ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Gülay ALTINDEMİR

SILAR YÖNTEMİ İLE FARKLI BAKIR TUZ KAYNAKLARI KULLANILARAK YARIİLETKEN Cu_2O İNCE FİLMLERİN DEPOLANMASI VE KARAKTERİZASYONU

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA, 2016

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SILAR YÖNTEMİ İLE FARKLI BAKIR TUZ KAYNAKLARI KULLANILARAK YARIİLETKEN Cu_2O İNCE FİLMLERİN DEPOLANMASI VE KARAKTERİZASYONU

Gülay ALTINDEMİR

DOKTORA TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu Tez 29/07/2016 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/~~Oyçokluğu~~ ile Kabul Edilmiştir.

.....	.....	.....
Doç. Dr. Cebrail GÜMÜŞ DANIŞMAN	Doç. Dr. Mehmet KARAKILÇIK ÜYE	Doç. Dr.O. Murat ÖZKENDİR ÜYE

.....	.....
Yrd. Doç. Dr. M. Zeki KURT ÜYE	Yrd. Doç. Dr. Mine TAYKURT DADAY ÜYE

Bu Tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No:FDK-2014-2712

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

DOKTORA TEZİ

SILAR YÖNTEMİ İLE FARKLI BAKIR TUZ KAYNAKLARI KULLANILARAK YARIİLETKEN Cu_2O İNCE FİLMLERİN DEPOLANMASI VE KARAKTERİZASYONU

Gülay ALTINDEMİR

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Doç. Dr. Cebrail GÜMÜŞ
Yıl: 2016, Sayfa: 139
Jüri : Doç. Dr. Cebrail GÜMÜŞ
: Doç. Dr. Mehmet KARAKILÇIK
: Doç. Dr. O. Murat ÖZKENDİR
: Yrd. Doç. Dr. M. Zeki KURT
: Yrd. Doç. Dr. Mine TAYKURT DADAY

Bu çalışmada, ardışık iyonik tabaka adsorpsiyon ve reaksiyon (SILAR) yöntemi ile dört farklı bakır tuz kaynağı [$Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$] kullanılarak cam alttaban üzerine Cu_2O ince filmleri hazırlanmıştır. Cu_2O ince filmleri 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüleri ile elde edilmiştir. Filmlerin yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel özellikleri araştırılmıştır. UV/Vis spektrofotometresi ile Cu_2O ince filmlerin optik özellikleri olan optik geçirgenlik ($\%T$), optik yansıma ($\%R$), soğurma (A), kırılma indisi (n), soğurma katsayısı (α), sönüm katsayısı (k), enerji bant aralığı (E_g) değerleri bulunmuştur. X-ışını kırınım (XRD) analizlerinden Cu_2O ince filmlerin kübik yapıda ve polikristal fazda olduğu ortaya çıkarılmıştır. FE-SEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntülerinden filmlerin genellikle küresel yığılmalar şeklinde oluştuğu bazı filmlerde ise küresel oluşum içinde kısmen çubuk yapılı taneciklerin olduğu görülmüştür. Hall ölçümlerinden Cu_2O ince filmlerin p-tipi iletkenlik sergilemiş olduğu tespit edilmiştir. Elektriksel özdirençleri (ρ), 1.25×10^{3}-6.10×10^{4} Ωcm hesaplanmıştır**.** Filmlerin mobilite (μ) değerleri 2.24×10^{1}'den 8.74×10^{2} $cm^2V^{-1}s^{-1}$ kadar değişmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cu_2O, SILAR, İnce film**,** XRD, FE-SEM, Optik özellikler, Elektriksel özellikler

ABSTRACT

PhD THESIS

DEPOSITION AND CHARACTERIZATION OF Cu_2O SEMICONDUCTOR THIN FILMS BY SILAR METHOD USING DIFFERENT COPPER SALT RESOURCES

Gülay ALTINDEMİR

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Cebrail GÜMÜŞ
Year: 2016, Pages: 139
Jury : Assoc. Prof. Dr. Cebrail GÜMÜŞ
: Assoc. Prof. Dr. Mehmet KARAKILÇIK
: Assoc. Prof. Dr. O. Murat ÖZKENDİR
: Asst. Prof. Dr. M. Zeki KURT
: Asst. Prof. Dr. Mine TAYKURT DADAY

In this study, Cu_2O thin films were prepared using four different copper salt [copper(II) asetat monohydrate ($Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$), copper(II) sulfate pentahydrate ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), copper(II) nitrate trihydrate ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$), copper(II) chloride dihydrate ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$)] sources via Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) method on a glass substrate. We deposited Cu_2O with 10, 20, 30 and 40 immersion cycles. The films are then examined in terms of their structural, optical, morphological and electrical properties. Optical properties such as optical transmittance (*T%*), refraction coefficient (*R%*), absorption (*A*), refraction index (*n*), absorption coefficient (α), extinction coefficent (*k*) and energy band gap (E_g) are determined by UV-Vis spectrophotometry. X-Ray Diffraction (XRD) analyses reveal that the material structure is indeed in a cubical form and polycraystal phase. It is deduced from FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) imaging that the thin film formation usually consists of spherical particles, often with an exception of a combination between spherical and linear particles. From the Hall effect measurement, it was found that Cu_2O thin film exhibits p-type conduction. Its electrical resistivity (ρ) values were calculated in the range 1.25×10^3-6.10×10^4 Ωcm. The charge mobility (μ) values were in the range from 2.24×10^1 to 8.74×10^2 $cm^2V^{-1}s^{-1}$.

Key Words: Cu_2O, SILAR, Thin film**,** XRD, FE-SEM, optical properties, electrical properties

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, yapıcı ve yönlendirici fikirleri ile bana daima yol gösteren, danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Cebrail GÜMÜŞ'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tezimin içeriğini inceleyen ve önerilerini benimle paylaşan Sayın Araş. Gör. Dr. Özge ERKEN ve Sayın Araş. Gör. Doğan ÖZASLAN'a tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Plazma Destekli Üretim Laboratuvarı imkânlarını bana sunan Sayın Prof. Dr. Ramazan ESEN ve öğrencileri Sayın Merhan KILIÇ ve Sayın Dr. Öğr. Gör. Necdet Hakan ERDOĞAN'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmam sırasında arkeometri laboratuvarını kullanmam konusunda yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Zehra YEĞİNGİL ve öğrencileri Sayın Adnan ÖZDEMİR, Sayın Volkan ALTUNAL ve Sayın Veysi GÜCKAN'a teşekkür ederim.

Kimya Bölümünden Sayın Araş. Gör. Gökmen SIĞIRCIK ve Sayın Uzman Serkan KARACA'ya, kimyasalların hazırlanması ve kullanımı konusunda değerli yardımları için teşekkür ederim.

Tezim süresince beni destekleyen sevgili arkadaşlarım Filiz DEMİR, Nurgül ÖREL ARIKAN ve ailelerine ayrıca sevgili arkadaşlarım Derya FARİSOĞULLARI, Taner KUTLU, Nur Deniz KICIR, Faruk TOKSOY, Cemal ULUTAŞ, Filinta KIRMIZIGÜL, Ümran SELÇUK, Kamuran KARA, ve Kazım KABA'ya teşekkür ederim.

Stajım süresince her konuda bana yardımcı olan sevgili arkadaşlarım Natascha VON MORZE, Emi SUZUKİ, Henry Barasa WAFULA, Tayfun METE, Bünyamin ÜMSÜR, Xianzhong LİN, Albert JUMA ve eşine teşekkür ederim.

Herzaman yanımda olan sevgili Anneme, Babama ve kardeşlerime çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ I
ABSTRACT II
TEŞEKKÜR III
İÇİNDEKİLER IV
ÇİZELGELER DİZİNİ VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ X
SİMGELER VE KISALTMALAR XVI
1. GİRİŞ 1
1.1. Yarıiletken Malzemelerin Tarihsel Süreci 1
1.2. İnce Film Yarıiletkenlerin Teknolojideki Önemi 2
1.3. Katıların Kristal Yapısı 2
1.3.1. Kristalin Yapısı ve Birim Örgü Hücresi 3
1.3.2. Kristal Doğrultu, Düzlem ve Miller İndisleri 7
1.4. X-Işınları 9
1.4.1. Bragg Kırınımı 11
1.4.2. X-Işınları Kırınımındaki Temel Deneysel Teknikler 13
1.4.2.1. Dönen Kristal Metod 13
1.4.2.2. Laue Metod 14
1.4.2.3. Toz Metod 15
1.5. Yarıiletkenler 16
1.5.1. Yarıiletkenlerin Bant Teorisi 18
1.5.2. Saf Yarıiletkenler 19
1.6. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri 20
1.6.1. Yarıiletkenlerde Işığın Soğrulması 20
1.6.2. Temel Soğurma 22
1.6.2.1. Doğrudan Bant Geçişi ve Soğurması 23
1.6.2.2. Dolaylı Bant Geçişi ve Soğurması 24
1.6.3. Eksiton Soğurması 26
1.6.4. Bir Yarıiletkende Olası Optiksel Soğurmalar 26

1.7. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri 27
1.7.1. Elektron ve Boşluk Mobilitesi ve Sürüklenme Hızı 27
1.7.2. Akım Taşıyıcı Yoğunlukları n ve p 29
1.7.3. Elektriksel İletkenlik 32
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 35
2.1. Cu_2O İnce Film Çalışmaları 35
3. MATERYAL VE METOD 49
3.1. Materyal 49
3.1.1. Alttaban Temizliği 49
3.1.2. Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyon (SILAR) Yöntemi ile Cu_2O İnce Filmin Depolanması için Kullanılan Kimyasallar ve Kimyasal Çözeltilerin Hazırlanması 49
3.2. Metod 50
3.2.1. Malzeme Üretim Yöntemleri 50
3.2.1.1. Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyon (SILAR) Yöntemi 51
3.2.2. SILAR Yöntemi ile Deneyin Yapılışı 53
3.2.3. Cu_2O İnce Filmlerin Depolanma Sürecindeki Kimyasal Reaksiyon Aşamaları 54
3.2.4. Malzeme Analiz Yöntemleri 55
3.2.4.1. Optiksel Özelliklerin Analizi 55
3.2.4.1.(1). Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi 56
3.2.4.1.(2). Optik Özellikler ile ilgili Bazı Sabitler 61
3.2.4.1.(3). Enerji Bant Aralığının Hesaplanması 62
3.2.4.2. Filmlerin Kalınlık Hesabı 64
3.2.4.3. Filmlerin Elektriksel Özelliklerin Belirlenmesi 64
3.2.4.4. Filmlerin Yapısal Özelliklerinin X-Işını Kırınım Cihazı (XRD) Kullanılarak Analiz Edilmesi 65
3.2.4.5. Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) Kullanılarak Analiz Edilmesi 67

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 69
4.1. Cu_2O İnce Filmlerinin X-ışını Kırınım Analizleri 69
4.1.1. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Analizleri 70
4.1.2. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Analizleri 73
4.1.3. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Analizleri 76
4.1.4. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Analizleri 79
4.2. Cu_2O İnce Filmlerin Oda Sıcaklığındaki Optik Özellikleri 83
4.2.1. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ Tuzu ile Elde Edilen Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özellikleri 83
4.2.2. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ Tuzu ile Elde Edilen Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özellikleri 90
4.2.3. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ Tuzu ile Elde Edilen Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özellikleri 96
4.2.4. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ Tuzu ile Elde Edilen Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özellikleri 102
4.3. Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özellikleri 108
4.3.1. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin FE-SEM Görüntüleri 108
4.3.2. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin FE-SEM Görüntüleri 112
4.3.3. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin FE-SEM Görüntüleri 116
4.3.4. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin FE-SEM Görüntüleri 120
4.4. Kalınlık 124
4.5. Elektriksel Özellikler 125
4.5.1. Cu_2O İnce Filmlerin Elektriksel Özellikleri 125

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 127
5.1. Sonuçlar 127
5.2. Öneriler 128
KAYNAKLAR 131
ÖZGEÇMİŞ 139

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 4.1. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerdeki (*111*) ve (*200*) düzlemlerine ait kristal parametreleri 72

Çizelge 4.2. ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerdeki (*111*) ve (*200*) düzlemlerine ait kristal parametreleri..... 75

Çizelge 4.3. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerdeki (*111*) ve (200) düzlemlerine ait kristal parametreleri..... 78

Çizelge 4.4. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerdeki (*111*) ve (*200*) düzlemlerine ait kristal parametreleri..... 81

Çizelge 4.5. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzları kullanılarak 40 daldırma döngüsünde elde edilen bütün Cu_2O ince filmlerinin (*111*) ve (*200*) düzlemlerine ait kristal parametreleri için bozuk yerleşme yoğunluğu..... 82

Çizelge 4.6. Farklı bakır tuz kaynakları ($Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$) kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin kalınlık dağılımı 126

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 1.1. Kristal yapı, amorf ve moleküler yapı türleri 3
Şekil 1.2. (a) Kristal örgü ve (b) Birim hücresi 4
Şekil 1.3. Kristal örgü yapıları 5
Şekil 1.4. Kristal sistemleri ve birim hücreleri 6
Şekil 1.5. (*a b c*) Miller indisi 7
Şekil 1.6. Kübik yapıda bazı kristal düzlemler 8
Şekil 1.7. X-ışını kaynağı 9
Şekil 1.8. Bir atomdaki elektronik geçişler 10
Şekil 1.9. Bir kristalin atomik düzlemlerinden X-ışınlarının yansıması 11
Şekil 1.10. Döner kristal metodu 14
Şekil 1.11. Laue yöntemi için deneysel düzenek 15
Şekil 1.12. Debye Scherrer toz metodu: (a) filmin gelen demet ve cisme nazaran durumu (b) açıldığında filmin görünüşü 16
Şekil 1.13. Saf bir yarıiletkenin (a) mutlak sıcaklıkta (0 K) ve (b) oda sıcaklığında (300 K) iletim ve valans bandları ve ısıl olarak uyarılmış elektron ve boşluklar 18
Şekil 1.14. Silisyum örgüsünde atomlar arası bağların gösterimi: a) T=0 b) T›0 19
Şekil 1.15. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonuyla yarıiletken bant aralığı ilişkisi 20
Şekil 1.16. Bir yarıiletken üzerine gelen tek renkli bir ışınım 21
Şekil 1.17. Fotonun soğrulması ile valans bandından iletim bandına doğrudan bant geçişi 23
Şekil 1.18. (a) Dolaylı bant geçişi (fonona bağlı) (b) Silisyumun iki farklı sıcaklıktaki temel soğurması (fonon yanımı ve soğrulması) 24
Şekil 1.19. Yarıiletkende foton enerjisine karşı olası soğurma durumları 26
Şekil 1.20. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu 30
Şekil 1.21. (a) İletim ve valans bandı (b) Dağılım fonksiyonu (c) Elektron ve boşluk (hol) için durum yoğunlukları; $g_e(E)$, $g_p(E)$ 31
Şekil 1.22. Elektrik alan uygulandığında yarıiletkendeki bant diyagramı + ve – yüklerin akışı 32

Şekil 3.1. SILAR yöntemi için deneysel düzenek 53
Şekil 3.2. Perkin-Elmer UV/Vis Lamda 2S spektrofotometresi 55
Şekil 3.3. İnce bir filmde çok yansımalı ışık geçirimi 57
Şekil 3.4. Amorf bir yarıiletkenin soğurma katsayısının enerji ile değişimi 62
Şekil 3.5. Yarıiletken ince filmin soğurma katsayısının enerjiye bağlı olan değişiminde filmin enerji bant aralığının bulunması 63
Şekil 3.6. Hall ölçüm sistemi HS-3000 Manual-Ver 3.5 65
Şekil 3.7. X-ışını kırınım cihazı 66
Şekil 3.8. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu 68
Şekil 4.1. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri 70
Şekil 4.2. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri 73
Şekil 4.3. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri 76
Şekil 4.4. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri 79
Şekil 4.5. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenliklerinin dalga boyuna bağlı grafiği 83
Şekil 4.6. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik soğurmalarının dalga boyuna bağlı grafiği 84
Şekil 4.7. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik yansımaların dalga boyuna bağlı grafiği 85
Şekil 4.8. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik soğurma katsayısı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı grafiği 86
Şekil 4.9. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki sönüm katsayısılarının (k) dalga boyuna bağlı grafiği 87
Şekil 4.10. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki kırılma indislerinin (n) dalga boyuna bağlı grafiği 87

Şekil 4.11. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine $(h\nu)$ bağlı grafiği 89
Şekil 4.12. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenliklerinin dalga boyuna bağlı grafiği..... 90
Şekil 4.13. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik soğurmalarının dalga boyuna bağlı grafiği..... 91
Şekil 4.14. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik yansımaların dalga boyuna bağlı grafiği 92
Şekil 4.15. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki soğurma katsayı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı grafiği 93
Şekil 4.16. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki sönüm katsayılarının (k) dalga boyuna bağlı grafiği 94
Şekil 4.17. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki kırılma indisinin (n) dalga boyuna bağlı grafiği 94
Şekil 4.18. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine $(h\nu)$ bağlı grafiği 95
Şekil 4.19. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenliklerinin dalga boyuna bağlı grafiği..... 96
Şekil 4.20. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik soğurmalarının dalga boyuna bağlı grafiği 97
Şekil 4.21. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik yansımaların dalga boyuna bağlı grafiği 98
Şekil 4.22. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki soğurma katsayı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı grafiği 99
Şekil 4.23. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki sönüm katsayısılarının (k) dalga boyuna bağlı grafiği... 100
Şekil 4.24. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin oda sıcaklığındaki kırılma indisinin (n) dalga boyuna bağlı grafiği 100

Şekil 4.25. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine $(h\nu)$ bağlı grafiği ... 101
Şekil 4.26. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenliklerinin dalga boyuna bağlı grafiği 102
Şekil 4.27. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik soğurmalarının dalga boyuna bağlı grafiği 103
Şekil 4.28. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik yansımaların dalga boyuna bağlı grafiği 104
Şekil 4.29. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki soğurma katsayı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı grafiği 105
Şekil 4.30. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki sönüm katsayılarının (k) dalga boyuna bağlı grafiği ... 105
Şekil 4.31. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki kırılma indisin (n) dalga boyuna bağlı grafiği 106
Şekil 4.32. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine $(h\nu)$ bağlı grafiği ... 107
Şekil 4.33. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 108
Şekil 4.34. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 109
Şekil 4.35. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 110
Şekil 4.36. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 111
Şekil 4.37. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma döngüsü elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 112
Şekil 4.38. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 113
Şekil 4.39. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü 114

Şekil 4.40. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 115
Şekil 4.41. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 116
Şekil 4.42. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 117
Şekil 4.43. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 118
Şekil 4.44. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 119
Şekil 4.45. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 120
Şekil 4.46. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 121
Şekil 4.47. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 122
Şekil 4.48. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü 123
Şekil 4.49. Farklı bakır tuz kaynakları $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin kalınlık grafiği 124

SİMGELER VE KISALTMALAR

E_c	: İletim bandı enerji seviyesi
E_v	: Valans bandı enerji seviyesi
E_g	: Enerji bant aralığı
E_f	: Fermi enerjisi
r	: Örgü vektörü
a	: Kristalografik örgü parametresi
(hkl)	: Miller indisleri
n	: Tam sayı
d	: Kristal düzlemleri arası uzaklık
λ	: Dalgaboyu
θ	: Bragg açısı
T	: Optik Geçirgenlik
h	: Planck sabiti
υ	: Işığın frekansı
R	: Yansıma katsayısı
n	: Kırılma indisi
k	: Sönüm katsayısı
E_{ex}	: Eksitonun bağlanma enerjisi
α	: Soğurma katsayısı
F	: Kuvvet
v	: Işığın yayılma hızı
c	: Işık hızı
q	: Soğrulan fotonun dalga vektörüdür
k_f	: İletim bandındaki elektron momenti
k_i	: Valans bandaki elektron momenti
$\hbar$	: Planck sabiti
E_p	: Fonun enerjisi
I_o	: Başlangıçtaki ışık şiddeti
I	: Filme giren ışık şiddeti

$f(E)$	: Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
k_B	: Boltzmann sabiti
$g(E)$	: Durum yoğunluğu
$g_e(E)$	: Elektronların durum yoğunluğu
$g_h(E)$	: Boşlukların durum yoğunluğu
D	: Diffüzyon katsayısı
J	: Sürüklenme akım yoğunluğu
J_p	: Boşlukların iletkenlik akım yoğunluğu
J_n	: Elektronların iletkenlik akım yoğunluğu
v_{thn}	: Ortalama sürüklenme hızı
λ	: Ortalama serbest yol
τ	: Zaman sabitti
m_e	: Serbest elektron kütlesi
m_p	: Elektrik alandaki boşlukların etkin kütlesi
m_n	: Elektrik alandaki elektronların etkin kütlesi
μ_p	: Boşlukların mobilitesi
μ_n	: Elektronların mobilitesi
q	: Yük
E	: Elektrik alan
n	: Elektron yoğunluğu
p	: Boşluk yoğunluğu
ρ	: Özdirenç
σ	: İletkenlik
σ_n	: Elektron İletkenliği
σ_p	: Boşluk iletkenliği
A	: Optik soğurma
ρ	: Filmin yoğunluğu
m_s	: Cam alttabanla birlikte filmin ağırlığı
m_i	: Cam alttabanın ağırlığı
t	: Filmin kalınlığı
A	: Filmin yüzey alanı

ε	: Dielektrik sabiti
ε_1	: Reel dielektrik sabiti
ε_2	: İmajiner dielektrik sabiti
N	: Kompleks kırılma indisi
μ	: Magnetik geçirgenlik
V	: Voltaj
R	: Direnç
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	: Bakır(II) sülfat pentahidrat
$Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	: Bakır(II) nitrat trihidrat
$(CH_3COO)_2Cu \cdot H_2O$	: Bakır(II) asetat monohidrat
$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	: Bakır(II) klorür dihidrat
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	: Sodyum tiyosülfat pentahidrat
NaOH	: Sodyum hidroksit
LPD	: Sıvı-faz depolama
SILAR	: Ardışık iyonik tabaka adsorpsiyon ve reaksiyon yöntemi
CBD	: Kimyasal depolama metodu
ED	: Elektriksiz depolama
RFMS	: Radyo frekans magnetron püskürtme yöntemi
P	: Polarizasyon
p_i	: Maddenin parcaçıklarının temel elektriksel momentleri
D	: Dipolmoment yoğunluğu
MBE	: Moleküler demet epitaksi yöntemi
TFT	: İnce film transistör
CTAB	: Setil trimetil amonyum bromür
MO	: Metil turuncu
SCE	: Doymuş kalomel elektrot
XPS	: X-ışını fotoelektron spektroskopisi
EDX-EDAX	: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
ITO	: Sn katkılı indiyum oksit alttaban
TL	: Tauc-Lorentz
sccm	: Aktif gaz akış oranı

SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
FE-SEM	: Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
PL	: Fotolüminesans
XRD	: X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

1.1. Yarıiletken Malzemelerin Tarihsel Süreci

Günümüzde giderek önemi artan ve kullanım alanı genişleyen yarıiletken malzeme ilk kez 1872 yılında Alessandro Volt tarafından bulunmuştur. Bu yarıiletken malzeme olarak adlandırılan uygun şartlar altında iletkenlik ya da yalıtkanlık özellik gösteren bu yeni malzemeler ile günümüz teknolojisinin vazgeçilmez elektronik devreleri üretilmeye başlanmıştır. Micheal Faraday 1833'de sıcaklık etkisiyle gümüş sülfürün (AgS) direncinin azaldığını ilk kayıt altına alan ve gözlemleyen kişidir. Ag_2S and Cu_2S sıcaklığa bağlı olarak elektriksel iletkenliğinin değişimini nicel olarak kapsamlı bir şekilde 1851'de Johann Hittorf tarafından incelenmiştir. Bundan sonraki bir kaç yıl içinde yarıiletkenlerin ışığa duyarlılığı ve metal yarıiletken kavşak gibi özelliklerinin incelenmesi açısından hızlı ve önemli bir gelişme olarak kayıt edilmiştir. 1874'de Karl Ferdinand Braun metal sülfür yarıiletkenin üzerine metal kontaklar yaparak üzerinde oluşan iletkenliğin doğrusal (rectification) olduğunu açığa çıkarmış ve yeni elektronik devre elemanları için n tipi ve p tipi yarıiletkenlerin birleştirilmesi üzerine çalışmıştır. Bu önemli keşif ikinci dünya savaşın sırasında kullanılan radar sistemlerinde radyo ve mikrodalga tespiti için dedektör olarak kullanılmıştır. Bu buluş, 1909'da Braun ve Marconiye Nobel ödülü kazandırmıştır. Arthur Schuster 1874 yılında bakır tel etrafında oluşan oksitlenmenin tele kısa devre yaptırdığını fark etmiş ve bu oksitlenmenin tel temizlendikten sonra telde kısa devrenin kalktığını da gözlemlemiştir. Bunun sadece kısa devre durumu olmadığını aynı zamanda CuO yarıiletken malzemesi olduğunun da farkına varmıştır. 1929 yılında Walter Schottky, metal-yarıiletken kavşak da bariyer oluştuğunu açığa çıkarmış olan önemli kişilerden biridir (Lukasiak ve Jakubowski, 2010).

Bu keşifler yarıiletken fiziğinin hızlı bir şekilde gelişmesine ve metal yarıiletken kontakların fiziksel doğasının anlaşılması açısından hızlı bir ilerleme sağlamıştır. 1942'de yarıiletkenler için en önemli olay Bethe'in termo iyonik emisyon teorisidir. Bu teoride akım sürüklenme ve difüzyondan dolayı değil akım

metal içerisindeki elektronların emisyonuyla meydana gelmektedir. Başka önemli bir gelişme de 1947'de ilk transistor üretilmesidir . Transistör ilk kez William Shockley, John Bardeen ve Walter Brattain tarafından Bell telefon laboratuvarında test edilmiştir. Bu ilk transistör polikristal germanyumdan elde edilmiş olup, nokta devre elemanı olarak kullanılmıştır. Tek kristal malzemeler 1949'un sonuna doğru üretilebilmiştir (Sağlam, 2007).

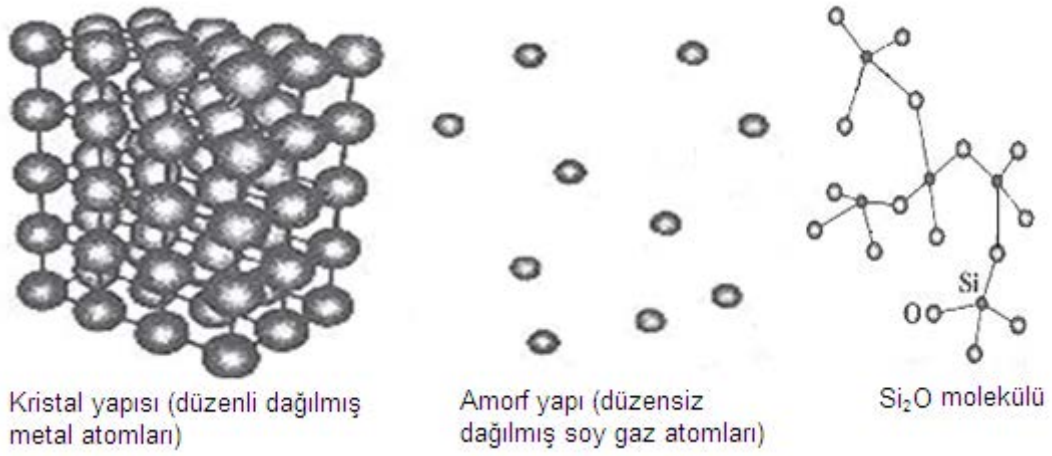
1.2. İnce Film Yarıiletkenlerin Teknolojideki Önemi

Son yüzyılda yarıiletken ince film üretimi, çeşitli elektronik devre elemanı ve değişik fiziksel özellikte aygıtların geliştirilmesi için optik, elektrik, yapısal, mekanik ve magnetik gibi özellikleri daha ileri düzeye getirilebilmesi açısında kayda değer ilerlemeler göstermiştir. Ayrıca ince filmlerin tek katmanlı ve iki boyutta kaplanabilmesinden dolayı nanoteknolojinin farklı bir kolu halinede gelmiştir. Yarıiletken ince film, atomların veya moleküllerin alttaban ya da kaplanılacak malzemenin üzerine ince bir tabaka halinde dizilmesi sonucu oluşan yarıiletken malzemelerdir. Genellikle kalınlıkları 1 μm altındadır. İnce film üzerine yapılan çalışmaların hızla ilerleme göstermesi sonucunda farklı ince film üretim teknikleri ortaya çıkmıştır. İnce film üretim teknikleri, üç ana başlık altında; buhar fazda büyütme yöntemi, sıvı fazda büyütme yöntemi ve katı fazda büyütme yöntemi olarak ayrılabilirler. Kullanım alanına göre ince filmler, farklı üretim teknikleri ile kullanılan farklı alttaban, farklı kimyasallar, ortamın sıcaklığı gibi kullanılan tekniğe göre parametrelerin değiştirilmesi ile farklı ve daha gelişmiş özellikte yeni teknolojik ürünlerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Günümüz teknolojisinde yarıiletken ince filminler; uzay mekiklerinden bilgisayar işlemcilerine, ışık kaynağı olarak kullanılan LED lambalarında, transistörlerde, diyotlarda, sensörlerde, lazerlerde, güneş pillerinde, askeri savunma sistemlerinden tıpa kadar geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bu malzemeler ile ilgili yapılan teknolojik ve bilimsel araştırmalar günümüzde çok hızlı bir ivme kazanmıştır.

1.3. Katıların Kristal Yapısı

Atomların dizilme şekillerine bağlı olarak, malzemelerin yapısal özellikleri ve mikro yapıları değişmektedir. Atomların diziliş şekillerine göre amorf, moleküler ve kristal yapı olarak üç grupta incelenir.

Atomlar düzensiz bir şekilde dağılmış ise amorf yapı (düzensiz yapı) adı verilir. Amorf yapıya cam, gaz ve sıvılar örnek verilebilir. Moleküler, kuvvetli bağlarla bağlanmış atomlardan oluşur ve bu moleküler birbirleri ile zayıf bağlar sayesinde bağlanırlar. Bu tür yapılara moleküler yapı denir. Moleküler yapıya sahip maddeler, molekül içerisinde düzenli bir şekilde dizilime sahipken moleküler kendi aralarında rastgele bir dizilim meydana getirirler. Su (H_2O), karbon dioksit (C_2O), Si_2O, O_2, N_2 ve birçok polimer malzemeler moleküler yapıya sahiptirler. Atom veya atom gruplarının üç boyutlu ve belirli bir geometrik düzende sıralanması sonucu oluşan yapıya kristal yapı denir. Bütün metaller, çoğu seramik malzemeler ve bazı polimerler kristal yapıya sahiptirler (Uzun ve ark., 2003)

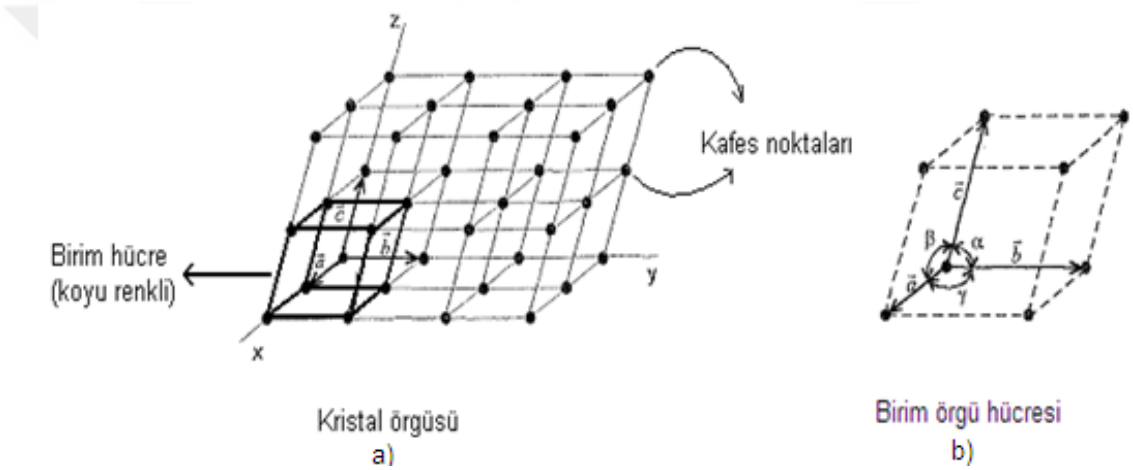


Şekil 1.1. Kristal yapı, amorf ve moleküler yapı türleri (Uzun ve ark., 2003)

1.3.1. Kristalin Yapısı ve Birim Örgü Hücresi

Kristal yapı üç boyutlu peryodik bir düzen içerisinde atomların düzenli bir şekilde diziliminden oluşur. Atomların yerleştiği bu noktaları, noktasal olarak ifade edilirse bu üç boyutlu düzenli oluşan kafes yapısına uzay örgüsü ya da kristal örgüsü

denir. Bir örgüdeki bir sıra ya da dizindeki atomlar arası uzaklık hep aynıdır. Atom ya da atom grupları birbirleriyle aynı düzenli yapıyı tekrar edecek şekilde takip ederler. İki boyutlu dizimlerde atomlar ya da atom grupları birbirlerini eşit uzaklıklarla takip eder. Fakat, üç boyutluda uzaklıklar *a*, *b*, *c* olarak ifade edilirse uzaklıklar aynı olabileceği gibi üç boyutlu örgüde uzaklıklar birbirinden farklıda olabilir. Belirli bir başlangıç noktasından çıkan ve *a b c* vektörleri ile belirtilen kristal içerisinde bir hacim kaplayacaktır. Bu hacime birim örgü hücresi denir (Durlu 1989, Uzun ve ark. 2003).



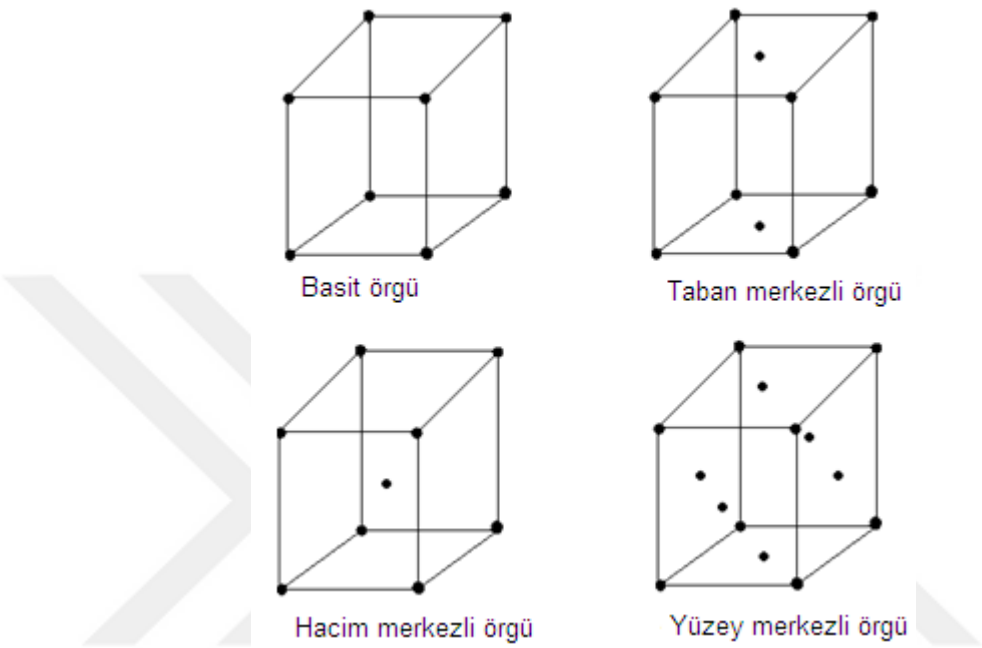
Şekil 1.2. (a) Kristal örgü ve (b) Birim hücresi (Kırmızıgül, 2008)

Bir örgüdeki atomun yeri örgü vektörü olan *r* ile hesaplanabilir. Birim örgüdeki *a*, *b*, *c* örgü vektörleri buna ait olan *a*, *b*, *c* uzunluk ve alfa (α), beta (β), gama (γ) açılarıyla belirlenir. $\vec{r}$ vektörü hesaplanırken kullanılan *m*, *n*, *p* katsayıları tam sayılardır. Bu değişkenler her kristalin kendine özgü özelliğini ortaya çıkarmamızı yardımcı olur (Uzun ve ark., 2003).

$$\vec{r} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c} \tag{1.1}$$

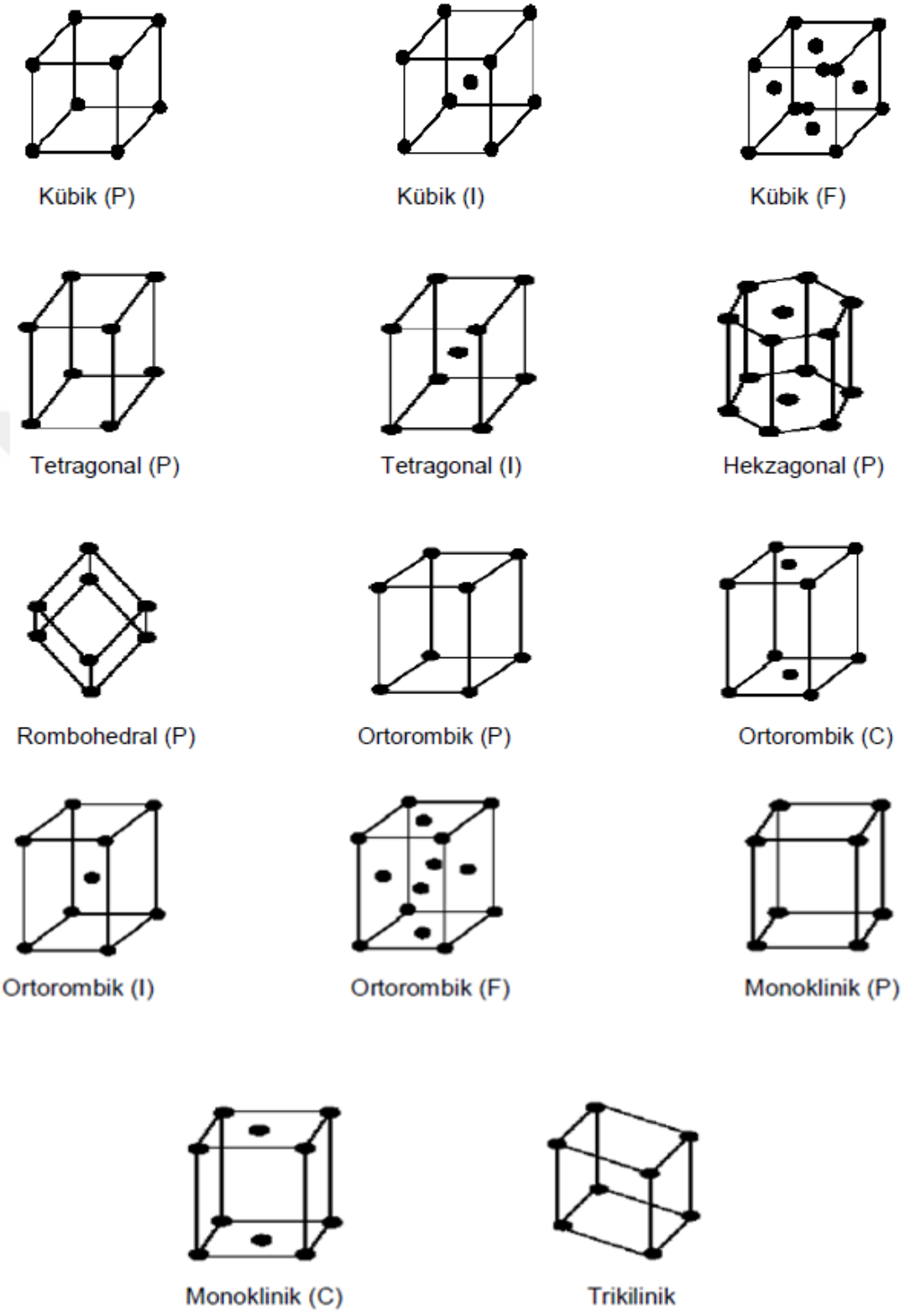
Kristaldeki atomların bulunduğu konuma göre basit, taban merkezli, hacim merkezli, yüzey merkezli örgü olmak üzere 4 ana kristal birim örgü hücresi vardır. Basit örgü, birim örgü hücresinin köşesine atomlar bulunduran örgüdür. Taban merkezli örgü, birim örgü hücresinin köşelerine, taban ve tavan kısımlarına atomların

yer almasıdır. Hacim merkezli örgüde atomların birim örgü hücresinin köşelerine ve tam orta merkezine yerleşmesidir. Yüzey merkezli örgü, köşelere ve tüm yüzeylerin orta kısmına atomların yerleşerek oluşturduğu örgüdür.



Şekil 1.3. Kristal örgü yapıları

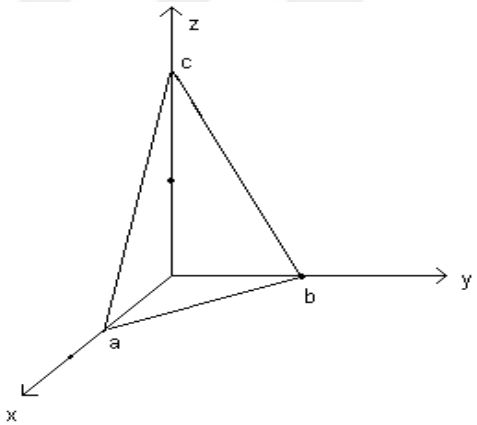
Yedi kristal sistemi vardır fakat bazıları birden farklı kristal örgü tiplerine sahip olabilir. Metallerin 14 adet farklı kristal örgüsü vardır (Uzun ve ark., 2003).



Şekil 1.4. Kristal sistemleri ve birim hücreleri (Kırmızıgül, 2008)

1.3.2. Kristal Doğrultu, Düzlem ve Miller İndisleri

Bir kristalin düzlemi ve doğrultusunu göstermek için bazı özel gösterimler kullanılır. Doğrultular [] parantez ile düzlemler ise () yuvarlak parantez ile gösterilir. Başlangıç noktasından *a, b, c* noktalarına uzanan herhangi bir doğrultuyu düşünürsek [*abc*] doğrultusu şeklinde temsil edilir. Kristallerin düzlemleri ve doğrultuları, herhangi bir orijin gösterilmeden de hesaplanır bu da Miller indisi yolu ile yapılabilir. Miller indisleri, bir düzlemin aynı doğru üzerinde olmayan üç farklı nokta birleştirilmesiyle ve bu noktaların yerleri, birim hücrenin *a, b, c* noktalarının ele alınan ekseninin x, y, z koordinatlarına göre uzunluklarının indis ile çarpılmasıyla bulunur.



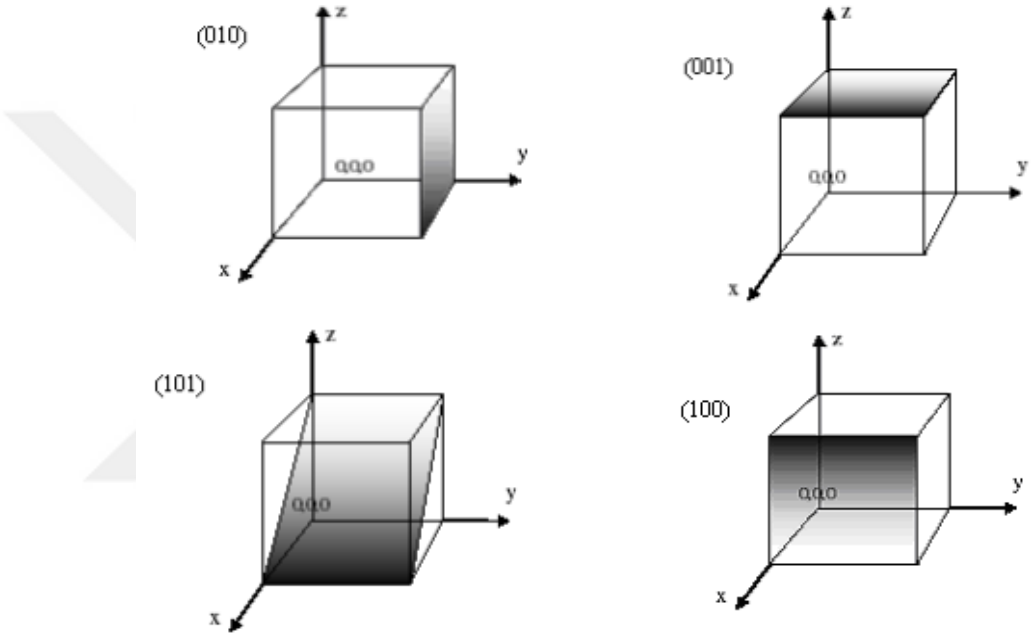
Şekil 1.5. (*a b c*) Miller indisi

Bir düzlemin Miller indisi;

a) Düzlemin birim hücre ile kesişme noktaları bulunur. *a, b, c*
b) Bu noktalara ait uzaklıkların birim hücre koordinatların oranları bulunur. *x/a, y/b, z/c*
c) Bu oranların tersi alınır *a/x, b/y, c/z*
d) Elde edilen sayılar en küçük sayılarla çarpılarak mümkün olan en küçük sayılara dönüştürülürler
e) – işaretli bir sayı ise sayının üst kısmına – konularak gösterilir.

f) Bulunan sayılar ortak parantez içine alınır. (*hkl*) Miller indisi cinsinden düzlemi şeklinde ifade edilir.

Bütün paralel düzlemler aynı Miller düzlemleri ile gösterilir. Yani () şeklinde gösterilen bir düzlem bir tek düzlemi ya da paralel düzlemler takımını gösterebilir (Durlu, 1989).



