hazırlanan örnekler için $(ahv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi	45
Şekil 32.	Kaynak-altlık mesafesine göre yasak enerji aralığının değişimi.....	46
Şekil 33.	(a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında hazırlanan örneklerin X-ışını kırınım desenleri.....	49
Şekil 34.	Örneklerin parçacık boyutlarının altlık sıcaklığına göre değişimi	50
Şekil 35.	Örneklerin c örgü parametrelerinin altlık sıcaklığına göre değişimi.....	51
Şekil 36.	(a) 300 K, (b) 200 K ve (c) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin SEM görüntüleri	52
Şekil 37.	(a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında hazırlanan örneklerin optik geçirgenlik eğrileri	53
Şekil 38.	(a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında hazırlanan örnekler için $(ahv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi	54
Şekil 39.	Örneklerin yasak enerji aralıklarının altlık sıcaklığına göre değişimi.....	55
Şekil 40.	Örneklerin kalınlıklarının (d) ve parçacık boyutlarının (D) altlık sıcaklığına göre değişimi	55
Şekil 41.	(a) 300 K, (b) 200 K ve (c) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örnekler için 100 – 300 K arasında $\ln(\sigma T^{1/2})$ 'nin $1/T^n$ 'ye göre değişimi	58
Şekil 42.	300 K altlık sıcaklığında üretilen örnek için 250 – 300 K arasında çizilen $\sigma - T^2$ grafiği.....	59
Şekil 43.	(a) 300 K (120 – 220 K arası) ve (b) 100 K (108 – 162 K arası) altlık sıcaklıklarında üretilen örnekler için $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiği.....	60
Şekil 44.	300 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin (a) tavlınmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki X-ışını kırınım desenleri.....	62
Şekil 45.	250 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin (a) tavlınmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki X-ışını kırınım desenleri.....	63
Şekil 46.	200 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin (a) tavlınmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki X-ışını kırınım desenleri.....	64
Şekil 47.	150 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin (a) tavlınmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki X-ışını kırınım desenleri.....	65
Şekil 48.	100 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin (a) tavlınmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki X-ışını kırınım desenleri.....	66

Şekil 49.	(a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin parçacık boyutunun tavlama sıcaklığına göre değişimi	68
Şekil 50.	Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlandıktan önce ve 673 K'de tavlandıktan sonra parçacık boyutunda meydana gelen artma ($\Delta D = D_2 - D_1$).....	69
Şekil 51.	(a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin c örgü parametrelerinin tavlama sıcaklığına göre değişimi	70
Şekil 52.	300, 200 ve 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örnekler için sırasıyla (a), (c) ve (e) tavlammamış ve (b), (d) ve (f) 673 K'de tavlammış SEM görüntüleri	71
Şekil 53.	(1) 300 K, (2) 250 K, (3) 200 K, (4) 150 K ve (5) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin a) tavlandıktan önce, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki optik geçirgenlik eğrileri	73
Şekil 54.	(1) 300 K, (2) 250 K, (3) 200 K, (4) 150 K ve (5) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin (a) tavlammamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonra $(ah\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi.....	74
Şekil 55.	(a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin yasak enerji aralıklarının tavlama sıcaklığına göre değişimi	75
Şekil 56.	(a) 300 K ve (b) 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak yapılan Cu/CdS Schottky diyot yapısının $I-V$ karakteristiği	77
Şekil 57.	300 K altlık sıcaklığında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak hazırlanan Cu/CdS Schottky diyot için (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K'de ölçülen $I-V$ karakteristiği	78
Şekil 58.	200 K altlık sıcaklığında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak hazırlanan Cu/CdS Schottky diyot için (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K'de ölçülen $I-V$ karakteristiği	78
Şekil 59.	300 K altlık sıcaklığında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak hazırlanan Cu/CdS Schottky diyot için (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K'de $\ln I-V$ grafiği.....	79
Şekil 60.	200 K altlık sıcaklığında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak hazırlanan Cu/CdS Schottky diyot için (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K'de $\ln I-V$ grafiği.....	80
Şekil 61.	(a) 300 K ve (b) 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen CdS örnekleri kullanılarak hazırlanan diyotların ideallik çarpanlarının sıcaklığa göre değişimi	81
Şekil 62.	(a) 300 K ve (b) 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen CdS örnekleri kullanılarak hazırlanan diyotların engel yüksekliğinin sıcaklığa göre değişimi	83

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Bu çalışmada kullanılan CdS tozu ile JCPDS 6-314 kart numaralı CdS tozunun d değerleri	40
Tablo 2. Değişik kaynak-altlık mesafelerinde üretilen örneklerin X-ışını kırınım desenlerinde görülen piklerin şiddet oranları $[I_{(hkl)}/I_{(002)} (\%)]$	41
Tablo 3. Değişik kaynak-altlık mesafelerinde hazırlanan örneklerin karanlık ve aydınlık özdirençleri, fotoduyarlılıkları ve taşıyıcı yoğunlukları	47
Tablo 4. Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin X-ışını kırınım desenlerinde görülen piklerin şiddet oranları $[I_{(hkl)}/I_{(002)} (\%)]$	48
Tablo 5. Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin karanlık özdirençleri, taşıyıcı yoğunlukları, elektron hareketlilikleri ve aktivasyon enerjileri	57
Tablo 6. Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlamadan önceki (TÖ) ve 673 K'de tavladıktan sonraki (TS) X-ışını kırınım desenlerinde görülen piklerin şiddet oranları $[I_{(hkl)}/I_{(002)} (\%)]$	61
Tablo 7. Farklı altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlamadan önceki (TÖ) ve 673 K'de tavlandıktan sonraki (TS) karanlık özdirençleri, taşıyıcı yoğunlukları, elektron hareketliliği ve aktivasyon enerjileri	76

SEMBOLLER DİZİNİ

B	: Manyetik alan
E	: Elektrik alan
E_A	: Alıcı enerji düzeyi
E_D	: Verici enerji düzeyi
E_G	: Bant aralığı enerjisi
E_H	: Hall elektrik alanı
h	: Plank sabiti
j	: Akım yoğunluğu
k	: Dalga vektörü
k_B	: Boltzman sabiti
m_e	: Elektron etkin kütlesi
m_h	: Boşluğun etkin kütlesi
n	: Elektron yoğunluğu
n_0	: Dengedeki elektron yoğunluğu
N_A	: Birim hacim başına alıcı yoğunluğu
N_C	: İletim bandındaki birim hacim başına durumların etkin sayısı
N_D	: Birim hacim başına verici yoğunluğu
p	: Boşluk yoğunluğu
p_0	: Dengedeki boşluk yoğunluğu
p_i	: Özden boşluk yoğunluğu
R_H	: Hall sabiti
v_e	: Elektronun hızı
v_h	: Boşluğun hızı
σ	: Elektriksel iletkenlik
v	: Frekans
ϵ	: Kristalin dielektrik katsayısı
α	: Soğurma katsayısı
τ	: Taşıyıcı ömrü
$\epsilon(k)$: Enerji dağılımı
$\mu(T)$: Kimyasal potansiyel

ϵ_0	: Boşluğun dielektrik katsayısı
σ_0	: Karanlık iletkenlik
μ_e	: Elektron hareketliliği
τ_e	: Elektron sürüklenme zamanı
ϵ_e	: Elektronun enerjisi
ϵ_F	: Fermi enerji düzeyi
ϵ_h	: Boşluğun enerjisi
τ_h	: Boşluğun sürüklenme zamanı
μ_h	: Boşluk hareketliliği

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyamızdaki petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil enerji kaynaklarının yakın gelecekte tükenecek olması ve bu tür enerji kaynaklarının karbondioksit gibi zararlı gazları atmosfere yayarak iklim üzerinde onarılması güç etkiler (greenhouse effect) meydana getirmesi bilim adamlarını rüzgar enerjisi, nükleer enerji ve güneş pilleri gibi alternatif enerji kaynakları üzerinde araştırma yapmaya yönlendirmektedir. Bu enerji kaynakları arasında güneş pilleri önemli yere sahiptir.

1839 yılında Henri Becquerel, aynı elektrolitik çözelti içerisine daldırılmış olan iki elektrottan birinin üzerine foton düşürüldüğünde bu iki elektrot arasında bir potansiyel fark meydana geldiğini gözledi. Bu fotovoltajik olay güneş pilleri ile ilgili çalışmaların temelini oluşturdu. Güneş pili, aynı veya farklı kimyasal malzemelerden oluşan, fakat farklı iletkenlik türüne (n ve p-tipi) sahip iki yarıiletkenin bir araya gelmesiyle oluşur. Bu tür güneş pillerinde, foto-üretilmiş taşıyıcıların toplandığı ön ve geri kontak ve foto-üretilmiş taşıyıcıları kontaklara transfer eden bir iç elektrik alan vardır.

Günümüzde güneş pili uygulamalarında çok değişik malzemeler çalışılmaktadır. Güneş pili için malzeme seçimi o malzemeden yapılacak olan cihazın verimine bağlıdır. Yüksek verime sahip cihaz için 1,5 eV civarında yasak enerji aralığına sahip olan malzemelerin soğurma katmanı olarak kullanılması gerektiği bilinmektedir. Çünkü bu yasak enerji aralığına sahip malzemeler minimum kayıp ile güneş ışınlarını maksimum olarak soğurabilmektedir. Bu nedenle yaklaşık 1,45 eV yasak enerji aralığına sahip CdTe güneş pilleri için uygun bir soğurma malzemesidir. CdTe, CuIn(Ga)Se₂ ve Cu_{2-x}S kullanılarak yapılan pek çok heteroeklem ince film güneş pilleri için kısmen geniş yasak enerji aralığına (2,42 eV) sahip olan CdS ideal bir pencere malzemesidir.

Bu çalışmada, CdS/CdTe, CdS/CuIn(Ga)Se₂ ve CdS/Cu_{2-x}S gibi güneş pillerinde, optik pencere katmanı olarak kullanılan CdS ince filmlerinin yapısal, elektriksel ve optik özelliklerini iyileştirmek amaçlandı. Bu nedenle CdS ince filmlerinin kısmen kapalı hacimde vakum buharlaştırma yöntemiyle üretilmesi ve kaynak-altlık mesafesinin, düşük altlık sıcaklığının ve ısıtma işleminin filmlerin yapısal, elektriksel ve optik özelliklerine etkisinin incelenmesi planlandı.

1.2. Yarıiletkenler Hakkında Genel Bilgi

Silisyum ve germanyum gibi önemli yarıiletken malzemeler, elmas yapıda kovalent bağlı kristaller oluştururlar. GaAs ve InSb gibi yarıiletken bileşikler ise çinko sülfüre benzer yapı oluştururlar. Mutlak sıfır sıcaklığında en yüksek işgal edilmiş enerji bandı tümüyle doludur. Bu bant, kovalent bağlanmadan sorumlu elektronları içerdiği için, değerlik bandı olarak bilinir. En düşük işgal edilmemiş enerji bandı iletim bandı olarak bilinir ve değerlik bandından tipik olarak 1 eV (yarıiletkenler için; $0 < E_G < 4$ eV) mertebesindeki bir aralık ile ayrılır. Yarıiletken davranış, $\varepsilon(k)$ enerji dağılım bağıntıları Şekil 1’de gösterildiği gibi olmak üzere, değerlik bandının tepesine ve iletim bandının tabanına yakın durumlardaki elektronların hareketi ile açıklanır.

Enerjinin bir maksimumuna veya minimumuna yakın durumlar ile ilgilenildiği için dağılım eğrisi $\varepsilon(k)$ iyi bir yaklaşıklıkla parabolik olarak alınabilir ve iletim bandı için;

$$\varepsilon = E_G + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} \quad (1)$$

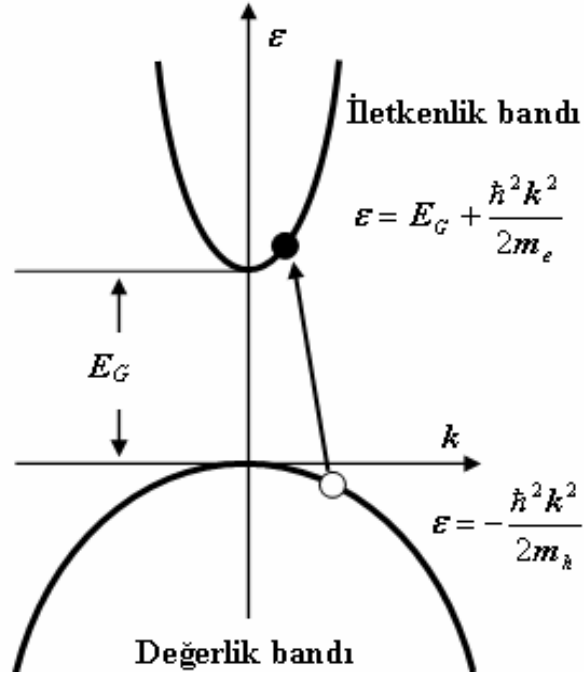
değerlik bandı için;

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

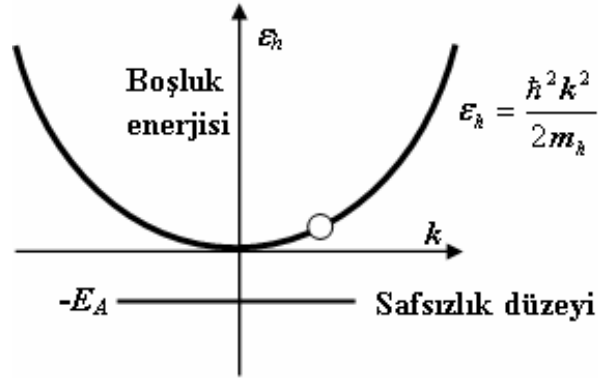
yazılabilir.

Burada, değerlik bandının tepesi potansiyel enerjinin sıfırı olmak üzere, E_G yasak enerji aralığı enerjisidir. İletkenlik bandının dibine yakın elektronlar, bu nedenle, pozitif m_e kütleli serbest parçacıklar gibi davranırlar. Bununla birlikte değerlik bandında daha aşağı durumlardaki elektronların pozitif etkin kütlelere sahip olmalarına karşın, değerlik bandının tepesine yakın durumda olanlar, negatif bir $-m_h$ kütlelerine sahip gözükmürler. Yaklaşık dolu bir değerlik bandının davranışı, doldurulmuş durumları tamamen ihmal ederek ve her bir boş durumun pozitif yüklü $|e|$, pozitif kütleli m_h ve $\hbar^2 k^2 / 2m_h$ enerjili bir parçacıkla işgal edilmiş olduğu göz önüne alınarak hesaplanabilir (Şekil 2). Bu hayali parçacıklara boşluklar (hole) denir.

Bir dış elektrik ve manyetik alanda bu boşluklar sanki pozitif e yüklü imiş gibi davranırlar. Yarıiletkende toplam akım iletim bandındaki elektronlardan ve değerlik bandındaki boşluklardan ileri gelen katkıların toplamı olarak yazılabilir. Bu nedenle yarıiletkendeki elektron ve boşluklara yük taşıyıcıları denir.



Şekil 1. Değerlik bandının tepesine ve iletim bandının dibine yakın elektronlar için dağılım bağıntıları



Şekil 2. Değerlik bandındaki boşluklar için dağılım bağıntısı

1.2.1. Elektriksel İletkenlik

Taşıyıcıların elektrik ve manyetik alanlardaki hareketini açıklamak için; elektronlar için

$$m_e \left(\frac{d\vec{v}_e}{dt} + \frac{\vec{v}_e}{\tau_e} \right) = -e\vec{E} - e\vec{v}_e \times \vec{B} \quad (3)$$

ifadesi ve boşluklar için

$$m_h \left(\frac{d\vec{v}_h}{dt} + \frac{\vec{v}_h}{\tau_h} \right) = +e\vec{E} + e\vec{v}_h \times \vec{B} \quad (4)$$

ifadesi kullanılmaktadır.

Sadece bir doğru akım elektrik alanı bulunduğunda denklem (3) ve (4)'ün çözümleri,

$$\vec{v}_e = -\frac{e\tau_e}{m_e} \vec{E} = -\mu_e \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{v}_h = \frac{e\tau_h}{m_h} \vec{E} = -\mu_h \vec{E} \quad (6)$$

olur. Burada \vec{v}_e ve \vec{v}_h sırasıyla elektron ve boşlukların sürüklenme hızlarıdır. Burada elektron ve boşlukların hareketlilikleri

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e} \text{ ve } \mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h} \quad (7)$$

ifadeleriyle verilmektedir. Elektron ve boşluk katkılarının toplanmasıyla elde edilen elektrik akım yoğunluğu,

$$\vec{j} = -ne\vec{v}_e + pe\vec{v}_h = \left(\frac{ne^2\tau_e}{m_e} + \frac{pe^2\tau_h}{m_h} \right) \vec{E}$$

$$\vec{j} = (ne\mu_e + pe\mu_h) \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad (8)$$

dir. Bu bağıntı, σ elektriksel iletkenliği

$$\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h \quad (9)$$

ile verilen Ohm yasasıdır. Elektron ve boşluk hareketlilikleri çoğunlukla karşılaştırılabilir olduklarından, bağıl taşıyıcı yoğunlukları, elektronların ve boşlukların iletkenliğe yaptıkları bağıl katkıları belirler. Özden yarıiletken olan sıcaklık bölgesinde, bu iki katkı, çoğunlukla birbirine yakın olup, katkılı yarıiletken olan sıcaklık bölgesinde ise normal olarak çoğunluk taşıyıcıları hakimdir.

1.2.2. Hall Olayı

Bir metal \vec{B} manyetik alanı içine yerleştirildiğinde ve içinden \vec{j} akım yoğunluğu geçirildiğinde aşağıdaki bağıntı ile verilen enine bir \vec{E}_H elektrik alanı meydana gelir:

$$\vec{E}_H = R_H \vec{B} \times \vec{j} . \quad (10)$$

Bu Hall olayıdır ve R_H Hall sabiti olarak bilinir. Deneyin geometrisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Olayın başlangıcı, manyetik alan içinde iletkenlik elektronlarına etkiyen $-e\vec{v} \times \vec{B}$ Lorentz kuvvetidir. Şekil 3, x yönünde \vec{j} akımına karşılık gelen elektronların \vec{v} sürüklenme hızının yönünü göstermektedir. Lorentz kuvveti elektronları $-y$ yönünde saptırma eğilimi gösterir ve bu da metalin alt yüzünde negatif yük yoğunluğunun hızlı birikimine sebep olur. Sonuçta $-y$ yönünde \vec{E}_H elektrik alanı (Hall alanı) oluşur. Böylece, $v_y = 0$ olan kararlı durumda, bu geometride (3) hareket denkleminin x ve y bileşenleri

$$\begin{aligned} m_e v_x / \tau &= -eE_x \\ 0 &= -e(E_y - v_x B) \end{aligned} \quad (11)$$

biçimindedir. Bu denklemlerin ilki, σ elektriksel iletkenliğinin manyetik alanın varlığından etkilenmediğini gösterir. İkinci denklemden

$$E_y = v_x B = j_x B / (-ne) \quad (12)$$

elde edilir. Bu, (10) denklemiyle karşılaştırılırsa

$$R_H = -1/ne \quad (13)$$

sonucuna ulaşılır.

İki tip taşıyıcı bulunduran bir yarıiletken, hesaplama daha karmaşıktır. Bununla birlikte, taşıyıcının bir tipinin yoğunluğu çoğunlukla ötekenden çok daha büyüktür ve böylece n-tipi yarıiletken ($n \gg p$)

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (14)$$

ve p-tipi yarıiletken ($p \gg n$)

$$R_H = +\frac{1}{pe} \quad (15)$$

ifadeleri kullanılabilir. Hall olayının işareti çoğunluk yük taşıyıcının işareti ile belirlenir ve R_H 'nin ölçülmesi taşıyıcı yoğunluğunun belirlenmesini mümkün kılar. Denklem (9), (14) ve (15) denklemleriyle birleştirilirse ve iletkenlikte çoğunluk taşıyıcılarının baskın olduğu varsayılırsa taşıyıcı hareketliliği için

$$\mu = |R_H| \sigma \quad (16)$$

ifadesine ulaşılır.

Kristalde hem elektronların ve hem de boşlukların önemli oranlarda var olduğu durumda Hall katsayısının hesaplanması daha karmaşıktır. Denklem (3) ve (4)'ün kararlı durum çözümleri

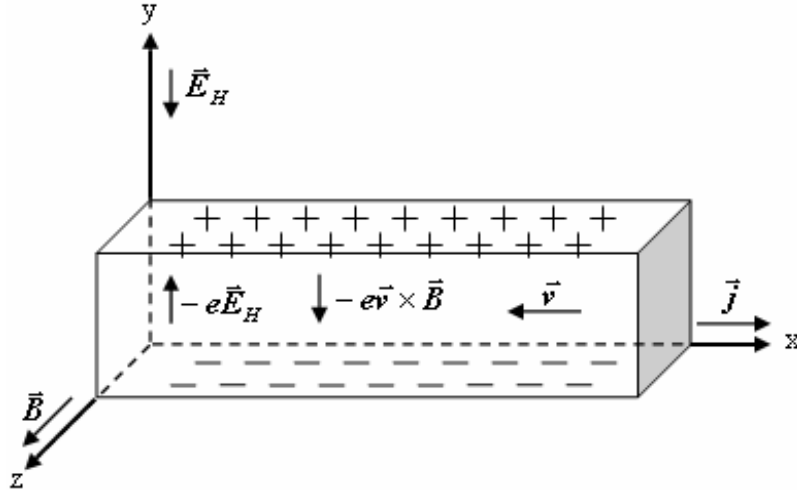
$$\vec{v}_e = -\frac{e\tau_e}{m_e}(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) = -\mu_e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) \quad (17)$$

$$\vec{v}_h = \frac{e\tau_h}{m_h}(\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B}) = \mu_h(\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B}) \quad (18)$$

dir. Bu durumda \vec{j} akım yoğunluğu,

$$\vec{j} = -ne\vec{v}_e + p\vec{v}_h = ne\mu_e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) + p\mu_h(\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B}) \quad (19)$$

olur. Şekil 3'teki deneysel geometri dikkate alınır, bu geometri için sınır koşulları, $j_y = 0$ olmasını gerektirir.



Şekil 3. Hall olayının geometrisi

Taşıyıcı hızlarının y bileşenlerinin B 'ye göre lineer olduğu ve B 'ye göre sadece birinci mertebeye kadar terimlerin tutulduğu dikkate alınır, denklem (19)'dan

$$j_x = eE_x(n\mu_e + p\mu_h) \text{ ve} \quad (20)$$

$$j_y = 0 = eE_y(n\mu_e + p\mu_h) - eB_z(n\mu_e v_{ex} + p\mu_h v_{hx}) \quad (21)$$

denklem (17) ve (18) kullanılırsa

$$j_y = eE_y(n\mu_e + p\mu_h) + eB_z E_x (n\mu_e^2 - p\mu_h^2) \quad (22)$$

ifadeleri elde edilir. Bu iki denklem arasında E_x yok edilirse

$$E_y = -\frac{j_x B_z (n\mu_e^2 - p\mu_h^2)}{e(n\mu_e + p\mu_h)^2} \quad (23)$$

ifadesi elde edilir. Hall katsayısının tanımından (denklem (10))

$$R_H = \frac{(p\mu_h^2 - n\mu_e^2)}{e(p\mu_h + n\mu_e)^2} \quad (24)$$

elde edilir. Böylece azınlık taşıyıcıları, hareketlilikleri yeterince yüksekse, Hall katsayısının işaretini belirleyebilirler.

1.3. II-VI Bileşiklerinin Doğal Yapısı

II-VI grubu bileşikleri hala önemli bir araştırma konusudur. III-V grubu bileşikleri yanında, II-VI grubu bileşikleri, IV. Grup element türü yarıiletkenlere alternatif bir çalışma konusu olarak sunulmuştur. 1950'li yılların başlarında yarıiletken teknolojisindeki büyüme, silisyum ve germanyumun sınırlı kullanım alanlarını ortaya çıkardı. Bu sınırlama, daha çok bu element türü yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarının değerleri ve karakteri açısından sahip olduğu dezavantajlardan kaynaklanıyordu. Yasak enerji aralığının genişletilmesi ile ilgili ilk çalışmalar III-V grubu bileşiklerinde yapılmıştır. Bunlar arasında InSb ve GaAs, sırasıyla küçük ve büyük enerji aralığına karşılık gelen, yarıiletken bileşikler olarak gösterilebilirler. III-V grubu bileşiklerindeki bu gelişmelere paralel olarak II-VI grubu bileşiklerinde de sistematik çalışmalar yapılmıştır (Ray, 1969). Bu çalışmaların sonuçları, daha çok II-VI bileşiklerinin genel doğası ve oda sıcaklığında geniş yasak enerji aralığına sahip malzemelerin kimyasal kararlılığı hakkında bilgiler verdi. Doğrudan enerji aralığının (direct energy gap), II-VI bileşiklerinin genel bir karakteri olduğu anlaşılmaktadır. HgTe'in yarı-metalik, CdS ve CdSe'in yüksek fotoiletkenlik ve ZnS'in ise güçlü bir lüminesans özellik göstermeleri, II-VI grubu bileşiklerinin çeşitli alanlarda yararlı olabileceklerini göstermektedir.

II-VI grubu bileşiklerinin bazıları iki tür kristal yapısından birini tercih ederler. Bu kristal yapıları çinko-blende (kübik örgü) ve wurtzite (hekzagonal) yapılarıdır. Bu yapıların her ikisi de dördü (tetrahedral) örgü konumları ile karakterize edilirler.

1.3.1. II-VI Bileşiklerinin Kristal Yapıları

1.3.1.1. Örgü Konumları

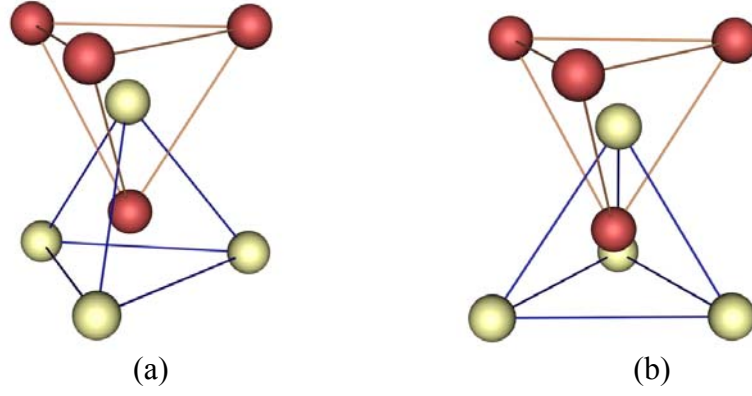
II. ve VI. grup elementlerin bir araya gelmeleri, ortalama olarak atom başına dört değerlik elektronunun ortaya çıkmasına neden olurlar. Burada atomlar arasında, elektron

transferinden ziyade, elektron paylaşılması eğiliminin olduğu, dörtlü örgü konumlarının oluşumuna yol açılır. AB bileşiğindeki dörtlü bir örgü konumu, öyle bir konumdur ki, her bir A atomu simetrik olarak dört tane en yakın B atomları tarafından çevrelenmiştir. Bu durumun oluşması için B atomları bir dört-yüzlü (tetrahedron)'nün köşelerine, A atomu ise bu dört yüzünün geometrik merkezine konulmalıdır. A ve B konumları, bunların dörtlü bağlanma doğası dikkate alındığında, birbirine eşdeğerdir. Bu dörtlü konumların birleşimi, ilgilendiğimiz bileşiklerle ilişkili olan, olası iki biçim ortaya çıkarır. Şekil 4 (a), iç içe giren iki tane dört-yüzlünün taban üçgenlerinin birbirine paralel ve düşey olarak aynı hizada oldukları andaki durumu göstermektedir. Şekil 4 (b) ise taban üçgenlerinin yine paralel fakat dikey çizgiye göre 60° dönmüş hali göstermektedir. II-VI grubu bileşiklerinin bazıları iki tür kristal yapısından birini tercih ederler. Bu kristal yapıları çinko-blende (kübik örgülü) ve wurtzite yapılarıdır. Bu yapıların her ikisi de dörtlü örgü konumları ile karakterize edilirler.

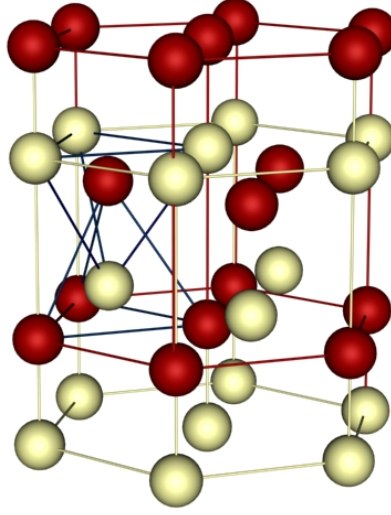
1.3.1.2. Kristal Yapılar

Dörtlü örgü konumlarının bu iki tür birleşimi, “wurtzite” ve çinko-blende gibi iki tane kristal yapıya yol açar.

(a) Wurtzite yapısı: Hekzagonal kristal sınıfında olan wurtzite yapısı, Şekil 4 (a)'da görülen dörtlü konumların birleşimine sahiptir. Bu yapı, Şekil 5'te görüldüğü gibi, hekzagonal c eksenine boyunca $(3/8)c$ mesafesi kadar birbirinden kaydırılmış iç içe geçmiş iki tane hekzagonal örgüyü içerir. İdeal dörtlü konumlara sahip wurtzite yapısında en yakın komşu mesafesi $(3/8)c$ veya $\sqrt{3/8}a$ dır; bu da c/a oranı için $\sqrt{8/3}=1,633$ değerini verir. BeO, ZnO, ZnS, CdS, ZnSe, CdSe ve MgTe gibi malzemelerin tümünün wurtzite yapıda kristalleştikleri gözlenmiştir (Ray, 1969).



Şekil 4. Dörtlü örgü konumları

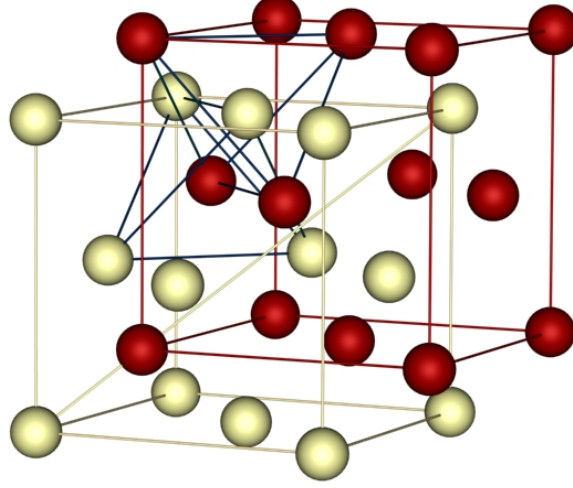


Şekil 5. Wurtzite yapısı

(b) Çinko-blende yapısı: Kübik kristal sınıfında olan çinko-blende yapısı, Şekil 4 (b)'de görüldüğü gibi, dörtlü konumların birleşimine sahiptir. Bu yapı, elmas yapısından türetilmiş olup, Şekil 6'da görüldüğü gibi, hacim köşegeni boyunca, hacim köşegeninin $1/4$ 'ü kadar ötelenerek iç içe geçmiş olan iki tane sıkı-paket kübik örgünün birleşiminden oluşmuştur. Bu durumda en yakın komşu mesafesi $(\sqrt{3}/4)a$ 'dır. Berilyum, çinko, kadmiyum ve civanın sülfürleri, selenürleri ve tellürlerinin tümü çinko-blende yapısında kristalleşmişlerdir (Ray, 1969).

Bu iki yapı, çinko-blende'nin $[111]$ üç-katlı eksenini ve wurtzite yapısının $[0001]$ altı-katlı eksenini cinsinden karşılaştırılabilir. Çinko-blende'deki iç içe geçmiş iki dört-yüzlü, $[111]$ eksenini etrafında döndürülürse, yapı, wurtzite yapısına dönüşür ve simetri eksenini $[0001]$

ekseni olur. Bir bileşiği oluşturan iki cins atomun elektronegativite farklarının karşılaştırılması, atomik elektronegativite farkları büyüdükçe, wurtzite yapının daha uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Çinko-blende yapısı

1.3.2. II-VI Bileşiklerinin Optik Özellikleri

Soğurma kenarı bölgesindeki spektrum, araştırılan malzemeler hakkında çok yararlı bilgiler sağlar. II-VI grubu bileşiklerinin incelenmesinde önemli bir özellik eksiton durumlarının varlığı şeklinde ortaya çıkar. Bunlar, soğurma kenarının uzun dalgaboyu tarafında pikler olarak görünür. Eksitonlar, iletim bandına yakın hidrojenimsi seviyeler cinsinden tanımlanan, bağlı elektron-boşluk çiftleridir. Bu seviyeler, E_c 'nin altında kesikli parabolik bantların bir serisini oluştururlar. İletkenlik bandının dibi olan bu E_c , II-VI grubu bileşiklerinde $\vec{k} = 0$ 'a yerleşmiştir.

