ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Farklı Alt Tabanlar Kullanılarak Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması

Hüsnü Çağlar ÇEVLİK

Fizik Anabilim Dalı

Haziran, 2025

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZ ONAYI

Farklı Alt Tabanlar Kullanılarak Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması

Hüsnü Çağlar ÇEVLİK

Fizik Anabilim Dalı

Bu Doktora Tezi 30/06/2025 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / ~~Oy Çokluğu~~ ile Kabul Edilmiştir.

Jüri	: Prof. Dr. Cebrail GÜMÜŞ	(Danışman)	……
	: Prof. Dr. Süleyman ÇABUK		……
	: Prof. Dr. Ramazan BİLGİN		……
	: Prof. Dr. Mustafa GÜNEŞ		……
	: Prof. Dr. Osman Murat ÖZKENDİR		……

Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.

Tez No:

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Ç.Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2021-14141

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.

İÇİNDEKİLER

ÖZ I
ABSTRACT II
TEŞEKKÜR III
ÇİZELGELER DİZİNİ IV
ŞEKİLLER DİZİNİ V
SİMGELER VE KISALTMALAR IX
1.GİRİŞ 1
1.1. Yarıiletken Teknolojisinin Gelişimi 1
1.2. Yarıiletken Malzemelerin Sınıflandırması 1
1.3. Katı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri 2
1.4. Kristalografik Yapıların Temel Birimleri 2
1.5. Temel Kristal Yapıları 3
1.6. Kristal Düzlemler ve Miller İndisleri 6
1.7. Katı Maddelerde Enerji Bandı Yapısı ve Elektriksel İletkenlik Özellikleri 7
1.7.1 Yalıtkan Malzemelerin Elektriksel Özellikleri ve Bant Yapısı 8
1.7.2. İletken Malzemelerin Elektriksel Özellikleri ve Bant Yapısı 9
1.7.3. Yarıiletken Malzemelerin Elektriksel Özellikleri ve Bant Yapısı 10
1.8. Yarıiletken Malzemelerin Karakterizasyon Teknikleri 15
1.8.1. X-ışını Kırınımı (XRD) 15
1.8.2. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) 17
1.9. Cu_2O Yarıiletken Özellikleri ve Uygulamaları 17
1.10. İnce Film Teknolojisinin Önemi 18
1.10.1. İnce Film Depolama Yöntemleri 19
1.10.2. SILAR Yöntemi 19
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR: 21
3.MATERYAL VE YÖNTEM 43
3.1. SILAR Yöntemi ile Cu_2O elde edilmesi 43
3.1.1. Alt Taban Hazırlama Protokolü 43
3.1.2. Çözeltileri Hazırlama 43
3.1.3. Deneyin Gerçekleştirilmesi 44
3.1.4. Cu_2O İnce Film Oluşumunda Redoks Tepkimesi 45
3.1.5. İnce Film Kalınlığı Ölçüm Yöntemi 45
3.2. Cu_2O İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılmasında Kullanılan Yöntem ve Teknikler 46
3.2.1. XRD ve Bragg Yasası 46

3.2.2. Alan Emisyon Taraması Elektron Mikroskobu (FE-SEM).....48
3.2.3. Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi 49
4. BULGULAR VE TARTIŞMA..... 57
4.1. SILAR Yöntemi ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin X-ışını Kırınım (XRD) Özelliklerinin İncelenmesi.....57
4.1.1. Cam Alt Taban Üzerinde 30 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin XRD Özelliklerinin İncelenmesi 58
4.1.2. Cam Alt Taban Üzerinde 70 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin XRD Özelliklerinin İncelenmesi 62
4.1.3. FTO Alt Taban Üzerinde 30 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin XRD Özelliklerinin İncelenmesi 67
4.1.4. FTO Alt Taban Üzerinde 70 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin XRD Özelliklerinin İncelenmesi 72
4.2. SILAR Yöntemi ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi.....77
4.2.1. Cam Alt Taban Üzerinde 30 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi.....77
4.2.2. Cam Alt Taban Üzerinde 70 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi.....78
4.2.3. FTO Alt Taban Üzerinde 30 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi.....79
4.2.4. FTO Alt Taban Üzerinde 70 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi.....80
4.3. SILAR Yöntemi ile Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerin İncelenmesi.....87
4.3.1. Cam Alt Taban Üzerinde 30 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi 87
4.3.2. Cam Alt Taban Üzerinde 70 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi 96
4.3.3. FTO Alt Taban Üzerinde 30 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi 105
4.3.4. FTO Alt Taban Üzerinde 70 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi 113
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 123
5.1. 30 ^oC ve 70 ^oC'de Cam ve FTO Alt Tabanlar Üzerinde Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin XRD Analizlerinin Sonuçları 123
5.2. 30 ^oC ve 70 ^oC' de Cam ve FTO Alt Tabanlar Üzerinde Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Analizlerinin Sonuçları 126

5.3. 30 ^{o}C ve 70 ^{o}C'de Cam ve FTO Alt Tabanlar Üzerinde Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Analizlerinin Sonuçları 129
KAYNAKLAR 135
ÖZGEÇMİŞ 143
EKLER 145

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Farklı Alt Tabanlar Kullanılarak Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması

Hüsnü Çağlar ÇEVLİK

Danışman: Prof. Dr. Cebrail GÜMÜŞ

Fizik Anabilim Dalı

ÖZ

Bu tez çalışmasının amacı, SILAR yöntemiyle, farklı sıcaklık (30 °C ve 70 °C) ve daldırma döngüsü sayılarında (10, 20 ve 40) cam (amorf) ve FTO (polikristal) alt tabanlar üzerinde Cu_2O (kuprit) yarıiletken ince filmler üretmek ve bu parametrelerin filmin fiziksel özelliklerine etkisini araştırmaktır. Çalışmada, alt taban türü, daldırma döngü sayısı ve üretim sıcaklığının, elde edilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. X-ışını kırınımı (XRD) analizleri sonucunda hem cam hem de FTO alt tabanlar üzerinde büyütülen Cu_2O ince filmlerin kübik fazda ve polikristal yapıda kristallendiği bulunmuştur. Üretilen yarıiletken filmlerin temel optik parametreleri geçirgenlik (%T), soğurma (A), yansıma (%R), kırılma indisi (n), sönüm katsayısı (k), reel ve imajiner dielektrik sabitleri ($\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$) ile enerji bant aralığı (E_g) UV-vis spektrofotometresinden elde edilen veriler yardımıyla hesaplanmıştır. Cam alt tabanlar üzerinde, 30 °C'de elde edilen filmlerin E_g değerleri 1,98–2,39 eV arasında, 70 °C'de ise 1,88–2,45 eV arasında bulunmuştur. FTO alt tabanlar için bu değerler, 30 °C'de 2,19–2,47 eV ve 70 °C'de 2,20–2,42 eV aralığında bulunmuştur. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) görüntüleri, ince filmlerin genel olarak homojen bir morfolojiye sahip olduğunu; ayrıca yer yer çubuksu ve küresel yapılara rastlandığını göstermiştir. Daldırma döngü sayısının ve üretim sıcaklığının artışı ile birlikte, daha sıkı ve yoğun bir yapının oluştuğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cu_2O, SILAR, İnce film, Optiksel özellikler, XRD.

CUKUROVA UNIVERSITY

INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

PhD THESIS

Investigation of the Physical Properties of Cu_2O Thin Films Deposited on Various Substrates

Hüsnü Çağlar ÇEVLİK

Advisor: Prof. Dr. Cebrail GÜMÜŞ

Department of Physics

ABSTRACT

The aim of this thesis is to deposit Cu_2O (cuprite) semiconductor thin films on glass (amorphous) and FTO (polycrystalline) substrates using the SILAR method at different temperatures (30 °C and 70 °C) and with varying numbers of dipping cycles (10, 20, and 40), and to investigate the effects of these parameters on the physical properties of the films.The effects of substrate type, number of dipping cycles, and deposition temperature on the structural, morphological, and optical properties of the films were investigated. XRD analyses revealed that the Cu_2O thin films grown on both glass and FTO substrates exhibited a cubic phase and polycrystalline structure. The fundamental optical parameters of the produced semiconductor films transmittance (%*T*), absorbance (*A*), reflectance (%*R*), refractive index (*n*), extinction coefficient (*k*), real and imaginary parts of the dielectric constant ($\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$), and optical band gap energy (E_g) were calculated using the data obtained from UV-vis spectrophotometry. The E_g values of the films on glass substrates were found to be in the range of 1,98–2,39 eV at 30 °C and 1,88–2,45 eV at 70 °C. For the films on FTO substrates, the values ranged between 2,19–2,47 eV at 30 °C and 2,20–2,42 eV at 70 °C. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) images revealed that the films generally had a homogeneous morphology and occasionally exhibited rod-like and spherical structures. It was observed that increasing the number of dipping cycles and the deposition temperature led to the formation of a denser and more compact structure.

Keywords: Cu_2O, SILAR, Thin film, Optical properties, XRD.

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam süresince bilgi birikimi, deneyimi ve yol göstericiliğiyle bana her zaman destek olan, bilimsel gelişimime büyük katkı sağlayan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Cebrail GÜMÜŞ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda ve tez yazım sürecinde verdikleri katkılarla her zaman yanımda olan kıymetli arkadaşlarım Onur YILMAZ ve Gülizar TEZCAN'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana koşulsuz sevgi ve desteğini esirgemeyen, bugün fiziksel olarak yanımda olmasalar da manevi varlıklarıyla daima güç veren merhum annem Zeynep ÇEVLİK ve merhum babam Selim ÇEVLİK'i rahmet ve minnetle anıyorum.

Bu zorlu süreçte sabırları, sevgileri ve anlayışlarıyla bana güç katan sevgili eşim Didem ÇEVLİK'e; varlıklarıyla hayatıma anlam katan sevgili çocuklarım Selim Arda ÇEVLİK ve Ata ÇEVLİK'e sonsuz teşekkür ederim.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yedi farklı kristal sistemine ait kafes parametreleri ve aralarındaki ilişkiler. 4
Çizelge 1.2. İnce film Üretim Yöntemleri.....19
Çizelge 3.1. Deneysel parametrelerin gösterimi 46
Çizelge 3.2. Cu_2O ince filmlerin incelenmesinde kullanılan yöntem ve teknikler 46
Çizelge 3.3. XRD ölçüm parametreleri.....47
Çizelge 4.1. 30 ^oC'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 59
Çizelge 4.2. 30 ^oC'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 60
Çizelge 4.3. 30 ^oC'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu2O ince filmin XRD değerleri 62
Çizelge 4.4. 70 ^oC'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 63
Çizelge 4.5. 70 ^oC'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 65
Çizelge 4.6. 70 ^oC'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 66
Çizelge 4.7. 30 ^oC'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 68
Çizelge 4.8. 30 ^oC'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 69
Çizelge 4.9. 30 ^oC'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 71
Çizelge 4.10. 70 ^oC'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 73
Çizelge 4.11. 70 ^oC'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 74
Çizelge 4.12. 70 ^oC'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri 76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Üç genel kristal tipinin gösterimi 2
Şekil 1.2. Kübik sistemler; basit kübik, cisim merkezli kübik, yüzey merkezli kübik kristal yapıları 3
Şekil 1.1. Kristali tanımlamak için gerekli parametrelerin gösterildiği birim hücrenin şematik gösterimi 4
Şekil 1.4. Yedi kristal sistemine ait toplam 14 farklı kristal geometrisi 5
Şekil 1.5. Üç kafes düzlemi: (100) düzlemi, (110) düzlemi, (111) düzlemi 6
Şekil 1.6. Yalıtkan bir malzemenin enerji-bant diyagramı 8
Şekil 1.7. İletken bir malzemenin enerji-bant diyagramı 9
Şekil 1.8. Yarıiletken bir malzemenin enerji-bant diyagramı 11
Şekil 1.9. Saf ve katkılı yarıiletkenlerin şematik gösterimi 12
Şekil 1.10. Doğrudan (a) ve dolaylı (b) bant aralığına sahip yarıiletkenler için bantlar arası optik geçişler 15
Şekil 1.11. X-ışını difraktometrenin şematik gösterimi 16
Şekil 1.12. Cu_2O'nun kristal yapısı 18
Şekil.3.1. SILAR yöntemi ile Cu_2O ince film elde etmek için kullanılan deneysel düzeneğin şematik gösterimi 44
Şekil 3.2. Denver Instrument TP-214 model hassas terazi 46
Şekil 3.3. PANalytical, EMPYREAN XRD 47
Şekil 3.4. Kristal düzlemlerinde X-ışını yansıması 48
Şekil 3.5. FEI Quanta 650 Field Emission SEM 49
Şekil 3.6. Perkin Elmer UV/vis Lambda 2S spektrofotometresi 50
Şekil 3.7. İnce film üzerine gelen ışığın temsili soğurma gösterimi 50
Şekil 3.8. Bir yarıiletkenin Soğurma katsayısı-Enerji grafiği 55
Şekil 4.1. 30 ^oC'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni 59
Şekil 4.2. 30 ^oC'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu2O ince filmin XRD deseni 60
Şekil 4.3. 30 ^oC'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni ve standart Cu_2O'nun XRD deseni PDF kartı (No: 01–071–3645) 61
Şekil 4.4. 70 ^oC'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni 63
Şekil 4.5. 70 ^oC'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni 64

Şekil 4.6. 70 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni ve standart Cu_2O'nun XRD deseni PDF kartı (No: 01–071–3645).....66
Şekil 4.7. 30 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni.....68
Şekil 4.8. 30 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni.....69
Şekil 4.9. 30 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni ve standart Cu_2O'nun XRD deseni PDF kartı (No: 01–071–3645).....71
Şekil 4.10. 70 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni.....72
Şekil 4.11. 70 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni.....74
Şekil 4.12. 70 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni ve standart Cu_2O'nun XRD deseni PDF kartı (No: 01–071–3645).76
Şekil 4.13. 30 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....81
Şekil 4.14. 30 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....81
Şekil 4.15. 30 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....82
Şekil 4.16. 70 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....82
Şekil 4.17. 70 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....83
Şekil 4.18. 70 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....83
Şekil 4.19. 30 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....84
Şekil 4.20. 30 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....84
Şekil 4.21. 30 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....85
Şekil 4.22. 70 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan.....85
Şekil 4.23. 70 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....86
Şekil 4.24. 70 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü.....86

Şekil 4.25. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik-dalga boyu grafiği 88
Şekil 4.26. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği 89
Şekil 4.27. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği 90
Şekil 4.28. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2$'nin enerjiye ($h\nu$) karşı grafiği 91
Şekil 4.29. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin-dalga boyuna karşı grafiği 92
Şekil 4.30. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği 93
Şekil 4.31. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği 94
Şekil 4.32. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği 95
Şekil 4.33. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik-dalga boyu grafiği 97
Şekil 4.34. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği 98
Şekil 4.35. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği 99
Şekil 4.36. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2$'nin enerjiye ($h\nu$) karşı grafiği 100
Şekil 4.37. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin-dalga boyuna karşı grafiği 101
Şekil 4.38. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği 102
Şekil 4.39. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği 103
Şekil 4.40. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği 104
Şekil 4.41. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik-dalga boyu grafiği 106
Şekil 4.42. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği 107

Şekil 4.43. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği 108
Şekil 4.44. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmleri için $(\alpha hv)^2$'nin enerjiye (hv) karşı grafiği.....109
Şekil 4.45. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin-dalga boyuna karşı grafiği.....110
Şekil 4.46. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği 111
Şekil 4.47. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği 112
Şekil 4.48. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği.....113
Şekil 4.49. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik-dalga boyu grafiği.....114
Şekil 4.50. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği.....115
Şekil 4.51. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği 116
Şekil 4.52. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmleri için $(\alpha hv)^2$'nin enerjiye (hv) karşı grafiği.....117
Şekil 4.53. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin-dalga boyuna karşı grafiği.....118
Şekil 4.54. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği 119
Şekil 4.55. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği 120
Şekil 4.56. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği.....121

SİMGELER VE KISALTMALAR

a,b,c : Kristalografik örgü parametreleri

A : Soğurma

B : Manyetik alan

c : Işık hızı

d : Kristal düzlemler arası uzaklık

δ : dislokasyon yoğunluğu

D : Kristalit boyutu

E : Elektrik alan

E_o : Ortalama uyarılma enerjisi

E_d : Osilatör kuvveti

E_f : Fermi enerjisi

E_c : İletim bandı enerji seviyesi

E_v : Değerlik (valans) bandı enerji seviyesi

E_g : Yasak enerji bant aralığı

$f(E)$: Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu

h,k,l : Miller indisleri

h : Planck sabiti

k : Sönüm katsayısı

Nc : Valans bandındaki elektronların etkin durum yoğunluğu

Nv : Değerlik bandındaki deşiklein etkin durum yoğunluğu

R : Direnç

n : Elektron yoğunluğu

n : Kırılma indisi

p : Deşik (boşluk – hole) yoğunluğu

r : Örgü vektörü

α : istiflenme hatası olasılığı

α : Lineer soğurma katsayısı

λ : Dalga boyu

θ : Bragg açısı

φ : Kristal doğrultuları veya düzlemleri arasındaki açı

υ : Frekans

ρ : Özdirenç

σ : Elektriksel iletkenlik

μ : Mobilite

ε : mikro gerinim

$\mathcal{E}_1$	: Reel dielektrik sabiti
$\mathcal{E}_2$	: İmajiner dielektrik sabiti
T	: Sıcaklık
% T	: Optik geçirgenlik
V	: Gerilim (voltaj)
V	: Hacim
V_S	: Sürüklenme hızı
% R	: Yansıma katsayısı
t_f	: Film kalınlığı
I	: Akım
I	: Işık şiddeti
Φ	: Foton (ışık) akısı
α, β, γ	: eksenler arasındaki açı değerleri
ω_p	: plazma frekansı
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
Au	: Altın
AZO	: Alüminyum katkılı çinko oksit
BCC	: Cisim merkezli kübik
CBD	: Kimyasal depolama yöntemi
CdS	: Kadmiyum sülfür
CdTe	: Kadmiyum tellür
CVD	: Kimyasal buhar depolama
CTAB	: Setiltrimetilamonyum bromür
$C_6H_8O_7$	: Sitrik asit
Cu	: Bakır elementi
CuO	: Bakır (II) oksit
$Cu(OAc)_2$	: Bakır (II) asetat
CuS	: Bakır sülfür
$CuSO_4$	: Bakır (II) sülfat
$CuSO_4.5H_2O$	: Bakır (II) sülfat pentahidrat
$3Cu_2S_2O_3 \cdot 2Na_2S_2O_3$	: Bakır tiyosülfat
Cu_2O	: Bakır (I) oksit
Cu_4O_3	: Bakır(I,II) oksit
$C_{16}H_{19}N_3O_3S$	: Metil oranj
$C_6H_5Na_3O_7$	: Trisodyum sitrat
DC	: Doğru akım
DFT	: Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi

ECD : Elektrokimyasal depolama

EDS : Enerji dağıtıcı spektrometri

FCC : Yüzey merkezli kübik

FE-SEM : Alan emisyon-taramalı elektron mikroskobu

FTIR : Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi

FTO : Flor katkılı kalay oksit

FWHM : Maksimum yarısı tam genişlik

GaAs : Galyum arsenik

Ge : Germanyum

GO : Grafen Oksit

H_2 : Hidrejen gazı

H_2O_2 : Hidrojen peroksit

H_2O : Su

HRTEM : Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskobu

InP : İndiyum fosfit

IR : Kızılötesi

ITO : İndiyum katkılı kalay oksit

KCl : Potasyum klorür

KLL : Bir Auger geçiş türüdür

LED : Işık yayan diyot

Li^+ : Lityum iyonu

LTB-Cu_2O : Düşük Sıcaklıklı Cu_2O Tampon Tabakası

LVV : Bir Auger geçiş türüdür

NaOH : Sodyum Hidroksit

Na_2SO_4 : Sodyum sülfat

$Na_2S_2O_3$: Sodyum tiyosülfat

Nd:YAG : Neodimyum yağ lazer

NiO : Nikel (II) oksit

NW : Nano teller

n-Cu_2O : *n*-tipi bakır (I) oksit

O : Oksijen

O_2 : Oksijen gazı

PEC : Fotoelektrokimyasl Hücre

PESC : Fotoelektrokimyasal güneş hücreleri

PET : Polietilen tereftalat

pH : Asit-baz dengesi göstergesi

PL : Fotolüminesans

PV : Fotovoltaik Sistemler

PVP : Polivinilpirolidon

p-CuO : *p*-tipi bakır (II) oksit

p-Cu_2O : *p*-tipi bakır (I) oksit

p-Si : *p*-tipi silisyum

Rct : Yük transfer direnci

RF : Radyo frekansı

RIP : Reaktif iyon kaplama

Sb : Antimon

Sccm : Standart santimetreküp / dakika

SCE : Doymuş kalomel elektrot

Se : Selenyum

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

Si : Silisyum

SILAR : Ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu

SLG : Soda Kireç Camı

SnO_2 : Kalay oksit

TEA : Trietanolaminin

TEM : Geçirimli Elektron Mikroskobu

Ti : Titanyum

TiO_2 : Titanyum dioksit

TL : Tauc-Lorentz

XPS : X-ışını fotoelektron spektroskopisi

XRD : X-ışını difraktometresi

UV-VİS : Ultraviyole ve görünür bölge spektrofotometresi

UV-vis-NIR : Ultraviyole, görünür bölge ve yakın kızılötesi bölge spektrofotometresi

XPS : X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi

ZnO : Çinko oksit

1.GİRİŞ

1.1. Yarıiletken Teknolojisinin Gelişimi

Yarıiletken teknolojisi, modern elektronik çağının temel taşlarından biridir ve insan teknolojisinin en önemli bilimsel buluşlarından birini temsil etmektedir. Yarıiletkenler, elektrik iletkenliği açısından metal ve yalıtkanlar arasında yer alan, kendine özgü elektronik özelliklere sahip malzemelerdir. Bu malzemelerin temel özellikleri, sıcaklık ve dış etkenlerle elektron geçirgenliklerinin değişebilmesidir. Yarıiletkenler genellikle silisyum, germanyum gibi elementler veya bileşik yarıiletkenlerden oluşur. 1833'te Michael Faraday, bazı malzemelerin sıcaklıkla iletkenliklerinin değiştiğini gözlemledi. 1870'lerde ilk yarıiletken davranış örnekleri bilim insanları tarafından incelenmeye başlandı. 1947'de Bell Laboratuvarları'nda William Shockley, John Bardeen ve Walter Brattain ilk transistörü geliştirdiler. Bu buluş, elektronik cihazların boyutlarının küçültülmesi ve performanslarının artırılmasında devrim yarattı. Transistörler, elektrik sinyallerini kontrol etme ve güçlendirme özelliğiyle elektronik sistemlerin temel bileşeni haline geldi. 1958'de Jack Kilby, ilk entegre devreyi geliştirdi. Robert Noyce, 1959'da silisyum üzerinde entegre devre üretim tekniğini icat etti. Bu gelişmeler, elektronik cihazların minyatürleşmesine ve performansının artmasına olanak sağladı. Yarıiletken malzemelere farklı atomların eklenmesiyle elektriksel özelliklerin kontrol edilmesi sağlandı. *n*-tipi ve *p*-tipi yarıiletkenler, elektronik aygıtların temelini oluşturdu (Lukasiak ve ark., 2010).

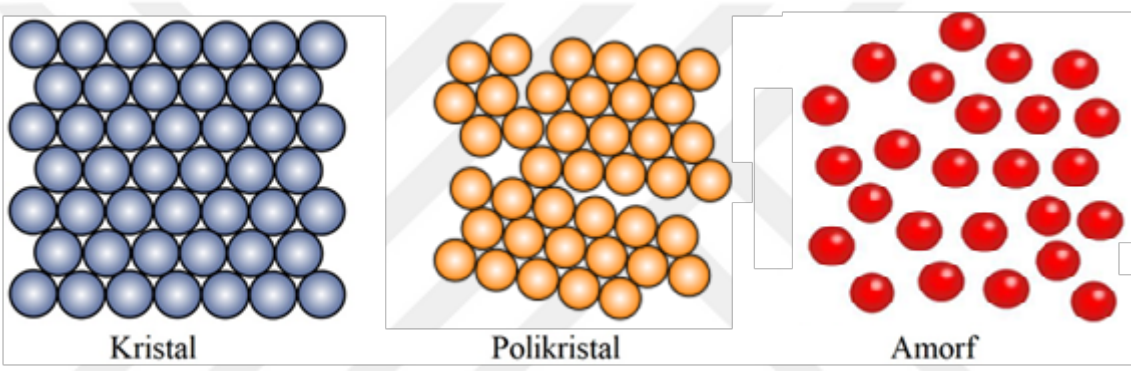
1.2. Yarıiletken Malzemelerin Sınıflandırması

Yarıiletken malzemeler, elektronik özellikleri ve kimyasal yapıları bakımından çeşitli şekillerde gruplandırılabilir. Temel olarak üç ana kategoride incelenmektedirler: Element yarıiletkenler, periyodik tablodaki IV. grup elementlerinden oluşur. Bunların başında silisyum (Si) ve germanyum (Ge) gelir. Bu malzemeler, saf haldeyken veya belirli oranlarda katlandırıldığında yarıiletken özellik gösterirler. Silisyum, elektronik endüstrisinde en yaygın kullanılan yarıiletken malzemedir ve transistör, mikroçip ve güneş pilleri gibi teknolojik uygulamalarda tercih edilir. Bileşik yarıiletkenler, farklı elementlerin birleşiminden oluşan malzemelerdir. Galyum arsenit (GaAs), indiyum fosfit (InP), kadmiyum tellürit (CdTe), çinko oksit (ZnO) ve bakır(I) oksit (Cu_2O) bu grupta yer alır. Bu malzemeler, genellikle yüksek frekanslı, optoelektronik ve hassas elektronik uygulamalar için tercih edilirler. Örneğin, GaAs, yüksek hızlı elektronik devreler ve optik haberleşme sistemlerinde ve Cu_2O, güneş pilleri, gaz sensörleri ve fotovoltaik malzemeler gibi uygulamalarda kullanılır. Organik yarıiletkenler, karbon bazlı moleküller ve polimerlerden oluşan bir gruptur. İletken polimerler, moleküler yarıiletkenler ve organometalik bileşikler bu kategoride yer alır. Esnek elektronik, organik LED'ler (Light Emitting Diode), organik fotovoltaik hücreler ve biyoelektronik uygulamalar için giderek daha fazla önem kazanmaktadırlar. İletken poliasetilen, politiyofen ve piroller bu grubun önemli örnekleridir. Bu sınıflandırmanın yanı sıra, yarıiletken

malzemeler elektronik özelliklerine göre de gruplandırılabilirler. Bunlar, saf yarıiletkenler, katkılanmış yarıiletkenler, *n*-tipi yarıiletkenler, *p*-tipi yarıiletkenlerdir. (Streetman ve ark., 2015).

1.3. Katı Maddelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Katı maddeler, molekül veya atomların düzenli veya düzensiz bir yapıda sıkı sıralar halinde dizildiği madde halidir. Yapısal özellikleri, atom ve moleküllerin birbirleriyle etkileşimlerine bağlı olarak çeşitli fiziksel ve kimyasal karakteristikler sergilerler. Fiziksel özellikleri açısından, katı maddeler belirgin bir şekil ve hacme sahiptir, dış kuvvetlere karşı direnç gösterirler ve sıkıştırılmaları oldukça zordur. Amorf, polikristal ve tek kristaller olmak üzere üç temel yapıya sahiptirler. (Şekil 1.1) Kristal katılarda atomlar düzenli ve tekrarlayan bir dizilim gösterirken, amorf katılarda atomların dizilimi rastgele ve düzensizdir.



Şekil 1.1. Üç genel kristal tipinin gösterimi

Kimyasal özellikleri bakımından katı maddeler, atomlar arasındaki bağ türlerine göre sınıflandırılırlar: İyonik bağlı katılar (tuz gibi), kovalent bağlı katılar (elmas gibi), metalik bağlı katılar (bakır gibi) ve moleküler bağlı katılar (buz gibi). Her bağ türü, maddenin ergime noktası, sertlik, elektrik iletkenliği ve çözünürlük gibi özellikleri üzerinde farklı etkiler yaratır.

Termodinamik açıdan incelendiğinde, katı maddeler belirli sıcaklık ve basınç koşullarında kararlı yapılar sergilerler. Sıcaklık artışıyla atomların titreşim enerjileri artar ve belirli bir eşik değerde faz değişimi gerçekleşir. Katı maddelerin iç enerjisi, atom ve moleküllerin konumsal ve kinetik enerjilerinin toplamından oluşur. Mekanik özellikleri açısından esneklik, plastiklik, tokluk ve sertlik gibi karakteristikler gösterirler. Bu özellikler, maddenin iç yapısındaki atomların dizilimi ve bağlanma türüyle doğrudan ilişkilidir (Callister ve ark., 2020).

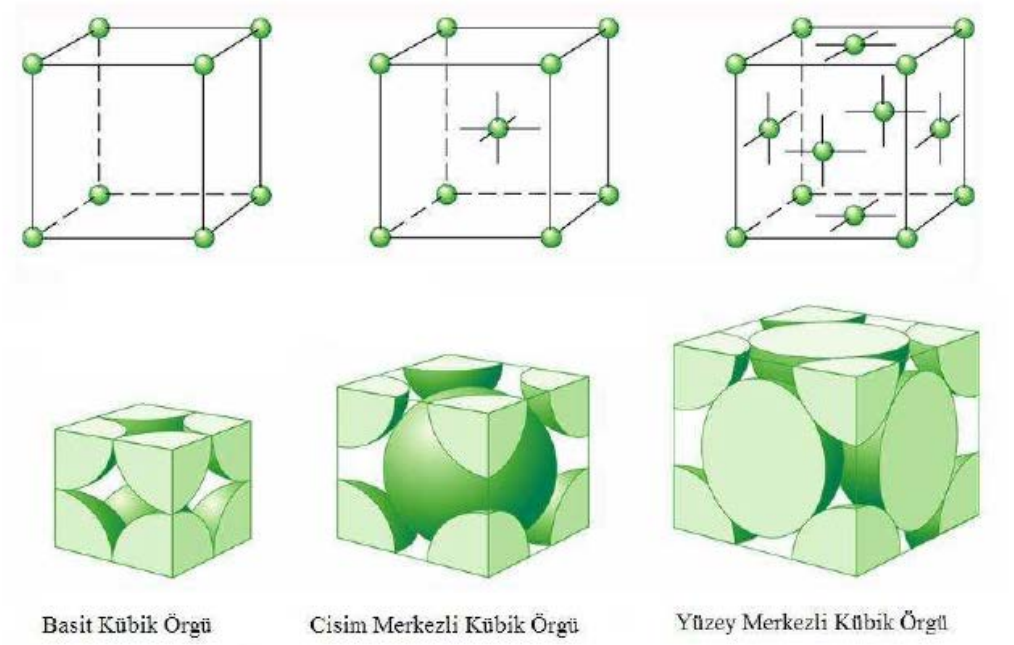
1.4. Kristalografik Yapıların Temel Birimleri

Kristalografide ilkel hücre ve birim hücre, katı maddelerin atomik yapılarını anlamamızda kritik öneme sahip iki temel kavramdır. Bu yapılar, maddelerin üç boyutlu düzenini ve fiziksel özelliklerini açıklamada bilim insanları için vazgeçilmez araçlardır. İlkel hücre, kristal yapının en

basit tekrar eden birimidir. Bu hücre, kristal yapının tüm simetri ve geometrik özelliklerini içinde barındırır. Atomların konumlarını ve dizilimlerini tanımlamada temel bir referans noktası oluşturur. Birim hücre, kristal yapının üç boyutlu uzayda tekrar eden en küçük hacimsel birimidir. Kristal yapının tamamını temsil eden ve üç boyutlu uzayda tekrarlanarak tüm kristal yapıyı oluşturan geometrik bir yapıdır (Kittel, C., 2018).

1.5. Temel Kristal Yapıları

Kristal yapılar arasında üç temel kübik örgü tipi bulunmaktadır (Şekil 1.2). Bu yapılar, yüksek simetri derecelerine sahip olup üç eksenin birbirine eş uzunlukta olması (a = b = c) ve tüm açılarının 90° olmasıyla tanımlanır. Temel yapılardan ilki, yalnızca köşe noktalarında atomların yer aldığı basit kübik (primitive) kafes yapısıdır. Bu yapıdaki atom konumları, örneğin (0,0,0), (1,0,0), (0,1,0) ve (1,1,0) gibi koordinatlarla ifade edilebilir. İkinci olarak, cisim merkezli kübik (BCC) yapıda köşe noktalarının yanı sıra kafesin merkezinde de bir atom yer alır ve bu yapı orta derecede bir paketlenme düzeni gösterir. Üçüncü yapı olan yüzey merkezli kübik (FCC) yapı ise köşe noktalarına ek olarak her yüzeyin merkezinde bir atomun bulunması ile karakterize edilir ve daha sıkı bir atom paketlenmesine sahiptir (Cullity ve ark., 1957).

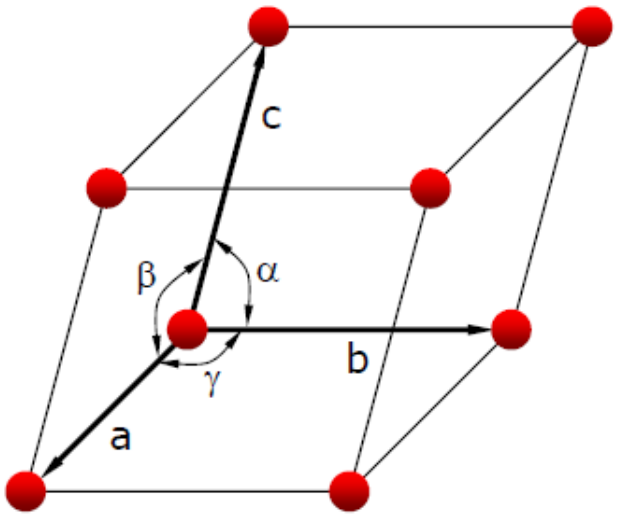


Şekil 1.2. Kübik sistemler; basit kübik, cisim merkezli kübik, yüzey merkezli kübik kristal yapıları (Sarıkurt, S., 2007)

Üç boyutlu uzayda yedi kristal sistem mevcuttur. Bu sistemlerde, atomların konumlarına göre sınıflandırılan ve farklı düzenlerde dizilen toplam on dört farklı örgü tipi, yani Bravais örgüsü tanımlanmıştır. 1780'li yıllarda kristallerin yüzeyleri ve yarılma düzlemleri üzerinde çalışan T.

Bergman ve R. Haüy, tüm kristallerin eşit paralel kenarlı tuğlaların bir duvarı oluşturması gibi düzenli bir yapı sergilediğini öne sürmüşlerdir. Bu çalışmalar sonucunda, kristallerin yedi temel kristalografik birim hücreyle tanımlanabileceği kabul edilmiştir (Aydoğan, 2011).

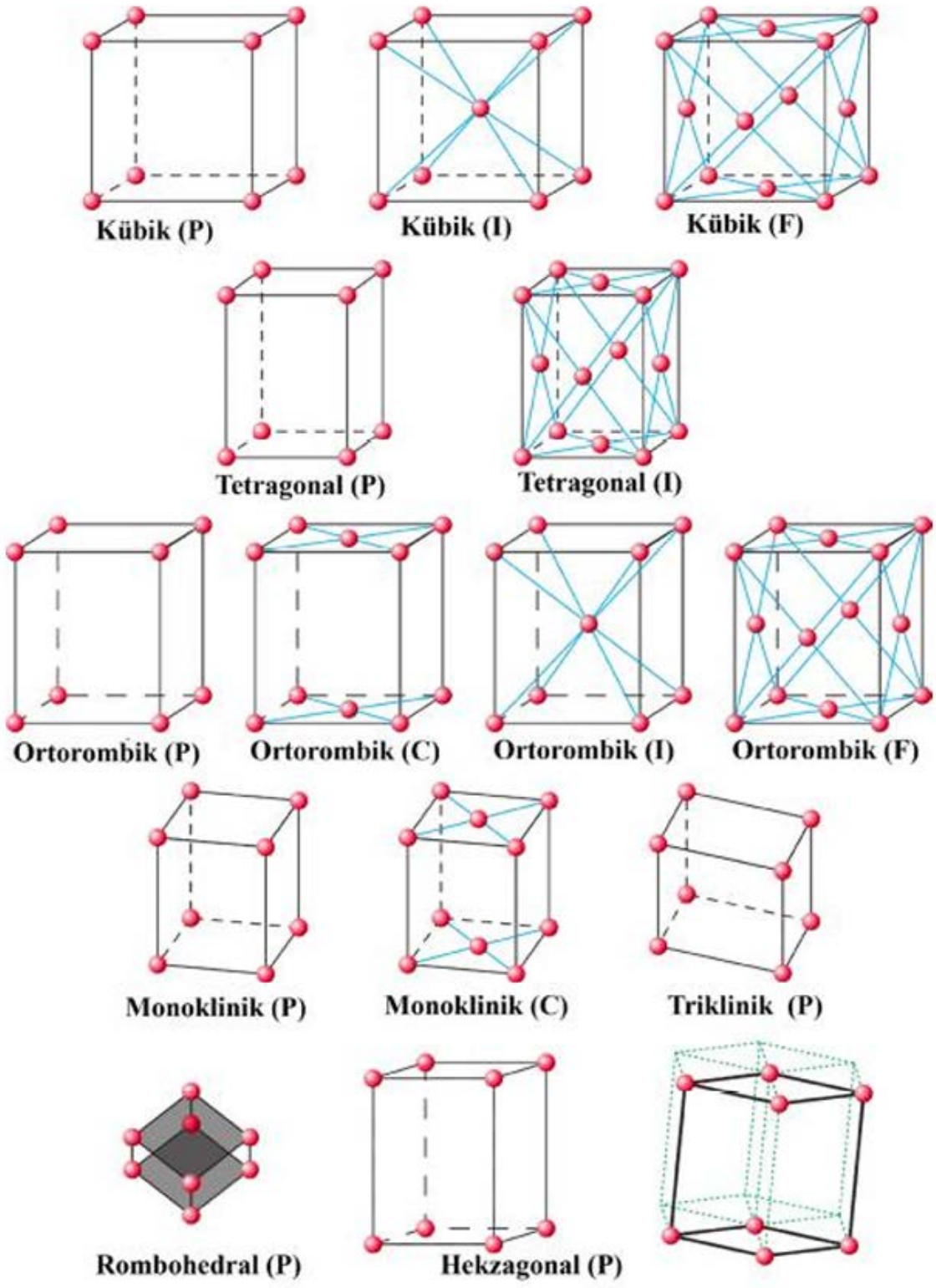
Birim hücre parametrelerinin farklı değerler alması, doğada gözlenen tüm kristalleri temsil edebilecek yedi farklı şekil ve büyüklükte birim hücrenin tanımlanmasını mümkün kılar. Bir kristal yapı, üç kenar uzunluğu (*a, b, c*) ve bu eksenler arasındaki açı değerleri (α, β, γ) ile tanımlanır. Bu parametreler Şekil 1.3'te gösterilmektedir. 1848 yılında Fransız bilim insanı Auguste Bravais, noktasal örgülerin sadece köşelerde değil aynı zamanda yüzey merkezlerinde ve hacim merkezlerinde de bulunabileceğini göstererek toplamda on dört farklı nokta örgüsünün mümkün olduğunu ispatlamıştır. Bu örgüler, literatürde Bravais örgüsü olarak adlandırılır (Hammond, 2001). Yedi kristal sistemine karşılık gelen Bravais örgüleri Çizelge 1.1'de, ilgili örgü yapı görselleri ise Şekil 1.4'te sunulmaktadır (Erken, Ö., 2015).



