

**CdS/CuO HETEROEKLEM YAPININ
ELDE EDİLMESİ VE
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Hilal RÜZGAR

Eskişehir, 2017

**CdS/CuO HETEROEKLEM YAPININ ELDE EDİLMESİ VE FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Hilal RÜZGAR

DOKTORA TEZİ

**Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ahmet Şenol AYBEK**

**Eskişehir
Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mart, 2017**

Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1307F291 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Hilal RÜZGAR'ın "CdS/CuO Heteroeklem Yapının Elde Edilmesi ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı tezi 31/03/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı-Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. Ahmet Şenol AYBEK	.....
Üye	: Prof. Dr. İdris AKYÜZ	.....
Üye	: Prof. Dr. Vildan BİLGİN	.....
Üye	: Doç. Dr. Evren TURAN	.....
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin BERBER	.....

.....
Enstitü Müdürü

ÖZET

CdS/CuO HETEROEKLEM YAPININ ELDE EDİLMESİ VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hilal RÜZGAR

Fizik Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart, 2017

Danışman: Doç. Dr. Ahmet Şenol AYBEK

Bu çalışmada CdS ve CuO yarıiletken filmleri mikroskop ve flor katkılı kalay oksit kaplı cam tabanlar üzerine kimyasal banyo depolama yöntemi ile elde edilmiştir. X-ışını kırınım desenlerinden elde edilen CdS filmlerinin yüzey merkezli kübik ve CuO filmlerinin basit taban merkezli monoklinik yapıda oldukları belirlenmiş, örgü sabitleri, kristal tanecik boyutları, kristal yapıdaki sıkışmalar, gerilmeler ve dislokasyon yoğunlukları hesaplanmıştır. Filmlerin yasak enerji aralıklarının direkt bant geçişli oldukları belirlenmiş, cam ve FTO taban üzerine elde edilen CdS filmlerinin yasak enerji aralıkları sırasıyla 2,39 ve 2,35 eV, CuO filmleri için sırasıyla 1,61 ve 1,26 eV olduğu hesaplanmıştır. Filmlerin fotoluminesans ölçümlerinden tuzaklar tanımlanmıştır. Filmlerin yüzey morfolojisi analizleri atomik kuvvet mikroskobu ve alan emisyon taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. KBD yöntemiyle FTO taban üzerine p-CuO/n-CdS yapısı elde edilerek üzerine altın kontaklar buharlaştırılmıştır. Filmlerin elektriksel özelliklerinden tuzaklı yapıya sahip oldukları ve tuzak yoğunluklarının CdS ve CuO filmleri için sırasıyla $1,04 \times 10^{21}$ ve $3,18 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, tuzak enerji seviyelerinin CdS için 0,67 eV iletim bandının altında ve CuO filmi için 0,31 eV valans bandının üzerinde olduğu belirlenmiştir. *C-V* ölçümlerinde V_{bi} değeri CdS için 0,43 V ve CuO filmi için 0,68 V olarak hesaplanmıştır. *G-f* ölçümlerinden CdS filmindeki tuzakların yasak enerji aralığında düzgün olmayan dağılım gösterdikleri belirlenmiştir. FTO/p-CuO/n-CdS/Au yapısının *I-V* ölçümlerinden ideal diyot faktörünün 3,53 olduğu hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler: CdS, CuO, KBD, Tuzak yoğunluğu, İdeal diyot faktörü.

ABSTRACT

OBTAINING OF CdS/CuO HETEROJUNCTION STRUCTURE AND INVESTIGATION OF PHYSICAL PROPERTIES

Hilal RÜZGAR

Department of Physics

Anadolu University, Graduate School of Sciences, March, 2017

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet Şenol AYBEK

CdS and CuO films have been grown onto microscope and fluorine doped tin oxide coated glass substrates using the chemical bath deposition method. Crystal structures of the CdS and CuO have been determined face-centered cubic and simple base-centered monoclinic structure respectively, and lattice constants, crystallite sizes, strains and dislocation densities calculated by xrd diffraction patterns. The forbidden energy gaps of films have been estimated. The films have exhibited direct band transition and the optical band gap values of the CdS are calculated 2.39 and 2.35eV for glass and FTO, respectively. Also, the band gap values of the CuO films are 1.61 and 1.26eV for glass and FTO, respectively. Traps are defined from the photoluminescence measurements of the films. The surface morphology analyses of the films have been investigated by atomic force microscopy and field emission scanning electron microscopy. The p-CuO/n-CdS structure has been obtained on the FTO by CBD method and the gold contacts were evaporated as top electrode on the n-CdS. Trap density of CdS and CuO have been found to be 1.04×10^{21} and $3.18 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ respectively, trap energy levels is 0.61eV below conduction band for CdS and 0.31eV above valance band for CuO. From the *C-V* measurements, the V_{bi} value was calculated to be 0.43V for CdS and 0.68V for CuO. It has been determined that the traps in the CdS from the *G-f* measurements show an non-uniformly distribution inside the forbidden energy gap. The diode ideality factor of the FTO/p-CuO/n-CdS/Au structure has been estimated 3.53 from the *I-V* measurements.

Keywords: CdS, CuO, CBD, Trap density, Ideality factor.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesi sürecinde bilimsel tecrübelerini benimle paylaşan, desteğini ve yol göstericiliğini benden esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Ahmet Şenol AYBEK'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve birikimleriyle beni yönlendiren yardım ve desteklerini gördüğüm değerli hocalarım Doç. Dr. Evren TURAN, Doç. Dr. Metin KUL ve Yrd. Doç. Dr. Hüseyin BERBER'e teşekkürlerimi sunarım.

AFM görüntülerinin, Fotolüminesans verilerinin ve film kalınlıklarının alınmasında yardımcı olan Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim üyelerinden Prof. Dr. İdris AKYÜZ'e, Doç. Dr. Suat PAT'a, Yrd. Doç. Dr. Sema KURTARAN'a ve Soner ÖZEN'e teşekkürlerimi sunarım.

SEM görüntülerinin alınmasında yardımcı olan Uzman Züliyet ADIGÜZEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bugünlere ulaşmamı sağlayan, hayatımın her aşamasında beni yalnız bırakmayan, çalışmam sırasında sabırla yanımda duran sevgili aileme hürmetlerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Hilal RÜZGAR

Mart 2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

.....

Hilal RÜZGAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
GÖRSELLER DİZİNİ	xvi
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
1.1. Giriş	1
1.2. CdS Yarıiletken Filminin Özellikleri	2
1.3. CuO Yarıiletken Filminin Özellikleri	5
1.4. Amaç	7
2. YARIİLETKENLER	8
2.1. Giriş	8
2.2. Katılarda Enerji Bantları	10
2.3. Yarıiletkenlerin Bant Yapısı	12
2.4. Katkısız ve Katkılı Yarıiletkenler	13
2.4.1. Katkısız yarıiletkenler	13
2.4.2. Katkılı yarıiletkenler	14
2.4.2.1. n-tipi yarıiletkenler	15
2.4.2.2. p-tipi yarıiletkenler	17
2.5. Yarıiletkenlerde Fermi Enerjisi	18

3. FİLMLERİN ÜRETİMİ	24
3.1. Giriş	24
3.2. Filmlerin KBD Yöntemi ile Elde Edilmesi	24
3.3. CdS Filmlerinin KBD Yöntemi ile Elde Edilmesi	27
3.4. CuO Filmlerinin KBD Yöntemi ile Elde Edilmesi	30
3.5. CuO/CdS Filminin KBD Yöntemi ile Elde Edilmesi	32
3.6. Elde Edilen CdS ve CuO Filmlerinin Kalınlıkları	33
4. CdS ve CuO FİMLERİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ	36
4.1. Giriş	36
4.2. X-Işınları	36
4.2.1. Sürekli X-Işınları	37
4.2.2. Karakteristik X-Işınları	37
4.3. CdS Filmlerinin X-Işını Kırınım Desenleri	41
4.3.1. Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin kristal yapısı	41
4.3.2. FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminin kristal yapısı ...	44
4.4. CuO Filmlerinin X-Işını Kırınım Desenleri	46
4.4.1. Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin kristal yapısı	47
4.4.2. FTO cam taban üzerine elde edilen CuO filminin kristal yapısı ...	48
4.5. Cam/CuO/CdS ve FTO/CuO/CdS Yapılarının X-Işını Kırınım Desenleri	50
5. CdS ve CuO FİMLERİNİN OPTİK ÖZELLİKLERİ	52
5.1. Giriş	52
5.2. Işığın Yarıiletken Malzeme ile Etkileşimi	52
5.2.1. Bant Sarkmaları	53
5.3. Temel Soğurma	54
5.3.1. Direkt bant geçişi	56
5.3.2. İndirekt bant geçişi	58
5.4. Yarıiletkenlerin Yasak Enerji Aralıklarının Optik Yöntemle Belirlenmesi	59
5.5. CdS Filmlerinin Soğurma ve Geçirgenlik Spektrumları	61
5.5.1. Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin soğurma ve geçirgenlik spektrumları	61
5.5.2. FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminin soğurma ve geçirgenlik spektrumları	65

5.6. CuO Filmlerinin Soğurma ve Geçirgenlik Spektrumları	67
5.6.1. Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin soğurma ve geçirgenlik spektrumları	67
5.6.2. FTO cam taban üzerine elde edilen CuO filminin soğurma ve geçirgenlik spektrumları	70
6. CdS VE CuO FİMLERİNİN FOTOLÜMİNESANS ÖZELLİKLERİ	74
6.1. Giriş	74
6.2. CdS Filmlerinin FL Analizi	76
6.3. CuO Filmlerinin FL Analizi	78
7. CdS ve CuO FİMLERİNİN YÜZEYSEL ÖZELLİKLERİ	80
7.1. Giriş	80
7.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu	80
7.3. CdS Filmlerinin AKM Analizleri	82
7.4. CuO Filmlerinin AKM Analizleri	84
7.5. Taramalı Elektron Mikroskobu	86
7.6. CdS Filmlerinin SEM Analizleri	89
7.7. CuO Filmlerinin SEM Analizleri	90
8. CdS ve CuO FİMLERİNİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ	92
8.1. Giriş	92
8.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar	92
8.2.1. Ohmik kontaklar	95
8.2.1.1. Metal/n-tipi yarıiletken arasında oluşan ohmik kontak ...	95
8.2.1.2. Metal/p-tipi yarıiletken arasında oluşan ohmik kontak ...	96
8.2.2. SCL akım mekanizması	98
8.3. FTO/CdS ve FTO/CuO Filmlerinde Metal-Yarıiletken-Metal Yapılarının Oluşturulması	104
8.4. Sıcak Uç Metodu ile Taşıyıcı Tipinin Belirlenmesi	105
8.5. FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au Filmlerinin DC İletkenlikleri	106
8.6. FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au Filmlerinin AC İletkenlikleri	110
8.6.1. Kapasitans-voltaj ölçümleri	110
8.6.1.1. FTO/n-CdS/Au yapısının kapasitans-voltaj ölçümleri	113
8.6.1.2. FTO/p-CuO/Au yapısının kapasitans-voltaj ölçümleri	114

8.6.2. FTO/n-CdS/Au Yapısının kondüktans-frekans (<i>G-f</i>) ölçümleri ...	116
8.7. FTO/p-CuO/n-CdS/Au Heteroeklem Yapısı	117
8.8. Fotovoltaik Yapı	118
8.9. FTO/p-CuO/n-CdS/Au Eklemının Akım Gerilim Karakteristiği	119
9.TARTIŞMA ve SONUÇ	122
KAYNAKÇA	125
ÖZGEÇMİŞ	134

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Elde edilen filmlerin kalınlık değerleri.....	35
Çizelge 4.1. Cam taban üzerine üretilen CdS filminin $d_{hk\ell}$ ve a değerleri.....	42
Çizelge 4.2. Cam taban üzerine üretilen CdS filminin ε , D ve γ değerleri.....	44
Çizelge 4.3. FTO ve CdS filmine ait ICDD kart numaralarına karşılık gelen açılış değerleri.....	45
Çizelge 4.4. FTO cam taban üzerine üretilen CdS filminin $d_{hk\ell}$ ve a değerleri.....	45
Çizelge 4.5. Tabanlara göre elde edilen CdS filmlerinin a değerleri karşılaştırması .	46
Çizelge 4.6. FTO taban üzerine üretilen CdS filminin ε , D ve γ değerleri.....	46
Çizelge 4.7. Cam taban üzerine üretilen CuO filminin $d_{hk\ell}$ değerleri.....	48
Çizelge 4.8. Cam taban üzerine üretilen CuO filminin ε , D ve γ değerleri.....	48
Çizelge 4.9. FTO cam taban üzerine üretilen CuO filminin $d_{hk\ell}$ değerleri.....	49
Çizelge 4.10. FTO taban üzerine üretilen CuO filminin ε , D ve γ değerleri.....	50
Çizelge 5.1. Cam ve FTO taban üzerine üretilen CdS ve CuO filmlerinin kalınlık, E_g , E_U ve maksimum geçirgenlik değerleri.....	72
Çizelge 6.1. Cam ve FTO tabanlı CdS filmlerindeki FL tuzak enerji seviyeleri.....	77
Çizelge 7.1. Cam ve FTO taban üzerine üretilen CdS filminin R_a ve R_q değerleri.....	84
Çizelge 7.2. Cam ve FTO taban üzerine üretilen CuO filminin R_a ve R_q değerleri....	86
Çizelge 8.1. FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au yapılarının A , d , ρ ve σ değerleri...	107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. CdS kristal yapısının iki farklı kristal formu: a) hekzagonal (wurtzite) b) Kübik (zinc blende) yapısında kristalleşen CdS	3
Şekil 1.2. CuO kristal yapısının iki farklı kristal formu: a) Kübik yapısında kristalleşen Cu ₂ O b) Monoklinik yapısında kristalleşen CuO .	5
Şekil 2.1. Katılarda enerji bant diyagramı a) Metal, b) Yarı metal, c) Yarıiletken, d) Yalıtkan	10
Şekil 2.2. Bir has yarıiletkenin a) T=0 K'de, b) T>0 K'de şematik enerji bant diyagramı	12
Şekil 2.3. Silisyum kristal örgüsünün iki boyutlu şematik gösterimi	15
Şekil 2.4. İki boyutlu silisyum kristal örgüsüne katılanmış donör atomu.....	16
Şekil 2.5. a) T=0 K, b) T > 0 K'de n-tipi yarıiletkende donör enerji seviyeleri	16
Şekil 2.6. İki boyutlu silisyum kristal örgüsüne katılanmış akseptör atomu	17
Şekil 2.7. a) T=0 K, b) T > 0 K'de p-tipi yarıiletkende akseptör enerji seviyeleri	17
Şekil 2.8. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu	19
Şekil 2.9. Bir yarıiletkende $m_e^* = m_h^*$ durumunda a) iletim ve valans bantları ve b) dağılım fonksiyonu ile elektron ve hollerin durum yoğunluğu	21
Şekil 3.1. KBD yönteminin şematik sistemi	27
Şekil 3.2. FTO taban üzerine elde edilen CuO/CdS.....	32
Şekil 3.3. Filmetrics F20 interferometrik ölçüm cihazının şematik gösterimi	34
Şekil 3.4. Dalgalanma ile kırılma spektrumunun örneği	34
Şekil 4.1. Molibden hedefli x-ışınları spektrumunun şematik gösterimi	38
Şekil 4.2. X-ışınlarının kristal düzlemleri tarafından kırınımı	39
Şekil 4.3. Cam taban üzerine üretilen CdS filminin x-ışını kırınım deseni	41
Şekil 4.4. FTO ve FTO/CdS filmlerine ait x-ışını kırınım desenleri	44
Şekil 4.5. Cam taban üzerine üretilen CuO filminin x-ışını kırınım deseni	47
Şekil 4.6. FTO cam taban üzerine üretilen CuO filminin x-ışını kırınım deseni	49

Şekil 4.7.	Cam/CuO/CdS yapısının x-ışını kırınım deseni	51
Şekil 4.8.	FTO/CuO/CdS yapısının x-ışını kırınım deseni	51
Şekil 5.1.	.a) Safsızlık atomlarının birbirleriyle Coulomb etkileşmesi nedeniyle bant kenarlarının pertürbe olması b) Bant sarkmalarındaki durum yoğunlukları	54
Şekil 5.2.	Valans bandındaki eletronun iletim bandına geçişi, (Temel soğurma) ...	55
Şekil 5.3.	Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu	56
Şekil 5.4.	Bir yarıiletkende direkt bant geçişinin şematik gösterimi	57
Şekil 5.5.	Bir yarıiletkende indirekt bant geçişinin şematik gösterimi	59
Şekil 5.6.	Yarıiletkenlerde direkt (a) ve indirekt (b) bant geçişinin grafiksel gösterimi	60
Şekil 5.7.	Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin soğurma spektrumu	62
Şekil 5.8.	Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin $(ahv)^2-hv$ grafiği	62
Şekil 5.9.	Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin $\ln\alpha-hv$ grafiği	63
Şekil 5.10.	Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin geçirgenlik spektrumu	64
Şekil 5.11.	FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin soğurma spektrumu	65
Şekil 5.12.	FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin $(ahv)^2-hv$ grafiği	66
Şekil 5.13.	FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin $\ln\alpha-hv$ grafiği	66
Şekil 5.14.	FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin geçirgenlik spektrumu	67
Şekil 5.15.	Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin soğurma spektrumu	68
Şekil 5.16.	Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin $(ahv)^2-hv$ grafiği	68
Şekil 5.17.	Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin $\ln\alpha-hv$ grafiği	69
Şekil 5.18.	Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin geçirgenlik spektrumu	70
Şekil 5.19.	FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin soğurma spektrumu	71
Şekil 5.20.	FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin $(ahv)^2-hv$ grafiği	71
Şekil 5.21.	FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin geçirgenlik spektrumu	72
Şekil 6.1.	FL spektrometre cihazının şematik gösterimi	75

Şekil 6.2.	Cam taban üzerine üretilen CdS filminin fotolüminesans spektrumu	76
Şekil 6.3.	FTO taban üzerine üretilen CdS filminin fotolüminesans spektrumu	77
Şekil 6.4.	Cam taban üzerine üretilen CuO filminin fotolüminesans spektrumu	78
Şekil 6.5.	FTO taban üzerine üretilen CuO filminin fotolüminesans spektrumu	79
Şekil 7.1.	AKM'nin çalışma mekanizmasının şematik gösterimi	81
Şekil 7.2.	Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin üç boyutlu AKM görüntüsü	83
Şekil 7.3.	FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin üç boyutlu AFM görüntüsü	83
Şekil 7.4.	Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin üç boyutlu AFM görüntüsü	85
Şekil 7.5.	FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin üç boyutlu AFM görüntüsü	85
Şekil 7.6.	Taramalı Elektron Mikroskopunun şematik diyagramı	87
Şekil 7.7.	SEM'de gelen elektron demeti-numune etkileşimi	88
Şekil 7.8.	(a) Cam taban ve, (b) FTO taban üzerine elde edilen CdS filmlerinin SEM görüntüleri	90
Şekil 7.9.	(a) Cam taban ve, (b) FTO taban üzerine elde edilen CuO filmlerinin SEM görüntüleri	91
Şekil 8.1.	Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken ohmik kontak oluşturmadan önceki enerji bant diyagramı	95
Şekil 8.2.	Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken ohmik kontak oluşturduktan sonraki enerji bant diyagramı	96
Şekil 8.3.	Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken ohmik kontak oluşturmadan önceki enerji bant diyagramı	97
Şekil 8.4.	Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken ohmik kontak oluşturduktan sonraki enerji bant diyagramı	98
Şekil 8.5.	Tuzaklı yapıya sahip bir yarıiletkende akım-voltaj grafiği	99
Şekil 8.6.	Sığ tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj karakteristiği	103
Şekil 8.7.	Derin tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj karakteristiği	104
Şekil 8.8.	Metal-yarıiletken-metal yapının şematik gösterimi	104
Şekil 8.9.	Sıcak uç metodunun şematik gösterimi	106
Şekil 8.10.	FTO/ <i>n</i> -CdS/Au yapısının I-V grafiği	108

Şekil 8.11. FTO/n-CuO/Au yapısının I-V grafiği	109
Şekil 8.12. Yarıiletken ve arayüzey durumlarının kapasitansı	112
Şekil 8.13. 500 kHz frekansta FTO/n-CdS/Au yapısının C-V grafiği	114
Şekil 8.14. 500 kHz frekansta FTO/n-CdS/Au yapısının $\left[\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0}\right)\right]^{-2}$ -V grafiği	114
Şekil 8.15. 100 kHz frekansta FTO/p-CuO/Au yapısının C-V grafiği	115
Şekil 8.16. 100 kHz frekansta FTO/p-CuO/Au yapısının $\left[\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0}\right)\right]^{-2}$ -V grafiği ...	115
Şekil 8.17. FTO/n-CdS/Au yapısının farklı voltajlarda elde edilmiş kondüktans frekans grafiği	116
Şekil 8.18. Sandviç yapıda oluşturulan FTO/p-CuO/n-CdS/Au yapısının şematik gösterimi	120
Şekil 8.19. FTO/p-CuO/n-CdS/Au eklemine I-V grafiği	120
Şekil 8.20. FTO/p-CuO/n-CdS/Au eklemine lnI-V grafiği	121

GÖRSELLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Görsel3.1. (a) CdS filmi oluşumunda kullanılan kimyasal reaksiyon banyosu. (b) Cam taban üzerine elde edilen CdS filmi	30
Görsel3.2. (a) CuO filmi oluşumunda kullanılan kimyasal reaksiyon banyosu. (b) Cam taban üzerine elde edilen CuO filmi	32
Görsel4.1. Bruker D8 Advance X-ray difraktometre	40
Görsel5.1. Shimadzu Solidspec-3700 DUV model UV-VIS-NIR Spektrofotometre cihazı	60
Görsel6.1. Perkin Elmer LS 55 Fluorescence Spectrometre cihazı	75
Görsel7.1. XE-100E Park Systems marka AKM'nin fotoğrafı	82
Görsel7.2. Zeiss Ultra Plus FESEM fotoğrafı	89

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Kristal örgü sabiti
A	: Soğurma potansiyeli
Å	: Angström
AKM	: Atomik kuvvet mikroskobu
Au	: Altın
B	: Maksimum yarı pik genişliği
c	: Işık hızı
C	: Kapasitans
C_o	: Arayüzey kapasitansı
C_y	: Yarıiletkenin kapasitansı
CdS	: Kadmiyum sülfür
CuO	: Bakır (II) oksit
Cu₂O	: Bakır (I) oksit
d	: Film kalınlığı
$d_{gözlenen}$	: Kırınım desenlerinden belirlenen kristal düzlemleri arasındaki mesafe
d_{hkl}	: Kristal düzlemleri arası mesafe
$d_{standart}$	: Standart kristal düzlemleri arasındaki mesafe
D	: Kristalcik boyutu
E	: Enerji
ϵ	: Kristaldeki gerilmeler
ϵ_o	: Boşluğun dielektrik sabiti
E_a	: Akseptör enerji seviyesi
E_C	: İletim bandı enerji seviyesi

E_d	: Donör enerji seviyesi
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_{fonon}	: Fonon enerjisi
E_g	: Yasak enerji bant aralığı
ϵ_r	: Malzemenin dielektrik sabiti
E_t	: Tuzak enerji seviyesi
E_U	: Urbach enerji
E_V	: Valans bandı enerji seviyesi
eV	: Elektron volt
ϵ_y	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
FCC	: Yüzey merkezli kübik yapı
$f(E)$	: Enerji durumlarının her birinin işgal edilme olasılığı
FESEM	: Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu
FL	: Fotoluminesans
FTO	: Flor katkılı kalay oksit
G	: Kondüktans
$g_e(E)$	: İletim bandındaki elektron durum yoğunluğu
$g_h(E)$	: Valans bandındaki elektron durum yoğunluğu
h	: Planck sabiti
hkl	: Kristal düzlemlerinin Miller indisleri
I	: Akım
$I_{geçen}$	: Malzemedен geçen elektromanyetik dalganın şiddeti
I_{gelen}	: Malzemeye gelen elektromanyetik dalganın şiddeti
ICDD	: International Centre for Diffraction Data
ITO	: İndiyum katkılı kalay oksit

J	: Akım yoğunluğu
\vec{k}	: Dalga vektörü, momentum
K	: Kelvin
KBD	: Kimyasal banyo depolama
kV	: Kilovolt
k_B	: Boltzman sabiti
m_o	: Serbest elektron kütlesi
mA	: Miliamper
m_e^*	: Elektronun etkin kütlesi
m_h^*	: Holün etkin kütlesi
n	: İletim bandındaki elektron yoğunluğu
N	: Newton
N_c	: İletim bandındaki elektron yoğunluğu
N_D	: Katkı atomu konsantrasyonu
n_i	: Has yarıiletkenler için taşıyıcı yoğunluğu
n_{ideal}	: İdeal diyot faktörü
nm	: Nanometre
n_n	: n -tipi bir yarıiletkende elektron yoğunluğu
n_o	: Serbest yük yoğunluğu
n_p	: n -tipi bir yarıiletkende hol yoğunluğu
n_t	: Tuzaklanan yük yoğunluğu
N_t	: Tuzak yoğunluğu
N_v	: Valans bandındaki hol yoğunluğu
ρ	: Özdirenç

p	: Valans bandındaki hol yoğunluğu
p_n	: p -tipi bir yarıiletkende elektron yoğunluğu
p_p	: p -tipi bir yarıiletkende hol yoğunluğu
$q\Phi_m$	: Metalin iş fonksiyonu
$q\Phi_y$	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
R_a	: Ortalama pürüzlülük değeri
R_q	: rms pürüzlülük değeri
s	: Saniye
SCL	: Space-charge-limited
SILAR	: Ardışık iyonik tabaka adsorpsiyon ve reaksiyonu
T	: Optik geçirgenlik
T	: Sıcaklık
ν	: Fotonun frekansı
V	: Voltaj
V_{bi}	: Build-in voltage
V_{TFL}	: Trap-filled-limited voltajı
W	: Kıtlık bölgesinin genişliği
χ	: Elektron ilgisi
XRD	: X-Ray diffraction
λ	: Işığın dalgaboyu
θ	: Bragg açısı
γ	: Dislokasyon yoğunluğu
2θ	: Kırınım açısı
α	: Absorpsiyon katsayısı
λ_g	: Fotonun dalgaboyu

- μm** : Mikrometre
 μ : Serbest taşıyıcı mobilitesi
 σ : İletkenlik

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1. Giriş

Hızlı nüfus artışı ve sanayinin gelişmesiyle birlikte gereken enerji ihtiyacının artması, kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların tükenmesi ve bu yakıtların çevre problemlerine yol açması insanoğlunun enerji ihtiyacının karşılanması üzerine eğilmesine neden olmuştur. 15 Ekim 1973 yılından sonra yaşanan küresel ekonomik krizden petrol fiyatlarının aşırı derecede yükselmesi, petrol bağımlısı ülkeleri çok etkilemiş, bu tür enerji sorunları bizi yeni enerji kaynakları bulmaya yöneltmiştir. Gelecek nesillerin enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmek için tükenmeyen enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Bu tükenmeyen enerji kaynakları da yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerjiler üretimleri için kullandığı kaynakların tükenme hızından çok daha kısa sürede kendini yenileyebilen çevre dostu enerjilerdir. Petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıt olmayan, güneş, rüzgâr, jeotermal, hidrojen, biyokütle gibi enerji kaynakları kendini yenileyen enerji kaynakları'na örnek olarak verilebilir.

Evlerimizde kullandığımız ev aletlerinden, sanayide kullanılan büyük ölçekli makinelere, ev ve işyerlerimizin aydınlatma ve ısınma ihtiyacına kadar elektrik enerjisine ihtiyaç duyarız. Hem sürekli artan enerji ihtiyacını karşılamak hem de sürekliliğini sağlamak için, enerji üretiminde kullanılan kaynakları çeşitlendirmek gerekir. Bu yüzden yenilenebilir enerji kaynaklarından azami ölçüde faydalanmak gerekmektedir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, günümüzde alternatif enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinin kolay ulaşılabilir olması ve doğada bol miktarda bulunması nedeniyle elektrik enerjisi üretimi için oldukça önemli bir enerji kaynağıdır.

Çevreye hiçbir zararı olmayan güneş enerjisinden elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için, fotovoltaik güneş enerjisi dönüşümü en cazip seçeneklerden birisidir. Güneş enerjisinin dönüştürülüp kullanılması doğal ve yapay olmak üzere iki farklı yolla olur. Doğal yollar ile enerji dönüşümüne fotosentez olayı, su döngüsü, toprak ve suyun ısınması örnek olarak verilebilir. Yapay yollar ile enerji dönüşümüne fotovoltaik güneş pilleri örnek olarak verilebilir. Günlük hayatımızda güneş enerjisinden elektrik elde etmek için güneş pilleri kullanılmaktadır. Özellikle fotovoltaik yöntem ile güneş enerjisinden elektrik elde etmek için gerekli teknolojik altyapının hızlı gelişimi, bu

sistemlerden günlük hayatımızda daha fazla faydalanma sürecini de beraberinde getirmiştir. Bu çerçevede çevreci ve uzun ömürlü fotovoltaik sistemler enerji üretimi için tercih edilen sistemler olmuştur.

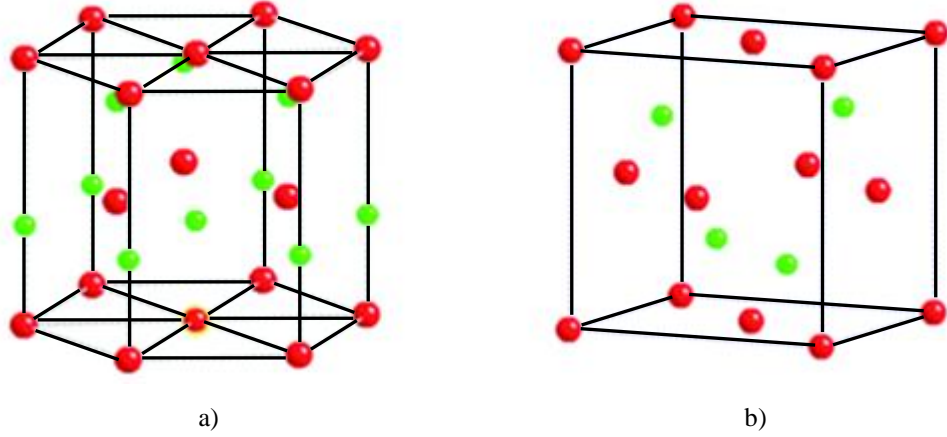
İnce film fotovoltaik sistemleri, malzeme maliyetlerinin, enerji tüketiminin, bakım ve sermaye maliyetlerinin azaltılmasıyla üreticilerine umut vermektedir. Kullanılan malzeme miktarının en aza indirilerek, pahalı olmayan depolama yöntemi ve ucuz montaj dizileri kullanılarak maliyetlerin azaltılması hedeflenmektedir [1,2]. Güneş pilleri genel olarak yarıiletken malzemelerden yararlanılarak elde edilirler. Yarıiletken malzemelerin kullanıldığı, geleceğin en önemli teknolojileri arasında gösterilen yarıiletken teknolojisi hızla gelişmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte yarıiletkenlerin kullanım alanları da gittikçe artmaktadır. Bu malzemelerin uydu sistemlerinden bilgisayar teknolojisine, savunma sistemlerinden cep telefonuna, detektör teknolojisinden güneş pillerine kadar birçok uygulama alanı mevcuttur. Günümüzde malzeme bilimindeki çalışmalarda, kullanılan malzemelerin cinsini, karışım oranlarını değiştirerek ya da malzemeye katkılama yaparak elde edilen malzemenin özelliklerinin daha iyi kontrol edilmesi amaçlanmaktadır. Teknolojik malzemelerin hem ekonomik bir üretim metoduyla üretilmesi hem de fiziksel özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesiyle gerek güneş pilleri gerekse birçok cihazın verimi artacaktır.

Bu çalışmada kadmiyum sülfür (CdS) ve bakır (II) oksit (CuO) yarıiletken filmleri kullanılmıştır.

1.2. CdS Yarıiletken Filminin Özellikleri

Periyodik cetvelin II^B-VI^A grup yarıiletken bileşiği olan kadmiyum sülfür bileşiği sarı-turuncu renktedir ve son altmış yılın en çok çalışılan yarıiletken malzemelerinden biridir. [3-6]. CdS; uzun ömürlü, oldukça kararlı olması, elektriksel, optik ve manyetik özelliklerinin katkılama ile büyük oranda değiştirilebilmesi nedeniyle sıkça çalışılan bir malzemedir. CdS, görünür bölgede geçirgenlik özelliklerine, akustik karakteristiklerine, yüksek elektrokimyasal kararlılığa ve mükemmel elektronik özelliklere sahiptir [7]. CdS filmleri, bugün için en iyi bilinen ışığa duyarlı yarıiletkenlerden biridir, özellikle oda sıcaklığında görünür bölgede ve yakın infrared bölgede ışımalar elektrik enerjisine dönüştürülür [8]. CdS filmleri *n*-tipi iletim özelliğine ve 2,32-2,45 eV arasında değişen direkt enerji bant aralığına sahip yarıiletkenlerdir. [6, 9-12].

CdS sıkı paketlenmiş hekzagonal yapı (wurtzite) ve yüzey merkezli kübik (zinc blende) olmak üzere iki kristal formunda kristalleşmektedir. Cd iyonları tetrahedral bölgenin yarısını işgal eder. Çoğunlukla CdS hekzagonal yapıda kristalleşme gösterirken, nano-ölçekli CdS filmlerinde kübik yapı baskındır [12]. Şekil 1.1.'de CdS filmlerinin iki kristal formunun şekli verilmiştir.



Şekil 1.1. CdS kristal yapısının iki farklı kristal formu: a) hekzagonal (wurtzite) b) Kübik (zinc blende) yapısında kristalleşen CdS. (Kırmızı toplar Cd, yeşil toplar S atomlarını göstermektedir) [13].

CdS filmleri, vakumda buharlaştırma, saçtırma, püskürtme ve kimyasal banyo depolama gibi birçok yöntemle elde edilmektedir [7, 11]. CdS filmleri genellikle, cam, silikon wafer, indiyum kalay oksit (indium tin oxide-ITO)/cam ve kalay oksit (SnO_2)/cam tabanlar üzerine elde edilirler [14]. Yarıiletken ince filmlerinin ve bunlara dayalı yapılan cihazların kalitesi üretim tekniklerine oldukça bağlıdır [15]. Kimyasal banyo depolama (KBD) yöntemiyle elde edilen CdS filmleri genellikle yüksek özdirenç (10^6 - 10^{12} $\Omega \cdot \text{cm}$) sahiptir. Özdirenç değerini düşürmek için, tavlama ve katkılama gibi bazı işlemlere başvurulmuştur ve elektriksel özelliklerinde iyileşme sağlanmıştır [2]. Tavlama işleminin sonucu olarak, CdS filmlerinin yeniden kristalleşmesini sağlayabilir ve sonuç olarak iyi bir kristal yapısının oluşmasına etkisi olabilir. Yapılan çalışmalarda film elde etmede kullanılan çözeltinin pH değerinin değişmesi CdS filmlerinin kristallenmelerini etkilediği belirtilmektedir [16].

Son zamanlarda uzun süredir II-VI grubu yarıiletken filmleri güneş pilleri, ekran panelleri gibi birçok opto-elektronik aygıtlarda kullanılabildiği için yoğun bir şekilde elde edilmektedir [17]. Optoelektronik uygulamalar için kullanılan CdS filmlerinin

yüksek optiksel geçirgenlik, düşük özdirenç, yüksek fotoiletkenlik ve daha iyi kristal yapıya sahip olması istenir [18].

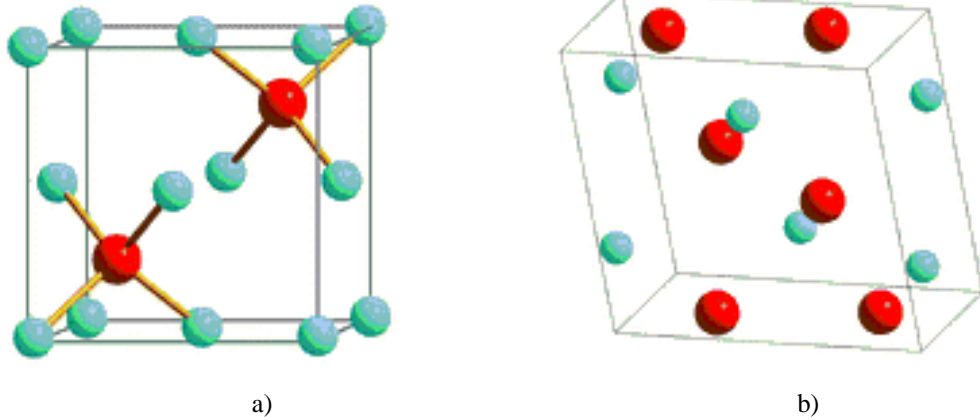
CdS yarıiletken filmleri güneş pili uygulamalarında pencere malzemesi olarak kullanılmaktadır. Pencere malzemesinin temel iki özelliği vardır. Bu özellikleri düşük özdirenç ve yüksek optik geçirgenliktir. Pencere malzemesi olarak kullanılacak CdS yarıiletken filminin özdirencinin (10^6 - 10^{12} Ω -cm) daha küçük olması beklenir. CdS yarıiletken filminin özdirenç değerini daha da azaltmak için CdS bileşiğinin içerisine Ag, Al, In, Cu, Fe gibi elementler katılır [18].

Yüksek taşıyıcı yoğunluğu ve geniş bant aralığı, güneş pillerinin açık devre voltajını iyileştirmesi açısından önemlidir. CdS bazlı güneş pillerinin üretiminde, CdS filmlerinin elektriksel taşınımı önemli bir özelliktir. CdS filmi yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olduğundan *pn* eklemi yapılarında *n*-tipi pencere malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kullanılan güneş pilinin pencere malzemesi için, yüksek geçirgenlik ve geniş bant aralığı gerekmektedir. CdS filmi *pn* eklemi yapılarında görünür ışığı olabildiğince absorbe tabakasına iletir [7]. CdS filmleri 1980'li yıllardan beri ince kalınlıklı buffer tabakası olarak güneş pillerinde yüksek verimlilikle kullanılmaktadır [19].

CdS malzemesi sadece güneş pillerinin yapısında pencere tabakası olarak görev yapmaz, aynı zamanda yüksek fotoduyarlılığa sahip olduğu için taşıyıcı oluşumuna da katkı sağlar. Bu sebeple, CdS tabakasının optik, yapısal ve elektriksel özellikleri CdS/CdTe, CdS/CZTS veya CdS/CIGS heteroeklem arayüzlerinin özelliklerini etkileyebilir ve bu durumda bütün pillerin performansını etkileyebilir [20]. CdS ince filmi CdTe, Cu (In, Ga)Se₂ (CIGS), CuZnSeS bazlı güneş pillerinde yaygın bir şekilde kullanılmakta ve yüksek verim elde edilmektedir [7]. Bu tür güneş pillerinde, CdS filminin düşük dirençte üretimi çok önemlidir, çünkü aygıt tabaka (sheet) direncini düşürür. Bu durumda CdTe filminde aktif bölgenin içinde space charge bölgesi oluşur [11]. KBD yöntemi ile elde edilen ara (buffer) tabakası olarak kullanılan CdS ile CuInSe₂ filminin oluşturduğu güneş pilinde %17'yi aşan verimlilik elde edildiği ifade edilmektedir [21]. Diğer bir örnek, Cu(In,Ga)Se₂ güneş pillerinin kimyasal banyo depolama yöntemiyle elde edilen CdS ile oluşturduğu 0,5 cm² alana sahip laboratuvarda üretilen güneş pilinde en yüksek verim %19,9 olarak belirtilmektedir [22]. CdS/CdTe heteroyapılarda ulaşılan maksimum verim %30 civarında olduğu bildirilmiştir [2].

1.3. CuO Yarıiletken Filminin Özellikleri

Geçiş metal oksitleri yarıiletkenlerin önemli bir sınıfıdır [23]. Özellikle son yıllarda *p*-tipi yarıiletken olan nano-boyuttaki metal oksit malzemelerin geliştirilmesine önem verilmiştir. Metal oksit nano-parçacıklarının optik, elektronik, manyetik ve katalitik özellikleri ayarlanabilir olduğu için ilgi çeken malzemeler içinde yer aldığı ifade edilmektedir [24]. Metal oksit yarıiletkenlerin ilginç özelliklerinden ve yapısal çeşitliliğinden dolayı nano boyutlu elektronik, optoelektronik, kataliz ve sensör gibi farklı alanlarda geniş araştırmalar yapılmaktadır [25]. Metal oksit yarıiletken filmlerinden biri de CuO ve Cu₂O malzemeleridir. Bakır oksit filmleri periyodik cetvelin I^B-VI^A grup bileşiği olup, iki tane yaygın kristal formu bulunmaktadır. Bunlar, küprik oksit (tenorite-monoklinik, CuO) ve küproz oksit (cuprite-kübik, Cu₂O) olmak üzere iki genel bileşik halinde oluşur [26]. CuO kristalinin örgü parametreleri $a=4,653$ Å, $b=3,410$ Å, $c=5,018$ Å, $\beta=99.48$ iken Cu₂O kristalinin örgü parametreleri $a=4,250$ Å olarak verilmektedir [27]. Şekil 1.2.'de CuO ve Cu₂O filmlerinin kristal formunun şekli verilmiştir.



Şekil 1.2. CuO kristal yapısının iki farklı kristal formu: a) Kübik yapıda kristalleşen Cu₂O b) Monoklinik yapıda kristalleşen CuO. (Kırmızı toplar O, yeşil toplar Cu atomlarını göstermektedir) [28].

Metal oksit yarıiletkenlerde oksijen veya metal atomlarının eksikliği ya da fazlalığı kusurları oluşturur. Bu kusurlar metal oksit yarıiletken filminin elektriksel iletiminin *n*-tipi veya *p*-tipi olmasını sağlar. CuO ve Cu₂O filmleri, kristal yapılarında bakır boşlukları meydana geldiği için önemli bir *p*-tipi geçiş metal yarıiletkenleridir

[29, 30]. CuO malzemesinin yasak enerji aralığı değeri $E_g \sim 1,2-2,1$ eV arasındaki değerleri alırken Cu₂O malzemesi $E_g \sim 2-2,6$ eV arasındaki değerleri alır [17, 25, 31-33].

Elde edilen filmlerin farklı şartlarda ve farklı metotlarda elde edilmesine bağlı olarak fiziksel özellikleri Cu ve O atomlarının düzenlenmesiyle alakalıdır. Temel özelliklerinden örneğin, bant aralığı depolama yöntemine ve şartlarına bağlı olup, bu durum filmlerin atomik düzenini etkiler [17]. Yasak enerji aralığı değerleri malzemelerin elde edilme yöntemlerine, kullanılan tabana ve banyo çözeltisinin pH değerine bağlı olarak değişebilmektedir. Literatürde, KBD metoduyla cam tabanlar üzerine elde edilmiş tavlınmamış ve tavlınmış CuO filmlerin yasak enerji aralığı değerleri sırasıyla 1,37 eV ve 1,39 eV bulunmuştur. KBD yöntemiyle silisyum ve quartz taban üzerine elde edilen CuO filmlerinin yasak enerji aralığı değerleri 1,40 eV olarak verilmektedir [34]. Ardışık iyonik tabaka adsorpsiyon ve reaksiyonu yöntemiyle (SILAR) cam tabanlar üzerine elde edilen CuO filmlerin yasak enerji aralığı değeri ise 1,43 eV olarak bulunmuştur [35]. CuO malzemesi uygun optik özelliklerinden dolayı güneş pili üretimi için umut verici bir yarıiletken malzemesidir. Bundan başka, yüksek güneş ışığı soğurma ve düşük ısı yayma özelliği nedeniyle soğurucu tabaka olarak rol oynar [29]. Güneş pili için ideal enerji aralığına uygundur ve elektromanyetik spektrumun görünür bölgesindeki ışığı soğurma özelliğine sahip oldukları için güneş pili uygulamalarında soğurucu *p*-tabakası olarak kullanılmaktadırlar [27, 31]. Literatürde CuO malzemesi kullanılarak yapılan çok az sayıda güneş pili vardır [27]. Araştırmacılar kimyasal banyo depolama yöntemini kullanarak *n*-ZnO/*p*-CuO güneş pili elde etmiş ve yapısal, elektriksel özelliklerini incelemişlerdir [36]. CuO ile yapılan güneş pili uygulamalarında teorik olarak bulunan verim %18 olarak verilmektedir [17, 25].

CuO yarıiletken filmi toksik olmayan, mükemmel kimyasal kararlılığa sahiptir [25], ve antiferromanyetik bir malzemedir [37]. CuO düşük maliyetle elde edilebilir, doğada bol miktarda bulunur. Bu nedenlerle CuO filmleri araştırmalarda ilgi çekici bir malzeme olarak kullanılmaktadır [17, 38]. Bakırın bol bulunması ve CuO'nun düşük maliyette üretilebilmesi sebebiyle CuO; gaz sensörleri, güneş pilleri, alan emitörleri, heterojen katalizleri, manyetik depolama malzemeleri, FET'ler, Li iyonlu bataryalarda anot malzemesi ve süperkapasitörlerde kullanılabilen ayrıca gelecek vaat eden bir malzemedir [25, 39]. CuO ve Cu₂O malzemeleri heterojen katalizörlerinde, gaz sensörlerinin heterokontaktlarında ve mikrodalga dielektrik malzemesi olarak

kullanılmaktadırlar [17]. Bu kadar farklı uygulamalarda kullanılabilen CuO, birçok yöntemle elde edilmektedir. Bu yöntemler, pulsed laser deposizyon, ısı oksidasyon, ısı buharlaştırma, ultrasonik püskürtme, kimyasal banyo depolama, kimyasal buhar depolama, mikrodalga, sol-jel daldırma, elektrodeposizyon, hidrotermal, saçtırma, moleküler beam epitaksi ve SILAR yöntemleridir [25, 40]. Nano yapılu CuO filmlerine katkılama yapılarak, yüksek kalitede fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip filmlerin elde edildiği ifade edilmektedir. Birçok araştırmacı, CuO bileşiminin içerisinde farklı metal iyonlarının katkılanması (Mn, Ni, Ti, Cd ve Zn) ile ilgili araştırmalar yapmıştır [24].

1.4. Amaç

Bu çalışmada; kadmiyum sülfür (CdS) ve bakır (II) oksit (CuO) yarıiletken filmleri kimyasal banyo depolama (KBD) yöntemi ile mikroskop ve flor katkılu kalay oksit (FTO) kaplı camlar üzerine elde edilmiştir. Ayrıca FTO taban üzerine *p*-CuO/*n*-CdS heteroeklem yapıları büyütülmüştür. Üretilen filmlerin yapısal, optik, yüzeysel ve elektriksel gibi fiziksel özellikleri incelenmiştir. KBD yöntemi ileri teknoloji gerektirmemesi ve bu yöntemde kullanılan kimyasal bileşenlerin maliyetlerinin düşük oluşu elde edilen heteroeklem yapılarının maliyetlerini de düşürmektedir. Bu yöntemle elde edilen FTO/*p*-CuO/*n*-CdS/Au heteroeklem yapılarının kullanıldığı cihazların maliyetlerini de azaltacağı düşünülmektedir.

2. YARIİLETKENLER

2.1. Giriş

Son yıllarda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları arasında büyük bir aşama kaydeden yarıiletken ince filmler, elektronik aygıt teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle elektronik cihazlar günlük yaşantımızın önemli bir parçası haline gelmiştir. Geniş bir kullanım alanına sahip yarıiletken ince filmlerden elde edilen verimlilik oldukça önemli bir faktördür. Bunun nedeni elde edilen verimin üretim yöntemleriyle ilişkili olmasıdır. Yarıiletken filmlerin kolay ve ucuz yöntemlerle üretilmesi, maliyetleri düşürerek kullanımlarını yaygınlaştıracaktır.

Yarıiletken filmler farklı teknolojik uygulamalarda kullanılırlar. Örneğin; elektriksel özelliklerine bağlı olarak yarıiletken ve süperiletken cihazlarda, yalıtım ve iletim kaplamalarında, optik özelliklerinden dolayı yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan kaplamalarda, girişim filtrelerinde, manyetik özellikleri kullanılarak hafıza disklerinde, kimyasal özellikleriyle de oksidasyon veya korozyona karşı korumada, sensörlerde ve bunlar gibi daha birçok yerde kullanılabilirliği her geçen gün artmaktadır [41].

Yarıiletken ince filmler öncelikli olarak kaplanmak istenilen taban üzerine biriktirme işlemi yapılarak elde edilir. Aynı zamanda farklı üretim yöntemleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, filmi destekleyerek filmin oluşumuna yardımcı olan bir taban üzerine ince bir tabaka halinde dizilmesi ile oluşturulan ve kalınlıkları genel olarak 1 μm 'nin altında olan yarıiletken malzemelerdir [41, 42].

Yarıiletken ince filmlerin ilk kullanım alanı cam ve seramik tabanların üzerine üretilerek dekorasyon amacı ile kullanılmasıdır. Daha sonra, cam yüzeyler üzerine, gümüş tuzları kullanılarak, gümüş filmleri elde edilmiştir [41]. 1838 yılında elektroliz yöntemi ile ilk yarıiletken film elde edilmiştir. 1852 yılında Bunsen kimyasal reaksiyon ve yine aynı yıl Grove glow-discharge sputtering yöntemi ile metal filmler elde etmişlerdir. 1857'de Faraday asal gaz içerisinde buharlaştırma yöntemini kullanarak ilk metal filmi elde etmiştir. 1887'de Nahrwold vakum ortamı kullanarak Joule ısıtması yöntemiyle Pt ince filmlerini elde etmiştir. 1888'de Kundt Joule ısıtması yöntemini kullanarak metal filmler elde etmiştir [43].