Işınımın soğurulması, iletim ve değerlik bantları arasında elektronik geçişlere neden olur ve bu geçişler doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki şekilde oluşur. Doğrudan geçiş, elektronların \vec{k} değerinde (momentumunda) bir değişim olmayan uyarma sürecidir. Dolaylı geçişte elektronun kristal içindeki momentumu değişir. Doğrudan geçiş, değerlik ve iletim bantlarının uç noktaları (maksimum ve minimum) Brillouin bölgesinde aynı noktaya (k) yerleştiği zaman gerçekleşir. Dolaylı geçiş ise bant uç noktaları \vec{k} uzayında farklı konumlardayken meydana gelir. Şekil 7 her iki tip geçişi göstermektedir. Dolaylı geçiş süreci, kristal momentumunu dengelemek için, fononların oluşmasını veya yok

1.4. Literatür Araştırması

Yarıiletken malzemeler elektronik aygıt imalatında oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır. Genellikle klasik yöntemlerle üretilen aygıtların bazı özelliklerinin teorik değerleri deneysel değerlerle uyuşmamaktadır. Örneğin CdS/CdTe güneş pilinde ulaşılan en iyi verim değerleri % 16-17 civarında olmasına rağmen teorik verim oda sıcaklığında % 30 civarındadır (Potlog vd., 2003). Bu uyuşmazlıkları kaldırmak için (ısıl işlem yapılması, katkı yapılması, kontak malzemelerinin değiştirilmesi, değişik ince film üretim yöntemlerinin kullanılması, vs.) değişik çalışmalar yapılmaktadır.

1.4.1. Isıl İşlemin CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi

CdS örneklerinin bazı karakteristik özelliklerini iyileştirmek için örneklere değişik şartlarda ısıl işlem uygulanmaktadır. Lozada-Morales ve arkadaşları kimyasal banyo yöntemiyle kübik yapıda CdS ince filmlerini elde ettiler (Lozada-Morales vd., 1998). Bu malzemeleri $180 - 430^{\circ}\text{C}$ arasında ve 10^{-3} torr'luk vakum ortamında tavladılar. Tavlama sonucunda numunelerin a örgü parametresinin $5,76 \text{ \AA}$ 'dan $5,80 \text{ \AA}$ 'a arttığını ve yasak enerji aralığının yaklaşık $2,40 \text{ eV}$ 'tan $2,28 \text{ eV}$ 'a azaldığını gördüler. Bununla birlikte kristal yapıda bir değişim olmadığını belirlediler. Lozada-Morales ve arkadaşları 2001 yılında benzer bir çalışma yaptılar. Bu sefer numuneleri $\text{Ar} + \text{S}_2$ ortamında ve $100 - 550^{\circ}\text{C}$ arasında tavladılar ve yaklaşık 300°C tavlama sıcaklığından itibaren kübik yapının hekzagonal yapıya dönüştüğünü gördüler (Lozada-Morales vd., 2001). Sasikala ve arkadaşları ITO (indium tin oxide) kaplı cam altlıklar üzerinde, elektro-çökeltme (electrodeposition) yöntemiyle hekzagonal yapıda CdS ince filmlerini elde ettiler (Sasikala vd., 1997). Bu filmleri 350°C 'da H_2 ortamında 30 dakika tavladılar. Tavlama işleminden sonra filmlerin kristal yapısında bir değişim gözlemediler fakat pik şiddetlerinde bir artış gözlediler. Oumous ve arkadaşlar kimyasal banyo yöntemiyle elde ettikleri CdS ince film örneklerini 200°C 'ta vakum ve argon ortamında tavladılar. Tavlama sonucu örneklerin öz direncinin ve yasak enerji aralığının ($2,48 \text{ eV}$ 'tan $2,34 \text{ eV}$ 'a) azaldığını gördüler (Oumous ve Hadiri, 2001). Fumitaka ve arkadaşları elektrokimyasal yöntemle elde ettikleri CdS örneklerini N_2 , hava ve O_2 ortamlarında ve değişik sıcaklıklarda tavladılar (Fumitaka vd., 1998). Sonuç olarak O_2 ortamında tavlamanın örneklerdeki S eksikliğiyle ilgili kusur yoğunlunu azalttığını belirlediler.

Güneş pilinde kullanılan örneklerin değişik tuzların buharında tavllanması bu iyileştirme çalışmaları arasında yer almaktadır. Lee ve arkadaşları RFMS (Radio Frekans Magnetron Sputtering) yöntemiyle elde ettikleri $Cd_{1-x}Zn_xTe$ filmlerini $CdCl_2$ ve $ZnCl_2$ tuzlarının buhar ortamında tavladılar. Sonuç olarak $CdS/Cd_{1-x}Zn_xTe$ güneş pilinin performansının iyileştiğini gördüler (Sung Hyun Lee vd., 2005). Moutinho ve arkadaşları CBD (Chemical Bath Deposition) ve CSS (Close-Space Sublimation) yöntemleriyle CdS ince filmlerini elde ettiler ve bu ince filmleri $CdCl_2$ buharında tavladılar. Sonuç olarak CBD yöntemiyle üretilen örneklerde tavlama ile kübik yapının hekzagonal yapıya dönüştüğünü ve tane boyutunun arttığını gördüler. Buna zıt olarak, CSS yöntemiyle üretilen örneklerin fiziksel özelliklerinin bu ısıl işlem sürecinden önemli ölçüde etkilenmediğini belirlediler (Moutinho vd., 2003).

1.4.2. Katkı Atomlarının CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi

$CdS/CdTe$ güneş pilinde pencere malzemesi olarak kullanılan CdS 'in, iyi bir verim elde etmek için, direncinin küçük ve yasak enerji aralığının büyük olması gerekir. Bu zamana kadar yapılan değişik çalışmalarda farklı katkı malzemeleri kullanılarak CdS 'in bu özellikleri iyileştirilmeye çalışıldı. Fakat yapılan katkıların, bir özelliği düzeltirken diğerini bozduğu tespit edildi. Örneğin CdS ince filmlerine çinko katkısı yapıldığında örneklerin yasak enerji aralığı ve özdirenci artmaktadır (Tomakin, 2003). Özdirencin artması ise güneş pillerinde istenmeyen bir durumdur. Bu olumsuzluklara rağmen güneş pillerinde CdS yerine $Cd_{1-x}Zn_xS$ örneklerinin kullanılması daha büyük açık devre voltajı (V_{OC}) ve kısa devre akımı (I_{SC}) elde edilmesini sağlar (Burton ve Hench, 1976; Pande vd., 1985). Bu da güneş pilinin performansını arttırmaktadır. Yapılan değişik çalışmalarda CdS ince film örneklerine In katkısının, örneklerin özdirencini belli bir In katkı miktarına kadar azalttığı ve bu miktar aşıldığında ise özdirenci tekrar arttırdığı belirlenmiştir (Dhere vd., 1987; Bacaksız, 2002). Lee ve arkadaşları CBD yöntemiyle elde ettikleri CdS 'e bor katkısı yaparak CdS 'in özdirencini $2 \Omega \times cm$ 'ye kadar düşürdüler (Jae-Hyeong Lee vd., 2003). Yine bu çalışmada bor katkısının $CdS/CdTe$ güneş pilinin özelliklerinde iyileştirme yaptığı belirlendi. Patil ve arkadaşları CdS 'e $x = 0,1$ miktarında ($CdS_{1-x}Te_x$) Te katıldığında pil performansında artma tespit ettiler (Patil vd., 2004).

1.4.3. Üretim Tekniğinin CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi

Yarıiletken ince film üretim tekniği bu malzemelerin karakteristik özelliklerini etkilemektedir. Dolayısıyla bu malzemelerden yapılan cihazların performansı ince film üretim tekniğine bağlıdır. Al Kuhaimi tarafından yapılan bir çalışmada CdS ince filmleri vakum buharlaştırma, ekran baskı (screen printing) ve kimyasal banyo yöntemleriyle elde edilip sonuçlar karşılaştırıldı (Al Kuhaimi, 1998). Elde edilen sonuçlar, düşük özdirence ve yüksek geçirgenliğe sahip CdS ince filmlerinin vakum buharlaştırma yöntemiyle elde edilebileceğini gösterdi. Bununla birlikte, başka bir çalışmada vakum buharlaştırma yöntemi ile üretilmiş CdS ince film örneklerinin, CBD yöntemiyle üretilmiş CdS ince filmlerine göre yapısal ve optik özelliklerinde iyileşmeler olmasına rağmen, CdS/CdTe güneş pili uygulamasında daha düşük verime sahip olduğu belirtilmiştir (Jae-Hyeong Lee, 2005).

1.4.4. Kontak Malzemesinin CdS/CdTe Güneş Pillerine Etkisi

CdS/CdTe güneş pilinin performansını etkileyen faktörlerden biri geri kontak malzemesidir. Bu tür güneş pillerinde geri kontak malzemesi olarak kullanılan bakır, hızlı difüze olma özelliğine sahiptir. Bakırın bu özelliği güneş pilinin performansını bozmaktadır. Romeo ve arkadaşları bu olumsuz durumdan kurtulmak için CdS/CdTe güneş pilinde geri kontak malzemesi olarak Sb_2Te_3 malzemesini kullandılar ve %15,2-15,8 verim elde ettiler (Romeo vd., 2004). Bu araştırma grubunun bir başka çalışmasında CdS/CdTe güneş pilinin performansının, CdS ile altlık malzemesi olarak kullanılan TCO'nun (transparent conducting oxide) yüzeyi arasındaki etkileşmelere güçlü bir şekilde bağlı olduğunu ve bu etkileşmelerin genellikle TCO filmlerinin yüzeyindeki oksijen atomlarının kararlılığıyla ilişkili olduğu ileri sürüldü (Romeo vd., 2003). Bu çalışmada en iyi verim, TCO malzemesi olarak flor katkısı yapılmış In_2O_3 kullanılarak, %14 civarında elde edilmiştir. Ayrıca bazı araştırmacılar Cd_2SnO_4 'ün daha iyi elektriksel ve optik özelliklere sahip olduğunu ve bu nedenle SnO_2 yerine kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Wu vd., 1996; Coutts vd., 1996).

1.4.5. Tane Boyutunun CdS/CdTe Güneş Pillerine Etkisi

CdS/CdTe güneş pilinde SnO₂/poly-CdS/poly-CdTe cihaz yapısı yaklaşık 30 yıldan beri kullanılmaktadır. Bu yapının bazı sınırlamaları vardır: 1) Tabaka öz direnci ~10 Ω/sq olduğu zaman, geçirgen iletken oksit (TCO) katmanı olan SnO₂ yaklaşık %80 geçirgenliğe sahiptir. Bu durum cihaz performansını olumsuz etkilemektedir. 2) Dar olan bir yasak enerji aralığına (~2,42 eV) sahip CdS, kısa dalga boyu sınırında önemli ölçüde soğurmaya neden olmaktadır. 3) Pencere katmanı olan CdS filmi, 0,1 µm kalınlığında üretildiğinde, E_g'den daha büyük enerji ile gelen ışınımın yaklaşık %63'ünü soğurur. Yüksek kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) elde etmek için CdS'in kalınlığını azaltmak gerekmektedir. Bu işlem, CdS/CdTe aygıt yapısında maviye duyarlılığı iyileştirmek için yapılmalıdır. Bununla birlikte, CdS'in kalınlığının azaltılması, aygıtın açık-devre voltajını (V_{oc}) ve doldurma çarpanını (FF) olumsuz yönde etkilemektedir (Chu ve Chu, 1993). 4) CdTe ile polikristal-CdS arasında daha küçük yasak enerji aralıklı CdS_{1-y}Te_y alaşımının oluşması; bu da aygıt performansını olumsuz etkilemektedir (McCandess ve Hegedus, 1991). 5) Polikristal-CdTe ile polikristal-CdS film arasında yaklaşık %10 örgü uyumsuzluğu vardır; bu da eklem bölgesinde yüksek kusur yoğunluğuna yol açar. CdS ile CdTe arasında olan bu örgü uyumsuzluğunu azaltmak için yüksek-sıcaklık aygıt imal süreci uygulanmalıdır. Burada CdS ile CdTe arasında interdifüzyon gerçekleşerek yeni ara katmanlar (CdS_{1-y}Te_y ve CdTe_{1-x}S_x) oluşur. Fakat yüksek sıcaklık sürecinde yeni kusurlar ve safsızlıklar ortaya çıkar; bu da açık devre voltajı (V_{oc}) ve dolum çarpanının (FF) iyileşmesinde sınırlamalar getirir. Bu nedenle, (i) daha yüksek bir değerde yasak enerji aralığına sahip, (ii) CdTe soğurma katmanı ile daha iyi örgü uyumu gösteren, (iii) minimum Te difüzyonu olacak şekilde yeni bir pencere malzemesine gerek duyulmaktadır.

Son olarak, CdCl₂ ile yapılan ısıtma işlemi, yüksek verimli CdS/CdTe güneş pili yapımında önemli bir basamak oluşturur. Yapılan iyileştirmeler, (i) tane büyüklüğünün artması, (ii) tane-sınırı pasifleşmesi, (iii) artan CdS/CdTe arayüzey alaşımlaması ve (iv) CdS ile CdTe katmanları arasındaki örgü uyumsuzluğunun azaltılması şeklinde sıralanabilir. Bununla birlikte CdCl₂ ile yapılan işlemin dozunun artması adhezyon sorununa yol açmaktadır.

Wu, SnO₂/poly-CdS/poly-CdTe cihaz yapısı yerine Cd₂SnO₄/ZnSnO_x/nano-CdS:O/CdTe cihaz yapısını kullandı ve %16.5 verim elde etti (Xuanzhi Wu, 2004). Wu'nun nano-CdS kullanmasının nedenlerinden biri nano-CdS ile CdTe arasındaki örgü

uyuşmazlığı poly-CdS ile CdTe arasındaki örgü uyuşmazlığından daha az olmasıdır. Başka bir çalışmada CdS/CdTe güneş pillerinin veriminin CdS ve CdTe ince filmlerinin tane boyutları arasındaki farka bağlı olduğu ve bu fark arttıkça pil veriminin arttığı tespit edilmiştir (Hernández-Contreras vd., 2004). Bu nedenle güneş pillerinde pencere katmanı olarak nano-CdS ince filmlerinin kullanılmasının güneş pilinin verimini artırması beklenebilir.

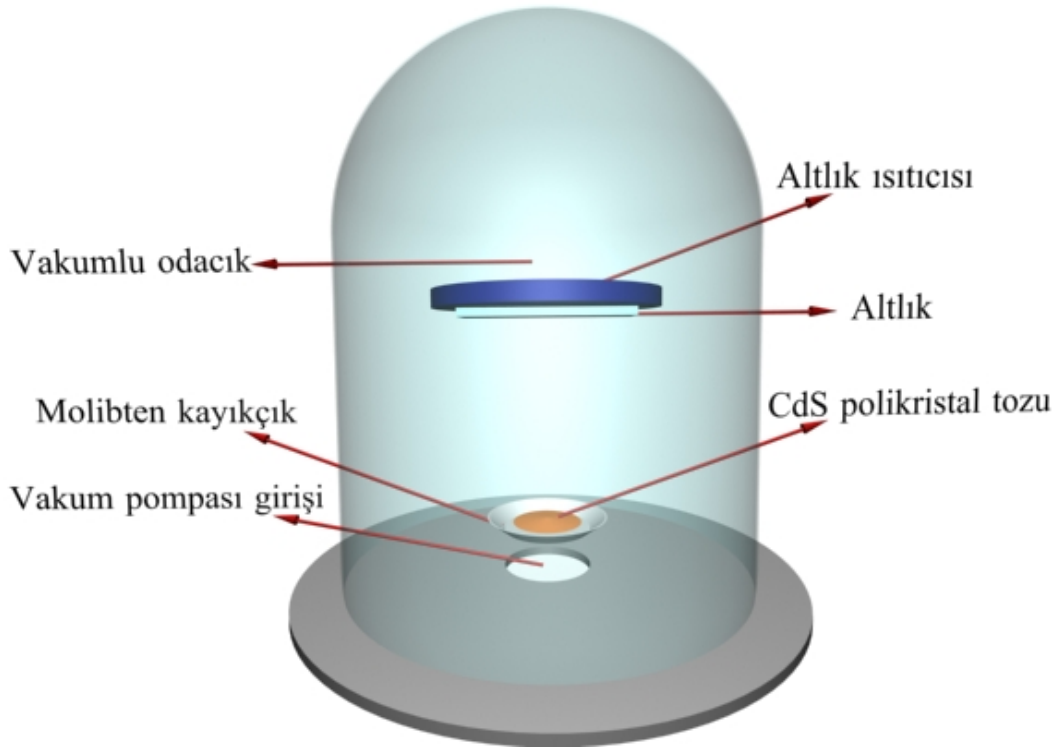
Güneş pillerinde optik pencere katmanı olarak kullanılan CdS örneklerinin yaklaşık 2.42 eV olan yasak enerji aralığının daha büyük değerlere çıkarılması, güneş pili performansını olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda yarıiletken malzemelerinin tane boyutu azaldıkça yasak enerji aralığının arttığı tespit edilmiştir (Nanda vd., 1998; Nima vd., 2005). Nanoparçacıklı malzemeler değişik yöntemlerle elde edilebilmektedir. Çözeltide çökeltme, sol-gel, kimyasal banyo ve kimyasal püskürtme yöntemleri bunlar arasındadır. Böyle malzemelerin üretimi için son yıllarda genişçe kullanılan yöntemlerden biri de gaz yoğunlaşma sürecidir (Fernández vd., 1999). Bu yöntemde metalik veya inorganik malzeme ısı buharlaştırma, elektron demeti ile buharlaştırma veya “sputtering” cihazları kullanılarak 1-5 Torr He (veya başka asal gaz) atmosferinde, nispeten soğuk olan (300 K) altlığa doğru buharlaştırılır. Bununla birlikte, yapılan değişik çalışmalarda vakum buharlaştırma yöntemiyle elde edilen CdS ince filmlerinin, altlık sıcaklığı (oda sıcaklığına kadar) azaldıkça tane boyutunun azaldığı tespit edildi (Pal vd., 1997; Zhibing He vd., 2005).

1.5. İnce Film Elde Etme Yöntemleri

1.5.1. 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 tabakasını oluşması. Şekil 8 vakumda buharlaştırma yöntemini göstermektedir. Buharlaştırılacak olan malzeme ısıtılarak atom ve moleküllerden oluşmuş gaz haline getirilir. Gaz halindeki malzeme altlık yüzeyine çökerek ince film halinde kaplanır. Bu yöntemle optik olarak düzgün filmler kolayca elde edilmesine rağmen stokiometrik filmler elde etmek zordur (Bouchenaki vd., 1991). Vakum ortamında hazırlanan filmlerin büyüme hızı, vakum

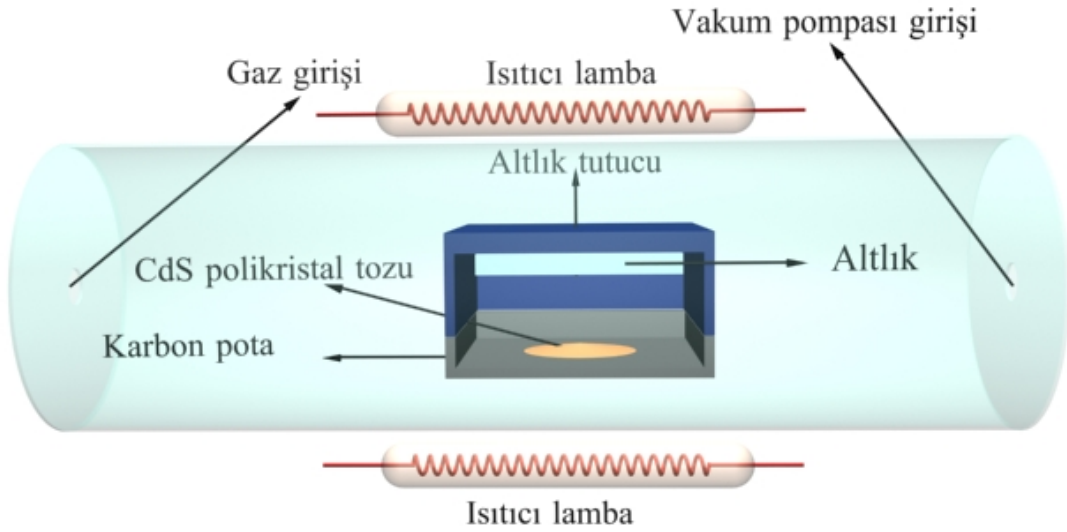
şartlarına sıkı bağlıdır. Orta ve düşük vakumda, kaynaktan kopan atom ve moleküller, ortamdaki hava molekülleri ile sık sık çarpışırlar. Bunun sonucu olarak film büyüme hızı azalır. Bundan başka, fanusun içinde kalan hava molekülleri, büyütülen film ile kimyasal tepkimeye girebilir ve neticede filmin özelliklerinde istenmeyen değişimler meydana gelebilir.



Şekil 8. Vakumda buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi

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

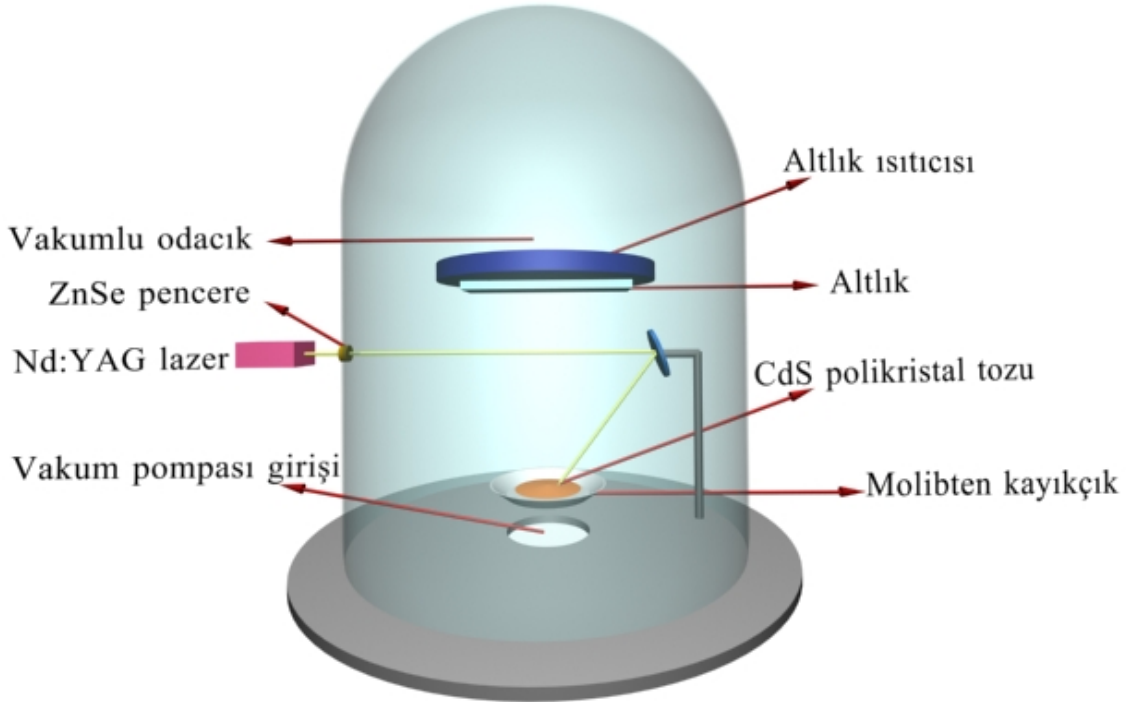
Bu yöntemde Şekil 9’da gösterildiği gibi, altlıklar kaynaktan yaklaşık 0,5 – 2 cm uzaklığa yerleştirilir ve yüksek sıcaklıklarda (kaynak sıcaklığından düşük sıcaklıklarda) tutulurlar. Isıtıcı olarak genellikle tungsten lamba kullanılır. Bu yöntemle CdS ince film örnekleri üretilirken altlığa yapışmanın iyi olması için altlık sıcaklığı 500 °C kadar yüksek seçilir (Romeo vd., 2004). Bununla birlikte yüksek altlık sıcaklığı kristal yapının kalitesini de artırır. Bu yöntemde örnekler genellikle Ar, He, Ar/O₂ veya He/O₂ gibi asal gaz ortamlarında üretilir (Ferekides vd., 2000).



Şekil 9. Kapalı hacimde buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi

1.5.3. Lazerle Buharlaştırma Yöntemi

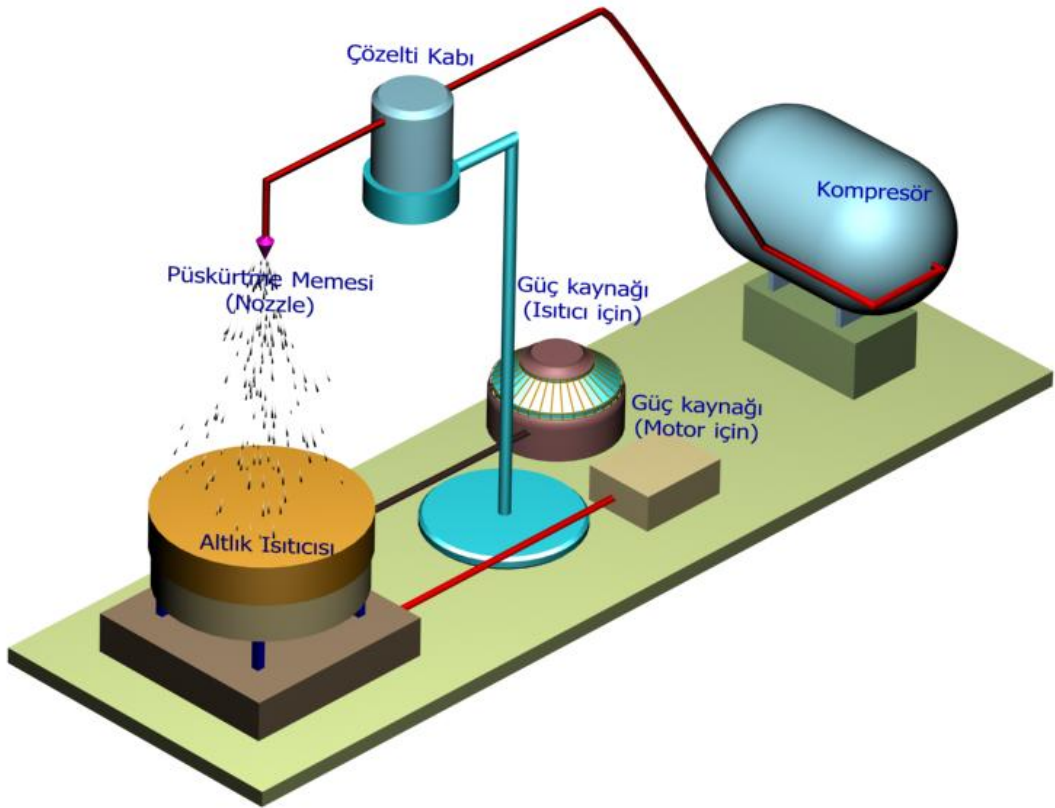
Lazerle buharlaştırma yöntemi optik olarak düzgün ve yüksek yönelime sahip CdS ince filmler üretmek için çok kullanışlı bir tekniktir (Kwok vd., 1988). Lazerle buharlaştırma yönteminde film özellikleri, lazer dalgaboyu, darbe süresi, enerji yoğunluğu ve sistem geometrisi gibi bazı üretim parametrelerine bağlıdır (Ullrich vd., 1998). Örneğin CdS ince filmlerin geçirgenlik ve özdirençleri lazer demetinin enerji yoğunluğu ve darbe süresi ile değiştirilebilir (Ezumi ve Keitoku, 1993). Bu yöntemde kullanılan altlıkların film stokiometrisine etkisi vardır. Lazerle buharlaştırma yönteminde, lazer ışın demeti, vakum odacığına bir ZnSe pencereden girilerek buharlaştırılacak malzemenin üzerine odaklanır (Şekil 10).



Şekil 10. Lazerle buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi

1.5.4. Kimyasal Püskürtme Yöntemi

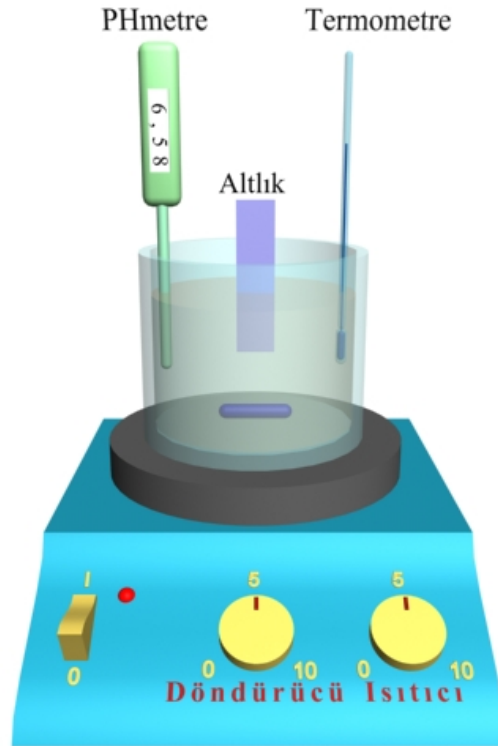
Kimyasal püskürtme yönteminde (Şekil 11), elde edilecek malzemenin elementlerini içeren çözelti ısıtılmış altlıklar üzerine basınçlı azot veya hava gazı yardımıyla belirli bir süre püskürtülür. Kimyasal püskürtme yöntemi ince film elde etme yöntemleri arasında en kolay ve ucuz olan yöntemdir. Bu yöntemle elde edilen filmlerin fiziksel özellikleri değişik parametrelere bağlıdır. Bunlar; altlık sıcaklığı, püskürtme hızı, altlık ile püskürtme başlığı (nozzle) arasındaki mesafe, çözeltinin bileşim oranları, püskürtme zamanı ve püskürtülen çözelti miktarıdır (Feigelson vd., 1977).



Şekil 11. Kimyasal püskürtme yönteminin şematik gösterimi

1.5.5. Kimyasal Banyo Yöntemi

Kimyasal banyo yönteminde (chemical bath deposition, CBD), Şekil 12’de gösterildiği gibi elde edilecek malzemenin elementlerini içeren çözelti bir kap içine konularak manyetik karıştırıcılı ısıtıcı üzerine yerleştirilir. İnce film üretimine başlamadan önce çözelti belli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve o sıcaklıkta sabit tutulur. Daha sonra ince film kaplanacak olan altlık çözelti içersine daldırılır ve film kaplanması için belli bir süre beklenir. Bekleme süresi değiştirilerek film kalınlığı ayarlanabilir. Bu yöntemde çözeltinin PH’ı ve sıcaklığı, üretilen ince filmin özelliklerini etkilemektedir (Jinesh vd., 2003). CBD yöntemi kimyasal püskürtme yöntemi gibi ince film üretimi için kolay ve ucuz yöntemlerden biridir. Fotovoltaik uygulamalar için CBD yöntemiyle CdS üretmenin avantajlarından biri çok ince tabakaların (< 50 nm) uygun şekilde altlık yüzeyi üzerinde oluşturulmasıdır (Herrero vd., 2000). Bu yöntem ile CdS üretilirken çözeltinin PH değeri ve sıcaklığı sırası ile 10 ve 70 °C olarak ayarlanabilir (Quevedo-Lopez vd., 1999).



Şekil 12. Kimyasal banyo yönteminin şematik gösterimi

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

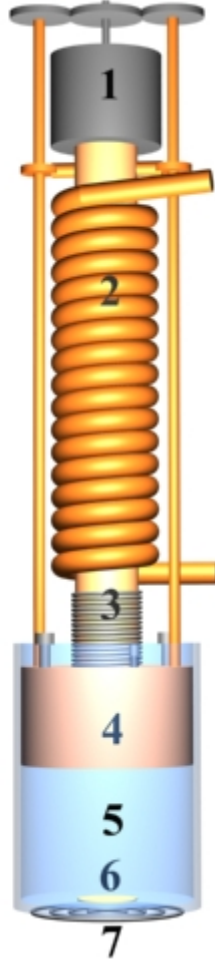
Bu çalışmada, ilk olarak CdS ince filmlerinin kısmen kapalı hacimde (quasi-closed volume) vakum buharlaştırma yöntemiyle üretilmesi için yeni bir ince film üretim düzeneği tasarlandı. Daha sonra Varian NRC 840 vakum sistemi (Şekil 13) kullanılarak, CdS ince filmlerin üretilmesine geçildi ve kaynak-altlık mesafesinin, düşük altlık sıcaklığının ve ısıtılma işleminin filmlerin yapısal, elektriksel ve optik özelliklerine etkileri araştırıldı. Bu çalışmada kullanılan % 99,995 saflığına sahip CdS polikristal tozları "Aldrich Chemical Co." dan temin edildi. İnce film üretiminde kullanılacak tozlar 13 mm çapında ve $18,5 \times 10^6$ Pascal değerindeki basınç altında preslendi. Buharlaştırma sırasında kaynak sıcaklığı 600-650 °C arasında ve ortamın vakum değeri yaklaşık 8×10^{-6} Torr değerinde tutuldu. Altlık olarak cam lamalar kullanıldı. Altlıklar saf su ve alkol ile temizlenerek üzerindeki istenmeyen maddelerden arındırıldı. Bu çalışmada düşük sıcaklıklar (oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklar) için bakır-konstantan termoçift ve yüksek sıcaklıklar için kromel-alumel termoçift kullanıldı.