Şekil 1.1. Kristali tanımlamak için gerekli parametrelerin gösterildiği birim hücrenin şematik gösterimi (Erken, Ö., 2015)

Çizelge 1.1. Yedi farklı kristal sistemine ait kafes parametreleri ve aralarındaki ilişkiler.

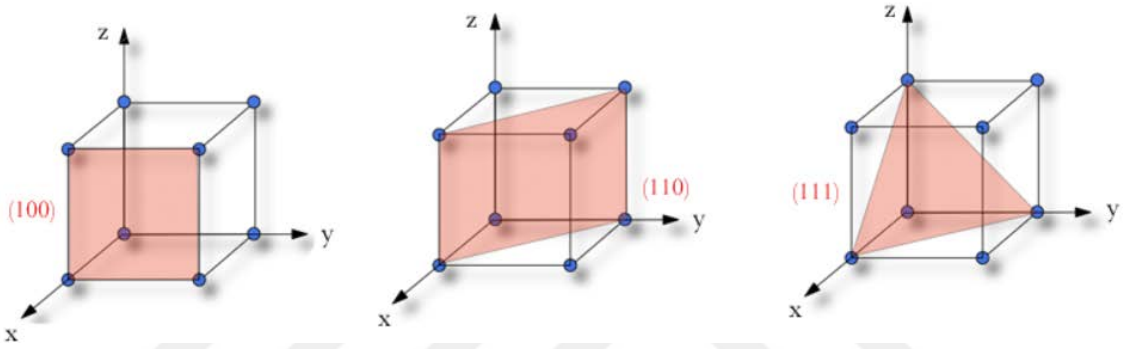
Kristal Sistemi	Kafes Kenarları Arasındaki İlişki	Eksenler Arasındaki Açı Değerleri
Kübik Kafes	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^o$
Hegzagonal Kafes	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^o, \gamma = 120^o$
Tetragonal Kafes	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^o$
Ortorombik Kafes	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^o$
Triklinik Kafes	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^o$
Mono Klinik Kafes	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^o, \beta \neq 90^o$
Rombohedral Kafes	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^o$



Şekil 1.4. Yedi kristal sistemine ait toplam 14 farklı kristal geometrisi (Özaslan, D., 2016)

1.6. Kristal Düzlemler ve Miller İndisleri

Kristalografide, kristal kafes düzlemlerinin tanımlanması ve konumlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Miller indisleri, kristal yapılardaki düzlemleri tanımlamak için kullanılan ve 1839 yılında William Henry Miller tarafından geliştirilen matematiksel bir gösterim sistemidir. Bu sistem, kristal düzlemlerinin koordinat sistemi ile kesişim noktalarının terslerinin en küçük tam sayı değerleriyle ifade edilmesine dayanmaktadır. Miller indisleri, bir kristal düzleminin x, y ve z koordinat eksenleriyle yaptığı kesişimlerin tersleri alınarak belirlenir ve (hkl) şeklinde gösterilir. Burada h, k ve l değerleri sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki kesişim noktalarının terslerinin en küçük tam sayı değerlerini temsil eder. Eğer bir düzlem herhangi bir eksenle paralel ise, o eksendeki Miller indisi sıfır olarak kabul edilir. Örneğin, (100) düzlemi x eksenini 1 birim mesafede keserken, y ve z eksenleri ile paralel olan düzlemi ifade eder. (Erken, Ö., 2015)



Şekil 1.5. Üç kafes düzlemi: (100) düzlemi, (110) düzlemi, (111) düzlemi

Kristal yapılarda, farklı Miller indislerine sahip düzlemler farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösterir. Özellikle, düşük Miller indisli düzlemler [(100), (110), (111) gibi] genellikle daha kararlı ve yoğun paketlenmiş düzlemlerdir. Bu düzlemler, malzemelerin mekanik özellikleri, optik özellikleri ve kimyasal reaktivitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Örneğin, (111) düzlemi kübik kristal sistemlerinde en yoğun paketlenmiş düzlem olup, genellikle tercihli büyüme ve kayma düzlemi olarak görev yapar. Miller indisleri ayrıca kristal yönlerini de tanımlamak için kullanılır ve [hkl] şeklinde köşeli parantez içinde gösterilir. Kristal yönleri, özellikle anizotropik malzemelerin elektriksel iletkenlik, ısıl iletkenlik ve elastik özellikleri gibi yöne bağlı özelliklerinin anlaşılmasında önemli rol oynar. Örneğin, yarıiletken teknolojisinde, silikon kristallerinin belirli kristalografik yönlerde kesilmesi ve işlenmesi, elektronik cihazların performansını doğrudan etkiler. Kristal düzlemlerinin simetrisi ve eşdeğer düzlemler de Miller indisleri ile ifade edilir. Eşdeğer düzlemler aynı kristalografik aileden gelir ve {hkl} şeklinde gösterilir. Örneğin, kübik bir kristalde {100} gösterimi, (100), (010), (001), (-100), (0-10) ve (00-1) düzlemlerinin tümünü temsil eder. Bu eşdeğer düzlemler, kristal yapının simetri operasyonları altında birbirine dönüşebilen düzlemlerdir. Modern malzeme biliminde, Miller indisleri X-ışını kırınımı, elektron mikroskobu ve diğer karakterizasyon tekniklerinde kristal yönelimlerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılır. Özellikle epitaksiyel büyütme, ince film teknolojileri ve nanoteknoloji uygulamalarında, kristal

düzlemlerinin kontrolü ve yönlendirilmesi kritik öneme sahiptir. Örneğin, yarıiletken endüstrisinde, silikon waferların belirli kristalografik düzlemlerde kesilmesi ve işlenmesi, elektronik cihazların performansını optimize etmek için gereklidir. Miller indisleri ayrıca kristal kusurları ve deformasyonların analizinde de önemli rol oynar. Dislokasyonlar, ikizlenme düzlemleri ve kayma sistemleri gibi kristal kusurları, belirli kristalografik düzlemler boyunca oluşma eğilimindedir. Bu düzlemlerin Miller indisleri ile tanımlanması, malzemelerin mekanik davranışının ve deformasyon mekanizmalarının anlaşılmasına yardımcı olur. Kristalografik tekstür analizi ve yönelim dağılımı fonksiyonları gibi ileri karakterizasyon teknikleri de Miller indislerini temel alır. Bu analizler, polikristal malzemelerdeki kristal tanelerinin tercihli yönelimlerini belirlemek ve malzeme özelliklerini optimize etmek için kullanılır. Tekstür kontrolü, özellikle manyetik malzemeler, süperiletkenler ve yapısal malzemeler gibi anizotropik özelliklere sahip malzemelerin performansını iyileştirmede kritik öneme sahiptir. (Kittel, C., 2018)

1.7. Katı Maddelerde Enerji Bandı Yapısı ve Elektriksel İletkenlik Özellikleri

Katı maddelerin elektriksel özellikleri, atomların dizilimi ve elektronların enerji durumları ile doğrudan ilişkilidir. Atomlar izole edilmiş durumda iken, elektronlar belirli enerji seviyelerine sahip ayrık yörüngelerde bulunurlar. Ancak katı maddeler oluştuğunda, atomlar birbirine yakın konumlanır ve elektronların enerji seviyeleri, komşu atomların etkisiyle değişime uğrar. Özellikle dış yörünge elektronları bu etkileşimden daha fazla etkilenir ve sonuç olarak elektronların enerjileri ayrık seviyelerden sürekli enerji bantlarına dönüşür. İzole atomlarda elektronlar, kuantum mekaniğinin öngördüğü şekilde belirli enerji seviyelerinde bulunurlar. İki atom birbirine yaklaştığında, dış yörünge elektronları birbirleriyle etkileşime girer. Bu etkileşim sonucunda, elektronların enerji seviyeleri bölünmeye başlar. Atomlar kristal yapıyı oluşturacak şekilde düzenlendiğinde, bu bölünmeler o kadar sıklaşır ki sürekli enerji bantları oluşur. İç yörünge elektronları, atom çekirdeğine daha güçlü bağlı olduklarından bu etkileşimlerden daha az etkilenir. Katı maddelerde iki temel enerji bandı yapısı bulunmaktadır. Bunlar valans ve iletim bandı olarak adlandırılır. Katı maddeleri elektrik iletkenliği açısından ele aldığımızda, yalıtkanlar, iletkenler ve yarıiletkenler olarak üç gruba ayırabiliriz. İletken maddelerde valans ve iletim bantları çakışmış hatta iç içe girmiş durumdadır. Fakat, yalıtkanlarda ve yarıiletkenlerde bu bantlar birbirinden ayrılmış durumdadır ve aralarında yasak enerji aralığı olarak adlandırılan bir enerji boşluğu bulunur (Callister ve ark, 2020).

Valans bandı, katı maddedeki en dış yörünge elektronlarının enerji seviyelerinin oluşturduğu banttır. Bu banttaki elektronlar iletim bandının altında konumlanırlar. İletim bandındaki elektronlara göre daha düşük enerjiye sahiptir. Bu elektronlar, atom çekirdeğine nispeten gevşek bağlanmıştır ve kimyasal bağların oluşumunda rol oynarlar.

İletim bandı, serbest elektronların enerji seviyelerini içeren banttır. Bu bant normal durumda genellikle boştur. Dışarıdan uygulanan enerji ile valans bandından elektronlar bu banda

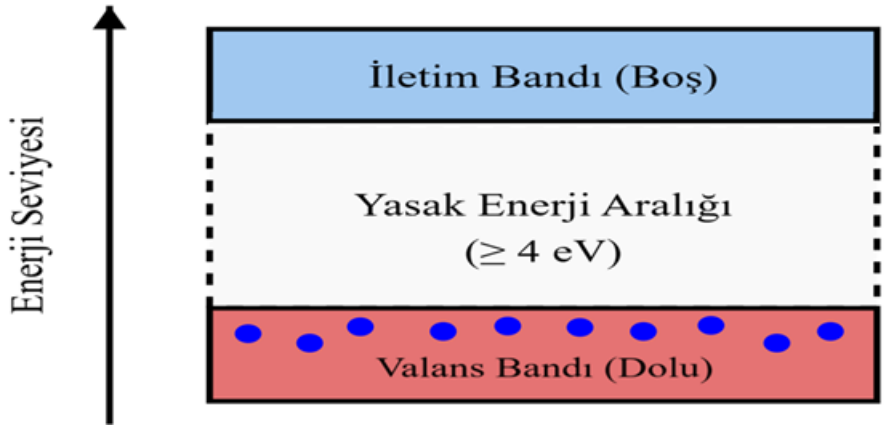
geçebilir. Böylece, bu banttaki elektronlar serbest hareket edebilir ve elektrik akımını oluşturur. Bu elektronlar atom çekirdeğine bağlı değildir.

Yalıtkanlardaki ve yarıiletkenlerdeki valans bandı ile iletim bandı arasındaki enerji farkı, yasak enerji aralığı olarak adlandırılır. Bu bölge elektronların bulunamayacağı bir enerji bölgesidir. Malzemelerin elektriksel sınıflandırmasını belirleyen temel faktördür.

1.7.1 Yalıtkan Malzemelerin Elektriksel Özellikleri ve Bant Yapısı

Günlük yaşamımızda sıkça karşılaştığımız kauçuk, ahşap, plastik ve elmas gibi maddeler, elektrik akımının iletilmesine karşı gösterdikleri direnç nedeniyle yalıtkan malzemelerdir. Yalıtkan malzemelerin en dikkat çekici özelliği, elektronlarını sıkı bir şekilde tutmalarıdır. Bu malzemelerde, dış yörünge elektronları komşu atomlarla güçlü bağlar oluşturarak valans bandını tamamen doldurur. Elektronlar bu bağlarda adeta "hapsedilmiş" durumdadır ve serbest hareket kabiliyetine sahip değildir.

Elektrik akımının oluşabilmesi için elektronların serbestçe hareket edebilmeleri gerekir. Ancak yalıtkanlarda, elektronların valans bandından iletim bandına geçmesi için aşmaları gereken enerji bariyeri çok yüksektir. Yalıtkan malzemeler için yasak enerji aralığı en az 4 eV veya daha fazladır.



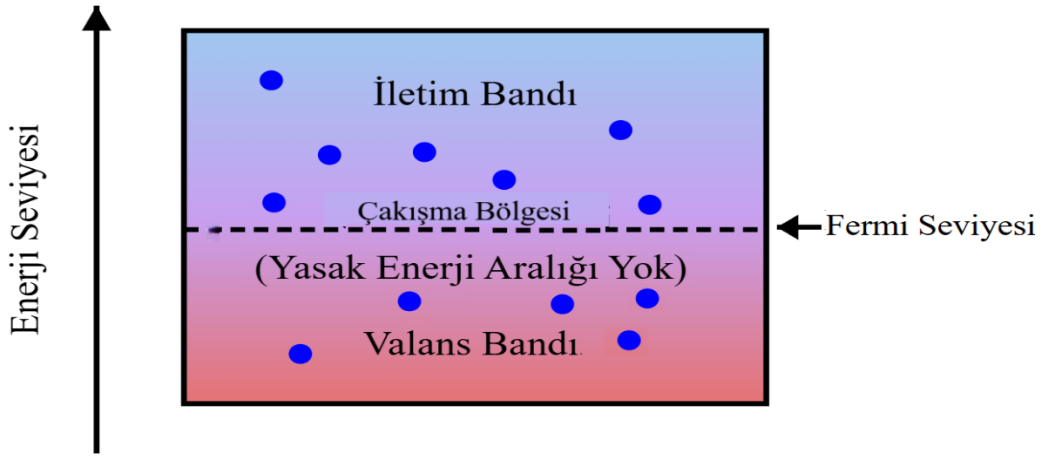
Şekil 1.6. Yalıtkan bir malzemenin enerji-bant diyagramı

Bu değer, oda sıcaklığında elektronların sahip olabileceği termal enerjiden çok daha büyüktür. Bu geniş yasak enerji aralığı, elektronların valans bandından iletim bandına geçişini engeller. Dolayısıyla iletim bandı tamamen boş kalır ve elektrik akımını taşıyacak serbest elektronlar bulunmaz. Fiziksel bir benzetme yapmak gerekirse, yalıtkanlardaki elektronlar derin bir vadide hapsolmuş gibidir. Bu vadiden çıkabilmek için, elektronların çok yüksek bir dağı aşmaları gerekir ki bu, normal koşullarda neredeyse imkansızdır. Valans bandındaki elektronlar, komşu atomlar arasında paylaşıldığından hareket özgürlükleri kısıtlanmıştır. Yalıtkan malzemelerin bu özelliği elektrik endüstrisinde hayati önem taşır. Elektrik tellerinin etrafını saran plastik

kaplamalar, elektrik akımının kontrollü bir şekilde iletilmesini sağlar. Bu sayede elektrik sadece iletken metal kablonun içinden geçer ve dışarıya sızarak tehlikeli durumlar oluşturması engellenir. Evlerimizden endüstriyel tesislere kadar birçok alanda, elektrik enerjisinin kontrollü ve güvenli bir şekilde kullanılabilmesi, büyük ölçüde yalıtkan malzemelerin bu özel bant yapısı sayesindedir. Kauçuk bir eldivenin bizi elektrik çarpmasından koruması ya da plastik kaplı kabloların güvenli bir şekilde elektrik taşıması, atomik düzeydeki bu enerji bariyerlerinin bir sonucudur.

1.7.2. İletken Malzemelerin Elektriksel Özellikleri ve Bant Yapısı

Günlük yaşamımızda sıkça kullandığımız bakır, gümüş, demir ve alüminyum gibi metaller, elektrik akımını olağanüstü kolaylıkla ileten malzemelerdir. Bu iletkenler, modern teknolojinin temel yapı taşlarını oluşturur ve elektrik enerjisinin taşınmasında kritik rol oynarlar. İletken malzemelerin en belirgin özelliği, elektronlarını oldukça gevşek bir şekilde tutmalarıdır. Metallerde, en dış yörüngedeki elektronlar (valans elektronları) atom çekirdeğine çok zayıf bir şekilde bağlıdır. Bu elektronlar, adeta "gezgin" gibi davranarak bir atomdan diğerine kolayca geçebilirler. Bu elektronlar, pozitif yüklü metal iyonlarının oluşturduğu örgü yapısı içinde serbestçe hareket edebilir. Bu yapı, elektronların herhangi bir dış elektrik alan uygulandığında kolayca yönlendirilmelerini sağlar. İletkenlerde valans bandı ve iletim bandı arasında belirgin bir ayrım yoktur. Bu iki bant birbiriyle çakışır. Başka bir deyişle, valans bandının en üst seviyesi ile iletim bandının en alt seviyesi iç içe geçmiştir.



Şekil 1.7. İletken bir malzemenin enerji-bant diyagramı

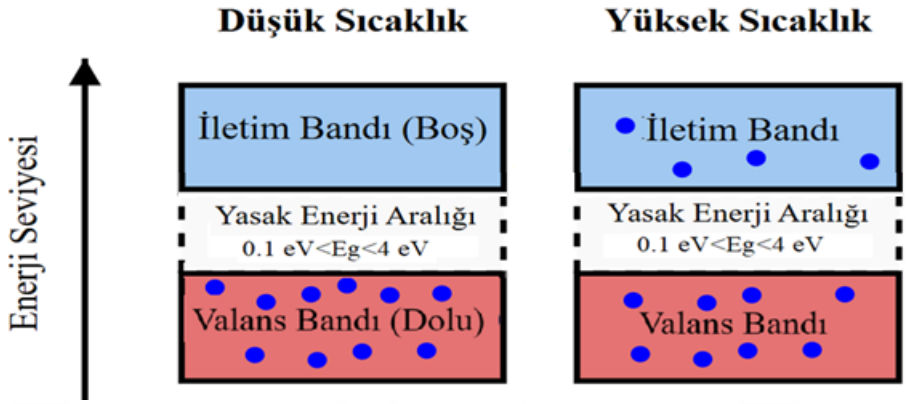
Bu durum, elektronların valans bandından iletim bandına geçiş yapmaları için ekstra enerji kazanmalarına gerek olmadığı anlamına gelir. İletkenlerde elektronlar, içinde bulundukları metalik yapıya çok zayıf bağlarla tutundukları için, çok küçük bir dış enerji uygulandığında bile hemen tepki verebilirler. Bu durum, elektrik alanı uygulandığında elektronların hızla yönlendirilmesini ve dolayısıyla akım oluşmasını sağlar. Oda sıcaklığında bile iletken metaller, valans elektronlarının bir kısmının iletim bandına geçmesi için yeterli termal enerjiye sahiptir. Sonuç olarak, herhangi bir dış

etki olmaksızın bile iletim bandında birçok serbest elektron bulunur. Bu nedenle, iletken bir malzemeye potansiyel fark uygulandığında, iletim bandındaki bu serbest elektronlar hemen hareket etmeye başlar ve elektrik akımı oluşur. İletken malzemelerde, elektronların enerji dağılımını gösteren Fermi enerji seviyesi, valans bandı ile iletim bandının örtüştüğü bölgede yer alır. Bu durum, iletkenlerde elektronların enerji bantları arasında geçiş yapabilmek için ek enerji bariyeriyle karşılaşmadıklarını gösterir. Fermi seviyesindeki elektronlar, herhangi bir aktivasyon enerjisine ihtiyaç duymadan iletim bandına katılabilir. Her ne kadar iletkenler elektriği kolayca iletse de sıfır dirence sahip değildirler (süperiletkenler hariç). Elektronlar metal örgü içinde hareket ederken, kristal örgüdeki düzensizlikler, safsızlıklar ve ısıl titreşimlerden kaynaklanan çarpışmalar nedeniyle bir miktar engellemeyle karşılaşırlar. Bu çarpışmalar, elektrik akımına karşı bir direnç oluşturur. Sıcaklık arttıkça, iletken metallerde örgü atomlarının titreşimleri de artar. Bu durum, hareket eden elektronların daha fazla çarpışma yaşamasına ve dolayısıyla direncin artmasına neden olur. Bu nedenle, sıcaklık yükseldikçe iletken metallerin direnci de artar. Bu özellik, yarıiletkenlerin davranışının tam tersidir. İletken metaller, modern teknolojinin temel yapı taşlarını oluşturur. Elektrik şebekelerindeki bakır ve alüminyum kablolar, elektronik devrelerdeki altın bağlantılar, ev aletlerindeki gümüş kontaklar elektrik enerjisinin verimli bir şekilde iletilmesini sağlar. İletken malzemelerdeki valans ve iletim bantlarının çakışması, modern teknolojinin temelini oluşturan elektrik iletimini mümkün kılar. Bu özel bant yapısı, elektronların neredeyse hiçbir engelle karşılaşmadan serbest hareket edebilmelerini sağlar. Cep telefonunuzdan ev elektrik tesisatınıza, bilgisayarınızdan elektrikli araçlara kadar modern yaşamımızın vazgeçilmez unsurları, metallerdeki bu mikroskobik elektron hareketliliği sayesinde çalışır. İletken metallerin bu özellikleri, onları elektrik enerjisinin iletilmesi ve kullanılması gereken her türlü teknolojik uygulamada vazgeçilmez kılar.

1.7.3. Yarıiletken Malzemelerin Elektriksel Özellikleri ve Bant Yapısı

Modern elektronik teknolojisinin temelinde yer alan yarıiletkenler, iletkenler ile yalıtkanlar arasında köprü görevi gören benzersiz malzemelerdir. Silisyum, germanyum ve grafit gibi yarıiletkenler, günümüz elektronik cihazlarının kalbini oluşturur ve teknolojik ilerlemenin itici gücüdür. Yarıiletkenler, elektronlarını şartlı olarak serbest bırakabilen bir karaktere sahiptirler. Bu özellik, elektronik bileşenlerin işlevlerini kontrol edebilmemizi sağlayan temel özelliktir. Elektronların bu şartlı serbestliği, yarıiletkenlerdeki valans bandı ile iletim bandı arasındaki görece küçük enerji aralığından kaynaklanır. Bu aralık, iletkenler kadar küçük olmamakla birlikte (iletkenler için 0 eV), yalıtkanlar kadar büyük de değildir (yalıtkanlar için>4 eV). Yarıiletkenlerdeki bu aralık 0,1 eV ile 4 eV arasında değişir. Yarıiletkenlerin bant yapısı, sıcaklığa bağlı olarak dinamik bir davranış sergiler. Düşük sıcaklıklarda, valans bandı elektronlarla tamamen dolu iken iletim bandı neredeyse boştur. Bu durumda, yarıiletken malzeme adeta bir yalıtkan gibi davranır, çünkü elektrik akımını taşıyacak serbest elektronlar iletim bandında bulunmaz. Ancak

sıcaklık arttıkça, yarıiletkenin karakteri değişmeye başlar. Isınan malzemede atomların titreşim enerjisi artar ve bu enerji, bazı valans elektronlarına yasak enerji aralığını aşıp iletim bandına geçmeleri için yeterli enerjiyi sağlar.



Şekil 1.8. Yarıiletken bir malzemenin enerji-bant diyagramı

Bu durum, malzemenin elektrik iletim özelliklerinin değişmesine yol açar. Yarıiletkenlerde iletkenliğin sıcaklıkla artması, diğer malzemelere kıyasla oldukça belirgin bir farklılıktır. Bu durum, sıcaklık arttıkça daha fazla elektronun termal enerji kazanarak yasak enerji aralığını aşabilmesinden kaynaklanır. Yarıiletken bir malzemeye enerji verildiğinde (ısıtma yoluyla), valans bandındaki bazı elektronlar yeterli enerji kazanır ve iletim bandına sıçrar. Bu sıçrama sonucunda, iletim bandında, elektrik akımını taşıyabilen serbest elektronlar oluşur. Valans bandında, elektronların arkasında boşluklar (holes) bırakılır. Bu boşluklar, pozitif yük taşıyıcıları gibi davranır ve elektrik akımına katkıda bulunabilir. Bu nedenle yarıiletkenlerde elektrik iletimi hem serbest elektronlar hem de boşluklar tarafından gerçekleştirilebilir. Bu ikili iletim mekanizması, modern elektronik bileşenlerin temelini oluşturur. Yarıiletkenlerin en ayırt edici özelliklerinden biri, dirençlerinin sıcaklıkla ters orantılı olarak değişmesidir. Sıcaklık arttıkça daha fazla elektron iletim bandına geçer, iletkenlik artar ve direnç azalır. Sıcaklık azaldıkça daha az elektron iletim bandında bulunur, iletkenlik azalır ve direnç artar. Yarıiletken malzemelerin bu benzersiz davranışı onları modern teknolojinin vazgeçilmez bir parçası haline getirir. Yarıiletkenler transistörler, diyotlar, entegre devreler, güneş pilleri, led'ler ve termistörler gibi parçaların üretiminde kullanılabilir.

1.7.3.1. Saf Yarıiletkenler

Kristal yapıda düzenli dizilmiş atomlardan oluşan ve doğada saf halde bulunan elementlerdir. En yaygın saf yarıiletkenler silisyum (Si) ve germanyum (Ge) elementleridir. Bu tür malzemeler, dört valans elektronuna sahip olup her bir komşu atomla kovalent bağ yaparak kristal örgü içinde dengeli bir yapı oluştururlar. Mutlak sıfır sıcaklığında tüm valans elektronları bağ yaparak hareket edemez hale gelir ve bu durumda serbest yük taşıyıcısı bulunmaz. Ancak sıcaklık

arttığında bazı kovalent bağlar kırılır, böylece elektron ve boşluk (hol) çiftleri oluşur. Bu serbest yük taşıyıcıları, elektriksel iletkenlik sağlamada temel rol oynar. Saf yarıiletkenlerin iletkenliği sıcaklıkla artar ve bu nedenle bu malzemeler sıcaklığa duyarlı elektriksel özellikler sergiler.

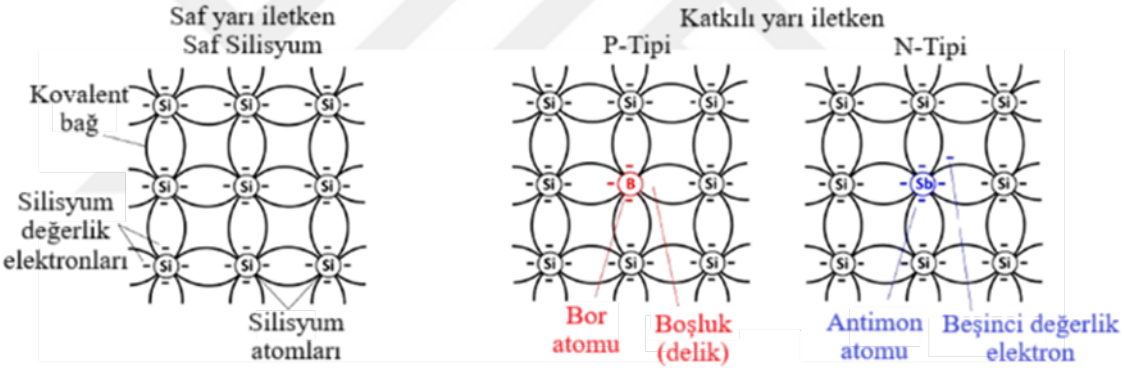
1.7.3.2.Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin belki de en önemli özelliği, katkılama (doping) yoluyla elektriksel özelliklerinin hassas bir şekilde kontrol edilebilmesidir. Saf yarıiletkenlere az miktarda farklı elementler eklenerek,

n-tipi yarıiletkenler: Fazla elektronlar içeren malzemelerdir,

p-tipi yarıiletkenler: Elektron boşlukları içeren malzemelerdir,

elde edilir. Bu katkılama işlemi, modern elektronik cihazların temelini oluşturan *p-n* eklemelerin ve transistörlerin üretilmesini mümkün kılar. Elektriksel özellikleri sıcaklık, ışık, manyetik alan gibi dış etkenlerle kontrol edilebilir. Bu kontrol edilebilirlik özelliği, yarıiletkenleri modern elektronik cihazların temelini oluşturur.



Şekil 1.9. Saf ve katkılı yarıiletkenlerin şematik gösterimi

1.7.3.3. Yarıiletkenlerde Taşıyıcı Yoğunluğu ve Fermi-Dirac Dağılımı

Bir yarıiletkenin elektriksel özelliklerinin belirlenebilmesi için, serbest yük taşıyıcıları olarak adlandırılan iletim bandındaki elektronlar ile valans bandındaki boşlukların (hollerin) yoğunluklarının bilinmesi gereklidir. Bu taşıyıcı yoğunluklarının hesaplanmasında, istatistiksel bir dağılım fonksiyonu olan Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon, belirli bir enerji seviyesinin bir elektron tarafından işgal edilme olasılığını verir ve Pauli Dışarlama İlkesi'ne uymak zorundadır. Mutlak sıfır sıcaklığında (T = 0 K), yarıiletken içindeki elektronlar enerji seviyelerini en düşük seviyeden başlayarak doldurur. Bu koşullarda, elektronların bulunduğu en yüksek enerji seviyesine Fermi enerjisi (E_f) adı verilir. Bu durum, aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT}+1} \qquad 1.1$$

Burada; E_f, Fermi enerji seviyesi, k ise Boltzmann sabitidir ve T ise mutlak sıcaklıktır. T = 0 K sıcaklığında, Fermi seviyesinin altındaki tüm enerji seviyeleri tamamen doludur; Fermi seviyesinin üzerindeki tüm seviyeler ise tamamen boştur. Bu durum, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$f(E) = \begin{cases} 1 & E < E_f \\ 0 & E > E_f \end{cases} \quad 1.2$$

Sıcaklık arttıkça (T > 0), dolu enerji seviyelerinden boş seviyelere elektron geçişleri başlar. Bu durumda, Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu sürekli bir geçiş gösterir ve Fermi seviyesindeki bir enerji düzeyi %50 olasılıkla doludur. Sıcaklık çok yüksek değerlere ulaştığında (T ≫ 0), dağılım fonksiyonu klasik Maxwell-Boltzmann istatistiğine yaklaşır. Bu durumda, Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$f(E) \approx e^{-(E-E_f)/(kT)} \quad 1.3$$

Bu yaklaşık ifade, yüksek sıcaklıklarda enerji seviyelerinin işgal olasılığının üstel olarak azaldığını göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda, enerji seviyelerinin işgal olasılığı hızla düşer ve iletim bandında serbest elektronların sayısı artar. Aynı zamanda, valans bandında da boşluklar (hole) oluşur. Bu nedenle, bir yarıiletkende sıcaklığın artması, serbest taşıyıcı yoğunluğunu artırarak elektriksel iletkenliği doğrudan etkiler. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu sayesinde, iletim bandındaki serbest elektronların ve valans bandındaki boşlukların dağılımı öngörülebilir. Bu öngörü, bir yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini hesaplamada büyük önem taşır. Serbest taşıyıcı yoğunluklarının hesaplanmasında, enerji bant yapısı dikkate alınır. Elektron yoğunluğu, iletim bandındaki dolu enerji seviyeleri üzerinden aşağıdaki integral ile hesaplanır:

$$n = \int_{E_c}^{\infty} f(E) D_c(E) dE \quad 1.4$$

Burada, D_c iletim bandı yoğunluk durumu fonksiyonunu, E_c iletim bandı taban enerjisini ve $f(E)$ Fermi-Dirac dağılım fonksiyonunu temsil etmektedir. Yaklaşık ifade ile elektron yoğunluğu şu şekilde verilir:

$$n \approx N_c e^{-(E_c-E_f)/(kT)} \quad 1.5$$

Benzer şekilde, boşluk (hole) yoğunluğu valans bandındaki boş enerji seviyeleri üzerinden aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} [1 - f(E)] D_v(E) dE \quad (1.6)$$

Bu da yaklaşık olarak:

$$p \approx N_v e^{-(E_v - E_f)/(kT)} \quad (1.7)$$

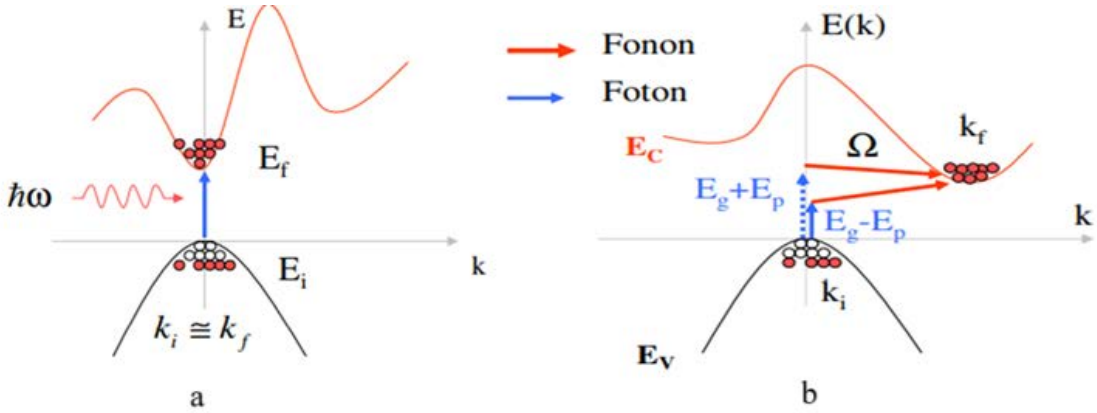
şeklinde hesaplanır. Burada N_c etkin iletim bandı yoğunluk durumu, N_v etkin valans bandı yoğunluk durumu, E_c iletim bandı tabanı enerjisi ve E_v valans bandı tavanı enerjisini temsil etmektedir. Yarıiletkenler için enerji bant aralığı $E_g = E_c - E_v$ olduğundan, saf yarıiletkenlerde $n = p = n_i$ olacak şekilde, kendi kendine oluşan taşıyıcı yoğunluğu aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \, . \, e^{-E_g/(2kT)} \quad (1.8)$$

Bu bağıntı, saf bir yarıiletkendeki kendiliğinden oluşan taşıyıcı yoğunluğunu tanımlar (Streetman ve ark., 2015).

1.7.3.4. Doğrudan ve Dolaylı Bant Aralığı

Yarıiletkenlerde bant aralığı, valans bandının en yüksek enerjili noktası ile iletim bandının en düşük enerjili noktası arasındaki enerji farkıdır. Bu enerji farkı, bir elektronun valans bandından koparak iletim bandına geçmesi için gereken minimum enerjiyi belirler. Ancak bu geçiş yalnızca enerjiyle değil, momentumun korunumu ilkesiyle de ilişkilidir. Bir yarıiletkende doğrudan bant aralığı mevcutsa, valans bandının tepe noktası ile iletim bandının tabanı aynı kristal momentum değerinde (k noktasında) yer alır. Bu durumda, bir elektronun valans bandından iletim bandına geçişi yalnızca bir fotonun enerjisiyle sağlanabilir. Fotonun momentumu çok küçük olduğundan, elektrona fazla momentum aktarmasına gerek yoktur. Bu yüzden doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerde optik geçişler daha verimli ve hızlıdır. Bu özellik, LED'ler, laser diyotlar ve diğer optoelektronik cihazlar için oldukça avantaj sağlar. Buna karşın, dolaylı bant aralığına sahip yarıiletkenlerde, valans bandının maksimum enerjili noktası ile iletim bandının minimum enerjili noktası farklı kristal momentum değerlerine sahiptir. Dolayısıyla, bir elektronun bu geçişi gerçekleştirebilmesi için yalnızca bir foton enerjisi almak yetmez, aynı zamanda momentum değişimi de gerekir. Bu momentum farkını sağlamak için fononlar (kafes titreşimleri) devreye girer. Foton ve fononun birlikte katıldığı bu geçiş daha karmaşık ve yavaştır. Bu nedenle dolaylı bant aralıklı yarıiletkenler, optik cihazlar için doğrudan bant aralıklılara kıyasla daha az tercih edilir (Streetman ve ark., 2015).



Şekil 1.10. Doğrudan (a) ve dolaylı (b) bant aralığına sahip yarıiletkenler için bantlar arası optik geçişler

1.8. Yarıiletken Malzemelerin Karakterizasyon Teknikleri

Yarıiletken malzemelerin karakterizasyonu, malzeme bilimi ve elektronik endüstrisinde kritik bir öneme sahiptir. Karakterizasyon teknikleri yapısal, morfolojik, elektronik ve optik özelliklerin belirlenmesinde temel rol oynar. Bu teknikler arasında X-ışını kırınımı (XRD) kristal yapı analizinde, Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) yüzey morfolojisinin incelenmesinde, UV-vis Spektroskopisi ise optik özelliklerin karakterizasyonunda kullanılır. Bu karakterizasyon teknikleri malzemelerin kalite kontrolünde, performans optimizasyonunda ve yeni malzeme geliştirme süreçlerinde vazgeçilmez bir role sahiptir. Bu teknikler sayesinde malzemelerin temel özellikleri anlaşılabilir ve uygulamaya yönelik optimizasyonları gerçekleştirilebilir, bu da modern elektronik endüstrisinin gelişiminde önemli bir faktör olarak karşımıza çıkar (Streetman ve ark., 2015).