Farklı malzemeler cam, seramik, metal ve grafit gibi tabanlar üzerine üretilerek şeffaf, iletken, süperiletken, amorf yarıiletken, alaşımlı, inorganik, polimerik, organik,

payroelektrik, ferroelektrik ince filmler şeklinde elde edilebilir [44]. Yarıiletken filmler elde edilmiş yöntemlerine ve kullanılan malzemeye göre üç ana grupta toplanır. Bunlar;

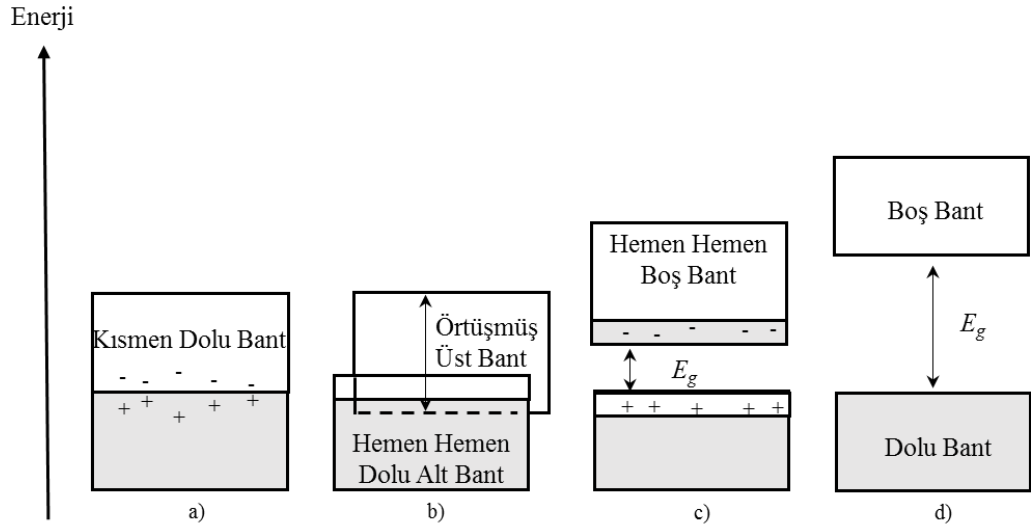
- (1) Homoepitaksiyel filmler: Aynı malzemenin tek kristal tabanı üzerine büyütülen tek kristal filmler,
- (2) Heteroepitaksiyel filmler: Farklı malzemelerin tek kristal tabanı üzerine büyütülen tek kristal filmler
- (3) Polikristal filmler: Yaygın olarak cam, mika, kuartz, metal veya amorf gibi tabanlar üzerine büyütülen polikristal filmlerdir.

Homoepitaksiyel ve heteroepitaksiyel filmler genellikle 1 μm 'den daha büyük kalınlıkta olup genellikle kalınlıkları 10 μm civarındadır. Homoepitaksiyel filmler Schottky diyotlarında, varaktörlerde kullanılmaktadır. Homoepitaksiyel filmlerine Si, Ge, GaAs filmleri, heteroepitaksiyel filmlerine GaAs üzerine elde edilen GaAlAs veya GaPAs filmleri örnek olarak verilebilir. Heteroepitaksiyel filmler LED'lerde kullanılmaktadır. Homoepitaksiyel ve heteroepitaksiyel yöntemlerle elde edilen filmler ileri teknoloji gerektirmesiyle beraber maliyeti oldukça yüksektir. Polikristal filmler ise genellikle 1 μm 'den daha ince kalınlığa sahip olan filmlerdir. Polikristal filmler daha düşük maliyetli yöntemlerle, daha geniş yüzeylerde ve kolayca elde edilebilirler. Bu filmlere CdS, Cu₂S, SnO₂ gibi filmleri örnek olarak verilebilir. Polikristal filmler sahip olduğu optik ve elektriksel özellikleri sayesinde güneş pilleri, yarıiletken fotodedektörler, diyotlar, ince film transistörler, sensörler gibi elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. Polikristal filmler yalıtkan bir amorf yüzey üzerine genellikle bileşik yarıiletken olarak elde edilirler [45].

Yarıiletken ince filmler birçok elektronik ve optoelektronik devre elemanlarında oldukça geniş bir alanda uygulama bulmaktadır. Yarıiletken bileşikler kendi aralarında, örneğin (ZnO) gibi ikili (binary), (Zn_{1-x}Cd_xS) gibi üçlü (ternary) ve (Zn_{1-x}Cd_xS_ySe_{1-y}) gibi dördü (quaternary) yarıiletken bileşiklerini oluşturabilirler [46-48]. Bu bileşikler, elementler çeşitli oranlarda karıştırılarak elde edilebilir. Yarıiletken teknolojisinin gelişmesiyle birlikte çeşitli yöntemlerle kaliteli, ucuz ince filmler elde etmek mümkündür. Bu yöntemlere Elektrodepozisyon, Metal Organik Kimyasal Buhar Çöktürme, Moleküler Demet Epitaksi, Saçtırma (Sputtering), Ultrasonik püskürtme ve Kimyasal Banyo Depolama yöntemlerini örnek olarak verebiliriz.

2.2. Katılarda Enerji Bantları

Katıların iletkenliği hakkında yapılan araştırmalarda bazı katıların elektriği iyi iletteği, bazılarının kısmen ve bazılarının da hiç iletmediği gözlenmiştir. Katılar, elektriksel iletkenlikleri bakımından metalik iletkenler (metaller ve yarı metaller), yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Bu gruplandırma işlemi, enerji bant yapısına göre yapılabilir. Her kristal kendi enerji bant yapısına sahiptir ve Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Katılarda enerji bant diyagramı a) Metal, b) Yarı metal, c) Yarıiletken, d) Yalıtkan [49].

Bir atom tek başına ele alındığında elektronlar belirli enerji seviyelerinde bulunabilirler. Atomlar katıyı oluştururlarken bu enerji seviyeleri yarılmalara uğrar. Bu yarılmalara enerji bantları adı verilir. Katıda bantlar oluştuktan sonra bantlar arası elektron geçişleri Pauli ilkesini ve istatistiksel dengeyi sağlayıncaya kadar devam eder. Elektronlarla dolu olan banda valans bandı, bu bandın üzerindeki banda ise iletim bandı denir. Yarıiletken ve yalıtkanlarda bu iki bandın arasında serbest elektron bulunmaz ve bu aralığa yasak enerji aralığı (E_g) denir.

Şekil 2.1.a.'da enerji bant yapısı verilen metallerde bant tam dolu değildir. Bu yüzden elektronların gidebileceği enerji düzeyleri bantta mevcuttur. Bu durumda elektronların hareket etmesine bir engel yoktur ve en küçük bir potansiyel farkında bile sıcaklık ne olursa olsun elektrik akımı ölçülebilir. Bir metalin iki ucuna gerilim uyguladığımızda elektrik alanın etkisiyle metal içindeki elektronlar belirli bir sıraya girerler, bu düzen içerisinde bir elektron diğer komşu elektronu uyararak dalga dalga

ilerleyen bir etki meydana getirir. Bu etki malzeme bütününe yayılır ve malzemenin bütününde akım iletilir. Böylece metal içinde elektrik akımı bir uçtan diğer uca doğru akar ve iletkenlik sağlanmış olur. Metallerin elektron yoğunluğu sıcaklığın artmasıyla değişmez, ancak yüksek sıcaklıklarda metallerin elektriksel iletkenliği sıcaklıkla birlikte azalır. Yüksek sıcaklıklarda sıcaklığın artmasıyla örgü noktalarındaki atomların daha büyük genliklerle titreşmesini sağlar. Bu da elektronların akışına karşı bir direnç oluşturur ve elektriksel iletkenlik azalır. Düşük sıcaklıklarda sıcaklığın artmasıyla metallerdeki serbest elektronların hareketliliği artar ve buna bağlı olarak iletkenlik artar. Düşük sıcaklıklarda karşılaşılan direnç örgü atomlarının titreşimleri ve kristaldeki safsızlıklardan (katkı atomları, kristal kusurları gibi) kaynaklanır. Metaller 0 K sıcaklıkta bile elektriksel iletkenlik gösterirler. Metallerin oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenlikleri oldukça yüksek olup 10^2-10^6 (ohm·cm)⁻¹ arasında değiştiği ifade edilmektedir [50, 51].

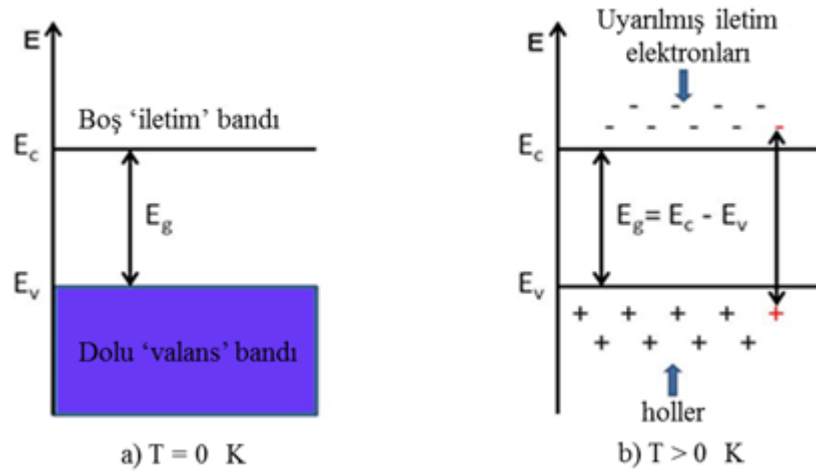
Şekil 2.1.b.'de enerji bant yapısı verilen bu tür katılarda valans bandının tamamen dolu ve iletim bandının da tamamen boş olması gerekir. Elektronlar kendilerine ayrılan enerji düzeyinden daha aşağıda boş enerji düzeyleri varsa kural olarak oraya giderler. Böyle bir yapıda da iletim bandının alt kısmı ile valans bandının üst kısmı çakıştığından, dolu olması gereken valans bandın üst kısmındaki elektronlar, boş olan iletim bandının alt kısımlarına geçerler. Bu durumda da elektronların hareket edebilmeleri mümkün olur. Bunlar da elektriği iletirler ancak geçiş yapan elektron miktarının az olması sonucu, metaller kadar iyi iletmezler. Bunlar yarı metal olarak adlandırılırlar [50-52].

Şekil 2.1.c.'de yarıiletkenlerin enerji bant yapısı verilmektedir. Yarıiletkenlerde valans ve iletim bandı birbirinden yasak enerji aralığı ile ayrılmış durumdadır. Mutlak sıcaklıktaki yarıiletkenlerde valans bandı tamamen elektronlarla dolu, iletim bandı ise tamamen boştur. Bu durumdaki yarıiletkene elektrik alanı uygulandığında valans bandında elektronların hareket edebileceği bir yer olmadığından ve iletim bandında elektron bulunmadığından elektronlar hareket edemez, yani elektriksel iletim gözlenmez. Bu sıcaklıktaki yarıiletken yalıtkan gibi davranır. Sıcaklık mutlak sıcaklığın biraz üzerine çıktığında elektronların iletim bandında bulunma olasılıkları artar ve yarıiletkene bir elektrik alan uygulandığında elektriksel iletim gözlenir. Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlikleri oda sıcaklığında 10^9-10^2 (ohm·cm)⁻¹ arasında değişmektedir [51].

Şekil 2.1.d.'de yalıtkanların enerji bant yapısı verilmektedir. Yalıtkanların bant yapısı incelendiğinde, valans bandı elektronlarla hemen hemen dolu durumdadır ve elektronlar atomlarına sıkı olarak bağlıdır. İletim bandı ise boştur. Yasak enerji aralığı yalıtkanlar için oldukça büyüktür. Bu aralık değeri genellikle 4 eV veya daha büyük bir değerdedir. Dolayısıyla, elektronların valans bandı içinde serbestçe hareket edebilme imkânı olmadığı gibi, valans bandındaki elektronlar büyük yasak enerji aralığını aşip iletim bandına geçemezler. Yalıtkanlar bu yasak enerji bandının genişliği nedeniyle elektriği iletmezler. Literatürde yalıtkanların özdirenç değerlerinin 10^{22} (ohm·cm) mertebesine kadar ulaştığı ifade edilmektedir [50, 51].

2.3. Yarıiletkenlerin Bant Yapısı

Yarıiletkenler, mutlak sıfır sıcaklığında yalıtkan gibi davranırlar. Yarıiletkenlerde mutlak sıcaklıkta valans bandı tamamen dolu ve iletim bandı boştur. Yarıiletkenin bütün elektronları valans bandında bulunduğu için elektriksel akımı mümkün kılan serbest elektronlar yoktur ve yarıiletkene elektrik alanı uygulandığında elektriksel iletim göz-



Şekil 2.2. Bir has yarıiletkenin a) T=0 K'de, b) T>0 K'de şematik enerji-bant diyagramı [50].

lenmez (Şekil 2.2.a.). Sıcaklık 0 K'den itibaren artırıldığında yalıtkan özelliği gösteren yarıiletkene ısı, ışık veya elektriksel gerilim gibi dış etkiler uygulandığında valans elektronlarının bir kısmı serbest hale geçerek, yasak bant aralığını aşip iletim bandına geçerler. İletim bandına geçen bu elektronlar geride hol adı verilen pozitif yüklü boşluklar bırakırlar. Hollerin valans bandındaki hareketi, valans bandındaki

elektronların, hollerin boş bıraktığı yerlere ilerlemesiyle sağlanır. Bu durumda yarıiletkenlere elektrik alanı uygulandığında iletim bandındaki elektronlar ile valans bandındaki holler serbest taşıyıcı gibi hareket ederek elektriksel iletimi meydana getirirler. Böylece yarıiletkenlerde elektriksel iletkenliğe hem elektronlar hem de holler katkıda bulunurlar (Şekil 2.2.b.). Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlikleri metallere yalıtkanlar arasında olan malzemelerdir [50, 51].

Yarıiletkenler genel olarak elemental yarıiletkenler ve bileşik yarıiletkenler olarak iki grupta sınıflandırılabilirler. Elemental yarıiletkenler olarak periyodik cetvelin en önemli IV. grup yarıiletken malzemeleri silisyum (Si) ve germanyumu (Ge) örnek olarak verebiliriz. Bununla birlikte bileşik yarıiletkenler ise periyodik tablonun iki veya daha fazla farklı grubunda bulunan elementlerin bileşimi ile oluşan yarıiletkenlerdir. Bu yarıiletkenlere periyodik tablonun III-V grup bileşiklerinden InSb, InAs ve GaAs, II-VI grup bileşiklerinden CdS, ZnO, ZnS, IV-VI grup bileşiklerinden PbS, PbSe ve PbTe ile bu bileşiklerin üçlü $Al_xGa_{1-x}As$, ZnS_xSe_{1-x} ve dördü $Ga_xIn_{1-x}AsP_{1-y}$ bileşiklerinden oluşan yarıiletken malzemelerini örnek olarak verebiliriz [51, 53].

2.4. Katkısız ve Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletkenler serbest taşıyıcı açısından katkısız (has, intrinsic) ve katkılı (extrinsic) yarıiletkenler olarak iki grupta incelenirler. Bu durum, iletim bandındaki elektron yoğunluğu ve valans bandındaki hol yoğunluğuna göre tanımlanmaktadır.

2.4.1. Katkısız yarıiletkenler

Yarıiletken içinde yarıiletkeni oluşturan atomlardan farklı bir atom (yabancı atom) bulunursa bu atom katkı atomu olarak adlandırılır. Katkı atomu yarıiletkenlere fazladan elektron sağlayabilir veya yarıiletkenden bir elektron alabilir, yani yarıiletkenlere bir hol verebilir. İçinde yabancı atom ve örgü kusurları bulunmayan yarıiletkenler has yarıiletken olarak adlandırılır. Has yarıiletkenler mutlak sıfır sıcaklığında yalıtkan olup serbest yük taşıyıcıları yoktur. 0 K'de, has yarıiletkenlerde valans bandı elektronlarla dolu olup iletim bandında serbest elektronlar bulunmamaktadır. 0 K sıcaklıktan itibaren sıcaklık arttıkça, valans bandındaki elektronlar ısı enerjisi kazanır. Bazı durumlarda valans bandındaki bir elektron enerji kazanarak iletim bandına geçebilir. Elektron iletim bandına geçtiğinde valans bandında bir hol oluşur. Bu durumda yarıiletkenin iletim

bandında bir elektron ve valans bandında bir hol bulunur. İletim bandındaki elektron yoğunluğu (n) valans bandındaki hol yoğunluğuna (p) eşit olan bu yarıiletkeni has yarıiletken denir.

$$(n = p = n_i(T)) \quad (2.1)$$

Burada $n_i(T)$, verilen bir yarıiletken için has (intrinsic) taşıyıcı yoğunluğudur ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bu elektron ve hol yoğunlukları çarpımları sabittir ve sadece sıcaklığa bağlı olan taşıyıcı yoğunluğunun karesine eşittir (Eş. 2.2.).

$$n \cdot p = n_i^2(T) \quad (2.2)$$

Bu eşitliğe mass-action yasası denir [53].

2.4.2. Katkılı yarıiletkenler

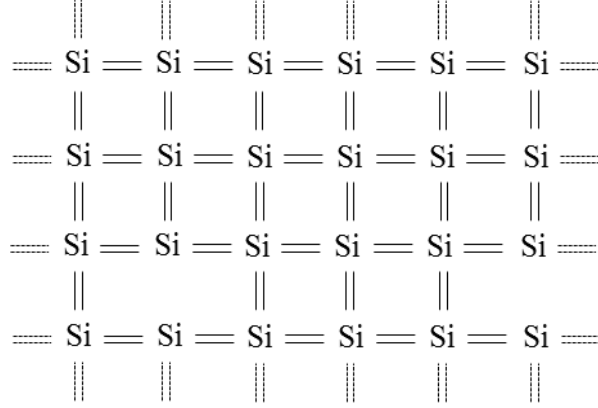
Yabancı bir atomla katkılanan bir yarıiletkende çoğunluk yük taşıyıcıları ya iletim bandındaki elektronlar ya da valans bandındaki holler olur. Yarıiletken kristale katkılanan katkı atomları elektron verici (donör) ya da elektron alıcı (akseptör) olarak görev yaparlar. Yarıiletken donör atomlarıyla katkılanmışsa n -tipi, akseptör atomlarıyla katkılanmışsa p -tipi iletkenlik özelliği gösterir. Eğer yarıiletkende çoğunluk taşıyıcıları elektronlar olan n -tipi bir yarıiletken ise elektron yoğunluğu n_n ve azınlık taşıyıcıları olan hol yoğunluğu p_n veya çoğunluk taşıyıcıları holler olan p -tipi bir yarıiletkende hol yoğunluğu p_p , azınlık taşıyıcıları olan elektron yoğunluğu n_p gösterimleri kullanılır. Katkılı yarıiletkende Mass-action yasası,

$$n_n \cdot p_n = n_p \cdot p_p = n_i^2(T) \quad (2.3)$$

olarak verilir. Bu ifade, elektron yoğunluğu biliniyorsa hol yoğunluğunu bulmak için, ya da hol yoğunluğu biliniyorsa, elektron yoğunluğunu hesaplamak için kullanılır.

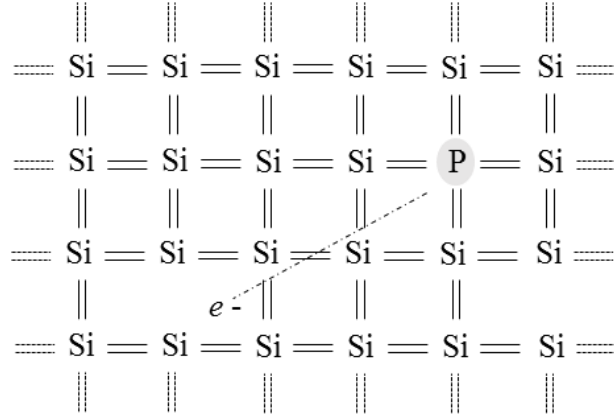
2.4.2.1. *n*-tipi yarıiletkenler

Yarıiletkenlerde valans bandındaki hollerin ve iletim bandındaki elektronların sayısı sınırlıdır. Periyodik cetvelde IVA grubunda yer alan Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) kovalent bağlı yarıiletkenlerdir ve elmas yapıda kristallenirler. Si veya Ge kristallerinin elektriksel iletkenliği katkılama işlemi yapılarak artırılabilir.



Şekil 2.3. Silisyum kristal örgüsünün iki boyutlu şematik gösterimi [50].

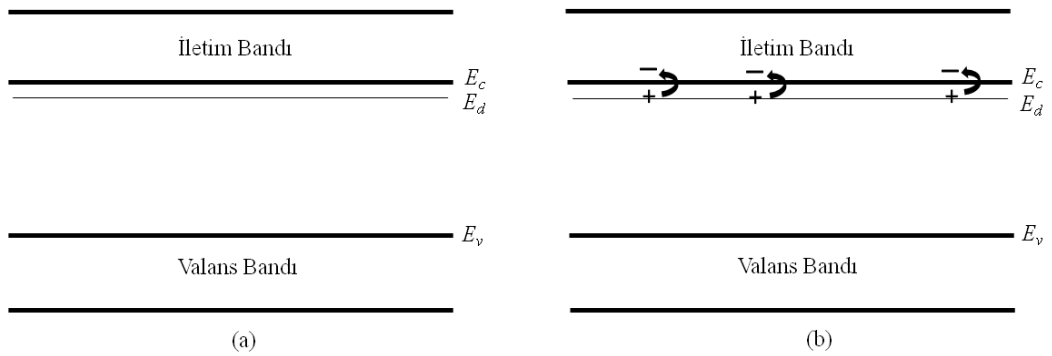
Elektriksel iletkenliği ayarlanabilen Si veya Ge, elektronik devre elemanlarının yapımında kullanılır. Si kristaline (Şekil 2.3.) çok az miktarda değerliği beş olan fosfor (P), arsenik (As) veya antimon (Sb) gibi katkı atomlarının katılmasıyla elde edilen yarıiletken *n*-tipidir. Örneğin P atomunun son yörüngesinde 5 elektron ve Si atomunun son yörüngesinde 4 elektron bulunmaktadır. Bu durumda silisyumun 4 değerlik elektronu ile fosforun 4 değerlik elektronu kullanılarak bir kovalent bağ meydana gelir. Fosfor atomundaki fazlalık bir elektron yarıiletken kristali içerisinde serbest kalır. Bu şekilde yarıiletkene donör atomları tarafından fazladan elektron sağlanmış olur. Şekil 2.4.'te Si kristal örgüsüne katılanmış P atomunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. İki boyutlu silisyum kristal örgüsüne katkılanmış donör atomu [50].

Katkı atomlarından gelen elektronlar iletim bandına yakın bir seviyede, yasak enerji aralığında donör enerji seviyesini oluşturur. Bu enerji seviyesi iletim bandının biraz aşağısında yer almaktadır. Donör atomlarından kaynaklı oluşan bu seviye E_d ile gösterilir. n -tipi yarıiletkenin enerji bant yapısı Şekil 2.5.'te gösterilmiştir. Düşük sıcaklıkta donör elektronu fosfor atomuna zayıf olarak bağlıdır (Şekil 2.5.a.). Kristal içinde iyonlanmış fosfor atomu pozitif olarak yüklenir. Donör atomuna küçük bir enerji verildiğinde zayıf bağlı elektron, arkasında iyonlaşmış pozitif yüklü iyon bırakarak iletim bandına çıkar (Şekil 2.5.b.). Bu çıkan elektron akım oluşturarak kristal boyunca hareket edebilir yerinde bıraktığı pozitif yüklü iyon kristal içinde sabittir.

n -tipi yarıiletkenlerde donör atomunun iyonlaşması ile donör enerji seviyesinden iletim bandına çıkan serbest elektron geçişine karşılık valans bandında hol oluşmaz.

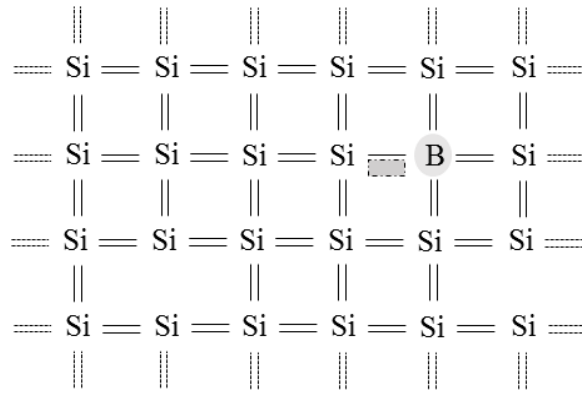


Şekil 2.5. a) $T=0 K$, b) $T > 0 K$ 'de n -tipi yarıiletkende donör enerji seviyeleri [50].

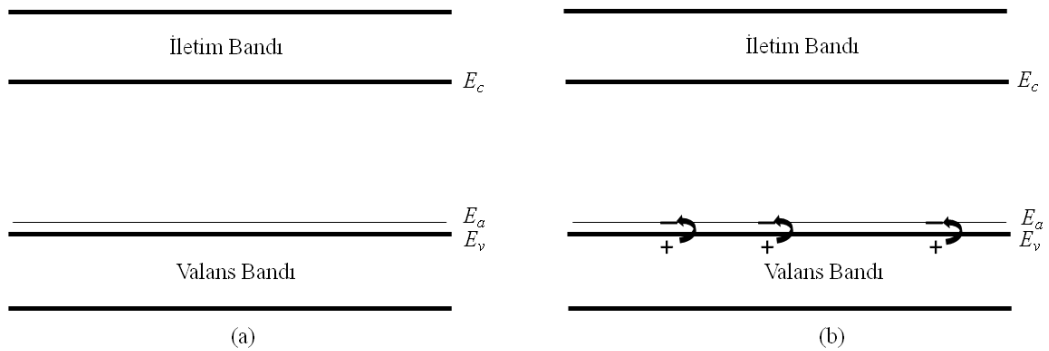
Donör yoğunluğuna bağlı olarak, n -tipi yarıiletken malzemelerde elektron yoğunluğu hol yoğunluğundan büyük olacağından ($n_n > p_n$), elektriksel iletkenliğe elektronlardan gelen katkı daha fazla olacaktır [50].

2.4.2.2. p -tipi yarıiletkenler

p -tipi yarıiletkenler hol konsantrasyonu serbest elektron konsantrasyonundan fazla olan yarıiletkenlerdir. p -tipi yarıiletkenler akseptör atomları katkılanarak elde edilirler. Silisyuma bor (B), galyum (Ga) veya indiyum (In) gibi atomlar katkılanarak p -tipi yarıiletken elde edilir. Örneğin, Si kristali içerisine çok az miktarda değerliği üç olan B atomu katkılандığında B atomunun üç elektronu ile Si atomunun üç elektronu kovalent bağ yapar. Si atomunda bir bağ boş kalır. Bu boşluk Si atomuna zayıf bir şekilde bağlıdır. Kristale küçük bir enerji verildiğinde Si atomuna zayıf bir şekilde bağlı olan bu boşluk yani hol Si atomunu terkederek kristal içerisinde kolayca hareket eder. Şekil 2.6.'da Si kristal örgüsüne katkılanmış B atomunun ve holün şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.6. İki boyutlu silisyum kristal örgüsüne katkılanmış akseptör atomu [50].



Şekil 2.7. a) $T=0$ K, b) $T > 0$ K'de p -tipi yarıiletkende akseptör enerji seviyeleri [50].

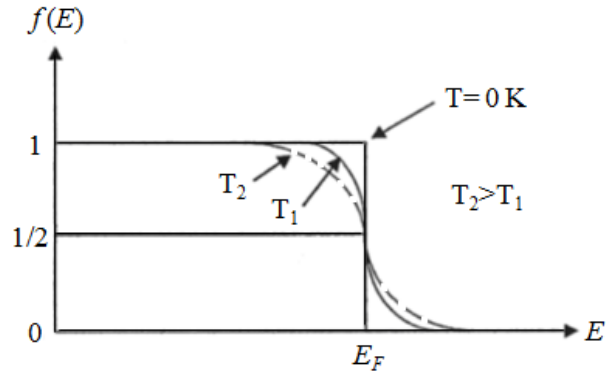
Şekil. 2.7.a.'da 0 K sıcaklıkta iyonlaşmamış akseptör atomlarına ait akseptör enerji seviyeleri gösterilmiştir. Akseptör atomlarından oluşan enerji seviyesi E_a ile gösterilir. Akseptör enerjisi, akseptör tarafından bir holün yakalanabilmesi için gerekli enerjiye eşittir. Bir akseptör atomu iyonlaştığında valans bandındaki bir elektron akseptör atomundaki boşluğa yerleşir. Akseptör atomundaki boşluk yani hol valans bandına geçer ve böylelikle akseptör atomu iyonlaşmış olur. Valans bandındaki hol de serbestçe hareket ederek elektriksel iletme katkı verir (Şekil. 2.7.b.). Elektriksel iletkenliğe katkıda bulunan çoğunluk taşıyıcıları pozitif yük taşıyıcı özelliği gösteren hollerdir. Akseptör yoğunluğuna bağlı olarak, p -tipi yarıiletken malzemelerde hol yoğunluğu elektron yoğunluğundan büyük olacağından ($p_p > n_p$), elektriksel iletkenliğe hollerden gelen katkı daha fazla olacaktır [50].

2.5. Yarıiletkenlerde Fermi Enerjisi

Yarıiletkende akımı oluşturan yükler elektronlar ve hollerdir. Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliğinin belirlenmesinde serbest yük yoğunluklarının bilinmesi ve buna bağlı olarak da bu taşıyıcı yük yoğunluklarını belirlemek için Fermi enerji seviyesinin bilinmesi önemlidir. Mutlak sıfır sıcaklığındaki katı bir malzemede, Pauli Dışarlama İlkesi'ne bağlı olarak yerleşen elektronların doldurduğu enerji seviyelerinden en üstteki seviyeye Fermi enerji seviyesi (E_F) denir. Sıcaklık arttığında, elektronların kinetik enerjileri artar. Mutlak sıfırda boş olan enerji düzeyleri dolmaya başlar. Bu durumda, elektronların E enerjisine sahip bir enerji seviyesini doldurma olasılığı Fermi-Dirac dağılım fonksiyonuyla hesaplanır. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu,

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)}} \quad (2.4)$$

eşitliği ile verilir. Burada k_B , Boltzman sabitini ve T ise mutlak sıcaklığı göstermektedir. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu, T sıcaklığındaki sistemin E enerji seviyesinin bir elektron tarafından işgal edilme olasılığını verir. Şekil 2.8.'de $f(E)$ fonksiyonunun E enerjisine göre değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 2.8. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu [50].

Bu grafikte, sıcaklığın artmasıyla birlikte elektronların Fermi enerji seviyesinden daha büyük enerji seviyelerine geçme olasılığının arttığı görülmektedir. Aynı zamanda sıcaklığın artmasıyla Fermi enerji seviyesinin alt kısımlarında bulunan elektronlar tarafından işgal edilen bölgelerin de artması söz konusudur. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu incelendiğinde, mutlak sıcaklığın sıfır olduğu durumda, $T \rightarrow 0$ K iken,

$$E < E_F \text{ için, } \left(\frac{E - E_F}{k_B T} \right) \rightarrow -\infty \quad f(E < E_F) = 1 \quad (2.5)$$

$$E > E_F \text{ için, } \left(\frac{E - E_F}{k_B T} \right) \rightarrow +\infty \quad f(E > E_F) = 0 \quad (2.6)$$

elde edilir. Buna göre, $T \rightarrow 0$ K iken, E_F 'nin altında tüm enerji seviyeleri elektronlarla dolu ve E_F 'nin üstündeki tüm enerji seviyeleri boştur yani hiç elektron bulunmadığını gösterir. $T > 0$ K iken,

$$E = E_F \text{ için, } \left(\frac{E - E_F}{k_B T} \right) \rightarrow 0 \quad f(E = E_F) = \frac{1}{2} \quad (2.7)$$

elde edilir. Bu durumda Fermi enerji seviyesinde olasılık yoğunluğu yüzde elliye eşittir.

$(E - E_F) \gg k_B T$ olması durumunda $e^{\left(\frac{E - E_F}{k_B T} \right)}$ değeri 1'den çok büyük olur ve eşitlik (2.4)'teki Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu eşitliği, Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonuna dönüşür. Bu enerji seviyesindeki elektronlar için Pauli Dışarlama İlkesi geçerli değildir. Bu durumda eşitlik,

$$f(E) = \frac{1}{1+e^{\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)}} \cong e^{-\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)} \quad (2.8)$$

haline dönüşür. Eşitlik (2.8)'e göre, iletim bandındaki elektronların yoğunluğu ve valans bandındaki hollerin yoğunluğu bulunabilir. İletim bandındaki elektronların yoğunluğu, sonsuz küçük dE enerji aralığında bulunan elektron sayısının iletim bandı yüksekliğince integrali alınmasıyla bulunur. E ile $E+dE$ enerji aralığında durum yoğunluğu $g_e(E)dE$ ile verilir. Burada $g_e(E)$, iletim bandındaki elektron durum yoğunluğudur. Bu enerji durumlarının her birinin işgal edilme olasılığı $f(E)$ ise, enerji aralığında elektronların bulunma ihtimali $f(E)g_e(E)dE$ olarak ifade edilir. Böylece, iletim bandı alt sınırı E_C 'den herhangi bir E enerji seviyesi aralığında bulunan elektronların yoğunluğu (n),

$$n = \int_{E_C}^E f(E)g_e(E) dE \quad (2.9)$$

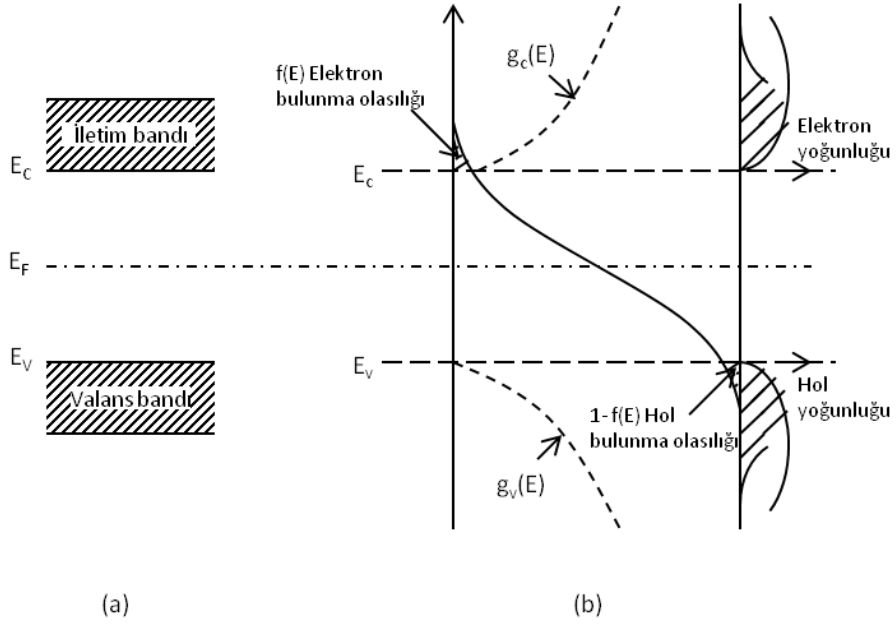
eşitliği ile verilir. Şekil 2.9.'da dağılım fonksiyonu ve durum yoğunluğunun enerjiye göre değişimi verilmiştir. İletim bandındaki elektron durum yoğunluğu,

$$g_e(E) = \frac{4\pi(2m_e^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_C} \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir. Burada m_e^* iletim bandındaki elektronların etkin kütesidir. Eşitlik (2.9) tekrar düzenlenerek yazıldığında,

$$n = \int_{E_C}^{\infty} \frac{4\pi(2m_e^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_C} e^{-\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)} dE \quad (2.11)$$

elde edilir. Referans sistemini iletim bandının üst sınırının enerji değeri sıfır olarak seçildiğinde eşitlik (2.9), eşitlik (2.13) şeklinde yazılır.



Şekil 2.9. Bir yarıiletkende $m_e^* = m_h^*$ durumunda a) iletim ve valans bantları ve b) dağılım fonksiyonu ile elektron ve hollerin durum yoğunluğu [54].

$$\eta = \frac{E - E_c}{k_B T} \quad (2.12)$$

$$n = \frac{4\pi(2m_e^*kT)^{3/2}}{h^3} e^{-\left(\frac{E_c - E_f}{k_B T}\right)} \int_0^\infty \eta^{1/2} e^{(-\eta)} d\eta \quad (2.13)$$

Eşitlik (2.13)'te, (2.14) ifadesini kullandığımızda,

$$\int_0^\infty \eta^{1/2} e^{(-\eta)} d\eta = \frac{1}{2} \sqrt{\pi} \quad (2.14)$$

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\left(\frac{E_c - E_f}{k_B T}\right)} \quad (2.15)$$

ifadesi elde edilir.

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.16)$$

Burada; N_c , iletim bandındaki elektronlar için etkin durum yoğunluğudur. İletim bandındaki elektronların yoğunluğu,

$$n = N_c e^{-\left(\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right)} \quad (2.17)$$

ifadesi ile verilir. İletim bandındaki elektronların etkin kütlesi, serbest elektron kütlesine eşit kabul edildiğinde ($m_e^* = m_0$), oda sıcaklığında 300 K'de, iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu $N_c \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ mertebesindedir [50].

Benzer şekilde p -tipi yarıiletkende valans bandındaki hol yoğunluğu için,

$$p = \int_E^{E_V} (1 - f(E)) g_h(E) dE \quad (2.18)$$

eşitliği kullanılarak ve benzer işlemler yapılarak;

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* k T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\left(\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)} \quad (2.19)$$

ifadesi elde edilir.

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* k T}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.20)$$

Burada; N_v , valans bandındaki holler için etkin durum yoğunluğu, m_h^* valans bandındaki hollerin etkin kütlesidir. Valans bandındaki hollerin yoğunluğu,

$$p = N_v e^{-\left(\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)} \quad (2.21)$$

p -tipi yarıiletkenler için 300 K sıcaklıkta $N_v \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ mertebesindedir [50].

Bir yarıiletkende elektron ve hol yoğunlukları kullanılarak Mass action yasası yazılırsa,

$$n_i^2 = N_c N_v e^{-\left(\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right)} \cdot e^{-\left(\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)} \quad (2.22)$$

$$= N_c N_v e^{-\left(\frac{E_c - E_V}{k_B T}\right)} \quad (2.23)$$

$$= N_c N_v e^{-\left(\frac{E_g}{k_B T}\right)} \quad (2.24)$$

(2.24) eşitliği elde edilir. Bu ifade de yarıiletkenler için yasak enerji bant aralığı $E_g = E_c - E_v$ olarak tanımlanmıştır. Sabit sıcaklıkta, yarıiletken malzemeler için n sabittir ve Fermi enerjisinden bağımsızdır. Böylece bir yarıiletkende yasak enerji bant aralığı,

$$E_g = kT \ln \left[\frac{N_c N_v}{np} \right] \quad (2.25)$$

olarak ifade edilebilir. n ve p çarpımı yalnızca sıcaklığa ve yarıiletkenin tipine bağlıdır, hol ve elektron konsantrasyonlarına bağlı değildir. Herhangi bir katkının yapılmadığı has yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu hol yoğunluğuna eşit olduğundan,

$$N_c e^{-\left(\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right)} = N_v e^{-\left(\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right)} \quad (2.26)$$

olarak yazılır. İki tarafın logaritmasını aldığımızda ve E_F için çözdüğümüzde,

$$E_F = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{1}{2} kT \ln \left[\frac{N_v}{N_c} \right] \quad (2.27)$$

ifadesi elde edilir. Eşitlik (2.16) ve (2.20) ile tanımlanan ifadeleri, eşitlik (2.27)'de yerine koyduğumuzda,

$$E_F = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{3}{4} kT \ln \left[\frac{m_h^*}{m_e^*} \right] \quad (2.28)$$

ifadesi elde edilir. Eşitlik (2.28) incelendiğinde, yarıiletkende etkin kütleler birbirine eşit ise Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasında yer alacağı görülür. Eğer yarıiletkende $m_h^* > m_e^*$ ise Fermi enerji seviyesi iletim bandına doğru yaklaşır. Eğer $m_e^* > m_h^*$ olduğu durumda ise Fermi enerji seviyesi valans bandına doğru yaklaşır [50].

3. FİLMLERİN ÜRETİMİ

3.1. Giriş

Yarıiletken film elde etmek için kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bunlar; elektrodepozisyon, moleküler demet epitaksi, saçtırma, ultrasonik püskürtme, pulsed laser deposizyon, ısı oksidasyon, ısı buharlaştırma, kimyasal buhar depolama, mikrodalga, sol-jel daldırma, hidrotermal, SILAR ve kimyasal banyo depolama yöntemleridir. Bu çalışmada CdS ve CuO filmleri farklı tabanlar üzerine kimyasal banyo depolama yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

3.2. Filmlerin KBD Yöntemi ile Elde Edilmesi

Kimyasal banyo depolama yöntemi, yeni kullanılmaya başlanmış bir yöntem değildir. İlk olarak 1835 yılında Liebig, KBD yöntemini ayna yapmak amacıyla cam yüzeyini gümüş ile kaplamada kullanmıştır. PbS, CuS ve SbS bu yöntemle elde edilen ilk yarıiletken bileşiklerdir. Bu yöntemle elde edilen kristaller çok küçüktür ve nanokristallerin elde edilmesinde kullanılan oldukça iyi bir yöntemdir. Bu yöntem geniş alanlı cam yüzeyleri kaplamak için kullanılabilir. Bu alandaki çalışmaların başlıcaları PbS ve Cu_xS olmak üzere çeşitli yarıiletken filmler kullanılarak elde edilmektedir [55].

KBD yöntemi ile ilk defa CdS filmi Mokrushin ve Tkachev'in tarafından 1961 yılında üretilmiştir. Bu çalışmada kadmiyum asetat ve tiyoüre içeren banyo çözeltisi kullanılarak cam tabanlar üzerine film oluşturulmuştur [56, 57]. 1962 yılında Bube ve arkadaşları, kübik ve hekzagonal yapıda CdS filminin üretilebileceğini rapor etmişler ve filmin fiziksel özelliklerini karakterize etmişlerdir [56]. Literatürde KBD yöntemiyle üretilen CdS filmlerinin genellikle polikristal yapıda olduğu, yarı kararlı kübik ve kararlı hekzagonal fazda kristal yapıda kristallendiği belirtilmiştir [10]. KBD oldukça basit bir yöntem olup, bu yöntemle tekrarlanabilen, uniform ve geniş yüzeylere tutunabilen filmler üretilmektedir [11].

KBD yöntemiyle elde edilen CdS filmleri önce CdTe daha sonralarda ise $CuInSe_2$ üzerine elde edilerek katlı yapılar oluşturulmuştur. Daha önceleri filmlerin üzerine CdS buharlaştırılarak elde edilen filmlere kıyasla daha yüksek fotovoltajik hücre özelliği göstermiştir. Birçok yarıiletken KBD yöntemi ile elde edilebilmektedir. Bunları sülfidler ve selenitler olarak bir grup, diğer grup da oksitler olmak üzere ikiye ayırmak uygundur.

Sülfidler ve selenitler grubuna en çok çalışılan malzeme olan CdS başta olmak üzere Ag₂S, SnS, HgS, MoSe, ZnSe ve In₂O₃ örnek olarak verilebilir. Oksitler grubuna ise CdO, SnO₂ ve In₂O₃ malzemeleri örnek olarak verilebilir.

KBD yönteminde farklı tür ve boyutta tabanlar kullanılabilir. Tabanın kimyasal banyo çözeltisi içinde reaksiyona girmemesi gerekmektedir. Işığın geçirgenliğinden yararlanılmak istenildiği durumlarda cam tabanlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, KBD yöntemi bir banyo çözeltisinden oluşmaktadır ve sınırlı sıcaklık aralığında film elde edilmektedir. Film kalınlığı arttıkça kristal boyutunun da arttığı birçok çalışmada verilmiştir. Tavlama, kristal boyutunun artırılmasında tüm depolama teknikleri için depolama sonrası uygulanan ortak bir yöntemdir. Çoğu durumda tavlama işlemi, KBD ile elde edilen filmlerin sadece kristal boyutunu artırmak için değil, fotoelektrotların fotoelektrokimyasal performansı gibi özelliklerini artırmak için de uygulanır. Ayrıca tavlama KBD ile elde edilen filmlerde kristal boyutunu değiştirmesinin yanında tavlama yapılan gaza bağlı olarak filmin yüzey kimyasını da değiştirebilir. Kristal boyutunun artması tavlama sıcaklığının derecesine ve uygulama süresine de bağlı olarak değişmektedir. CdSe ve CdS genellikle hava ortamında bazen de inert gazlar kullanılarak tavlama yapılır. 300 °C'ye gelene kadar kristal boyutu artışı yavaş bir şekilde olur, 300 °C ile 400 °C arasında artış fazladır. Bununla birlikte CdS zinc-blende yapısında kristalleşmiş ise bu sıcaklık aralığında kristal yapı zinc-blende yapıdan wurtzite yapıya faz dönüşümü gerçekleşebilir [58]. KBD ile elde edilen filmlerde tavlama etkisi, filmlerin öz direncini önemli ölçüde azaltma gibi elektriksel özelliklerinin iyileşmesini sağlayabilir [11].

KBD yönteminde iki farklı depolama süreci vardır. Bunlar, küme küme depolama ve iyon iyon depolamadır. Küme küme büyümede filmin büyük kristalcik boyutları oluşmaktadır. Ancak, iyon iyon büyümede filmlerin kristalcik boyutları küçüktür ve daha ince filmler elde edilmektedir [59].

Kimyasal büyütme, çözeltide meydana gelen reaksiyon sonucu oluşan filmin bir katı taban üzerine çökmesiyle oluşur. Örnek CdS filmi için banyo çözeltisindeki Cd tuzları, çözeltiye sülfür iyonlarının (H₂S veya Na₂S) eklenmesiyle CdS'ye dönüşmektedir. Bu durumda CdS hemen çöker. CdS oluşumunda diğer bir yol, bir S atomu Cd atomuna bağlanarak bir CdS bileşiği oluşturur [55]. Bu yöntemde düşük sıcaklıklarda (<100 °C) çeşitli tabanlar üzerine film elde edilebilmektedir [1]. Elde

edilen filmlerin kalınlığı kimyasal banyo çözeltisi ve depolama süresi ayarlanarak kontrol edilebilmektedir [60].

CdS filmlerinin KBD yöntemi ile elde edilmesi, sulu bir çözelti içerisinde Cd^{2+} ve S^{2-} iyonlarının kontrollü bir şekilde serbest hale geçirilmesi ve daha sonra bu iyonların, sulu çözelti içerisine daldırılan taban üzerine uygun bir şekilde yığılması esasına dayanır. Yapılan deneylerde kadmiyum tuzu olarak kadmiyum sülfat, kadmiyum asetat, kadmiyum iyodür/nitrat ve kadmiyum klorür gibi farklı kadmiyum kaynakları, sülfür tuzu olarak tiyoüre veya sodyum tiyosülfat kaynakları kullanılmaktadır. Farklı kaynaklar kullanılarak elde edilen CdS filmlerin elektriksel, yapısal ve optik özelliklerinin kullanılan kaynağın çeşidine bağlı olarak değiştiği görülmüştür [59]. KBD ile elde edilen CdS filmlerinde kristalografik, optik ve elektriksel özellikleri film banyosunun pH değerine, Cd tuzunun çeşidine ve kullanılan taban gibi deneysel parametrelere hassas bir şekilde bağlı olduğu ifade edilmektedir [61].

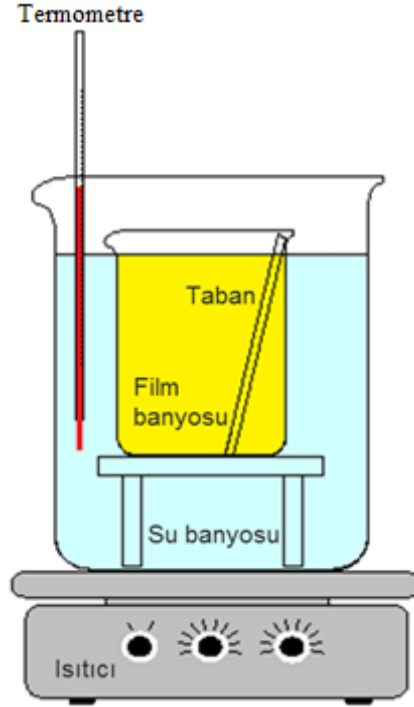
KBD yöntemi heterojen film oluşum sürecidir ve iki önemli faktör tarafından sınırlanır. Birincisi, çözeltideki homojen reaksiyon ikincisi ise reaktör kabı duvarına istenmeyen malzemenin birikimidir. Buna ek olarak, mevcut KBD yöntemleri için, ön-madde malzemelerinin kullanımı oldukça düşüktür. Tipik haliyle, kadmiyum kaynağının sadece %2'si CdS film elde edilmesinde kullanılır. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için, birçok araştırmacı, depolama parametrelerini optimize etmek için KBD depolama kinetiklerini incelemişlerdir. Hariskos ve arkadaşları, atık çözeltiden CdS çökeltisini ultra filtrasyon ve yeniden süzme işlemine tabi tutmuşlardır. Bu çökeltinin, CdS bileşiğine veya CIGS cihaz performansı üzerine hiçbir önemli etkiye sahip olmadığını göstermiştir. Benzer şekilde, Oladeji ve arkadaşları, sürekli bir çökeltme işlemi sonucunda CdS filminin oluştuğunu söylemişlerdir. Tipik bir KBD yöntemi ile elde edilen CdS filminin oluşumu, amonyum çözeltisi içinde kadmiyum iyonları ve tiyoürenin reaksiyonlarından meydana gelmektedir [22].

Kimyasal banyo depolama yöntemi uygulanabilirliği kolay bir yöntem olduğu için metal kalkonitlerin ve metal oksit filmlerinin elde edilmesinde de kullanılmaktadır. Bu yöntemde özel ekipmanlar gerekmemektedir. KBD yöntemi ile film elde etme aşamasında genellikle sıcaklık ölçümlerinde yüksek sıcaklığa, yüksek basınca ve kontrol edilmesi gereken bir atmosfer ortamına gerek yoktur. Sonuç olarak, enerji tüketimi azdır [62].