Şekil 13. Yüksek vakum sistemi (Varian NRC 840)

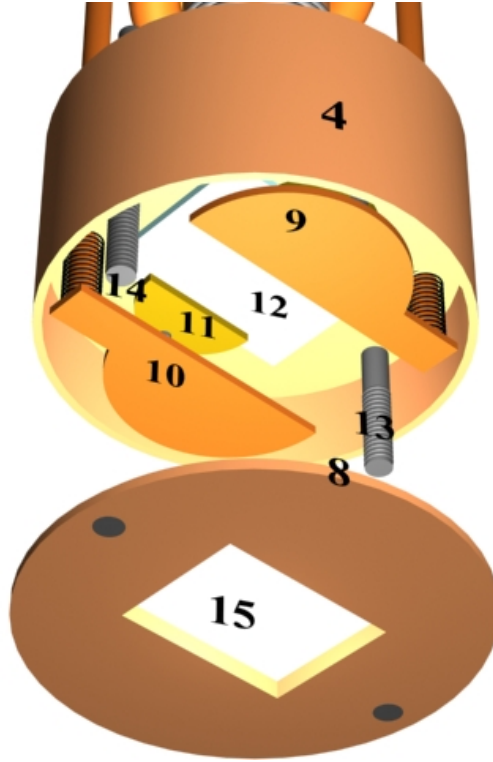
2.2. İnce Film Üretim Düzeneginin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan ince film üretim düzenegi Şekil 14’te gösterildi. Bu düzenek K.T.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde bulunan Torna Atölyesinde hazırlandı. Bu şekilde, (1) altlığa açılan ayarlanabilir (açılıp kapanabilir) pencereyi kontrol eden motor ve dişlilerden oluşan bölümü, (2) altlığı soğutmak için sıvı azotun dolaşacağı bakır borudan oluşan bölümü, (3) altlık sıcaklığını ayarlamak için sarılmış ısıtıcıyı, (4) altlığın, altlık tutucularının ve ayarlanabilir (açılıp kapanabilir) pencerenin bulunduğu bölümü, (5) 4,6 cm çapında düz tabanlı silindirik kuartz reaktörü, (6) buharlaştırılacak malzemeyi ve (7) malzemeyi buharlaştırmak için kullanılan ısıtıcıyı göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kuartz reaktör aşağı yukarı hareket ettirilerek kaynak-altlık mesafesi değiştirilebilir. Şekil 14’te gösterilen (4) numaralı kısmın ayrıntılı görüntüsü ise Şekil 15’te gösterildi.



Şekil 14. İnce film üretim düzeneği

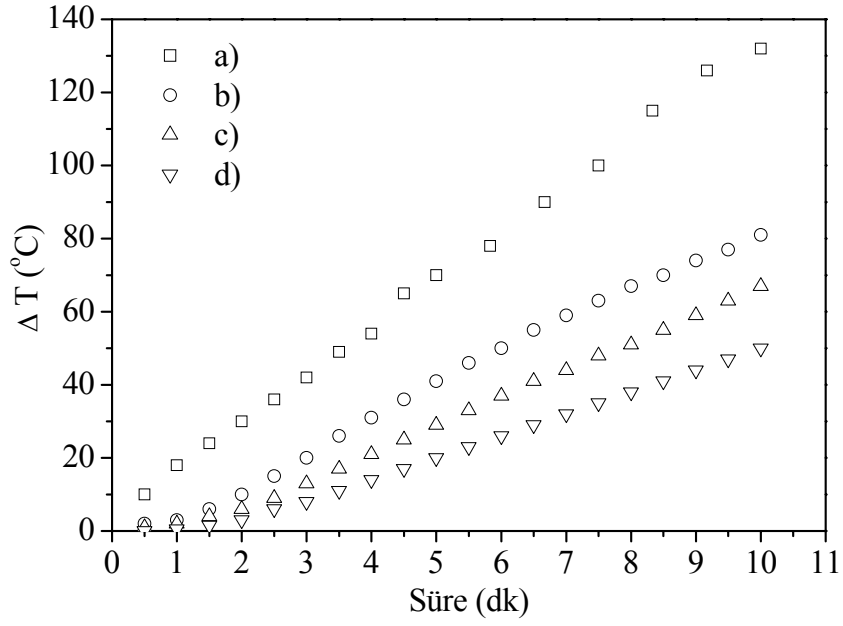
Şekil 15’te (8) alt kapağı, (9) ve (10) pencere açma-kapama kapaklarını, (11) altlık tutucusunu, (12) altlığı, (13) ve (14) alt kapak vidalarını ve (15) pencereyi göstermektedir. (9) ve (10) numaralı kapaklar motor yardımıyla hareket ettirilerek, (15) numaralı pencere açılıp-kapatılabilir. Böylece malzeme buharlaşırken süreye bağlı olarak film büyümesi gerçekleştirilir.



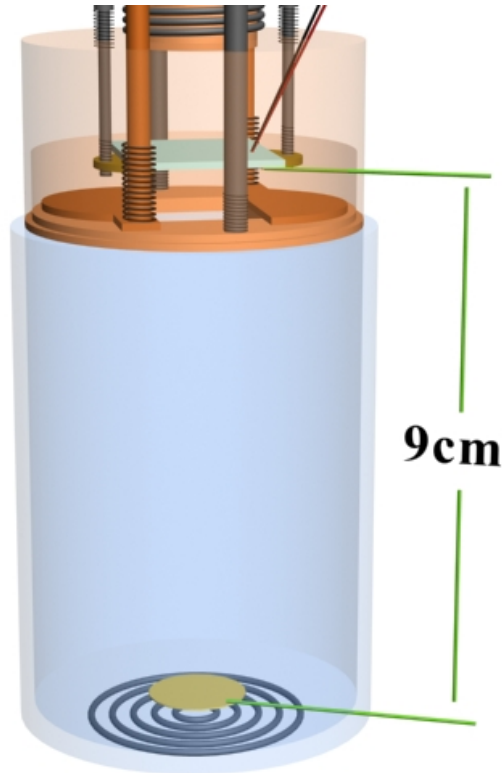
Şekil 15. Şekil 14'teki (4) numaralı parçanın ayrıntılı görüntüsü

2.3. Kaynak-Altılık Mesafesini Değiştirerek Örnek Hazırlanması

Bu üretim sürecinde kaynak-altılık mesafesi 4, 6, 8 ve 9 cm'ye ayarlanarak mesafeye (veya buharlaşmanın meydana geldiği hacime) bağlı 4 farklı örnek üretildi ve film üretimi için uygun mesafe belirlenmeye çalışıldı. Bu üretim aşamasında çökeltme süresi (10 dk) sabit tutuldu. Her bir örnek için 0,2 g CdS tozu alınarak preslendi. Preslenen malzeme, Şekil 14'te 6 numara ile gösterilen yere yerleştirilerek buharlaştırma işlemi gerçekleştirildi. Buharlaşma başladıktan sonra Şekil 15'te 15 numara ile gösterilen pencere açıldı ve 10 dakika boyunca buharlaşan malzemenin altlığa ulaşması sağlandı. Bu üretim sürecinde altlığın sıcaklık kontrolü yapılmadı. Bu nedenle, örneklerin üretimi sırasında altlık sıcaklığında, kaynak ısıtıcısından ve buharlaşmış malzemeden kaynaklanan, değişimler oldu. Bu değişimler 10 dakikalık üretim süresince kaydedildi. Şekil 16, değişik kaynak-altılık mesafelerinde (4, 6, 8 ve 9 cm) büyütülen örneklerin film çökeltme süresince altlık sıcaklıklarında meydana gelen değişimleri göstermektedir ($\Delta T = T_{altlık} - T_{oda}$).



Şekil 16. (a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm ve (d) 9 cm kaynak-altlık mesafeleri için çökeltme süresince altlık sıcaklığında meydana gelen değişim



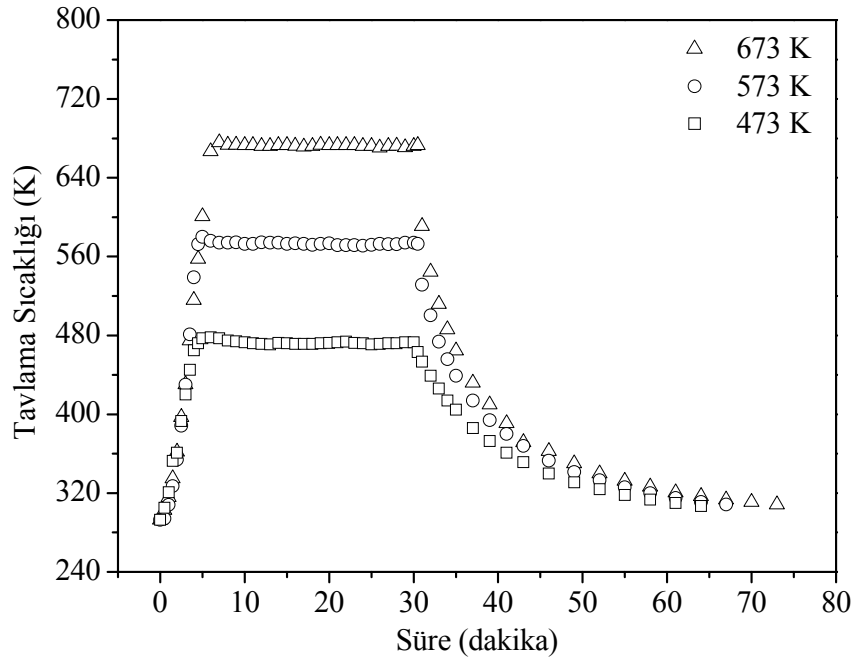
Şekil 17. Kaynak-altlık mesafesinin 9 cm'ye ayarlanması

2.4. Değişik Altlık Sıcaklıklarında Örnek Hazırlanması

Bu aşamada sabit kaynak-altlık mesafesinde (9 cm) ve değişik altlık sıcaklıklarında (300, 250, 200, 150 ve 100 K, $\pm 2,5$) CdS ince film örnekleri hazırlandı. Her bir örnek için 0,1 g CdS tozu alınarak preslendi. Çökeltme süresi 5 dakika olarak belirlendi ve çökeltme süresince altlığa açılan pencere sürekli açık tutuldu.

2.5. Değişik Altlık Sıcaklıklarında Hazırlanan Örneklerin Tavlanması

Örnekler, yüksek vakum ortamında (yaklaşık 8×10^{-6} Torr) ve üç farklı sıcaklıkta (473, 573 ve 673 K) tavlandı. Isıl işlem süresi, örneklerin hedef sıcaklığa ulaşması için geçen süre ile birlikte toplam 30 dakika olarak ayarlandı. Örneklerin ısıl işlem sırasındaki sıcaklık değişimi Şekil 18’de gösterildi.



Şekil 18. Tavlama sırasında sıcaklığın zamana göre değişimi

2.6. X-ışını Kırınım Analizi

X-ışını kırınım desenlerinden faydalanılarak, bir malzemenin kristal yapısı, örgü parametreleri ve parçacık boyutu hakkında bilgi edinilebilir. Kısmen kapalı ortamda

vakum buharlaştırma yöntemiyle değişik şartlarda üretilen ince film örneklerinin X-ışını kırınım analizi yapıldı. Bu işlem için Şekil 19’da gösterilen Rigaku D/Max-IIIC difraktometresi kullanıldı. Ölçümler sırasında, difraktometredeki bakır hedefe 35 keV’luk gerilim ve 30 mA’lık akım uygulanarak elde edilen CuK_α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) X-ışınları kullanıldı. Ölçümler, oda sıcaklığında, $20^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ aralığı boyunca $0,05^\circ$ ’lik adımlar ile yapıldı.



Şekil 19. X-ışını difraktometresi (Rigaku D/Max-IIIC)

2.6.1. Örneklerin Örgü Parametrelerinin Hesaplanması

Herhangi bir extrapolasyon veya iyi bir deneysel teknik olmaksızın, en basit şekilde örgü parametreleri X-ışını kırınım desenlerindeki en yüksek açıdaki pikler yardımıyla bulunabilir. CdS hem kübik hem de hekzagonal yapıda kristalleşebilmektedir. Kübik yapıda kristalleşen numuneler için

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (25)$$

ifadesi kullanılarak a örgü parametresi bulunabilir. Hekzagonal yapıda kristalleşen numuneler için

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (26)$$

ifadesi kullanılarak a ve c örgü parametreleri bulunabilir. Burada, d düzlemler arası mesafeyi, h, k, l ise Miller indislerini göstermektedir.

Bu çalışmada üretilen örnekler hekzagonal yapıya sahip oldukları için (26) ifadesi kullanılarak örneklerin örgü parametreleri hesaplandı. Ayrıca tüm örneklerin X-ışını kırınım desenlerinde genellikle (002) yansıma düzlemine ait tek bir pik görüldüğünden bu örnekler için sadece c örgü parametreleri hesaplandı.

2.6.2. Örneklerin Parçacık Boyutunun Hesaplanması

Örneklerin parçacık boyutu X-ışını kırınım desenlerinden faydalanılarak ve Scherrer formülü ($D = 0.94\lambda/\beta\cos\theta$) formülü kullanılarak hesaplandı. Burada D örneğin parçacık boyutunu, λ kullanılan X-ışını dalgaboyunu (1,5418 Å), β X-ışını kırınım desenindeki pikin yarı maksimumdaki tam genişliğini ve θ açısını göstermektedir.

2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri

Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlama öncesi ve 673 K'de tavlandıktan sonra yüzey şekillerini ve parçacık boyutlarını incelemek için ZEISS EVO 50 taramalı elektron mikroskobu ile mikrografları çekildi. Kullanılan taramalı elektron mikroskobu Şekil 20'de gösterildi.



Şekil 20. Taramalı elektron mikroskobu (ZEISS EVO 50)

2.8. Optik Özelliklerin Ölçülmesi

Optik ölçüm, yarıiletken malzemelerin bant yapılarını tayin etme yollarının en önemlisini oluşturur. Yarıiletken malzemeler fotonlar ile uyarıldıkları zaman, değerlik bandı ile iletim bandı arasında elektronik geçişler olur. Bu geçişler vasıtasıyla yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralığı bulunur. Yarıiletken malzemelerde optik özellikler hem geçirgenlik eğrilerinden hem de fotoiletkenlik ölçümlerinden belirlenebilir. Bu çalışmada üretilen CdS ince film örneklerinin optik özellikleri oda sıcaklığında geçirgenlik ölçümleriyle ($T-\lambda$) belirlendi. Bu ölçümler için Şekil 21’de gösterilen Shimadzu 1601 UV Vis (190-1100 nm) spektrofotometresi kullanıldı.



Şekil 21. UV-Visible spektrofotometresi (Shimadzu UV-1601)

2.8.1. Örneklerin Yasak Enerji Aralığının Hesaplanması

Örneklerin yasak enerji aralığını belirlemek için geçirgenlik ölçümleri ve $\alpha = -\ln(I/T)/d$ ifadesi kullanılarak soğurma katsayısı hesaplandı. Burada, α soğurma katsayısını, d ince filmin kalınlığını göstermektedir. Daha sonra (CdS doğrudan geçişli bir yarıiletken olduğu için) $(ah\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre grafiği çizildi. Bu grafiğin doğrusal kısmına ekstrapolasyon yapıldı ve bu ekstrapolasyonun enerji eksenini kestiği nokta yardımıyla örneklerin yasak enerji aralığı belirlendi.

2.8.2. Örneklerin Kalınlığının Hesaplanması

Örneklerin kalınlığı, geçirgenlik eğrilerinde görülen girişim saçakları yardımıyla ve (27) eşitliği kullanılarak hesaplandı.

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (27)$$

Burada d ince filmin kalınlığını, n_1 ve n_2 , λ_1 ve λ_2 dalgaboyu değerlerine karşılık gelen iki ardışık maksimumdaki (veya minimumdaki) kırılma indislerini göstermektedir. Belirli bir dalgaboyuna karşılık gelen kırılma indisleri denklem (28) ile hesaplandı.

$$n = \left[N + (N^2 - s^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (28)$$

Burada s altlık olarak kullanılan camın kırılma indisini (yaklaşık 1,5) göstermektedir. N değerleri ise denklem (29) yardımıyla hesaplandı.

$$N = 2s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{s^2 + 1}{2} \quad (29)$$

Burada T_M ve T_m belli bir dalgaboyunda girişim saçığındaki maksimum ve minimum geçirgenlik değerlerini göstermektedir (Swanepoel, R., 1983).

2.9. Elektriksel Özelliklerin Ölçülmesi

Bu çalışmada, bazı örneklerin oda ortamında ve 100 – 300 K arasında dört nokta yöntemiyle özdirenç ölçümleri yapıldı. Dört nokta yöntemini kullanmak için, örneğin en az bir yüzeyi düzlemsel olmalı ve bu yüzeyin geometrik boyutları, kontaklar sisteminin boyutlarından daha büyük olmalıdır. Bu ölçümlerde örneğin düzlemsel yüzeyinde küçük alanlı ve eşit aralıklı dört kontak yapıldı. Bu ölçüm için kullanılan devrenin şeması Şekil 22'de verildi. Ölçülen akım ve voltaj değerleri $\rho = 2\pi l(V/I)$ ifadesinde yazılarak yarıiletken malzemenin özdirenci hesaplanır. Burada ρ özdirenç ve l kontaklar arasındaki mesafedir.



Şekil 22. Özdirenç ölçümü için kullanılan devrenin şematik gösterimi

2.9.1. CdS İnce Film Örneklerinin İletim Mekanizmasının İncelenmesi

Bu çalışmada, örneklerde iletim mekanizmasını incelemek için 100 – 300 K arasında sıcaklığa bağlı iletkenlik özellikleri incelendi. Bu ölçümler dört nokta yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi.

Polikristal yarıiletken malzemelerde genellikle üç tip iletim mekanizması vardır. Bu iletim mekanizmaları şunlardır: termoiyonik emisyon, tünelleme ve sıçrama (hopping).

Termoiyonik emisyon mekanizması genellikle yüksek sıcaklık bölgesinde baskındır. Bu iletim türünde taşıyıcıların tane sınırındaki potansiyel engelini aşabilecek kadar enerjisi vardır. Termoiyonik emisyon için iletkenlik aşağıdaki gibi yazılabilir (Seto, 1975):

$$\sigma\sqrt{T} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right). \quad (30)$$

Burada σ_0 sabiti, E_a aktivasyon enerjisini, k Boltzmann sabitini ve T sıcaklığı göstermektedir. Bu ifadeye göre $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1}$ grafiğinin eğiminden faydalanılarak E_a aktivasyon enerjisi bulunabilir.

Tane sınırındaki potansiyel engel, yüksek ve dar olduğunda ve taşıyıcıların engeli aşacak kadar enerjisi olmadığında taşıyıcıların kuantum mekaniksel olarak engel boyunca tünellemesi baskın iletim mekanizması olur. Tünelleme tipindeki iletim mekanizması için iletkenlik aşağıdaki gibi yazılabilir (Simmons, 1963):

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + \frac{F^2}{6} T^2\right). \quad (31)$$

Burada σ_0 ve F sabittir.

Düşük sıcaklık bölgesinde ve safsızlık durumlarının yeterince düşük olduğu durumlarda sıçrama tipindeki iletim mekanizması baskın olabilir. Bu iletim türünde düşük aktivasyon enerjili taşıyıcılar yerleşik durumlar arasında sıçrarlar. İki tür sıçrama mekanizması vardır: taşıyıcıların en yakın boş duruma sıçraması (sabit menzilli sıçrama) ve taşıyıcıların yakın bir durumdan uzak bir duruma sıçraması (değişken menzilli sıçrama). Mott sıçrama mekanizmasına göre iletkenlik aşağıdaki gibi yazılabilir (Mott ve Davis, 1971):

$$\sigma\sqrt{T} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right)^{1/4}. \quad (32)$$

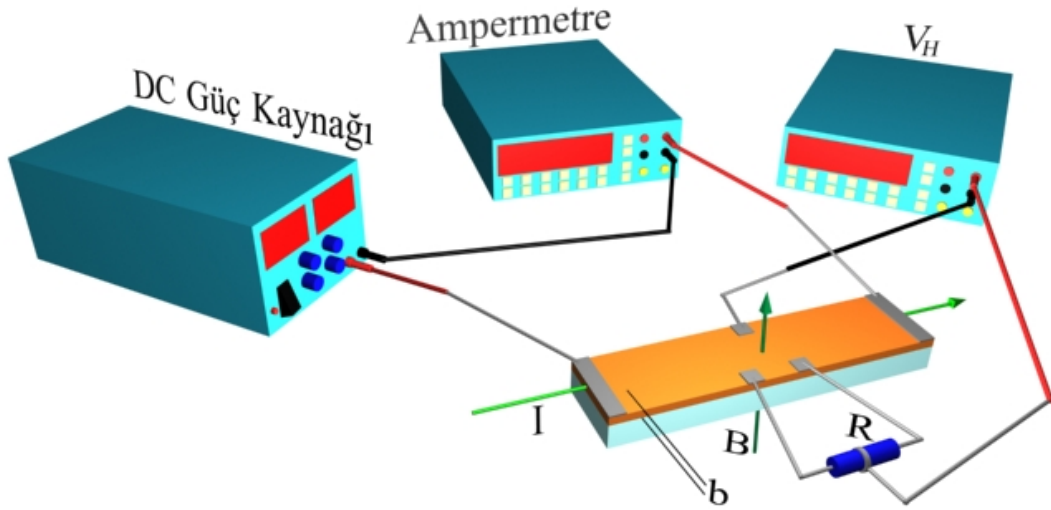
Burada σ_0 ve T_0 sabittir.

2.9.2. Hall Katsayısı Ölçümü

Bir yarıiletkenden Şekil 23'te gösterildiği gibi bir elektrik akımı geçirildiğinde ve bu akıma dik olacak şekilde manyetik alan uygulandığında yarıiletkende hem elektrik alana hem de manyetik alana dik olacak şekilde bir Hall elektrik alanı oluşur (Kesim 1.2.2). Bu Hall alanı nedeniyle yarıiletkende

$$V_H = R_H \frac{IB}{b} \quad (33)$$

ile verilen bir Hall voltajı oluşur. R_H Hall sabitidir ve b ise örneğin manyetik alan yönündeki kalınlığıdır. n-tipi yarıiletkende ($n \gg p$); $R_H = -1/(ne)$, p-tipi yarıiletkende ($p \gg n$); $R_H = +1/(pe)$ ile verilmektedir. Taşıyıcı tipi belli olan malzeme için Hall voltajı ölçülerek taşıyıcı yoğunluğu hesaplanabilir.



Şekil 23. Hall voltajı ölçümü için kullanılan devrenin şematik gösterimi

Hall voltajındaki hatayı küçültmek için, Hall voltajının ölçüldüğü kontaklar arasındaki parazit gerilimlerini ortadan kaldırmak gerekir. Bu parazit gerilimler farklı nedenlerden meydana gelebilir. Hall voltajının ölçüldüğü kontaklar eş potansiyelli noktalarda değilse parazit gerilimleri oluşabilir. Bu tür gürültü gerilimlerini ortadan kaldırmak için Şekil 23'te görüldüğü gibi yarıiletkenin bir kenarına yan yana iki kontak yapıp aralarına bir değişken direnç bağlanır ve değişken direnç yardımıyla alt ve üst kenarlar arasındaki potansiyel farkı sıfırlanır. Buradaki değişken direncin değeri yan yana olan kontaklar arasındaki direnç değerinden büyük olmalıdır. Örnek homojen değilse yine parazit gerilimler oluşabilir.

örnekten akım geçiren kontaklar arasında taşıyıcıların hareketi ile ilgili parazit gerilimleri oluşabilir. Parazit gerilimlerinin çoğunluğu elektrik akımının ve manyetik alanın yönüne bağlıdır ve bu nedenle akımın ve manyetik alanın yönünü değiştirmekle parazit gerilimlerinin Hall gerilimine etkisi ortadan kaldırılabilir. Bu çalışmada, Hall gerilimini doğru ölçebilmek için akımın ve manyetik alanın yönü dikkate alınarak toplam dört Hall voltajı ölçüldü. Bunlar, $V_H(+I,+B)$, $V_H(-I,+B)$, $V_H(+I,-B)$ ve $V_H(-I,-B)$ voltajlarıdır. Gerçek Hall voltajı ise

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

ifadesinden hesaplanır. Bu çalışmada, Hall voltajı yukarıda belirtildiği gibi ölçüldü. Örnek üzerinde oluşan akım ve voltaj değerleri sayısal multimetreler yardımıyla bilgisayara aktarıldı ve daha önceden Visual Basic 6.0 programlama dilinde hazırlanan program yardımıyla değerlendirildi.

2.10. Cu/CdS Schottky Diyot Yapımı

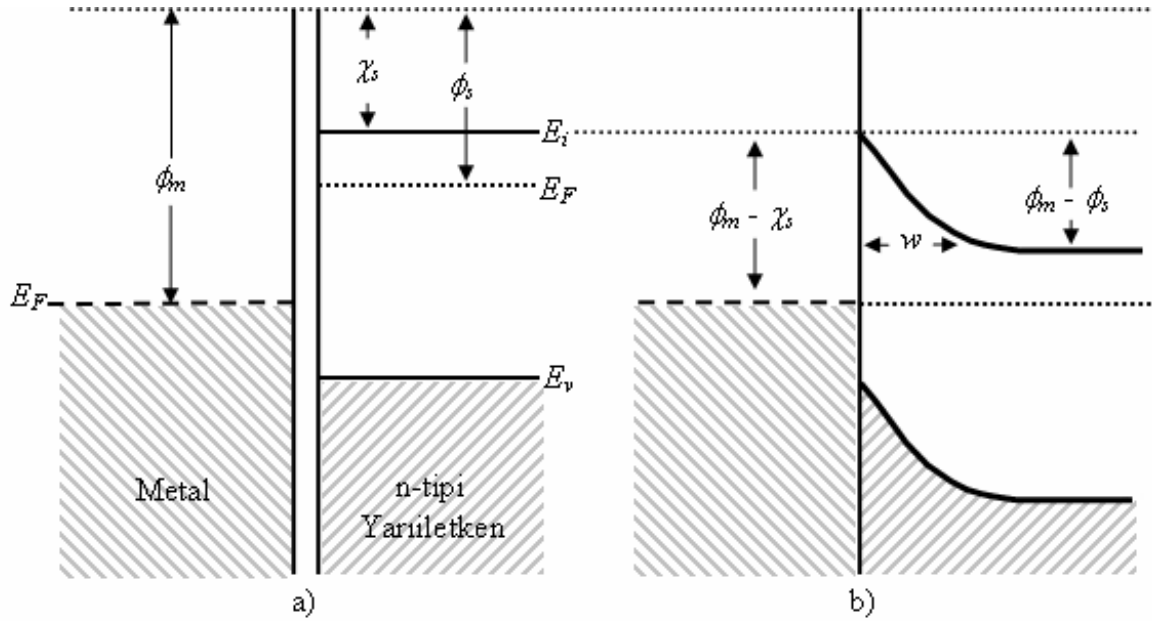
Bu çalışmada, Cu/CdS Schottky diyotunu yapmak için SnO₂ kaplı cam altlıklar üzerinde 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında n-tipi CdS ince filmler üretildi. Bu işlem için 0,15 g CdS tozu kullanıldı. Elde edilen ince filmler üzerine vakum buharlaştırma yöntemiyle bakır metali buharlaştırıldı. Buharlaştırılan bakırın alanı $8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ olarak ayarlandı. Ayrıca bakır buharlaştırılırken CdS ince film kaplı altlıklar 220 K sıcaklığında tutuldu. Elde edilen Schottky diyotlarının oda ortamında ve 100 – 300 K arasında beş farklı sıcaklıkta karanlık akım-voltaj ölçümleri gerçekleştirildi.

2.10.1. Cu/CdS Schottky Diyotunda Akım Taşıma Mekanizmasının İncelenmesi

Schottky engelinde akım iletimi genellikle çoğunluk taşıyıcıları ile sağlanır. Taşıyıcı iletiminin meydana gelebileceği dört farklı mekanizma vardır: (i) engel üzerinden termoiyonik emisyon, (ii) engel boyunca tünelleme, (iii) boşaltılmış bölgede taşıyıcı yeniden-birleşimi (recombination) [veya üretimi (generation)] ve (iv) nötr bölgede taşıyıcı yeniden-birleşimi.

Şekil 24, (a) temastan önce ve (b) temastan sonra olmak üzere metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji düzeylerini göstermektedir. Bu şekilde E_F Fermi enerji düzeyini, E_i

iletim bandının alt kenar enerji düzeyini, E_v değerlik bandı enerji düzeyini, ϕ_m metalin iş fonksiyonunu, ϕ_s yarıiletkenin iş fonksiyonunu, χ_s yarıiletkenin elektron çekiciliğini, w engel genişliğini göstermektedir. Metal – n-tipi yarıiletken temasının doğrultucu karakterde olması için, metalin iş fonksiyonunun n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olması gerekmektedir ($\phi_m > \phi_s$).



Şekil 24. a) Tam temastan önceki metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı, b) temas ettirildikten sonraki enerji bant diyagramı

(i) Düşük katkılı durumlarda ($N_d \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) taşıyıcılar engeli genellikle termoiyonik emisyon ile geçerler [Şekil 25 (a)]. Bu durumda engel yüksekliği küçük fakat engel genişliği büyüktür. Termoiyonik emisyon sürecinde yarıiletken tarafındaki elektronlar engel üzerinden geçerek metal tarafına ulaşırlar. Benzer olarak metal tarafından yarıiletken tarafına elektron geçişi olur. Termoiyonik emisyon için toplam akım yoğunluğu aşağıdaki gibi yazılabilir (Schroder, 1990):

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right]. \quad (35)$$

Burada n ideallik çarpanı ve I_s doygunluk akımıdır. Doymunluk akımı I_s aşağıdaki ifade ile verilir:

$$I_s = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right). \quad (36)$$

Burada A diyotun kesit alanı, ϕ_b engel yüksekliği ve A^* Richardson sabitidir. A^* 'ın değeri denklem (37) ile bulunabilir:

$$A^* = \frac{4\pi q k^2 m^*}{h^3} = 120 \frac{m^*}{m} (A / \text{cm}^2 \text{K}^2). \quad (37)$$

Burada m^* elektronun etkin kütesidir.

Çizilen $\ln I-V$ grafiğinin doğrusal kısmının eğimi q/nkT 'ye eşittir ve bu ifadeden ideallik çarpanı bulunabilir. Termoiyonik emisyon iletim mekanizması baskın ise n ideallik çarpanı 1 civarında değerler alır. Ayrıca bu grafiğin doğrusal kısmının $\ln I$ eksenini kestiği nokta yardımıyla doygunluk akımı bulunabilir. Bu veriler ve denklem (38) kullanılarak diyotun engel yüksekliği bulunabilir:

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_s} \right). \quad (38)$$

(ii) Tünelleme akımı, katkı oranı ve sıcaklığa göre ya termoiyonik alan emisyonu ya da alan emisyonu yoluyla gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda bazı elektronlar Fermi seviyesinin üzerine yükselirler; bu elektronlar burada daha ince ve yüksekliği daha küçük bir engel görürler ve engeli aşmadan önce metale doğru tünelleme yapabilirler. Bu süreç termoiyonik alan emisyonu (TFE) olarak bilinir [Şekil 25 (b)]. Termoiyonik alan emisyonu sadece orta düzeydeki katkılı ($10^{17} < N_d < 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) yarıiletkenlerde gözlenir. Katkı yoğunluğu yüksek olduğunda ($N_d > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) boşaltılmış bölge çok daralır ve Fermi seviyesi, iletim bandının alt kenarının üzerinde olabilir. Düşük sıcaklıkta elektronlar Fermi seviyesine yakındır ve doğru besleme halinde bu elektronlar yarıiletkenin Fermi seviyesinden metale doğru akarlar. Bu olay alan emisyonu (FE) olarak bilinir [Şekil 25 (c)]. Tünelleme mekanizması için akım–voltaj ilişkisi aşağıdaki gibidir (Padovani ve Stratton, 1966; Crowell ve Rideout, 1969):

$$I_t = I_{t0} \exp \left(\frac{qV_a}{E_0} \right). \quad (39)$$

Burada I_{t0} çarpanı, engel yüksekliğinin, yarıiletkenlerin parametreleri ve sıcaklığın karmaşık bir fonksiyonudur ve

$$E_0 = E_{00} \coth \left(\frac{E_{00}}{kT} \right), \text{ dır.} \quad (40)$$

E_{00} ise karakteristik bir enerji olup, taşıma mekanizması olarak tünelleme ve termoiyonik emisyonun bağıl önemini belirtir. $E_{00} \gg kT$ olduğunda alan emisyonu, baskın olan iletim mekanizmasıdır. Bu durum, çoğunlukla düşük sıcaklık bölgesinde gözlenir. $E_{00} \sim kT$

çiftleri boşaltılmış bölgedeki denge değerini aşar. Engeldeki elektrik alanı bu çiftleri süpürür ve ters bir akıma neden olur. Bununla birlikte uygulanan voltaj düz besleme ise elektronlar nötr olan külçe yarıiletkenin boşaltılmış bölgeye boşluklar da metalden boşaltılmış bölgeye doğru enjekte olurlar. Bu fazlalık elektron-boşluk çiftleri boşaltılmış bölgede yeniden birleşirler ve böylece geçirme yönünde yeniden birleşim akımına neden olurlar. Boşaltılmış bölgede taşıyıcıların üretim ve yeniden-birleşim akımı aşağıdaki denklemlerle verilir (Grove, 1967):

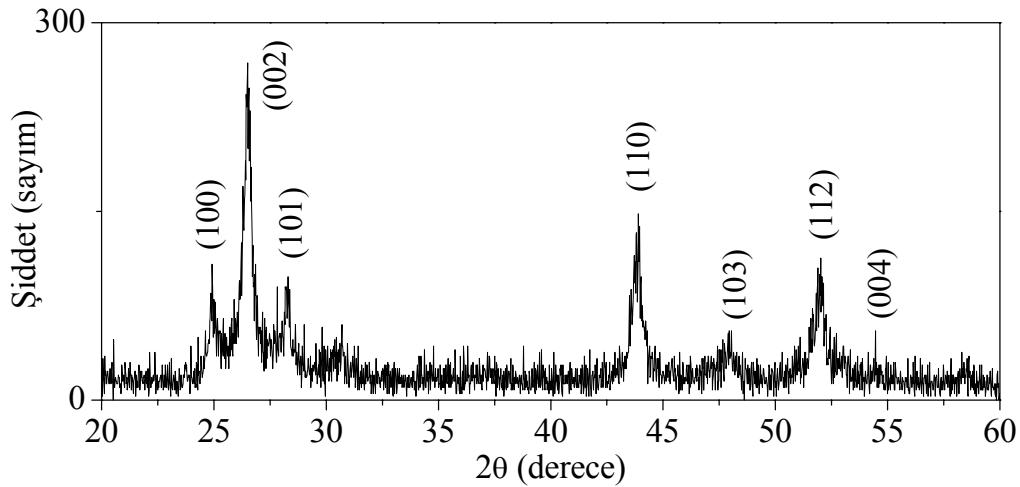
$$I = \frac{qn_i w}{2\tau_0} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{2kT}\right) - 1 \right]. \quad (41)$$

Burada τ_0 boşaltılmış bölgede azınlık taşıyıcısı yaşam süresi, w boşaltılmış bölgenin genişliği ve n_i özden elektron yoğunluğudur. Bu denklem, bu akımın sadece doğru beslemenin düşük değerlerinde önemli olduğunu gösterir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Örnek Büyütülmesinde Kullanılan CdS Tozunun X-ışını Kırınım Deseni

Şekil 26, örnek üretiminde kullanılan CdS tozunun X-ışını kırınım desenini göstermektedir. Bu kırınım deseni incelendiğinde piklerin tümünün hekzagonal faza ait olduğu anlaşıldı. Bu piklerin, (100), (002), (101), (110), (103) ve (112) yansıma düzlemlerine ait oldukları belirlendi. XRD verileri yardımıyla CdS tozunun a ve c örgü parametreleri sırasıyla $a = 4,125 \pm 0,005 \text{ \AA}$, $c = 6,720 \pm 0,005 \text{ \AA}$ olarak hesaplandı. Bu çalışmada kullanılan CdS tozunun XRD verileri $[2\theta, d$ (düzlemler arası mesafe)] ile JCPDS 6-314 kart numaralı hekzagonal CdS tozunun d^l değerleri Tablo 1’de listelendi. Bu çalışmada kullanılan toz CdS’in d değerlerinin JCPDS 6-314 numaralı kart verileri ile uyum içinde olduğu görüldü.