1.8.1. X-ışını Kırınımı (XRD)

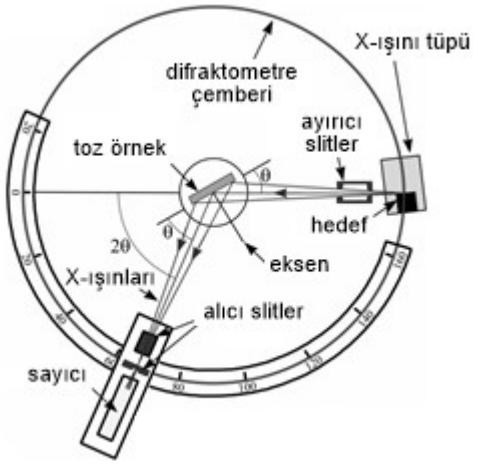
XRD, yarıiletken ince filmlerin kristal yapısını ve kristal kalitesini belirlemede kullanılan temel karakterizasyon tekniklerinden biridir. Bu teknik, Bragg yasasına dayanmaktadır.

$$n\lambda = 2dsin\theta \qquad 1.9$$

Burada, λ, X-ışınının dalga boyu, d, kristal düzlemleri arası mesafe, θ, ışının kristal düzlemi ile yaptığı geliş açısı ve n, kırınım derecesidir. Bu prensip aracılığıyla, kristal yapıların atomik düzeni ve düzlemler arası mesafeleri hesaplanabilmektedir. XRD tekniğinin tahribatsız analiz özelliği, özellikle hassas yapıya sahip yarıiletken malzemelerin incelenmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır (Waseda ve ark., 2011). Toz numunelerin ve polikristal yapıdaki malzemelerin analizinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri Debye-Scherrer tekniğidir**.** Bu teknikte kristal boyutu, aşağıdaki denklem yardımıyla tahmin edilebilir.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \qquad 1.10$$

Burada, D ortalama kristal boyutunu, K Scherrer sabitini (genellikle 0.9), λ X-ışını dalga boyunu, β *p*ikin yarı yükseklikteki tam genişliği (FWHM, radyan cinsinden), θ Bragg açısını temsil eder. Ayrıca, XRD verileri kristal örgü parametrelerini (a, b, c) belirlenmesinde de kullanılır. Bu yöntemde, numune üzerinde yönlendirilen X-ışınları kristal yapıdaki farklı düzlemlerden saçılmakta ve oluşan kırınım desenleri, belirli bir açı aralığında hareket eden dedektör yardımıyla taranarak kaydedilmektedir (Şekil 1.11). Modern difraktometre sistemlerinden elde edilen bu veriler, bilgisayar destekli yazılımlar aracılığıyla işlenmekte ve böylece incelenen malzemenin kristal yapısına ilişkin detaylı bilgiler elde edilmektedir.



Şekil 1.11. X-ışını difraktometrenin şematik gösterimi

Bu teknik, kristal yönelimi, örgü parametreleri ve kristal kalitesi gibi temel özelliklerin yanı sıra, dislokasyon yoğunluğu ve mozaik yapı gibi detaylı kristal kusur analizlerine de olanak tanımaktadır. Debye-Scherrer yöntemi, özellikle nanokristal malzemelerin ve ince filmlerin kristal boyutu ile örgü gerilmelerinin belirlenmesinde etkili sonuçlar vermektedir. Bu özellikleriyle XRD, yarıiletken teknolojisinin gelişiminde ve kalite kontrol süreçlerinde vazgeçilmez bir karakterizasyon aracı haline gelmiştir. Tekniğin sağladığı detaylı yapısal bilgiler, yarıiletken cihazların performansının optimize edilmesinde ve yeni nesil elektronik malzemelerin geliştirilmesinde temel bir rol oynamaktadır. XRD analizinde kristal yapının belirlenmesi, sistematik bir yaklaşım gerektirmektedir. Bir malzemenin kristal yapısının belirlenmesi, ister yığın halinde, isterse ince film formunda olsun, üç temel aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk adım, birim hücrenin şekli ve boyutunun belirlenmesidir. Bu aşamada, kırınım desenindeki çizgilerin açısal pozisyonları analiz edilerek yedi kristal sisteminden hangisine ait olduğuna dair bir varsayım yapılır. "Kalıbın indekslenmesi" olarak adlandırılan bu süreçte, her bir yansıma için Miller indeksleri atanır ve bu işlem ancak doğru kristal sisteminin seçilmesiyle başarılı olur (Hammond, 2015). İkinci aşamada, birim hücre başına düşen atom sayısı, belirlenen birim hücre şekli ve boyutu kullanılarak hesaplanır. Son aşamada ise, atomların birim hücre içindeki kesin konumları, kırınım

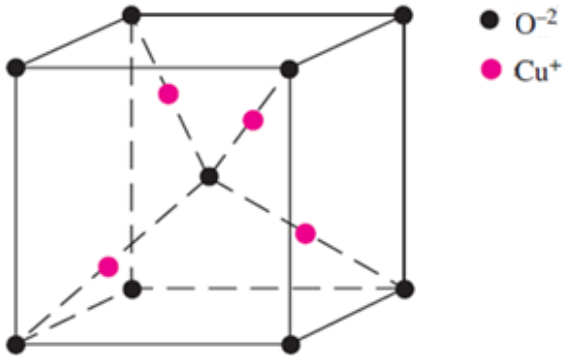
çizgilerinin göreceli yoğunlukları analiz edilerek belirlenir. Bu sistematik yaklaşım, kristal yapının tam olarak karakterize edilmesine ve malzemenin yapısal özelliklerinin detaylı biçimde anlaşılmasına olanak sağlamaktadır (Cullity, 1957).

1.8.2. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM)

Yarıiletken ince filmlerin yüzey morfolojisi ve mikro yapısal özelliklerinin yüksek çözünürlüklü analizinde kullanılan ileri bir karakterizasyon tekniği olan Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM), sağladığı üstün görüntüleme özellikleri sayesinde öne çıkmaktadır. FE-SEM'in alan emisyon tabanlı elektron kaynağı, geleneksel Taramalı Elektron Mikroskopları (SEM) ile karşılaştırıldığında daha yüksek parlaklık ve daha düşük enerji dağılımı sunmaktadır. Bu avantaj, özellikle ince film yapıların nanometre ölçeğindeki detaylarının görüntülenmesinde büyük katkı sağlamaktadır. FE-SEM analizi sırasında, yüksek enerjili bir elektron demeti numunenin yüzeyini taramakta ve yüzeyden yayılan ikincil elektronlar ile geri saçılan elektronlar toplanarak yüzey topografyasına ilişkin detaylı bilgiler elde edilmektedir. FE-SEM'in düşük hızlandırma voltajlarında çalışabilme yeteneği, iletken olmayan ince film numunelerinin bile minimum yüzey şarj birikimiyle incelenmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, modern FE-SEM sistemlerine entegre edilen enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) detektörleri sayesinde, yalnızca yüzey morfolojisi değil, aynı zamanda yüzeyin elementel kompozisyonu da analiz edilebilmektedir. Bu özellikleri sayesinde FE-SEM, yarıiletken teknolojisinde; güneş pilleri, mikroelektronik devreler ve optoelektronik cihazlar gibi ileri teknoloji uygulamalarında kullanılan ince filmlerin karakterizasyonunda vazgeçilmez bir analiz aracı haline gelmiştir (Reimer, 2000).

1.9. Cu_2O Yarıiletken Özellikleri ve Uygulamaları

Cu_2O (Kuprit), doğal olarak oluşabilen ve laboratuvar ortamında sentezlenebilen *p*-tipi bir yarıiletken malzemedir. Kristal yapısı kübik sistem olup, uzay grubu Pn3m'dir. Bakır atomları yüzey merkezli kübik (fcc) yapıda düzenlenirken, oksijen atomları bakır atomlarının oluşturduğu tetrahedrallerin merkezinde yer alır. (Şekil 1.10) Cu_2O'nun en dikkat çekici özelliklerinden biri, 2,0-2,2 eV aralığında değişen direkt bant aralığına sahip olmasıdır. Bu bant aralığı değeri, görünür ışık spektrumunda absorpsiyon yapmasına olanak sağlar ve bu özellik fotovoltaik uygulamalar için ideal bir aralıktır. Valans bandı başlıca Cu 3*d* ve O 2*p* orbitallerinin hibridizasyonundan oluşurken, iletim bandı esas olarak Cu 4*s* orbitallerinden oluşur. Cu_2O'da *p*-tipi iletkenlik, kristal yapıdaki bakır boşluklarından kaynaklanır.



Şekil 1.12. Cu_2O'nun kristal yapısı (Yu ve ark., 2010)

Bu boşluklar, kristal yapıda doğal olarak oluşan kusurlar olup, elektronik yapıda akseptör seviyeleri oluşturur. Bakır boşlukları, valans bandının üzerinde yaklaşık 0,4 eV enerji seviyesinde yerleşir ve oda sıcaklığında hole (boşluk) taşıyıcılarının oluşmasına neden olur. Cu_2O'nun uygulama alanları, malzemenin benzersiz elektronik ve optik özelliklerinden kaynaklanan geniş bir yelpazede dağılım göstermektedir. Fotovoltaik uygulamalarda, özellikle heterokavşak yapılı güneş pillerinde tercih edilen Cu_2O, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde etkin rol oynamaktadır. Fotoelektrokimyasal hücreler ve su ayırma sistemlerinde de yaygın kullanım alanı bulan bu malzeme, sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir potansiyele sahiptir. Cu_2O'nun bir diğer önemli uygulama alanı gaz sensörleri teknolojisidir. NO_x ve CO gibi zararlı gazların tespitinde yüksek hassasiyet gösteren Cu_2O bazlı sensörler, aynı zamanda nem sensörleri ve seçici gaz algılama sistemlerinde de kullanılmaktadır. Bu sensörlerin çalışma prensibi, Cu_2O'nun gaz molekülleriyle etkileşimi sonucu elektronik özelliklerinde meydana gelen değişimlere dayanmaktadır. Katalitik uygulamalar, Cu_2O'nun üçüncü önemli kullanım alanını oluşturmaktadır. Fotokatalitik su ayırma yöntemlerinde, organik kirleticilerin parçalanmasında ve CO_2 indirgeme reaksiyonlarında etkin bir katalizör görevi gören Cu_2O, çevre teknolojilerinde giderek artan bir öneme sahiptir. Bu uygulamalarda Cu_2O'nun yüksek yüzey aktivitesi ve uygun bant aralığı, fotokatalitik reaksiyonların verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Cu_2O'nun endüstriyel ve teknolojik uygulamalardaki tercih edilirliğini artıran birçok avantajı bulunmaktadır. Düşük maliyet ve doğada bol miktarda bulunması, ekonomik açıdan sürdürülebilir uygulamalar için ideal bir seçenek olmasını sağlar. Çevre dostu yapısı ve kolay işlenebilirlik özelliği, yeşil teknolojiler için uygunluğunu pekiştirmektedir. Yüksek optik soğurma katsayısı ise özellikle fotovoltaik uygulamalarda önemli bir avantaj sağlamaktadır.

1.10. İnce Film Teknolojisinin Önemi

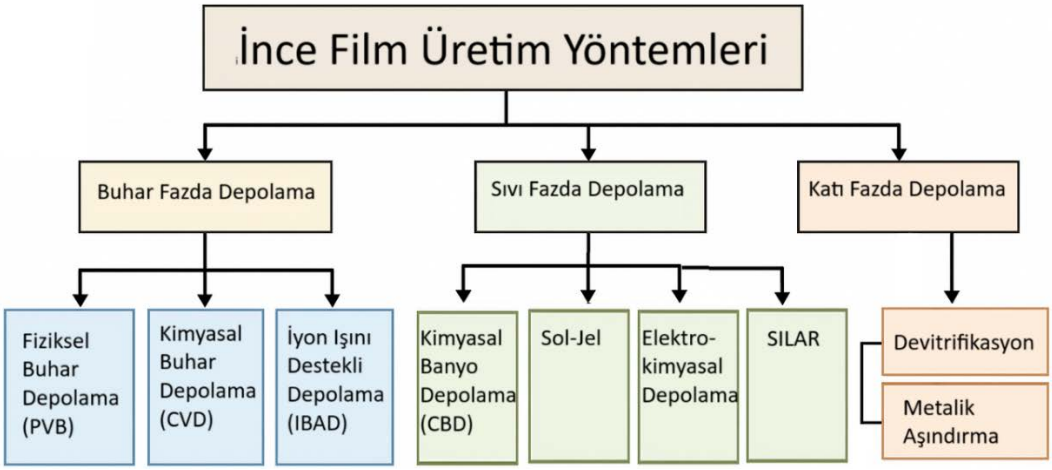
Elektronik ve malzeme bilimi alanında, düşük maliyetli ve yüksek verimli fotoelektrokimyasal (PEC) enerji dönüşüm cihazlarının geliştirilmesi küresel araştırmacıların temel hedeflerindendir. İnce film teknolojisi, katıhal elektroniği, optik, manyetizma, kaplama, süperkapasitör ve fotovoltaik sistemler gibi çeşitli alanlarda devrim niteliğinde uygulamalara

olanak sağlamaktadır. Dökme malzemelere kıyasla, ince filmler, düşük malzeme tüketimi, kolay işlenebilirlik, esnek alt taban kullanımı gibi önemli avantajlar sağlamaktadır.

1.10.1. İnce Film Depolama Yöntemleri

İnce film depolama yöntemleri buhar, sıvı ve katı olarak üç ana kategoride sınıflandırılabilir. Buhar fazda depolama yöntemlerine, fiziksel buhar depolama, kimyasal buhar depolama ve iyon ışını destekli depolama, sıvı fazda depolama yöntemlerine kimyasal banyo depolama, sol-jel, elektro-kimyasal depolama ve ardışık iyonik tabaka adsorpsiyon ve reaksiyon (SILAR), katı fazda depolama yöntemlerine devitrifikasyon ve metalik aşındırma örnek olarak sıralanabilir (Çizelge 1.2). Bu ince film depolama yöntemleri arasında, SILAR yöntemi nispeten basittir ve diğer pahalı ince film depolama yöntemlerine göre çeşitli avantajlar sunar. SILAR yöntemi ile film kalınlığı, kaplama döngüleri ile kolaylıkla ayarlanabilir, geniş bir aralıkta homojen kaplamalar üretilebilir, farklı boyut ve profillerdeki alt tabanlara uygulanabilir, alt taban kullanımında özel gereksinimler yoktur, vakum gerektirmez, pahalı ekipmana ihtiyaç duymaz, endüstriyel ölçekte kolay bir şekilde uygulanabilir, minimum enerji tüketimi ve düşük sıcaklıkta depolama sağlanabilir.

Çizelge 1.2. İnce film Üretim Yöntemleri



1.10.2. SILAR Yöntemi

SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction), ince film teknolojisinde son yıllarda öne çıkan önemli bir teknik olarak dikkat çekmektedir. Bu yöntem, ilk olarak 1985 yılında Ristov ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve daha sonra Nicolau ile Menard tarafından isimlendirilmiştir (Ristov ve ark., 1985; Nicolau ve ark., 1988). Kimyasal Banyo Depolama (CBD) yönteminin geliştirilmiş bir versiyonu olarak kabul edilen SILAR, metaller, yarıiletkenler, seramikler, süper iletkenler ve iletken polimerler gibi çeşitli malzemelerin ince film formunda hazırlanmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. SILAR yönteminin temelinde, iyonların

çözeltilerden adsorpsiyonu ve ardından yüzeyde gerçekleştirdiği reaksiyon yatmaktadır. Bu işlem, dört temel adımdan oluşur: adsorpsiyon, ilk durulama, reaksiyon ve ikinci durulama. Döngüsel bir şekilde tekrarlanan bu işlemler sayesinde, istenen kalınlıkta ve özelliklerde ince filmler elde edilebilmektedir (Pathan ve ark., 2004). Yöntemin en önemli avantajlarından biri, düşük sıcaklıklarda çalışabilmesidir. Bu özellik, difüzyon, kontaminasyon ve dopant dağılımı gibi yüksek sıcaklık etkilerini önlemekte ve aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca, film büyüme oranı adsorpsiyon ve reaksiyon süresi değiştirilerek kolayca kontrol edilebilmektedir. SILAR yönteminin bilimsel literatürde ve teknolojik uygulamalarda giderek artan bir öneme sahip olmasının çeşitli nedenleri bulunmaktadır. Yöntem, geniş uygulama alanı sayesinde I-VI, II-VI, III-VI, V-VI, VIII-VI ikili bileşikler ve I-III-VI, II-II-VI, II-III-VI, II-VI-VI ve II-V-VI üçlü kalkojenitler gibi çeşitli bileşiklerin ince filmlerinin hazırlanmasında kullanılabilmektedir. Bunun yanı sıra, çözeltinin sıcaklığı, alt tabanın yapısı, pH değeri, çözelti konsantrasyonu, daldırma ve durulama süresi gibi parametreler değiştirilerek film kalınlığı ve morfolojisi üzerinde hassas kontrol sağlanabilmektedir. SILAR yöntemi, pahalı ekipman ve vakum sistemleri gerektirmemektedir. Ayrıca, CBD yönteminden farklı olarak çözeltide çökelti oluşmaması, malzeme maliyetini düşürmektedir (Pathan ve ark., 2004). Farklı geometrilere sahip alt tabakalarda bile nispeten homojen ve tek biçimli filmler elde edilebilmektedir. SILAR yöntemiyle ince film üretiminde, çeşitli parametrelerin kontrol edilmesi film kalitesini ve özelliklerini belirlemekte önemli rol oynamaktadır. Bileşik konsantrasyonundaki artış daha kalın filmler elde edilmesini sağlarken, belirli bir eşik değerin üzerinde reaksiyon hızının artması film kalınlığını azaltabilmektedir. Adsorpsiyon ve reaksiyon süreleri, film oluşumunda kritik bir rol oynar. Adsorpsiyon süresinin reaksiyon süresinden daha uzun olması, daha yüksek terminal kalınlık sağlar; eşit süreler ise daha tutarlı ve düzgün film oluşumuna katkıda bulunur. Yeterli durulama süresi, gevşek bağlı atomların ve moleküllerin uzaklaştırılmasını sağlayarak kaliteli film oluşumuna yardımcı olur. Yüksek sıcaklıklar, atomların veya moleküllerin ayrışmasını artırarak daha yüksek depolama oranlarına neden olur. Metal iyonlarının salınımı ve adsorpsiyonu, kompleksleştirici maddeler kullanılarak kontrol edilebilir; bu da büyüme kinetiğini etkileyebilir. Sonuç olarak, SILAR yöntemi, basit yapısı, düşük maliyeti ve sunduğu kontrol imkanları sayesinde ince film teknolojisinde önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Özellikle yarıiletkenler, oksitler ve polimerler gibi farklı malzeme sınıflarının hazırlanmasında kullanılabilmesi yöntemin çok yönlülüğünü göstermektedir. Gelecekte, nanoteknoloji ve malzeme bilimindeki ilerlemelerle birlikte, SILAR yönteminin daha da geliştirilmesi ve optimizasyonu mümkün olabilir. Bu sayede, elektronik, optoelektronik, güneş pilleri ve sensör teknolojileri gibi alanlarda yeni ve gelişmiş uygulamalar için daha uygun zemin hazırlanabilecektir (Pathan ve ark., 2004).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR:

Bu çalışmada, farklı alt tabanlar üzerinde daldırma kaplama yöntemiyle hazırlanan bakır oksit (CuO) ince filmleri incelenmiştir. Kullanılan alt tabanlar cam, indiyum katkılı kalay oksit (ITO), silikon ve polimerden oluşmaktadır. Film kalınlıkları yüzey profilometresiyle tahmin edilmiş ve 520–640 nm aralığında olduğu belirlenmiştir. Daldırma kaplamalı filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve topografik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. CuO filmlerinin yapısal özellikleri, X-ışını kırınımı (XRD) analizleriyle değerlendirilmiştir. Elde edilen XRD desenleri, kaplanan filmlerin baskın olarak (111) kristalografik düzlem yönelimli, polikristalin ve monoklinik yapıda olduğunu göstermiştir. Tercihli yönelimlere ilişkin kristalit boyutu (D), dislokasyon yoğunluğu (δ), mikro gerinim (ε) ve istiflenme hatası olasılığı (α) gibi mikro yapısal parametreler hesaplanmış ve ayrıntılı şekilde tartışılmıştır. Yüzey morfolojisi ve elementel bileşim sırasıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile karakterize edilmiştir. Morfolojik analizler, cam alt taban üzerinde hazırlanan filmlerin tüm yüzeyi kaplayan nano-levha biçimindeki tanelerden oluşan düzgün bir morfolojiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. CuO filmlerinin optik özellikleri, UV-vis-NIR dalga boyu aralığında yapılan geçirgenlik ölçümleri ve doğrusal soğurma katsayısı analizleriyle belirlenmiştir. Bant aralığı Tauc diyagramı kullanılarak hesaplanmış ve cam alt taban üzerinde 1,08 eV olarak bulunmuştur. Ayrıca, optik iletkenlik (σ), ortalama uyarılma enerjisi (E_o), osilatör kuvveti (E_d), etkin kütle (m), plazma frekansı (ω_p), statik dielektrik sabiti (ε_1) ve taşıyıcı yoğunluğu (N) gibi optik sabitler, film geçirgenlik spektrumuna dayalı geliştirilmiş yaklaşık bir algoritma aracılığıyla tahmin edilmiştir. Sonuç olarak, farklı alt tabanların CuO ince filmlerinin yapısal, yüzeysel, optik ve morfolojik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur **(**Dhanasekaran, V. ve ark., 2012**)**.

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmleri, dalga benzeri yüzey özelliklerine sahip kompakt nanoparçacıklar formunda, basit ve maliyet etkin bir elektrodepozisyon yöntemiyle sentezlenmiştir. Kontrollü elektrodepozisyon parametreleri sayesinde, iyi hizalanmış kristal yönelimleri ve belirgin yüzey morfolojileri elde edilmiştir. Yüksek çözünürlüklü atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve pik kuvvet AFM görüntüleri, Cu_2O nanoyapılı filmlerin nanomekanik ve kimyasal özelliklerini detaylı biçimde haritalamıştır. As-depoze edilen ince filmlerin yapısal, optik ve bileşimsel analizleri, bulk Cu_2O malzemesinin karakteristik özelliklerini göstermektedir. Elektrodepozisyon yöntemi, ortam koşullarında kesintisiz şekilde uygulanabilir olup, dalga benzeri morfolojiye sahip Cu_2O ince filmlerin üretimi için kolay ve ekonomik bir yöntem sunmaktadır. Fotolüminesans yaşam süresi ölçümleri, Cu_2O filmleri için 0,8–1,3 ns gibi oldukça kısa değerler ortaya koymuştur. Mott-Schottky analizleri, filmlerin *p*-tipi iletkenliğe sahip olduğunu ve taşıyıcı yoğunluğunun yaklaşık 2×10^{18} cm^{-3} seviyesinde olduğunu göstermiştir. Gözlenen fotolüminesans yaşam süreleri ile taşıyıcı yoğunlukları, Cu_2O filmlerinin güneş hücreleri ve su ayrıştırma sistemleri gibi uygulamalarda

verimli delik iletkeni ve fotoelektrot materyali olarak kullanılabileceğini desteklemektedir (Hossain ve ark., 2017).

Bu çalışmada, kurşun (Pb) içeren ve içermeyen CuO nanoyapıları, Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyon (SILAR) yöntemiyle sentezlenmiştir. Elde edilen filmler; taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX), X-ışını kırınımı (XRD) ve ultraviyole-görünür (UV-vis) spektrofotometresi kullanılarak karakterize edilmiştir. SEM analizleri, Pb konsantrasyonunun artmasıyla birlikte film morfolojisinin, levha benzeri yapıdan mercan benzeri nanoyapılara dönüştüğünü ortaya koymuştur. XRD desenleri, filmlerin monoklinik kristal yapıda olduğunu ve (111) ile ($\bar{1}\bar{1}1$) düzlemlerine yönelik tercihli yönelim sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, UV-vis analizleri Pb katkılamasının CuO filmlerinin optik bant aralığını etkilediğini ortaya koymuştur (Bayansal ve ark., 2015).

Nanokristalin bakır oksit (Cu_2O) ince filmleri, amorf cam alt taban üzerinde, oda sıcaklığında uygulanan basit bir kimyasal yöntem olan kimyasal banyo biriktirme (CBD) yöntemiyle sentezlenmiştir. Biriktirme kinetiği, düzgün kalınlığa ve yüksek kalitede nanokristalin yapıya sahip filmlerin elde edilmesinde kritik bir rol oynamıştır. Filmlerin yapısal, yüzey morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Kristalleşme ve büyüme süreçleri sonucunda, küçük nanoparçacıkların topaklanması ile mikroküresel biçimde Cu_2O taneleri oluşmuştur. Optik ve elektriksel karakterizasyon çalışmaları, filmlerin optik bant aralığını ve elektriksel iletkenlik türünü belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir (Ahirrao ve ark., 2011).

CdO ve Cu_2O ince filmleri, kimyasal bir depozisyon yöntemi kullanılarak cam alt tabanlar üzerinde büyütülmüştür. CdO ve Cu_2O ince filmlerinin optik geçirgenlikleri, oda sıcaklığında 400–900 nm dalga boyu aralığında sırasıyla %60–70 ve %3–8 olarak ölçülmüştür. Optik iletim eğrilerinden hesaplanan bant aralıkları, CdO için 2,3 eV ve Cu_2O için 2,1 eV olarak belirlenmiştir. X-ışını kırınım (XRD) analizleri, her iki filmin de polikristalin yapıda olduğunu ortaya koymuştur. Van der Pauw yöntemiyle yapılan elektriksel ölçümler sonucunda, CdO filmlerinin özgül direnç değerleri 10^2–10^3 Ω·cm, Cu_2O filmlerinin ise yaklaşık 10^3 Ω·cm olarak tespit edilmiştir. CdO/Cu_2O hetero eklemli güneş pilleri, bu iki tip ince film kullanılarak üretilmiştir. Gümüş macun kontaklar aracılığıyla yapılan elektriksel karakterizasyon sonucunda, açık devre gerilimleri 1–8 mV ve kısa devre akımları 1–4 μA arasında ölçülmüştür (Hameş ve ark., 2004).

Bakır oksit ince filmleri, metanol çözeltisi içerisinde çözünen bakır klorür ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$) kullanılarak, sol-jel benzeri bir daldırma tekniğiyle ve farklı pişirme sıcaklıklarında hazırlanmıştır. X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, filmlerin 360 °C'de pişirildiğinde Cu_2O fazında, 400–500 °C sıcaklıklarında pişirildiğinde ise CuO fazında oluştuğunu doğrulamaktadır. Optik absorbsiyon ölçümlerinden elde edilen doğrudan bant aralığı değerleri, Cu_2O filmleri için 2,10 eV ve CuO filmleri için 1,90 eV olarak hesaplanmıştır (Ray, 2001).

Bu çalışmada, Cu_2O ve CuO yapıları, titanyum alt tabanlar üzerinde elektrolitik olarak kaplanan bakır (Cu) tabakalarının termal oksidasyonu yoluyla hazırlanmıştır. Tavlama sıcaklığının

(200 ^{o}C–600 ^{o}C aralığında) Cu_2O ve CuO yapıların morfolojisi, kristal yapısı ve fotokatalitik aktiviteleri üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Hazırlanan fotokatalizörler, X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) teknikleri ile karakterize edilmiştir. Örneklerin fotokatalitik aktiviteleri, UV ışığı altında metilen mavisi (MB) çözeltisinin bozunma davranışı üzerinden değerlendirilmiştir. Spektroskopik analizler UV-vis spektrofotometresi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, farklı tavlama sıcaklıklarının örneklerin mikroyapısı ve yüzey morfolojisi üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermiştir. 500 ^{o}C'de tavlanan örnek, en yüksek fotokatalitik aktiviteyi sergilemiştir. Bu sonuçlar, iğne benzeri yüzey morfolojisi ile faz yapısının, Cu_2O/CuO yapıların fotokatalitik performansını artırmada önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur (Yurddaskal ve ark., 2016).

Bu çalışmada, Cu_2O malzemesi, güneş pili uygulamaları için bir foton emici olarak incelenmiştir. Cu_2O, elektrokimyasal çöktürme (ECD) yöntemiyle bir TiO_2 filmi üzerinde çöktürülmüştür. Yapılan gözlemler, Cu_2O parçacıklarının TiO_2 filmine nüfuz ettiğini ve esas olarak TiO_2 alt taban arayüzüne yakın bölgelerde biriktiğini, TiO_2 yüzeyinde ise sınırlı bir çökelme gözlendiğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, *p-n* tipi hacimsel heteroeklem arayüzü oluşturmanın potansiyel bir yöntemi olarak değerlendirilmektedir. X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, elde edilen yapının Cu_2O/TiO_2kompozit film olduğunu doğrulamıştır. Üst elektrot, I–V karakterizasyon ölçümleri amacıyla indiyum buharlaştırılarak uygulanmıştır ve elde edilen güneş hücresi fotovoltaik özellikler göstermiştir (Zainun ve ark., 2012).

Bu çalışmada, sakkarin katkı maddesi içeren alkali çözeltilerden nanoyapılı CuO ince filmler üretilmiştir. Film örneklerinin faz yapısı, kristallenme durumu ve ortalama kristalit boyutu, X-ışını kırınımı (XRD) analizleri ile belirlenmiştir. XRD sonuçları, elde edilen filmlerin monoklinik fazda ve polikristal yapı özellikleri gösterdiğini ortaya koymuştur. Ortalama kristalit boyutları, ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile değerlendirilmiş; SEM görüntüleri, filmlerin yaklaşık 25 nm kalınlığında tabaka benzeri nanoyapılardan oluştuğunu göstermiştir. Bununla birlikte, büyüme banyosundaki sakkarin konsantrasyonunun filmlerin optik geçirgenlik ve bant aralığı üzerindeki etkisi, UV-vis spektrofotometre analizleriyle incelenmiştir. Elde edilen UV-vis spektrumları, sakkarin konsantrasyonundaki artışın filmlerin hem optik bant aralığını hem de geçirgenlik özelliklerini anlamlı düzeyde etkilediğini göstermiştir (Bayansal ve ark., 2013).

Cu_2O ince filmleri, polietilen glikol ve etilen glikol gibi farklı katkı maddeleri kullanılarak, sol-jel spin kaplama yöntemiyle indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam alt taban üzerinde biriktirilmiştir. Eklenen organik katkı maddelerinin Cu_2O filmlerinin oluşumu üzerinde önemli etkiler gösterdiği ve farklı mikro yapılar ile optik özelliklerin ortaya çıktığı belirlenmiştir. Filmler; X-ışını kırınımı (XRD), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve ultraviyole-görünür bölge (UV-vis) spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. FE-SEM mikrografları, polietilen glikol katkısıyla elde edilen filmlerin düzensiz şekilli ve yaklaşık 83 nm boyutlarında tanelerden oluştuğunu göstermiştir. En yüksek optik soğurma, polietilen glikol katkısı ile hazırlanan filmlerde

gözlenmiştir. Hazırlanan Cu_2O ince filmleri, fotoelektrokimyasal güneş hücrelerinde (PESC) çalışma elektrodu olarak kullanılmıştır (Halin ve ark., 2008).

Bu çalışmada, elektrodepozisyon yöntemi kullanılarak indiyum kalay oksit (ITO) kaplı alt tabanlar üzerinde Cu_2O ince filmleri hazırlanmıştır. Elektrodepozisyon banyosunun sıcaklığı 40 ^oC ile 80 ^oC arasında kontrol edilmiş, katkı maddesi (KCl) konsantrasyonu ise 2 mM ile 10 mM arasında değiştirilmiştir. Hazırlanan ince filmlerin yapısal, yüzey morfolojik ve optik özellikleri; X-ışını kırınımı (XRD), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM), Raman spektroskopisi ve UV-vis spektrofotometresi ile karakterize edilmiştir. Cu_2O ince filmlerinin yüzey morfolojisinin, banyo sıcaklığı ve katkı maddesi konsantrasyonuna bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir. Raman spektroskopisi sonuçlarına göre, KCl konsantrasyonundaki artışla birlikte Raman piklerinin yoğunluğu da artmıştır. UV-vis absorpsiyon spektrumları, 80 ^oC'de elde edilen filmlerin ortalama absorpsiyonunun, 40 ^oC ve 60 ^oC'de elde edilen filmlere göre daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde, 10 mM KCl kullanılarak elde edilen filmlerin ortalama absorpsiyonunun, 2 mM ve 5 mM ile elde edilenlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, film morfolojisiyle ilişkilendirilmiştir (Jiang ve ark., 2015).

Elektrodepozisyon tekniği, farklı alt tabanlar üzerinde *n*-tipi Cu_2O ince filmlerin kaplanması için oldukça uygun bir yöntemdir. Ancak, literatürde raporlanan çoğu *n*-tipi Cu_2O ince film elektrodu yalnızca *n*-tipi fotoaktivite değil, aynı zamanda fotoelektrokimyasal hücrelerde *p*-tipi fotoaktivite de sergilemektedir. Bu çalışmada, elektrodepozisyon yöntemiyle titanyum (Ti) alt tabanı üzerinde kaplanan *n*-tipi Cu_2O ince filmlerde görülen istenmeyen *p*-tipi davranışın ortadan kaldırılması veya azaltılması amacıyla akım-gerilim (I–V) karakteristikleri ve sıfır bias spektral yanıt ölçümleri kullanılmıştır. Bu hedef doğrultusunda, Cu_2O filmlerinin kaplanmasından önce Cu filmlerinin Ti alt tabanı üzerinde büyütülmesi, kaplama banyosunun pH optimizasyonu ve filmlerin havada düşük sıcaklıkta tavlanmasının etkileri araştırılmıştır. Çok ince bir Cu tabakasının büyütülmesi, *n*-tipi fotosinyali anlamlı ölçüde iyileştirmiş ve filmlerin *p*-tipi foto yanıtını azaltmıştır. pH 6,1'de hazırlanan asetat bazlı kaplama banyosu kullanılarak elde edilen Cu_2O filmleri yalnızca *n*-tipi foto yanıt üretmiştir. Ayrıca, filmlerin havada düşük sıcaklıkta tavlanması *n*-tipi fotoaktiviteyi artırmış ve 100 ^oC'de 24 saatlik tavlama sonucunda en iyi performans elde edilmiştir. Bu yöntemler, ince film güneş pilleri ve benzeri aygıtlarda istenen *n*-tipi fotoaktiviteye sahip Cu_2O ince filmlerin üretimi açısından oldukça faydalı görülmektedir (Kalubowila ve ark., 2014).

Bu çalışmada, RF magnetron sıçratma (sputtering) yöntemiyle biriktirilen *p*-tipi Cu_2O ince filmler, Cu_2O tabanlı tamamen metal oksit güneş pillerinde oksijenin kısmi basınç oranına bağlı olarak incelenmiştir. Cu_2O (111) yönelimine ait X-ışını kırınımı (XRD) pikleri, oksijenin kısmi basınç oranına göre değerlendirilmiştir. As-depozite Cu_2O ince filmlerin optik bant aralığı enerjilerinin, oksijen kısmi basınç oranına bağlı olarak 1,88 eV ile 1,96 eV arasında değiştiği belirlenmiştir. Oksijen kısmi basınç oranı %2,4 olan *p*-tipi Cu_2O ince film için ölçülen özdirenç ve

taşıyıcı hareketliliği sırasıyla 2×10^4 Ω·cm ve 15.1 $cm^2/V \cdot s$ olarak bulunmuştur (Lee ve ark., 2014).

Cu_2O, fotovoltaik uygulamalar için umut vadeden ve doğada bol bulunan bir yarıiletken malzemedir. Bu çalışmada, reaktif doğru akım (d.c.) magnetron sıçratma (sputtering) yöntemiyle büyütülen polikristalin Cu_2O ince filmlerinin Hall mobilite değerleri rapor edilmiştir. Yüksek alt taban sıcaklığında büyütülen filmlerin tane yapısının iyileştiği ve buna bağlı olarak Hall mobilitesinin arttığı belirlenmiştir. Sıcaklığa bağlı Hall etkisi ölçümleri, 250 K'nin üzerindeki sıcaklıklarda bu filmlerin mobilite değerlerinin tek kristal Cu_2O ile karşılaştırılabilir seviyelerde olduğunu ve oda sıcaklığında 62 $cm^2/V \cdot s$'ye ulaştığını göstermiştir. Daha düşük sıcaklıklarda ise Hall mobilitesinin, iyonize saçıcılardan kaynaklanan taşıyıcı saçılmasıyla sınırlandığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar, yüksek alt taban sıcaklıklarında üretilen Cu_2O ince filmlerinin ince film tabanlı fotovoltaik uygulamalarda potansiyel olarak uygun olduğunu ortaya koymaktadır (Lee ve ark., 2011).

CuO ince filmleri, mikroskop camı alt tabanlar üzerinde sol-jel benzeri bir yöntemle hazırlanmıştır. Prekürsör çözeltileri, bakır asetatın izopropil alkol içerisinde çözündürülmesiyle hazırlanmıştır. Çözeltide, bakır asetatın çözünürlüğünü artırmak ve filmlerin cam alt tabana yapışmasını iyileştirmek amacıyla çeşitli stabilize ediciler ve katkı maddeleri kullanılmıştır. Yapılan gözlemler, filmlerin 600 °C'de 30 dakika süreyle uygulanan ısıl işlem sonrasında tenorite fazında kristalize CuO yapılarına dönüştüğünü göstermektedir. Filmler, homojen yapıda ve kahverengi-siyah renkte olup, yüzey morfolojileri büyük ölçüde prekürsör çözeltinin kimyasal içeriğine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Optik ölçümler sonucunda filmlerin bant aralıkları 1,60–1,75 eV aralığında bulunmuştur (Oral ve ark., 2004).

Bakır oksit filmleri, vakum buharlaştırma yöntemiyle silisyum alt tabakalar üzerinde kaplanan bakır tabakalarının oksidasyonu yoluyla elde edilmiştir. Oksidasyon işlemleri, atmosferik basınç altında, %10 oksijen içeren azot-oksijen gaz karışımı atmosferinde ve 185 °C ile 450 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) desenleri, oksidasyon sıcaklığına bağlı olarak filmlerin faz değişimini ortaya koymuştur: 225 °C'de yalnızca Cu_2O fazı gözlenirken, 350 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda CuO fazı tespit edilmiştir. 185 °C'de hazırlanan filmler, alt tabakaya yakın bölgelerde bakır silisidi ve Cu_2O içerirken; 280 °C'de hazırlanan filmler bakır silisidi, Cu_2O ve CuO fazlarını birlikte içermektedir. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi sonuçları, XRD ile elde edilen faz analizlerini desteklemiştir. Filmlerin optik özellikleri, 1–3,5 eV enerji aralığında yapılan spektroskopik elipsometri ölçümleri ile incelenmiştir. Elde edilen veriler, düzensiz film yapılarının kompleks kırılma indisi dağılımını modellemek amacıyla Tauc-Lorentz (TL) modeli kullanılarak analiz edilmiştir. TL modelinin, bakır oksit filmlerinin kırılma indisi dispersiyonunu başarıyla tanımladığı gösterilmiştir. Modellemeye göre, bant aralığı Cu_2O için 2,3 eV; CuO için ise 1,05–1,2 eV arasında bulunmuştur. Ayrıca, Cu_2O

filmlerinin bant aralığının, CuO'nun aksine, yerelleşmiş enerji düzeylerinden arındırılmış olduğu belirlenmiştir (Papadimitropoulos ve ark., 2006).