Şekil 1.6. Kübik yapıda bazı kristal düzlemleri (Kırmızıgül, 2008)

Bir (*hkl*) düzlem takımında komşu iki düzlem arasındaki uzaklık (*d*) aşağıdaki örgü denklemleri ile hesaplanabilir;

Kübik $$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}$$

Tetragonal $$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

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

Birim hücrelerin hacmi;

Kübik	$V = a^3$
Tetragonal	$V = a^2 c$
Hekzagonal	$V = 0.866 a^2 c$

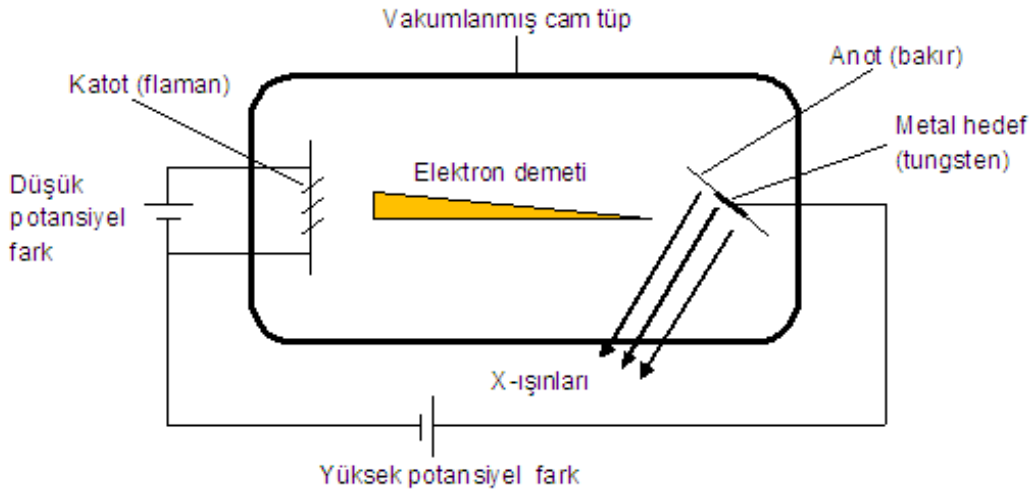
Kristallografik doğrultuların yönelimine ve değişimine göre kristalin birçok özelliği değişim göstermektedir. Miller indisleri kullanılarak doğrultular bulunmaktadır. Karşılıklı indisli düzlemlere kristal doğrultuları diktir ve kristal örgüsünde herhangi bir doğrultuya paralel olarak, sonsuz sayıda doğrultular vardır. Doğrultu vektörü $[hkl]$, karşılıklı (hkl) düzlemine diktir.

Kübik kristal için $[h_1k_1l_1]$ ve $[h_2k_2l_2]$ doğrultuları veya $(h_1k_1l_1)$ ve $(h_2k_2l_2)$ düzlemleri arasındaki ϕ açısı;

$$\cos\phi = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + I_1I_2}{(h_1^{\,2} + k_1^{\,2} + I_1^{\,2})(h_2^{\,2} + k_2^{\,2} + I_2^{\,2})^{\frac{1}{2}}} \qquad (1.2)$$

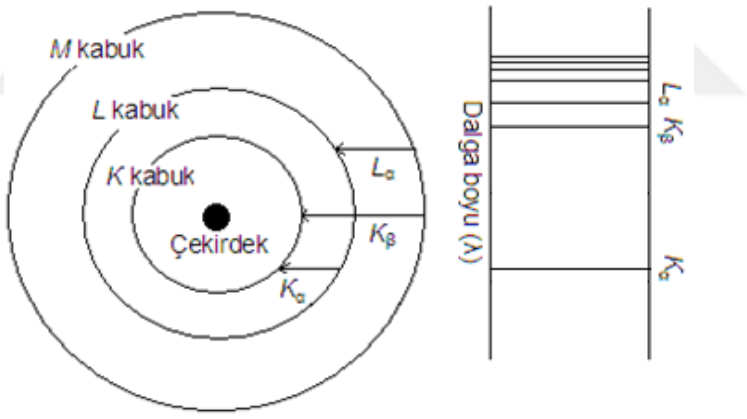
(Caferov, 1998).

1.4. X-Işınları Kaynağı



Şekil 1.7. X-ışını kaynağı

Vakumlanmış katot ışın tüpüne yüksek gerilim uygulandığında katot tarafında kopan elektronlar yüksek gerilimin etkisi ile katotdan kopan elektronlar anota doğru ivmeli bir şekilde hareket ederek yüksek hızlara ulaşırlar. Daha sonra bu hızlı elektronlar metal anot hedefe çarptıktan sonra yavaşlar bu yavaşlama ile sürekli spektruma sahip X-ışınları olarak ortama yayılırlar. Eğer enerjisinin büyük bir kısmını hedef metal anot atomları tarafından soğrulur ise yeterli kinetik enerjiye sahip elektronlar metal anotun K, L, M yörüngelerinin herhangi birisinden elektron sökerek atomu uyarılmış hale getirebilirler. Bu durumda iç yörüngüdeki elektron uyarılır ve başka bir yörüngeye geçer. Tekrar eski yörüngesine dönerken sürekli spektruma ek olarak, keskin çizgili X-ışınları yayılır. K, L, M yörüngelerinden birinde bu yayınım olabilir. Hedef atomların cinsine göre keskin çizgili spektrum farklılık gösterir. Kristaller için X-ışını kırınım deneylerinde genellikle şiddetli k serisi çizgileri kullanılır (Özdoğan ve ark., 2014).



Şekil 1.8. Karakteristik X-ışını tipleri (Özdoğan ve ark., 2014)

Şekil 1.8. de görüldüğü gibi karekteristik çizgileri, hedef metalin atomik yapısı ile ilgilidir. K ve M kabuklarındaki bir elektron enerjisi yaklaşık olarak ;

$$E_n = -\frac{13.6Z^2}{\Pi^2} \text{ eV} \qquad (1.3)$$

(1.3) eşitliği kullanılarak bulunur. Salınan X-ışınının enerjisi ise

$$\Delta E = E_m - E_k = \frac{hc}{\lambda} \tag{1.4}$$

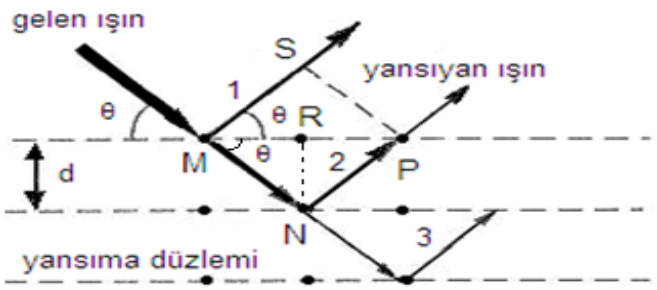
(1.4) eşitliği ile hesaplanır. Bu enerji değerine görede karakteristik X-ışınının dalga boyu (λ_x);

$$\lambda_x = \frac{hc}{\Delta E} \tag{1.5}$$

(1.5) eşitliği yardımı ile elde edilir. Kristal atomları ya da düzlemleri arasındaki uzaklık 1 ile 100 *Å* aralığında olduğu için elektromanyetik ışın olan X-ışını ile kristalin yapısı incelenebilir. Yani X-ışını dalga boyu, kristal düzlemleri arasındaki uzaklık olan (örgü sabiti) $1 \leq \lambda \leq 100$ *Å* aralığında değerler alır. Gönderilen ışığın dalga boyu kristal örgü sabiti a'dan büyük olamaz. Kristallerin yapısı incelenirken X-ışının seçilmesinin en önemli nedeni budur (Akat, 2010).

1.4.1. Bragg Kırınımı

Bir kristal malzeme üzerine tek renkli bir X-ışını demeti gönderildiğinde, bu kristal malzemedeki paralel atomik düzlemleri tarafından X-ışını demetinin gelme açısına bağlı olarak kırılır ya da yansıtılır. Paralel düzlem takımı içindeki farklı düzlemler tarafından yansıtılan ışınlar üst üste gelerek kuvvetlendirici girişim oluştururlar. Bu nedenle farklı yanısıma doğrultularında değişik doğrultularda kırınım meydana getirir (Dikici, 2012).



Şekil 1.9. Bir kristalin atomik düzlemlerinden X-ışınlarının yansıması (Dikici, 2012)

Kristalde, komşu atomlar arasındaki uzaklık *d* olarak alınırsa bu düzlemler gelen ışınların büyük bir kısmı birinci düzlemden, çok küçük bir kısmı da ikinci düzlemden yansır. Daha derinde bulunan düzlemdeki yansımaların çok çok küçük katkısı vardır.

$$\text{yolfarkı} = n\lambda \quad (n=1, 2, 3, \ldots) \tag{1.6}$$

Buna göre Şekil 1.9'da 1 ve 2 düzlemdeki ışın demetleri arasındaki yol farkı, MN=NP eşit olmasından dolayı yolfarkı = MN + NP - MS =2 MN – MS ve $MP = 2MR$ eşittir. X-ışını demeti θ açısıyla gönderilirse θ_2 açısı ile kırınımı uğrarlar ($n=\sin\theta_1/\sin\theta_2$), $\theta_1= \theta_2=\theta$;

$$MN = \frac{d}{\sin\theta} \tag{1.7}$$

$$\tan\theta = \frac{d}{MR} \text{ ve } MR = \frac{d}{\tan\theta} \tag{1.8}$$

$$MP = 2\left(\frac{d}{\tan\theta}\right) \tag{1.9}$$

$MS = MP\cos\theta$ eşittir ve 1.8 denklemi bu eşitlikte yerine yazılırsa;

$$MS = \frac{2d}{\tan\theta}\cos\theta \tag{1.10}$$

$$yolfarkı = 2d\left(\frac{1}{\sin\theta} - \frac{\cos^2\theta}{\sin\theta}\right) \tag{1.11}$$

yukardaki denklem yerine $\text{Cos}\theta^2\text{-1}=\sin\theta^2$ yazılırsa;

$$yolfarkı = 2d\sin\theta = n\lambda \qquad (n=1, 2, 3, \ldots) \tag{1.12}$$

Aynı doğrultuda ilerleyen ışınların yol farkı dalga boyunun tam katlarını bulundurur. Bundan dolayı bu ışınların tepe ve çukurları üst üste gelerek yapıcı girişim oluşturması sonucu Bragg yasası olan yol farkı (1.6) eşitliği ile elde edilir veya n=1 için Bragg yasasından;

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2d} \tag{1.13}$$

kırınım olayı $\lambda \leq 2d$ olduğunda gerçekleşir (Akat, 2010).

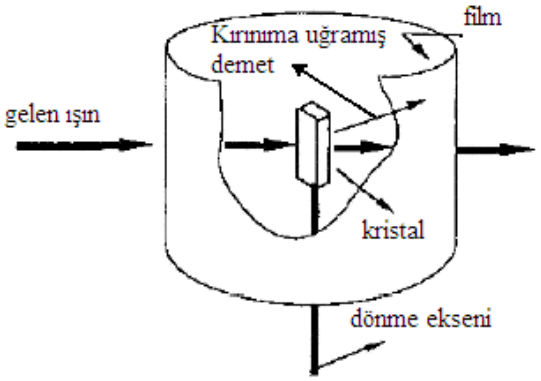
1.4.2. X-Işınları Kırınımındaki Temel Deneysel Teknikler

X-ışınları kırınım incelemelerinde en çok tercih edilen metodların hesabı açı ve dalga boyuna bağlıdır. Bragg kanunu $\lambda n = 2d\sin\theta$ olduğunda kırınım oluşur. Bragg kanunu herhangi bir kristal için λ ve θ'ya bağlı olarak değişir. Rastgele konmuş monokristalin üzerine monokromatik X-ışın demeti gönderildiğinde genel olarak hiçbir kırınım demeti oluşmaz. Bragg kanununun oluşması için deney devamınca λ ya da θ'nın sürekli olarak değişmesi gereklidir. λ ve θ'ya bağlı olarak üç temel kırınım metodu vardır (Cullity, 1958).

1.4.2.1. Dönen Kristal Method

Bu yöntem, tek kristal malzeme ölçümü için kullanılır. Deneysel düzenek Şekil 1.10'da görüldüğü gibidir. Bu düzenek eşmerkezli silindirin iç kısmında fotografik film ve silindirin tam orta kısmında iğne bulunduran parçalardan oluşmaktadır. Numune, düzenekteki iğne ucuna yerleştirilir ve bu iğne dönme hareketine sahiptir. Monokromatik λ dalga boylu gelen ışık, ilk olarak kristal üzerine düşmesi için ayarlanır. Numune döndürülür ve λ, θ'ya bağlı Bragg yasasına uygun bir şekilde kırınım koşullarının oluşması sağlanır. Bu olay meydana geldiğinde kırınım demeti, kristal üzerine düştüğünde film üzerine lekeler meydana geldiği

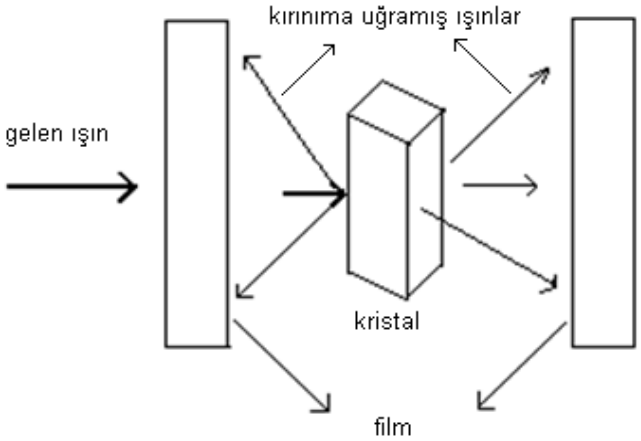
görülür. Çeşitli kristal yönelimleri için kırınım desenleri kayıt edilirken hücredeki atomların birim hücredeki biçim ve büyüklükleri tespit edilir (Omar, 1993).



Şekil 1.10. Döner kristal metodu (Dikici, 2012)

1.4.2.2. Laue Metod

Tek kristal yönelimi ve simetrisi hızlı bir şekilde bu metod ile tespit edilebilir. Deneysel düzenek Şekil 1.11'deki gibidir. Beyaz X-ışını demeti, sürekli dalga boyu spektrumu kristal üzerine düşürüldüğünde meydana gelir. Gelen ışının yönelimi kısmen ayarlanabilir. Düz film, numunenin arkasında ve önünde yer alır. X-ışını demeti heterojen olmasından dolayı kristal, aralarında d uzaklığı bulunan ve gelen ışınla θ açısı yapan her düzlem takımı için uygun bir dalga boyu seçer ve seçilen dalga boylu ışını kırınıma uğratır. Daha sonra kırınım demeti film üzerine lekeler olarak kayıt edilir. Fakat sadece dalga boyu doğrultusundaki lekeler ölçülemez, bundan dolayı bu doğrultudaki düzlemler arası aralık değeri belirlenemez. Ayrıca birim hücrenin şekli ve simetrisi belirlenir ancak mutlak büyüklüğü hesaplanamaz (Dikici 2012, Omar 1993).



Şekil 1.11. Laue yöntemi için deneysel düzenek (Dikici, 2012)

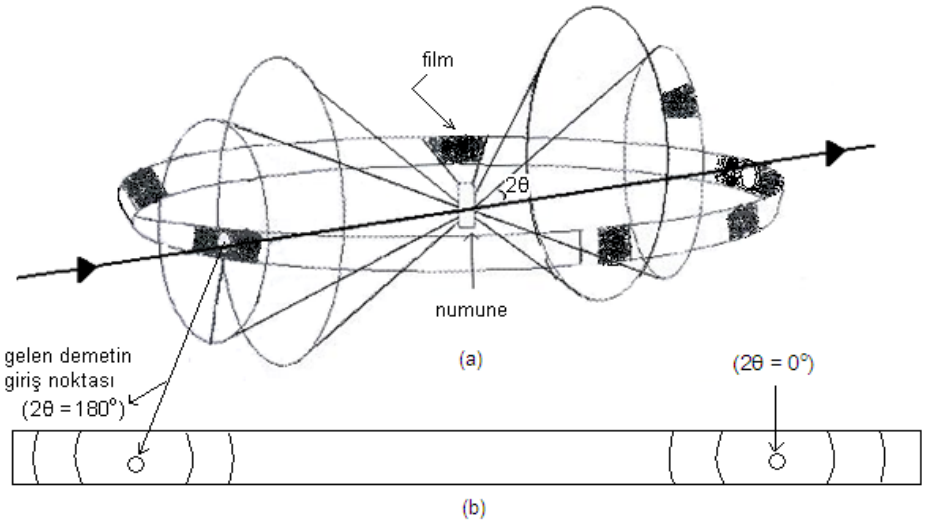
1.4.2.3. Toz Metod

Toz metodu için malzemenin kristal yapılı oması gereklidir ve gelen tek dalga boylu X-ışınları ile Bragg yasasını uyacak şekilde açılar yapan örgü düzlem takımlarının var olması durumunda gerçekleşebilir (Başaran, 1999). Kristal malzeme toz haline getirildikten sonra X-ışını kırınımı ölçümü sonuçlarında kristal yapı hakkında sırası ile şu bilgileri elde edebiliriz;

1) Kristal malzemeyi oluşturan atomlar belirlenir
2) Kristal yapı
3) Örgü parametreleri
4) Scherrer formülü ile toz taneciklerinin büyüklükleri hesaplanabilir
5) Yapıdaki safsızlıklar tespit edilebilir
6) Başka düzlemlerden gelen yansımalarla karşılaştırılarak malzemede bir yönelimin olup olmadığı öğrenilebilir (Kabak, 2004).

Örgü düzlemlerinin herhangi birindeki tanelerin bazıları gelen X-ışını ile θ Bragg açısı yapacak şekilde yönlenmişlerdir. Şekil 1.12(a)'da aynı örgü düzlem takımlarındaki farklı tanelerden yansıyan ışık demetleri görülmektedir ve gelen ışın eksen olarak düşünülürse yarı tepe açısı 2θ olan bir koniye dönüşür; bu X-ışını konisinin film ile kesiştiği noktada fotoğraf üstünde bir çizgi meydana gelir. Şekil

1.12(b)'de bu toz fotoğrafı örnek olarak gösterilmiştir. Her çizgi örgü düzlemlerindeki farklı takımların oluşturduğu kırınım desenidir. Yapı, ölçülen θ değerlerinden ve yansımaların bağıl şiddetleri yoluyla tespit edilir. Bragg denklemi $2d\sin\theta = n\lambda$ göre θ açısı 90°'ye çok yakın ise, d'de kesin değerine çok yakındır. Bu nedenle birim hücre boyutlarının çok çok yakın değerleri hemen hemen geri yansımış ışınımlardan elde edilebilir (Başaran, 1999).



Şekil 1.12. Debye Scherrer toz metodu: (a) filmin gelen demet ve cisme nazaran durumu (b) açıldığında filmin görünüşü (Cullity, 1958)

1.5. Yarıiletkenler

Tüm metal ve metal olmayan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde elektronların önemli bir rolü vardır. Ayrıca metal ve metal olmayan malzemelerin elektron enerji spektrumu da birbirinden farklıdır. Metaller özdirençleri çok düşük olması nedeniyle çok iyi iletkenlerdir ve sıcaklık arttıkça iletkenliği düşer. Metal olmayanlarda valans bandı tamamen dolu ve iletim bandı ise tamamen boştur. Alçak sıcaklıklarda bu malzemeler yalıtkan olarak davranırlar. Fakat bazı metal olmayanlar sıcaklık artışı ile ısısal uyarılırlar bundan dolayı valans bandındaki bazı elektronlar iletim bandına geçiş yaparlar. Bunun sonucu olarakta elektriksel iletkenlik sıcaklık artışı ile üstel bir şekilde hızlıca değişir. Bu tip malzemeler yarıiletken olarak tanımlanır. Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği

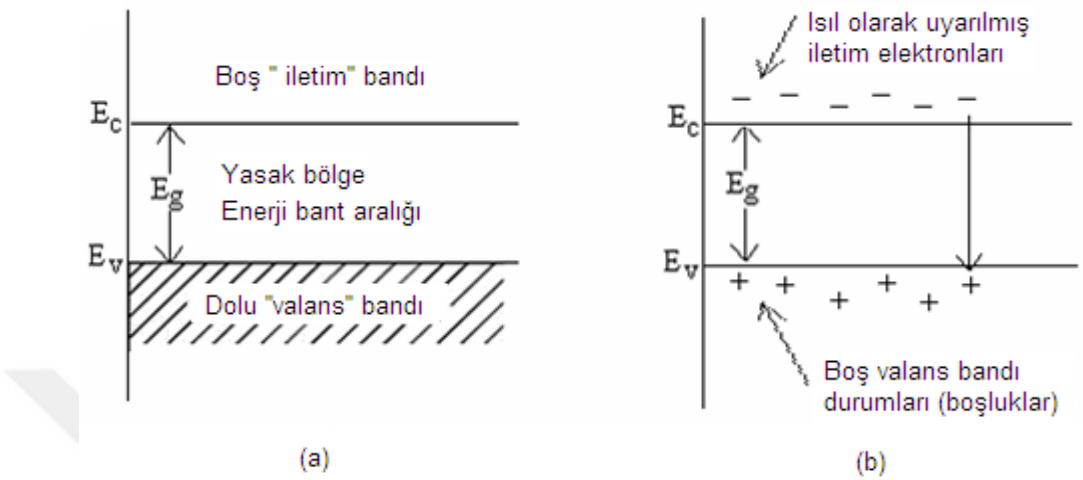
safsızlıklardan etkilenir. Eğer yarıiletken malzemede safsızlık yok ise enerji band aralığı (E_g) k_BT den çok büyükse malzeme yalıtkan gibi davranır. Ancak atomik yapıya safsızlıkların ve kristal yapı kusurlar eklenirse atomik yapıda meydana gelen bu değişim sonucunda bölgesel enerji düzeylerini oluşturur ki buda yasak bandın bir kısmının doldurmasına sebeb olur. Bu tür enerji düzeylerinin seviyesi ve dağılımı safsızlık ve kusurların yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik sıcaklıkla üstel bir şekilde artacaktır. En iyi yalıtkan ile en iyi iletken arasındaki elektriksel iletim oranı 10^{24} kat gibi büyük bir değerdir (Durlu, 1989).

Yarıiletken bileşikler kovalent bağlıdırlar ve oda sıcaklığında, yarıiletkenlerin elektriksel özdirençleri 10^{-2}-10^{9} Ωcm aralığında değişir. Ayrıca, sıcaklık etkisinde bırakılan yarıiletkenlerin özdirençleri hızlı bir şekilde değişir. Çoğu yarıiletken 10^{14} Ωcm den daha büyük değerlerde yalıtkan olurlar bu nedenle saf yarıiletkenlerin çoğu mutlak sıfırda yalıtkana dönüşürler (Kittel, 1996).

Isı enerjisi, ışık, elektrik alan, basınç, gama ışınları, hızlı parçacıkların (elektronların, protonların, nötronların, iyonların vb) bombardımanı gibi etkiler yarıiletken malzemede serbest yük taşıyıcılarının (elektronların ve boşlukların) yoğunluğunu arttırmaktadır.

Serbest yük taşıyıcılarının oluşum şekilleri yarıiletkenin kristal yapısına, kompozisyonuna ve katkı atomlarının bulunması ile ilişkilidir. Çok az miktardaki (%10^{-3}-10^{-8}) katkı atomları yarıiletkenin iletkenliğini keskin bir şekilde (10^{-8} kata kadar) değiştirebilir (Caferov, 1998).

1.5.1. Yarıiletkenlerin Bant Teorisi



Şekil 1.13. Saf bir yarıiletkenin (a) mutlak sıcaklıkta (0 K) ve (b) oda sıcaklığında (300 K) iletim ve valans bandları ve ısıl olarak uyarılmış elektron ve boşluklar (Göde, 2007)

Mutlak sıfır sıcaklığında (0 K) yarıiletkenlerde valans bant altındaki tüm seviyeler tamamen dolar ve valans bandının hemen üzerindeki ilk boş seviye ise iletkenlik bandıdır. Valans bant (E_v) ve iletim bandı (E_c) arasında herhangi bir elektron bulunamaz çünkü elektronlar bu aralıktaki kuantum enerji seviyelerinin değerlerini alamazlar. Bundan dolayı bu iki bant arasındaki bu boşluğa enerji bant aralığı (E_g) denir. Enerji bant aralığı bu iki bandın $E_g=E_c-E_v$ farkına eşittir. 0 K de yarıiletkenler yalıtkan gibi davranırlar ancak üzerine herhengi bir enerji kaynağı (termal, optik, mekanik enerji…) etkirse bant genişliğine bağlı olarak valans bandındaki elektronlar uyarılabilirler. Yani enerji bant aralığına eşit ya da daha yüksek bir enerji ile elektron uyarılmalıdır. Uyarılan elektronun valans bandından iletim bandına geçmesi ile yarıiletken malzeme iletkenlik özelliği gösterir. Geçiş yapan bu elektronlar arkalarında boşluk (deşik) bırakırlar. İletim bandı enerjisi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

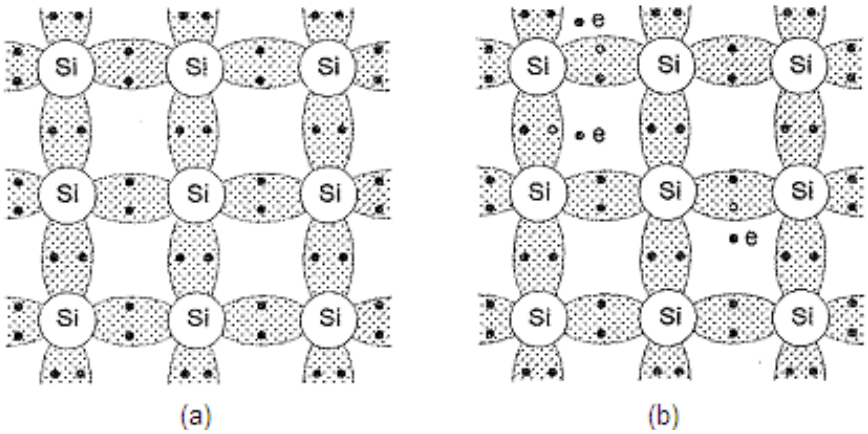
$$E_c(k) = E_g + \frac{\hbar k}{2m} \tag{1.14}$$

İletim elektronları genellikle iletim bandının tabanında yer aldığı için o bölgede enerjisi küresel olarak düşünülerek ele alınır. Valans bandının enerjisi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$E_v(k) = E_g + \frac{\hbar k}{2m} \tag{1.15}$$

Isınma etkisiyle kristal örgü sabiti değişir bunun sonucu olarakta enerji bant aralığıda (E_g) değişir. Bu değişim çok küçüktür (Erken 2015, Göde 2007).

1.5.2. Saf Yarıiletkenler

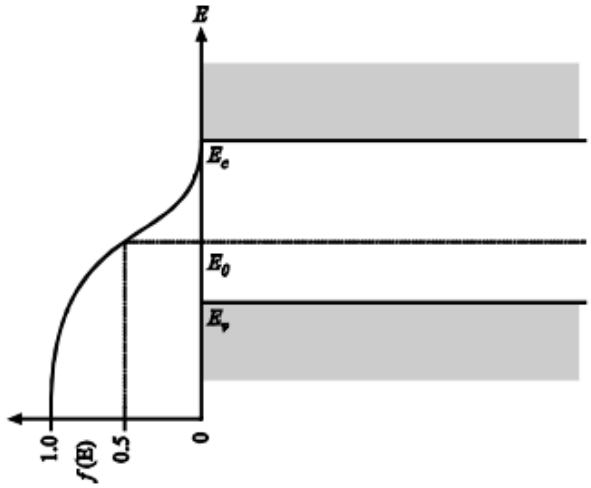


Şekil 1.14. Silisyum örgüsünde atomlar arası bağların gösterimi: a) T=0 b) T›0 (Caferov, 1998)

Saf yarıiletken silisyum örgüsündeki kovalent bağların iki-boyutlu olarak Şekil 1.14'deki gibidir. Silisyum iyonları (+4 yüklü) örgü noktalarına yerleşir. Her silisyum iyonu dört valans elektronuna sahiptir. Valans elektronları kovalent bağın oluşmasını sağlar ve Şekil 1.14'de koyu noktalarla gösterilmektedir.

Mutlak sıfır sıcaklığında saf yarıiletken serbest yük taşıyıcılara sahip değildir. Şekil 1.14(a) için mutlak sıfırda kovalent bağlarda elektronlar eksiksiz olarak yerleşir ayrıca ısı enerjisinin etkisi ile bazı kovalent bağlarda kopma olur ve bundan dolayı kristal örgüsündeki atomlardan elektron kopar ve serbest elektron haline gelir. Bu elektronlar iletkenliğe katkısı olan elektronlardır. Ayrıca elektronun yer

değiştirmesiyle arkasında boşluk bırakırlar ve oluşan bu boşluğa hol denir (Şekil 1.14(b)). Böylece ısının etkisiyle silisyumda elektron ve boşluk çifti oluşur. Valans bağların kopmasının sonucu serbest elektronlar ve boşlukların sayısı eşit olacak şekilde serbest taşıyıcı yükler oluşur. Enerji bant aralığı (E_g) saf yarıiletkende ana atomlardaki bağların kopma enerjisi ya da elektron-boşluk çiftlerin aktivasyon enerjisi üzerine bilgi verir. Eğer bir yarıiletkene dışardan elektik alan uygulanırsa elektronlar ve boşlukların bir yöne doğru yönelmesi sonucu yarıiletken üzerinde elektrik akımı oluşur (Caferov, 1998).



Şekil 1.15. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonuyla yarıiletken bant aralığı ilişkisi (Güneri, 2009).

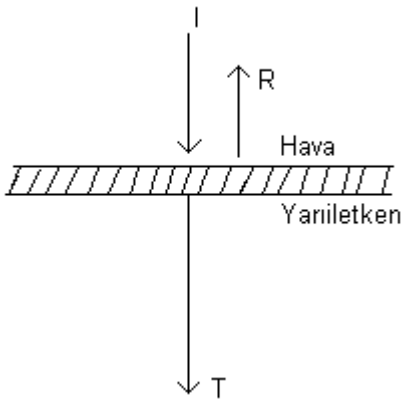
Fermi enerjisi, saf bir yarıiletkende iletkenlik bandı tabanı ve valans bandı tavanının tam orta kısmında yer alır. Şekil 1.15'de Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ile yarıiletken bant aralığı ilişkisidir ve elektron geçişlerinin sadece E_v enerjili kuantum durumundan E_c enerjili duruma geçtiği düşünülür (Güneri, 2009).

1.6. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri

1.6.1. Yarıiletkenlerde Işığın Soğrulması

Bir yarıiletken üzerine gelen ışın enerjisi, enerji bant aralığından büyük ise ($h\upsilon \geq E_g$), atomları uyarır yani elektron-boşluk çiftleri oluşturarak yarıiletken

tarafından soğurulur. $h\upsilon<E_g$ ise ışınım enerjisini yarıiletken atomlarına aktararak yarıiletkenin ısınmasına neden olur ve kaybolur ya da malzemenin içinden geçip gider. Gelen ışınımların R kadarı geriye yansır, geri kalanı (T) ise yarıiletken içine girer. Bu durumda;



Şekil 1.16. Bir yarıiletken üzerine gelen tek renkli bir ışınım (Engin, 1995)

$n_c=n$-ik formülü ile malzemenin kırılma indisi (n_c) hesaplanır. Burda n kırılma indisi ve k sönüm katsayısına bağlı olarak yansıma (R):

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \tag{1.16}$$

elde edilir.

Belli bir dalga boyunda ışığın soğurulması, ışığın şiddeti gelen foton sayısı ile orantılıdır ve yarıiletkende foton akısının (Φ) azalışı;

$$\phi(x) = \phi(x_0)e^{-\alpha(x-x_0)} \tag{1.17}$$

dır. Dalga boyuna bağlı olan α'ya soğurma katsayısı denilmektedir. α, foton akısının ne kadar malzeme içine gireceği ile ilgili bir parametre olduğundan güneş pili tasarımında önemlidir.

Dalganın yayılma hızı;

$$v = \frac{c}{n_c} \text{ veya } \frac{1}{v} = \frac{n}{c} - \frac{ik}{c} \tag{1.18}$$

Işınımla ilgili elektrik alan bir düzlem dalga olarak (1.19) eşitliğindeki gibidir.

$$E = E_0 e^{i2\Pi v(t-\frac{x}{v})} \tag{1.19}$$

$$E = E_0 e^{i2\pi vt} e^{-\frac{i2\pi xnv}{c}} e^{\frac{2\pi vkx}{c}} \tag{1.20}$$

olur. (1.20) bağıntısındaki son terim sönüm çarpanıdır. Işınımın gücü, elektrik alanın karesiyle azaldığından (1.20) bağıntısının karesi alınarak,

$$E^2 = E_0^2 e^{-\frac{4\pi vk}{c}x} \tag{1.21}$$

(1.17) ile (1.21) eşitlikleri karşılaştırıldığında

$$\alpha = \frac{4\pi vk}{c} \tag{1.22}$$

soğurma katsayısı (α) elde edilir. v ışınım frekansıdır (Engin, 1995).

1.6.2. Temel Soğurma

Temel soğurma, doğrudan bant geçişli ve dolaylı bant geçişli soğurma olmak üzere ikiye ayrılır. Doğrudan geçişlerde elektrona fotonun enerjisi yeterli iken dolaylı geçişte foton artı birde fonon enerjisi gereklidir.

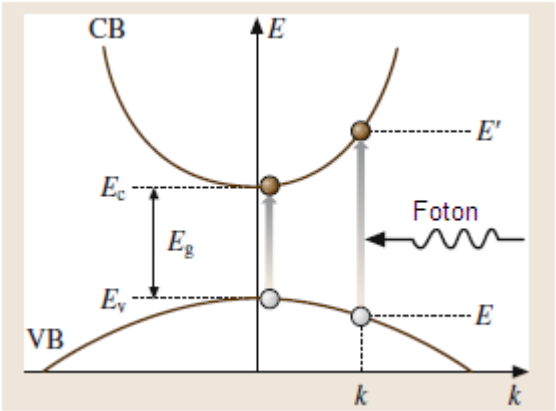
$$E_f = E_i + h\nu \tag{1.23}$$

E_i ve E_f sırası ile elektronun ilk ve son enerjisi olan valans bant ve iletim bandaki enerjileridir.

$$\vec{k}_f = \vec{k}_i + \vec{q} \tag{1.24}$$

k_f ve k_i elektronun momentidir. q ise soğrulan fotonun dalga vektörüdür (Omar 1993, Kasap ve Capper 2006).

1.6.2.1. Doğrudan Bant Geçişi ve Soğurması



Şekil 1.17. Fotonun soğrulması ile valans bandından iletim bandına doğrudan bant geçişi (Kasap ve Capper 2006)

Doğrudan elektronun fotonun enerjisi alarak valans bandından iletim bandına geçişi söz konusudur. Bu yüzden fotonun frekansı ($\nu \geq (E_g/h)$) olmak zorundadır. Doğrudan geçişlerde, fotonun dalga vektörünün optiksel etkisi oldukça küçüktür. Bu yüzden ihmal edilebilir.

$$\vec{k}_f = \vec{k}_i + \vec{q} \tag{1.25}$$

$$\vec{k}_f = \vec{k}_i \tag{1.26}$$

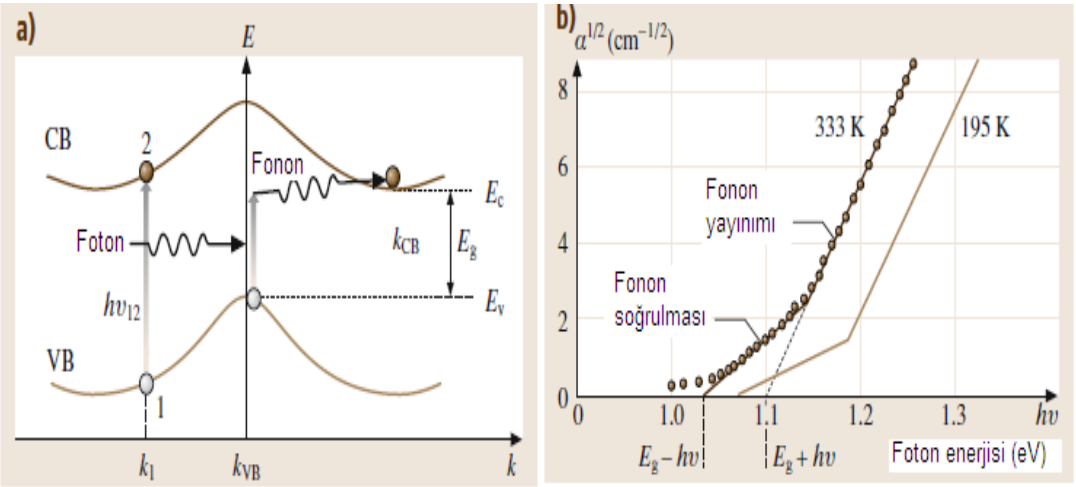
K uzayında direk geçiş durumunda valans bandı tepesi ve iletim bandının tam alt kısımları birbirlerine denk geldiği an k=0 dır ve bu geçişte elektron geçişi valans bandı tepesinden iletim bandının tam alt kısmına en yakın olacak bir şekilde meydana gelir. Yani uyarılan elektronun valans bandınki k vektörü ile iletim bandındaki k vektörü aynıdır.

$$\alpha(h\nu) \cong A^*(h\nu - E_g)^n \tag{1.27}$$

$$\alpha(h\nu) \cong A^*(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \tag{1.28}$$

Fotonun soğrulması (α), A^* bantlarla ilgili özellikleri içeren bir sabittir (Omar 1993, Kasap ve Capper 2006).

1.6.2.2. Dolaylı Bant Geçişi ve Soğurması



Şekil 1.18. (a) Dolaylı bant geçişi (fonona bağlı) (b) Silisyumun iki farklı sıcaklıktaki temel soğurması (fonon yanımı ve soğrulması) (Kasap ve Capper 2006)

Dolaylı bant geçişlerinde valans bandı tepesi ve iletim bandının en alt kısmı aynı *k* dalga vektörüne sahip değildir bundan dolayıda valans ve iletkenlik bantları arasında geniş bir aralık vardır. Ayrıca dolaylı bandın eşik enerjisi, enerji bant aralığından daha büyüktür. Yeterli eşik enerjisi için fonon yayınım ya da soğrulması gereklidir. Dolaylı bant geçişlerinde enerji korunur fakat momentum korunmaz ancak fonon yayınımı ya da soğrulması yoluyla momentum korunabilir (Kittel 1996, Omar 1993, Erken 2015). Fonunun enerjisine (E_p) bağlı olarak enerjinin korunum yasası; soğrulma ve yayınım için aşağıdaki denklemlerdeki gibi olur.

Fonon yayınımıyla geçiş;

$$h\nu = E_f - E_i + E_p = E_g + E_p \qquad (h\nu \rangle E_g + E_p) \tag{1.29}$$

Fonon soğrulmasıyla geçiş;

$$h\nu = E_f - E_i - E_p = E_g - E_p \qquad (h\nu \rangle E_g - E_p) \tag{1.30}$$

bu bağıntılar durum yoğunluğun da yerine yazılır. Bose-Einstein istatisiği ile fonon sayısı da hesaplandıktan sonra dolaylı bant geçişi için fonon yayınım ve soğurma katsayısı bulunmuş olur.

Fonon yayınım katsayısı;

$$\alpha(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^n}{1 - \exp\left(-\frac{E_p}{k_B T}\right)} \tag{1.31}$$

Fonon soğurma katsayısı;

$$\alpha(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^n}{\exp\left(\frac{E_p}{k_B T}\right) + 1} \tag{1.32}$$

Hem fonon yayınım hem de fonon soğurması varlığında soğurma katsayısı (1.31 ve (1.32) bağıntıların toplamıdır. n=2 olursa izinli dolaylı bant geçişlidir eğer n=3 değerini alırsa yasaklı dolaylı bant geçişlidir (Erken, 2015).

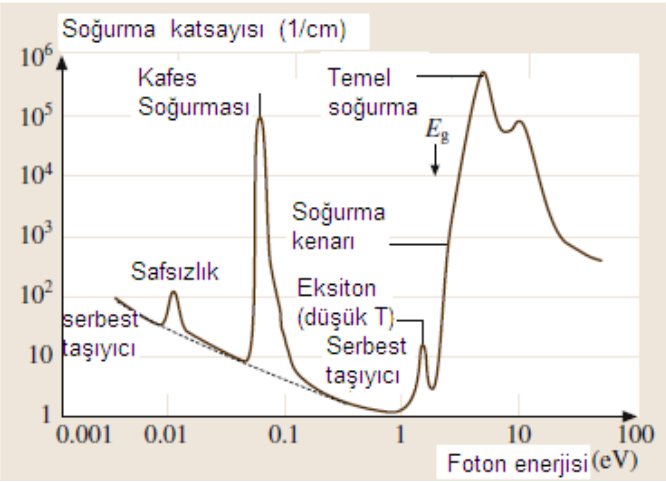
1.6.3. Eksiton Soğurması

Coulomb etkileşim etkisi ile elektron ve boşluk bir çift olarak hareket ederler. Bu elektron-boşluk çifti eksiton olarak tanımlanır. Eksiton bağlanma enerjisi çok küçütür yaklaşık olarak 0,01 eV dir. Bundan dolayı iletim bandı kenarının altında eksiton seviyeleri yer alır ve değerlik bandında uyarılan elektronlar eksiton seviyelerine geçişi gerçekleşir. Oda sıcaklığında eksiton geçişleri, eksiton enerji seviyelerinin enerjisi çok az olmasından dolayı gerçekleşmez (Kittel 1996, Omar 1993).

$$h\nu = E_g - E_{ex} \tag{1.33}$$

E_{ex} eksitonun bağlanma enerjisidir.

1.6.4. Bir Yarıiletkende Olası Optiksel Soğurmalar



Şekil 1.19. Yarıiletkende foton enerjisine karşı olası soğurma durumları (Kasap ve Capper 2006)

Bir yarıiletkenin temel optiksel özellikleri; kırılma indisi (n), sönüm katsayısı (k) ve soğurma katsayısı (α) ile ilişkili olmasının yanı sıra sıcaklık, basınç, alaşım, yabancı maddeler vb. parametrelere de bağlıdır. Soğurma katsayısı ve foton enerjisi arasındaki ilişki Şekil 1.19'da olası soğurma durumları gösterilmiştir ve sırası ile açıklanacak olursa;

A) Serbest elektronlar ve boşlukların varlığına bağlı olan serbest taşıyıcı soğurması foton enerjisi arttıkça azalan bir etki gösterir.
B) Çeşitli katkılardan dolayı kirlilik soğurma bandı (genellikle dar).
C) Kafes soğurması (Reststrahlen) burada ışınım kristal iyonlarının titreşimlerinden dolayı soğrulurlar.
D) Eksiton soğurması genellikle düşük sıcaklıklarda gözlenir ve temel soğurma kenarına yakındır.
E) Fotonların temel soğurması, foton tarafından uyarılan bir elektronun valans bandından iletim bandına geçmesidir (Kasap ve Capper 2006).

1.7. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri

1.7.1. Elektron ve Boşluk Mobilitesi ve Sürüklenme Hızı

Yarıiletken malzemeye elektrik alan (E) uygulanmadığında yük taşıyıcıların ısısal hareketinden dolayı gelişi güzel düzensiz hareketleri vardır. Isısal hareketin ortalama kinetik enerjisi ($3k_BT$)/2 dir. T kelvin cinsinden sıcaklıktır, k_B Boltzmann sabittidir. Elektronun ısısal hızı;

$$\frac{m_n}{2} v_{thn}^2 = \frac{3k_B T}{2} \tag{1.34}$$

$$v_{thn} = \left(\frac{3k_B T}{m_n} \right)^{1/2} \tag{1.35}$$

Burada, m_n elektronunun etkin kütlesidir. Boşlukların ısısal hız denklemi elektronlarınkiyle aynıdır sadece etkin kütle m_p dir. Isısal hareketin yönü rastgele olduğu için aynı yük taşıyıcılar yarıiletken içinde herhangi bir yöne doğrudur. Bundan dolayı elektrik akımı sıfırdır. Eğer elektrik alan uygulanırsa bu durum değişir. Elektron sürüklenme hızı, elektrik alan içerisinde elektron hareketin için newton ikinci kurallı ile yaklaşık olarak hesaplanır. Elektrik alan içerisinde serbet elektronlar ivmelenir ve denklem aşağıdaki gibi olur. Serbest elektron kütlesine bağlı olarak;

$$m_e \frac{dv_n}{dt} = -qE \tag{1.36}$$

Burada, E elektrik alandır. Yarıiletkende serbest elektron kütlesinin yerini etkin kütle alır.

$$m_n \frac{dv_n}{dt} = -qE = F \tag{1.37}$$

Elektronların hız kazanmasıyla atom denge durumundaki etrafındaki titreşimler, safsızlıklar ve kristal bozukluğu yüzden elektronlar çarpışmalar yaparlar. Bu elektron sürüklenme hızını sınırlar bu yüzden bir sınırlama terimi eklenir.

$$m_n \frac{dv_n}{dt} = -qE - m_n \frac{v_n}{\tau_{np}} \tag{1.38}$$

τ zaman sabittidir. Düşük elektrik alanda τ elektrik alana bağlı değildir. Yüksek verimli bir elektrik alanda elektronun enerji kazanmasından dolayı bu zaman elektron enerjisinin fonksiyonu olur. Elektronun iki çarpışma arasında ortalama yola serbest (λ) yol denir.

$$\lambda_n = v_{thn}\tau_{np} \tag{1.39}$$

v_{thn} elektronun sürüklenme hızıdır. Düşük frekansta $w<<1/\tau_{np}$

$$m_n \frac{dv_n}{dt} = -qE - m_n \frac{v_n}{\tau_{np}} \tag{1.40}$$

$$qE = -m_n \frac{v_n}{\tau_{np}} \tag{1.41}$$

$$v_n = -\frac{q\tau_{np}\mathrm{E}}{m_n} = -\mu_n \mathrm{E} \tag{1.42}$$

$$\mu_n = \frac{q\tau_{np}}{m_n} \tag{1.43}$$

Mobilite (μ) (1.43) eşitliği ile hesaplanır (Shur, 1996).

