

**DÖNDÜREREK KAPLAMA
YÖNTEMİ İLE CuO
YARIİLETKEN
FİLMLERİNİN ELDE EDİLMESİ,
OPTİK VE YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Yasin DEMİRCİ
Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı
Temmuz-2012

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Yasin Demirci'nin "Döndürerek Kaplama Yöntemi İle CuO Yarıiletken Filmlerin Elde Edilmesi ve Optik, Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı **Fizik** Anabilim Dalındaki, Yüksek lisans tezi .../.../.... tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı – Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. Ahmet Şenol AYBEK
Üye	: Doç. Dr. Evren TURAN
Üye	: Yard. Doç Dr. Mehmet PEKER

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET**Yüksek lisans tezi****DÖNDÜREREK KAPLAMA YÖNTEMİ İLE
CuO YARIİLETKEN FİLMLERİNİN
ELDE EDİLMESİ, OPTİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ****Yasin DEMİRCİ****Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı****Danışman: Doç. Dr. Ahmet Şenol AYBEK
2012, 63 sayfa**

Bu çalışmada, CuO yarıiletken filmleri cam alt tabanlar üzerine döndürerek kaplama yöntemi ile elde edilmiştir. Farklı sıcaklıkta tavlanan filmlerin x-ışını kırınım desenlerinden polikristal tenorit yapıda oldukları saptanmıştır. CuO filmlerin kalınlık değerleri elipsometre yardımı ile 0,65 µm olarak belirlenmiştir. Absorpsiyon spektrumu ölçümlerinden filmlerin direkt bant aralığına sahip ve yasak enerji aralıklarının 1,62 eV ile 1,69 eV arasında değiştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: CuO, Döndürerek Kaplama Yöntemi, X-ışınları Kırınım Deseni, Optik Özellikler

ABSTRACT**Master of Science Thesis****THE INVESTIGATION of STRUCTURAL and OPTICAL PROPERTIES
of CuO SEMICONDUCTOR FILMS OBTAINED by SPIN COATING
METHOD****Yasin DEMİRCİ****Anadolu University
Graduate School of Sciences
Physics Program****Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet Şenol AYBEK
2012, 63 pages**

CuO semiconductor films have been produced onto glass substrates by the spin coating method. The films were annealed at 450, 500, 550 and 600°C. The CuO samples have crystallized tenorite structure. The thicknesses of the samples have been determined about 0,65 µm. The optical properties of the samples were characterized by transmittance and absorption spectroscopy measurements. The optical band gap energies of the CuO samples from the absorption spectra have been calculated between 1.62 eV and 1.69 eV.

Keywords: CuO, Spin Coating Method, X-Ray Diffraction, Optical Properties

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde beni yönlendiren, bilimsel katkılarını ve tecrübelerini benimle paylaşan sayın hocam Doç. Dr. Ahmet Şenol Aybek'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam sırasında bilimsel deneyimlerini benimle paylaşmaktan çekinmeyen, gösterdikleri ilgi, hoşgörü ve yardımları için başta değerli hocalarımdan Prof. Dr. Muhsin Zor, Doç. Dr. Metin Kul ve Doç. Dr. Evren Turan olmak üzere tüm Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü ve Kimya Bölümü öğretim elemanlarına çok teşekkür ederim.

Çalışmam süresince bilimsel yardımlarını ve desteğini esirgemeyen Osmangazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Yard. Doç. Dr. Tefik Ünal ve Yard. Doç. Dr. Mehmet Peker'e teşekkür ederim.

Son olarak, bugünlere gelmemde emeği ve katkısı olan değerli anneme ve babama, ayrıca sevgili kardeşim Ersin'e çalışmam süresince gösterdikleri sabır ve verdikleri destek için çok teşekkür ederim.

Yasin DEMİRCİ

Temmuz 2012

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ALT ve ÜST İNDİSLER	xii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
1.1. Oksit Bileşikleri	1
1.2. Bakır Oksit	3
2. YARIİLETKENLER	5
2.1. Giriş	5
2.2. Katılarda Bant Oluşumu ve Yarıiletkenlerde Bant Yapısı	5
2.3. Taşıyıcı Konsantrasyonu ve Has Yarıiletkenler	8
2.4. Katkılı Yarıiletkenler	13
2.4.1. n-tipi yarıiletkenler	13
2.4.2. p-tipi yarıiletkenler	15
3. FİLMLERİN ELDE EDİLMESİ	18
3.1. Döndürerek Kaplama Yöntemi	18
3.2. Cam Alt Tabanların Hazırlanması	19



3.3. CuO Filmlerin Elde Edilmesi	20
3.3.1. Çözelti hazırlanması	20
3.3.2. Deneyin yapılışı	20
4. FİLMLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ	21
4.1. Giriş	21
4.2. X-Işını Kırınımı	21
4.3 CuO Filmlerin X-Işını Kırınım Desenleri	24
5. ABSORPSİYON	33
5.1. Giriş	33
5.2. Temel Absorpsiyon	33
5.2.1. Direkt bant geçişi	35
5.2.2. İndirekt bant geçişi	36
5.3. Optik Yöntem ile Yarıiletkenlerin Yasak Enerji Aralıklarının Belirlenmesi	38
5.4 CuO Filmin Temel Absorpsiyon Spektrumları ve Yasak Enerji Aralıklarının Belirlenmesi	38
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	60
KAYNAKLAR	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1.	ZnO'nun kristal yapısı	1
1.2.	Yüzey merkezli kübik yapı (fcc)	2
1.3.	Tenorit yapı (fcc)	3
2.1.	Saf bir yarıiletkenin (a) mutlak sıcaklıkta (0 K) ve (b) oda sıcaklığında (300 K) iletim ve valans bantları, ısıl olarak uyarılmış elektron ve holler	6
2.2.	Karbon kristalinde enerji bantlarının oluşumu	7
2.3.	Fermi – Dirac dağılım fonksiyonu	9
2.4.	Bir yarıiletkende $m_e^* = m_h^*$ durumunda (a) iletim ve valans bantları ve (b) dağılım fonksiyonu ile elektron ve hollerin durum yoğunluğu	10
2.5.	Has yarıiletkenlerde (m_e^*) = (m_h^*) Fermi enerji seviyesi (T=0 K)	12
2.6.	Silisyum atomuna arsenik katkılanması	13
2.7.	n-tipi bir yarıiletkenin (a) 0 K ve (b) T>0 K sıcaklıkta enerji bant diyagramı	14
2.8.	Silisyum kristaline bor atomu katkılanması	15
2.9.	p-tipi bir yarıiletkenin (a) 0 K ve (b) yüksek sıcaklıklarda enerji bant diyagramı	16
2.10.	(a) n-tipi ve (b) p-tipi katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi ...	17
3.1.	Döndürerek kaplama yöntemi deney düzeneği	18
4.1.	X-ışınlarının kristaller tarafından kırınımına uğraması	22
4.2.	X-ışını kırınım deseni piklerin şematik gösterimi(a) kristal yapı ve (b) amorf yapı.....	24
4.3.	3000 rpm'de (a) 30 saniye ve (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri	26
4.4.	3000 rpm'de (a) 30 saniye ve(b) 60 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri	28

4.5.	3000 rpm’de (a) 30 saniye ve(b) 60 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri	30
4.6.	3000 rpm’de (a) 30 saniye ve (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri	31
5.1.	Yarıiletkenlerde Temel Absorpsiyon Spektrumu	34
5.2.	Direkt Bant Geçişi	35
5.3.	İndirekt Bant Geçişi	37
5.4.	Bir yarıiletkende absorpsiyon katsayısının, fotonun enerjisine göre değişiminden yasak enerji aralığının belirlenmesi.....	38
5.5.	3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin temel absorpsiyon spektrumu.....	39
5.6.	3000 rpm’de saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin $(ahv)^2$ ’nin, foton enerjisi hv ’ye göre değişimi	40
5.7.	3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin temel absorpsiyon spektrumu	41
5.8.	3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin $(ahv)^2$ ’nin, foton enerjisi hv ’ye göre değişimi	42
5.9.	3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin temel absorpsiyon spektrumu	43
5.10.	3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin $(ahv)^2$ ’nin, foton enerjisi hv ’ye göre değişimi	44
5.11.	3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin temel absorpsiyon spektrumu	45
5.12.	3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin $(ahv)^2$ ’nin, foton enerjisi hv ’ye göre değişimi	46

5.13.	3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin temel absorpsiyon spektrumu	47
5.14	3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin $(\alpha hv)^2$ ’nin, foton enerjisi hv ’ye göre değişimi	48
5.15.	3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin temel absorpsiyon spektrumu	49
5.16.	3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin $(\alpha hv)^2$ ’nin, foton enerjisi hv ’ye göre değişimi.....	50
5.17.	3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin temel absorpsiyon spektrumu	51
5.18.	3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin $(\alpha hv)^2$ ’nin, foton enerjisi hv ’ye göre değişimi	52
5.19.	3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin temel absorpsiyon spektrumu	53
5.20.	3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin $(\alpha hv)^2$ ’nin, foton enerjisi hv ’ye göre değişimi	54
5.21.	3000 rpm’de (a) 30 saniye, (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri ...	55
5.22.	3000 rpm’de (a) 30 saniye, (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri ...	56
5.23.	3000 rpm’de (a) 30 saniye, (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri ...	57
5.24.	3000 rpm’de (a) 30 saniye, (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

4.1.	3000 rpm’de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansarak elde edilen CuO filminin döndürme süresi, açığı, yarı pik genişliği ve tanecik boyutu	25
4.2.	3000 rpm’de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansarak elde edilen CuO filminin döndürme süresi, açığı, yarı pik genişliği ve tanecik boyutu	27
4.3.	3000 rpm’de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansarak elde edilen CuO filminin döndürme süresi, açığı, yarı pik genişliği ve tanecik boyutu	27
4.4.	3000 rpm’de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansarak elde edilen CuO filminin döndürme süresi, açığı, yarı pik genişliği ve tanecik boyutu	29

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

KDY	: Kimyasal depolama yöntemi
CVD	: Kimyasal buharlaştırma yöntemi
a	: Kristalografik örgü parametresi
d	: Kristal düzlemleri arası uzaklık
E_g	: Yasak enerji aralığı
E_c	: İletim bandı enerji seviyesi
E_v	: Valans bandı enerji seviyesi
E_F	: Fermi enerji seviyesi
e	: Temel yük
f(E)	: Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
k_B	: Boltzman sabiti
E	: Enerji
T	: Sıcaklık
E_c	: İletim bandı enerji seviyesi
E_d	: Katkılı yarıiletkenlerde donör enerji seviyesi
Φ	: İş fonksiyonu
E_{F_i}	: Özgün yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi
$g_c(E)$: İletim bandındaki elektronların durum yoğunluğu fonksiyonu
$g_v(E)$: Valans bandındaki hol durum yoğunluğu fonksiyonu
n	: İletim bandındaki elektronların yoğunluğu
p	: Valans bandındaki hollerin yoğunluğu
m_e^*	: İletim bandındaki elektronların etkin kütlesi
m_h^*	: Valans bandındaki hollerin etkin kütlesi
N_a	: Katkılı yarıiletkenlerde akseptör yoğunluğu
N_c	: İletim bandındaki elektronların etkin durum yoğunluğu
N_d	: Katkılı yarıiletkenlerde donör yoğunluğu
$n_i(T)$: Has yarıiletkenler için taşıyıcı yoğunluğu
N_v	: Valans bandındaki hollerin etkin durum yoğunluğu
E_H	: Hidrojen atomunun birinci iyonlaşma enerjisi
ϵ_0	: Serbest uzayın permitivitesi



ϵ_r	: Yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti
E_d	: Donör enerji seviyesi
E_a	: Katkılı yarıiletkende akseptör enerji seviyesi
t_f	: Yarıiletken filmin kalınlığı
Δm	: Filmin kütlesi
ρ_f	: Filmin yoğunluğu
S	: Cam tabanın yüzey alanı
\vec{E}	: Elektrik alan
\vec{v}	: Elektrik alan uygulanan bir yarıiletkende taşıyıcıların sürüklenme hızı
ν	: ışığın frekansı
t	: Zaman
n_o	: Kırılma indisi
T	: Geçirgenlik
θ	: Kırılma açısı
D	: Ortalama parçacık boyutu
B	: Yansıma düzlemine ait pikin radyan cinsinden yarı pik genişliği
I_0	: Materyale gelen ışının şiddeti
I_T	: Ortamdan geçen ışının şiddeti
Δx	: Absorpsiyona uğrayan materyalin kalınlığı
α	: Lineer absorpsiyon katsayısı
ΔI	: Δx kalınlıktaki bölgeden geçtikten sonra gelen ışığın şiddetindeki azalma
R	: Yansıma
I	: Film içine giren ışık miktarı
λ_g	: Gelen fotonun dalgaboyu
c	: Işık hızı
h	: Planck sabiti ($\hbar = h / 2\pi$)
E_f	: Fonon enerjisi
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu



φ	: Potansiyel engel yüksekliği
\vec{j}	: Akım yoğunluğu
β_s	: Schottky sabiti
β_{PF}	: Poole-Frenkel sabiti
τ	: Taşıyıcıların çarpışmaları arasında geçen süre
μ_e	: Elektron mobilitesi
μ_h	: Hol mobilitesi
\vec{v}_e	: Elektronların sürüklenme hızı
\vec{v}_h	: Hollerin sürüklenme hızı
σ	: Elektriksel iletkenlik
l	: Elektrot boyu
d'	: Kontaklar arası mesafe

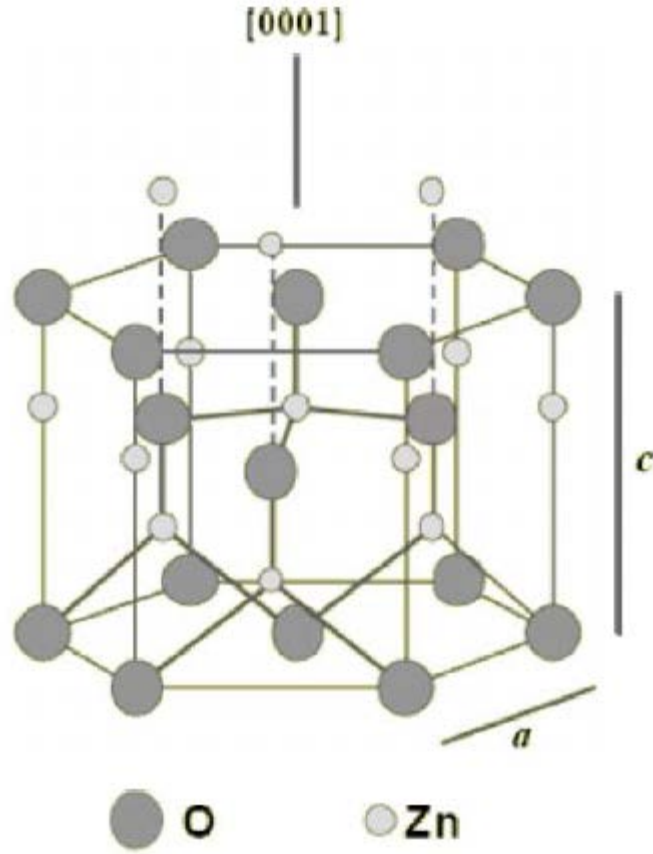
Alt ve üst indisler

a	: Akseptör
e	: Elektron
d	: Donör
f	: Fonon
h	: Hol
i	: Has
*	: Etkin
k	: Katkılı
m	: Metal
s	: Yarıiletken
em	: Emisyon
abs	: Absorpsiyon

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1. Oksit Bileşikleri

Optik ve elektriksel özelliklerinden dolayı metal oksit yarıiletken filmler son yıllarda yoğun bir şekilde çalışılmakta ve oldukça ilgi çekmektedir. Bunlardan bazıları; çinko oksit, kadmiyum oksit ve bakır oksittir.

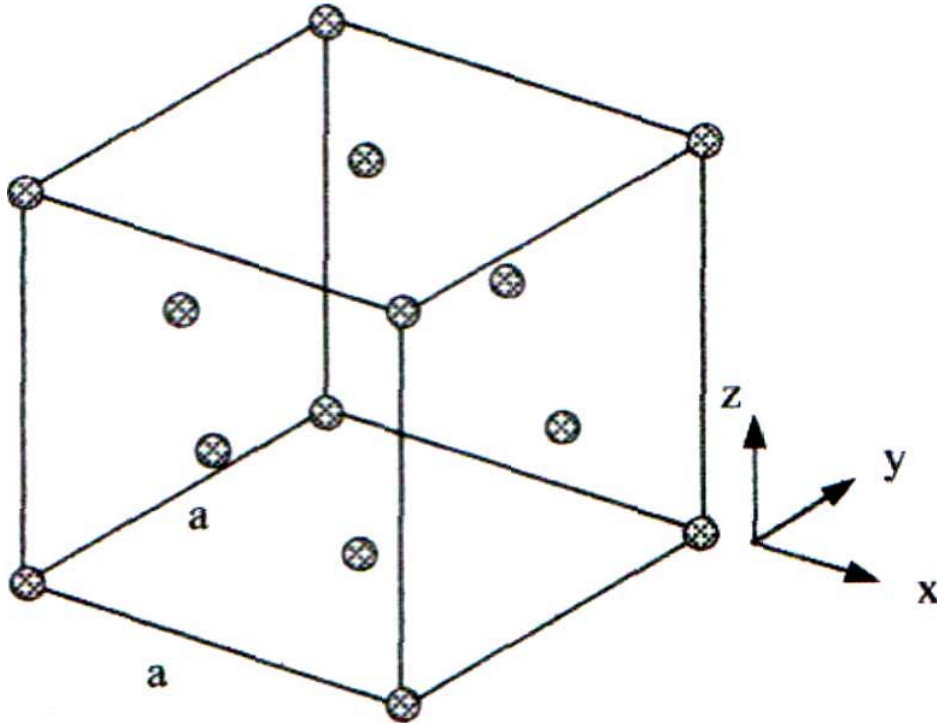


Şekil 1.1. ZnO'nun kristal yapısı

Çinko oksit doğada “mineral zinkit” olarak bulunur. ZnO bileşiği hekzagonal yapıda kristalleşmektedir (Şekil 1.1), örgü sabitleri $a=3,24982 \text{ \AA}$, $c=5,20661 \text{ \AA}$ 'dır. ZnO birim hücresinin hekzagonal yapısında her Zn atomu birinci kabukta 4 O atomu ve ikinci kabukta 12 Zn atomu ile çevrilmiştir. II-IV bileşiklerinin çoğu kübik, “zinc blende” ya da “hekzagonal wurtzite” yapısına sahiptir. ZnO bileşiği II-IV grubu bir yarıiletkendir. ZnO elektriksel iletkenliği

yüksektir ve oda sıcaklığında yaklaşık 3,3 eV'luk direkt band geçişli yasak enerji aralığına sahiptir. Çinkonun doğada bol miktarda bulunması ve ucuz bir malzeme oluşu çinko oksit ince filmlerin maliyetini düşürmektedir. Görünür ışık bölgesinde saydam oluşu nedeniyle çinko oksit filmler saydam iletken malzeme olarak çok büyük ilgi görmektedir. ZnO bileşiği görünür bölgede yaklaşık %80-%90 optik geçirgenliğe sahiptir [1,2].

Kadmiyum oksit (CdO) yarıiletken bileşiği periyodik tablonun II. Grup elementlerinden olan Cd ile VI. Grup elementlerinden olan O' den oluşan II-VI grup bileşiğidir. CdO ince film, n-tipi yarıiletken olup kristal yapısı NaCl (yüzey merkezli kübik) yapısına benzemektedir (Şekil 1.2). CdO ince filmi 2,2 – 2,8 eV direkt geçişli yasak enerji aralığına sahiptir [3]. Diğer geçirgen iletken oksitlere göre CdO'nun yasak enerji aralığı daha dardır [4]. CdO yarıiletken bileşiği yüksek iletkenliğe ve görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahiptir [3].



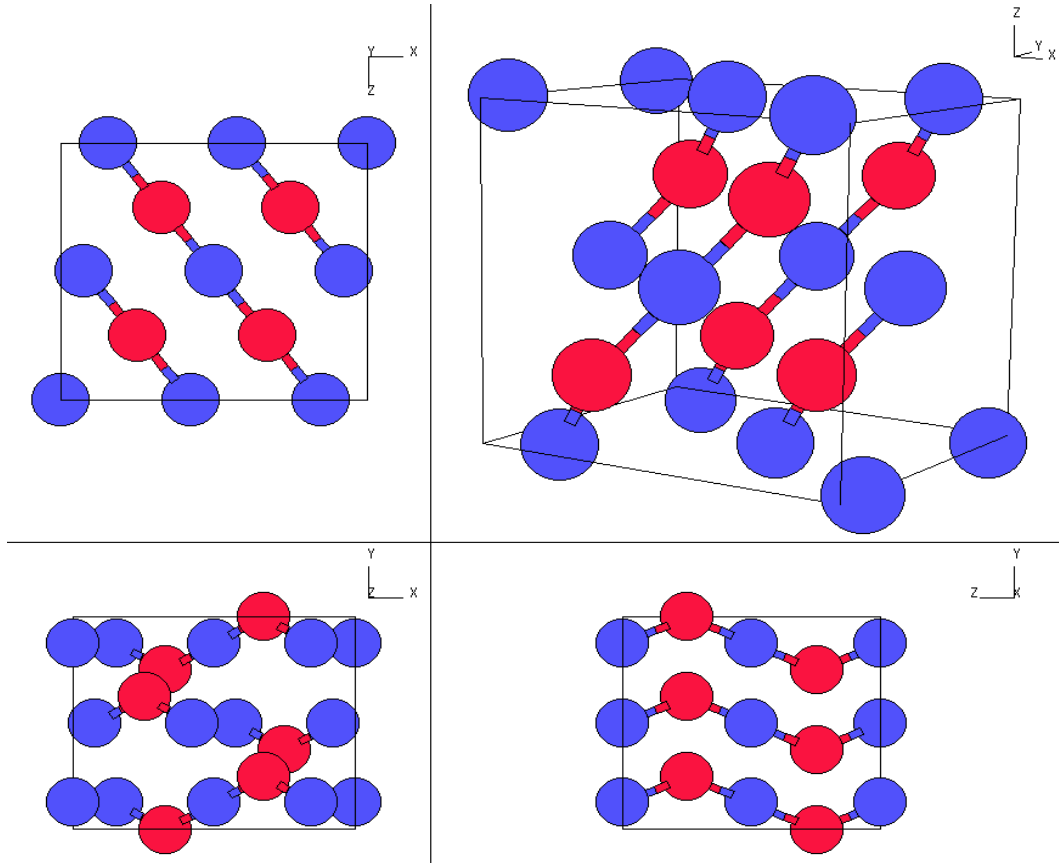
Şekil 1.2. Yüzey merkezli kübik yapı (fcc) [17]

ZnO ve CdO yarıiletken filminin elde edilme yöntemleri; relative sputtering (RS), ion-beam sputtering (IBS), radio frequency sputtering (RFS),

activated reactive evaporation (ARE), spray pyrolysis (SP) olarak bilinir. CdO yarıiletken bileşiği, güneş pillerinde, saydam elektrotlarda, fototransistörlerde, fotodiyotlarda, gaz sensörlerde, fotovoltaik ve optoelektronik devrelerde, sıvı kristal göstergelerde, IR dedektörlerde, yansıma yapmayan kaplamalarda kullanılmaktadır [5, 6, 7, 8, 9].

1.2 Bakır Oksit

Bilinen iki çeşit bakır oksit bileşiği vardır: Cu_2^+O (cuprite) ve Cu^{2+}O (tenorite) [10]. Cu_4O_3 (paramelaconite) olarak adlandırılan metastabil bakır oksit, diğer ikisinin ara bileşiği olarak bildirilmiştir [11].



Şekil 1.3. Tenorit yapı (fcc) [17]

Cu_2O kübik yapıya sahiptir ve örgü parametresi $4,27 \text{ \AA}$ 'dur. Cu_4O_3 ise tetragonal yapıya sahiptir ve örgü parametreleri $a = 5,837 \text{ \AA}$ ve $c = 0,9932 \text{ \AA}$ 'dur.

CuO monoclinic yapıda kristalleşir ve örgü parametreleri $a = 4,684 \text{ \AA}$, $b = 3,425 \text{ \AA}$, $c = 5,129 \text{ \AA}$ ve $\beta = 99,28^\circ$ 'dir. CuO'in tenorit kristal yapısı Şekil 1.3'te verilmiştir. Burada CuO₃ birimleri zincirlenmiş ve Cu, O ile dört adet eş düzlemsel bağ oluşturmuştur [12]. Monoksitlerin üç boyutlu geçiş elementlerinde bakırın, oksijen ile kare düzlemsel koordinasyona sahip olması CuO'i monoclinic yapılar arasında eşsiz kılar [13].

CuO optik özelliklerinin uygun olması nedeniyle güneş pili yapımında kullanılabilir [14]. Ayrıca, yüksek güneş ışınları emiciliğine ve düşük ısı ışıma özelliğine sahip olduğu için seçkin bir güneş ışınları absorplayicisidir [15]. Yapısındaki bakır oranı nedeniyle bakır oksitler p-tipi yarıiletkenlerdir [16]. CuO siyah renkli, görünür bölgede kısmen saydam yapıya sahiptir ve yasak enerji aralığı değeri 1,3 ile 1,7 eV arasındadır [12]. CuO'i aygıt uygulamalarında kullanmanın önemli avantajları, non-toksik olması ve bileşenlerinin bolca mevcut olmasıdır.