Şekil 26. CdS Tozunun X-ışını kırınım deseni

Tablo 1. Bu çalışmada kullanılan CdS tozu ile JCPDS 6-314 kart numaralı CdS tozunun d değerleri

(h k l)	(100)	(002)	(101)	(110)	(103)	(112)
2θ (derece)	24,938	26,503	28,272	43,845	47,940	51,989
d (Å)	3,568	3,360	3,154	2,063	1,896	1,758
d^l (Å)	3,563	3,357	3,160	2,068	1,898	1,761

3.2. Kaynak-Altılık Mesafesinin CdS İnce Filmleri Üzerine Etkisi

3.2.1. Yapısal Özelliklerin İncelenmesi

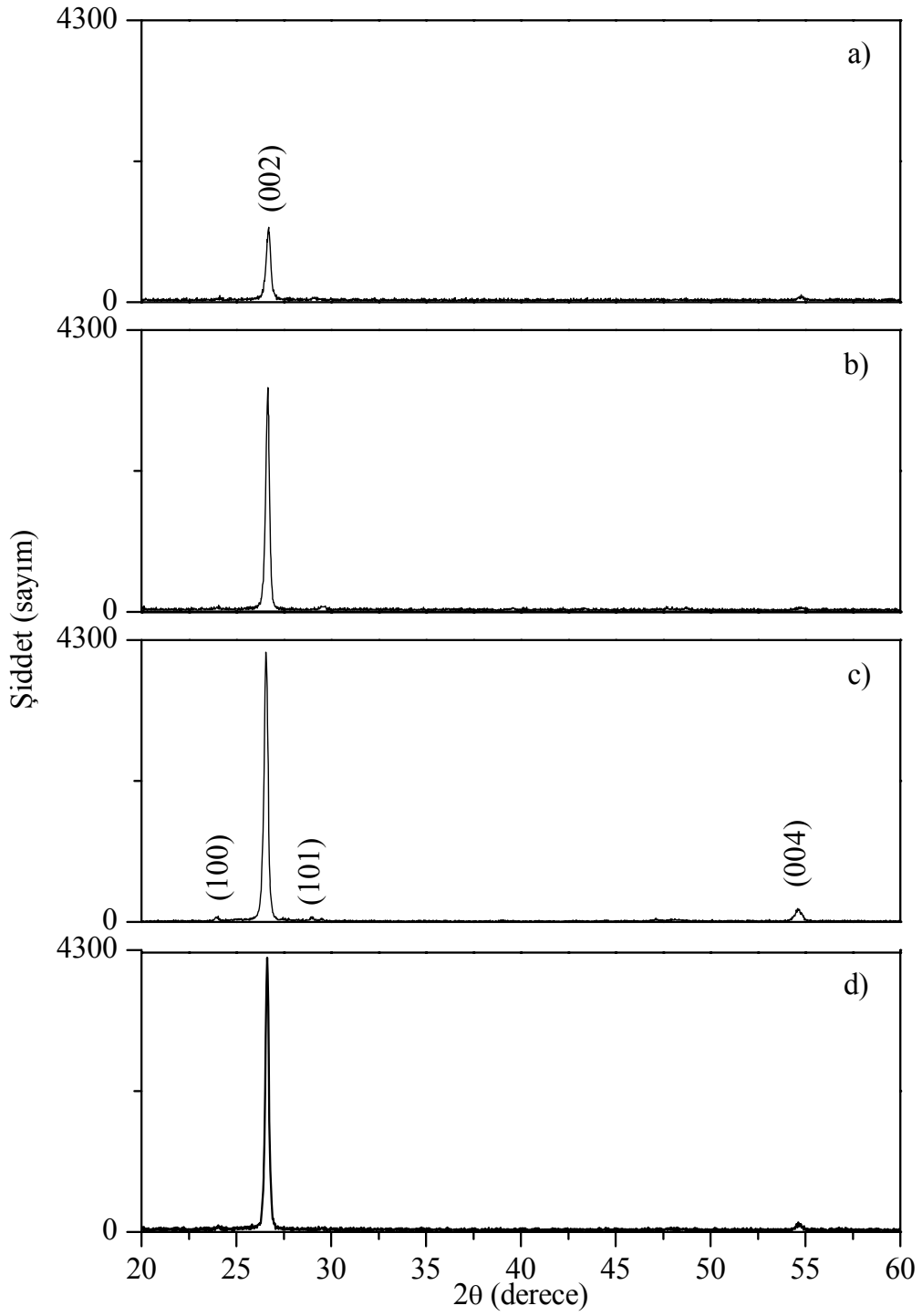
Şekil 27’de değişik kaynak-altılık mesafelerinde hazırlanan örneklerin X-ışını kırınım desenleri gösterildi. Bu kırınım desenlerinde görülen piklerin, hegzagonal yapı için (100), (002), (101) ve (004) yansıma düzlemlerine ait oldukları ve en şiddetli pikin tüm örnekler için (002) yansıma düzlemi olduğu belirlendi. Tablo 2’de bu piklerin şiddet oranları listelendi. Kaynak-altılık mesafesi arttıkça (100), (101) ve (004) piklerinin şiddet oranlarının azaldığı tespit edildi. Bununla birlikte kaynak-altılık mesafesi arttıkça kırınım şiddetinde artma olduğu ve piklerin ‘yarı maksimumdaki tam genişliğinin’ (FWHM) giderek azaldığı görüldü. Böylece en iyi kristalleşmenin kaynak-altılık mesafesinin 9 cm olduğu durumda gerçekleştiği anlaşıldı.

Şekil 28’de değişik kaynak-altılık mesafelerinde hazırlanan örneklerin, Scherrer formülü ile hesaplanan parçacık boyutları gösterildi. Kaynak-altılık mesafesi arttıkça parçacık boyutunun yaklaşık 32,9 nm’den 40,3 nm’ye ($\pm 0,1$ nm) arttığı gözlemlendi.

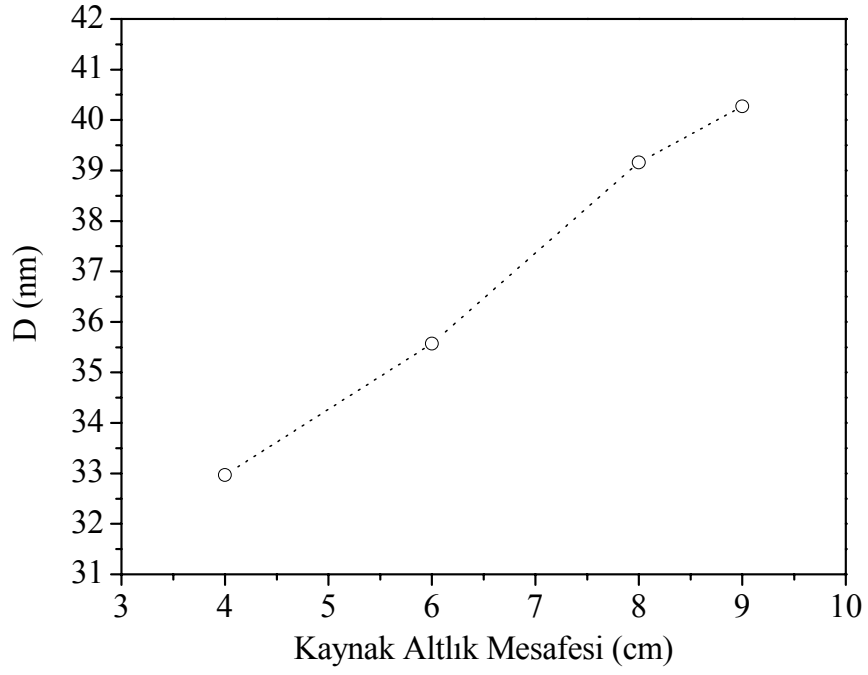
Şekil 29, örneklerin c örgü parametresinin kaynak-altılık mesafesine göre değişimini göstermektedir. Kaynak-altılık mesafesi arttıkça örgü parametresinin yaklaşık 6,672 Å’dan 6,716 Å’a ($\pm 0,005$ Å) artarak CdS ince filmlerini üretmek için kullanılan toz CdS’in c örgü parametresi değerine ($6,720 \pm 0,005$ Å) yaklaştığı belirlendi. Bu sonuca göre küçük kaynak-altılık mesafelerinde hazırlanan örneklerde çekme zorlanmasının (tensile strain) olduğu ve bu zorlanmanın kaynak-altılık mesafesi arttıkça azaldığı söylenebilir. Bu sonucun, Ortuño-López ve arkadaşlarının kimyasal banyo yöntemiyle elde ettikleri CdS ince filmlerinin [002] tercihli yönelmesine sahip olduğunu ve hesapladıkları c örgü parametresinin bulk (külçe) değeri 6,713 Å’dan (Pankove, 1971) küçük olduğunu gösteren çalışmaları ile iyi bir uyum içinde olduğu görüldü (Ortuño-López vd., 2004).

Tablo 2. Değişik kaynak-altılık mesafelerinde üretilen örneklerin X-ışını kırınım desenlerinde görülen piklerin şiddet oranları [$I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)]

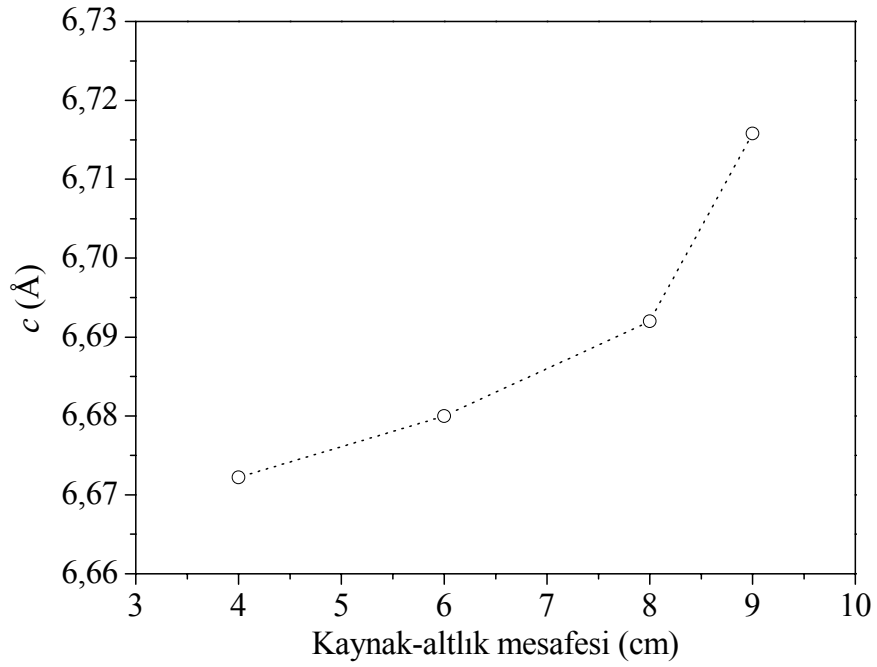
(hkl)	4 cm, $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)	6 cm, $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)	8 cm, $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)	9 cm, $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)
(100)	2,4	1,6	0,7	0,9
(002)	100,0	100,0	100,0	100,0
(101)	6,9	4,6	1,1	0,7
(004)	7,4	1,4	2,5	2,0



Şekil 27. (a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm ve (d) 9 cm'lik kaynak-altlık mesafesinde hazırlanan örneklerin X-ışını kırınım desenleri



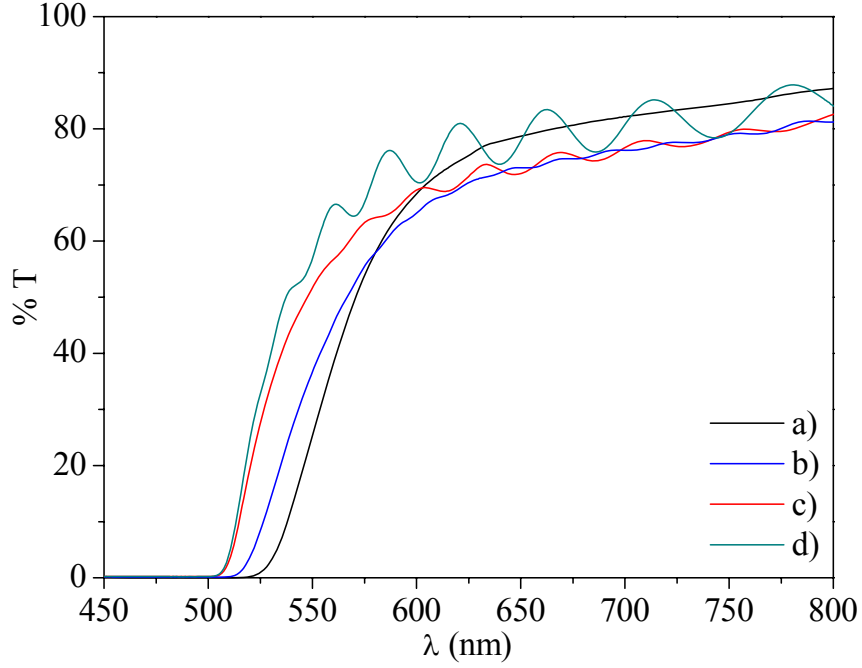
Şekil 28. Kaynak-altlık mesafesine göre parçacık boyutunun değişimi



Şekil 29. Kaynak-altlık mesafesine göre c örgü parametresinin değişimi

3.2.2. Optik Özelliklerin İncelenmesi

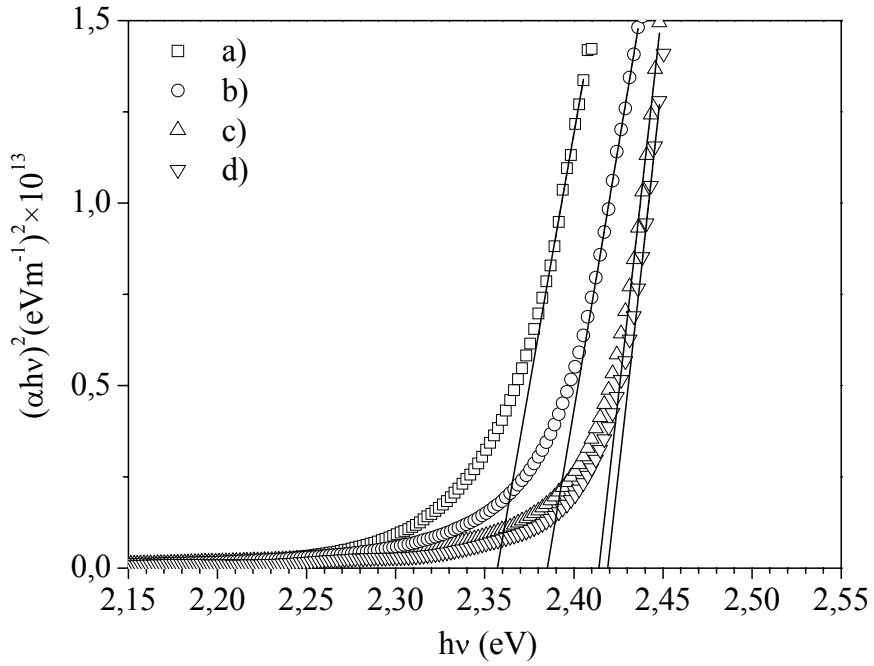
Şekil 30'da değişik kaynak-altlık mesafelerinde hazırlanan örneklerin optik geçirgenlik ölçümleri gösterildi. Kaynak-altlık mesafesi 4 cm'den 9 cm'ye doğru arttıkça soğurma kenarının düşük dalgaboylarına doğru kaydığı gözlemlendi. Örneklerin geçirgenlik eğrilerinde girişim saçakları görüldü. İnce filmlerin geçirgenlik eğrilerinde girişim saçaklarının oluşması onların düzgün bir yüzeye sahip olduğunu gösterir (Swanepoel, 1983). Böylece mesafe arttıkça (i) ince film yüzeyinin daha düzgün hale geldiği, (ii) yasak enerji aralığının arttığı, (iii) bant kenarlarındaki eğrilerin dikleşerek kristalleşmede iyileşme olduğu belirlendi.



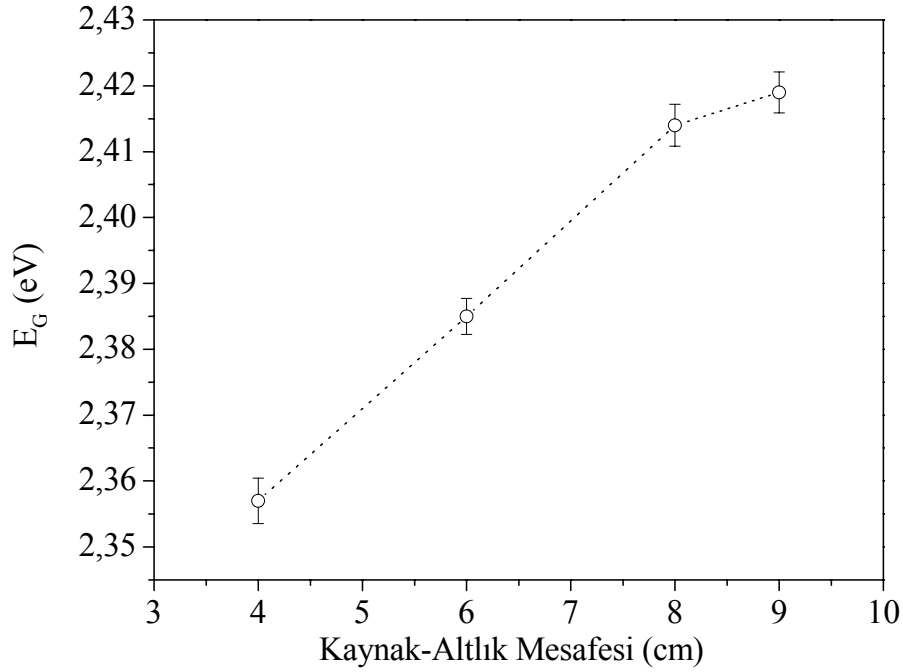
Şekil 30. (a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm ve (d) 9 cm'lik kaynak-altlık mesafesinde hazırlanan örneklerin optik geçirgenlik eğrileri

Şekil 31, değişik kaynak-altlık mesafelerinde hazırlanan örnekler için $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimini göstermektedir. Örneklerin, bu şekilden faydalanılarak belirlenen yasak enerji aralıklarının kaynak-altlık mesafesine göre değişimi Şekil 32'de gösterildi. Şekilden de görüldüğü gibi kaynak-altlık mesafesi arttıkça ince film örneklerinin yasak enerji aralığı yaklaşık 2,35 eV'tan 2,42 eV'a artarak CdS'in bulk yasak enerji aralığı değerine (2,42 eV) yaklaştı.

Örneklerin geçirgenlik eğrilerinde görülen girişim saçaklarından faydalanılarak kalınlıkları hesaplandı. Kaynak-altlık mesafesi arttıkça kalınlığın yaklaşık 4,6 μm 'den 2,3 μm 'ye azaldığı belirlendi.



Şekil 31. (a) 4 cm, (b) 6 cm, (c) 8 cm ve (d) 9 cm'lik kaynak-altlık mesafesinde hazırlanan örnekler için $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi



Şekil 32. Kaynak-altılık mesafesine göre yasak enerji aralığının değişimi

3.2.3. Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi

Değişik kaynak-altılık mesafelerinde üretilen örneklerin karanlık öz dirençleri, aydınlık (100 mW/cm²'lik ışık şiddetinde) öz dirençleri, fotoduyarlılıkları (ρ_K/ρ_A) ve taşıyıcı yoğunlukları Tablo 3'te gösterildi. Kaynak-altılık mesafesi arttıkça öz direncin ve fotoduyarlılığın arttığı belirlendi. Ayrıca örneklerin taşıyıcı yoğunluklarının kaynak-altılık mesafesi artarken ilk olarak hızlı bir şekilde $5,2 \times 10^{15}$ cm⁻³'ten $6,2 \times 10^{16}$ cm⁻³'e arttığı daha sonra $1,1 \times 10^{16}$ cm⁻³'e azaldığı görüldü.

Yukarıda sözü edilen yapısal, elektriksel ve optik incelemelerden çıkan sonuç, kaynak-altılık mesafesinin 9 cm civarında olması bu özelliklerde bir iyileştirmeye sebep olduğu biçimindedir. Bu nedenle bundan sonraki deneysel çalışmalarda kaynak-altılık mesafesi 9 cm alınarak ince film örnekleri üretildi.

Tablo 3. Değişik kaynak-altlık mesafelerinde hazırlanan örneklerin karanlık ve aydınlık özdirençleri, fotoduyarlılıkları ve taşıyıcı yoğunlukları

Kaynak-altlık mesafesi (cm)	$\rho_K (\Omega \times \text{cm})$	$\rho_A (\Omega \times \text{cm})$	ρ_K/ρ_A	$n (\text{cm}^{-3})$
4	$2,6 \times 10^2$	$1,3 \times 10^2$	2,0	$5,2 \times 10^{15}$
6	$3,0 \times 10^4$	$8,2 \times 10^3$	3,7	$6,2 \times 10^{16}$
8	$4,7 \times 10^4$	$9,4 \times 10^3$	5,0	$1,5 \times 10^{16}$
9	$8,6 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$	5,4	$1,1 \times 10^{16}$

3.3. Altlık Sıcaklığının CdS İnce Filmler Üzerine Etkisi

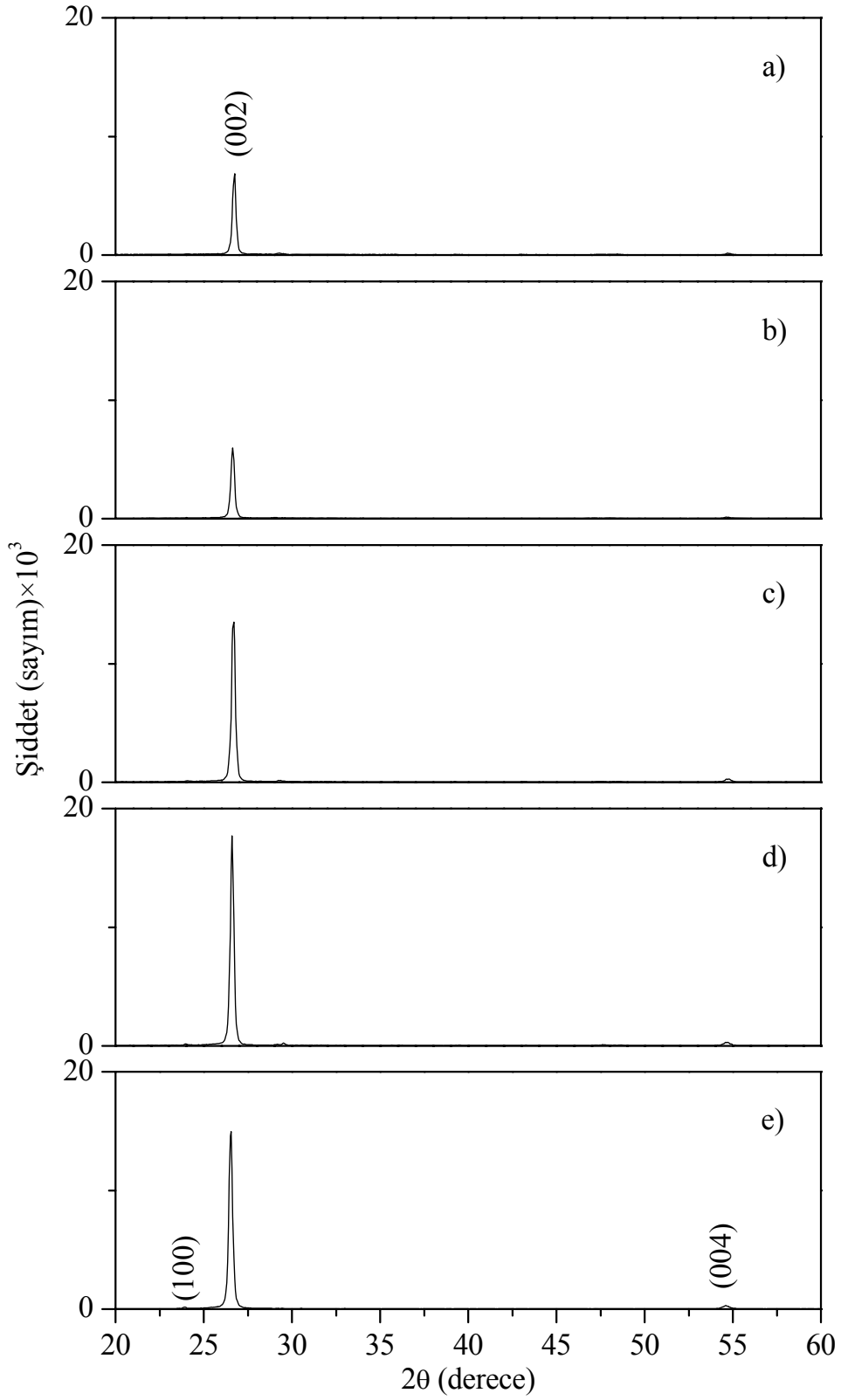
3.3.1. Yapısal Özelliklerin İncelenmesi

Kaynak-altlık mesafesi 9 cm olacak şekilde, değişik altlık sıcaklıklarında (300, 250, 200, 150 ve 100 K), üretilen örneklerin X-ışını kırınım desenleri Şekil 33'te gösterildi. Bu kırınım desenlerinde hegzagonal yapıya ait olan (100), (002) ve (004) pikleri görüldü ve bu piklerin şiddet oranları [$I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)] Tablo 4'te listelendi. Örneklerin X-ışını kırınım desenlerinde görülen en şiddetli pikin (002) yansıma düzlemine ait olduğu ve altlık sıcaklığı azaldıkça pik şiddetinin arttığı görüldü. Buradan ince film örneklerinin tümüyle *c* eksenini yönünde bir yapılanma gösterdiği anlaşıldı. Oda sıcaklığında üretilen örnekte sadece (002) ve (004) pikleri görüldü. Bu pikler kübik yapıda yaklaşık olarak aynı kırınım açısında görülen (111) ve (222) piklerine karşılık gelmektedir. Kübik ve hegzagonal yapının en şiddetli piklerinin [sırasıyla (111) ve (002)] yaklaşık aynı açılarda ($2\theta = 26,5^\circ$) olması nedeniyle oda sıcaklığında üretilen örnekte kristal yapıyı belirlemek zordur. Düşük altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerde ise hegzagonal yapıya ait olan (100) yansıma düzlemine ait pikin görülmesi, bu örneklerde hegzagonal fazın baskın olduğunu göstermektedir. Zhibing He ve arkadaşları değişik altlık sıcaklıklarında (oda sıcaklığı, 100, 150, 250 ve 300 °C) CdS ince film örneklerini vakum buharlaştırma yöntemiyle elde ettiler (Zhibing He vd., 2005). Örneklerin hepsinde en şiddetli pikin hegzagonal yapıya ait olan (002) yansıma düzlemi olduğunu gördüler. Kübik ve hegzagonal yapının en şiddetli piklerinin yaklaşık aynı açıda olması nedeniyle X-ışını kırınım desenlerini açıklamanın zor olduğunu belirttiler. Bununla birlikte, altlık sıcaklığı arttıkça, hegzagonal yapıya ait olan (100) ve (101) yansıma düzlemlerinin oluştuğunu ve bu düzlemlerin pik şiddetlerinin arttığını gördüler. Senthil ve arkadaşları 373 K'de vakum buharlaştırma yöntemiyle CdS ince film örneğini elde ettiler (Senthil vd., 2001a). Bu örneğin X-ışını kırınım deseninde

sadece $2\theta = 26,44^\circ$ 'de keskin bir pik gördüler. Bu pikin hekzagonal yapı için (002) yansıma düzlemine ait olabileceği gibi kübik yapı için (111) yansıma düzlemine de ait olabileceğini belirttiler. Bu nedenle kristal yapının tamamen hekzagonal, tamamen kübik veya her iki fazın karışımı şeklinde olup olmadığını belirlemenin güç olduğunu söylediler. Bununla birlikte değişik araştırmacılar, yüksek altlık sıcaklıklarında (393 K ve üzeri sıcaklıklar) vakum buharlaştırma yöntemiyle ürettikleri CdS ince film örneklerinin hekzagonal yapıya sahip olduğunu belirttiler (Pal vd., 1997; Al Kuhaimi, 1998; Lee vd., 1999; Senthil vd., 2001b). Oda sıcaklığı veya 393 K kadar olan altlık sıcaklıklarında düzgün ve amorf olan altlık yüzeylerinde kısmen kübik yapının ortaya çıkma eğilimi olduğu, daha yüksek altlık sıcaklıklarında ise gittikçe artan ölçüde hekzagonal yapının oluşacağı bilinmektedir (Boichott ve Wilmant, 1980). Böylece bu tez çalışmasında, altlık sıcaklığını düşürerek hekzagonal yapıya ait piklerin gözükmesi sonucu yukarıda belirtilen çalışmalarla uyum içinde olmadığı görülmektedir.