Bu çalışmada ayrı ayrı CdS ve CuO, ayrıca CdS/CuO filmleri KBD yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

3.3. CdS Filmlerinin KBD Yöntemi ile Elde Edilmesi

CdS yarıiletken filmleri cam tabanlar (mikroskop, FTO) üzerine KBD yöntemiyle depolanmıştır. KBD yönteminde, elde edilecek filmin sulu çözeltileri hazırlanır, çözeltiler istenilen oranlarda karıştırılarak film banyosu elde edilir, banyo uygun sıcaklığa getirilerek tabanlar bu banyoya daldırılır ve belirli bir süre sonra film oluşumu gözlenir. Şekil 3.1.'de görüldüğü üzere, kabın içindeki kimyasal banyo çözeltisi ayarlı ısıtıcı çalıştırıldığında istenilen sıcaklığa ayarlanabilir.



Şekil 3.1. KBD yönteminin şematik sistemi.

Bu çalışmada altlık olarak kullandığımız tabanların temiz olması önemlidir. Tabanlar ne kadar temizse o kadar kaliteli film elde edilir. Film üretiminde taban olarak $1 \times 25 \times 76 \text{ mm}^3$ boyutlarında mikroskop ve $2,2 \times 25 \times 76 \text{ mm}^3$ boyutlarında elektriksel iletken kaplamaya sahip Flor katkılı kalay oksit (Flourine doped tin oxide, FTO) camları kullanılmıştır. FTO tabanın özellikleri; film kalınlığı 250 nm, elektriksel direnci 6-8

ohm/alan olarak verilmektedir (TMI crystal). Film üretiminden önce cam tabanlar aşağıda yer alan sıra takip edilerek temizlenmiş ve kurutulmuştur:

- Deterjanlı suda kaynatılmıştır ve saf suda durulanmıştır.
- Ultrasonik banyoda 15 dakika temizlenmiştir.
- Asetonda 2 dakika bekletilmiştir.
- Propanolde 2 dakika bekletilmiştir.
- Basınçlı havada kurutulmuştur.
- Temizlenmiş tabanlar temiz bir kutuya konularak muhafaza edilmiştir.

CdS yarıiletken filmini elde etmek için banyo çözeltisinde 0,02 M $CdCl_2 \cdot H_2O$; 0,5 M KOH; 1,5 M NH_4NO_3 ve 0,2 M $CS(NH_2)_2$ sulu çözeltileri kullanılmıştır.

0,02 M $CdCl_2 \cdot H_2O$ sulu çözeltisi için,

Cd kaynağı olarak %98'lik kadmiyumklorit-monohidrat $CdCl_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılmıştır. $CdCl_2 \cdot H_2O$ tuzunun formül tartısı 201,32 g/mol olup, suda kolay çözünen bir tuzdur. Çözelti 0,02 M konsantrasyonunda ve 10 ml deiyonize su içerisinde 0,0410 g $CdCl_2 \cdot H_2O$ tuzu çözülerek hazırlanmıştır.

0,5 M KOH sulu çözeltisi için,

0,5 M %85'lik potasyum hidroksit tuzunun formül tartısı 56,11g/mol olup, suda kolay çözünen bir tuzdur. Çözelti 0,5 M konsantrasyonunda ve 25 ml deiyonize su içerisinde 0,8250 g KOH tuzu çözülerek hazırlanmıştır.

1,5 M NH_4NO_3 sulu çözeltisi için,

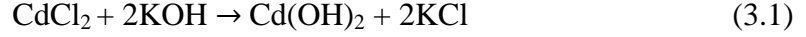
1,5 M %99'luk amonyum nitrat tuzunun formül tartısı 80,04 g/mol olup, suda kolay çözünen bir tuzdur. Çözelti 1,5 M konsantrasyonunda ve 10 ml deiyonize su içerisinde 1,2127 g NH_4NO_3 tuzu çözülerek hazırlanmıştır.

0,2 M $CS(NH_2)_2$ sulu çözeltisi için,

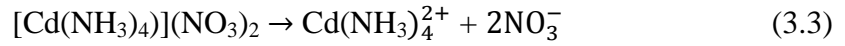
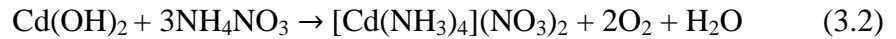
S kaynağı olarak %99'luk tiyoüre $CS(NH_2)_2$ tuzu kullanılmıştır. $CS(NH_2)_2$ tuzunun formül tartısı 76,11 g/mol olup, suda kolay çözünen bir tuzdur. Çözelti 0,2 M konsantrasyonunda ve 10 ml deiyonize su içerisinde 0,15373 g $CS(NH_2)_2$ tuzu çözülerek hazırlanmıştır.

Tartım işlemlerinde Sartorius CP225D marka 0,01 mg hassasiyetli terazi kullanılmıştır. Belirli miktarlarda tartılan kimyasal tuzlar ayrı ayrı temiz balon joje içerisine konulmuş, deiyonize su ilave edilmiş ve manyetik karıştırıcıda homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan çözeltiler belirtilen miktarlarda kullanılarak

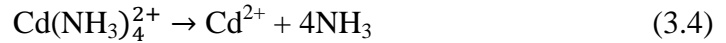
önce $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ sulu çözeltisi behere eklenmiştir. CdS 'in KBD ile üretilmesindeki kimyasal süreçler eşitlik (3.1) ile (3.7) arasındaki gibi verilmiştir [56].



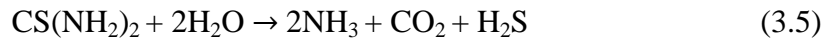
OH^- iyonlarını Cd^{2+} iyonlarından uzaklaştırmak için çözeltiliye NH_4NO_3 eklenmiştir ve aşağıdaki kimyasal tepkimelerin oluşması sağlanmıştır.



Çözelti ısıtıldıkça amonyak buharlaşacağı için aşağıdaki tepkimede verildiği gibi Cd^{2+} iyonları açığa çıkar.



İstenilen banyo sıcaklığına ulaşıldıktan sonra banyo çözeltisine $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ eklenerek aşağıdaki tepkimede verildiği gibi S^{2-} iyonları açığa çıkar.



Sırasıyla NH_4NO_3 ve $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ sulu çözeltisi eklenmiş banyo çözeltisi, manyetik karıştırıcıda tekrar karıştırılmış ve böylelikle banyo çözeltisi elde edilmiştir. Banyo çözeltisinin pH'ı NH_3 ile 10,40'a ayarlanmıştır. Temizlenmiş tabanlar kimyasal banyo içerisine Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi belirli bir eğimle daldırılmıştır. Filmler 80°C banyo sıcaklığında, 40 dakika depolama süresinde mikroskop ve FTO cam tabanlar üzerine elde edilmiştir. Deney süresince kimyasal banyo sıcaklığı dijital termometre kullanılarak kontrol edilmiştir. Filmin depolanmasında son aşamada, Cd^{2+} ve S^{2-} iyonlarının bir araya gelmesiyle CdS bileşiği elde edilmiştir.



Film depolama süresi sonunda üzerine film depolanmış cam tabanlar beherden alınmış ve deionize su ile yıkanmıştır. Böylelikle filmlerin üzerinde oluşan tortular ve zayıf bağlı parçacıklar uzaklaştırılmıştır. Bu filmler sıcaklığı 80 °C'ye ayarlanmış etüvde yaklaşık iki saat kurutulmaya bırakılmıştır. CdS filmi oluşumunda kullanılan kimyasal reaksiyon banyosunun fotoğrafı Görsel 3.1.a. ve elde edilen filmin fotoğrafı Görsel 3.1.b.'de verilmiştir.



a)



b)

Görsel 3.1. a) CdS filmi oluşumunda kullanılan kimyasal reaksiyon banyosu. b) Cam taban üzerine elde edilen CdS filmi.

3.4. CuO Filmlerinin KBD Yöntemi ile Elde Edilmesi

Bakır oksit (CuO) yarıiletken filmleri cam tabanlar (mikroskop, FTO) üzerine KBD yöntemiyle depolanmıştır.

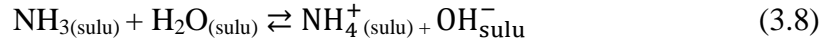
0,05 M $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ sulu çözeltisi için,

Cu kaynağı olarak %99,5 saflıkta Bakır(II) nitrat trihidrat ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$) kimyasal tuzu kullanılmıştır. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzunun formül tartısı 241,60 g/mol olup, suda kolay çözünen bir tuzdur. Çözelti 0,05 M konsantrasyonunda ve 100 ml deiyonize su içerisinde 1,21407 g $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu çözülerek hazırlanmıştır.

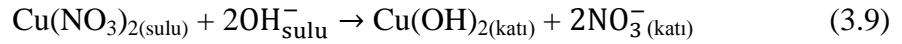
Kimyasal tuz temiz bir balon joje içerisine konulmuş, deiyonize su ilave edilmiş ve manyetik karıştırıcıda homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan çözeltinin yarısı 50 ml'lik behere konulmuştur ve manyetik karıştırıcıda tekrar karıştırılmıştır. Banyo çözeltisinin pH'ı NH_3 ile 10,30'a ayarlanmıştır. Temizlenmiş

tabanlar kimyasal banyo içerisine belirli bir eğimle daldırılmıştır. Filmler 90 °C banyo sıcaklığında, 60 dakika depolama süresinde mikroskop ve FTO cam tabanlar üzerine elde edilmiştir. Deney süresince kimyasal banyo sıcaklığı dijital termometre kullanılarak kontrol edilmiştir. Film depolama süresi sonunda üzerine film depolanmış cam tabanlar beherden alınmış ve deionize su ile yıkanmıştır. Bu filmler sıcaklığı 80 °C'ye ayarlanmış etüvde yaklaşık iki saat kurutulmaya bırakılmıştır. CuO filmi oluşumunda kullanılan kimyasal reaksiyon banyosunun fotoğrafı Görsel 3.2.a. ve elde edilen filmin fotoğrafı Görsel.3.2.b.'de verilmiştir. Kaplanan filmin Görsel 3.2.b.'de fotoğrafı görüldüğü gibi siyahımsı renktedir. CuO'nun KBD ile üretilmesindeki kimyasal süreçler eşitlik (3.8) ile (3.10) arasındaki gibi verilmiştir [63].

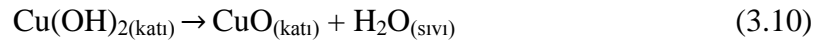
Bu çözeltide filmin oluşmasında NH₃ anahtar rol oynar ve aynı zamanda çözeltiye OH iyonları sağlar.

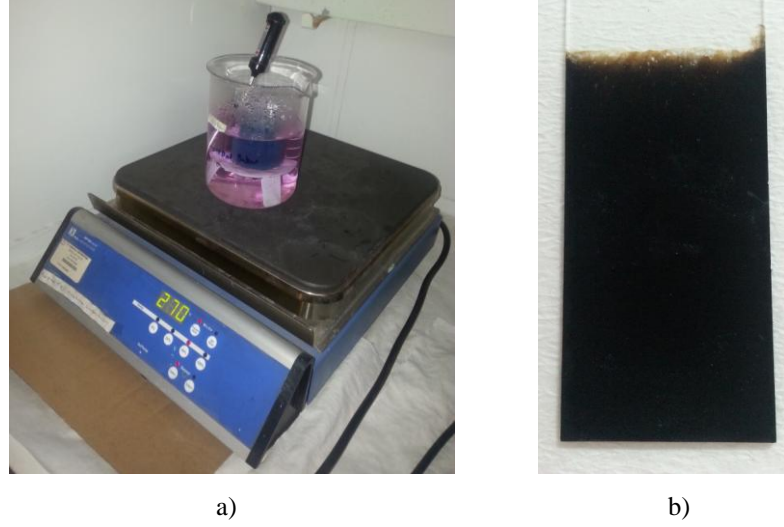


Cu(NO₃)_{2(sulu)}, OH ile tepkimeye girmiştir ve Cu(OH)₂ çökeltisi oluşmuştur.



Cu(OH)₂ parçacıkları toplanarak filmi oluşturmuşlardır. Sıcak çözelti içerisindeki Cu(OH)₂ çökeltisinden su molekülleri buharlaşarak CuO filmi oluşmuştur.

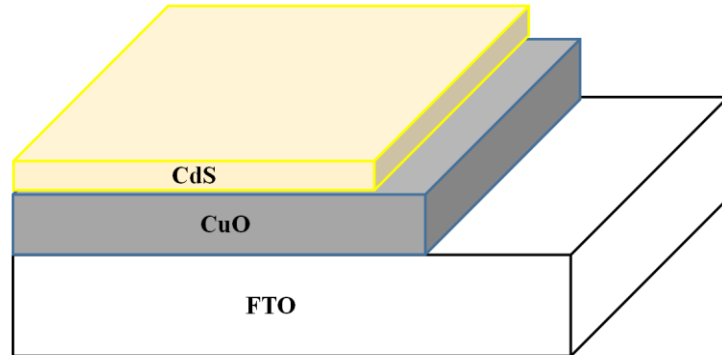




Görsel 3.2. a) *CuO* filmi oluşumunda kullanılan kimyasal reaksiyon banyosu. b) Cam taban üzerine elde edilen *CuO* filmi.

3.5. *CuO/CdS* Filminin KBD Yöntemi ile Elde Edilmesi

CuO/CdS yapısı mikroskop ve FTO cam tabanlar üzerine KBD yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. *CuO* filminin banyosu 0,05 M konsantrasyonunda $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi kullanılarak hazırlanmış ve çözeltinin pH'si 10,30 olarak ayarlanmıştır. Kimyasal banyo sıcaklığı 90 °C tutulmuş ve deney 60 dakikada bitirilerek *CuO* filmi elde edilmiştir. *CuO* filmi üzerine *CdS* filmi kaplanmadan önce, *CuO* filmleri deiyonize su ile yıkanmış ve sıcaklığı 80 °C'ye ayarlanmış etüvde yaklaşık iki saat kurutulmuştur. *CdS* filminin banyosu için 0,02 M CdCl_2 , 0,5 M KOH, 1,5 M NH_4NO_3 ve 0,2 M $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ çözeltileri kullanılarak hazırlanmış ve banyo çözeltisinin pH'si 10,40 olarak ayarlanmıştır. Kimyasal banyo sıcaklığı 80 °C tutulmuş ve deney 40 dakikada bitirilmiştir. Böylelikle *CuO/CdS* yapısı elde edilmiştir. Şekil 3.2.'de elde edilen eklem yapısının üç boyutlu şematik gösterimi verilmiştir.



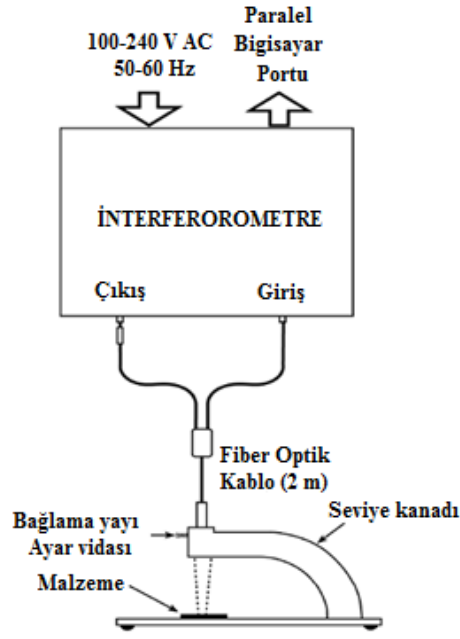
Şekil 3.2. FTO taban üzerine elde edilen *CuO/CdS*.

3.6. Elde Edilen CdS ve CuO Filmlerinin Kalınlıkları

Mikroskop ve FTO camları üzerine elde edilen CdS ve CuO filmlerinin kalınlıklarını belirlemek için Filmetrics F20 interferometrik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihazın şematik gösterimi Şekil 3.3.'te verilmiştir. Bu cihaz, malzemedен gelen, yansıyan ve geçen ışık vasıtasıyla film karakteristiklerini ölçer ve bu ışığın dalgaboyu aralığında analizini yapar. Bu dalga türü özelliklerinden dolayı, ince filmin yüzeyleri arasında ışığın yukarıdan aşağıya doğru yansıması eş fazlı olabilir, böylece yansımalar eklenir ya da faz dışında olabilir, bu durumda da yansımalar çıkartılır. Bu yansımalar ister eş-fazlı ister faz dışında olsun (ikisinin arasında bir yerde de olabilir) filmin özelliklerine ve kalınlığına bağlı olduğu gibi ışığın dalgaboyuna da bağlıdır. Yansımalar faz içinde olduğunda dalgaboyu ile film kalınlığı arasındaki bağıntı,

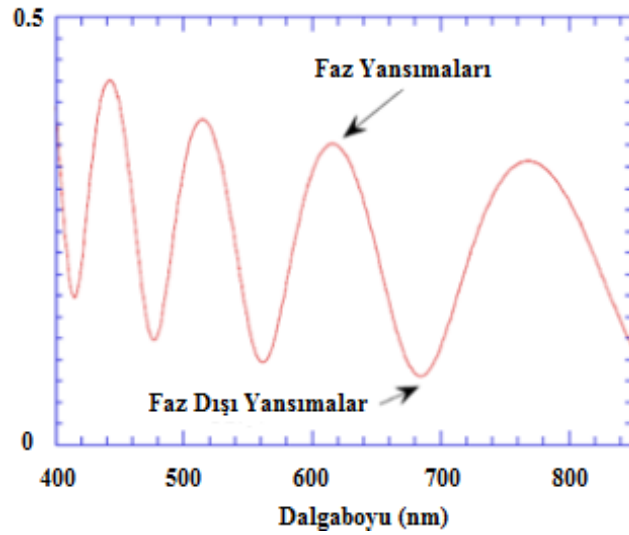
$$\lambda = (2 \times n d) / i \quad (3.11)$$

ile verilir. Burada ışığın dalgaboyu λ , n kırılma indisi, d filmin kalınlığı ve i bir tamsayıdır. Sonuç olarak yansıma spektrumunda yoğun dalgalanma özelliği vardır. Şekil 3.4.'te bu dalgalanma ile kırılma spektrumunun şekli verilmiştir. Dalgalanmanın titreşim genliği, kırılma indisi, filmlerin ve tabanın sönüm katsayısı tarafından belirlenir. Bundan dolayı, periyodun analizi ve bu dalgalanmaların titreşim genliği filmetrics cihazı tarafından çoklu ince filmlerin optiksel özellikleri (n ve k) ve kalınlığı belirlenebilir.



Şekil 3.3. Filmetrics F20 interferometrik ölçüm cihazının şematik gösterimi [64].

Filmlerin kalınlığının ölçümü iki aşama gerektirir. Bunlar, yansıma spektrumunun elde edilmesi ve elde edilen spektrumunun analiz edilmesidir. Film kalınlığını belirlemek



Şekil 3.4. Dalgalanma ile kırılma spektrumunun örneği [64].

için *Filmeasure* paket programı, ölçülen spektruma mümkün olduğu kadar yakın eşleşen bir yansıma spektrumu hesaplar ve bu spektrumdan yararlanarak film kalınlık değerini belirler [64].

KBD yöntemi ile elde edilen filmlerin kalınlık ölçümleri film yüzeylerinin farklı yerlerinden ölçüm alınarak belirlenmiştir ve film kalınlıkları Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. *Elde edilen filmlerin kalınlık değerleri.*

CdS (nm)		CuO (nm)	
Cam	FTO	Cam	FTO
160	358	490	2040

4. CdS ve CuO FİMLERİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

4.1. Giriş

Katı cisimler, kristal ve amorf olmak üzere doğada iki şekilde bulunurlar. Atom veya atom gruplarının uzayda belirli bir düzene sahip olarak dizilmesi sonucunda oluşan hallerine kristal adı verilir. Eğer katı madde içinde düzgün bir dizilim yoksa bu durum amorf olarak adlandırılır. Max Von Laue bir kristal üzerine x-ışınları düşürüldüğünde, bir kırınım ağının güneş ışınlarını kırınımına uğratmasına benzer şekilde, kristalinde x-ışınlarını kırınımına uğratacağını ileri sürmesi üzerine, CuS kristali ile yapılan çalışmalarda x-ışınlarının kristal yapıdan kırınımına uğradığı ve kırınım desenleri incelenerek kristal yapının belirlenmesine olanak sağlamıştır. Katıların bilinmeyen kristal yapılarını belirlemek veya kristal yapı parametrelerini tayin etmek için kırınım desenlerini kullanmak gerekir. Görünür ışık kullanarak kristalin içyapısı hakkında bilgi elde etmek mümkün değildir, çünkü görünür ışığın dalgaboyu, kristalin atom veya molekülleri arasındaki boşluklarla kıyaslandığında oldukça büyüktür. Katıların kristal yapısını incelemek için dalgaboyları görünür ışığa göre çok daha küçük olan, dalgaboyları kristal yapıdaki atomlar arası uzaklıkla kıyaslanabilir büyüklükte olan, x-ışını, nötron veya elektronlar kullanılır. Böylece, yalnız kristal yapıyı oluşturan birim hücrenin özellikleri yanında, atomların kristal içerisindeki yerleşim düzeni, kristal yapı bozuklukları, kristalde meydana gelen zorlanmalar gibi özellikleri incelenebilir [65].

4.2. X-Işınları

Katıların kristal yapılarını incelemek için en çok kullanılan kırınım tekniği x-ışını kırınım tekniğidir. X-ışınları kısa dalgaboylu olup dalgaboyları 0,1 ile 100 Å arasında değişen elektromanyetik dalgalar. Kristal çalışmalarında 0,1-2,5 Å arasındaki dalgaboylu monokromatik x-ışınları kullanılır [65].

X-ışınları, vakum ortam içerisinde metal tabakaya (bakır, molibden ve tungsten) yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların çarptırılması yolu ile elde edilir. Hızlandırılan elektronların metal tabakayla etkileşmesi sırasında, gelen elektronların metal atomları tarafından yavaşlatılması ve metaldeki çekirdeğe en yakın elektronların uyarılması ile x-ışınları ortaya çıkar. Hedef metale çarpan elektronlar ilk çarpışmada durdurulamaz, metal hedef içinde ardışık birçok çarpışma yapabilirler. Bu çarpışma sonucunda sürekli spektrum ortaya çıkar. Elektronun durdurulması sırasında kaybedilen

kinetik enerjinin yüzde biri veya daha az kısmı x-ışını ışımasına, geri kalan kısmı ise ısı enerjisine dönüşür. Etkileşme türüne göre iki tip x-ışını spektrumu elde edilir. Bunlar; üstüste binmiş şekilde oluşan bu spektrumlardan, elektronların yavaşlatılması yolu ile oluşan sürekli, diğeri de karakteristik x-ışınlarıdır [65].

4.2.1. Sürekli X-ışınları

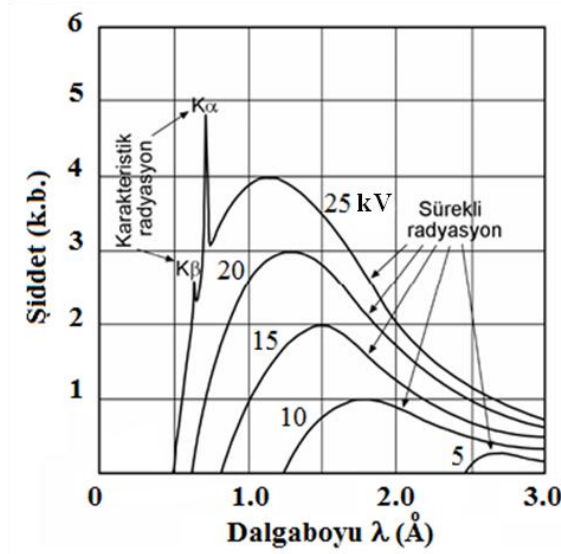
Bu tip x-ışınları hızlandırılmış elektronların yüksek atom numaralı (bakır, molibden ve tungsten) hedefe çarpıp birdenbire durdurulmaları sonucunda meydana gelir. Yüksek hızlı bir elektron, hedef atomun çekirdeğine yaklaştığında, çekirdeğin pozitif yükünden kaynaklanan elektrik alandan etkilenir ve elektron enerji kaybettiği için yavaşlar. Eğer elektron çekirdeğe çok yakından geçiyorsa rotası daha çok sapar ve daha çok enerji kaybeder. Aradaki mesafe daha fazla ise, etkileşim gücü azalacağı için daha az enerji kaybeder. Bu durum da elektron yavaşlar ve yön değiştirir. Bu da bir ivmelenmeye sebep olur. İvmelenen bir yük de azalan kinetik enerjisinden dolayı, elektromagnetik ışımaya yapar, dışarıya foton yayar. Sürekli enerji spektrumuna sahip bu fotonlara sürekli x-ışınları adı verilir. Şekil 4.1.'de molibden hedefli sürekli x-ışınları spektrumunun (5, 10, 15 ve 20 kV hızlandırma gerilimleri için) şematik gösterimi verilmiştir.

4.2.2. Karakteristik X-ışınları

Hedef atom üzerine gönderilen yüksek hızlı elektronlar hedef metale çarparak, metal atomunun yörüngesindeki bir elektronu koparır. Elektronun koştığı yörüngedeki boşluk diğer kabuklardan gelen elektron geçişiyle doldurulur. Bu elektron geçişinden kaynaklanan iki yörünge arasındaki enerji farkı kadar dışarıya bir foton yayımlanır. Enerji seviyeleri arasındaki farka eşit olan bu fotonlara karakteristik x-ışınları adı verilir. Yayımlanan enerji,

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.1)$$

eşitliği ile verilir. Burada; h planck sabiti ($6,62 \times 10^{-34}$ J·s), c ışık hızı (3×10^8 m/s), λ ise x-ışınının dalgaboyunu ifade etmektedir.

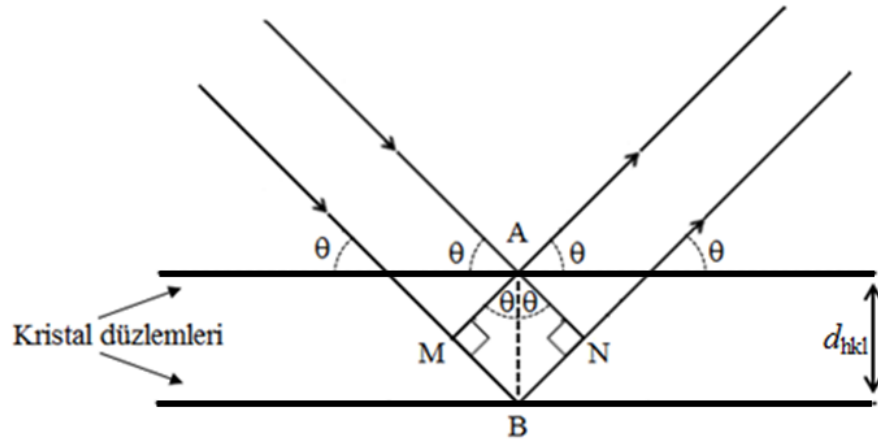


Şekil 4.1. Molibden hedefli x-ışınları spektrumunun şematik gösterimi [65].

Şekil 4.1.'de verilen spektrumda büyük dalgaboylarından küçük dalgaboylarına giderken x-ışını şiddeti maksimum bir değere kadar artmaktadır. X-ışını şiddeti maksimum değerinden sonra belirli bir dalgaboyu değerinde sıfırlanır. Bu dalgaboyu değeri elektronlar için hızlandırma gerilimi arttıkça azalmaktadır. Ayrıca hızlandırma gerilimi arttıkça maksimum şiddet değerine karşılık gelen dalgaboyu değeri de azalmaktadır. Diğer taraftan hızlandırma gerilimi 25 kV ve daha büyük gerilim değerlerinde (molibden hedef için) spektrumda K_{α} ve K_{β} pikleri meydana gelmektedir. Bu pikler hedef metalin karakteristik pikleridir. Buradaki K_{α} pikini meydana getiren ışınlar hemen hemen tek dalgaboylu (monokromatik) x-ışınlarıdır. Bu ışınlar katıların kristal yapısını belirlemede kullanılan x-ışınlarıdır [65].

Karakteristik x-ışınları katıların kırınım desenlerini oluşturur. X-ışını kırınımı katıların kristalografik özelliklerini, yapı kalitesini araştıran ve malzemeye hasar vermeyen en etkili karakterizasyon tekniğidir. X-ışını kırınımı, katı ve toz örneklerin yapılarındaki çeşitli kristal formlar veya fazlar hakkında bilgi veren analitik bir tekniktir. Eğer x-ışınları kristal düzlemlerinden saçılırsa, saçılan ışınlar yapıcı girişim meydana getirirler. Girişim oluşturan ışınlar, dedektörde kırınım pikini oluştururlar. Kırınım deseninde oluşan bu pikler sayesinde malzemenin kristalleşip kristalleşmediği, kristal yönelimi, örgü parametreleri, ortalama tanecik boyutu gibi kristal yapı özellikleri incelenebilmektedir.

X-ışınları kristal yapı üzerine düşürüldüğünde, katıdaki elektronlarla etkileşmesi sonucunda saçılma meydana gelir. X-ışınları kristaldeki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılır. Kristal düzlemlerinden meydana gelen bu saçılımlar *kırınım* olarak adlandırılır. Kırınım çok sayıda atomu içeren saçılma olayıdır. Kırınım olayında, kristale gelen x-ışınları kristal yüzeyinin altındaki atom düzlemlerine ulaşır, yani kırınım yüzeysel bir olay değildir.



Şekil 4.2. X-ışınlarının kristal düzlemleri tarafından kırınımı [65].

Kristal içerisinde bulunan atomlar periyodik olarak yerleşmiş olduklarından saçılan ışınlar arasında belirli faz bağlantıları vardır. Bu faz bağlantıları nedeniyle saçılma doğrultularının çoğunda yıkıcı girişim fakat çok az doğrultuda ise yapıcı girişim meydana gelir ve kırınım demetleri oluşur. Burada önemli olan girişimi oluşturan x-ışınları ve periyodik olarak yerleşmiş saçıcı merkezlerdir. Kristalin paralel düzlemlerinden saçılan x-ışınları yapıcı bir girişim oluşturduğu zaman kırınım deseninde bir kırınım piki gözlenir. Aralarındaki mesafe d_{hkl} (burada hkl kristal düzlemlerinin Miller indisleridir) olan paralel düzlemlerde meydana gelecek kırınım *Bragg Yasası* ile açıklanır.

Şekil 4.2.'de gösterildiği gibi kristal düzlemlerine gelen birbirlerine paralel x-ışınlarının her biri düzlemlerden ayrı ayrı yansımaya uğrar. Kristal düzlemlerinden yansıyan ışınlar tarafından alınan yol, λ 'nın tam katlarına eşit olduğunda düzlemlerden yansıyan ışınlar arasındaki faz farkı aynı olur. Faz farkı aynı olan iki ışın yapıcı girişim veya kırınımı oluşturur. Kırınımı oluşturan ışınlar arasındaki yol farkı,

$$\overline{MBN} = \overline{MB} + \overline{BN} \quad (4.2)$$

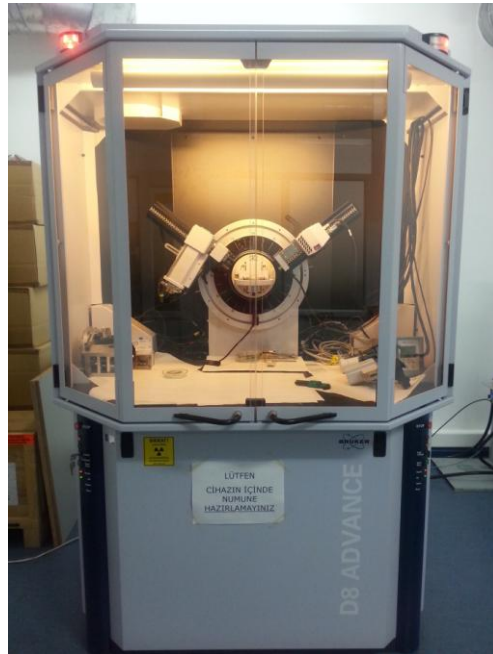
olarak verilir. Yol farkının kristal düzlemleri arasındaki bağıntı,

$$\overline{MBN} = d_{hkl} \sin \theta + d_{hkl} \sin \theta \quad (4.3)$$

ifadesi ile tanımlanır. Burada θ gelen ve yansıyan ışınların kristal düzlemleriyle yaptığı açıdır. *Bragg Yasası*'na göre bu yol farkı düzlemlerden yansıyan ışının dalgaboyunun tam katına eşit ise,

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (n = 1,2,3,\dots) \quad (4.4)$$

kristal düzlemlerinden kırınım gerçekleşir [65]. Elde edilen kırınım desenleri kullanılarak kristal yapı hakkında detaylı bilgi elde edilir. Bu çalışmada üretilen filmlerin x-ışını kırınım desenleri *Bruker D8 Advance X-ray Diffractometer*'sinden elde edilmiştir (Görsel 4.1.).



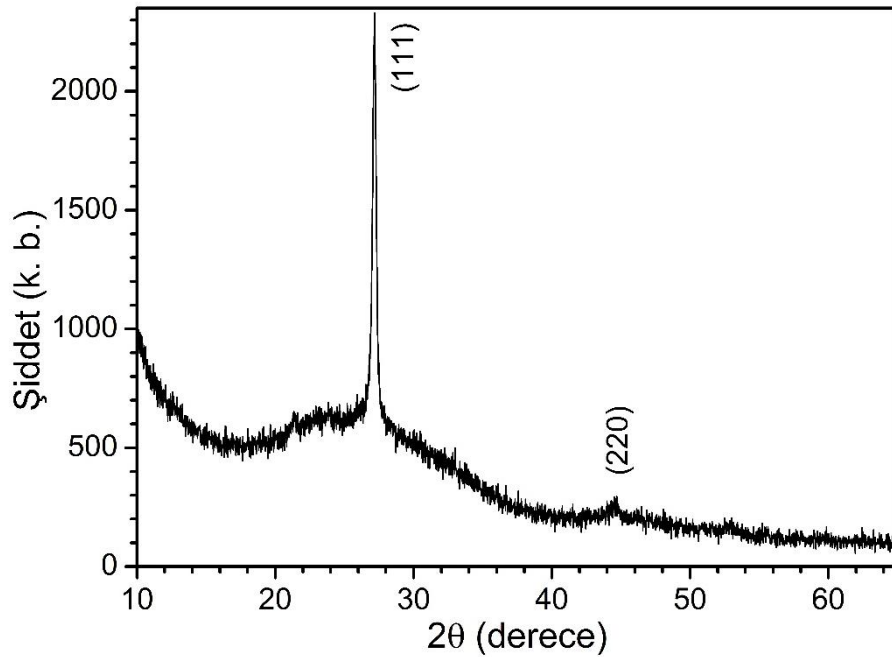
Görsel 4.1. Bruker D8 Advance X-ray difraktometre.

4.3. CdS Filmlerinin X-Işını Kırınım Desenleri

Mikroskop ve FTO cam tabanlar üzerine KBD yöntemiyle elde edilen CdS filmlerinin kırınım desenleri, oda sıcaklığında 0,1 derece/saniye tarama hızında ve 1,5406 Å dalgaboylu CuK_α x-ışınları kullanılarak elde edilmiştir. Kırınım desenlerinden kristal yapıya ait örgü sabitleri, kristal tanecik boyutları, kristal yapıdaki sıkışmalar, gerilmeler ve dislokasyon yoğunlukları belirlenmiştir.

4.3.1. Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin kristal yapısı

Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin kırınım deseni 2θ , 10-65° açı aralığında alınmıştır (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Cam taban üzerine üretilen CdS filminin x-ışını kırınım deseni.

X-ışını kırınım desenindeki $2\theta = 27,181^\circ$ (111) ve $44,693^\circ$ (220) pikler hkl Miller indislerine sahip kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu Miller indisleri ICDD (International Centre for Diffraction Data) 03-065-8873 kartından, ayrıca CdS filminin Hawleyite kristal yapıda kristallendiği belirlenmiştir. α -CdS (Hawleyite) kristali yüzey merkezli kübik (Face Centered Cubic) yapıdadır. CdS filminin kırınım deseninden (111) düzlemine ait pikin en şiddetli pik olduğu görülmektedir. Bu nedenle CdS filmi (111)

düzlemi doğrultusunda tercihi yönelime sahiptir. Yücel ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada KBD yöntemiyle elde edilen CdS filminin kübik ve tek kristal yapıda kristallendiği ifade edilmektedir [66].

Kübik kristal için, kristal düzlemleri ile örgü sabiti arasındaki bağıntı,

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{(h^2 + k^2 + \ell^2)}{a^2} \quad (4.5)$$

eşitliği ile verilir. Burada a , kristal örgü sabitidir. Eşitlik (4.4) ve (4.5) kullanılarak FCC CdS filminin kristal örgü sabiti hesaplanmış, standart ve hesaplanan örgü sabiti değerleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Cam taban üzerine üretilen CdS filminin d_{hkl} ve a değerleri.

	$(h \ k \ \ell)$	d_{hkl} (Å)		a (Å)	
		gözlenen	standart	gözlenen	standart
CdS	(111)	3,278	3,303	5,677	5,720
	(220)	2,026	2,022	5,730	

Çizelge 4.1. incelendiğinde standart ve hesaplanan örgü sabitleri arasında küçük de olsa fark olduğu görülmektedir. Bu fark kristal içinde gerilme ve sıkışma kuvvetlerinin varlığına işaret etmektedir.

Kristalde katkı atomları (impurity) kristal örgüdeki atomlardan farklı büyüklükte olabilir. Bu, kristalde sıkışmalar ya da genleşmeler meydana getirir. Bazı malzemelerde sıkışma, enerji bant aralığını artırırken genleşme durumunda ise azaltmaktadır. Örgü noktalarının aralarına giren atomlar sıkışma gerilmelerine sebep olurken, örgü noktalarında yerinde olmayan atomlar genleşme gerilmelerine sebep olur. Bu iki durum yani örgü noktalarının arasına sıkışmış atomlar veya boşluklar ilave katkılardır [67]. Küçük gerilme değerleri kristalde deformasyonun az olduğunun bir göstergesidir. Bir kristalde gerilmeler,

$$\varepsilon = \frac{d_{gözlenen} - d_{standart}}{d_{standart}} \quad (4.6)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanabilir. Eşitlik (4.6)'da ε malzemedeki gerilmeleri, $d_{gözlenen}$ malzemenin kırınım desenlerinden belirlenen kristal düzlemleri ve $d_{standart}$ ise

malzemenin standart kristal düzlemleri arasındaki mesafeyi göstermektedir. CdS filminin kırınım deseninden elde edilen gerilme değeri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Çizelgede gerilme değerinin negatif olması kristalde mikro gerilmelerin ve sıkışmış örgü düzlemlerinin varlığının bir ölçüsüdür.

Kristaldeki kristalcik büyüklüğü (grain size) kristal kusurlarına neden olmaktadır. Bu nedenle kristalcik boyutu hesaplanmalıdır. Elde edilen CdS filminin, x-ışını kırınım spektrumunda gözlenen piklerin yarı genişliklerinden yararlanılarak, kristallerin kristalcik boyutu *Debye-Scherrer* eşitliği ile hesaplanabilir [65]. *Debye-Scherrer* ifadesi;

$$D = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta} \quad (4.7)$$

olarak verilir. Burada D kristalcik boyutunu, B maksimum yarı pik genişliğini (full width at half maximum, FWHM), θ pikin gözleendiği açığı gösterir. Çizelge 4.2.'de cam taban üzerine elde edilen CdS filminin hesaplanan kristalcik boyutu değeri verilmiştir.

Kristalde kristalcik boyutuna bağlı olarak kristalde çizgisel kusurlar meydana gelmektedir. Bir kristalde düzlemlerin hatalı dizilmesi sonucunda oluşan ve çizgisel kusur olarak davranan dislokasyonlar oluşabilir. Dislokasyon yani kristal düzlemi kaymaları, genellikle kristalde görülen bir durumdur. Kristal düzlemlerinin kaymasıyla yeni kristal düzlemleri ortaya çıkar. Bu tür ilave düzlemlerin uyumsuzluğu sıkışma ve genişleme gerilmelerine sebep olur [67]. Dislokasyon yoğunluğu (γ), kristalin birim hacmindeki dislokasyon çizgilerinin uzunluğunu temsil eder. Küçük γ değeri filmlerin kristalleşmelerinin iyi olduğu anlamına gelir. Dislokasyon yoğunluğu,

$$\gamma = \frac{n}{D^2} \quad (4.8)$$

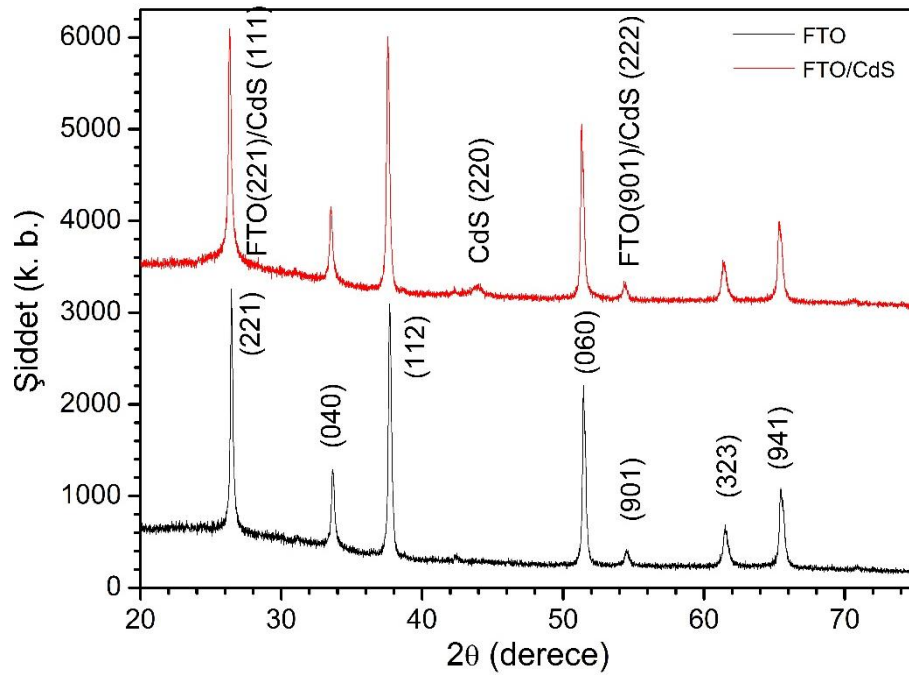
ifadesi kullanılarak hesaplanabilir [68]. Minimum γ değeri için $n=1$ alınır. Çizelge 4.2.'de CdS filminin dislokasyon değeri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Cam taban üzerine üretilen CdS filminin ϵ , D ve γ değerleri.

CdS	($h k \ell$)	ϵ ($\times 10^{-3}$)	D (nm)	γ ($\times 10^{15}$) (çizgi/m ²)
	(111)	-7,568	27,355	1,336

4.3.2. FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminin kristal yapısı

FTO ve FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminin kırınım deseni 2θ , 20-75° açı aralığında alınmıştır (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. FTO ve FTO/CdS filmlerine ait x-ışını kırınım desenleri.

FTO tabana ait kırınım deseni incelendiğinde FTO filminin ortorombik kristal yapıda kristallendiği belirlenmiştir (ICDD: 01-082-2194). FTO taban üzerine üretilen CdS filminin kırınım deseni incelendiğinde $2\theta=43,886^\circ$ deki pikin dışındaki piklerin ($2\theta=26,948^\circ$ FTO taban- $26,457^\circ$ CdS ve $54,551^\circ$ FTO taban- $54,474^\circ$ CdS) FTO filmine ait kırınım desenine ait piklerle aynı açı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu kırınım deseni CdS filminin (ICDD: 01-089-0440) numaralı kartı göz önünde bulundurularak incelendiğinde CdS filminin piklerinin FTO filmine ait piklerin açı değerlerine çok yakın pik değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum Çizelge 4.3.'te açık bir şekilde görülmektedir. Bu durumda CdS filminin kristallenmesini ifade

eden sadece (220) piki değil Çizelge 4.3.'te belirtilen diğer piklere ait kristal yönelimlerine de sahip olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan FTO filmindeki kristallenmenin CdS filmindeki kristallenmeden daha iyi olması nedeniyle yakın açı değerlerine sahip piklerin FTO filmine ait pikler tarafından perdelenmiş olduğu düşünülmektedir. FTO filmi üzerine büyütülen CdS filminin yüzey merkezli kübik yapıda kristallendiği belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. FTO ve CdS filmine ait ICDD kart numaralarına karşılık gelen açı değerleri.

FTO		CdS	
(h k l)	2θ (°)	(h k l)	2θ (°)
(221)	26,948	(111)	26,457
(040)	33,590	(220)	43,886
(112)	37,768	---	---
(060)	51,294	---	---
(901)	54,551	(222)	54,474
(323)	61,350	---	---
(941)	65,520	---	---

Eşitlik (4.5) kullanılarak FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin örgü sabiti hesaplanmıştır. Çizelge 4.4.'te d_{hkl} ve a örgü sabiti değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4. FTO cam taban üzerine üretilen CdS filminin d_{hkl} ve a değerleri.

	(h k l)	d_{hkl} (Å)		a (Å)	
		gözlenen	standart	gözlenen	standart
FTO/CdS	(111)	3,382	3,365	5,857	5,830
	(220)	2,049	2,061	5,795	
	(222)	1,687	1,682	5,843	

Filmlerin kristal yapısı üzerine tabanların etkisi bilinmektedir. Cam ve FTO taban üzerine elde edilen CdS filmlerinin aynı yüzey merkezli kübik yapıda olduğu ve örgü sabiti değerlerinin de birbirine yakın olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.5.). ITO cam taban üzerine KBD yöntemiyle CdS filmi elde edilen bir çalışmada, filmin kübik yapıda olduğu ifade edilmektedir. Genellikle KBD metoduyla elde edilen tavlanmamış CdS

filmlerinde kübik faz gözlenmektedir [15]. Çizelge 4.5. incelendiğinde her iki taban üzerine üretilen CdS filmlerinin örgü sabiti değerlerinin arasında büyük fark olmadığı görülmektedir. Bu durumda tabanların CdS filmlerinin kristal yapısı üzerine etkisi olmadığı sonucu çıkarılabilir.

Çizelge 4.5. Tabanlara göre elde edilen CdS filmlerinin a değerleri karşılaştırması.

a (Å)	Taban	$(h k \ell)$			
		(111)	(220)	(222)	(331)
	Cam	5,677	5,730	---	---
	FTO	5,857	5,795	5,843	5,792

Çizelge 4.4.'te CdS kristalinin hesaplanan ve standart d_{hkl} değerleri karşılaştırıldığında farklılık olduğu görülmektedir. Bu farklılık kristal içindeki örgü gerilmelerinin bir sonucudur. Eşitlik (4.6-8) kullanılarak CdS kristalinin gerilme (ϵ), kristalcik boyutu (D) ve dislokasyon yoğunluğu (γ) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 4.6.'da verilmiştir. FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminde gerilme değerlerinin pozitif ve negatif olmasından dolayı kristalde hem makro hem de mikro gerilmelerin olduğu söylenebilir. Çizelgede gerilme değerinin pozitif olması kristalde makro gerilmelerinin varlığının ve örgü düzlemlerinin deformasyon olmayan duruma göre genişlediğinin bir ölçüsüdür. Ayrıca makrogerilme değerinin küçük olması piklerin pozisyonlarındaki kaymaların küçük olduğunu yani kusurların ve deformasyonun az olduğunu ifade eder.

Çizelge 4.6. FTO taban üzerine üretilen CdS filminin ϵ , D ve γ değerleri.

CdS	$(h k \ell)$	ϵ $\times 10^{-3}$	D (nm)	γ $\times 10^{15}$ (çizgi/m ²)
		(111)	5,052	38,483	0,675
	(220)	-5,822	12,084	6,848
	(222)	2,972	25,053	1,593

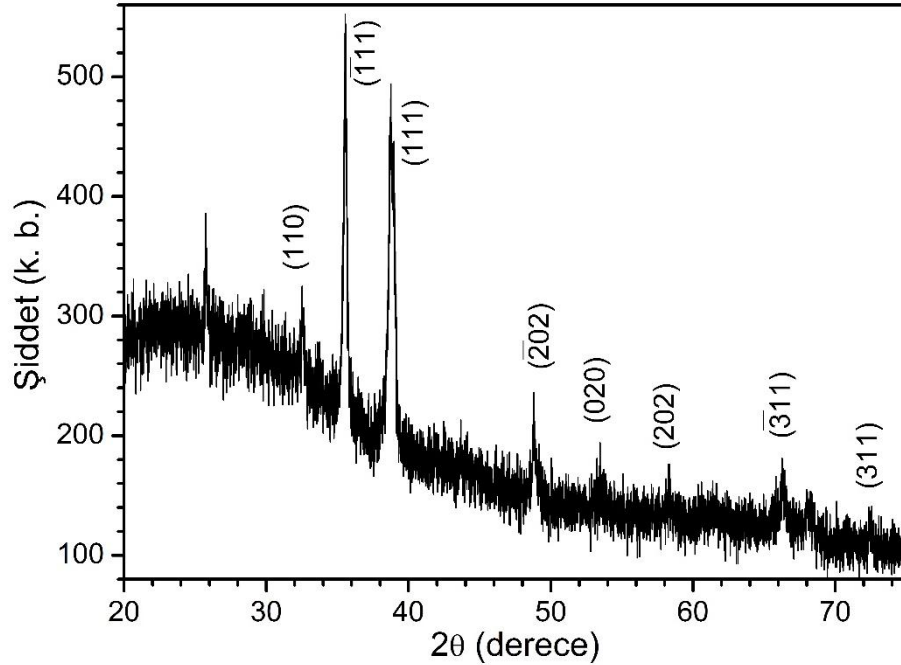
4.4. CuO Filmlerinin X-Işını Kırınım Desenleri

Mikroskop ve FTO cam tabanlar üzerine KBD yöntemiyle elde edilen CuO filmlerinin kırınım desenleri, oda sıcaklığında 0,1 derece/saniye tarama hızında, 1,5406 Å dalgaboylu CuK_α x-ışınları kullanılarak elde edilmiştir. Kırınım desenlerinden kristal

yapıya ait örgü sabitleri, kristal tanecik boyutları, kristal yapıdaki sıkışmalar, gerilmeler ve dislokasyon yoğunlukları belirlenmiştir.