Elektronun mobilitesi elektrik alan etkisinde parçacığın sürüklenme hızının büyüklüğüdür. Mobilitenin (μ) birimi $cm^2/V.s$ dir. Saf yarıiletkenlerde serbest taşıyıcı sayısı yani elektronların sayısı proton sayısına eşittir. Boşluk mobilitesi elektronların mobilitesine eşittir ancak boşlukların ortalama sürüklenme hızı pozitiftir. Burada (1.44) bağıntısının pozitif olmasının nedeni boşlukların hız vektörünün elektronların hız vektörünün yönüne zıt olmasıdır (Sağlam, 2007).

$$v_p = \mu_p E \tag{1.44}$$

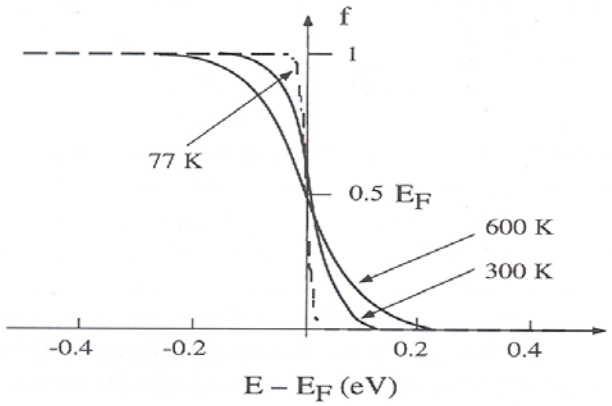
1.7.2. Akım Taşıyıcı Yoğunlukları n ve p

Yarıiletken üzerinde elektrik akım meydana gelmesi için ısıl ya da ışınım enerjisi ile valans bandındaki elektronların uyarılarak daha yüksek iletim bantlarına geçiş yapması gereklidir. Oluşan bu elektrik akımı elektron ve boşluklardan kaynaklandığını ayrıca Fermi-Dirac bağıntısına uygun bir şekilde *T* sıcaklığına bağlı

olarak (E) enerji seviyesine kadar bulunma olasılığı eşitlik (1.45) ile ifade edilir. Oda sıcaklığında paydadaki üstel terim 1 den daha büyük olmasından dolayı (E) enerjisi, fermi enerjisinden (E_f) den çok büyüktür. Bu nedenle eşitlik (1.45) eşitlik (1.46) şeklinde kullanılır (Akat, 2010).

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_f}{k_B T}} + 1} \tag{1.45}$$

$$f(E) \cong e^{\frac{E-E_f}{k_B T}} \tag{1.46}$$

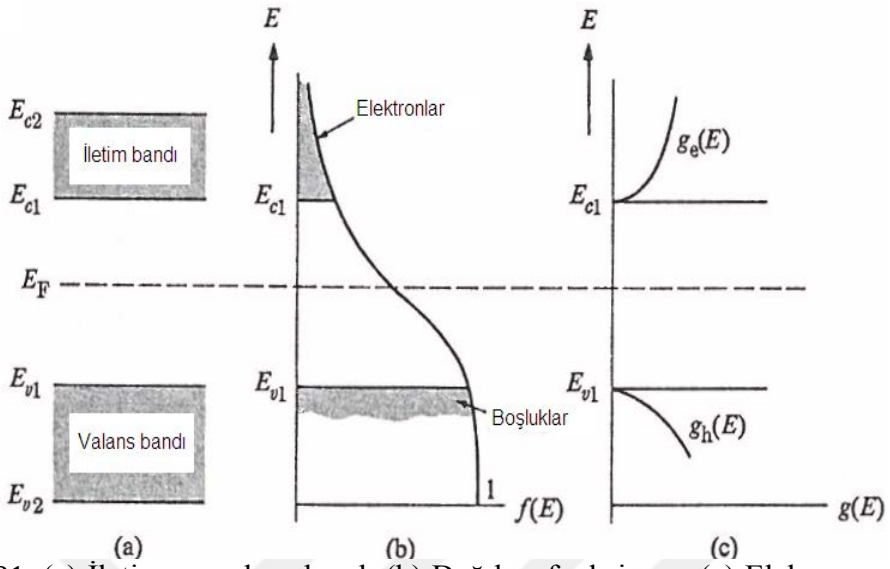


Şekil 1.20. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu (Shur, 1996)

Yasak bölge (E_g), elektronların bulunabileceği kuantum enerji seviyelerine sahip değildir. Fakat amorf ve dolaylı geçişli yarıiletkenlerde bu yasak bölgede elektron bulundurabilirler. Çünkü yasak bölge tuzaklara sahiptirler. Serbest elektron yoğunluğu (n) aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$n = \int f(E) g(E) dE \tag{1.47}$$

f(E) Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu, *g(E)* durum yoğunluğu, *d/dE* elektronların ya da boşlukların birim enerjideki yoğunluğudur. Saf yarıiletkenlerde $E_f = E_g/2$ yani fermi enerjisi (E_f), enerji bant aralığının tam orta kısmında yer alır.



Şekil 1.21. (a) İletim ve valans bandı (b) Dağılım fonksiyonu (c) Elektron ve boşluk (hol) için durum yoğunlukları; $g_e(E)$, $g_p(E)$ (Omar, 1993)

$$n = N_c e^{\frac{E-E_f}{k_B T}} \tag{1.48}$$

$$p = N_v e^{\frac{-E_f}{k_B T}} \tag{1.49}$$

Saf yarıiletkenlerde n=p olmasından dolayı;

$$N_c e^{\frac{E-E_f}{k_B T}} = N_v e^{\frac{-E_f}{k_B T}} \tag{1.50}$$

$$2\left[\frac{m_n k_B T}{2\pi\hbar^2}\right]^{\frac{3}{2}} e^{\frac{E-E_f}{k_B T}} = 2\left[\frac{m_p k_B T}{2\pi\hbar^2}\right]^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_f}{k_B T}} \tag{1.51}$$

$$E_f = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln\left(\frac{m_p}{m_n}\right) \tag{1.52}$$

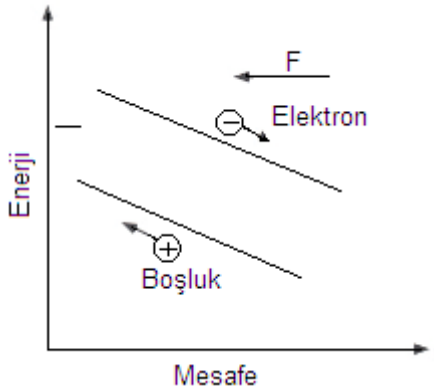
$$n = 2\left[\frac{m_n k_b T}{2\pi\hbar^2}\right]^{\frac{3}{2}} e^{\frac{E-E_f}{k_B T}} \tag{1.53}$$

Elektron yoğunluğu (1.53) eşitliğindeki E_f enerjisi yerine E_g yazılırsa elektron yoğunluğu ve boşluk yoğunluğunun E_g bağlı olduğu görülür (Köksal, 1999).

$$n = p = 2\left[\frac{k_b T}{2\pi\hbar^2}\right]^{\frac{3}{2}} \left(m_p m_n\right)^{\frac{3}{4}} e^{\frac{-E_g}{2k_B T}} \tag{1.54}$$

Sıcaklık arttışı kopmuş valans bağların sayısını artırır. Bunun sonucu olarakta yarıiletken malzeme içerisindeki taşıyıcıların konsantrasyonu artar.

1.7.3. Elektriksel İletkenlik



Şekil 1.22. Elektrik alan uygulandığında yarıiletkendeki bant diyagramı + ve – yüklerin akışı (Shur, 1996)

Düşük elektrik alnada elektronların ve boşlukların iletkenlik akım yoğunluğu, sürüklenme akım yoğunluğu ve diffüzyon akım yoğunluğu toplamıdır.

$$j_n \nabla_n = q\left(n\mu_n E + D_n \nabla_n\right) \tag{1.55}$$

$$j_p \nabla_p = q\left(n\mu_p E + D_p \nabla_p\right) \tag{1.56}$$

Diffüzyon (D) mobiliteye bağlı bir katsayıdır. Yarıiletkende düzensizlikten dolayı yük yoğunluğunun gradyanı sıfır olur.

$$\nabla_p = 0, \nabla_n = 0 \tag{1.57}$$

$$j_n \nabla_n = q\left(n\mu_n E = \sigma_n E\right) \tag{1.58}$$

$$j_p \nabla_p = q\left(n\mu_p E + \sigma_p E\right) \tag{1.59}$$

Toplam akım (*j*);

$$j = \sigma E \tag{1.60}$$

(σ) iletkenlik aşağıdaki gibidir ve $\sigma=qn\mu$ ise

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p \tag{1.61}$$

$$j = \sigma_n E + \sigma_p E = qn\mu_n E + qn\mu_p E \tag{1.62}$$

İletkenliğin tersi özdirençtir 'ρ' ile gösterilir. Birimi Ω.cm olarak gösterilir. Özdirenç denklemi;

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)} \tag{1.63}$$

(1.60) bağıntısı yeniden ohm yasasına göre düzenlenirse elektrik akım (*I*) denklemi;

$$I = \frac{\sigma S}{L} V = \frac{V}{R} \tag{1.64}$$

Örneğin alanı S, uzunluğu L ve *V* uygulanan voltajdır.

$$R = \frac{L}{\sigma S} \tag{1.65}$$

R dirençtir (Shur, 1996).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Cu_2O İnce Film Çalışmaları

p-tipi Cu_2O ve CuO ince film transistörler, bakır(II) asetat öncülleri kullanılarak sol-jel yöntemi ile hazırlanmıştır. Sol jel yöntemi ile ilk olarak alt taban üzerine Cu depolanmıştır ve daha sonra elde edilen Cu filmi oksitlendirilerek Cu_2O ve CuO ince filmi elde edilmiştir. Oksitlendirme sıcaklığı 500 °C den düşük sıcaklıklara ayarlanmıştır ve çok yüksek sıcaklık gerektirmemesinden dolayı şeffaf ekran uygulamaları kullanımında standart ekran, cam alt taban ile uyumlu olduğu görülmüştür. Sol-jel işleminde bakır oksit tabakasının elde edilirken su öncül olarak çözeltiye ilave edilerek ince filmin morfolojisi kontrol altına alınabilmiştir. Alkoksit oranındaki suyun artırılması ile hidroliz derecesi yükseltilmiştir. Böylece CuO ve Cu_2O tane boyutu büyümüştür. Sonuçlar p-tipi CuO ve Cu_2O ince film transistörün (TFT) performansın gelişmiş olduğunu göstermiştir ve alan etki mobiliteleri sırası ile $1.0x10^{-2}$-$2.0x10^{-3}$ cm^2/Vs değerlerini aldığı bulunmuştur (Jang ve ark., 2016).

Bakır oksit filmler, sol-jel yöntemi ile kuprik klorid metanolik kompleks çözeltisi kullanılarak hazırlanmıştır. 360 °C sıcaklığında depolanan Cu_2O ince filmler ve 400-500 °C sıcaklığında depolanan CuO filmleri için XRD çalışması yapılmıştır. Cu_2O ve CuO filmerinin optik enerji bant aralığı, optik soğurma ölçüm sonucunda sırası ile 2.10 ve 1.90 eV olduğu hesaplanmıştır (Ray, 2001).

Yarıiletken bakır oksit film (kabuk), titanyum oksit ince film (çekirdek) üzerine kimyasal banyo yöntemi ile hazırlanmıştır. Depolanan filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerine ısısal tavlamanın etkisini değerlendirmek için 673 K sıcaklığına kadar çeşitli sıcaklıklarda tavlanarak çalışılmıştır. Sonuçlar filmlerin tavlanma sıcaklığının artırılması ile kristal oluşumunda daha fazla yönelim ve kristalizasyon olduğunu ortaya çıkarmıştır. TiO_2/Cu_2O çekirdek/kabuk ince filmi 0.8 – 3.5 m^{-1} değişen (α) soğurma değerlerini almıştır. Enerji bant aralığı 2,99 eV' dan 4,00 eV kadar değerler aldığı hesaplanmıştır. İnce filmin ısı kontrolü, güneş kaplama,

elektriksel izolasyon ve UV-ışın soğurması gibi teknolojide çeşitli amaçlar için kaplama olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Agbo ve ark., 2013).

Bakır oksit Cu-O ince film reaktif iyon kaplama yöntemi ile depolanmıştır. Cu-O ince filmlerin, değişen oranlardaki oksijen içeriğinin filmlerin termoelektrik özellikleri üzerine etkisi çalışılmıştır. Bakırın elektron tabancasıyla buharlaştırıldıktan sonra Cu-O oksijenin plazmada reaksiyonu sonucu depolanmıştır. Oksijen gazının akım oranı ayarlanarak depolanan ince filmin oksijen içeriği kontrol altında tutulmuştur. Cu_2O'nun oda sıcaklığında Seebeck katsayısı ve direnci sırası ile 0.7 mV/K ve 83.5 Ωcm bulunmuştur. Direnç termoelektrik malzeme için hala yüksek olduğu tespit edilmiştir. Burada Cu_2O ince film üretimi için bakır kullanılıp, oksijen gazı ve nitrojen gazı ilave edilerek denemeler yapılmıştır. Deneysel sonuçlarda nitrojen ilavesi yapılmadan düşük öz direnç rapor edildi. Seebeck katsayısı ve en düşük özdirenci 0.3 mV/K ve 2 Ωcm elde edilmiştir (Uchiyama ve ark., 2006).

Cu_2O p-tipi yarıiletken, dikkat çekici fotovoltaik özellikler göstermiş olmasına rağmen yüksek kalitede ince filmler elde edilememiştir. Bu çalışmada, plazma destekli moleküler demet epitaksi yöntemi (MBE) ile filmin yönelimi ve Cu_2O heteroyapıların arayüzey kimyasını kontrol altına almak için bu yöntem kullanılmıştır. Cu_2O ince filmler MgO tek kristal alt taban üzerine Pt ve Au ince filmler üzerine püskürtülmesi ile MBE yoluyla depolanmıştır. Bu heteroyapılı konfigürasyon bir kristalin Si alt hücresinde sıralı bir şekilde dizilmiş yapıda üst hücre olarak Cu_2O kullanılabilir olduğu görülmüştür (Tolstova ve ark., 2015).

Kimyasal depolama yöntemi ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin tanecik şekillerinin değişen parametreler sonucu küreden çubuk, hatta koniye kadar dönüşmüş olduğu fark edilmiştir. Bu teknik iki aşamalıdır; ilk daldırmada alt taban bakır tiyosülfat çözeltisi içine daha sonra NaOH çözeltisine daldırması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Cu_2O filmlerin morfolojisi ve tanecik boyutu depolama zamanı, daldırma sayısı ve NaOH çözeltisinin yoğunluğu ayarlanarak kontrol altına alınmıştır. Üç boyutlu küre, bir boyutlu çubuk ve üç boyutlu koni Cu_2O filmlerin şekilsel olarak peryodik sıralamasında NaOH çözeltisinin konsantrasyonu, 1.2 M dan az olması ve daldırma döngüsünün 10'dan fazla olması durumunda gerçekleşmiştir. Yani daldırma döngü sayısı artması sonucunda peryodik olarak oluşabilmiştir. Cu_2O

filmlerin peryodik model dönüşümü için bu yayında büyüme mekanizması önerilmiş ve araştırılmıştır. Çubuk ve koni benzeri Cu_2O filmlerin görünür ışık altında küre benzeri Cu_2O filmden daha iyi fotoelektrik özelliğe sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu basit yöntem ile filmlerin özel yapılar ve değişik özelliklere sahip olması nedeni ile diğer metal oksit filmlerin sentezi için de kullanılabilir olduğu düşünülmüştür (Xiong ve ark., 2010).

Sulu çözelti ile elde edilen Cu_2O nanoküpleri 40, 65, 100, 230 ve 420 nm ortalama boyutlarında ve çok iyi monodağılımlı büyüme gösterdiği rapor edilmiştir. Nano küpler oda sıcaklığında 2 saat içinde oluşmuştur. Nano küplerin boyutlarındaki standart sapma her bir örnek için aşağı yukarı %10 bulunmuştur. Yapısal analizler, bu nano küplerin altı kenarı (*100*) ve (*110*) da kestiğini ve ayrıca (*111*) köşelerine sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Sodyum dodesil sülfat ve bakır sülfat bileşimi sonucunda iyi yapıda Cu_2O nano küplerin oluşumu için kritik bir öneme sahip olduğu fark edilmiştir. Muhtemelen sülfat iyonları yoluyla kesik kübik yapı elde etmek için kullanılmıştır. Ayrıca Sodyum dodesil sülfatın yüzey gerilimini azaltarak yüzeyin yeniden yapılanması sonucunda Cu_2O çekirdek parçacıklarının kümeleşmeleri kontrol altına alınarak oluşturulmuştur. Optiksel karakterizasyon 515-525 nm soğurma bandında 200 nm'dan daha büyük nano küpler olduğunu ortaya çıkarılmıştır. Nano küplerin yaklaşık 490 nm luk soğurmada ise 100 nm daha küçük olduğunu göstermiştir. Soğurma özelliği yardımı ile kırmızı ve yakın kızılötesi bölgede ışık saçılma etkisi gözlenerek iri Cu_2O nano küpler tespit edilmiştir. Cu_2O nano yapıların fotokatalitik aktivitesinden sorumlu aktif yüzeylere bağlı olarak rodamin B ışınımsal bozunumunda bu nano küplerin (*111*) kristal yüzeyi tespit edilmiştir. Monodağılımlı Cu_2O nano küplerin basit ve hızlı sentezi sonucu nanokristal boyutlarının bir fonksiyonu olarak Cu_2O nano küplerin ceşitli ve daha ileri özelliklerini ortaya çıkarılabileceği düşünülmektedir (Kuo ve ark., 2007).

CdO ve Cu_2O ince filmleri kimyasal depolama yöntemi ile cam alttaban üzerine büyütülmüştür. CdO ve Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlikleri 400-900 nm aralığında sırası ile, %60-70 ve %3-8 olarak ölçülmüştür. CdO ve Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik eğrilerinden enerji bant aralıkları sırası ile 2.3 ve 2.1 eV olarak hesaplanmıştır. X-ışını kırınım spektrumu ile filmlerin polikristal yapıda

olduğu görülmüştür. Filmlerin özdirençleri, Van der Pauw yöntemi ile CdO için 10^{-2}-10^{-3} Ωcm ve Cu_2O için yaklaşık olarak 10^3 Ωcm olarak ölçülmüştür. CdO/Cu_2O güneş pilleri CdO ve Cu_2O ince filmler kullanılarak yapılmıştır. Güneş hücreleri için açık devre gerilimleri ve kısa devre akımları, gümüş kontaklar yapılarak ölçülmüştür. Bu güneş pillerinin açık devre gerilimleri ve kısa devre akımları 1-8 mV ve 1-4 μA arasında olduğu tespit edilmiştir (Hames ve ark., 2004).

Değişik parçacık şekillerine sahip bakır oksit (Cu_2O) ince film üretmek için tek basamaklı ve maliyeti düşük olan kimyasal depolama yöntemi kullanılmıştır. Kimyasal depolama yöntemi ile Cu_2O ince filmi düşük sıcaklıkta (80 °C) trisodyum yerine glukoz kullanılmıştır. Glukoz çözeltide indirgeyici olmasından dolayı ince film kolayca elde edilebilmiştir. Süper doyma etkileri; çözelti reaksiyonundaki yoğunluk değerlerine bağlı olarak glukoz, trisodyum sitrat ve bakır iyonu konsantrasyonlarını ve Cu_2O nun parçacık morfolojisi detaylı bir şekilde incelenerek belirlenmiştir. Film tanecik morfolojisi, aşırı glukoz ile düşük bakır iyonu konsantrasyonunda oktahedral ve artan bakır iyon konsantrasyonunda ise aşırı glukozdan dolayı küresel parçacıklar şeklinde oluştuğu görülmüştür. Morfolojik kontrol mekanizması; iyon konsantrasyonuna bağlı olarak farklı kinetik şartlar altında ve difüzyon sınırlı progresif büyüme modelindeki temel teoriye bağlı olarak açıklanmıştır (Xu ve ark., 2013b).

Nano kristal bakır oksit (Cu_2O) ince filmler kimyasal depolama yöntemi ile oda sıcaklığında amorf cam alt taban üzerine sentezlenmiştir. Depolama kinetikleri aynı kalınlıkta ve iyi kalitede nanokristal filmlerin elde edilebilmesi için önemli bir rol oynamıştır. Filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Kristalleşme ve büyüme süreçlerine bağlı olarak küçük nano parçacıkların yığılım şeklinde depolanmış olduğu fark edilmiştir. Bu depolama süreçinin yığılmalar şeklinde olması nedeni ile Cu_2O film taneciklerinin mikro-küresel şekili oluştuğu ortaya çıkarılmıştır. Optik ve elektriksel karakterizasyon sonucunda filmin optik bant aralığı, elektriksel iletkenlik ve iletkenlik tipi tespit edilmiştir (Ahirrao ve ark., 2011).

Yüksek kaliteli Cu_2O ince filmler atmosfer basıncında kimyasal buhar yöntemi yolu ile MgO (110) alt taban üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüştür. X-

ışını kırınım sonucunda (220) düzleminin yarı maksimum tam genişliği 0.1429° ve aynı şekilde (1-10) düzlemininde 0.303° olduğu görülmüştür. Bu sonuç, Cu_2O filmlerin kristalliğinin yüksek derecede olduğunu ortaya çıkarmıştır. Kutup-figürü ve Cu_2O filmlerin karşıt uzay haritalaması ile filmlerin zorlanma olmadan büyümüş olduğunu ortaya çıkarmıştır. Cu_2O filmin optik enerji bant aralığı, soğurma spektrumu yolu ile hesaplanmıştır. Filmin optik enerji bant aralığı 2.38 eV olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar, atmosfer basıncında kimyasal buhar yöntemi ile yüksek kaliteli Cu_2O filmlerin depolaması için umut verici olduğunu göstermiştir (Kobayashi ve ark., 2007).

CuO ve Cu_2O ince filmler, oksijen kaynağı olarak O_2, N_2O ve bakır kaynağı olarak CuI kullanılarak depolanmıştır. O_2 kullanıldığında, CuO ve Cu_2O ince filmleri elde edilmiştir. Cu_2O düşük O_2 kısmi basınç altında kimyasal buhar depolama (T=500 °C) yöntemi (CVD) ile depolanmıştır. CuO fazı CVD reaktöründe belirli şartlar altında elde edilmiştir. I_2 reaksiyon gazı karışımına ilave edildiğinde depolama oranı artmıştır. CuO oluşumu, termodinamik açıdan araştırılmıştır. Yüksek $[I_2]/[CuI]$ oranları için düşük O_2 basınçta CuO fazının hala kararlı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Cu_2O filmleri oksijen kaynağı olarak N_2O seçildiğinde de elde edilebilmiştir. 650 °C 'de, CuI ve depolama oranı, N_2O ayrışma etkisine bağlı olarak kontrol edilebildiği fark edilmiştir (Ottosson ve ark., 1996).

Farklı nanoyapılardaki Cu_2O filmler setil trimetil amonyum bromür (CTAB) içeren kimyasal banyo depolama (CBD) yöntemi kullanılarak farklı alttabanlar (flor katkılı SnO_2 (FTO), Cu ve Ti folyolar) üzerine depolanmıştır. Örnekler X-ışını kırınım cihazı, taramalı elektron mikroskobu ve UV-Vis spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar CTAB reaksiyon sistemi ile hazırlanarak elde edilen Cu_2O filmlerin nano çubuk sıralı diziler şeklinde meydana geldiğini göstermiştir. Çözelti içerisine CTAB eklenmediğinde nano kürecikli Cu_2O filmler depolanmıştır. CTAB konsantrasyonu konrtolü sentezi sonucunda farklı uzunlukta ve çap oranı ile nano çubuk yapılı Cu_2O filmlerin üretilmiştir. Nano çubuk dizilim yoğunluğu hem alttabanlar ve hemde CTAB bağlı olduğu burada ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, Cu_2O nano çubuklar için UV-Vis soğurma özelliği nano küreciklerden çok daha iyi olduğu bulunmuştur. Cu_2O filmlerin görünür ışık altında fotovoltaj verimi nano kürelerden

daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ti folyo üzerine depolanan Cu_2O nano çubukları görünür ışık altında soğurma yapabilmelerine rağmen Cu folyo üzerine depolanan fimler diğer alttabanlara depolanan fimlere göre daha iyi ve daha istikrarlı fotoelektrokimyasal özellik göstermiştir. Bu çalışmanın sonucunda nano yapılı Cu_2O tabanlı aygıtlar için Cu_2O ince filmlerin kullanılabilir olabileceği düşünülmektedir (Aref ve ark., 2011).

Nanokristal bakır oksit (Cu_2O) ince filmler, tek basmaklı kimyasal depolama (CBD) yöntemi ile hazırlanmıştır. İnce filmelerin yönelimi, morfolojisi, kristal boyutu ve fotokatalitik aktivitesi X-ışını kırınım cihazı, taramalı elektron mikroskobu ve UV-Vis spektrofotometre kullanılarak dikkatli bir şekilde incelenmiştir. Sonuçlar film yönelimi ve kristal boyutunun trisodyum sitrat yoğunluğuna (TSC) bağlı olduğunu ortaya çıkarmıştır ve optik enerji bant aralığı 2.71 eV-2.49 eV arasında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca, ince filmlerin sayısal yoğunluğunun ve morfolojisininde TSC yoğunluğuna bağlı olduğu görülmüştür. Dahası, elde edilen Cu_2O ince filmler görünür ışık altında H_2O_2 bulunduğu ortamda, metil turuncu (MO) ile verimli bir şekilde indirgenmiştir. Cu_2O ince filmlerin fotokatalitik aktivitesinin geliştirilebilmesi için H_2O_2 yardımı ile detaylı olarak incelenmiştir (Xu ve ark., 2014c).

Cu_2O kristalleri galvanik olarak depolanmasında elektrolit etkileri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını (EDX), X-ışını kırınımı (XRD) cihazları ile incelenmiştir. Sonuçlar Cu_2O kristallerinin galvanik depolanmasında elektrolitlerin kimyasal doğasının ciddi bir şekilde etki ettiği fark edilmiştir. Cu_2O kristalleri nitrat, sülfat ve florür ile dengelendiğinde (*111*) düzlemleri ile kesik oktahedral ve oktahedral Cu_2O kristallerin depolanmasına neden olurken klorür ile dengelendiğinde ise, Cu_2O kristalleri (*100*) düzlemlerinde kübik kristal oluşumu gösterdiği bulunmuştur. Galvanik yöntemde Cu_2O kristallerin morfolojisi kolayca kontrol altına alınabilen basit bir yöntem olduğu görülmüştür (Wang ve ark., 2011).

Bakır oksit ve bakır ince filmler asetat banyosunda potansiyostatik elektrodepolama ile elde edildi. Voltametrik eğriler, bonyo çözeltisinin pH ve sıcaklığı, depolama potansiyeli gibi büyüme parametrelerinden faydalanarak araştırılmıştır. Filmlerin, yapısal, morfolojik, optik ve elektronik özellikleri depolama

potansiyeline bağlı olarak X-ışını kırınım tekniği, taramalı elektron mikroskobu, soğurma ölçümleri ve karanlık ve aydınlık akım-gerilim karakteristikleri araştırılarak yapılmıştır. Bu tek fazlı polikristal Cu_2O doymuş kalomel elektrotta (SCE) 0 dan 300mVVs değerine kadar depolanabildiği ve ayrıca Cu ve Cu_2O nun eşzamanlı depolanması doymuş kalomel elektrot (SCE) üzerinde 400 mVVs başlamış olduğu gözlenmiştir. Dahası 700 mVVs depolama potansiyelinin artması ile doymuş kalomel elektrot üzerinde tek fazlı Cu ince filmler üretilebilmiştir. 1-2 μm'lik kübik taneli tek fazlı polikristal Cu_2O ince filmler çok dar potansiyel etkide SCE üzerine yaklaşık olarak 200 mVVs ile elde edilmiştir. Cu_2O ince film, SCE üzerine 400 mVVs hazırlanmış olan bir fotoelektrokimyasal hücrede ilerlemiş fototepki sonucunda depolanmıştır. Cu ve Cu_2O eşzamanlı depolanmış olup Cu_2O yüzeyi üzerinde Cu küreleri rastgele dağılmıştır. Bu çalışmada, aynı depolanma bayosunda hem Cu ve hemde Cu_2O ayrı ayrı depolanmıştır. Ayrıca Cu ve Cu_2O karışımının depolama parametreleri kontrol altında tutularakda depolama yapılabilmiştir (Wijesundera ve ark., 2006).

Ardışık iyonik tabaka soğurma ve reaksiyon (SILAR) yöntemi ile çelik üzerine ince Cu_2O katmanlarının depolanması araştırılmıştır. Alkali banyosunda OH^- iyonları ve Cu^+ iyonlarının mol oranlarının değiştirilmesi ve buna bağlı olarak oluşan fimlerin farklılık gösteren özellikleri X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), fotolüminesans (PL) spektroskopisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Ultra viyole görünür spektroskopi teknikler ile karakterize edilmiştir. XPS Cu 2p pikleri bağlanma enerjisindeki değer artışını, optimum bakır boşluk yoğunluğu Cu^+/OH mol oranın 1:10 ile 1:15 arasında elde edilerek ortaya çıkarmıştır. SEM çalışmaları, Cu_2O ince filmlerin yoğun, düzgün bir mikroyapıda olduğunu göstermiştir. Cu boşluğu, Cu^+/OH^- mol oranı 1:15 ile yapılan ince filmin düşük enerji pikler 1.2-1.4 eV ve 580 nm'daki piki için PL güçlü piki görülmüştür. Alkali konsantrasyonun $Cu_{2-\delta}O$ yapısı üzerine etkisi açıklanmıştır. Çeşitli elektriksel ve mekanik uygulamalar için geniş alanlı cihaz entegrasyonlarda kullanılabilir ve Cu_2O ince film tabakalarının yüzey reaktivitesinin modüle edilebilmesinin kolay bir yolu olmuştur (Chowdhury ve ark., 2014).

Bakır oksit (Cu_2O) ince filmler kimyasal depolama yöntemi ile filmin aynı şekilde tekrar çoğaltılabilmesi ve basit bir yöntem olmasından dolayı bu yöntem seçilmiştir. Fimler kimyasal depolama yöntemi ile elde edildikten sonra 523 K'e kadar çeşitli tavlama sıcaklıkları altında tavlanarak hazırlanmıştır. Filmler elektromanyetik spektrumun görünür/yakın kızıl ötesi bölgelerinde çok yüksek geçirgenlik (%80-95) göstermiştir. Soğurma ve yansıtma özellikleri, uzun dalga boylarında azalarak (<%10) düşüş göstermiştir. Oksit filmlerin enerji bant aralığı 2.65-2.70 eV arasında hesaplanmıştır ve enerji bant aralığı değerlerinin değişimi tavlama sıcaklıkları ve banyo konsantrasyonu ile kontrol altına alınabilmiştir. Değişen sıcaklıklarda elde edilen kırılma indisinin maksimum değeri 2.63 bulunmuştur (Eya ve ark., 2005).

Düzgün ve homojen Cu_2O ince filmler Sn katkılı indiyum oksit alttaban (ITO) üzerine elektrokimyasal yöntem ile $Cu(Ac)_2$ elektrolitler kullanılarak ve tiyoüre eklenerek hazırlanmıştır. Bu ince filmlerin oluşumunda, depolama potansiyeli ve tiyoüre konsantrasyonunun etkileri; X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ve atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) kullanılarak incelenmiştir. 0.5 mM tiyoüre ile -0.1 V potansiyeli altında elektrodepolama yöntemi ile pürüzsüz ve düzgün Cu_2O ince filmler üretilebilmiştir. Bu filmler görünür ışık aralığında belirgin soğurma ve fotoakım tepkisi sergilemiştir. Dahası, tiyoüre konsantrasyonu arttıkça, Cu_2O ince filmlerin yoğunluğu azalmıştır. Bu sonuç tiyoüre bağlı büyüme sürecinin en pürüzsüz ve düzgün Cu_2O ince filmlerin oluşumu için mantıklı bir yöntem olarak öne sürülmüştür (Xue ve ark., 2013).

Bakır (II) oksit ince filmler mikroskop cam alt tabanlar üzerine sol-jel yöntemi ile hazırlanmıştır. Öncül çözeltide izopropil alkol içinde bakır asetat çözünmesi sağlanarak çözeltiler hazırlanmıştır. Çeşitli dengeleyiciler ve katkı maddeleri kullanılarak bakır asetatın çözünürlüğü arttırılmaya çalışılmıştır. Ayrıca film ve cam yüzey arasındaki yapışmayı güçlendirmek için bu katkı maddeleri çözelti içine eklenmiştir. 30 dakikada 600 °C'de ısıl işlemden sonra bu filmlerin tenorite yapısında CuO olarak kristalleştiği gözlenmiştir. Filmlerin genel görünümleri düzgün dağılımlı ve kahverengi-siyah renklidir. Filmlerin mikroyapıları,

kimyasal çözeltilerden etkilenmiştir. Filmlerin enerji bant aralıkları 1.6 ve 1.75 eV arasındadır (Oral ve ark., 2004).

Bakır oksit ince filmler, (Cu_2O) bakır oksit tozlarının termal buharlaştırılması yolu ile depolanmıştır. Alttabanlar, ısıtılmadan ve 300 °C sıcaklığa kadar ısıtılarak kullanılmıştır. Filmler, aynı zamanda 3 saat boyunca 500 °C sıcaklığa kadar hava ortamında tavlanmıştır. Filmler X-ışını fotoelektron spektroskopisi, X-ışını kırınımı ve UV-Vis spektrofotometre ile karakterize edilmiştir. Kaplama sonrası elde edilen filmler üzerine tavlama ve alttaban sıcaklığı etkilerinin kimyasal, yapısal ve optik özellikleri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Isıtılmamış alttaban üzerinde depolanan filmler, karışık bakır oksit (CuO) ve Cu_2O fazlarında olup ayrıca Cu_2O fazı daha yüksek konsantrasyonlu bir şekilde oluşmuş olduğu görülmüştür. Ancak, ısıtılarak hazırlanan alttabanlarda depolanan filmlerde ve tavlanmış filmlerde CuO fazı baskın olduğu fark edilmiştir (Al-Kuhaili, 2008).

Nanokristal Cu_2O ince filmler aktif reaktif buharlaştırma tekniği kullanılarak sentezlenmiştir. Bu filmlerin yapısal ve optik karakterizasyonları; X-ışını difraktometresi, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi, geçirimli elektron mikroskobu ve UV-VIS-NIR spektrofotometresi ile ortaya çıkarılmıştır. Bu nanokristal filmlerin boyutu, depolama parametreleri değiştirilmesi ile değiştirilmişir. Optik çalışmalar sonucunda filmlerin doğrudan geçişli, nanokristal boyutu ve stoikometri tespit edilmiştir. Ayrıca optik ölçümler, optik soğurma kenarında kayma olduğunuda göstermiştir. Bu sonuçlar, tek fazlı nanokristal Cu_2O ince filmlerin aktif reaktif buharlaştırma tekniği kullanılarak, nispeten düşük bir alt taban sıcaklığında filmin sentez edilebileceğini göstermiştir. Bu çalışmalar, filmlerdeki kübik Cu_2O yapısının kararlı olduğunu ve nanokristal yapıda olduğunu göstermiştir (Balamurugan ve ark., 2001).

Bakır oksit ince filmler 0,05-0,45 μm arasında değişen kalınlıklarda elde edilmiştir. Bakır oksit ince filmler, mikroskop cam slaytları üzerine ilk olarak bakır kompleks çözeltisine daha sonra 1M NaOH çözeltisi içine ardışık olarak 20 saniye daldırılması ile depolanmıştır. Bakır çözeltisi oda sıcaklığında bulunurken NaOH çözeltisinin sıcaklığı, 50-90 °C arasında değiştirilmiştir. X-ışını kırınım desenleri filmlerin Cu_2O bileşiminde ve kuprit yapıda olduğunu göstermiştir. 350 °C'de hava

ortamında tavlanan filmlerin CuO fazına dönüşmüş olduğu fark edilmiştir. Bu dönüşüm, enerji bant aralığının 2,1 eV dan 1.75 eV kadar değişmesine neden olmuştur. Filmin p-tipi iletkenlik gösterdiği tespit edildi ve kalınlığı 0,15 μm olduğu hesaplanmıştır. Film p-tipi iletkenliği ~$5x10^{-4}$ $\Omega^{-1}cm^{-1}$ değerinde olduğu ölçülmüştür. Film 1 kWm^{-2} tungsten halojen radyasyon altında aydınlatıldığında, bu aydınlatma filmin elektrik iletkenliğinin 3 kat arttırmış olduğu görülmüştür. Film 400 °C sıcaklığa kadar nitrojen bulunan ortamda atmosfer basınçında tavlandığında filmin bileşimi değişmemiştir. Fakat bu filmin, karanlık ortamdaki iletkenliği hemde fotoiletkenlik büyüklüğü artmıştır. Hava ortamında tavlamada ise 400 °C'de üretilmiş olan CuO ince filmin elektriksel iletkenliği $7x10^{-3}$ $\Omega^{-1}cm^{-1}$ yüksek değerini almıştır. Ayrıca bu filmler fotoiletken olduğu tespit edilmiştir (Nair ve ark., 1999).

Bakır oksit filmleri vakumlu ortamda bakır katmanları buharlaştırılması ve bakırın oksidasyonu ile silikon alttabanlar üzerine depolanmıştır. Oksidasyonlar, atmosfer basıncında %10 nu oksijen içeren azot-oksijen karışımında 185-450 °C kadar değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. X-ışını kırınım (XRD) desenleri oksidasyon sıcaklığına bağlı olarak, filmlerin 350 °C'nin üzerinde CuO ve 225 °C'de ise Cu_2O bileşimi olduğunu göstermiştir. 185 °C'de elde edilen filmlerde, alttaban ve Cu_2O arayüzünde bakır silisid oluşmaktadır. 280 °C filmlerde bakır silisid, Cu_2O ve CuO bileşikleri birlikte oluşmuştur. Fourier dönüşümlü kızılötesi geçirgenlik spektrumları XRD de elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Filmlerin optik enerji aralığı 1-3.5 eV kadar değişen değerler almıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen filmlerin düzensiz kompleks kırılma indisi dağılımının simüle etmek için Tauc-Lorentz (TL) modeli kullanılarak araştırılmıştır. Bu TL modeli ile bakır oksit filmlerin düzensiz kırılma indisi tanımlanarak gösterilmiştir. Bant aralığı, TL modeli tarafından tanımlandığı gibi Cu_2O için 2.3 eV ve CuO için 1.05 -1.2 eV arasında olduğu bulunmuştur (Papadimitropoulos ve ark., 2006).

Polikristal bakır oksit ince filmler atmosfer basıncında kimyasal buhar depolama yöntemi ile 280 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hazırlanmıştır. Bu yöntemde kullanılan temel malzemeler; bakır, dipivaloil metan ve oksijendir. Bu deney iki çeşit film oluşumunu açığa çıkarmıştır. Cu_2O ve CuO fimler sistemdeki kısmi oksijen basıncı kontrol edilerek büyütülmüştür. Karakterizasyonlar sırası ile

elektron mikroskobu, X-ışını fotoelektron spektroskopisi, X-ışını kırınımı ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre ile analiz edilmiştir. Sonuçlardan CuO filminin iyi kristalleştiği bulunmuştur ve CuO filminin anizotropik ve monoklinik yapısından dolayı üzerine gönderilen ışığın saçılması sonucunda düşük kızılötesi geçirgenliğine sahip olduğunu görülmüştür (Maruyama, 1998).

Sistemdeki oksijen-argon karışımındaki oksijen değerleri, oksijenin kısmi basıncı değiştirilerek kolaylıkla bakır oksit ince filmleri üretilebilmiştir. Faz bileşiminin özellikleri, direnç ve optik sabitler araştırılmıştır. Fazlar Cu+Cu_2O, Cu_2O, Cu_2O+CuO, CuO tespit edilmiş olup ve her bir fazın direnç değerleri ve optik sabitleri bulunmuştur. Cu_2O görünür bölge aralığında yüksek kırılma indis (n=2.8-3.4) değerleri ile teknolojide yararlı ince film yarıiletken malzeme olabileceği düşünülmüştür (Drobny ve ark., 1979).

Cu_2O ince filmler, reaktif doğru akım magnetron püskürtme yolu ile kuvars alttaban üzerine depolanmıştır. Burada kısmi oksijen basıncı etkileri ve gaz akış oranın, depolan filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerine nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Kısmi oksijen basıncı değişimi farklı mikroyapılarda Cu_2O, Cu_4O_3 ve CuO sentezine yol açmıştır. Gaz akış oranı 80 sccm altında olduğunda $6.6x10^2$ Pa sabit kısmi oksijen basıncında, tek kristal Cu_2O filmler elde edilebilmiştir. Cu_2O ince filmler görünür bölgede yüksek soğurmaya sahip olup ve görünür ışıkta fotokatalitik etki göstermiştir (Zhu ve ark., 2009).

Doğru akım reaktif magnetron püskürtme yöntemi ile cam alttaban üzerine bakır oksit (Cu_2O) ince tabakaları depolanmıştır. Hedef olarak saf bakır katı disk kullanılarak argon gazı ortamında 0,133 Pa dan 4 Pa kadar değişen püskürtme basıncında püskürtülmüştür. Cu_2O ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerine püskürtme gücü ve basınç etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Depolanan katmanlar, X-ışını kırınım, atomik kuvvet mikroskobu, profilometrik ve spektrofotometri kullanılarak karakterize edilmiştir. Filmlerin optik geçirgenliği görünür bölgede ölçülmüştür. Basınç artışı nedeni ile püskürtme gücünün artması sonucunda filmde daha fazla büyüme görülmüştür. Sistemde güç artırıldığında üretilen Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenliğinin kötüleştiği fark edilmiştir (Rastkar ve ark., 2009).

Bu çalışmada, filmler 1000 °C'ye kadar farklı sıcaklıklarda tavlanarak ısısal olarak oksitlendirilmiştir ve $Cu/SiO_2/Si$ ince filmin oksitli oluşumlarının elektriksel direnç ve kristal yapısı araştırılmıştır. Tavlama sıcaklığı artıkça, X-ışını kırınım görüntüsü $Cu \rightarrow Cu+Cu_2O \rightarrow Cu_2O \rightarrow Cu_2O+CuO \rightarrow CuO$ gelişmiş fazının gerçekleşmiş olduğu tespit edilmiştir. Saf Cu_2O filmler 200 ^oC elde edilmiştir fakat 300- 550 °C arasında değişen sıcaklıklarda elde edilen filmler gözenekli, çatlak, bükülmüş ve set gibi yüzey kusurlarına sahip değildir ve ayrıca heryerde düzgün dağılıma sahip olmayan CuO ince filmleri üretilmiştir. Her iki oksitlenme durumunda da tavlama sıcaklığı artıkça kristalleşme gelişmiştir. Direnç faz diyağramı, akım-voltaj verilerinden elde edilmiştir. Direncin, oksitleşme oranı değişerek artmasından dolayı tavlanma sıcaklığının fonksiyonu olarak doğrusal artması beklenmiştir. Ancak; direnç için farklı sıcaklık aralıklarında anormal düşüşler gözlenmiştir. Sıcaklık artığında kristalleşme ve kristal büyüklüğünün değişerek gelişmesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmüştür (De Los Santos Valladares ve ark., 2012).

Fotoelektrokimyasal sistemde CO_2 yakıt üretimi için katot malzeme olarak, tabakalaşmış CuO/Cu_2O filmler geliştirilmiştir ve bu filmlerin yüzeyleri, geçiş metalleri (örneğin, Ag, Au, Cd, Cu, Pb ve Sn) eklenerek denenmiştir. Geçiş metallerinin iyi bir şekilde depolanması ile faradaysal verimlilik açısından yakıt dönüşümü CO_2 'nin artmıştır. Özellikle; $Pb/CuO/Cu_2O$ için geçiş metalleri arasında en iyi performansı -0.16 V toplam faradaysal verimlilik %40.45 olduğunda gerçekleşmiştir. 0.102 metanol mol/scm^2 ve %0.524 mol/scm^2 formik asitte CO_2 elde edilirken formik asit ve metanol standart redoks potansiyelinde daha yüksek bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Dahası; elektrokimyasal alternatif akım direnç spektroskopisi, geçiş metalleriyle depolanmış olan CuO/Cu_2O elektrot üzerine düşürülen görünür ışık aydınlatmasının altında etkili bir şekilde açığa çıkan elektron-boşluk çiftlerini göstermiştir. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) sonucu; dıştaki CuO tabakasında Cu_2O/Cu tabakasının aniden azaldığını ve kompozisyondaki bu bozukluk aktif yerlerderki elektron iletimini engellemiştir. Bunun nedeninin ise filmdeki bozukluk ile iligi olduğu ortaya çıkarılmıştır (Won ve ark., 2014).

Bakır oksit ince filmler, oda sıcaklığında değişen oksijen miktarına bağlı olarak kısmi basınç altında radyo frekans magnetron yöntemi ile cam alttaban

üzerine büyütülmüştür. XRD ve XPS analtik ölçümleri kullanılarak Cu_2O ve CuO fazlarının oluşum ve depolama şartları optimize edilmiştir. Cu_2O ve CuO nun enerji bant aralıkları sırası ile 2.31 ve 1.41 eV dir. Mobilitesi 0.01 cm^2/Vs bulunmuştur (Sanal ve ark., 2014).