Bu çalışmanın amacı yarıiletken oksitlerden CuO filmini döndürerek kaplama yöntemi ile elde etmek, elde edilen yarıiletken filmin optik ve kristal özelliklerini belirlemektir. Filmin özellikleri üzerine tavlama sıcaklığı ve film kaplamasını etkileyen faktörlerden biri olan döndürme süresini değiştirerek CuO filmlerini elde etmektir.

2. YARIİLETKENLER

2.1. Giriş

Yarıiletkenler, özellikleri bakımından iletkenlerden ve yalıtkanlardan farklılıklar gösteren katıların ayrı bir sınıfıdır. Günümüz teknolojisinde önemli rol oynayan yarıiletkenler, diyot, transistör ve tümeleşik devreler gibi devre bileşenlerinin yanı sıra anahtar, fotovoltajik pil, detektör, termistör gibi aygıtların da yapımında kullanılır.

Yarıiletkenler oda sıcaklığında 10^{-2} 'den 10^9 ohm·cm'ye kadar ve sıcaklığın artmasıyla azalan elektrik özdirençleriyle sınıflandırılabilir. Yalıtkan materyallerin özdirenci 10^{14} ohm·cm'den büyük iken, yarıiletkenler mutlak sıfır sıcaklıkta yalıtkan özelliği gösterirler [17]. Yarıiletkenlerde sıcaklık arttıkça elektronlar valans bandından iletim bandına ısıl uyarılma yoluyla geçerler. Hem iletim bandındaki elektronlar hem de elektronların valans bandında bıraktıkları boşluklar (holler) elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Sıcaklığın yükselmesiyle yarıiletkenlerin özdirençlerinin azalması, yarıiletkenleri metallere ayıran temel özelliklerden biridir.

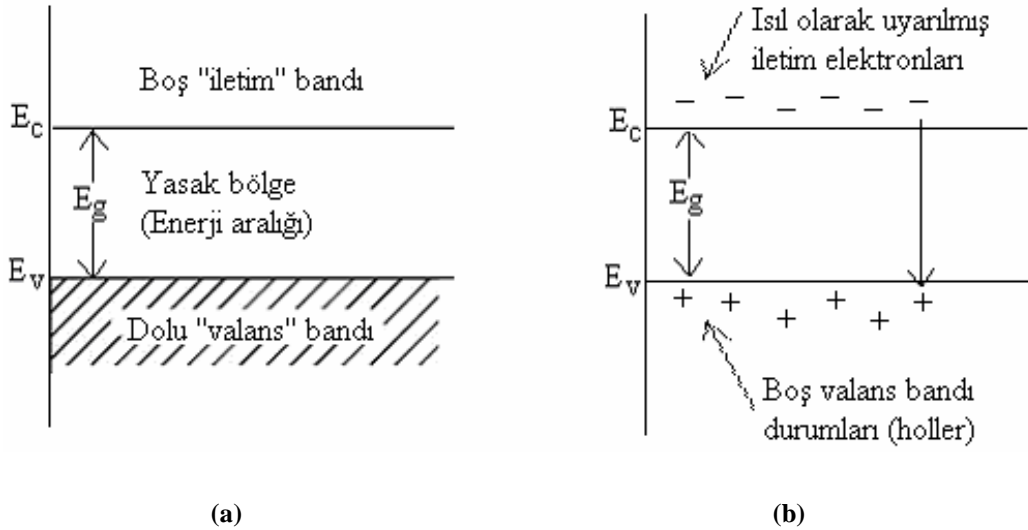
Kimyasal formülü AB olan yarıiletken bir bileşikte, son yörüngesinde üç elektronu bulunan A atomu ile son yörüngesinde beş elektronu bulunan B atomu birleşerek meydana getirdikleri bileşiğe III-V bileşikler denir. Buna örnek olarak InSb ve GaAs sayılabilir. II-VI bileşiklerine ZnS ve CdS en bilinen örneklerdir. I-VI bileşiklerine CuO örnek olarak verilebilir. Si ve Ge yarıiletkenleri tek atomludur ve elmas-türü yarıiletkenler olarak adlandırılır, çünkü elmas kristal yapısına sahiptirler [17].

2.2. Katılarda Bant Oluşumu ve Yarıiletkenlerde Bant Yapısı

Atomlar birbirlerini etkilemeyecek kadar uzakta olduklarında her bir atomdaki elektron için bulunabileceği enerji seviyeleri vardır. Atomlar bir katıyı oluşturmak üzere birbirlerine yaklaştırıldıklarında atomlar etkileşmeye başlar. Atomlarda bulunan elektronlar Pauli ilkesine göre enerji seviyelerine yerleşmeye başlarlar. Pauli ilkesine göre birden fazla elektron aynı kuantum sayısına sahip olamaz, bu nedenle atomlar katıyı oluşturmaya başladıklarında enerji seviyeleri

yarılarak enerji bantları oluşur. Atomlar katıyı oluşturduklarında elektronlar enerji seviyelerinin yarılmasıyla oluşan enerji bantlarında yer alırlar. Yarılan enerji düzeylerindeki fark 10^{-19} eV civarındadır. Bu değer o kadar küçüktür ki enerji düzeyleri bir bant şeklini meydana getirir.

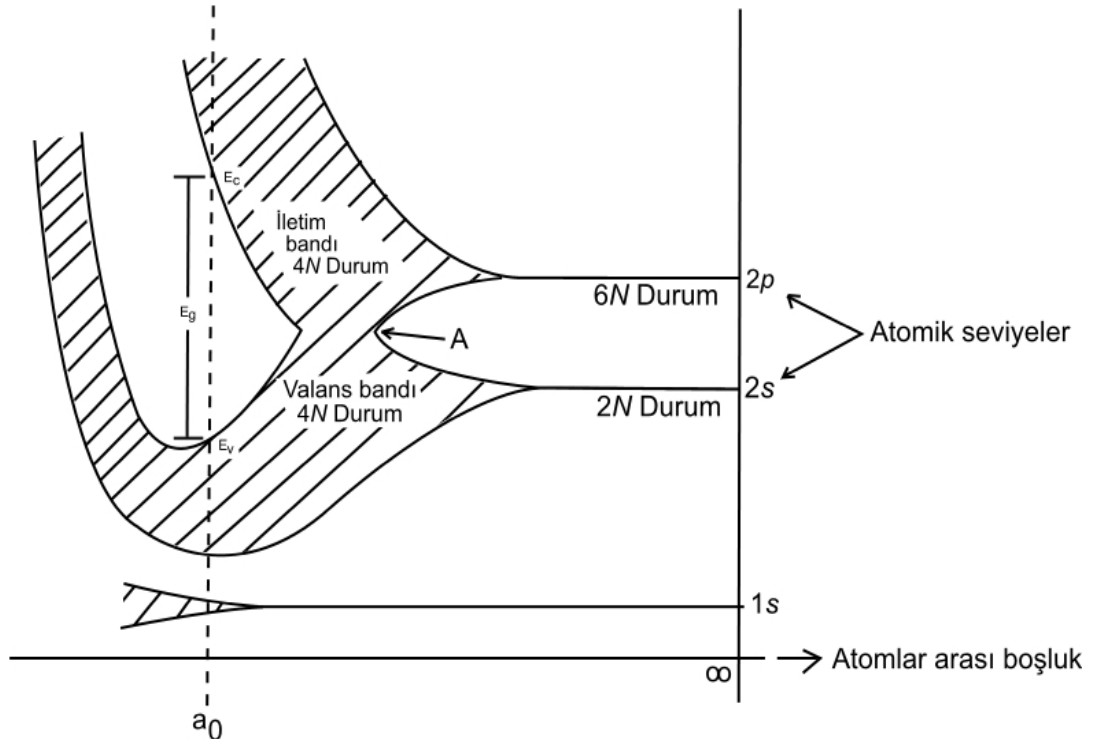
Bir yarıiletkenin enerji bant yapısı, şematik olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Şekil 2.1a'da mutlak sıfır sıcaklığında yarıiletkenin bant durumu görülmektedir. Burada valans bandı tamamen dolu iletim bandı ise tamamen boştur. Bu durumda yarıiletken mükemmel bir yalıtkan gibi davranır. İki bant arasında elektron bulunmaz ve bu bölge yasak enerji aralığı (E_g) olarak tanımlanır. Yarıiletkenin sıcaklığı mutlak sıfır sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklara arttırılırsa, valans bandından bir elektron yasak enerji aralığını geçerek iletim bandına geçebilir. Bu durumda iletim bandında bir elektron ve valans bandında bir hol bulunur (Şekil 2.1b). Bu durumda yarıiletkene bir elektrik alan uygulandığında iletim bandındaki elektron ve valans bandındaki hol elektrik alana bağlı olarak hareket eder ve her ikisi de elektriksel iletme katkıda bulunurlar. Yarıiletkenin sıcaklığı arttıkça iletme katkıda bulunan elektronların ve hollerin sayısının artacağı açıktır. Bundan dolayı elektriksel iletkenlik sıcaklıkla artmış olur [18].



Şekil 2.1. Saf bir yarıiletkenin (a) mutlak sıcaklıkta (0 K) ve (b) oda sıcaklığında (300 K) iletim ve valans bantları ve ısıl olarak uyarılmış elektron ve holler

Yarıiletkenlerin bant yapısını daha iyi anlamak için, benzer atomlar katı bir kristali oluşturacak şekilde bir araya getirildiklerinde, bu atomların elektronik seviyelerinin nasıl davranacağını bilmek gerekir. Periyodik şekilde dizilmiş N tane atomdan oluşan bir kristali ele alırsak, atomlar birbirinden ayrıken aralarında bir etkileşme olmayacağı ve bu sistemin izinli durumlarının uzayda N kez tekrar edilen tek bir atomun durumları gibi olacağı söylenebilir.

İki benzer atom birbirlerine yaklaşırken bunların elektronlarının dalga fonksiyonları üst üste gelmeye başlar. Pauli dışarlama ilkesini sağlamak için, tüm spin-çiftlenimli elektronların durumları izole atomdaki değerlerinden biraz farklı enerjiler elde ederler. Böylece eğer N atom bir etkileşim menziline bir araya gelirse, aynı orbitalin $2N$ elektronu $2N$ - farklı durumu işgal edebilir. Bunlar izole atomdaki gibi ayrı bir seviye yerine, durumların bir bandını oluşturur [19].



Şekil 2.2. Karbon kristalinde enerji bantlarının oluşumu

Şekil 2.2’de karbon atomundan oluşan elmas kristalindeki enerji bantlarının oluşumu verilmiştir. Enerji durumlarının dağılımı atomlar arası mesafeye kuvvetli bir şekilde bağlıdır. N tane izole edilmiş atom, bir kristalde bir araya getirildiğinde, $2s$ ve $2p$ atomik seviyeleri önce enerji bantlarına genişler;

atomlar arası mesafe azaldığında bu bantlar daha da genişler ve sonunda üst üste gelirler. Atomlar arası mesafe azalmaya devam ederken, aslında 2s ve 2p olan durumların sürekliliği bir defa daha iki banda yarılr. Bu iki bandın her biri 4N durum içerirler. Atomlar arası denge mesafesinde (a_0), bu bantlar E_g büyüklüğünde bir “enerji aralığı” veya yasak bölge ile ikiye ayrılır. Karbonun elektronik yapısı $1s^2 2s^2 2p^2$ olduğundan 4N değerlik elektronu bulunur. Bu bantlardan altta bulunan bant elektron sayısı kadar durum içerir. Değerlik elektronları bantlardan altta bulunanı doldurmaya tam yeterli gelir ve kristalin valans bandını oluşturur. Tamamen elektronlarla dolu olan bant valans bandı olarak tanımlanır. Durumların elektron içermeyen üstteki bandına ise iletim bandı denir. Bu durum silisyum ve germanyum gibi elmas yapıda kristalleşen yapılar için de benzerdir [20, 21].

2.3. Taşıyıcı Konsantrasyonu ve Has Yarıiletkenler

Yarıiletken materyallerde elektronlar ve holler iletkenliği sağladıkları için serbest taşıyıcı ya da taşıyıcı olarak adlandırılırlar. Birim hacimdeki taşıyıcı sayısı yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini belirler. Taşıyıcıların yoğunluğunu belirlenmek için Fermi–Dirac dağılım fonksiyonlarından faydalanılır. Fermi–Dirac fonksiyonu,

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1} \quad (2.1)$$

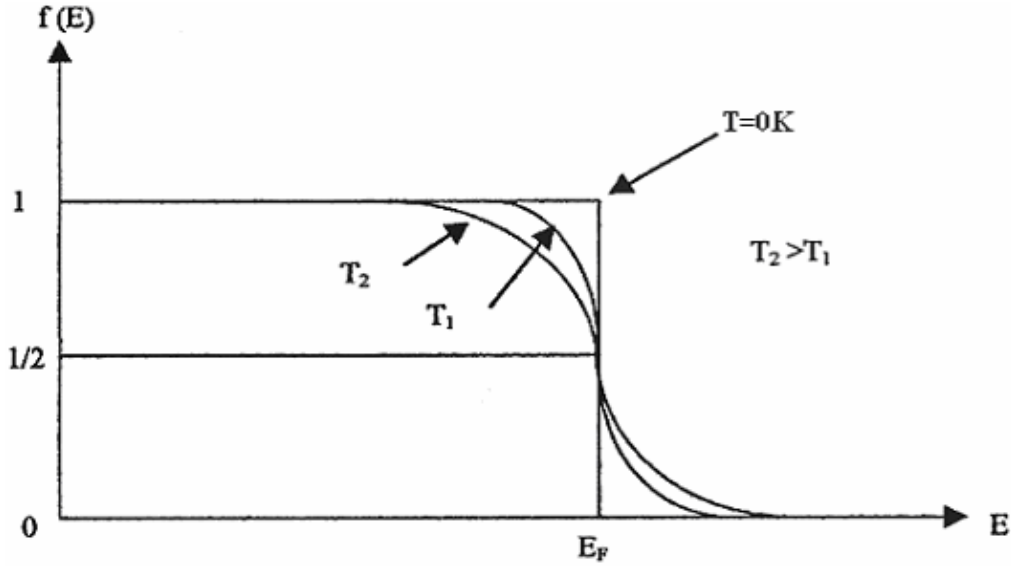
bağıntısı ile verilir. Burada; E_F , Fermi enerji seviyesi ve k_B Boltzmann sabitidir.

Fermi–Dirac dağılım fonksiyonu, elektronun T sıcaklığında ve E enerji seviyesinde bulunma olasılığını verir. Fonksiyonun E enerji seviyesine göre değişimi Şekil 2.3’te gösterilmiştir.

Fonksiyonda ($E-E_F$) $\gg k_B T$ ise $e^{\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)}$ değeri 1’den çok büyük olacağından bu değer ihmal edilebilir ve Fermi–Dirac dağılım fonksiyonu Maxwell – Boltzman dağılım fonksiyonuna dönüşür. Bu fonksiyon,

$$f(E) = e^{-\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)} \quad (2.2)$$

ile verilir. Bu fonksiyona göre iletim bandındaki elektronların yoğunluğu



Şekil 2.3. Fermi – Dirac dağılım fonksiyonu [19]

hesaplanabilir. Burada $(E, E+dE)$ enerji aralığındaki durumların sayısı $g_c(E)dE$ 'ye eşit olur. Burada $g_c(E)$ elektron durum yoğunluğu olarak adlandırılır. Bu durumların dolu olma olasılığı $f(E)$ olarak tanımlanırsa, bu enerji aralığında bulunan elektronların yoğunluğu $f(E)g_c(E)dE$ olur. İletim bandındaki elektronların yoğunluğu n ise,

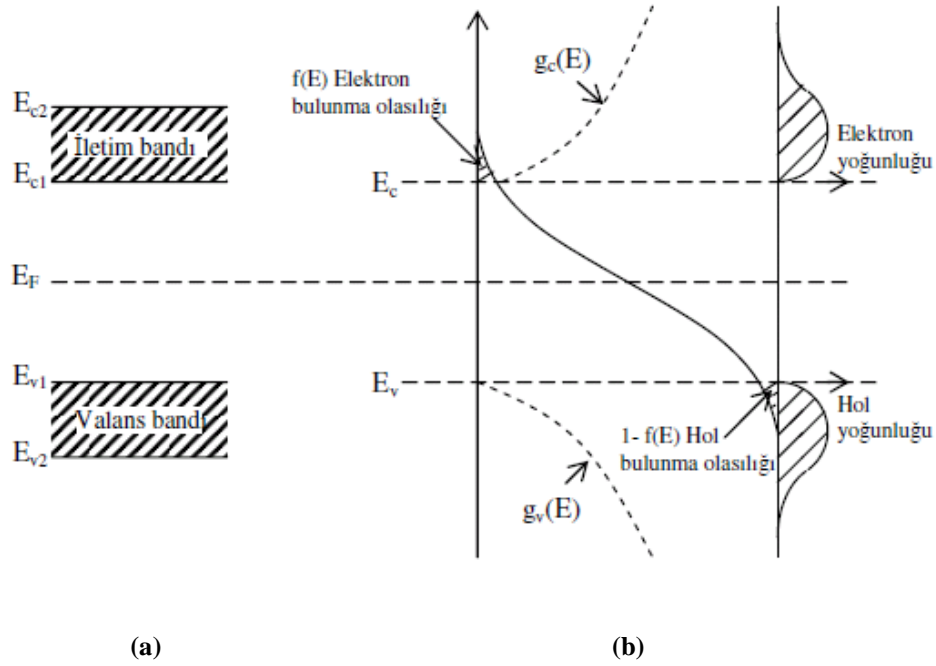
$$n = \int_{E_{c1}}^{E_{c2}} f(E)g_c(E)dE \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilir. Burada E_{c1} ve E_{c2} , iletim bandının alt ve üst değerleridir. Şekil 2.4'te dağılım fonksiyonları ve durum yoğunluklarının enerjiye göre değişimleri verilmiştir.

İletim bandındaki elektronların durum yoğunluğu $g_c(E)$,

$$g_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{1/2} \quad (2.4)$$

bağıntısı ile verilir. Burada; m_e^* iletim bandında bulunan elektronların etkin kütlesidir.



Şekil 2.4. Bir yarıiletkende $m_e^* = m_h^*$ durumunda (a) iletim ve valans bantları ve (b) dağılım fonksiyonu ile elektron ve hollerin durum yoğunluğu [21]

$E < E_g$ ise $g_c(E)$ sifira gider. $E_g < E$ ise $g_c(E)$ sonludur. Valans bandının üst sınırındaki enerji değerini sıfır kabul edip denklem (2.3)'teki E_{c1} ve E_{c2} sınırları yerine E_g ve ∞ değerleri konularak ve (2.4)'ü (2.3)'te yerine yazılırsa,

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{E_F/k_B T} \int_{E_g}^{\infty} (E - E_g)^{1/2} e^{-E/k_B T} dE \quad (2.5)$$

elde edilir. İntegral sınır değerlerine göre alındığında elektron yoğunluğu n için,

$$n = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi^2 \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\left(\frac{E_c - E_F}{k_B T} \right)} \quad (2.6)$$

elde edilir ve N_c

$$N_c = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi^2 \hbar^2} \right)^{3/2} \quad (2.7)$$

alınırsa

$$n = N_c e^{-\left(\frac{E_c - E_F}{k_B T} \right)} \quad (2.8)$$

Bulunur. Burada; N_c , iletim bandında bulunan elektronların etkin durum yoğunluğudur. Ayrıca bu ifadede üstel olmayan terim, üstel olan terime göre sıcaklığa bağlı olarak daha yavaş bir şekilde değişir [21, 22].

Valans bandında bulunan hollerin durum yoğunluğu p ise,

$$p = \int_{E_{v1}}^{E_{v2}} (1 - f(E)) g_v(E) dE \quad (2.9)$$

ile verilir. Burada $g_v(E)$ valans bandında bulunan hollerin durum yoğunluğunu, $g_v(E)d(E)$, holler için $(E, E+dE)$ enerji bölgesindeki durumların sayısı, E_{v1} ve E_{v2} ise sırasıyla valans bandının alt ve üst sınırlarıdır. Bu durumların her birinin dolu olma olasılığı $(1 - f(E))$ 'ye sahip olduğu için, bu enerji bölgesinde yer alan hollerin yoğunluğu $(1 - f(E))g_v(E)dE$ 'ye eşittir. Valans bandındaki hol yoğunluğu p ,

$$p = 2 \left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\left(\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right)} \quad (2.10)$$

olur ve N_v

$$N_v = 2 \left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \quad (2.11)$$

alınırsa,

$$p = N_v e^{-\left(\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right)} \quad (2.12)$$

bulunur. Burada N_v valans bandında bulunan hollerin etkin durum yoğunluğunu, m_h^* ise hollerin etkin kütlelerini gösterir [18, 21].

Has bir yarıiletkende elektron yoğunluğu ile hol yoğunluğu birbirine eşit olmalıdır. Valans bandındaki bir elektron, uyarılarak iletim bandında çıkarsa, valans bandında bu elektrona karşılık iletim bandında bir tane hol oluşur. Bu nedenle iletim bandındaki elektron yoğunluğu (n), valans bandındaki hol yoğunluğuna (p) eşit,

$$n = p \quad (2.13)$$

çarpımları verilen sıcaklıkta sabit olup

$$np = n_i^2(T) \quad (2.14)$$

olarak verilir. Bu eşitliğe mass-action yasası denir. Burada $n_i(T)$ söz konusu yarıiletken için özgül taşıyıcı yoğunluğudur ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Elektron ve hollerin taşıyıcı yoğunlukları için elde edilen bağıntıları denklem (2.13)'te yerine yazılırsa, taşıyıcı yoğunluğu $n_i(T)$,

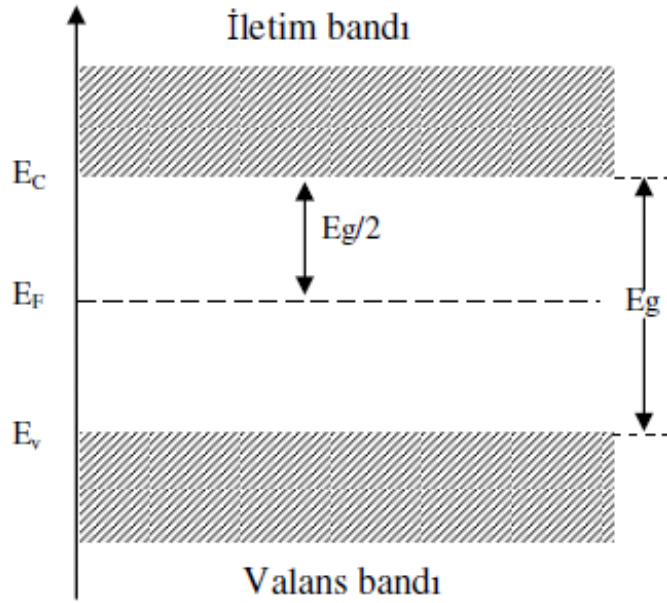
$$n_i(T) = 2 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} \quad (2.15)$$

ile verilir. Bir yarıiletkende yasak enerji aralığı ve etkin kütleler biliniyor ise taşıyıcı yoğunluğu yalnızca sıcaklığın bir fonksiyonu olacaktır.

Mutlak sıfır sıcaklıkta bir katının elektronlarının Pauli dışarlama ilkesine uygun bir şekilde bütün enerji seviyelerini doldurması durumunda en üstteki enerji seviyesi E_F Fermi enerji seviyesi olarak adlandırılır. Has yarıiletkenlerde elektron ve hol yoğunlukları eşit olacağından, (2.8) ve (2.12) denklemleri (2.13) denkleminde yerine yazılırsa Fermi enerji seviyesi E_{Fi} ,

$$E_{Fi} = \frac{1}{2}E_g + \frac{3}{4}k_B T \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right) \quad (2.16)$$

ile verilir. Has yarıiletkenlerde, elektron ve hol etkin kütleleri birbirine eşit alındığında ($m_e^* = m_h^*$) Fermi enerji seviyesi Şekil 2.5'te görüldüğü gibi yasak enerji aralığının tam ortasında bulunur.



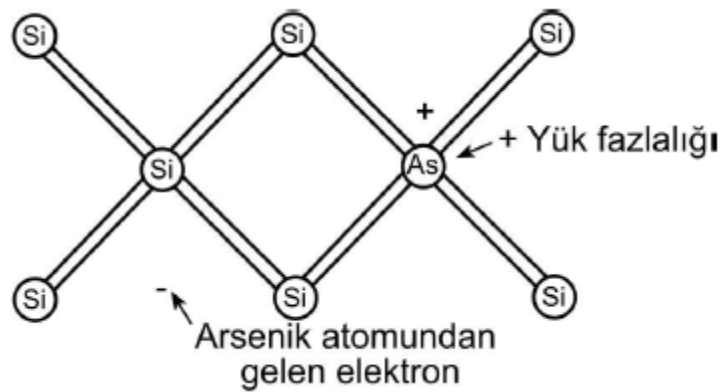
Şekil 2.5. Has yarıiletkenlerde ($m_e^* = m_h^*$) Fermi enerji seviyesi ($T=0$ K)

2.4 Katkılı Yarıiletkenler

Has yarıiletkenlerde elektron ve hol yoğunlukları birbirine eşittir. Bir elektron uyarılarak valans bandından iletim bandına çıkarılırken valans bandında bir hol bırakır. Yarıiletken malzeme uygun elementler ile katkıldığında çoğunluk taşıyıcıları holler veya elektronlar olan numuneler elde edilir. Bu katkılama yarıiletkenin elektriksel özelliklerini önemli derecede etkileyen faktörlerdir. Katkılama işleminden sonra yarıiletken malzemeler n-tipi veya p-tipi özellik gösterirler [17, 21].