4.4.1. Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin kristal yapısı

Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin kırınım deseni 2θ , $10-75^\circ$ açı aralığında alınmıştır (Şekil 4.5.). X-ışını kırınım desenindeki $2\theta = 32,516^\circ$ (110), $35,547^\circ$ ($\bar{1}11$), $38,754^\circ$ (111), $48,804^\circ$ ($\bar{2}02$), $53,459^\circ$ (020), $58,278^\circ$ (202), $66,263^\circ$ ($\bar{3}11$), ve $72,573^\circ$ (311) pikler hkl indislerine sahip kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir. CuO filminin ICDD 01-080-1916 kartından taban merkezli monoklinik kristal yapıda kristallendiği belirlenmiştir. Kırınım desenindeki ($\bar{1}11$) ve (111) düzlemlerine ait piklerin diğer piklerden daha şiddetli olduğu görülmektedir. CuO filminin kırınım deseni üzerindeki piklerin şiddetli ve dar yarı pik genişlikli olması filmlerin kristalleşme düzeylerinin iyi olduğunu göstermektedir. Bu pik şiddetlerinin birbirine yakın değerde olması CuO filmindeki kristallenmenin rastgele dağılıma (randomly oriented) sahip olduğunu gösterir.



Şekil 4.5. Cam taban üzerine üretilen CuO filminin x-ışını kırınım deseni.

Çizelge 4.7. Cam taban üzerine üretilen CuO filminin d_{hkl} değerleri.

	$(h k \ell)$	d_{hkl} (Å)	
		gözlenen	standart
CuO	(110)	2,751	2,750
	($\bar{1}$ 11)	2,523	2,523
	(111)	2,321	2,323
	($\bar{2}$ 02)	1,864	1,866
	(020)	1,712	1,713
	(202)	1,581	1,580
	($\bar{3}$ 11)	1,409	1,409
	(311)	1,301	1,304

Çizelge 4.7.'de CuO kristalinin gözlenen ve standart d değerleri incelendiğinde aralarında farklılık olduğu görülmektedir. Bu farklılık CuO kristalinde örgü gerilmelerinin olduğunu gösterir. Eşitlik (4.6-8)'den yararlanılarak CuO filmi için ε , D ve γ değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 4.8.'de verilmiştir. Cam taban üzerine elde edilen CuO filmde gerilmelerin pozitif ve negatif değerlerini aldığı görülmektedir. Bu durumda kristalde hem makro hem de mikro gerilmelerin olduğu söylenebilir. Elde edilen değerler literatürde KBD yöntemiyle cam tabanlar üzerine elde edilen CuO filmlerinin kristalcik boyutu, gerilme ve dislokasyon yoğunluğu değerleriyle uyumludur [69].

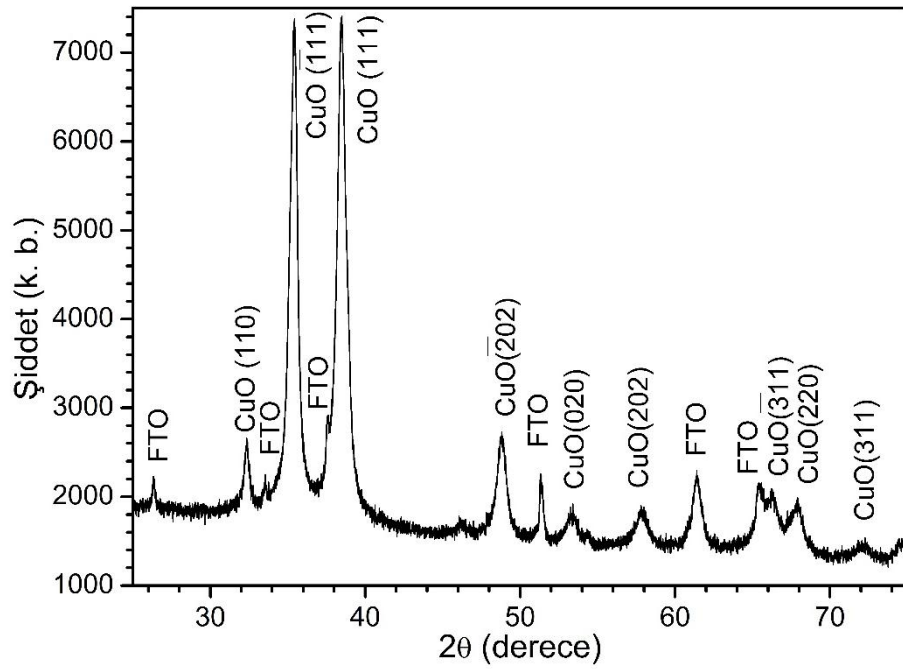
Çizelge 4.8. Cam taban üzerine üretilen CuO filminin ε , D ve γ değerleri.

	$(h k \ell)$	ε $\times 10^{-3}$	D (nm)	γ $\times 10^{15}$ (çizgi/m ²)
CuO	(110)	0,363	53,236	0,352
	($\bar{1}$ 11)	0	29,225	1,170
	(111)	-0,860	17,133	3,406
	($\bar{2}$ 02)	-1,071	25,605	1,525
	(020)	-0,583	---	---
	(202)	0,632	--	---
	($\bar{3}$ 11)	0	33,414	0,895
	(311)	-2,300	---	---

4.4.2. FTO cam taban üzerine elde edilen CuO filmin kristal yapısı

FTO cam taban üzerine elde edilen CuO filminin kırınım deseni 2θ , $25-75^\circ$ açı aralığında alınmıştır (Şekil 4.6.). CuO filminin taban merkezli monoklinik yapıda kristallendiği belirlenmiştir (ICDD: 01-080-1916). Şekil 4.5.'te verilen cam taban

üzerine elde edilen CuO ve Şekil 4.6.'da FTO taban üzerine elde edilen CuO filmlerinin kırınım desenleri karşılaştırıldığında kristal FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin pik şiddetlerinin arttığı ve cam taban üzerine elde edilen CuO filminin kırınım deseninde gözlenmeyen piklerin de belirgin hale geldiği görülmektedir (Şekil 4.6.'da CuO (220) piki). Ayrıca $(\bar{1}11)$ ve (111) pik şiddetlerinin birbirine yakın değerde olması CuO filmindeki kristallenmenin rastgele dağılıma (randomly oriented) sahip olduğunu gösterir.



Şekil 4.6. FTO cam taban üzerine üretilen CuO filminin x-ışını kırınım deseni.

Çizelge 4.9. FTO cam taban üzerine üretilen CuO filminin d_{hkl} değerleri.

	$(h k \ell)$	d_{hkl} (Å)	
		gözlenen	standart
CuO	(110)	2,762	2,750
	$(\bar{1}11)$	2,530	2,523
	(111)	2,336	2,323
	$(\bar{2}02)$	1,864	1,866
	(020)	1,714	1,713
	(202)	1,593	1,580
	$(\bar{3}11)$	1,410	1,409
	(220)	1,379	1,377
	(311)	1,306	1,304

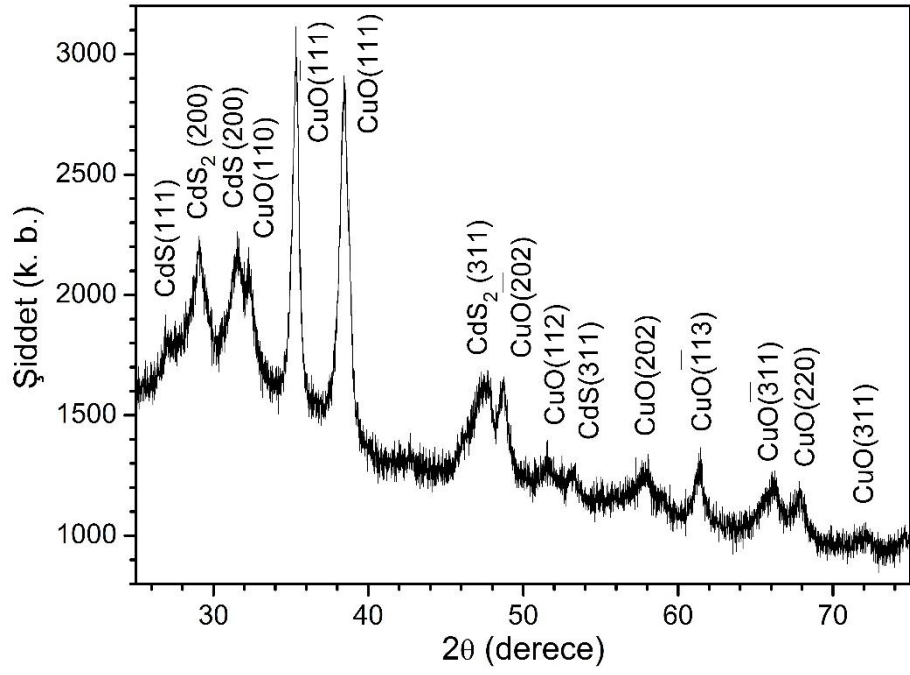
Çizelge 4.9.'da FTO/CuO kristalinin gözlenen ve standart d_{hkl} değerleri incelendiğinde aralarında farklılık olduğu görülmektedir. Farklılıklar FTO/CuO kristalinde örgü gerilmelerinin nedenidir. Eşitlik (4.6-8)'den yararlanılarak FTO/CuO kristalindeki sırasıyla ϵ , D ve γ değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 4.10.'da verilmiştir. FTO taban üzerine elde edilen CuO filmde gerilme değerleri pozitif ve negatif olduğu için kristalde hem makro hem de mikro gerilmelerin olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.10. FTO taban üzerine üretilen CuO filminin ϵ , D ve γ değerleri.

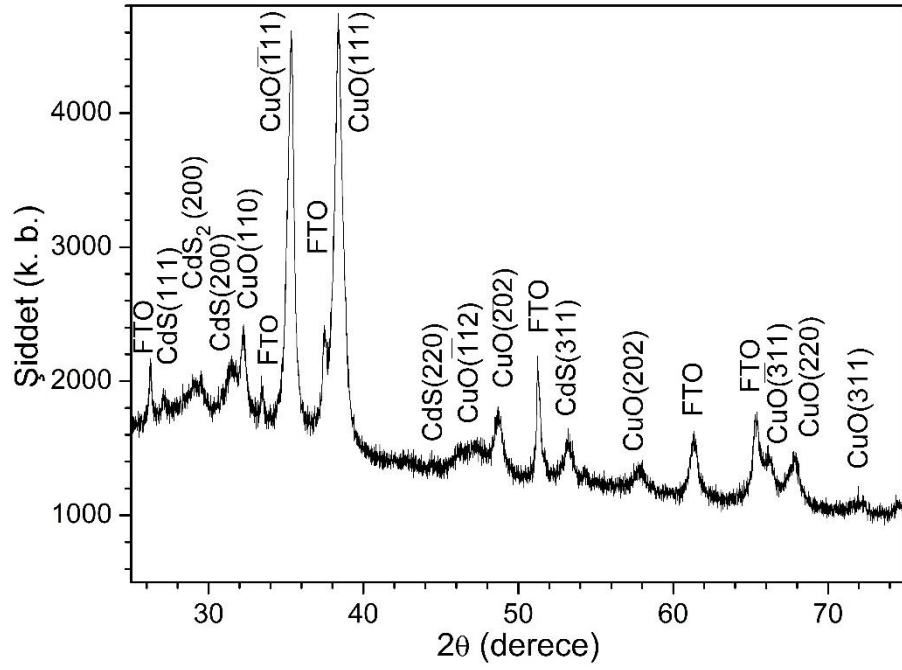
	$(h k \ell)$	ϵ $\times 10^{-3}$	D (nm)	γ $\times 10^{15}$ (çizgi/m ²)
CuO	(110)	4,363	22,153	2,037
	($\bar{1}$ 11)	2,774	14,119	5,016
	(111)	5,596	11,428	7,657
	($\bar{2}$ 02)	-1,071	11,819	7,158

4.5. Cam/CuO/CdS ve FTO/CuO/CdS Yapılarının X-Işını Kırınım Desenleri

Cam/CuO/CdS ve FTO/CuO/CdS yapılarının kırınım deseni 2 θ , 25-75° açı aralığında alınmıştır (Şekil 4.7. ve 4.8.). Kırınım desenleri incelendiğinde hem cam taban üzerine hem de FTO taban üzerine üretilen filmlerin kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir (CdS için 03-065-8873, CuO için 01-080-1916, CdS₂ için 01-079-3166). Böylelikle hem cam taban üzerinde hem de FTO taban üzerinde yarıiletken eklem yapısının oluştuğu söylenebilir.



Şekil 4.7. Cam/CuO/CdS yapısının x-ışını kırınım deseni.



Şekil 4.8. FTO/CuO/CdS yapısının x-ışını kırınım deseni.

5. CdS ve CuO FİMLERİNİN OPTİK ÖZELLİKLERİ

5.1. Giriş

Çeşitli uygulamalarda kullanılacak olan yarıiletken malzemelerin teknolojideki kullanım alanlarını belirleyebilmek amacı ile bu malzemelerin optik özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sayede yarıiletken malzemenin optiksel spektrumlarının elde edilip incelenmesi ile malzemenin bant yapıları, elektron ve hollerin davranışları hakkında bilgiler elde edilebilir.

5.2. Işığın Yarıiletken Malzeme ile Etkileşimi

Işığın madde ile etkileşmesi farklı şekillerde meydana gelir. Bu etkileşmeler ışığın maddesel ortamdan geçerken kırılması, yansınması veya madde tarafından soğurulması şeklinde olabilir. Maddeler ışığı geçirip geçirmeme özelliklerine göre çeşitlilik gösterirler. Örneğin, metaller parlaktır, üzerine düşen ışığın büyük bir kısmını yansıtıken, çok az kısmını soğurur. Su saydamdır, üzerine düşen ışığın büyük bir kısmını geçirirken çok az kısmını yansıtır. Boyalı cam ve değerli taşlar bazı renkleri geçirir, fakat diğerlerini soğururlar. Süt, beyaz renktedir ve gelen ışığı bütün yönlerde saçar [70].

Bir malzemeye gelen elektromanyetik dalgalar ile bu malzemede bulunan elektriksel yüklerin etkileşmesi sonucunda ortaya çıkan enerji kaybı soğurma (absorption) olarak adlandırılır. Soğurma sürecinde, bir foton bir elektronu düşük bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine uyarabilir. Böylece, soğurma spektrumundaki enerji seviyeleri arasında meydana gelen geçişler, yarıiletkenin yasak enerji aralığı ve bant tipi hakkında bilgi verir.

Enerji kaybı malzemenin atomları tarafından kullanılır. Kalınlığı d olan bir malzeme elektromanyetik dalga ile etkileştiğinde, gelen ışık şiddetinin d kalınlıklı malzemeden çıkan ışık şiddetine bağlılığı,

$$I_{geçen} = I_{gelen} e^{-\alpha d} \quad (5.1)$$

eşitliği ile verilir. Burada $I_{geçen}$ malzemeden geçen elektromanyetik dalganın şiddetini, I_{gelen} malzemeye gelen elektromanyetik dalganın şiddetini, α soğurma katsayısını ifade etmektedir. Işığın yarıiletken içinde ne kadar soğurulacağı malzemenin soğurma

katsayısına ve kalınlığına bağılıdır. Eşitlik (5.1)'e göre, soğurma katsayısı büyüdükçe, malzemedeki geçen elektromanyetik dalganın şiddeti azalır. Burada soğurma katsayısı malzemenin cinsine ve elektromanyetik dalganın dalga boyuna bağılıdır.

Yarıiletken bir malzeme üzerine gönderilen bir foton yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit ya da daha büyük bir enerji seviyesine sahip ise, bu enerji yarıiletken tarafından soğurularak valans bandındaki bir elektron uyarılarak iletim bandına geçer. Bu olay soğurma olayı olarak adlandırılır. Soğurma katsayısı α ,

$$\alpha = \frac{A}{d} \quad (5.2)$$

ifadesi kullanılarak bulunur. A , soğurma potansiyelini (absorbance) ifade etmektedir. Malzeme üzerine gönderilen fotonların enerjisi yasak enerji aralığından daha küçük ise yarıiletken malzeme tarafından soğurulmadan fotonlar malzemeyi terk ederler. Bu yüzden yarıiletkenler kısa dalga boylu fotonlar için soğurucu, uzun dalga boylu fotonlar için ise saydamdırlar. Yarıiletken malzemedeki geçirgenlik ifadesi, geçen ışık şiddetinin gelen ışık şiddetine oranı olarak,

$$T = \frac{I_{geçen}}{I_{gelen}} \quad (5.3)$$

yazılır. Burada T yarıiletkenin optik geçirgenliğini ifade eder. Geçirgenlik ve soğurma arasındaki bağıntı,

$$T = 10^{-A} \quad (5.4)$$

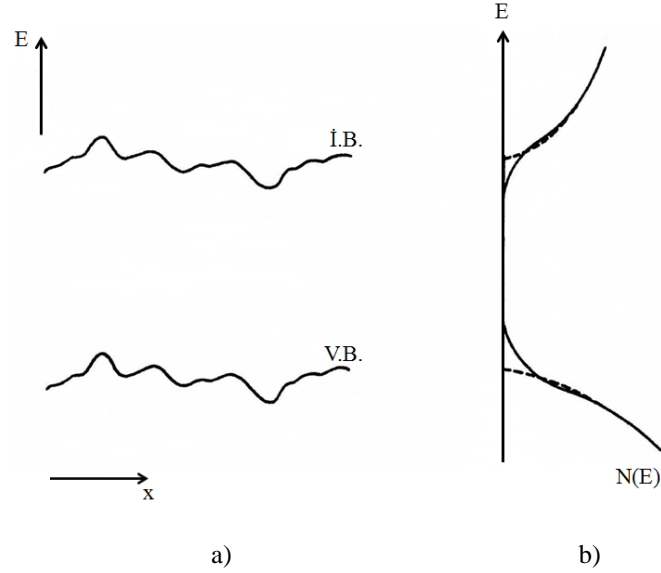
$$A = \log_{10} \left(\frac{I_{gelen}}{I_{geçen}} \right) \quad (5.5)$$

eşitlikleriyle ifade edilir [70].

5.2.1. Bant Sarkmaları

Yarıiletken içinde katkı atomları, atomların araya sıkışması, örgü noktalarındaki boşluklar, kristal içindeki gerilmeler, sıkışmalar ve dislokasyonlar gibi kristal kusurları

yarıiletkenin optik özelliklerine etki eden faktörlerdir. Kristal kusurlarının artmasının sonucu olarak yarıiletkenin yasak enerji aralığında katkı bandı oluşur. Katkı bandı yasak enerji aralığında sarkmalar şeklinde kendini gösterir. Şekil 5.1.'de yasak enerji aralığındaki sarkmalar şematik olarak gösterilmiştir [67].



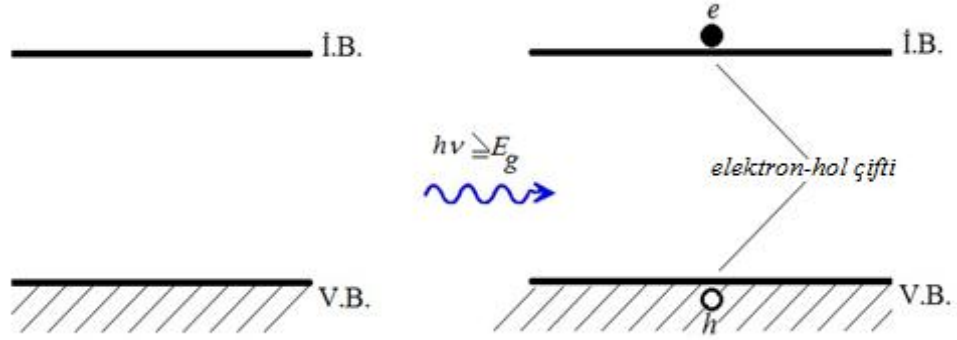
Şekil 5.1. a) Safsızlık atomlarının birbirleriyle Coulomb etkileşmesi nedeniyle bant kenarlarının pertürbe olması **b)** Bant sarkmalarındaki durum yoğunlukları [67].

5.3. Temel Soğurma

Geniş yasak enerji aralığına sahip yarıiletkenlerin bant yapılarının araştırılmasında optik soğurma spektrumundan yararlanılır. Optik soğurma yönteminde, enerjisi bilinen bir foton, bir elektronu düşük enerjili bir durumdan yüksek enerjili bir duruma uyarır. Böylece yarıiletken üzerine gönderilen ve yarıiletkenden geçen ışınların incelenmesi ile bir elektronun yapabileceği mümkün bütün enerji seviyelerine geçişleri bulunabilir [67].

Temel soğurma, yarıiletken üzerine gelen bir foton enerjisi, yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya ondan daha büyük olması durumunda, yarıiletkenin valans bandındaki bir elektronun bu fotonun enerjisini soğurarak valans bandından iletim bandına geçmesi olarak tanımlanır. Eğer gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığından küçükse ($h\nu < E_g$) bu durumda foton soğurulmaz ve foton enerjisini yarıiletken atomlarına aktarır. Böylece yarıiletkenin ısınmasına neden olur. Eğer gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit ya da büyükse ($h\nu \geq E_g$) bu durumda gelen foton valans elektronu tarafından soğurulur ve valans bandındaki

elektron iletim bandına geçer. Bu geçişte elektron valans bandında bir hol bırakır ve böylece iletim bandında bir elektron, valans bandında bir hol oluşarak elektron-hol çifti meydana gelir. (Şekil 5.2.).



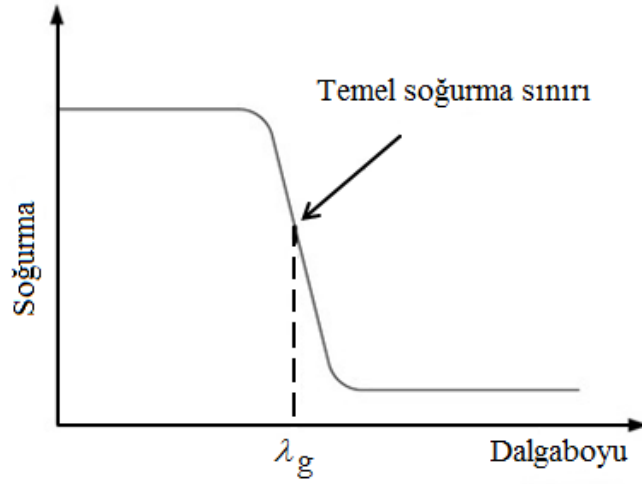
Şekil 5.2. Valans bandındaki eletronun iletim bandına geçişi, (Temel soğurma).

Planck sabiti h , fotonun frekansı ν , fotonun dalgaboyu λ_g ve ışığın boşluktaki hızı c olmak üzere,

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda_g} \geq E_g \quad (5.6)$$

olarak ifade edilir. Yarıiletkenlerde temel soğurma dalgaboyu değişimi Şekil 5.3.'te gösterilmiştir. Şekilde soğurmanın olduğu ve olmadığı iki bölge bulunmaktadır. Bu iki bölgeyi ayıran sınır temel soğurma sınırı olarak adlandırılır. Bu durum soğurma spektrumunda büyük dalgaboylarından küçük dalgaboylarına doğru λ_g dalgaboyundan itibaren soğurmada keskin bir artış olarak gözlenir. λ_g dalgaboyundan daha büyük değerlerde soğurma bir denge değerine ulaşır ve yarıiletken ışığı geçirgen bir yapı gösterir.

Yarıiletkende direkt ve indirekt geçiş olmak üzere iki tür geçiş meydana gelir. İki durumda da geçişte kullanılan yollar farklı olmakla beraber elektronlar valans bandından iletim bandına geçerler [67].



Şekil 5.3. Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu.

5.3.1. Direkt bant geçişi

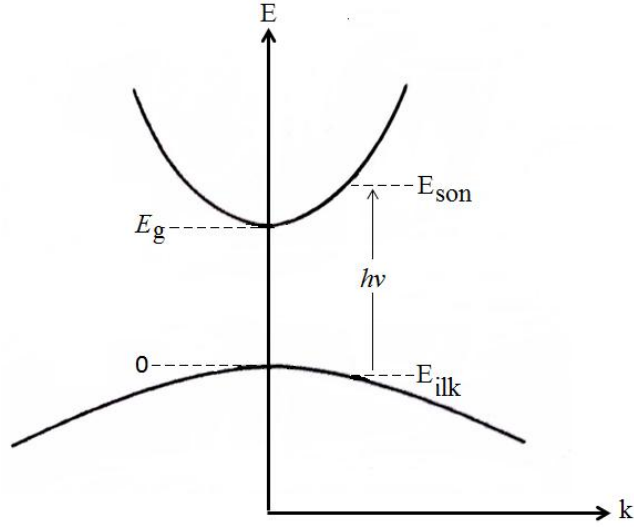
Direkt bant geçişli yarıiletkenlerde Şekil 5.4.'te gösterildiği gibi, yarıiletkenin valans bandının en üst noktası ile iletim bandının en alt noktası enerji-momentum uzayında aynı \vec{k} (dalga vektörü, momentum) değerinde,

$$\Delta\vec{k} = \vec{k}_{son} - \vec{k}_{ilk} \quad (5.7)$$

$$\Delta\vec{k} = 0 \quad (5.8)$$

bulunurlar. Bu geçiş valans bandındaki elektronun momentumunda bir değişiklik olmaksızın iletim bandına geçmesi ile meydana gelir. Valans bandında bulunan bir elektron, yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya bu değerden daha büyük olan bir fotonu soğurarak momentumunda bir değişiklik olmaksızın iletim bandına geçer. Bu geçiş sonrasında valans bandında bir hol meydana gelir. Böylelikle iletim bandına geçen elektron dalga vektörünü değiştirmez ve momentum korunur ($\Delta\vec{k} = 0$).

Şekil 5.4.'e göre valans bandındaki elektron için E_{ilk} , yarıiletkenin ilk durum enerji seviyesini; E_{son} , iletim bandındaki elektron için son durum enerji seviyesini göstermektedir. $h\nu$ enerjili fotonu soğurarak E_{ilk} enerji seviyesinden E_{son} enerji seviyesine geçen elektronun enerjisi için,



Şekil 5.4. Bir yarıiletkenin direkt bant geçişinin şematik gösterimi [67].

$$E_{son} = h\nu - |E_{ilk}| \quad (5.9)$$

yazılır. Parabolik bantlarda,

$$E_{son} - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (5.10)$$

$$E_{ilk} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (5.11)$$

ile verilir. Burada m_e^* elektronun, m_h^* holün etkin kütlelerini göstermektedir. Eşitlik (5.10) ve (5.11) eşitlikleri (5.9)'da yerine yazıldığında,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (5.12)$$

ifadesi elde edilir. Direkt geçişlerde soğurma katsayısı α ile gelen fotonun enerjisi arasındaki bağıntı,

$$\alpha(h\nu) = A^* (h\nu - E_g)^n \quad (5.13)$$

ifadesi ile verilir. Burada n direkt bant geçişi bir malzeme için 1/2 (izinli geçiş) veya 3/2 (yasaklı geçiş) değerlerini alabilen bir sabiti ifade etmektedir. A^* ise,

$$A^* \approx \frac{q^2 \left(2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*}\right)^{3/2}}{nch^2 m_e^*} \quad (5.14)$$

ifadesi ile verilen bir sabittir [67].

5.3.2. İndirekt bant geçişi

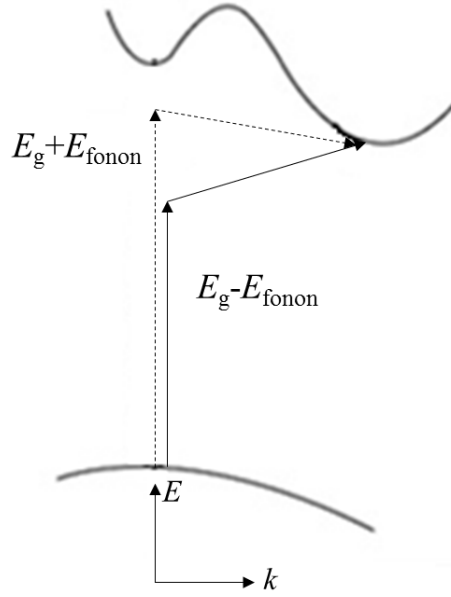
İndirekt bant yapılı yarıiletkenlerde, Şekil 5.5.'te görüldüğü gibi, yarıiletkenin valans bandının en üst noktası ile iletim bandının en alt noktası enerji-momentum uzayında aynı \vec{k} değerinde değildir ($\Delta\vec{k} \neq 0$). Bu durumda valans bandındaki bir elektron en az yasak enerji aralığı kadar bir enerjiyi soğurarak momentumunu değiştirmeksizin iletim bandına çıkamaz, ancak momentumunu değiştirerek (artırarak veya azaltarak) iletim bandına geçer. Bu geçiş indirekt geçiş olarak tanımlanır. Momentum değişikliği fonon soğurulması veya yayılması ile gerçekleşir. Fonon, bir kristal örgüsünde bulunan atomların titreşimleridir ve her bir fononun karakteristik enerjisi bulunmaktadır. Fonon soğurması ile yapılan geçiş,

$$h\nu_s = E_{son} - E_{ilk} - E_{fonon} \quad (5.15)$$

Fonon yayılması ile yapılan geçiş ise,

$$h\nu_y = E_{son} - E_{ilk} + E_{fonon} \quad (5.16)$$

eşitlikleri ile tanımlanmaktadır. Burada E_{fonon} , fonon enerjisini ifade etmektedir. Bu geçişlerde foton, elektronun iletim bandına geçebilmesi için yarıiletkenin yasak enerji aralığı kadar ya da bu değerden daha büyük olan gerekli enerjiyi sağlar.



Şekil 5.5. Bir yarıiletkeninde indirekt bant geçişinin şematik gösterimi [67].

Fonon ise valans bandından iletim bandına geçen elektronun momentum korunumunu sağlar. Fonon soğurularak yapılan geçiş için, soğurma katsayısı,

$$\alpha_s(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_{fonon})^n}{\exp\left[\frac{E_{fonon}}{kT}\right] - 1} \quad (5.17)$$

ile ifade edilir. Fonon yayılımlı geçiş için soğurma katsayısı,

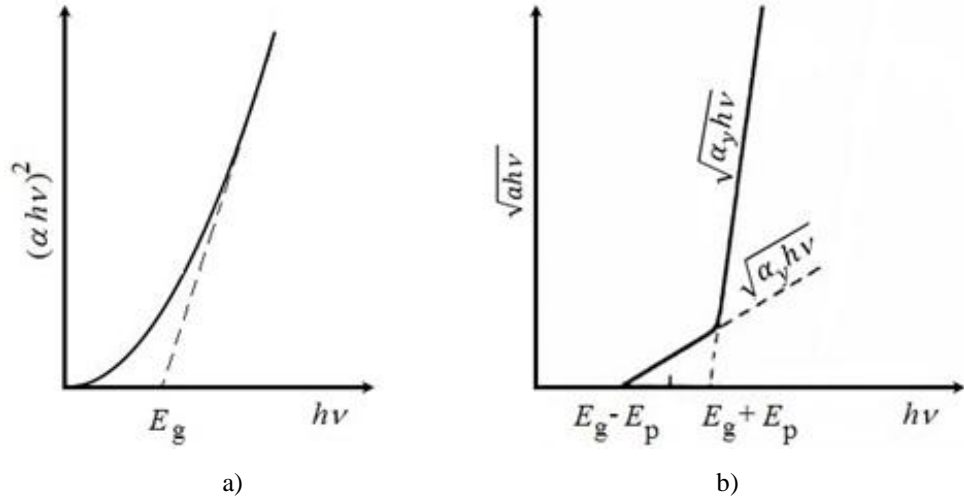
$$\alpha_y(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_{fonon})^n}{1 - \exp\left[-\frac{E_{fonon}}{kT}\right]} \quad (5.18)$$

ile ifade edilir. Burada n , indirekt bant geçişli bir yarıiletken için 2 (izinli geçiş) veya 3 (yasaklı geçiş) değerlerini alabilen bir sabiti ifade etmektedir [67].

5.4. Yarıiletkenlerin Yasak Enerji Aralıklarının Optik Yöntemle Belirlenmesi

Yarıiletkenin valans bandından iletim bandına elektron geçişleri temel soğurma spektrumunda gösterilen (Şekil 5.3.) λ_g değerinde başlar. Geniş bant aralıklı yarıiletken

malzemelerin yasak enerji aralıklarını belirlemek için optik metot kullanılır. Direkt bant aralıklı bir yarıiletken malzemede soğurma spektrumundan faydalanılarak $(\alpha hv)^2$ 'nin hv enerjisine göre değişim grafiği çizilir ve grafiğin lineer kısmının hv eksenini $(\alpha hv)^2=0$ 'da kestiği noktanın enerji değeri, yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı değerini verir (Şekil 5.6.a.).



Şekil 5.6. a) Yarıiletkenlerde direkt b) indirekt bant geçişinin grafiksel gösterimi [67].



Görsel 5.1. Shimadzu Solidspec-3700 DUV model UV-VIS-NIR Spektrofotometre cihazı.

Bunun için filmlerin soğurma spektrumlarından faydalanılarak α katsayısı eşitlik (5.2)'den yararlanarak hesaplanır ve $(\alpha hv)^{1/n} \sim hv$ değişiminin grafiği çizilir. Burada n izinli direkt geçişler için 1/2, izinsiz direkt geçişler için 3/2, izinli indirekt geçişler için

2, izinsiz indirekt geçişler için 3 değerini alır (Şekil 5.6.b.). Bu çalışmada üretilen filmlerin soğurma ve geçirgenlik spektrumlarını belirleyebilmek için *Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarı*'mızda bulunan Shimadzu SolidSpec-3700 DUV (Deep Ultraviolet) model UV-VIS-NIR spektrofotometre kullanılmıştır (Görsel 5.1.).

5.5. CdS Filmlerinin Soğurma ve Geçirgenlik Spektrumları

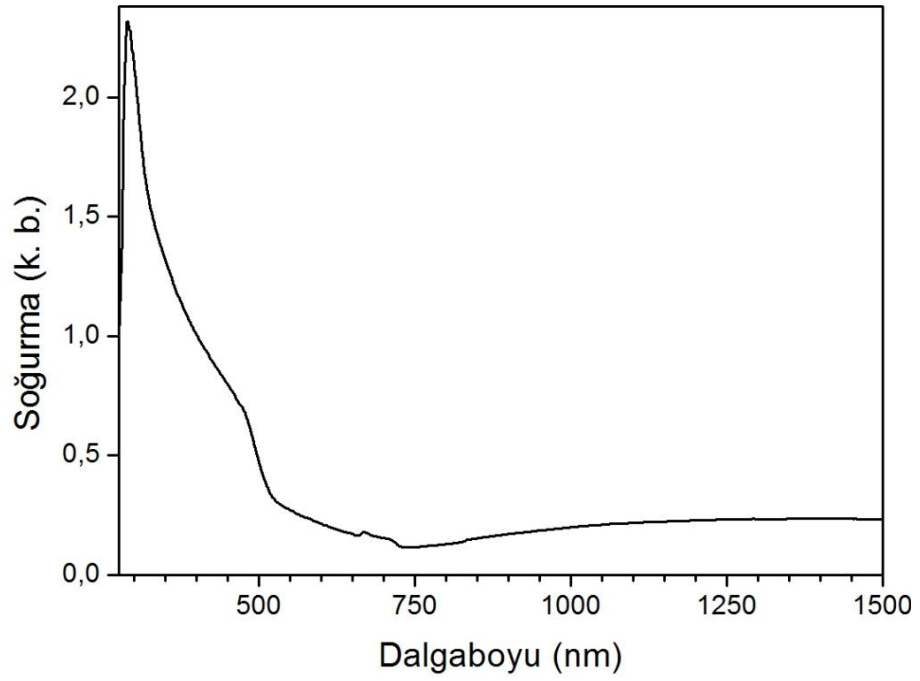
Mikroskop ve FTO cam tabanlar üzerine KBD yöntemiyle elde edilen CdS filmlerinin soğurma ve geçirgenlik spektrumları, oda sıcaklığında 200-3300 nm dalgaboyu aralığında alınmıştır. Spektrumlardan yararlanarak yasak enerji aralığı, bant sarkmaları ve geçirgenlik değerleri belirlenmiştir.

5.5.1. Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin soğurma ve geçirgenlik spektrumları

Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin soğurma spektrumu Şekil 5.7.'de görülmektedir. Elde edilen CdS filminin soğurma değerleri yaklaşık 730 nm dalgaboyundan başlayarak 300 nm dalgaboyuna kadar hızlı bir şekilde artmıştır. Bu soğurma sınırının dışında 750 nm'den daha büyük dalgaboylarında film geçirgen ve 750 nm'den daha küçük dalgaboylarında ise kuvvetli bir absorplayıcı davranış göstermektedir.

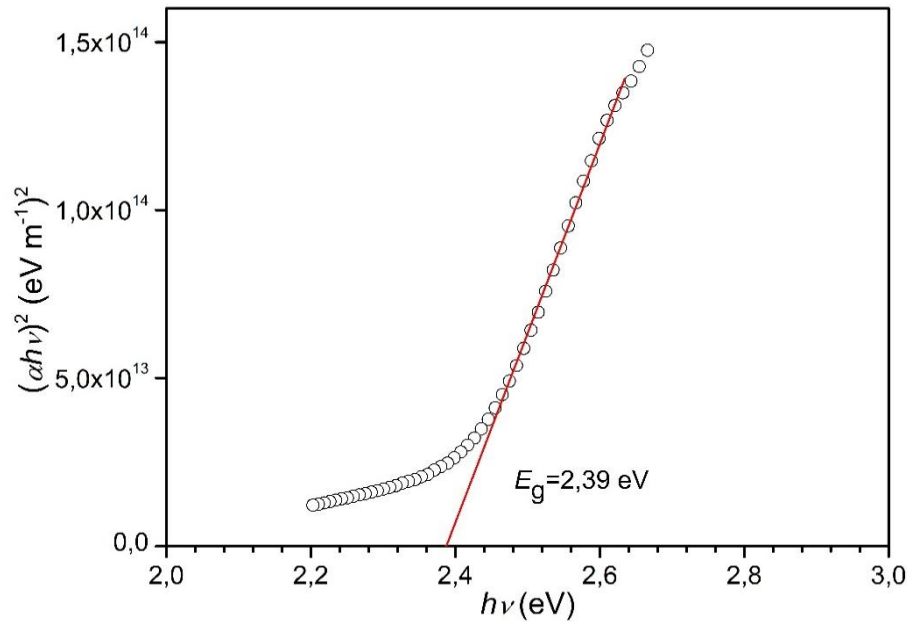
Temel soğurma spektrumu verilerinden yararlanılarak $n=1/2, 3/2, 2$ ve 3 değerleri için CdS filmine ait $(\alpha hv)^{1/n} \sim hv$ 'ye göre değişim grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler Şekil 5.6.'da verilen grafiklerle karşılaştırılmış, CdS filminin $(\alpha hv)^2 \sim hv$ eğrisinin Şekil 5.6.a.'da verilen grafikte uyumlu ve bu durumda CdS filminin direkt geçişli bant yapısında olduğu belirlenmiştir.

CdS filminin $(\alpha hv)^2 \sim hv$ eğrisinin (Şekil 5.8.) hv eksenini kestiği nokta yarıiletkenin yasak enerji aralığı değerini vermektedir. Elde edilen CdS filminin yasak enerji aralığı değerini belirleyebilmek için çizilen grafiğin lineer kısmına Origin7.5 bilgisayar programı yardımıyla lineer fit uygulanmıştır. Uygulanan fit programı sonucu



Şekil 5.7. Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin soğurma spektrumu.

CdS filminin yasak enerji aralığı değeri 2,39 eV olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalarda CdS filminin yasak enerji aralığı değerinin 2,32-2,45 eV arasında değiştiği ifade edilmektedir. [6, 9-12].



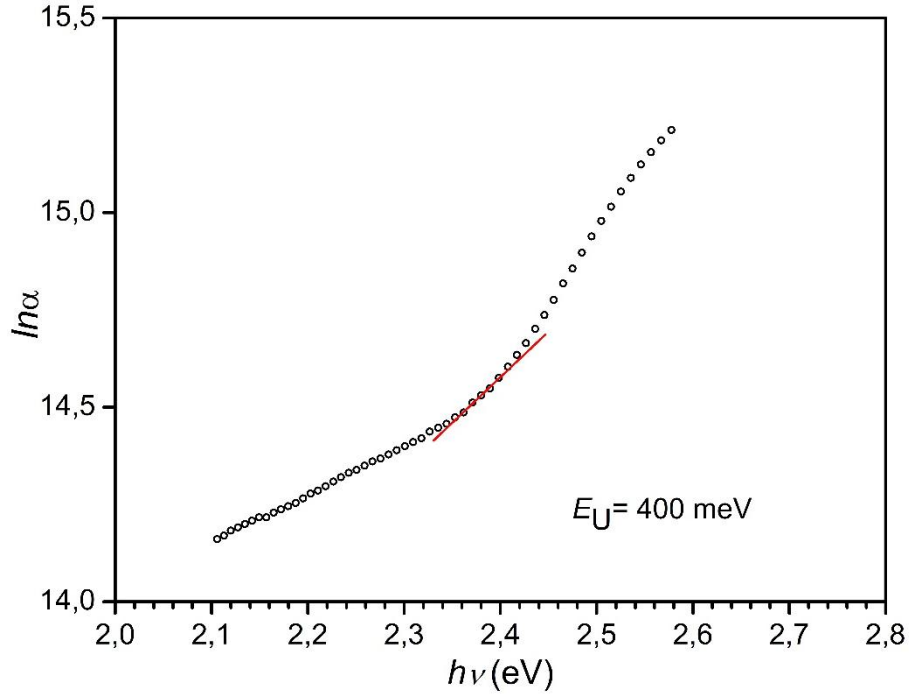
Şekil 5.8. Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ grafiği.

Optik soğurma spektrumundan filmlerin bant sarkmaları değeri hesaplanabilmektedir. Bant sarkmaları yarıiletkendeki kristal kusurlarından kaynaklanmaktadır. Kristal kusurları yarıiletken filmlerin optik özelliklerini yani optik bant aralığı yapısını ve optik geçişleri etkiler [67, 71]. Kusurlardan kaynaklanan enerji bantlarındaki sarkma miktarı, *Urbach Enerji* (E_U) değeri;

$$\alpha(E) = \alpha_0 e^{\frac{E}{E_U}} \quad (5.19)$$

$$E_U = \left(\frac{d \ln[\alpha(E)]}{dE} \right)^{-1} \quad (5.20)$$

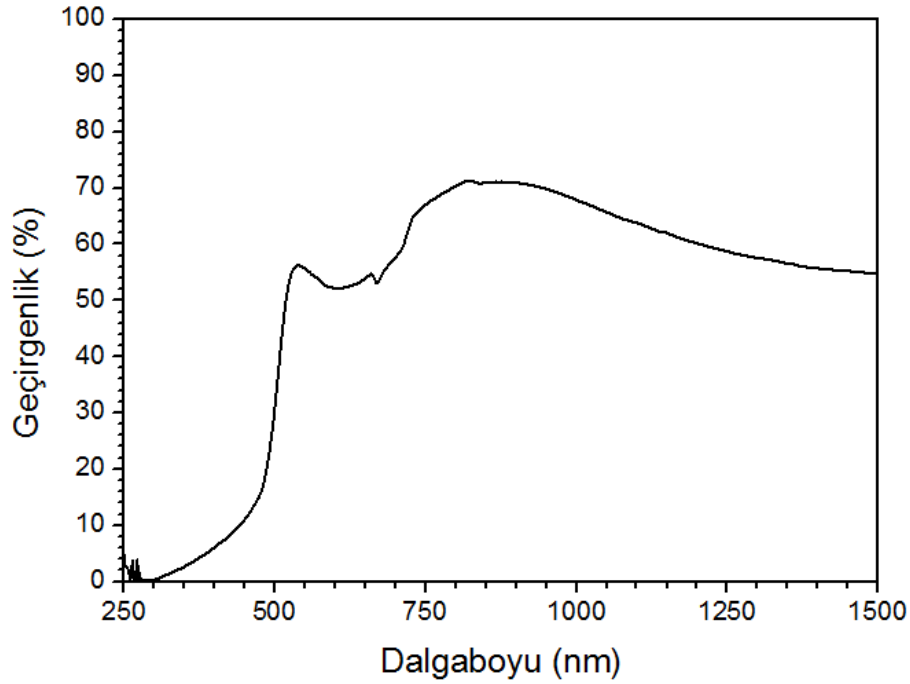
ifadesi kullanılarak belirlenir. Burada α_0 sabit bir değeri, E foton enerjisini ifade etmektedir. Buradan Urbach enerji değeri (E_U), $\ln(\alpha)$ nın E 'ye karşı çizilen grafiğin eğiminden hesaplanır [72]. Şekil 5.9.'da cam taban üzerine elde edilen CdS filmine ait $\ln \alpha$ - $h\nu$ grafiği verilmiştir.



Şekil 5.9. Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin $\ln \alpha$ - $h\nu$ grafiği.

Grafikte eğrinin eğiminden bantlardaki sarkma miktarı E_U , 400 meV olarak hesaplanmıştır. Yapılan bir çalışmada KBD yöntemi ile elde edilen CdS filmi için filmin depolama süresi arttıkça E_U değerlerinin 520 meV'tan 370 meV'a azaldığı ifade edilmektedir. Bu çalışmada cam üzerine elde edilen CdS filmi için E_U değerinin literatürdeki değere yakın olduğu söylenebilir [73]. Ayrıca yapılan çalışmalarda tavlama sıcaklığının artmasıyla filmin E_U değerinin azaldığı ifade edilmektedir. Urbach enerjisinin azalması filmin bant yapısında sarkma miktarının azalması anlamına gelmektedir. Bu da film yapısındaki kristal kusurlarının azaldığı anlamına gelir.

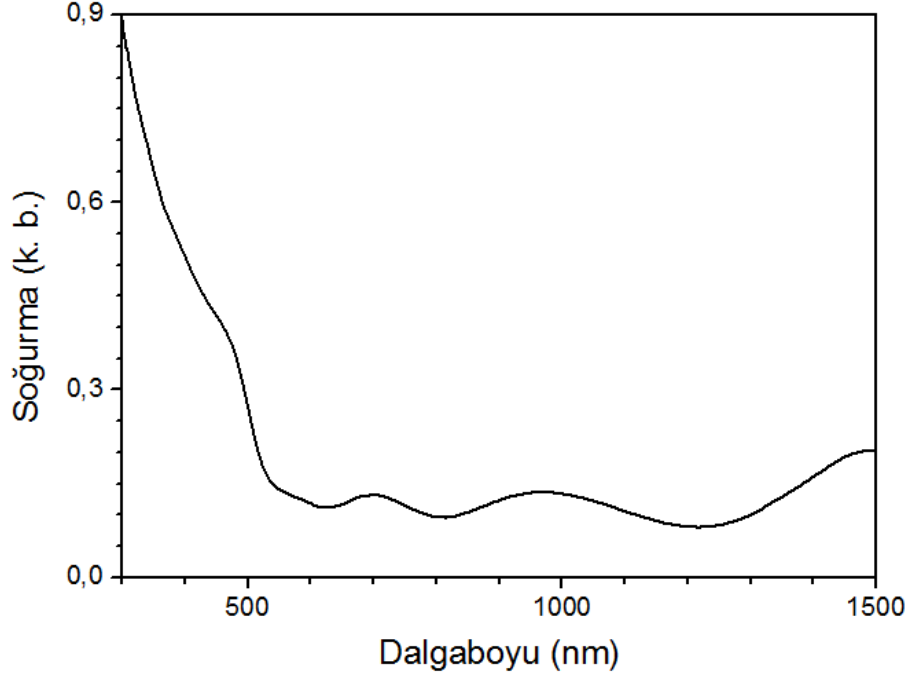
Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin geçirgenlik spektrumu Şekil 5.10.'da verilmiştir. Spektrumda dalgaboyu 535 nm'den sonra geçirgenlik değerlerinde bir artış gözlenmiştir. Bu artış 880 nm'ye kadar devam etmiştir. Elde edilen CdS filminin görünür bölgede geçirgenlik değeri %70 civarında elde edilmiştir. Gözeneklilik, kristallenme, yüzey pürüzlüğü, film kalınlığı ve kullanılan taban malzemenin geçirgenliğini etkileyen özelliklerdir [74].



Şekil 5.10. Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin geçirgenlik spektrumu.