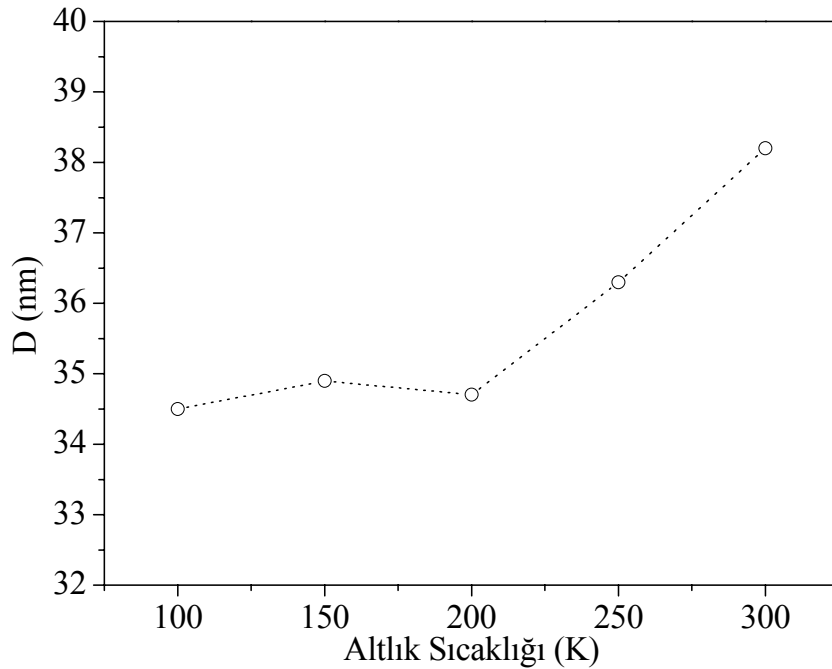
Tablo 4. Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin X-ışını kırınım desenlerinde görülen piklerin şiddet oranları [$I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)]

(hkl)	$T_s = 300\text{ K},$ $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)	$T_s = 250\text{ K},$ $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)	$T_s = 200\text{ K},$ $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)	$T_s = 150\text{ K},$ $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)	$T_s = 100\text{ K},$ $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)
(100)	0,0	0,6	1,0	0,9	1,1
(002)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
(004)	2,2	2,0	2,0	1,7	1,9



Şekil 33. (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında hazırlanan örneklerin X-ışını kırınım desenleri

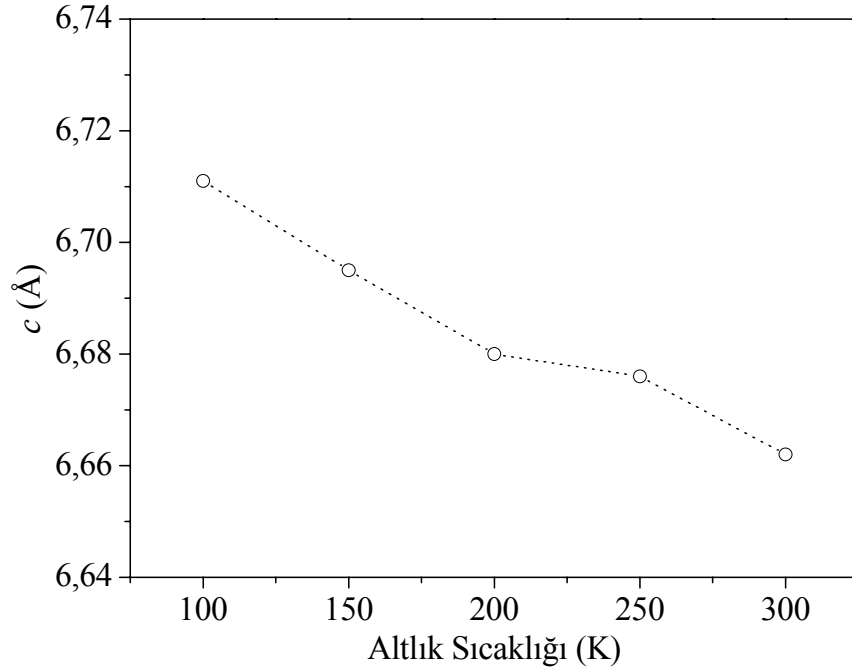
Şekil 34, değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin Scherrer formülü ile hesaplanan parçacık boyutlarını göstermektedir. Oda sıcaklığından 100 K altlık sıcaklığına inilirken parçacık boyutunun yaklaşık 38,2 nm'den bir doyum değeri olan 34,5 nm'ye ($\pm 0,1$) azaldığı belirlendi. Kesim 3.3.2'de anlatılacağı gibi, altlık sıcaklığı azaldıkça ince film örneklerinin kalınlığının arttığı (Şekil 41) görüldü. Yapılan değişik çalışmalarda CdS ince film örneklerinin kalınlığı arttıkça parçacık boyutunun arttığı belirtildi (Al Kuhaimi, 1998; Joel Pantoja Enríquez ve Xavier Mathew, 2003). Bu tez çalışmasında, kalınlık artmasına rağmen parçacık boyutunun artmadığı aksine bir miktar azaldığı görüldü. Bu da düşük altlık sıcaklığının etkisi olarak değerlendirildi. Bu sonuç, Belyaev ve arkadaşlarının düşük altlık sıcaklıklarında ürettikleri CdS (212-218 K) ve CdTe (228-233 K) ince filmleri için elde ettikleri sonuçlar ile uyum içindedir (Belyaev vd., 2003). Belyaev ve arkadaşları, CdS ve CdTe ince filmlerinin, düşük altlık sıcaklıklarında üretimi sırasında oluşan ilk adacıklarının boyutunun yaklaşık 20-25 nm olduğunu ve ince film oluşumu devam ettikçe bu boyutun çok değişmediğini sadece adacık yoğunluğunun arttığını belirlediler.



Şekil 34. Örneklerin parçacık boyutlarının altlık sıcaklığına göre değişimi

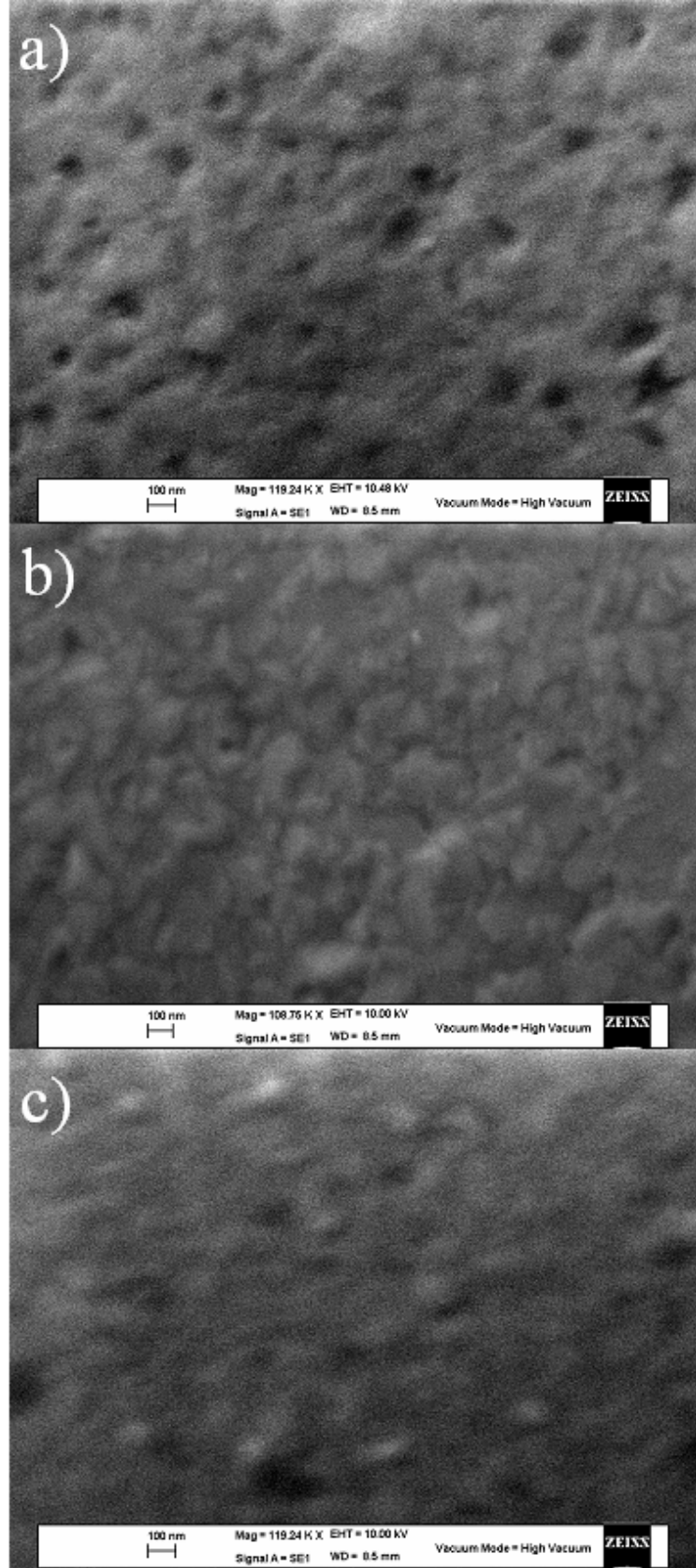
Şekil 35'te değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin c örgü parametreleri altlık sıcaklığının fonksiyonu olarak çizildi. Altlık sıcaklığı azaldıkça örneklerin c örgü parametrelerinin yaklaşık 6,662 Å'dan 6,711 Å'a ($\pm 0,005$ Å) artarak toz CdS'in c örgü

parametresi değerine ($6,720 \pm 0,005 \text{ \AA}$) yaklaştığı belirlendi. Bu sonuca göre yüksek altlık sıcaklığında üretilen örneklerde çekme zorlanmasının oluştuğu ve altlık sıcaklığı azaldıkça, artan kalınlık nedeniyle, bu zorlanmanın azaldığı söylenebilir (Freund ve Suresh, 2003).



Şekil 35. Örneklerin c örgü parametrelerinin altlık sıcaklığına göre değişimi

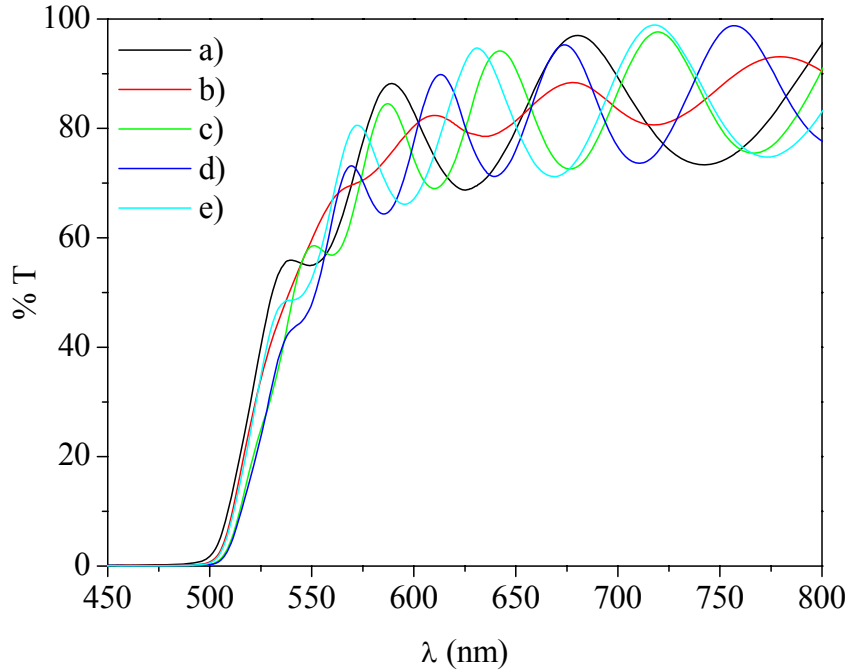
Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin yüzey şekilleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi (Şekil 36). Bu şekillerde, örneklerdeki parçacık boyutları küçük olduğu için sürekli bir film yüzeyi görüldü ve bu nedenle örneklerin parçacık boyutu belirlenemedi. Bununla birlikte oda sıcaklığında üretilen örneğin gözenekli bir yüzeye sahip olduğu, düşük altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerde ise gözeneklerin daha az olduğu tespit edildi.



Şekil 36. (a) 300 K, (b) 200 K ve (c) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin SEM görüntüleri

3.3.2. Optik Özelliklerin İncelenmesi

Şekil 37’de değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin optik geçirgenlik ölçümleri gösterildi. Tüm örneklerin geçirgenlik eğrilerinde girişim saçakları görüldü. Değişik araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda vakum buharlaştırma yöntemi ile üretilen CdS ince film örneklerinin optik geçirgenlik eğrilerinde girişim saçaklarının oluştuğu belirlendi (Aboul-Enein vd., 1998; Chandramohan vd., 2007). Böylece, ince filmlerin geçirgenlik eğrilerinde girişim saçaklarının oluşması onların düzgün bir yüzeye ve homojen bir kalınlığa sahip olduğunu gösterdi (Swanepoel, 1983).

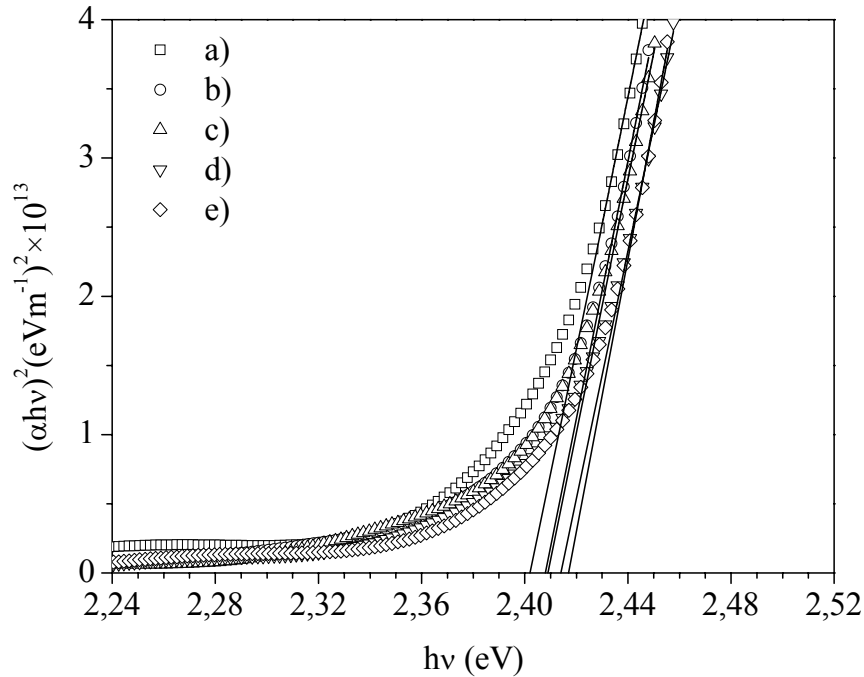


Şekil 37. (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında hazırlanan örneklerin optik geçirgenlik eğrileri

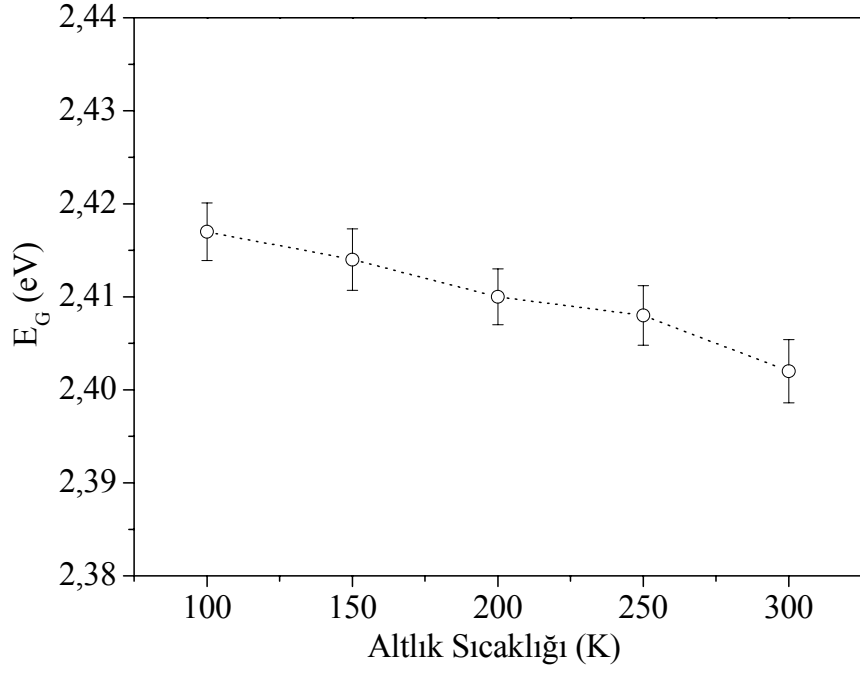
Şekil 38, değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örnekler için $(ah\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimini göstermektedir. Bu şekilde faydalanarak CdS ince film örneklerinin yasak enerji aralıkları belirlendi. Elde edilen yasak enerji aralıklarının altlık sıcaklığına göre değişimi Şekil 39’da gösterildi. Altlık sıcaklığı 300 K’den 100 K’e azalırken örneklerin yasak enerji aralığının yaklaşık 2,40 eV’tan 2,42 eV’a arttığı tespit edildi. Yasak enerji aralığında meydana gelen bu değişim; tane büyüklüğü, yapısal parametreler, taşıyıcı yoğunluğu, safsızlıkların varlığı, filmdeki stokiometrik kayma ve örgü zorlanması gibi

değişik etkenlerden ileri gelebilir (Rakhshani ve Al-Azab, 2000; Lejmi ve Savadogo, 2001; Al Kuhaimi, 1998; Zelaya-Angel vd., 1994; Chopra, 1969; Pattabi ve Uchil, 2000). Bu parametrelerden her birinin yasak enerji aralığına etkisini ortaya çıkarmak için ayrıntılı bir analiz gerekmektedir. Bununla birlikte ince film örneklerinde hekzagonal faz ile birlikte kübik fazın varlığının yasak enerji aralığının küçülmesine neden olabileceği bilinmektedir (Pal vd., 1997; Senthil vd., 2001a). Kesim 3.3.1’de anlatıldığı gibi, düşük altlık sıcaklığında üretilen örneklerde hekzagonal yapının oda sıcaklığında üretilen örneğe göre daha baskın olmasının bu örneklerde yasak enerji aralığının yüksek olmasına neden olabileceği düşünülmektedir. Bu tez çalışmasında elde edilen yasak enerji aralığının kristal yapıya bağlı olarak değişimi ile ilgili sonuç, Pal ve arkadaşlarının bulduğu sonuç ile uyum içindedir (Pal vd., 1997).

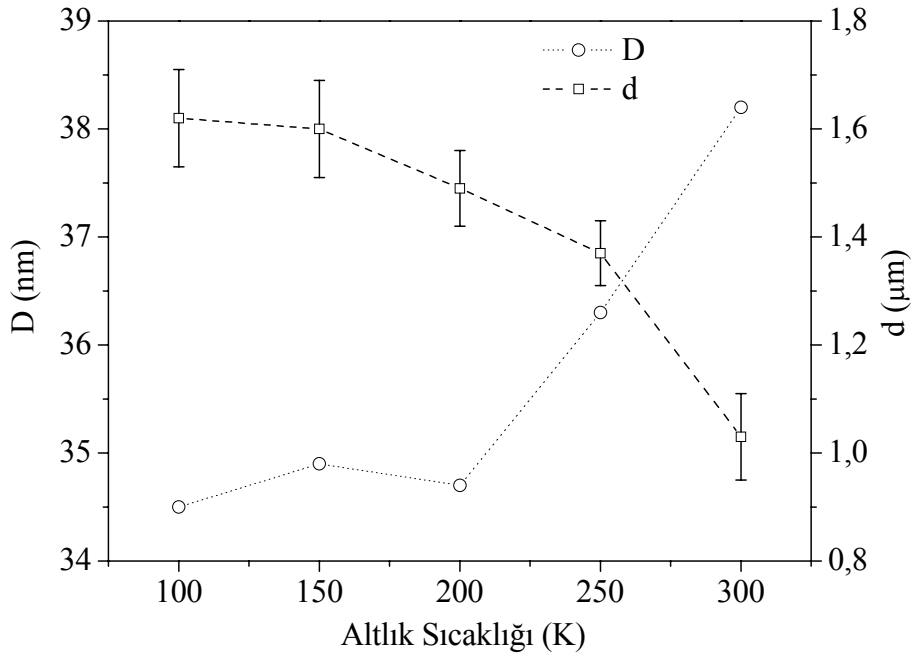
Geçirgenlik eğrilerindeki girişim saçaklarından türetilen örnek kalınlıklarının altlık sıcaklığına göre değişimi Şekil 40’ta gösterildi. Altlık sıcaklığı azaldıkça ince film kalınlığının yaklaşık 1,0 μm ’den 1,6 μm ’ye arttığı belirlendi.



Şekil 38. (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında hazırlanan örnekler için $(\alpha h\nu)^2$ nin foton enerjisine göre değişimi



Şekil 39. Örneklerin yasak enerji aralıklarının altlık sıcaklığına göre değişimi



Şekil 40. Örneklerin kalınlıklarının (d) ve parçacık boyutlarının (D) altlık sıcaklığına göre değişimi

3.3.3. Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi

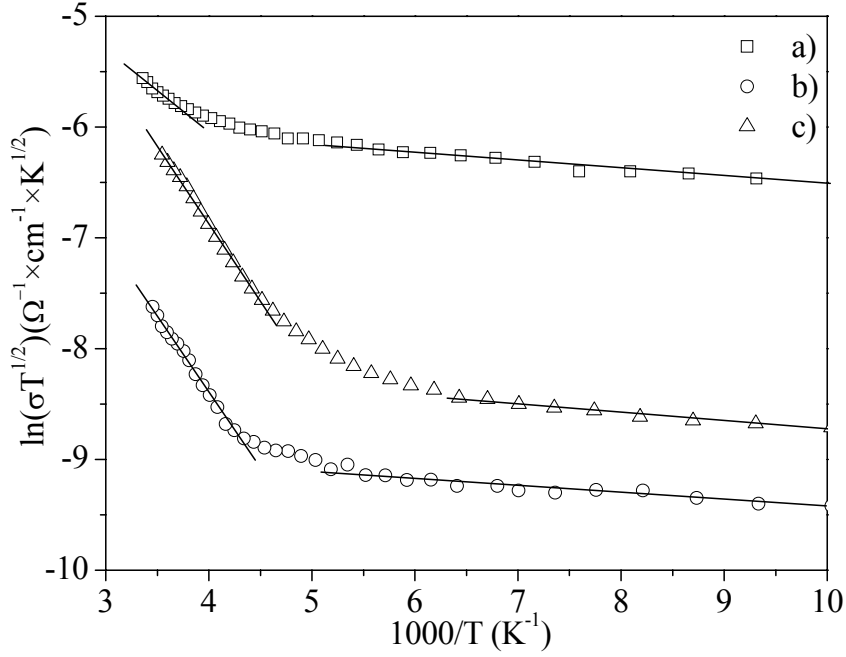
Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin oda ortamında ve karanlıkta ölçülen özdirenç, Hall ölçümünden hesaplanan taşıyıcı yoğunluğu ve elektron hareketliliği Tablo 5'te verildi. 300 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin en yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olduğu ve altlık sıcaklığı azaldıkça taşıyıcı yoğunluğunun azaldığı tespit edildi. Bununla birlikte 200 K ve daha düşük altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerde taşıyıcı yoğunluğunda önemli bir değişimin olmadığı görüldü. Değişik çalışmalarda, vakum buharlaştırma yöntemiyle oda sıcaklığında ve oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda üretilen CdS ince film örneklerinde Cd fazlalığının olduğu belirtildi (Pal vd., 1997; Zhibing He vd., 2005). Ara yerlere yerleşen (I_{Cd}) Cd fazlalığı olduğu zaman, yasak enerji aralığında verici enerji düzeylerinin oluştuğu ve böylece taşıyıcı yoğunluğunun arttığı bilinmektedir. Altlık sıcaklığı düştükçe, örneklerin özdirenç değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı belirlendi. Burada dikkat edilmesi gereken nokta altlık sıcaklığı azaldıkça örneklerin elektron hareketliliğinin artmış olmasıdır. CdS ince film örneklerinin düzlemsel özdirenci, örneklerin tercihli yöneliminin derecesine bağlıdır (Ashour vd., 1995). Kesim 3.3.1'de anlatıldığı gibi soğuk altlıklar üzerinde üretilen örneklerde düşük şiddette (100) yansıma düzlemine ait pikin oluşması nedeniyle, bu örneklerin hekzagonal yapıdaki (002) tercihli yöneliminin azaldığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle düşük altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin özdirenç değerlerinin oda sıcaklığında üretilen örneğin özdirenç değerine bir miktar yüksek olduğu düşünülmektedir. Zhibing He ve arkadaşları değişik altlık sıcaklıklarında (oda sıcaklığı, 100, 150, 250 ve 300 °C) CdS ince film örneklerini vakum buharlaştırma yöntemiyle elde ettiler (Zhibing He vd., 2005). Örneklerin hepsinde en şiddetli pikin hekzagonal yapıya ait olan (002) yansıma düzlemi olduğunu gördüler. Altlık sıcaklığı arttıkça, hekzagonal yapıya ait olan (100) ve (101) yansıma düzlemlerinin oluştuğunu ve bu düzlemlerin pik şiddetlerinin arttığını gördüler. 150 °C altlık sıcaklığından sonra, (100) ve (101) piklerinin iyice belirginleşmesi nedeniyle örneklerin tercihli yöneliminin zayıfladığını ve bunun sonucu olarak da örneklerin düzlemsel özdirençlerinde bir miktar artış ($1,8 \Omega \times \text{cm}$ 'den $18,90 \Omega \times \text{cm}$ 'ye) olduğunu belirttiler.

Tablo 5. Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin karanlık öz dirençleri, taşıyıcı yoğunlukları, elektron hareketlilikleri ve aktivasyon enerjileri

Altlık Sıcaklığı (K)	$\rho_K (\Omega \times \text{cm})$	$n (\text{cm}^{-3})$	$\mu (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}) \times 10^{-3}$	$E_a^1 (\text{meV})$	$E_a^2 (\text{meV})$
300	$4,5 \times 10^3$	$4,7 \times 10^{17}$	3,0	57,6	6,0
250	$5,6 \times 10^3$	$2,3 \times 10^{16}$	47,7	-	-
200	$1,2 \times 10^4$	$5,3 \times 10^{15}$	97,8	116,0	5,6
150	$8,3 \times 10^3$	$7,2 \times 10^{15}$	104,6	-	-
100	$7,5 \times 10^3$	$3,5 \times 10^{15}$	238,2	121,4	6,3

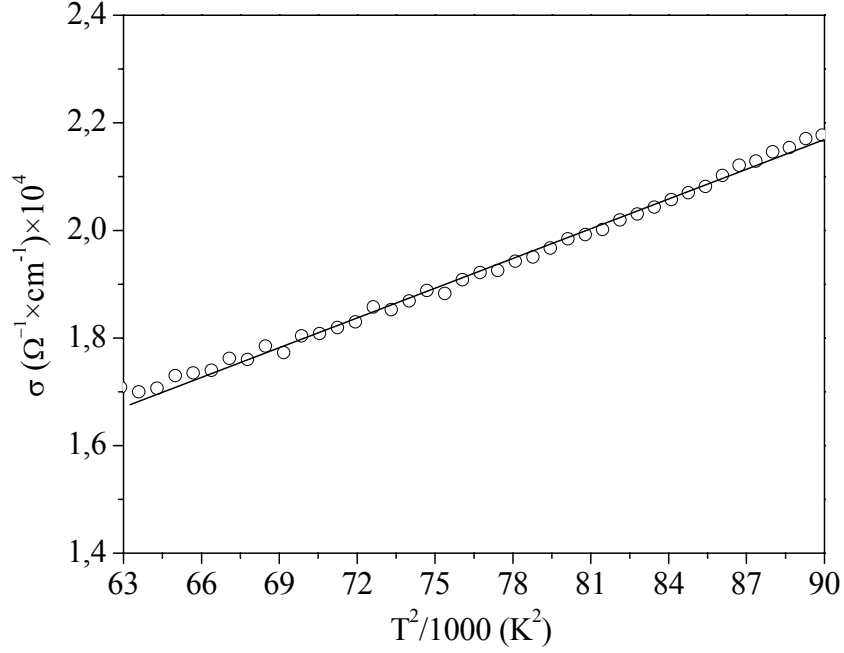
Şekil 41’de, 100 – 300 K sıcaklık aralığında, $\ln(\sigma T^{1/2})$ ’nin $1/T$ ’ye göre değişimi gösterildi. 300 K altlık sıcaklığında üretilen örnek için, bu sıcaklık aralığındaki iletkenlik $1,5 \times 10^{-4}$ ’ten $2,3 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \times \text{cm}^{-1}$ ’e yaklaşık 1,5 kat artarken; düşük altlık sıcaklığında üretilen örneklerde bu artışın yaklaşık 10 kat olduğu ($T_s = 100$ K için $1,6 \times 10^{-5}$ ’ten $1,5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \times \text{cm}^{-1}$ ’e) belirlendi. Garcia-Cuanca ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada düşük taşıyıcı yoğunluğuna sahip CdS ince film örneklerinde sıcaklığa (77 - 300 K) bağlı olarak iletkenlikte meydana gelen yaklaşık 10^4 mertebesindeki artışın, yüksek taşıyıcı yoğunluklu örneğin iletkenliğinde meydana gelen değişimden çok daha fazla olduğu belirtildi (Garcia-Cuanca vd., 1987a). Böylece bu tez çalışmasında elde edilen sonucun, Garcia-Cuanca ve arkadaşlarının elde ettikleri sonuç ile uyum içinde olduğu görüldü. Bununla birlikte tüm örneklerde farklı eğime sahip iki sıcaklık bölgesinin olduğu belirlendi. İki farklı bölge için, $\ln(\sigma T^{1/2})-1/T$ grafiğinin eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjileri Tablo 5’te listelendi. 300 K altlık sıcaklığında üretilen örnek için E_a^1 aktivasyon enerjisi değeri 250 – 300 K arasındaki sıcaklık bölgesinde (1. bölge), düşük altlık sıcaklıklarında üretilen örnekler için E_a^1 aktivasyon enerjisi ise 200 – 300 K arasındaki sıcaklık bölgesinde (1. bölge) hesaplandı.

Tablo 5’te E_a^2 düşük sıcaklık bölgesindeki (2. bölge, 100 – 200 K) aktivasyon enerjisini göstermektedir. 300 K altlık sıcaklığında üretilen örnek için $E_a^1 = 57,6$ meV değerinin, düşük altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin $E_a^1 = 116,0$ meV ($T_s = 200$ K) ve $E_a^1 = 121,4$ meV ($T_s = 100$ K) değerlerinden daha küçük olduğu belirlendi. 300, 200, 100 K altlık sıcaklığına sahip olan örneklerin E_a^2 değerlerinin sırasıyla 6,0, 5,6 ve 6,3 meV olduğu ve altlık sıcaklığına bağlı olarak önemli bir değişim olmadığı tespit edildi.



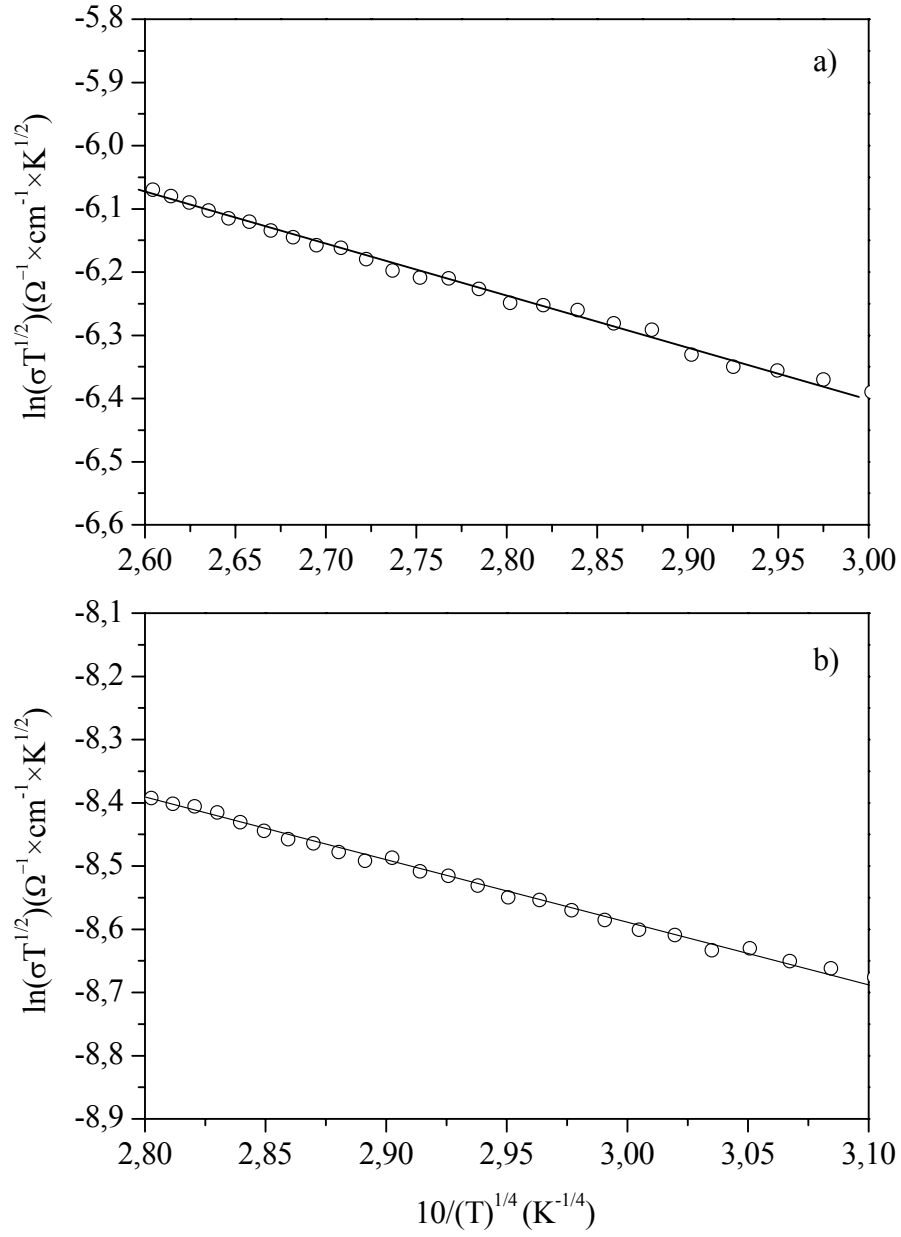
Şekil 41. (a) 300 K, (b) 200 K ve (c) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örnekler için 100 – 300 K arasında $\ln(\sigma T^{1/2})$ 'nin $1/T^2$ 'ye göre değişimi

Düşük altlık sıcaklıklarında (100 K ve 200 K) üretilen örnekler için 1. bölgede, E_a^1 değerleri bağıl olarak daha büyük oldukları için termoionik emisyon türü iletim mekanizmasının baskın olduğu söylenebilir. Oda sıcaklığında üretilen örnek için 1. bölgede tünelleme tipi bir iletim mekanizmasının varlığını incelemek için $\sigma-T^2$ grafiği çizildi ve Şekil 42'de gösterildi. Burada 250 – 300 K arasında doğrusal bir davranış görüldü. Bu nedenle 300 K altlık sıcaklığında üretilen bu örnek için 1. bölgede tünelleme tipi bir iletim mekanizmasının baskın olduğu söylenebilir. Garcia-Cuenca ve arkadaşlarının yaptığı diğer bir çalışmada CdS ince film örneklerinde taşıyıcı yoğunluğu arttıkça tünelleme tipi iletim mekanizmasının arttığı ve belli bir değerden ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) sonra ise baskın hale geldiği belirtildi (Garcia-Cuenca vd., 1987b). Bu sonuca göre 300 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin düşük altlık sıcaklığında üretilen örneklere göre yüksek taşıyıcı yoğunluğuna ($\sim 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) sahip olması bu örnekte tünelleme türü iletim mekanizmasının baskın olduğu sonucunu doğrulamaktadır.