Cu_2O ince filmleri, farklı sıcaklıklarda radyo frekansı (RF) ile sputtering yöntemi kullanılarak büyütülmüştür. Filmlerin dielektrik fonksiyonları ve lüminesans özellikleri sırasıyla spektroskopik elipsometri ve fotolüminesans (PL) teknikleriyle karakterize edilmiştir. PL spektrumlarında yüksek enerjili tepe noktaları gözlenmiştir. Dielektrik fonksiyonların ikinci türev spektrumları ile standart kritik nokta (CP) modeli kullanılarak çeşitli kritik noktalar belirlenmiştir. Elektronik bant yapısı ve dielektrik özellikler, yoğunluk fonksiyonu teorisi (DFT) kullanılarak teorik olarak hesaplanmış ve deneysel CP enerjileriyle karşılaştırılmak üzere değerlendirilmiştir. Gözlenen yüksek enerjili fotolüminesans tepe noktaları, Cu_2O ince filmlerinin granüler yapısından kaynaklanan Kuazi-doğrudan bant geçişleri olarak yorumlanmıştır (Park ve ark., 2011).

Bu çalışmada, Cu filmlerinin termal oksidasyonu yoluyla elde edilen kristal Cu_2O ince filmlerinin yapısal ve optik özellikleri karakterize edilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, sentezlenen filmlerin yalnızca Cu_2O fazından oluştuğunu ve herhangi bir ara faz içermediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu filmlerin nanotanecikli bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) gözlemleri, Cu_2O filmlerinin mikrometre mertebesinde yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu gösterirken; Yüksek Çözünürlüklü İletken Elektron Mikroskobu (HRTEM), bu nanokristalin yapının 30 nm'den küçük, neredeyse küresel nanokristallerin birikmesiyle oluştuğunu ortaya koymuştur. Oda sıcaklığında kaydedilen fotolüminesans (PL) spektrumları, her iki film serisinde de 1,34 eV'de kusur enerji seviyelerine bağlı bir emisyon ve 1,97 eV'de 1s ortoeksitonun fonon yardımlı rekombinasyonuna karşılık gelen, iyi çözünmüş iki emisyon tepesine sahiptir. Emisyon davranışının laser gücüne bağlı olarak detaylı incelenmesi, emisyonların kaynaklarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Zaman-integrasyonlu 1s ortoeksiton spektrumları, rezonanssız iki foton uyarımı altında iletim bandı eşiği altındaki oksijen kusurlarının varlığını, geniş bir uyarım dalga boyu aralığında doğrulamıştır. İletim ve yansıma spektrumlarının ayrıntılı analiziyle elde edilen oda sıcaklığındaki optik soğurma katsayıları, Cu_2O filminin optik bant aralığı enerjisinin yaklaşık 2,11 eV olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, özellikle güneş pilleri, optik kaynaklar ve dedektörler gibi yarıiletken tabanlı cihazlardaki uygulamalar açısından büyük öneme sahiptir (Karapetyan ve ark., 2015).

Cu_2O ince filmleri, potansiyostatik elektrodepozisyon yöntemi kullanılarak bakır ve kalay oksit kaplı cam alt tabanlar üzerinde büyütülmüştür. Depozisyon parametrelerinin optimum aralığı deneysel olarak belirlenmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, 0,355 ile 0,555 V arasındaki depozisyon potansiyeli aralığında, tek fazlı kübik Cu_2O filmlerinin oluştuğunu göstermiştir. Araştırmalar, pH 9,0 değerinin tek fazlı kübik filmlerin kristalleşmesinin iyileştirdiğini ortaya koymuştur. (200) düzlemine ait kübik Cu_2O piki, 30–70 ^oC arasındaki banyo sıcaklığının artışıyla birlikte daha belirgin bir tercihli yönelim sergilemiştir. Pişirme işleminin, filmdeki tercihli yönelim, tane boyutu ve optik bant aralığı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Depozisyon

sonrası pişirilen *p*-tipi Cu_2O filmleri, fotoelektrokimyasal (PEC) güneş hücrelerinde fotokatot olarak kullanılarak enerji dönüşüm verimlilikleri değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır (Mahalingam ve ark., 2005).

Bu çalışma, düşük sıcaklıkta bir tampon katman (LTB-Cu_2O) olarak kullanılan Cu_2O'nun, Cu_2O ince filmlerinin büyümesi üzerindeki etkilerini incelemektedir. Örnekler, radyo frekansı (RF) magnetron sputtering yöntemiyle hazırlanmıştır. LTB-Cu_2O katmanının eklenmesiyle birlikte, X-ışını kırınım (XRD) piklerinin çizgi genişliklerinin azaldığı ve Cu_2O ince filmlerinin (111) düzlemine yönelimli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçümleri, tane boyutunun anlamlı şekilde arttığını ve yüzey düzgünlüğünün iyileştiğini göstermiştir. Optimum büyüme koşulları altında, 1×10^{14} cm^{-3} delik yoğunluğu ve 256 $cm^2/V{\cdot}s$ delik hareketliliği elde edilmiştir; bu değer, literatürde şimdiye kadar raporlanan en yüksek mobilite değeri olarak öne çıkmaktadır (Li ve ark., 2009).

Bu çalışma, Cu (II) sülfat çözeltisinden $C_6H_8O_7$ (sitrik asit) şelatlama ajanı kullanılarak florla katkılanmış kalay oksit (FTO) kaplı iletken cam alt tabanlar üzerinde Cu_2O ince filmlerinin elektrodepozisyonunu göstermektedir. Sıklık voltametri deneyleri, Cu_2O'nun elektrodepozisyonu için uygun potansiyel aralığını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. İnce filmler potansiyostatik yöntemle üretilmiş ve çeşitli tekniklerle karakterize edilmiştir. Mott-Schottky ölçümleri aracılığıyla Cu_2O filmleri için düz bant potansiyeli ile akseptör yoğunluğu hesaplanmıştır. Tüm filmler, $2{,}41 \times 10^{18}$ cm^{-3} ile $5{,}38 \times 10^{18}$ cm^{-3} arasında değişen taşıyıcı yoğunlukları ile *p*-tipi yarıiletken davranışı sergilemiştir. Bu fark, uygulanan depozisyon potansiyelinin neden olduğu stokiyometrik bozulmalara atfedilmiştir. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizleri, yüksek potansiyelde elde edilen Cu_2O filmlerinin daha homojen yüzey morfolojisine ve daha küçük kristalit boyutlarına sahip olduğunu ortaya koymuştur. X-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri ise, iyi kristalleşmiş kübik yapıların oluştuğunu ve depozisyon potansiyelinin kristalit boyutu üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Optik ölçümler, uygulanan potansiyele bağlı olarak 2,07–2,49 eV aralığında değişen doğrudan bant aralıklarını ortaya koymuştur (Laidoudi ve ark., 2013).

Bu çalışmada, mikroskop lamları üzerine kalınlıkları 0,05–0,45 mm arasında değişen Cu_2O ince filmleri, ardışık olarak 20 saniye boyunca 1 M NaOH çözeltisine ve ardından bakır kompleks çözeltisine daldırılarak sentezlenmiştir. NaOH çözeltisinin sıcaklığı 50–90 ^oC arasında değiştirilmiş, bakır kompleks çözeltisi ise oda sıcaklığında tutulmuştur. X-ışını kırınımı (XRD) desenleri, elde edilen filmlerin kuprit fazında (Cu_2O) kristallendiğini göstermiştir. Filmlerin 350 ^oC'de havada tavlanması sonucunda, Cu_2O fazı CuO fazına dönüşmüş; bu faz dönüşümü, optik bant aralığında 2,1 eV'den 1,75 eV'e (her ikisi de doğrudan geçişli) bir azalma ile kendini göstermiştir. Filmler *p*-tipi yarıiletken özelliği sergilemekte olup, 0,15 mm kalınlıktaki bir film için yaklaşık 5×10^5 $\Omega{\cdot}cm$'lik özgül direnç değeri tespit edilmiştir. Bu filmin elektriksel iletkenliği, 1 $kW{\cdot}m^{-2}$ tungsten-halojen ışınımı altında yaklaşık üç kat artış göstermiştir. Filmlerin azot atmosferinde 400 ^oC'ye kadar tavlanması bileşimde önemli bir değişiklik yaratmamış, ancak

karanlık ortamda iletkenlik ve foto yanıt şiddetinde yaklaşık bir büyüklük mertebesinde artış gözlenmiştir. Havada 400 ^{o}C'de tavlanan CuO ince filmleri ise, yaklaşık 7×10^{-3} $\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$'lik yüksek bir elektriksel iletkenlik değeri ile birlikte foto yanıt davranışı sergilemiştir (Nair ve ark., 1999).

Bu çalışmada, nanokristalin kübik Cu_2O ince filmleri, basit ve düşük maliyetli bir yöntem olan modifiye edilmiş ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyon (SILAR) yöntemi ile başarıyla sentezlenmiştir. Bu yöntem, büyüme hızını artırarak genel kaplama süresini azaltmaktadır. Elde edilen Cu_2O ince filmler, çeşitli fizikokimyasal özellikleri bakımından karakterize edilmiştir. 25 döngü sonucunda kaplanan film; yaklaşık 2,16 eV optik bant aralığına, saf kübik Cu_2O kristal yapısına, puslu (sisli) yüzey morfolojisine ve hidrofobik yüzey özelliklerine sahiptir. Bu Cu_2O filmi kullanılarak hazırlanan bir fotoelektrokimyasal hücre, %0,35 enerji dönüşüm verimliliği göstermiştir (Nikam ve ark., 2016).

Bu çalışmada, bakır oksit (Cu_2O) ince filmleri, Corning cam alt tabanlar üzerinde kimyasal banyo biriktirme (CBD) yöntemi ile sentezlenmiştir. Kompleksleştirici ajan ve biriktirme süresinin, filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Trietanolamin (TEA) adlı kompleksleştirici ajan, yalnızca Cu_2O'nun yüzeye tutuna bilirliğini ve kristalitesini artırmakla kalmamış, aynı zamanda Cu^{+} iyonlarının salınımını düzenleyerek film kalınlığının kontrolünde önemli bir rol oynamıştır. Kompleksleştirici ajan miktarındaki artış ve uzun biriktirme süreleri, daha kalın filmlerin oluşmasına neden olmuştur. Film kalınlığı ile tercihli kristal yönelimi arasında güçlü bir ilişki tespit edilmiştir. İnce filmler (50–100 nm), baskın olarak (111) düzlemine yönelim gösterirken; kalınlık arttıkça bu yönelim (200) düzlemine kaymıştır. Ayrıca, film kalınlığındaki artış, elektriksel iletkenlikte azalmaya yol açmıştır; 50 nm kalınlığında yaklaşık 10^{1} $(\Omega\cdot cm)^{-1}$ olan iletkenlik, 920 nm'de 10^{-4} $(\Omega\cdot cm)^{-1}$ seviyesine düşmüştür. Bu değişim, yapısal kusurlar özellikle Cu boşlukları ile ilişkilendirilmiş olup, aynı zamanda Urbach enerjisi (E_U) ile tanımlanan yapısal düzensizlikle bağlantılıdır. Kristal yöneliminin (111) düzleminden (200) düzlemine kayması, E_U değerinde azalmaya neden olmuş; bu da daha düzenli bir yapıya ve dolayısıyla daha yüksek dirençliliğe işaret etmektedir (Reyes-Vallejo ve ark., 2022).

Bu çalışmada, Cu_2O filmleri, pH = 10 olan alkalin çözeltide bakır laktatının indirgenmesi yoluyla üç farklı alt taban üzerinde başarılı bir şekilde elektrodepoze edilmiştir. Alt tabanlar, indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam, (001) oryantasyonuna sahip *n*-Si levha ve Si alt taban üzerinde buharlaştırılmış altın (Au) filmini içermektedir. Elektrodepoze edilen filmlerin yapısal ve optik özellikleri, in situ voltametri, zamanla akım geçiş ölçümü, ex situ X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu, UV-vis geçirgenlik ve yansıma ile fotolüminesans teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, alt taban seçiminin film morfolojisi, yapısı ve optik özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Liu ve ark., 2005).

Bu çalışmada, kimyasal banyo yöntemi kullanılarak periyodik boyut aktarımı yoluyla küre, çubuk ve koni şeklindeki Cu_2O filmlerinin sentezlenmesi için basit bir yöntem geliştirilmiştir. Bu

iki aşamalı süreç; öncelikle alt tabanların bakır tiosülfat çözeltisine daldırılması ve ardından NaOH çözeltisine batırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Cu_2O filmlerinin boyut ve morfolojisi, NaOH çözeltisinin konsantrasyonunun ayarlanması ve daldırma döngüsü (depozisyon süresi) sayısının düzenlenmesiyle kontrol edilebilmektedir. NaOH çözeltisinin konsantrasyonu 1,2 M'nin altında tutulduğunda ve batırma döngüleri 10'dan fazla olduğunda, sırasıyla üç boyutlu küresel, bir boyutlu çubuksu ve üç boyutlu konik Cu_2O yapılar periyodik olarak oluşturulabilmektedir. Çalışmada, bu periyodik desen aktarımı için büyüme mekanizması incelenmiş ve açıklanmıştır. Fotovoltaik performans testleri, çubuk ve koni morfolojisine sahip Cu_2O filmlerinin, küresel morfolojiye sahip filmlere kıyasla görünür ışık altında daha üstün fotoelektrik özellikler sergilediğini göstermiştir. Bu basit yöntem, özel morfolojilere ve gelişmiş özelliklere sahip diğer metal oksit filmlerinin sentezi için de uygulanabilir niteliktedir (Xiong ve ark., 2010).

Cu_2O filmleri, farklı partikül morfolojileriyle doğrudan biriktirilmiş olup, bu işlem basit, tek adımlı ve düşük maliyetli bir kimyasal banyo yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Süreçte, ucuz bir indirgen madde olan glikoz ve triknatlı sitrat kompleksleştirici ajan kullanılmış, işlem düşük sıcaklıkta (80 ^{o}C) başarıyla tamamlanmıştır. Glikoz, triknatlı sitrat ve bakır iyonu konsantrasyonu gibi reaksiyon parametrelerinin belirlediği aşırı doygunluk (süpersatürasyon) düzeylerinin Cu_2O filmlerinin partikül yoğunluğu ve morfolojisi üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Düşük bakır iyonu konsantrasyonunda ve aşırı glikoz varlığında oktahedral partiküller oluşurken, bakır iyonu konsantrasyonu arttığında yine aşırı glikoz varlığında küresel partikül morfolojisi gözlenmiştir. Bu morfoloji kontrolünün mekanizması, iyon konsantrasyonuna bağlı olarak farklı kinetik koşullarda işleyen difüzyonla sınırlı progresif büyüme modeline dayanan temel bir teori ile açıklanmıştır (Xu ve ark., 2013).

Nanokristalin Cu_2O ince filmleri, tek adımlı kimyasal banyo biriktirme (CBD) yöntemiyle başarıyla hazırlanmıştır. Trisodyum sitrat ($C_6H_5Na_3O_7$) şelatlama ajanının film oryantasyonu, morfolojisi, kristalit boyutu ve fotokatalitik aktivite üzerindeki etkileri; X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve UV-vis spektrofotometri kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen veriler, kristalit boyutu ve yönelimin trisodyum sitrat hacmine bağlı olduğunu ortaya koyarken; film morfolojisi ve yüzey yoğunluğunun da aynı şekilde bu parametreye duyarlı olduğunu göstermiştir. İnce filmlerin doğrudan geçişli optik bant aralığı 2,71 eV ile 2,49 eV arasında değişmektedir. Ayrıca, sentezlenen Cu_2O ince filmleri, H_2O_2 varlığında ve görünür ışık altında metil oranj ($C_{16}H_{19}N_3O_3S$) boyasını etkili bir şekilde bozabilmiştir. Gözlenen bu gelişmiş fotokatalitik aktivitenin mekanizması da ayrıntılı olarak analiz edilmiştir (Xu ve ark., 2014).

Düzgün ve homojen Cu_2O ince filmleri, $Cu(Ac)_2$ içeren elektrolit çözeltilerine tiyoüre eklenmesiyle, Sn katkılı indiyum oksit (ITO) alt tabanlar üzerinde elektrodepozisyon yöntemi kullanılarak başarıyla elde edilmiştir. Elektrodepozisyon potansiyelinin ve tiyoüre konsantrasyonunun film oluşumu üzerindeki etkileri; XRD, taramalı elektron mikroskobu (SEM), iletim elektron mikroskobu (TEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) teknikleri ile detaylı

şekilde analiz edilmiştir. Çalışma bulguları, −0,1 V (SCE'ye göre) potansiyelde ve 0,5 mM tiyoüre konsantrasyonunda gerçekleştirilen elektrodepozisyon işlemiyle, yüzeyleri düzgün ve homojen Cu_2O ince filmlerin elde edilebildiğini göstermektedir. Bu filmler, görünür ışık aralığında belirgin optik soğurma ve fotoakım yanıtı sergilemektedir. Ayrıca, tiyoüre konsantrasyonundaki artışın, Cu_2O ince filmlerinin yoğunluğunda bir azalmaya yol açtığı gözlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, tiyoüre destekli büyüme süreci, düzgün ve homojen Cu_2O ince filmlerin elde edilmesi açısından etkili ve geçerli bir mekanizma olarak önerilmektedir (Xue ve ark., 2013).

Cu_2O ince filmleri, 0,02 M bakır (II) asetat ($Cu(OAc)_2$) ve 0,1 M sodyum asetat (NaOAc) içeren bir Cu(II) asetat çözeltisinden, pH 5,6 koşullarında, yaklaşık olarak benzer yüzeysel direnç değerlerine sahip üç farklı iletken elektrot kullanılarak elektrodepozisyon yöntemiyle başarıyla sentezlenmiştir. Kullanılan elektrotlar; indiyum katkılı kalay oksit cam (ITO/cam), flor katkılı kalay oksit cam (FTO/cam) ve indiyum katkılı kalay oksit kaplı polietilen tereftalat (ITO/PET) alt tabanlarından oluşmaktadır. Elde edilen Cu_2O ince filmler; taramalı elektron mikroskobu (SEM), XRD, akı yoğunluğu ile büyüme süresi arasındaki ilişki ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Bulgular, kullanılan alt taban malzemesinin Cu_2O film büyümesinin kontrolünde kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. FTO/cam-Cu_2O yapısı, en düşük yük transfer direnci (Rct) değerine sahip olması nedeniyle, en yüksek elektron transfer verimliliğine ulaşmıştır. Tüm Cu_2O filmlerinin *n*-tipi yarıiletken özellik gösterdiği ve taşıyıcı yoğunluklarının $1,4 \times 10^{18}$ ile $1,2 \times 10^{19}$ cm^{-3} arasında değiştiği belirlenmiştir (Elmezayyen ve ark., 2015).

Bu çalışmada, elektrodepozisyon sıcaklığının Cu_2O filminin mikro yapısı, optik ve fotoelektrokimyasal özellikleri üzerindeki etkisi nicel olarak incelenmiştir. Üç farklı depozisyon sıcaklığı (35 ^oC, 50 ^oC ve 65 ^oC) dikkate alınmıştır. Gözlemlerimize dayanarak, genel bir eğilim ortaya konmuştur. Düşük sıcaklıkta (35 ^oC) depozite edilen Cu_2O filmleri, her zaman yüksek derecede tercihli bir yönelim, daha küçük piramidal benzeri kristal boyutu, yüksek fotolüminesans ve daha yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olmuştur. Bu özellikler, 35 ^oC'de depozite edilen Cu_2O filmlerini, fotoelektrokimyasal performansı daha yüksek hale getirmiştir ve -0,4 V vs. SCE bias'ında -0,22 mA/cm^2 fotoakım yoğunluğu sağlamaktadır. Bu değer, daha yüksek sıcaklıklarda depozite edilen Cu_2O filmlerine göre yaklaşık %35 daha yüksektir. Gözlenen daha yüksek fotoakım yoğunluğu, Cu_2O kristali içindeki ve Cu_2O/elektrolit arayüzündeki daha düşük direnç ile daha yüksek taşıyıcı yoğunluğunun bir sonucu olarak açıklanabilir (Huang ve ark., 2014).

Bu çalışmada, 0,45 μm kalınlığındaki bakır oksit (CuO) ince filmleri, mikroskop camı lamları üzerinde sırasıyla 20 saniye süreyle 1 M NaOH ve bakır kompleks çözeltilerine daldırılarak kimyasal olarak kaplanmıştır. NaOH çözeltisinin sıcaklığı 70 ^oC'ye yükseltilirken, bakır çözeltisi oda sıcaklığında tutulmuştur. Bakır oksit ince filmler, 200–400 ^oC arasında değişen sıcaklıklarda hava ortamında tavlanmış ve hazırlanan örnek referans olarak kullanılmıştır. Film yapıları X-ışını kırınımı (XRD) ile incelenmiştir. Desenler, 200 ^oC'de tavlanan filmlerin, Cu_2O bileşimine sahip

kuprit yapısında olduğunu göstermektedir. 300 ^{o}C'de tavlanan filmler, karışık tenorite (CuO) ve kuprit (Cu_2O) fazlarını içermektedir. Filmleri hava ortamında 400 ^{o}C'de tavlamak, bu filmleri tamamen tenorite yapısına dönüştürmekte ve CuO bileşimini sağlamaktadır. İki farklı bakır oksit formunun oranı, oksidasyon sıcaklığına göre değişiklik göstermektedir. Yüzey özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. UV-vis yansıma spektrumları, optik bant aralığının 2,40 eV'den 1,73 eV'ye kaymasıyla XRD sonuçlarını doğrulamıştır. Dönüşüm, FTIR spektroskopisi ölçümleriyle de doğrulanmıştır. Fotolüminesans yoğunluğu, tavlama sıcaklıklarının artışıyla büyük ölçüde iyileşmiştir (Johan ve ark., 2011).

Bu çalışmada, Cu_2O filmleri paslanmaz çelik alt tabanlar üzerinde elektrokimyasal olarak çöktürülmüş ve ardından fotoelektrokimyasal hidrojen üretimi amacıyla argon atmosferinde tavlanmıştır. İstenilen film kalitelerinin elde edilmesi için kaplama banyosunun süresi ve pH değeri gibi değişkenler araştırılmıştır. XRD desenleri, kaplama banyosu pH 9 olan numunelerde (200) düzlemine, pH 11 olan numunelerde ise (111) düzlemine tercihli yönelim gösteren Cu_2O filmleri elde edildiğini ortaya koymuştur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, pH 9 kaplama banyosundan elde edilen Cu_2O filmlerinde yaklaşık 1 μm boyutunda piramit benzeri taneler, pH 11 banyosundan elde edilen filmlerde ise 3–8 μm boyutunda büyük plaka benzeri taneler bulunduğunu göstermektedir. Daha uzun kaplama sürelerinde SEM ve XRD analizlerinden benzer sonuçlar elde edilmiştir. 350 ^{o}C sıcaklıkta 30 ve 60 dakika süreyle yapılan tavlama işlemi sonrasında Cu_2O fazı korunmuş, ancak SEM görüntüleri daha iri tanelerin oluştuğunu göstermektedir. Tavlama öncesi ve sonrası Cu_2O filmlerinin 0,5 M sulu Na_2SO_4 çözeltisinde −0,3 V potansiyelde kaydedilen fotoelektrokimyasal akımlar üzerinden hidrojen üretimi için fotoelektrokimyasal aktiviteleri incelenmiştir. Her iki banyodan elde edilen Cu_2O filmlerinde, tavlanmış numunelerde çöktürülmüş numunelere kıyasla fotoelektrokimyasal akımda önemli artışlar gözlenmiştir. En yüksek fotoelektrokimyasal akım, pH 9 kaplama banyosundan elde edilen ve 60 dakika tavlanan Cu_2O filminde 0,143 mA/cm^2 olarak ölçülmüş ve çöktürülmüş numuneye göre %560 artış sergilemiştir. Bu artış, tavlanmış Cu_2O filmlerinde kristal yapının iyileşmesi ve kusur yoğunluğunun azalmasına bağlanmıştır (Liang ve ark., 2010).

Bu çalışmada, cam alt tabanlar üzerinde darbeli 532 nm Nd:YAG laser kullanılarak nanokristalin bakır oksit Cu_2O ve CuO ince filmlerinin sentezi sunulmaktadır. Filmlerin deposyonu iki farklı altlık sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Alt taban sıcaklığının bakır oksit filmlerinin yapısal ve optik özellikleri üzerindeki etkisi tartışılmış ve analiz edilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları, depo edilen filmlerin kristalin yapıya sahip olduğunu göstermektedir. 300 ^{o}C altlık sıcaklığında hazırlanan filmler Cu_2O olup, (111) ve (200) difraksiyon piki gösterirken, 500 ^{o}C alt taban sıcaklığında büyütülen filmler CuO olup, (111) ve (020) düzlemlerine sahiptir. Depo edilen filmlerin morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile karakterize edilmiştir. Cu_2O ve CuO filmlerinin optik yasak enerji aralığı sırasıyla 2,04 eV ve 1,35 eV olarak belirlenmiştir (Jawad ve ark., 2011).

Cu_2O oktahedral mikrokristalleri, $CuSO_4$ çözeltisinde polivinilpirolidon (PVP) yüzey aktif madde olarak kullanılarak galvanostatik elektrodepozisyon yöntemiyle ITO camı üzerinde hazırlanmıştır. Elektrodepozisyon süresi kontrol edilerek, mikrokristaller ITO camı üzerinde rastgele dağılmış ve birbirlerinden ayrılmış şekilde düzenlenmiş, bu da mümkün olduğunca fazla (111) kristal düzleminin açığa çıkmasına neden olmuştur. ITO camına sabitlenen bu mikrokristaller, 150 W halojen tungsten lamba altında H_2O_2 varlığında boya kirleticilerinin fotolizini gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Methylene blue'un fotolizini örnek olarak alarak, oktahedral Cu_2O mikrokristallerinin fotokatalitik aktiviteleri değerlendirilmiştir. Elektrodepozisyon süresi ve H_2O_2 miktarının bozunma verimliliği üzerindeki etkileri tartışılmış ve optimum koşullar ile buna karşılık gelen bozunma mekanizması belirlenmiştir. Katalizör, aynı koşullar altında methylene blue, methyl orange, rhodamine B, eosin B ve bu maddelerin karışımlarının bozunmasında yüksek etkinlik göstermiştir (Zhai ve ark., 2013).

Cu_2O ince filmleri, kuvars alt tabanı üzerinde reaktif doğru akım magnetron püskürtme (DC magnetron sputtering) yöntemiyle hazırlanmıştır. Çöktürülen filmlerin yapıları ve özellikleri üzerine oksijen kısmi basıncı ile gaz akış hızının etkileri araştırılmıştır. Oksijen kısmi basıncının değiştirilmesi, farklı mikro yapılara sahip Cu_2O, Cu_4O_3 ve CuO bileşiklerinin sentezlenmesine yol açmıştır. Oksijen kısmi basıncının sabit tutulduğu $6{,}6 \times 10^{-2}$ Pa koşulunda, gaz akış hızı 80 sccm'nin altında olduğunda saf Cu_2O filmleri elde edilmiştir. Hazırlanan Cu_2O ince filmleri, görünür bölgede çok yüksek bir ışık absorpsiyonuna sahip olup, bu özellikleri sayesinde görünür ışık indüklemeli fotokatalitik aktivite sergilemektedir (Zhu ve ark., 2009).

İki basit, güvenli ve çevre dostu kimyasal çözeltisi yöntemi, büyük ölçekli üretim için uygun, düşük sıcaklıklarda uygulanabilir ve maliyet açısından etkili bir şekilde homojen nano yapılandırılmış CuO filmleri hazırlamak için kullanılmıştır. Farklı tipte altlıklar (cam, kuvars, Cu folyo ve Si) ve teknikler kullanılarak çeşitli türde CuO nanoyapıları (plaka, iğne ve ağ benzeri) üretilmiştir. Ürünler, taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınımı ve sıcaklık bağımlı karanlık elektriksel direnç ölçümleri ile karakterize edilmiştir; böylece alt tabanın morfoloji, kristal yapısı ve filmlerin elektriksel özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu karakterizasyonlardan, farklı tekniklerle ve/veya farklı alt tabanlarda üretilen nanoyapıların morfolojik, kristalografik, yapısal ve elektriksel özelliklerinde önemli farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, CuO filmlerinin büyüme mekanizmaları da araştırılmıştır (Bayansal ve ark., 2012).

Farklı nanoyapılara sahip Cu_2O ince filmleri, kimyasal banyo kaplama (CBD) tekniği kullanılarak sırasıyla florla doymuş SnO_2 (FTO) cam, Cu ve Ti folyo gibi farklı alt tabanlar üzerinde cetiltrimetilamonyum bromür (CTAB) varlığında dökülmüştür. Numuneler, X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve UV-vis difüz yansıma spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar, hazırlanan Cu_2O filmlerinin reaksiyon sisteminde CTAB bulunduğunda nanorod dizilerinden oluştuğunu göstermektedir. CTAB olmadan, Cu_2O filmleri nanosferler oluşturur. CTAB konsantrasyonu, farklı uzunluk-çap oranına sahip ve farklı nanorod diziliği

yoğunluğuna sahip nanorod yapılı Cu_2O filmlerinin kontrollü sentezi için kritik öneme sahiptir ve nanorod diziliği yoğunluğu hem substratlara hem de CTAB'a bağlıdır. Cu_2O nanorodlarının oluşumu için olası bir mekanizma tartışılmaktadır. Ayrıca, Cu_2O nanorodlarının UV-vis emilim özelliği, nanosferlere göre çok daha iyidir. Görünür ışık altında üretilen fotovoltaj, Cu_2O nanorod filmleri için nanosferlere göre daha yüksektir. Ti folyo üzerindeki Cu_2O nanorodları en fazla görünür ışığı emebilecekken, Cu folyo üzerindekiler diğer substratlara kıyasla daha iyi ve daha stabil fotoelektrokimyasal özellik göstermektedir. Bu çalışma, nanoyapılı Cu_2O tabanlı cihazlar için son derece faydalı olabilir (Aref ve ark., 2011).

Destek elektrolitlerinin Cu_2O kristallerinin galvanik çökelmesi üzerindeki etkileri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılmalı X-ışını (EDX) ve XRD kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar, destek elektrolitlerinin kimyasal doğasının Cu_2O kristallerinin galvanik çökelmesinde çok önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Klorür, Cu_2O kristallerinin (100) düzlemlerini stabilize ederek kübik kristallerin oluşumuna neden olurken, nitrat, sülfat ve florür, Cu_2O kristallerinin (111) düzlemlerini stabilize eder ve bu da kesik oktahedral ve oktahedral Cu_2O kristallerinin çökelmesine yol açar. Bu durum, inorganik adsorban ajanları dolaylı olarak ayarlayarak galvanik olarak elde edilen Cu_2O kristallerinin morfolojisini kontrol etmek için kolay bir yol sunmaktadır (Wang ve ark., 2011).

Cu_2O ince filmlerinin homojen epitaksiyel büyümesi, reaktif sputtering kullanılarak cam ve silikon altlıkları üzerinde gerçekleştirilmiş ve büyüme yönlerinin ayarlana bilirliği sağlanmıştır. İlk büyüme aşamasının, belirli yönlerin sonraki gelişimi üzerindeki önemi ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Farklı depozisyon koşulları arasında, toplam basıncın Cu_2O filmlerinin tercih edilen yönelimi üzerinde güçlü bir etkisi olduğu bulunmuştur: düşük basınçta h (100) ve yüksek basınçta h (111) yönelimi tercih edilmiştir. Ayrıca, depozisyon sırasında ilk Cu_2O katmanının, sürekli bir çekirdek katmanı olarak işlev görerek, yerleştirilen filmlerin dokusunu etkilediği gözlenmiştir. Etkili bir şekilde, iki adımlı bir depozisyon prosedürü kullanılarak, depozisyon koşullarından bağımsız olarak, kontrollü bir yönelime sahip yüksek dokulu Cu_2O ince filmi oluşturulabilmektedir. Yeterli kalınlığa sahip olduğunda, bu katman, hava ile temas etse de ve/veya depozisyon öncesinde yüzeyin özel olarak temizlenmesi gerekmeden, ikinci bir katmanın kristal yönelimini belirleyen çekirdek katman olarak işlev görür. Yüksek çözünürlüklü iletim elektron mikroskobu analizleri, üst katmanın çekirdek katmanla homoepitaksiyel olarak büyüdüğünü ve katmanlar arasındaki ara yüzeyi geçerek tek kristal kolonlardan oluşan bir mikro yapıyı ortaya koyduğunu göstermektedir (Wang ve ark., 2014).

n-tipi Cu_2O ince filmleri, asetat banyosunda Ti substratına potansiyostatik elektrodepozisyon yöntemiyle kaplanmıştır. Cu_2O ince filmleri, *p*-tipi bakır oksit (CuO) ince filmlerinin büyümesi için 500 ^{o}C'de 30 dakika hava atmosferinde tavlanmıştır. *n*-Cu_2O ince filmleri, Ti/CuO elektrotları üzerinde *p*-CuO/*n*-Cu_2O hetero-kavşağı oluşturmak amacıyla asetat banyosunda potansiyostatik elektrodepozisyon yöntemiyle kaplanmıştır. CuO/Cu_2O hetero-

kavşağının yapısal, morfolojik ve optoelektronik özellikleri, XRD, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve karanlık ile aydınlık akım–gerilim özellikleri kullanılarak incelenmiştir. XRD ve SEM, Ti/CuO elektrotları üzerinde iyi kaplanmış tek fazlı polikristalin Cu_2O ince filminin, asetat banyosunda -550 mV depozisyon potansiyelinde, doygun kalomel elektrotuna (SCE) karşı elde edilebileceğini göstermektedir. Fotovoltaik özellikler, CuO/Cu_2O hetero-ekleminin oluşumunu daha da doğrulamıştır (Wijesundera, 2010).

Cu_2O ve bakır ince filmleri, asetat banyosunda potansiyostatik elektrodepozisyon yöntemiyle elde edilmiştir. Büyüme parametrelerini araştırmak amacıyla voltametrik eğriler kullanılmıştır; bu parametreler arasında depozit potansiyeli, pH ve banyonun sıcaklığı yer almaktadır. Depozit potansiyelinin filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektronik özellikleri üzerindeki etkisi, X-ışını kırınım ölçümleri, taramalı elektron mikrografileri, absorpsiyon ölçümleri ve karanlık ile aydınlık akım–gerilim karakterizasyonlarıyla incelenmiştir. 0 ila 300 mV arasında, doymuş kalomel elektrotuna (SCE) karşı tek fazlı polikristalin Cu_2O'nun çökelmesi gözlenirken, SCE referans elektroduna göre 400 mV potansiyelde Cu ve Cu_2O'nun birlikte çökelmeye başladığı tespit edilmiştir. Depozit potansiyeli, SCE referans elektrodu esas alınarak 700 mV seviyesine kadar yükseltilmesi, tek fazlı bakır ince filmlerinin oluşmasına yol açmaktadır. SCE referans elektroduna göre yaklaşık 200 mV potansiyel civarında ve dar bir aralıkta, 1–2 μm büyüklüğünde kübik tanelere sahip tek fazlı polikristalin Cu_2O ince filmleri elde edilebilir. 400 mV potansiyelinde (SCE referans elektroduna göre), Cu ve Cu_2O'nun birlikte çökelmesi ve Cu_2O yüzeyinde rastgele dağılan Cu kürelerinin bulunması nedeniyle fotoelektrokimyasal hücrede artırılmış fotoğraf yanıtı elde edilmiştir. Bu çalışma, tek bir çökelme banyosunun, çökelme parametreleri kontrol edilerek hem Cu hem de Cu_2O'nun ayrı ayrı ve Cu–Cu_2O karışımının çökelmesi için kullanılabileceğini ortaya koymaktadır (Wijesundera ve ark., 2006).

Katkı maddesi kullanmadan, elektrokimyasal yöntemler ile 20 nm'den küçük boyutlarda ve alt tabanda altıgen dizilim gösteren Cu_2O nanoparçacıkları üretilmiştir. Bu nanoparçacıklar, nanoyapılı bir alt tabanda tohumların tercihe dayalı çekirdekleşmesiyle gelişir. Nanoyapılı Cu_2O parçacıkları, zamanla düzgün mikron büyüklüğündeki Cu_2O parçacıklarına dönüşür. Nanoyapılı alt tabanın, Cu_2O parçacıklarının çekirdekleşmesi için aşırı potansiyelin düşmesine ve parçacıkların boyut dağılımının daralmasına neden olduğu bulunmuştur; bu durum, cilalanmış bir alt tabana kıyasla gözlenmiştir (Choi ve ark., 2007).

Elektrokimyasal depozisyon yöntemiyle, titanyum alt tabanlar üzerinde, sulu bakır laktat çözeltisinden saf Cu_2O ince filmleri hazırlanmıştır. Bu filmlerin, lityum (Li) ile tersinir şekilde reaksiyona girebildiği gösterilmiştir. Film faz bileşimi, mikro yapısı ve özellikle yüzey morfolojisi, kristal/tane boyutu ve kalınlığı gibi özellikler, elektrodepozisyon parametrelerinin değiştirilmesiyle kontrol edilebilmektedir. Bu parametreler, filmlerin Li^+ iyonlarına karşı elektrokimyasal tepkisini doğrudan etkilediğinden, çekirdeklenme ve büyüme mekanizmalarının kinetiğinin incelenmesi, tersinirlik davranışlarının tam olarak anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada, saf Cu_2O

ince filmleri üç farklı uygulanan potansiyel (150, 400 ve 575 mV) kullanılarak, farklı yüzey morfolojileri ve kristal boyutlarına sahip olacak şekilde elektrodepoze edilmiştir. Potansiyostatik akım yoğunluğu-zaman geçiş eğrileri, iki ve üç boyutlu çekirdeklenme modelleri (anlık veya ilerleyici) ile analiz edilmiştir ve bu modeller, Cu_2O filmlerinin çekirdeklenme ve büyüme mekanizmalarının yüzey morfolojisine bağlı olarak incelenmesinde kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, 150 mV ve 400 mV (SCE referans elektroduna göre) potansiyellerinde sentezlenen Cu_2O ince filmleri için, yük transferi kontrollü, zamanla ilerleyen 3D çekirdeklenme süreciyle birlikte 2D katman-katman büyümeyi işaret etmektedir. 575 mV (SCE referans elektroduna göre) potansiyelde biriktirilen filmler için, baskın katkının difüzyon kontrollü 3D ilerleyici çekirdeklenmeden kaynaklandığı gözlenmiştir (Bijani ve ark., 2011).