5.5.2. FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminin soğurma ve geçirgenlik spektrumları

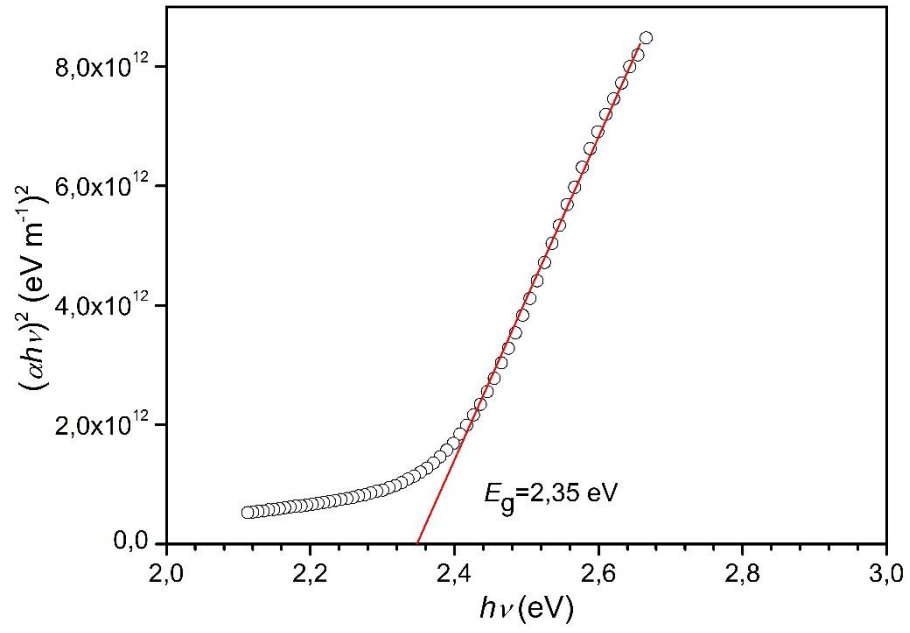
Filmin soğurma ve geçirgenlik değerlerinin tabandan bağımsız olmasını sağlamak için *baseline* yapılır. Analiz öncesi FTO cam taban kullanılarak *baseline* yapılmıştır.



Şekil 5.11. FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin soğurma spektrumu.

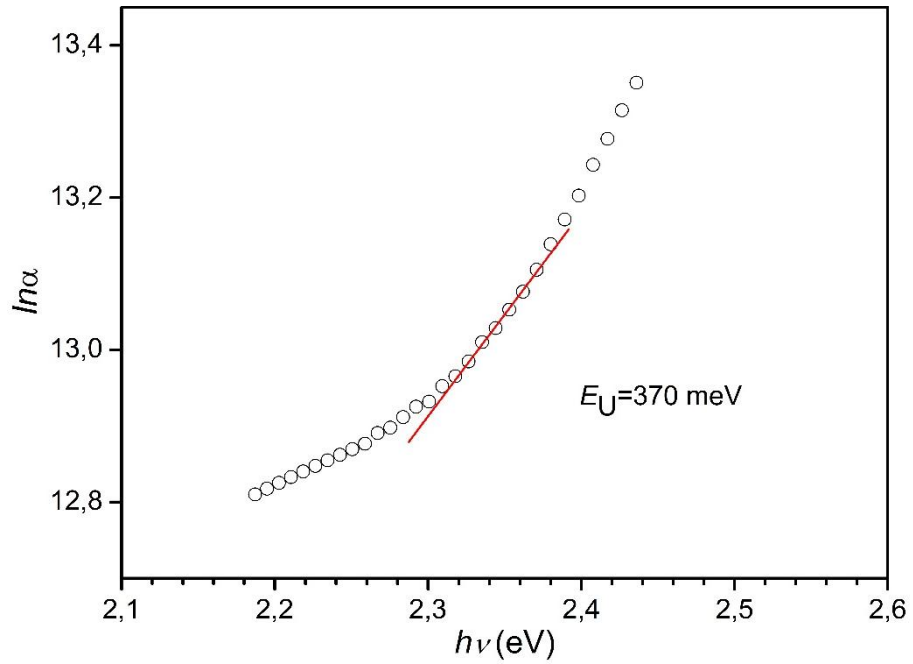
FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin soğurma spektrumu Şekil 5.11.'de görülmektedir. Elde edilen CdS filminin soğurma değerleri yaklaşık 600 nm dalgaboyunda başlayarak 300 nm dalgaboyuna kadar hızlı bir şekilde artmıştır. Bu soğurma sınırının dışında 600 nm'den daha büyük dalgaboylarında film geçirgen ve 600 nm'den daha küçük dalgaboylarında ise kuvvetli bir soğurucu davranış göstermektedir.

Şekil 5.12.'de temel soğurma spektrumundan yararlanılarak FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminin $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ 'ye göre değişim grafiği verilmiştir. Grafikten yararlanılarak CdS filminin yasak enerji aralığı değeri 2,35 eV olarak hesaplanmıştır. Literatürde FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminin yasak enerji aralığı değeri 2,34 eV verilmektedir [12].



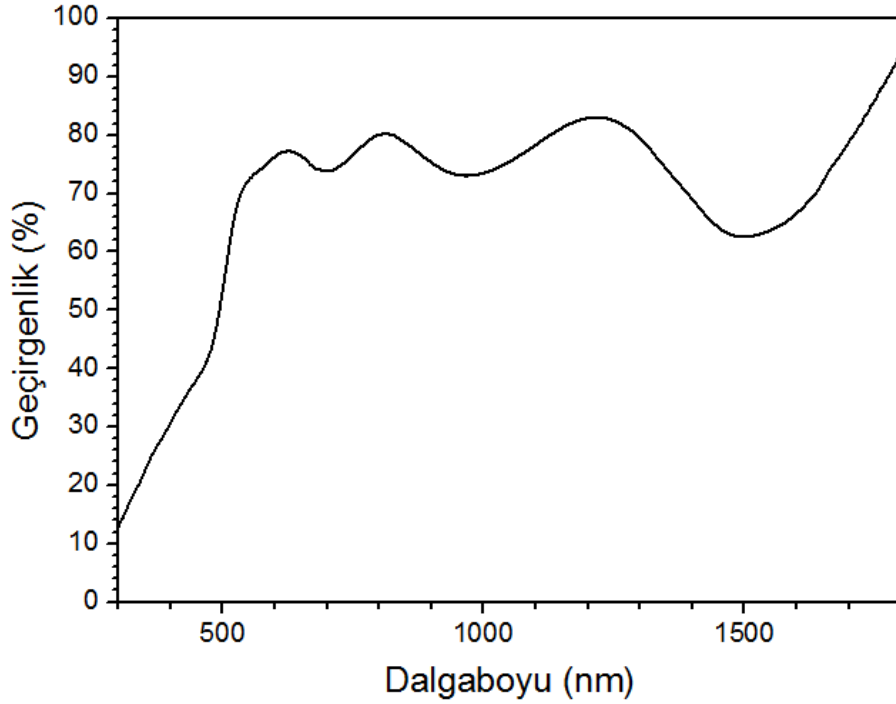
Şekil 5.12. FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği.

Şekil 5.13.'te FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminin $\ln \alpha$ - $h\nu$ grafiği verilmiştir. Grafikte eğrinin eğiminden yararlanılarak bantlardaki sarkma miktarı E_U , 370 meV olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.13. FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin $\ln \alpha$ - $h\nu$ grafiği.

FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminin geçirgenlik spektrumu Şekil 5.14.'te verilmiştir. CdS filminin görünür bölge için geçirgenlik değeri %80 civarında elde edilmiştir. Bu filmin geçirgenliğinin Şekil 5.10.'da verilen cam taban üzerine elde edilmiş CdS filminin geçirgenliği ile kıyaslandığında geçirgenlik değerinin arttığı söylenebilir. Bu durumun kullanılan tabandan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.14. FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin geçirgenlik spektrumu.

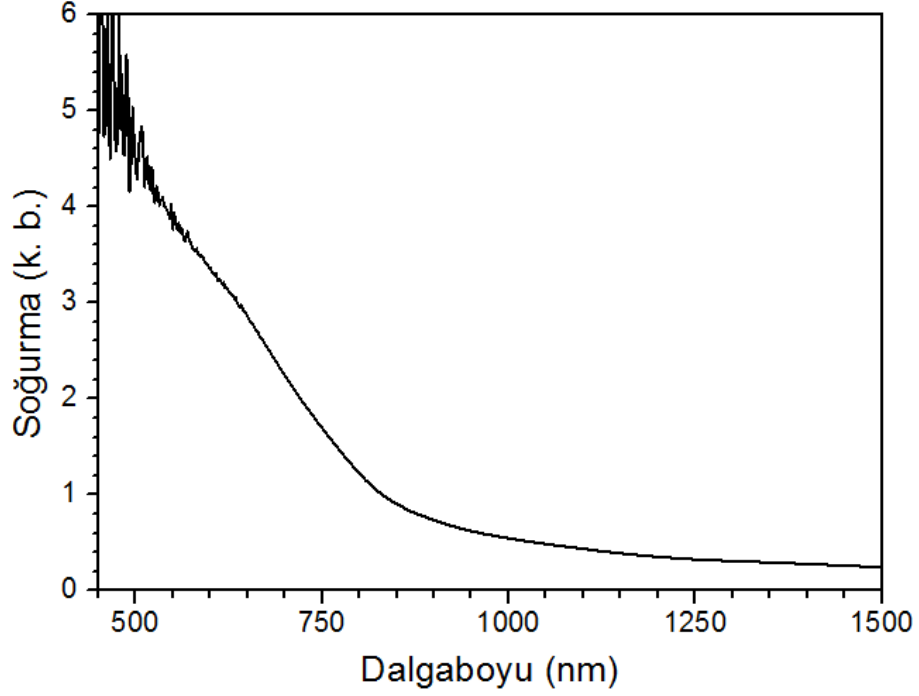
5.6. CuO Filmlerinin Soğurma ve Geçirgenlik Spektrumları

Mikroskop ve FTO cam tabanlar üzerine KBD yöntemiyle elde edilen CuO filmlerinin soğurma ve geçirgenlik spektrumları, oda sıcaklığında 200-3300 nm dalgaboyu aralığında alınmıştır. Spektrumlardan yararlanarak yasak enerji aralığı, bant sarkmaları ve geçirgenlik değerleri belirlenmiştir.

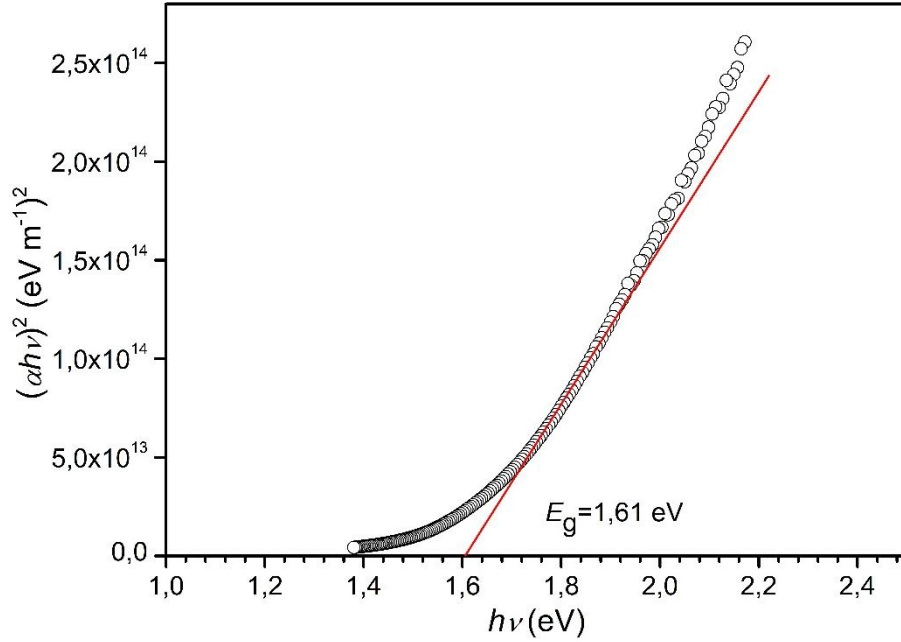
5.6.1. Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin soğurma ve geçirgenlik spektrumları

Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin soğurma spektrumu Şekil 5.15.'te görülmektedir. Elde edilen CuO filminin soğurma değerleri yaklaşık 900 nm dalgaboyundan başlayarak 500 nm dalgaboyuna kadar artmıştır. Bu soğurma sınırının

dışında 900 nm'den daha büyük dalgaboylarında film geçirgen ve daha küçük dalgaboylarında ise kuvvetli bir soğurucu davranış göstermektedir.



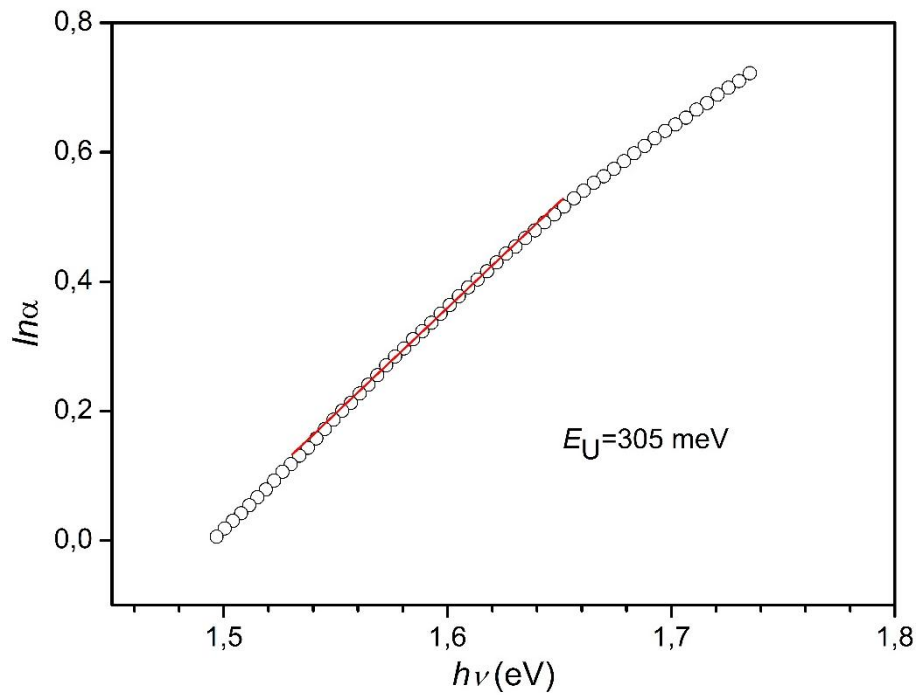
Şekil 5.15. Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin soğurma spektrumu.



Şekil 5.16. Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği.

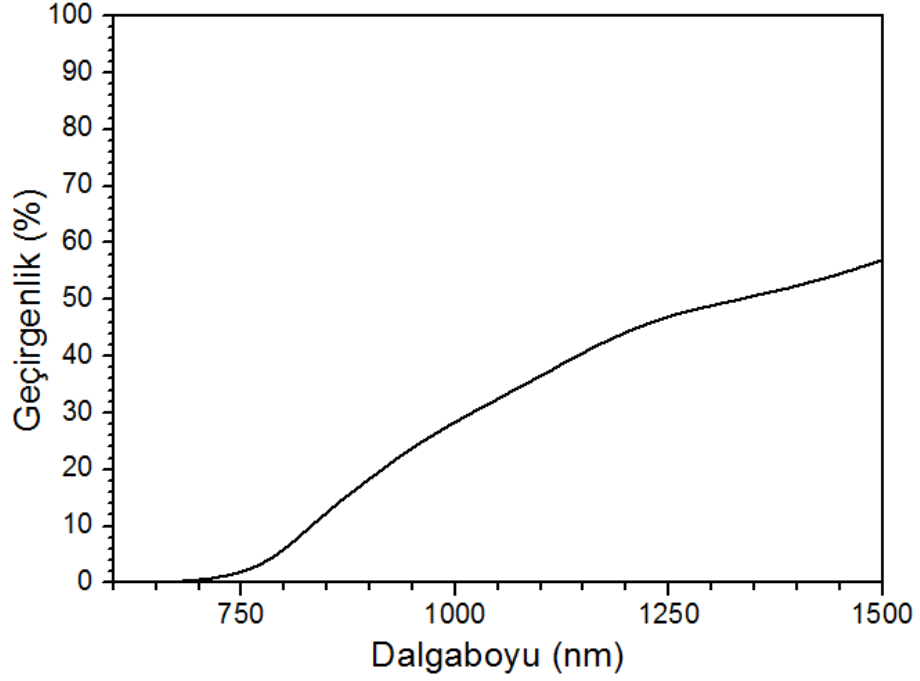
Şekil 5.16.'da temel soğurma spektrumundan yararlanılarak cam taban üzerine elde edilen CuO filminin $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ 'ye göre değişim grafiği verilmiştir. Grafikten yararlanılarak CuO filminin yasak enerji aralığı değeri 1,61 eV olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalarda, CuO malzemesinin yasak enerji aralığı değeri değerinin $E_g \sim 1,2-2,1$ eV arasında değiştiği görülmektedir [17, 25, 31].

Şekil 5.17.'de cam taban üzerine elde edilen CuO filminin $\ln\alpha-h\nu$ grafiği verilmiştir. Grafikte eğrinin eğiminden yararlanılarak bantlardaki sarkma miktarı E_U , 305 meV olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.17. Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin $\ln\alpha-h\nu$ grafiği.

Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin geçirgenlik spektrumu Şekil 5.18.'de verilmiştir. CuO filminin uzun dalgaboyları için geçirgenlik değerinin %60 civarında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen CuO filminin görünür bölgede geçirgenlik değerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bu durum filmin kalın olmasına ve siyah renkte olmasına bağlıdır.

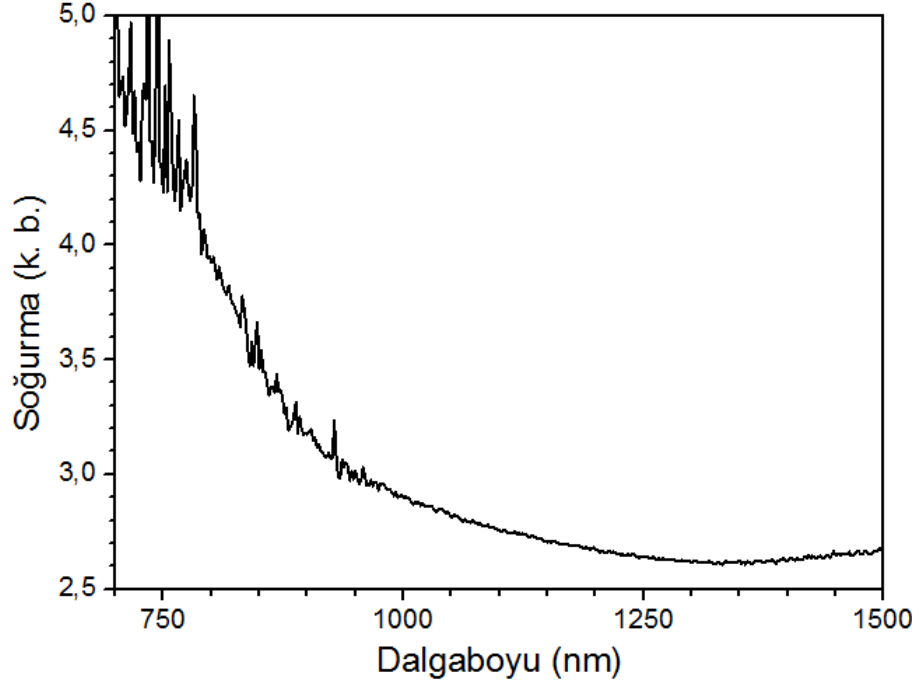


Şekil 5.18. Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin geçirgenlik spektrumu.

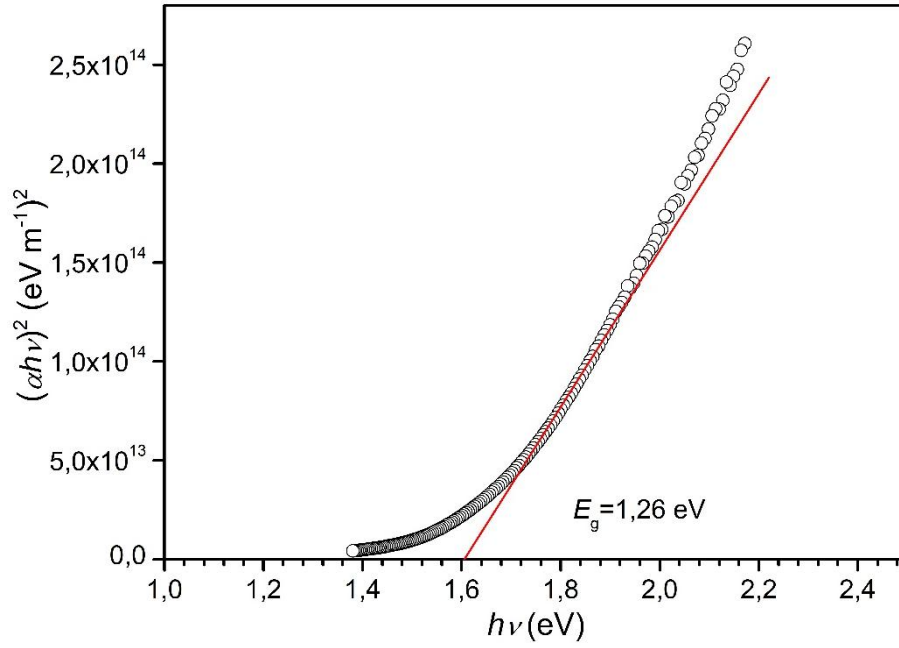
5.6.2. FTO cam taban üzerine elde edilen CuO filminin soğurma ve geçirgenlik spektrumları

FTO cam taban üzerine elde edilen CuO filminin soğurma spektrumu Şekil 5.19.'da görülmektedir. Elde edilen CuO filminin soğurma değerleri yaklaşık 1050 nm dalgaboyunda başlayarak 750 nm dalgaboyuna kadar hızlı bir şekilde artmıştır. Bu soğurma sınırının dışında 1050 nm'den daha büyük dalgaboylarında film geçirgen ve 1050 nm'den daha küçük dalgaboylarında ise kuvvetli bir soğurucu davranış göstermektedir.

Şekil 5.20.'de temel soğurma spektrumundan yararlanılarak FTO cam taban üzerine elde edilen CuO filminin $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ 'ye göre değişim grafiği verilmiştir. Grafikten yararlanılarak CuO filminin yasak enerji aralığı değeri 1,26 eV olarak hesaplanmıştır.



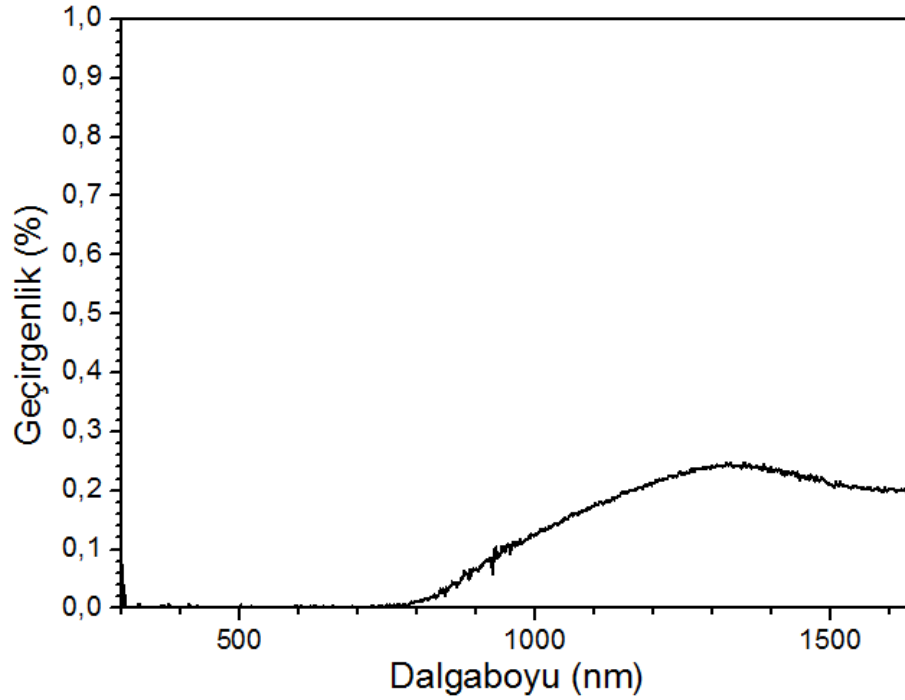
Şekil 5.19. FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin soğurma spektrumu.



Şekil 5.20. FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin $(ahv)^2-hv$ grafiği.

FTO cam taban üzerine elde edilen CuO filminin geçirgenlik spektrumu Şekil 5.21.'de verilmiştir. CuO filminin uzun dalgaboyları için geçirgenlik değeri yaklaşık %0,2 civarında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen CuO filminin görünür bölgede geçirgenlik değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bu durum filmin kalın

olmasına ve siyah renkte olmasına bağlıdır. Bu filmin geçirgenliğinin Şekil 5.18.'de verilen cam taban üzerine elde edilmiş CuO filminin geçirgenlik değerleri ile kıyaslandığında FTO taban üzerine elde edilen filmin geçirgenlik değerinin küçük olduğu söylenebilir. Bu durumun FTO taban üzerine elde edilen filmin daha kalın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.21. FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin geçirgenlik spektrumu.

Çizelde 5.1.'de cam ve FTO taban üzerine üretilen CdS ve CuO yarıiletken filmlerinin kalınlık, yasak enerji aralığı, bantlardaki sarkma miktarı ve yaklaşık 300-1500 nm dalgaboyu aralığındaki optik geçirgenlik değerleri verilmiştir. Filmler kalınlıkları açısından değerlendirildiğinde FTO taban üzerine üretilen filmlerin daha

Çizelge 5.1. Cam ve FTO taban üzerine üretilen CdS ve CuO filmlerinin kalınlık, E_g , E_U ve maksimum geçirgenlik değerleri.

		Kalınlık (nm)	E_g (eV)	E_U (eV)	Maksimum Geçirgenlik (%)
CdS	Cam	160	2,39	0,400	70
	FTO	358	2,35	0,370	80
CuO	Cam	490	1,61	0,305	60
	FTO	2010	1,26	---	0,2

kalın olduğu gör÷lmektedir. Bu durumda FTO taban üzerine elde edilen filmlerin daha kolay büyüdüğu söylenebilir. Bunun FTO tabanının kristal yapıya sahip olmasının bir sonucu olduğu düşün÷lmektedir. Filmler yasak enerji aralıklarına göre değerlendirildiğinde CdS filmlerinin yasak enerji aralığında büyük bir değişiklik olmadığı söylenebilir. CuO filmlerinde ise film kalınlığının artmasıyla yasak enerji aralığı değerinde önemli bir azalmanın olduğu gör÷lmektedir. Bu durum nanoyapılarda beklenen bir sonuç olmakla birlikte bu çalışmada filmlerin kalınlıkları nanoyapı olarak değerlendirilemez. Ancak literatürdeki CuO filmlerinin yasak enerji aralıkları (1,2-2,1 eV [17, 25, 31]) göz önüne alındığında kalınlığın artmasıyla yasak enerji aralığının azalmasından ziyade hem 1,61 hem de 1,26 eV değerleri daha önce yapılan çalışmalarda verilen değerler arasında olduğu söylenebilir. Böylece yasak enerji aralığı değerindeki bu azalmanın kullanılan tabana bağlanması pek mümkün değildir. Bantlardaki sarkmalar yani E_U değerleri incelendiğinde CdS filminin bantlarında E_U değerlerindeki değişmelerin çok fazla olmadığı düşün÷lmektedir. Filmlerin maksimum geçirgenlik değerleri incelendiğinde ilginç değişmeler olduğu gözlenmiştir. CdS filmindeki ilginçlik, kalınlığın artmasıyla geçirgenliğin azalması beklenirken FTO taban üzerine üretilen CdS filminin kalınlığının artmasıyla geçirgenlik değerinin arttığı belirlenmiştir. Bunun nedenini FTO taban üzerine üretilen filmin kristal yapısının cam üzerine üretilenden daha iyi olmasından kaynaklandığı düşün÷lmektedir. CuO filminin maksimum geçirgenlik değerlerinde ise film kalınlığının artmasıyla birlikte geçirgenlik değerlerinde önemli bir azalmanın olduğu gözlenmiştir, buda beklenen bir sonuçtur.

6. CdS ve CuO FİMLERİNİN FOTOLÜMINESANS ÖZELLİKLERİ

6.1. Giriş

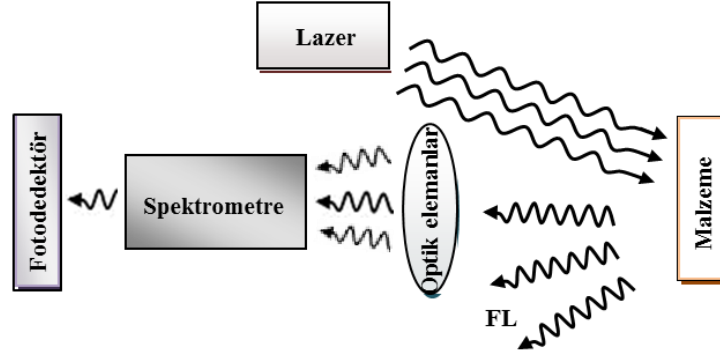
Fotolüminesans (FL) bir malzemenin optik olarak uyarılması sonucu malzemedeki ışığın yayılmasıdır. Yeterli enerjiye sahip fotonlar malzeme üzerine gönderildiği zaman malzeme tarafından soğurulur ve elektronik uyarımlar oluşur. Bu uyarımlar zamanla zayıflar ve elektronlar taban duruma geçerler. Eğer elektronların taban duruma geçişi ışımaya geçiş ise yayılan bu ışığa fotolüminesans denir. Bu ışık foto-uyarılmış malzeme hakkında geniş bilgi sağlamak için toplanabilir ve analiz edilebilir. FL spektrumu, elektronik enerji seviyelerini belirlemek için kullanılabilen, optiksel uyarılmaya bağlı bir yöntemdir [75].

FL araştırmaları, çeşitli malzeme parametrelerini karakterize etmek için kullanılabilir. FL spektroskopisi yöntemi, malzemeye zarar vermez, hızlı, kolay ve kullanışlı bir yöntemdir. Malzeme optik olarak uyarılır, malzemeye kontak yapmaya gerek yoktur. FL hemen hemen her yüzey üzerinde çalışmak için kullanılabilir. FL olayının gerçekleşebilmesi için önce yarıiletken bir malzeme üzerine malzemenin optik bant aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton gönderildiğinde, valans bandındaki bir elektron bu fotonu soğurarak iletim bandına geçer [75]. İletim bandına geçen elektron fazlalık enerjisini atmak için bant içerisinde enerjisini fononlara aktararak iletim bandının tabanına gelir. Bu elektron iletim bandından valans bandına geri dönerken bir foton yayar. İletim bandında bulunan elektronlar, valans bandına geri dönerken, yarıiletkendeki çeşitli kusurların oluşturduğu, yasak enerji aralığının içerisinde bulunan tuzaklara da yakalanabilirler [76].

Yarıiletkendeki çeşitli kusurlar, bu malzemelerle elde edilen cihazların verimini etkiler. FL spektrumları, yarıiletkenin kristal kalitesi ile yakından ilişkilidir. FL spektrumlarından donör ve akseptör varlığı, tuzak ve rekombinasyon merkezleri, gerilmeler ve dislokasyonlar belirlenebilir [77].

Fotolüminesans çalışması için optiksel bir kaynak ve optiksel bir güç sayacı veya spektrometre gereklidir. Şekil 6.1.'de bir FL düzeneği verilmiştir. Işık kaynağından gelen ışınlar, malzeme üzerine gönderilir. Malzemedeki ışımalar, ışın spektrometresi yardımıyla filtre edilerek dedektöre gönderilir. Dedektöre gelen optik sinyaller bu cihaz yardımıyla elektrik akımına çevrilip bilgisayara gönderilerek, dalga boyuna karşılık FL şiddetindeki değişimi gösteren bir spektrum elde edilir. Bu

durumda enerji ile dalgaboyu arasındaki ilişkiyi gösteren bir grafik elde edilebilir. FL spektrumları kullanılarak malzemenin bant aralığı belirlenebilir ve malzeme içerisindeki kusurların oluşturduğu tuzaklar incelenebilir [78].



Şekil 6.1. FL spektrometre cihazının şematik gösterimi [75].

Bir FL ölçümünde uyarma seçimi önemlidir. Uyarma enerjisi ve şiddeti, FL sinyalini önemli derecede etkiler. FL sistemleri için ışık kaynağı olarak lazer kullanımı uygundur.

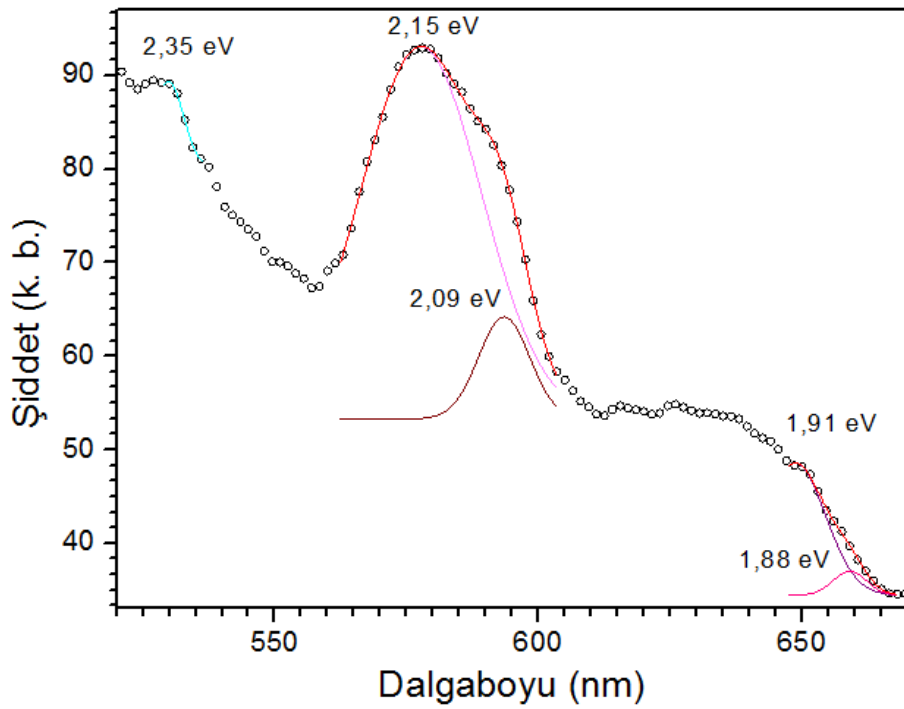
CdS ve CuO filmlerine ait fotoluminesans verileri oda sıcaklığında Görsel 6.1.'de fotoğrafı verilen Perkin Elmer LS 55 Fluorescence Spectrometer cihazı ile alınmış olup, malzemeyi optik olarak uyarmak için ışık kaynağı olarak ksenon lamba kullanılmış ve uyarma dalgaboyu CdS için 440 nm, CuO için 685 nm olarak seçilmiştir.



Görsel 6.1. Perkin Elmer LS 55 Fluorescence Spectrometre cihazı.

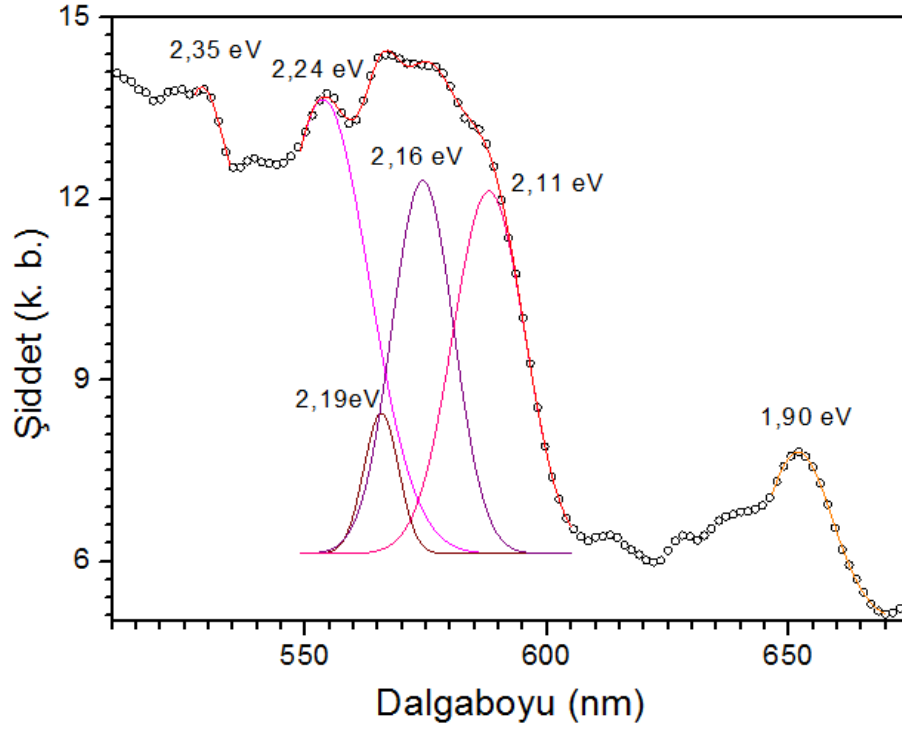
6.2. CdS Filmlerinin FL Analizi

Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin FL spektrumu 500 nm ile 800 nm dalgaboyu aralığında incelenmiştir. Şekil 6.2.'de FL spektrumu incelendiğinde 527 nm (2,35 eV) dalgaboyunda yeşil emisyon, 578 nm (2,15 eV) dalgaboyunda düşük şiddetli sarı-yeşil emisyon, 594 nm (2,09 eV) dalgaboyunda orta şiddetli turuncu emisyon, 650 nm (1,91 eV) ve 659 nm (1,88 eV) dalgaboylarında kırmızı emisyonların olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.2. Cam taban üzerine üretilen CdS filminin fotolüminesans spektrumu.

FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin FL spektrumu 500 nm ile 800 nm dalgaboyu aralığında incelenmiştir (Şekil 6.3.). Bu yapının FL spektrumu incelendiğinde 527 nm (2,35 eV) ve 554 nm (2,24 eV) dalgaboyunda yeşil emisyon, 566 nm (2,19 eV) dalgaboyunda düşük şiddetli sarı-yeşil emisyon, 575 nm (2,16 eV) dalgaboyunda düşük şiddetli sarı-yeşil emisyon, 588 nm (2,11 eV) dalgaboyunda orta şiddetli turuncu emisyon ve 652 nm (1,90 eV) dalgaboylarında kırmızı emisyonların olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.3. FTO taban üzerine üretilen CdS filminin fotoluminesans spektrumu.

Cam ve FTO tabanlı CdS filmlerinin FL spektrumları birlikte değerlendirildiğinde 527 nm dalga boyundaki ışımaların yasak enerji aralığından temel, 554 nm dalgaboyu aralığındaki geçişler yeşil emisyonlu, 566-578 nm dalgaboyu aralığındaki geçişler düşük şiddetli sarı-yeşil emisyonlu, 588-594 nm dalgaboyu aralığındaki geçişler orta şiddetli kırmızı emisyonlu geçişleri göstermektedir.

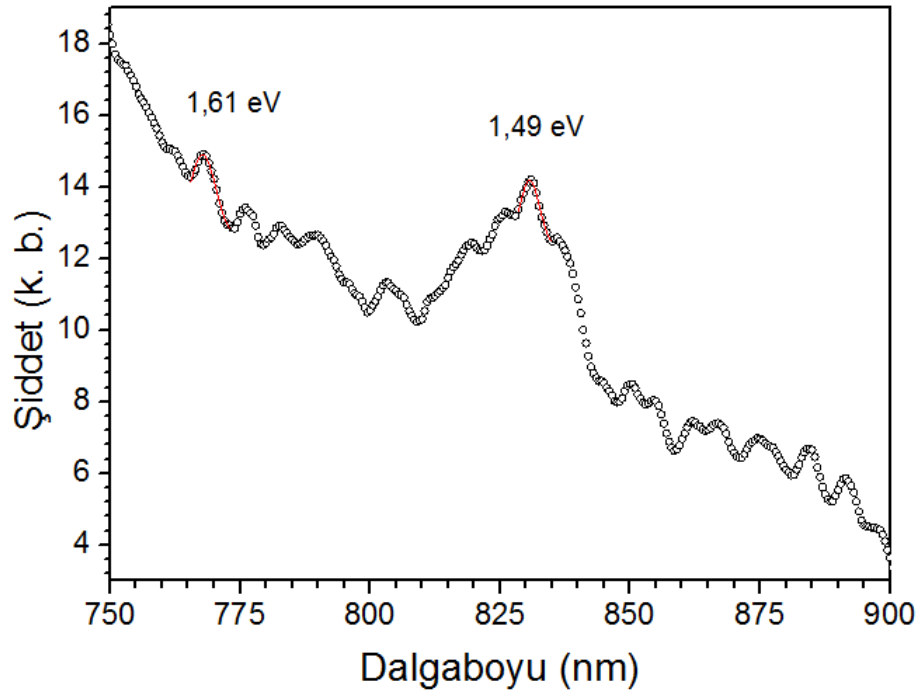
Çizelge 6.1. Cam ve FTO tabanlı CdS filmlerindeki FL tuzak enerji seviyeleri.

FL pikleri (eV)	Emisyon	Kusur Tanımları	Kaynaklar
2,35		Temel geçiş	
2,24	Yeşil	Araya sıkışmış Cd atomları, S boşlukları	[77] [79]
2,19	Düşük şiddetli sarı-yeşil	Cd boşlukları, Donör-akseptör rekombinasyon	[77] [80]
2,16			
2,15			
2,11			
2,09	Kırmızı	S boşlukları, donör-akseptör rekombinasyon	[80] [81] [82]
1,91			
1,90			
1,88			

Yapılan çalışmalarda bu geçişler çeşitli tuzak seviyelerinden elektronların valans bandına geçişleri olarak tanımlanmaktadır. Bunlar Çizelge 6.1.'de verilmiştir.

6.3. CuO Filmlerinin FL Analizi

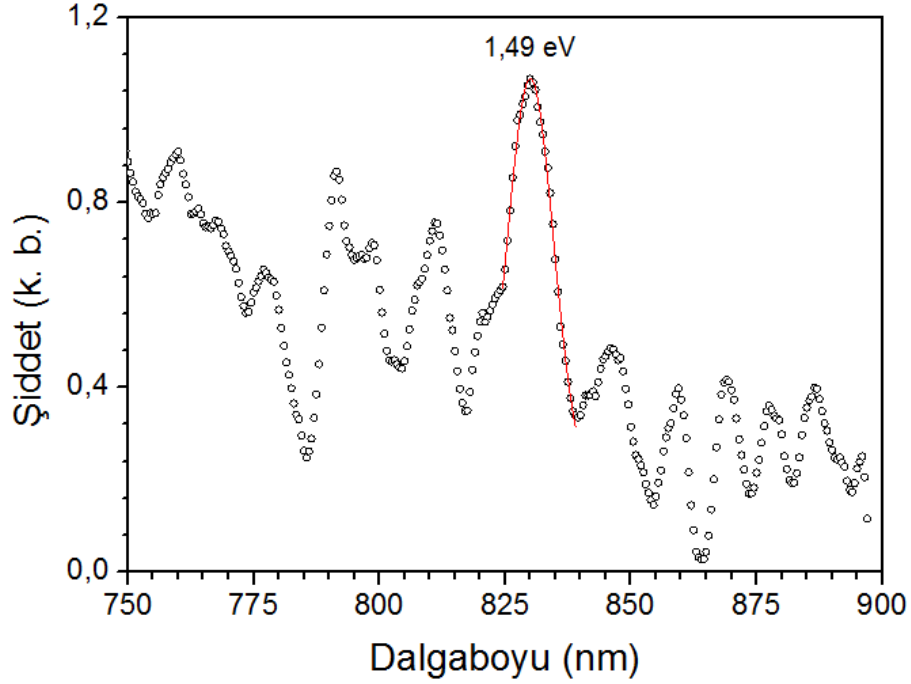
Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin FL spektrumu 700 nm ile 900 nm dalgaboyu aralığında incelenmiştir. (Şekil 6.4.). FL spektrumu incelendiğinde 768 nm (1,61 eV) ve 831 nm (1,49 eV) dalgaboyunda kırmızı emisyonlu geçişlerin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.4 Cam taban üzerine üretilen CuO filminin fotoluminesans spektrumu.

Literatürde 864 nm'de (1,44 eV) görülen pik, elektronların iletim bandından akseptör enerji seviyesine geçişi ve elektronların donör enerji seviyesinden valans bandına veya akseptör enerji seviyesine geçişine bağlı olarak ortaya çıktığı ifade edilmektedir [83]. Bu çalışmada cam taban üzerine elde edilen CuO filminin FL spektrumunda gözlenen 1,49 eV'luk pikin elektronların iletim bandından akseptör enerji seviyesine ve elektronların donör enerji seviyesinden valans bandına veya akseptör enerji seviyesine geçişlere bağlı olabileceği düşünülmektedir. 770 nm'de (1,61 eV) dalga boyundaki ışımının yasak enerji aralığından temel geçişi göstermektedir.

FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin FL spektrumu Şekil 6.5.'te verilmiştir. Bu yapının FL spektrumu incelendiğinde 831 nm (1,49 eV) dalgaboyunda kırmızı emisyon olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.5. FTO taban üzerine üretilen CuO filminin fotoluminesans spektrumu.

Literatürde yasak enerji aralığı 1,20 eV olan CuO filmi ile ilgili yapılan bir çalışmada fotoluminesans ölçümlerinden 1,31 eV'luk bir emisyonun olduğu ifade edilmektedir. Bu çalışmada 1,31 eV'luk emisyonun yakın bant kenar geçişlerine karşılık gelebileceği belirtilmiştir [84]. Yapılan başka bir çalışmada ise 3,37 eV bant aralığına sahip ZnO filmi için yaklaşık 3,49 eV'ta meydana gelen geçişin yakın bant kenar geçişi olduğu ifade edilmektedir [85].

Bu çalışmada elde edilen 1,26 eV bant aralığına sahip CuO filmine ait 1,49 eV'ta meydana gelen geçişin yakın bant kenar geçişi olduğu düşünülmektedir.

7. CdS ve CuO FİMLERİNİN YÜZEYSEL ÖZELLİKLERİ

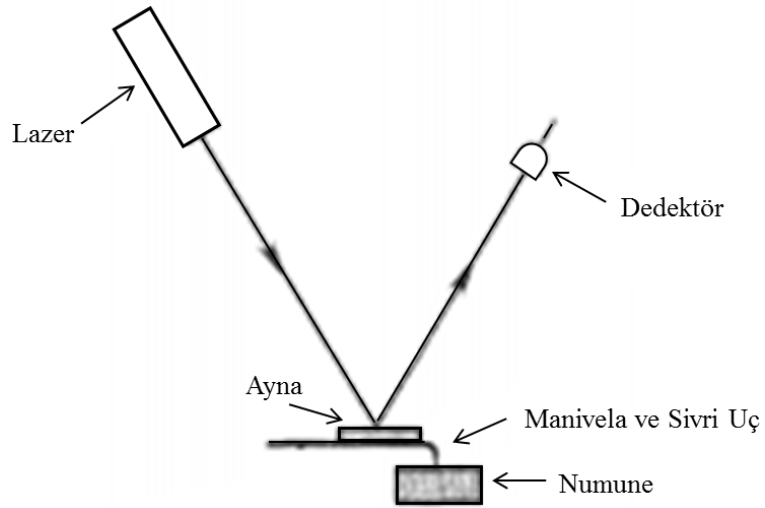
7.1. Giriş

Katı malzemelerin morfolojik özelliklerini, yüzeylerinin oluşumlarını, homojenliklerini, yüzeyin gözenekli olup olmaması, pürüzlülükleri, atomların nasıl dizildiği gibi malzemelerin morfolojik özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak için çeşitli mikroskoplar geliştirilmiştir. Malzemelerin yüzey özellikleri, makroskobik ve mikroskobik yöntemlerle incelenir. Makroskobik inceleme optik mikroskop gibi küçük büyütme oranlı cihazlarla yapılır ve kısmen malzemelerin yapıları hakkında bilgi edinilebilir. Mikroskobik inceleme ise yüksek ayırt etme gücüne sahip atomik kuvvet (AKM) ve taramalı elektron mikroskopları (Scanning Electron Microscopy, SEM) kullanılarak malzemenin yüzey özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi edinilebilir.

7.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu

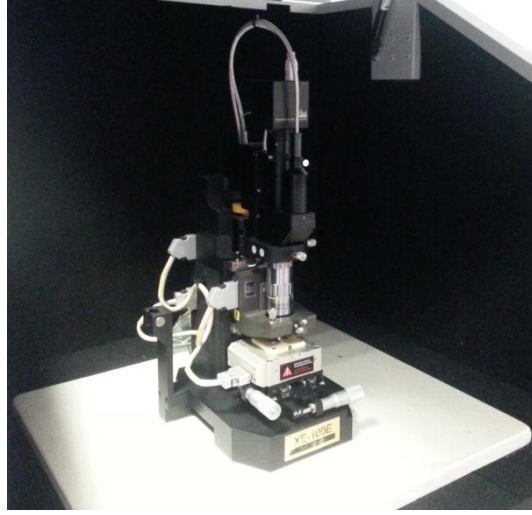
AKM, nano boyutta görüntüleme yapabilen ve yüzeylerin yeniden yapılanmalarını incelemek için kullanılan gelişmiş bir mikroskoptur. AKM yüksek çözünürlüklü bir taramalı uç mikroskobudur. Atomik ölçekte iletkenler ve yalıtkanların yüzey özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Günümüzde, polimerler, seramikler, alaşımlar, camlar ve biyolojik numunelerin görüntülenmesinde de kullanılmaktadır. 1986 yılında Binnig ve ark. ilk atomik kuvvet mikroskobunu geliştirmişlerdir. AKM’de yüzeyden alınan bilgi, mekanik bir ucun yüzeyi algılamasıyla toplanır. Şekil 7.1.’de AKM’nin çalışma mekanizmasının şematik gösterimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi numune yüzeyi bir-iki mikron uzunluğunda ve genelde 100 Å’ dan daha küçük bir çapa sahip sivri bir uç yardımı ile taranarak incelenir. 100-200 µm uzunluğunda bir esnek yayın serbest ucuna bu sivri uç yerleştirilmiştir. Yay genellikle silisyum veya silisyum nitrürden yapılır. Uç-yay sistemi, malzeme yüzeyinde piezoelektrik malzeme sayesinde tarama yapar. Tarama piezoelektrik malzemeye verilen voltaj sayesinde olur. Tarama esnasında uç malzeme yüzeyine yakın bir mesafeye getirilince, uç ile yüzey arasındaki atomlar arasında kuvvetler (10^{-11} - 10^{-6} N) Hooke yasasına göre yayın eğilmesine ya da sapsmasına yol açar. Uç, malzeme yüzeyi üzerinde gezinirken bir detektör yaydaki sapsmayı ölçer. Genelde sapsma miktarının ölçümü yayın yüzeyinden yansıyan lazer ışığının bir dizi fotodiyot ile algılanması sonucu gerçekleştirilir. Ölçülen bu sapsmalar bir bilgisayar vasıtasıyla yüzey

topografisinin bir haritasını oluşturur. Numune ile uç arasındaki kuvvet etkileşimi sonucu kaldırma mekanizması nm ölçeğinde hareket eder. Bu hareketten faydalanılarak bilgisayar ortamına aktarılan veriler, yazılım aracılığı ile derlenerek ya numunenin görüntüsü elde edilir ya da iğne ile numune arasındaki etkileşimler ölçülür. Yüzey taraması ucun sürekli olarak yüzeyle teması ile mümkündür. Ancak bu durumda yüzeyin hasar görmesi ve görüntünün bozulması kaçınılmaz olur. Bunu önlemek için uç yüzeye sadece çok kısa sürelerle periyodik olarak temas edip sonra tekrar yüzeyden uzaklaşır. Çok duyarlı ucun yüzeyi taramasıyla, yüzeyin iki ve üç boyutlu görüntüsü alınabilir [86]. Bu şekilde AKM ile elde edilen yüzey topografisinden malzemenin büyüme şekli, yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyinde oluşabilecek yığılma ya da boşluk tipi kusurlar hakkında bilgi edinilebilir.