Şekil 42. 300 K altlık sıcaklığında üretilen örnek için 250 – 300 K arasında çizilen $\sigma-T^2$ grafiği

Örneklerin 2. bölgedeki aktivasyon enerjilerinin çok düşük olması (~ 6 meV) bu bölgede sıçrama (hopping) gibi bir iletim mekanizmasının baskın olduğunu ima etmektedir. Düşük sıcaklık bölgesinde sıçrama tipi iletim mekanizmasının katkısını incelemek için $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1/4}$ grafiği çizildi ve Şekil 43'te gösterildi. Bu grafik, 300 K altlık sıcaklığında üretilen örnek için 120 – 220 K arasında ve 100 K altlık sıcaklığında üretilen örnek için 108 – 162 K arasında çizildi. Şekil 43 incelendiğinde örneklerin $\ln(\sigma T^{1/2})-T^{-1/4}$ grafiğinin doğrusal davranış gösterdiği görüldü. Bu sonuçlara göre düşük sıcaklık bölgesinde sıçrama tipi iletim mekanizmasının baskın olduğu söylenebilir. Günel ve Parlak tarafından yapılan bir çalışmada, 100 – 200 K arası sıcaklık bölgesinde, In katkılı CdS ince film örneklerinde baskın iletim mekanizmasının tünelleme olduğu görüldü (Günel ve Parlak, 1997). İletim mekanizmasında görülen bu farkın, bu tez çalışmasında üretilen CdS ince film örneklerin taşıyıcı yoğunluğunun (yaklaşık $5 \times 10^{15} - 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), Günel ve Parlak tarafından üretilen In katkılı CdS örneklerinin taşıyıcı yoğunluğuna (yaklaşık $3 \times 10^{18} - 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) göre küçük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 43. (a) 300 K (120 – 220 K arası) ve (b) 100 K (108 – 162 K arası) altlık sıcaklıklarında üretilen örnekler için $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiği

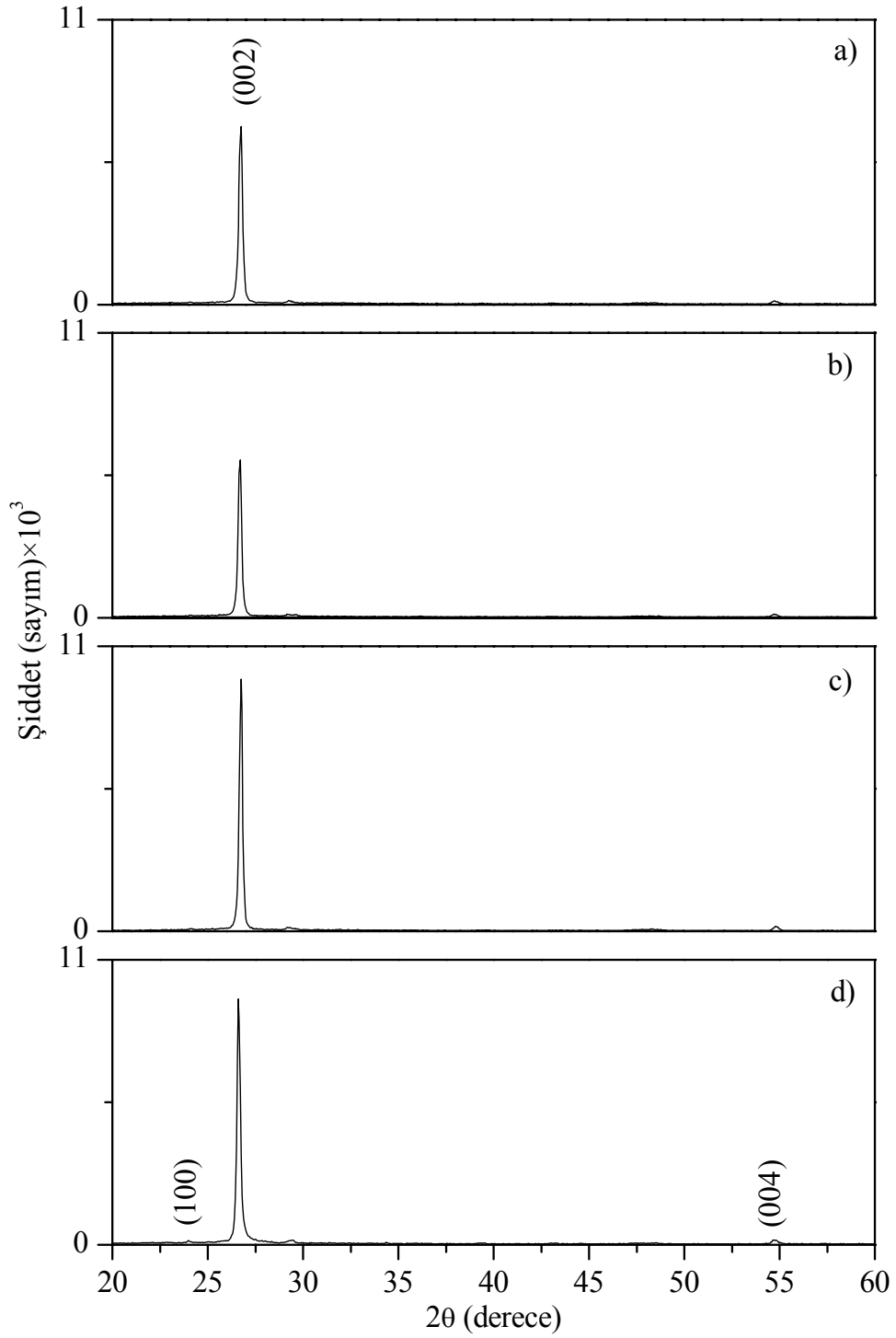
3.4. İnce Film Örneklerinin Değişik Sıcaklıklarda Tavlama

3.4.1. Yapısal Özelliklerin İncelenmesi

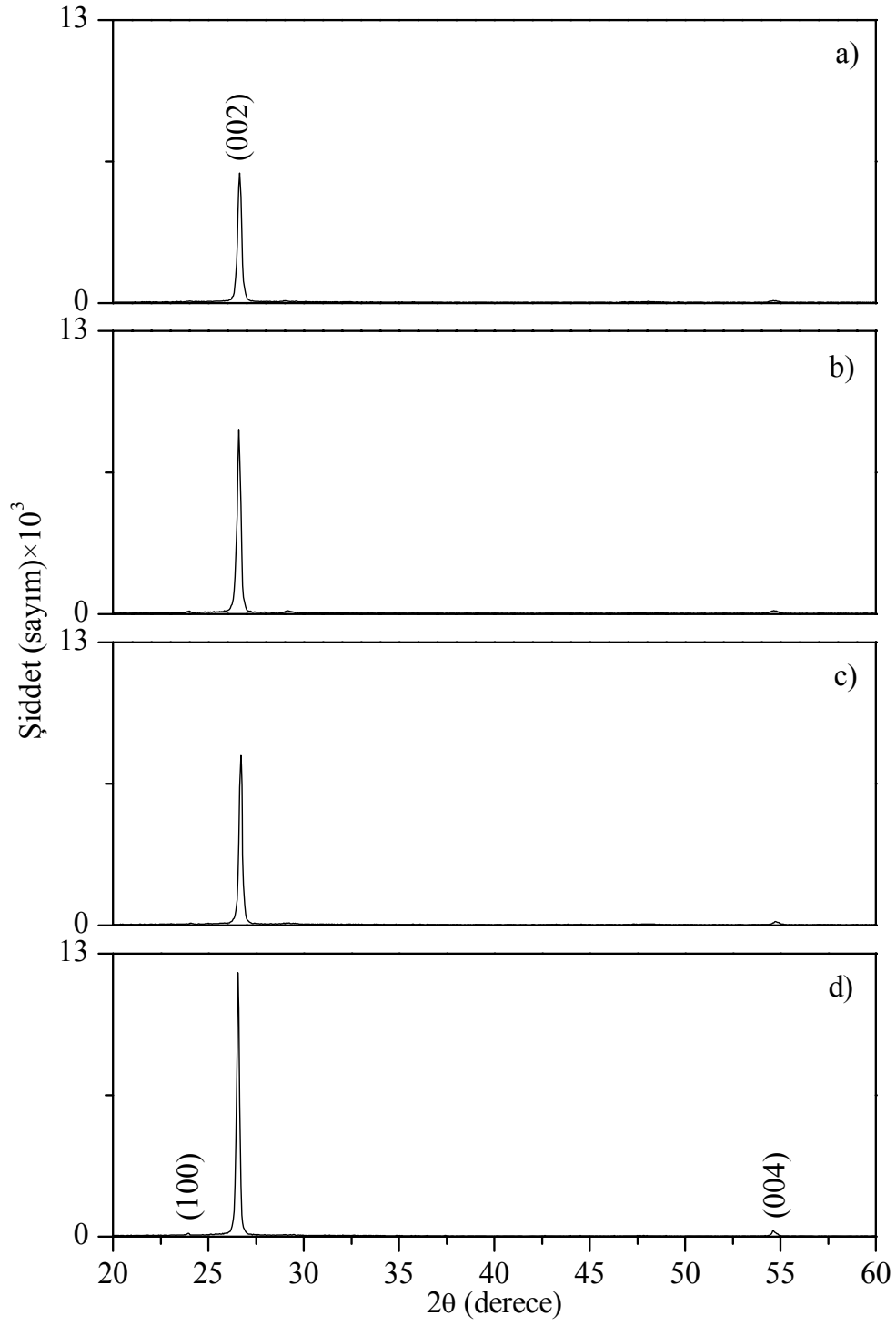
300, 250, 200, 150 ve 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin, 473, 573 ve 673 K'de 30 dakika süre ile vakum ortamında tavlandıktan sonra X-ışını kırınım desenleri sırasıyla Şekil 44 - 48'de gösterildi. Bu kırınım desenlerinde görülen en şiddetli pikin (002) yansıma düzlemine ait olduğu görüldü ve tüm örneklerde genel olarak tavlama ile pik şiddetinin arttığı tespit edildi. Buradan ince film örneklerinin tümüyle *c* eksenine yönünde bir yapılanma gösterdiği ve tavlama ile bu durumun değişmediği anlaşıldı. Tablo 6'da X-ışını kırınım desenlerinde görülen bazı piklerin, tavlama öncesi (TÖ) ve 673 K'de tavlandıktan sonraki (TS) şiddet oranları [$I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)] listelendi. Bu tablo incelendiğinde 300 ve 250 K altlık sıcaklığında üretilen örneklerde tavlama sonrası (100) yansıma düzlemine ait pikin şiddetinin arttığı, diğer örneklerde ise önemli bir değişimin olmadığı görüldü. Bu sonuca göre 300 ve 250 K altlık sıcaklığında üretilen örneklerde 673 K'de tavlama ile hegzagonal fazın arttığı söylenebilir. Benzer bir çalışmada Senthil ve arkadaşları vakum buharlaştırma yöntemiyle 373 K altlık sıcaklığında CdS ince film örneğini elde ettiler (Senthil vd., 2001a). Bu örneğin X-ışını kırınım deseninde sadece $2\theta = 26,44^\circ$ 'de keskin bir pik gördüler. Bu pikin hegzagonal yapı için (002) yansıma düzlemine ait olabileceği gibi kübik yapı için (111) yansıma düzlemine de ait olabileceğini belirttiler. Senthil ve arkadaşları bu örneği 673 K de tavladıklarında, hegzagonal yapıya ait olan (110), (103), (112) ve (201) piklerinin oluşması nedeniyle hegzagonal fazın arttığını söylediler.

Tablo 6. Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlama öncesi (TÖ) ve 673 K'de tavlandıktan sonraki (TS) X-ışını kırınım desenlerinde görülen piklerin şiddet oranları [$I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)]

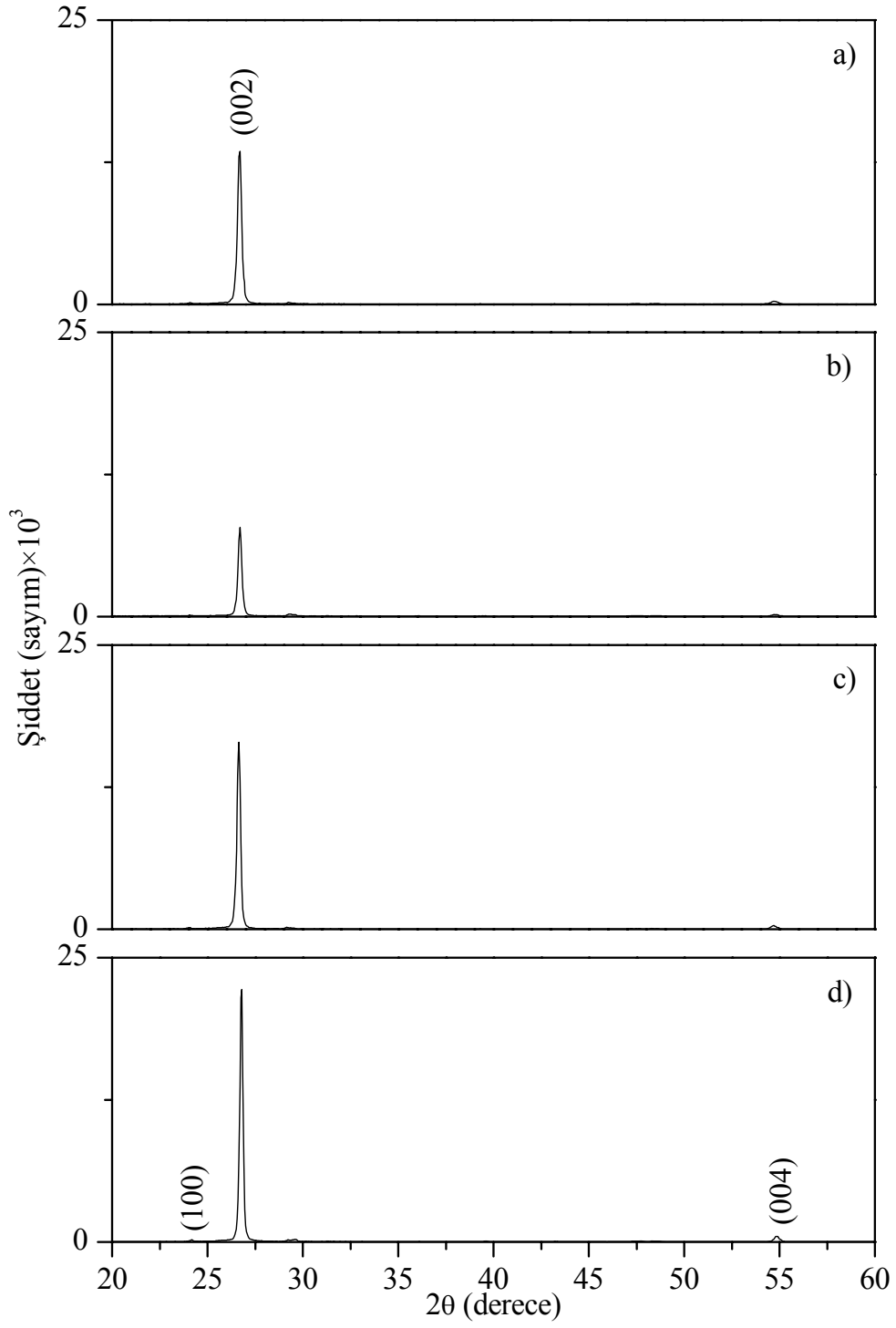
(hkl)	$T_s = 300\text{ K},$ $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)		$T_s = 250\text{ K},$ $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)		$T_s = 200\text{ K},$ $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)		$T_s = 150\text{ K},$ $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)		$T_s = 100\text{ K},$ $I_{(hkl)}/I_{(002)}$ (%)	
	TÖ	TS	TÖ	TS	TÖ	TS	TÖ	TS	TÖ	TS
(100)	0,0	1,7	0,6	1,3	1,0	0,9	0,9	1,0	1,1	0,9
(002)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
(004)	2,2	2,0	2,0	2,3	2,0	2,2	1,7	1,8	1,9	1,8



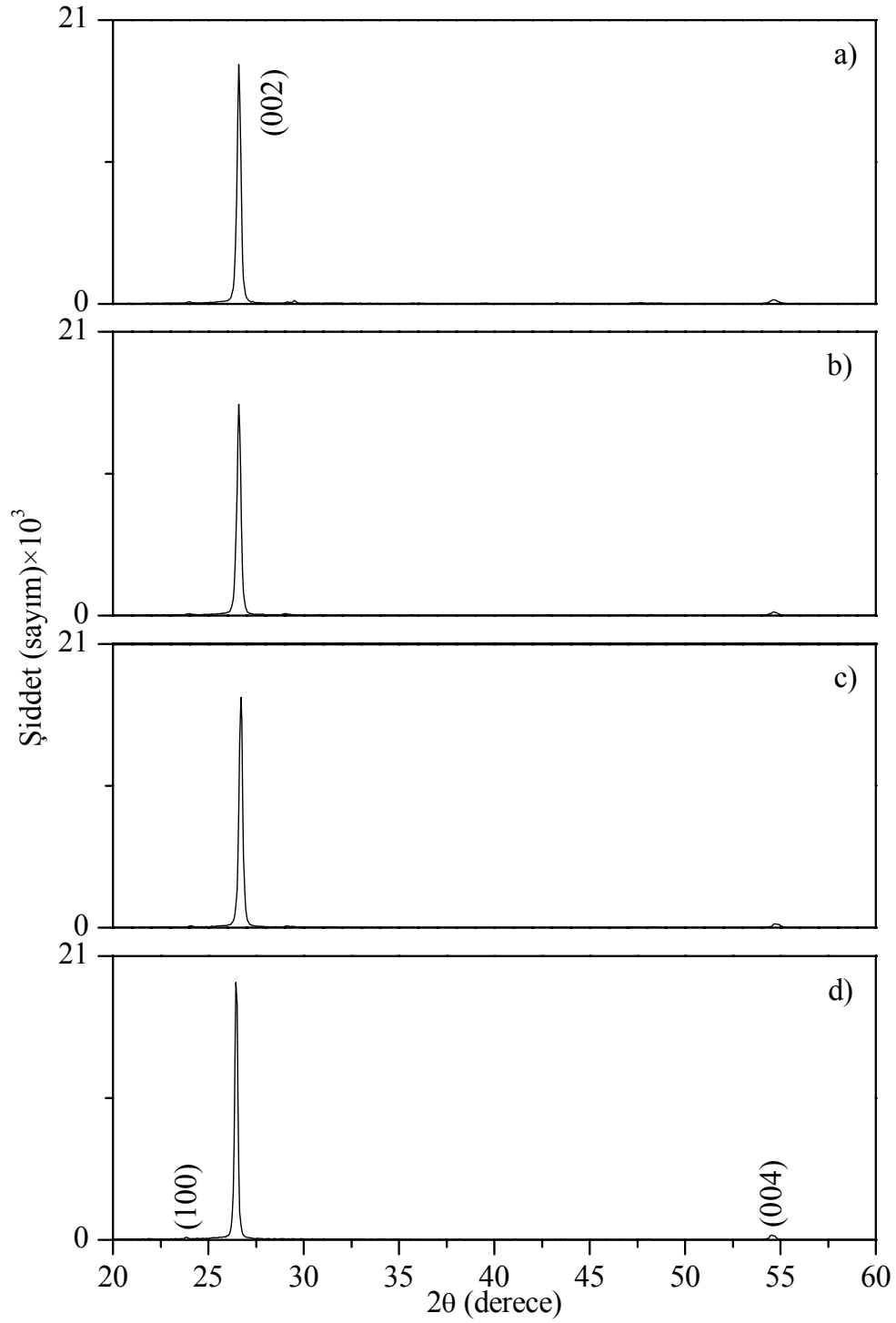
Şekil 44. 300 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin (a) tavlanmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki X-ışını kırınım desenleri



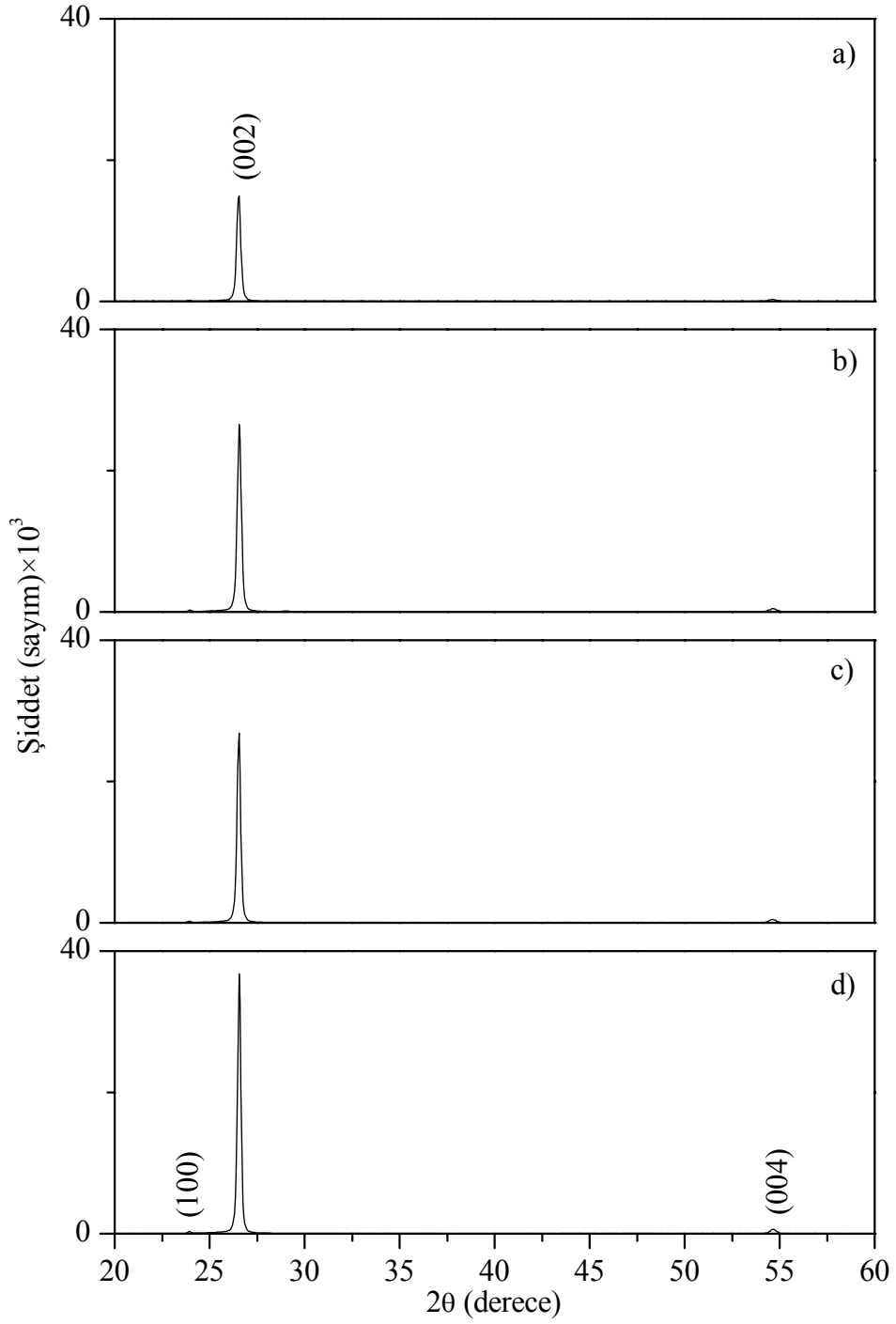
Şekil 45. 250 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin (a) tavlınmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki X-ışını kırınım desenleri



Şekil 46. 200 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin (a) tavlınmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki X-ışını kırınım desenleri



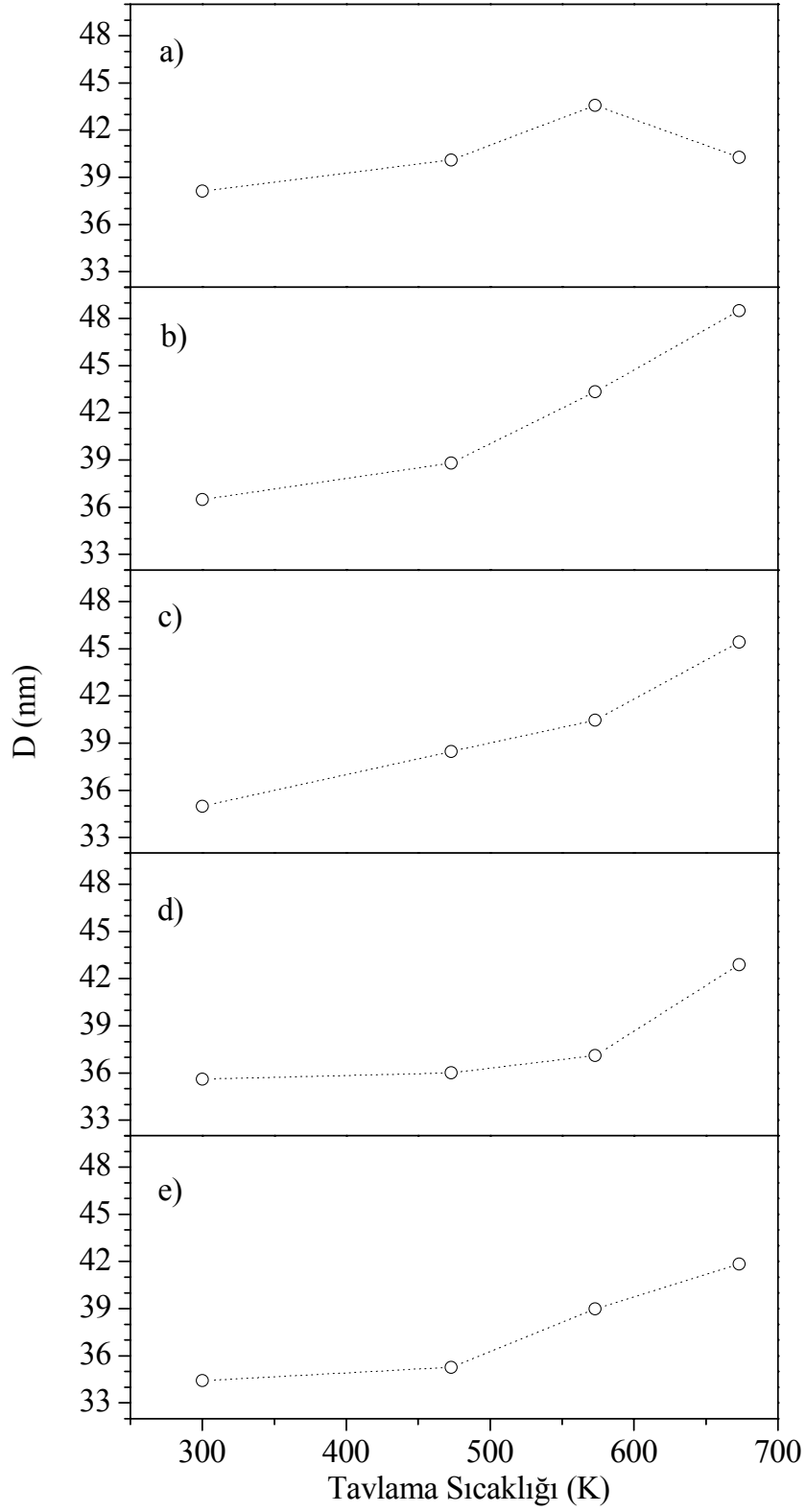
Şekil 47. 150 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin (a) tavlanmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki X-ışını kırınım desenleri



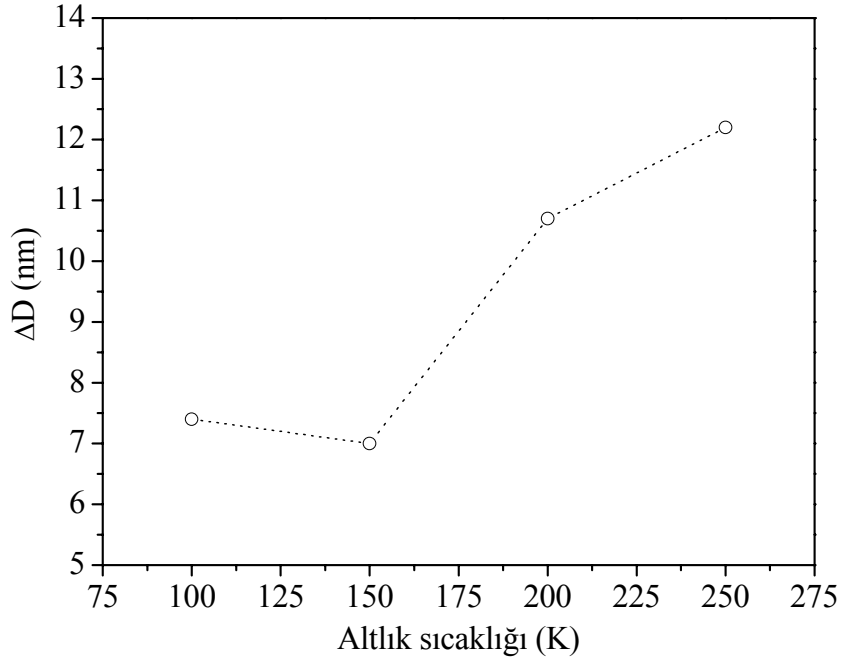
Şekil 48. 100 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin (a) tavlanmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K’de tavlandıktan sonraki X-ışını kırınım desenleri

Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlama sonrası Scherrer formülü ile hesaplanan parçacık boyutları Şekil 49'da gösterildi. Tavlama sıcaklığı arttıkça örneklerin parçacık boyutunun arttığı belirlendi. Bununla birlikte, diğer örneklerden farklı olarak, 300 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin parçacık boyutunun tavlama sıcaklığı arttıkça 38,2 nm'den 43,6 nm'ye ($\pm 0,1$) arttığı ve 673 K tavlama sıcaklığı için tekrar 43,6 nm'den 40,3 nm'ye ($\pm 0,1$) azaldığı belirlendi. Redwan ve arkadaşları vakum buharlaştırma yöntemiyle 423 K altlık sıcaklığında elde ettikleri CdS ince film örneklerini N_2 ve $CdCl_2$ ortamında ve 673 K'de tavladılar (Redwan vd., 2003). Sonuç olarak N_2 ortamında tavlanan örneğin parçacık boyutunun daha küçük olduğunu gördüler. Redwan ve arkadaşları, bu azalmanın film yüzeyinde meydana gelen S kayıplarından kaynaklanabileceğini belirttiler. Bu nedenle, bu tez çalışmasında, 300 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin 673 K'de tavlandıktan sonra parçacık boyutunda meydana gelen azalmanın örnekte S kaybının olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 50, değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlandıktan önceki (D_1) ve 673 K'de tavlandıktan sonraki (D_2) parçacık boyutunda meydana gelen artışı ($\Delta D = D_2 - D_1$) göstermektedir. Tavlama sonrası parçacık boyutunda meydana gelen en büyük artışın 250 K altlık sıcaklığında üretilen örnekte olduğu (yaklaşık 12 nm), daha düşük altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerde ise bu artışın daha az olduğu (yaklaşık 7 nm) görüldü. Yeniden-kristalleşme süreci, zorlanmış filmde zorlamayı azaltacak şekilde meydana gelir. Tüm olarak zorlanmanın azalması süreci, yüksek örgü zorlanmasının olduğu bölgelerde (genellikle tane sınırları) çekirdeklerin oluşumu, düşük zorlanmaya sahip yeni kristal yapı ile eskisi yer değiştirinceye kadar bu çekirdeklerin artması ve son olarak da tane büyümesinden oluşur. Zorlanma altındaki filmlerde yeniden-kristalleşme süresi ve sıcaklığı, düşük zorlanmaya sahip örneklerdekine göre daha küçük olduğu bilinmektedir. Bu sonuca göre, düşük altlık sıcaklığında üretilen örneklerde zorlanmanın az olması, bu örneklerde daha az yeniden-kristalleşmenin olmasına ve böylece parçacık boyutunda meydana gelen artışın da küçük olmasına neden olduğu düşünülmektedir.