Cu_2O ince filmlerinin kimyasal çökelmesi için basit bir yöntem tanımlanmıştır. Bu yöntemle elde edilen filmler yüksek kimyasal saflığa sahip olup, film kalınlığı çökelme süreci boyunca kolaylıkla kontrol edilebilmektedir. Elde edilen filmlerin fiziksel özellikleri detaylı olarak incelenmiş ve farklı yöntemlerle sentezlenen Cu_2O filmlerinin özellikleriyle karşılaştırılmıştır (Ristov ve ark., 1984).

Cu_2O ince filmleri, elektrodepozisyon yöntemiyle hazırlanmış ve XRD, SEM-EPMA ve spektrofotometri gibi çeşitli karakterizasyon teknikleriyle analiz edilmiştir. Filmlerin yapısal, morfolojik, bileşimsel ve optik özelliklerinin, elektrokimyasal banyo içeriği ile depozisyon parametrelerine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, alt tabanlara uygulanan ön işleme sürecinin de film özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Elektrodepozisyon yoluyla elde edilen Cu_2O filmleri; fotovoltaik, fototermal ve oksijen sensörü gibi uygulamalarda potansiyel kullanım alanlarına sahiptir (Sebastian ve ark., 2000).

Cam alt tabakalar üzerinde kimyasal kaplama yöntemiyle hazırlanan Cu_2O filmlerinin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerine tavlama sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. Filmler, hava atmosferinde 200°C ile 350°C arasındaki farklı sıcaklıklarda tavlanmıştır. X-ışını kırınım desenleri, as-depozit filmler ile 200°C ve 250°C'de tavlanan filmlerin Cu_2O bileşimine sahip kuprit fazında olduğunu göstermektedir. 300°C'de gerçekleştirilen tavlama işlemi, bu filmlerin CuO fazına dönüşmesine neden olmuştur. Bu faz dönüşümü, optik bant aralığında 2,20 eV'den 1,35 eV'ye kayma ile birlikte gerçekleşmiş ve bu durum doğru akım elektriksel iletkenlik ölçümleri ile FTIR spektroskopisi analizleriyle de doğrulanmıştır (Serin ve ark., 2012).

Cu, CuO ve Cu_2O'nun elektronik ve optik özellikleri; X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve yansımalı elektron enerji kaybı spektroskopisi (REELS) yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Cu 2*p*, Cu LVV, O 1*s* ve O KLL spektrumları ayrıntılı olarak raporlanmış ve önceki literatürle iyi bir uyum gösterdiği belirlenmiştir. 150 ila 2000 eV arasındaki birincil enerjilerde elde edilen REELS spektrumları, çoklu inelastik saçılmaların etkisi düzeltilerek analiz edilmiş ve etkin inelastik saçılma kesiti hesaplanmıştır. Bu deneysel kesit değerleri, yalnızca $\mathrm{Im}(-1/\varepsilon)$ girdisi kullanılan yarı-klasik dielektrik yanıt modeli çerçevesinde simüle edilen kesitlerle

karşılaştırılmıştır. Böylece, Cu, CuO ve Cu_2O için dielektrik fonksiyonlar ve optik özellikler belirlenmiştir. Analizlerde QUEELS-ε(k, ω)-REELS yazılım paketi kullanılmıştır. Kramers–Kronig dönüşümüyle elde edilen Im($-1/\varepsilon$) değerlerinden, dielektrik fonksiyonun reel (ε_1) ve imajiner (ε_2) bileşenleri ile kırılma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) gibi optik parametreler 0–100 eV enerji aralığında hesaplanmıştır. Cu, CuO ve Cu_2O arasındaki gözlenen farklılıkların, esas olarak Cu 3d ve O 2p elektron konfigürasyonlarındaki değişimlerden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır (Tahir ve ark., 2012).

Bu çalışmada, ZnO:Al (AZO) ince film kaplama koşullarının AZO–Cu_2O hetero-yapılı cihazların fotovoltaik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Cihazlar hem aktif katman hem de alt taban görevi gören bir Cu_2O levhası üzerine şeffaf iletken AZO ince filmlerin kaplanmasıyla üretilmiştir. Fotovoltaik performansın, kullanılan kaplama yönteminden bağımsız olarak büyük ölçüde kaplama sıcaklığına bağlı olduğu gözlenmiştir. Darbeli laser depozisyonu (PLD) ve radyo frekanslı magnetron saçtırma (rf MS) yöntemleriyle yaklaşık 200 ^oC'de kaplanan AZO filmleriyle üretilen AZO/Cu_2O cihazlarının, AM2 güneş ışığı altında sırasıyla %1,2 ve %1,0 maksimum verimlilik sağladığı raporlanmıştır. Kaplama sıcaklığının 200 ^oC'ye kadar artırılması, AZO filmlerinin kristal kalitesinde iyileşme sağlamış ve buna bağlı olarak cihaz performansını artırmıştır. Ancak sıcaklık 250 ^oC'nin üzerine çıktığında, Cu_2O katmanının elektriksel direncindeki artış nedeniyle cihaz performansında bozulma meydana geldiği düşünülmektedir (Tanaka ve ark., 2005).

Elektrodepozisyon yöntemiyle, çözeltinin sıcaklığı, uygulanan akım ve yük gibi çeşitli biriktirme parametreleri değiştirilerek kontrollü morfolojiye sahip Cu_2O ince filmleri elde edilmiştir. İnce film güneş pili uygulamaları için uygun, daha yüksek kaliteli Cu_2O filmleri elde etmek amacıyla optimal biriktirme koşulları belirlenmiştir. Uygulanan negatif yükün etkisi incelendiğinde, yük arttıkça biriken Cu_2O film kalınlığının da arttığı gözlenmiştir. Farklı Cu_2O absorban kalınlıklarına sahip Cu_2O/ZnO heteroeklemli güneş pilleri değerlendirilmiş ve en yüksek güç dönüşüm verimi (PCE) %0,52 olarak elde edilmiştir. Daha kalın Cu_2O tabakalarının şönt iletkenliğini azaltmada etkili olduğu, ancak aynı zamanda seri dirençte artışa neden olduğu belirlenmiştir. Optimal Cu_2O kalınlığı yaklaşık 3,3 μm olarak tespit edilmiştir (Tran ve ark., 2018).

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmleri Reaktif İyon Kaplama (RIP) yöntemiyle üretilmiş ve oksijen içeriği farklılık gösteren Cu-O ince filmlerinin termoelektrik özellikleri incelenmiştir. Bakır, elektron tabancasıyla buharlaştırılmış ve CuO ince filmleri, oksijen plazması ortamında reaksiyon yoluyla çökeltilmiştir. Oksijen gazı akış hızının kontrolüyle, elde edilen ince filmlerin oksijen içeriği ayarlanabilmiştir. Cu_2O filminin Seebeck katsayısı ve elektriksel özgül direnci oda sıcaklığında sırasıyla 0,7 mV/K ve 83,5 Ω·cm olarak ölçülmüştür. Ancak termoelektrik malzeme olarak kullanılabilmesi için özgül direncin hala yüksek olması nedeniyle, Cu_2O ince filmleri; bakır, oksijen gazı ve azot gazı dopantları kullanılarak yeniden üretilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, hidrojen muamelesi uygulanmaksızın, Seebeck katsayısı 0,3 mV/K ve özgül direnç 2 Ω·cm olarak

elde edilmiş; bu değer, literatürde hidrojen kullanılmadan raporlanan en düşük dirençlilik olarak kaydedilmiştir (Uchiyama ve ark., 2006).

Bu çalışmada, kimyasal banyo yöntemi kullanılarak farklı Au (altın) konsantrasyonlarında cam yüzeyler üzerine büyütülen Cu_2O filmlerinin yapısal ve optik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Filmlerin kafes parametresi, kristal boyutu, tercihli yönelimi ve yüzey gerilimi gibi yapısal özellikleri XRD verileri aracılığıyla hesaplanmış ve tüm numunelerin polikristalin yapıda olduğu belirlenmiştir. Yapısal parametrelerin, kullanılan Au katkı oranına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Filmlerin yüzey morfolojileri, alan yayılımlı taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile karakterize edilmiştir. Optik özellikler ise UV-vis spektroskopisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, optik özelliklerin Au katkı oranıyla birlikte değiştiğini ortaya koymuştur. Özellikle enerji bant aralığı (2,12 eV−2,02 eV), kırılma indisi, soğurma katsayısı, gerçek ve sanal dielektrik sabitleri, optik iletkenlik ve penetrasyon derinliği gibi optik parametrelerin altın katkısına bağlı olarak farklılık gösterdiği belirlenmiştir (Güneri, 2019).

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmlerinin fluorine katkılı kalay oksit (FTO) alt tabanı üzerinde elektrokimyasal kaplama yöntemiyle büyütülmesi incelenmiştir. Ağartma sıcaklığı ve süresinin, Cu_2O ince filmlerinin morfolojik, yapısal, fotoelektrokimyasal ve optik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma, pH 11 koşulunda büyütülen Cu_2O ince filmlerinin (111) kristal yönelimini sergilediğini ve bu filmlerin daha yüksek fotokarakteristik akım yoğunluğuna sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, Cu_2O ince filmlerinin fotoelektrokimyasal özelliklerinin kristal yapısı ve yüzey morfolojisiyle yakından ilişkili olduğu bulunmuştur (Kim ve ark., 2014).

Bu çalışmada, GO-Cu_2O kompozit filmleri elektro-kimyasal birikim yöntemiyle, farklı GO miktarları ile florlu kalay oksit (FTO) alt tabanlarına büyütülmüştür. GO içeriğinin, GO-Cu_2O kompozit filminin morfolojik, yapısal, optik ve fotoelektrokimyasal (PEC) özellikleri ile XPS spektrumları üzerindeki etkileri incelenmiştir. En yüksek XRD (111) zirve yoğunluğu ve 2,15 eV optik enerji bant aralığı, %10 ağırlık oranındaki örnek için elde edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek fotoakım yoğunluğu −4,74 mA/cm^2 ile %1 ağırlık oranına sahip örnekte gözlenmiştir; bu örneğin optik enerji bant aralığı ise 1,94 eV idi. %1 ağırlık oranına sahip örneğin fotoakım yoğunluğu, %0 ağırlık oranına sahip örneğin yaklaşık 1,75 katıydı. XPS ölçümlerine göre, %1 ağırlık oranına sahip GO örneğinde oksijen konsantrasyonunun, %0 ağırlık oranına sahip GO örneğine göre daha yüksek olduğu gözlenmiş ve bu durum, %1 ağırlık oranına sahip örneğin fotoakım yoğunluğunun artmasına neden olmuş olabilir (Kim ve ark., 2015).

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmleri, 60°C'de sodyum tiyosülfat katkılı bakır asetat sulu çözeltilerinden elektrodepozisyon tekniği ile ITO kaplı cam alt tabanlar üzerinde büyütülmüştür. Sodyum tiyosülfatın Cu_2O film elektrokimyasal biriktirme süreci üzerindeki etkileri, döngüsel voltametri ve kronoamperometri teknikleri ile incelenmiştir. Filmler, −0.58 V vs. SCE potansiyelinde biriktirilmiş ve X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), taramalı elektron mikroskobu (SEM), optik, fotoelektrokimyasal ve elektriksel ölçümlerle

karakterize edilmiştir. XRD analizleri, sentezlenen Cu_2O filmlerinin belirgin bir şekilde (200) düzlemine yönelimli saf kübik faza sahip olduğunu ve örgü sabitlerinin $a = b = c = 0{,}425$ nm olduğunu göstermiştir. FTIR sonuçları, 634 cm^{-1} pikinde gözlenen absorpsiyon ile Cu_2O fazının varlığını doğrulamıştır. SEM görüntüleri, iyi kompaktlıkta ve küresel yapılı film morfolojisini ortaya koymuştur. Optik ölçümler, Cu_2O filmlerinin görünür bölgedeki ışıkta yüksek geçirgenliğe (%80'in üzerinde) ve yüksek soğurma katsayısına ($\alpha > 10^4\ cm^{-1}$) sahip olduğunu göstermiştir. Optik bant aralığı (band gap) 2,103 eV olarak hesaplanmıştır. Fotoelektrokimyasal ölçümler, Cu_2O filmlerinin *n*-tipi yarıiletken özellik gösterdiğini ortaya koymuş ve bu durum Hall Etkisi ölçümleriyle de doğrulanmıştır (Rahal ve ark., 2018).

Bu çalışmada, doğrudan akım reaktif magnetron sputtering yöntemi, cam alt tabanlar üzerinde Cu_2O ince filmlerinin biriktirilmesinde kullanılmıştır. Saf bakırdan yapılan bir hedef, argon gazı altında 0,133 ila 4 Pa arasındaki sputtering basınçlarında sputter edilmiştir. Sputtering gücü ve basıncının Cu_2O ince filmlerinin yapısal ve optik özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Biriktirilen katmanlar, X-ışını kırınımı, atomik kuvvet mikroskobu, profilometri ve spektrofotometri gibi teknikler kullanılarak karakterize edilmiştir. Filmlerin optik geçirgenliği, görünür bölge aralığında ölçülmüştür. Basınçtaki artış, sputtering gücünü artırmaktan daha yüksek bir büyüme hızına yol açmıştır. Güçteki artış ise, Cu_2O ince filmlerinin optik geçirgenliği üzerinde olumsuz bir etki yaratmıştır (Rastkar ve ark., 2009).

Bu çalışmada, *p*-CuO/*n*-Si hetero-ekleminin güneş hücresi özellikleri, SILAR yöntemiyle hazırlanan CuO ince filmler kullanılarak incelenmiştir. Bakır tuzu konsantrasyonunun CuO filmlerinin büyümesi üzerindeki etkisi ve bunun güneş hücresi verimliliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı bakır sülfat konsantrasyonlarıyla 90 ^oC'de hazırlanan CuO ince filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri rapor edilmiştir. Filmin kristalin yapısının, bakır sülfat konsantrasyonunun artışıyla birlikte iyileştiği bulunmuştur. Ölçülen Raman spektrumu, depo edilen filmin CuO fazına ait pikler gösterdiğini ortaya koymuştur. SEM gözlemleri, filmin alt tabanı tamamen kaplayan homojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Depo edilen filmin optik bant aralığı, bakır sülfat konsantrasyonunun artışıyla 1,76 eV'den 1,57 eV'ye düşüş göstermiştir. *p*-CuO filminin n-silikon alt tabanına yerleştirildiği güneş hücresi cihazı yapılmış ve fotovoltaik yanıtı ölçülmüştür. Gözlemler, bakır sülfat konsantrasyonunun artışıyla fotorespansın arttığını göstermiştir (Visalakshi ve ark., 2016).

Bu çalışmada, bakır oksit (CuO) ince filmleri, ardışık iyon katmanları adsorpsiyonu ve reaksiyon (SILAR) yöntemiyle cam alt taban üzerinde farklı sürelerle 30 döngü ileüretilmişir. Katmanlar, bakır tiosülfat sulu çözeltileri kullanılarak 15, 20, 25 ve 30 saniye gibi farklı daldırma süreleriyle büyütülmüştür. Kristal fazlar, tüm daldırma seviyelerinde elde edilmiştir. Bakır oksit, stokiyometrik olmayan *p*-tipi şeffaf yarıiletken oksit malzemeleri için en umut verici adaylardan biri olarak öne çıkmaktadır. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) çalışmaları, bakır oksidin oluşumunu doğrulamış ve CuO'nun karakteristik titreşim modları tanımlanmıştır. Bakır

oksit ince filmlerinin hem yapısal hem de yüzey özellikleri, depozisyon süresinin artmasıyla iyileşmiş ve bunun sonucunda bakır oksidin optik emilim eşiği daha uzun dalga boylarına kaymış, optik bant aralığı enerjisi 1,43 eV'den 1,96 eV'ye kadar değişmiştir. Filmin kristalinliği yüksek olup, maksimum çekirdeklenme sürecine olanak tanımaktadır. Oda sıcaklığındaki fotolüminesans spektrumu, bu ince filmlerin optik emisyon özelliklerini açıklığa kavuşturmak için alınmıştır (Ravichandran ve ark., 2015).

Bu çalışmada, kolay ve düşük maliyetli bir ardışık iyonik katman adsorpsiyon ve reaksiyon (SILAR) yöntemiyle nanokristalin CuO ince filmlerinin sentezlenmesi rapor edilmiştir. Depolama döngülerinin nanokristalin CuO ince filmlerinin fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. XRD çalışmaları, tüm filmlerin monoklinik kristal yapıya sahip polikristalin doğada olduğunu ortaya koymuştur. Fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve Raman analizleri, CuO'nun tek faz olarak oluşumunu doğrulamış ve Cu-O bağının karakteristik titreşimsel modunu belirlemiştir. Tarama elektron mikroskobu (SEM) gözlemleri, çubuk şeklinde uzamış parçacıkların rastlantısal büyümesini göstermektedir. Depolama döngülerinin sayısının artmasıyla birlikte CuO ince filmlerinin yapısal ve yüzeysel özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiş, bunun sonucunda CuO'nun optik soğurma kenarının daha uzun dalga boylarına kaydığı ve optik bant aralığının 2,48 eV'den 2,31 eV'ye düştüğü belirlenmiştir. Oda sıcaklığındaki fotolüminesans spektrumu, CuO'nun bant kenarı emisyonu nedeniyle 468 nm'de merkezlenen mavi emisyon bandını göstermiştir; bu durum Burstein–Moss etkisinden kaynaklanmaktadır (Mageshwari ve ark., 2013)

Ardışık iyon katman adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) yöntemi, ince film formunda çeşitli bileşik malzemeleri depozito etmek için bir çözüm yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. SILAR yöntemi, düşük maliyetli, basit ve büyük alanlara depozito yapabilmek için kullanışlıdır. İzolatörler, yarıiletkenler, metaller ve sıcaklığa duyarlı alt tabanlar (örneğin polyester gibi) gibi çeşitli alt tabanlar kullanılabilir, çünkü depozito işlemi oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Düşük sıcaklıkla yapılan bir işlem olarak, aynı zamanda alt tabanın oksidasyon ve korozyonunu engeller. Yüksek kaliteli ince film elde etmenin başlıca gereksinimi, hazırlık koşullarının optimizasyonudur; örneğin, prekürsörlerin konsantrasyonu, kompleks oluşturucu ajanının doğası, prekürsör çözeltilerinin pH'ı ve adsorpsiyon, reaksiyon ve durulama süreleri gibi faktörler yer almaktadır (Pathan ve ark., 2004).

Bu çalışmada, SILAR yöntemi kullanılarak farklı anyonik banyo sıcaklıklarında (40 ^{o}C, 60 ^{o}C, 80 ^{o}C) ITO alt taban üzerinde Cu_2O ince filmleri başarıyla kaplanmıştır. Araştırmalar kapsamında, Cu_2O'nun kristal yapısı (XRD), geçirgenlik, optik bant aralığı, yüzey morfolojisi ve fotokatalitik aktivitesi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapısal analizler, artan banyo sıcaklığı ile birlikte kristal kalitesinin iyileştiğini ve kristal yapının baskın yöneliminin (111) düzleminde olduğunu, yani kübik yapıda oluştuğunu göstermektedir. Optik analizler, banyo sıcaklığının Cu_2O filmlerinin geçirgenliği ve optik bant aralığı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, Cu_2O filmlerinin nanotel benzeri bir morfolojiye

sahip olduğunu ve banyo sıcaklığı arttıkça bu yapıların daha kompakt hale geldiğini göstermiştir. Fotoelektrokimyasal (PEC) analizler, 80 ^{o}C'de kaplanan Cu_2O filminin yüksek fotoyük akımı ve iyi stabilite sergilediğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, Cu_2O filmlerinin SILAR yöntemiyle banyo sıcaklığı kontrol edilerek yapısal, optik ve fotokimyasal özelliklerinin iyileştirilebileceğini ve bu tür malzemelerin özellikle fotovoltaik ve fotokatalitik uygulamalar için uygun olduğunu göstermektedir (Baig ve ark., 2018).

Bu çalışmada, bakır oksit ince filmleri, cam ve paslanmaz çelik alt tabakalara, ardışık iyonik katman adsorpsiyon reaksiyonu (SILAR) olarak bilinen basit, güvenli ve çevre dostu bir kimyasal çözüm yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Filmler, sırasıyla 20 saniye süreyle 1 M NaOH çözeltisine ve ardından 0,1 M bakır kompleksi çözeltisine daldırılarak hazırlanmıştır. NaOH çözeltisinin sıcaklığı 70 ^{o}C'ye ayarlanmış, bakır kompleksi çözeltisinin sıcaklığı ise (pH 8−12) oda sıcaklığında tutulmuştur. Filmler, XRD, Enerji Dağılımlı X-ışını Analizi (EDAX) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. XRD ölçümleri, cam alt tabakalarda oluşan CuO nanoyapılarının paslanmaz çelik alt tabakalara göre daha kristalli olduğunu göstermiştir. SEM görüntüleri, paslanmaz çelik üzerine depo edilen CuO nanoyapılarının, cam alt tabakalara depo edilenlerden daha büyük tane boyutlarına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Cam alt tabakalar kullanılarak depo edilen bakır oksit filmleri, paslanmaz çelik alt tabakalara depo edilen filmlerden daha iyi bir morfolojiye, daha yüksek kristalliniteye ve Cu/O bileşen oranı bakımından daha iyi bir yüzdeye sahip olmuştur (Emumejaye, 2015).

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmleri, soda kireç camı (SLG) mikroskop lamları ve flor katkılı kalay oksit (FTO) alt tabanlar üzerinde modifiye edilmiş SILAR tekniği ile büyütülmüştür. Banyo çözeltisinin pH seviyesi, biriktirilen ürünün fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla 4,50–7,95 aralığında sistematik olarak değiştirilmiştir. Hazırlanan filmler, küresel tanelerden oluşan kompakt bir yüzey morfolojisi göstermiştir (SEM görüntülerine göre). XRD analizleri, biriktirilen filmlerin (111) tercihli yönelime sahip tek fazlı Cu_2O yapıda olduğunu göstermiştir. Bu yönelim artışı, çözeltinin pH seviyesinin ve tavlama sıcaklığının artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Tavlanmış Cu_2O filmleri, 200 ^{o}C'ye kadar kararlı kalmış; ancak 350 ^{o}C'ye ulaşıldığında tamamen CuO (bakır oksit) fazına dönüşmüştür. UV-vis-NIR geçirgenlik verileriyle tahmin edilen optik bant aralığı, 2,28–2,48 eV arasında bulunmuş ve çözeltinin pH seviyesi azaldıkça bant aralığının daraldığı gözlenmiştir. Ayrıca, 75–350 ^{o}C arasındaki tavlama sıcaklıklarının etkisi de incelenmiş; bu sıcaklıkların, filmlerin optik bant aralığı (1,44–2,13 eV) ve elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Biriktirilen örneklerin levha direnci, 4120 MΩ/kare seviyesinden 800 MΩ/kare seviyesine düşmüştür (Farhad ve ark., 2019).

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmleri, soda kireç camı (SLG) mikroskop lamları ve flor katkılı kalay oksit (FTO) alt tabanlar üzerinde modifiye edilmiş SILAR yöntemi ile büyütülmüştür. Katyonik öncül çözeltinin pH seviyesi, sırasıyla asetik asit ve sülfürik asit ilavesiyle ayarlanmış; ayrıca, anyonik öncül olarak kullanılan NaOH konsantrasyonu değiştirilerek, biriktirilen filmlerin

fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. XRD ölçümleri, tüm filmlerin polikristalin yapıda olduğunu ve (111) yönelimine sahip tek fazlı Cu_2O yapısının oluştuğunu ortaya koymuştur. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri, biriktirilen filmlerin mikro çatlak ve pinhole (iğne deliği) içermediğini ve alt tabanı düzgün şekilde kapladığını göstermektedir. Elde edilen filmlerin tahmin edilen optik bant aralığı 2,05–2,16 eV arasında bulunmuş ve özdirenci 180–380 Ω·cm arasında ölçülmüştür. Bu özdirenç değerleri, benzer yöntemlerle elde edilen Cu_2O ince filmlerle karşılaştırıldığında en az bir büyüklük mertebesi daha düşüktür. Hem optik bant aralığının hem de elektriksel özdirencin, katyonik çözeltilerin pH seviyesinin azalmasıyla birlikte düştüğü gözlenmiş ve bu durumun iyileşen kristalleşme ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Modifiye SILAR yöntemiyle üretilen Cu_2O elektrotları, LED açık/kapalı geçişli geçici yüzey fotogerilimi ölçümleri ile *p*-tipi iletkenlik sergilediği ve sıcak nokta probu ile tutarlı sonuçlar verdiği doğrulanmıştır. Ayrıca, bu fotokatotların sulu elektrolit içeren bir fotoelektrokimyasal hücrede 1 saatten fazla süreyle kararlı kaldığı belirlenmiştir (Farhad ve ark., 2019).

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmlerinin ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyon (SILAR) süreciyle oluşturulması rapor edilmiştir. Atmosfer koşullarında, vakum kullanılmadan büyütülen ince filmler tamamen karakterize edilmiştir. Depozisyon sonrası oksijen ortamında yapılan tavlama işlemi, CuO ince filmlerinin oluşmasına yol açmıştır. *P*-tipi bakır oksit (CuO) katmanı ile *n*-tipi SnO_2 nanoparçacıklarının bulunduğu bir katmanla *pn*-eklemeler oluşturulmuştur. Bu tür *pn*-eklemeler, diğer oksit yarıiletkenlerle taşıyıcı engelleme katmanları olarak birlikte çalışarak, atmosfer koşullarında oluşturulmuş tamamen oksit ince film güneş pillerini meydana getirmiştir. NiO'nun delik taşıma ve elektron engelleme katmanı, ZnO'nun ise *p*- ve *n*-katmanları arasındaki tampon katman olarak etkisi rapor edilmiştir. Bu sayede, arayüzde kimyasal değişikliklerin oluşması engellenmiştir. Tarama tünelleme spektroskopisi (STS) ölçümleri ile malzemelerin bant uçları, Fermi seviyelerine göre belirlenmiştir. $NiO/Cu_2O/ZnO/SnO_2$ heteroeklem cihazları, merdiven şeklinde enerji seviyeleri ile elektron ve deliklerin karşı elektrotlara kolayca taşınmasını sağlamış ve böylece tamamen oksit ince film güneş pillerine dönüşerek enerji dönüşüm verimliliği %1'in üzerine çıkmıştır (Chatterjee ve ark., 2016).

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmleri, düşük sıcaklıkta (60 ^oC) cam alt tabanı üzerinde SILAR yöntemi kullanılarak ve dört farklı bakır tuzu ($(CH_3COO)_3Cu{\cdot}H_2O$, $CuSO_4{\cdot}5H_2O$, $Cu(NO_3)_2{\cdot}3H_2O$ ve $CuCl_2{\cdot}2H_2O$) ile 40 daldırma çevrimi uygulanarak hazırlanmıştır. Filmlerin yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. XRD analizleri, Cu_2O ince filmlerin çok kristalli (polikristalin) yapıya sahip olduğunu ve filmler arasında yapısal farkların gözlenmediğini göstermiştir. Cu_2O ince filmlerin optik özellikleri, soğurma spektrumu sonuçlarıyla analiz edilmiştir. Film kalınlığının artışı ile birlikte, enerji bant aralığı (band gap) değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. FE-SEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri, filmlerde genellikle küresel aglomerasyonun oluştuğunu ve bazı filmlerde küresel yapıda çubuk benzeri parçacıkların bulunduğunu ortaya koymuştur. Hall ölçümleri, Cu_2O ince filmlerin *p*-tipi

elektriksel iletkenliğe sahip olduğunu ve filmlerin elektriksel özdirenç (ρ) değerlerinin sırasıyla $1{,}24 \times 10^4$, $4{,}06 \times 10^4$, $2{,}86 \times 10^3$ ve $1{,}67 \times 10^4\ \Omega{\cdot}cm$ olduğunu göstermiştir. Ayrıca, film mobilite (μ) değerleri sırasıyla 174, 87, 80 ve 23 cm^2/V olarak ölçülmüştür (Altindemir ve Gümüş., 2020).

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmleri, düz perovskit güneş pillerinde delik taşıma katmanı olarak tanıtılmaktadır. Cu_2O katmanı, ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyon (SILAR) yöntemiyle oluşturulmuştur. Methylammonium kurşun triyodür ($MAPbI_3$) ile doğrudan bir *p*–*i*–*n* yapısı oluşturulmuştur; burada perovskit katmanı, *p*-tip Cu_2O katmanı ile *n*-tip PCBM (fenilC_{61}-bütirik asit metil esteri) katmanı arasında yer almakta ve sırasıyla delik ve elektron taşıma malzemesi olarak görev yapmaktadır. Malzemelerin bant uçları, durum yoğunluğu (DOS) ile ilişkilendirilen tarama tünelleme spektroskopisi (STS) ölçümleriyle Fermi enerjilerine göre belirlenmiştir. Enerji seviyeleri, her iki arayüzde (*p*–*i* ve *i*–*n*) tip II bant hizalamaları oluşturacak şekilde, yük ayırma ve ışık altında kesintisiz taşıyıcı taşıma için uygun bir düzen sağlar. Bu bant hizalaması, $MAPbI_3$'ten yük transferini mümkün kılmakta olup, perovskit katmanı, delik- veya elektron taşıma katmanlarından biriyle temas ettiğinde fotolüminesans emisyonunun sönmesiyle kanıtlanmıştır. Uygun enerji seviyelerine sahip doğrudan *p*–*i*–*n* yapısı ile planar perovskit güneş pili ($Cu_2O/MAPbI_3/PCBM$), 1 güneş ışığı altında %8,23 enerji dönüşüm verimliliği (η) elde etmiştir (Chatterjee ve ark., 2016).

Bu çalışmada, ekonomik bir yöntem olan ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyon (SILAR) yöntemi, çelik yüzeyine ince Cu_2O katmanları depon etmek amacıyla araştırılmıştır. Alkali banyosundaki Cu^+ iyonlarının OH^- iyonlarına olan molar oranları değiştirilmiş ve bu değişikliklerin etkileri X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), fotolüminesans (PL) spektroskopisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve ultraviyole-görünür spektroskopisi (UV-vis) teknikleriyle karakterize edilmiştir. XPS analizlerinde, Cu 2*p* pikin bağlanma enerjilerindeki artış, Cu^+/OH^- molar oranının 1:10 ile 1:15 arasında olduğu durumlarda optimum bakır boşluğu konsantrasyonunun elde edilebileceğini ortaya koymuştur. SEM incelemeleri, bu bileşimlerle kaplanmış Cu_2O ince filmleri için yoğun ve homojen bir mikro yapı doğrulamıştır. PL spektrumunda, 580 nm'deki pik için en güçlü mutlak pik yoğunluğu, düşük enerji pikinleri (1,2-1,4 eV) ile birlikte Cu boşluğuna bağlı olarak, Cu^+/OH^- molar oranı 1:15 olan ince filmde en belirgin şekilde gözlenmiştir. Alkali konsantrasyonunun rolü, optimum bakır boşluğu ile kararlı bir Cu_2O yapısı oluşturulması açısından açıklanmıştır. Bu çalışma, Cu_2O ince katmanlarının yüzey reaktivitesini modüle etmek için kolay bir yöntem sunmakta olup, bu kavram, çeşitli elektriksel ve mekanik uygulamalar için büyük alanlı cihaz entegrasyonlarında kullanılabilir (Chowdhury ve ark., 2014).

3.MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. SILAR Yöntemi ile Cu_2O elde edilmesi

Cu_2O ince filmlerinin SILAR yöntemi ile üretimi, yarıiletken teknolojisinde, kontrollü ve hassas bir film büyütme tekniğidir. Bu yöntem, düşük sıcaklıkta homojen ince film üretimini sağlayarak optoelektronik ve sensör uygulamalarında giderek artan bir öneme sahiptir. Üretim süreci, yüksek saflıkta alt tabanların hazırlanması, bakır tuzları çözeltilerinin kontrolü, adsorpsiyon-reaksiyon-yıkama döngülerinin tekrarından oluşmaktadır. Düşük sıcaklıkta çalışma, homojen film oluşumu bu yöntemin avantajları arasındadır. Bu teknik, kontrollü film büyütme ve malzeme mühendisliği açısından büyük potansiyel barındırmaktadır. Bu aşamada SILAR yöntemi ile Cu_2O ince filmlerinin elde ediliş aşamaları ve uygulan karakterizasyon teknikleri hakkında bilgi verilecektir.

3.1.1. Alt Taban Hazırlama Protokolü

Alt taban hazırlama aşamaları, SILAR yöntemiyle elde edilecek ince filmlerin kalitesini doğrudan etkilediğinden, cam alt tabanlar homojen ve temiz bir yüzey oluşturacak şekilde çok aşamalı bir temizleme protokolünden geçirilir. Öncelikle 75 mm × 25 mm × 1 mm boyutlarındaki cam parçalar, yüzeydeki kaba kir ve organik kalıntıları gidermek amacıyla sabunlu su ile yıkanır; ardından yüzey enerjisini artırmak ve asidik tortuları çözmek için seyreltik sitrik asit çözeltisinde belirli bir süre bekletilir. Bu aşamadan sonra hem sitrik asit artıklarının hem de sudaki çözünmüş minerallerin tamamen uzaklaşması için bol miktarda saf su ile durulama yapılır. Durulama sonrasında camlar, yüzey gerilimini düşürmek ve su damlacıklarının uçmasını sağlamak üzere 10 dakika boyunca etil alkol içinde tutulur; daha sonra alkol kalıntılarını gidermek için tekrar saf su ile son bir durulama gerçekleştirilir. Tüm temizlik işlemleri tamamlandıktan sonra cam alt tabanlar, etüvde 100 ^{o}C'de bir saat süreyle kurutularak üzerlerindeki nem tamamen uzaklaştırılır ve ince film depolama öncesi ideal koşullara getirilir. Temizleme ve kurutma işlemlerinin ardından numune hazırlama sürecinin son aşamasında her bir cam alt taban, isimlendirilerek etiketlenir ve başlangıç ağırlıkları hassas bir terazide kaydedilir. Film depolama işlemi sonrasında alt tabanlar tekrar tartılarak ölçüm sonuçları kaydedilir.

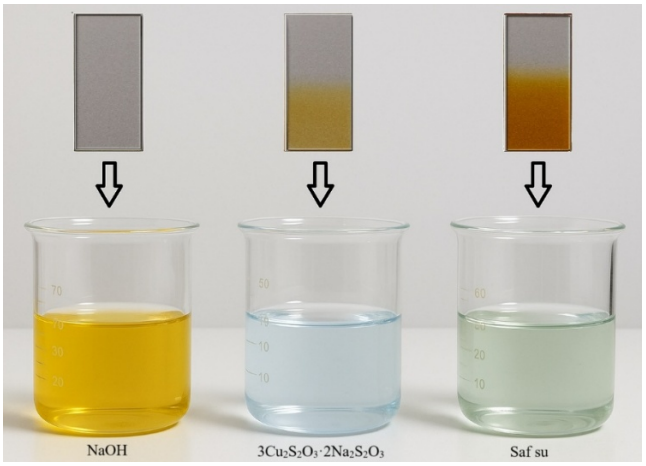
3.1.2. Çözeltileri Hazırlama

Bu çalışmada Cu_2O ince filmlerinin üretimi için iki farklı çözelti hazırlanmıştır. Öncelikle ilk olarak 50 ml suda 1 M $CuSO_4.5H_2O$ (bakır sülfat pentahidrat) ve 200 ml suda 1 M NaS_2O_3 (sodyum tiosülfat) hazırlanarak karıştırılmıştır. Bu karışıma daha sonra 250 ml saf su eklenerek manyetik karıştırıcıda homejen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Sonuç olarak, 1 M 500 ml $3Cu_2S_2O_3{\cdot}2Na_2S_2O_3$ (bakır tiosülfat) çözeltisi elde edilmiştir. Hazırlanan bu çözelti deney sırasında oda sıcaklığı koşullarında tutulmuştur. İkinci çözelti olarak 500 ml suda 2 M NaOH

(sodyum hidroksit) manyetik karıştırıcıda homejen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Bu çözelti ise deneyler sırasında 30 ve 70 ^{o}C'de kontrollü ısıtıcı yardımı ile sabit tutulmuştur.

3.1.3. Deneyin Gerçekleştirilmesi

Cu_2O ince filmin cam ve FTO alt tabanlar üzerinde depolanması amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, her bir alt taban ve sıcaklık ve daldırma döngüsü için standart bir deney düzeneği uygulanmıştır. Bu deney düzeneğinde, önceden hazırlanan ve detaylı bir temizleme protokolünden geçirilen cam ve kaplanmaya hazır FTO alt tabanlar, iki farklı sıcaklıkta (30 ^{o}C ve 70 ^{o}C) kontrollü olarak ısıtılan ve bu sıcaklıklarda sabit tutulan 2 M NaOH çözeltisi, oda sıcaklığında hazırlanan 1 M $3Cu_2S_2O_3{\cdot}2Na_2S_2O_3$ çözeltisi ve saf su kullanılmıştır. Her bir SILAR döngüsü için alt taban önce 2 saniye boyunca 2 M NaOH çözeltisine daldırılmış, ardından 2 saniye 1 M $3Cu_2S_2O_3{\cdot}2Na_2S_2O_3$ çözeltisine daldırılarak yüzeyde reaksiyonun gerçekleşmesi sağlanmış ve son olarak 2 saniye süreyle saf su içerisinde durulanarak reaksiyon artıklarının uzaklaştırılması sağlanmıştır. Bu işlem bir döngü olarak tanımlanmış ve her numune için sırasıyla 10, 20 ve 40 döngüde, 30 ve 70 ^{o}C'de ve cam ve FTO alt tabanlar üzerinde uygulanmıştır. Her döngü sonrasında film tabakasında gözle görülür bir renk değişimi ve koyulaşma meydana geldiği, döngü sayısı arttıkça ise filmin kalınlığının belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. Film rengindeki bu değişimler ve kalınlık artışı, Cu_2O ince filminin kontrollü bir şekilde yüzeye çökeldiğini ve katman kalınlığının döngü sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak arttığını göstermiştir. Deneyin son aşamasında ise, iki yüzeyi de kaplanan alt tabanların bir tarafı amonyum klorür çözeltisi ile temizlenmiştir. Ardından her bir alt taban yeniden tartılarak film kaplanması sonucu oluşan kütle değişimi kaydedilmiş ve numuneler ileri inceleme ve karakterizasyon çalışmalarına hazır hale getirilmiştir. Böylece, sıcaklık, döngü sayısı ve alt taban parametrelerinin film özellikleri üzerindeki etkisi detaylı biçimde incelenmiştir.