Şekil 7.1. AKM'nin çalışma mekanizmasının şematik gösterimi [87].

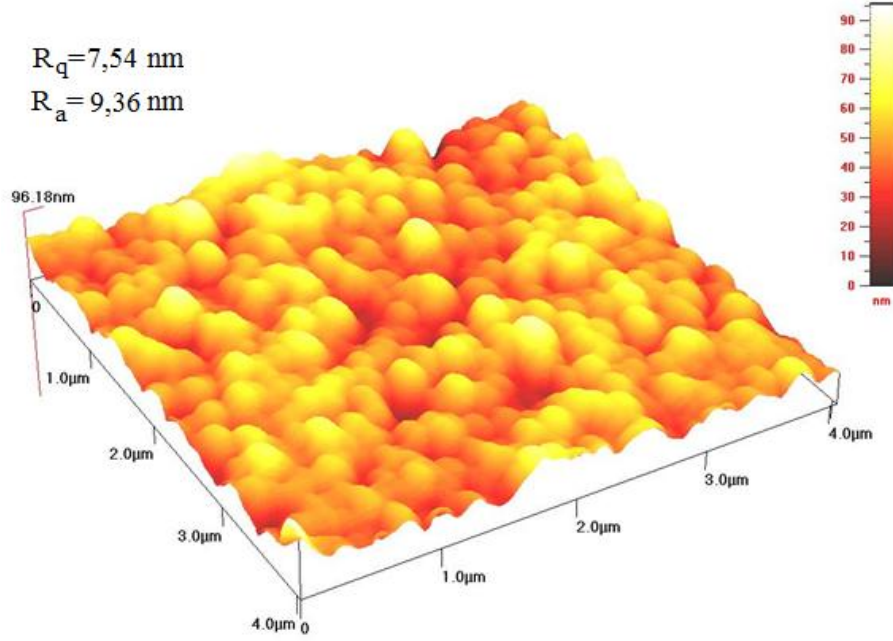
KBD yöntemi ile cam ve FTO taban üzerine elde edilen CdS ve CuO filmlerinin yüzey morfolojilerini incelemek ve pürüzlülük değerlerini belirlemek için AKM kullanılmıştır. AKM görüntüleri Görsel 7.1.'de fotoğrafı verilen XE-100E Park Systems marka AKM cihazıyla alınmıştır. Filmler, oda sıcaklığında $4 \times 4 \mu\text{m}^2$ ölçekte alınmış ve üç boyutlu AKM görüntüleri bilgisayar programı yardımıyla elde edilmiştir.



Görsel 7.1. XE-100E Park Systems marka AKM'nin fotoğrafı.

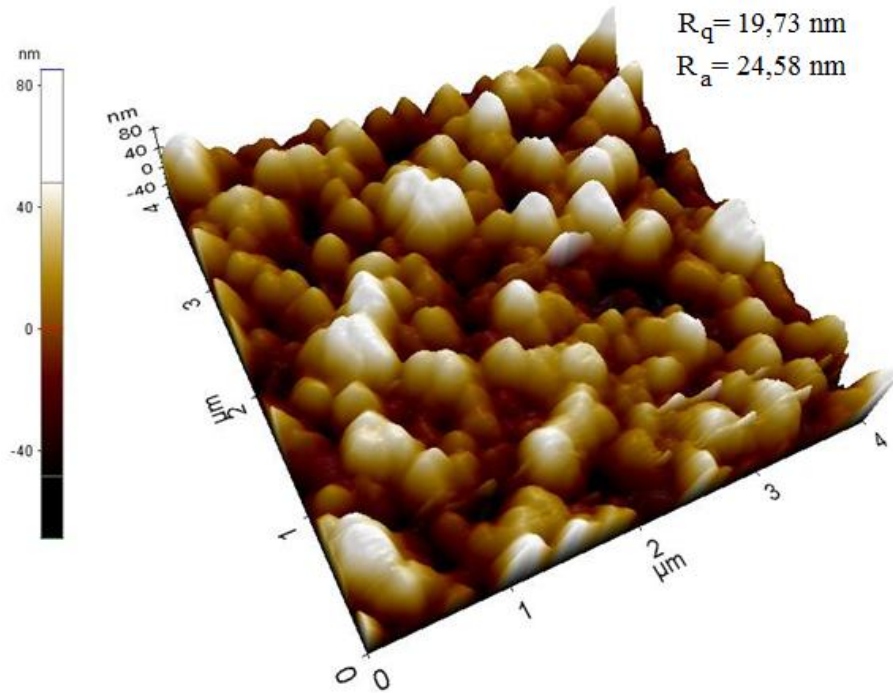
7.3. CdS Filmlerinin AKM Analizleri

Şekil 7.2.'de cam taban üzerine elde edilen CdS filminin üç boyutlu AKM görüntüsü verilmiştir. Görüntüde kristal tanelerinin boyut olarak diğer tanelerle hemen hemen aynı olması kaplamanın homojen olduğunun kanıtıdır. Yüzeyde gözlenen açık renkli bölgeler film oluşumu esnasında atomların üst üste yığılmaları sonucunda oluşan kümeleri göstermektedir. Ayrıca filmi elde etmek için taban olarak kullandığımız cam malzeme de yüzey yapısı olarak bir pürüzlülüğe sahiptir. Bu durum da kullandığımız tabanda film yüzeylerinin homojenliğini ve tanelerin büyüklüklerini etkilediği söylenebilir. Ölçümler sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir. Şekilde en yüksek tepe ile en çukur bölge arasındaki yükseklik farkı 96,18 nm'dir. Şekilde verilen R_a (ortalama pürüzlülük) ve R_q (root-mean-square rms pürüzlülük) değerlerini ifade etmektedir. R_a ve R_q değerlerinin küçük olması film oluşumu sırasında yüzeydeki kusurların az olması anlamı taşır. Düşük pürüzlülük değeri filmin yüzeyinin düzgün, homojen ve yoğun olduğuna işaret eder.



Şekil 7.2. Cam taban üzerine elde edilen CdS filminin üç boyutlu AFM görüntüsü.

Şekil 7.3.'te FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminin üç boyutlu AFM görüntüsü verilmiştir. Görüntüde yüzeyde rastgele dağılmış farklı yükseklik ve büyüklükte oluşumlar göze çarpmaktadır. Yüzeyde kümeler şeklinde oluşumlar söz konusudur, ancak birbirinden ayırt edilebilir derecede taneli bir yapılanma oluşmamıştır.



Şekil 7.3. FTO taban üzerine elde edilen CdS filminin üç boyutlu AFM görüntüsü.

FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filminde atomların üst üste yığılmaları sonucunda oluşan kümeleri gösteren açık renkli bölgeler cam taban üzerine elde edilen CdS filmine göre daha belirgindir ve tepe benzeri sivri oluşumlar şeklinde kendini göstermektedir. Bu durumda filmin yüzey pürüzlülüğünün ve film süreksizliğinin arttığı söylenebilir. Beyaz bölgelerdeki artış ve siyah bölgelerin varlığı, filmin süreksizliğin artmasından dolayı yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucuna varılmıştır. Bunu R_a ve R_q değerlerinin büyük olması da kanıtlamaktadır.

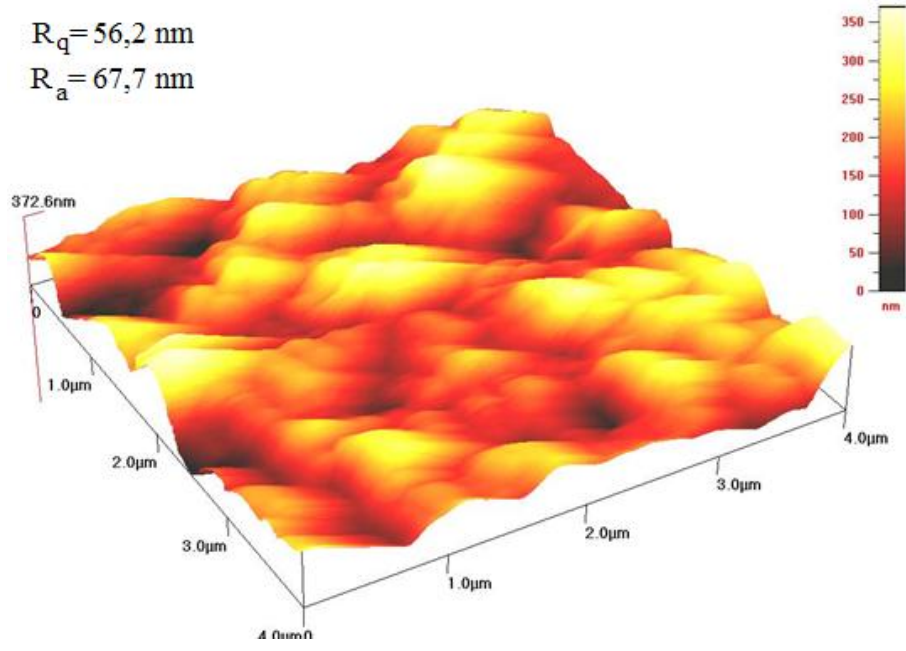
Çizelge 7.1. Cam ve FTO taban üzerine üretilen CdS filminin R_a ve R_q değerleri.

CdS	Taban	R_a (nm)	R_q (nm)
	Cam	7,54	9,36
FTO	19,73	24,58	

Çizelge 7.1.'de cam ve FTO tabanlar üzerine elde edilen CdS filmlerinin yüzey pürüzlülük değerleri (R_a , R_q) verilmiştir. FTO cam taban üzerine elde edilen filmin yüzey pürüzlülük değerlerinin cama göre daha büyük olduğu görülmektedir. Bu FTO taban üzerine elde edilen film yüzeyinin cama göre daha pürüzlü olduğunun bir göstergesidir. Bu sonuç filmin kristal deseni sonuçlarından da desteklenmektedir. Literatürde farklı tabanlar üzerine elde edilmiş yarıiletken filmlerinin farklı morfolojik özellikler gösterdiği görülmüştür [88].

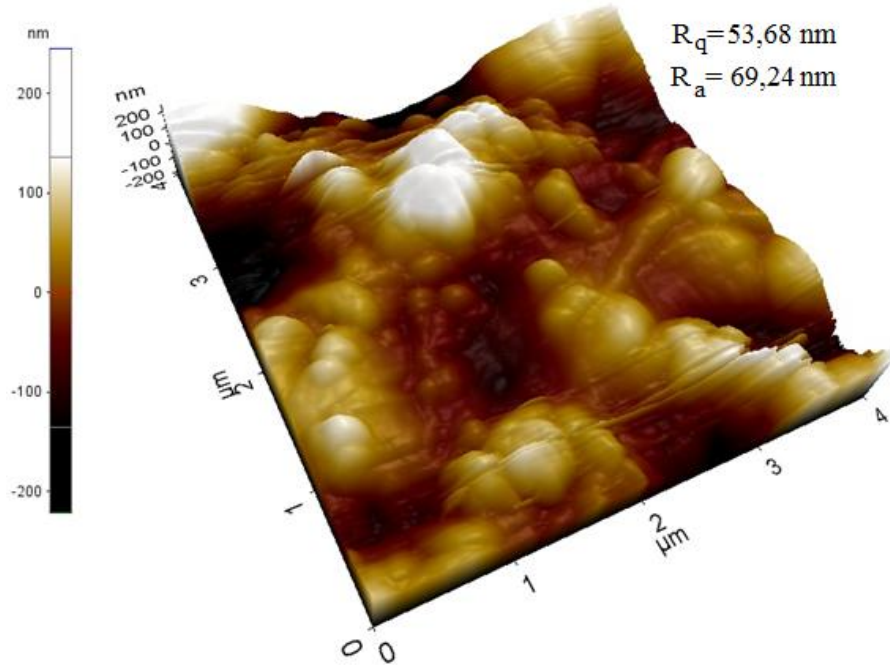
7.4. CuO Filmlerinin AKM Analizleri

Şekil 7.4.'te cam taban üzerine elde edilen CuO filminin üç boyutlu AKM görüntüsü verilmiştir. Yüzeyde gözlenen açık renkli bölgeler film oluşumu esnasında atomların üst üste yığılmaları sonucunda oluşan kümeleri gösterirken, yüzey üzerinde bulunan boşlukların veya düşük yükseklikteki bölgelerin varlığı siyah bölgeler şeklinde dikkat çekmektedir. Boşlukların oluşması, film oluşumu esnasında yüzeye gelen atomların siyah bölgeleri büyüme merkezi olarak tercih etmediklerini gösterir. Açık ve siyah bölgelerin varlığı, film yüzeyinde süreksizliğin ve dolayısıyla yüzeyin pürüzlü olduğu sonucuna varılır. Bununla birlikte, film yüzeyinde görülen oldukça büyük yuvarlak tanelerin ve tane boyutlarının birbirlerine yakın olduğu da söylenebilir. Yüzey pürüzlülüğünün artması, yüzeyin yükseklik olarak homojen dağılım sergilemeyen tanelerden oluşmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.4. Cam taban üzerine elde edilen CuO filminin üç boyutlu AFM görüntüsü.

Şekil 7.5.'te FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin üç boyutlu AFM görüntüsü verilmektedir.



Şekil 7.5. FTO taban üzerine elde edilen CuO filminin üç boyutlu AFM görüntüsü.

Görüntüde yüzeyde rastgele dağılmış farklı yükseklik ve büyüklükte oluşumlar göze çarpmaktadır. Yüzeyde kümeler şeklinde oluşumlar ve birbirinden ayırt edilebilir

derecede taneli bir yapılanma söz konusudur. Yüzeyde gözlenen açık renkli bölgeyi film oluşumu esnasında atomların üst üste yığılmaları sonucunda oluşan kümeyi gösterirken, yüzey üzerinde bulunan boşlukların veya düşük yükseklikteki bölgelerin varlığı siyah bölgeler şeklinde dikkat çekmektedir. FTO taban üzerine elde edilen CuO filminde atomların üst üste yığılmaları sonucunda oluşan kümeleri gösteren açık renkli bölgeler cam taban üzerine elde edilen CdS filmine göre daha belirgindir. Ayrıca FTO taban üzerine üretilen filmin yüzeyindeki tane yapılanması yükseklik olarak artma eğilimindedir. Bu durum pürüzlülük değerlerindeki artış ile de kendini göstermektedir.

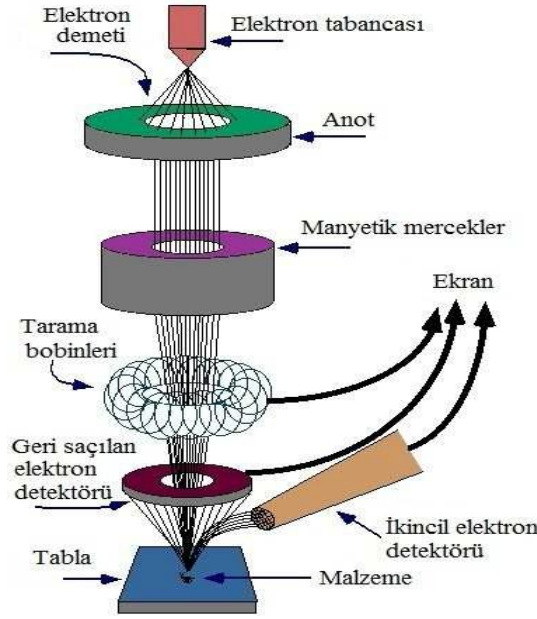
Çizelge 7.2. Cam ve FTO taban üzerine üretilen CuO filminin R_a ve R_q değerleri.

CuO	Taban	R_a (nm)	R_q (nm)
	Cam	56,20	67,70
FTO	53,68	69,24	

Çizelge 7.2.'de cam ve FTO tabanlar üzerine elde edilen CuO filmlerinin yüzey pürüzlülük değerleri (R_a , R_q) verilmiştir. FTO taban üzerine elde edilen filmin yüzey pürüzlülük değerlerinin cam taban üzerine elde edilen filmin pürüzlülük değerleri ile aynı olduğu söylenebilir. Bu durum pürüzlülük değerlerinin kullanılan tabana bağlı olmadığı sonucuna varılabilir.

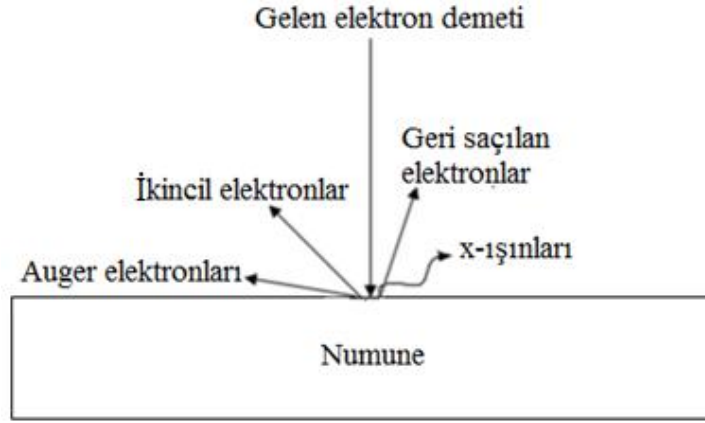
7.5. Taramalı Elektron Mikroskobu

Mikro yapılı malzemeleri görüntülemek, yüzey durumlarını incelemek ve analiz etmek için kullanılan en yaygın cihazlardan birisi SEM'dir. SEM, incelenecek malzemeleri görüntülemek için ışık yerine elektronları kullanan bir mikroskoptur. SEM ölçümlerinde genel olarak enerjisi 200 eV-100 keV aralığında değişen hızlandırılmış elektronlar kullanılır. Kullanılan elektron demeti ile malzeme arasındaki etkileşimler malzemenin bileşimi, homojenlikleri, kristolografisi, gözenekli yapıları, morfolojisi ve yüzey kusurları hakkında bilgi verir. SEM cihazı yüksek çözünürlükte görüntüler elde edilmesini sağlar. İncelenecek malzemenin iletken olması gerekir ve malzemenin öz direnci büyük ise malzeme üzerine altın kaplanır. Böylelikle elektron demeti ile malzeme yüzeyi arasındaki iletim sağlanmış olur. Kaplama yardımıyla net görüntüler elde edilebilir.



Şekil 7.6. Taramalı Elektron Mikroskopunun şematik gösterimi [89].

Şekil 7.6.'da taramalı elektron mikroskopunun şematik gösterimi verilmiştir. Genel olarak bir SEM cihazında elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları malzemeye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti malzeme üzerinde odaklamak için objektif mercek, bu merceğe bağlı çeşitli çapta aparatlar ve elektron demetinin malzeme yüzeyini taraması için tarama bobinleri bulunur. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya malzeme üzerine odaklamaktadır. SEM cihazında görüntü oluşumu temel olarak, yüksek gerilim ile hızlandırılmış elektron demetinin incelenen malzemenin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşmelerin sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanması ve incelenmesi prensibine dayanır. Fiziksel etkileşimler elastik ve inelastik etkileşimler olmak üzere iki çeşittir. Malzeme üzerine gelen elektron demetinin malzeme ile etkileşimi Şekil 7.7.'de görülmektedir.



Şekil 7.7. SEM'de gelen elektron demeti-numune etkileşimi

Elastik etkileşimde gelen elektronlar malzeme elektronlarıyla etkileştiğinde aynı kinetik enerjiyle saçılırlar. İnelastik saçılmada gelen elektronlar çekirdek etrafındaki diğer elektronlarla etkileşir ve yerlerini değiştirir. Gelen elektron bir elektronu uyardığında, uyarılan elektron malzemenin yüzeyine doğru elastik ve elastik olmayan çarpışmalar yaparak ilerler ve yeterli enerjisi kalırsa yüzeyi terkeder. Gelen elektronların numune atomlarından inelastik saçılması sonrası salınan elektronlara ikincil elektron denir ve malzemenin yüzeyine yakın yerlerde ortaya çıkarlar. Enerjileri en fazla 50 eV civarındadır. İkincil elektronlar malzeme odasında bulunan sintilatörde toplanarak ikincil elektron görüntüsü sinyaline çevrilir. İkincil elektronlar malzeme yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinliklerinden geldiği için, malzemenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır. Yüksek gerilim altında hızlandırılan elektron demeti numune yüzeyi ile etkileştiğinde, numune atomlarının iç kabuklarından bir elektron koparılır. Bu elektronun yerine dış kabuktan bir elektron gelir ve aradaki enerji değişimini dengelemek için bir elektron salınır. Bu elektrona Auger elektronu denir. Ayrıca elektron demeti ile numune atomları arasındaki etkileşimde ortaya çıkan diğer bir elektron grubu ise geri saçılan elektronlardır ve dedektör ile toplanarak görüntü oluşumunda kullanılır. Geri saçılan elektronlar, yüzeyin derin bölgelerinden gelen daha yüksek enerjili elektronlardır ve şiddetleri atom numarasıyla doğru orantılıdır. Geri saçılan elektronlar, ikincil elektronlara göre numune yüzeyinin daha derin bölgesinden geldiği için görüntünün ayırım gücü düşük olmaktadır.

Gelen elektron demetinin incelenen numune ile yapmış olduğu diğer bir etkileşme sonucu karakteristik x-ışınları oluşabilir. Buna göre, numuneye çarpan elektron,

numunedeki atomun iç yörüngesindeki bir elektronu koparır ve bir üst enerji seviyesindeki elektron bu kopan elektronun yerine geçer. Geçen elektron da dışarıya x-ışını yayar. Yayılan x-ışını her element için farklıdır. Ortaya çıkan karakteristik x-ışınları sayesinde, SEM cihazında incelenen numunede var olan elementler nitel ve nicel olarak belirlenir. Bu yöntemle numune içindeki elementlerin analizine enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopisi (EDS) adı verilir [12].

CdS ve CuO filmlerinin SEM analizleri Görsel 7.2.'de fotoğrafı verilen Zeiss Ultra Plus alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (Field Emission Scanning Electron Microscopy, FESEM) ile alınmıştır. FESEM analizlerinden önce yarıiletken malzemeler altın ile kaplanmış ve ölçümler oda sıcaklığında alınmıştır.

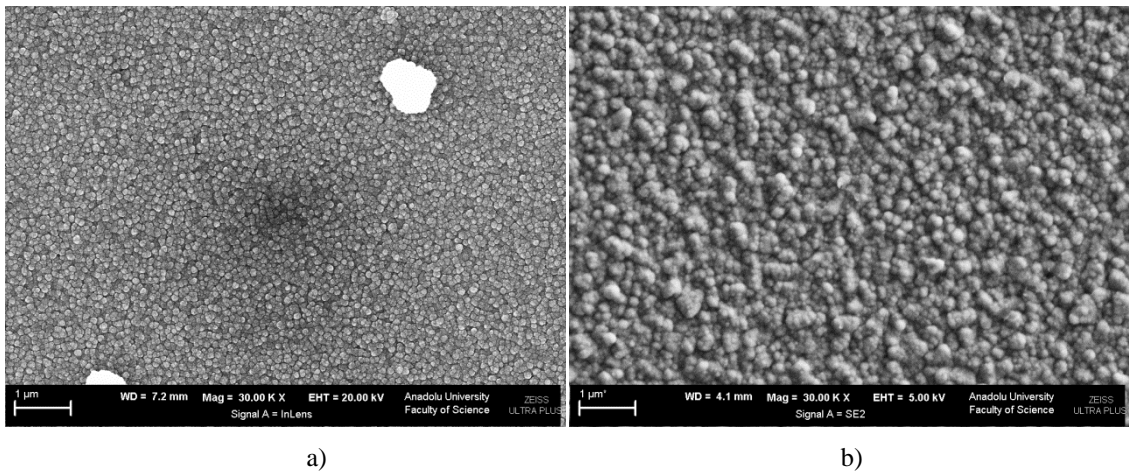


Görsel 7.2. Zeiss Ultra Plus FESEM fotoğrafı.

7.6. CdS Filmlerinin SEM Analizleri

CdS filmlerinin yüzey görüntüleri 20 ve 5 kV çalışma geriliminde ve 30 Kx büyütmede alınmıştır. SEM analizlerinden önce film yüzeylerine 30 mA akımda 80 s süreyle altın kaplama yapılmıştır. Şekil 7.8.'de cam ve FTO taban üzerine üretilen CdS filmlerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde genel olarak filmlerin tabana tutunmasının iyi olduğu söylenebilir. Filmlerin homojen, düzgün ve küçük taneli yapıda taban üzerine büyüdüğü söylenebilir. Bu durum AFM sonuçlarında elde edilen küçük pürüzlülük değerleri ile de uyumludur. SEM görüntülerinden filmlerin yüzeylerinde nanoparçacıkların homojen olarak dağıldığı ve sıkı bir form

halinde kaplandığı gözlenmiştir. Filmdeki nanoparçacıklar arasındaki tane sınırlarının (grain boundaries) belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum filmin iyon iyon şeklinde taban üzerine büyüdüğünü göstermektedir [6]. Cam taban üzerine elde edilen CdS filmde yüzey üzerinde beyaz bir görüntü vardır. Bu beyazlığın bu bölgede film kaplanmamasına bağlanabilir. FTO taban üzerine büyütülen filmin, cam üzerine büyütülen filmde daha büyük taneciklere sahip olduğu görülmüştür. Bunun taban üzerine elde edilen film yüzeyinde oluşan kristalciklerin birleşerek daha büyük kümelenmeler oluşturduğu söylenebilir.

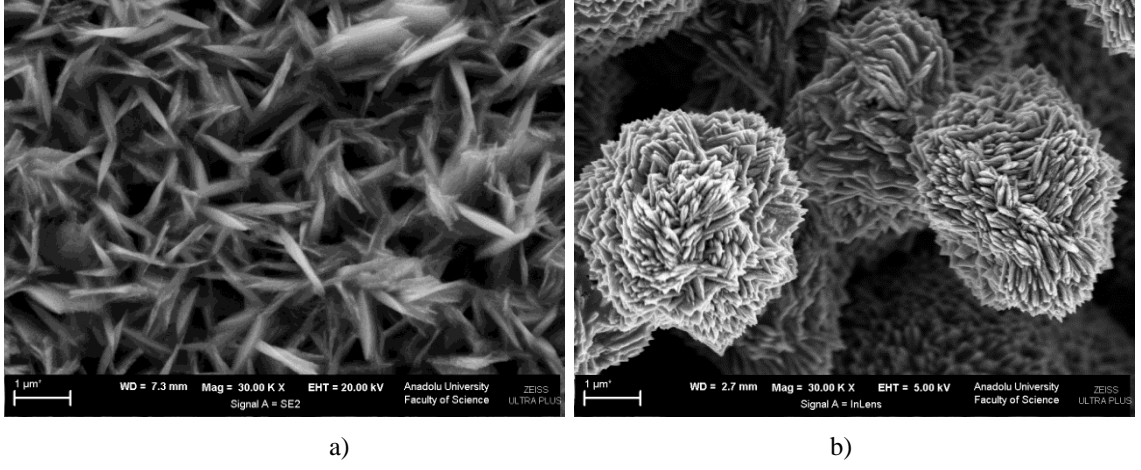


Şekil 7.8. a) Cam taban ve b) FTO taban üzerine elde edilen CdS filmlerinin SEM görüntüleri.

7.7. CuO Filmlerinin SEM Analizleri

CuO filmlerinin yüzey görüntüleri 20 ve 5 kV çalışma geriliminde ve 30 Kx büyütmede alınmıştır. Şekil 7.9.'da cam ve FTO taban üzerine üretilen CuO filmlerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde herhangi bir boşluk, delik veya çatlak görülmediğinden filmlerin tabana tutunmasının iyi olduğunu söylenebilir. Şekil 7.9.a.'da bütün yüzeyi homojen, düzgün bir şekilde kaplayan plaka benzeri elipsoidal CuO nanoyapılar vardır. Literatürde KBD ile elde edilmiş CuO filmlerinde plaka benzeri elipsoidal yapılar gözlenmektedir [90]. Şekil 7.11.b.'de plaka benzeri elipsoidal yapıların birleşerek daha büyük küresel tanecikleri oluşturduğu görülmektedir. SEM görüntülerinde oluşan nanoyapıların arasında nano boyutlu gözeneklerin olduğu görülmüştür. Bu durumda farklı taban üzerine büyütülen CuO filmleri film yüzeylerinde farklı morfolojilere sahip kristallenme gösterdiği söylenebilir. Literatürde büyütme yöntemi yapılarının film morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu

görülmektedir. Örneğin p-Si taban üzerinde KBD yöntemiyle elde edilen CuO filminde needle-like nanoyapıları gözlenirken, aynı taban üzerine solgel yöntemiyle elde edilen CuO filminde ise neredeyse kübik yapıda nanoyapılar şekillendiği ifade edilmektedir [91].



Şekil 7.9. a) Cam taban ve b) FTO taban üzerine elde edilen CuO filmlerinin SEM görüntüleri.

8. CdS ve CuO FİMLERİNİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

8.1. Giriş

Yarıiletken malzemeler birbirlerinden farklı elektriksel özellikler gösterebilmektedirler. Yarıiletken malzemelerin dc elektriksel özelliklerini belirleyebilmek için öncelikle metal-yarıiletken-metal yapıları oluşturulur. Bu yapıların oluşturulmasıyla uygulanan voltaja karşılık elde edilen akım değerlerinden yararlanılarak malzemenin öz direnci, iletkenliği, ne tür bir iletim özelliği gösterdiği gibi çeşitli elektriksel özellikleri hakkında fikir edinilebilir. Bu yapıların *I-V* karakteristiklerinden yararlanılarak, yarıiletken malzemenin *ohmik*, *space-charge-limited* (SCL), *Schottky Emisyonu*, *Poole-Frenkel Emisyonu*, *Tünel veya Alan Emisyonu* ve *İyonik İletim* gibi iletim özelliklerinden hangisine sahip olduğu belirlenebilir [92]. Yarıiletken üzerine oluşturulacak kontaklar için, farklı iş fonksiyonlarına sahip altın, bakır, gümüş, platin ve alüminyum gibi metaller kullanılmaktadır. Bu metallerin sahip oldukları iş fonksiyonları, metal-yarıiletken-metal kontak yapılarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında üst kontak olarak altın metali ve alt kontak olarak FTO iletken taban kullanılmıştır.

8.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Metal-yarıiletken kontakların elektriksel iletkenlik özelliklerinden faydalanılması ve elektronik endüstrisinde kullanılması hakkındaki ilk araştırma 1874 yılında Braun tarafından yapılmıştır. Toplam direncin uygulanan voltaja ve yüzey koşullarına bağlı olduğu belirtilmiştir. Metal-yarıiletken kontakların ilk pratik uygulamaları 1904 yılının başlarında noktasal kontaklar şeklinde yapılmıştır. 1931 yılında Wilson, yarıiletkenlerin akım iletim teorisini katıların bant teorisinden yararlanarak formüle etmiştir. Bu teori daha sonra metal-yarıiletken kontaklara uygulanmıştır. 1938 yılında Schottky, potansiyel engelinin kimyasal bir tabaka olmaksızın yalnız yarıiletkendeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklanabileceğini ileri sürmüştür. Bu düşünceden ortaya çıkan model Schottky engeli olarak adlandırılır. 1938 yılında Mott, Mott engeli olarak bilinen, metal-yarıiletken kontaklar için uygun bir teorik model tasarlamıştır. 1942 yılında bu modeller Bethe tarafından, termiyonik emisyon modeli olarak geliştirilmiştir [92].

Metal-yarıiletken kontaklar, doğru akım ve mikrodalga uygulamalarında sıkça kullanıldığından kontaklar üzerinde yoğun bir şekilde çalışılmıştır. Son zamanlarda

transistör ve gelişmiş vakum teknolojisi kullanılarak ideale yakın metal-yarıiletken kontaklar üretilmektedir. Özellikle, metal-yarıiletken kontaklar fotodedektörlerde, güneş pillerinde, metal-yarıiletken alan etkili transistörlerde kapı elektrodu olarak kullanılmaktadır [92].

Metal-yarıiletken kontaklar bütün yarıiletken elektronik ve optoelektronik cihazların önemli bir parçasıdır. Metal-yarıiletken kontakların arayüzeyinin en önemli özelliklerinden biri onun Schottky engel yüksekliği büyüklüğünün bilinmesidir. Schottky engel yüksekliği, metal-yarıiletken kontak arayüzeyi boyunca elektronik geçişi kontrol eder ve bu yüzden, herhangi bir yarıiletken cihazının performansı için çok önemlidir. 20. yüzyılın ikinci yarısından beri Schottky engel yüksekliği hakkında birçok ders kitabı ve makale yayınlanmıştır ve araştırmalar halen devam etmektedir [93].

Metal-yarıiletken kontaklar, modern elektronikte önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda yüzey ve arayüzey bilim tekniklerinin uygulanması göstermiştir ki, metal ve yarıiletkenler arasında oluşan kompleks arayüzeyin fiziksel özellikleri yüzeyin hazırlanma şartlarına bağlıdır. Çünkü birçok durumda yüzeyin üzerine depolanan kontak metalleri bilinmeyen katkı atomlarıyla birlikte depolanır. Bu arayüzey durumlarına neden olabilir ve metal-yarıiletken kontak cihazların kararlılığını, güvenilirliğini, performansını, kantağın mekaniksel ve elektriksel özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle, arayüzey durumları ve arayüzey-oksit tabakası doğrultucu kontakta cihazın karakteristik parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Yüzey atomları arasındaki boşluklar yüzey durumları olarak görülebilir. Kristal yüzeyleri genellikle laboratuvar ortamında doğal oksitler ve organik kirliliklerle kaplanır. Ayrıca, yarı logaritmik akım-gerilim karakteristiklerinde düşük voltajlarda ileri besleme durumunda akım-gerilim değişimi doğrusaldır, fakat uygulanan voltaj yeterince büyük olduğu zaman arayüzey durumlarının oluşturduğu R_s seri direnci nedeniyle akım-gerilim değişimi doğrusallıktan önemli ölçüde sapar. Arayüzey durumlarını belirlemede birçok teknik vardır. Yapılan çalışmalarda, Cowley ve Sze, farklı metallerle oluşan engel yüksekliklerinin analizlerinden arayüzey durumlarını belirleme tekniğini kullanmışlardır. Cart ve Rhoderick, metal-yalıtkan-yarıiletken (Metal-Insulator-Semiconductor) yapılarının arayüzey durumlarının yoğunluğunu belirlemek için $I-V$ karakteristiklerini kullanmışlardır. Chattopadhyay ve Raychaudhuri, metal-yarıiletken kontakların arayüzey durumlarını belirlemek için kapasitans tekniğini geliştirmişlerdir. Tseng ve Wu, ideal olmayan $I-V$ karakteristiklerinden arayüzey

durumlarının yoğunluklarından bulunan ve uygulanan voltajın bir fonksiyonunun özellikleri olarak arayüzey durumlarını ele almışlardır [94].

Kristal yüzeyinde periyodik potansiyeli ve enerji bantları son bulur. Yüzeyin üzerinde yabancı atomlar, boşluklar veya oksit tabakasının varlığı, yüzeyde lokalize olmuş kuantum durumlarının artmasına sebep olur. Bunlar yüzey durumları olarak adlandırılmaktadır. Yüzey durumları, yüzeyin yakınındaki bölgede olur ve katının özelliklerini etkiler. Bu yüzey durumları elektron yakalayabilirler veya verebilirler. Elektron verici yüzey durumları donör tipi ve elektron alıcı yüzey durumları da akseptör tipi yüzey durumları olarak adlandırılmaktadır [95].

Metal-yarıiletken kontakların enerji bant diyagramı, yarıiletkenin iletkenlik tipine ve yarıiletken ile metalin iş fonksiyonuna bağlıdır. Bir metal ile bir yarıiletken malzeme kontak haline getirildiğinde meydana gelen yeni sistem, metal-yarıiletken yapı olarak adlandırılır. Yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük veya küçük olması durumuna göre iki şekilde metal-yarıiletken kontak yapısı oluşur [96]. Kontak, iki malzemenin en az dirençle birbirine teması şeklinde düşünülebilir. Birbirine temas eden yüzeylerin temiz ve pürüzsüz olması önemlidir. İş fonksiyonları farklı olan iki malzeme birbiriyle kontak yapıldığı zaman, malzemeler arasında elektron akışı meydana gelir. Elektron akışı, Fermi enerji seviyesi büyük olan malzemedan küçük olan malzemeye doğrudur. Ya da diğer bir ifadeyle elektron akışı, iş fonksiyonu küçük olan malzemedan büyük olan malzemeye doğrudur. Bu elektron geçişi, iki malzeme arasında denge kontak potansiyel farkı oluşuncaya kadar, yani her iki malzemenin Fermi enerji seviyeleri birbirine eşitleninceye kadar devam eder. Bu durum iki metal arasında olduğu gibi, metal ile n -tipi veya p -tipi yarıiletkenler arasında oluşan kontak yapılarında da olabilir. Kontaklar, her iki malzemenin iş fonksiyonlarına bağlı olarak; taşıyıcı hareketinin bir yönde diğerine göre çok büyük olduğu doğrultucu kontak ve taşıyıcıların bir malzemedan diğerine kolayca geçebildiği ohmik kontak olmak üzere ikiye ayrılır.

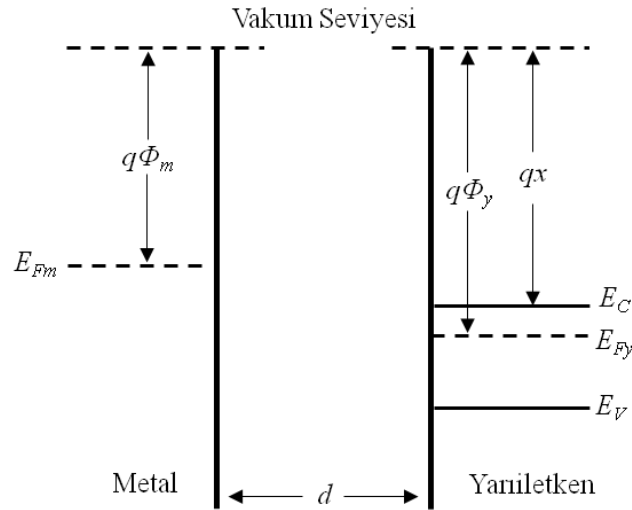
Metalin iş fonksiyonu ($q\Phi_m$) ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ($q\Phi_y$), bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan minimum enerji olarak tanımlanır. Fermi enerji seviyesi, malzemenin n -tipi ya da p -tipi olmasına göre değiştiği için değişken bir yapıya sahip niceliktir. Diğer taraftan, yarıiletkenlerde katkı miktarına bağlı olmayan ve χ ile gösterilen elektron ilgisi önemli bir parametredir. $q\chi$, iletim bandının alt sınırından bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanır.

8.2.1. Ohmik kontaklar

Metal ve yarıiletken arasında oluşan ohmik kontakın direnci, yarıiletken malzemeye göre kıyaslandığında ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Ohmik kontak yarıiletken malzemenin tipine göre ve yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük veya küçük olmasına göre iki farklı şekilde oluşturulabilir.

8.2.1.1. Metal/n-tipi yarıiletken arasında oluşan ohmik kontak

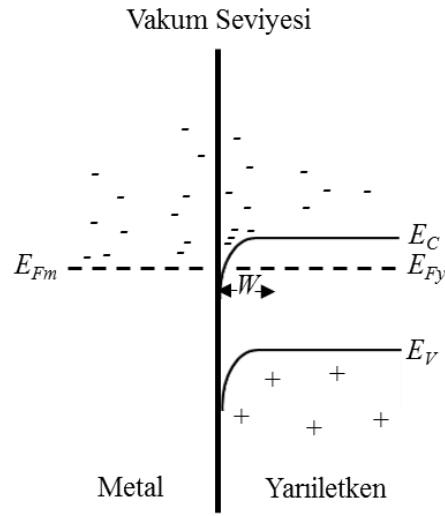
Metal/n-tipi yarıiletken için ohmik kontak yapısı $q\Phi_y > q\Phi_m$ şeklindedir. Metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçüktür. Şekil 8.1.'de görüldüğü gibi, metal ile n-tipi bir yarıiletkenin kontak oluşturmadan önceki durum için enerji bant diyagramı verilmiştir. Şekile göre metal/n-tipi yarıiletken kontağı arasında d kadar mesafe bulunduğu, başlangıçta elektronların geçişi olmaz ve dolayısıyla bir akım da gözlenmez.



Şekil 8.1. Metal/n-tipi yarıiletken ohmik kontakın kontak oluşturmadan önceki enerji bant diyagramı [50].

Şekil 8.2.'de görüldüğü gibi, metal ile n-tipi bir yarıiletken kontak oluşturmak üzere birbirine yaklaştırıldığında, arasındaki d mesafesi azaldığında, metalden yarıiletkene elektronların geçişi tünelleme yoluyla gerçekleşebilir. Bu durumda metal-yarıiletken kontağı oluşmaya başlar ve metal-yarıiletken arasında yüklerin yeniden dağılımı gerçekleşir. Metal-yarıiletken kontağı oluştuğunda, elektron akışı metalden yarıiletkenin iletim bandına doğru olur. Bu durumda yarıiletken tarafına geçen

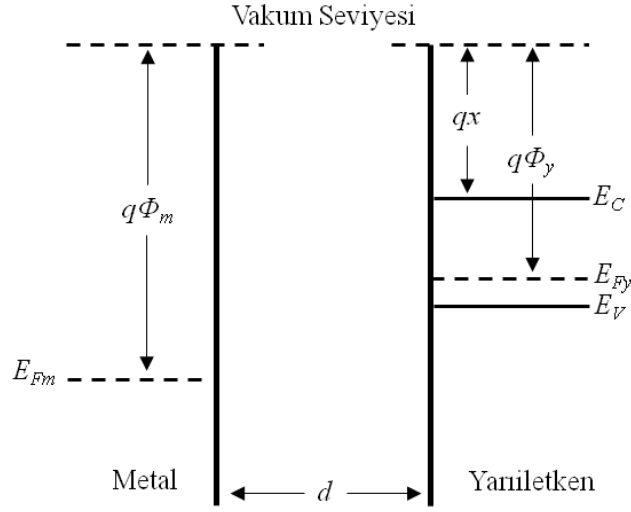
elektronlar metal tarafında holler bırakılır. Yarıiletkenin arayüzeyinde elektron yoğunluğu artar. Metal tarafındaki elektron yoğunluğunun azalması, metalin Fermi enerjisi seviyesini değiştirmez. Çünkü metaldeki elektron sayısı çok fazladır. Fakat yarıiletken tarafındaki elektron sayısının artmasıyla kontak sonrası denge konumuna gelmiş enerji-bant diyagramında bir bükülmeye sebep olur. Isıl dengeye ulaşıldığında yarıiletkenin Fermi seviyesi Şekil 8.2.'de görüldüğü gibi $q\Phi_y - q\Phi_m$ kadar yükselir. Yarıiletken arayüzey yakınındaki bölgede elektron yoğunluğu artar ve sistemin en yüksek dirençli bölgesi, yarıiletken tarafında oluşur.



Şekil 8.2. Metal/n-tipi yarıiletken ohmik kontakın kontak oluşturduktan sonraki enerji bant diyagramı [95, 50].

8.2.1.2. Metal/p-tipi yarıiletken arasında oluşan ohmik kontak

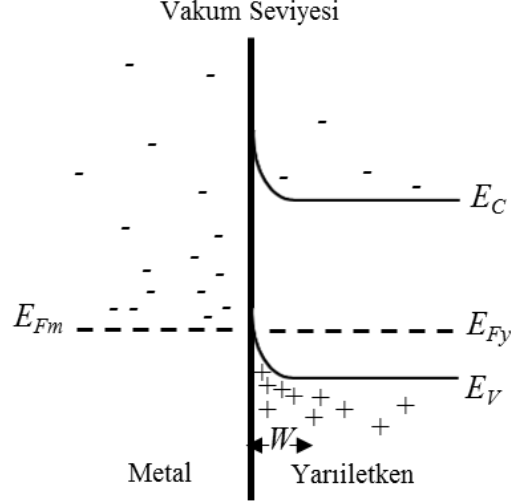
Metal/p-tipi yarıiletken için ohmik kontak yapısı $q\Phi_m > q\Phi_y$ şeklindedir. Metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyüktür. Şekil 8.3.'te görüldüğü gibi, metal ile p-tipi bir yarıiletkenin kontak oluşturmadan önceki durum için enerji bant diyagramı verilmiştir. Şekile göre, metal/p-tipi yarıiletken kontakta d kadar mesafe bulunduğundan, başlangıçta elektronların geçişi olmaz ve dolayısıyla bir akım da gözlenmez.



Şekil 8.3. Metal/*p*-tipi yarıiletken ohmik kontağın kontak oluşturmadan önceki enerji bant diyagramı [50].

Şekil 8.4.'te görüldüğü gibi, metal ile *p*-tipi bir yarıiletken kontak oluşturmak üzere birbirine yaklaştırıldığında, d mesafesi azaldığında, yarıiletkenden metale elektronların geçişi tünelleme yoluyla gerçekleşir. Bu durumda metal-yarıiletken kontağı oluşmaya başlar ve metal-yarıiletken arasında yüklerin yeniden dağılımı gerçekleşir. Metal-yarıiletken kontağı oluştuğunda, elektron akışı yarıiletkenin valans bandından metale doğru olur. Bu durumda valans bandında holler meydana gelir. Yarıiletkenin arayüzeyinde hol yoğunluğu artar. Metal tarafındaki elektron yoğunluğunun artması metaldeki elektron sayısı çok fazla olduğundan metalin Fermi enerji seviyesini değiştirmez. Fakat yarıiletken tarafındaki elektron sayısının azalması, Fermi enerji seviyesinin aşağı inmesine ve kontak sonrası denge konumuna gelmiş enerji bant diyagramında bir bükülmeye sebep olur. Malzemelerin Fermi enerji seviyeleri eşitlendiğinde, metal/*p*-tipi yarıiletken arasında potansiyel farkı yani potansiyel engeli oluşmaz ve elektron geçişi durur. Isıl dengeye ulaşıldığında yarıiletkenin Fermi seviyesi Şekil 8.4.'te görüldüğü gibi $q\Phi_m - q\Phi_y$ kadar aşağı bükülür. Hol konsantrasyonunun artmasıyla yarıiletken arayüzeyi daha fazla *p*-tipi olur. Elektron geçişlerinden sonra yarıiletkenin kontak arayüzeyi yakınındaki hol yoğunluğu iç kısımlardaki yoğunluğa göre oldukça fazlalaşır. Akümülyasyon bölgesi olarak adlandırılan, W genişliğindeki bu bölgede çoğunluk taşıyıcıları (holler), yarıiletkenin iç kısımlarındaki çoğunluk taşıyıcılarından oldukça fazladır. Ohmik kontağın arayüzeyinde, yarıiletken tarafında, yarıiletkenin hacmindeki serbest taşıyıcı

yoğunluğundan daha fazla serbest taşıyıcı var olduğu için, bu bölge taşıyıcı deposu olarak davranır [95].



Şekil 8.4. Metal/p-tipi yarıiletken ohmik kontakın kontak oluşturduktan sonraki enerji bant diyagramı [95, 50].

Bu n ve p tipindeki alıcı ve verici iyonlar valans ve iletim bandında bükülmelere sebep olur. Bu bükülme miktarına engel potansiyeli, difüzyon potansiyeli veya build-in voltaj denir. Toplam bükülme miktarı her iki yarıiletkenin iş fonksiyonları farkına eşittir. Bu miktar engel yüksekliğini bize verir. Bu ifade $V_{bi}=(\Phi_m-\Phi_y)$ şeklinde ifade edilir. Burada V_{bi} potansiyel farkıdır ve bu değer doğru besleme voltajı (build-in voltage) olarak da adlandırılır.

8.2.2. SCL akım mekanizması

İlk olarak 1940 yılında Mott ve Gurney tarafından, paralel düzlem elektrotları arasında SCL akım teorisi verilmiştir. Daha sonra 1956 yılında, Lambert'te dahil olmak üzere birkaç bilim adamı tarafından bu teori genişletilmiştir [97].