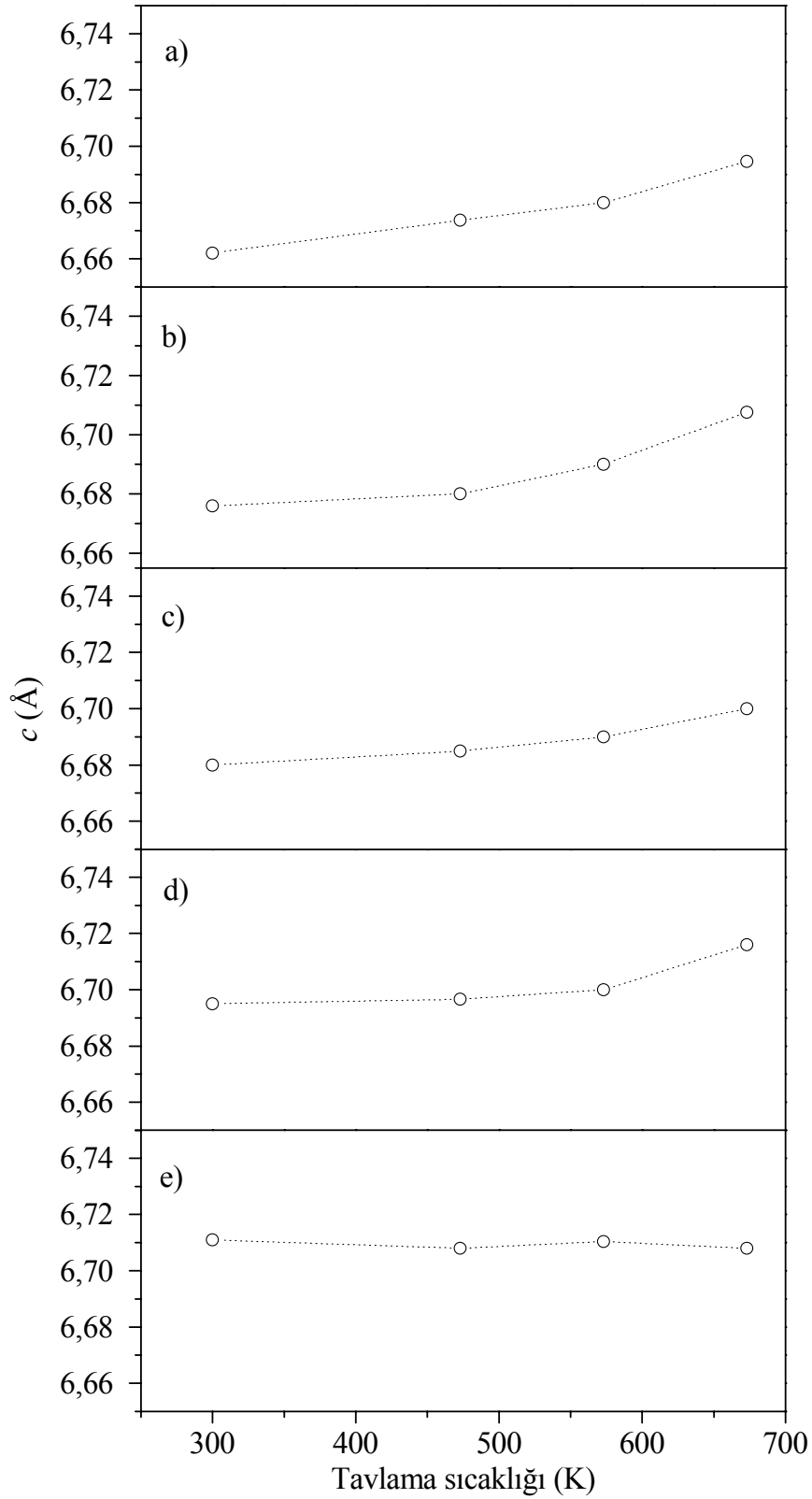


Şekil 49. (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin parçacık boyutunun tavlama sıcaklığına göre değişimi



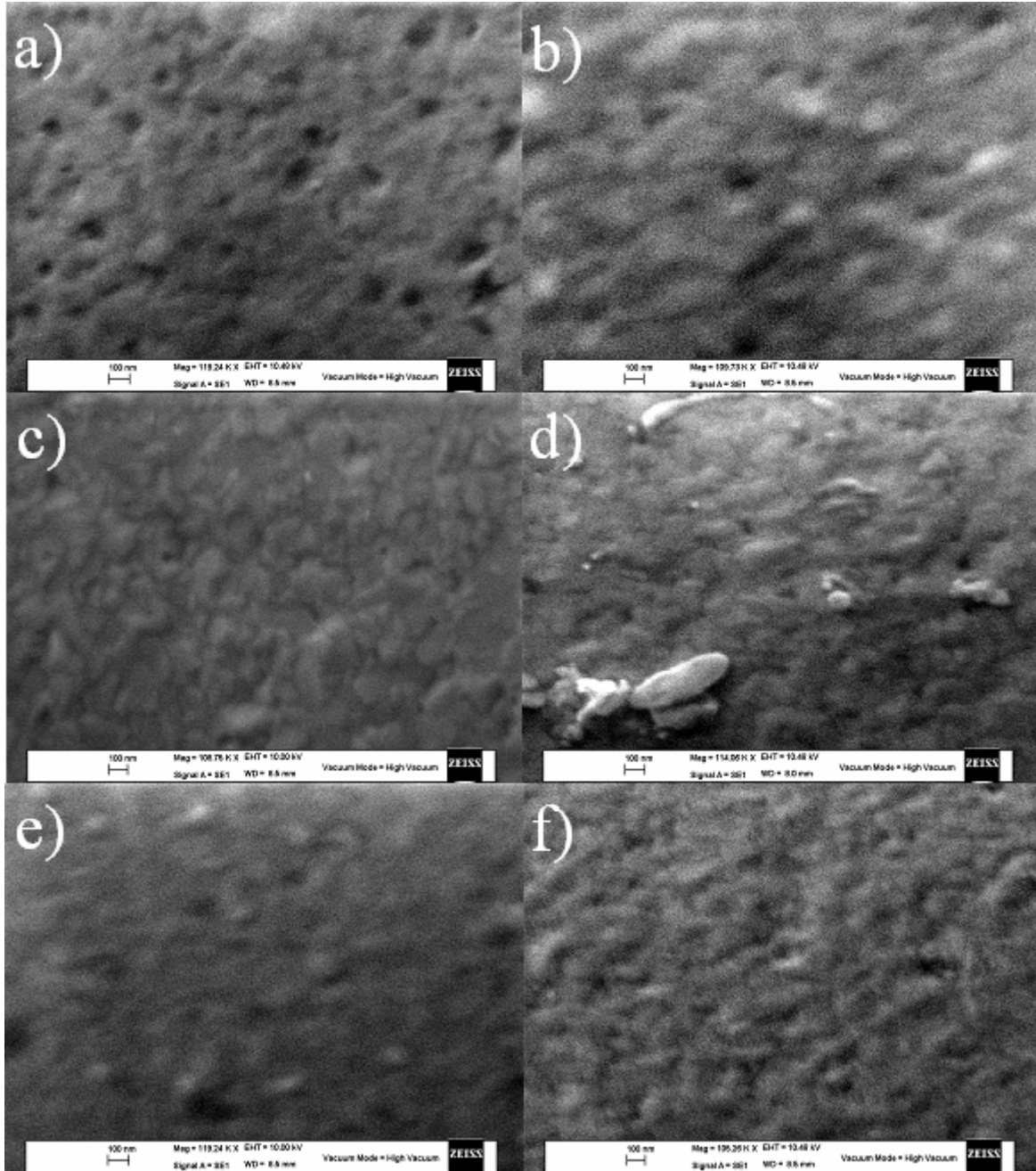
Şekil 50. Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlamanmadan önce ve 673 K'de tavlandıktan sonra parçacık boyutunda meydana gelen artma ($\Delta D = D_2 - D_1$)

Farklı altlık sıcaklıklarında üretilen CdS ince film örneklerinin tavlama sonrası c örgü parametreleri Şekil 51'de gösterildi. 100 K altlık sıcaklığında üretilen örnek hariç diğer örnekler tavlama sıcaklığına göre benzer davranış gösterdi. Tavlamadan önce CdS ince film örneklerinin c örgü parametreleri, toz CdS'in örgü parametresi değerinden küçük olduğu halde, tavlama sonrası örneklerin c değerleri toz halindeki c değerine yaklaştığı belirlendi. Bu sonuca göre, tavlamadan önce örneklerde görülen zorlanmanın, tavlama işleminden sonra azaldığı söylenebilir. 100 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin ise tavlama ile örgü parametresinin yaklaşık sabit kaldığı görüldü.



Şekil 51. (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin c örgü parametrelerinin tavlama sıcaklığına göre değişimi

Şekil 52’de 300, 200 ve 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlamadan önceki ve 673 K’de tavlandıktan sonraki SEM görüntüleri verildi. Bu görüntüler incelendiğinde, 673 K’de tavlanan örneklerde [Şekil 52 (b), (d), (f)] tanelerin çok az belirginleştiği tespit edildi. Bununla birlikte, oda sıcaklığında üretilen örneğin yüzeyinde görülen gözeneklerin 673 K’de tavlandıktan sonra azaldığı görüldü.

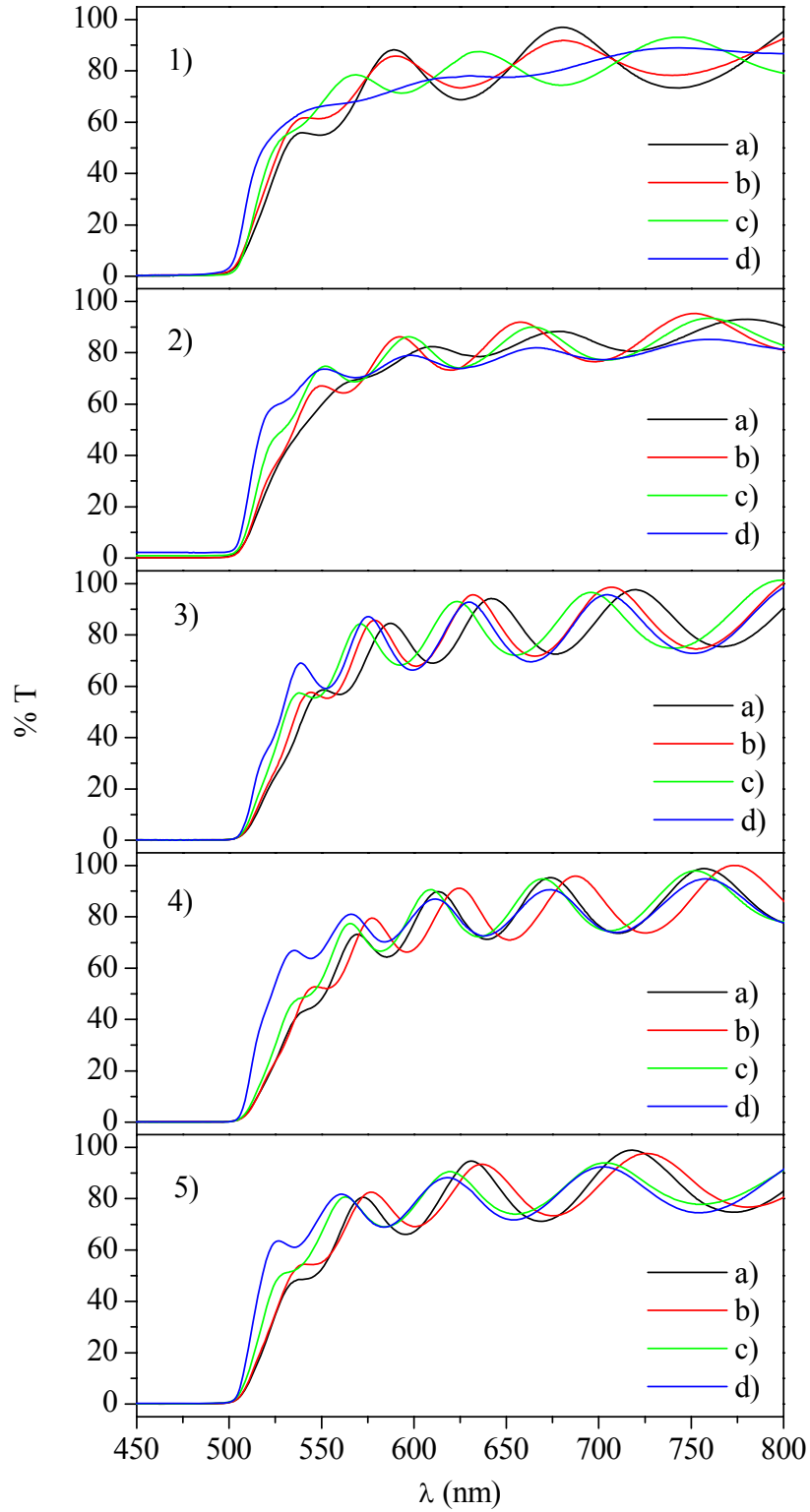


Şekil 52. 300, 200 ve 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örnekler için sırasıyla (a), (c) ve (e) tavlınmamış ve (b), (d) ve (f) 673 K’de tavlınmış SEM görüntüleri

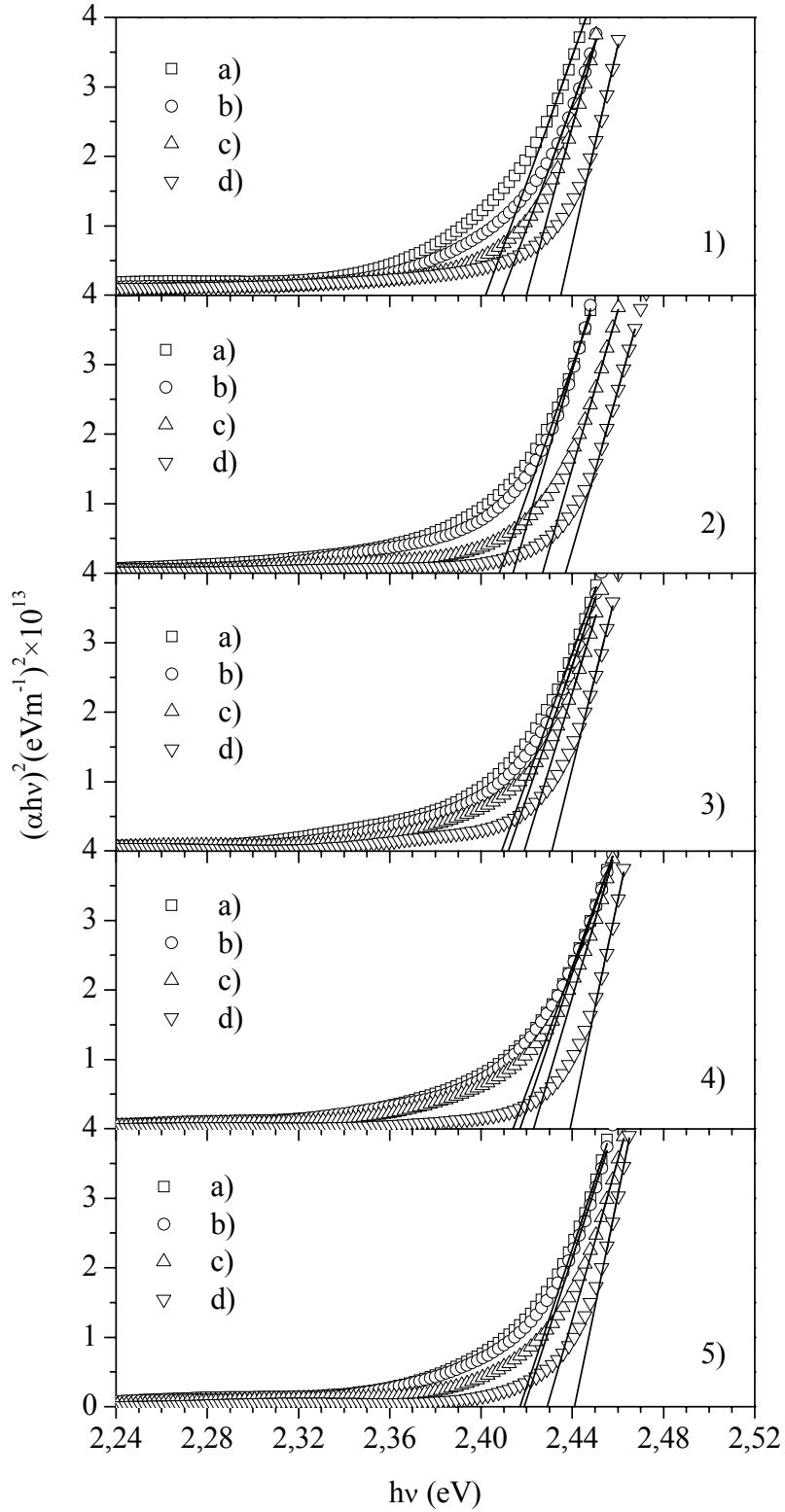
3.4.2. Optik Özelliklerin İncelenmesi

Şekil 53'te değişik altlık sıcaklıklarında üretilen CdS ince film örneklerinin farklı sıcaklıklarda tavlandıktan sonraki optik geçirgenlik ölçümleri gösterildi. Tüm örneklerin geçirgenlik eğrilerinde girişim saçakları görüldü yani örneklerin yüzeylerinin düzgün olduğu ve tavlama ile örneklerin bant kenarı geçişinin keskinleştiği gözlemlendi. Bunun yanında 300 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin 673 K'de tavlandıktan sonra geçirgenlik eğrisinde görülen girişim saçaklarının genliğinin azaldığı belirlendi. Bu azalmanın, tavlama sonucunda kristal yapıda meydana gelebilecek stokiometrik değişimin sebep olduğu film yüzey düzgünlüğünün bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

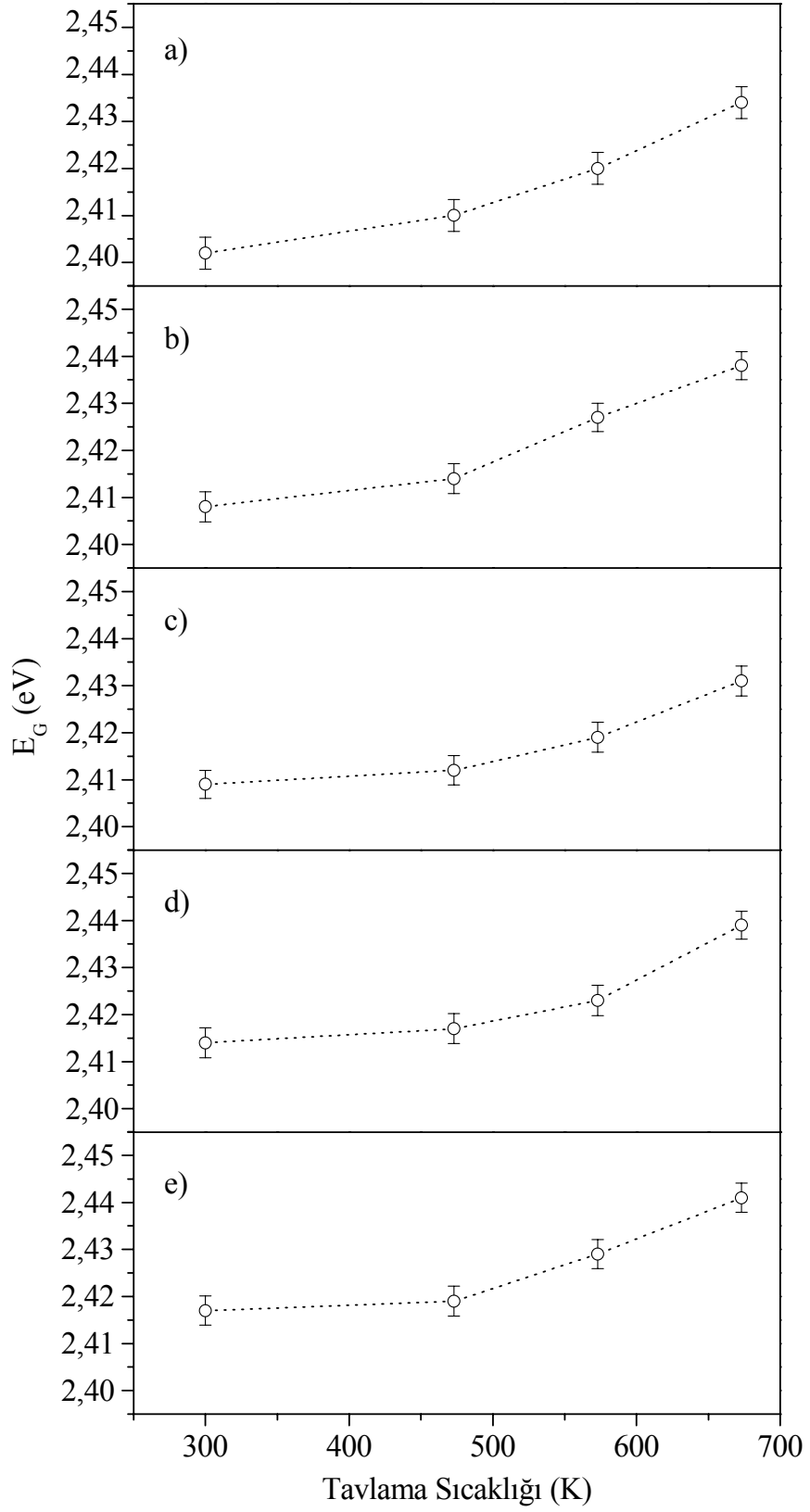
Şekil 54, farklı altlık sıcaklıklarında üretilen ve değişik sıcaklıklarda tavlanan CdS ince film örnekler için geçirgenlik verilerinden faydalanılarak hesaplanan $(ahv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimini göstermektedir. Bu şekil yardımıyla örneklerin yasak enerji aralıkları belirlendi. Elde edilen yasak enerji aralıklarının tavlama sıcaklığına göre değişimi Şekil 55'te gösterildi. Tavlama sıcaklığı arttıkça örneklerin yasak enerji aralıklarının arttığı belirlendi. Kesim 3.3.2'de anlatıldığı gibi yasak enerji aralığı üzerine birçok parametrenin etkisi vardır. Filmde hekzagonal faz ile birlikte kübik fazın bulunması, zorlanma ve kusurların olması, yasak enerji aralığını azaltabileceği bilinmektedir (Pal vd., 1997; Senthil vd., 2001a). Tavlanan örneklerde zorlanmanın azalması ve 300 ile 250 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerde hekzagonal fazın artması [hekzagonal faza ait olan (100) yansıma düzleminin oluşması] nedeniyle yasak enerji aralığının arttığı düşünülmektedir. Farklı altlık sıcaklıklarında üretilen CdS ince film örneklerinin tavlama ile kalınlığında önemli bir değişim olmadığı belirlendi.



Şekil 53. (1) 300 K, (2) 250 K, (3) 200 K, (4) 150 K ve (5) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin a) tavlamadan önce, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonraki optik geçirgenlik eğrileri



Şekil 54. (1) 300 K, (2) 250 K, (3) 200 K, (4) 150 K ve (5) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin (a) tavlınmamış, (b) 473 K, (c) 573 K ve (d) 673 K'de tavlandıktan sonra $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi



Şekil 55. (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin yasak enerji aralıklarının tavlama sıcaklığına göre değişimi

3.4.3. Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi

Değişik altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlansızdan önce ve 673 K'de tavlandıktan sonra oda ortamında ve karanlıkta ölçülen öz direnç, Hall ölçümünden hesaplanan taşıyıcı yoğunluğu ve elektron hareketliliği Tablo 7'de listelendi. Tavlama sonrası elektriksel özelliklerde meydana gelen en büyük değişimin 300 K altlık sıcaklığında üretilen örnekte olduğu, soğuk altlık üzerinde üretilen örneklerin elektriksel özelliklerinin tavlama işleminden daha az etkilendiği görüldü.

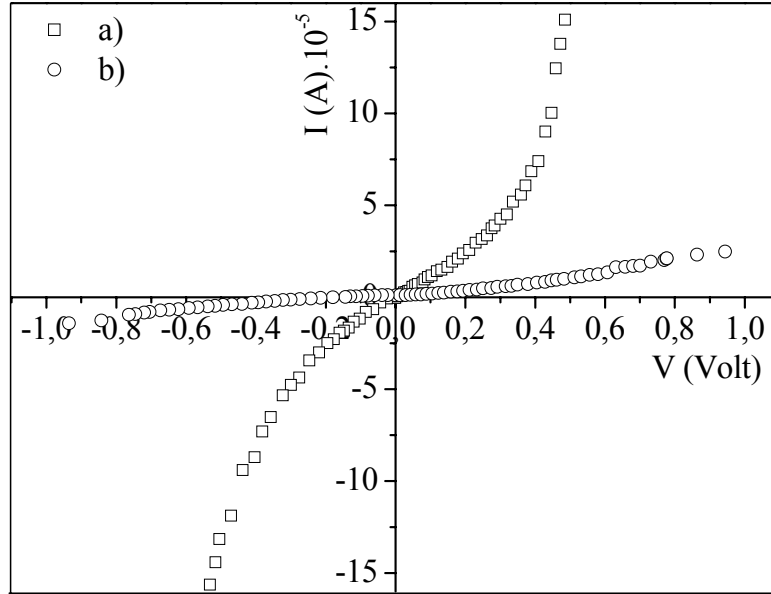
Tablo 7. Farklı altlık sıcaklıklarında üretilen örneklerin tavlama öncesi (TÖ) ve 673 K'de tavlandıktan sonraki (TS) karanlık öz dirençleri, taşıyıcı yoğunlukları, elektron hareketliliği ve aktivasyon enerjileri

Altlık Sıcaklığı (K)	$\rho_K (\Omega \times \text{cm})$ TÖ	$\rho_K (\Omega \times \text{cm})$ TS	$n (\text{cm}^{-3})$ TÖ	$n (\text{cm}^{-3})$ TS	$\mu (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}) \times 10^{-3}$ TÖ	$\mu (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}) \times 10^{-3}$ TS
300	$4,5 \times 10^3$	$6,7 \times 10^4$	$4,7 \times 10^{17}$	$2,9 \times 10^{15}$	3,0	32,3
250	$5,6 \times 10^3$	$6,3 \times 10^3$	$2,3 \times 10^{16}$	$1,2 \times 10^{16}$	47,7	82,3
200	$1,2 \times 10^4$	$2,1 \times 10^3$	$5,3 \times 10^{15}$	$1,5 \times 10^{16}$	97,8	205,2
150	$8,3 \times 10^3$	$4,3 \times 10^3$	$7,2 \times 10^{15}$	$1,2 \times 10^{16}$	104,6	124,9
100	$7,5 \times 10^3$	$1,5 \times 10^3$	$3,5 \times 10^{15}$	$1,6 \times 10^{16}$	238,2	265,9

3.5. Cu/CdS Schottky Diyot Yapısının İncelenmesi

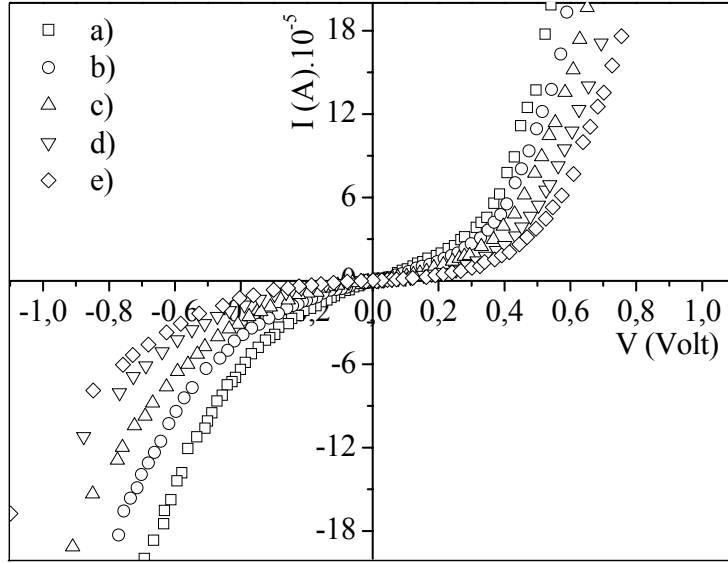
Şekil 56'da, 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen CdS ince filmleri kullanılarak hazırlanan Cu/CdS Schottky diyotlarının oda ortamındaki $I-V$ karakteristikleri gösterildi. CdS ince filmlerinin üretim sıcaklığının $I-V$ karakteristiğini önemli oranda etkilediği görüldü. 300 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin akım-voltaj değişimi üstel bir karakter gösterirken, düşük altlık sıcaklığında üretilen örneğin akım-voltaj değişiminin üstel davranıştan uzaklaştığı gözlemlendi. Seri direncin, yüksek voltaj değerlerinde, üstel davranıştan sapmalara neden olduğu bilinmektedir (Schroder, 1990). Mandal ve arkadaşları, Au/CBD-CdS/SnO₂ ve Au/nano-CdS/CBD-CdS/SnO₂ Schottky diyotları için yaptıkları $I-V$ ölçümlerinde, nano-CdS yapısının olduğu diyotun daha yüksek seri dirence sahip olduğu, yani $I-V$ 'deki eğrinin eğiminin daha küçük olduğunu gördüler (Mandal vd., 1997). Bununla birlikte, $I-V$ karakteristiğindeki eğimin azalması filmdeki zorlanmanın azalmasından da kaynaklanabileceği bilinmektedir (Zhao vd., 1993). Bu tez çalışmasında, yukarıda belirtilenlere paralel olarak oda sıcaklığındaki altlık üzerinde üretilen CdS ince

film örneklerinin, soğuk altlıklar üzerinde üretilen örneklere göre parçacık boyutunun görece olarak büyük olması ve zorlanma miktarının fazla olması (Kesim 3.3.1) nedeniyle, $I-V$ karakteristiğindeki eğimin daha dik olduğu düşünülmektedir.

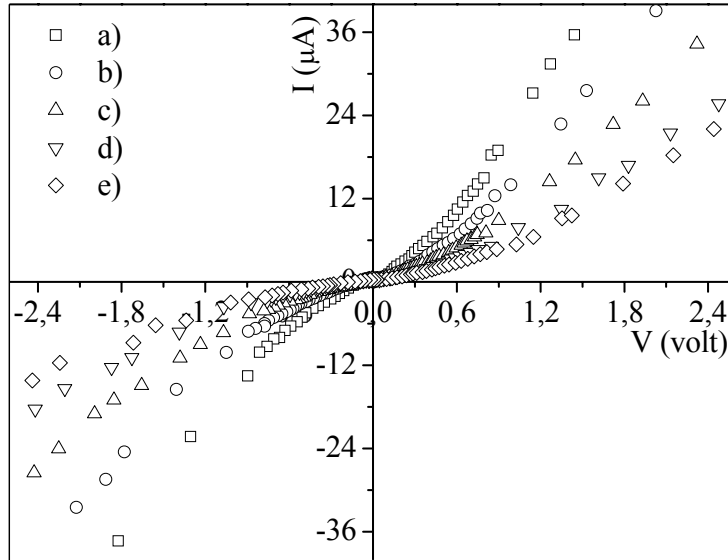


Şekil 56. (a) 300 K ve (b) 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak yapılan Cu/CdS Schottky diyot yapısının $I-V$ karakteristiği

Şekil 57 ve Şekil 58, sırasıyla 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen CdS ince filmleri kullanılarak hazırlanan diyotların değişik sıcaklıklarda ölçülen akım-voltaj karakteristikleri gösterildi.

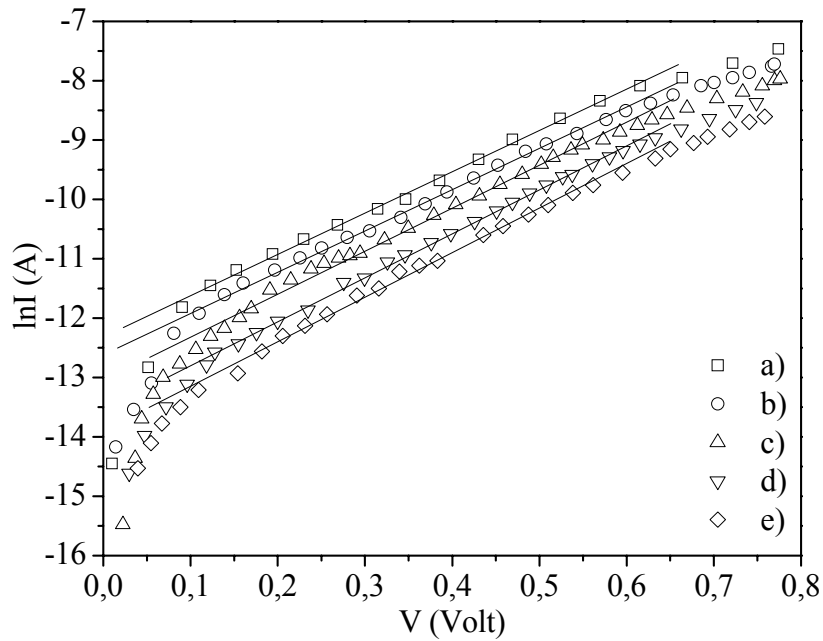


Şekil 57. 300 K altlık sıcaklığında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak hazırlanan Cu/CdS Schottky diyot için (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K'de ölçülen I - V karakteristiği

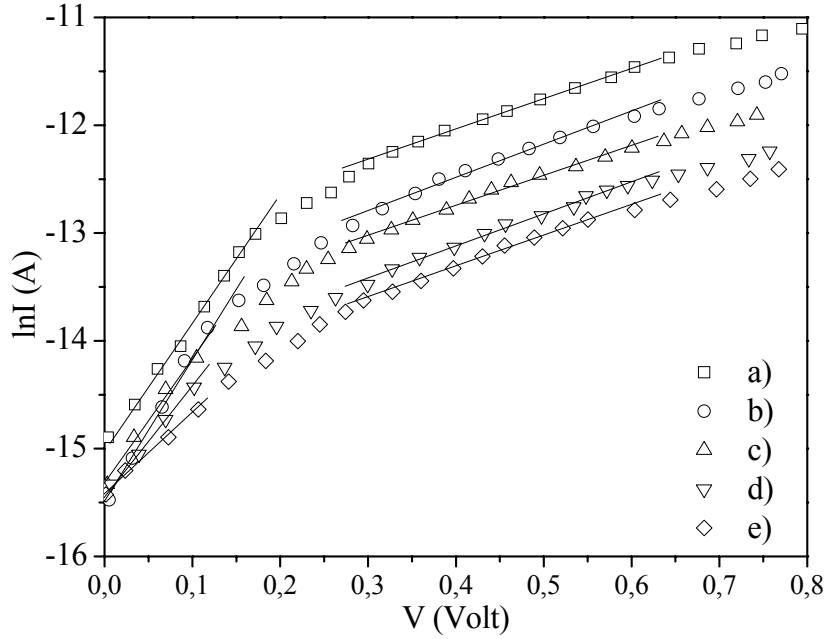


Şekil 58. 200 K altlık sıcaklığında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak hazırlanan Cu/CdS Schottky diyot için (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K'de ölçülen I - V karakteristiği

Şekil 59 ve Şekil 60, sırasıyla 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen CdS ince filmleri kullanılarak hazırlanan diyotların $\ln I-V$ grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklerin doğrusal kısımlarından faydalanılarak ideallik çarpanı (n) ve düşey eksen kestiği noktadan da doygunluk akımı (I_s) belirlendi. Elde edilen bu veriler ve denklem (38) kullanılarak diyotların engel yüksekliği hesaplandı. 300 K altlık sıcaklığında üretilen CdS ince filmi kullanılarak hazırlanan diyotun $\ln I-V$ grafiğinde net bir şekilde bir tane doğrusal bölge (0,1 - 0,6 V arası) görülürken; 200 K altlık sıcaklığında üretilen CdS örneğinden hazırlanan diyot için iki ayrı doğrusal bölge (1. bölge: 0,0 - 0,2 V arası, 2. bölge: 0,3 - 0,6 V arası) görüldü.