2.4.1 n-tipi yarıiletkenler

Has yarıiletken olan silisyum ve germanyum kristalleri katkıldığında bu yapıların özellikleri değişir. Silisyum ve germanyum elmas yapısında kristalleşen IV. grup elementleridir. Bu tür elementlerde, her atom komşu dört atomla kovalent bağlı olup değerlilikleri dördür. Beş değerliliğe sahip olan fosfor, arsenik veya antimon gibi katkı elementi, örgüde bulunan normal bir atomla yer değiştirirse, dört kovalent bağı tamamlandıktan sonra boşa bir valans elektronu kalır. Bu şekilde bir katkı maddesi örgüyü en az bozacak şekilde yerleşmiş olur. Şekil 2.6'da silisyum kristaline arsenik atomunun katkılanması görülmektedir.



Şekil 2.6. Silisyum atomuna arsenik katkılanması [17]

Kristal içerisinde, arsenik atomunun beş değerlik elektronundan dört tanesi, silisyum atomunun dört değerlik elektronu ile kovalent bağ yapar. Arsenik

atomunun beşinci elektronu ise arsenik atomuna zayıf bir kuvvetle bağlıdır. Zayıf kuvvetle arsenik atomuna bağlı olan bu elektron, ısı enerjisi ile kolayca iyonlaşabilir ve fazladan bir iletim elektronu ortaya çıkar. Arsenik atomu, dört komşu silisyum atomu tarafından kuvvetli bir bağla bağlı olduğu için hareketsizdir.

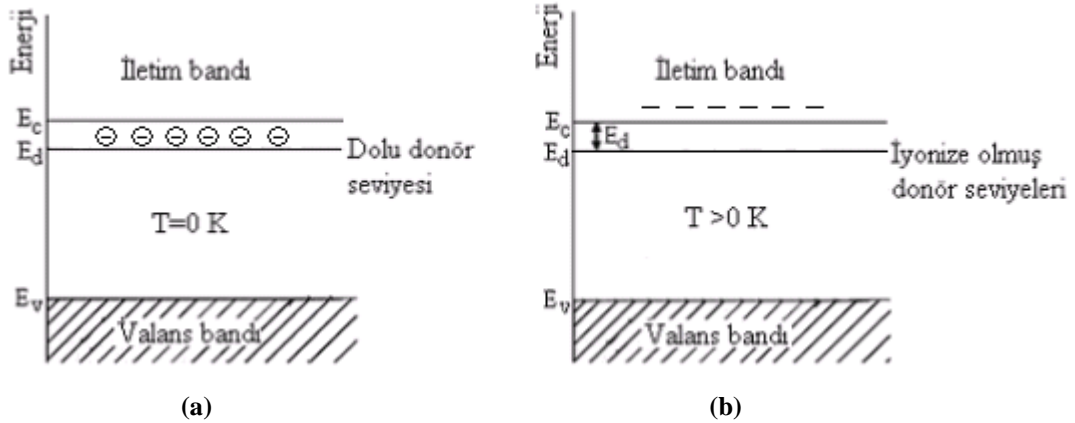
Bir yarıiletkende elektron yoğunluğu, hol yoğunluğundan fazla ise buna n-tipi yarıiletken adı verilir. Katkılanan atomlara elektron verici anlamına gelen donör ve katkılanan atomların bulunduğu enerji seviyesine de donör enerji seviyesi denir. Donör enerji seviyesini hesaplamak için Bohr atom modeli kullanılır. Hidrojen atomunun birinci iyonizasyon enerjisi $-13,6 \text{ eV}$ 'tur. Buna göre katkılı yarıiletkenin donör enerji seviyesi E_d ,

$$E_d = \left(\frac{1}{\epsilon_r}\right)^2 \left(\frac{m_e^*}{m_e}\right) E_H \quad (2.17)$$

ile verilir. Burada ϵ_r , yarıiletkenin bağlı dielektrik sabiti ve E_H ise hidrojen atomunun birinci iyonlaşma enerjisidir.

n-tipi yarıiletkenlerde donör atomunun iyonlaşması sonucu donör enerji seviyesinden iletim bandına geçen elektrona karşılık valans bandında hol oluşmaz. Donör yoğunluğuna bağlı olarak n-tipi yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu, hol yoğunluğundan büyük olduğundan, elektriksel iletkenliğe elektronların katkısı hollerden daha fazla olur. Bu sebepten n-tipi yarıiletkenlerde elektronlara çoğunluk taşıyıcıları, hollere ise azınlık taşıyıcıları adı verilir [23].

Donör enerji seviyesi, yasak enerji aralığında yer alır ve Şekil 2.7'de görüldüğü gibi iletim bandının biraz aşağısındadır.

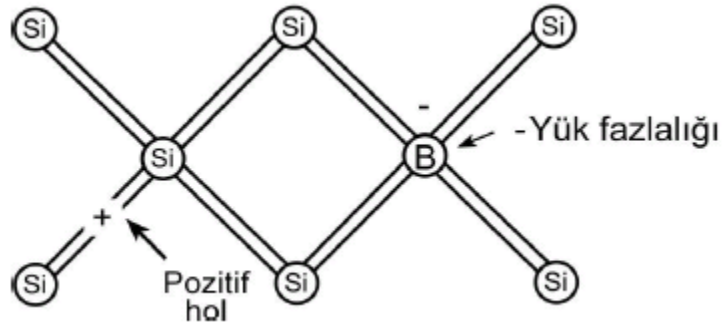


Şekil 2.7. n-tipi bir yarıiletkenin a) 0 K ve b) $T > 0 \text{ K}$ sıcaklıkta enerji bant diyagramı [24]

n-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi, katkı yoğunluğuna bağlı olarak yasak enerji aralığının orta kısmından iletim bandına doğru kayar. Bu sebepten, küçük bir enerji aracılığı ile donör atomlarının iyonlaşmasıyla birlikte donör elektronları iletim bandına çıkarlar. Bu enerji katkılanan atomun iyonlaşma enerjisi adını alır [21].

2.4.2 p-tipi yarıiletkenler

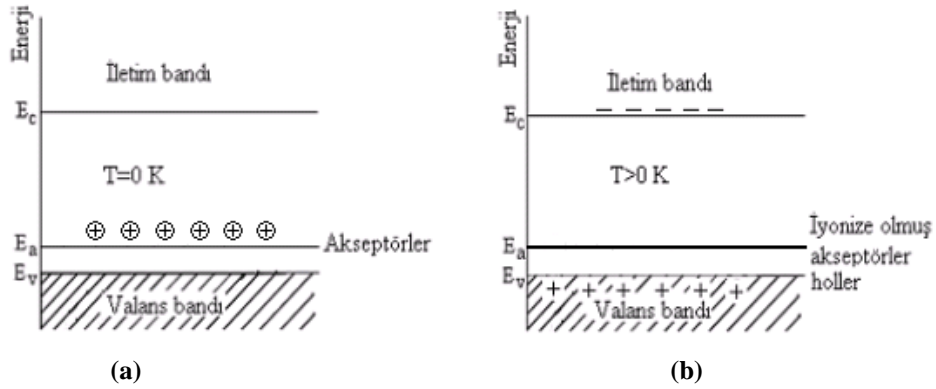
Periyodik tablonun dördüncü grubunda bulunan silisyum ve germanyum elementlerine, üçüncü grupta yer alan bor, alüminyum, galyum ve indiyum gibi bir element katkılanabilir. Silisyum kristaline bor atomu katkılanmış durumu Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Silisyum kristaline bor atomu katkılanması [17]

Bor atomunda üç adet değerlik elektronu bulunur ve silisyuma katkılандığı zaman bor ile silisyum arasındaki bağlardan biri boş kalır. Bu boşluğun yükü elektronun yükü büyüklüğünde fakat pozitif işaretlidir. Buna hol denir. Hol bir diğer bağlanmadan gelen bir elektronla doldurulabilir ve hol bu elektronun yerini alır. Bu şekilde hol kristal içerisinde hareket etmiş olur. B, Al, Ga ve In gibi üç değerliğe sahip katkı atomları, komşu atomlarla kovalent bağları oluşturabilmek için valans bandından elektron alıp geride bir boşluk bıraktıklarından dolayı alıcı anlamına gelen akseptör adını alırlar ve buldukları enerji seviyesine de akseptör enerji seviyesi denir.

Şekil 2,9'da p-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı gösterilmiştir. İletim ve valans bantları arasındaki yasak enerji aralığı içinde valans bandına yakın seviyede akseptör enerji seviyesi bulunur. Mutlak sıfır sıcaklıkta akseptör seviyesi tamamen boştur veya bu seviye hollerle doludur da denir (Şekil 2,9a). Yarıiletkenin sıcaklığı arttırıldıkça valans bandında bulunan elektronlar boş akseptör seviyelerine geçmeye başlarlar. Başka bir deyimle akseptör seviyesindeki holler valans bandına geçmeye başlarlar. Oda sıcaklığında akseptör seviyesindeki hollerin tamamı valans bandına geçerler (Şekil2,9b).



Şekil 2.9. p-tipi bir yarıiletkenin (a) 0 K ve (b) yüksek sıcaklıklarda enerji bant diyagramı [24]

Akseptör tarafından bir hol yakalanabilmesi için gerekli olan enerjiye, akseptör enerjisi denir. Bir elektron valans bandından holün bulunduğu yeri dolduracak şekilde uyarıldığı zaman, hol valans bandının en üst enerji seviyesine düşer ve serbest taşıyıcı haline gelir. Bu sebepten iyonlaşma olayı enerji diyagramında elektronun çıkışı ve holün aşağı inişi olarak temsil edilebilir [25]. Akseptör enerji seviyeleri

$$E_a = \left(\frac{1}{\epsilon_r}\right)^2 \left(\frac{m_h^*}{m_h}\right) E_H \quad (2.18)$$

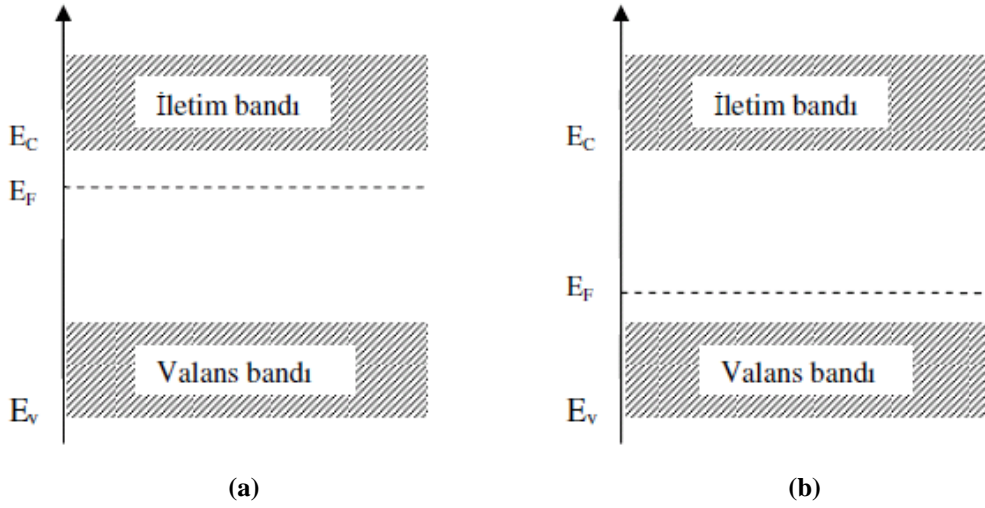
ile verilir. Burada E_a , akseptör enerji seviyesidir.

Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesinin değeri, katkı atomlarının yoğunluğuna ve cinsine göre değişir. Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi,

$$E_F = E_{Fi} + k_B T \sinh^{-1} \left(\frac{N_D - N_A}{2n_i} \right) \quad (2.19)$$

bağıntısı ile verilir. Burada; N_D donör yoğunluğu, N_A akseptör yoğunluğu ve E_{Fi} has yarıiletkenlerdeki Fermi enerji seviyesidir.

Fermi enerji seviyesi, bağıntıdaki $(N_D - N_A)$ net katkı yoğunluğuna bağlı olarak n-tipi yarıiletkenlerde iletim bandına, p-tipi yarıiletkenlerde ise valans bandına daha yakındır. Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. (a) n-tipi ve (b) p-tipi katkı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi

Katkılı yarıiletkenlerde, materyalin n-tipi ve p-tipi durumuna göre taşıyıcı yoğunlukları arasındaki bağıntı,

$$n_n p_n = n_p p_p = n_i^2(T) \quad (2.20)$$

ile verilir. Bu bağıntıya göre belirli bir sıcaklıkta, elektron ve hol yoğunluklarının çarpımı sabit, toplamları farklıdır. Taşıyıcı yoğunlukları uygun katkılama yapılarak arttırılıp azaltılabilir [21].

3. FİLMLERİN ELDE EDİLMESİ

3.1. Döndürerek Kaplama Yöntemi

Döndürerek kaplama yöntemi belirli bir hızla döndürülen, üzerine film oluşturulan, alt tabanlar üzerine mikro ölçekli pipet ile uygulanan çözelti merkezkaç kuvvetinin etkisi ile katı yüzey üzerinde yayıldıktan sonra çözelti içindeki çözücünün tavlansarak buharlaşması ile film oluşturulmasıdır. Döndürerek kaplama yönteminde kullanılan deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Döndürerek kaplama yöntemi deney düzeneği

Bir motor yardımıyla dönmesi sağlanan dönen platform üzerine yerleştirilmiş alt taban, üretim sırasında yüksek devirli dönme etkisi ile savrulmasını önlemek için vakumlanır. Bu işlem için bir vakum pompası veya düzeneği kullanılmaktadır. Bu vakum pompası alt taban üzerine vakum uygulama yolu ile altlığın savrulmadan sabit durmasını sağlamaktadır. Dijital kontrol

ünitesi, üzerine kaplama yapılacak altlığın dönme süresi, dönme hızı ve istenen dönme hızına ulaşması için gereken ivmesi gibi değerlerinin belirlenmesi, çok adımlı programların uygulanması için kullanılmaktadır. Bu değerler hareket motoruna iletilerek film üretimi gerçekleştirilmektedir. İşlem sırasında durağan halden harekete başlayan alt taban a_1 ivmesi ile t_1 sürede belirlenen hıza ulaşır, dakikadaki devir sayısı (rpm, revolutions per minute) cinsinden ifade edilen sabit dönme hızı ile t_2 süresince döner ve a_2 ivmesi ile t_3 sürede durağan hale geri döner.

Film üretimi temel olarak 3 adımda tanımlanabilir. İlk aşama kaplama yapılacak kimyasal madde ile hazırlanan çözeltinin alt taban üzerine pipet ile uygulanmasıdır. İkinci aşamada alt taban belirlenen değerlerde döndürülerek çözelti alt taban üzerine yayılır. Bu aşamada seçilen dönme hızı ve dönme süresi oluşacak olan filmin kalınlığını belirleyeceği için üretimin en önemli değişkenleridir. Dönme hızı veya dönme süresi ile film kalınlığı ters orantılı değişir [26]. Film kalınlığına dönme hızının yanı sıra çözeltinin viskozluğu ve kuruma oranı da etki etmektedir [27]. Döndürme işlemi tamamlandıktan sonra numuneler kurutulur, belirlenen sıcaklık ve sürede tavlansak üretim tamamlanmış olur.

3.2 Cam Alt Tabanların Temizlenmesi

CuO film üretiminde mikroskop cam alt tabanlar kullanılmıştır. 10×10 mm² boyutlarında kesilen cam alt tabanlar, cam yüzeylerinde bulunabilecek yağ, kir veya tozdan arındırmak için deterjanlı saf su içerisinde 30 dakika kaynatılmıştır. Kaynatılan camlar saf suda durulanmış ve basınçlı hava yardımı ile kurutulmuştur. Daha sonra oda sıcaklığında içinde aseton bulunan cam şişe içerisinde 10 dakika bekletilmiştir. Asetondan geçirilen cam alt tabanlar saf su ile durulandıktan sonra yine basınçlı hava yardımı ile kurutulmuştur. Kurutulan camlar metanolde 5 dakika bekletilmiş sonra tekrar saf su ile durulanıp hava yardımı ile kurutulmuştur. Son olarak %30'luk HCl çözeltisinde 4 saat bekletilen cam alt tabanlar saf su ile durulandıktan sonra basınçlı hava yardımı ile kurutulmuştur. Bütün bu işlemler sonunda cam alt tabanlar film üretilmek için hazır hale getirilmiştir.

3.3. CuO Filmlerin Elde Edilmesi

3.3.1. Çözelti Hazırlanması

CuO filmi elde etmede kullanılacak çözeltileri hazırlamak için bakır kaynağı olarak neme karşı düşük duyarlıklı ve uzun raf ömrü olan 1,158 g bakır asetat [$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$] kullanılmıştır. Çözelti, oda sıcaklığında bakır asetatın 22,5 ml izopropanol ve 1,3625 g dietolaminde çözünmesi ile elde edilmiştir. Bundan sonra son çözeltiliye 1,25 ml polietilen glikol [PEG, $\text{H}(\text{COH}_2\text{CH}_2)_n \text{OH}$] eklenmiştir. Çözelti 10-15 dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılmış ve sonra çözelti içinde gözle görülemeyen iri parçacıkları ayırmak için filtre kâğıdı ile süzlmüştür. 25 ml ve 0,25 M olan çözelti koyu mavi renkte olup film elde etmede kullanıma hazır hale getirilmiştir.

3.3.2. Deneyin Yapılışı

Döndürerek kaplama yöntemi ile CuO film elde edilirken iki aşamalı döndürme programı uygulanmıştır. Birinci aşamada 20 µl çözelti hazırlanan cam alt tabana damlatıldıktan sonra 100 rpm devirde 10 s döndürülmüştür. Bu işlem çözeltinin cam alt taban üzerine düzgün bir şekilde dağılmasını sağlar İkinci aşamada 3000 rpm devirde 30 s ve 60 s döndürülür ve bu işlem de cam altlığın çözelti ile kaplanmasını sağlar. Birinci aşamadan ikinci aşamaya geçiş sırasında bir zaman farkı olmadığından bu uygulama bir kaplama süreci olarak belirlenmiştir. Bir kaplama sürecinden sonra numune 250 °C sıcaklıkta ısıtılmış fırında hava ortamında 30 dakika kurutulmuştur. Bu işlem alt taban üzerine film oluşumunu sağlamaktadır ve buna bir kaplama işlemi diyoruz. Kaplama sayılarını arttırarak filmin cam alt taban üzerinde büyümesi sağlanır. Cam alt tabanların üzerine 10 kat kaplama yapılmıştır. Son kaplamadan sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat hava ortamında tavlınmıştır. Elde edilen filmin siyahımsı kahverengi olduğu görülmüştür.

Üretilen filmlerin kalınlıkları elipsometre yardımı ile 0,65 µm olarak belirlenmiştir.

4. FİLMLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

4.1 Giriş

Filmlerin yapısal özellikleri dendiğinde kristal yapıda olup olmadıkları akla gelir. Katıların yapısal özelliği onların optik, elektrik ve manyetik özelliklerini etkileyen faktörlerden biridir.

Atomların, üç boyutlu uzayda periyodik dizilimleriyle oluşturdukları yapı kristal olarak adlandırılır. Katılarda kristal yapı, o katıya ait atom, atom grupları ve moleküllerin üç boyutlu uzayda, belirli bir geometrik düzende dizilerek bir araya gelmesi sonucu oluşur [28, 29].

Alman fizikçi Von Laue, x-ışınları aracılığı ile kristal yapıların incelenmesinin mümkün olduğunu ilk olarak 1912’de göstermiştir. Yaptığı deneylerde x-ışınlarının dalga karakterini ve atomların bir kristal içerisinde periyodik düzende olduğunu ispatlamıştır. Laue’nin yaptığı bu deneyleri inceleyen İngiliz fizikçi W. L. Bragg yine 1912’de kırınım için gerekli koşulları daha basit bir matematiksel formda ifade etmiştir. İlerleyen yıllarda da bazı kristal yapıları eksiksiz olarak analiz etmiştir [28].

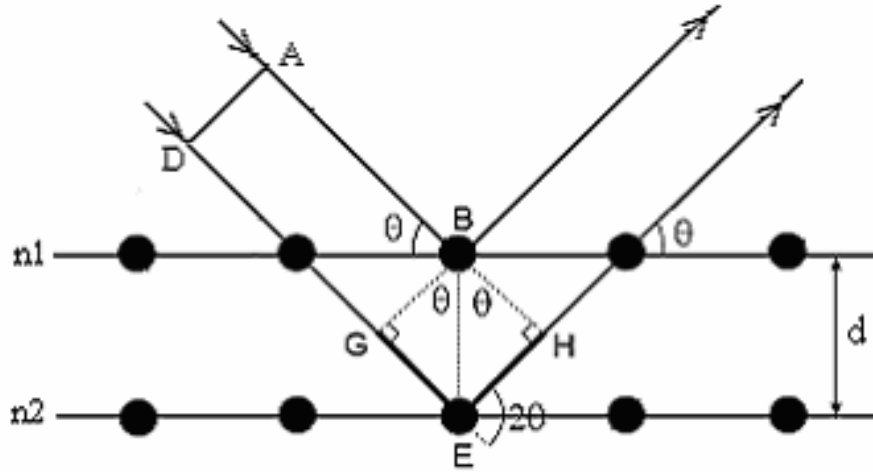
4.2 X-Işını Kırınımı

Materyallerin kristal yapıları hakkında bilgi edinmek için x-ışınlarının kırınımından yararlanılmaktadır. X-ışının enerjisi, dalgaboyu ile ters orantılıdır ve $E = hc/\lambda$ ’dır. Dalgaboyu 0,1–100 Å arasındadır. Kristaller üzerinde çalışılırken 0,2–2,5 Å arasındaki dalgaboyuna sahip x-ışınları kullanılır. Bu çalışmada kullanılan x-ışınları tek dalgaboylu olan CuK_α (1,541 Å) kullanılmıştır.

Bir kristalde x-ışınlarının kırınıma uğraması için belirli geometrik şartların gerçekleşmesi gerekir. Kristale x-ışını gönderildiğinde, kristaldeki atomlara ait elektronlar aynı frekansta titreşmeye zorlanırlar. Bu şekilde kristaldeki elektronlar, her yöne aynı dalgaboyunda ışın saçarlar. Kristalde bulunan her atomun bütün elektronları x-ışınlarının yayınlanmasına katkıda bulunurlar ve küresel dalga şeklinde aynı faz ve aynı frekansta ışına yaparlar. Işıma yapan

atomlar birer kaynak gibi davranır. Bu ışınlar bazı yönlerde birbirlerini kuvvetlendirir, bazı yönlerde ise zayıflatırlar. Yani ışınlar yapıcı ve yıkıcı girişim yapmış olurlar.

Kristalde kırınım olayı W. L. Bragg tarafından açıklanmıştır. Kırınım olayı Şekil 4.1'de görüldüğü gibi kristaldeki atomların oluşturduğu düzlemlerden yansıyan dalgaların girişimleri sonucu meydana gelir.



Şekil 4.1. X-ışınlarının kristaller tarafından kırınımına uğraması

Yansıma düzlemleri, kristalin yüzeyini oluşturan düzlemlerden tamamen farklı olabilir. Tek dalgaboylu x-ışınlarının, kristalin paralel düzlemlerine θ açısı yaparak geldiğinde kırılmadığı kabul edilirse, bu ışınlar düzlemlerden θ açısı yaparak yansıyacaktır. Aynı zamanda bu ışınlar yol farkından dolayı birbirlerini yapıcı veya yıkıcı şekilde etkilerler. Eğer girişim yapıcı ise A ve D ışınları arasındaki yol farkı, dalgaboyunun tam katlarına eşit olmalıdır.

$$\text{Yol Farkı} = \overline{GE} + \overline{EH} = d \sin \theta + d \sin \theta$$

İle verilir. Buradan

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (4.1)$$

yol farkının dalgaboyunun tam katlarına eşit olması gerektiği görülür. Bu eşitlik Bragg yasası olarak adlandırılır. Burada, d kristal düzlemleri arası uzaklık, n bir tam sayı olmak üzere yansıma mertebesi, λ ise gelen ışının dalgaboyudur.

Üç farklı yöntemle x-ışınları kırınımından faydalanarak veri elde edilebilir. Bunlar, Laue yöntemi, döner kristal yöntemi ve toz yöntemidir.