Şekil.3.1. SILAR yöntemi ile Cu_2O ince film elde etmek için kullanılan deneysel düzeneğin şematik gösterimi

3.1.4. Cu_2O İnce Film Oluşumunda Redoks Tepkimesi

$Na_2S_2O_3$ ve $CuS0_4$, suda çözündüklerinde sırasıyla tiyosülfat ($S_2O_3^{-2}$) ve kuprik (Cu^{+2}) iyonlarını serbest bırakırlar. Redoks reaksiyonu bağlamında, Cu^{+2} iyonları oksitleyici ajan olarak görev yaparken, $S_2O_3^{-2}$ iyonları hem indirgen hem de kompleks oluşturucu ajan olarak işlev görür. $S_2O_3^{-2}$ iyonları, Cu^{+2} iyonlarını indirger ve Cu^{+} iyonlarına dönüştürür; bu dönüşüm, çözeltinin renginde mavi (kuprik iyonlar) renkten renksiz (kupröz iyonlar) hale geçiş olarak gözlenir. Elde edilen bu bakır kompleksi, katyon kaynağı olarak kullanılmaktadır (Aref ve ark., 2011).

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

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

$$NaOH \rightarrow Na^{+} + OH^{-}$$

$$2Cu^{+} + 2OH^{-} \rightleftharpoons Cu_2O + H_2O$$

3.1.5. İnce Film Kalınlığı Ölçüm Yöntemi

Alt tabanlar üzerinde depozisyon yoluyla oluşturulan ince filmlerin kalınlıklarının belirlenebilmesi için, film kaplanmadan önceki (Mi) ve kaplandıktan sonraki (Ms) kütleler, 0,1 mg hassasiyetinde ölçüm yapabilen Denver Instrument TP-214 model hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.2). Kalınlık hesaplamasında, filmin alt taban yüzeyine homojen olarak dağıldığı varsayılmaktadır. Bu varsayım doğrultusunda, film kalınlığı; kütle farkı ile doğru, alt taban alanı (A) ve filmin yoğunluğu (ρ) ile ters orantılı olarak hesaplanmaktadır. Bu ilişki aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$t = \frac{M_s - M_i}{\mathrm{A}.\rho} = \frac{\Delta M}{\mathrm{A}.\rho} \qquad (3.1)$$

Burada, M_i film kaplanmadan önceki alt taban kütlesini (g), M_s film kaplandıktan sonraki alt taban kütlesini (g), ρ İnce filmin yoğunluğunu (g/cm^3), t filmin kalınlığını (cm) ve A ise filmin kaplandığı yüzey alanını (cm^2) ifade eder. Cu_2O'nin yoğunluğu 6.08 g/cm^3 olarak alınmıştır.



Şekil 3.2. Denver Instrument TP-214 model hassas terazi

3.2. Cu_2O İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılmasında Kullanılan Yöntem ve Teknikler

Bu çalışmada kullanılan yöntem ve karakterizasyon teknikleri, Cu_2O ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin detaylı biçimde incelenmesini mümkün kılmıştır. Deneysel süreçte uygulanan parametreler ve kullanılan analiz teknikleri, elde edilen ince filmlerin çok yönlü değerlendirilmesini sağlamıştır. Deneysel parametreler ve karakterizasyon sürecinde kullanılan cihazlara ilişkin bilgiler Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Deneysel parametrelerin gösterimi

Parametre	Açıklama
Alt tabanlar	Cam, FTO
Sıcaklıklar	30 ^{o}C, 70 ^{o}C
SILAR Döngü Sayıları	10, 20, 40 Döngü

Çizelge 3.2. Cu_2O ince filmlerin incelenmesinde kullanılan yöntem ve teknikler

Karakterizasyon Tekniği	Cihaz/Model	Açıklama/Parametreler
Yapısal Analiz	PANalytical EMPYREAN XRD	X-ışını kırınım ölçümleri
	FEI Quanta 650 Field Emission SEM	Yüzey morfolojisi ve film yapısının incelenmesi
Optik Özellikler	Perkin Elmer UV/vis Lambda 2S Spektofotometre	Dalga boyu aralığı 190-1100 nm

3.2.1. XRD ve Bragg Yasası

X-ışını kırınımı (XRD), kristal yapıların incelenmesinde kullanılan temel bir yapısal karakterizasyon tekniğidir. Bu yöntem, kristal yapıların atomik ve moleküler düzeyindeki düzenlenme biçimlerinin belirlenmesine olanak sağlar. Kristal malzemelere gönderilen X-ışınları, kristalin düzenli atom dizilimleri tarafından kırınıma uğrar. Bu kırınım modelleri, kristalin yapısı,

fazları, tercihli yönelimleri, ortalama tane boyutu, kristallik derecesi ve kristal kusurları hakkında detaylı bilgiler verir. Cu_2O gibi ince filmlerin kristal yapısının incelenmesinde XRD analizi, filmin faz saflığını, kristal yapısını ve tercihli büyüme yönelimlerini belirlemede kritik önem taşır. Literatürde Cu_2O için karakteristik XRD pikleri, kübik kristal sistemine ait olup; en belirgin pikler genellikle (111), (200), (220) ve (311) düzlemlerine karşılık gelmektedir standart PDF kart (No:01–071–3645). Bu çalışmada gerçekleştirilen XRD ölçümleri, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında PANalytical EMPYREAN XRD sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan parametreler Çizelge 3.3'te verilmiştir. Farklı deneysel koşullar altında (sıcaklıklar: 30 ^oC ve 70 ^oC; SILAR döngü sayıları: 10, 20 ve 40) cam ve FTO alt tabanlar üzerinde büyütülen Cu_2O ince filmler incelenmiştir. Elde edilen kırınım desenleri, standart Cu_2O PDF kart (No:01–071–3645) referans verileriyle karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

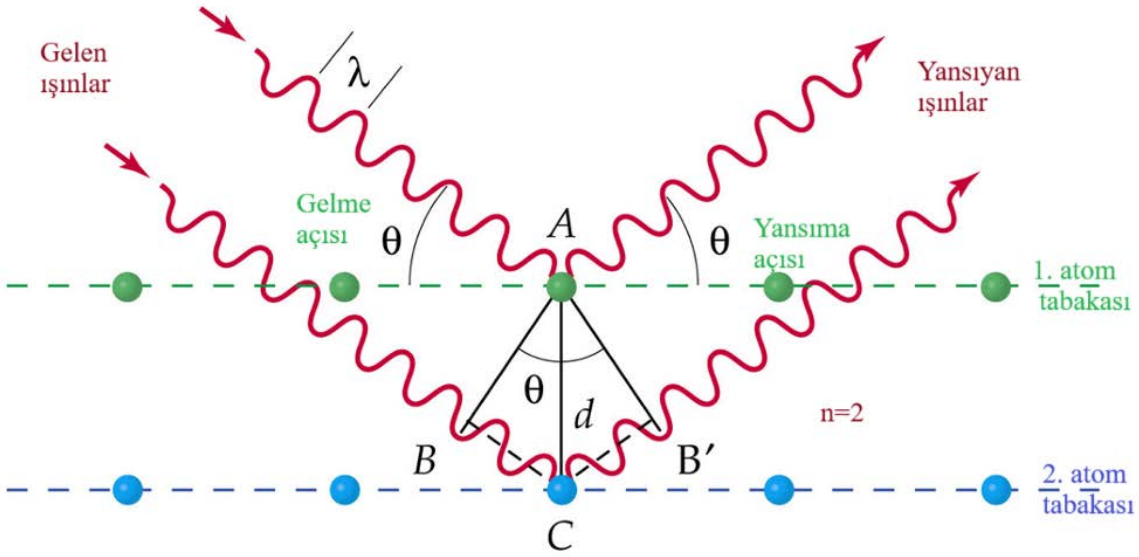


Şekil 3.3. PANalytical, EMPYREAN XRD

Çizelge 3.3. XRD ölçüm parametreleri

Parametre	Değer
X-ışını kaynağı	Cu-$K\alpha$ (λ=1.5406 Å)
Çalışma voltajı aralığı	20-50 kV
Çalışma akım aralığı	5-60 mA
Tarama aralığı (2θ)	20°-80°
Tarama hızı	2°/dakika

X-ışını kırınımının temelini oluşturan Bragg Yasası, 1913 yılında William Henry Bragg ve oğlu William Lawrence Bragg tarafından formüle edilmiştir. Bu yasa, kristal düzlemlerinden yansıyan X-ışınlarının yapıcı girişim koşulunu tanımlar. Bragg yasası 1.9 denklemi ile ifade edilir. Burada, n kırınım derecesini (tam sayı), λ X-ışınının dalga boyunu, d kristal düzlemleri arasındaki mesafeyi ve θ gelen X-ışını ile kristal düzlemi arasındaki açıyı (Bragg açısı) temsil etmektedir. Bragg yasasına göre, gelen X-ışınları kristal düzlemleri tarafından elastik saçılmaya uğrar ve bu saçılmalar, yalnızca belirli açılarda (θ) girişim oluşturarak kırınım deseninde gözlenen pikleri meydana getirir. Kırınım açılarından elde edilen veriler, kristal düzlemleri arasındaki mesafenin (d) hesaplanmasında kullanılır ve bu da kristal yapının belirlenmesine olanak sağlar.



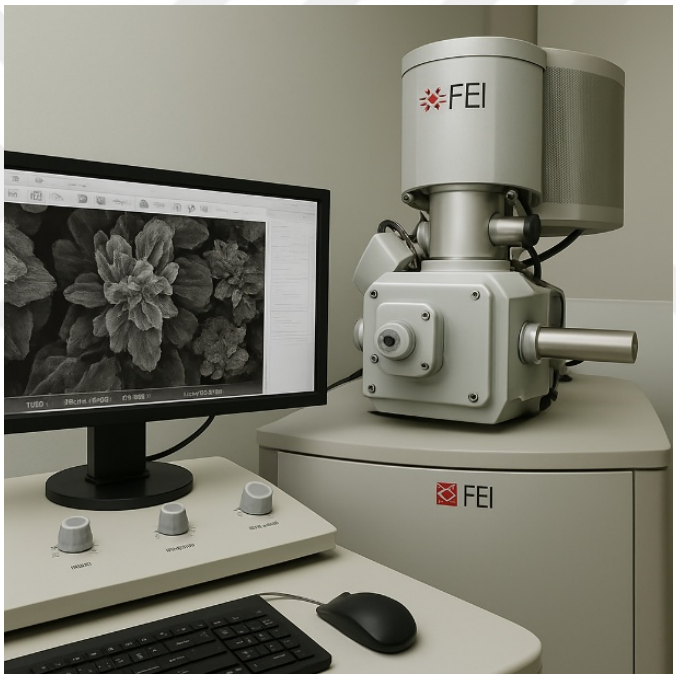
Şekil 3.4. Kristal düzlemlerinde X-ışını yansıması

Cu_2O ince filmlerinin XRD analizi, filmlerin kristal yapısının, kristallenme derecesinin ve tercihli yönelimlerinin belirlenmesinde kritik önem taşır. Bu parametreler, Cu_2O ince filmlerin elektriksel, optik ve fotovoltaik özelliklerini doğrudan etkiler. Elde edilen XRD verilerinden, 1.10'da verilen Debye-Scherrer denklemi kullanılarak ortalama kristal boyutu hesaplanabilir.

3.2.2. Alan Emisyon Taraması Elektron Mikroskobu (FE-SEM)

Öncelikle, boşluk ortamında özel bir elektron kaynağı tarafından elektronlar üretilmiştir. Bu elektronlar, bir elektrik alan yardımıyla belirli bir hıza ulaşacak şekilde ivmelendirilmiş ve ardından elektromanyetik lensler kullanılarak incelenecek örnek üzerine ince bir demet halinde odaklanmıştır. Elektron demetinin örnek yüzeyine çarpması sonucu, yüzeyden çeşitli türlerde elektronlar saçılmıştır. Bu saçılan elektronlar arasında özellikle ikincil elektronlar, özel bir algılayıcı (detektör) tarafından toplanmıştır. İncelenen bölgenin her noktasından toplanan ikincil elektron miktarı, gönderilen ilk elektron demetiyle ilişkilendirilerek örneğin yüzey haritası oluşturulmuştur. Elde edilen veriler bilgisayar ortamında görsel olarak işlenmiş ve görüntüye

dönüştürülmüştür. Bu yöntem sayesinde, örneklerin yüzey yapısına ilişkin detaylı bilgiler elde edilmiştir. Bu çalışmada, Cu_2O ince filmlerinin karakterizasyonu, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan FEI Quanta 650 Field Emission SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, FTO veya cam alt tabanlar üzerinde kaplanmış Cu_2O ince filmler küçük parçalara ayrılarak SEM analizi için hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler cihazın numune odasına yerleştirilmiş ve ortam yüksek vakum koşullarına getirilmiştir. Elektron tabancasından çıkan yüksek enerjili elektronlar, numune yüzeyine odaklanarak tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı büyütme oranlarında (50.000x–100.000x) elde edilen görüntüler aracılığıyla, farklı sıcaklıklarda (30 ^oC ve 70 ^oC) ve farklı SILAR döngü sayılarında (10, 20 ve 40) hazırlanan Cu_2O filmlerin yüzey morfolojileri incelenmiştir. Bu görüntüler üzerinden şekli, dağılımı, film homojenliği, gözeneklilik ve pürüzlülük gibi parametreler detaylı şekilde analiz edilmiştir. (Şekil 3.5)



Şekil 3.5. FEI Quanta 650 Field Emission SEM

3.2.3. Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, SILAR yöntemi ile üretilen Cu_2O ince filmlerin optik karakterizasyonu, Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarında bulunan Perkin Elmer UV/vis Lambda 2S spektrofotometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Filmlerin optik analizi, 300–1100 nm dalga boyu aralığında (ultraviyole ve görünür bölge) yürütülmüştür. Bu aralık, Cu_2O'nun temel soğurma kenarını ve bant geçişlerini kapsamaktadır. Öncelikle, temiz alt tabanlar kullanılarak sistem kalibre edilmiş ve bu adım, alt tabanın optik katkısını elimine ederek yalnızca Cu_2O filminin optik özelliklerinin ölçülmesini sağlamıştır. Monokromatik ışığın Cu_2O ince film ile etkileşimi incelenmiş; yansıma ve kırılma etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu varsayımıyla esas

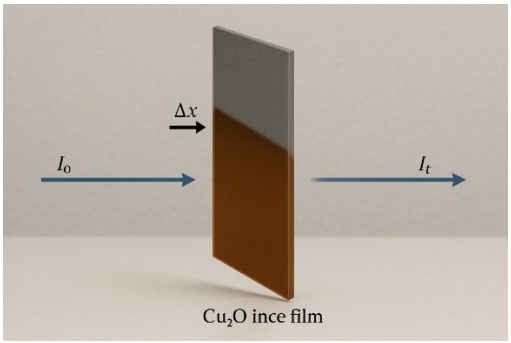
olarak soğurma olayı üzerine odaklanılmıştır. Ardından, tüm filmlerin optik geçirgenlik ve soğurma değerleri ölçülmüştür. Bu değerler kullanılarak, yansıma, yasak enerji aralığı, kırılma indisi, sönüm katsayısı, soğurma katsayısı ile reel ve imajiner dielektrik katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 3.6. Perkin Elmer UV/vis Lambda 2S spektrofotometresi

3.2.3.1. Işığın İnce Filmlerle Etkileşimi

Tek renkli bir ışın demeti bir ince film yüzeyine düştüğünde, kırılma, soğurma ve yansıma olayları meydana gelir. Işık, madde içerisinden geçişi sırasında ardışık olarak birden fazla katmandan geçer. Her bir katmandan geçişte, ışığın şiddeti kademeli olarak azalır; ancak bu azalma, gelen ışığın şiddeti ile katmandan geçen ışığın şiddeti arasındaki oranın sabit kalması ilkesine dayanır. Bu teorik yaklaşımda, soğurma katsayısı (α), ışık şiddetinden bağımsız olarak değerlendirilir ve doğrudan üzerine ışık gönderilen filmin özgün optik özelliklerini yansıtır. Matematiksel olarak, Δx kalınlığındaki bir filmden geçen ışığın şiddeti, -ΔI kadar azalır.



Şekil 3.7. İnce film üzerine gelen ışığın temsili soğurma gösterimi

Bu mekanizma, ışığın madde içindeki zayıflamasının temel prensibini oluşturur. Işığın her katmandan geçişi sırasında meydana gelen şiddet azalması, malzemenin iç yapısı ve optik özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlar. Gelen ışığın şiddeti ile katmandan geçen ışığın şiddeti

arasındaki oranın sabit kalması, soğurma katsayısının nesnel bir ölçüt olarak kullanılmasına olanak tanır. Bu yaklaşım, malzemelerin optik karakterizasyonunda temel bir analiz yöntemi olarak kabul edilmektedir. Söz konusu mekanizma, ışığın madde içindeki yolculuğunu mikroskobik düzeyde tanımlar. Her bir katman, ışığın enerjisinin belirli bir kısmını emerek, geçen ışığın şiddetini kademeli olarak azaltır. Bu süreç, malzemelerin optik davranışlarını anlamak için kritik bir yaklaşım sunar. Böylece, aşağıdaki denklem elde edilir:

$$-\Delta I = I - I_o = I_o \alpha \Delta x \tag{3.2}$$

Bu denklemden soğurma katsayısı (α), şu şekilde ifade edilebilir:

$$\alpha = -\frac{1}{I_o}\frac{\Delta I}{\Delta x} \tag{3.3}$$

Eğer Δx kalınlığındaki katmanları daha ince bir diferansiyel ele alırsak, ışığın her katmandan geçerken soğurulma oranı şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{dI}{I_o} = -\alpha dx \tag{3.4}$$

Katmanlardan geçen ışığın şiddetindeki azalmayı hesaplayabilmek için bu eşitliğin integralini alırsak, şu denklem elde edilir:

$$I_{\mathrm{T}} = I_o\, e^{-\alpha x} \tag{3.5}$$

Bu denklem, Lambert tarafından formüle edilmiş olup, Soğurma Yasası olarak adlandırılmaktadır.
Soğurma katsayısı, ışık şiddeti I(λ) ve ortamda alınan yol x ile şu şekilde ifade edilebilir:

$$\alpha = \frac{1}{I(\lambda)}\frac{dI(\lambda)}{dx} \tag{3.6}$$

Burada, I(λ) ışık şiddetini ve x ortam içinde alınan yolu göstermektedir Yansıma katsayısı, dik açıyla gelen ışık için şu şekilde ifade edilir:

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \tag{3.7}$$

Burada, n_1 ve n_2 ortamların kırılma indisleri olup, R yansıma katsayısını temsil etmektedir. Yansıma katsayısının hesaba katılması durumunda, x kalınlığındaki filmin içine giren ışığın şiddeti şu şekilde yazılabilir:

$$I = (1 - R)I_0 \tag{3.8}$$

Burada, I filmin içine giren ışığın şiddetini ve I_o gelen ışığın şiddetini temsil etmektedir. Filmin içerisindeki elektrik yükleri ile etkileşerek filmin sonuna ulaşan ışığın şiddeti ise şu şekilde ifade edilir:

$$I = I_0(1 - R)e^{-\alpha x} \tag{3.9}$$

Filmden çıkan ışığın şiddeti, aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

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

Filmin içine geriye yansıyan ışığın şiddeti ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$I = R(1 - R)I_0 e^{-\alpha x} \tag{3.11}$$

Filmin içerisinden geçen ışığın iç katmanlardan da yansıdığı dikkate alındığında, toplam geçirgenlik şu denklemle bulunabilir:

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha x}}{1-R^2 e^{-2\alpha x}} \tag{3.12}$$

Burada, T toplam geçirgenliktir. Bu denklemden soğurma katsayısını çektiğimizde şu denklem elde edilir:

$$\alpha = -\frac{1}{x} ln\left[-\frac{(1-R)^2+\sqrt{(1-R)^2+4R^2T^2}}{2TR^2}\right] \tag{3.13}$$

3.2.3.2. Optiksel Sabitlerin Hesaplanması

Perkin Elmer UV-vis Lamda 2S spektrofotometresi kullanılarak elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda soğurma katsayısı (α), optik soğurma (A), optik geçirgenlik (%T), sönüm katsayısı (k), yansıma katsayısı (R), kırılma indisi (n), dielektrik sabiti (ε_1) ve imajiner dielektrik sabiti (ε_2) hesaplanmıştır.

Filmden çıkan ışığın şiddetini hesaplamak için kullanılan (3.11) denkleminde $I/I_o=T_s/T_o$ ve $d=t_f$ değişikliği yapıldığında, aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{T_s}{T_o} = (1-R)^2 e^{-\alpha t_f} \tag{3.14}$$

Bu denklemden, soğurma katsayısı (α) şu şekilde ifade edilebilir:

$$\alpha = -\frac{1}{t_f} ln\left(\frac{T_s}{T_o}\right) \tag{3.15}$$

Burada t_f film kalınlığını, T_o spektrofotometreden gelen ışığın şiddetini ve T ışığın filmden geçtikten sonraki sepektrofotometre tarafından ölçülen şiddetini temsil etmektedir. Soğurma (A) veya optik yoğunluk denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$A = \log_{10}\left(\frac{T_s}{T_o}\right) \tag{3.16}$$

Optik geçirgenliği (T) optik soğurma (A) cinsinden ifade etmek istenirse, $T_o/T_s=T$ olarak kabul edildiğinde, aşağıdaki denklem elde edilir:

$$T = 10^{-A} \tag{3.17}$$

Burada, A spektrofotometreden elde edilen optik soğurma değerini, T ise spektrofotometreden elde edilen optik geçirgenliği (%T) ifade etmektedir. Sönüm katsayısı (k), soğurma katsayısı (α) cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \tag{3.18}$$

(3.15) denkleminden yararlanarak, yansıma katsayısı (R) şu şekilde hesaplanabilir:

$$R = 1 - \left[\left(\frac{T_s}{T_0}\right) e^{\alpha t_f}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.19}$$

Kırılma indisi (n) ise şu denklemle bulunabilir:

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \tag{3.20}$$

Dielektrik sabiti ε, reel dielektrik sabiti ε_1 ve imajiner dielektrik sabiti ε_2 toplamı olarak ifade edilebilir.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \tag{3.21}$$

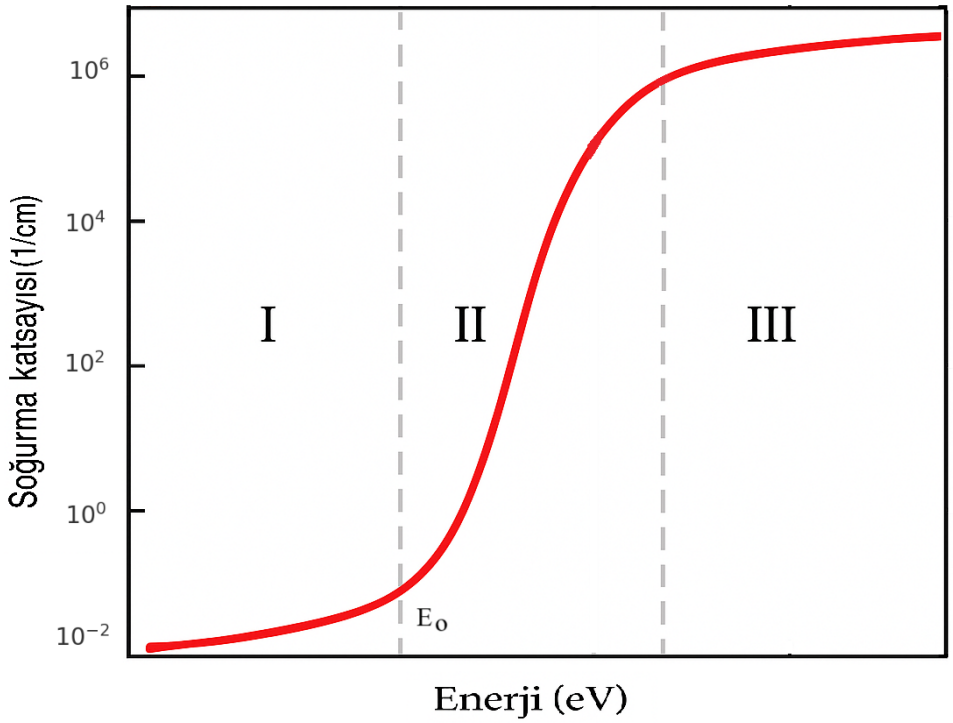
Burada, reel ve imajiner dielektrik sabitleri şu şekilde ifade edilir:

$$\varepsilon_1 = n^2 + k^2 \tag{3.22}$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \tag{3.23}$$

3.2.3.3. Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi

Yarıiletken malzemelerin optik özellikleri, esas olarak elektronik bant yapısı ve enerji geçişleri tarafından belirlenir. Soğurma katsayısının enerji ile değişim grafiği, malzemenin elektronik yapısını anlamak için kritik bir araç olup, üç temel bölümde incelenebilir. Şekil 3.8'de gösterilen grafikte, ilk bölümde (I), amorf yapıya sahip kristal kusurlarından kaynaklanan düşük enerjili elektron durumları gözlenir. Bu bölgede, yapısal düzensizlikler nedeniyle lokalize elektron enerji durumları bulunur ve bu enerji seviyeleri düşük enerjili ışığın soğurulmasına neden olur. Yapısal kusurlar, malzemenin optik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip temel faktörlerden biridir. İkinci bölümde (II), yarıiletkenin en karakteristik özelliği olan yasak enerji aralığı yer alır. Bu bölge, valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki enerji geçişinin başladığı kritik enerji aralığını temsil eder. Elektronların temel enerji geçiş mekanizması bu bölgede gözlenir ve malzemenin optik ve elektronik özellikleri belirginleşir. Yasak enerji aralığının genişliği, malzemenin yarıiletken özelliklerini doğrudan etkiler. Bu doğrusal bölge, bir doğru ile sabitlenerek x-eksenine kadar uzatılır. Doğrunun x-ekseni ile kesiştiği nokta, yani $(\alpha hv)^2 = 0$ olduğu nokta, malzemenin yasak enerji aralığını (E_g) verir. Üçüncü bölümde (III), yüksek enerjili elektron geçişlerinin gerçekleştiği alan yer alır. Valans bandından iletkenlik bandına doğru doğrudan elektronik geçişler meydana gelir; yüksek enerjili fotonlar elektronları daha yüksek enerji seviyelerine transfer eder. Bu bölge, malzemenin güçlü soğurma karakteristiğini sergiler ve optik davranışın en yoğun olduğu alanı oluşturur.



Şekil 3.8. Bir yarıiletkenin Soğurma katsayısı-Enerji grafiği

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. SILAR Yöntemi ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin X-ışını Kırınım (XRD) Özelliklerinin İncelenmesi

X-ışınları, kristal yapılı malzemelerin analizinde yaygın olarak kullanılan temel bir tekniktir. İncelenen malzemeye belirli bir θ açısıyla gönderilen X-ışınları, kristal yapı içerisindeki atom düzlemleri tarafından kırınıma uğrar. Bu kırınım olayı, Bragg yasası (denklem 1.9) ile açıklanır ve matematiksel olarak ifade edilir. Bragg yasası, kristal yapının belirli düzlemlerinden yansıyan X-ışınlarının girişim koşullarını tanımlar. XRD deseni, malzemelerin yapısal karakterizasyonunda kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Bu yöntem aracılığıyla kristal yapının türü ve simetrisi, birim hücre parametreleri (*a, b, c*), kristal düzlemleri arası mesafeler (*d*), malzemedeki fazların tanımlanması, kristallenme derecesi, kristal boyutu, tanecik yönelimi ve kimyasal kompozisyon gibi çok sayıda yapısal bilgiye ulaşmak mümkündür. Cu_2O ince filmleri kübik kristal yapıya sahip olduğundan, bu yapının örgü parametreleri eşittir ($a = b = c$). Bu nedenle, kristal düzlemleri arası mesafe (*d*), kübik sistem için geçerli olan özel bir eşitlik aracılığıyla hesaplanabilir. XRD analizi ile elde edilen bu yapısal bilgiler, Cu_2O ince filmlerin özelliklerinin anlaşılmasında ve uygulamalara uygunluklarının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

$$\frac{1}{d^2_{(hkl)}} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \qquad 4.1$$

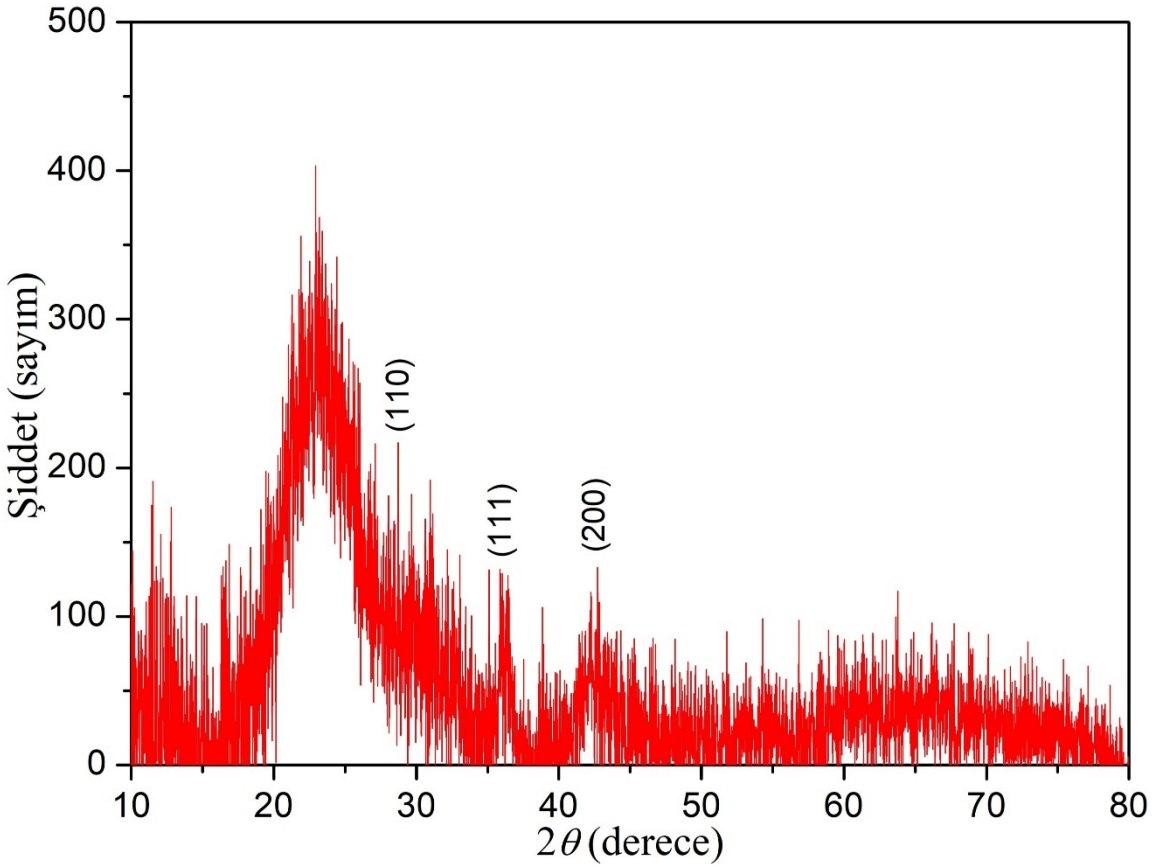
Cu_2O ince filmin yoğunluğu XRD verileri kullanılarak teorik olarak hesaplanabilir. Bu hesaplama, birim hücredeki atom sayısı ve hacim bilgisi kullanılarak yapılır. Bunlara ek olarak, (1.10)'da verilen Debye-Scherrer denklemi kullanılarak malzemenin kristalit boyutu hesaplanır.

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmleri ekonomik ve çevre dostu bir yöntem olan SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Film üretiminde başlangıç malzemesi olarak bakır sülfat pentahidrat ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) kullanılmıştır. Filmler, farklı alt tabanlar [Cam ve Flor Katkılı Kalay Oksit (FTO)] üzerinde, düşük sıcaklık koşullarında (30 ^oC ve 70 ^oC) kaplanmıştır. SILAR yönteminde, film kalınlığını ve yapısal özellikleri kontrol edebilmek amacıyla farklı sayılarda daldırma döngüleri (10, 20 ve 40 döngü) uygulanmıştır. Her bir döngüde alt tabanlar, belirli sürelerde sırasıyla katyonik ve anyonik çözeltilere daldırılarak Cu_2O ince filmlerin büyümesi sağlanmıştır. Elde edilen Cu_2O ince filmlerin kristal yapısı ve faz analizi, X-ışını Difraksiyonu (XRD) tekniği kullanılarak incelenmiştir. XRD ölçümleri, geniş bir açı aralığında ($2\theta = 10^o - 80^o$) ve 3°/dakika tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler, filmlerin kristal yapısının ve tercihli yönelimlerinin belirlenmesini sağlamıştır. Farklı alt tabanlar ve üretim parametrelerinin Cu_2O ince filmlerin yapısal özellikleri üzerindeki

etkisini sistematik olarak değerlendirmek amacıyla XRD desenlerinden elde edilen veriler analiz edilmiştir. Böylece, uygulama alanlarına yönelik en uygun üretim parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

4.1.1. Cam Alt Taban Üzerinde 30 ^{o}C Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin XRD Özelliklerinin İncelenmesi

Şekil 4.1'de, 30 ^{o}C sıcaklıkta ve 10 daldırma döngüsü kullanılarak cam alt taban üzerinde SILAR yöntemiyle büyütülen Cu_2O ince filmin XRD deseni görülmektedir. XRD deseninde, $2\theta = 29{,}56^{o}$, $2\theta = 36{,}17^{o}$ ve $2\theta = 42{,}76^{o}$ açılarına karşılık gelen (hkl) yansıma düzlemleri sırasıyla (110), (111) ve (200) olarak belirlenmiştir. Bu düzlemler literatürde de verilmiştir (Wang, 2011). 30 ^{o}C gibi düşük bir sıcaklıkta ve 10 daldırma döngüsünde üretilen bu filmde, belirgin bir tercihli pik oluşumu gözlenmemiştir. Buna rağmen tespit edilen bu küçük pikler, filmin polikristal bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 15°–35° açı aralığında alt tabandan (cam) kaynaklanan amorf bir yapı gözlenmiştir. Bu durum, literatürde de rapor edilmiştir (Altındemir ve Gümüş, 2020). Tespit edilen piklerin analizi, düşük sıcaklık ve az sayıda daldırma döngüsü koşullarında üretilen Cu_2O ince filmin karakteristik yapısına uygun kristal özellikler sergilediğini, ancak kristalleşme sürecinin henüz başlangıç aşamasında olduğunu işaret etmektedir. Bütün piklerin Cu_2O'nin kübik fazına ait olduğu, herhangi bir ikincil faz oluşumuna rastlanmadığı belirlenmiştir. XRD deseninde elde edilen piklere karşılık gelen 2θ açıları, düzlemler arası mesafe (d), maksimum yarı tam genişlik (FWHM, β), kristalit boyutu (D), birim hücre hacmi (V) ve örgü parametreleri (a, b, c) gibi değerler bulunarak ve hesaplanarak Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Arka planda gözlenen gürültü seviyesi ve bazı piklerin düşük şiddette olması, filmin yeterince bir kalınlığa ulaşamadığını işaret etmektedir. Sonuç olarak, düşük sıcaklıkta (30 ^{o}C) ve 10 daldırma döngüsü ile SILAR yöntemi kullanılarak kübik yapıda ve polikristal fazda Cu_2O ince filmin üretildiği görülmüştür. Elde edilen verilerin, Cu_2O için referans alınan PDF kartı (No: 01–071–3645) verileriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



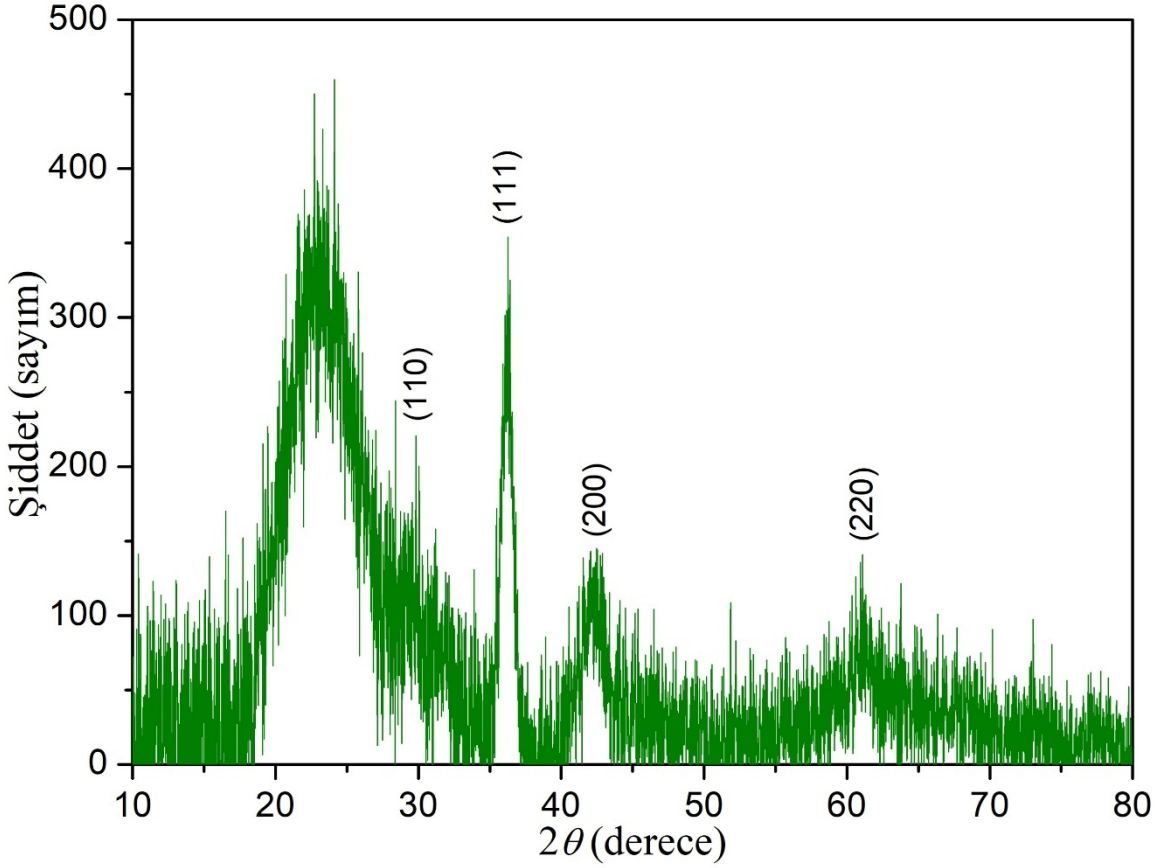
Şekil 4.1. 30 °C'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni

Çizelge 4.1. 30 °C'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	*d* (Å)	*a=b=c* (Å)	*2θ* (°)	*d* (Å)	*a=b=c* (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	*D* (Å)	(hkl) düzlemi
29,57	3,018	4,269	29,56	3,019	4,269	77,80	8,4317	9,7	(110)
36,43	2,464	4,269	36,17	2,481	4,297	79,34	1,7259	48,4	(111)
42,31	2,134	4,269	42,76	2,113	4,226	75,47	2,5151	33,9	(200)

Şekil 4.2'de, 30 °C sıcaklıkta ve 20 daldırma döngüsü kullanılarak cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni verilmiştir. XRD deseninde, 2θ = 29,84°, 2θ = 36,17°, 2θ = 42,18° ve 2θ = 61,09° açı değerlerine karşılık gelen (hkl) düzlemleri sırasıyla (110), (111), (200) ve (220) olarak belirlenmiştir. En yüksek şiddetli pik, (111) düzlemine ait olup, filmin bu yönde tercihli büyüme gösterdiğini ifade etmektedir. Bu durum, artan daldırma döngüsü sayısının filmin kristallenme derecesini iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, 20 daldırma döngüsünde de 15°–35° açı aralığında alt tabandan (cam) kaynaklanan amorf bir yapı gözlenmiştir. XRD deseninden elde edilen veriler kullanılarak gözlenen ve hesaplanan *2θ* açıları, düzlemler arası mesafe (*d*),

maksimum yarı tam genişlik (*FWHM*, β), kristalit boyutu (*D*), birim hücre hacmi (V) ve örgü parametreleri (*a, b, c*) gibi değerler bulunarak ve hesaplanarak Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Bu değerlerin, Cu_2O'un referans PDF kartı (No: 01–071–3645) ile uyum içinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, 30 ^oC sıcaklıkta ve 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin kübik yapıda ve polikristal fazda olduğu tespit edilmiştir.