Metal-yarıiletken-metal yapısının kontak bölgesine bir dış elektrik alan uygulandığında, akümülyasyon bölgesinden yeteri kadar elektron yarıiletkene enjekte edilir. Uygulanan elektrik alan yeteri kadar büyükse, elektron yarıiletken içerisine uzay yüklerinin miktarıyla sınırlandırılmış bir akım şeklinde enjekte edilir. Bu akım SCL akımıdır. Herhangi bir tuzak etkisi olmadığında SCL akım yoğunluğu,

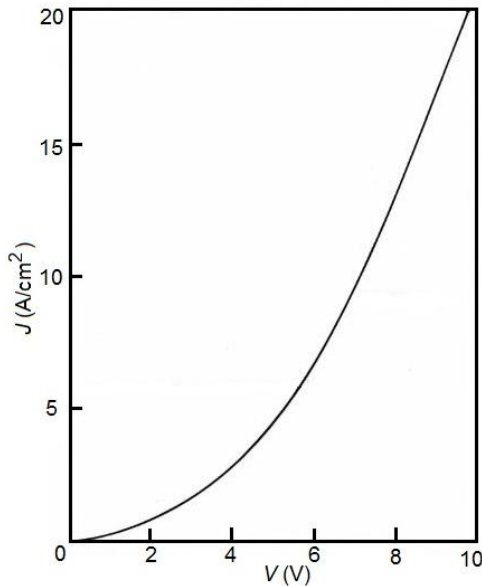
$$J = \frac{9}{8} \frac{\mu \epsilon_r \epsilon_0}{d^3} V^2 \quad (8.1)$$

eşitliği ile verilir. Burada μ serbest taşıyıcı mobilitesini, ϵ_r malzemenin bağıl dielektrik sabitini, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitini, d iki metal kontak arasındaki mesafeyi ve V uygulanan voltajı ifade eder. Bu eşitlik “*Mott-Gurney square law*” olarak bilinir. Burada akımın taşıyıcılar tarafından yalnızca bir yönde aktığı, difüzyon etkisi ihmal edildiği ve mobilitenin alandan bağımsız olduğu varsayılmıştır [97]. Şekil 8.5.’te tuzaklı yapıya sahip bir yarıiletkenin akım-voltaj grafiği verilmiştir.

Eğer tuzaklar yarıiletkenin iletim bandının altında bir E_t enerji seviyesinde bulunuyorlarsa serbest yüklerin, serbest ve tuzaklanmış yüklere oranı,

$$\frac{n_o}{n_o+n_t} = \theta_0 = \frac{N_c}{N_t} \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) \quad (8.2)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada n_o ve n_t sırasıyla serbest ve tuzaklanan yük yoğunluğunu; N_c , iletim bandındaki etkin durum yoğunluğunu; N_t tuzak yoğunluğunu ve k Boltzmann sabitini gösterir. θ_0 , burada tuzakların tam dolmadığı yani boş olduğu bölgedeki akımın tuzakların tam dolu olduğu akıma oranı’dır.



Şekil 8.5. Tuzaklı yapıya sahip bir yarıiletkenin akım-voltaj grafiği [92].

Tuzaksız durumda $n_t=0$ 'dır ve $\theta_o = 1$ olur. Tuzaklı durumda θ_o birden daha küçük olur. Akım yoğunluğu (J),

$$J = e\mu n_o E \quad (8.3)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada e elektron yükünü, μ serbest taşıyıcı mobilitesi, E uygulanan elektrik alanı belirtir. Burada difüzyon katkısı ihmal edilmektedir. Poisson eşitliği formunda yazılırsa,

$$\frac{dE}{dx} = \frac{n_o + n_t}{\epsilon_r \epsilon_o} \quad (8.4)$$

Eşitlik (8.2), (8.3) ve (8.4)'ten yararlanarak akım yoğunluğu,

$$J = \mu \theta_o \epsilon_r \epsilon_o E \frac{dE}{dx} \quad (8.5)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Bu nedenle,

$$\frac{Jx}{\mu \theta_o \epsilon_r \epsilon_o} = \frac{E^2(x) - E^2(0)}{2} \quad (8.6)$$

enjekte olmuş elektrot $x=0$ ise, $E(0)$ sıfır varsayılır.

$$E(x) = \left(\frac{2Jx}{\mu \theta_o \epsilon_r \epsilon_o} \right)^{1/2} \quad (8.7)$$

Bu eşitlik en son aşağıdaki haliyle elde edilir.

$$J = \frac{9}{8} \frac{\mu \epsilon_r \epsilon_o \theta_o}{d^3} V^2 \quad (8.8)$$

Bu ifade *Mott-Gurney yasası* olarak bilinir. Böylece, SCL akım yoğunluğu,

$$J \sim V^m \quad (8.9)$$

bağıntısı şeklinde yazılabilir. Akım yoğunluğu akım cinsinden ifade edildiğinde metal-yarıiletken-metal yapıların akım-voltaj karakteristikleri $I \propto V^m$ olarak değişir. Burada I akımı, V uygulanan voltajı ve m ise grafiğin eğimini belirtir. Burada $m = 1$ olduğunda yarıiletken ohmik iletim özelliğine sahiptir ve uygulanan voltajın etkisi altında gözlenen akım *Ohm Yasası*'na uyar. m birden büyük değerler de alabilir. Eğer $m \approx 2$ ise iletim mekanizması space charge limited (SCL) olarak adlandırılır [92,97-99]. SCL iletim mekanizması ohmik kontak özelliğindeki metal-yarıiletken-metal yapılarda gözlenir. SCL akımının oluşması, yarıiletkene yeteri kadar taşıyıcının gönderilmesi ile olur.

Ohm yasasına göre malzemeye uygulanan voltaj arttırıldığında malzemeye enjekte edilen serbest taşıyıcı yoğunluğu artar. Eğer yarıiletkene enjekte edilen serbest taşıyıcı (sadece elektronlar için) yoğunluğu, yarıiletkendeki serbest taşıyıcı yoğunluğunu aşmassa ohmik iletim baskın olur. Aksi durumda, yarıiletkene enjekte edilen serbest taşıyıcı yoğunluğu, yarıiletkendeki serbest taşıyıcı yoğunluğunu aşarsa, SCL akımının etkisi gözlenir. Ohmik iletimden space charge iletme geçiş $V = V_{tr}$ voltajında meydana gelir. Burada V_{tr} ohmik iletimden space charge iletme geçiş voltajıdır. Bu durumda tuzaksız yapı için ohmik iletimden SCL iletimine geçiş voltajı aşağıdaki bağıntıyla verilir.

$$V_{tr} = \frac{8 en_0 d^2}{9 \epsilon_r \epsilon_0 \theta_0} \quad (8.10)$$

Bu voltajda geçiş akım yoğunluğu,

$$J_{tr} = \frac{8 e^2 n_0^2 \mu d}{9 \epsilon_r \epsilon_0 \theta_0} \quad (8.11)$$

şeklinde yazılır. $V = V_{TFL}$ yani trap-filled-limited (TFL) voltajında, bütün tuzaklar dolar ve akım θ_0^{-1} miktarında hızlı bir şekilde artış gösterir. Burada m değeri çok büyüktür.

$$V_{TFL} = \frac{e N_t d^2}{2 \epsilon_r \epsilon_0} \quad (8.12)$$

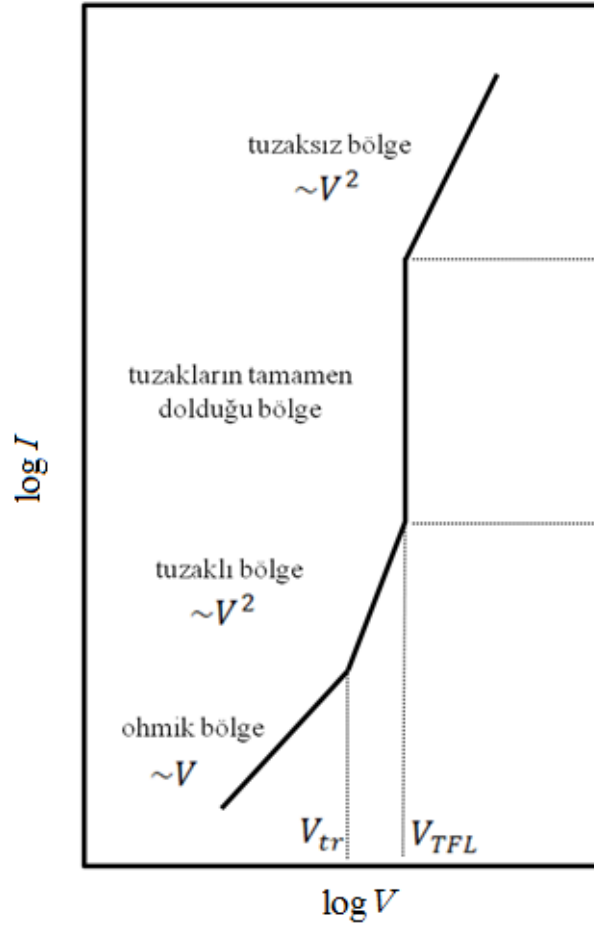
Yarıiletkenlerde, çeşitli kusurlardan, katkı atomlarından kaynaklanan ve yasak enerji aralığında iletim bandının altında (n -tipi yarıiletkenler), Fermi enerji seviyesinin

üstünde bulunan tuzaklar *sığ tuzak* olarak adlandırılır. Sığ tuzaklı space-charge-limited (SCL) iletimi için I - V karakteristiği Şekil 8.6.'da verilmiştir.

Şekil 8.6.'da verilen “ohmik bölge” ohmik akıma karşılık gelen durumu göstermektedir ve metal-yarıiletken kontağa uygulanan küçük voltajlarda meydana gelir. Bu bölgede yarıiletken içerisine enjekte edilen serbest taşıyıcı sayısı, yarıiletken içerisindeki serbest taşıyıcılara oranla ihmal edilebilecek kadar çok küçüktür. Bu bölgede ohmik iletim baskındır.

Şekil 8.6.'da “tuzaklı bölge” SCL akımına karşılık gelen durumu göstermektedir. Metal-yarıiletken kontağa büyük voltaj uygulanmaktadır. Uygulanan voltajın artmasıyla birlikte akım lineer değişimden daha fazla artar ve voltajın karesi ile artış gösterir. Bu bölgede metal kontak tarafından enjekte edilen taşıyıcı sayısı malzemede oluşturulan taşıyıcı sayısından daha fazla olur. Enjekte edilen taşıyıcıların sayısı daha baskın durumdadır. Bu bölge tuzakların etkisinden meydana gelmektedir. Tuzaklar, serbest taşıyıcıları yakalayıp etkisini gösterir. Bu bölgede, ölçülen en yüksek akım değeri tuzakların tamamen dolduğu V_{TFL} voltajında gözlenir.

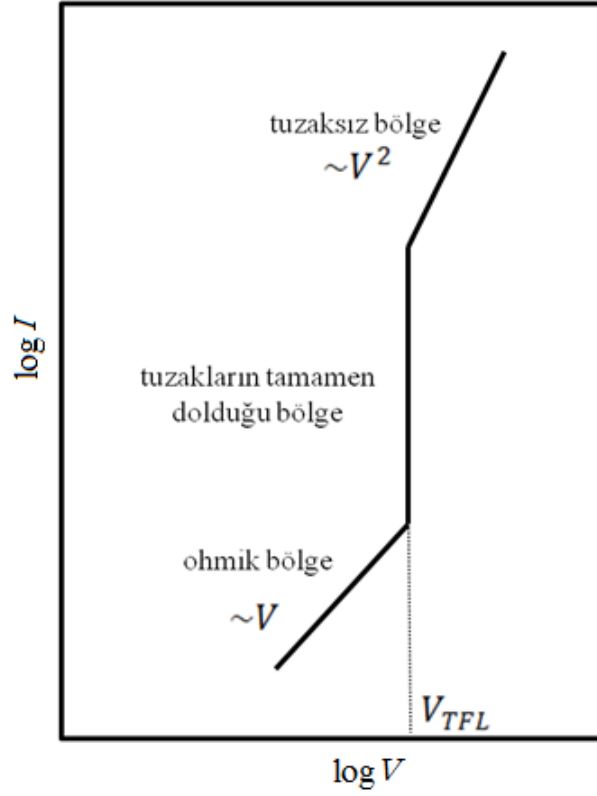
Şekil 8.6.'da “tuzakların tamamen dolduğu bölge” uygulanan voltajın artırılmasıyla birlikte tuzaklar dolmaya başlar ve V_{TFL} değerinde bütün tuzaklar dolmuş olur. V_{TFL} değerinden itibaren akım yoğunluğunda keskin bir artış gözlenir. Akım değerindeki bu hızlı artış θ_0^{-1} katsayısına ulaşınca kadar devam eder.



Şekil 8.6. Sığ tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj karakteristiği [99].

Şekil 8.6.'da “tuzaksız bölge” voltajın artışı sonrasında akım V^2 ile doğru orantılı olarak değişir. Fermi enerji seviyesi tuzak seviyesine yaklaşır. Bu bölgede tuzakların tamamı doludur.

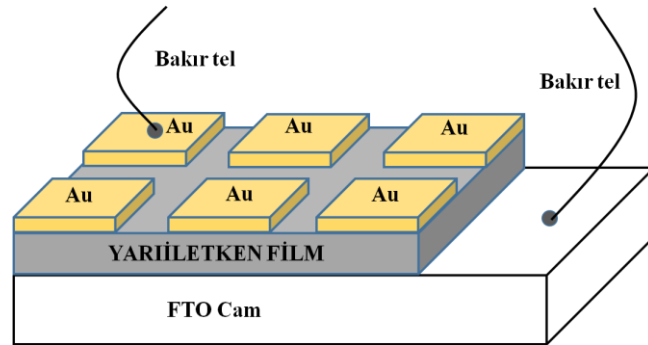
Tuzak enerji seviyeleri Fermi enerji seviyesinin altında ise (n -tipi yarıiletken) derin tuzak (deep trap) olarak adlandırılır. Şekil 8.7.'de derin tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj karakteristiği verilmiştir. Burada ohmik bölgeyi sığ tuzaklı SCL iletiminden farklı olarak “tuzakların tamamen dolduğu bölge” takip eder. Bu bölgede tuzaklar dolduktan sonra Fermi enerji seviyesi n -tipi malzemede iletim bandına, p -tipi malzemede valans bandına doğru yaklaşacaktır.



Şekil 8.7. Derin tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj karakteristiği.

8.3. FTO/CdS ve FTO/CuO Filmlerinde Metal-Yarıiletken-Metal Yapılarının Oluşturulması

Elde edilen filmlerin elektriksel özelliklerini inceleyebilmek için bu çalışmada öncelikle metal-yarıiletken-metal yapıları oluşturulmuştur. FTO cam taban üzerine elde edilen CdS ve CuO yarıiletken filmlerinin elektriksel özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla metal-yarıiletken şeklinde yapılar, Şekil 8.8.'deki gibi sandviç yapıda oluşturulmuştur.



Şekil 8.8. Metal-yarıiletken-metal yapının şematik gösterimi.

CdS ve CuO filmleri üzerine metal kaplama işlemi, Leybold-Heraus 300 Univex System cihazı kullanılarak vakum altında buhar depolama yöntemiyle oluşturulmuştur. Sistemde metal kontak malzemesi olarak altın (Au) kullanılmıştır. FTO taban üzerine altın malzemesi 10^{-5} Torr basınç altında buharlaştırılarak elde edildi. Burada Au metalinin kullanılmasının sebebi, Au metali ile yapılan kontakların daha iyi doğrultucu bölge karakteristiği göstermesinden dolayıdır. Kontak, iki malzemenin en az dirençle birbirine dokunması şeklinde düşünülebilir. Temas eden yüzeylerin temiz ve pürüzsüz olması önemlidir.

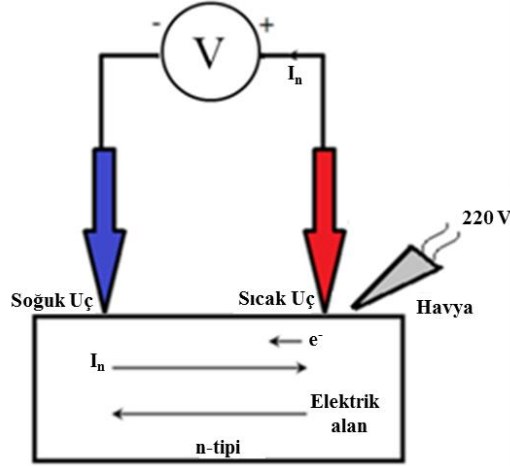
Metal buharlaştırılmadan önce CdS ve CuO yarıiletken filmlerinin üst yüzeyinin altın ile kaplanması istenmeyen bölgeler alüminyum folyo ile kapatılarak maskelenmiştir. Böylece kontaklar oluşturulmuştur. Yarıiletken filmler üzerine CdS için 50 nm, CuO için 90 nm kalınlığında altın buharlaştırılmıştır. Numunelerin ölçümlere hazır hale gelebilmesi için altın kaplanan kontakların üzerine gümüş yapıştırıcı (silver paste) kullanılarak ince bakır tellerle bağlantı yapılmıştır. Oluşturulan yapılar ölçüm öncesi kapalı karanlık kutularda kısa devre konumunda bekletilmiştir.

FTO/CdS/Au ve FTO/CuO/Au yapısındaki filmlerin akım-voltaj değerleri karanlıkta ve oda sıcaklığında 0-1 V aralığında 0,01 V'luk voltaj artışlarıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Hewlett Packard marka 4140B pA Meter/DC Voltage Source cihazı ve VEE One Lab 6.1 bilgisayar programı kullanılarak alınmıştır. Ölçümler sonucu alınan veriler yardımıyla CdS ve CuO yarıiletken filmlerinin *I-V* grafikleri çizilmiştir.

8.4. Sıcak Uç Metodu ile Taşıyıcı Tipinin Belirlenmesi

Yarıiletkenlerde elektriksel iletimin elektronlarla veya hollerle olduğunun bilinmesi önemlidir. Yarıiletkendeki taşıyıcı tipini belirlemenin kolay yollarından biri sıcak uç metodudur. Şekil 8.9.'da sıcak uç metodunun şematik gösterimi verilmiştir. Isıtılmış bir havaya yarıiletken yüzeyinde bir noktaya yaklaştırılarak bölgenin ısınması sağlanır. Voltmetrenin uçlarından biri bu sıcak bölgedeki kontağa, diğeri ise soğuk bölgedeki başka bir kontağa dokundurulur. Yarıiletken yüzeyindeki sıcak bölgedeki, *n*-tipi yarıiletken ise, serbest elektronlar kazandıkları ısıl enerji ile hareketlerini artırarak sıcak bölgeden geride sabit pozitif iyonları bırakarak uzaklaşırlar. Bu bölge artık artı yüklüdür. Voltmetrenin pozitif ucu bu bölgeye dokundurulmuşsa voltmetrenin ibresi

pozitif yönde saptır. Voltmetre ibresinin pozitif saptması yarıiletkendeki taşıyıcıların elektronlar yani yarıiletkendeki taşıyıcı tipinin *n*-tipi olduğu anlamına gelir. Yarıiletkenin *p*-tipi olması durumunda voltmetrenin ibresinin negatif yönde sapacağı açıktır [100].



Şekil 8.9. Sıcak uç metodunun şematik gösterimi [100].

8.5. FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au Filmlerinin DC İletkenlikleri

Elektrot uçları kısa devre halinde bulunan metal-yarıiletken-metal yapılarının ölçüm cihazının özel kutusu aracılığı ile cihaza bağlantısı yapılmıştır. Bu durumda, yaklaşık 30 dakika beklenildikten sonra, filmlerin *I-V* ölçüm sonuçları alınmıştır. Ölçümler sonucu alınan veriler yardımıyla FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au yapıları için akım-voltaj grafikleri Şekil 8.10. ve 8.11.'deki gibi çizilmiştir. Bu grafiklere göre FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au yapılarında ohmik ve SCL akım mekanizmalarının olduğu görülmüştür. Akım voltaj grafiklerinden yararlanılarak FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au yapılarının özdirenç ve iletkenlik değerleri yapıların *I-V* grafiğinin lineer kısmının eğimlerinden hesaplanmıştır. Yarıiletken malzemenin sahip olduğu elektriksel iletkenliği ve özdirenci,

$$R = \frac{V}{I} \quad (8.13)$$

$$R = \rho \frac{d}{A} \quad (8.14)$$

eşitlik (7.13), eşitlik (7.14)'te yerine yazıldığında;

$$\frac{V}{I} = \rho \frac{d}{A} \quad (8.15)$$

ifadesi elde edilir. Eşitlik (7.15)'i düzenlersek;

$$\rho = \frac{V A}{I d} \quad (8.16)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (8.17)$$

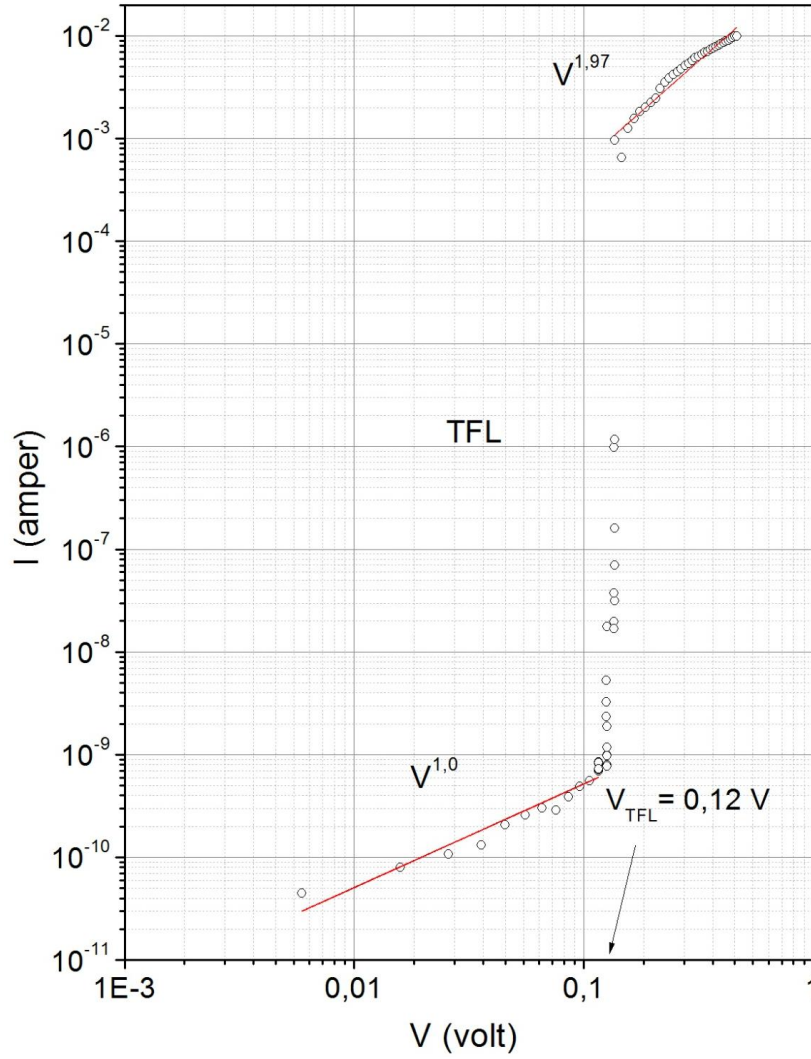
ifadesi elde edilir. FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au yapılarında A elektrot alanı, d yarıiletken film kalınlığı, σ iletkenlik ve ρ öz direnç değerleri Çizelge 8.1.'de verilmiştir. Yarıiletkenlerin öz dirençleri 10^{-4} - $10^7 \Omega \cdot m$ değerleri arasında değiştiği göz önünde bulundurulduğunda, Çizelgede verilen öz direnç değerlerinin verilen aralıkta olduğu söylenebilir [50,51].

Çizelge 8.1. FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au yapılarının A , d , ρ ve σ değerleri.

Malzeme	$A(m^2)$	$d(nm)$	$\rho (\Omega \cdot m)$	$\sigma(\Omega \cdot m)^{-1}$
FTO/n-CdS/Au	$1,1 \times 10^{-5}$	358	31,62	$3,1 \times 10^{-2}$
FTO/p-CuO/Au	$0,5 \times 10^{-5}$	2040	4,46	$2,2 \times 10^{-1}$

Şekil 8.10.'da FTO/n-CdS/Au sandviç yapısındaki malzemenin akım-voltaj grafiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde 0-0,12 V arasındaki bölgede akımın uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği belirlenmiştir. Bu da bu bölgede ohmik iletimin etkin olduğunu gösterir. Bu bölgede akımı yarıiletkendeki serbest yükler oluşturmaktadır. Ohmik iletim bölgesini, uygulanan voltajın artırılmasıyla birlikte tuzakların tamamen dolduğunu ifade eden ve akımın keskin bir şekilde arttığı TFL bölgesi izlemektedir. Ohmik bölgeden TFL bölgesine geçiş voltajı $V_{TFL}=0,12$ V olup, bu voltaj değerinden itibaren tuzakların tamamen dolduğu ve bunun sonucunda Fermi enerjisi seviyesinin iletim bandına doğru yaklaştığını söyleyebiliriz. Ohmik bölgeyi TFL bölgesinin izlemesi, FTO/n-CdS/Au yapısının derin tuzaklı yapıya sahip olduğu anlamını taşır. Tuzakların tamamen dolu olduğu TFL bölgesinden sonra akımın

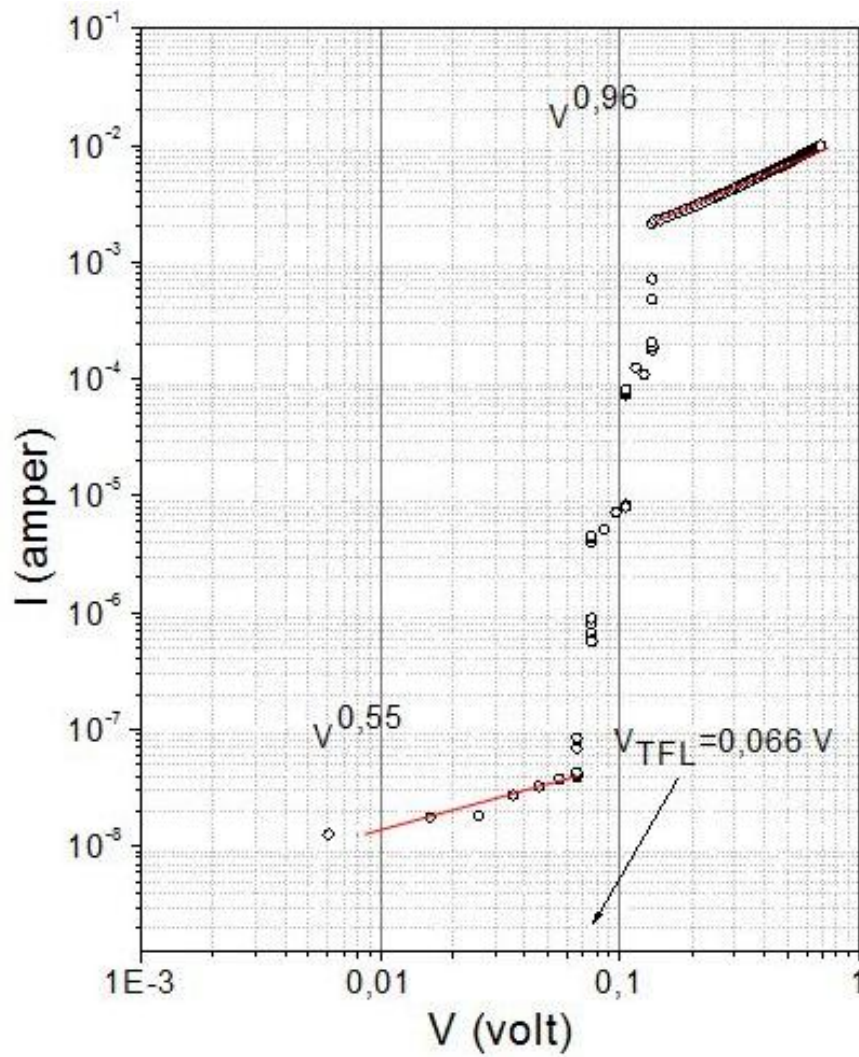
uygulanan voltajla $V^{1,97}$ şeklinde değiştiği iletim b3lgesi gelmektedir. Bu b3lgede akıma serbest y3k taşıyıcıları katkıda bulunurken, tuzakların etkisi kaybolmuştur. Şekil 8.10.'dan, Eşitlik (8.12) kullanılarak hesaplanan tuzak yoğunluğu $1,04 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ olarak ve tuzakların iletim bandının $0,67 \text{ eV}$ altında olduğu hesaplanmıştır. Yapılan bir çalışmada CdS yarıiletken filminin tuzak yoğunluğu $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ve tuzakların iletim bandının $0,61 \text{ eV}$ altında olduğu verilmiştir [101].



Şekil 8.10. FTO/n-CdS/Au yapısının I-V grafiği.

Şekil 8.11.'de FTO/p-CuO/Au sandviç yapısındaki malzemenin akım-voltaj grafiği g3r3lmektedir. Grafikte 3l3m sonuçları incelendiğinde $0-0,066 \text{ V}$ arasında akımın uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği ve akımın $I \propto V^{0,55}$ olduğu belirlenmiştir. Bu da bu b3lgede ohmik iletimin olduğunu g3sterir. Ohmik iletim

bölgesini *TFL* bölgesi izlemektedir. Ohmik bölgeden *TFL* bölgesine geçiş voltajı $V_{TFL}=0,066$ V olup, bu voltaj değerinden itibaren tuzakların tamamen dolduğunu ve bunun sonucunda Fermi enerji seviyesinin valans bandına doğru yaklaştığını söyleyebiliriz. Ohmik bölgeyi *TFL* bölgesinin izlemesi, FTO/p-CuO/Au yapısının derin tuzaklı yapıya sahip olduğu anlamını taşır. *TFL* bölgesinden sonra akımın uygulanan voltajla $V^{0,96}$ şeklinde değiştiği iletim bölgesi gelmektedir. FTO/p-CuO/Au yapısının tuzak yoğunluğu $3,18 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ve tuzakların valans bandının 0,31 eV üstünde olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 8.11. FTO/n-CuO/Au yapısının I - V grafiği.

Yapılan bir çalışmada CuO yarıiletken filminin tuzak yoğunluğu $3,4 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ve tuzakların valans bandının 0,27 eV üstünde olduğu verilmiştir [102].

8.6. FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au Filmlerinin AC İletkenlikleri

Metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey, uygulanan voltajla değişen yüzey yüküne, ohmik kontak ve kıtlık tabakası arasında oluşan seri dirence bağlıdır. Bu nedenle arayüzey, seri direnç ve aradurumlar metal-yarıiletken kontakların karakteristik parametrelerinin bulunmasında önemli rol oynamaktadır. İdeal kapasitans-voltaj karakteristikleri frekanstan bağımsızdır ve artan ileri besleme ile kapasitansı artmaktadır. Bununla birlikte, doğal oksit tabakasının varlığı veya metal-yarıiletken arasındaki arayüzey durumları, Schottky diyodu seri direnci ve kusurlu ohmik kontakların azınlık taşıyıcı enjeksiyon etkisi, paralel kondüktans, kararlı olmayan kontak akımları, uzay-yük bölgesinde yasak enerji aralığında derin tuzak yoğunluğu ve yarıiletken yüzey hazırlama şartları $C-V$ ve admittans değerlerini etkiler. Metal-yarıiletken kontakların opto-elektriksel karakteristikleri arayüzey özellikleriyle kontrol edilir. Bu yüzden, arayüzey durumları üzerine çalışmalar, metal-yarıiletken aygıtların elektriksel özelliklerini anlamak için önemlidir. Verilen voltajla, azalan frekansla kapasitans değerinin azalması, arayüzey durumların düşük frekanslarda ac sinyali izler ve arayüzey yüklerinin katkısından dolayı space charge kapasitansının eklenmesiyle fazlalık kapasitans oluşur. Shottky engel diyotlarında, yüksek frekanslarda kapasitans sadece space charge kapasitansıdır. Çünkü arayüzey durumlarındaki yükler ac sinyali izleyemezler ve bu frekanslarda kapasitansa katkıda bulunmaz [103].

8.6.1. Kapasitans-voltaj ölçümleri

Metal-yarıiletken arasında çeşitli kusurların bulunması nedeniyle arayüzey bir yalıtkan gibi davranabilir. Bu durumda yapı metal-yalıtkan-yarıiletken gibi davranır. Metal-yalıtkan-yarıiletken yapı dielektrik sabitli bir kapasitör olarak değerlendirilerek metal-yarıiletken-metal yapıların elektriksel parametreleri $C-V$ ölçümlerinden belirlenebilir.

Metal-yarıiletken kontak yapısı oluştuğunda, yarıiletkendeki kontak bölgesine yakın elektronların metale geçmesiyle yarıiletkende elektronların azalmasından kaynaklanan bir kıtlık bölgesi (depletion region) meydana gelir. Bu kıtlık bölgesindeki yüklerin gerilime bağlı değişimi bize kıtlık bölgesinin kapasitansını verir. Bu kıtlık bölgesinin genişliği,

$$W \text{ (kıtlık bölgesinin genişliği)} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_y}{qN_D} \left(V_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right)} \quad (8.18)$$

ile verilir. Bu ifade de, ε_y yarıiletkenin dielektrik sabitini, N_D katkı atomu konsantrasyonunu, V_{bi} engel potansiyelini, V uygulanan gerilimi, $\frac{kT}{q}$ ısı potansiyeli göstermektedir. Kıtlık bölgesinin yükü,

$$Q_{yüzey} = qN_D W = \sqrt{2q\varepsilon_y N_D \left(V_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right)} \text{ coulomb/cm}^2 \quad (8.19)$$

Bu durumda kıtlık bölgesinin kapasitansı,

$$C = \frac{Q_{yüzey}}{V} \quad (8.20)$$

eşitliği ile verilir. Metal-yarıiletken kontakta kıtlık bölgesinin birim alanının kapasitansı ise,

$$C \equiv \frac{\partial Q_{yüzey}}{\partial V} \quad (8.21)$$

$$C = \sqrt{\frac{q\varepsilon_y N_D}{2 \left(V_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right)}} \text{ (farad/cm}^2\text{)} \quad (8.22)$$

eşitlikleriyle ifade edilir. Diğer taraftan,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2 \left(V_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right)}{q\varepsilon_y N_D} \quad (8.23)$$

$$\frac{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{(-dV)} = \frac{2}{q\varepsilon_y N_D} \quad (8.24)$$

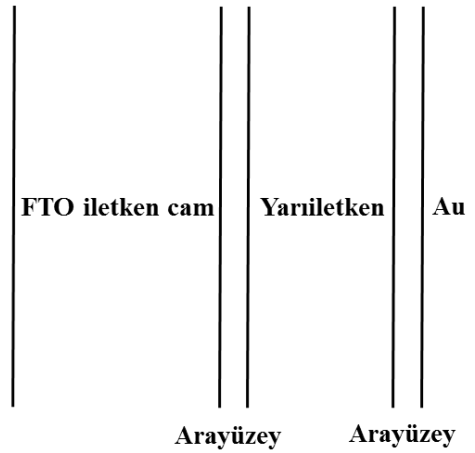
eşitlik (7.24)'ten görüleceği üzere metal-yarıiletken kontağın C^2-V değişiminin eğimi N_D değerini verir [92]. Ayrıca bu ifade kullanılarak birim alan başına kapasitans yazıldığında N_D ,

$$N_D = \frac{2}{q\epsilon_y\epsilon_oA^2} \left[-\frac{dV}{d\left(\frac{1}{C^2}\right)} \right] \quad (8.25)$$

ile ifade edilir.

İleri besleme altında bazı kontaklar space-charge kapasitansından fazladır ve bu fazlalık kapasitans değeridir. Bu fazlalık kapasitans arayüzey durumlarından kaynaklanmaktadır. Metal-yarıiletken kontaklarda bazı durumlarda, ince katmanlı yapılar, arayüzey kapasitansı (C_o) oldukça büyük olduğundan seri bağlı durumda sistem kapasitansı üzerindeki etkisi ihmal edilebilmektedir. Sistem kapasitansı ($C-C_o$) olarak hesaplanır ve tuzak yoğunluğu, engel potansiyel değerleri (V_{bi}), $\left[\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_o}\right)\right]^{-2} \sim V$ grafiğinden hesaplanır [92, 104, 105].

C^2-V grafiğinde ters voltaj lineer olmayan durum veya eğrilik arayüzey durumlarının varlığından dolayı oluşan 'fazlalık kapasitans' (C_o) ile açıklanmıştır. Fazlalık kapasitans değeri frekans arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Bu durum arayüzey durum yoğunluğunun artan frekansla azalmasına bağlıdır. Yarıiletkenin kapasitansı (C_y) ve arayüzey durumlarının varlığından dolayı oluşan fazlalık kapasitans (C_o) birbirleriyle seri bağlıdır. Bu durum Şekil 8.12.'de temsili olarak çizilmiştir.



8.12. Yarıiletken ve arayüzey durumlarının kapasitansı.

Yarıiletken ve arayüzeyden oluşan metal-yarıiletken kontağın toplam kapasitansı seri bağlı kondansatörlerdeki kapasitans değeri gibi hesaplanabilir. Bu durumda toplam kapasitans,

$$(C)^{-1} = (C_y)^{-1} + (C_o)^{-1} \quad (8.26)$$

olarak ifade edilir. Buradan, $\left[\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_o}\right)\right]^{-2} - V$ 'ye göre grafiğinde yarıiletken için N_D ve V_{bi} değerleri hesaplanabilir.

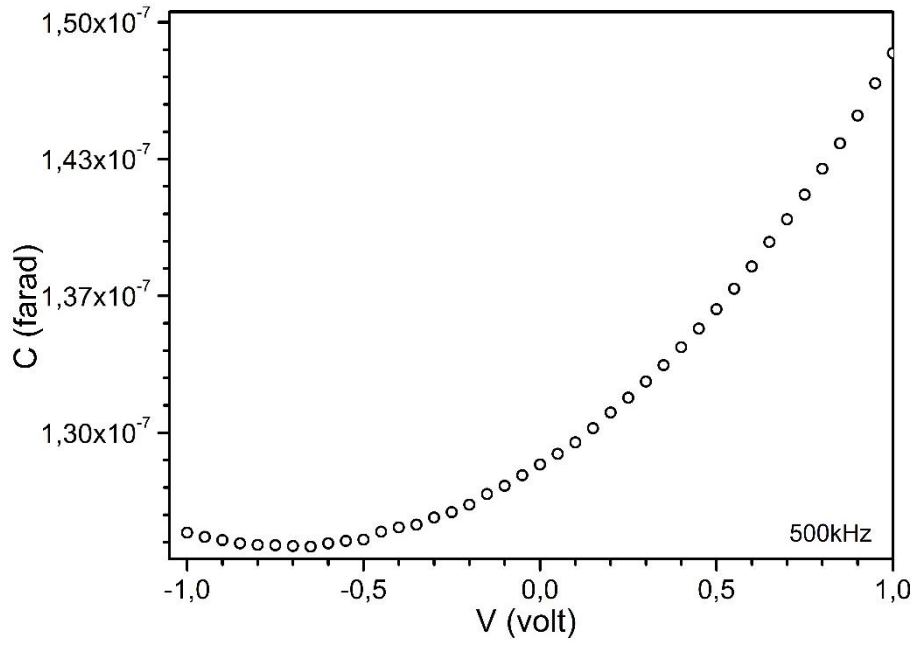
Bu çalışmada elde edilen FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au yapılarının karakteristikleri kapasitans-voltaj ($C-V$) ölçümleri alınarak arayüzey durumları incelenmiştir. FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au filmlerinin ac iletkenlik ölçümleri karanlıkta ve oda sıcaklığında Hewlett Packard 4192A LF Impedance Analyzer (5Hz-13MHz) cihazında alınmıştır. FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au yapılarının kapasitans-voltaj ve kondüktans-frekans ölçümleri alınıp değişim grafikleri çizilmiştir. Kapasitans-voltaj eğrilerinden tuzak yoğunlukları ve difüzyon potansiyelleri hesaplanmıştır.

8.6.1.1. FTO/n-CdS/Au yapısının kapasitans-voltaj ölçümleri

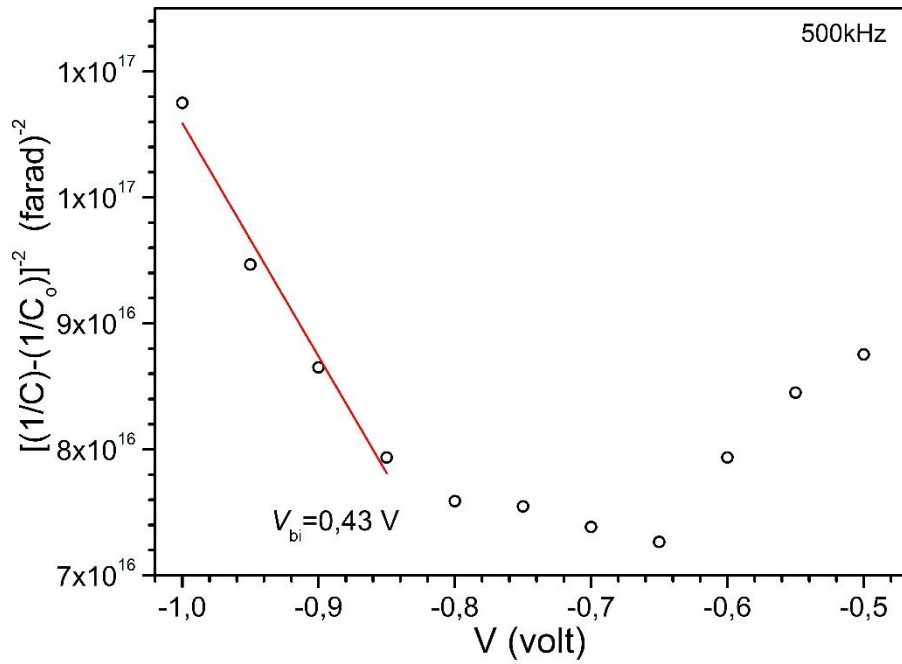
Şekil 8.13.'te FTO/n-CdS/Au yapısının 500 kHz frekansta kapasitans-voltaj grafiği verilmiştir. Grafikte -1 ile -0,6 V aralığında numunenin kapasitans değerindeki değişimin -0,6 ile 1 V aralığındaki değişimden daha küçük olduğu görülmektedir.

FTO/n-CdS/Au yapısının $C-V$ verilerinden faydalanarak, $\left[\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_o}\right)\right]^{-2} - V$ grafiği Şekil 8.14.'teki gibi elde edilmiştir. Bu grafiğin eğrisinin voltaj eksenini kestiği noktadan V_{bi} potansiyeli 0,43 V ve eşitlik (8.25) kullanılarak eğrinin eğiminden N_D , $6 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır.

AC ölçümlerinden belirlenen N_D değeri $6 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ile dc ölçümlerinden elde edilen N_T değeri $1,04 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ karşılaştırıldığında aralarında büyük bir fark olmadığı söylenebilir. Yapılan bir çalışmada CdS filmi için V_{bi} potansiyeli 0,393 V ve N_D ; $1,84 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ olarak verilmiştir [106]. Ayrıca, $C^{-2} - V$ grafiğinin lineer olarak değişmemesi arayüzey durumlarının düzgün dağılmayan katkı yoğunluğuna atfedilmiştir [107].



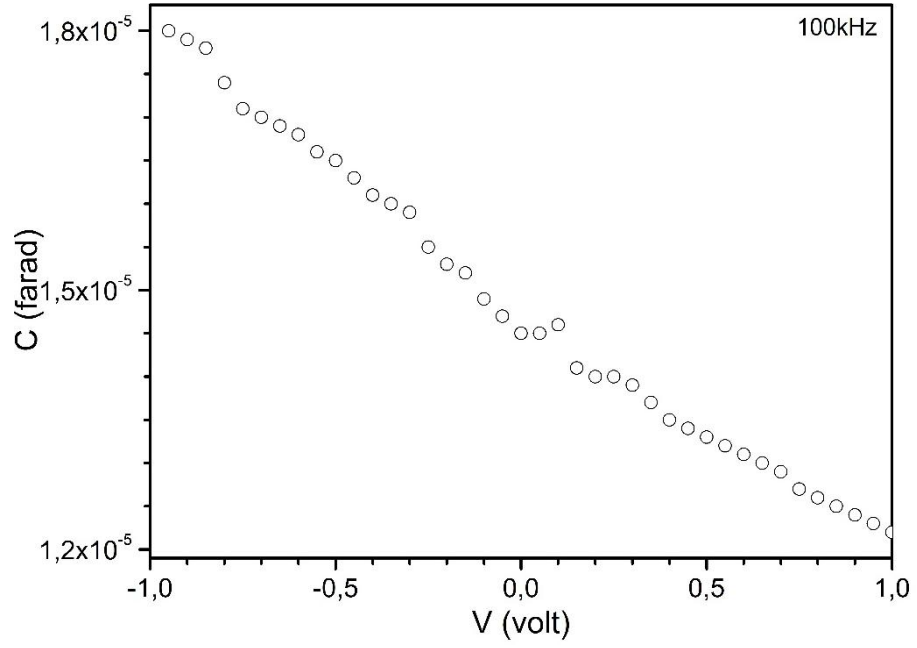
Şekil 8.13. 500 kHz frekansta FTO/n-CdS/Au yapısının C-V grafiği.



Şekil 8.14. 500 kHz frekansta FTO/n-CdS/Au yapısının $\left[\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0}\right]^{-2}$ -V grafiği.

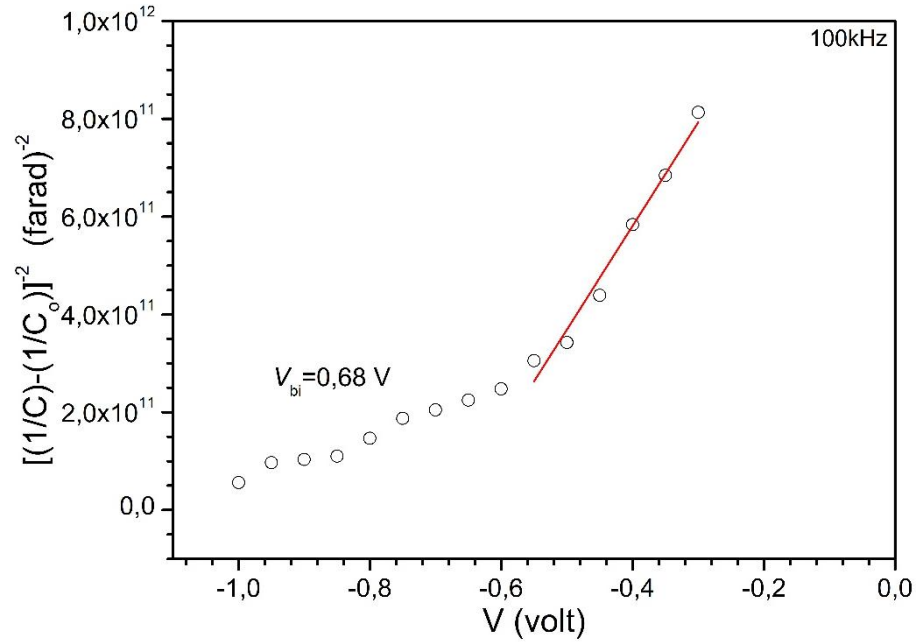
8.6.1.2. FTO/p-CuO/Au yapısının kapasitans-voltaj ölçümleri

Şekil 8.15.'te FTO/p-CuO/Au yapısının 100 kHz frekansta kapasitans-voltaj grafiği verilmiştir. Grafikte verilen voltaj aralığında, voltaj değerleri arttıkça kapasitansın azaldığı görülmektedir.



Şekil 8.15. 100 kHz frekansta FTO/p-CuO/Au yapısının C-V grafiği.

FTO/p-CuO/Au yapısının 100 kHz'deki C-V verilerinden faydalanılarak, $\left[\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0}\right)\right]^{-2} - V$ grafiği şekil 8.16.'daki gibi elde edilmiştir. $\left[\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0}\right)\right]^{-2} - V$ eğrisinin voltaj eksenini kestiği noktadan V_{bi} ; 0,68 V ve eşitlik (7.25) kullanılarak eğrisinin eğiminden N_A ; $1,50 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır.



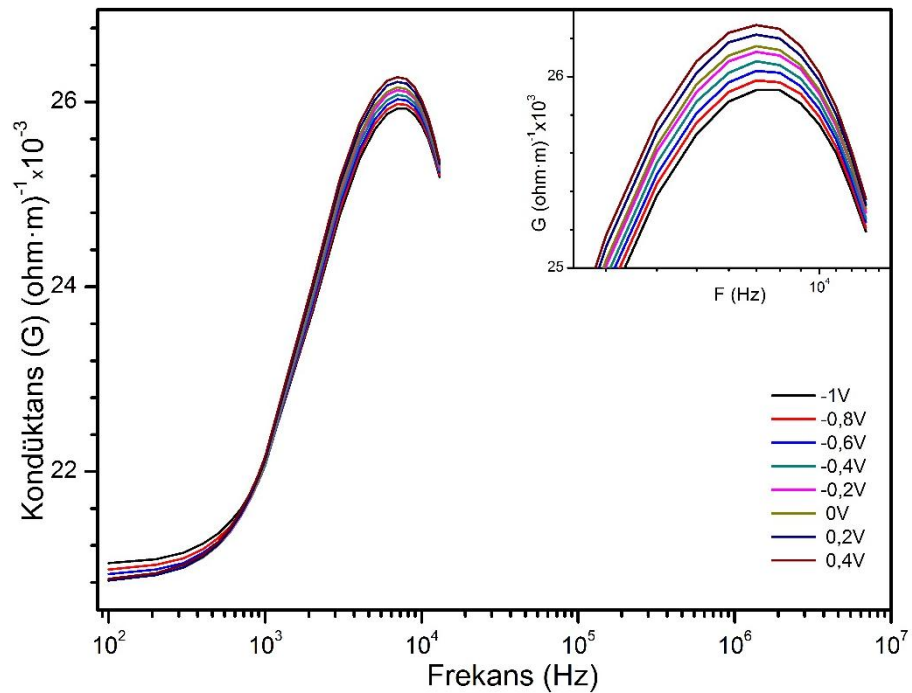
Şekil 8.16. 100 kHz frekansta FTO/p-CuO/Au yapısının $\left[\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0}\right)\right]^{-2} - V$ grafiği.