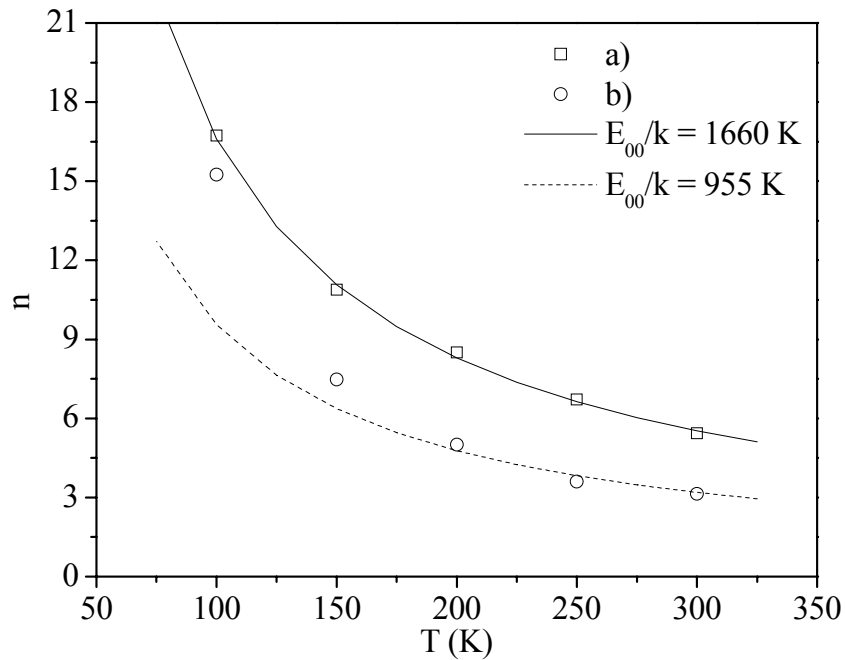
Şekil 59. 300 K altlık sıcaklığında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak hazırlanan Cu/CdS Schottky diyot için (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K'de $\ln I-V$ grafiği



Şekil 60. 200 K altlık sıcaklığında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak hazırlanan Cu/CdS Schottky diyot için (a) 300 K, (b) 250 K, (c) 200 K, (d) 150 K ve (e) 100 K'de $\ln I-V$ grafiği

Şekil 61'de her iki altlık sıcaklığı için diyotların birinci bölge için hesaplanan ideallik çarpanlarının sıcaklığa göre değişimi gösterildi. 300 K altlık sıcaklığında üretilen CdS ince filmi kullanılarak hazırlanan diyotun ideallik çarpanının altlık sıcaklığının azalması ile 5,4'ten 16,7'e arttığı görüldü. İdeallik çarpanının 1'den çok büyük olması baskın iletim mekanizmasının termoiyonik emisyonla farklı olduğunu göstermektedir. Genellikle bu kadar yüksek ideallik çarpanı yoğun katkılı Schottky diyotlarda gözlenir ve baskın iletim mekanizmasının tünelleme olduğunu gösterir (Tansley ve Owen, 1976; Schroder, 1990). Tünelleme mekanizması için geçerli olan denklem (40) kullanılarak hesaplanan teorik eğri Şekil 61'de sürekli çizgi ile gösterildi. Teorik eğri ile deneysel verilerin iyi bir uyum içinde olduğu görüldü. Bu teorik eğri için E_{00} tünelleme enerjisinin 143 meV olduğu belirlendi. Bu enerji değerinin kT 'den büyük olması nedeniyle, Kesim 2.10.1'de belirtildiği üzere, iletim mekanizmasında tünellemenin büyük katkısı olduğunu göstermektedir. Kesim 3.3.3'te anlatıldığı gibi, oda sıcaklığında üretilen CdS ince film örneğinin düşük sıcaklıkta üretilen örneklerle göre yüksek taşıyıcı yoğunluğuna ($\sim 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) sahip olması, oda sıcaklığında üretilen CdS ince film örnekleri kullanılarak hazırlanan diyotta tünelleme türü iletim mekanizmasının baskın olduğu sonucunu doğrulamaktadır.

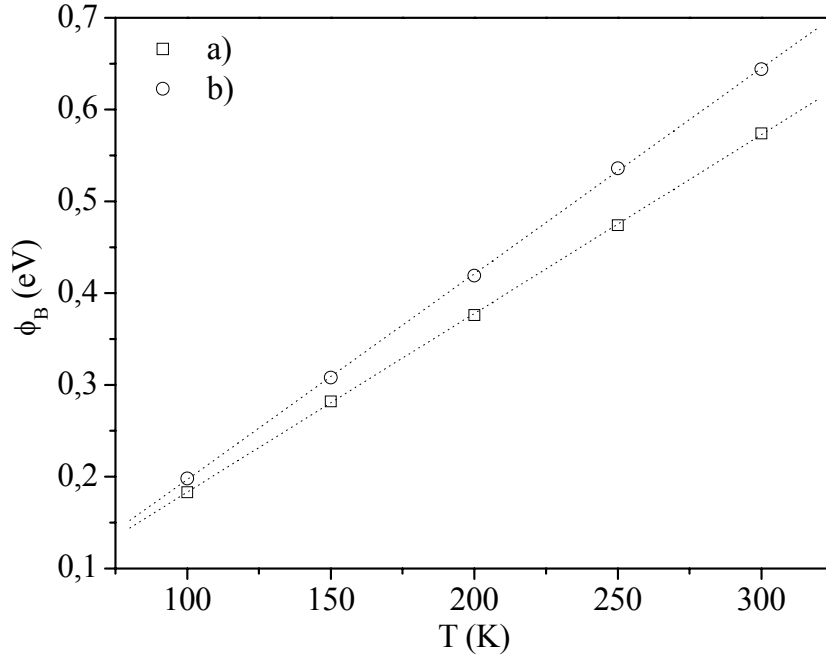
200 K altlık sıcaklığında üretilen CdS için ise iki farklı bölge kullanılarak ideallik çarpanları hesaplandı. Birinci bölge için ideallik çarpanının sıcaklığın azalması ile 3,1'den 15,3'e arttığı görüldü. Bu değerler baskın iletim mekanizmasının termiyonik emisyonundan farklı olduğunu göstermektedir. Birinci bölge için denklem (40) kullanılarak hesaplanan teorik eğrinin, 300 – 200 K sıcaklık aralığında deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğu ve 200 K'nin altındaki sıcaklıklarda ise uyumun bozulduğu gözlemlendi. Bu sonuca göre yaklaşık olarak 200 K civarında diyotun baskın iletim mekanizmasının değiştiği söylenebilir (Fahrenbruch ve Bube, 1983). Bununla birlikte, yeniden-birleşim mekanizması genellikle az katkılı ve düşük taşıyıcı ömürlü malzemelerde, düşük sıcaklıklarda ve düşük voltaj değerlerinde baskın olduğu için, 200 K civarındaki bu davranışın, iletme rekombinasyon katkısının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İkinci bölge için hesaplanan ideallik çarpanının sıcaklığın azalması ile 14,3'ten 44,3 eV'a arttığı belirlendi. İdeallik çarpanının bu kadar yüksek olduğu durumlarda genellikle iletim sıçrama (hopping) mekanizması ile açıklanır (Mandal vd., 1997).



Şekil 61. (a) 300 K ve (b) 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen CdS örnekleri kullanılarak hazırlanan diyotların ideallik çarpanlarının sıcaklığa göre değişimi

Şekil 62’de 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen CdS kullanılarak hazırlanan diyotların 1. bölge için hesaplanan engel yüksekliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimleri gösterildi. 300 K altlık sıcaklığında üretilen CdS örneği kullanılarak hazırlanan diyotun engel yüksekliğinin sıcaklık azaldıkça 0,57 eV’tan 0,18 eV’a azaldığı belirlendi. Oda sıcaklığında üretilen CdS diyotu için elde edilen 0,57 eV’luk engel yüksekliği değeri, Lepley ve arkadaşlarının CdS ince film örneği ile hazırladıkları Cu/CdS Schottky diyotunun 0,55 eV olan engel yüksekliği değerine yakın olduğu görüldü (Lepley vd., 1979). Bununla birlikte, tek kristal CdS kullanılarak hazırlanan Cu/CdS Schottky diyotunun engel yüksekliğinin, CdS kristalinin yüzeyini hazırlama şartlarına bağlı olarak 0,36 eV ile 0,80 eV arasında değiştiği bilinmektedir (Fabricus, 1962; Goodman, 1964; Forsyth vd., 1989). Metal–yarıiletken temasında, yarıiletkende yüzey durumları var ise engel yüksekliğinin arttığı bilinmektedir (Goodman, 1963; Cowley ve Sze, 1965). CdS ince film örnekleri polikristal yapıya sahip oldukları için tane sınırlarından kaynaklanan yüzey durumlarına sahiptir. Bu yüzey durumları ise engel yüksekliğinde artışa neden olmaktadır.

200 K altlık sıcaklığında üretilen CdS örneği kullanılarak hazırlanan diyotun engel yüksekliğinin birinci bölgede 0,64 eV’tan 0,20 eV’a, ikinci bölgede ise 0,59 eV’tan 0,19 eV’a azaldığı görüldü. 200 K altlık sıcaklığında üretilen CdS kullanılarak hazırlanan diyotun engel yüksekliğinin, her iki bölge için, 300 K altlık sıcaklığında üretilen CdS kullanılarak hazırlanan diyotun engel yüksekliğine göre yüksek olduğu tespit edildi. Kesim 3.3.1 de anlatıldığı gibi, düşük altlık sıcaklığında üretilen CdS örneklerinin 300 K altlık sıcaklığında üretilen örneğe göre daha küçük parçacık boyutuna sahip olması, tane sınırlarının ve dolayısıyla yüzey durumlarının daha fazla olmasına neden olmaktadır. Bu durum ise engel yüksekliğini arttırmaktadır.



Şekil 62. (a) 300 K ve (b) 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen CdS örnekleri kullanılarak hazırlanan diyotların engel yüksekliğinin sıcaklığa göre değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, güneş pillerinde optik pencere katmanı olarak kullanılan CdS ince filmlerinin bazı yapısal, elektriksel ve optik özelliklerine ve Cu/CdS/SnO₂ Schottky diyot yapısına düşük altlık sıcaklığının etkisi incelendi.

Elde edilen bu filmlerde hekzagonal yapıya ait olan (100), (002) ve (004) yansıma düzlemleri görüldü. Tüm örneklerde en şiddetli pikin (002) yansıma düzlemine ait olduğu belirlendi. Bununla birlikte soğuk altlıklar üzerinde üretilen örneklerde hekzagonal fazın, oda sıcaklığında üretilen örneğe göre daha baskın olduğu görüldü. Soğuk altlıklar üzerinde üretilen örneklerin (~1,6 µm) oda sıcaklığında üretilen örneğe (~1,0 µm) göre daha kalın olmalarına rağmen parçacık boyutunun (~34,5 nm) oda sıcaklığında üretilen örneğin parçacık boyutuna göre (~38,2 nm) göre yaklaşık 4 nm daha küçük olduğu görüldü.

Altlık sıcaklığının azalmasıyla örneklerin *c* örgü parametrelerinin 6,662 Å'dan 6,711 Å'a artarak toz CdS'in *c* örgü parametresi değerine (6,720 Å) yaklaştığı tespit edildi. Ayrıca yasak enerji aralığının 2,40 eV'tan 2,42 eV'a artarak CdS'in külçe yasak enerji aralığı değerine (2,42 eV) yaklaştığı belirlendi.

Örneklerde taşıyıcı yoğunluğunun altlık sıcaklığından önemli ölçüde etkilendiği ve oda sıcaklığında üretilen örneğin yaklaşık 100 kat daha yüksek taşıyıcı yoğunluğuna (~ 5×10¹⁷ cm⁻³) sahip olduğu görüldü. Buna bağlı olarak oda sıcaklığında üretilen örneklerde yüksek sıcaklıklarda (250 - 300 K) tünelleme türü iletim mekanizması baskın ($E_a^1 = 57,6$ meV) iken düşük altlık sıcaklığında üretilen örneklerde termiyonik emisyon türü iletim mekanizmasının baskın ($E_a^1 = 116,0 - 121,4$ meV) olduğu belirlendi. 200 K'nin altındaki bölgede ise tüm örneklerde sıçrama türü iletim mekanizmasının baskın ($E_a^2 = \sim 6,0$ meV) olduğu tespit edildi.

200 K altlık sıcaklığında üretilen CdS örneği kullanılarak hazırlanan Schottky diyotun engel yüksekliğinin (0,64 eV), 300 K altlık sıcaklığında üretilen CdS örneği kullanılarak hazırlanan Schottky diyotun engel yüksekliğine (0,57 eV) göre daha fazla olduğu görüldü. Her iki diyotun ideallik çarpanlarının 1'den büyük olduğu (300 K için 5,4; 200 K için 3,1) belirlendi. Bu diyotlar için genel olarak tünelleme türü iletim mekanizmasının baskın olduğu görüldü.

Yapısal, elektriksel ve optik özellikler incelendiğinde tavlamanın oda sıcaklığında üretilen CdS ince film örneğini daha çok etkilediği tespit edildi.

5. ÖNERİLER

Altlık sıcaklığının, CdS ince film örneklerinde Cd/S oranına etkisini incelemek için gerekli ölçümlerin yapılmasına ihtiyaç vardır.

Altlık sıcaklığının parçacık boyutuna etkisi SEM görüntüleri ile net olarak belirlenemediği için uygun şartlarda yeni örnekler hazırlanarak TEM görüntülerinin alınması gerekmektedir.

Altlık sıcaklığının CdS ince film örneklerinin yasak enerji aralığında bulunan kusur seviyelerine etkisi incelenmelidir.

Düşük altlık sıcaklıklarında üretilen CdS ince film örnekleriyle güneş pilleri hazırlanıp altlık sıcaklığının, CdS ince film örneğinin optik pencere katmanı olarak kullanıldığı güneş pillerine etkisi incelenmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Aboul-Enein, S., Badawi, M.H., Ghali, M. and Hassan, G., 1998. Preparation and Properties of CdS Thin Films Prepared on Cold Substrate as a Window Layer for Solar Cells, Renewable Energy 14, 113-118.
- Al Kuhaimi, S.A., 1998. Influence of Preparation Tehcnique on Structural, Optical and Electrical Properties Polycrystalline CdS Films, Vacuum, 51, 349-355.
- Ashour, A., ElKadry, N. ve Mahmoud, S.A., 1995. On The Electrical and Optical Properties of CdS Films Thermally Deposited by A Modified Source, Thin Solid Films, 269, 117-120.
- Bacaksız, E., 2002. CdS İnce Filmlerinin Farklı Yöntemlerle Büyütülmesi, Yapısal, Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Trabzon/Türkiye.
- Belyaev, A.P., Rubets, V.P. and Kalinkin, I.P., 2003. “Soliton Heteroepitaxy” in The Formation of Epitaxial Films of II-VI Compounds Under Highly Noneequilibrium Conditions, Mater. Phys. Mech., 6, 58-62.
- Boichott, S.J. and Wilmant, H., 1980. The Structure and Growth of Thin Films of CdS, CdSe and CdTe Condensed in Vacuum on To Polished Stainless Steel Substrates at Room Temperature, J. Phys. D: Appl. Phys., 13, 45-51.
- Bouchenaki, C., Ullrich, B. and Zielenger, J.P., 1991. Preparation Characterization and Bistable Photoconductivition Properties of Thin CdS Layers, J. Opt. Soc. Am., B8, 691-700.
- Burton, L.C. and Hench, T.L., 1976. Cd_{1-x}Zn_xS Films for Use in Heterojunction Solar-Cells, Appl. Phys. Lett., 29, 612.
- Cardona, M., Weinstein, M. ve Wolff, G.A., 1965. Ultraviolet Reflection Spectrum of Cubic CdS, Physical Review, 140, A633-A637.
- Chandramohan, S., Sathyamoorthy, R., Sudhagar, P., Kanjilal, D., Kabiraj, D. ve Asokan, K., 2007. Swift Heavy Ion Beam Irradiation Induced Modifications in Structural, Morphological and Optical Properties of CdS Thin Films, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 254, 236–242.
- Chopra, K.L., 1969. Thin Film Phenomena, McGraw-Hill, New York.
- Chu, T.L. ve Chu, S.S., 1993. Recent Progress in Thin-Film Cadmium Telluride Solar Cells, Prog. Photovoltaics: Res. Appl. 1, 31–42.
- Cody, G.D., Tiedje, T., Abeles, B., Brooks, B. ve Goldstein, Y., 1981. Disorder and The Optical-Absorption Edge of Hydrogenated Amorphous-Silicon, Physical Review Letters, 47, 1480-1483.
- Coutts, T.J., Wu, X., Mulligan, W.P. ve Webb, J.M., 1996. High-Performance, Transparent Conducting Oxides Based on Cadmium Stannate, J. Electron. Mater., 25, 935-943.

- Cowley, A.M. ve Sze, S.M., 1965. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems, J. Appl. Phys., 36, 3212.
- Crowell, C.R. ve Rideout, V.L., 1969. Normalized Thermionic-Field (T-F) Emission in Metal-Semiconductor (Schottky) Barriers, Solid-State Electronics, 12, 89.
- 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.
- Duchemin, S., Bougnot, J. and Kaka, M., 1986. Crystallographic and Morphological Characterization of Sprayed CdZnS Thin Films, Thin Solid Films, 136, 289-298.
- Ezumi, H. ve Keitoku, S., 1993. Influence of Pulse Width on CdS Film Prepared by YAG Laser Ablation, Jpn. J. Appl. Phys., 32, 1783-1786.
- Fabricius, E.D., 1962. Photoeffect in Au-CdS and Cu-CdS Photovoltaic Cells, J. Appl. Phys., 33, 1597.
- Fahrenbruch, A.L. and Bube, R.H., 1983. Fundamental of Solar Cells and Photovoltaic Solar Energy Conversion, Academic Press, California.
- Ferekides, C.S., Marinskiy, D., Viswanathan, V., Tetali, B., Palekis, V., Selvaraj, P. ve Morel, D.L., 2000. High Efficiency CSS CdTe Solar Cells, Thin Solid Films, 361-362, 520-526.
- Fernández, A., Reddy, E.P., Rojas, T.C. ve Sánchez-López, J.C., 1999. Application of The Gas Phase Condensation to The Preparation of Nanoparticles, Vacuum, 52, 83-88.
- Forsyth, N.M., Dharmadasa, I.M., Sobiesierski, Z. and Williams, R.H., 1989. Schottky Barriers to CdS and Their Importance in Schottky Barrier Theories, Semicond. Sci. Technol. 4, 57-59.
- Freund, L.B. ve Suresh, S., 2003. Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution, Cambridge University Press.
- Fumitaka Goto, Katsunori Shirai ve Masaya Ichimura, 1998. Defect Reduction in Electrochemically Deposited CdS Thin Films by Annealing in O₂, Solar Energy Materials & Solar Cells, 50, 147-153.
- Garcia-Cuenca, M.V., Morenza, J.L. ve Codina, J.M., 1987b. Electrical Conduction in Polycrystalline CdS Films: I. Theory, J. Phys. D: Appl. Phys. 20, 951-957.
- Garcia-Cuenca, M.V., Morenza, J.L., Bertran, E. ve Lousa, A., 1987a. Electrical Conduction in Polycrystalline CdS Films: II. Comparison of Theory and Experiment, J. Phys. D: Appl. Phys., 20, 958-962.
- Goodman, A.M., 1963. Metal-Semiconductor Barrier Height Measurement by the Differential Capacitance Method-One Carrier System, J. Appl. Phys., 34, 329.
- Goodman, A.M., 1964. Evaporated Metallic Contacts to Conducting Cadmium Sulfide Single Crystals, J. Appl. Phys., 35, 573.
- Grove, A.S., 1967. Physics and Technology of Semiconductor Devices, John Wiley and Sons, New York.
- Günel, İ. ve Parlak, M., 1997. Current Transport Mechanism in Low Resistive CdS Thin Films, Journal of Material Science: Materials in Electronics, 8, 9-13.

- Hernández-Contreras, H., Mejía-García, C. ve Contreras-Puente, G., 2004. Optical Study of The Influence of CdCl₂ in Large Area Thin Films Grown by RF-Sputtering, Thin Solid Films, 451–452, 203–206.
- Herrero, J., Gutiérrez, M.T., Guillén, C., Doña, J.M., Martínez, M.A., Chaparro, A.M. ve Bayón, R., 2000. Photovoltaic Windows by Chemical Bath Deposition, Thin Solid Films, 361-362, 28-33.
- Jae-Hyeong Lee, 2005. Comparison of CdS Films Deposited by Different Techniques: Effects on CdTe Solar Cell, Applied Surface Science, 252, 1398-1403.
- Jae-Hyeong Lee, Jun-Sin Yi, Kea-Joon Yang, Joon-Hoon Park ve Ryum-Duk Oh, 2003. Electrical and Optical Properties of Boron Doped CdS Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition, Thin Solid Films, 431–432, 344–348.
- Jinesh, K.B., Wilson, K.C., Thampi, S.V., Kartha, S.C., Vijayakumar, K.P., Abe, T. ve Kashiwaba, Y., 2003. How Quantum Confinement Comes in Chemically Deposited CdS?—A Detailed XPS Investigation, Physica E, 19, 303 – 308.
- Joel Pantoja Enríquez ve Xavier Mathew, 2003. Influence of the Thickness on Structural, Optical and Electrical Properties of Chemical Bath Deposited CdS Thin Films, Solar Energy Materials & Solar Cells, 76, 313–322.
- Kwok, H.S., Zheng, J.P., Witanachchi, S., Mattoks, P., Shi, L., Ying, Q.Y., Wang, X.W. and Shaw, D.T., 1988. Growth of Highly Oriented CdS Thin Films by Laser-Evaporation Deposition, Appl. Phys. Lett., 52, 1095-1097.
- Lee, Y.H., Lee, W.J., Kwona, Y.S., Yeom, G.Y. ve Yoon, J.K., 1999. Effects of CdS Substrates on The Physical Properties of Polycrystalline CdTe Films, Thin Solid Films, 341, 172-175.
- Lejmi, N. ve Savadogo, O., 2001. The Effect of Heteropolyacids and Isopolyacids on the Properties of Chemically Bath Deposited CdS Thin Films, Solar Energy Materials & Solar Cells, 70, 71-83.
- Lepley, B., Nguyen, P.H., Boutrit, C. and Ravelet, S., 1979. Copper Diffusion and Photovoltaic Mechanisms at Cu-CdS Contact, J. Phys. D: Appl. Phys., 12, 1917-1928.
- Lozada-Morales, R., Rubin-Falfan, M., Zelaya-Angel, O. and Ramirez-Bon, R., 1998. Characterization of Cubic CdS Thin Films Annealed in Vacuum, J. Phys. Chem. Solids, 59, 1393-1398.
- Lozada-Morales, R., Zelaya-Angel, O. and Torres, G., 2001. Photoluminescence in Cubic and Hexagonal CdS Films, Applied Surface Science, 175-176, 562-566.
- Mandal, S.K., Maity, A.B., Dutta, J., Pal, R., Chaundhuri, S. ve Pal, A.K., 1997. Au/CdS Schottky Diode Fabricated with Nanocrystalline CdS Layer, Phys. Stat. Sol. (a), 163, 433-443.
- McCandess, B.E. ve Hegedus, S.S., 1991. Influence of CdS Window Layer on Thin-Film CdS/CdTe Solar Cell Performance, In: Proceedings of 22nd IEEE PVSC, 967–972.
- Mott, N.F. ve Davis, E.A., 1979. *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*, Clarendon, Oxford Press.

- Moutinho, H.R., Albin, D., Yan, Y., Dhare, R.G., Li, X., Perkins, C., Jiang, C.S., To, B. ve Al-Jassim, M., 2003. Deposition and Properties of CBD and CSS CdS Thin Films for Solar Cell Application, Thin Solid Films, 436, 175–180.
- Nanda, K.K., Sarangi, S.N. and Sahu, S.N., 1998. CdS Nanocrystalline Films: Composition, Surface, Crystalline Size, Structural and Optical Absorption Studies, Nanostructured Materials, 10, 1401-1410.
- Nima Taghavinia, Azam Irajizad, Mohammad Mahdavi, S. ve Reza-esmaili, M., 2005. Photo-induced CdS Nanoparticles Growth, Physica E, 30, 114–119.
- Ortuño-López, M.B., Sotelo-Lerma, M., Mendoza-Galván, A. ve Ramírez-Bon, R., 2004. Chemically Deposited CdS Films in an Ammonia-Free Cadmium-Sodium-Citrate System, Thin Solid Films, 457, 278–284.
- Oumous, H. ve Hadiri, H., 2001. Optical and Electrical Properties of Annealed CdS Thin Films Obtained from A Chemical Solution, Thin Solid Films, 386, 87-90.
- Padovani, F.A. ve Stratton, R., 1966. Field and Thermionic-Field Emission in Schottky Barriers, Solid-State Electronics, 9, 695.
- Pal, U., Silva-González, R., Martínez-Montes, G., Gracia-Jiménez, M., Vidal, M.A. ve Torres, S., 1997. Optical Characterization Vacuum Evaporated Cadmium Sulfide Films, Thin Solid Films, 305, 345-350.
- Pande, P.C., Claybourn, M., Russel, G.J., Brinkman, A.W. and Woods, J., 1985. Deep Levels in Single Crystals of $Zn_xCd_{1-x}S$, Journal of Crystal Growth, 72, 174-178.
- Pankove, J.I., 1971. Optical Processes in Semiconductors, Dover Publications Inc., New York.
- Patil, V.B., Shahane, G.S., Sutrave, D.S., Raut, B.T. ve Deshmukh, L.P., 2004. Photovoltaic Properties of n-CdS_{1-x}Te_x Thin Film/Polysulphide Photoelectrochemical Solar Cells Prepared by Chemical Bath Deposition, Thin Solid Films, 446, 1–5.
- Pattabi, M. ve Uchil, J., 2000. Synthesis of Cadmium Sulphide Nanoparticles, Solar Energy Materials & Solar Cells, 63, 309-314.
- Potlog, T., Ghimpu, L., Gashin, P., Pudov, A., Nagle, T. ve Sites, J., 2003. Influence of Annealing in Different Chlorides on The Photovoltaic Parameters of CdS/CdTe Solar Cells, Solar Energy Materials & Solar Cells, 80, 327–334.
- Quevedo-Lopez, M.A., Ramirez-Bonb, R., R.A. Orozco-Teran, R.A., Mendoza-Gonzalez, O. ve Zelaya-Angel, O., 1999. Effect of a CdS Interlayer in Thermochromism and Photochromism of MoO₃ Thin Films, Thin Solid Films, 343-344, 202-205.
- Rakhshani, A.E. ve Al-Azab, A.S., 2000. Characterization of CdS Films Prepared by Chemical-Bath Deposition, J. Phys.: Condens. Matter, 12, 8745-8755.
- Ray, B., 1969. II-VI Compounds, Printed in Great Britain by Neil & Co., Ltd. of Edinburgh.
- Redwan, M. A., Soliman, L.I., Aly, E.H., El-Shazely, A.A. ve Zayed, H.A., 2003. Study of Electrical and Optical Properties of Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films, Journal of Materials Science, 38, 3449 – 3454.

- Romeo, N., Bosio, A., Canevari, V. ve Podestà, A., 2004. Recent Progress on CdTe/CdS Thin Film Solar Cells, Solar Energy, 77, 795–801.
- Romeo, N., Bosio, A., Canevari, V., Terheggen, M. ve Vaillant Roca, L., 2003. Comparison of Different Conducting Oxides as Substrates for CdS/CdTe Thin Films Solar Cells, Thin Solid Films, 431–432, 364–368.
- Romeo, N., Bosio, A., Canevari, V. ve Podestà, A., 2004. Recent Progress on CdTe/CdS Thin Film Solar Cells, Solar Energy, 77, 795–801.
- Schroder, D.K., 1990. Semiconductor Material and Device Characterization, John Wiley and Sons, New York.
- Senthil, K., Mangalaraj, D. ve Narayandass, Sa.K., 2001a. Structural and Optical Properties of CdS Thin Films, Applied Surface Science, 169-170, 476-479.
- Senthil, K., Mangalaraj, D., Narayandass, Sa.K., Kesavamoorthy, R. ve Reddy, G.L.N., 2001b. Raman Scattering and XRD Analysis in Argon Ion Implanted CdS Thin Films Prepared by Vacuum Evaporation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 173, 475-482.
- Seto, J.Y., 1975. The Electrical Properties of Polycrystalline Silicon Film, J. Appl. Phys., 46, 5247-5254.
- Simmons, J.G., 1963. Generalized Formula for Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film, J. Appl. Phys., 34, 1973-1803.
- Sung Hyun Lee, Akhlesh Gupta, ShanLi Wang, Alvin D. Compaan ve Brian E. McCandless, 2005. Sputtering Cd_{1-x}Zn_xTe Films For Top Junctions in Tandem Solar Cells, Solar Energy Materials & Solar Cells, 86, 551–563.
- Swanepoel, R., 1983. Determination of The Thickness and Optical Constants of Amorphous Silicon, J. Phps. E: Sci. Instrum., 16, 1214-1222.
- Tansley, T.L. and Owen, S.J.T., 1976. Electron Tunneling Modified Ideality Factors at Heterocontacts, IEEE Transactions on Electron Devices, ED-23, 10.
- Tomakin, M., 2003. Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle Elde Edilen Cd_{1-x}Zn_xS İnce Filmlerinin Bazı Yapısal, Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Trabzon/Türkiye.
- Ullrich, B., Sakai, H., Dushkina, N.M., Ezumi, H., Keitoku, S. and Kobayashi, T., 1998. The Influence of the Laser Fluence on the Transmission Features of Thin CdS Films Formed by Laser Ablation, Microelectronic Engineering, 43-44, 695-700.
- Wu, X., Mulligan, W.P. ve Coutts, T.J., 1996. Recent Developments in RF Sputtered Cadmium Stannate Films, Thin Solid Films, 286, 274-276.
- Xuanzhi Wu, 2004. High-Efficiency Polycrystalline CdTe Thin-Film Solar Cells, Solar Energy, 77, 803–814.
- Zelaya-Angel, O., Alvarado-Gil, J.J., Lozada-Morales, R., Vargas, H. ve Ferreira da Silva, A., 1994. Band-Gap Shift in CdS Semiconductor by Photoacoustic Spectroscopy: Evidence of a Cubic to Hexagonal Lattice Transition, Appl. Phys. Lett., 64, 291.

- Zhao, G., Charlson, E.M., Charlson, E.J., Stacy, T., Meese, J.M., Popovici, G. ve Prelas M., 1993. Effect of Mechanical-Stress on Current-Voltage Characteristics of Thin-Film Polycrystalline Diamond Schottky Diodes, Journal of Applied Physics, 73, 1832-1837.
- Zhibing He, Gaoling Zhao, Wenjian Weng, Piyi Du, Ge Shen ve Gaorong Han, 2005. The Difference Between The Transverse and in-Plane Resistivity of Vacuum Evaporated Cadmium Sulfide (CdS) Thin Films, Vacuum, 79, 14–18.

ÖZGEÇMİŞ

21.06.1978 tarihinde Ordu ili Merkez ilçesine bağlı Günören köyünde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ordu'da tamamladı. 1996 yılında 19 Mayıs Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2000 yılında bölüm birincisi olarak lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl 19 Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2000 – 2001 güz yarıyılında 19 Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans eğitimine devam ettikten sonra K.T.Ü. Rize Fen-Edebiyat Fakültesine Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2000 – 2001 bahar yarıyılından itibaren K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2003 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı ve aynı yıl Doktora eğitimine başladı. Halen Rize Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuğu olan Murat TOMAKİN İngilizce bilmektedir.