Oktahedral Cu_2O kristalleri, herhangi bir yüzey aktif madde kullanmadan hidrazin kullanılarak bakır hidroksitin indirgenmesi ile üretilmiştir. Elde edilen ürünlerin boyutları ve morfolojisine etki eden faktörler araştırılmıştır. Öncüllerin molar oranları (NH_3:Cu^{+2} ve OH^-:Cu^{+2}) NH_3 ve Cu^{+2} arasındaki etkileşim yolu ile oluşan ürünlerin boyutu ve morfolojisi tespit edilmiştir. Cu^{+2} ve NH_3 molar oranı ayarlanarak (*100*) karşı büyüme hızının oranı (*111*) düzlemine kaymıştır ve bundan dolayı Cu_2O kristalleri küre, küp benzeri ve oktahedral gibi farklı morfolojilerde elde edilmiştir. OH^- ve Cu^{+2} molarite oranı ayarlandığında oktahedral kenar uzunlukları 130 nm dan kolayca 600 nm dönüşmüştür. Bu yöntemin oktahedral Cu_2O sentezi için etkili ve kolay bir yöntem olduğu görülmüştür. Elde edilen oktahedral Cu_2O parçacıkları kübik Cu_2O parçacıkları ile karşılaştırıldığında yüzeye tutunması ve metil oranjın bozunumu sırasında daha iyi olduğu görülmüştür (Xu ve ark., 2006a).

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

Farklı bakır tuz kaynakları kullanılarak bakır(II) sülfat pentahidrat ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), bakır(II) nitrat trihidrat ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$), bakır(II) asetat monohidrat ($Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$), bakır(II) klorür dihidrat ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$) ile elde edilen Cu_2O ince filmler üretilirken kullanılan kimyasal kaynaklar, kullanım amacı, çözeltilerin hazırlanılması, alttaban seçimi ve temizliği üzerine durulmuştur.

3.1.1. Alttaban Temizliği

Cam alttabanların temizliğine dikkat edilmelisi önemlidir. Çünkü elde edilecek filmin optik, yapısal ve elektriksel özellikleri cam alttabanların temizlenme durumu ile ilişkilidir. Nitrik asit, cam alttabanın üzerindeki inorganik ve organik kirleri temizler. Alkol ve su organik kalıntıların daha iyi temizlenmesi için kullanılır. 76 mm x 26 mm x 1 mm boyutlarında cam alttabanların temizliği sırası ile;

a) Önce deterjanlı ılık suda yıkanıp daha sonra çeşme suyu ile durulandı.
b) Seyreltilmiş nitrik asitte yaklaşık 5 dakika bekletildikten sonra tekrar çeşme suyu ile durulandı.
c) İzopropil alkolde yaklaşık 5 dakika bekletilip ardında iyonize su ile durulandı.
d) En son olarakta etüvde 100 °C de 1 saatte kurutuldu.

3.1.2. Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyon (SILAR) Yöntemi ile Cu_2O İnce Filmin Depolanması için Kullanılan Kimyasallar ve Kimyasal Çözeltilerin Hazırlanması

SILAR yöntemi için sodyum tiyosülfat pentahidrat ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) bakır kaynakları indirgemek için kompleks bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bakır

kaynakları olarak ($Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$), $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ ve oksijen kaynağı olarakta sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak Cu_2O ince filmler elde edilmiştir. Bu yöntem için iki farklı çözelti kaynağı kullanılmıştır. Cu_2O ince filmi üretiminde; birinci çözelti olan anyon çözeltisi 2 M 100 ml NaOH olarak hazırlandı. İkinci çözelti; katyon kompleks çözeltisi ise 1 M 40 ml $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ çözeltisi ve 1 M 10 ml $CuSO_4.5H_2O$ çözeltisi 100 ml'lik bir beher içerisinde birbirine karıştırıldıktan sonra üzerine 50 ml saf su eklenerek 100 ml tamamlandı. Aynı şekilde diğer bakır kompleks çözeltileride bu molarite oranlarında ve hacimlerinde hazırlanmıştır.

- 1 M 40 ml $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ sulu çözeltisi ve 1 M 10 ml ($Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$) hazırlanmıştır.
- 1 M 40 ml $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ sulu çözeltisi ve 1 M 10 ml $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ hazırlanmıştır.
- 1 M 40 ml $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ sulu çözeltisi ve 1 M 10 ml $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ hazırlanmıştır.

3.2. Metod

3.2.1. Malzeme Üretim Yöntemleri

İnce film sentezi için kimyasal depolama (CBD), sıvı-faz depolama (LPD), elektriksiz depolama (ED), ardışık iyonik tabaka adsorpsiyon ve reaksiyon (SILAR) yöntemi olmak üzere sulu çözelti teknikleri şeklinde dörde ayrılmıştır. (Gilbert, 2010).

CBD; metal, ametal iyonlarının ve hidroksit iyonlarının oluşturduğu sulu bir çözelti ortamına alttabanların daldırılması ile ince filmlerin elde edilmesine dayalı bir metoddur.

Elektriksiz depolama (ED) ile metal ya da metal olmayan alttaban üzerine genelde kalın metal yapıların kaplanması için tercih edilir. Seçilen metalin çözeltideki iyonlarının indirgenmesi ile alttaban üzerine film depolanmasıdır.

Alttaban üzerinde iyonlar azalır ve çözünmeyen metal atomları yüzeyde birleşirler. Elektriksiz depolanma elektrokimyasal depolama olarakta tanımlanmıştır. Bunun için elektrot ve iyonik çözelti ve akım gereklidir. Elektrokimyasal biriktirme tekniği elektrolit çözelti içine elektrotların daldırılarak sistem üzerinde potansiyel etki ya da akım etkisi ile film oluşturulmasıdır.

(LPD) sıvı fazda depolama metal-florid kompleks sulu çözeltisi içine borik asit, su, alüminyum gibi değişik kimyasallar eklenerek çözeltinin yavaşça hidroliz edilmesidir (Shampa, 2013).

SILAR yöntemi sulu çözelti içine daldırılan alttaban yüzeyine iyonik öncüllerin yapışması sonucu film elde edilmesidir.

3.2.1.1. Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyon (SILAR) Yöntemi

Bu yöntem için kullanılan kimyasallar ucuz ve kolay elde edilebilir. Ayrıca kimyasal bir yöntem olmasından dolayı birçok alttaban bu yöntem ile kaplanabilmektedir. Metalik taban üzerine oda sıcaklığında ya da civarındaki sıcaklıklarda kaplama yapılabilir. Oda sıcaklığında depolanma yapılabilmesi nedeniyle alttabanın oksitlenme ya da korozyona uğraması söz konusu olmaz. Temel yapı malzemeleri iyonlar olması sonucunda hazırlık parametreleri kontrol altına alınabilir. Ayrıca en iyi yönelimli ve iyi tanecikli yapı elde edilebilmesi açısından bu yöntem çok avantajlıdır. Kimyasal depolama yönteminde film oluşurken çözelti içinde gerçekleşen çökelmeden dolayı bir metaryal kaybı olur bunun giderilmesi için SILAR yöntemi geliştirilmiştir. SILAR yöntemi Nicolau ve meslektaşları tarafından ZnS, CdZnS ve CdS ile alakalı olarak yapılan çalışmalarda tartışılmıştır. Bu yöntemle I-VI, II-VI, III-VI, V-VI, VIII-VI, ikili ve I-III-VI, II-II-VI, II-III-VI, II-VI-VI ve II-V-VI üçlü sülfürlü ve daha farklı filmler büyütmek için kullanışlı bir yöntemdir. Bu yöntem; katyon ve anyon iyonları adsorpsiyonu, reaksiyonu ve her bir daldırma döngüsünden oluşan bir süreçtir. Yani alttaban üzerine elde edilmek istenen bileşiğin biriktirilmesidir. Bu yöntem ile çözeltilerin birden çökelmesi engelenmiş olur ve daha iyi filmlerin elde edilmesine olanak sağlar. Adsorpsiyon, alttaban ile iyonlar arasında gerçekleşen bir ekzotermik yüzey işlemidir ve çözeltideki iyonlar ile

alttaban malzemenin yüzeyi arasındaki çekici kuvvetlerin etkisiyle ortaya çıkar. Bu bağlayıcı kuvvetler, Van-der Waals kuvvetleri veya kimyasal çekim kuvvetleri olabilir. Alttaban malzeme yüzeyindeki atom veya moleküllerin etrafında boşluklar bulunmaktadır. Yani etrafı diğer atom ya da moleküller ile tamamen kaplı değildir. Bundan dolayı taban malzemenin parçacıklarına tutunan parçacıklar dengelenmemiştir. Bunun sonucunda atomlar alttaban malzeme yüzeyine yapışabilirler. Katyon ve anyon iyonları arasında oluşan reaksiyon ile istenilen ince film elde edilir. Adsorpsiyon işlemini etkileyen bazı faktörler;

a) Çözeltinin sıcaklığı
b) Çözeltinin konsantrasyonu
c) Basınç
d) Alttaban malzemenin yapısı
e) Alttaban malzemenin yüzey alanıdır.

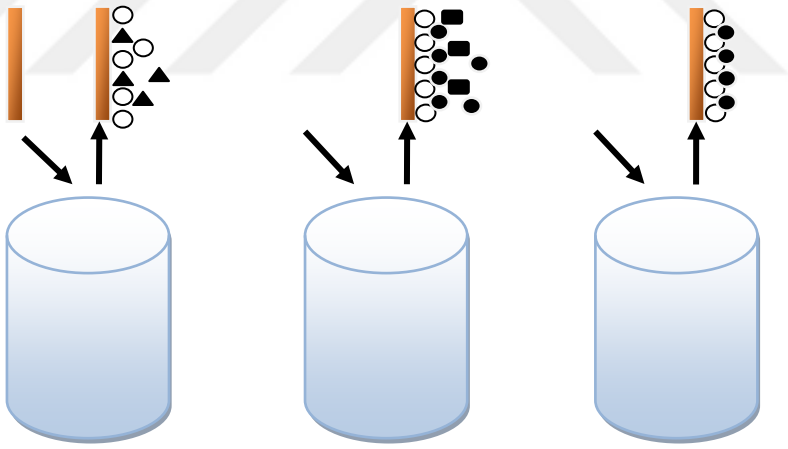
Çözeltinin konsantrasyonu, pH, sıcaklık, reaksiyon hızı, daldırma zamanı gibi parametreleri rahatça ayarlanabilmesinden dolayı elde edilen ince filmin yüzey morfolojik oluşumu kontrol altına alınabilir. Atmosfer basıncında ve oda sıcaklığında hazırlanılan çözeltilerin düşük sıcaklıklara ayarlanabilmesi ve sadece cam beherler kullanımı ile deneyin yapılabilmesi nedeniyle en ucuz yöntemlerden biridir. SILAR yönteminin bazı avantajları sıralanacak olursa:

1) Film üretimde katkılama yapılmak istendiğinde katkılama için katyonik çözeltinin içine direk katkı maddesinin eklenmesinden dolayı çok büyük bir kolaylık sağlar.
2) Kapalı buhar çökeltme metodundan farklı olarak SILAR yöntemi endüstriyel uygulamalarda vakum ve yüksek kalitede hedef veya altlık gerektirmediğinden endüstriyel açıdan büyük bir avantaja sahiptir.
3) Çökeltme oranı ve filmin kalınlığı, çökeltme döngüsünü değiştirmek şartıyla kolaylıkla kontrol edilebilir.

4) Oda sıcaklığında yapılan işlemlerde, alttaban malzemenin oksitlenme durumu olmadığı için malzemeler üzerine film kolaylıkla büyütülebilir.
5) Yüksek enerjili metodlardan (Radyo frekansı manyetron püskürtme yöntemi (RFMS) gibi) farklı olarak SILAR yöntem çökeltilen materyal için zararlı olabilecek ısınmalara yol açmaz.
6) Kaplanacak malzemenin boyutları ve yüzeyi rahatça kaplanabilmektedir (Çevik, 2013).

3.2.2. SILAR Yöntemi ile Deneyin Yapılışı

Cu_2O ince filmlerin depolanması için farklı bakır tuz kaynakları kullanılarak dört farklı deney yapılmıştır. Ayrıca her bir deney 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü tekrarlanarak filmler elde edilmiştir.



Şekil 3.1. SILAR yöntemi için deneysel düzenek

Oda sıcaklığında, SILAR yöntemi ile Cu_2O ince filmleri elde edilmesi için ilk olarak 2 M 100 ml NaOH anyon çözeltisi daha sonrada 1 M 100 ml bakır kompleks çözeltisi hazırlanmıştır. İlk çözelti, NaOH çözeltisidir ve sıcaklığı 60 °C'de sabit hale getirilmiştir. İkinci çözelti ise bakır kompleks çözeltisidir ve oda sıcaklığında hazırlanarak çözeltinin sıcaklığı oda sıcaklığı olarak ayarlanmıştır. Hazırlanmış olan

NaOH çözeltisi 4 tane 25 ml beherlere ve bakır kompleks çözeltisi de 4 tane 25 ml beherlere ayrılmıştır. 10 daldırma döngüsünde ilk olarak cam alttaban yavaşça ve dik bir şekilde 2 M 25 ml NaOH çözeltisine birkaç saniyeliğine daldırıldı. Daha sonrada yine dik bir şekilde 1 M 25 ml katyon kompleks çözeltisi olan bakır kaynağına birkaç saniyeliğine daldırılmıştır. Daldırma döngüsü bu şekilde bu iki beherin her birisi için 10 kez tekrarlandı. Daldırma işlemi bittikten sonra üzerinde film oluşan alttaban saf suya daldırılıp çıkarılır ve hava ortamında kurutulmuştur. 20, 30 ve 40 daldırma döngüleri de benzer yöntem ile hazırlanmıştır.

3.2.3. Cu_2O İnce Filmlerin Depolanma Sürecindeki Kimyasal Reaksiyon Aşamaları

Cu_2O ince filmlerin depolanması için 1 M 40 ml $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ kompleks öncül olarak 1 M 10 ml $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ çözeltisinin içine eklenir ve sonra üzerine 50 ml saf su eklenerek 100 ml tamamlanmıştır. Bu kompleks çözelti magnetik karıştırıcı ile birkaç saniyeliğine karıştırılmıştır. Diğer tuz ($Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$),, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$) kaynaklarıda $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ gibi hazırlanmıştır. $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ve $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ sulu çözeltileri sulu ortama sırası ile $S_2O_3^{-2}$ ve Cu^{+2} iyonlarını verir. $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ çözeltsi bu bakır kaynak çözeltisine ilave edildiğinde Cu^{+2} iyonlarını indergeyerek Cu^{+} iyonlarının oluşmasını sağlamaktadır. Bakır tuz kaynakları çözeltileri mavi renklidir ve $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ çözeltisi, bakır tuz kaynağı çözeltisine ilave edildiğinde elde edilen bakır kompleks çözeltisinin rengi renksizdir. Kompleks çözeltinin renginin renksiz olmasının nedeni Cu^{+2} iyonlarının Cu^{+} iyonlarına indirgenmesidir.

$$2Cu^{+2} + 4S_2O_3^{-2} \leftrightarrow 2\,[Cu(S_2O_3)]^{-} + (S_4O_6)^{-2}$$

Tiyosülfatbakır(I) çözeltisindeki Cu(I) iyonları aşağıdaki denklemde çözünüm dengesine gelir.

$$[Cu(S_2O_3)]^{-} \leftrightarrow Cu^{+} + S_2O_3^{-2}$$

2 M 100 ml NaOH çözeltisi hazırlanıp 60 °C de sabit sıcaklığa ayarlanır. Burdaki OH^- anyon iyonları ile Cu^+ katyon iyonları bir araya gelerek çözelti ve alttaban üzerine Cu_2O moleküllerini oluştururlar (Nikam ve ark., 2016).

$$Cu^+ + OH^- \rightarrow CuOH$$

$$2CuOH \rightarrow Cu_2O + H_2O$$

3.2.4. Malzeme Analiz Yöntemleri

3.2.4.1. Optiksel Özelliklerin Analizi

Cu_2O ince filmlerin bant aralığı enerjisi (E_g), bant yapısı, geçirgenlik (%T), yansıma (%R), soğurma (A) gibi fiziksel özellikleri hakkında bilgi verir. SILAR yöntemi ile amorf cam alttabanlar üzerine depo edilen saf Cu_2O ince filmlerin optik karakterizasyonu için optik geçirgenlik (%T) ve soğurma (A) spektrum ölçümleri Perkin Elmer UV/Vis Lamda 2S spektrofotometresi kullanılarak alındı. Bu ölçümler, oda sıcaklığında spektrofotometrede 300–1100 nm dalga boyu aralığında yapıldı. Spektrofotometreye yerleştirilen boş camların üzerinden ışık geçmesi sağlanarak sistem %100 olarak normalize edildi. Böylece ince filmlerin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik değerleri cam alttabandan bağımsız hale getirildi.



Şekil 3.2. Perkin-Elmer UV/Vis Lamda 2S spektrometresi

3.2.4.1.(1). Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi

I(λ) ışık şiddetini, x ortam içinde alınan yolu, *α* ise soğurma katsayısına bağlı olarak optik soğurma için Beer-Lambert yazılırsa;

$$\alpha = \frac{1}{I(\lambda)} \frac{dI(\lambda)}{dx} \tag{3.1}$$

Dik açı ile gelme halinde yansıma katsayısı;

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k^2}{(n_2 + n_1)^2 + k^2} \tag{3.2}$$

şeklinde yazılabilir. İkinci ve birinci ortamların n_2 ve n_1 kırılma indislerinin gerçel kısmı, *k* ise sanal kısmıdır ve sanal kısım olan *k* görünür bölgede *n*'den çok çok küçük olduğu için k^2 terimi ihmal edilebilir. Böylece (3.2) eşitliği aşağıdaki gibi olur.

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \tag{3.3}$$

Örnekler cam alttaban üzerine hazırlanıp daha sonra bu şekilde ölçüm alınmasından dolayı camdan gelen soğurma teriminin etkisi, ölçüm sırasında spektrofotometre optimize edildiği için cam alttabanın soğurması için düzeltme terimi yazmaya gerek yoktur.

Tek renkli ışık I_o şiddetinde, d kalınlığındaki bir ince film üzerine düşürülürse film içerisinde giren ışık miktarı *I* (girişim ihmal edildiği zaman),

$$I = (1 - R) I_0 \tag{3.4}$$

yazılabilir. Film sonuna ulaşan ışık şiddeti ise

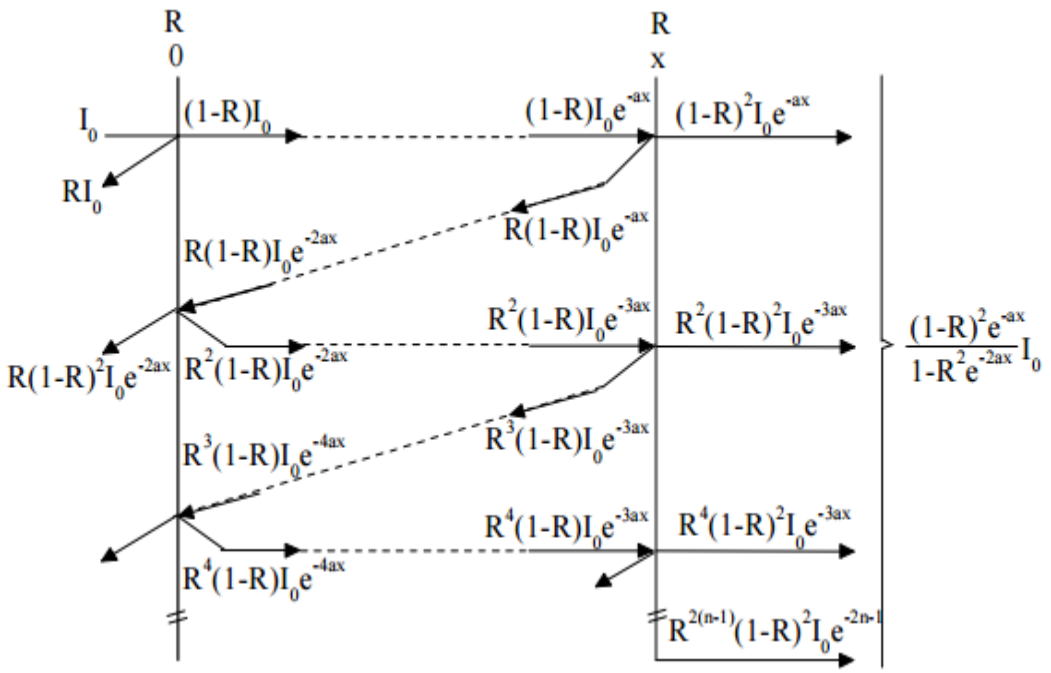
$$I = I_0(1-R)e^{-\alpha d} \tag{3.5}$$

dir. Filmden geçen ışık miktarı

$$I = I_0(1-R)^2 e^{-\alpha d} \tag{3.6}$$

Geriye yansıyan ışık miktarı ise

$$I = R(1-R)I_0 e^{-\alpha d} \tag{3.7}$$



Şekil 3.3. İnce bir filmde çok yansımalı ışık geçirimi (Gümüş, 1998)

Bu şekilde iç yansımalar Şekil 3.3'de görüldüğü gibi devam ettirilirse yansıyan ışın miktarının her yansımada bir

$$I = R^{2n}(1-R)^2 I_0 e^{-(2n+1)\alpha d} \tag{3.8}$$

terimi kadar arttığı görülür. Bu katkılar göz önüne alınarak filmin toplam ışık geçirgenliğinin

$$I = (1-R)^2 I_0 e^{-\alpha d} (\sum_n R^{2n} e^{-2n\alpha d}) \tag{3.9}$$

olduğu görülür ki bu ise geometrik bir seridir. Böylece toplam geçirgenlik

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}} \tag{3.10}$$

şekline indirgenir. Optik yoğunluk aşağıdaki formülle tanımlanır.

$$\text{Optik yoğunluk} = \text{O.D.} = \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{3.11}$$

(3.11) eşitlik geçirgenlik (T) cinsinden;

$$T = 10^{-O.D.} \tag{3.12}$$

şeklinde yazılabilir. (3.10) eşitliğinde içler dışlar çarpımı ile

$$TR^2 e^{-2\alpha d} + (1-R)^2 e^{-\alpha d} - T = 0 \tag{3.13}$$

haline gelir. Burada $e^{-\alpha d} = y$ tanımı yaparsak $e^{-2\alpha d} = y^2$ olur ve (3.13) eşitliği (3.14) şeklinde bilinen ikinci dereceden eşitlik şeklini alır. Bu denklem kökü ($e^{-\alpha d}$ en küçük değeri sıfır olabileceğinden eksi kök atılırsa)

$$TR^2 y^2 + (1-R)^2 y - T = 0 \tag{3.14}$$

$$y = \frac{-(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4R^2T^2}}{2TR^2} \tag{3.15}$$

Soğurma katsayısı bulunur. Böylece optik yoğunluktan geçirgenlik belirlenince (3.16) eşitliği kullanılarak soğurma katsayısı

$$\alpha = -\frac{1}{x}\ln(-\frac{-(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4R^2T^2}}{2TR^2}) \tag{3.16}$$

elde edilir (Gümüş, 1998).

Metal olmayan katılar, yeterli düşük sıcaklıklarda ve zayıf alanlarda, yalıtkan ya da dielektriksel özellik gösterirler. Katının en düşük elektriksel karşı koyma gücüne göre zayıf kabul edilen alan zayıf alan olarak adlandırılır. Eğer böyle bir katı malzeme bir elektriksel alana konulursa üzerinde bir elektirksel akım oluşmaz. Fakat elektriksel alan, atomik, elektriksel yapıları ve durumlarında değişme neden olur yani eksi ve artı yüklerin birbirinden ayrılması olayıdır ki bunun sonucunda katıda oluşan bu değişimlere elektriksel polarizasyon (kutuplanma) adı verilir. Polarizasyon ($\vec{p}$) birim hacimdeki momentlerin toplamı olarakta tanımlanır

$$\vec{p} = \sum p_i \tag{3.17}$$

p_i maddenin parcaçıklarının temel elektriksel momentleridir.

Dielektirksel (ε) özellik dipolmoment yoğunluğuna ($\vec{D}$), ve elektriksel alana ($\vec{E}$) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} = \vec{E} + 4\Pi\vec{p} \tag{3.18}$$

$$\varepsilon = 1 + \frac{4\Pi p}{E} = 1 + 4\Pi X \tag{3.19}$$

Burdan dielektrik sabiti, *P* ile doğru orantılı olduğu görülür (Durlu, 1989).

Bir dielektrik veya optik ortamın kırılma indisi, ışığın boşluktaki *c* ve ortamdaki hızı *v*'ye oranıdır:

$$n = \frac{c}{v} \tag{3.20}$$

Maxwel denklemleri yardım ile bir örneğin kırılma indisi:

$$n = \varepsilon\mu \tag{3.21}$$

elde edilir. ε statik sabit (göreli dielektrik geçirgenlik) ve μ magnetik geçirgenliktir. Magnetik olmayan malzemenin μ = 1 dir. Böyle malzemelerin kırılma indisi formülü $n = \sqrt{\varepsilon}$ olur. Belirli bir frekansta materyalin optiksel özellikleri dielektrik özelliklerine bağlı olduğundan önemli bir kavramdır. ε ışığın dalga boyuna bağlıdır dolayısıyla kırılma indisi de ışığın dalga boyuna bağlıdır ki bu dispersiyon olarak adlandırılır. Dispersiyona ek olarak, elektromagnetik dalga soğurucu veya saçıcı bir ortamdan geçerken kendi enerjisini kaybeder. Dalganın enerjisini kaybetme şekli farklı şekillerde olur, örneğin fonon üretimi (örgü dalgası), photogeneration, serbest taşıyıcı soğurulması ve saçılmasıdır. Böyle materyallerde, kırılma indisi ışığın dalga frekansının kompleks bir fonksiyondur.

Reel parçası kırılma indisi (n) ve imajiner parçası sönüm katsayısı (k) olan N kompleks kırılma indisi kompleks göreli dielektrik geçirgenlik ile ilişkilidir,

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 \tag{3.22}$$

$$N = n - ik = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{\varepsilon_1 - i\varepsilon_2} \tag{3.23}$$

Dielektrik sabiti (ε) reel kısmı ve imajiner kısmı sırası ile ε_1, ε_2 dir ve yukarıdaki (3.23) eşitliği aşağıdaki (3.24) eşitliğini verir (Kasap ve Capper., 2006).

$$n^2 - k^2 = \varepsilon_1 \quad 2nk = \varepsilon_2 \tag{3.24}$$

3.2.4.1.(2). Optik Özellikler ile ilgili Bazı Sabitler

Cu_2O İnce filmlerin oda sıcaklığındaki yansıma katsayısı değerleri (R) aşağıdaki eşitlik ile elde edildi.

$$R = 1 - \sqrt{Te^{A}} \tag{3.25}$$

(3.25) eşitliğinde T optik geçirgenlik ve A optik soğurma olarak tanımlıdır.

Cu_2O ince filmlerin soğurma katsayısı (3.26) eşitliği kullanılarak hesaplandı;

$$\alpha = -\frac{1}{t}\ln(\frac{T}{T_o}) \tag{3.26}$$

Burada t filmin kalınlığını, T_o gelen ve T geçen ışığın değerini göstermektedir.

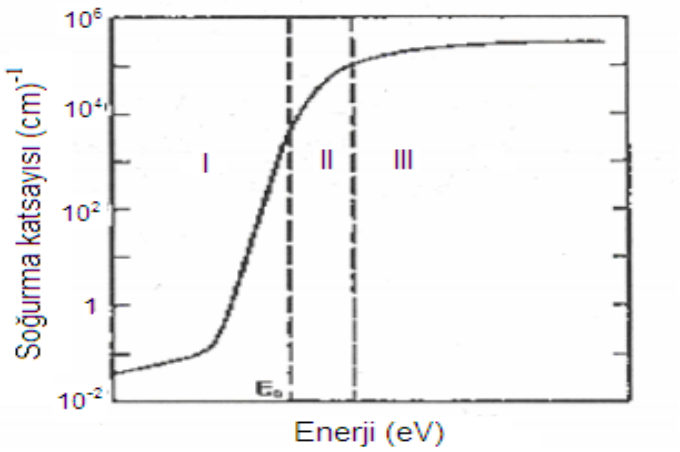
$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \tag{3.27}$$

k sönüm katsayısı, α soğurma katsayısı ve λ dalga boyu kullanılarak eşitlik (3.27) ile optik ortamın kırılma indisi hesaplanır.

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \tag{3.28}$$

Cu_2O ince filmlerinin optik kırılma indisi eşitlik (3.28) ile hesaplanmaktadır. R yansıma katsayısı, k sönüm katsayısıdır.

3.2.4.1.(3). Enerji Bant Aralığının Hesaplanması



Şekil 3.4. Amorf bir yarıiletkenin soğurma katsayısının enerji ile değişimi (Mott, 1979)

Amorf bir yarıiletkenin soğurma katsayısının enerjiye göre değişimi Şekil 3.4'de görülmektedir.

$\alpha < 1$ cm^{-1} I. bölgesinin enerji aralığı yapı kusurlarının oluşturduğu elektron enerji durumlarına bağlı soğurmadır.

$1 < \alpha < 10^4$ cm^{-1} olan II. bölgede Urbach kuyruğunun oluştuğu yer olup değerlik ve iletkenlik bandındaki elektronların enerji durumlarının uzantılarının oluşturduğu bölgedir. Bu bölgedeki sınırlar içi içe girmiş durumdadır. Enerji bant aralığı II. bölgesine düşer. Ölçülen soğurma katsayısından enerji bant aralığı (E_g) aşağıdaki yöntem ve yaklaşımlar kullanılarak hesaplanabilir.

$\alpha > 10^4$ cm^{-1} III. bölge banttan banda geçişlerin oluşturduğu bölgedir ve fotoiletkenlik yöntemiyle bile tamamı ölçülemez.

Doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerde kristal soğurması ve amorf yarıiletkenin için $1 < \alpha < 10^4$ cm^{-1} II. bölgesinde soğurma katsayısı aşağıdaki (3.29) eşitliğindeki gibidir (Kara, 2008).

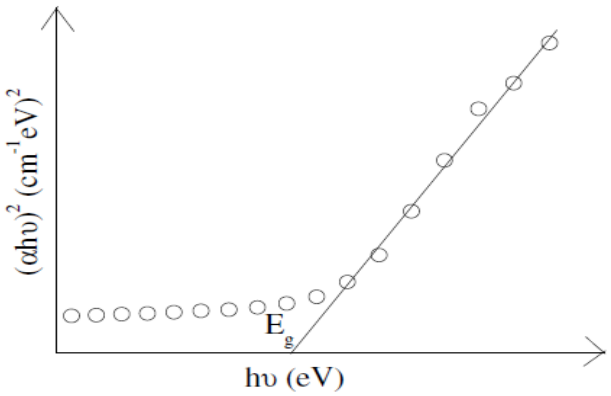
$$\alpha(h\nu) = A\,\left(h\nu - E_g\right)^n \tag{3.29}$$

Enerji bant aralığı (*Eg*) doğrudan veya dolaylı enerji bant aralığı *n*=1/2, 2, 3/2, 3 değerleri ile belirlenir. Dolaylı bant geçişli *n*=2 ise enerji bant aralığında safsızlık ya da katkı seviyelerinin olmasıdır. Dolaylı bant geçişli *n*=3 ise enerji bant aralığında herhangi bir seviyenin olmamasıdır. Doğrudan bant geçişli *n*=1/2 ise enerji bant aralığında safsızlık veya katkı seviyelerinin olmasıdır. Doğrudan bant geçişli n=3/2 enerji bant aralığında herhangi bir seviyenin olmamasında kullanılır.

Amorf yarıiletkende $\alpha > 10^4$ cm^{-1} III. bölge ise soğurma katsayısı (3.30) eşitliği

$$\alpha = \alpha_o \exp\left(\frac{E}{E_e}\right)^n \tag{3.30}$$

E gelen fotonun enerjisi, α_o sabit, E_e üstel kenar bölgesinin eğimi ile ilgilidir ve yarıiletkende ki kusur veya katkı seviyelerinin bant kuyruğunun genişliğine denk gelir (Aksoy, 2011).



Şekil 3.5. Yarıiletken ince filmin soğurma katsayısının enerjiye bağlı olan değişiminde filmin enerji bant aralığının bulunması (Erken 2015).

Soğurma katsayısının enerji ile çarpımının karesinin $(\alpha hv)^2$ enerjiye karşılık çizilen grafiğine teğet çekildiğinde bu teğetin $(\alpha hv)^2=0$ olduğunda alınan *E* enerji değeri (E_g) enerji bant aralık değeridir (Erken, 2015).

Cu2O ince filmlerin enerji bant aralığı aşağıdaki (3.31) eşitliği kullanılarak bulundu,

$$\alpha h\nu = K\left(h\nu - E_g\right)^{n/2} \tag{3.31}$$

E_g yarıiletkenin enerji bant aralığı, α soğurma katsayısı, K sabit bir sayı, $h\nu$ foton enerjisi ve n sabit bir sayıdır. Doğrudan bant aralıklı yarıiletkenler için n=1 dir.

$$\alpha h\nu = K\left(h\nu - E_g\right)^{1/2} \tag{3.32}$$

3.2.4.2. Filmlerin Kalınlık Hesabı

Cam alttaban üzerine elde edilen Cu_2O ince filmleri tartım yöntemi ile hesaplandı. İlk olarak temizlenmiş boş cam hassas terazi ile tartılır ve bu cam üzerine SILAR yöntem ile Cu_2O ince filmi kaplanır. Daha sonra kaplanmış camın bir yüzeyindeki film kromik asitle temizlendikten sonra tartılır. Bu tartımlar arasındaki fark ince filmin kütlesini verir.
Filmlerin kalınlıkları;

$$t = \frac{m_s - m_i}{\rho \cdot A} \tag{3.33}$$

(3.33) eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada m_s–m_i filmin kütlesidir, ρ filmin yoğunluğunu ve cam alttabanın yüzey alanını A dır. Film kalınlığı homojen olarak dağılım gösterdiği düşünülmüştür. Cu_2O ince film yoğunlukları 6.1 gr/cm^3 olarak alındı.(Ohajianya, ark., 2013)

3.2.4.3. Filmlerin Elektriksel Özelliklerin Belirlenmesi

Filmlerin hall ölçümleri, Hall Effect Measurement System HS-3000 ManualVer 3.5 sistemi ile alınmıştır. İlk olarak kare şeklinde kesilen Cu_2O örnekleri daha sonra dört köşesine indiyum omik kontak yapılmıştır. Daha sonra mıknatıs kitine yerleştirilen örneklerin oda sıcaklığında Hall ölçümleri alındı. Hall ölçümü

yolu ile Cu_2O ince filmlerin mobilite (μ), taşıyıcı konsantrasyonu, özdirenç (ρ), gibi elektriksel değerleri ölçülmüş ve iletkenlik tipi tespit edilmiştir.



Şekil 3.6. Hall ölçüm sistemi HS-3000 ManualVer 3.5

3.2.4.4. Filmlerin Yapısal Özelliklerinin X-Işını Kırınım Cihazı (XRD) Kullanılarak Analiz Edilmesi

X-ışını kırınımı, kristal fazların belirlenmesi, yapısal özelliklerini incelenmesi amaçıyla kullanılan ve ayrıca örneğe zarar vermeden ölçüm alan analitik bir yöntemdir. X-ışını üzerine gönderilen bir örneğin saf ya da karışım olmasına bağlı olarak bu örneğin karakteristik kırınım deseni oluşmasını sağlar. Bu kırınım deseni kullanılarak ince filmlerin yapısal özellikleri ve kristal fazları ortaya çıkarılmıştır (Shampa, 2013).

SILAR yöntemi ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin X-ışını analizleri Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezinde (MEİTAM) bulunan Rigaku SmartLab difraktometre sistemi (CuKα_1, 1.54059 *Å*, 40 kV, 30 mA, tarama hızı 3.0352 derece/dakika) ile otomatik veri hafızası kullanılarak 2θ=10°-80° aralığında yapıldı. X-ışını kırınım grafiklerindeki dik eksen kırınım sinyal şiddetini, yatay eksen ise 2θ Bragg kırılma açısıdır.



Şekil 3.7. X-ışını kırınım cihazı

X-ışını kırınım desenindeki dikey eksen şiddeti, yatay eksende 2θ açısını ifade eder. Her pikin 2θ açısından yararlanılarak θ açısı bulunur ve Bragg eşitliğinde yerine koyularak

$$n\lambda = 2d \sin\theta \tag{3.34}$$

atom düzlemleri arasındaki d uzaklığı hesaplanır. Burada λ, X-ışını dalga boyunu, n ise kırınım derecesini gösterir.

X-ışını ölçümleri sonucunda kübik fazda olduğu tespit edilen Cu_2O ince filmlerin düzlemler arası uzaklık (d) ve (hkl) düzlemindeki h, k, l değerleri yerlerine yazılarak örgü parametreleri (a, b ve c) hesaplanır.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \tag{3.35}$$

Kübik yapıda (a=b=c) örgü parametreleri birbirine eşittir (Cullity, 1958).

Filmlerin optiksel, yapısal, morfolojik ve elektriksel özellikleri üzerine tanecik yönelimi ve büyüklüğünün önemli etkileri var olmasından dolayı polikristal filmlerdeki tanecik büyüklüğü Scherrer formülü yardımıyla,

$$D = \frac{0.9\lambda}{FWHM\,(\beta)\cos\theta} \tag{3.36}$$

bulunur. Burada D tanecik büyüklüğü, $FWHM$ (β) radyan cinsinden maksimum şiddetli pikin yarı pik genişliği, θ Bragg kırınım açısı ve λ ise X-ışının dalga boyudur (λ=1.54059) (Cullity, 1958).

Bozuk yerleşme yoğunluğu (δ) filmdeki kusurların miktarını gösterir ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır (Güneri, 2009).

$$\delta = \frac{1}{D^2} \tag{3.37}$$

3.2.4.4. Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) Kullanılarak Analiz Edilmesi

Yüksek görüntüleme işlemi ve analizleri yapılabilen elektronik ve optik sistemlerin bir arada kulanıldığı cihazlar geliştirilmiştir. Bu elektroskopik görünteleme amacıyla tasarlanmış aletlerden biride elektron mikroskobudur (FE-SEM). Birçok araştırma geliştirme çalışmasının yanı sıra elektron mikroskobu sanayide, mikro elektronikte, tıpta ve kriminalde yaygın bir kullanıma sahiptir. Taramalı elektron mikroskobu ile görüntü almında yüksek voltaj uygulanarak hızlandırılan elektronların, örnek üzerine odaklandırılmasıdır ve bu örnek yüzeyinde elektron demetinin taratılması esnasında elektron ve örnek atomları arasında girişim meydana gelir. Açığa çıkan bu girişim etkileşimleri, algılayıcılar tarafından toplanır sonra sinyal güçlendiricide geçirilir. Daha sonrada katot tüpünden ekrana aktarılması sonucunda FE-SEM görüntüleri elde edilir.

Yeni gelişmiş sistemlerde algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere dönüştürülüp bilgisayara aktarılabilmektedir. Taramalı elektron mikroskobunun en önemli avantajları olan ayırım gücü, odak derinliği, görüntü ve analizi birleştirebilme özelliğinden dolayı kullanım alanı son yıllarda artmıştır (Ulutaş, 2009). Filmlerin FE-SEM ölçümleri Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezinde (MEİTAM) bulunan Zeiss Supra 55VP FEG SEM ile alınmıştır.



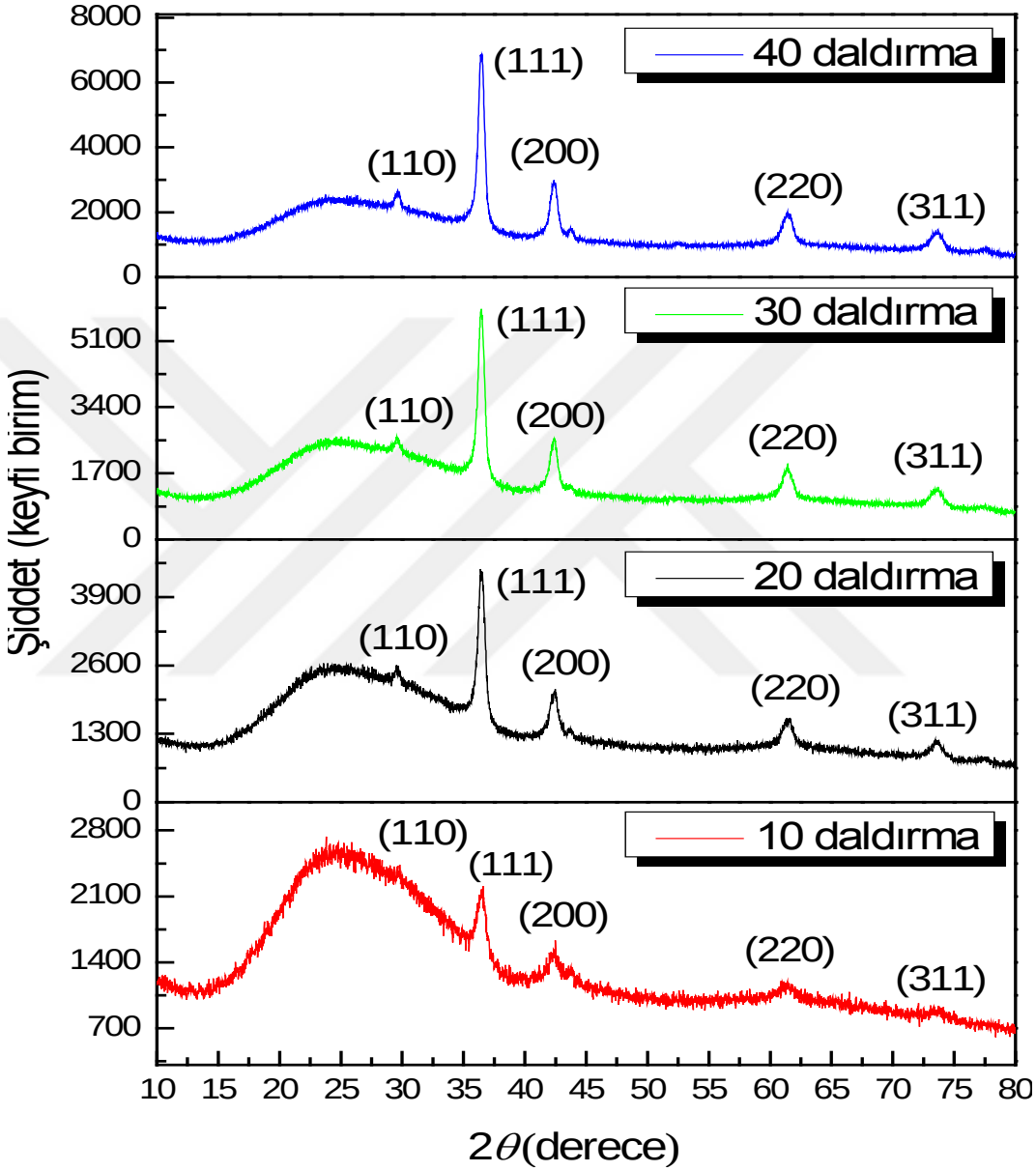
Şekil 3.8. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Cu_2O İnce Filmlerinin X-ışını Kırınım Analizleri

SILAR yöntemi ile dört farklı bakır tuz kaynağı; $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırmada amorf cam alttabanlar üzerine Cu_2O ince filmleri depo edildi. Depo edilen Cu_2O ince filmlerin X-ışını analizleri Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezinde (MEİTAM) bulunan Rigaku SmartLab difraktometre sistemi ($CuK\alpha_1$, 1.54059 *Å*, 40 kV, 30 mA, tarama hızı 3.0352 derece/dakika) kullanılarak 2θ=10°-80° aralığında yapıldı. İnce filmlerin X-ışını kırınım desenleri kullanılarak kristalleşme durumu (tek kristal, polikristal veya amorf), örgü parametreleri, düzlemler arası uzaklık (*d*), kristal yönelimi, tane boyutu (*D*), *FWHM* (β) ve Miller indisleri (*hkl*) gibi yapısal özellikler tespit edildi.

4.1.1. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Analizleri



Şekil 4.1. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, tuzu ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri

60 °C'de 2 M NaOH çözeltisi ve oda sıcaklığında bulunan 1 M $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen Cu_2O ince filmlerin X-ışını kırınım deseni Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekilde tüm daldırmalar için geniş tepe yaklaşık $15° < 2\theta < 35°$ arasındadır. Bunun amorf cam

alttabanın etkisidir (Panda ve ark. 2007, Sankapal ve ark. 2000). 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen Cu_2O ince filmlerin daldırma sayısı artıkça filmlerin kalınlıkları artmaktadır. Buna bağlı olarak amorf tepe yüksekliğinde bir miktar azalma görülmüştür. Bunun nedeni X-ışınlarının artan film kalınlığına bağlı olarak amorf cam alttaban ile etkileşiminin azalmasıdır.

Şekil 4.1'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin X-ışını kırınım desenindeki $10° \leq 2\theta \leq 80°$ arasındaki 2θ değerleri sırası ile; 10 daldırmada elde edilen Cu_2O ince filmleri için 2θ=29.90°, 2θ=36.36°, 2θ=42.06°, 2θ=60.92° ve 2θ=73.72°, 20 daldırmada elde edilen Cu_2O ince filmleri için 2θ=29.60°, 2θ=36.60°, 2θ=42.40° , 2θ=61.30° ve 2θ=73.53°, 30 daldırmada elde edilen Cu_2O ince filmleri için 2θ=29.57°, 2θ=36.40°, 2θ=42.40°, 2θ=61.34° ve 2θ=73.49°, 40 daldırmada elde edilen Cu_2O ince filmleri için 2θ=29.67°, 2θ=36.40°, 2θ=42.40°, 2θ=61.41° ve 2θ=73.60° görülmüştür. Bu açı değerlerine karşılık gelen (*hkl*) düzlemleri sırasıyla (*110*), (*111*), (*200*), (*220*) ve (*311*) olduğu tespit edilmiştir.