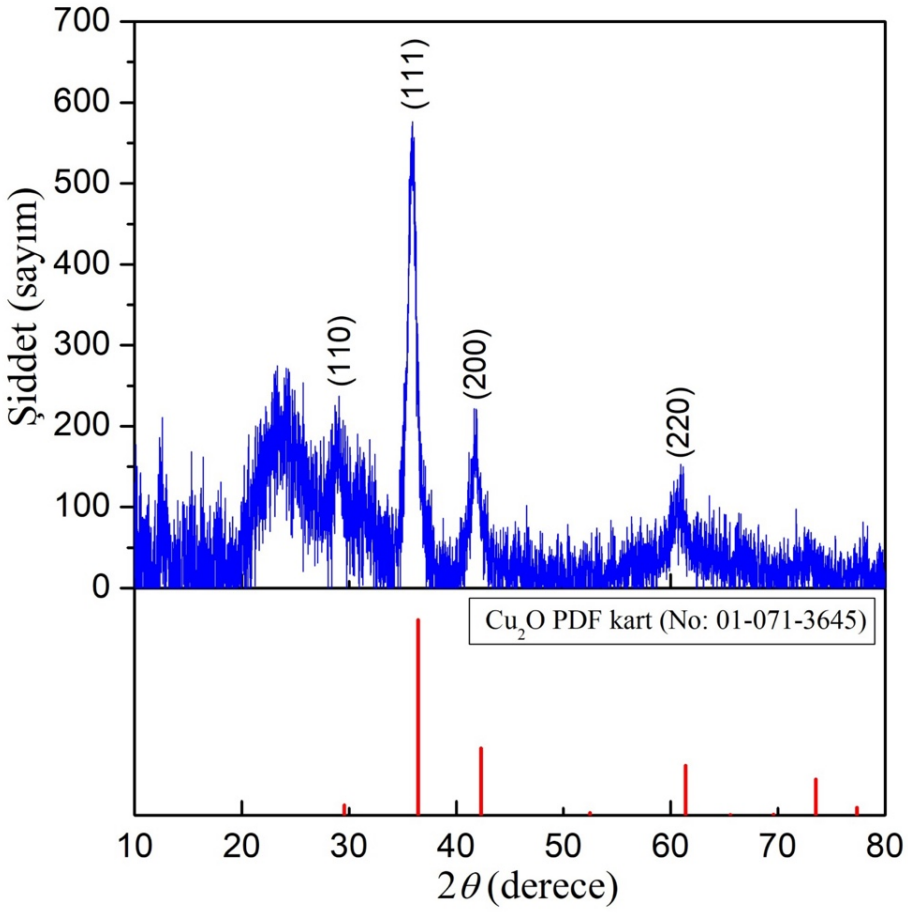


Şekil 4.2. 30 ^oC'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu2O ince filmin XRD deseni

Çizelge 4.2. 30 ^oC'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	*d* (Å)	*a=b=c* (Å)	2θ (°)	*d* (Å)	*a=b=c* (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	*D* (Å)	(hkl) düzlemi
29,57	3,018	4,269	29,84	2,968	4,197	73,93	4,9623	16,6	(110)
36,43	2,464	4,269	36,17	2,481	4,297	79,35	1,0187	82,0	(111)
42,31	2,134	4,269	42,18	2,135	4,270	77,85	2,2135	38,5	(200)
61,38	1,509	4,269	61,09	1,511	4,273	78,01	7,9908	11,5	(220)

Şekil 4.3'te, 30 ^{o}C sıcaklıkta ve 40 daldırma döngüsü kullanılarak cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni sunulmuştur. Bu daldırma döngüsünde XRD deseninde, 2θ = 29,85^{o}, 2θ = 36,04^{o}, 2θ = 41,87^{o} ve 2θ = 61,17^{o} açı değerlerinde pikler gözlenmiştir. Bu piklerin sırasıyla (110), (111), (200) ve (220) düzlemlerine karşılık geldiği belirlenmiştir. XRD deseninde gözlenen en yüksek şiddetli pik, 2θ = 36,04^{o} açısında yer alan (111) düzlemine aittir. Bu pik, diğer piklere kıyasla çok daha belirgin ve şiddetli olup, filmin kristallenme derecesinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. 30 ^{o}C sıcaklıkta ve tüm daldırma döngülerinde gözlenen piklerin yalnızca Cu_2O'un kübik fazına ait olması ve başka fazlara ilişkin piklerin bulunmaması, film büyütme parametrelerinin faz saflığı açısından uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, pik şiddetlerindeki artış ve keskinleşme, daldırma döngüsü sayısındaki artışla birlikte kristallenme derecesinin arttığını göstermektedir. 40 daldırma döngüsü, daha kalın ve kristal kalitesi yüksek Cu_2O ince filmlerin elde edilmesini sağlamıştır. XRD deseninden elde edilen veriler kullanılarak gözlenen ve hesaplanan (2θ, d, β, D, V, a, b, c) değerleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Bu değerlerin, Cu_2O'un referans PDF kartı (No: 01–071–3645) ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, 30 ^{o}C sıcaklıkta ve 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin kübik yapıda ve polikristal fazda olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.3. 30 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni ve standart Cu_2O'nun XRD deseni PDF kartı (No: 01–071–3645)

Çizelge 4.3. 30 °C'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

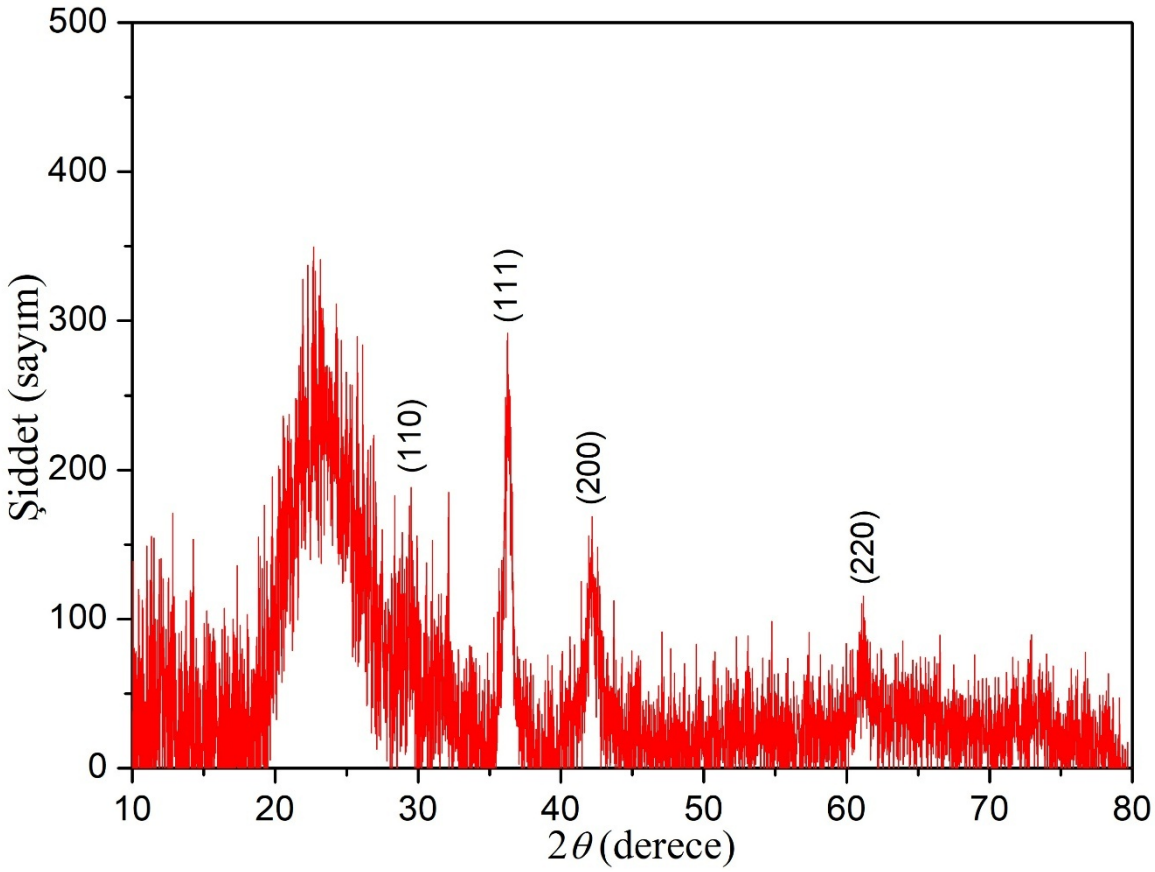
Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	D (Å)	(hkl) düzlemi
29,57	3,018	4,269	29,85	3,059	4,326	80,95	6,0457	13,6	(110)
36,43	2,464	4,269	36,04	2,502	4,333	81,35	0,9564	87,3	(111)
42,31	2,134	4,269	41,87	2,160	4,320	80,62	1,2824	66,3	(200)
61,38	1,509	4,269	61,17	1,523	4,307	79,89	2,9673	31,1	(220)

30 °C sıcaklıkta, 10, 20 ve 40 daldırma döngüsü kullanılarak cam alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kendi aralarındaki XRD sonuçları karşılaştırıldığında, filmlerde önemli yapısal değişimlerin meydana geldiği görülmüştür. XRD desenlerinden elde edilen verilere göre, (111) düzlemine ait pik şiddeti 10 daldırma döngüsünde 132, 20 daldırma döngüsünde 355 ve 40 daldırma döngüsünde 577 olarak belirlenmiştir. Daldırma döngüsü arttıkça filmlerin kristallilik derecesi artmıştır. 40 döngülü film en iyi kristallenmeyi ve en belirgin pik şiddetlerini göstermektedir. Daldırma döngüsü arttıkça (111) düzleminin tercihli yönelimi daha belirgin hale gelmiştir. Filmlerin kalınlığı arttıkça, cam alt tabanın amorf yapısından kaynaklanan geniş tepenin etkisi azalmıştır. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça (220) düzlemi gibi yüksek açılardaki pikler daha belirgin hale gelmiştir. Sonuç olarak, daldırma döngüsü sayısının artması, Cu_2O ince filmlerin kristallilik derecesini, yönelimini ve tanecik boyutunu olumlu yönde etkilemiştir. 40 döngülü film, referans Cu_2O yapısıyla en uyumlu XRD desenini göstermektedir.

4.1.2. Cam Alt Taban Üzerinde 70 °C Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin XRD Özelliklerinin İncelenmesi

SILAR yöntemi ile 70 °C sıcaklıkta ve 10 daldırma döngüsü kullanılarak cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni Şekil 4.4'te sunulmuştur. XRD deseninde, 2θ = 29,52°, 2θ = 36,28°, 2θ = 42,16° ve 2θ = 61,17° açı değerlerinde sırasıyla (110), (111), (200) ve (220) yansıma düzlemleri bulunmuştur. Bu koşullarda hazırlanan filmde, en şiddetli pik (111) düzlemine ait olup, tercihli yönelimin bu düzlem boyunca gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca, 15°–35° açı aralığında alt tabandan (cam) kaynaklanan amorf yapıya yine rastlanmıştır. Sıcaklığın (70 °C) artışıyla birlikte piklerin daha belirgin hale geldiği görülmüştür. XRD deseninde tespit edilen tüm piklerin Cu_2O'nun kübik fazına ait olduğu, herhangi bir ikincil faz oluşumunun gözlenmediği belirlenmiştir. XRD ölçümlerinden gözlenen ve hesaplanan parametreler (2θ, d, β, D, V, a, b, c) Çizelge 4.4'te verilmiştir. Arka plandaki gürültü seviyesinin azalması, piklerin daha keskin ve belirgin hale gelmesine katkı sağlamıştır. Sonuç olarak, SILAR yöntemi kullanılarak 70 °C sıcaklıkta ve 10 daldırma döngüsü ile büyütülen Cu_2O ince filmin kübik yapıda ve polikristal fazda

olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen XRD deseninden hesaplanan değerlerin, Cu_2O'nun PDF kartı (No: 01–071–3645) ile uyumlu olduğu görülmüştür.



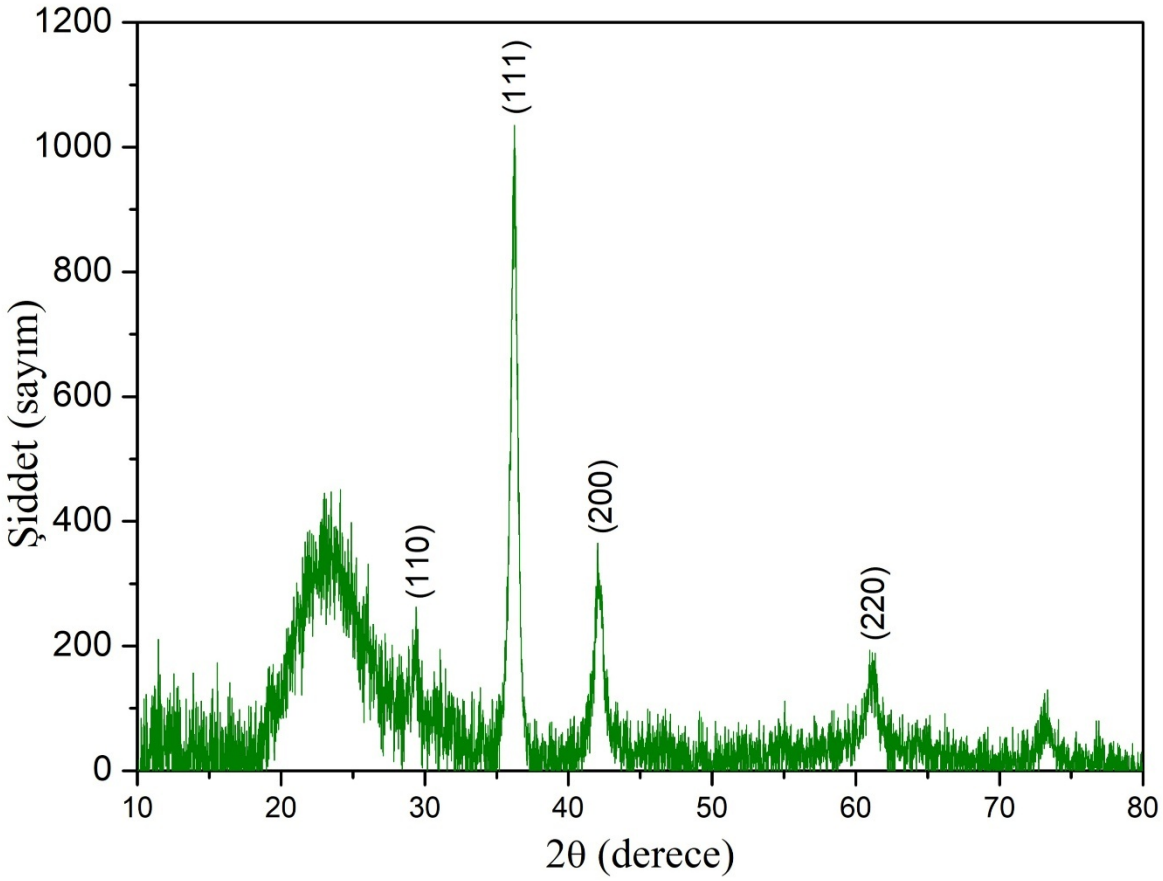
Şekil 4.4. 70 °C'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni

Çizelge 4.4. 70 °C'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	D (Å)	(hkl) düzlemi
29,57	3,018	4,269	29,52	2,987	4,224	75,36	5,9038	13,9	(110)
36,43	2,464	4,269	36,28	2,475	4,286	78,73	0,6655	125,6	(111)
42,31	2,134	4,269	42,16	2,142	4,284	78,62	1,0792	78,9	(200)
61,38	1,509	4,269	61,17	1,508	4,265	77,58	1,6171	57,1	(220)

SILAR yöntemi ile 70 °C sıcaklıkta ve 20 daldırma döngüsü kullanılarak cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni Şekil 4.5'te sunulmuştur. XRD deseni incelendiğinde, 2θ = 29,40°, 2θ = 36,22°, 2θ = 42,02°, 2θ = 60,98° ve 2θ = 73,35° açı değerlerinde sırasıyla (110), (111), (200), (220) ve (311) düzlemlerine ait yansımalar gözlenmiştir. Özellikle

büyük açı değerinde bulunan (311) pikinin ortaya çıkması, kristal yapının daha da geliştiğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. XRD deseninde en şiddetli pikin (111) düzlemine ait olduğu ve bu pikin belirgin bir şekilde artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, filmin (111) yöneliminde güçlü bir tercihli büyüme sergilediğini ve kristallenmenin önemli ölçüde iyileştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, XRD verilerinden gözlenen ve hesaplanan parametreler (2θ, d, β, D, V, a, b, c) Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Elde edilen bu değerlerin, Cu_2O'un PDF kartı (No: 01–071–3645) ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, 70 ^oC sıcaklıkta ve 20 daldırma döngüsü ile cam alt taban üzerinde büyütülen Cu_2O ince filmin kübik yapıda ve polikristal fazda olduğu tespit edilmiştir.

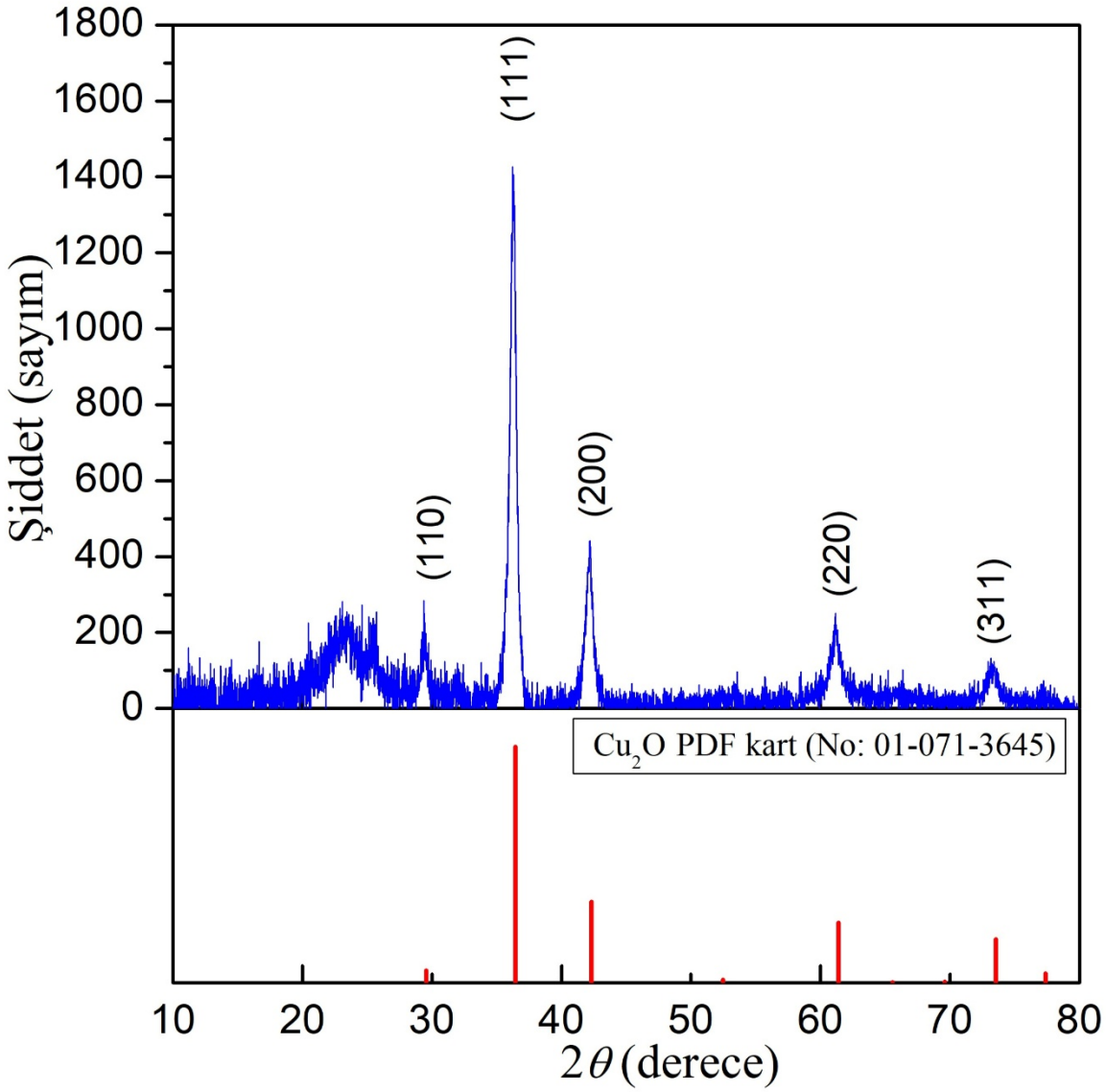


Şekil 4.5. 70 ^oC'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni

Çizelge 4.5. 70 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	D (Å)	(hkl) düzlemi
29,57	3,018	4,269	29,40	3,045	4,306	79,84	5,6150	14,6	(110)
36,43	2,464	4,269	36,22	2,480	4,295	79,22	0,6596	126,7	(111)
42,31	2,134	4,269	42,02	2,145	4,290	78,95	0,8710	97,7	(200)
61,38	1,509	4,269	60,98	1,517	4,291	79,00	1,3722	67,2	(220)
73,53	1,287	4,269	73,35	1,292	4,285	78,68	3,1771	31,2	(311)

SILAR yöntemi ile 70 ^{o}C sıcaklıkta ve 40 daldırma döngüsü kullanılarak cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni Şekil 4.6'da sunulmuştur. XRD deseni incelendiğinde, 2θ = 29,38^{o}, 2θ =36,22^{o}, 2θ = 42,18^{o}, 2θ = 61,16^{o} ve 2θ = 73,15^{o} açı değerlerinde sırasıyla (110), (111), (200), (220) ve (311) düzlemlerine ait yansımalar gözlenmiştir. XRD deseninde en yüksek şiddetli pikin (111) düzlemine ait olduğu belirlenmiş, bu döngüde (111) düzlemine ait pik en yüksek şiddet değerine ulaşmıştır. Bu durum, tercihli yönlenmenin belirgin şekilde güçlendiğini ve kristallenmenin önemli ölçüde iyileştiğini göstermektedir. Ayrıca, XRD deseninden elde edilen gözlenen ve hesaplanan parametreler (2θ, d, β, D, V, a, b, c) Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Elde edilen bu değerlerin, Cu_2O'nun PDF kartı (No: 01–071–3645) ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, 70 ^{o}C sıcaklıkta ve 40 daldırma döngüsü ile cam alt taban üzerinde büyütülen Cu_2O ince filmin kübik yapıda, polikristal fazda olduğu ve aynı zamanda en yüksek kristallenme derecesine sahip olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.6. 70 °C'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni ve standart Cu_2O'nun XRD deseni PDF kartı (No: 01–071–3645)

Çizelge 4.6. 70 °C'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	D (Å)	(hkl) düzlemi
29,57	3,018	4,269	29,38	3,036	4,293	79,12	0,6911	118,8	(110)
36,43	2,464	4,269	36,22	2,477	4,290	78,95	0,6481	129,0	(111)
42,31	2,134	4,269	42,18	2,143	4,286	78,73	0,7319	116,3	(200)
61,38	1,509	4,269	61,16	1,515	4,285	78,68	1,2366	74,6	(220)
73,53	1,287	4,269	73,15	1,292	4,285	78,68	1,0652	92,9	(311)

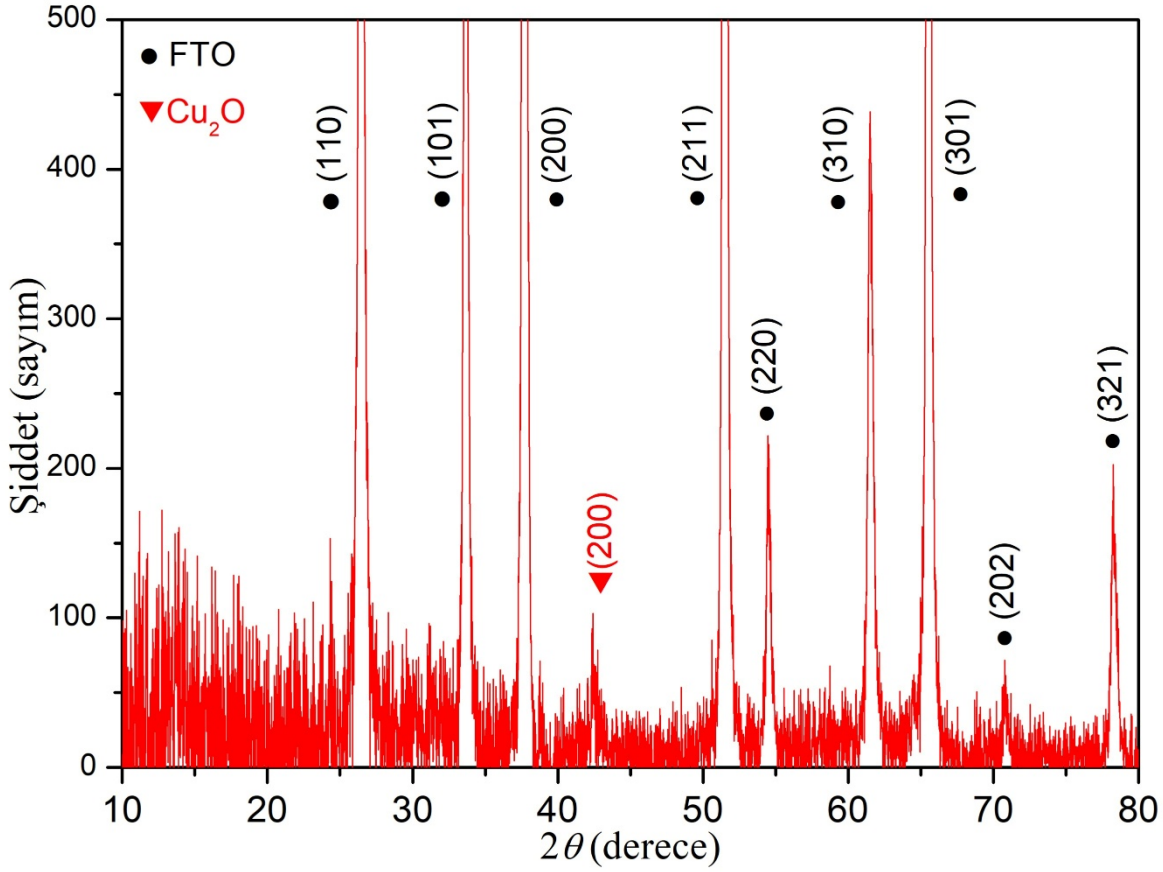
Daldırma döngüsü 10'dan 20'ye ve 40'a çıktıkça, kristallilik derecesi önemli ölçüde artmıştır. Bu, pik şiddetlerindeki artıştan ve piklerin daha keskin hale gelmesinden anlaşılmaktadır. Üç desende de (111) düzlemi baskın kristal yönelimini göstermektedir. Daldırma döngüsü arttıkça (111) pikinin diğer piklere oranla şiddeti artmış, bu da (111) yöneliminin güçlendiğini göstermektedir. 10 döngü en düşük pik şiddetlerini, 20 döngü orta düzeyde pik şiddetlerini, ancak 10 döngüye göre önemli bir artış göstermektedir. 40 döngü ise en yüksek pik şiddetlerini göstermektedir. Daldırma döngüsü arttıkça (220) ve (311) gibi ikincil pikler daha belirgin hale gelmiştir. Bu, malzemenin daha iyi kristallendiğini ve kristal örgünün daha iyi oluştuğunu gösterir. Düşük açılardaki (10° – 30°) amorf zeminin etkisi daldırma döngüsü arttıkça azalmıştır. Bu, film kalınlığının artmasıyla cam alt tabandan gelen katkının azaldığını gösterir. 70 ^oC'de daldırma döngüsü sayısı arttıkça Cu_2O ince filmlerin kristallilik derecesi önemli ölçüde artmış ve (111) düzleminde tercihli yönelim güçlenmiştir. 40 daldırma döngüsünde elde edilen film, en yüksek kristallilik derecesine ve en iyi tanımlanmış Cu_2O yapısına sahiptir.

Ayrıca, 30 ^oC ve 70 ^oC sıcaklıklarda elde edilen Cu_2O ince filmler karşılaştırıldığında, sıcaklığın kristal yapı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu belirlenmiştir. 30 ^oC'de hazırlanan filmler düşük şiddetli ve geniş pikler gösterirken, 70 ^oC'de hazırlanan filmlerin daha keskin, yüksek şiddetli ve daha fazla pik içerdiği gözlenmiştir. Bu durum, sıcaklık artışının kristallenmeyi teşvik ettiğini ve daha düzenli bir kristal yapı oluşumunu desteklediğini kanıtlamaktadır. Hem düşük hem yüksek sıcaklıklarda daldırma döngüsü sayısının artırılması film kalitesine katkı sağlamış, ancak sıcaklık artışı bu gelişimi daha belirgin hale getirmiştir. Özellikle 70 ^oC'de ve yüksek daldırma döngülerinde hazırlanan filmlerin daha kalın, daha büyük kristalit boyutuna sahip ve kristal yapı açısından daha düzenli olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, sıcaklık ve daldırma döngüsü sayısının Cu_2O ince filmlerin kristal yapısı ve kalitesi üzerinde doğrudan etkili parametreler olduğu, sıcaklığın artırılmasıyla birlikte özellikle daldırma döngüsü sayısının da artmasının daha kaliteli, kübik yapıda ve polikristal fazda Cu_2O ince filmlerin büyütülmesini sağladığı belirlenmiştir.

4.1.3. FTO Alt Taban Üzerinde 30 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin XRD Özelliklerinin İncelenmesi

30 ^oC'de ve 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni Şekil 4.7'de verilmiştir. XRD deseninde, 2θ = 42,42^o açı değerinde (200) düzlemine ait pik gözlenmiştir. XRD deseninde tespit edilen diğer şiddetli pikler ise FTO alt tabana ait olup, bu pikler FTO'nun kendi kristal yapısını yansıtmakta ve Cu_2O piklerine göre daha yüksek şiddete sahiptir. FTO alt taban kullanılarak üretilen bu filmde, Cu_2O'ya ait baskın bir pik görülmemiştir. Bu durum, kristalleşmenin henüz yeni başladığını ve belirgin bir tercihli yönelimin oluşmadığını göstermektedir. Bu nedenle, kristalleşmenin tercihli bir yönelim belirlemek için yetersiz olduğu söylenebilir. Ayrıca, XRD deseni sonucu elde edilen veriler kullanılarak gözlenen ve hesaplanan

(2θ, d, β, D, V, a, b, c) değerler Çizelge 4.7'de sunulmuştur. Elde edilen bu değerlerin, Cu_2O'un PDF kartında (PDF No: 01–071–3645) verilen değerlerle uyum içinde olduğu görülmüştür.

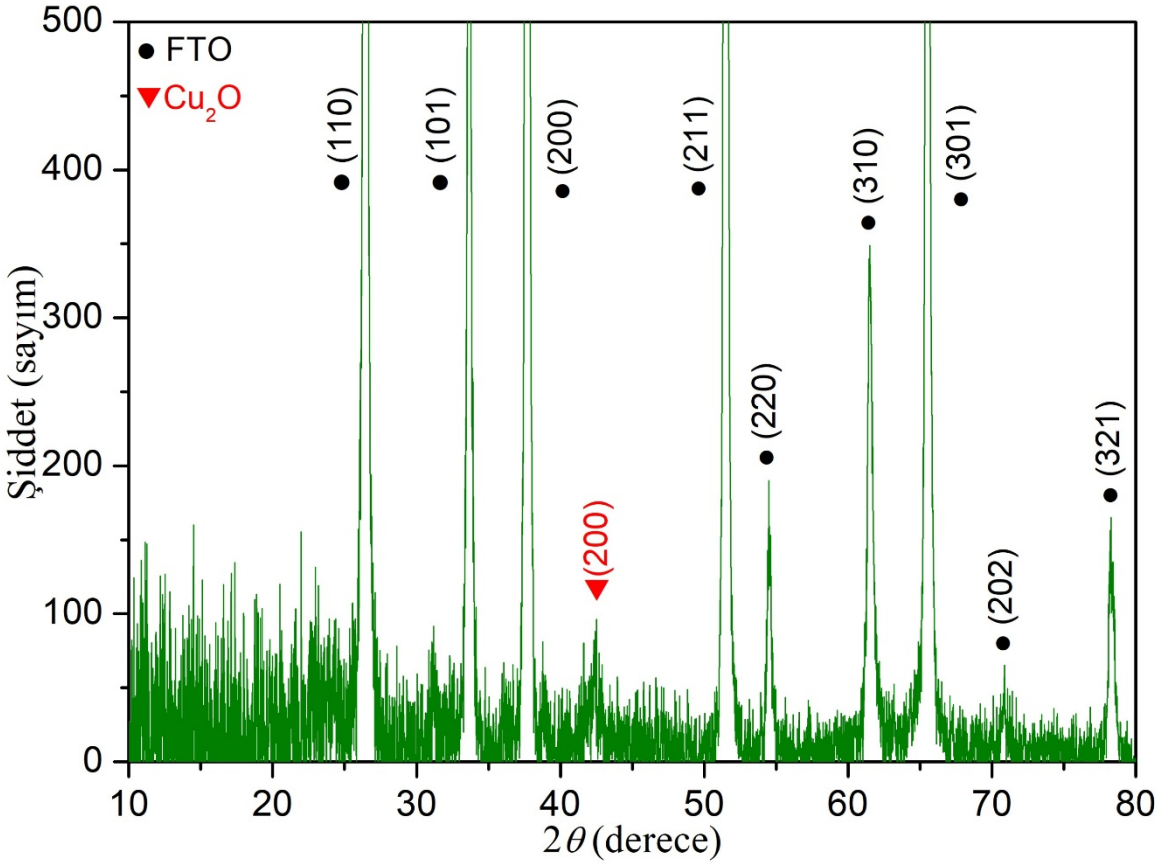


Şekil 4.7. 30 °C'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni

Çizelge 4.7. 30 °C'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	D (Å)	(hkl) düzlemi
42,31	2,134	4,269	42,42	2,129	4,258	77,19	7,5525	11,3	(200)

30 °C'de ve 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni Şekil 4.8'de verilmiştir. XRD deseninde, 2θ = 42,49° açı değerinde (200) düzlemine ait pik gözlenmiştir. FTO alt taban kullanılarak üretilen bu filmde de Cu_2O'ya ait baskın bir pik görülmemiştir. Bu durum, kristalleşmenin yavaş gerçekleştiğini ve belirgin bir tercihli yönelimin oluşmadığını göstermektedir. XRD deseni sonucunda elde edilen veriler kullanılarak gözlenen ve hesaplanan (2θ, d, β, D, V, a, b, c) değerler Çizelge 4.8'de verilmiştir. Elde edilen bu değerlerin, Cu_2O'un PDF kartında (No: 01–071–3645) verilen değerlerle uyum içinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.8. 30 °C'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni

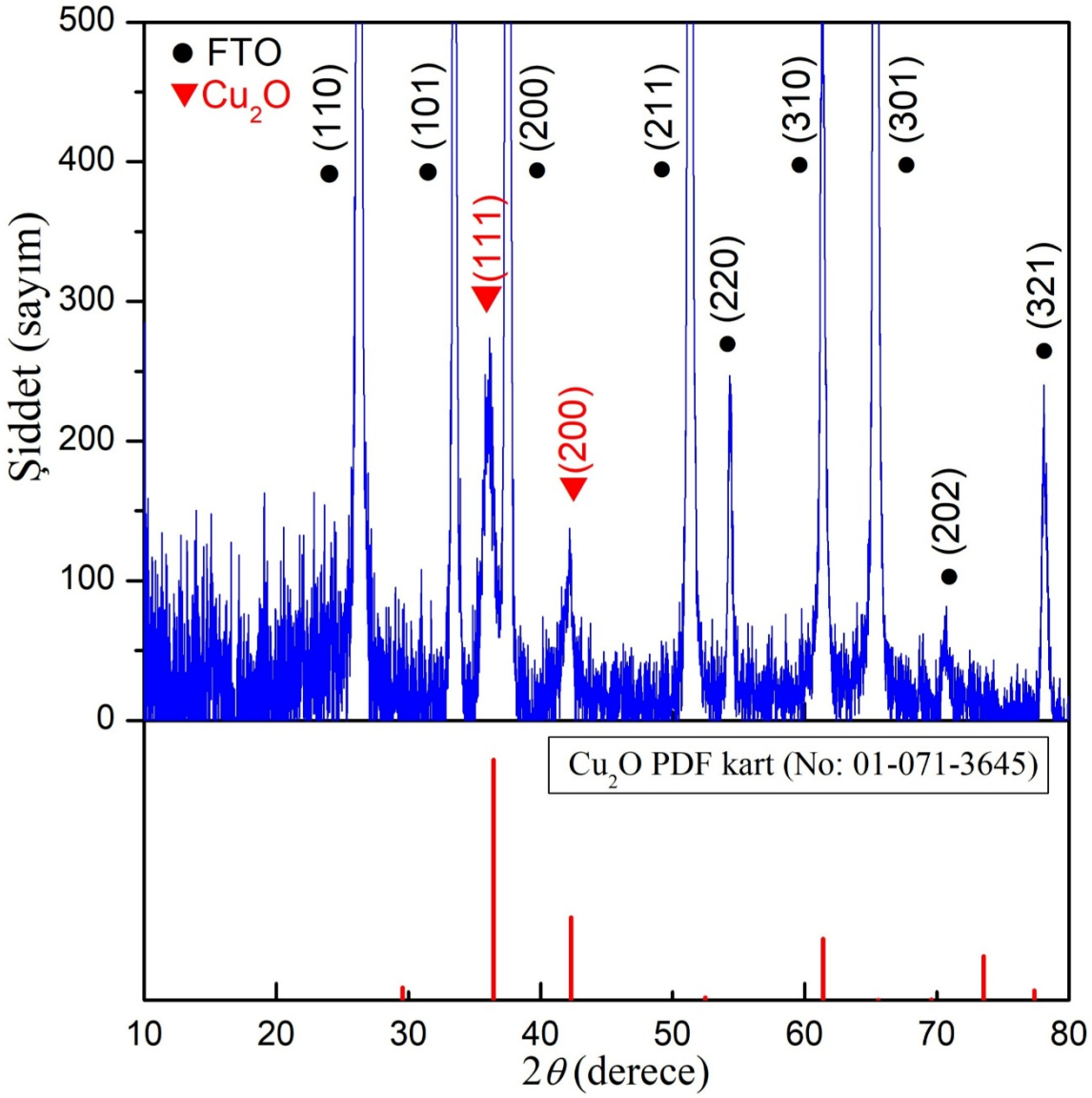
Çizelge 4.8. 30 °C'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	D (Å)	(hkl) düzlemi
42,31	2,134	4,269	42,49	2,133	4,266	77,63	7,2240	11,8	(200)

30 °C'de ve 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni Şekil 4.9'da verilmiştir. XRD deseninde, 2θ = 36,14° ve 2θ = 42,21° açı değerlerinde sırasıyla (111) ve (200) düzlemlerine ait pikler gözlenmiştir. Özellikle daldırma döngü sayısının artırılmasıyla birlikte 2θ = 36,14°'deki (111) düzlemi pikinin belirginleştiği ve baskın pik olarak ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum, Cu_2O filminin kristal kalitesi ve kalınlığının arttığını göstermektedir. XRD desenindeki pik şiddetinin artışı ve pik genişliğinin daralması, kristal boyutunda büyüme ve kristallenme derecesinde iyileşmeye işaret etmektedir. Ayrıca, XRD verilerinden hesaplanan ortalama kristalit boyutları (D) da artış eğilimi göstererek kristal büyümesinin desteklendiğini ortaya koymuştur. Daldırma döngü sayısının artırılması, Cu_2O ince filmlerinde (111) düzlemi boyunca tercihli yönelimin güçlenmesine katkıda bulunmuştur. Elde

edilen (2θ, d, β, D, V, a, b, c) değerleri Çizelge 4.9'da verilmiş olup, bu değerlerin Cu_2O'un PDF kartı (No: 01–071–3645) ile uyum içinde olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, FTO alt tabanın yüzey özellikleri ve kristal yapısının, Cu_2O filminin büyümesi üzerinde etkili olduğu, özellikle ilk aşamalarda FTO piklerinin Cu_2O piklerine baskın geldiği görülmüştür. Ancak artan daldırma döngüsü ile birlikte Cu_2O kristallenmesinin belirginleşmesi, film-alt taban etkileşimlerinin aşılabildiğini ve Cu_2O kristallerinin daha düzenli bir yapı oluşturabildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, FTO alt taban üzerinde 30 ^oC sıcaklıkta ve farklı daldırma döngüleri kullanılarak hazırlanan Cu_2O ince filmlerin XRD analizleri, film büyüme mekanizması ve kristal kalitesi üzerinde daldırma döngüsü sayısının belirleyici bir rol oynadığını göstermiştir. Düşük daldırma döngüsü (10 ve 20 döngü) uygulamalarında Cu_2O'ya ait piklerin düşük şiddette ve geniş bir şekilde gözlenmesi, kristalleşmenin henüz başlangıç aşamasında olduğunu ortaya koymuştur. Daldırma döngüsü sayısının 40'a çıkarılmasıyla birlikte, Cu_2O kristallerinin büyüdüğü, kristal yapının geliştiği ve özellikle (111) düzlemi yöneliminin belirginleştiği görülmüştür. Pik şiddetinin artması ve pik genişliğinin daralması, kristal kusurlarının azaldığını ve kristal boyutunun büyüdüğünü göstermektedir. Ayrıca FTO alt tabanın etkisinin, artan film kalınlığı ve kristal büyümesiyle birlikte azaldığı ve Cu_2O'nun kendine özgü kristal özelliklerinin daha baskın hale geldiği anlaşılmaktadır. FTO gibi yarıiletken yüzeylere sahip alt tabanlarda, yeterli daldırma döngüsü ile yüzey etkilerinin aşılabileceği ve yüksek kaliteli, iyi yönelimli Cu_2O filmler elde edilebileceği ortaya konulmuştur.