Laue yönteminde kristal sabit tutulur. Değişen dalgalarda x-ışınları materyal üzerine gönderilerek kırınım koşulları sağlanır. Beyaz ışınım söz konusu değildir, x-ışınları demeti heterojen olarak kullanılır. Yöntem iki farklı şekilde uygulanabilir. Birinci yöntemde x-ışınları kristal üzerine gönderilir ve kristal tarafından kırınıma uğrayan ışınlar kristali geçerek film plağı üzerine düşer, diğer yöntemde ise film plağının ortasına bir delik açılır ve x-ışınları kaynağı ile kristal arasına konur. Kırınıma uğrayan ışınlar film plağı üzerine düşer. Sonuç olarak kristalde bulunan her bir düzlem takımı için Bragg yasasını sağlayacak bir beyaz ışınım dalgalı boyu olacaktır. Film plakalarından, kristalin yönelmesi ve içerisindeki kusurları gibi özellikler Laue desenleri yardımı ile bulunabilir. Numune olarak yaklaşık 1 mm boyutlarında tek kristal kullanılır.

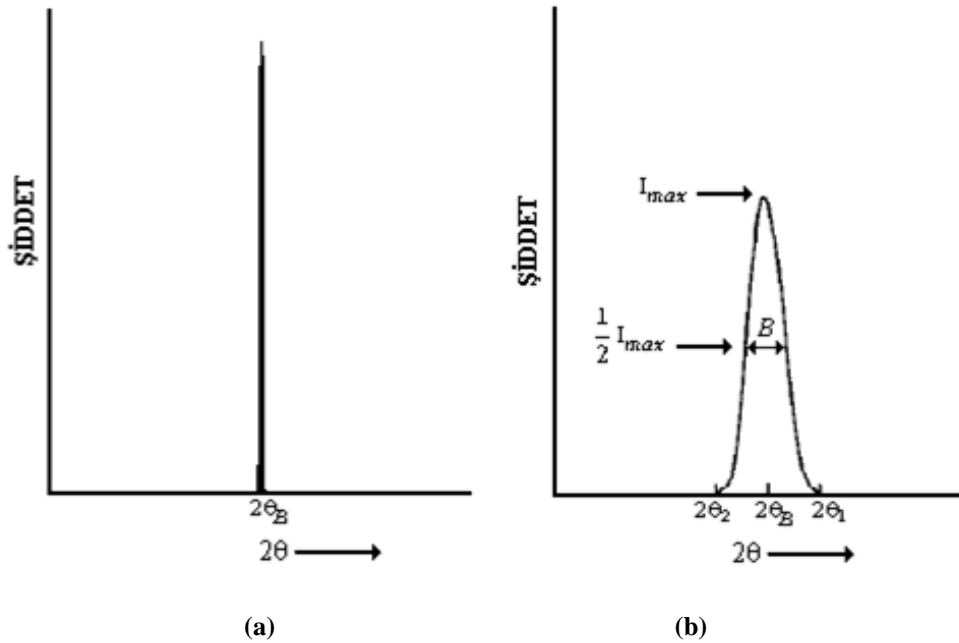
Döner kristal yönteminde monokromatik x-ışınları kullanılır. Kristal, belirlenmiş bir eksen etrafında döndürülerek Bragg yasasını sağlayan açılarla kırınım oluşması sağlanır. Bir adet kristal monokromatik x-ışını demetine dik olacak şekilde yerleştirilir ve silindirik bir film kristalin etrafına sarılır. Kristal, seçilen eksenin etrafında döndürülürken filmin eksenini ile kristalin eksenini çakışmalıdır. Kırınımın gerçekleşmesi sonucu film üzerinde düzenli lekeler meydana gelir. Bu yöntem en büyük avantajı ortaya çıkan yansıma, kristalin ayrı düzlemlerine ait yansımalarının kolaylıkla ayırt edilebilmesidir. Dezavantajı ise kristal eksenlerinden birinin bilinmesi gerektiğidir. Kristal yapısı bilinmeyen bir materyal üzerinde çalışılıyorsa, eksenlerden birini belirlemek uzun zaman alabilir.

Toz yönteminde, incelenecek kristal çok ince toz haline getirilip monokromatik x-ışınları içerisine yerleştirilir. Her toz parçası gelen ışın demetine göre keyfi bir şekilde yönelmiş küçük bir kristaldir. Bu durumda Bragg yasasını sağlayan örgü düzlemlerinde kırınım meydana gelir. Toz numune, merkezinden geçen bir eksen etrafında dönebilen silindirik bir cam tüp içine konur. Kırınımın kaydedileceği film ise tüpün dönme eksenini ile aynı eksenli silindirin iç yüzeyine yerleştirilir. Çok fazla sayıda toz kristal tanesi tüpte rastgele yöneldiği için Bragg yasasını sağlayacak şekilde yönelmiş yeterli sayıda kristal tanesi bulunur. Cam tüpün içindeki numune tüple beraber döndürülürse, her yeni durum için farklı kristal taneleri kırınım konumuna geçer. Toz numunenin tamamı ele alınırsa, bir

eksen etrafında değil, bütün mümkün eksenler etrafında döndürülen tek bir kristale denktir. Kristal yapı önceden biliniyorsa, örgü sabitleri büyük bir duyarlılıkla belirlenebilir [25, 30]. Bu yöntemin en büyük avantajı tek kristal kullanılmadan kırınım desenlerinin bulunmasını sağlar.

4.3 CuO Filmlerin X-ışını Kırınım Desenleri

CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri dalga boyu $\lambda=1,541 \text{ \AA}$ olan CuK_α ışını kullanılarak 40 kV'ta, 30 mA'de 0,01 adım/saniye çalışan Bruker D8 Advance model x-ışını kırınım cihazı ile elde edilmiştir. Filmlerin kırınım desenleri $20^\circ < 2\theta < 70^\circ$ açı aralıklarında elde edilmiştir. Bu desenlerin incelenmesi ile filmlerin kristal yapıları hakkında bilgi edinilebilir.



Şekil 4.2. X-ışını kırınım deseni piklerin şematik gösterimi (a) kristal yapı (b) amorf yapı

Kırınım desenlerinde bulunan pik şiddetlerinin büyük, yarı genişliklerinin ise küçük olması kristallenmenin iyi olduğu anlamına gelir. Kristallenmenin iyi olması malzemenin tek kristal özellikte olması veya polikristal yapıda ise kristal taneciklerinin büyük olması anlamına gelir. Bu Debye-Scherrer denklemi

kullanarak tanecik boyutunu hesaplanmasıyla söylenebilir. Debye-Scherrer denklemi,

$$D = \frac{0,9\lambda}{B\cos\theta} \quad (4.2)$$

ile ifade edilir.

Pik şiddetlerinin küçük ve geniş olması materyalin amorf yapıya daha yakın olması anlamına gelir. X-ışını kırınım desenlerindeki pik çeşitleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir [28].

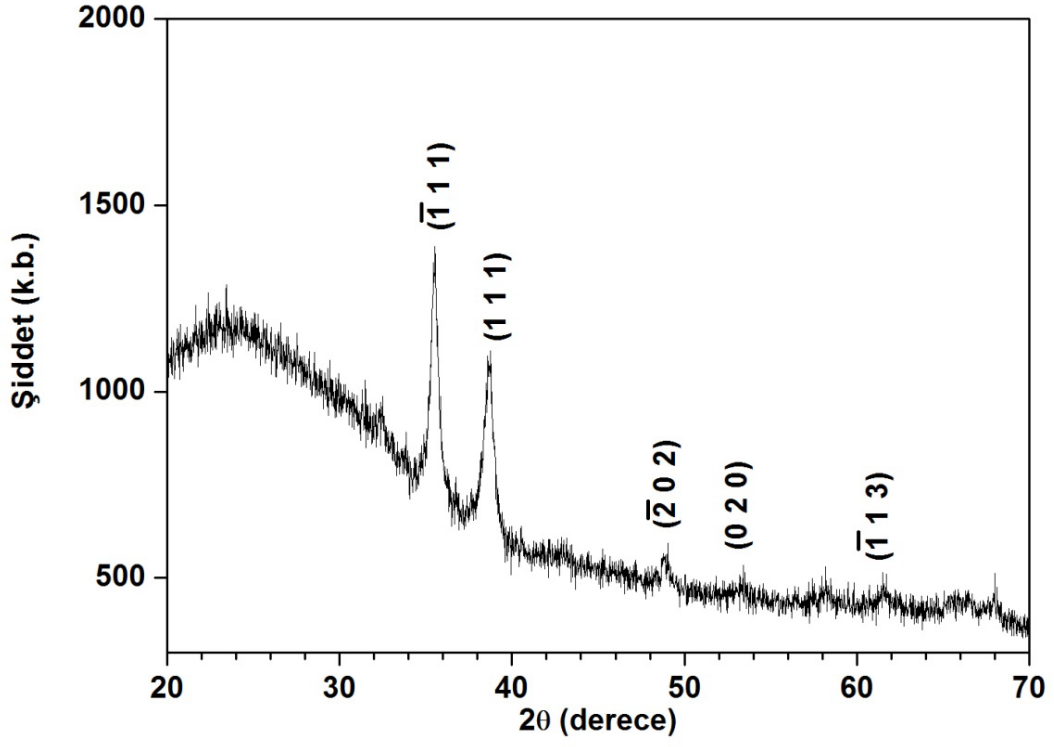
Bu çalışmada farklı tavlama sıcaklıklarında elde edilen CuO filmlerinin x-ışını kırınım desenlerinde piklerin üzerinde ilgili düzlemlerin Miller indisleri gösterilmiştir.

Şekil 4.3’te 3000 rpm’de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra kaplanan ve 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansak elde edilen CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri gösterilmektedir. Kırınım desenleri incelenerek elde edilen CuO filmlerin taban merkezli kübik yapıda olduğu saptanmıştır (PDF01-08-1916).

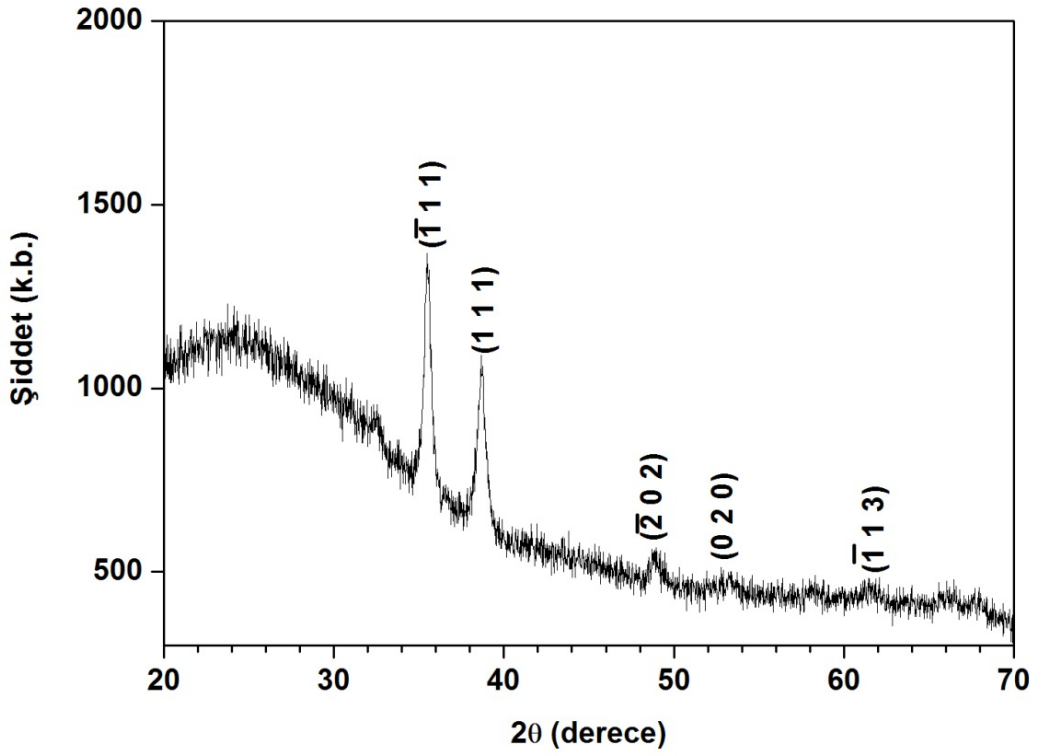
Çizelge 4.1 3000 rpm’de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansak elde edilen CuO filminin döndürme süresi, açısı, yarı pik genişliği ve tanecik boyutu

Düzlem	Döndürme süresi (s)	Açı (derece)	Yarı pik genişliği (derece)	Tanecik boyutu (nm)
$(\bar{1}11)$	30	17,77	0,276	61
	60	17,73	0,217	84
(111)	30	19,38	0,266	35
	60	19,33	0,250	36

Çizelge 4.1 incelendiğinde, 60 s süre ile döndürülerek kaplanan CuO filmlerinin 450°C sıcaklıkta tavlansak yapılarının 30 s döndürme süresiyle kaplanan filmler yarı pik genişliklerine göre daha iyi kristallendikleri söylenebilir.



(a)



(b)

Şekil 4.3. 3000 rpm'de (a) 30 saniye, (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri

Şekil 4.4'te 3000 rpm'de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri verilmektedir. Kırınım desenleri incelenerek elde edilen CuO filmlerin taban merkezli kübik yapıda olduğu saptanmıştır. Kırınım desenlerindeki en şiddetli pik ($\bar{1}11$) yönünde ve $2\theta = 35,4^\circ$ 'de olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2. 3000 rpm'de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filminin, döndürme süresi, açısı, yarı pik genişliği ve tanecik boyutu

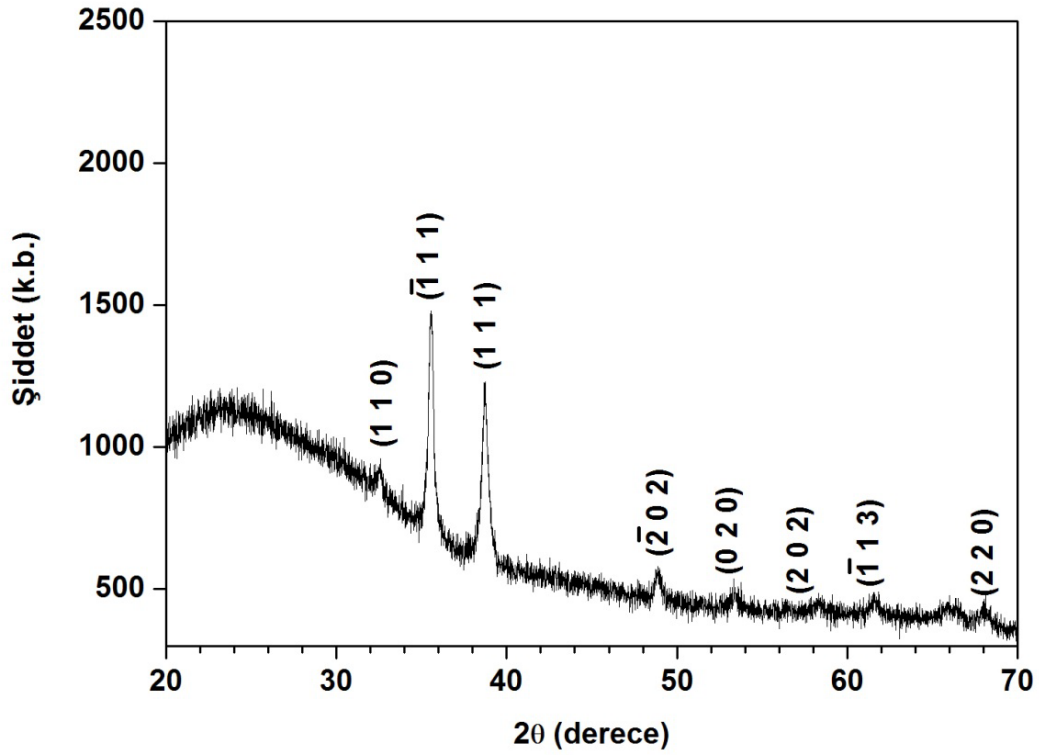
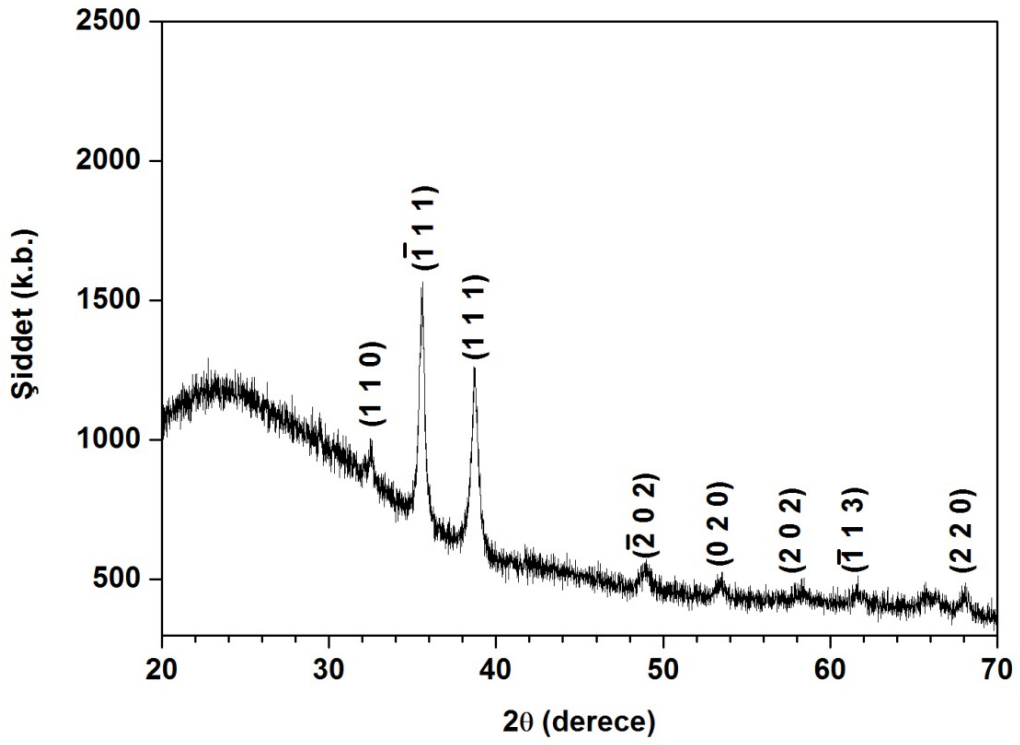
Düzlem	Döndürme süresi (s)	Açı (derece)	Yarı pik genişliği (derece)	Tanecik boyutu (nm)
$(\bar{1}11)$	30	17,80	0,200	80
	60	17,80	0,220	73
(111)	30	19,35	0,200	45
	60	19,37	0,197	46

Çizelge 4.2 incelendiğinde, 30 ile 60 s süre ile döndürülerek kaplanan CuO filmlerinin 500°C sıcaklıkta tavlanaarak kristal yapılarında bir farklılık meydana gelmediği söylenebilir.

Şekil 4.5'te 3000 rpm'de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri verilmektedir. Kırınım desenleri incelenerek elde edilen CuO filmlerin taban merkezli kübik yapıda olduğu saptanmıştır. Kırınım desenlerindeki en şiddetli pik ($\bar{1}11$) yönünde ve $2\theta = 35,4^\circ$ 'de olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3. 3000 rpm'de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filminin döndürme süresi, açısı, yarı pik genişliği ve tanecik boyutu.

Düzlem	Döndürme süresi (s)	Açı (derece)	Yarı pik genişliği (derece)	Tanecik boyutu (nm)
$(\bar{1}11)$	30	17,78	0,150	110
	60	17,78	0,166	100
(111)	30	19,35	0,172	53
	60	19,33	0,150	60



Şekil 4.4. 3000 rpm'de (a) 30 saniye, (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri

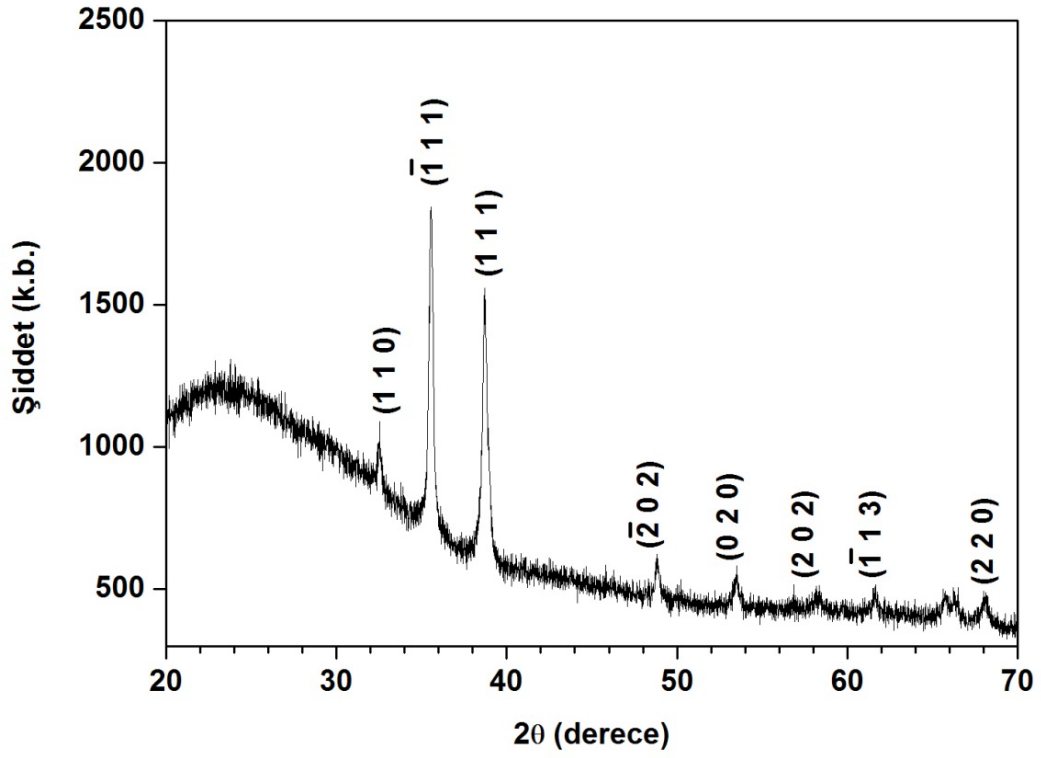
Çizelge 4.3 incelendiğinde, 30 s süre döndürülerek kaplanan ve 550 °C sıcaklıkta tavlanan CuO filminin kırınım deseninde ($\bar{1}11$) düzlemine ait tanecik boyutunun oldukça büyüdüğü görülmektedir. Diğer taraftan (111) düzlemine ait tanecik büyüklüğünün de diğer tavlama sıcaklıklarına göre daha da büyüdüğü söylenebilir.

Şekil 4.6'da 3000 rpm'de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri verilmektedir. Kırınım desenleri incelenerek elde edilen CuO filmlerin taban merkezli kübik yapıda olduğu saptanmıştır. Kırınım desenlerindeki en şiddetli pik ($\bar{1}11$) yönünde ve $2\theta = 35,4^\circ$ dedir.

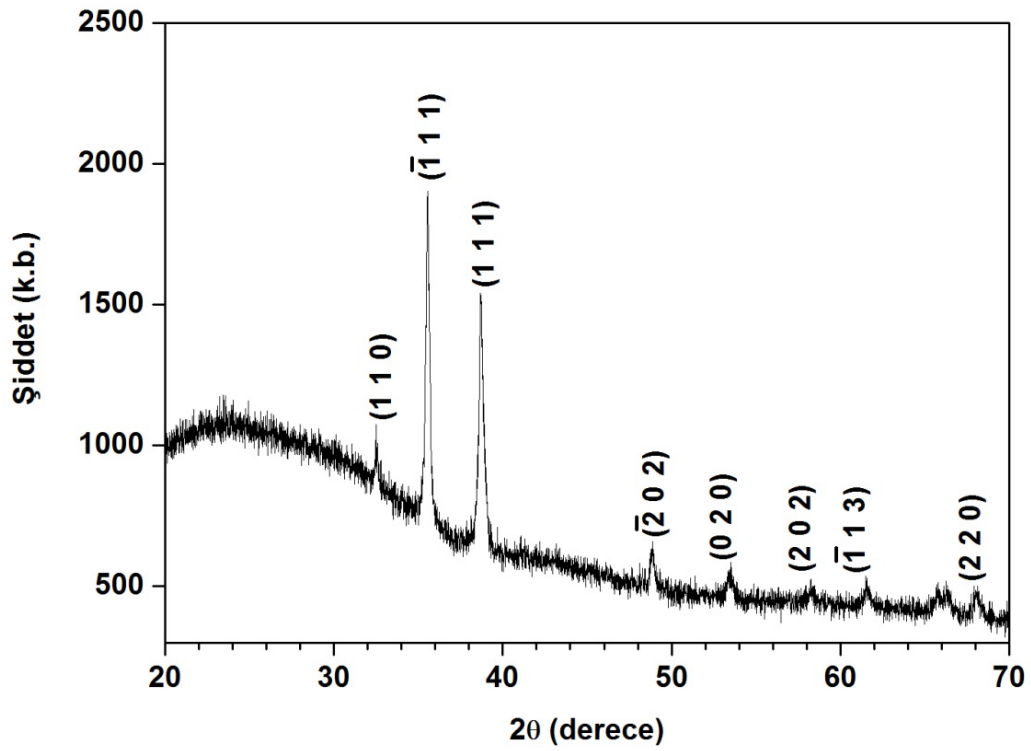
Çizelge 4.4. 3000 rpm'de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filminin, döndürme süresi, açısı, yarı pik genişliği ve tanecik boyutu

Düzlem	Döndürme süresi (s)	Açı (derece)	Yarı pik genişliği (derece)	Tanecik boyutu (nm)
$\bar{1}11$	30	17,78	0,149	111
	60	17,78	0,138	120
(111)	30	19,37	0,110	83
	60	19,37	0,143	64

Çizelge 4.4 incelendiğinde, 30 s ve 60 s süre döndürülerek kaplanan ve 600 °C sıcaklıkta tavlanan CuO filmde kristallenmenin iyi yönde arttığı söylenebilir. Bunu tanecik ($\bar{1}11$) ve (111) düzlemleri için artmasından anlayabiliriz.