10, 20, 30 ve 40 daldırmada oluşturulan Cu_2O ince filmlerdeki tüm piklerin 2θ değerlerinin üst üste gelerek örtüştüğü Şekil 4.1'de görülmektedir. Daldırma sayısı artıkça kırınım piklerinin şiddetlerinde belirgin bir artış vardır. Bu da Cu_2O filminin daha iyi polikristal yapıya doğru kaydığının göstergesidir. 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen Cu_2O ince filmlerinin en şiddetli (*111*) düzlemindeki pikin şiddeti sırasıyla; 655.77, 2849, 4307.62, 5318.69 ve (*200*) düzlemindeki pikin şiddeti ise sırasıyla; 492.82, 954.4, 1432.70, 1776.92 olarak belirlendi. Sonuç olarak; daldırma sayısının artması ile (*111*) düzlemindeki pikin şiddet değerinin belirgin bir şekilde arttığı görüldü. Ayrıca Şekil 4.1'de görüldüğü gibi filmin büyüme yönelimi güçlü bir şekilde (*111*) düzlemindeki en şiddetli pike doğru kaymaktadır. Bunun nedeni artan film kalınlığı ile filmdeki tanecik sayısının artarak daha sıkı bir yapı oluşturması ve filmlerin büyüme yöneliminin güçlü bir şekilde (*111*) düzlemindeki ana pike doğru daha düzenli bir yapıda kristalleşme göstermesidir.

Cu_2O ince filmlerinin (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki ana piklerin *d* değerleri (3.34) eşitliği olan Bragg yasası kullanılarak hesaplandı. (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki ana piklerin *d* değerleri sırası ile 10 daldırma için 2.47 ve 2.15 *Å*, 20

daldırma için 2.45 ve 2.13 *Å*, 30 daldırma için 2.47 ve 2.13 *Å*, 40 daldırma için 2.47 ve 2.13 *Å* olarak hesaplandı.

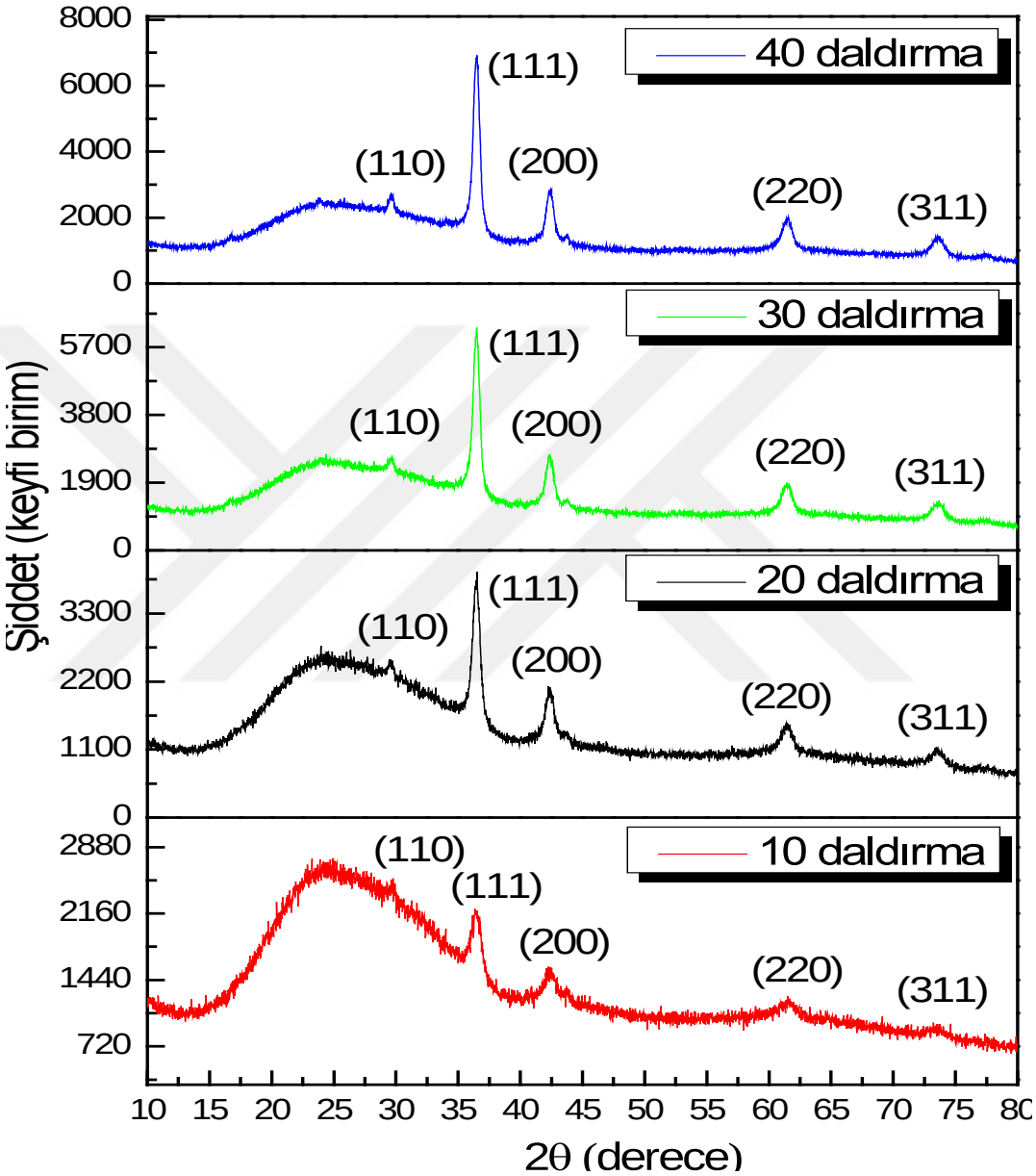
Filmlerdeki piklerin 2θ ve *d* değerleri Cu_2O nin standart kartındaki (PDF Kart No:01-071-3645) değerleri ile bire bir uyumlu olduğu görüldü. X-ışını kırınım analizleri sonucunda Cu_2O ince filmlerin polikristal yapıda ve kübik fazda (*111*) düzlemine doğru güçlü bir kristal yönelimine sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.1. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerdeki (*111*) ve (*200*) düzlemlerine ait kristal parametreleri

Daldırma sayısı	2θ (°)	d (Å)	*D* (Å)	*a=b=c* (Å)	*FWHM* (°)	(*hkl*)	Standart değerler PDF 01-071-3645		
							2θ (°)	*d* (Å)	*a=b=c* (Å)
10	36.36	2.47	49.15	4.28	1.7010	(*111*)	36.43	2.46	4.27
	42.06	2.15	57.08	4.30	1.4912	(*200*)	42.31	2.13	
20	36.60	2.45	51.75	4.26	1.6887	(*111*)	36.43	2.46	
	42.40	2.13	60.58	4.26	1.4692	(*200*)	42.31	2.13	
30	36.40	2.47	140.91	4.27	0.6198	(*111*)	36.43	2.46	
	42.40	2.13	115.38	4.27	0.7714	(*200*)	42.31	2.13	
40	36.40	2.47	149.16	4.27	0.5855	(*111*)	36.43	2.46	
	42.40	2.13	119.44	4.27	0.7451	(*200*)	42.31	2.13	

60 °C'de 2 M NaOH çözeltisi ve oda sıcaklığında bulunan 1 M $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen kübik fazdaki Cu_2O ince filmlerinin (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki ana piklere ait kristal parametreler; Miller indisleri (*hkl*), kristallerin tanecik boyutu (*D*) , 2θ, *d* ve örgü parametreleri, *FWHM* Çizelge 4.1'de görülmektedir. Elde edilen filmlerin tanecik boyutu (*D*) (3.36) eşitliği ve *a*, *b*, *c* örgü parametreleri (3.35) eşitliği yardımı ile hesaplanmıştır. SILAR yöntemi ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin 2θ, *d* ve (*a=b=c*) örgü parametreleri standart kartındaki (PDF Kart No:01-071-3645) değerler ile bire bir uyumlu olduğu görülmüştür.

4.1.2. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Analizleri



Şekil 4.2. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri

60 °C'de 2 M NaOH çözeltisi ve oda sıcaklığında bulunan 1 M $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen Cu_2O ince filmlerin X-ışını kırınım deseni Şekil 4.2'de verilmiştir. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin amorf camdan kaynaklı geniş tepe yüksekliği (2θ=15°-35°),

$Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerindeki gibi daldırma sayısı artıkça azalma göstermiştir.

$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin X-ışını kırınım desenindeki 2θ değerleri sırası ile; 10 daldırmada 2θ=29.80°, 2θ=36.49°, 2θ=42.48°, 2θ=61.67° ve 2θ=73.45°, 20 daldırmada 2θ=29.55°, 2θ=36.63°, 2θ=42.31°, 2θ=61.33° ve 2θ=73.70°, 30 daldırmada 2θ=29.67°, 2θ=36.42°, 2θ=42.40°, 2θ=61.41° ve 2θ=73.37°, 40 daldırmada 2θ=29.59°, 2θ=36.43°, 2θ=42.36°, 2θ=61.43°ve 2θ=73.51° görülmüştür. Bu açı değerlerine karşılık gelen (*hkl*) düzlemleri sırasıyla (*110*), (*111*), (*200*), (*220*) ve (*311*) olduğu tespit edilmiştir.

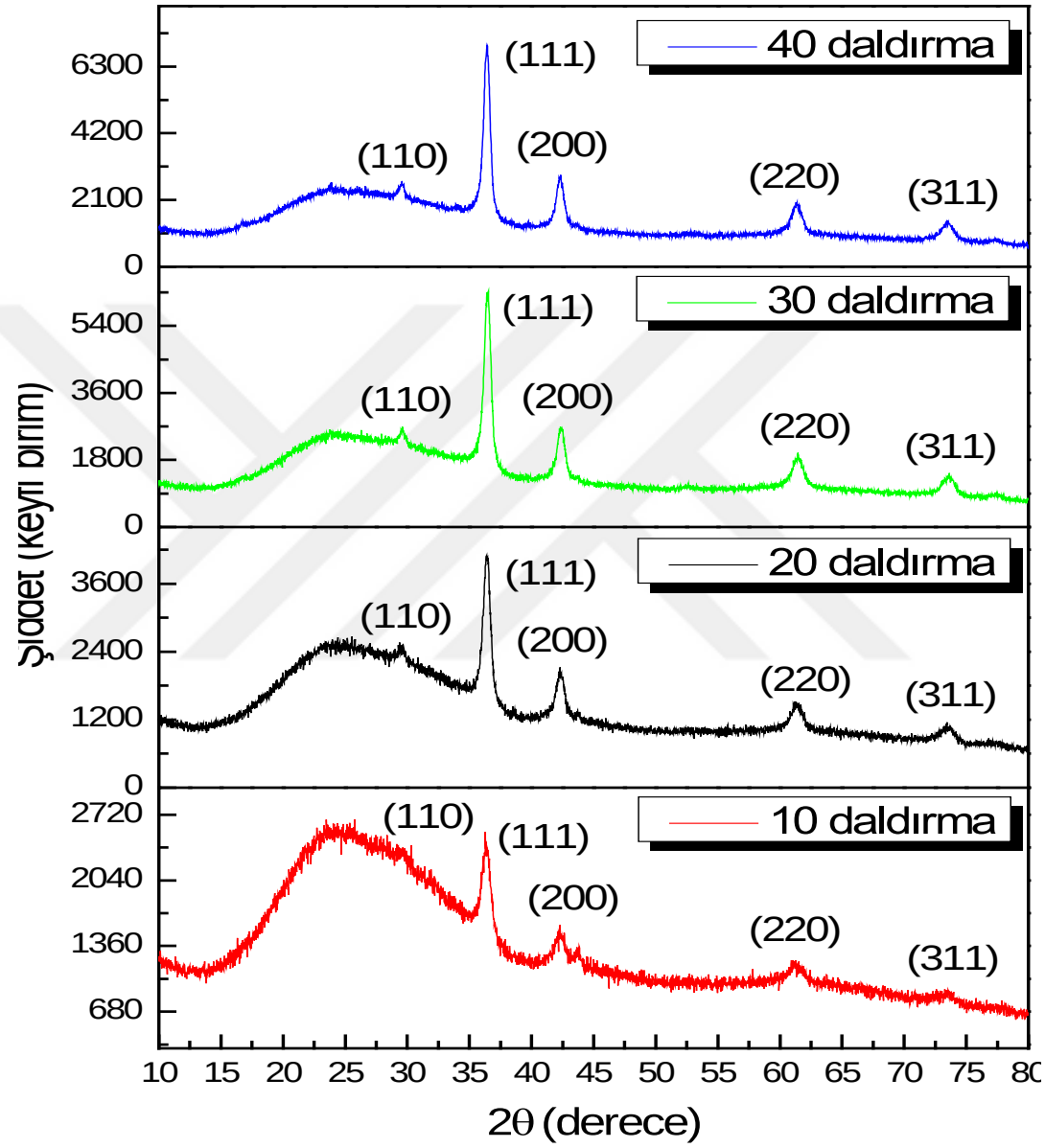
Şekil 4.2'de 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen Cu_2O ince filmlerinin (*111*) düzlemindeki ana pikin şiddet değerleri sırasıyla 643.33, 2387.69, 4604.7, 5307.69 ve (*200*) düzlemindeki pikin şiddeti ise sırasıyla; 428.89, 916.92, 1410.26, 1637.98 olarak hesaplandı. 40 daldırma için bu şiddet değeri, $(CH_3COO)_2Cu \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma ile elde edilen filmin (*111*) düzlemine ait şiddet değerinden çok az bir miktar artış göstermiştir. Burada da büyüme yönelimi güçlü bir şekilde (*111*) düzlemindeki en şiddetli pike doğrudur. Depolanan kübik fazdaki Cu_2O ince filmlerinin ana pikleri olan (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki *d* değerleri (3.34) eşitliği olan Bragg yasası kullanılarak hesaplandı. (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki ana piklerin *d* değerleri sırası ile 10 daldırma için 2.46 ve 2.13 *Å*, 20 daldırma için 2.45 ve 2.13 *Å*, 30 daldırma için 2.46 ve 2.13 *Å*, 40 daldırma için 2.46 ve 2.13 *Å* olarak hesaplandı. SILAR yöntemi ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin 2θ, *d* ve (*a*=*b*=*c*) örgü parametreleri standart kartındaki (PDF Kart No:01-071-3645) değerler ile bire bir uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2. ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerdeki (*111*) ve (*200*) düzlemlerine ait kristal parametreleri

Daldırma sayısı	2θ (°)	d (Å)	D (Å)	a=b=c (Å)	*FWHM* (°)	(*hkl*)	Standart değerler PDF 01-071-3645		
							2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)
10	36.49	2.46	38.17	4.26	2.1913	(*111*)	36.43	2.46	4.27
	42.48	2.13	51.66	4.26	1.6500	(*200*)	42.31	2.13	
20	36.63	2.45	49.55	4.26	2.1874	(*111*)	36.43	2.46	
	42.31	2.13	63.19	4.26	1.4079	(*200*)	42.31	2.13	
30	36.42	2.46	140.05	4.27	0.6237	(*111*)	36.43	2.46	
	42.40	2.13	112.49	4.26	0.7912	(*200*)	42.31	2.13	
40	36.43	2.46	145.33	4.27	0.601	(*111*)	36.43	2.46	
	42.36	2.13	122.5	4.26	0.7264	(*200*)	42.31	2.13	

60 °C'de 2 M NaOH çözeltisi ve oda sıcaklığında bulunan 1 M $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen kübik fazdaki Cu_2O ince filmlerinin (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki ana piklere ait kristal parametreler; Miller indisleri (hkl), kristallerin tanecik boyutu (D), 2θ, d ve örgü parametreleri, *FWHM* Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Kristallerin tanecik boyutu (D) (3.36) eşitliği ve a, b, c örgü parametreleri (3.35) eşitliği yolu ile hesaplanmıştır. Elde edilen Cu_2O ince filmlerinin 2θ, d ve ($a=b=c$) örgü parametreleri standart kartındaki (PDF Kart No:01-071-3645) değerler ile bire bir uyumlu olduğu görülmüştür.

4.1.3. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Analizleri



Şekil 4.3. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri

$Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak Cu_2O ince filmlerin 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen X-ışını kırınım desenleri Şekil 4.3'de verilmiştir. Şekilde elde edilen Cu_2O ince filmlerin amorf camdan kaynaklı geniş tepe yüksekliği Şekil 4.1'de

$Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ ve Şekil 4.2'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmleri ile tamamen benzerdir.

$Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmleri için 2θ değerleri; 10 daldırmada; 2θ=29.75°, 2θ=36.43°, 2θ=42.27°, 2θ=61.10° ve 2θ=73.54°, 20 daldırmada; 2θ=29.61°, 2θ=36.38°, 2θ=42.26°, 2θ=61.26° ve 2θ=73.55°, 30 daldırmada; 2θ=29.57°, 2θ=36.40°, 2θ=42.44°, 2θ=61.40° ve 2θ=73.55°, 40 daldırmada; 2θ=29.52°, 2θ=36.37°, 2θ=42.32°, 2θ=61.28° ve 2θ=73.41° dir. Bu açı değerlerine karşılık gelen (*hkl*) düzlemleri sırasıyla (*110*), (*111*), (*200*), (*220*) ve (*311*) olduğu bulunmuştur.

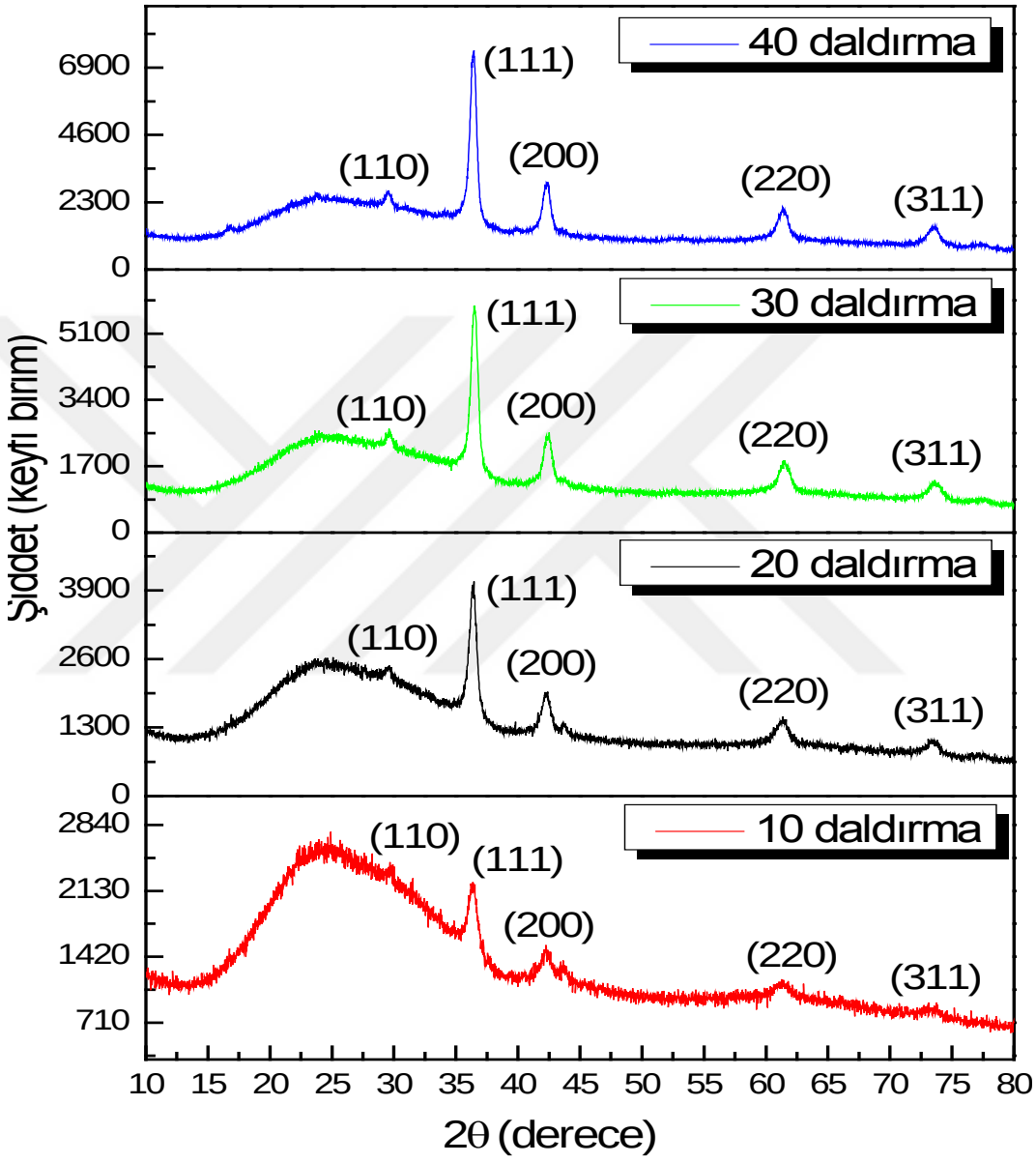
Şekil 4.3'deki 10, 20, 30 ve 40 daldırmada depolanan kübik fazdaki Cu_2O ince filmlerin (*111*) düzlemindeki ana pikin şiddet değerleri sırasıyla ve (*200*) düzlemindeki pikin şiddeti ise sırasıyla; 1019.23, 2542.44, 4676.13, 5303.13 olarak ve (*200*) düzlemindeki pikin şiddeti ise sırasıyla; 446.15, 937.04, 1386.04, 1705.41 olarak belirlendi. Bu değerler, daha önceki bakır kaynakları ile elde edilen filmlerin pik şiddetlerine göre bir miktar artış göstermiştir. Kübik fazdaki Cu_2O ince filmlerin ana pikleri olan (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki *d* değerleri (3.34) eşitliği kullanılarak 10 daldırma için 2.46 ve 2.14 *Å*, 20 daldırma için 2.47 ve 2.14 *Å*, 30 daldırma için 3.01 ve 2.47 *Å* ve 40 daldırma için 3.02 ve 2.47 *Å* olarak hesaplandı. Filmlerdeki piklerin 2θ ve *d* değerleri, Cu_2O nun standart kartındaki (PDF 01-071-3645) değerler ile uyumlu olduğu görüldü.

Çizelge 4.3. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerdeki (*111*) ve (*200*) düzlemlerine ait kristal parametreleri

Daldırma sayısı	2θ (°)	d (Å)	D (Å)	$a=b=c$ (Å)	*FWHM* (°)	(*hkl*)	Standart değerler PDF 01-071-3645		
							2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)
10	36.44	2.46	23.9	4.27	3.6542	(*111*)	36.43	2.46	4.27
	42.27	2.14	74.84	4.27	1.1887	(*200*)	42.31	2.13	
20	36.37	2.47	124.33	4.27	0.7024	(*111*)	36.43	2.46	
	42.26	2.14	76.66	4.27	1.1604	(*200*)	42.31	2.13	
30	36.40	3.01	132.48	4.27	0.6593	(*111*)	36.43	2.46	
	42.44	2.47	109.5	4.27	0.8128	(*200*)	42.31	2.13	
40	36.37	3.02	143.4	4.27	0.609	(*111*)	36.43	2.46	
	42.32	2.47	119	4.27	0.7477	(*200*)	42.31	2.13	

60 °C'de 2 M NaOH çözeltisi ve oda sıcaklığında bulunan 1 M $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen kübik yapıdaki Cu_2O ince filmlerinin (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki ana piklere ait kristal parametreler; Miller indisleri (hkl), kristallerin tanecik boyutu (*D*), 2θ, *d* ve örgü parametreleri, *FWHM* Çizelge 4.3'de verilmiştir. Cu_2O ince filmlerin tanecik boyutu (*D*) (3.36) eşitliği ve *a*, *b*, *c* örgü parametreleri (3.35) eşitliği ile hesaplanmıştır. Depolanmış Cu_2O ince filmlerinin 2θ, *d* ve (*a=b=c*) örgü değerleri ile standart PDF (01-071-3645) kartındaki değerler ile uyumludur.

4.1.4. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Analizleri



Şekil 4.4. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri

1 M $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen Cu_2O ince filmlerin X-ışını kırınım deseni Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekilde tüm daldırmalar için geniş tepe yaklaşık $15° < 2\theta < 35°$ arasındadır.

Şekil 4.4'de $10° \leq 2\theta \leq 80°$ arasında Cu_2O ince filmleri için yapılan X-ışını kırınım ölçümleri sonucu; 10 daldırmada elde edilen 2θ=29.75°, 2θ=36.41°, 2θ=42.06°, 2θ=60.92° ve 2θ=73.72°, 20 daldırmada elde edilen 2θ=29.60°, 2θ=36.47°, 2θ=42.31°, 2θ=61.26° ve 2θ=73.44°, 30 daldırmada elde edilen 2θ=29.56°, 2θ=36.44°, 2θ=42.39°, 2θ=61.41° ve 2θ=73.61°, 40 daldırmada elde edilen 2θ=29.57°, 2θ=36.36°, 2θ=42.36°, 2θ=61.37° ve 2θ=73.47° dir. Bu açı değerlerine karşılık gelen (*hkl*) düzlemleri sırasıyla (*110*), (*111*), (*200*), (*220*) ve (*311*) olarak bulunmuştur.

Şekil 4.4'de; 10, 20, 30 ve 40 daldırmada oluşturulan tüm Cu_2O ince filmlerdeki piklerin 2θ değerlerinin üst üste gelerek örtüştüğü görülmektedir. Daldırma sayısı artıkça kırınım piklerinin şiddetlerinde belirgin bir artış söz konusudur. Bu da Cu_2O filmlerin daha iyi polikristal yapıya doğru kaydığının göstergesidir.

Şekilde 10, 20, 30 ve 40 daldırmalar için elde edilen filmlere ait en büyük pik olan (*111*) düzlemindeki ana pikin şiddet değerleri sırasıyla ve (*200*) düzlemindeki pikin şiddeti ise sırasıyla; 654.24, 2500, 4201.92, 5769.23 olarak ve (*200*) düzlemindeki pikin şiddeti ise sırasıyla; 415.96, 826.21, 1365.38, 1691.69 şiddet değerine kadar yükselmiş olduğu görülmektedir. Cu_2O ince filmlerin kübik yapıda (*111*) düzlemindeki ana pike doğru tercihli yönelim gösterdiği görüldü.

Cu_2O ince filmlerindeki (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki ana piklerin *d* değerleri (3.34) eşitliği olan Bragg yasası kullanılarak hesaplandı. (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki ana piklerin *d* değerleri sırası ile 10 daldırma için 2.47 ve 2.15 *Å*, 20 daldırma için 2.47 ve 2.13 *Å*, 30 daldırma için 2.46 ve 2.13 *Å* ve 40 daldırma için 2.46 ve 2.13 *Å* olarak hesaplandı.

Piklerin 2θ ve *d* değerleri Cu_2O nun standart kartındaki (PDF 01-071-3645) değerleri ile uyumlu olduğu görüldü. Farklı bakır kaynakları kullanılarak elde edilen bütün Cu_2O ince filmlerin polikristal yapıda ve kübik fazda (*111*) düzlemine doğru, güçlü kristal yönelimi oluğu tespit edildi.

Çizelge 4.4. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerdeki (*111*) ve (*200*) düzlemlerine ait kristal parametreleri

Daldırma sayısı	2θ (°)	d (Å)	D (Å)	$a=b=c$ (Å)	*FWHM* (°)	(*hkl*)	Standart değerler PDF 01-071-3645		
							2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)
10	36.37	2.47	96.36	4.27	0.9063	(*111*)	36.43	2.46	4.27
	42.06	2.15	29.87	4.27	2.9757	(*200*)	42.31	2.13	
20	36.47	2.47	140.95	4.27	0.6198	(*111*)	36.43	2.46	
	42.31	2.13	99.6	4.27	0.8933	(*200*)	42.31	2.13	
30	36.44	2.46	131.85	4.27	0.6625	(*111*)	36.43	2.46	
	42.39	2.13	96.77	4.27	0.9196	(*200*)	42.31	2.13	
40	36.36	2.46	142.09	4.27	0.6146	(*111*)	36.43	2.46	
	42.36	2.13	118.98	4.27	0.7479	(*200*)	42.31	2.13	

60 °C'de 2 M NaOH çözeltisi ve oda sıcaklığında bulunan 1 M $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırmada elde edilen kübik fazdaki Cu_2O ince filmlerinin (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki ana piklere ait kristal parametreler; Miller indisleri (*hkl*), kristallerin tanecik boyutu (*D*), 2θ, *d* ve örgü parametreleri, *FWHM* Çizelge 4.4'de gösterilmiştir. Filmlerin tanecik boyutu (*D*) (3.36) eşitliği ve a,b,c örgü parametreleri (3.35) eşitliği ile hesaplanmıştır. Depolanmış Cu_2O ince filmlerinin 2θ, *d* ve (*a=b=c*) örgü değerleri Cu_2O nun standart kartındaki (PDF 01-071-3645) değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.5. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzları kullanılarak 40 daldırma döngüsünde elde edilen bütün Cu_2O ince filmlerinin (*111*) ve (*200*) düzlemlerine ait kristal parametreleri için bozuk yerleşme yoğunluğu

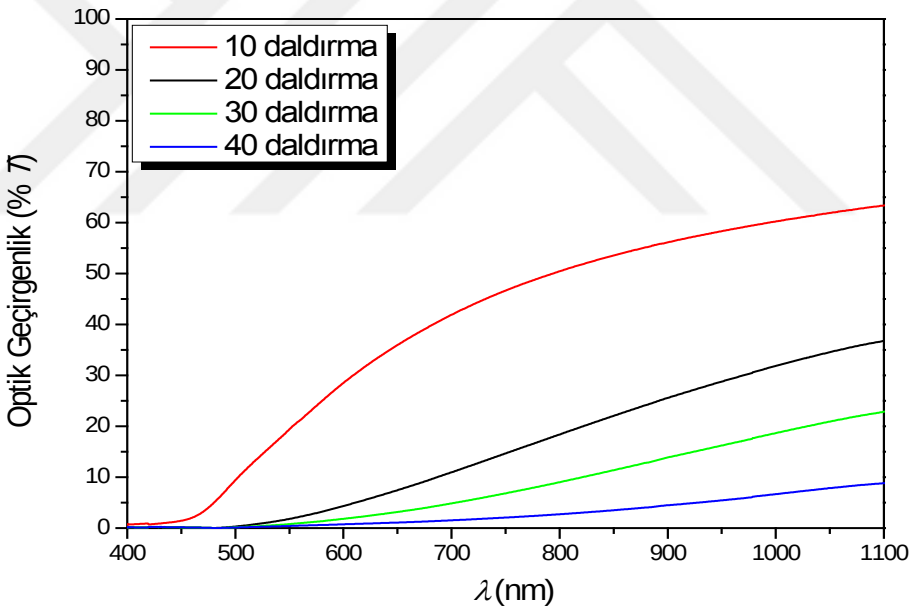
40 Daldırma Döngüsünde Elde Edilen Cu_2O İnce Filmler	2θ (°)	*FWHM* (°)	*D* (*Å*)	δ (**x**10^{-6} nm)	(*hkl*)
$(CH_3COO)_2Cu \cdot H_2O$	36.40	0.5855	149.16	4.49	(*111*)
	42.40	0.7451	119.44	7.01	(*200*)
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	36.43	0.601	145.33	4.73	(*111*)
	42.36	0.7264	122.5	6.66	(*200*)
$Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	36.37	0.609	143.4	4.86	(*111*)
	42.32	0.7477	119	7.06	(*200*)
$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	36.43	0.6146	142.09	4.95	(*111*)
	42.36	0.7479	118.98	7.06	(*200*)

Bozuk yerleşme yoğunluğu (δ) (3.37) eşitliği ile hesaplanmıştır. Çizelge 4.5'de farklı bakır tuz kaynakları kullanılarak 40 daldırmada hazırlanan Cu_2O ince filmler için bozuk yerleşme yoğunluğu (δ) değerleri sırasıyla incelendiğinde, (*111*) düzlemindeki ana pikte çok küçük bir miktar arttığı görülmektedir. Çizelge 4.5. aynı sırada incelenirse (*111*) düzlemindeki ana pikte tanecik boyutlarında (*D*) küçülme ve *FWHM* değerlerinin birazda olsa genişlediği fark edilmektedir. Buna göre $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ ile elde edilen filmlerin diğerlerine göre çok çok küçük oranda kristalleşmesi azalmaktadır ve en iyi kristalleşen ince filmler ise $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ kaynağı ile hazırlanan ince filmlerdir. Tanecik boyutu büyük olan filmin *FWHM* değerinin küçük olması durumunda film en iyi kristalleşmeye sahiptir (Ilıcan ve ark., 2008). Bununla birlikte farklı tuz kaynakları hazırlanan filmlerin (*111*) ve (*200*) düzlemlerindeki ana pikler kendi aralarında kıyaslanırsa; (*111*) düzlemindeki ana pikin (*200*) düzlemindeki ana pike göre daha büyük tanecikli ve *FWHM* değerinin biraz daha dar olduğu görülmektedir. Sonuç olarak filmlerin (*111*) düzlemindeki ana pikleri (*200*) düzlemindeki ana piklere göre daha iyi kristalleşmektedir.

4.2. Cu_2O İnce Filmlerin Oda Sıcaklığındaki Optik Özellikleri

Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığı (E_g), bant yapısı, geçirgenlik (%T), yansıma (%R), soğurma (A) ve dielektrik sabiti (ε) gibi optiksel parametreler filmlerin fiziksel özellikleri hakkında bilgi verir. SILAR yöntemi ile cam alttabanlar üzerine depo edilen polikristal Cu_2O ince filmlerin optik karakterizasyonu için optik geçirgenlik (%T) ve soğurma (A) spektrum ölçümleri Perkin Elmer UV/Vis Lamda 2S spektrofotometresi (190-1100 nm) kullanılarak alındı.

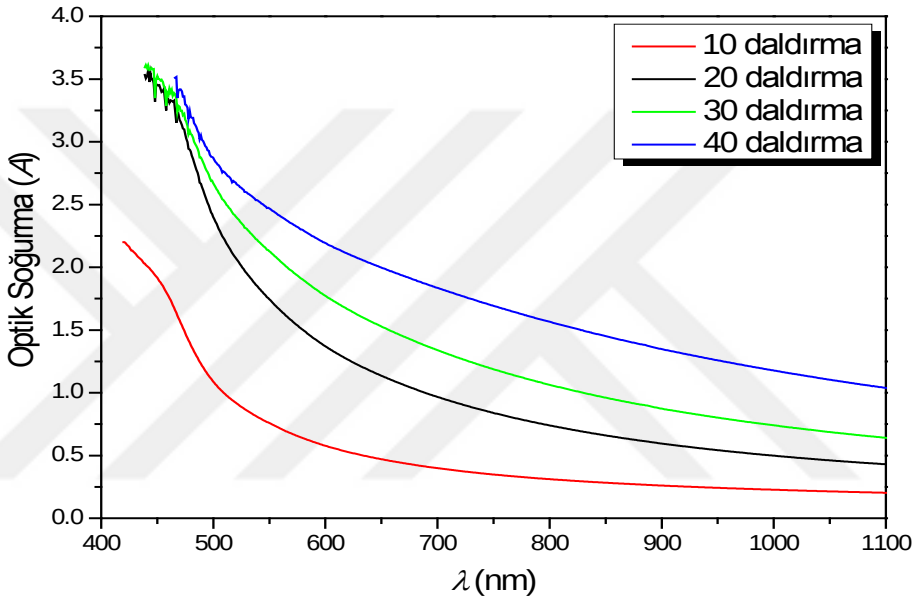
4.2.1. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ Tuzu ile Elde Edilen Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özellikleri



Şekil 4.5. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenliklerinin dalga boyuna bağlı grafiği

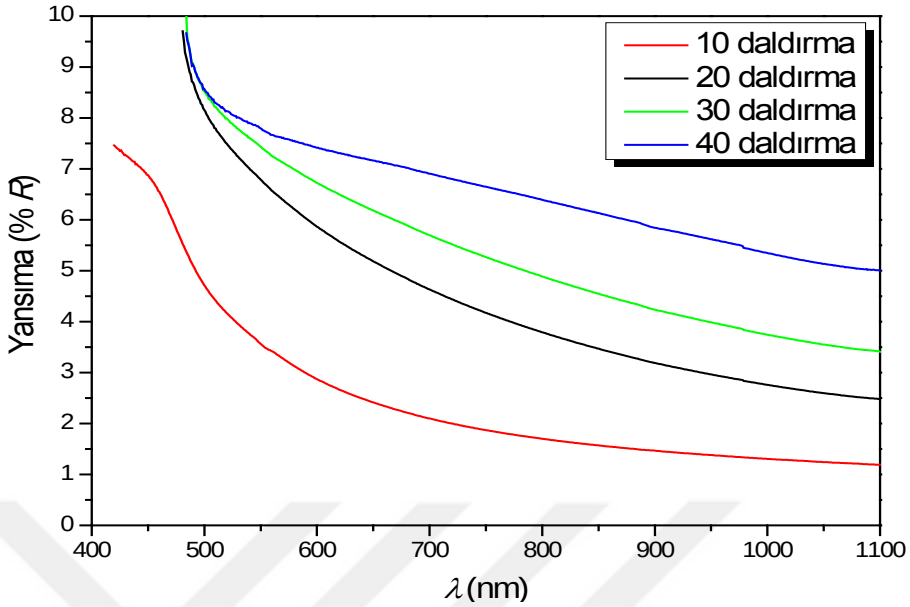
Şekil 4.5'de 1 M $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik eğrileri görülmektedir. 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsüyle depolanan Cu_2O ince filmlerinin 700 nm'de sırası ile %42 den %11, % 5 ve %2 değerlerine doğru azalış göstermektedir. 1100 nm'de ise Cu_2O ince filmlerinin optik geçirgenlikleri sırası ile %63.43, %36.69, %22.98 ve %8.93 değerlerindedir. Filmin

kalınlığının artması sonucunda filmin geçirgenliği azalmaktadır. Filmlerin optik geçirgenlik özelliği tanecik dağılımına ve ince filmin yüzeyindeki değişimlere karşı çok hassastır. Şekil 4.5.'de görüldüğü gibi film kalınlığının artması sonucunda filmin geçirgenliği azalmaktadır. Bu kalınlık artışı ile soğurma sınırının daha büyük dalgaboyuna kayması, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey saçılmalarına bağlı olabilir. Bunun nedeni tanecik boyutundaki değişimlerdir (Taner 2010, Erken 2015).



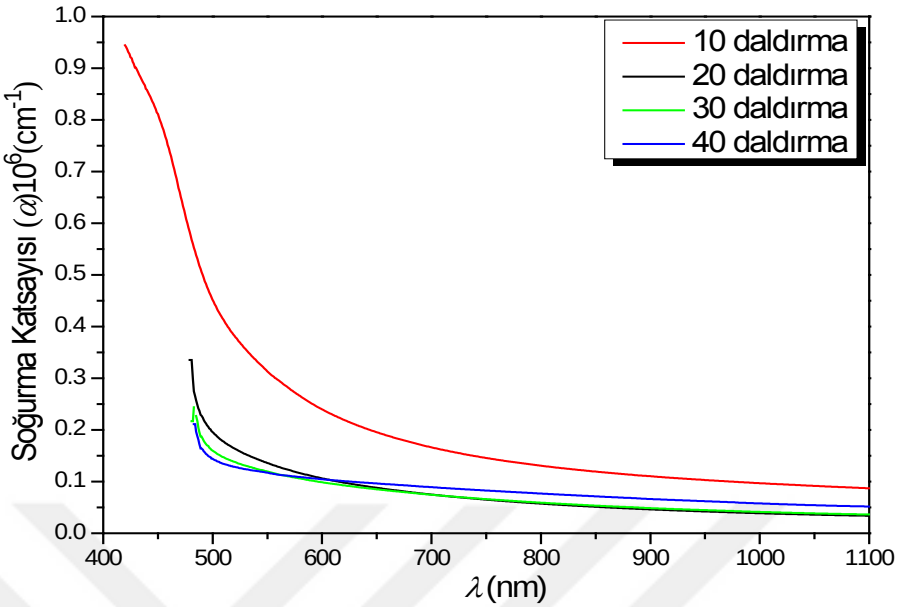
Şekil 4.6. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik soğurmalarının dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi bütün filmlerin optik soğurma kenarlarında 400-550 nm arasında belirgin bir artış vardır. Daldırma sayısı attıkça artan film kalınlığına bağlı olarak soğurma bant kenarının düşük dalga boylarından yüksek dalga boylarına doğru kaydığı görülmektedir (Nikam ve ark., 2016). Elde edilen Cu_2O ince filmler için optik soğurma başlangıcı sırası ile 10 daldırma döngüsü için 420.19 nm'de 2.22, 20 daldırma döngüsü için 439.10 nm'de 3.53, 30 daldırma döngüsü için 440.38 nm'de 3.60 ve 40 daldırma döngüsü için 465 nm'de 3.50 değerini aldığı tespit edildi.



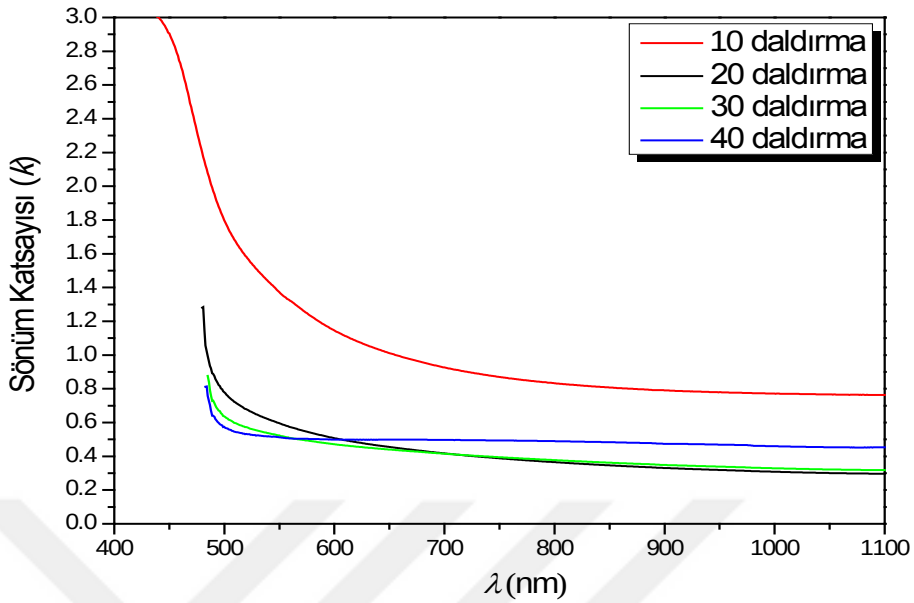
Şekil 4.7. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik yansımaların dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.7'de 1 M $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerin optik yansımaların dalga boyuna bağlı değişimi görülmektedir. Yansıma katsayısı değeri (3.25) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 400-1100 nm'de dalga boyları aralığında Cu_2O ince filmlerinin optik yansıma değerleri başlangıcı sırası ile 10 daldırma döngüsü için 419.02 nm'de %7.5, 20 daldırma döngüsü için 480.12 nm'de %9.7, 30 daldırma döngüsü için 483.9 nm'de %10 ve 40 daldırma döngüsü için 483.9 nm'de %9.7 değerini aldığı tespit edildi. Elde edilen tüm Cu_2O ince filmlerin 800-1100 nm'deki dalga boyu aralığında yansıma değerlerinde ciddi bir farklılık görülmemektedir.



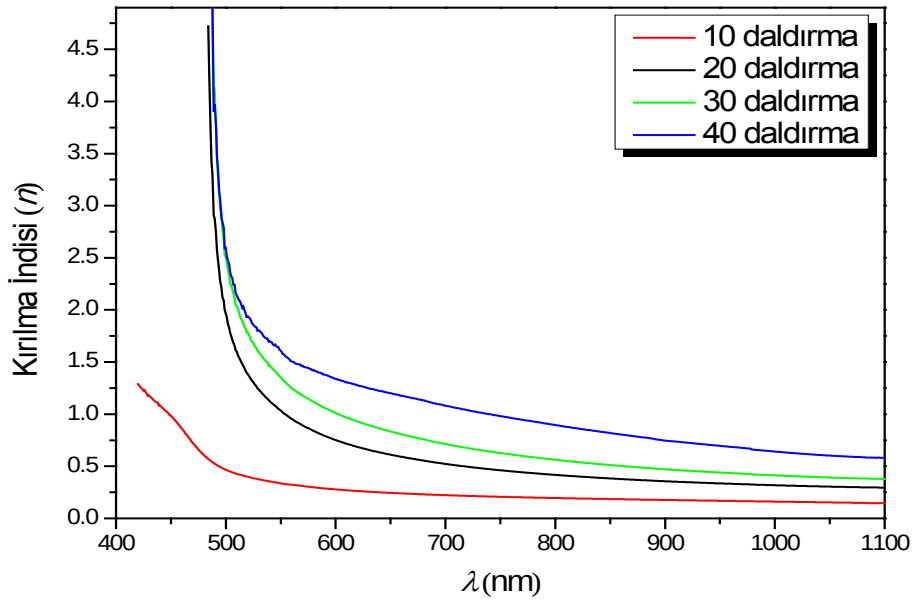
Şekil 4.8. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik soğurma katsayısı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.8'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerinin optik soğurma katsayısı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı eğrileri görülmektedir. Soğurma katsayısı (3.26) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Daldırma sayısının artması, soğurma katsayısı değerlerini düşürmektedir. Soğurma katsayısının yaklaşık olarak 10^5 den büyük olması güneş pilinde Cu_2O filmlerin soğurucu tabaka olarak kullanılması için ideal bir malzeme olduğunu gösterir (Yu ve ark., 2015).