Yapılan bir çalışmada CuO filmi için V_{bi} değeri 0,83 V ve N_A , $4,5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ olarak belirlenmiştir [108]. Bir diğer çalışmada ise V_{bi} değeri 0,58 V olarak verilmiştir [109].

AC ölçümlerinden belirlenen N_D değeri $1,50 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$ ile dc ölçümlerinden elde edilen N_T değeri $3,17 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ karşılaştırıldığında, ac ölçüm sonuçlarından bulunan tuzak yoğunluğu değerinin dc ölçüm sonuçlarından bulunan tuzak yoğunluğu değerinin yaklaşık 50 katı olduğu söylenebilir. Bu etkinin ac sinyallerinin FTO/p-CuO/Au arayüzey durumlarını daha fazla etkilediği düşünülmektedir.

8.6.2. FTO/n-CdS/Au yapısının kondüktans-frekans ($G-f$) ölçümleri

Şekil 8.17.'de FTO/n-CdS/Au yapısının -1–0,4 V arasında değişen voltaj değerlerindeki kondüktans-frekans grafiği verilmiştir. Farklı voltajlarda kondüktans değerleri yaklaşık 7000 Hz'de maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu durum CdS filminin enerji bandı içindeki arayüzey durumlarının varlığını göstermektedir. Çizgilerin oluşturduğu piklerin pozisyonlarında değişme görülmemektedir. Bu da CdS filmindeki arayüzey durumlarının yasak enerji bant aralığı içinde düzgün olmayan dağılım gösterdiğini ifade etmektedir [110, 111]. Bu durum, ayrıca C^2-V eğrisinin lineer olmaması arayüzey durumlarının enerji bant aralığında düzgün dağılmadığı sonucunu da desteklemektedir [107].



Şekil 8.17. FTO/n-CdS/Au yapısının farklı voltajlarda elde edilmiş kondüktans-frekans grafiği.

8.7. FTO/p-CuO/n-CdS/Au Heteroeklem Yapısı

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinin kolay ulaşılabilir olması, doğada bol miktarda bulunması ve doğrudan elektrik enerjisi üretilebilmesi nedeniyle oldukça önemli bir alternatif enerji kaynağıdır. Güneş enerjisinin dönüştürülüp kullanılması doğal ve yapay olmak üzere iki farklı yolla olur. Doğal yollar ile enerji dönüşümüne fotosentez olayını, su döngüsünü, toprak ve suyun ısınmasını örnek olarak verebiliriz. Yapay yollar ile enerji dönüşümüne fotovoltaik güneş pillerini örnek olarak verebiliriz. Günlük hayatımızda güneş enerjisinden elektrik elde etmek için güneş pilleri kullanılmaktadır. Özellikle fotovoltaik yöntem ile güneş enerjisinden elektrik elde etmek için gerekli teknolojik altyapının hızlı gelişimi, bu sistemlerin günlük hayatımızda daha fazla faydalanma sürecini de beraberinde getirmiştir. Bu çerçevede çevreci ve uzun ömürlü fotovoltaik sistemler enerji üretimi için tercih edilen sistemlerdir. İnce film fotovoltaik sistemleri, malzeme maliyetlerinin, enerji tüketiminin, bakım ve sermaye maliyetlerinin azaltılmasıyla üreticilerine umut vermektedir. Kullanılan malzeme miktarını en aza indirerek, pahalı olmayan depolama yöntemi ve ucuz montaj dizileri kullanılarak maliyetlerin azalması sağlanır [1,2].

Güneş pilleri, üzerine güneş ışığı düştüğünde güneş ışığını doğrudan elektrik akımına dönüştüren bir yapıdır. Yarıiletken bir diyot olarak çalışan güneş pilleri, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi kontak bölgesindeki fotoelektrik dönüşüm sayesinde doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. En önemli fotovoltaik aygıt olan güneş pilleri $p-n$ eklemi şeklinde oluşturulur. Yüksek verimli güneş pilleri ilk olarak 1954 yılında, Chapin, Fuller ve Pearson tarafından silisyum $p-n$ eklemlerinde görülmüştür. Bugüne kadar, güneş pilleri elde edilirken farklı yarıiletken malzemeler kullanılmıştır. Bunların başında silisyum malzemesi gelir. Silisyum dışında kullanılan yarıiletkenler, galyum arsenik, bakır indiyum selenyum, kadmiyum tellür ve kadmiyum sülfürdür [92]. Son yıllarda güneş pillerinde organik polimer malzemeler kullanılması üzerine yapılan çalışmalar artmıştır [112].

Heteroeklem yapısını meydana getiren iki yarıiletkenin örgü uyumsuzluğu ve ısıl yayılım katsayısındaki fark ekleme tuzaklar veya yeniden birleşme merkezleri gibi arayüzey durumlarını ortaya çıkarır. Arayüzey durumlarının büyüklüğüne ve grain sınırlarına bağlı olarak ekleme taşıyıcı iletimine karşı direnç oluşabilir. Heteroeklemlerin performansı arayüzeyde yeniden birleşme işlemi, tanecik sınırları ve

film direnci ile sınırlıdır. Çok kristalli heteroeklem filmlerin elektriksel özellikleri enerji süreksizlikleri, arayüzey durumları ve grain sınırlarının bulunmasından dolayı karmaşıktır [113].

Literatürde, ITO taban üzerine n-CdS/p-Cu₂S eklem yapısı KBD yöntemiyle elde edilmiştir [1]. Yine aynı yöntemle elde edilmiş n-ZnO/p-CuO eklem yapısı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [36].

Elektriksel iletkenliği ve ışık geçirgenliğini artırmak üzere, taban olarak iletken cam taban kullanılmaktadır. Başlıca iki tür iletken cam vardır. Bunlar, indiyum katkılı kalay oksit (ITO) ve flor katkılı kalay oksit (FTO) iletken camlardır [114]. Çalışmamızda taban olarak FTO iletken cam kullanılmıştır. FTO camlar, güneş pillerinde taban olarak kullanılan bir malzemedir. Yüksek optiksel geçirgenliğe ve düşük elektriksel dirence sahiptir.

Yapılan çalışmalarda, n-CdS/p-CdTe heteroyapılarda ulaşılan maksimum verimlilik %16,5 olarak belirtilmiştir. Bu yapıda, CdS film *n*-tipi pencere malzemesi olarak rol oynar. CdS/CdTe heteroyapısında kullanılan CdS pencere malzemesinin grain boyutunun artması ve pürüzlülük değerinin azalması heteroeklem yapısının verimini artırdığı belirtilmektedir [2].

Literatürde p-CuO/n-CdS heteroeklem yapısı, CuO seramik pellet altyapılar üzerine termal buharlaştırma yapılarak heteroeklem yapısı elde edilmiştir. Bu yapının *I-V*, *C-V* grafikleri incelenerek engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnci hesaplanmıştır [115].

8.8. Fotovoltaik Yapı

Fotovoltaik terimi yerine fotovoltaik piller veya güneş pilleri terimleri de kullanılmaktadır. Fotovoltaik dönüşüm teknolojisi, yarıiletken malzemelerden oluşmuş hücrelerle güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen bir teknolojidir. Güneş pilleri genel olarak yarıiletken malzemelerden elde edilmektedir.

Bir güneş pilinin verimi aldığı enerjinin yüzde kaçını kullanılabilir elektriğe dönüştürmesiyle belirlenir. Verim, güneş pilinin eklem bölgesi üzerine düşen fotonların enerjisinin, oluşan gerilime oranı olarak tanımlanabilir. Güneş pili eklem bölgesine düşen her ışığı elektriğe dönüştürmez. Gelen ışığın büyük miktarı yüzey tarafından yansıtılmaktadır. Dolayısıyla sıradan bir güneş hücresinin verimi günümüzde yaklaşık

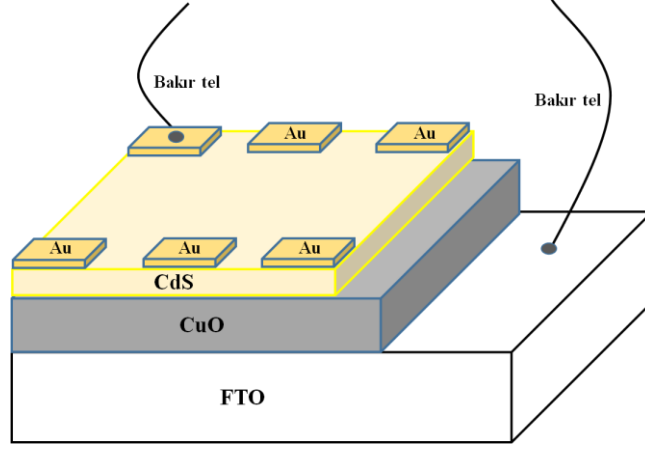
%15 civarındadır. Üzerine düşen güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güneş pilleri fotovoltaiik ilkeye göre çalışırlar. Yarıiletken malzeme üzerine ışık düştüğü zaman, ışık malzeme tarafından soğurulduğunda, yarıiletkende elektron-hol çifti oluşur. Bu duruma fotovoltaiik olay adı verilir. Fotovoltaiik olay sonucu meydana gelen akıma da fotoakım adı verilir.

Yasak enerji bant aralıkları farklı iki yarıiletken malzemenin birleşmesiyle meydana gelen ekleme heteroeklem denir. *p*-tipi ve *n*-tipi yarıiletkenlerin kontak durumuna getirilmesiyle *p-n* eklem yapısı oluşmaktadır. Bu eklem bölgesindeki yapısal ve periyodik ani değişikliğin sebep olduğu örgü uyumsuzluğu, ısısız yayılım uyumsuzluğu ve bir bileşenden diğerine difüzyondan dolayı arayüzey enerji durumları oluşur. Heteroeklemler yasak enerji bant aralıklarının büyüklüklerine göre *p-n* veya *n-p* olarak adlandırılırlar. Yasak enerji bant aralığı küçük olan malzemenin tipi önce, geniş olan malzemenin tipi ise sonra söylenir [113].

8.9. FTO/p-CuO/n-CdS/Au Ekleminin Akım Gerilim Karakteristiği

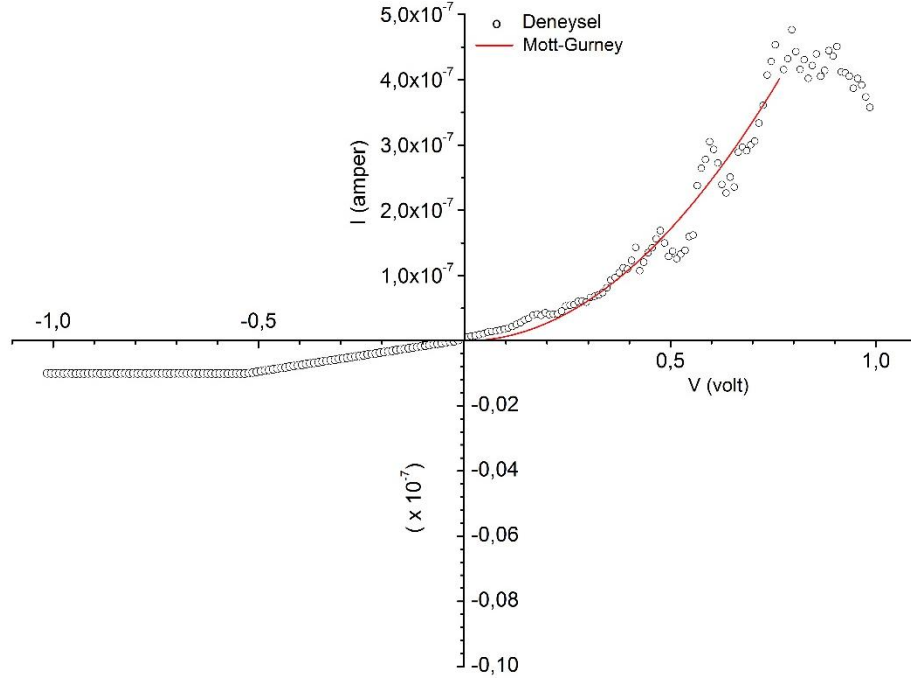
FTO taban üzerine elde edilen FTO/p-CuO/n-CdS/Au ekleminin elektriksel özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla eklem yapısının üzerine altın kontaklar buharlaştırılmıştır. Şekil 8.18.'de elde edilen yapı şematik olarak gösterilmiştir. Eklem yapısının üzerine altın buharlaştırılmadan önce FTO tabanlar üzerine üretilen eklemin üst yüzeyinin altın ile kaplanması istenmeyen bölgeleri alüminyum folyo ile kapatılarak maskelenmiştir. Böylece metal buharlaştırma sürecinde alüminyum folyo ile kaplanmayan bölgelere 10^{-5} torr basınçta ve 90 nm kalınlığında altın buharlaştırılmıştır. Oluşturulan yapının ölçümlere hazır hale gelebilmesi için altın kaplanan kontakların üzerine gümüş yapıştırıcı kullanılarak ince bakır tellerle bağlantı yapılmıştır. Numune ölçüm öncesi kapalı karanlık kutuda kısa devre konumunda bekletilmiştir.

FTO/p-CuO/n-CdS/Au yapısındaki eklemin akım-voltaj değerleri karanlıkta ve oda sıcaklığında -1 ve 1 V aralığında 0,01 V'luk voltaj artışlarıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde Hewlett Packard 4140B pA Meter/DC Voltage Source cihazı, Agilent 34401A $6^{1/2}$ dijital multimetre kullanılmıştır. Veriler VEE One Lab 6.1 bilgisayar programı kullanılarak alınmıştır. Ölçümler sonucu alınan veriler yardımıyla FTO/p-CuO/n-CdS/Au ekleminin *I-V* grafiği çizilmiştir (Şekil 8.19.).



Şekil 8.18. Sandviç yapıda oluşturulan FTO/p-CuO/n-CdS/Au yapısının şematik gösterimi.

Şekil 8.19.'da verilen grafik incelendiğinde ileri beslemede uygulanan voltaj ile beraber akım değerlerinde sürekli olarak artış meydana geldiği gözlenmiştir. Grafikte akım-voltaj bağıntısının $I \propto V^2$ ile değiştiği uygulanan fit programı ile belirlenmiştir. Bu durum Mott-Gurney yasası ile uyumludur. Grafik bir $p-n$ eklem diyotun akım-voltaj eğrisini tanımlamaktadır [98].

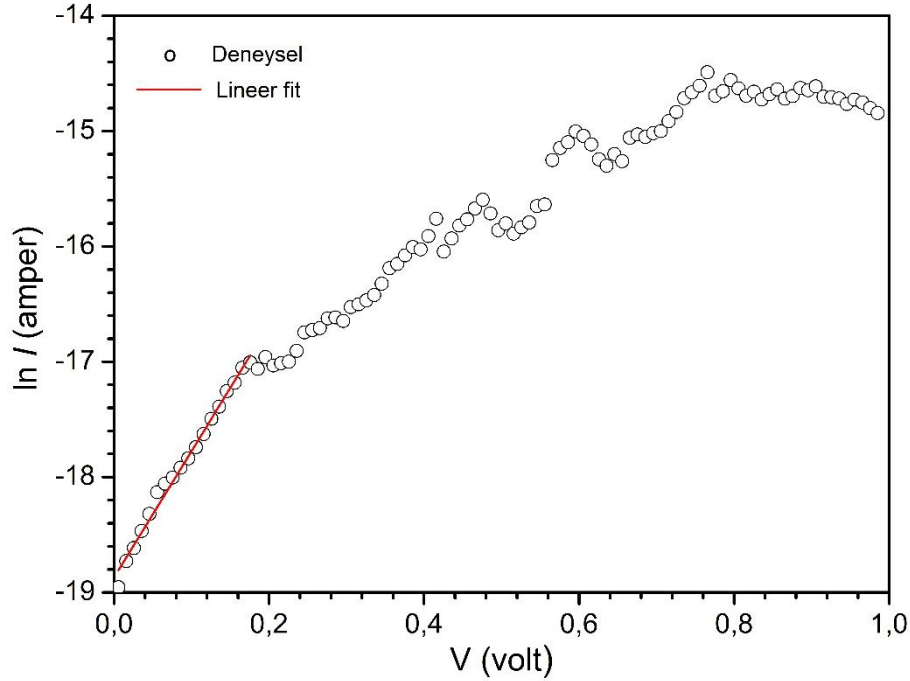


Şekil 8.19. FTO/p-CuO/n-CdS/Au eklemine I-V grafiği.

Şekil 8.19.'da verilen FTO/p-CuO/n-CdS/Au yapısının I - V verileri kullanılarak $\ln I$ - V grafiği çizilmiştir (Şekil 8.20.). Eklem ileri besleme ve küçük voltaj bölgesinin lineer kısmının eğimin,

$$n_{ideal} = \frac{q}{kT} \left[\frac{dV}{d(\ln I)} \right] \quad (8.27)$$

eşitlik (8.27) kullanılarak ideal diyot faktörü 3,53 olarak hesaplanmıştır. İdeal diyot için $n_{ideal}=1$ 'dir. İki metal kontak arasında bulunan yarıiletkenlerde arayüzey durumları, çeşitli kristal kusurlarının olması ideal faktörünün birden büyük olmasına neden olur.



Şekil 8.20. FTO/p-CuO/n-CdS/Au eklemine ait $\ln I$ - V grafiği.

Ayrıca ideal faktörü $n_{ideal}=1$ olduğunda eklem bölgesinde difüzyon akımının, $n_{ideal}>2$ olması durumunda rekombinasyon akımının baskın olduğu ifade edilmektedir. İdeal faktörünün $1 < n_{ideal} < 2$ arasındaki değerleri alması eklem bölgesinde difüzyon ve rekombinasyon akımlarının varlığı söylenir [92, 98, 107]. Bu çalışmada edilen FTO/p-CuO/n-CdS/Au eklem diyotunda rekombinasyon akımının baskın olduğunu ve yarıiletken yapılarda çeşitli kusurların elektriksel iletimi etkilediği sonucu çıkarılabilir.

9. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada kimyasal banyo depolama yöntemi kullanılarak elde edilen CdS ve CuO filmlerinin yapısal, optik, fotoluminesans yüzeysel ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Aynı yöntem kullanılarak FTO/p-CuO/n-CdS heteroeklem yapısı oluşturulmuş elektriksel özellikleri incelenmiştir.

FTO taban üzerine üretilen filmlerin cam taban üzerine üretilenlerden daha kalın olduğu belirlenmiştir.

Yapılan XRD analizlerinden yararlanılarak cam ve FTO taban üzerine üretilen CdS filmlerinin yüzey merkezli kübik, CuO filmlerinin ise basit taban merkezli monoklinik yapıda oldukları belirlenmiştir. Filmlerin kırınım desenlerinden kristal yapıya ait örgü sabitleri, kristal tanecik boyutları, kristal yapıdaki sıkışmalar, gerilmeler ve dislokasyon yoğunlukları hesaplanmıştır. Filmlerin kristal yapısında hem makro hem de mikro gerilmelerin ve dislokasyonların olduğu belirlenmiştir. Amorf cam ve kristal FTO taban üzerine büyütülen filmlerin kristal yapısının değişmediği, fakat kristal taban üzerine büyütülen filmlerin daha kalın kristaller meydana getirdiği belirlenmiştir. Bu durumda FTO tabanın filmlerin kristalleşmesi üzerine olumlu etki yaptığı söylenebilir. Cam/CuO/CdS ve FTO/CuO/CdS yapılarının kırınım desenleri incelendiğinde hem cam taban üzerine hem de FTO taban üzerine üretilen filmlerin kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir.

Temel absorpsiyon spektrumlarından yararlanılarak CdS ve CuO filmlerinin yasak enerji bant aralıklarının direkt geçişli oldukları belirlenmiştir. Cam ve FTO taban üzerine elde edilen CdS filmlerinin yasak enerji aralıkları sırasıyla 2,39 ve 2,35 eV, CuO filmi için sırasıyla 1,61 ve 1,26 eV olduğu hesaplanmıştır. CdS filmlerinin yasak enerji aralıklarında sarkmalar olduğu (band tailing) ve bu sarkmaların cam taban üzerine üretilen için 400 meV ve FTO taban üzerine üretilen için 370 meV mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Cam taban üzerine üretilen CuO filminin yasak enerji aralıklarındaki sarkma değerinin 305 meV mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Yasak enerji aralığındaki bu sarkmalar filmlerdeki strain, dislokasyon gibi lokalize enerji durumlarının varlığını gösterir. Maksimum geçirgenlik değerleri incelendiğinde FTO taban üzerine üretilen CdS filminin, görünür bölge için, optik geçirgenlik değerinin cam taban üzerine üretilen CdS filminin geçirgenlik değerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Geçirgenlik değerinin büyük olması tabanın kristal yapıda olmasına

bağlanabilir. FTO taban üzerine üretilen CuO filminin maksimum geçirgenlik değerinin cam taban üzerine üretilen CuO filmine göre önemli bir azalmanın olduğu gözlenmiştir. Geçirgenlik değerindeki bu azalma, filmin kalınlığındaki artmadan kaynaklandığı sonucu çıkarılır.

CdS filmlerinin fotoluminesans spektrumlarından farklı şiddet ve genişliklerde yeşil, sarı ve kırmızı emisyonlara sahip pikler tespit edilmiştir. Piklerin temel geçiş, S boşlukları, araya sıkışmış Cd atomları, Cd boşlukları ve donör-akseptör rekombinasyon enerji merkezlerine ait olduğu belirlenmiştir. CuO filmlerinin fotoluminesans spektrumlarından kırmızı emisyonu temsil eden pikler tespit edilmiştir. Bu piklerin cam taban üzerine üretilmiş CuO filminde temel geçiş ve elektronların iletim bandından akseptör enerji seviyesine geçişi ve elektronların donör enerji seviyesinden valans bandına veya akseptör enerji seviyesine geçişine bağlı olarak ortaya çıktığı yapılan çalışmalarda ifade edilmektedir. FTO taban üzerine üretilen, 1,26 eV bant aralığına sahip CuO filmine ait 1,49 eV'ta meydana gelen geçişin yakın bant kenar geçişi olduğu düşünülmektedir

Filmlerin atomik kuvvet mikroskobu ile yapılan yüzey analizlerinden cam taban üzerine elde edilen filmlerin yüzey pürüzlülük değerlerinin R_a ve R_q sırasıyla 7,54 ve 9,36, FTO cam taban üzerine elde edilen CdS filmindeki değerlerinin ise sırasıyla 19,73 ve 24,58 olarak belirlenmiştir. CuO filminin yüzey pürüzlülük değerleri, cam taban için, sırasıyla 56,20 ve 67,70, FTO taban için sırasıyla 53,68 ve 69,24 olarak belirlenmiştir. Yapılan SEM analizlerinde CdS filmlerinin küresel biçimli küçük taneciklerden oluşan homojen ve yoğun, CuO filmlerinin ise gözenekli yapıya sahip oldukları belirlenmiştir.

CdS ve CuO filmlerinin elektriksel özelliklerini belirleyebilmek ve akım iletim mekanizmaları hakkında bilgi elde etmek için öncelikle metal-yarıiletken-metal yapıları oluşturulmuştur. Elde edilen FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au yapıların elektriksel özelliklerini belirleyebilmek ve akım iletim mekanizmaları hakkında bilgi elde etmek için yapıların oda sıcaklığında $I-V$, $C-V$ ve $G-f$ ölçümleri yapılmıştır. FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au sandviç yapıların akım-voltaj grafikleri incelendiğinde ohmik ve SCL akım mekanizmalarına sahip olduğu gözlenmiştir. Her iki filmin derin tuzaklı yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. FTO/n-CdS/Au yapısının tuzak yoğunluğu $1,04 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ve tuzakların iletim bandının 0,67 eV altında olduğu hesaplanmıştır. FTO/p-CuO/Au yapısının tuzak yoğunluğu $3,18 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ve tuzakların valans bandının 0,31 eV üstünde olduğu hesaplanmıştır.

Oda sıcaklığında FTO/n-CdS/Au ve FTO/p-CuO/Au yapıların kapasitans-voltaj ölçümleri yapılmıştır. $C-V$ ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak yapıların taşıyıcı yoğunlukları ve difüzyon potansiyelleri elde edildi. FTO/n-CdS/Au yapısının tuzak yoğunluğu $6,0 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ve difüzyon potansiyeli 0,43 V olarak hesaplanmıştır. FTO/p-CuO/Au yapısının tuzak yoğunluğu $1,50 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$ ve difüzyon potansiyeli 0,68 V olarak hesaplanmıştır. Dc ve ac ölçüm sonuçlarından filmlerin tuzaklı yapıya sahip oldukları, tuzakların yasak enerji aralığında, n-CdS filminde iletim bandının altında ve p-CuO filminde valans bandının üzerinde yer aldıkları belirlenmiştir.

FTO/n-CdS/Au yapısının $G-f$ ölçümlerinden CdS filmindeki arayüzey durumlarının yasak enerji bant aralığı içinde düzgün olmayan dağılım gösterdiği belirlenmiştir.

KBD yöntemiyle FTO taban üzerine p-CuO/n-CdS yapısı elde edilerek üzerine altın kontaklar buharlaştırılmıştır. FTO/p-CuO/n-CdS/Au yapısının eklem davranışını anlamak için $I-V$ ölçümü yapılmıştır. $I-V$ grafiğinden FTO/p-CuO/n-CdS/Au yapısının diyot özelliği gösterdiği görülmüştür. $\ln I-V$ grafiğinden yararlanarak n_{ideal} ideal diyot faktörü 3,53 olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalarda $n_{ideal} > 2$ olması durumunda rekombinasyon akımının baskın olduğu ifade edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen FTO/p-CuO/n-CdS/Au yapısında rekombinasyon akımının iletme katkıda bulunduğu ve yarıiletken yapılarda çeşitli kusurların elektriksel iletimi etkilediği sonucu çıkarılabilir.

KAYNAKÇA

- [1] Sam, M., Bayati, M.R., Mojtahedi, M., Janghorban, K. (2010). Growth of Cu₂S/CdS nano-layered photovoltaic junctions for solar cell applications. *Appl. Surf. Sci.*, 257, 1449–1453.
- [2] Moure-Flores, F.de, Nieto-Zepeda, K.E., Guillén-Cervantes, A., Gallardo, S., Quiñones-Galván J.G., Hernández-Hernández, A., Olvera, M. de la L., Zapata-Torres, M., Kundriavtsev, Y., Meléndez-Lira, M. (2013). Effect of the immersion in CdCl₂ and annealing on physical properties of CdS:F films grown by CBD, *J. Phys. Chem. Solids*, 74 (4), 611–615.
- [3] Enríquez, J.P. and Mathew, X. (2003). Influence of the thickness on structural, optical and electrical properties of chemical bath deposited CdS thin films. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 76, 313-322.
- [4] Pradhan, B., Sharma, A.K. and Ray, A.K. (2007). Conduction studies on chemical bath- deposited nanocrystalline CdS thin films, *J. Cryst. Growth*, 304, 388-392.
- [5] Kim, D.J., Yu, Y.-M., Lee, J.W., Choi, Y.D. (2008). Investigation of energy band gap and optical properties of cubic CdS epilayers, *Appl. Surf. Sci.*, 254, 7522-7526.
- [6] Aybek, A.S. and Rüzgar, H. (2016). Effect Of the pH On Crystal Structural, Optical And Surface Morphological Properties Of The CdS Films Deposited By Chemical Bath Deposition. *Chalcogenide Letters*, 13 (8), 339 – 350.
- [7] Huang L., Wei Z.L., Zhang F.M., Wu X.S. (2015). Electronic and optical properties of CdS films deposited by evaporation. *J. Alloys Compd.*, 648, 591-594.
- [8] Shaikh, S.U., Siddiqui F.Y., Singh F., Kulriya, P.K., Phase, D.M., Sharma, R. (2016). Modification of photosensing property of CdS–Bi₂S₃ bi-layer by thermal annealing and swift heavy ion irradiation. *Mater. Chem. Phys.*, 169, 6–12.
- [9] Sivaraman T., Nagarethinam V.S. and Balu A.R. (2014). CdS thin films Fabricated by a simplified Spray technique from different Substrate Temperatures – Structural, Morphological, Optical and Electrical analysis. *Res. J. Material Sci.*, 2 (2), 6-15.
- [10] Kong, L., Li, J., Chen, G., Zhu, C., Liu, W. (2013). A comparative study of thermal annealing effects under various atmospheres on nano-structured CdS thin films prepared by CBD. *J. Alloys Compd.*, 573, 112–117.
- [11] Metin, H and Esen, R. (2003). Annealing studies on CBD grown CdS thin films. *J. Cryst. Growth*, 258 (1–2), 141–148.

- [12] Zyoud, A., Saa'deddin, I., Khudruj, S., Hawash, Z.M., Park, D., Campet, G., Hilal, H.S. (2013). CdS/FTO thin film electrodes deposited by chemical bath deposition and by electrochemical deposition: A comparative assessment of photo-electrochemical characteristics. *Solid State Sci.*, 18, 83–90.
- [13] Zhai, T., Fang, X., Li, L., Bando, Y., Golberg, D. (2010). One-dimensional CdS nanostructures: synthesis, properties, and applications. *Nanoscale*, 2, 168–187.
- [14] Metin, H., Erat, S., Durmuş, S., Ari, M. (2010). Annealing effect on CdS/SnO₂ films grown by chemical bath deposition, *Appl. Surf. Sci.*, 256, 5076–5081.
- [15] Vatavu, S., Rotaru C., Fedorov V., Stein, T.A., Caraman, M., Evtodiev, I., Kelch C., Kirsch, M., Chetruş, P., Gaşin, P., Lux-Steiner, M.Ch., Rusu, M. (2013). A comparative study of (ZnO, In₂O₃: SnO₂, SnO₂)/CdS/CdTe/(Cu)/Ni heterojunctions. *Thin Solid Films*, 535, 244–248.
- [16] Zhan, H., Li, J.k. and Cheng, Y.f. (2015). Preparation and properties of CdS thin films deposited by chemical bath deposition. *Optik*, 126 (15–16), 1411–1414.
- [17] Dhanasekaran, V. and Mahalingam, T. (2013). Surface modifications and optical variations of (–111) lattice oriented CuO nanofilms for solar energy applications. *Mater. Res. Bull.*, 48, 3585–3593.
- [18] Ghosh, B., Kumar, K., Singh, B.Kr, Banerjee, P., Das, S. (2014). Growth of CdS thin films on indium coated glass substrates via chemical bath deposition and subsequent air annealing. *Appl. Surf. Sci.*, 320, 309–314.
- [19] Nair, P.K., Daza, O.G., Readigos, A.A.-C., Campos, J., Nair, M.T.S. (2001). Formation of conductive CdO layer on CdS thin films during air heating. *Semicond. Sci. Technol.*, 16, 651–656.
- [20] Islam, M.A., Haque, F., Rahman, K.S., Dhar, N., Hossain, M.S., Sulaiman Y., Amin N. (2015). Effect of oxidation on structural, optical and electrical properties of CdS thin films grown by sputtering, *Optik*, 126, 3177–3180.
- [21] Cortes, A., Gómez, H., Marotti, R.E., Riveros, G., Dalchiale, E.A. (2004). Grain size dependence of the bandgap in chemical bath deposited CdS thin films. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 82, 21–34.
- [22] Yao, P.-C. and Chen, C.-Y. (2015). Effect of protic solvents on CdS thin films prepared by chemical bath deposition. *Thin Solid Films*, 579, 103–109.
- [23] Wang, H., Xu, J.-Z., Zhu, J.-J., Chen, H.-Y. (2002). Preparation of CuO nanoparticles by microwave irradiation, *J. Cryst. Growth.*, 244, 88–94.
- [24] Jayaprakash, J., Srinivasan, N., Chandrasekaran, P., Girija, E.K. (2015). Synthesis and characterization of cluster of grapes like pure and Zinc-doped CuO nanoparticles by sol–gel method. *Spectrochim. Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 136, 1803–1806.

- [25] Mageshwari, K. and Sathyamoorthy, R. (2013). Physical properties of nanocrystalline CuO thin films prepared by the SILAR method. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 16, 337–343.
- [26] Rafea, M.A. and Roushdy, N., (2009). Determination of the optical band gap for amorphous and nanocrystalline copper oxide thin films prepared by SILAR technique, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 42, 015413 (6pp).
- [27] Oku, T., Motoyoshi, R., Fujimoto, K., Akiyama, T., Jeyadevan, B., Cuya, J. (2011). Structures and photovoltaic properties of copper oxides/fullerene solar cells. *J. Phys. Chem. Solids.*, 72, 1206–1211.
- [28] Chen, K., Song, S. and Xue, D. (2013). Vapor-phase crystallization route to oxidized Cu foils in air as anode materials for lithium-ion batteries. *Cryst. Eng. Comm.*, 15, 144-151.
- [29] Erdoğan, İ.Y. and Güllü Ö. (2010). Optical and structural properties of CuO nanofilm: Its diode application. *J. Alloys Compd.*, 492, 378–383.
- [30] Srinivasa, V.P., Sivalingam, D., Gopalakrishnan, J.B., Rayappan, J.B.B. (2012). Nanostructured copper oxide thin film for ethanol vapor sensing. *J. Appl. Sci.*, 12 (16), 1656-1660.
- [31] Wijesundera, R.P. (2010). Fabrication of the CuO/Cu₂O heterojunction using an electrodeposition technique for solar cell applications. *Semicond. Sci. Technol.*, 25, 045015 (5pp).
- [32] Jiang, T., Wang, Y., Meng D., Wu X., Wang J., Chen J. (2014). Controllable fabrication of CuO nanostructure by hydrothermal method and its properties. *Appl. Surf. Sci.*, 311, 602–608.
- [33] Kose, S., Atay, F., Bilgin, V., Akyuz, I. (2008). Some physical properties of copper oxide films: The effect of substrate temperature. *Mater. Chem. Phys.*, 111, 351-358.
- [34] Bayansal, F., Çetinkara, H.A., Kahraman, S., Çakmak, H.M., Güder, H.S. (2012). Nano-structured CuO films prepared by simple solution methods: Plate-like, needle-like and network-like architectures. *Ceramics International*, 38, 1859–1866.
- [35] Bayansal, F., Gülen, Y., Şahin, B., Kahraman, S., Çetinkara, H.A. (2015). CuO nanostructures grown by the SILAR method: Influence of Pb-doping on the morphological, structural and optical properties. *J. Alloys Compd.*, 619, 378–382.
- [36] Terasako, T., Murakami, T., Hyodou, A., Shirakata, S. (2015). Structural and electrical properties of CuO films and n-ZnO/p-CuO heterojunctions prepared by chemical bath deposition based technique. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 132, 74–79.

- [37] Bozkurt, G., Bayrakçeken, A. and Özer, A.K. (2014). Synthesis and characterization of CuO at nanoscale. *Appl. Surf. Sci.*, 318, 244–250.
- [38] Bayansal F., Şahin, B., Yüksel, M., Biyikli, N., Çetinkara, H.A., Güder, H.S. (2013). Influence of coumarin as an additive on CuO nanostructures prepared by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. *J. Alloys Compd.*, 566, 78–82.
- [39] Harish, S., Navaneethan, M., Archana, J., Ponnusamy, S., Muthamizhchelvan, C., Hayakawa, Y. (2015). Chemical synthesis and properties of spindle-like CuO nanostructures with porous nature. *Mater. Lett.*, 139, 59-62.
- [40] Chand, P., Gaur, A., Kumar, A., Gaur, U.K. (2014). Structural and optical study of Li doped CuO thin films on Si (100) substrate deposited by pulsed laser deposition. *Appl. Surf. Sci.*, 307, 280-286.
- [41] Sönmezöğlü, S., Koç ve M., Akın, S. (2012). İnce Film Üretim Teknikleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28 (5), 389-401.
- [42] Bilgin, V. (2003). *ZnO filmlerinin elektrik, optik, yapısal ve yüzeysel özellikleri üzerine kalay katkısının etkisi*. Doktora Tezi. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [43] Zor, M., (1982). *Spray-Pyrolysis ile Elde Edilen AgInS₂ Bileşiğinin Bazı Fiziksel Özellikleri*. Doçentlik Tezi. Ankara: Hacettepe Üniversitesi.
- [44] Elmas, S. (2013). *ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [45] Koelmans, H. (1971). Application Of Semiconducting Thin Films. *Thin Solid Films*. 8, 19-33.
- [46] Söyleyici, M. (2011). *Ir Katkılı ZnO Filmlerinin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [47] Akyüz, İ. (2000). *Püskürtme tekniği ile elde edilen Zn_{1-x}Cd_xS filmlerinin bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [48] Boukourt, A., Abbar, B., Abid, H., Sehil, M., Bensaad, Z., Soudini B. (2003). Calculation of electronic and optical properties of the quaternary alloys Zn_{1-x}Cd_xS_ySe_{1-y}, *Mater. Chem. Phys.*, 82, 911–920.
- [49] McKelvey, J.P., (1969). *Solid State And Semiconductor Physics*. Harper & Row, New York, Evanston & London and John Weatherhill, Inc., Tokyo.
- [50] Neamen, D.A. (1997). *Semiconductor Physics and Devices*. McGraw-Hill Companies, Inc.

- [51] Kittel, C. (1996). *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley & Sons, Inc.
- [52] Zor, M. (1991). *Maddenin Elektriksel İletkenlik Özellikleri*. Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.
- [53] Tyagi, M.S., (1991), *Introduction to Semiconductor Materials and Devices*. John Wiley & Sons, Inc.
- [54] Omar M.A. (1975). *Elementary Solid State Physics*. Addison-Wesley Publishing, California, ABD.
- [55] Hodes, G. (2002). *Chemical Solution Deposition of Semiconductor Films*. New York, Basel, Marcel Dekker, Inc.
- [56] Vázquez-Luna, J.G., López Flores, R.B., Rubin-Falfán, M., Gómez-Pavón, L. Del C., Lozada-Morales, R., Juárez-Santiesteban H., Starostenko, O., Zelaya-Angel, O., Vigil O., Guzmán O., Angel, P. del, González, A. (1998). CdS thin-films deposited by a modified chemical-bath deposition method. *J. Cryst. Growth*, 187 (3-4), 380—386.
- [57] Breen, M.L., Woodward, J.T., IV, and Schwartz, D.K. (1998). Direct Evidence for an Ion-by-Ion Deposition Mechanism in Solution Growth of CdS Thin Films. *Chem. Mater.*, 10, 710-717.
- [58] Hodes, G. (2007). Semiconductor and ceramic nanoparticle films deposited by chemical bath deposition. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 9, 2181–2196.
- [59] Khallaf, H., Oladeji, I.O., Chai, G., Chow, L. (2008). Characterization of CdS thin films grown by chemical bath deposition using four different cadmium sources. *Thin Solid Films*, 516 (21), 7306–7312.
- [60] Dubal, D.P., Dhawale, D.S., Salunkhe, R.R., Jamdade, V.S., Lokhande, C.D. (2010). Fabrication of copper oxide multilayer nanosheets for supercapacitor application. *J. Alloys Compd.*, 492, 26–30.
- [61] Kwon, J.-H., Ahn, J.-S. and Yang, H. (2013). Chemical bath deposition of CdS channel layer for fabrication of low temperature-processed thin-film-transistors. *Curr. Appl. Phys.*, 13, 84–89.
- [62] Morrison, E., Gutiérrez-Tauste, D., Domingo, C., Vigil, E., Ayllón, J.A. (2009). One step room temperature photodeposition of Cu/TiO₂ composite films and its conversion to CuO/TiO₂. *Thin Solid Films*, 517, 5621–5624.
- [63] Arockiasamy, J.S.K. and Irudayaraj, J. (2016). Natural dye sensitized CuO nanorods for luminescence applications. *Ceramics International*, 42, 6198–6205.
- [64] Nebi, M., (2013). *Reaktif RF saçırma yöntemi ile TiN ince filmlerin üretilmesi ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.

- [65] Cullity B.D. and Stock, S.R. (2001). *Elements of X-ray Diffraction*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [66] Yücel, E., Güler, N. and Yücel, Y. (2014). Optimization of deposition conditions of CdS thin films using response surface methodology. *J. Alloys Compd.*, 589, 207–212.
- [67] Pankove, J., I. (1971). *Optical process in semiconductors*. Solid State Physical Electronics Series, Prentice-Hall, N.J.
- [68] Williamson, G.K. and Swman, R.E. (1956). *Philos. Mag.*, 1:1, 34-46.
- [69] Ramya, V., Neyvasagam, K., Chandramohan, R., Valanarasu, S., Benial, A.M.F. (2015). Studies on chemical bath deposited CuO thin films for solar cells application. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 26, 8489–8496.
- [70] Fox, M. (2001). *Optical Properties of Solids*. Published in the United States BY Oxford University Press Inc., New York.
- [71] Chiad, S.S., Jabbar, W.A. and Habubi, N.F. (2011). Effects of Annealing on the Electronic Transitions of ZnS Thin Films. *J. Arkansas Acad. Sci.*, 65, 39-42.
- [72] Urbach, F. (1953). The Long-Wavelength Edge of Photographic Sensitivity and of the Electronic Absorption of Solids, *Phys.Rev.*, 92, 1324.
- [73] Aşıkoğlu, A. and Yükselici, M.H. (2011). Evolution of the energy band structure in chemical-bath-deposited CdS thin films studied by optical absorption spectroscopy. *Semicond. Sci. Technol.*, 26, 055012 (5pp).
- [74] Savarimuthu, E., Lalithambika, K.C., Moses Ezhil Raj, A., Nehru, L.C., Ramamurthy, S., Thayumanavan, A., Sanjeeviraja, C., Jayachandran M. (2007). Synthesis and materials properties of transparent conducting In₂O₃ films prepared by sol-gel-spin coating technique. *J. Phys. Chem. Solids*, 68, 1380–1389.
- [75] Gfroerer, T.H. (2000). *Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- [76] Yapan, T. (2014). *Fotovoltaik Güneş Gözesi Uygulamaları için Cd_{1-x}Zn_xS İnce Filmlerinin Büyütülmesi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Çanakkale: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.
- [77] Lozada-Morales, R., Zelaya-Angel, O. and Torres-Delgado, G. (2001). Photoluminescence in cubic and hexagonal CdS films. *Appl. Surf. Sci.*, 175-176, 562-566.
- [78] Erbilen, E. (2010). *Mn Katkılı CdS Nanoparçacıklarının Sentezi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi.

- [79] Gemain, F., Robin, I.-C., Renet, S., Bernardi, S. (2012). Photoluminescence studies of CdS layers for solar cells. *Phys. Status Solidi C*, 9 (8–9), 1740–1743.
- [80] Fernando, D., Khan, M. and Vasquez, Y. (2015). Control of the crystalline phase and morphology of CdS deposited on microstructured surfaces by chemical bath deposition. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 30, 174–180.
- [81] Aguilar-Hernández, J., Sastre-Hernández, J., Ximello-Quiebras, Mendoza-Pérez, R., Vigil-Galán, O., Contreras-Puente, G., Cárdenas-García, M. (2006). Photoluminescence studies on CdS-CBD films grown by using different S/Cd ratios. *Thin Solid Films*, 511–512, 143–146.
- [82] Li, Y., Yuan, S.Q. and Li, X.J. (2014). White light emission from CdS/Si nanoheterostructure array. *Mater. Lett.*, 136, 67–70.
- [83] Siddiqui, H., Qureshi, M.S. and Haque, F.Z. (2016). Valuation of copper oxide (CuO) nanoflakes for its suitability as an absorbing material in solar cells fabrication. *Optik*, 127, 3713–3717.
- [84] Vila, M., Díaz- Guerra, C. and Piqueras, J. (2010). Optical and magnetic properties of CuO nanowires grown by thermal oxidation. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 43, 135403 (6pp)
- [85] Hussain, S.S., Noor, H., Riaz, S., Hashmi, A., Naseem, S. (2016). UV Photoluminescence of ZnO Nanostructures Based Thin films synthesized by Sol Gel method. *ACEM16*.
- [86] Binnig, G. and Quate, C. F. (1986). Atomic Force Microscope. *Phys. Rev. Lett.*, 56 (9), 930-934.
- [87] Meyer, G. and Amer, N.M. (1988) *Novel optical approach to atomic force microscopy. Appl. Phys. Lett.*, 53, 1045-1047.
- [88] Purica, M., Budianu, E. and Rusu, E. (2000). Heterojunction with ZnO polycrystalline thin films for optoelectronic devices applications. *Microelectronic Engineering*, 51–52, 425–431.
- [89] Bradbury, S., Joy, D.C. and Ford, B.J. (2008), *Encyclopædia Britannica, Inc.*, Scanning electron microscope.
- [90] Bayansal F., Kahraman, S., Çankaya, Çetinkara, H.A., Güder, H.S., Çakmak, H.M. (2011). Growth of homogenous CuO nano-structured thin films by a simple solution method. *J. Alloys Compd.*, 509, 2094–2098.
- [91] Çetinkaya, S., Çetinkara, H.A., Bayansal, F., Kahraman, S. (2013). Growth and Characterization of CuO Nanostructures on Si for the Fabrication of CuO/p-Si Schottky Diodes. *Scientific World J.*, 126982, 6 sayfa.

- [92] Sze, S. M. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley International Edition. Murray Hill, New Jersey.
- [93] Tung, R.T. (2001). Recent advances in Schottky barrier concepts, *Mater. Sci. Eng. R.* 35, (1-3) 1-138.
- [94] Ayyıldız, E., Nuho Lu, Ç. and Türüt, A. (2002). The Determination of the Interface-State Density Distribution from the Capacitance-Frequency Measurements in Au/n-Si Schottky Barrier Diodes. *J. Electron. Mater.*, 31, No. 2, 119-123.
- [95] Pascoe, K.J. (1973). *Properties of Materials for Electrical Engineers*. John Wiley & Sons.
- [96] Wilson, J. and Hawkes, J.F.B., 2000, *Optoelektronik*, (Çev. İ. Okur), Değişim Yayınları Adapazarı.
- [97] Murgatroyd, P. N. (1970). Theory of space-charge-limited current enhanced by Frenkel effect, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 3, 151-156.
- [98] Mott, N.F. and Davis E.A. (1971). *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*. Published in the United States by Oxford University Press Inc., New York.
- [99] Zor, M. and Hogarth C. A. (1987). High-Field Electrical Conduction in Thin Films of Polyethylene. *Phys. stat. sol. (a)*, 99, 513-519.
- [100] Schroder, D.K. (1998). *Semiconductor Material And Device Characterization*. John Wiley & Sons, Inc.
- [101] Marlor, G.A. and Woods, J. (1965). Space-charge-limited currents and electron traps in CdS crystals. *Brit. J. Appl. Phys.*, 16, 1449-1456.
- [102] Wu, J., Yin, B., Wu, F., Myung, Y., Banerjee, P. (2014). Charge transport in single CuO nanowires. *Appl. Phys. Lett.*, 105, 183506.
- [103] Doğan, H., Yıldırım, N., Orak, İ., Elagöz, S., Turut, A. (2015). Capacitance-conductance-frequency characteristics of Au/Ni/n-GaN/undoped GaN Structures. *Physica B*, 457, 48–53.
- [104] Patel, B.K., Nanda, K.K. and Sahu, S. N. (1999). Interface characterization of nanocrystalline CdS/Au junction by current–voltage and capacitance–voltage studies. *J. Appl. Phys.*, 85, 3666-3670.
- [105] Türüt, A. and Sağlam, M. (1992). Determination of the density of Si-metal interface states and excess capacitance caused by them. *Physica B*, 179, 285-294.

- [106] Parameshwari, P.M., Shrishya, B.V., Bhat, P.S., Naik, K.G. (2016). Electrical behavior of CdS/Al Schottky barrier diode at low temperatures. *Materials Today: Proceedings*, 3, 1620–1626.
- [107] Güllü, Ö., Aydoğan, Ş. and Türüt, A. (2008). Fabrication and electrical characteristics of Schottky diode based on organic material. *Microelectron. Eng.*, 85, 1647-1651.
- [108] Ray, A., Mukhopadhyay, I., Pati, R., Hattori, Y., Prakash, U., Ishii, Y., Kawasaki, S., (2017). Optimization of photoelectrochemical performance in chemical bath deposited nanostructured CuO. *J. Alloys Compd.*, 695, 3655-3665.
- [109] Sultana, J., Das, A., Das, A., Saha, N.R., Karmakar, A., Chattopadhyay, S. (2016). Characterization of nano-powder grown ultra-thin film p-CuO/n-Si heterojunctions by employing vapour-liquid-solid method for photovoltaic applications. *Thin Solid Films*, 612, 331–336.
- [110] Yakuphanoglu, F. (2008). Analysis of interface states of metal–insulator–semiconductor photodiode with n-type silicon by conductance technique. *Sens. Actuators A*, 147, 104–109.
- [111] Fouad, S.S., Sakr, G.B., Yahia, I.S., Abdel-Basset, D.M., Yakuphanoglu, F. (2014). Capacitance and conductance characterization of nano-ZnGa₂Te₄/n-Si diode. *Mater. Res. Bull.*, 49, 369–383.
- [112] *Elektrik Enerjisi Üretimi*. (2012). T.C. Anadolu Üniversitesi Yayını No:2506
- [113] Kuş, F.G. (2010). *Bakır oksit/Çinko oksit Heteroeklem Yapıların Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi. Ankara: Ankara Üniversitesi.
- [114] Gong, J., Liang, J. and Sumathy K. (2012). Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Fundamental concepts and novel materials. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 16, 5848–5860.
- [115] Gaewdang, T. and Wongcharoen, N. (2015). Heterojunction Properties of p-CuO/n-CdS Diode. *Adv. Mater. Res.*, 1098, 1-5.