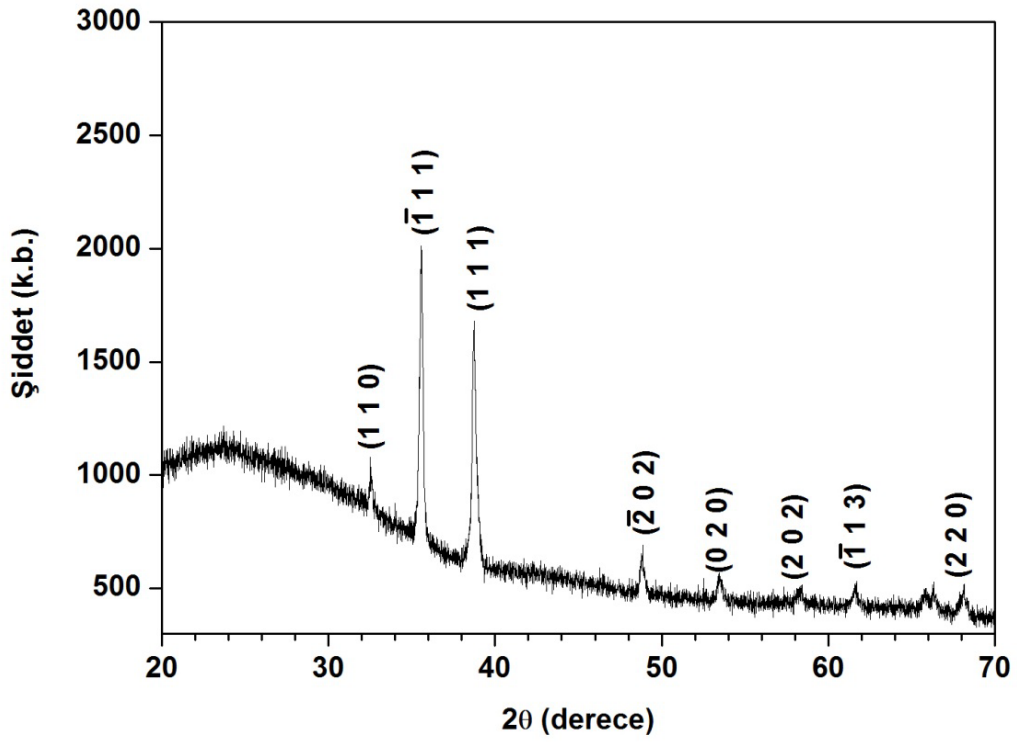


(a)

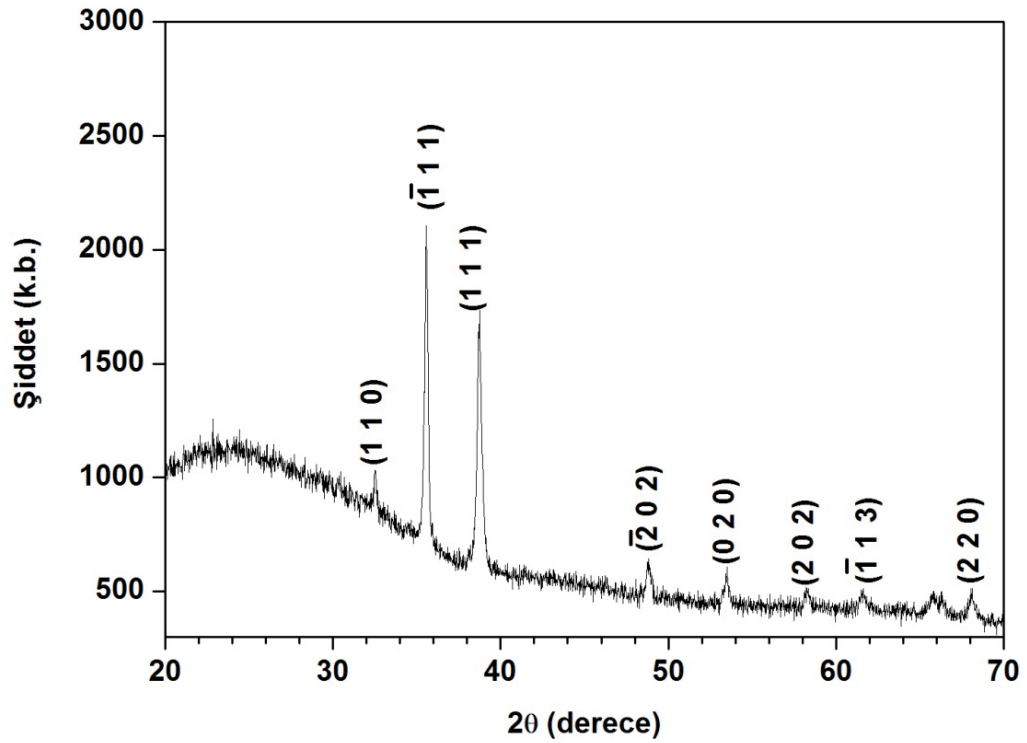


(b)

Şekil 4.5. 3000 rpm'de (a) 30 saniye ve (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri



(a)



(b)

Şekil 4.6. 3000 rpm'de (a) 30 saniye ve (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin x-ışını kırınım desenleri

Döndürerek kaplama yöntemiyle CuO filmi elde etmek için 3000 rpm döndürme hızı, 30 s ve 60 s döndürme süreleri ve 600 °C tavlama sıcaklığı oldukça elverişli değerler olduğu söylenebilir. Diğer yandan kırınım desenleri incelendiğinde filmlerdeki kristallenmenin tek bir düzlem boyunca değil de her iki düzlem boyunca $\{(\bar{1}11)$ ve $(111)\}$ ve birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Başka bir deyimle filmlerdeki kristallenmenin rastgele (randomly) yönelimlere sahip olduğu söylenebilir.

5.ABSORPSİYON

5.1. Giriş

Yarıiletkenlerin bant yapısını belirlemenin yöntemlerinden biri de absorpsiyon spektrumunu elde etmektir. Yarıiletken üzerine ışık düşürüldüğünde ışık materyal tarafından absorplanır. Absorpsiyon sürecinde, enerjisi bilinen bir foton materyaldeki bir elektronla etkileşime girer ve elektronu düşük bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine çıkarır. Bunun sonucunda, absorpsiyon spektrumunda enerji seviyeleri arasındaki bütün mümkün olan geçişler, yarıiletkenin bant tipi ve yasak enerji aralığı hakkında bilgi verebilir. Enerji seviyeleri arasındaki geçişler şunlardır;

- Banttın bantta
- Eksitonlar
- Altbantlar arasındaki geçişler
- İmpüriteler ile bantlar arasındaki geçişler
- Serbest taşıyıcılar aracılığı ile bant içine geçişler
- Örgüdeki durumların ve impüritelerin titreşimlerinin neden olduğu rezonanslar

Yarıiletken üzerine bir foton düşürüldüğünde foton ilerleme doğrultusu boyunca aşağıdaki ifadeye uygun olarak absorplanır:

$$\alpha = \frac{1}{I(h\nu)} \frac{d[I(h\nu)]}{dx} \quad (5.1)$$

Burada $I(h\nu)$ yarıiletkenin üzerine düşen ışığın şiddeti, α yarıiletken malzemenin absorpsiyon sabitidir [19].

5.2 Temel Absorpsiyon

Temel absorpsiyon, valans bandındaki bir elektronun uyarılarak iletim bandına geçmesi olarak tanımlanabilir [19]. Valans bandındaki bir elektronun yarıiletken üzerine düşürülen bir foton yardımıyla uyarılarak iletim bandına geçirilmesi durumunda, yarıiletken üzerine düşen fotonun enerjisi en az

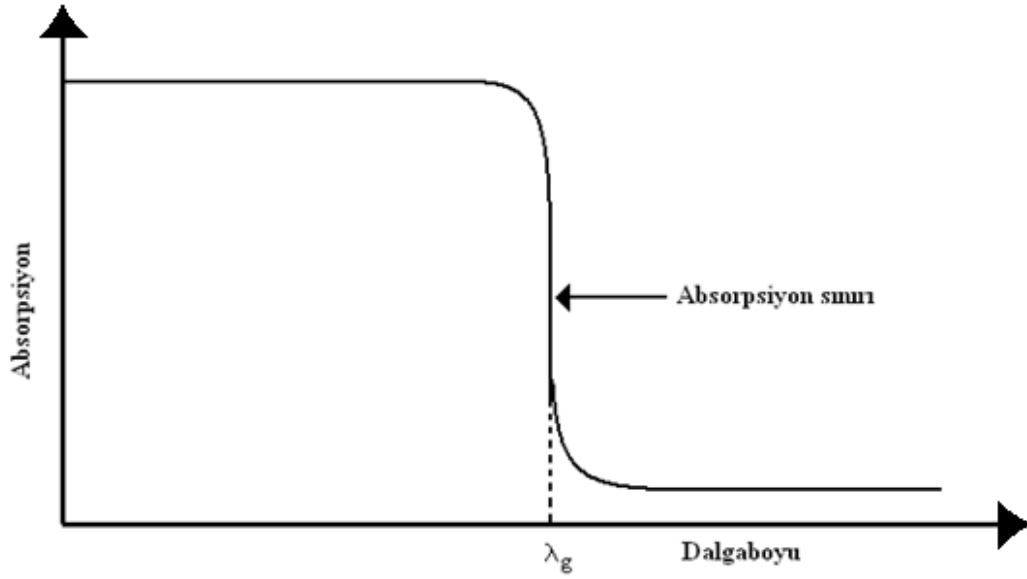
yarıiletkenin yasak enerji aralığına (E_g) eşit veya yasak enerji aralığından daha büyük olmalıdır. Bu durumda,

$$h\nu \geq E_g \quad (5.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada h Planck sabiti ve ν gelen fotonun frekansıdır. Bu durumda dalgaboyu ise λ_g ,

$$\lambda_g \leq hc / E_g \quad (5.3)$$

dir. Burada c ışığın boşluktaki yayılma hızıdır.



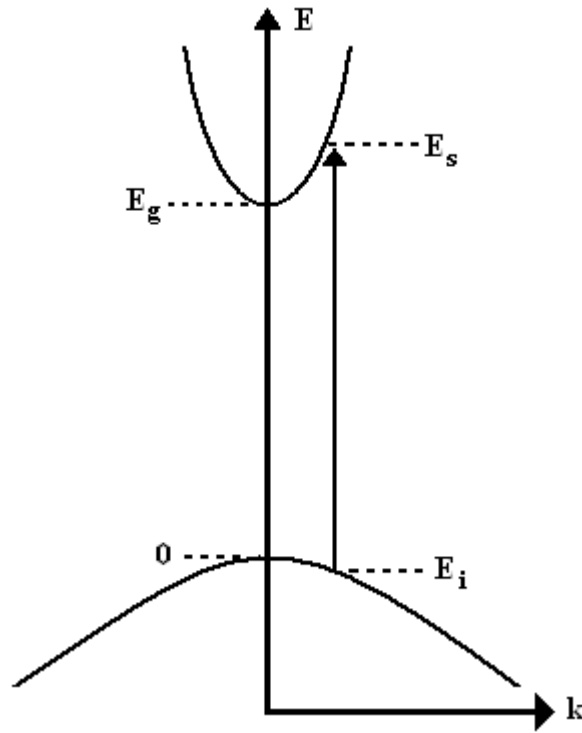
Şekil 5.1. Yarıiletkenlerde Temel Absorpsiyon Spektrumu

Şekil 5.1'de bir yarıiletkenin temel absorpsiyon spektrumunun şematik görünümü verilmiştir. Burada absorpsiyonun artan dalgaboyuna göre azaldığı görülmektedir. Bu durumda yarıiletken üzerine düşen küçük enerjili fotonların yarıiletkenin içinden geçtiği veya yüzeyinden yansıdığı düşünülebilir. Şekil 5.1'deki absorpsiyon spektrumunda λ_g dalgaboyu değerinde gözlenen hayali doğrusal çizgi temel absorpsiyon sınırı olarak tanımlanır. Bu dalgaboyunda meydana gelen olay, valans bandındaki bir elektronun yasak enerji aralığı kadar veya daha büyük bir enerjiyi alarak iletim bandına geçmesidir [19].

Yeterli enerjiye sahip olan elektronlar valans bandından iletim bandına iki değişik yolla geçebilir; bunlar direkt ve indirekt geçişlerdir.

5.2.1 Direkt Bant Geçişi

Valans bandından iletim bandına geçen elektronun durumunu göz önünde bulunduralım (Şekil 5.2). Valans bandının maksimum enerji değeri ile iletim bandının minimum değerinin aynı k değerine sahip olduğuna dikkat edilmelidir. Valans bandındaki bir elektron yarıiletken üzerine düşen fotondan aldığı $h\nu$ enerjisi ile E_i enerji değerinden, valans bandındaki E_s enerji değerine geçmektedir.



Şekil 5.2. Direkt Bant Geçişi

Bu durumda enerjinin korunumu,

$$E_s = h\nu - |E_i| \quad (5.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradaki $E_s - E_g$ enerjisi iletim bandındaki serbest bir elektronun enerjisine eşittir ve

$$E_s - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (5.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada m_e^* elektronun etkin kütlesi, k yarıiletken üzerine düşen fotonun dalga vektörüdür. E_i enerjisi ise valans bandındaki bir holün enerjisidir ve

$$E_i = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (5.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada m_h^* holün etkin kütlesidir. Yukarıdaki (5.4) ve (5.6) denklemleri kullanılarak,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (5.7)$$

veya

$$\alpha h\nu = A^* (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (5.8)$$

$$A^* \approx \frac{q^2 (2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*})^{3/2}}{nch^2 m_e^*} \quad (5.9)$$

$$\alpha h\nu = 2 \times 10^4 (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (5.10)$$

Bu geçişler izinli direkt geçişler olarak tanımlanır.

$$A' \approx \frac{4}{3} \frac{q^2 (\frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*})^{5/2}}{nch^2 m_e^* m_h^* h\nu} \quad (5.11)$$

$$\alpha h\nu = 1.3 \times 10^4 \frac{(h\nu - E_g)^{3/2}}{h\nu} \quad (5.12)$$

Bu geçişler izinli olmayan direkt geçişler olarak adlandırılır.

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

Burada $n = 1/2$ için izinli direkt geçişler $n = 3/2$ için izinli olmayan direkt geçişler olarak ele alınır [19, 31].

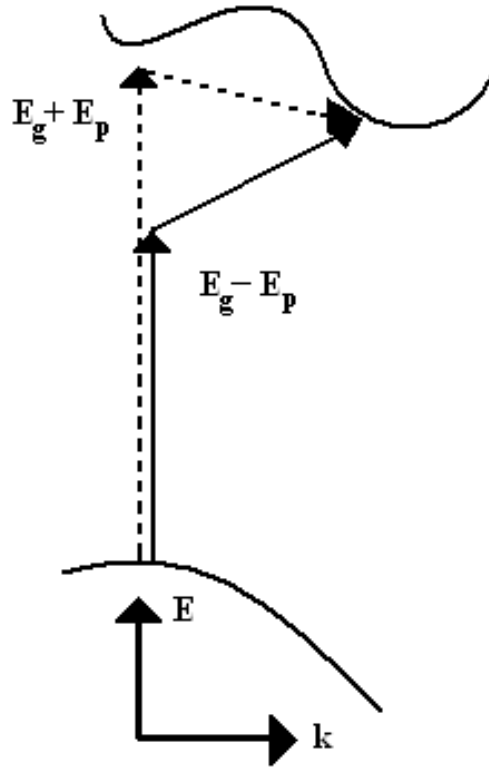
5.2.2. İndirekt Bant Geçişi

Bir valans bandından iletim bandına elektron geçişi için enerji ve momentum değişimine ihtiyaç duyuluyorsa iki basamaklı bir süreç söz konusudur. Bu süreçlerden birinde fonon absorplanırken diğerinde fonon salınır. Bir elektron valans bandından iletim bandına geçerken yeterli enerjiye sahip olmasına rağmen iletim bandına hâlâ geçemeyebilir. Bunun nedeni valans bandının maksimum enerji değeri ile iletim bandının minimum değerinin aynı k düzleminde

bulunmamasından kaynaklanır. Bu durumda elektron banttandır. Bu durumda elektron banttan banda geçiş yaparken momentumun korunumuna ihtiyaç duyar. Bu değişimi de fonon absorplayarak ya da yayarak sağlayabilir (Şekil 5.3). Fonon, kuantumlu bir örgü titreşimi olarak tanımlanır. Geniş spektrumlu fononlar bulunmasına rağmen sadece gerekli momentum değişimine sahip olanlar kullanılır. Bunlar enine ve boyuna akustik fononlardır. Bu fononların her biri karakteristik enerjiye sahiptir (E_p). E_i 'den E_s 'e geçişi tamamlamak için bir fonon salınır ya da absorplanır. Bu süreçler şöyle verilebilir [18],

$$h\nu_e = E_s - E_i + E_p \quad (5.14)$$

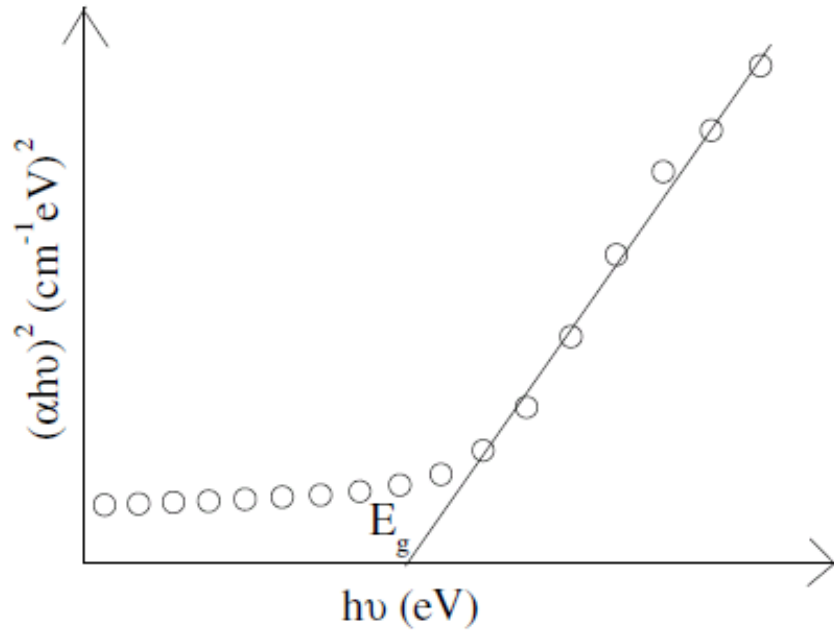
$$h\nu_a = E_s - E_i - E_p \quad (5.15)$$



Şekil 5.3. İndirekt Bant Geçiş

5.3. Optik Yöntem ile Yarıiletkenlerin Yasak Enerji Aralıklarının Belirlenmesi

CuO filmlerin yasak enerji aralığı belirlenirken optik absorpsiyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarının belirlenmesinin yanı sıra bant yapısının da belirlenmesinde de kullanılabilir. Optik absorpsiyon yönteminde yasak enerji aralığını belirlemek için $(\alpha hv)^{1/n} \sim hv$ değişimi grafiği çizilir (Şekil 5.4). Değişimin lineer olduğu kısma çizilen doğrunun hv eksenini $(\alpha hv)^{1/n} = 0$ 'da kestiği noktanın değeri materyalin yasak enerji aralığını verir.



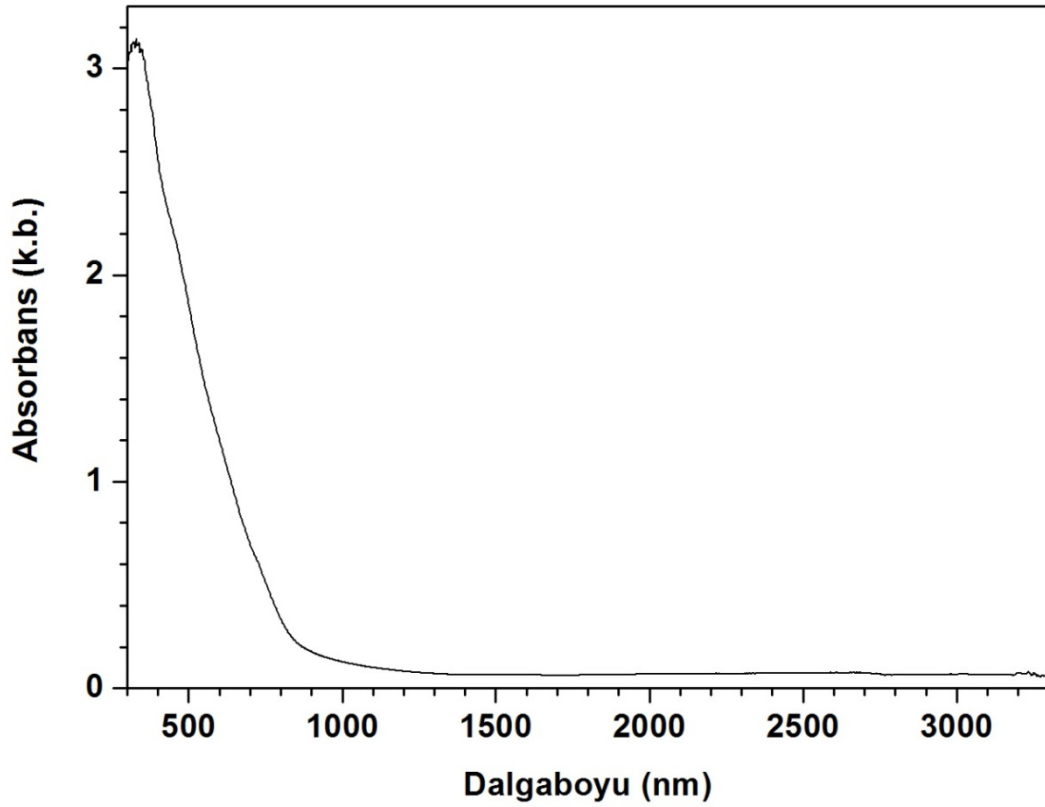
Şekil 5.4. Bir yarıiletkende absorpsiyon katsayısının, fotonun enerjisine göre değişiminden yasak enerji aralığının belirlenmesi

5.4 CuO Filmin Temel Absorpsiyon Spektrumları ve Yasak Enerji Aralıklarının Belirlenmesi

Döndürerek kaplama yöntemi ile elde edilen CuO filmlerin absorpsiyon ve saydamlık spektrumları, dalgaboyu aralığı 190–3300 nm arasında ölçüm

yapabilen SolidSpec-3700 DUV UV-VIS-NIR SPECTROPHOTOMETER cihazı kullanılarak elde edilmiştir.

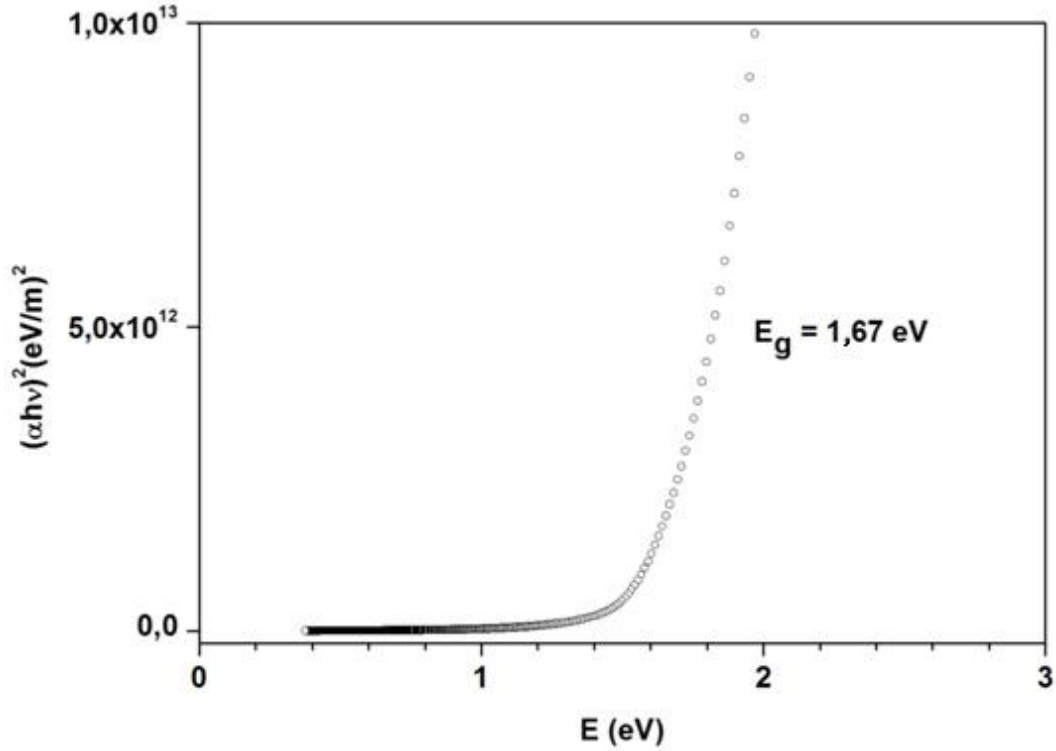
Şekil 5.5'te 3000 rpm'de 30 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlانarak elde edilen CuO filminin temel absorpsiyon spektrumu verilmektedir. 1000 nm'den küçük dalgalıboylarına gidildikçe absorpsiyon hızlı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Absorpsiyon hızlı bir şekilde arttığı bu bölge temel absorpsiyon bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede elektronlar fotonlardan aldığı enerjiyle yasak enerji aralığını geçerek valans bandından, iletim bandına ulaşırlar. 1000 nm'den daha büyük dalgalıboylarında ise absorpsiyon değeri düşük olduğu gözlenmiştir. Bu bölgedeki enerjiye sahip fotonların materyalle etkileşmeden geçtikleri veya yansıtıldıkları söylenebilir.