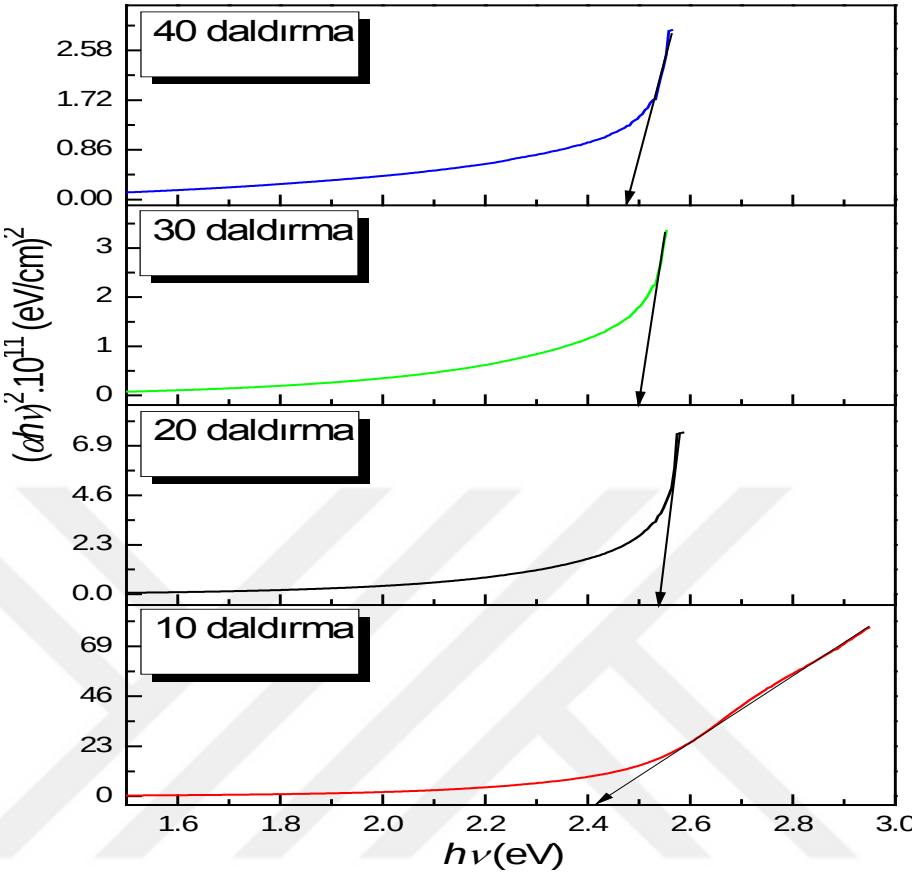
Şekil 4.9. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki sönüm katsayısılarının (k) dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi sönüm katsayısı değerleri, film kalınlığı arttıkça düşüş göstermektedir. Sönüm katsayısı değerleri (3.27) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Sönüm katsayısı, soğurma katsayısı ile doğru orantılı olduğu için soğurma katsayısındaki gibi bir davranış gösterir.



Şekil 4.10. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki kırılma indislerinin (n) dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.10'da $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indislerinin (*n*) dalga boyuna bağlı değişimi verilmiştir. Kırılma indisleri (3.28) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsüyle depolanan Cu_2O ince filmlerinin 400-700 nm'de kırılma indisi sırası ile 10 daldırma döngüsü için 419.31 nm'de 1.29, 20 daldırma döngüsü için 483.70 nm'de 4.73, 30 ve 40 daldırma döngüsü için 488.08 nm'de 4.89 değerlerinden başladığı görülür. 700 nm dalga boyunda kırılma indisin azaldığı gözlemlenerek 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü için sırasıyla 0.22, 0.52, 0.71 ve 1.08 değerlerini alır. 1100 nm'de ise yaklaşık olarak sırası ile 0.13, 0.27, 0.38 ve 0.58 değerlerindedir. Şekil 4.10'da kırılma indisi değeri SILAR daldırma döngü sayısının artmasına bağlı olarak film kalınlığının artması sonucunda artış göstermiştir. Ayrıca daldırma döngüsünün artmasına bağlı olarak film kalınlığının artması, kırılma indis değerinin yüksek dalga boylarına doğru kaymasına neden olmuştur. (Ravichandran ve ark., 2015).

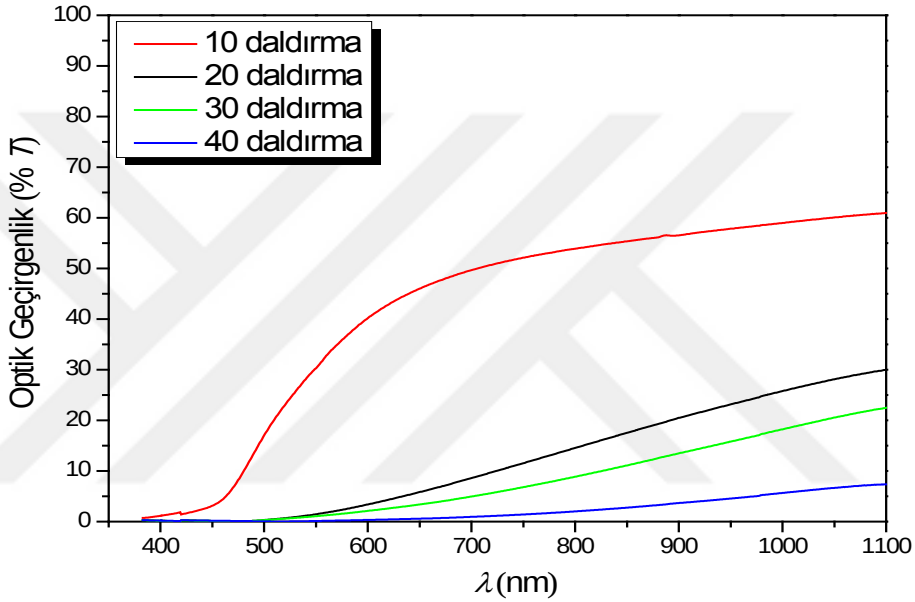


Şekil 4.11. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine $(h\nu)$ bağlı grafiği

Şekil 4.11'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerinin $(\alpha h\nu)^2$ değerlerinin foton enerjisine $(h\nu)$ bağlı grafiği görülmektedir. y eksenindeki değişim üzerinde çizilen doğrusal teğetin enerji eksenini (x) kestiği noktanın değeri ince filmin enerji bant aralığı değerini verir. Enerji bant aralığı (3.32) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin enerji bant aralığı sırası ile 2.42, 2.54, 2.50 ve 2.48 eV değerlerini almaktadır. Bu enerji bant aralık değerleri literatür ile birebir uyumludur (Kuo ve ark. 2007, Xu ve ark. 2014c, Ahirrao ve ark. 2011). 20, 30, 40 daldırma döngülerinde elde edilen Cu_2O ince filmlerinin daldırma döngü sayısı az olan filmde yapı kusurları ve oksijen boşluğunun fazla olması nedeniyle enerji bant aralık değeri artmaktadır (Bouderbala ve ark., 2008). Daldırma döngü sayısının artması ile kalınlık artışı ve 20, 30, 40

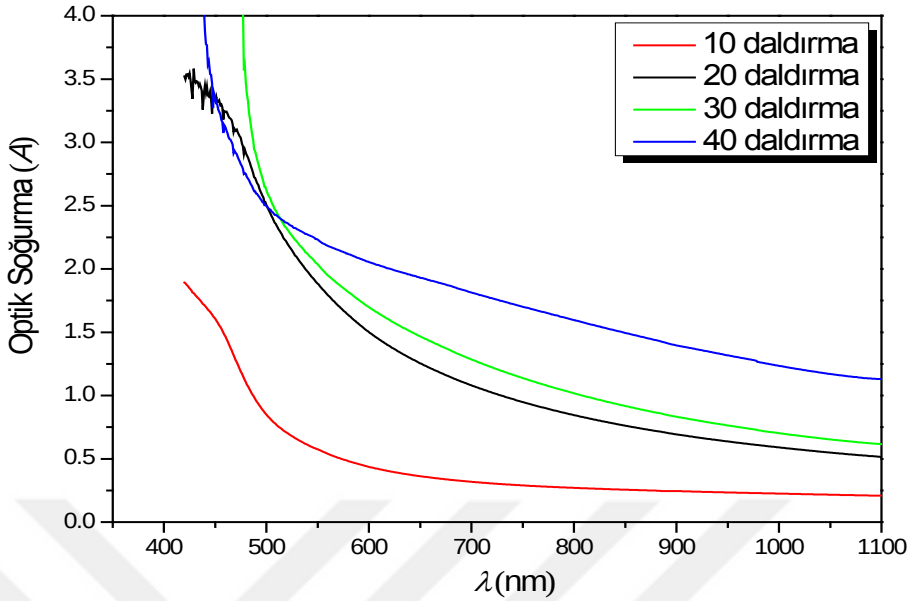
daldırma döngülerinin X-ışını kırınım desenleri yardımı ile hesaplanan tanecik boyutlarındaki artışa bağlı olarak kristalleşme daha iyi gerçekleşmiş olduğu görülmüştür. Bu sebeplerden dolayı enerji bant aralığı 20, 30 ve 40 daldırma döngüleri için 2.54 eV tan 2.49 eV a küçük bir düşüş göstermiştir.

4.2.2. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ Tuzu ile Elde Edilen Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özellikleri



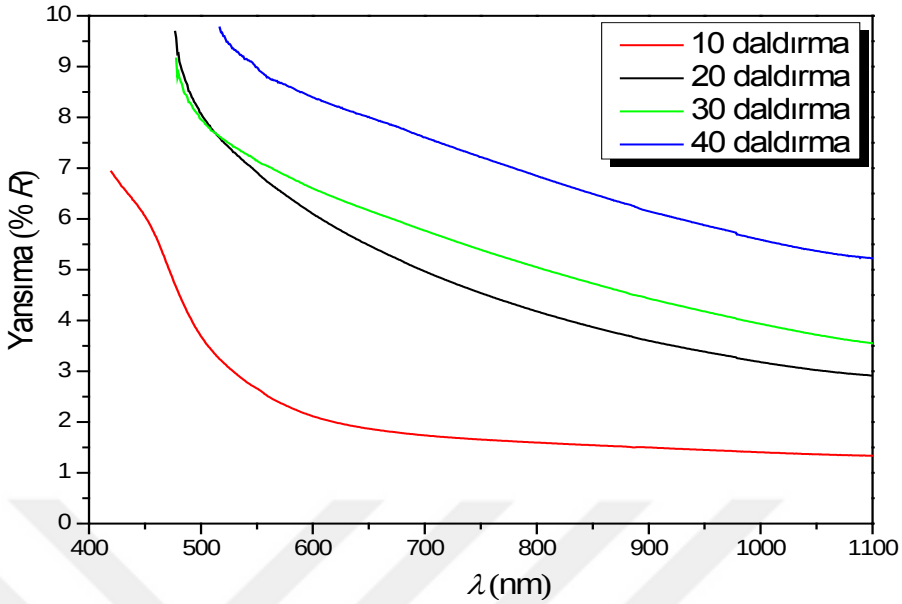
Şekil 4.12. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenliklerinin dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.12'de 1 M $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik eğrileri görülmektedir. 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlikleri 700 nm'de sırası sırası ile %49.73, %8.53, %4.95 ve %0.82 değerlerini alır. 1100 nm'de ise Cu_2O ince filmlerinin optik geçirgenlikleri sırası ile %60.79, %29.92, %22.43 ve %7.28 değerlerindedir. Filmin kalınlığının artmasına bağlı olarak geçirgenlik azalış göstermektedir. Şekil 4.5'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ ve Şekil 4.12'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzları ile hazırlanan filmlerin benzer optik geçirgenlik özellik sergilediği grafiklerden görülmektedir.



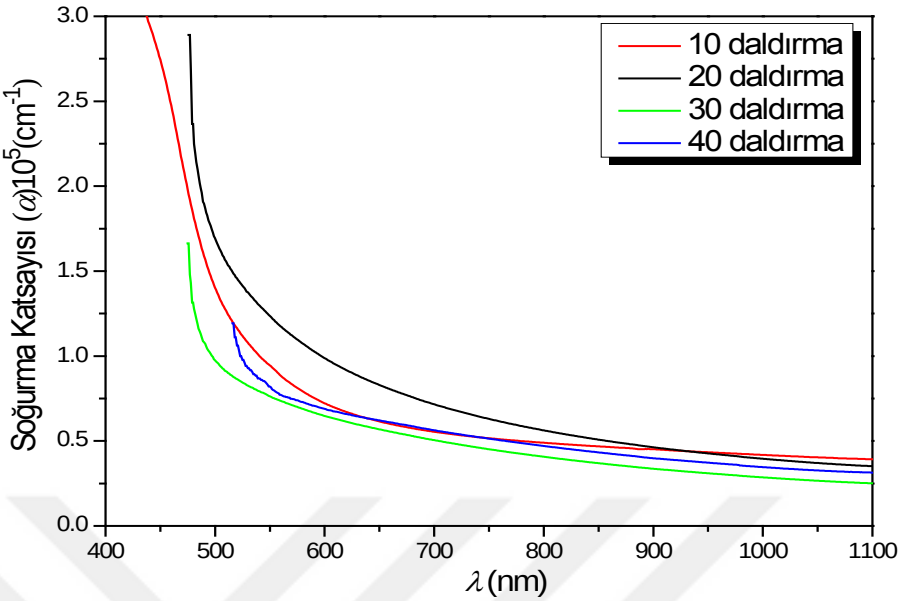
Şekil 4.13. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik soğurmalarının dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.13'de görüldüğü gibi bütün filmlerin optik soğurma bant kenarları 380-700 nm dalga boyu arasında belirgin bir artış göstermektedir. Elde edilen Cu_2O ince filmler için optik soğurma başlangıcı sırası ile 10 daldırma döngüsü için 421.17 nm'de 1.89, 20 daldırma döngüsü için 419.92 nm'de 3.52, 30 daldırma döngüsü için 439.36 nm'de 4 ve 40 daldırma döngüsü için 476.67 nm'de 4 değerini aldığı tespit edildi. Bu dalga boylarındaki değerlere denk gelen soğurma katsayıları literatür ile uyuşmaktadır (Eya ve ark., 2005).



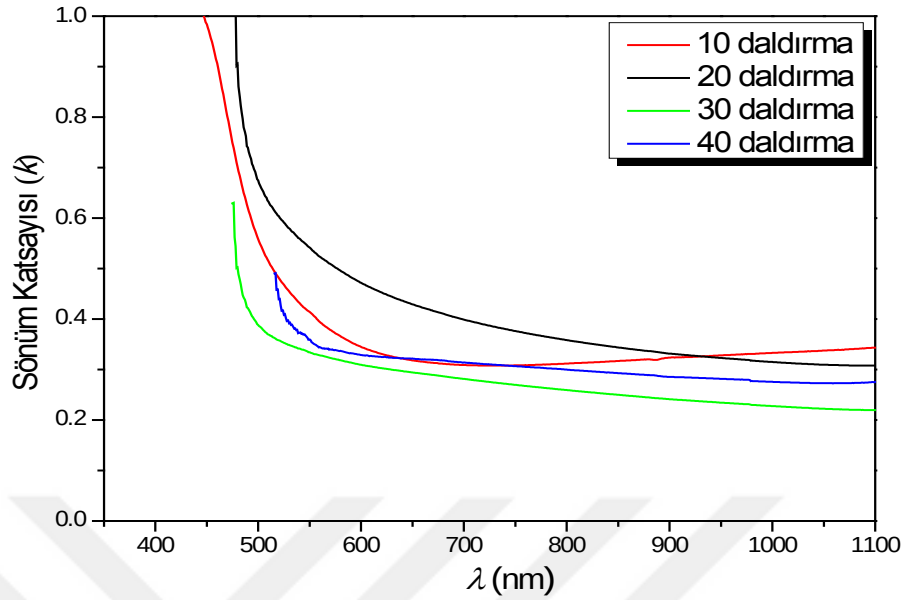
Şekil 4.14. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik yansımaların dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.14'de 1 M $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığında optik yansımaların dalga boyuna bağlı değişimi görülmektedir. Yansıma katsayısı değeri (3.25) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 400-1100 nm'de dalga boyları aralığında Cu_2O ince filmlerinin optik yansıma değerleri başlangıcı sırası ile 10 daldırma döngüsü için 419.89 nm'de %6.9, 20 daldırma döngüsü için 476.67 nm'de %9.7, 30 daldırma döngüsü için 478.23 nm'de %9.2 ve 40 daldırma döngüsü için 515.86 nm'de %9.8 değerini aldığı tespit edildi. Tüm Cu_2O filmlerin oda sıcaklığındaki optik yansıma değerleri dalga boyunun artması ile azalmaktadır.



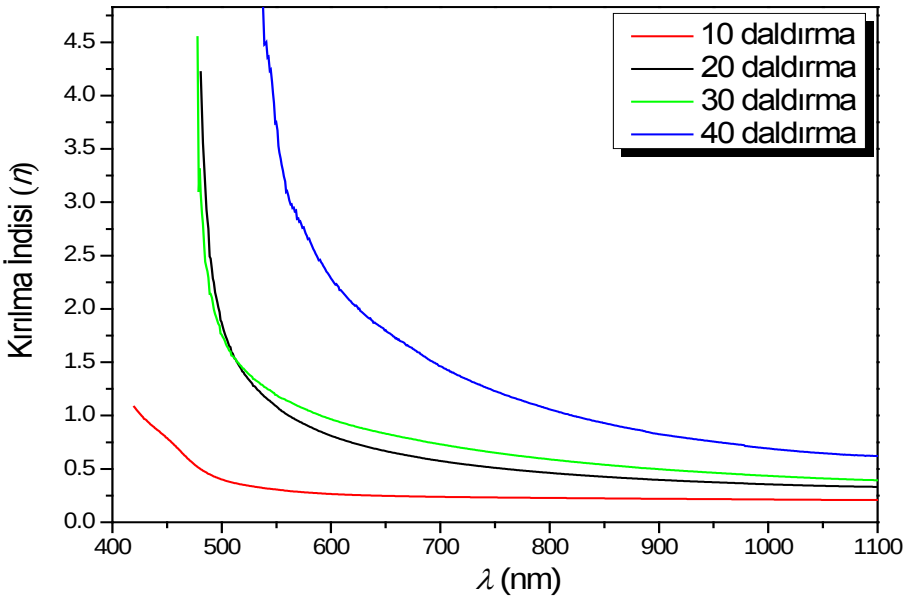
Şekil 4.15. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki soğurma katsayı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.15'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerin soğurma katsayı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı eğrileridir. Soğurma katsayısı (3.26) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.8'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ ve Şekil 4.15'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzları ile hazırlanan filmlerin soğurma katsayı değerleri, daldırma sayısının artması ile soğurma katsayı değerlerinin azaldığı görülmektedir.



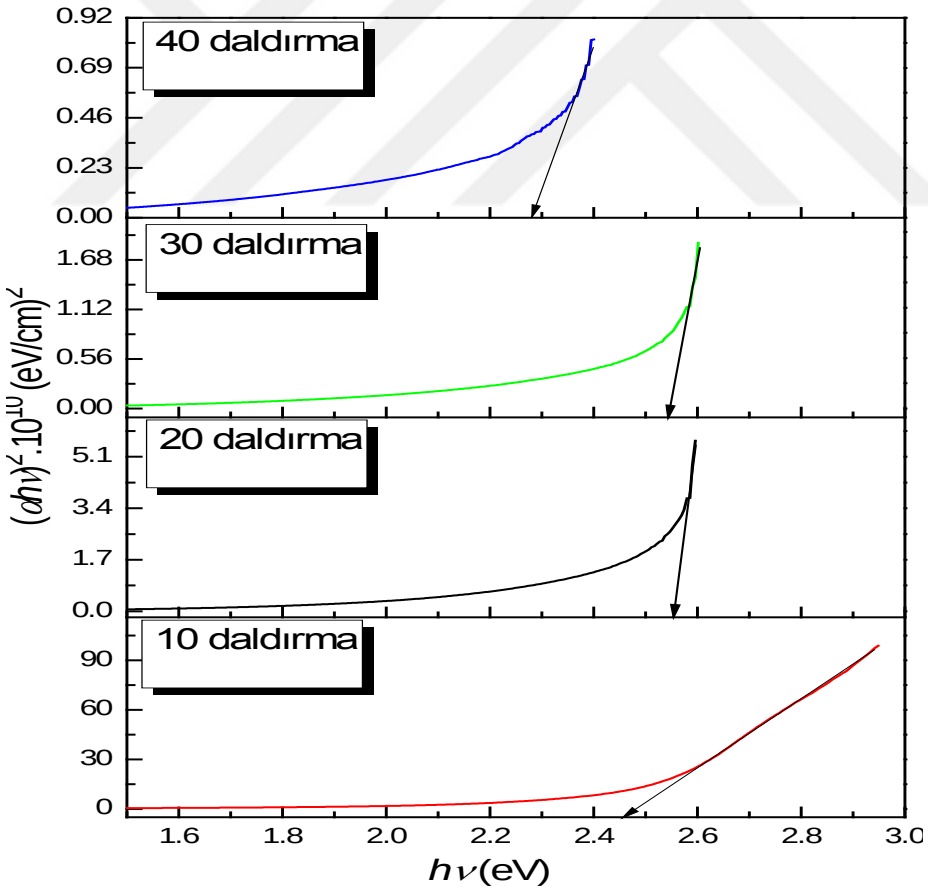
Şekil 4.16. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki sönüm katsayılarının (k) dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.16'da $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığında sönüm katsayısılarının (k) dalga boyuna bağlı grafiği verilmiştir. (3.27) eşitliği kullanılarak sönüm katsayısı hesaplanmıştır. Grafiğe göre artan dalga boyu ile birlikte sönüm katsayı değerleri azalmaktadır.



Şekil 4.17. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki kırılma indisinin (n) dalga boyuna bağlı grafiği

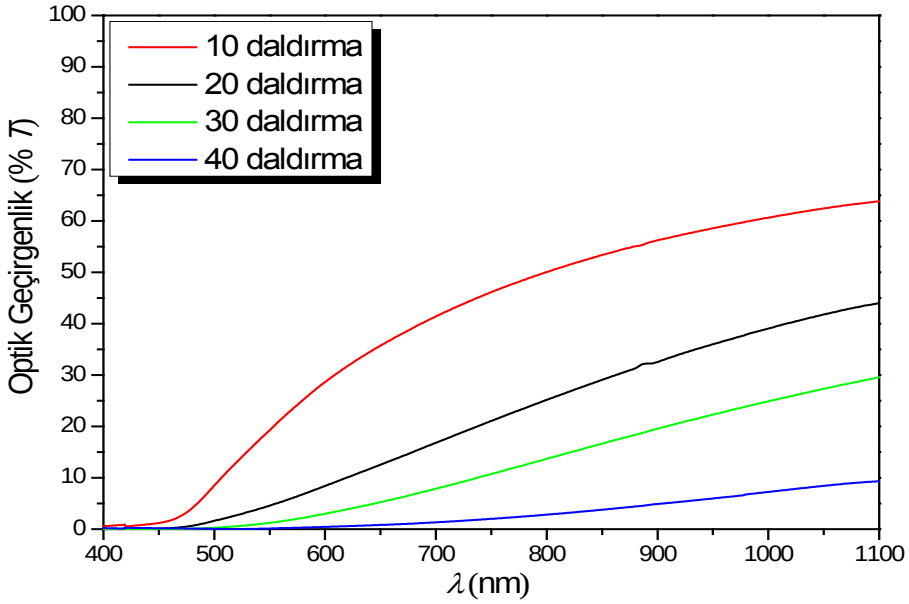
Şekil 4.17'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin kırılma indisinin (n) dalga boyuna bağlı değişimi verilmiştir. Kırılma indisi (3.28) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin 400-700 nm aralığında kırılma indisi sırası ile 10 daldırma döngüsü için 418.72 nm'de 1.09, 20 daldırma döngüsü için 480.18 nm'de 4.23, 30 daldırma döngüsü için 447.84 nm'de 4.54 ve 40 daldırma döngüsü için 537.83 nm'de 4.81 değerlerinden başlar. 700 nm dalga boyunda kırılma indisinin azaldığı gözlemlenerek 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü için sırasıyla 0.24, 0.59, 0.73 ve 1.46 değerlerini alır. Daldırma sayısı artıkça film kalınlığının artması nedeni ile kırılma indisi değeri artmaktadır. 1100 nm'de ise kırılma indisi sırası ile 0.20, 0.32, 0.40 ve 0.63 değerleridir.



Şekil 4.18. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine ($h\nu$) bağlı grafiği

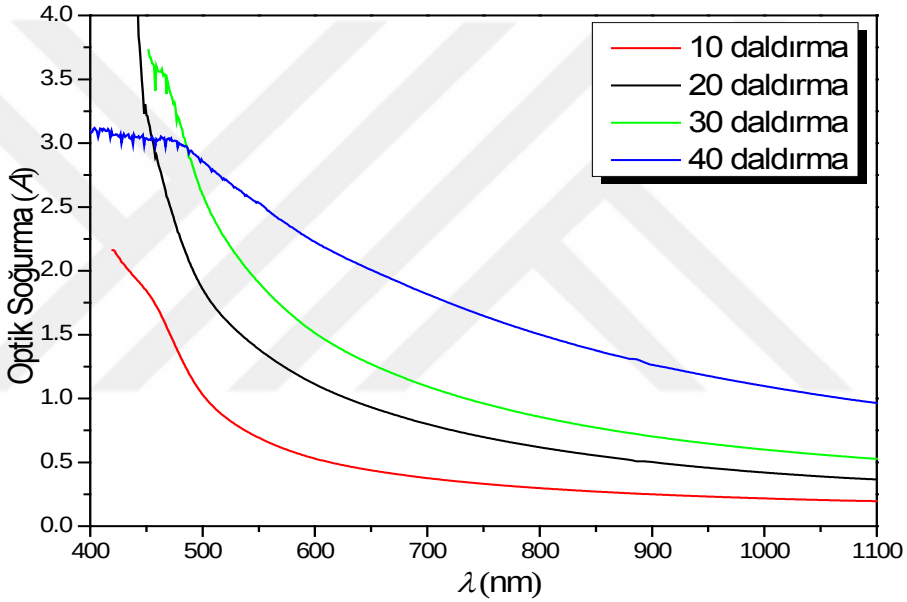
Şekil 4.18'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerinin $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine $(h\nu)$ bağlı grafiği görülmektedir. Enerji bant aralığı (3.32) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 10, 20, 30 ve 40 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığı (E_g) değerleri sırası ile 2.46, 2.55, 2.54 ve 2.28 eV olarak bulunmuştur (Kuo ve ark. 2007, Xu ve ark. 2014c, Reddy ve ark. 2010). Şekil 4.11'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ ve Şekil 4.18'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzları ile depolanan Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığı (E_g) değerleri birbirine çok yakın değerler almakta olduğu görülmektedir. Daldırma sayısı artışı ile enerji bant aralığı değeri azalmaktadır. Daha önce üzerinde durulduğu gibi 20, 30, 40 daldırma döngülerinde elde edilen Cu_2O ince filmlerinin daldırma döngü sayısı az olan filmde yapı kusurları ve oksijen boşluğunun fazla olması nedeniyle enerji bant aralık değerini büyümesine neden olmaktadır.

4.2.3. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ Tuzu ile Elde Edilen Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özellikleri



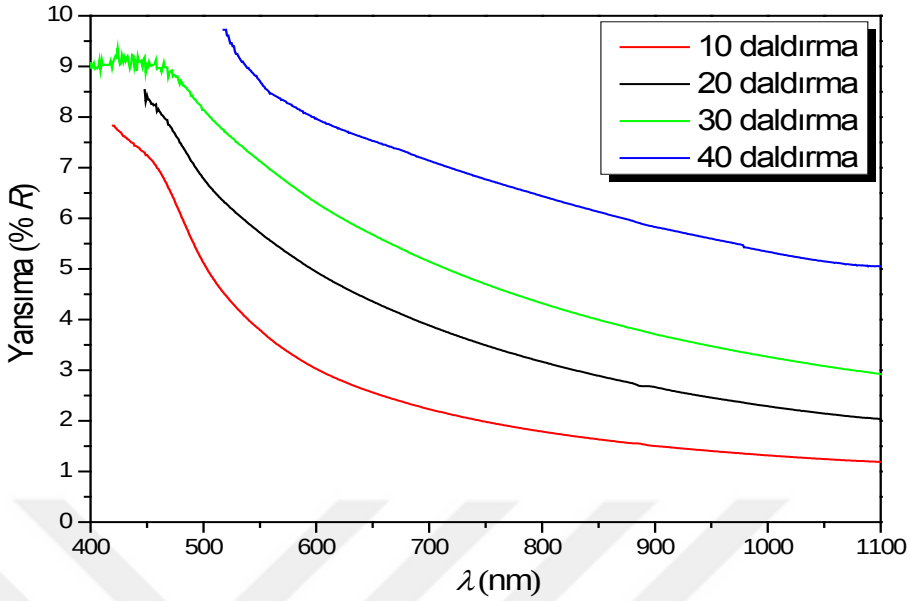
Şekil 4.19. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenliklerinin dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.19'da 1 M $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik eğrileri görülmektedir. 10, 20, 30 ve 40 daldırma ile depolanan Cu_2O ince filmlerin 700 nm'de optik geçirgenlikleri sırası ile %41.57, %16.74, %7.64 ve %1.46 değerlerini alır. Filmin kalınlığının artmasına bağlı olarak geçirgenlik azalmaktadır. Diğer tuz kaynakları ile hazırlanan Cu_2O ince filmler ile benzer optik geçirgenlik özellik sergilemektedir. 1100 nm'de ise Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlikleri ise sırası ile %63.76, %44.04, %29.55 ve %9.33 değerlerindedir.



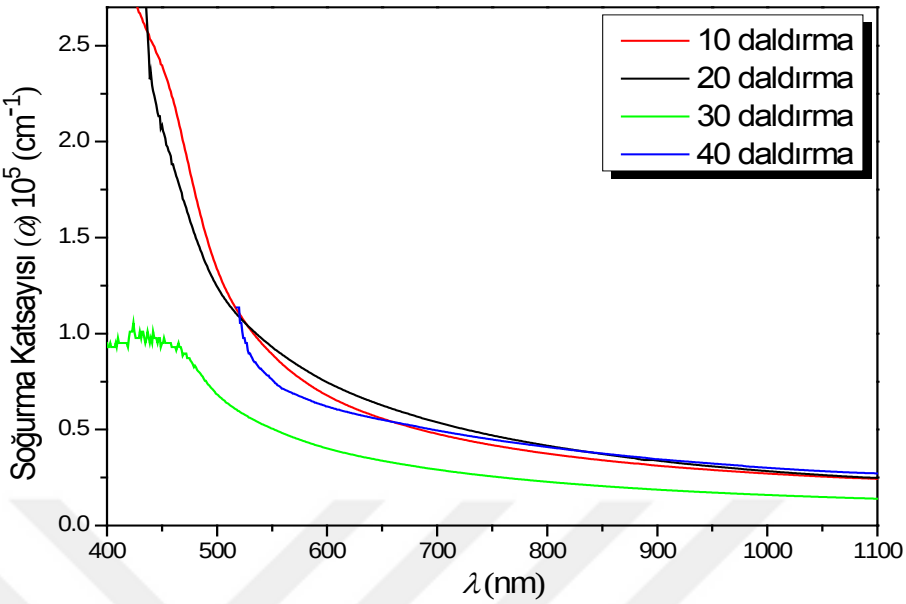
Şekil 4.20. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik soğurmalarının dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.20'de görüldüğü gibi bütün filmlerin optik soğurma bant kenarlarında 380-600 nm dalga boyu arasında belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Elde edilen Cu_2O ince filmler için optik soğurma başlangıcının sırası ile 10 daldırma döngüsü için 419.02 nm'de 2.18, 20 daldırma döngüsü için 442 nm'de 4, 30 daldırma döngüsü için 452.68 nm'de 3.71 ve 40 daldırma döngüsü için 403.51 nm'de 3.11 değerini aldığı tespit edildi.



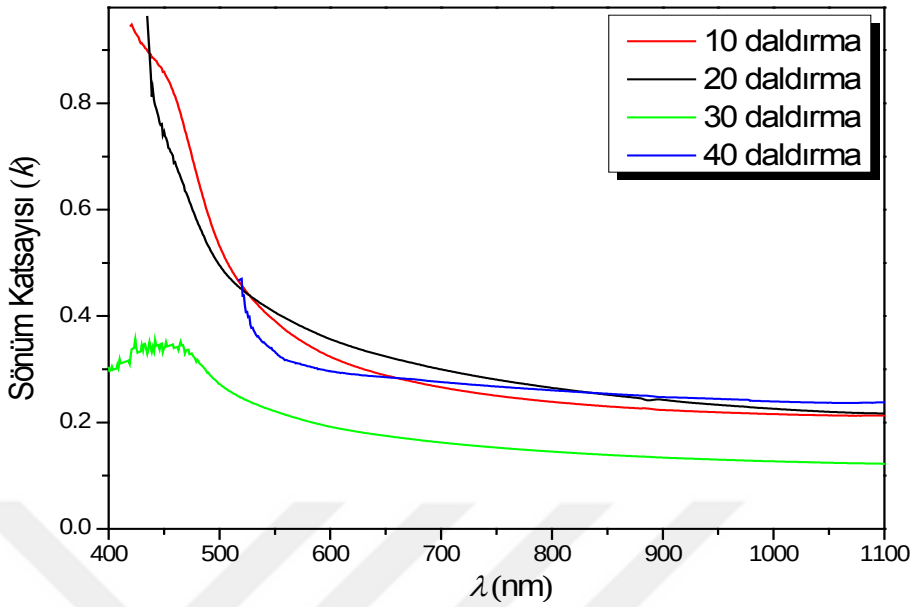
Şekil 4.21. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik yansımaların dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.21'de 1 M $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerin oda sıcaklığında optik yansımaların dalga boyuna bağlı değişimi görülmektedir. Yansıma katsayısı değeri (3.25) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 400-1100 nm'de dalga boyları aralığında Cu_2O ince filmlerinin optik yansıma değerleri başlangıcı sırası ile 10 daldırma döngüsü için 419.94 nm'de 7.8, 20 daldırma döngüsü için 447.12 nm'de 8.5, 30 daldırma döngüsü için 400 nm'de 9.0 ve 40 daldırma döngüsü için 518.63 nm'de 9.7 değerini aldığı tespit edildi.



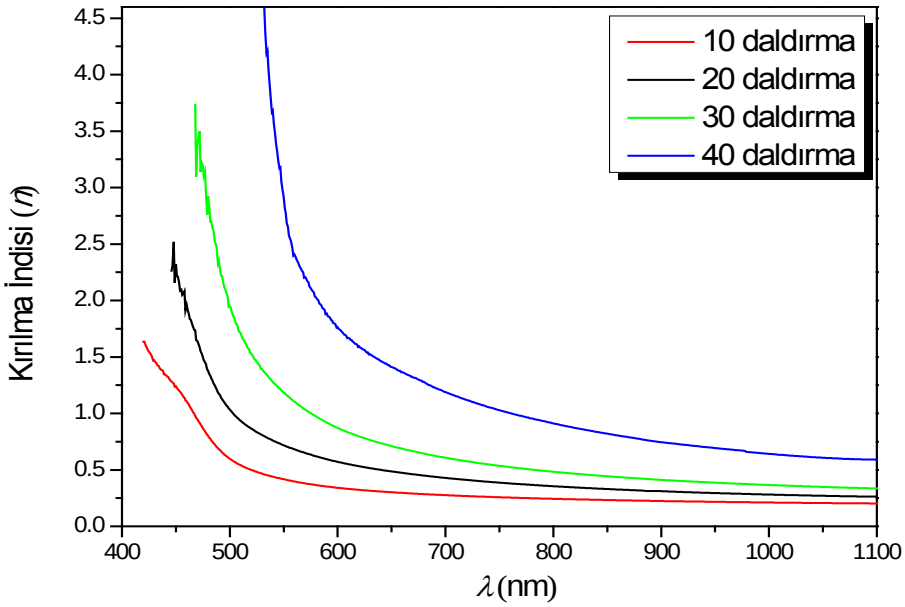
Şekil 4.22. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki soğurma katsayı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.22'de $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin soğurma katsayı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı eğrileri görülmektedir. Soğurma katsayısı kısım (3.26) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.8'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ ve Şekil 4.15'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ve Şekil 4.22'de $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzları ile hazırlanan filmlerin soğurma katsayı değerleri, daldırma sayısının artması soğurma katsayı değerlerini düşürmekte olduğu görülmektedir.



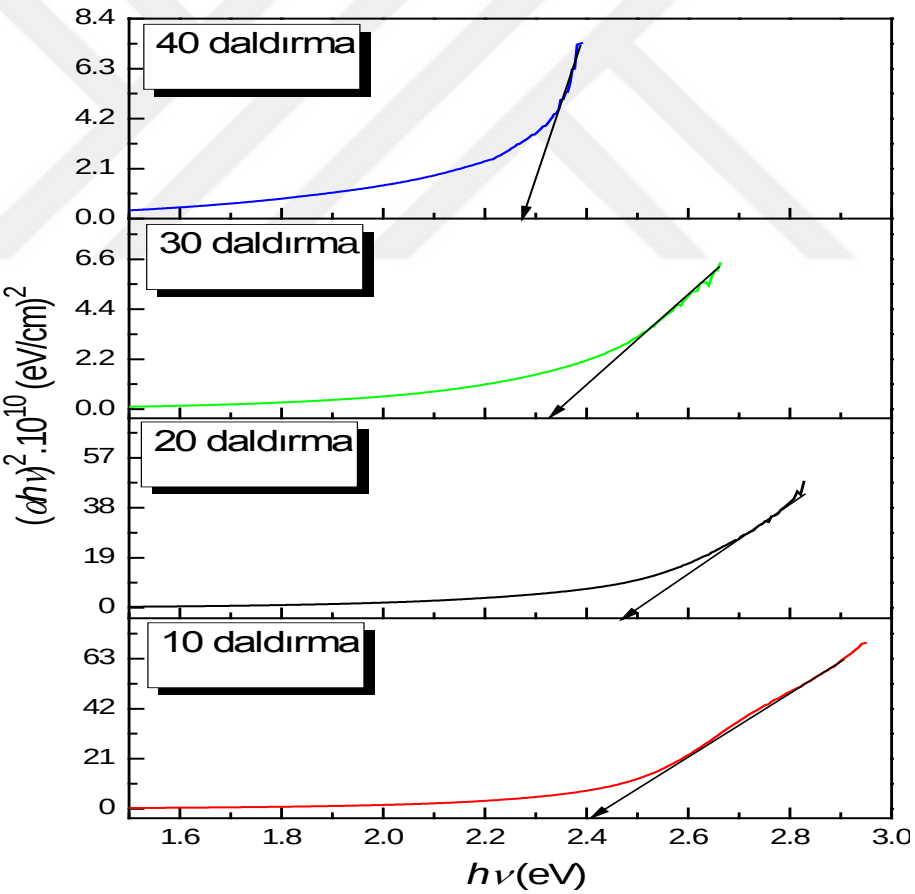
Şekil 4.23. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki sönüm katsayısılarının (k) dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.23'de 10 ve 20 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin yakın olduğu görülmektedir. (3.27) eşitliği kullanılarak sönüm katsayısı hesaplanmıştır.



Şekil 4.24. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin oda sıcaklığındaki kırılma indisinin (n) dalga boyuna bağlı grafiği

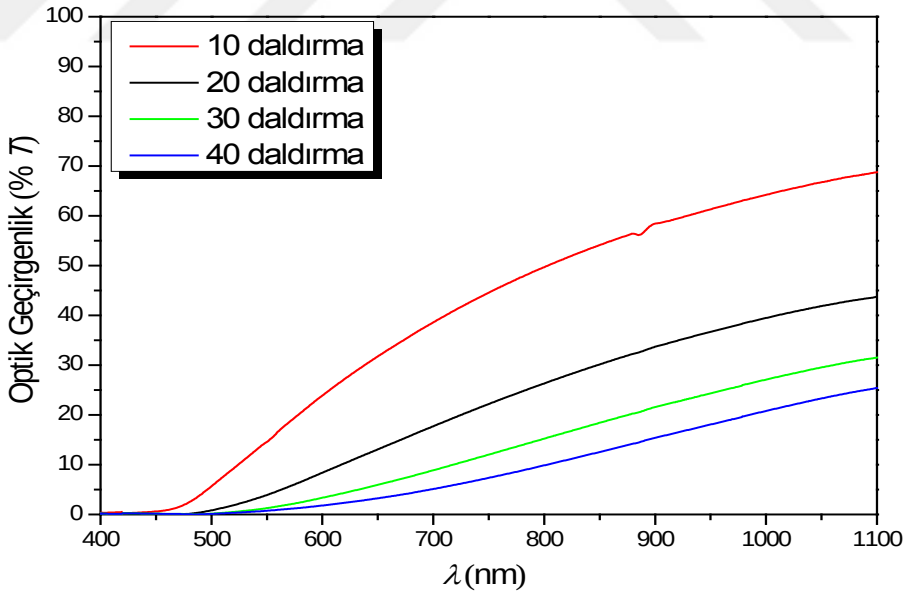
Şekil 4.24'de $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin kırılma indisinin (n) dalga boyuna bağlı değişimi verilmiştir. Kırılma indisi (3.28) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin 400-700 nm aralığında kırılma indisi sırası 10 daldırma döngüsü için 420.48 nm'de 1.64, 20 daldırma döngüsü için 448.29 nm'de 2.49, 30 daldırma döngüsü için 446.43 nm'de 3.74 ve 40 daldırma döngüsü için 530.81 nm'de 4.58 değerlerinden başlar. 700 nm dalga boyunda kırılma indisinin azaldığı gözlemlenerek 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü için sırasıyla 0.28, 0.43, 0.61 ve 1.19 değerlerini alır. 1100 nm'de ise kırılma indisi sırası ile 0.19, 0.27, 0.34 ve 0.59 değerleridir.



Şekil 4.25. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine ($h\nu$) bağlı grafiği

Şekil 4.25'de $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine $(h\nu)$ bağlı grafiği görülmektedir. Enerji bant aralığı (3.32) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 10, 20, 30 ve 40 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri (E_g) sırası ile 2.41, 2.48, 2.33 ve 2.27 eV olarak bulunmuştur (Maruyama ve ark. 1998, Reddy ve ark. 2010, Serin ve ark. 2005). Şekil 4.11'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ ve Şekil 4.18'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ve Şekil 4.25'de $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzları ile depolanan Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığı değerlerinin literatürle yakın değerler aldığı görülmektedir. Daldırma sayısının artması kalınlık artışına neden olduğu için enerji bant aralığı değeri küçülmektedir. Daha önce üzerinde durulduğu gibi daldırma sayısı az olan filmin yapı kusurları ve oksijen boşluğunun fazla olması nedeniyle enerji bant aralık değeri artmaktadır.

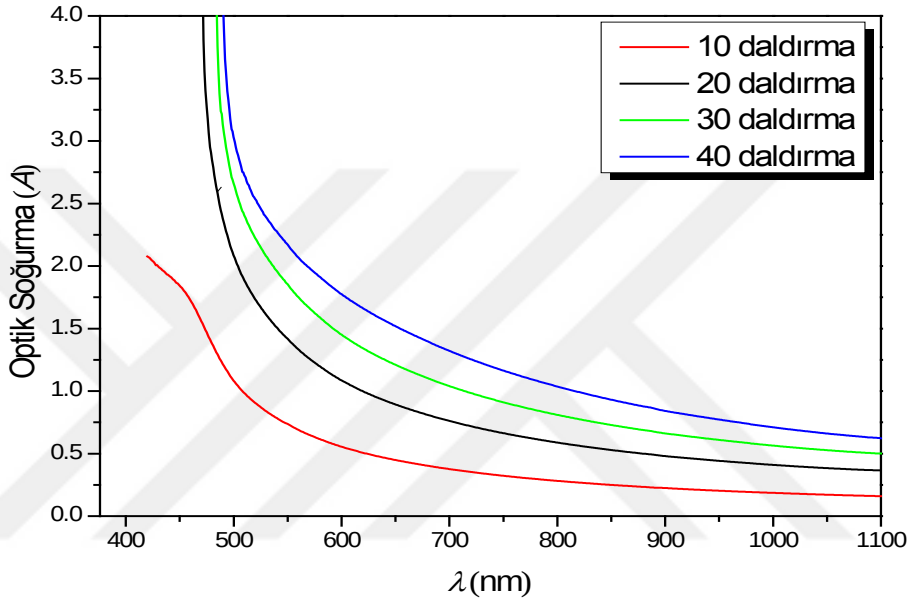
4.2.4. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ Tuzu ile Elde Edilen Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özellikleri



Şekil 4.26. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenliklerinin dalga boyuna bağlı grafiği

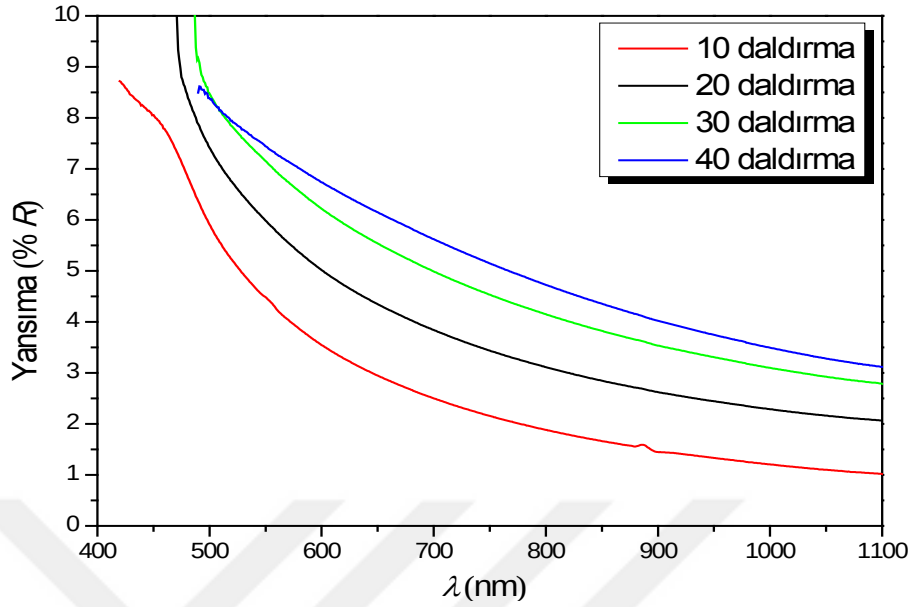
Şekil 4.26'da 1 M $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ çözeltisi kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik eğrileri görülmektedir. 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsüyle depolanan

Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlikleri 700 nm'de sırası ile %38.65, %17.70, %8.88 ve %5.17 değerlerini alır. 1100 nm'de ise Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlikleri sırası ile %68.65, %43.54, %31.52 ve %25.34 değerlerindedir. Farklı bakır tuz kaynakları ile elde edilen Cu_2O ince filmler benzer optik geçirgenlik özellik göstermiş olduğu tespit edilmiştir.