Şekil 5.5. 3000 rpm'de 30 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin temel absorpsiyon spektrumu

Elde edilen temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak $n = 1/2$, $3/2$, 2 ve 3 değeri için $(ahv)^{1/n} \sim hv$ değişimi grafiği çizilmiştir. Origin 7.5

programı kullanılarak verilerin $n= 1/2$ değeri için $(\alpha hv)^{1/n} \sim hv$ denkleminde uyumlu olduğu belirlenmiştir. Buna göre $n=1/2$ değeri için geçişler direkt geçişler olarak tanımlanır. CuO yarıiletken filminin bant yapısının direkt geçişli olduğu ifade edilir. Şekil 5.6'da 3000 rpm'de 30 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filmlerinde $(\alpha hv)^2$ 'nin, foton enerjisi hv 'ye göre değişimi görülmektedir. Grafiklerin lineer kısmına Origin 7.5 programı kullanılarak eğri uyumu sağlanarak, doğrunun hv eksenini kestiği noktadan yasak enerji aralığı 30 saniye döndürme süresi için 1,67 eV olarak hesaplanmıştır.

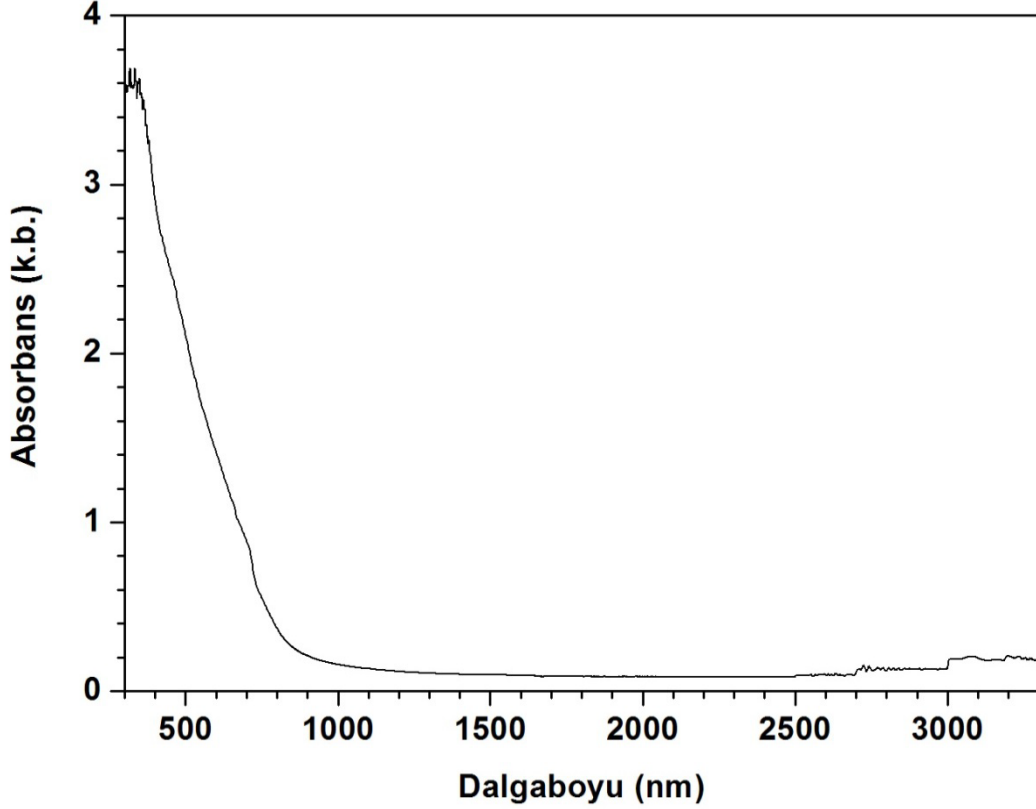


(a)

Şekil 5.6. 3000 rpm'de 30 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filminin $(\alpha hv)^2$ 'nin, foton enerjisi hv 'ye göre değişimi

Şekil 5.7'de 3000 rpm'de 60 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filminin temel absorpsiyon spektrumu verilmektedir. 1000 nm'den küçük dalgalınlara gidildikçe absorpsiyon hızı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Absorpsiyon hızı bir şekilde arttığı bu bölge temel absorpsiyon bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede elektronlar fotonlardan aldığı

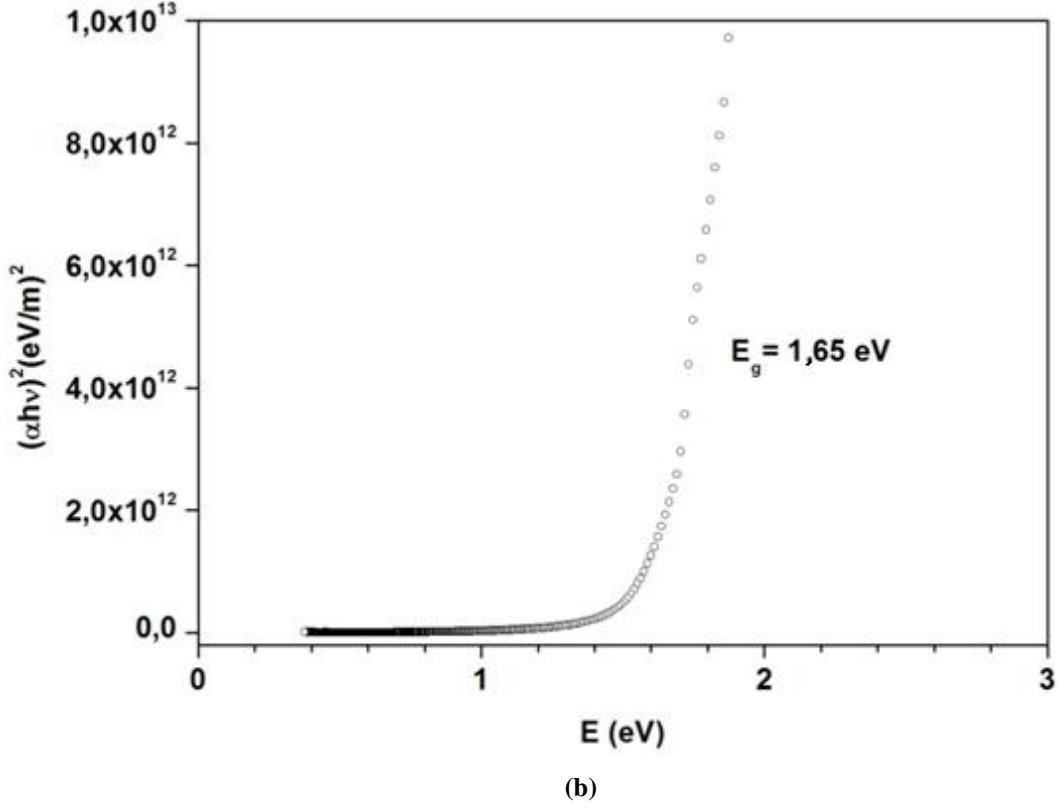
enerjiyle yasak enerji aralığını geçerek valans bandından, iletim bandına ulaşırlar. 1000 nm'den daha büyük dalgalıboylarında ise absorpsiyon değęerlerinin oldukça küçük değęerleri aldığı gözlenmiştir. Bu bölgedeki enerjiye sahip fotonların materyalle etkileşmeden geçtikleri veya yansıdıkları söylenebilir.



şekil 5.7. 3000 rpm'de 60 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin temel absorpsiyon spektrumu

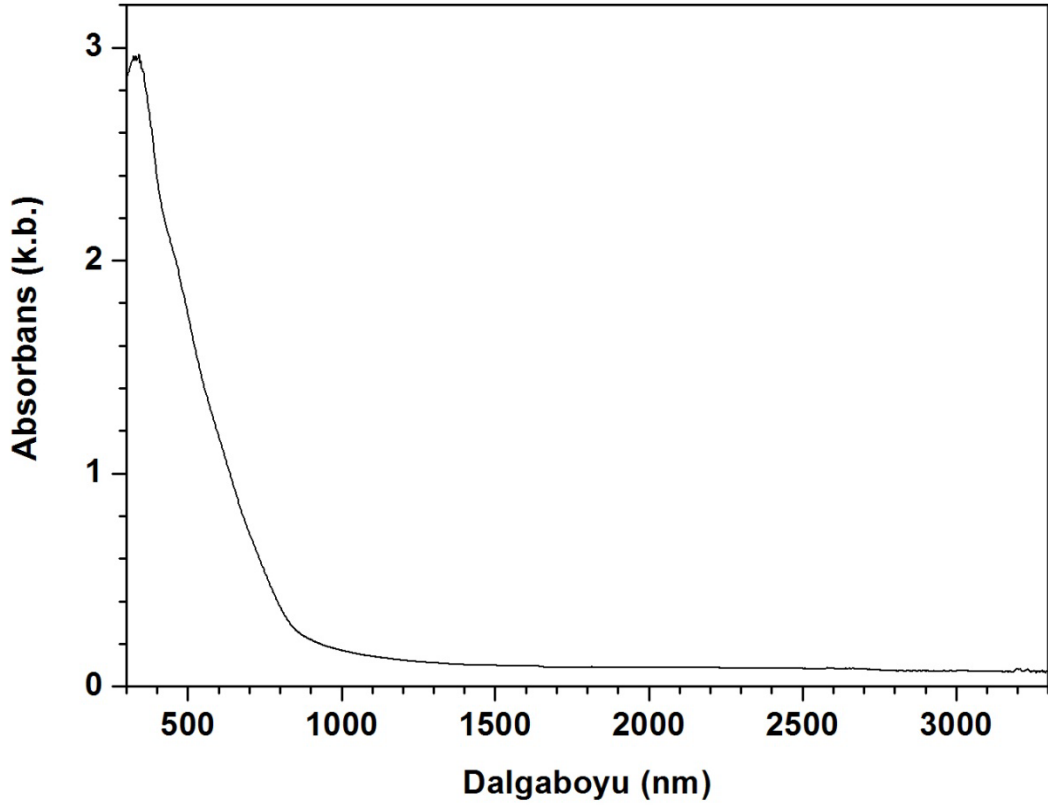
Elde edilen temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak $n = 1/2, 3/2, 2$ ve 3 değęerleri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ değişimi grafiği çizilmiştir. Origin 7.5 programı kullanılarak verilerin $n = 1/2$ değęeri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ denklemine uyumlu olduğu belirlenmiştir. Buna göre $n=1/2$ değęeri için geçişler direkt geçişler olarak tanımlanır. CuO yarıiletken filminin bant yapısının direkt geçişli olduğu ifade edilir. şekil 5.8'de 3000 rpm'de 60 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filmlerinde $(\alpha h\nu)^2$ 'nin, foton enerjisi $h\nu$ 'ye göre değişimi görülmektedir. Grafiklerin lineer kısmına Origin 7.5 programı kullanılarak eğri uyumu sağlanarak, doğrunun $h\nu$ eksenini kestiği

noktadan yasak enerji aralığı 60 saniye döndürme süresi için 1,65 eV olarak hesaplanmıştır.



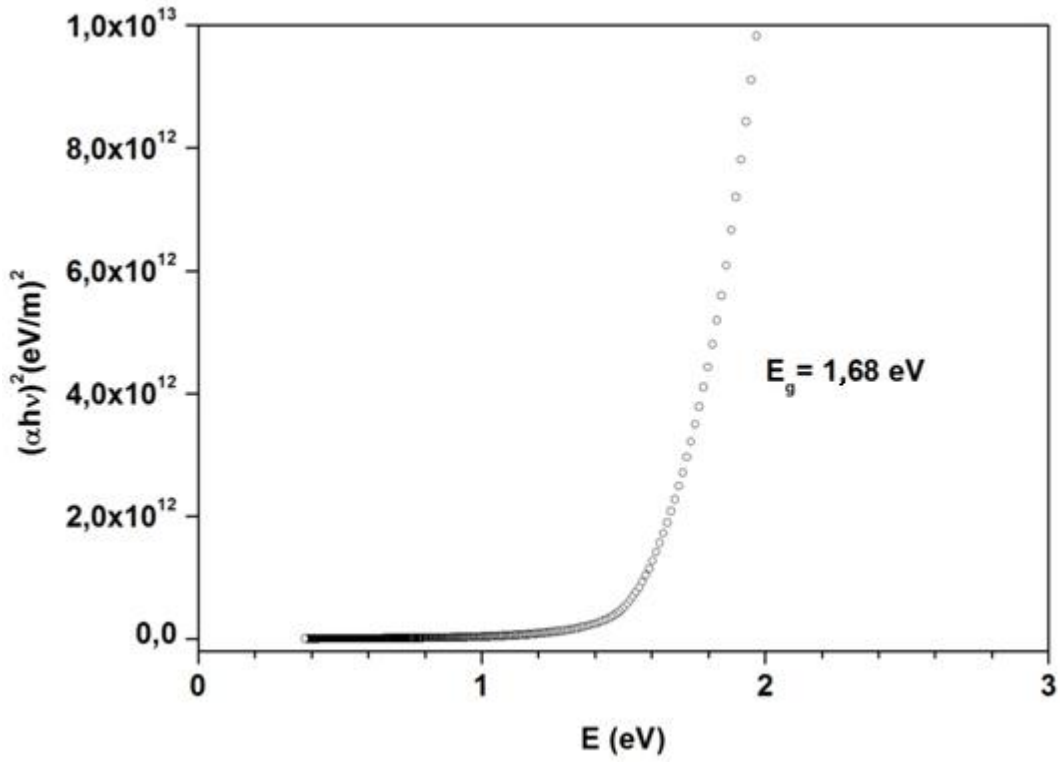
Şekil 5.8. 3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin $(\alpha hv)^2$ ’nin, foton enerjisi hv ’ye göre değişimi

Şekil 5.9’da 3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filminin temel absorpsiyon spektrumu verilmektedir. 1000 nm’den küçük dalgalıboylarına gidildikçe absorpsiyon hızlı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Absorpsiyon hızlı bir şekilde arttığı bu bölge temel absorpsiyon bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede elektronlar fotonlardan aldığı enerjiyle yasak enerji aralığını geçerek valans bandından, iletim bandına ulaşırlar. 1000 nm’den daha büyük dalgalıboylarında ise absorpsiyon değeriğerlerinin oldukça küçük değeriğerleri aldığı gözlenmiştir. Bu bölgedeki enerjiye sahip fotonların materyalle etkileşmeden geçtikleri veya yansıdıkları söylenebilir.



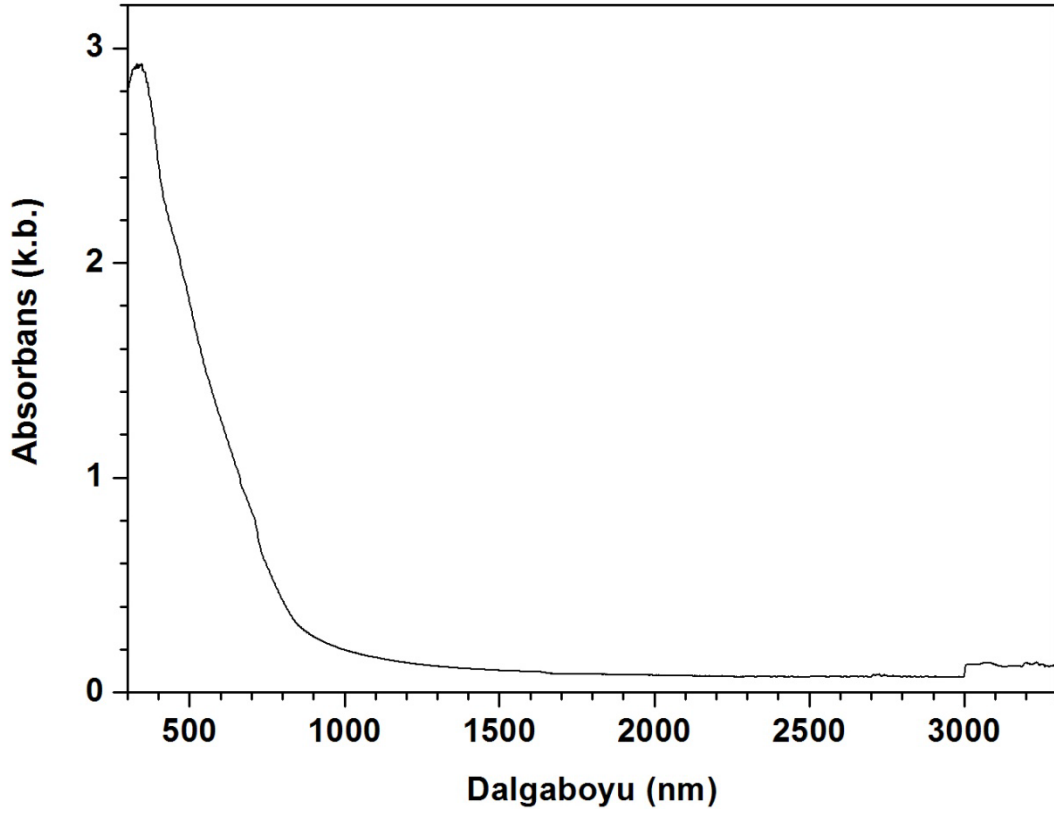
Şekil 5.9. 3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin temel absorpsiyon spektrumu

Elde edilen temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak $n = 1/2$, $3/2$, 2 ve 3 değerleri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ değişimi grafiği çizilmiştir. Origin 7.5 programı kullanılarak verilerin $n = 1/2$ değeri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ denklemine uyumlu olduğu belirlenmiştir. Buna göre $n=1/2$ değeri için geçişler direkt geçişler olarak tanımlanır. CuO yarıiletken filminin bant yapısının direkt geçişli olduğu ifade edilir. Şekil 5.10’da 3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filmlerinde $(\alpha h\nu)^2$ ’nin, foton enerjisi $h\nu$ ’ye göre değişimi görülmektedir. Grafiklerin lineer kısmına Origin 7.5 programı kullanılarak eğri uyumu sağlanarak, doğrunun $h\nu$ eksenini kestiği noktadan yasak enerji aralığı 30 saniye döndürme süresi için 1,68 eV olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.10. 3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin $(\alpha h\nu)^2$ nin, foton enerjisi $h\nu$ ’ye göre değişimi

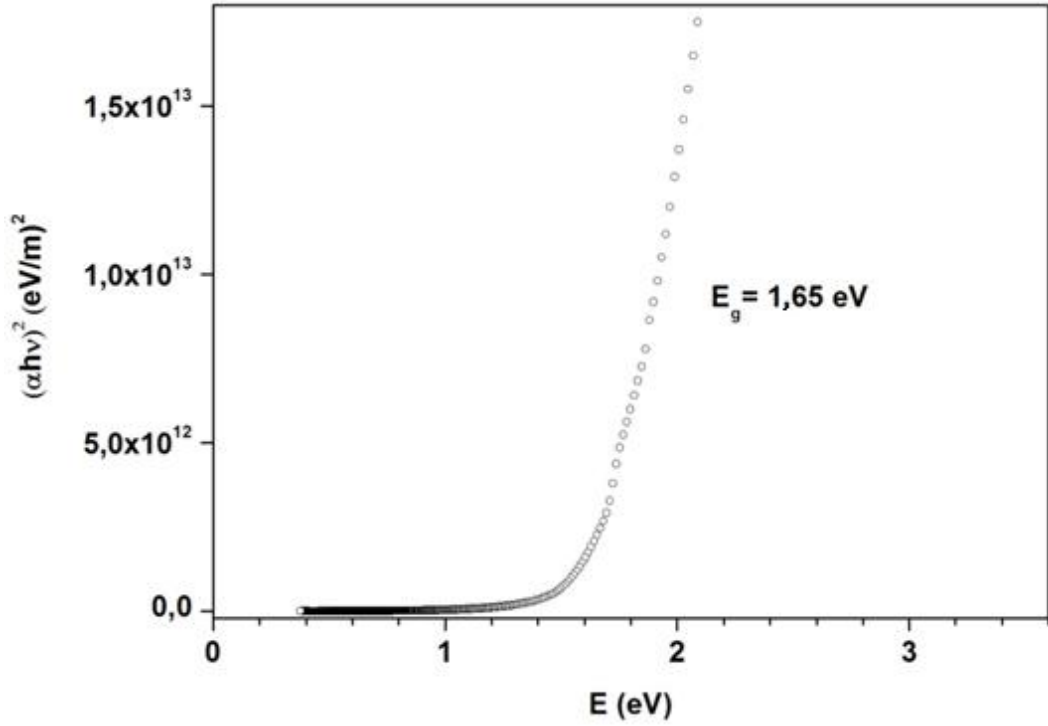
Şekil 5.11’de 3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansak elde edilen CuO filminin temel absorpsiyon spektrumu verilmektedir. 1000 nm’den küçük dalgaboylarına gidildikçe absorpsiyonun hızlı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Absorpsiyonun hızlı bir şekilde arttığı bu bölge temel absorpsiyon bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede elektronlar fotonlardan aldığı enerjiyle yasak enerji aralığını geçerek valans bandından, iletim bandına ulaşırlar. 1000 nm’den daha büyük dalgaboylarında ise absorpsiyon değerlerinin oldukça küçük değerleri olduğu gözlenmiştir. Bu bölgedeki enerjiye sahip fotonların materyalle etkileşmeden geçtikleri veya yansydıkları söylenebilir.



(b)

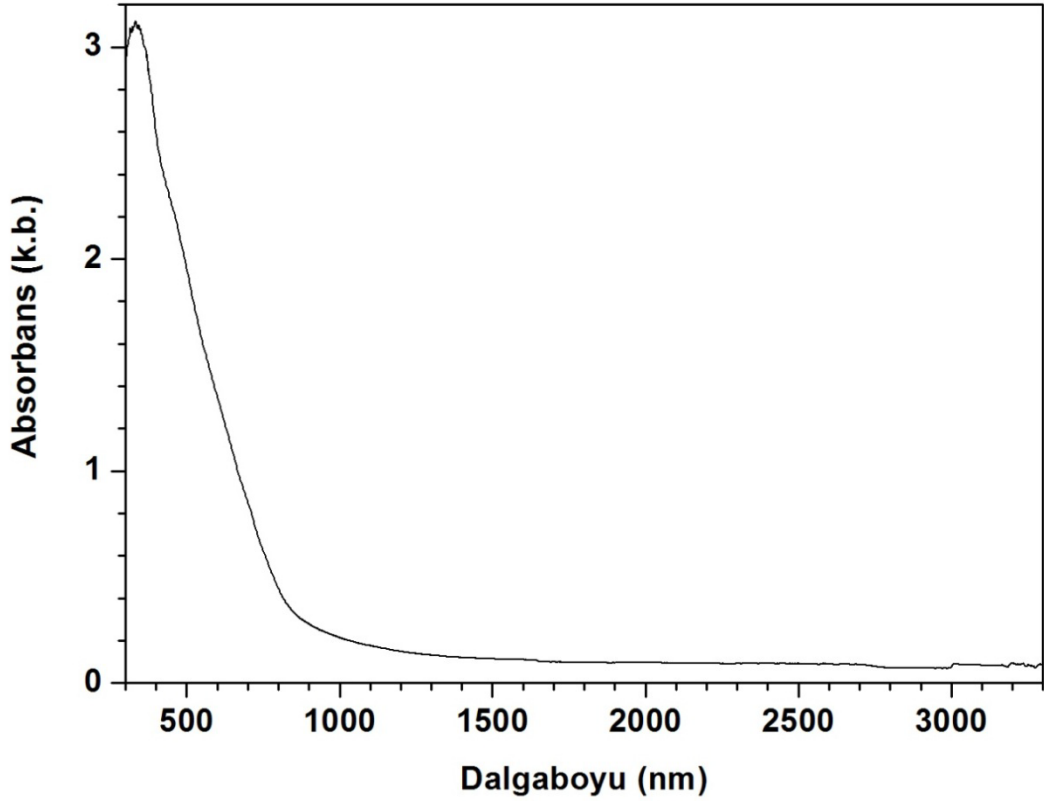
Şekil 5.11. 3000 rpm'de 60 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin temel absorpsiyon spektrumu

Elde edilen temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak $n = 1/2$, $3/2$, 2 ve 3 değerleri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ değişimi grafiği çizilmiştir. Origin 7.5 programı kullanılarak verilerin $n = 1/2$ değeri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ denklemine uyumlu olduğu belirlenmiştir. Buna göre $n=1/2$ değeri için geçişler direkt geçişler olarak tanımlanır. CuO yarıiletken filminin bant yapısının direkt geçişli olduğu ifade edilir. Şekil 5.12'de 3000 rpm'de 60 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansın elde edilen CuO filmlerinde $(\alpha h\nu)^2$ 'nin, foton enerjisi $h\nu$ 'ye göre değişimi görülmektedir. Grafiklerin lineer kısmına Origin 7.5 programı kullanılarak eğri uyumu sağlanarak, doğrunun $h\nu$ eksenini kestiği noktadan yasak enerji aralığı 60 saniye döndürme süresi için 1,65 eV olarak hesaplanmıştır.



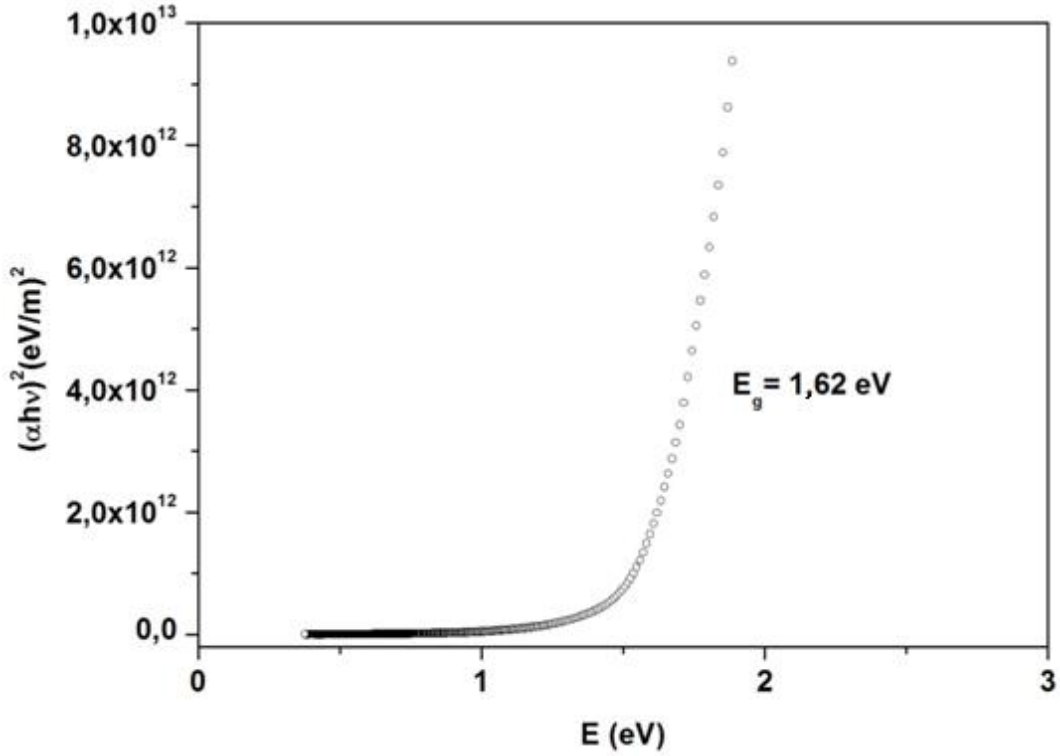
Şekil 5.12. 3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin $(\alpha h\nu)^2$ ’nin, foton enerjisi $h\nu$ ’ye göre değişimi

Şekil 5.13’te 3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansak elde edilen CuO filminin temel absorpsiyon spektrumu verilmektedir. 1000 nm’den küçük dalgalıboylarına gidildikçe absorpsiyonun hızlı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Absorpsiyonun hızlı bir şekilde arttığı bu bölge temel absorpsiyon bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede elektronlar fotonlardan aldığı enerjile yasak enerji aralığını geçerek valans bandından, iletim bandına ulaşırlar. 1000 nm’den daha büyük dalgalıboylarında ise absorpsiyon değerlerinin oldukça küçük değerleri aldığı gözlenmiştir. Bu bölgedeki enerjiye sahip fotonların materyalle etkileşmeden geçtikleri veya yansıdıkları söylenebilir.



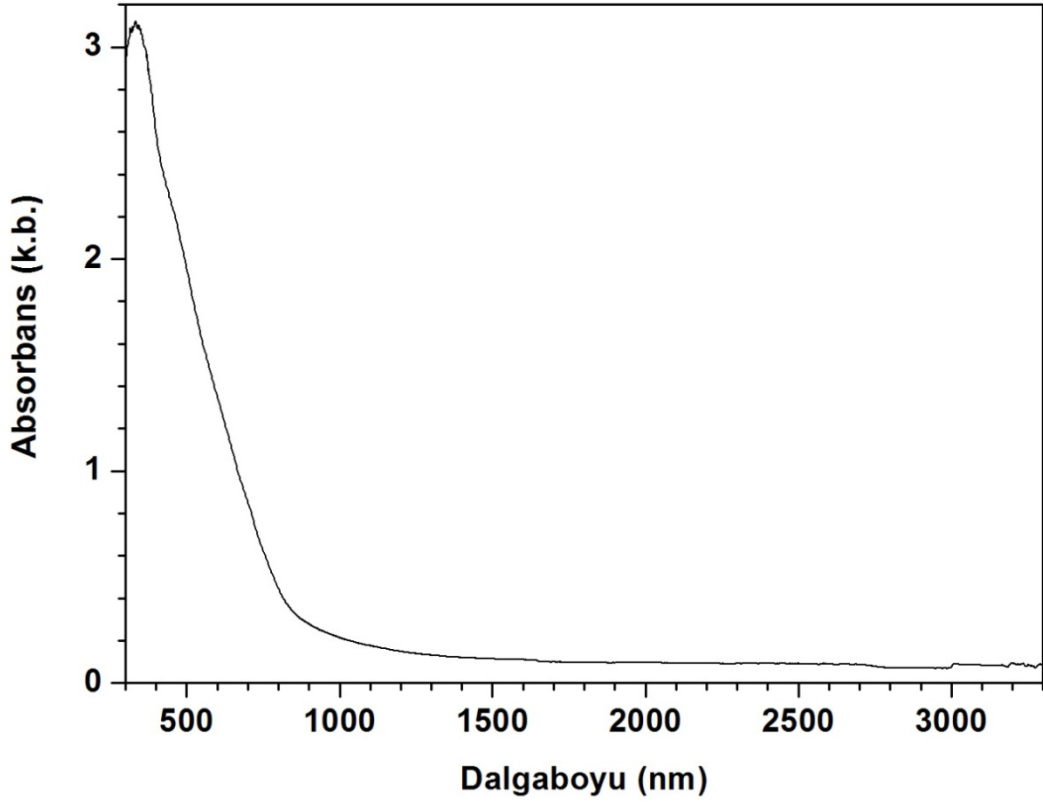
Şekil 5.13. 3000 rpm'de 30 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin temel absorpsiyon spektrumu

Elde edilen temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak $n = 1/2, 3/2, 2$ ve 3 değerleri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ değişimi grafiği çizilmiştir. Origin 7.5 programı kullanılarak verilerin $n = 1/2$ değeri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ denklemine uyumlu olduğu belirlenmiştir. Buna göre $n=1/2$ değeri için geçişler direkt geçişler olarak tanımlanır. CuO yarıiletken filminin bant yapısının direkt geçişli olduğu ifade edilir. Şekil 5.14'te 3000 rpm'de 30 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansın elde edilen CuO filmlerinde $(\alpha h\nu)^2$ 'nin, foton enerjisi $h\nu$ 'ye göre değişimi görülmektedir. Grafiklerin lineer kısmına Origin 7.5 programı kullanılarak eğri uyumu sağlanarak, doğrunun $h\nu$ eksenini kestiği noktadan yasak enerji aralığı 30 saniye döndürme süresi için 1,62 eV olarak hesaplanmıştır.



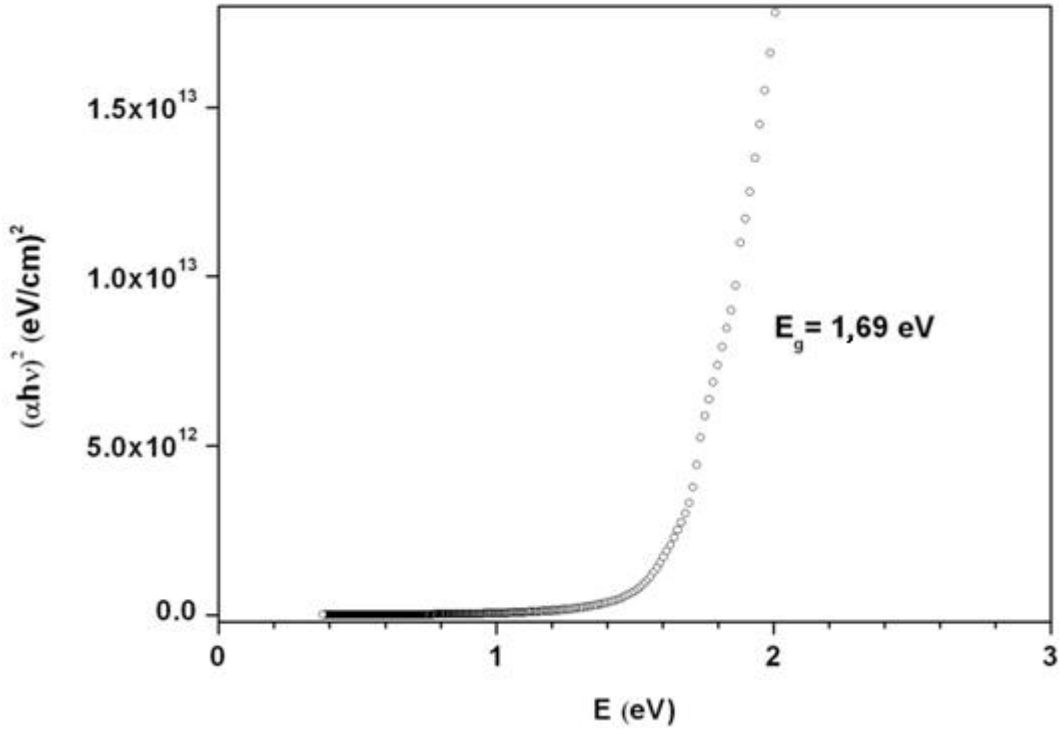
Şekil 5.14. 3000 rpm'de 30 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin $(\alpha hv)^2$ 'nin, foton enerjisi hv 'ye göre değişimi

Şekil 5.15'te 3000 rpm'de 60 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filminin temel absorpsiyon spektrumu verilmektedir. 1000 nm'den küçük dalgaboylarına gidildikçe absorpsiyon hızı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Absorpsiyon hızı bir şekilde arttığı bu bölge temel absorpsiyon bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede elektronlar fotonlardan aldığı enerjiyle yasak enerji aralığını geçerek valans bandından, iletim bandına ulaşırlar. 1000 nm'den daha büyük dalgaboylarında ise absorpsiyon değerlerinin oldukça küçük değerleri olduğu gözlenmiştir. Bu bölgedeki enerjiye sahip fotonların materyalle etkileşmeden geçtikleri veya yansydıkları söylenebilir.



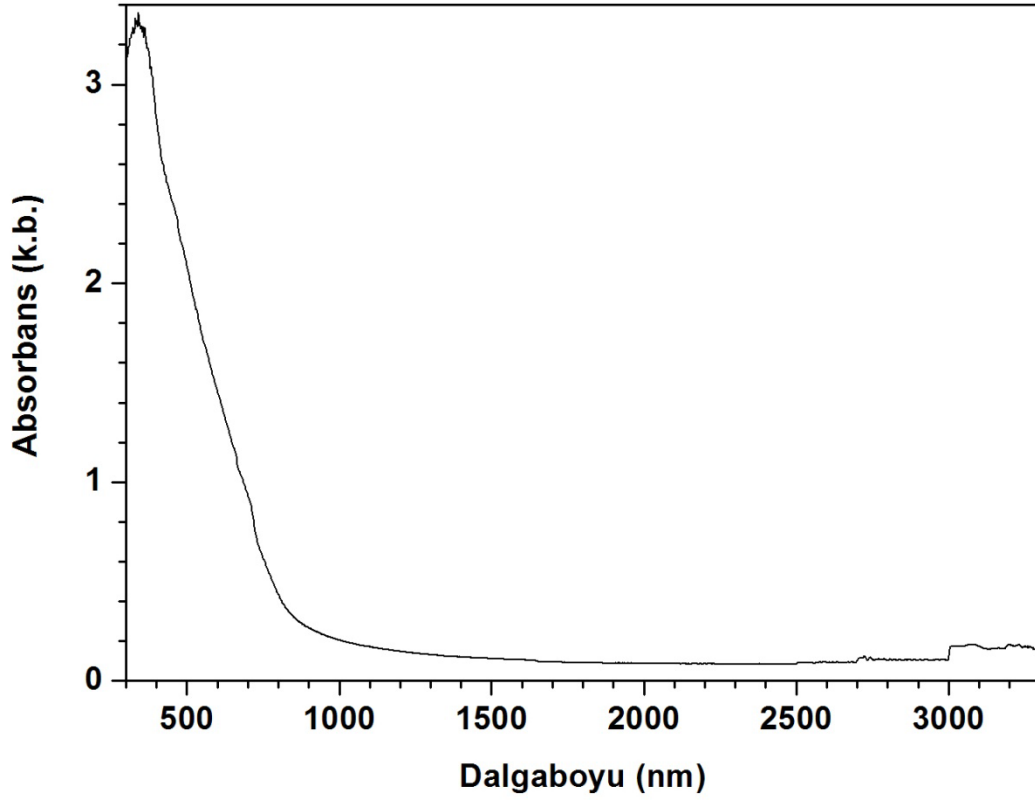
Şekil 5.15. 3000 rpm'de 60 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin temel absorpsiyon spektrumu

Elde edilen temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak $n= 1/2, 3/2, 2$ ve 3 değerleri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ değişimi grafiği çizilmiştir. Origin 7.5 programı kullanılarak verilerin $n= 1/2$ değeri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ denklemine uyumlu olduğu belirlenmiştir. Buna göre $n=1/2$ değeri için geçişler direkt geçişler olarak tanımlanır. CuO yarıiletken filminin bant yapısının direkt geçişli olduğu ifade edilir. Şekil 5.16'da 3000 rpm'de 60 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansak elde edilen CuO filmlerinde $(\alpha h\nu)^2$ 'nin, foton enerjisi $h\nu$ 'ye göre değişimi görülmektedir. Grafiklerin lineer kısmına Origin 7.5 programı kullanılarak eğri uyumu sağlanarak, doğrunun $h\nu$ eksenini kestiği noktadan yasak enerji aralığı 60 saniye döndürme süresi için 1,69 eV olarak hesaplanmıştır.



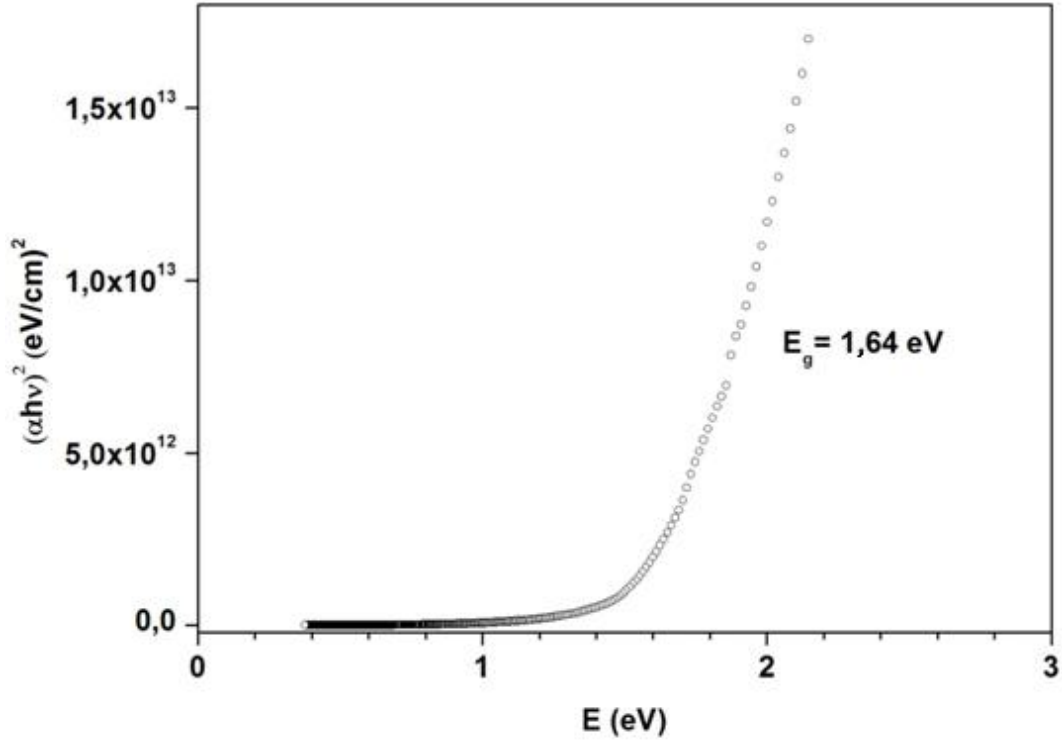
Şekil 5.16. 3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin $(\alpha h\nu)^2$ ’nin, foton enerjisi $h\nu$ ’ye göre değişimi

Şekil 5.17’te 3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansak elde edilen CuO filminin temel absorpsiyon spektrumu verilmektedir. 1000 nm’den küçük dalgalıboylarına gidildikçe absorpsiyonun hızlı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Absorpsiyonun hızlı bir şekilde arttığı bu bölge temel absorpsiyon bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede elektronlar fotonlardan aldığı enerjiyle yasak enerji aralığını geçerek valans bandından, iletim bandına ulaşırlar. 1000 nm’den daha büyük dalgalıboylarında ise absorpsiyon değerlerinin oldukça küçük değerleri aldığı gözlenmiştir. Bu bölgedeki enerjiye sahip fotonların materyalle etkileşmeden geçtikleri veya yansydıkları söylenebilir.



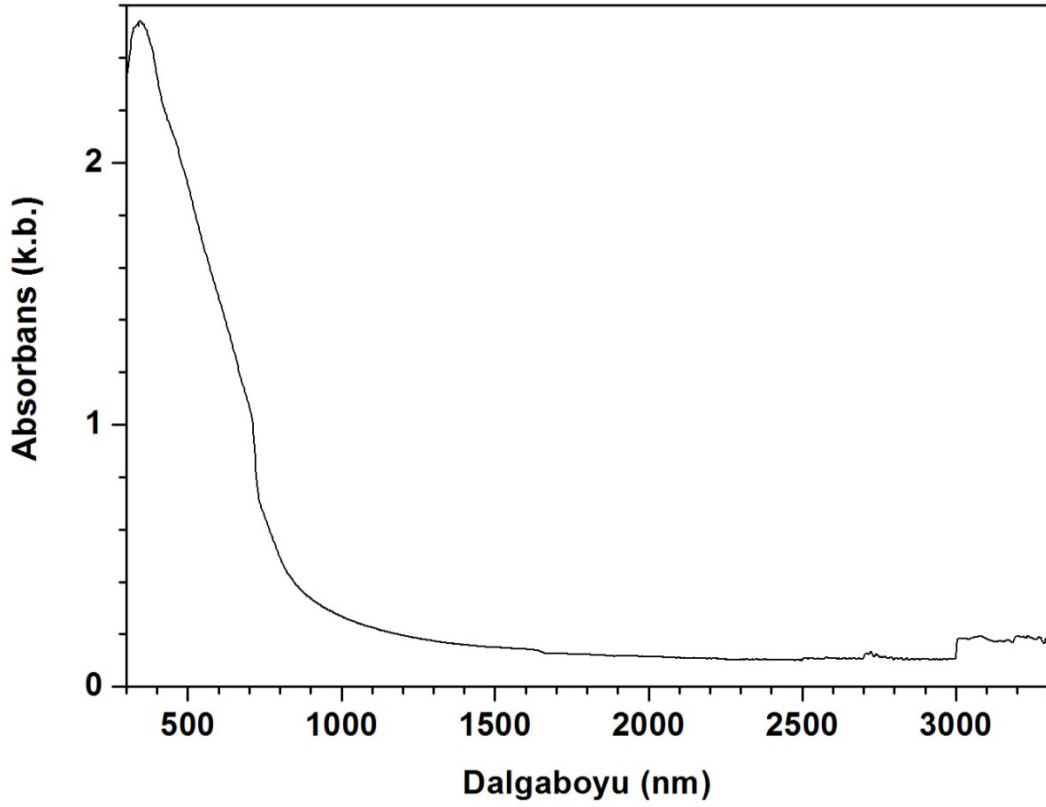
Şekil 5.17. 3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin temel absorpsiyon spektrumu

Elde edilen temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak $n = 1/2$, $3/2$, 2 ve 3 değerleri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ değişimi grafiği çizilmiştir. Origin 7.5 programı kullanılarak verilerin $n = 1/2$ değeri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ denklemine uyumlu olduğu belirlenmiştir. Buna göre $n=1/2$ değeri için geçişler direkt geçişler olarak tanımlanır. CuO yarıiletken filminin bant yapısının direkt geçişli olduğu ifade edilir. Şekil 5.18’de 3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansak elde edilen CuO filmlerinde $(\alpha h\nu)^2$ ’nin, foton enerjisi $h\nu$ ’ye göre değişimi görülmektedir. Grafiklerin lineer kısmına Origin 7.5 programı kullanılarak eğri uyumu sağlanarak, doğrunun $h\nu$ eksenini kestiği noktadan yasak enerji aralığı 30 saniye döndürme süresi için 1,64 eV olarak hesaplanmıştır.



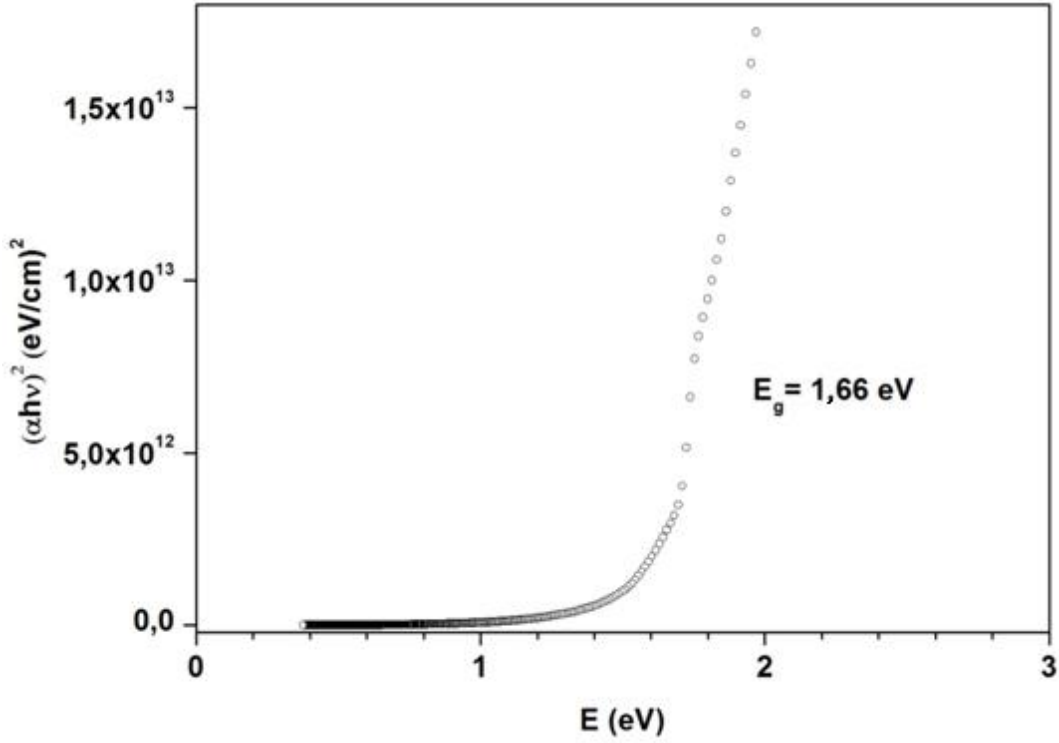
Şekil 5.18. 3000 rpm’de 30 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin $(\alpha h\nu)^2$ ’nin, foton enerjisi $h\nu$ ’ye göre değişimi

Şekil 5.19’da 3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanaarak elde edilen CuO filminin temel absorpsiyon spektrumu verilmektedir. 1000 nm’den küçük dalgaboylarına gidildikçe absorpsiyonun hızlı bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Absorpsiyonun hızlı bir şekilde arttığı bu bölge temel absorpsiyon bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede elektronlar fotonlardan aldığı enerjiyle yasak enerji aralığını geçerek valans bandından, iletim bandına ulaşırlar. 1000 nm’den daha büyük dalgaboylarında ise absorpsiyon değerlerinin oldukça küçük değerleri olduğu gözlenmiştir. Bu bölgedeki enerjiye sahip fotonların materyalle etkileşmeden geçtikleri veya yansydıkları söylenebilir.