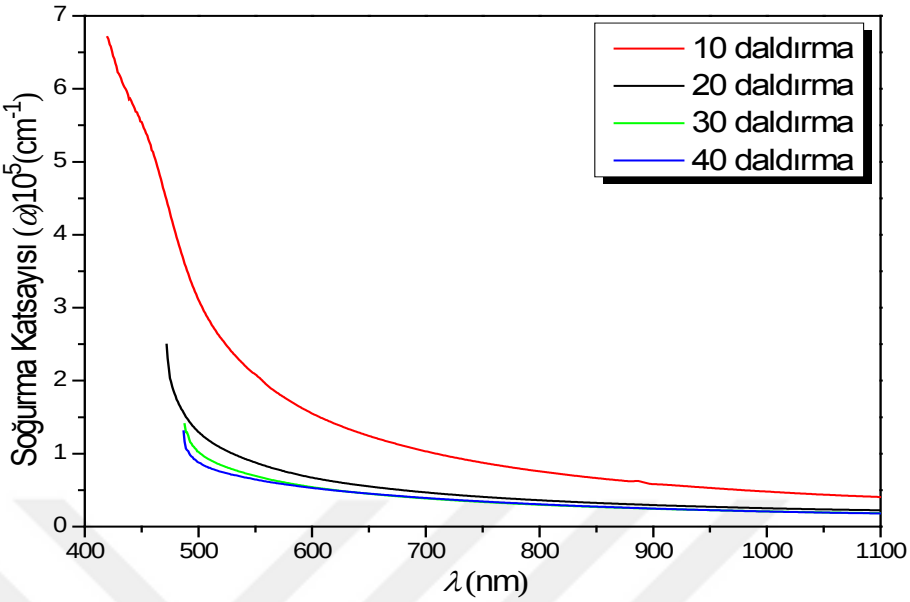
Şekil 4.27. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik soğurmalarının dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.27'de görüldüğü gibi bütün filmlerin soğurma bant kenarları 380-600 nm dalga boyu arasında belirgin bir artış göstermektedir. Daldırma sayısı arttıkça artan film kalınlığına bağlı olarak soğurma bant kenarının düşük dalga boylarından yüksek dalga boylarına doğru kaydığı grafikte görülmektedir. Elde edilen Cu_2O ince filmler için optik soğurma başlangıcının sırası ile 10 daldırma döngüsü için 420.19 nm'de 2.08, 20 daldırma döngüsü için 486.77 nm'de 2.53, 30 daldırma döngüsü için 498.28 nm'de 2.76 ve 40 daldırma döngüsü için 499.79 nm'de 3.02 değerini aldığı tespit edildi.



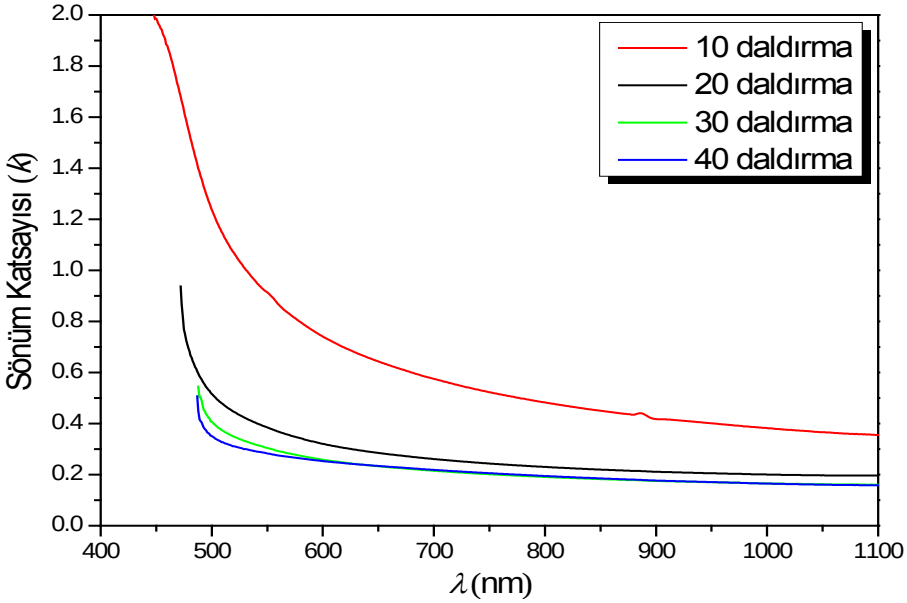
Şekil 4.28. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik yansımaların dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.28'de $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerin optik yansımaların dalga boyuna bağlı değişimi görülmektedir. Yansıma katsayısı değeri (3.25) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 400-1100 nm'de dalga boyları aralığında Cu_2O ince filmlerinin optik yansıma değerleri başlangıcı sırası ile 10 daldırma döngüsü için 421.94 nm'de %8.7, 20 daldırma döngüsü için 471 nm'de %10, 30 daldırma döngüsü için 487.50 nm'de %10 ve 40 daldırma döngüsü için 487.33 nm'de %8.4 değerini aldığı tespit edildi.



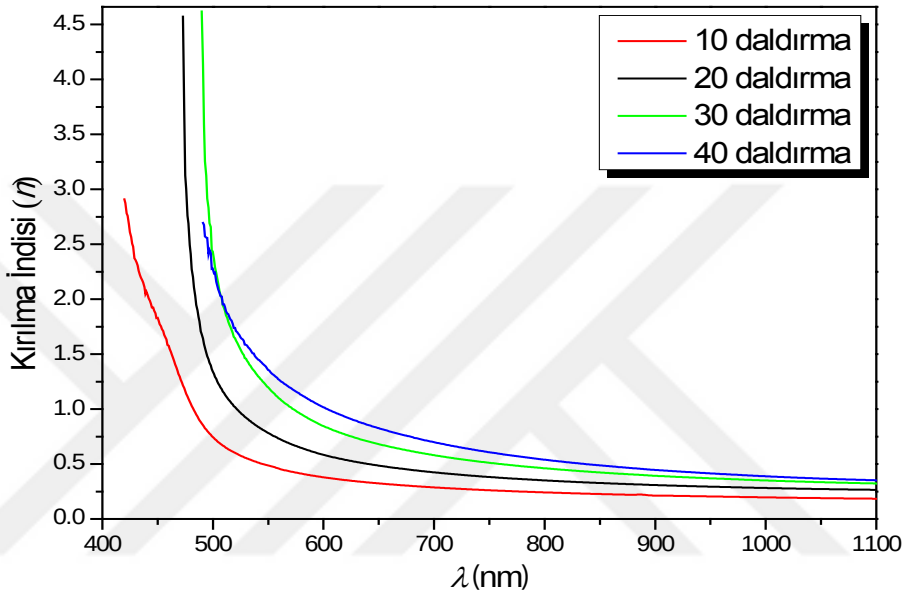
Şekil 4.29. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki soğurma katsayı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.29'da $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin soğurma katsayı değerlerinin (α) dalga boyuna bağlı değişim eğrileri görülmektedir. Soğurma katsayısı (3.26) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı tuz kaynakları ile elde edilen bütün Cu_2O filmlerde soğurma katsayı değerleri daldırma sayısının artması ile küçülmektedir.



Şekil 4.30. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki sönüm katsayılarının (k) dalga boyuna bağlı grafiği

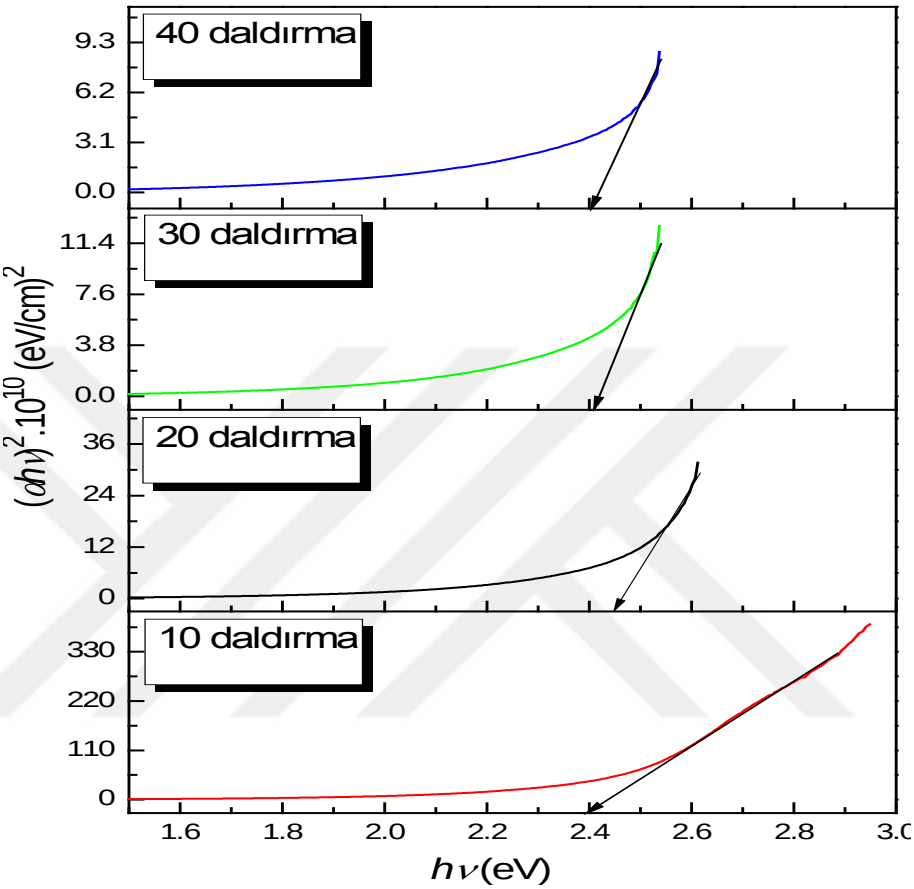
Şekil 4.30'da $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığında sönüm katsayılarının (k) dalga boyuna bağlı grafiği verilmiştir. (3.27) eşitliği kullanılarak sönüm katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Büyük dalga boylarına doğru sönüm katsayı değerleri azalmakta olduğu Şekil 4.30'da görülmektedir.



Şekil 4.31. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki kırılma indisin (n) dalga boyuna bağlı grafiği

Şekil 4.31'de $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerinin kırılma indislerinin (n) dalga boyuna bağlı değişimi verilmiştir. Kırılma indisi (3.28) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin 400-700 nm aralığında kırılma indisi sırası 10 daldırma döngüsü için 420.21 nm'de 2.91, 20 daldırma döngüsü için 473.45 nm'de 4.56, 30 daldırma döngüsü için 490.43 nm'de 4.64 ve 40 daldırma döngüsü için 491.89 nm'de 2.69 değerlerinden başladığı görülür. 700 nm dalga boyunda kırılma indisinin azaldığı gözlemlenerek 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü için sırasıyla 0.30, 0.43, 0.58 ve 0.71 değerlerini alır. 1100 nm'de ise kırılma indisi sırası ile 0.18, 0.28, 0.32 ve 0.35 değerleridir. Daldırma döngüsünün artmasına bağlı olarak film kalınlığının artması, kırılma indisi değerinin

yüksek dalga boylarına doğru kaymasına neden olmaktadır. (Ravichandran ve ark., 2015).



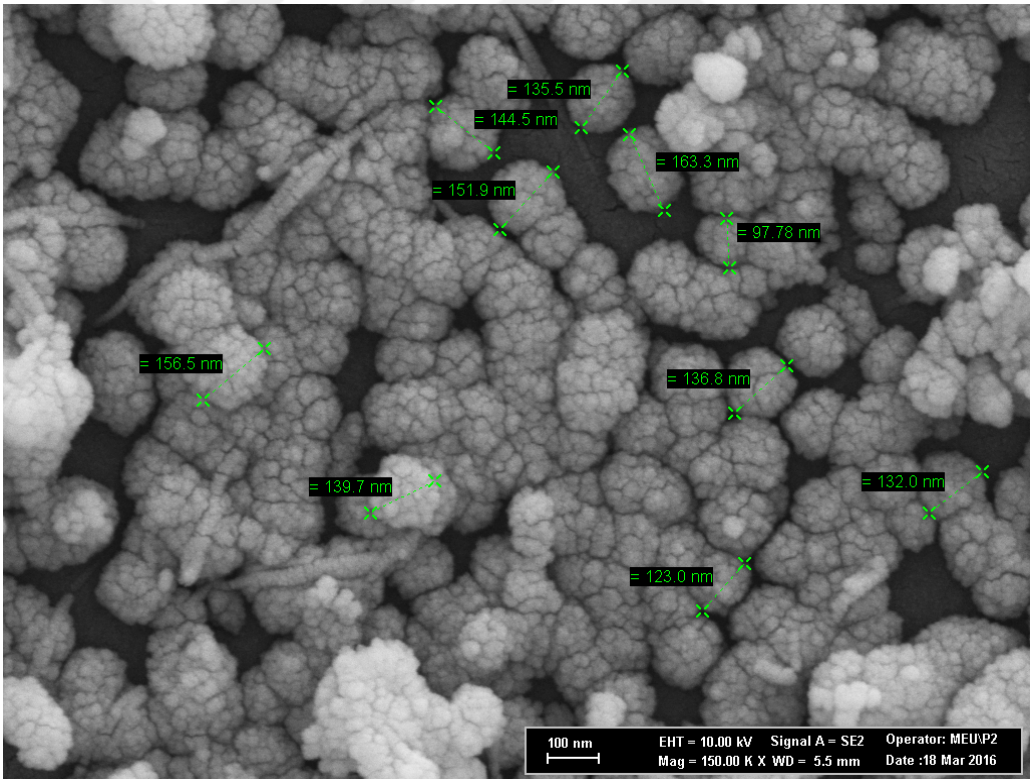
Şekil 4.32. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine (hν) bağlı grafiği

Şekil 4.32'de $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmlerinin $(\alpha h\nu)^2$ ifadesinin foton enerjisine (hν) bağlı grafiği görülmektedir. Enerji bant aralığı (3.32) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerde enerji bant aralığı değerleri (E_g) sırası ile 2.40, 2.45, 2.41 ve 2.41 eV değerlerini almaktadır (Kuo ve ark. 2007, Ahirrao ve ark. 2011)

4.3. Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özellikleri

Cu_2O ince filmlerin FE-SEM görüntüleri incelenerek filmlerin, yüzey görüntüsü, tabana tutunması, homojenliği ve yüzey kusurları gibi morfolojik özellikleri hakkındaki bilgiler elde edilebilir. Morfolojik özellikler, filmin elektriksel ve optik özelliklerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Filmlerin FE-SEM ölçümleri Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezinde (MEİTAM) bulunan Zeiss Supra 55VP FEG SEM ile alınmıştır.

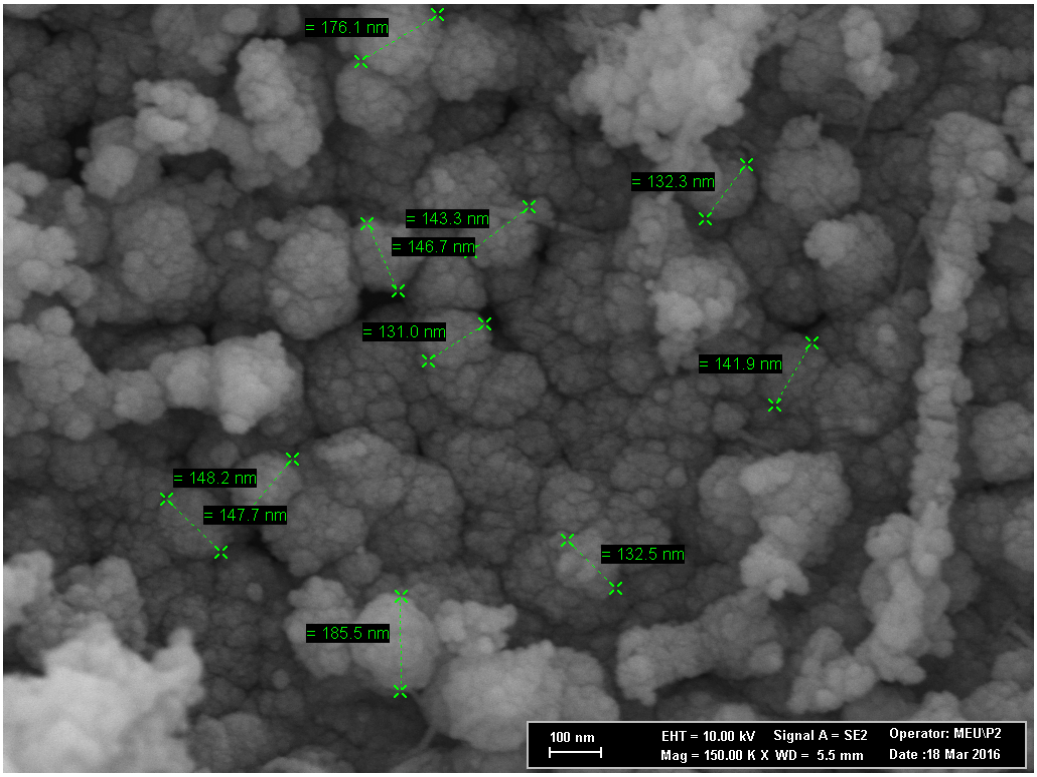
4.3.1. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin FE-SEM Görüntüleri



Şekil 4.33. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

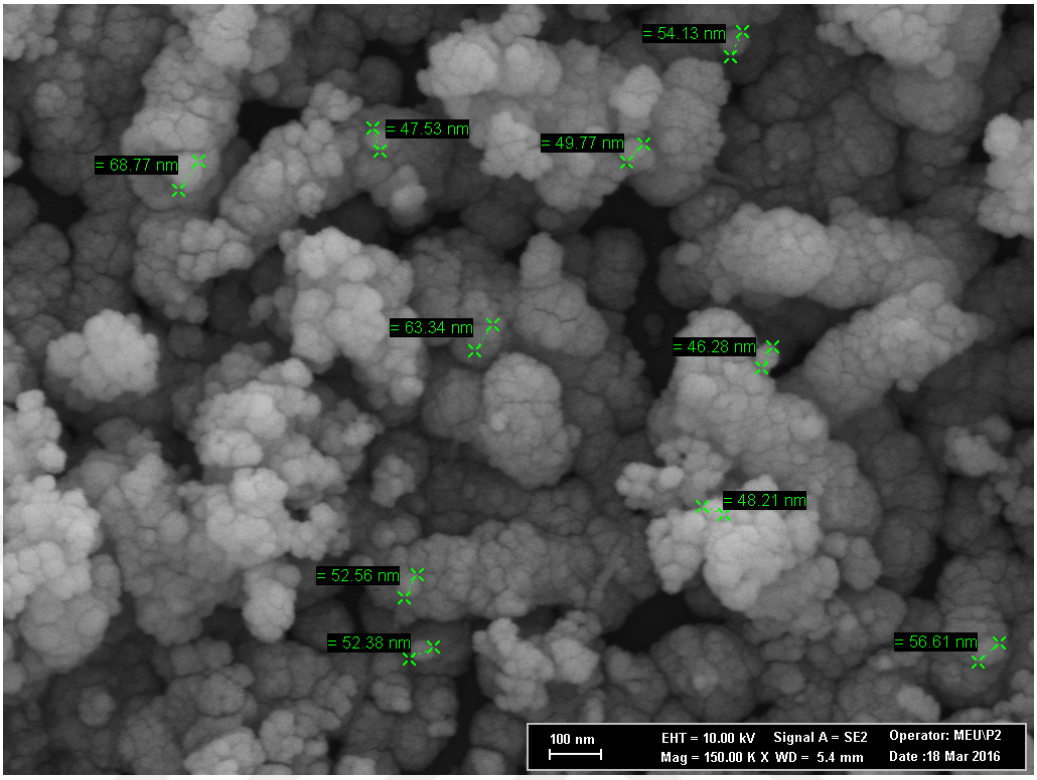
Şekil 4.33'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. Burada taneciklerin dağılımı iri topaklar şeklinde kümelenmiştir. Cu_2O ince filminin baskın bir şekilde

küresel ve kısmen çubuksu yapıda büyüme gösterdiği görülmektedir (Xiong ve ark., 2010). Ayrıca 10 daldırmada elde edilen Cu_2O filminin tanecikleri arasında boşluklar olduğu Şekil 4.41'de fark edilmektedir. Filmi oluşturan taneciklerin çapları 97.78 nm'den 163.3 nm'ye kadar değişmektedir.



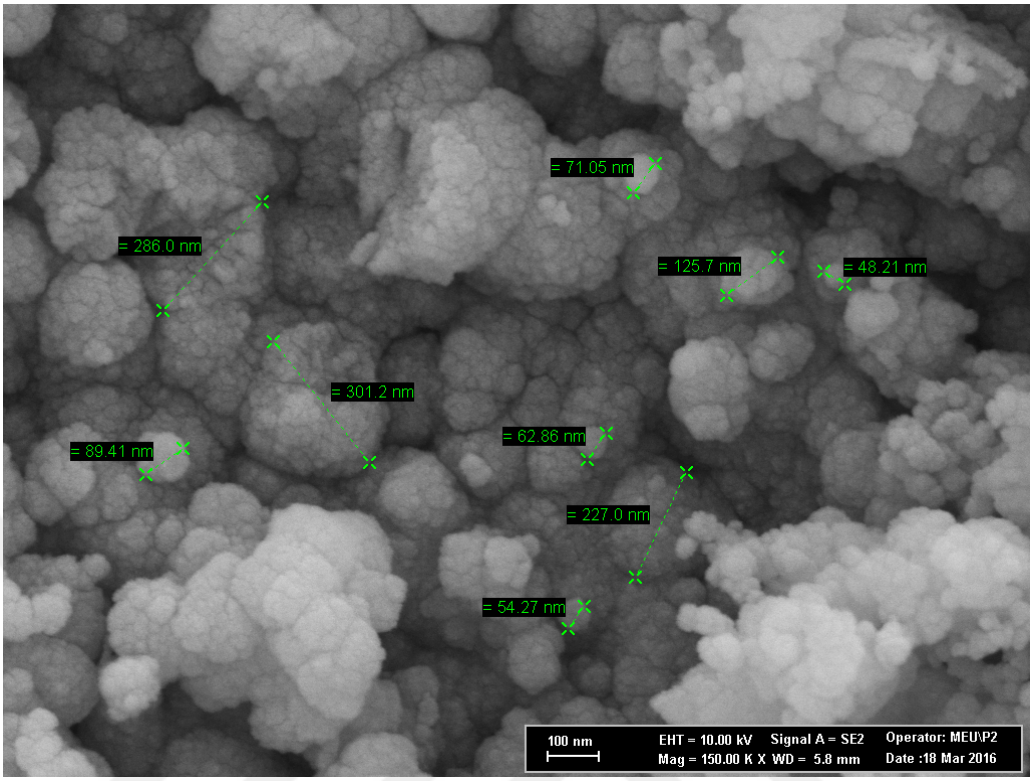
Şekil 4.34. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.34'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 20 daldırmada depolanan filmin parçacık dağılımı küresel kümeler halindedir. (Tang ve ark. 2005, Ahirrao ve ark. 2011, Xiong ve ark. 2010). $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsünde depolanan filmlerin mikro yapısı 10 daldırmada elde edilen filme göre daha sıkı ve daha homojen bir şekilde dağılım göstermektedir. Ayrıca çubuksu yapıların alt kısımlarda kaldığı ve üzerine küresel büyümelerin gerçekleştiği Şekil 4.34'de fark edilebilmektedir. Filmin tanecik çapları 131 nm'den 185.5 nm'ye kadar değişmektedir.



Şekil 4.35. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

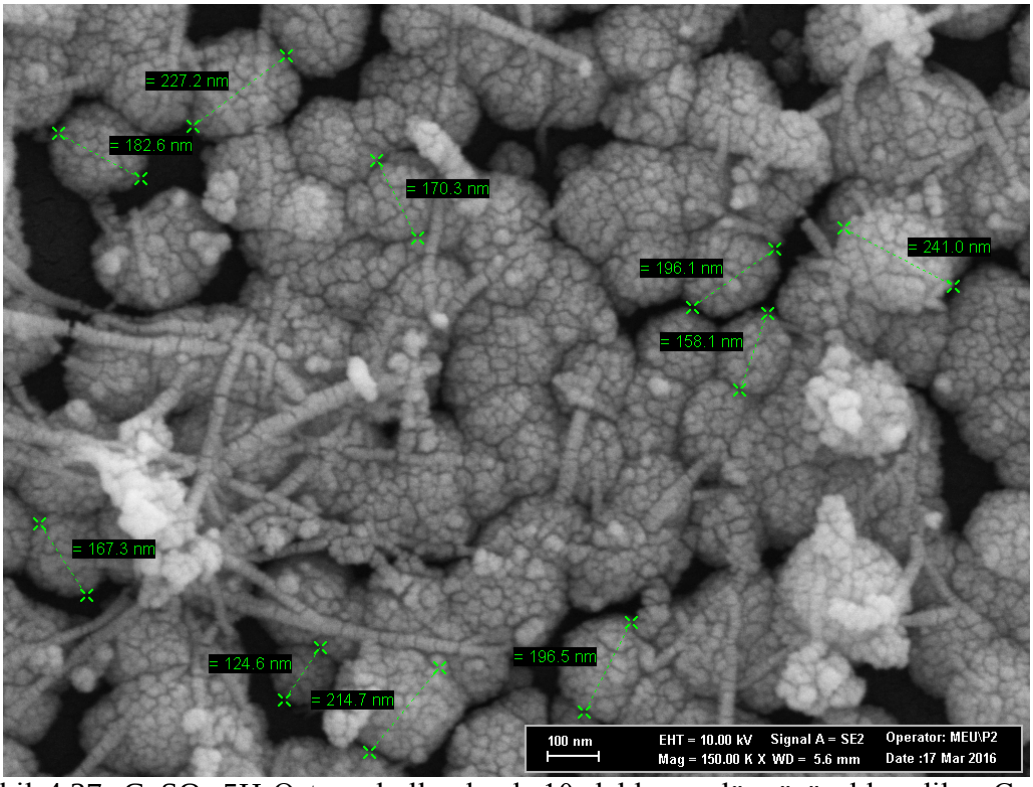
Şekil 4.35'de $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 30 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filmdeki taneciklerin küresel kümeler şeklinde dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Filmin tanecik çapları 46.28 nm'den 68.77 nm'ye kadar değişmektedir.



Şekil 4.36. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

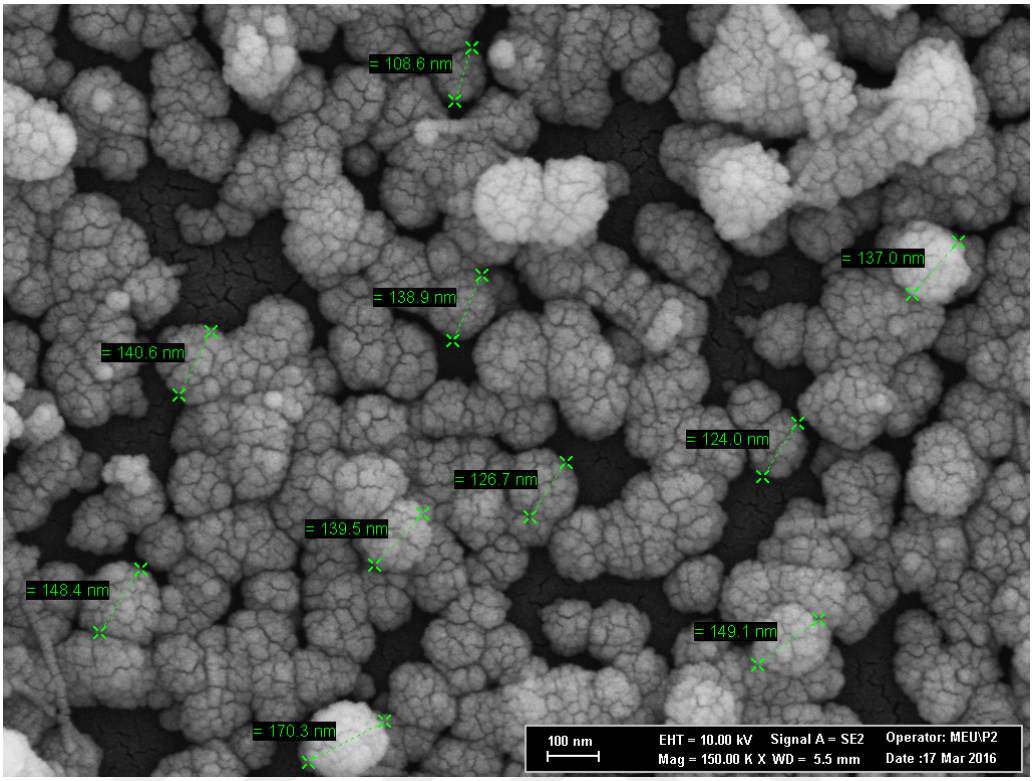
Şekil 4.36'da $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. Filmin tanecik çapları 48.21 nm'den 301.2 nm'ye kadar değişmekte ve küresel kümeler şeklinde dağılım göstermektedir. Şekil 4.36'da mikro yapı görüntüsünde açık renkli taneler gri olanlardan daha yüksektedir. Beyazımsı taneciklerin fazlalaşması yüzeydeki tane dağılımının yükselti farkına işaret etmektedir. Bu durum 40 daldırma döngüsünde en belirgindir.

4.3.2. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin FE-SEM Görüntüleri



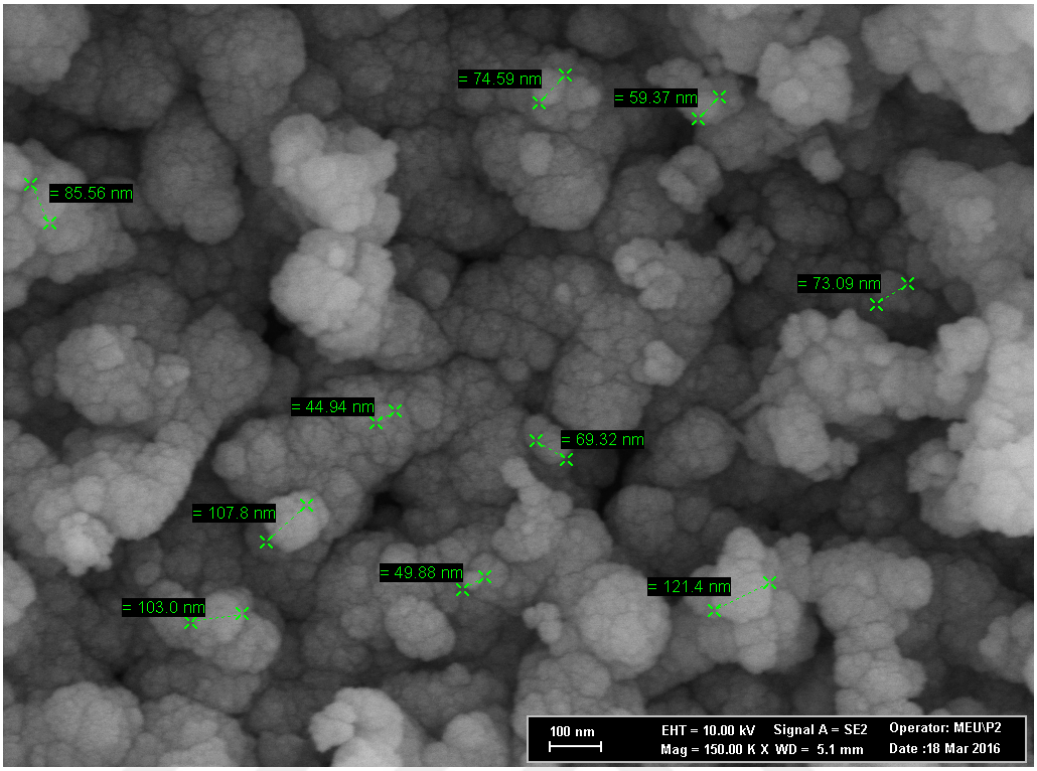
Şekil 4.37. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma döngüsü elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.37'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 10 daldırmada elde edilen Cu_2O ince film tanecikleri çoğunlukla küresel kümeler ve az miktarda da çubuk-benzeri dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Filmin tanecik çapları 124.6 nm'den 241nm'ye kadar değişmektedir.



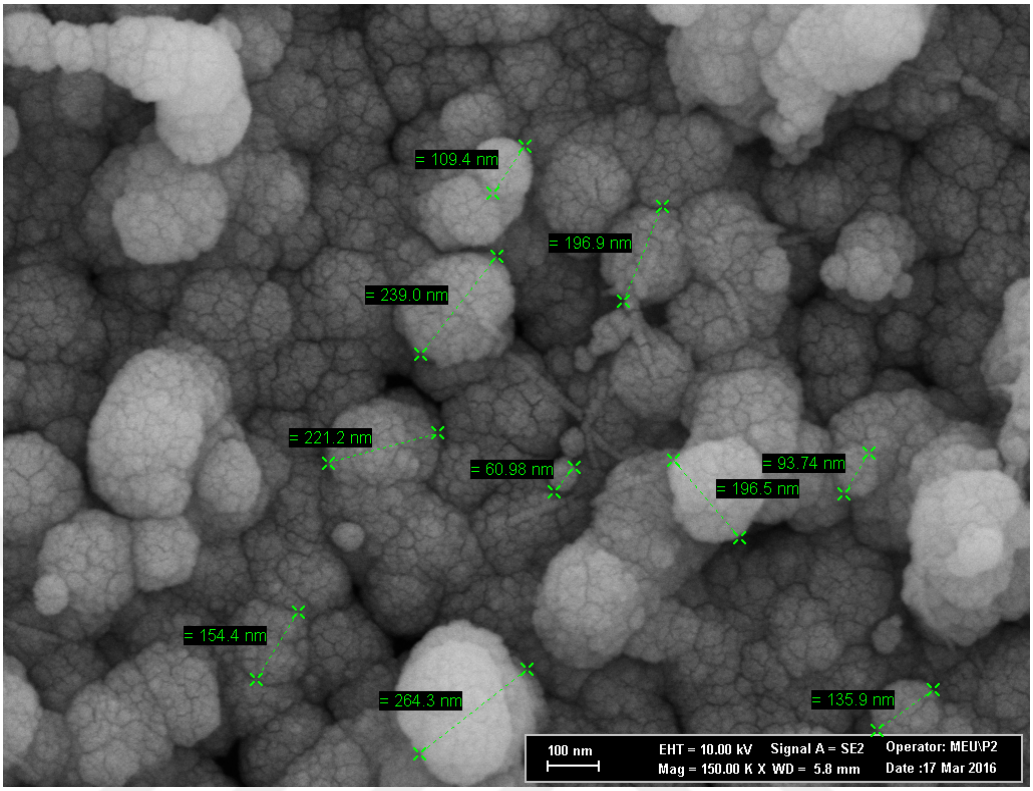
Şekil 4.38. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.38'de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 20 daldırma döngüsünde depolanan filmin parçacık dağılımı küresel ve az miktarda çubuksu yapılardan oluşmaktadır. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsünde depolanan filmin tanecik dağılımı 10 daldırmada elde edilen filme göre daha sıkı ve daha homojendir. Filmin tanecik çapları 108.6 nm'den 170.3 nm'ye kadar değişmektedir.



Şekil 4.39. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü

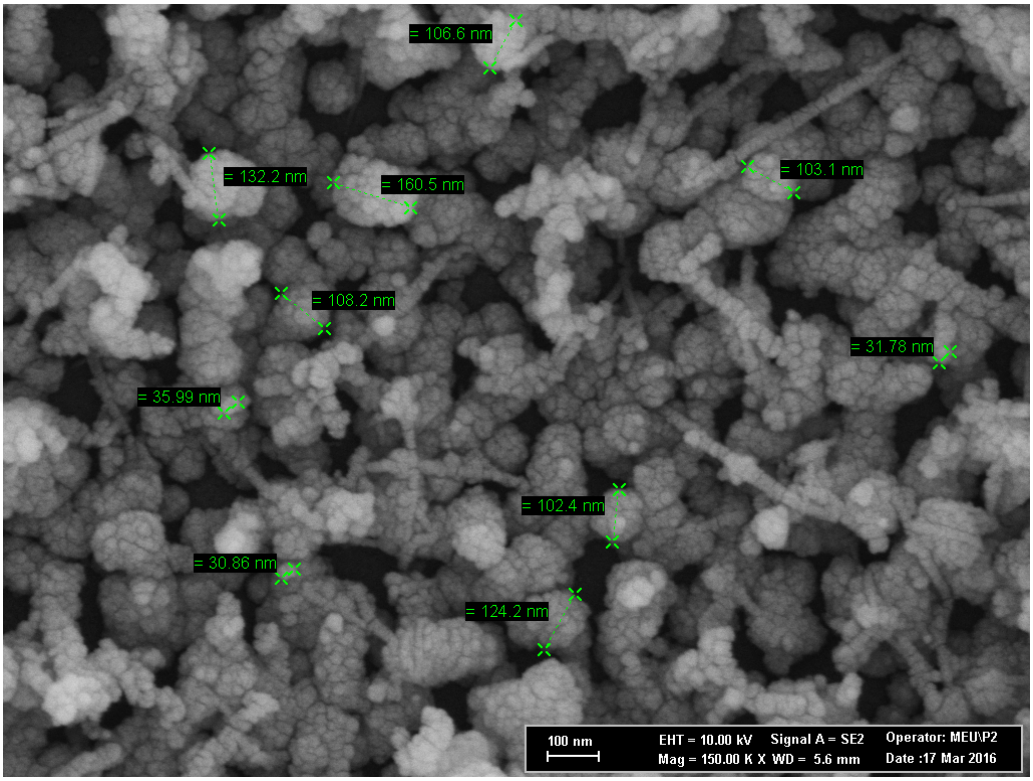
Şekil 4.39'da $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma ile elde edilen Cu_2O filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 30 daldırma döngüsünde elde edilen filmin küresel kümeler halinde meydana geldiği görülmektedir. Aynı bakır tuz kaynağı ile 30 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmin mikro yapısı, 20 daldırmada elde edilen filme göre daha sıkı ve homojen bir şekilde dağılım göstermektedir. Filmin tanecik çapları 44.94 nm'den 121.4 nm'ye kadar değişmektedir.



Şekil 4.40. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

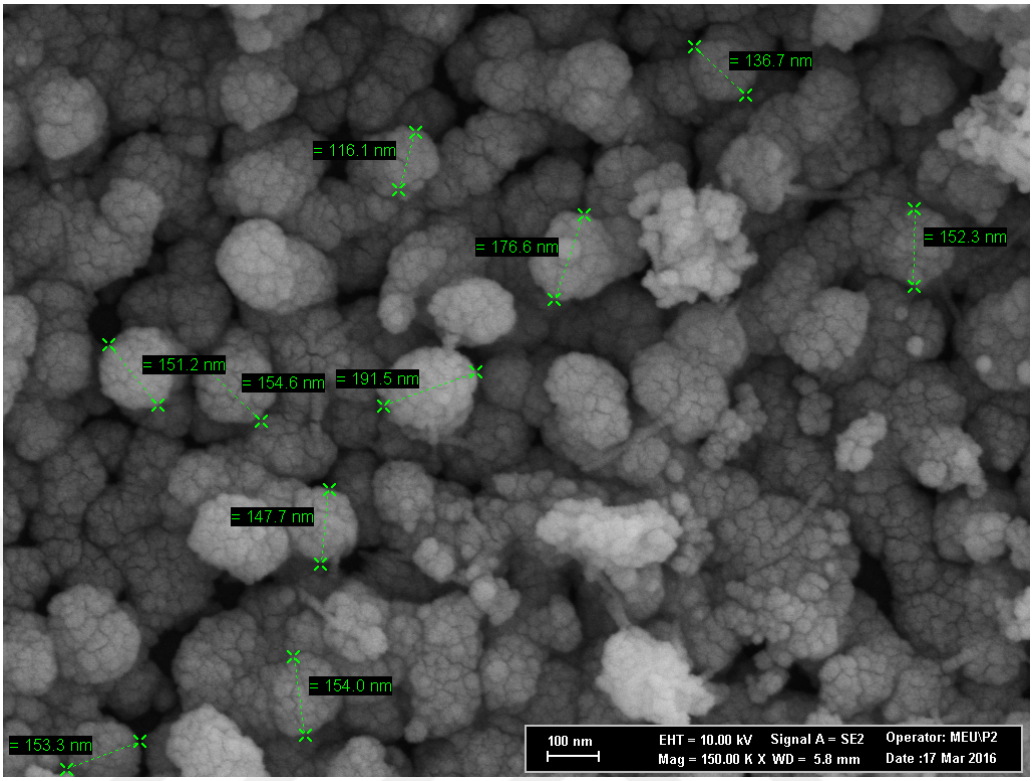
Şekil 4.40'da $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 40 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin tanecik dağılımı küresel kümeler halinde olup karnabaharın dış yüzeyine benzemektedir. Elektrodepolama yöntemi ile karnabahar-benzeri Cu_2O ince filmi elde edilmiştir (Morales ve ark., 2005). Ayrıca homojen sıkı bir yapının oluştuğu görülmektedir. Filmin tanecik çapları 60.98 nm'den 264.3 nm'ye kadar değişmektedir. Şekil 4.40'da görüldüğü gibi açık renkli taneler gri olan tanelerden daha yüksektedir.

4.3.3. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin FE-SEM Görüntüleri



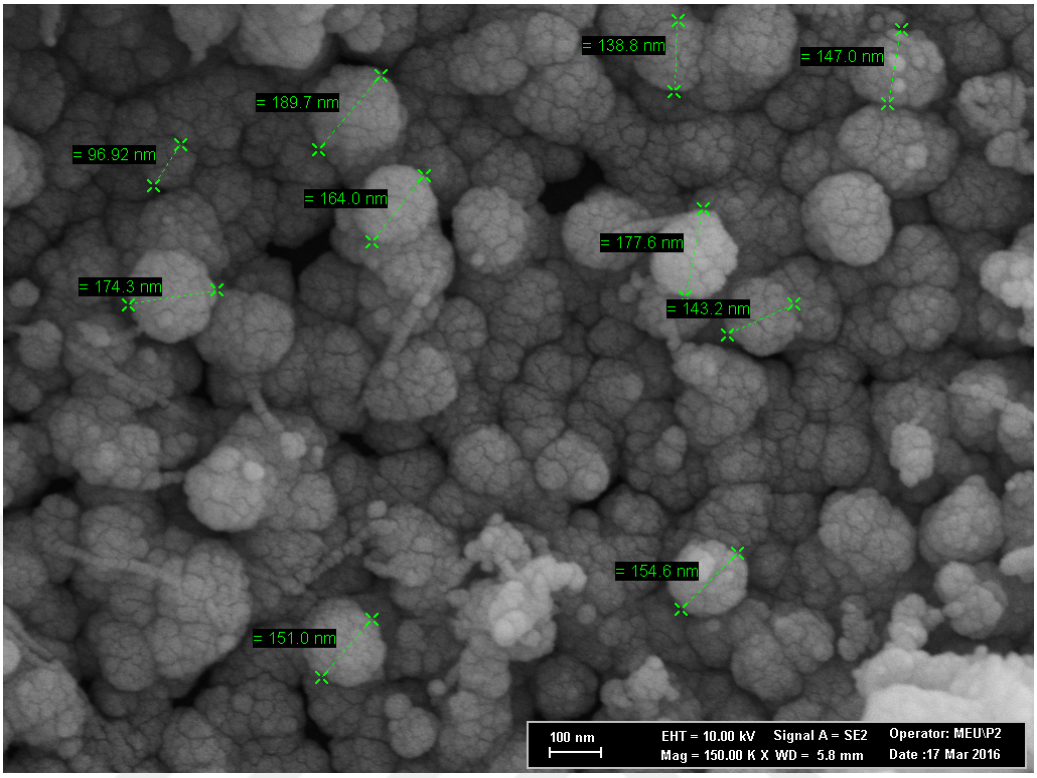
Şekil 4.41. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.41'de $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 10 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin küresel ve çubuk-benzeri mikro parçacıklar halinde karışık bir dağılıma sahip olduğu ve tanecikler arasında boşlukların yer aldığı fark edilmektedir. Filmin tanecik çapları 30.86 nm'den 160.5 nm'ye kadar değişmektedir.