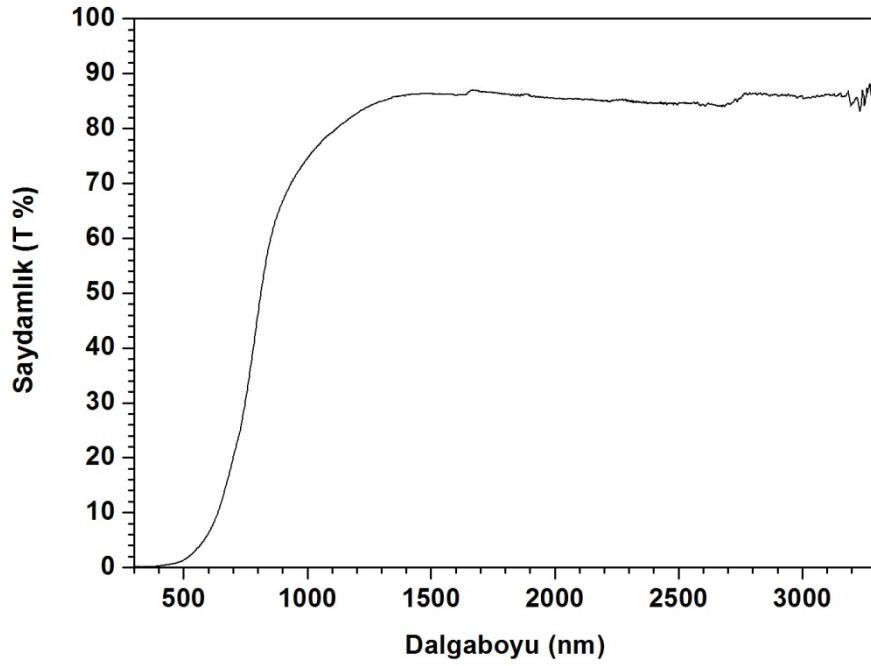
Şekil 5.19. 3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin temel absorpsiyon spektrumu

Elde edilen temel absorpsiyon spektrumu verilerinden yararlanarak $n = 1/2$, $3/2$, 2 ve 3 değerleri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ değişimi grafiği çizilmiştir. Origin 7.5 programı kullanılarak verilerin $n = 1/2$ değeri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ denklemine uyumlu olduğu belirlenmiştir. Buna göre $n=1/2$ değeri için geçişler direkt geçişler olarak tanımlanır. CuO yarıiletken filminin bant yapısının direkt geçişli olduğu ifade edilir. Şekil 5.20’de 3000 rpm’de 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansak elde edilen CuO filmlerinde $(\alpha h\nu)^2$ ’nin, foton enerjisi $h\nu$ ’ye göre değişimi görülmektedir. Grafiklerin lineer kısmına Origin 7.5 programı kullanılarak eğri uyumu sağlanarak, doğrunun $h\nu$ eksenini kestiği noktadan yasak enerji aralığı 60 saniye döndürme süresi için 1,66 eV olarak hesaplanmıştır.

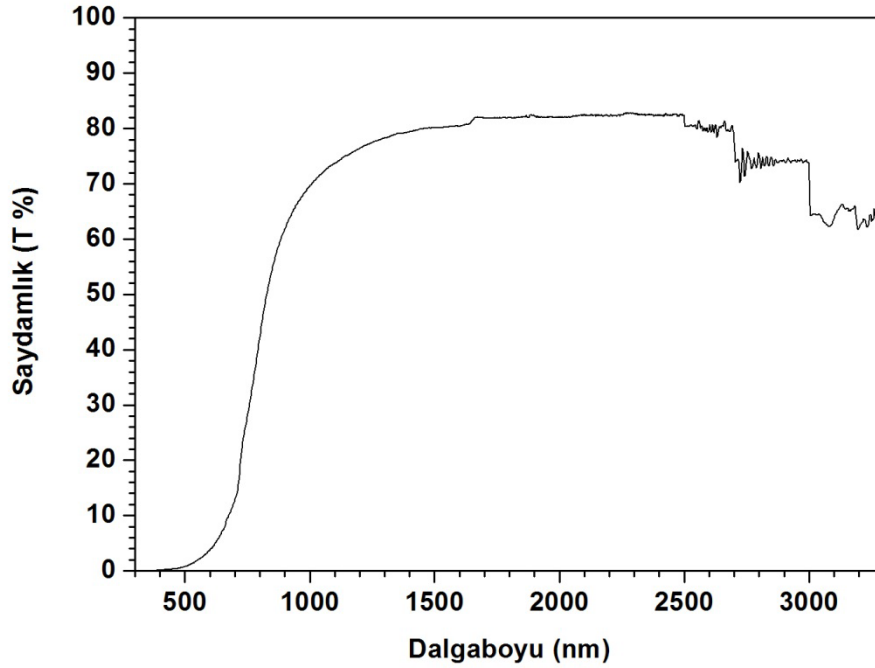


Şekil 5.20. 3000 rpm'de 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmin $(\alpha h\nu)^2$ 'nin, foton enerjisi $h\nu$ 'ye göre değişimi

Şekil 5.21'de 3000 rpm'de 30 60 s döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansarak elde edilen CuO filmlerin saydamlık eğrileri verilmektedir. 500 nm'den 1000nm'ye kadar olan bölgede saydamlıkta hızlı bir artışın olduğu 1000 nm'den daha büyük dalgalarda ise saydamlığın yaklaşık %85 değerine ulaştığı gözlenmektedir.



(a)

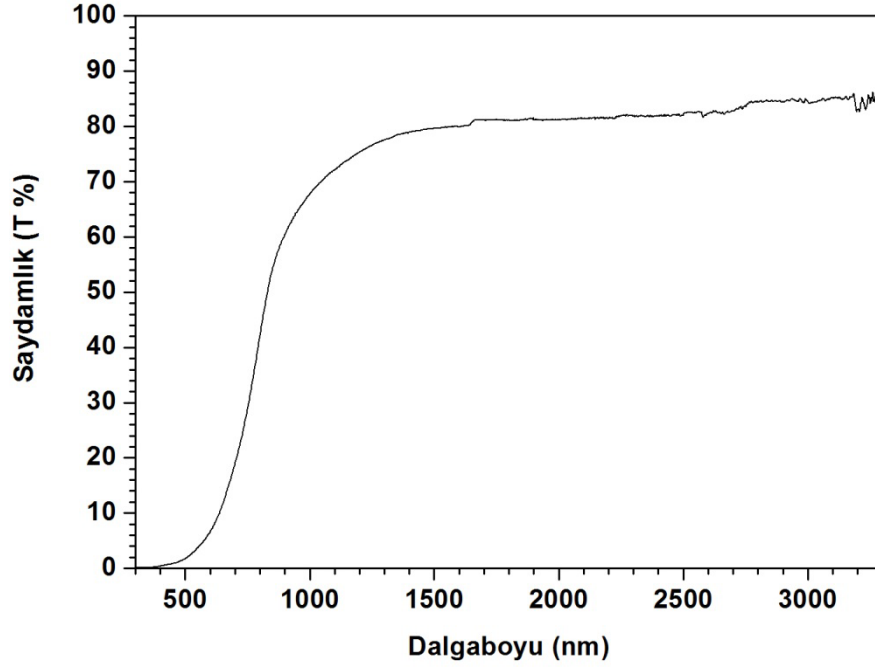


(b)

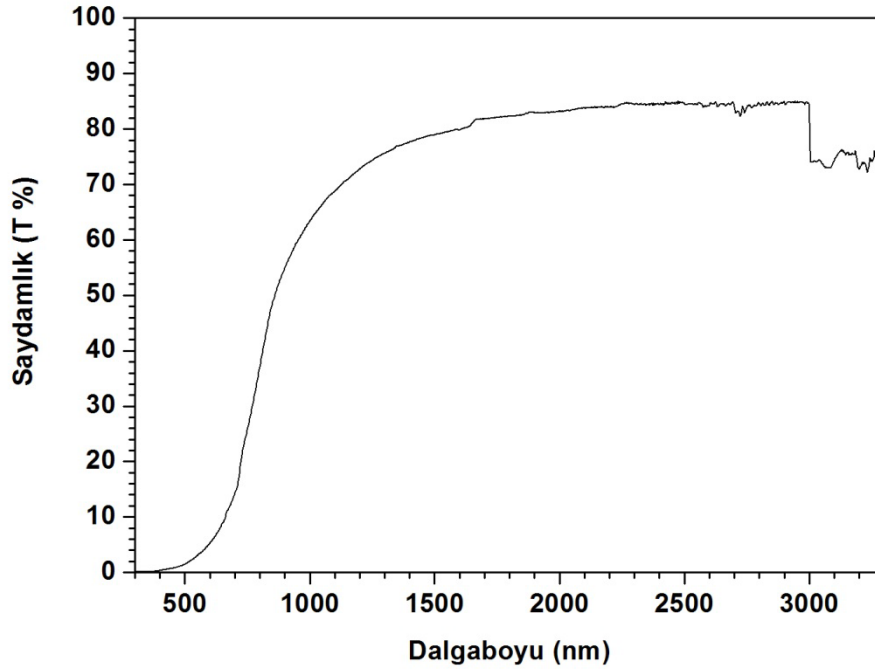
Şekil 5.21. 3000 rpm’de (a) 30 saniye, (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 450 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri

Şekil 5.22’de 3000 rpm’de 30 60 s döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansak elde edilen CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri verilmektedir. 500

nm'den 1000nm'ye kadar olan bölgede saydamlıkta hızlı bir artışın olduğu 1000 nm'den daha büyük dalgalarda ise saydamlığın yaklaşık %85 değerine ulaştığı gözlenmektedir.



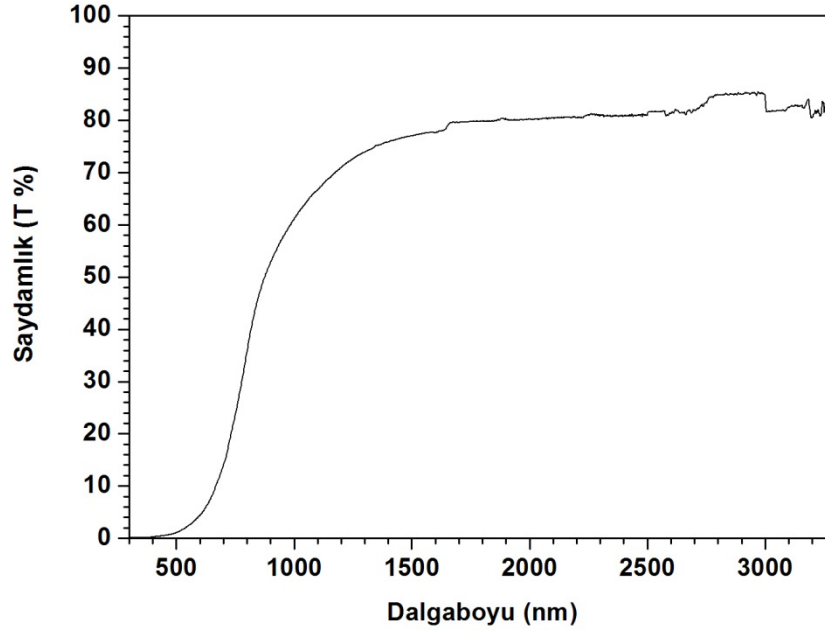
(a)



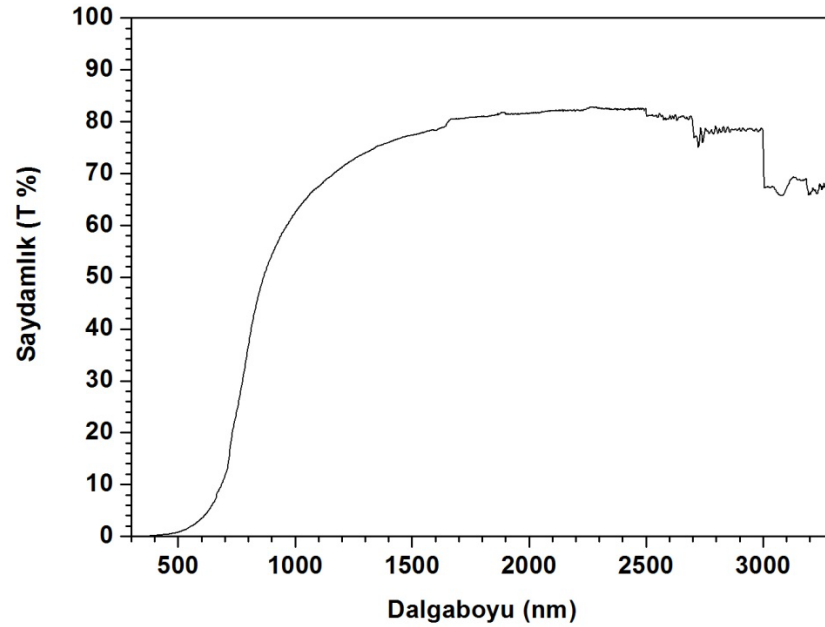
(b)

Şekil 5.22. 3000 rpm'de (a) 30 saniye, (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 500 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri

Şekil 5.23'te 3000 rpm'de 30 60 s döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansarak elde edilen CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri verilmektedir. 500 nm'den 1000nm'ye kadar olan bölgede saydamlıkta hızlı bir artışın olduğu 1000 nm'den daha büyük dalgaboylarında ise saydamlığın yaklaşık %80 değerine ulaştığı gözlenmektedir.



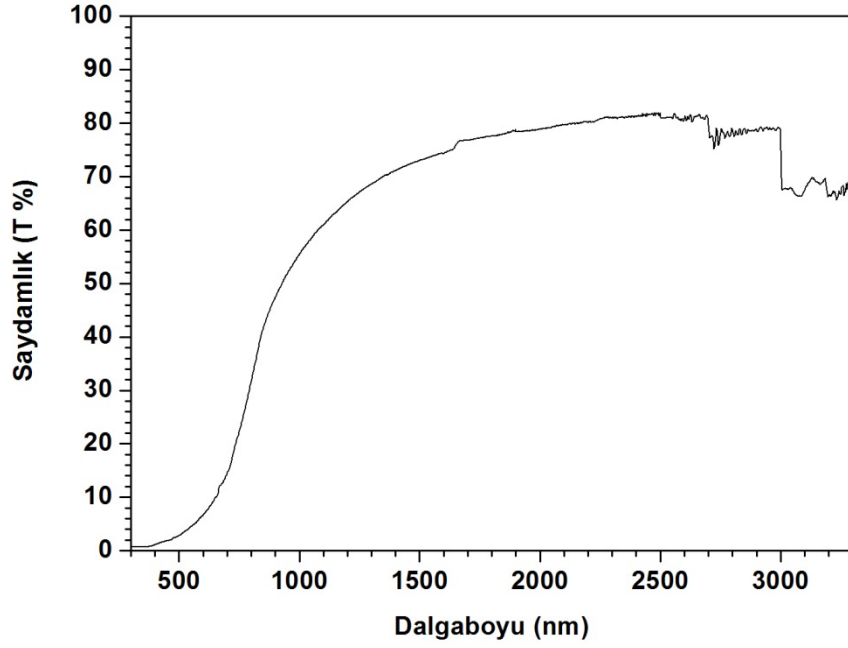
(a)



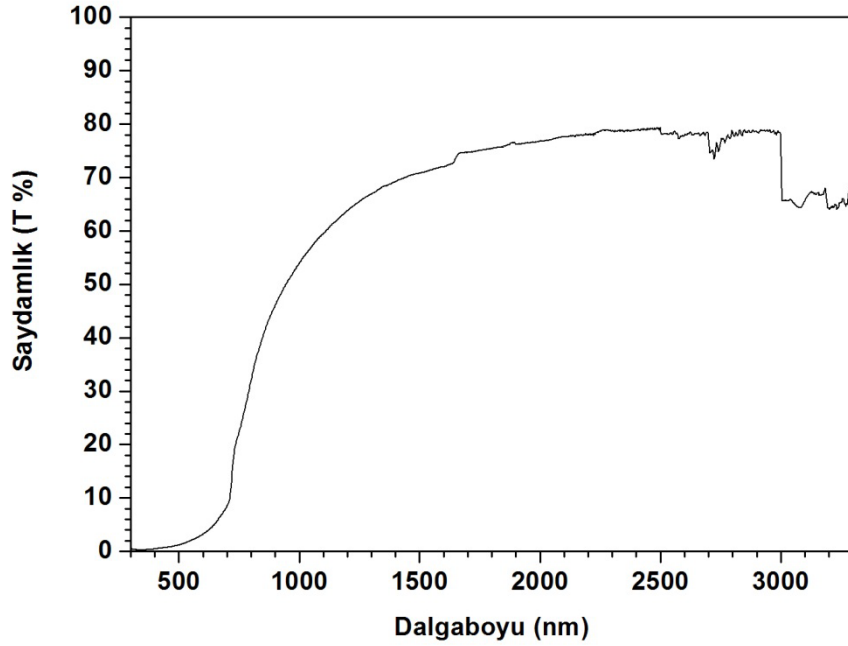
(b)

Şekil 5.23. 3000 rpm'de (a) 30 saniye, (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 550 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansarak elde edilen CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri

Şekil 5.16'da 3000 rpm'de 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansarak elde edilen CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri verilmektedir. 500 nm'den 1000 nm'ye kadar olan bölgede saydamlıkta hızlı bir artışın olduğu 1000 nm'den daha büyük dalgalarda ise saydamlığın yaklaşık %80 değerine ulaştığı gözlenmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.24. 3000 rpm'de (a) 30 saniye, (b) 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta 1 saat tavlansarak elde edilen CuO filmlerin geçirgenlik eğrileri

Saydamlık spektrumlarından da görüldüğü üzere döndürme sürelerinin filmlerin saydamlıklarını değiştirmediği söylenebilir. Diğer taraftan tavlama sıcaklıklarının saydamlığı değiştirdiği söylenebilir. 450 ve 500 °C tavlama sıcaklıklarında 1000 nm dalgaboyundan daha büyük dalgaboyları için saydamlık değeri yaklaşık %85 değerini alırken tavlama sıcaklığının 500 ve 600 °C'ye yükselmesiyle saydamlığın %80 değerlerine azaldığı belirlenmiştir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, döndürerek kaplama yöntemi ile farklı tavlama sıcaklıkları ve döndürme sürelerinde cam alt tabanlar üzerinde elde edilen CuO yarıiletken filmlerin yapısal ve optik özellikleri incelenmiştir.

Döndürerek kaplama yönteminin tercih edilmesinin sebebi kolay ve ekonomik bir yöntem olmasıdır. 30 ve 60 s döndürüldükten sonra 450, 500, 550 ve 600 °C sıcaklıklarda tavlanan CuO filmler polikristal yapıda oluşmuştur. Filmlerdeki kristallenmenin 60 saniye döndürüldükten sonra 600 °C sıcaklıkta tavllanmasıyla daha iyi olduğu x-ışını toz kırınım desenlerinden tespit edilmiştir. CuO filmlerin x-ışını kırınım desenlerinden taban merkezli kübik yapıda kristallendikleri belirlenmiştir. Kırınım desenlerindeki en şiddetli pik ($\bar{1}11$) yönünde ve $2\theta = 35,4^\circ$ dedir. Filmlerde kristallenmenin rastgele büyüyerek gerçekleştiği belirlenmiştir.

Elde edilen filmlerin kalınlık değerleri elipsometre yardımı ile 0,65 μm olarak belirlenmiştir.

CuO filmlerin elde edilen temel absorpsiyon spektrumlarından yararlanarak, $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişimleri çizilmiştir. Bu değişimlerden filmlerin direkt bant geçişli oldukları belirlenmiştir. Bu grafiklerden yararlanarak filmlerin yasak enerji aralıkları hesaplanmıştır. Yasak enerji aralığının 1,62 eV ile 1,69 eV arasında değiştiği belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada, basit ve aynı zamanda ekonomik bir yöntem olan döndürerek kaplama yöntemi kullanılarak CuO ince filmler elde edilmiştir. Yöntem pratik ve ekonomik olması bakımından çok caziptir. Ülkemizde gelişmekte olan ve yeni açılan üniversitelerde kullanılıp geliştirilebilme ihtimali yüksektir. Bu çalışmanın bu kapsamda teşvik edici olacağını umarız.

KAYNAKLAR

- [1] Shur, M., *Physics of Semiconductor Devices*, New Jersey, 1990.
- [2] Altuncu S., *Döndürerek kaplama Yöntemiyle Farklı Tavlama Sıcaklıklarında Üretilen ZnO Yarıiletken Filmlerin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 2012.
- [3] Ma, D. ve Ye, Z. ve Wang, L., *Deposition and characteristics of CdO films with absolutely (200)-preferred orientation*, *Materials Letters* **58**, 128-131, 2003.
- [4] Li, X., *A comparison of composite transparent conducting oxides based on the binary compound CdO and SnO₂*, NCPV Program Review Meeting, Conference Paper, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, U.S.A., 2001.
- [5] Jayakrishan, R. Ve Hodes, G., *Non-aqueous electrodeposition of ZnO and CdO films*, *Thin Solids Films* **440**, 19-25, 2003.
- [6] Zhao, Z., Morel, D.L. and Ferekides, C.S., *Electrical and optical properties of tin-doped CdO films deposited atmospheric metalorganic chemical vapor deposition*, *Thin Solid Films*, **413**, 203-211, 2002.
- [7] Lokhande, B.J. ve Uplane, M.D., *Effect of deposition temperature on spray deposited cadmium oxide films*, *Materials Research Bulletin*, **36**, 439-447, 2001.
- [8] Ashrafi, A.B.M.A ve Kumana, H., *CdO epitaxial layers grown on (001) GaAs surfaces by metalorganic molecular-beam epitaxy*, *Journal of Crystal Growth*, 237-239, 2002.
- [9] Ferro, R. ve Rodriguez, J.A. ve Vigil, O., *Chemical composition and electrical conduction mechanism for CdO:F thin films deposited by spray pyrolysis*, *Materials Science and Engineering* **B87**, 83-86, 2001.
- [10] A. Richthofen, R. Domnick, R. Cremer, *Fresenius J. Anal. Chem.* 312-358, 1997.
- [11] J. Li, G. Vizkelethy, P. Revesz, J.W. Mayer, *J. Appl. Phys.* **69**, 1020, 1991.
- [12] Y. Ohya, S. Ito, T. Ban, Y. Takahashi, *Key Eng. Mater.* **181**, 113, 2000.

- [13] U.D. Lanke, M. Vedawyas, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. **B155**, 97, 1999.
- [14] S.C. Ray, Solar Energy Mater. Solar Cells **68**, 307, 2001.
- [15] T. Maruyama, Solar Energy Mater. Solar Cells **56**, 85, 1998.
- [16] Y.K. Jeong, G.M. Choi, J. Phys. Chem. Solids **57**, 81, 1996.
- [17] Kittel, C., *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley & Sons, Inc., NewYork, USA, 1996.
- [18] Mckelvey, J.P., *Solid State and Semiconductor Physics*, Harper & Row Pres, New York, 1966.
- [19] Pankove, J.I., *Optical Process in Semiconductors*, Princeton Press, New Jersey, USA, 1971.
- [20] Streetman, B.G., *Solid State Electronic Devices*, Prentice Hall Int., New Jersey, 1980.
- [21] Omar, M.A., *Elementary Solid State Physics*, Addison-Wesley Publishing, California, ABD, 1975.
- [22] Nag, B.R., *Electron Transport in Compound Semiconductors*, Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- [23] Smith, W.T., *Principles of Materials Science and Engineering*, McGraw-Hill Inc., USA, 1990.
- [24] Allison, J., *Electronic Engineering Semiconductors and Devices*, McGraw-Hill Book Company, UK, 1990.
- [25] Dikici, M., *Katıhal Fiziğine Giriş*, On Dokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları, Samsun, Türkiye, 1993.
- [26] Bagen, S.; Gibson, G.; Newquist, C.; and Sago, H. *Next Generation Coating Technologies for Low-Cost Electronics Manufacturing*, 1996 IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, p. 468.
- [27] Carcano, G.; Ceriani, M.; and Soglio, F. *Spin Coating with High Viscosity Photoresist on Square Substrates*, Hybrid Circuits, **32**, 1993
- [28] Cullity, B.D., *Elements of X-Ray Diffraction*, 2nd Ed., Addison-Wesley Publishing, Massachusetts, USA, 1978.
- [29] Durlu, T.N., *Katıhal Fiziğine Giriş*, Bilim Yayınları, Ankara, Türkiye, 1992.
- [30] Rodrigues, C.G., *Electron mobility in n-doped zinc sulphide*, Microelektronik Journal, **37**, 657-660, 2006.

- [31] Mott, N.F. ve Davis, E.A., *Electronic Process in Non-Crystalline Materials*, Clarendon Press, London, 1971.