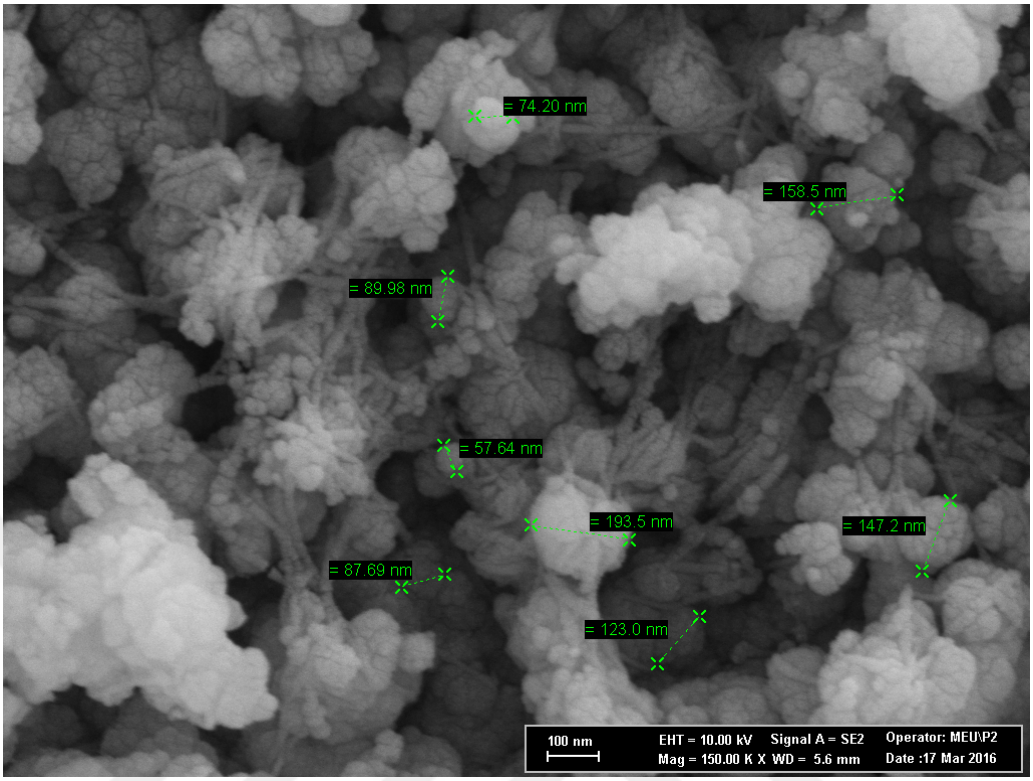
Şekil 4.42. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.42'de $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 20 daldırma döngüsü ile elde edilen filmin küresel dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Çubuksu yapılar ara ara 20 daldırma döngüsünde de fark edilmektedir. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsünde elde edilen filmin mikro yapısı, 10 daldırmada elde edilen filme göre daha sıkı ve daha homojendir. Filmin tanecik çapları 116.1 nm'den 191.5 nm'ye kadar değişmektedir.



Şekil 4.43. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

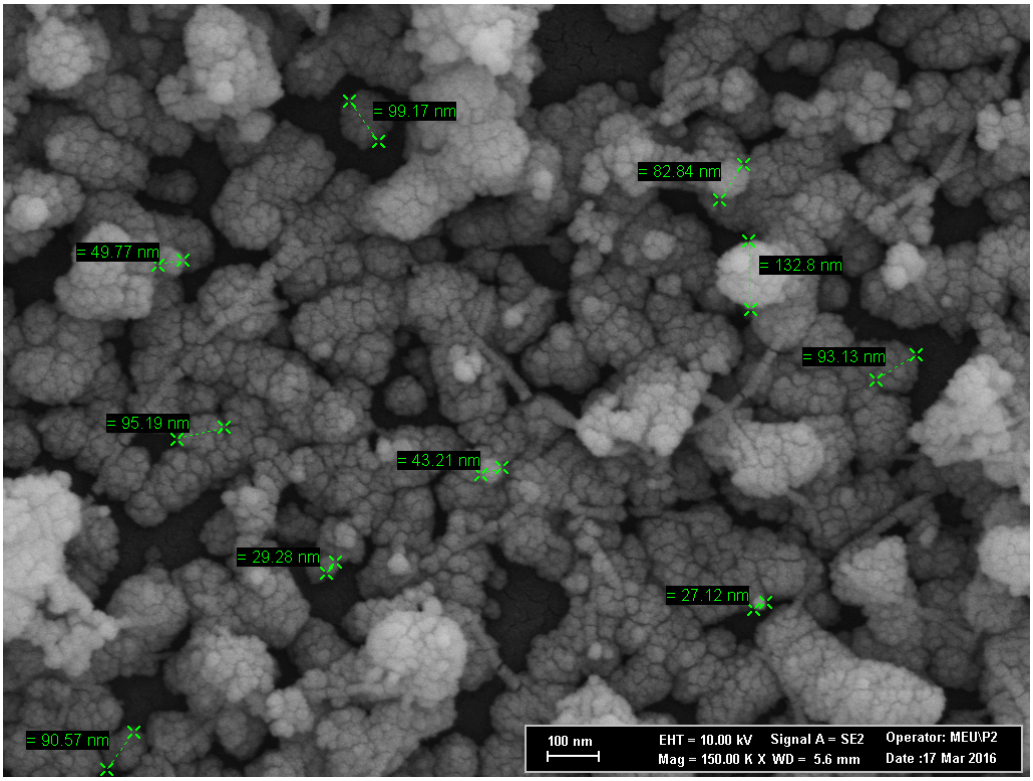
Şekil 4.43'de $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 30 daldırma ile elde edilen filmin baskın bir şekilde küresel ve çok azda olsa çubuksu yapılardan meydana geldiği görülmektedir. Aynı bakır tuz kaynağı ile 30 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince film tanecik dağılımı, 20 daldırmada elde edilen filme göre daha sıkı ve homojendir. Filmin tanecik çapları 96.92 nm'den 189.7 nm'ye kadar değişmektedir.



Şekil 4.44. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

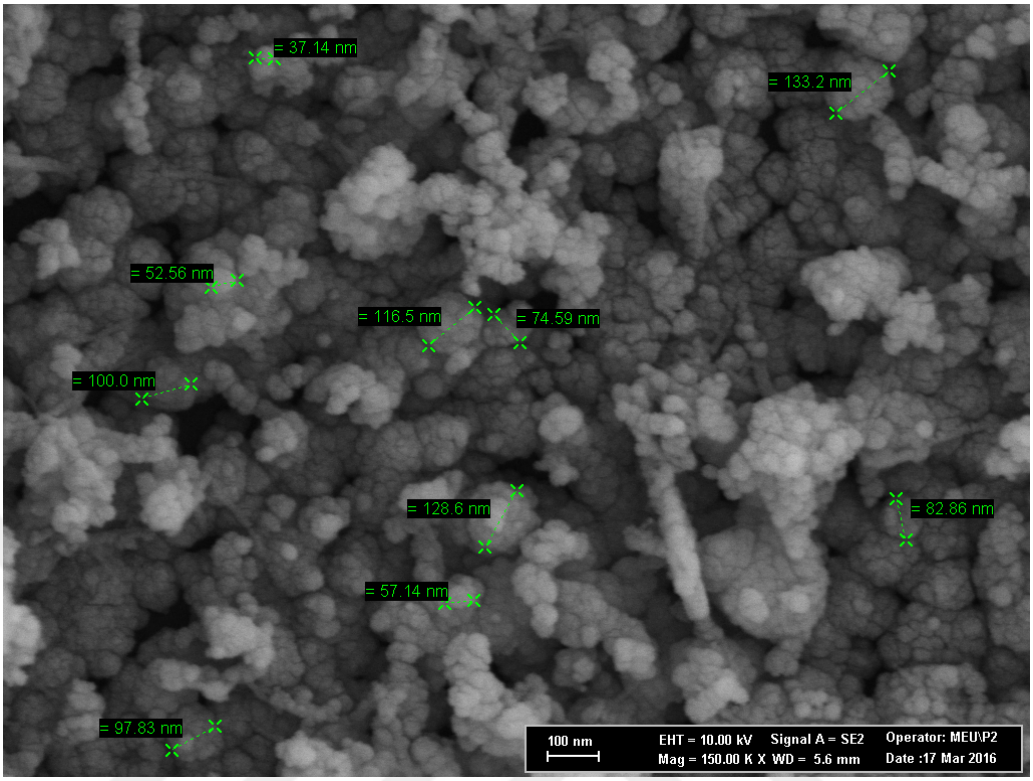
Şekil 4.44'de $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 40 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filmin mikroyapı görüntüsünde diğer daldırma döngüsünde oluşan yapılardan farklı olarak çubuksu yapıların oluştuğu ve küresel taneciklerle birlikte karnabahar-benzeri bir mikroyapının elde edildiği görülmektedir. Ayrıca homojen sıkı bir yapının oluştuğu fark edilmektedir. Filmin tanecik çapları 57.64 nm'den 193.5 nm'ye kadar değişmektedir ve küresel kümeler olarak dağılmaktadır. Şekil 4.44'de görüldüğü gibi açık renkli taneler gri olanlardan daha yüksektedir.

4.3.4. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ Tuzu ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin FE-SEM Görüntüleri



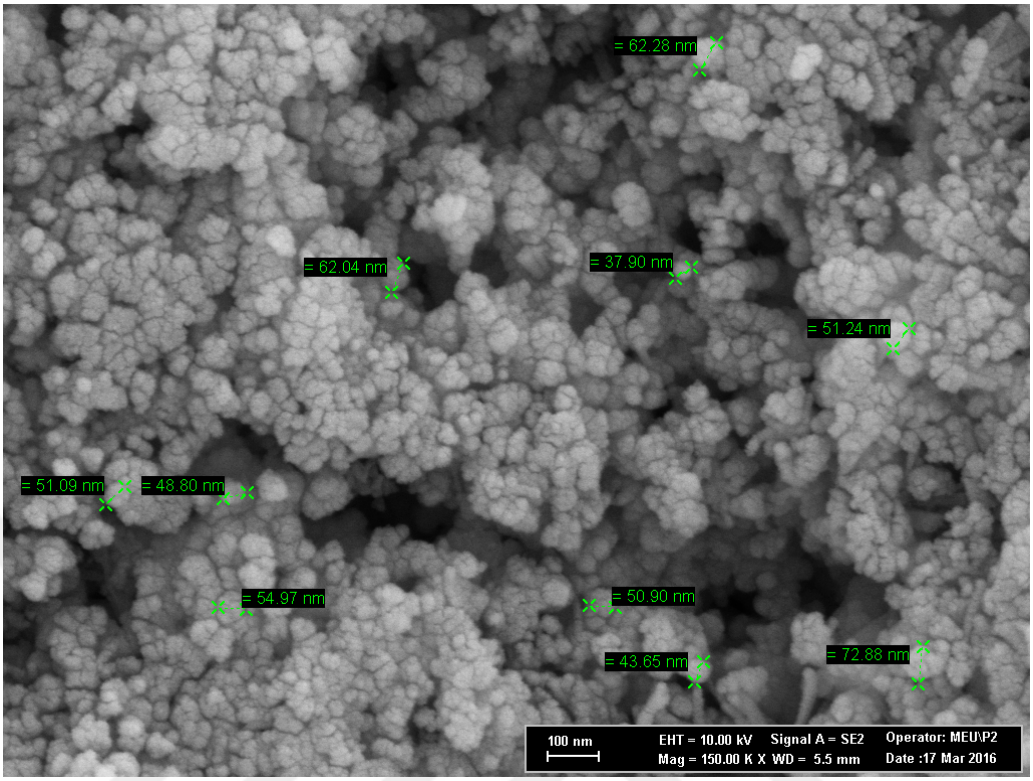
Şekil 4.45. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.45'de $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 10 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 10 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin baskın bir şekilde küresel ve kısmen çubuk-benzeri büyüme göstermiş olduğu görülmektedir. Cu_2O ince filmlerin tanecikleri, tanecik boyutu olarak büyük ve çok küçük parçacıklar karışık bir şekilde dağılım göstermektedir. Filmin tanecik çapları 27.12 nm'den 132.8 nm'ye kadar değişmektedir



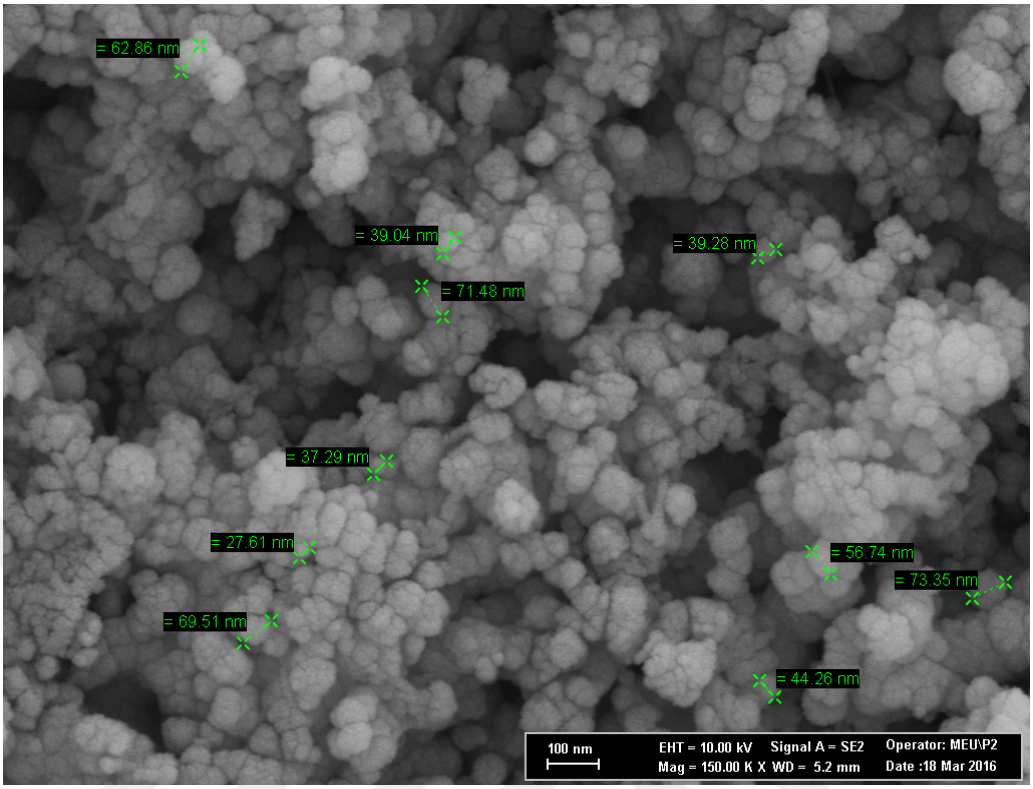
Şekil 4.46. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.46'da $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 20 daldırma döngüsü ile elde edilen film tanecikleri küresel kümeler olarak dağılım sergilemektedir. Çubuksu yapılar burada da kısmen fark edilmektedir. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 20 daldırma döngüsünde depolanan filmin mikro yapısı, 10 daldırmada elde edilen filme göre daha sıkı ve daha homojen bir dağılım göstermektedir Filmin tanecik çapları 37.14 nm'den 133.2 nm'ye kadar değişmektedir.



Şekil 4.47. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

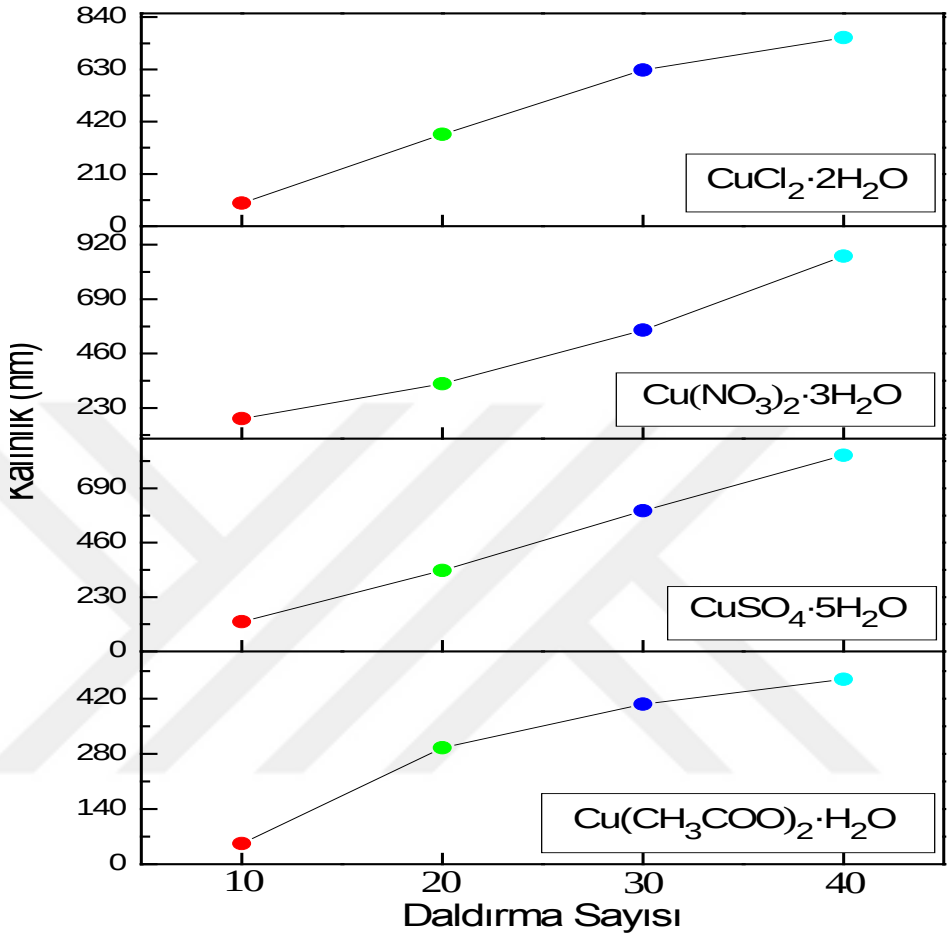
Şekil 4.47'de $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 30 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 30 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince film tanecikleri küresel kümeler olarak dağılım göstermektedir. Bu yapının daha çok karnabaharın dış yüzeyine benzer bir büyüme gösterdiği söylenebilir. Aynı bakır tuz kaynağı kullanılarak 30 daldırma ile elde edilen filmin mikro yapısı, 20 daldırmadaki film göre daha sıkı ve daha homojendir. Filmin tanecik çapları 37.90 nm'den 72.88 nm'ye kadar değişmektedir .



Şekil 4.48. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.48'de $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 40 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsü yer almaktadır. 40 daldırma ile elde edilen Cu_2O ince filminin FE-SEM görüntüsünde küresel yapılar karnabaharı anımsatmaktadır ve tanecik büyümesi karnabaharın dış yüzeyinde olduğu gibi küresel bir şekilde devam ettiği görülmektedir. Ayrıca aynı bakır tuz kaynağı ile 40 daldırma döngüsünde elde edilen film 10, 20 ve 30 daldırmada elde edilen filmlere göre tanecik dağılımı daha sıkı ve homojendir. Filmin tanecik çapları 27.61 nm'den 73.35 nm'ye kadar değişmektedir.

4.4. Kalınlık



Şekil 4.49. Farklı bakır tuz kaynakları $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin kalınlık grafiği

Film kalınlıkları (3.33) eşitliği yardımı ile hesaplandı. Şekil 4.49'da farklı bakır tuzu kaynakları kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin kalınlıklarının daldırma sayısı artıkça artmakta olduğu net bir şekilde görülmektedir. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince film kalınlıkları sırası ile 52.33, 295.31, 406.05 ve 468.97 nm olarak hesaplanmıştır. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince film kalınlıkları sırası ile 126.26, 342.71, 595.24 ve 829.73 nm olarak hesaplanmıştır. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince film

kalınlıkları sırası ile 184.57, 331.42, 558.87 ve 872.14 nm olarak hesaplanmıştır. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince film kalınlıkları sırası ile 92.29, 369.14, 627.54 ve 757.58 nm olarak hesaplanmıştır. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu kullanılarak elde edilen Cu_2O ince film kalınlıklarının diğer tuz kaynakları ile edilen Cu_2O ince film kalınlıklarına göre daha doğrusal olarak artığı Şekil 4.49'de net bir biçimde görülmektedir. Ayrıca bütün Cu_2O ince filmlerin yoğunlukları 6.1 gr/cm^3 olarak XRD ölçümlerinden elde edilmiştir ve literatür ile uyumludur (Ohajianya ve ark. 2013, Darvish 2013).

Çizelge 4.6. Farklı bakır tuz kaynakları ($Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$) kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmlerinin kalınlık dağılımı

Bakır Tuz Kaynakları	10 daldırma (film kalınlığı) (nm)	20 daldırma (film kalınlığı) (nm)	30 daldırma (film kalınlığı) (nm)	40 daldırma (film kalınlığı) (nm)
$Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$	52.33	295.31	406.05	468.97
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	126.26	342.71	595.24	829.73
$Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	184.57	331.42	558.87	872.14
$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	92.29	369.14	627.54	757.58

4.5. Elektriksel Özellikler

Hall ölçüm sistemi HS-3000 Manual-Ver 3.5 kullanılarak elektriksel ölçümler yapılmıştır. Bu sistem ile filmlerin hacim konsantrasyonu, mobilitesi (μ), özdirenci (ρ) ölçülmüştür.

4.5.1. Cu_2O İnce Filmlerin Elektriksel Özellikleri

Farklı bakır tuz kaynakları kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen bütün Cu_2O ince filmlerin Hall ölçümlerinden p-tipi yarıiletken olduğu tespit edilmiştir. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ tuzu ile hazırlanan çözeltilerde 10, 20, 30 ve 40

daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin özdirenç değerleri sırası ile $1.24x10^4$-$3.69x10^4$ Ωcm, mobilite değerleri sırası ile $2.24x10^1$-$8.74x10^2$ $cm^2V^{-1}s^{-1}$, hacim konsantrasyon değerleri sırası ile $7.14x10^{12}$-$1.39x10^{14}$ cm^{-3} kadar değişen değerleri aldığı bulunmuştur. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ tuzu ile hazırlanan çözeltilerde 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin özdirenç değerleri sırası ile $1.25x10^3$-$6.10x10^4$ Ωcm, mobilite değerleri sırası ile $1.96x10^1$-$1.39x10^2$ $cm^2V^{-1}s^{-1}$, hacim konsantrasyon değerleri sırası ile $1.79x10^{12}$-$5.32x10^{14}$ cm^{-3} kadar değişen değerleri aldığı bulunmuştur. $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ tuzu ile hazırlanan çözeltilerde 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin özdirenç değerleri sırası ile $2.86x10^3$-$5.92x10^4$ Ωcm, mobilite değerleri sırası ile $5.16x10^1$-$2.96x10^2$ $cm^2V^{-1}s^{-1}$, hacim konsantrasyon değerleri sırası ile $2.47x10^{12}$-$1.49x10^{14}$ cm^{-3} kadar değişen değerleri aldığı bulunmuştur. $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzu ile hazırlanan çözeltilerde 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin özdirenç değerleri sırası ile $8.86x10^3$-$4.06x10^4$ Ωcm, mobilite değerleri sırası ile $2.33x10^1$-$2.14x10^2$ $cm^2V^{-1}s^{-1}$, hacim konsantrasyon değerleri sırası ile $1.25x10^{12}$-$4.74x10^{14}$ cm^{-3} kadar değişen değerleri aldığı bulunmuştur. Cu_2O ince filmlerin özdirenç değerleri $1.25x10^3$-$6.10x10^4$ Ωcm (Li ve ark. 2011, Musa ve ark. 1998, Ahirrao ve ark. 2011) literatür değerleri ile örtüşmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, SILAR yöntemi ile dört farklı bakır tuz kaynağı [$Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$] kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngülerinde cam alttaban üzerine Cu_2O ince filmleri elde edilmiştir.

Dört farklı bakır tuz kaynağı ile 10, 20, 30 ve 40 daldırmada döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmleri X-ışını kırınım desenleri 2θ=10°-80° arasında alınmıştır. Daldırma sayısı artıkça film kalınlığı artarak daha iyi kristaleşen filmler elde edilmiştir. Bütün Cu_2O ince filmlerin polikristal yapıda, kübik fazda olduğu görülmüştür. Filmlerin 2θ değerlerine karşılık gelen (*hkl*) yansıma düzlemlerinin (*110*), (*111*), (*200*), (*220*), (*311*) olduğu bulunmuştur. Ayrıca düzlemler arası *d* uzaklığı ve kristal kafese ait örgü parametreleri (*a*=*b*=*c*) bulunmuştur. Bulunan bu değerlerin Cu_2O nun standart kartındaki (PDF 01-071-3645) değerleri ile bire bir uyumlu olduğu tespit edilmiştir. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ bakır tuzları ile elde edilen tüm Cu_2O ince filmlerin yapısal özellikleri benzerlik göstermiştir. SILAR yöntemi ile değişen bakır tuz kaynakları kullanılarak hazırlanan kimyasal çözeltiler ile elde edilen tüm filmlerin yapısal özelliği üzerine farklı bakır tuz kaynaklarının etkisinin olmadığı X-ışını kırınım analizlerinde net bir biçimde görülmüştür. Sadece elde edilen ince filmlerin pik şiddetleri birbirlerinden bir miktar farklı olduğu tespit edilmiştir.

Dört farklı bakır tuz kaynağı kullanılarak 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmlerin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik (%*T*) grafikleri elektromagnetik spektrumun 700 nm dalga boyu bölgesinde $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ için sırası ile %42, 49.73, 41.57, 38.65 değerlerini almıştır. 10, 20, 30 ve 40 daldırma döngüsü ile elde edilen tüm Cu_2O ince filmlerin soğurma katsayısı değerleri 550 nm dalga boyunda 0.94×10^6-0.51×10^5 cm^{-1} arasında bulunmuştur. Bu soğurma katsayı değerleri gelen ışığın iyi soğurulduğunu göstermektedir. Bundan dolayı elde edilen Cu_2O ince filmler, güneş pillerinde

soğurucu tabaka yapımı için çok uygundur. Cu_2O ince filmlerinin enerji bant aralığı değerleri soğurma değerleri yardımı ile yaklaşık olarak 2.27-2.55 eV arasında bulunmuştur.

Filmlerin morfolojik yapısı dijital bilgisayar kontrolü alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılarak yapıldı. Elde edilen Cu_2O ince filmlerin bazılarının küresel yığılmalar bazılarının ise küresel ve çok azda olsa çubuksu yapılar şeklinde oluştuğu ve genellikle homojen dağılım gösterdiği görüldü. $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ tuzları kullanılarak 10, 20, 30 ve 40 daldırmada döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmlerin daldırma sayısının arttırılması bağlı olarak alttaban üzerinde oluşan çubuksu yapıların görünümünde azalma meydana gelmiştir. Tabaka kalınlığının artmasına sebep olan bu durum küresele yakın ve ilerleyen daldırma sayılarında küresel tanelerin elde edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Cu_2O ince filmlerin kalınlığı tartım metodu ile hesaplandı. Yapılan dört farklı deney sonucunda daldırma döngüsü artıkça filmlerin kalınlıklarının artığı fark edilmiştir. Artan film kalınlığına bağlı olarak tanecikler arasındaki boşluklar gittikçe azalmıştır. Bu durum filmlerin FE-SEM görüntüleri ile kıyaslandığında uyum içinde olduğu fark edilmiştir. Ayrıca daldırma döngü sayısı belirli bir değeri aşarsa cam alttaban üzerine biriken bileşik istenmeyen yığılmalar şeklinde olabilir. Bu durum filmin optik, yapısal, morfolojik ve elektriksel özelliklerini olumsuz bir şekilde etkileyebilir.

Elde edilen Cu_2O filmlerin Hall ölçümleri sonucunda hepsinin p-tipi iletkenliğe sahip olduğu, özdirençlerinin $1.25x10^{3}$-$6.10x10^{4}$ Ωcm, hacim konsantrasyonu $1.25x10^{12}$-$5.32x10^{14}$ cm^{-3}, mobilitelerinin $2.24x10^{1}$-$8.74x10^{2}$ $cm^2V^{-1}s^{-1}$ arasında değiştiği bulunmuştur.

5.2. Öneriler

Cu_2O ince filmleri azot ya da hava ortamında tavlandığında filmlerin küçük tanecikleri büyüyerek daha da sıkı küresel yapıya dönüşebilir. Ayrıca hava ortamında tavlama yapılan Cu_2O ince filmleri CuO fazına geçiş yapmasına neden olur. Bu yüzden Cu_2O filmlerin tavlanması üzerine durulması çok ilgi çekicidir. Bundan

sonraki hedefimiz; SILAR yöntemi ile dört faklı bakır tuz kaynağı $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ kullanılarak elde edilen Cu_2O ince filmlerini azot ve hava ortamında farklı sıcaklarda tavlayarak filmlerin elektriksel, yapısal, optiksel ve morfolojik özelliklerinin nasıl değişeceği üzerine çalışma yapmaktır. Ayrıca çözelti molaritesi, çözelti sıcaklığı ve daldırma döngüsü değiştirilerek filmlerin optiksel, elektriksel, morfolojik ve yapısal özellikleri daha da geliştirilebilir. Tüm Cu_2O ince filmlerin soğurma katsayısı değerleri yüksektir ve enerji bant aralıkları 2.27-2.55 eV arasında değerler almıştır. Bu sebeple Cu_2O ince filmleri, geniş enerji bant aralıklı güneş pilleri yapımında soğurucu tabaka olarak kullanımı için çok uygundurlar.

KAYNAKLAR

AGBO, P.E., IBEH, G.F., OKEKE, S.O., EPKE J.E., 2013. Chemically deposited cuprous oxide thin film on titanium oxide for solar applications. Communications in Applied Sciences, 1(1):38-46.

AHİRRAO, P.B., SANKAPAL, B.R., PATİL R.S., 2011. Nanocrystalline p-type-cuprous oxide thin films by room temperature chemical bath deposition method. Journal of Alloys and Compounds, 509:5551–5554.

AKAT, E., 2010. Katıhal Fiziği Temelleri, Papatya Yayıncılık, İstanbul. 568s.

AKSOY, Ç., 2011. (In10Ga9)Se Yarıiletken Kristalinin ve Amorf İnce Filmlerinin Doğrusal Olmayan Optik Soğurma Özellikleri. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. Fizik Mühendisliği Anabilimdalı. Ankara. 70s.

AL-KUHAİLİ M.F., 2008. Characterization of copper oxide thin films deposited by the thermal evaporation of cuprous oxide (Cu_2O). Vacuum, 82:623-629.

AREF , A.A., XİONG, L., YAN N., ABDULKAREM, A.M., YU, Y., 2011. Cu_2O nanorod thin films prepared by CBD method with CTAB: Substrate effect, deposition mechanism and photoelectrochemical properties. Materials Chemistry and Physics, 127: 433-439.

BALAMURUGAN, B., MEHTA, B. R., 2001. Optical and structural properties of nanocrystalline copper oxide thin films prepared by activated reactive evaporation. Thin Solid Films, 396:90-96.

BAŞARAN, E., 1999. Katıhal Fiziği. Literatüre yayıncılık, İstanbul. 467s.

BOUDERBALA, M., HAMZAOUİ, S., AMRANİ, B., RESHAK, A.H., ADNANE, M., SAHRAOUİ, T., ZERDALİ M., 2008. Thickness dependence of structural, electrical and optical behaviour of undoped ZnO thin films. Physica B: Condensed Matter, 403:3326-3330.

CAFEROV T., 1998. Yarıiletkenler Fiziği-1. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi Matbaası, İstanbul. 200s.

CHOWDHURY, A., BIJALWANA, P. K., SAHUBA R. K., 2014. P Investigations on the role of alkali to obtain modulated defect concentrations for Cu_2O thin films. Applied Surface Science, 289:430-436.

CULLİTY, B.D., 1958. Elements of X-Ray Diffraction. Adsison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, 514p.

ÇEVİK, S., 2013. SILAR Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen Kurşun Sülfür Filmlerin Bazı Fiziksel Özellikleri. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. Burdur. 92s.

DE LOS SANTOS VALLADARES, L., HURTADO SALINAS, D., BUSTAMANTE DOMINGUEZ, A., ACOSTA NAJARRO, D., KHONDAKER, S.I., MITRELIAS, T., BARNES, C.H.W., ALBINO AGUIAR J., MAJIMA Y., 2012. Crystallization and electrical resistivity of Cu_2O and CuO obtained by thermal oxidation of cu thin films on SiO_2/Si substrates. Thin Solid Films, 520(20): 6368–6374.

DARVİSH D.S., 2013. Cu2O Substrates and Epitaxial Cu2O/ZnO Thin Film Heterostructures for Solar Energy Conversion. Doctor of Philosophy. California Institute of Technology. Pasadena, California, ABD, 105p.

DİKİCİ, M., 2012. Katıhal Fiziği. Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. Ltd. Şti., Ankara 424s.

DROBNY, V.F., PULFREY L., 1979. Properties of reactively-sputtered copper oxide thin films. Thin Solid Films, 61(1):89-98.

DURLU, N. T., 1989. Katıhal Fiziğine Giriş. Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi. Fizik Bölümü, Ankara. 356s.

ENGİN R., 1995. Güneş Pilleri. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van. 152s.

ERKEN, Ö., 2015. Kimyasal Depolama Yöntemi ile Hazırlanan Zns ve $Zn_{1-x}SMn_x$ Yarıiletken İnce Filmlerin Optiksel, Yapısal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi. Adana. 201s.

EYA, D. D. O., EKPUNOBİ, A. J., OKEKE C. E., 2005. Optical properties of cuprous oxide thin film prepared by chemical bath deposition technique. The Pacific Journal of Science and Technology, 6(2):98-104.

GILBERT T., 2010. Surface Characterization of Oxides Synthesized by Successive Ionic Layer Deposition. Chemical Engineering. Doctoral thesis. The University of Michigan. Detroit. Michigan. ABD. 103s.

GÖDE, F., 2007. Kimyasal Depolama Yöntemiyle Elde Edilen ZnS Filmlerin Yapısal, Optiksel ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi. Adana. 118s.

GÜMÜŞ, C., 1998. Zn:Mn İnce Film Elektrolüminesans Çalışması. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi. Adana. 145s.

GÜNERİ, E., 2009. Kimyasal Depolama Yöntemiyle Elde Edilmiş SnS Filmlerin Yapısal, Elektriksel ve Optiksel Özelliklerin İncelenmesi. Ç.Ü. Fen Bilimleri Doktora Tezi. Adana. 139s.

HAMES, Y., EREN SAN S., 2004. CdO/Cu_2O solar cells by chemical deposition Solar Energy, 77:291–294.

ILICAN, S., ÇAĞLAR, Y., ÇAĞLAR, M., YAKUPHANOĞLU, F., 2008. Structural, optical and electrical properties of F-doped ZnO nanorod semiconductor thin films deposited by sol-gel proces. Applied Surface Science, 255:2353-2359.

JANG, J., CHUNG,S., KANG,H., SUBRAMANİAN V., 2016. P- type CuO and Cu_2O transistors derived from a sol-gel copper(II) acetate monohydrate precursor. Thin Solid Films, 600:157–161.

KABAK, M., 2004. X-ışınları kristalografisi. Bıçaklar Kitap Evi., Ankara. 235s.

KARA, K., 2008. Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi ile P-Tipi ZnO (Çinko Oksit) Üretimi ve Yapısal Özellikleri. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. Adana. 66s

KASAP, S., CAPPER P., 2006. Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials. Acid Free Paper, Canada. 1407p.

KIRMIZIGÜL. F., 2008. CdO İnce Flimlerin Püskürtme Yöntemi ile Hazırlanması Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. Adana. 97s.

KITTEL, C., 1996. Introduction to Solid State Physics. Jhon Wiley and Sons, Inc., New York 434p.

KOBAYASHİ, H., NAKAMURA, T., TAKAHASHİ, N., 2007. Preparation of Cu_2O films on mgo (110) substrate by means of halide chemical vapor deposition under atmospheric pressure. Materials Chemistry and Physics, 106:292–295.

KÖKSAL, F., 1999. Katıhal Fiziği, Literatür Yayınları, İstanbul. 467s.

KUO, C.H., CHEN, C. H., HUANG M. H., 2007. Seed-mediated synthesis of monodispersed Cu_2O nanocubes with five different size ranges from 40 to 420 nm. Adv. Funct. Mater, 17:3773–3780.

Lİ, F., M., WADDINGHAM, R., MILNE, W., I., A., J., FLEWITT,A., J., SPEAKMAN, S., DUTSON, J., WAKEHAM, S., THWAITES M., 2011. Low temperature (<100 °C) deposited P-type cuprous oxide thin films: Importance of controlled oxygen and deposition energy. Thin Solid Films, 520:1278-1284.

LUKASIAK L., JAKUBOWSKI A., 2010. History of semiconductors.Journal of telecommunications and information technology. Warsaw, Poland, 3-9.

MARUYAMA T., 1998. Copper oxide thin films prepared by chemical vapor deposition from copper dipivaloylmethanate. Solar Energy Materials and Solar Cells, 56(1): 85-92.

MORALES, J., SANCHEZ, L., BIJANI, S., MARTINEZ, L., GABAS,M., RAMOS-BARRADO, J., R., 2005. Electrodeposition of Cu_2O: An Excellent Method for Obtaining Films of Controlled Morphology and Good Performance in Li-Ion Batteries. Electrochemical and Solid-State Letters, 8(3):A159-A162.

MOTT, N.F., DAVIS, E.A., 1979. Electronic Process in Noncrystalline Materials. Clarendon Press, Inc. Oxford, pp 273-274.

MUSA, A.O., AKOMOLAFE, T., CARTER M.J., 1998. Production of cuprous oxide, a solar cell material, by thermal oxidation and a study of its physical and electrical properties. Solar Energy Materials and Solar Cells, 51:305-316.

NAİR, M.T.S., GUERRERO, L. ARENAS O., NAİR P.K., 1999. Chemically deposited copper oxide thin films: structural, optical and electrical characteristics. Applied Surface Science, 150:143-151.

NİKAM S. S., SURYAWANSHİ M. P., BHOSALE S. M., GAİKWAD M. A., SHİNDE P. A., MOHOLKAR A. V., 2016. Cu_2O thin films prepared

using modified successive ionic layer adsorption and reaction method and their use in photoelectrochemical solar cells. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 27:1897–1900.

OHAJIANYA, A., C., ABUMERE, O., E., 2013. Effect Of Cuprous Oxide (Cu_2O) Film Thickness On The Efficiency Of The Copper-Cuprous Oxide (Cu_2O/Cu) Solar Cell. The International Journal Of Engineering And Science (IJES), 2: 2319 -1805.

OMAR M. A., 1993. Elementary Solid State Physics: Principles and Applications. Addison-Wesley Publishing, USA, 669p.

ORAL, A.Y., MENŞUR¸ E., ASLAN, M.H., BAŞARAN E., 2004. The preparation of copper(II) oxide thin films and the study of their microstructures and optical properties. Materials Chemistry and Physics, 83:140-144.

OTTOSSON, M., CARLSSON J.O., 1996. Chemical vapour deposition of Cu_2O and CuO from CuI and O_2 or N_2O. Surface and Coatings Technology, 78:263-273.

ÖZDOĞAN, T., KARA, M., GÜMÜŞ, S., VE ORBAY M., 2014. Modern Fiziğe Giriş,4. Baskı, Pegem Akademi ISBN 978-605-5885-72-4

PANDA, A. ANTONAKOS, E. LIAROKAPIS, BHATTACHARYA, S., CHAUDHURI. S., 2007. Optical properties of nanocrystalline SnS2 thin films. Materials Research Bulletin, 42:576–583.

PAPADIMITROPOULOS, G., VOURDAS, N., VAMVAKAS, V. E., DAVAZOGLOU D., 2006. Optical and structural properties of copper oxide thin films grown by oxidation of metal layers. thin solid films 515(4):2428-2432.

RASTKAR A. R., NIKNAM A.R., SHOKRI B., 2009. Characterization of copper oxide nanolayers deposited by direct current magnetron sputtering. Thin Solid Films, 517(18): 5464-5467.

RAY, S.C., 2001. Preparation of copper oxide thin by sol-gel-like dip technique and study of their structural and optical properties. Solar Energy Materials & Solar Cells, 68: 307-312.

RAVICHANDRAN, A. T., DHANABALAN, K., VASUHI, A., CHANDRAMOHAN, R., MANTHA S., 2015. Morphology, Bandgap, and Grain Size Tailoring in Cu_2O Thin Film by SILAR Method. IEEE Transactions on Nanotechnology 14(1):108-112.

REDDY, M., H., P., REDDY, P., N., UTHANNA, S., 2010. Structural, electrical and optical behaviour of rf magnetron sputtered cuprous oxide films. Indian Journal of Pure and Applied Physics 48:420-424.

SAĞLAM M, ATEŞ A., 2007 Yarıiletken Fiziğine Giriş. Bizim Büro Basımevi Yayın-Dağıtım, Ankara, 322s.

SANAL, K.C., VİKAS L.S., JAYARAJ M.K., 2014. Room temperature deposited transparent p-channel CuO thin film transistors. Applied Surface Science, 297:153-157.

SANKAPAL, B.R., MANE, R.S. LOKHANDE C.D., 2000. Successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method for the deposition of large area (~10 cm^2) tin disulfide (SnS_2) thin films. Materials Research Bulletin, 35:2027–2035.

SERİN, N., SERİN, T., HORZUM, S., CELIK, Y., 2005. Annealing effects on the properties of copper oxide thin films prepared by chemical deposition. Semiconductor Science and Technology. 20:398–401.

SHAMPA M., 2013. Preparation of undoped and some doped ZnO thin films by SILAR and their characterization. Department of Physics. Doctoral thesis. The University of Burdwan. Burdwan. West Bengal. INDIA. 151s.

SHUR, M., 1996. Introduction to Electronic Devices. John Wiley and Sons. New York, United States of America. 577p.

TANER A., 2010. SILAR Yöntemiyle ZnO Yarıiletken Filminin Elde Edilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin incelenmesi. Anadolu üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi. Eskişehir. 60s.

TANG, Y., CHEN, Z., JİA, Z., ZHANG, L., Lİ J., 2005. Electrodeposition and characterization of nanocrystalline cuprous oxide thin films on TiO_2 films. Materials Letters, 59: 434–438.

TOLSTOVA, Y., WILSON, S. S., OMELCHENKO, S. T., LEWIS, N. S., ATWATER, H. A., 2015. Molecular beam epitaxy of Cu_2O heterostructures for photovoltaics. California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA.

UCHİYAMA, H., HASEGAWA, Y., MORİTA, H., KUROKOUCHİ,A., WADA, K., KOMİNE T., 2006 Thermoelectric property of Cu_2O thin film deposited by reactive ion plating method. Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255, Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan.

ULUTAŞ, C., 2009. Kimyasal Depolama Yöntemiyle Elde Edilmiş MnS İnce Filmlerin Özelliklerine Isısal Tavlamanın Etkisi. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi. Adana. 126s.

UZUN H, FINDIK F, SALMAN S., 2003. Malzeme Biliminin Temelleri. Değişim Yayınları, İstanbul. 247s.

WANG, L., LİU, G., XUE D., 2011. Effects of supporting electrolyte on galvanic deposition of Cu_2O crystals. Electrochimica Acta, 56:6277– 6283.

WİJESUNDERA, R.P., HİDAKA, D, M., KOGA, K., SAKAİ, M., SİRİPALA W., 2006. Growth and characterisation of potentiostatically electrodeposited Cu_2O and Cu thin films. Thin Solid Films, 500:241-246.

WON D.H., CHOI C.H., CHUNG J., WOO S.I., 2014. Photoelectrochemical production of formic acid and methanol from carbon dioxide on metal-decorated CuO/Cu_2O-layered thin films under visible light irradiation. Applied Catalysis.B, Environmental, 158-59,pp:217-223.

XİONG, L., YU,H., YANG, G., QİU,M., CHEN, J., YU,Y., 2010. A simplified chemical synthesis of Cu2O films with periodic pattern transfer. Thin Solid Films, 518:6738–6745.

XU, H., WANG, W., ZHU W., 2006a. Shape evolution and size-controllable synthesis of Cu_2O octahedral and their morphology-dependent photocatalytic properties. J. Phys. Chem. B, 110(28):13829-13834.

XU, H., CHEN, C., XU, L., DONG J., 2013b. Direct growth and shape control of Cu_2O film via one-step chemical bath deposition. Thin Solid Films, 527:76–80.

XU, H., DONG, J., CHEN C., 2014c. One-step chemical bath deposition and photocatalytic activity of Cu_2O thin films with orientation and size controlled by a chelating agent. Materials Chemistry and Physics. 143(2):713-719.

XUE, J., SHEN, Q., LİANG, W., LİU, X., BİAN, L., XU, B., 2013. Preparation and formation mechanism of smooth and uniform Cu_2O thin film by electrodeposition method. Surface & Coatings Technology, 216:166-171.

YU, W.L., LİN, Y. Z., ZHU, X.W., HU Z.G., HAN, M. J., CAİ, S.S., CHEN, L.L., SHAO H.H., 2015. Diversity of electronic transitions and photoluminescence properties of p-type cuprous oxide films: A temperature-dependent spectral transmittance study. J. Appl. Phys 117, 045701.

ZHU, H., ZHANG J., LI, C., PAN, F., WANG, T., HUANG, B., 2009. Cu_2O thin films deposited by reactive direct current magnetron sputtering. Thin Solid Films, 517(19):5700-5704.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Malatya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya'da tamamladı. 2003 yılında başladığı Gaziantep Üniversitesi, Kilis Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümünden 2007 yılında mezun oldu. Aynı yıl Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2011 yılında yüksek lisansını tamamladı. 2012 yılında Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında doktora öğrenimine başladı.