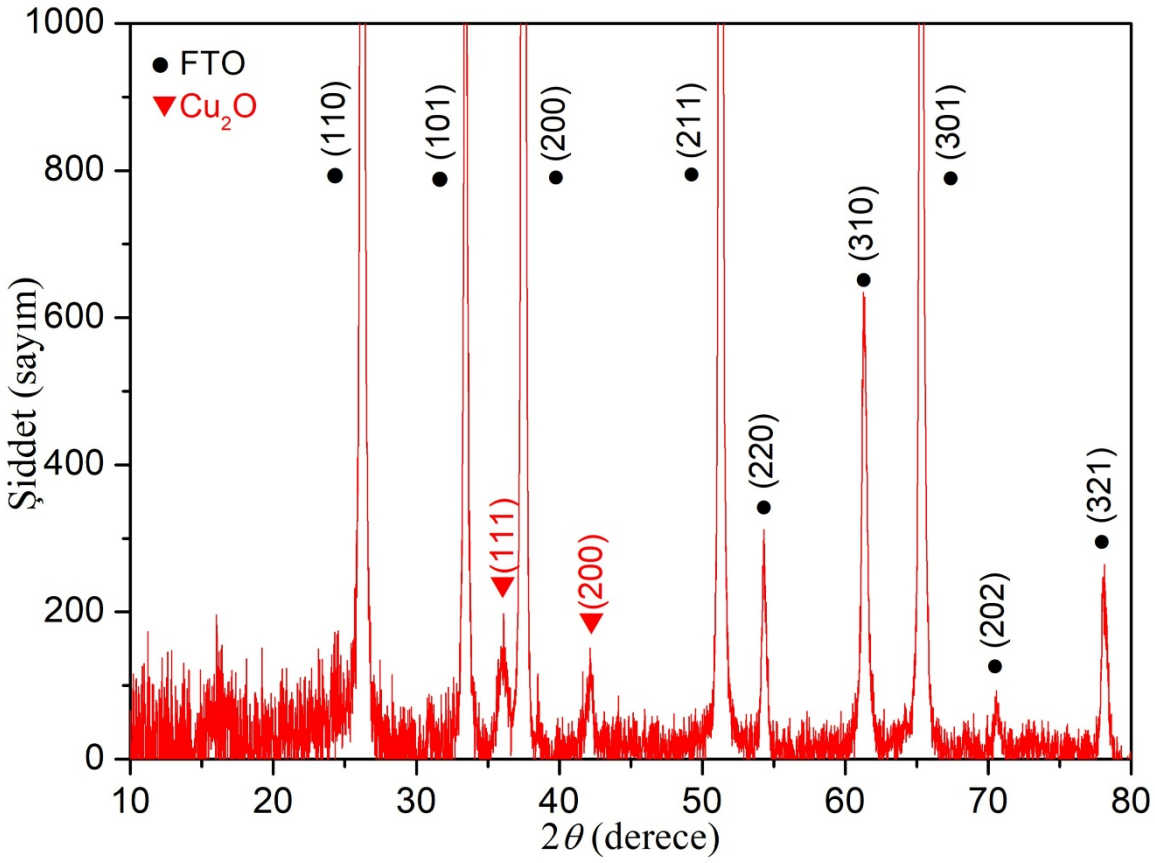
Şekil 4.9. 30 °C'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni ve standart Cu_2O'nun XRD deseni PDF kartı (No: 01–071–3645)

Çizelge 4.9. 30 °C'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	D (Å)	(hkl) düzlemi
36,43	2,464	4,269	36,14	2,493	4,318	80,50	0,7137	117,1	(111)
42,31	2,134	4,269	42,21	2,148	4,296	79,28	6,7854	12,5	(200)

4.1.4. FTO Alt Taban Üzerinde 70 ^{o}C Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin XRD Özelliklerinin İncelenmesi

70 ^{o}C'de ve 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni Şekil 4.10'da verilmiştir. XRD deseninde, 2θ = 36,09^{o} ve 2θ = 42,16^{o} açı değerlerinde sırasıyla (111) ve (200) düzlemlerine ait pikler gözlenmiştir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte, yalnızca 10 daldırma döngüsünde bile 2θ = 36,09^{o}'deki (111) düzlemine ait pik belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklığın kristallenme sürecini olumlu yönde etkilediğini ve daha iyi kristallenmiş bir Cu_2O yapısının oluşumunu desteklediğini göstermektedir. Ayrıca, (111) düzleminin baskınlığı, yüksek sıcaklık koşullarında Cu_2O kristallerinin belirli bir yönelim doğrultusunda büyüme eğilimi gösterdiğine ve tercihli yönelimin başladığına işaret etmektedir. Bununla birlikte, FTO alt tabanın yüzey morfolojisi ve kristal yapısının başlangıçta Cu_2O filminin büyümesini etkilediği, ancak sıcaklık artışıyla birlikte FTO alt tabanın etkisinin azaldığı ve Cu_2O kristallenmesinin daha belirgin hale geldiği anlaşılmaktadır. XRD deseni sonucunda elde edilen veriler kullanılarak gözlenen ve hesaplanan (2θ, d, β, D, V, a, b, c) değerler Çizelge 4.10'da sunulmuş olup, bu değerlerin Cu_2O'un PDF kartında (PDF No: 01–071–3645) verilen referans değerlerle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

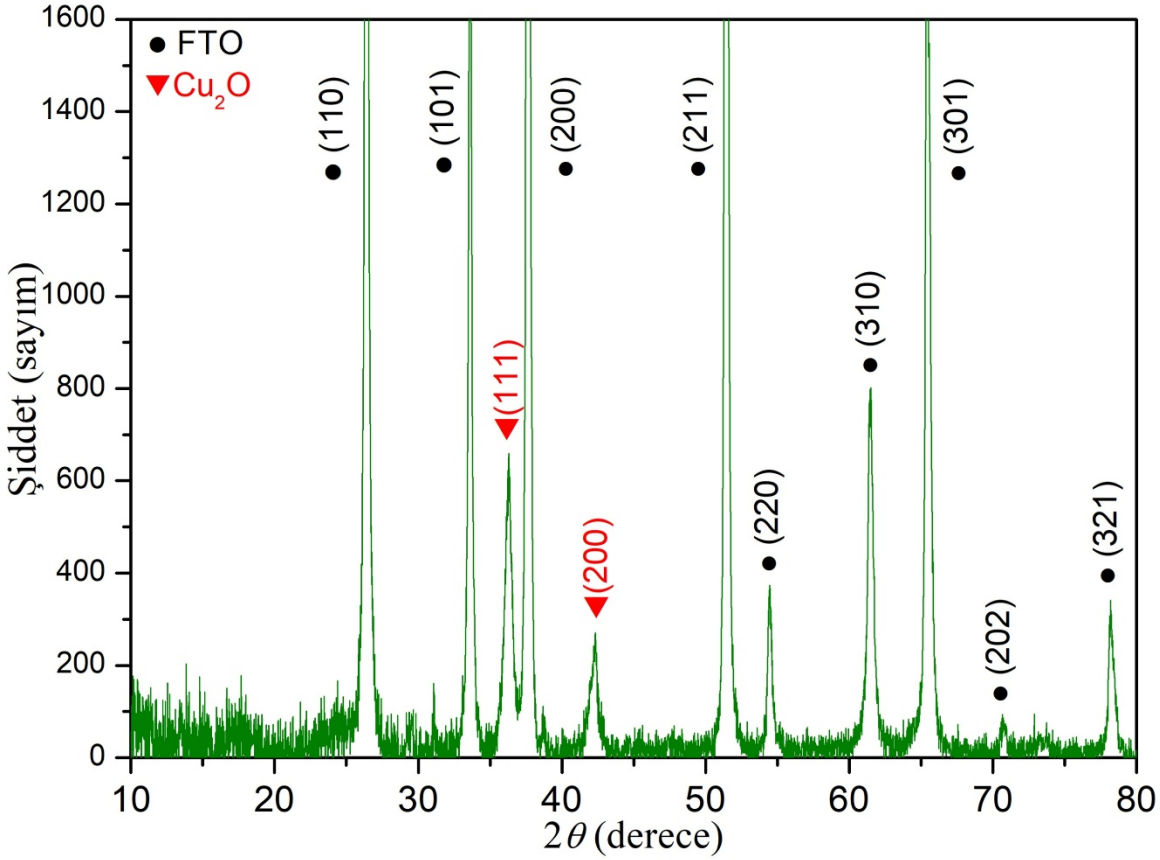


Şekil 4.10. 70 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni

Çizelge 4.10. 70 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	D (Å)	(hkl) düzlemi
36,43	2,464	4,269	36,09	2,494	4,319	80,56	0,9774	85,5	(111)
42,31	2,134	4,269	42,16	2,145	4,290	78,95	5,5975	15,2	(200)

70 ^{o}C'de ve 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni Şekil 4.11'de verilmiştir. XRD deseninde, 2θ = 36,29^{o} ve 2θ = 42,34^{o} açı değerlerinde sırasıyla (111) ve (200) düzlemlerine ait pikler gözlenmiştir. 20 daldırma döngü sayısı ve yüksek sıcaklık etkisiyle 2θ = 36,29^{o}'deki (111) düzlemine ait pikin şiddetinin belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklığın kristallenme sürecini olumlu yönde etkilediğini, Cu_2O filmlerinde (111) düzlemi boyunca belirgin bir tercihli yönelim oluşumunu desteklediğini ve kristal yapının geliştiğini göstermektedir. Ayrıca, artan daldırma döngü sayısının, kristal büyümesini ve film kalitesini iyileştirdiği anlaşılmaktadır. Başlangıçta FTO alt tabanın yüzey pürüzlülüğü ve kristal yapısının Cu_2O filminin büyüme davranışı üzerinde etkili olduğu görülse de sıcaklık ve döngü sayısındaki artışla birlikte FTO etkisinin azaldığı ve Cu_2O kristallenmesinin daha baskın hale geldiği belirlenmiştir. XRD deseni sonucunda elde edilen veriler kullanılarak gözlenen ve hesaplanan (2θ, d, β, D, V, a, b, c) değerler Çizelge 4.11'de sunulmuş olup, bu değerlerin Cu_2O'un PDF kartında (PDF No: 01–071–3645) verilen referans değerlerle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. 70 °C'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni

Çizelge 4.11. 70 °C'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

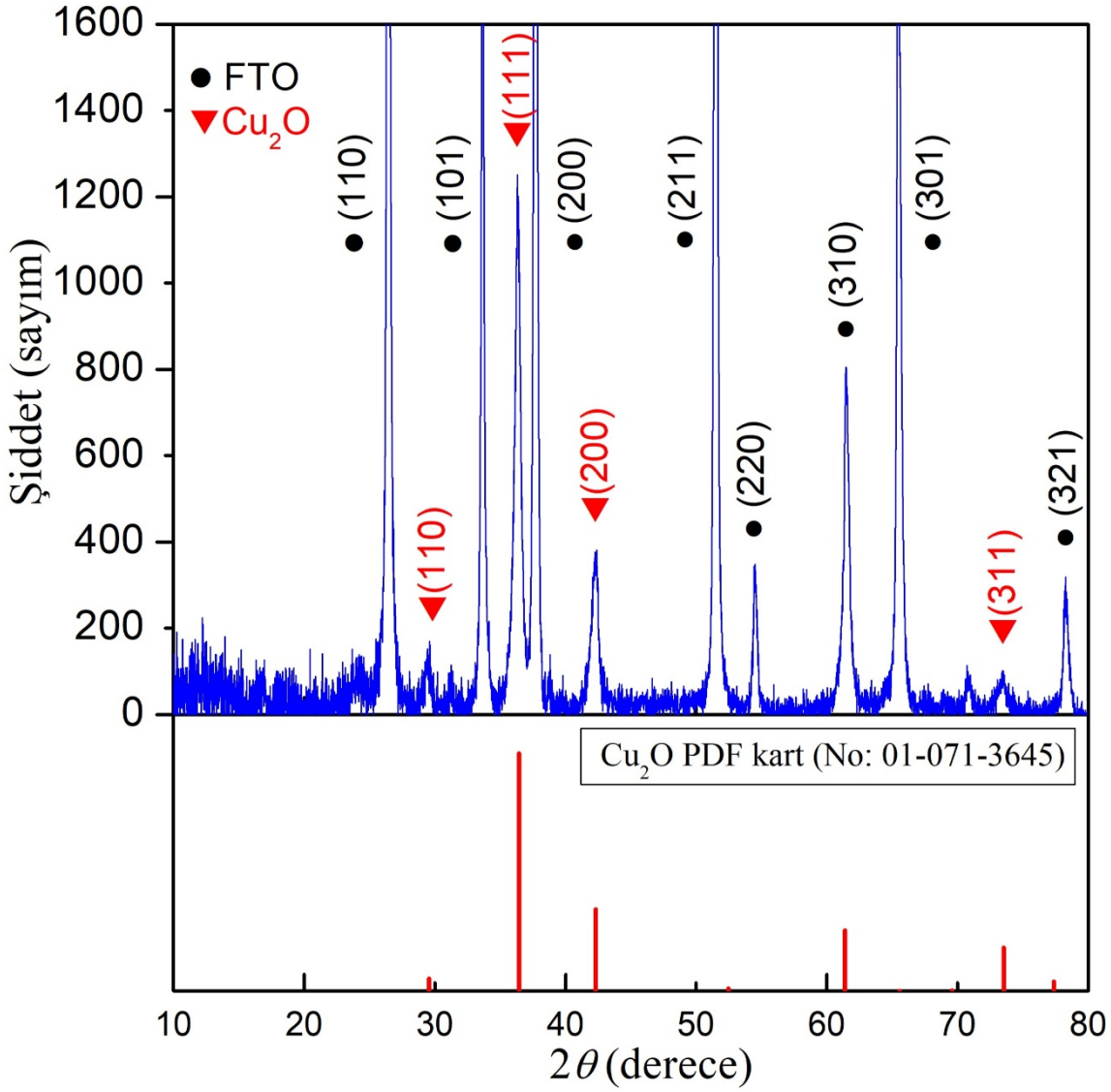
Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	D (Å)	(hkl) düzlemi
36,43	2,464	4,269	36,29	2,476	4,288	78,84	0,6154	135,8	(111)
42,31	2,134	4,269	42,34	2,140	4,280	78,40	5,0838	16,8	(200)

70 °C'de ve 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni Şekil 4.12'de verilmiştir. XRD deseninde, 2θ = 29,39°, 2θ = 36,33°, 2θ = 42,28° ve 2θ = 73,43° açı değerlerinde sırasıyla (110), (111), (200) ve (311) düzlemlerine ait pikler gözlenmiştir. 2θ = 36,33°'deki (111) düzlemine ait pik şiddetinin artığı ve filmin bu yönde güçlü bir tercihli yönelime sahip olduğunu görülmektedir. Ayrıca, birden fazla düzleme ait piklerin belirgin olarak gözlenmesi, filmin polikristal bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır. Piklerin şiddetindeki artış ve netlik, Cu_2O filminin kristal kalitesinin yükseldiğine işaret etmektedir. Artan daldırma döngüsü ve sıcaklıkla birlikte FTO alt tabanın yüzey ve kristal yapısının Cu_2O büyümesi üzerindeki etkisinin azaldığı, böylece Cu_2O kristallerinin daha düzenli ve yoğun bir yapıya

ulaşabildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, XRD deseni sonucu elde edilen veriler kullanılarak gözlenen ve hesaplanan (2θ, d, β, D, V, a, b, c) değerler Çizelge 4.12'de sunulmuştur. Elde edilen bu değerlerin, Cu_2O'un PDF kartında (No: 01–071–3645) verilen referans değerlerle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, FTO alt taban üzerinde 70 ^oC sıcaklıkta ve farklı daldırma döngüleri kullanılarak hazırlanan Cu_2O ince filmlerin XRD analizleri, sıcaklığın ve daldırma döngüsü sayısının film büyümesi ve kristal kalitesi üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Düşük daldırma döngüsü (10 döngü) uygulamasında, Cu_2O'ya ait (111) düzlemine karşılık gelen pikin belirgin ancak sınırlı şiddette gözlenmesi, kristalleşmenin başlangıç aşamasında olduğunu ve FTO alt taban etkisinin halen sürdüğünü göstermektedir. Daldırma döngüsü sayısının 20'ye çıkarılmasıyla, (111) düzlemi boyunca belirgin bir tercihli yönelim oluşmuş, kristal kalitesi artmış ve Cu_2O yapısının daha düzenli bir şekilde büyüdüğü anlaşılmıştır. 40 daldırma döngüsü uygulamasında ise, (110), (111), (200) ve (311) düzlemlerine ait piklerin belirgin bir şekilde ortaya çıkması, Cu_2O filminin polikristal bir yapıya ulaştığını ve kristal kusurlarının azaldığını göstermektedir. Pik şiddetlerinin artması ve pik genişliklerinin daralması, kristal boyutlarının büyüdüğünü ve kristal kusurlarının azaldığını işaret etmektedir. Ayrıca, artan film kalınlığı ve düzenli kristal büyümesi ile birlikte, FTO alt tabanın etkisinin azaldığı ve Cu_2O'nun özgün kristal özelliklerinin daha baskın hale geldiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, yarıiletken bir yüzeye sahip FTO alt tabanlar üzerinde, uygun sıcaklık ve yeterli daldırma döngüsü kullanılarak yüksek kaliteli, iyi yönelimli ve polikristal Cu_2O filmler elde edilebileceği ortaya konulmuştur.

Ayrıca hem cam hem de FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kristal yapısının, sıcaklık ve daldırma döngüsü sayısına doğrudan bağlı olarak geliştiği belirlenmiştir. 30 ^oC'de hazırlanan filmler, düşük kristal kalitesi ve geniş pikler sergilerken, 70 ^oC'de hazırlanan filmler daha keskin pikler, yüksek kristal şiddeti ve belirgin tercihli yönelim özellikleri göstermiştir. Daldırma döngüsü sayısının artırılması hem kristal boyutunun büyümesine hem de film kalitesinin iyileşmesine katkı sağlamıştır. Özellikle yüksek sıcaklık (70 ^oC) ve yüksek daldırma döngüsü birlikteliği, Cu_2O filmlerin polikristal yapıya ulaşmasını, kristal kusurlarının azalmasını ve filmlerin daha düzenli büyümesini desteklemiştir. Sonuçlar, sıcaklık ve daldırma döngüsü optimizasyonunun, SILAR yöntemi ile yüksek kaliteli, iyi kristallenmiş ve tercihli yönelim gösteren Cu_2O ince filmler elde etmek için kritik parametreler olduğunu açıkça ortaya koymuştur.



Şekil 4.12. 70 °C'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD deseni ve standart Cu_2O'nun XRD deseni PDF kartı (No: 01–071–3645)

Çizelge 4.12. 70 °C'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmin XRD değerleri

Standart Değerler PDF Kart (No:01-071-3645)			Ölçülen Değerler			Gözlenen ve Hesaplanan Değerler			
2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	2θ (°)	d (Å)	$a=b=c$ (Å)	V (Å^3)	*FWHM* (°)	D (Å)	(hkl) düzlemi
29,57	3,018	4,269	29,39	3,036	4,293	79,12	1,2489	65,8	(110)
36,43	2,464	4,269	36,33	2,472	4,281	78,45	0,4745	176,2	(111)
42,31	2,134	4,269	42,28	2,139	4,278	78,29	4,5811	18,6	(200)
73,53	1,287	4,269	73,43	1,289	4,275	78,12	8,0845	12,3	(311)

4.2. SILAR Yöntemi ile Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Cu_2O ince filmlerin yüzey morfolojisi, Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. SILAR yöntemiyle sentezlenen filmlere uygulanan morfolojik analiz, filmlerin yapısal özelliklerinin ayrıntılı biçimde incelenmesine olanak sağlamıştır. Bu karakterizasyon sayesinde film yüzeyinin homojenliği, tanecik boyutu dağılımı ve tanecik morfolojisi incelenmiştir. FE-SEM analizi, Cu_2O ince filmlerin yüzeysel özellikleri hakkında detaylı bilgiler sunmakla birlikte elde edilen bulgular filmlerin potansiyel uygulama alanlarının (örneğin fotovoltaik, sensör, fotokatalizör sistemleri) değerlendirilmesinde önemli bir referans oluşturmaktadır.

4.2.1. Cam Alt Taban Üzerinde 30 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi

30 ^oC'de ve 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmeli FE-SEM görüntüsü Şekil 4.13'te verilmiştir. Görüntüde, Cu_2O taneciklerinin birbiriyle bağlantılı ağsı bir yapı oluşturduğu gözlenmiştir. Film, oldukça gözenekli ve tam anlamıyla homojen olmayan bir morfolojiye sahiptir. Cam yüzeyi üzerinde oluşan küresel parçacıklar ile aralarındaki boşluklar, filmin spesifik bir yüzey alanına sahip olduğunu göstermektedir. Bu morfolojik yapı, Cu_2O ince filminin gaz sensörleri, fotokatalitik sistemler ile elektrokimyasal cihazlar gibi çeşitli teknolojik uygulamalarda avantaj sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

30 ^oC'de ve 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmedeki FE-SEM görüntüsü Şekil 4.14'te verilmiştir. Bu görüntüde, Cu_2O ince filminin tanecikleri arasındaki ağsı yapı daha belirgin hale gelmiş ve film daha yoğun bir görünüm sergilemiştir. Gözenekler halen mevcut olmakla birlikte, artan daldırma döngüsü sayısı ile birlikte gözenek boyutlarında bir azalma gözlenmiştir. Aynı zamanda yüzeydeki tanecik yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Bu durum, artan daldırma döngüsü sayısının film kalınlığı ve yoğunluğu üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Taneciklerin daha fazla yığılma eğilimi gösterdiği ve bazı bölgelerde daha büyük kümeler oluşturduğu görülmüştür. Bu değişimler, daldırma döngüsü sayısındaki artışın, filmin büyüme mekanizması ve yapısal gelişimi üzerinde önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır. Artan daldırma döngüsü ile birlikte tanecik boyutlarında bir artış gözlenmiştir. Bu durum, taneciklerin birleşme ve büyüme eğilimi gösterdiğini ve yüzeyde daha kompakt bir morfolojinin oluştuğunu ortaya koymaktadır.

30 ^oC'de ve 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmede elde edilen FE-SEM görüntüsü Şekil 4.15'te sunulmuştur. Bu örnekte, Cu_2O ince film daha yoğun bir ağ yapısı sergilemektedir. Tanecikler arasındaki bağlantılar daha belirgin hale gelmiş olup, gözenekli yapı önceki örneklere kıyasla korunmakla birlikte gözenek

boyutlarında bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, artan daldırma döngüsüyle birlikte boşlukların kademeli olarak dolduğunu göstermektedir. Ayrıca, tanecikler arasında yer yer yığılmalar meydana gelmiş ve bu bölgelerde belirgin kümeleşmeler oluşmuştur. Bu yapısal değişimler, yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur. Oluşan yapı, daha kalın ve kompakt bir morfolojiye sahip olup, daldırma döngüsü sayısındaki artışın film birikimi ve kalınlığı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

4.2.2. Cam Alt Taban Üzerinde 70 ^{o}C Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi

70 ^{o}C'de ve 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmedeki FE-SEM görüntüsü Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu görüntüde, Cu_2O ince filminin taneciklerinin yarı-küresel morfolojiye sahip olduğu, az miktarda ise çubuk benzeri yapılara rastlandığı görülmektedir. 70 ^{o}C sıcaklıkta büyütülen Cu_2O ince film, daha kompakt ve nispeten homojen bir tanecik dağılımına sahiptir. Bu gözlem, sıcaklığın kristal büyümesi ve yoğunlaşma süreci üzerindeki olumlu etkisini yansıtmaktadır. Elde edilen bu morfolojik yapı, 70 ^{o}C'de büyütülen Cu_2O ince filmin daha hızlı kristallenme ve büyüme kinetiği gösterdiğini, ayrıca yüksek sıcaklığın tanecik boyutu ile yüzey morfolojisi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

70 ^{o}C'de ve 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmede elde edilen FE-SEM görüntüsü Şekil 4.17'de verilmiştir. Görüntüde, Cu_2O filminin birbiriyle bağlantılı yarı küresel taneciklerden oluşan karmaşık bir ağ yapısı sergilediği gözlenmiştir. Film, önceki örneklere kıyasla daha kompakt bir morfoloji kazanmıştır. Ayrıca, filmin bazı bölgelerinde belirgin kümeleşmeler meydana gelmiştir. Bu morfolojik yapılanmanın yanı sıra, filmde gözenekli bir yapı da dikkat çekmektedir. Bu gözenekli yapı, filmin özgül yüzey alanını artırarak özellikle katalitik uygulamalar açısından avantaj sağlayabilecek bir özellik olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen bu morfolojik özellikler, yüksek sıcaklık ve artan daldırma döngüsü sayısının Cu_2O ince filminin kristal büyümesi ve yoğunlaşma kinetiği üzerinde doğrudan bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu koşullar altında daha kompakt ve homojen bir yapı elde edilmesi, taneciklerin daha hızlı birleşme ve yönelimli büyüme eğiliminde olduğunu göstermektedir.

70 ^{o}C'de ve 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmede elde edilen FE-SEM görüntüsü Şekil 4.18'de verilmiştir. 40 daldırma döngüsü sonucunda elde edilen film, önceki örneklere kıyasla çok daha yoğun ve kompakt bir morfoloji sergilemiştir. Cu_2O taneciklerinin daha fazla birleşerek kümeler oluşturduğu bu yapıda, film kalınlığında ve yoğunluğunda belirgin bir artış meydana gelmiştir. Film yüzeyinde daha büyük ve düzenli gözeneklerin varlığı dikkat çekerken, yüzeyin genel görünümü daha pürüzlü ve kompleks bir hal almıştır. Ek olarak, yüksek sıcaklıkta ve artan daldırma döngüsü sayısında Cu_2O film

büyümesinin belirgin bir yoğunlaşma ve yönlü kristal büyüme eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu tür büyüme mekanizması, filmin fonksiyonel özelliklerini doğrudan etkileyerek uygulama alanlarını genişletebilir.

4.2.3. FTO Alt Taban Üzerinde 30 ^{o}C Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi

30 ^{o}C'de ve 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmede alınan FE-SEM görüntüsü Şekil 4.19'da verilmiştir. Görüntü incelendiğinde, filmin yüzeyinde belirgin bir nanotel (nanowire) yapılanması gözlenmektedir. Bu nanoteller, birbirleriyle bağlantılı olarak ağsı bir yapı oluşturmakta ve oldukça homojen bir şekilde dağılmaktadır. Nanotellerin büyük ölçüde yüzeyin tamamını kapladığı görülmektedir. Bu ağsı morfoloji sayesinde film, yüksek düzeyde gözeneklilik sergilemekte ve buna bağlı olarak önemli ölçüde geniş bir yüzey alanı sunmaktadır. Bu morfolojik özellikler, Cu_2O filmin elektriksel iletkenliği, katalitik aktivitesi, gaz sensör performansı ve optik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olabilmektedir. Bu gözlemler, düşük sıcaklık ve sınırlı daldırma döngüsüyle elde edilen Cu_2O ince filmlerin özgün bir nanoyapılı morfoloji geliştirebildiğini ve bu yapıların fonksiyonel özellikler üzerinde belirleyici bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Özellikle nanotel ağ yapısı, yüksek yüzey alanı sağlaması nedeniyle Cu_2O filmlerin gaz algılama, fotokatalitik reaksiyonlar ve elektrokimyasal enerji sistemleri gibi uygulama alanlarındaki potansiyelini artırmaktadır.

30 ^{o}C'de ve 20 daldırma döngüsü ile FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmede alınan FE-SEM görüntüsü Şekil 4.20'de sunulmuştur. Görüntü incelendiğinde, nanotel yapısının önceki duruma göre daha yoğunlaştığı ve karmaşık bir ağ yapısı oluşturduğu görülmektedir. Nanoteller arasındaki bağlantıların arttığı ve bu bağlantıların daha kompakt bir yapının oluşmasına katkıda bulunduğu dikkat çekmektedir. Filmin yüzeyinde daha büyük gözenekler ve boşluklar meydana gelmiş olup, bu oluşum yüzeyin daha pürüzlü bir morfoloji kazanmasına ve dolayısıyla yüzey alanının artmasına neden olmuştur. Bazı bölgelerde nanotel yapıların birleşerek daha kalın lif benzeri yapılar oluşturduğu, ayrıca bu yapıların kesişme noktalarında kalınlaşmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Nanotellerin kesişme noktalarında gözlenen kalınlaşmalar taneciklerin birleşme eğilimini yansıtmaktadır.

30 ^{o}C'de ve 40 daldırma döngüsü ile FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmede elde edilen FE-SEM görüntüsü Şekil 4.21'de sunulmuştur. Görüntü incelendiğinde, film yüzeyinde hem nanotel hem de küresel tanecik yapılarının birlikte bulunduğu hibrit bir morfoloji gözlenmektedir. Bu örnekte küresel tanecikler daha baskın bir dağılım göstermekte olup, yoğun ve karmaşık bir ağ yapısı oluşturdukları dikkati çekmektedir. Film yüzeyinde gözlenen gözenekli yapı ve pürüzlülük önceki numunelere kıyasla artış göstermiştir. Ayrıca, gözeneklerin ve taneciklerin yüzey boyunca homojen bir şekilde dağıldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, bazı bölgelerde taneciklerin bir araya gelerek kümeler oluşturduğu da

görülmektedir. Bu morfolojik yapı, artan daldırma döngüsünün Cu_2O filminin yüzey organizasyonu üzerindeki etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Nanotel ve küresel taneciklerin birlikte bulunması, film yüzeyinde hem yüksek yüzey alanı hem de potansiyel taşıyıcı yolların oluşumunu destekleyebilir. Bu tür hibrit yapılar; fotovoltaik hücreler, gaz sensörleri, elektrokatalizörler ve fotokatalitik sistemler gibi uygulamalarda performans artışı sağlayabilir.

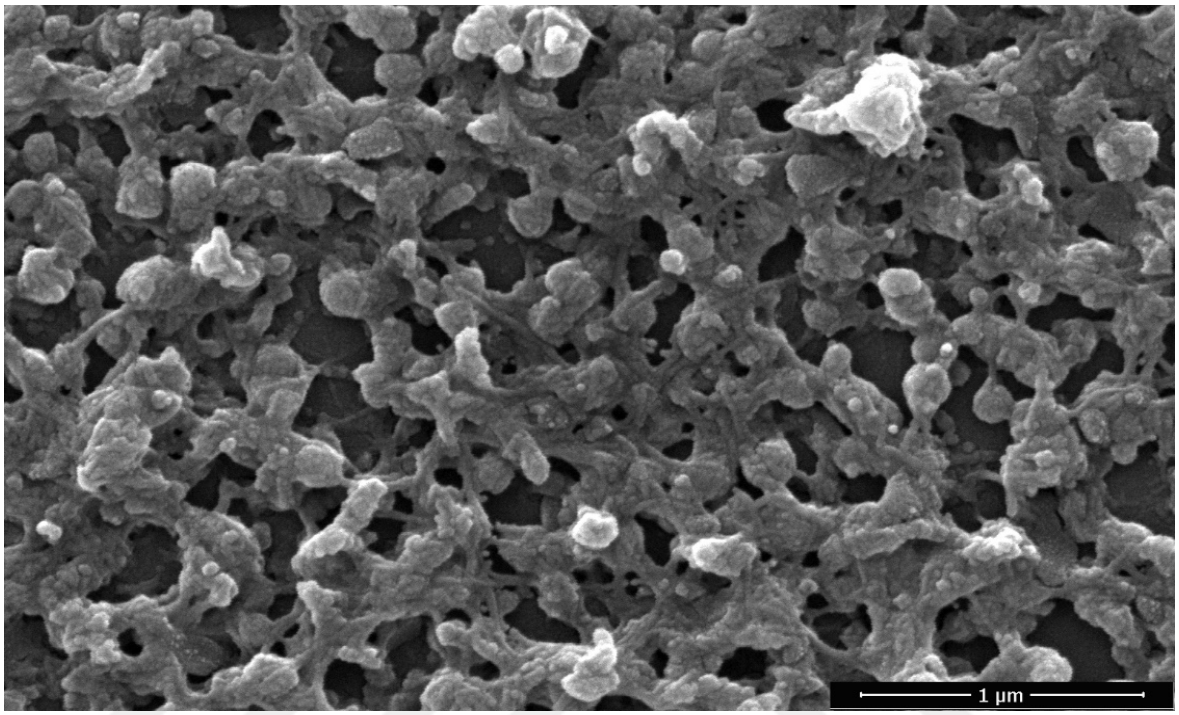
4.2.4. FTO Alt Taban Üzerinde 70 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi

70 ^oC'de ve 10 daldırma döngüsüyle FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmede elde edilen FE-SEM görüntüsü Şekil 4.22'de sunulmuştur. Görüntü incelendiğinde, film yüzeyinde hem nanotel yapılar hem de küresel taneciklerin bir araya gelerek oluşturduğu kümelenmiş bölgeler dikkat çekmektedir. Filmde çoğunlukla kümeleşmiş küresel tanecikler bulunmakta, bu kümelerin arasında ise ağ benzeri yapılar oluşturan nanotel formları gözlenmektedir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle taneciklerin büyüme ve birleşme eğiliminde artış olduğu anlaşılmaktadır. Film, belirgin şekilde gözenekli bir yapıya sahiptir ve bu durum, malzemenin yüzey alanını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu tür bir morfoloji, Cu_2O ince filmin optik özellikleri ve katalitik performansı gibi işlevsel özellikleri üzerinde etkili olabilir. Ayrıca, 70 ^oC sıcaklıkta gerçekleşen kristallenme süreci, taneciklerin birleşerek daha büyük yapılar oluşturmasına neden olmaktadır.

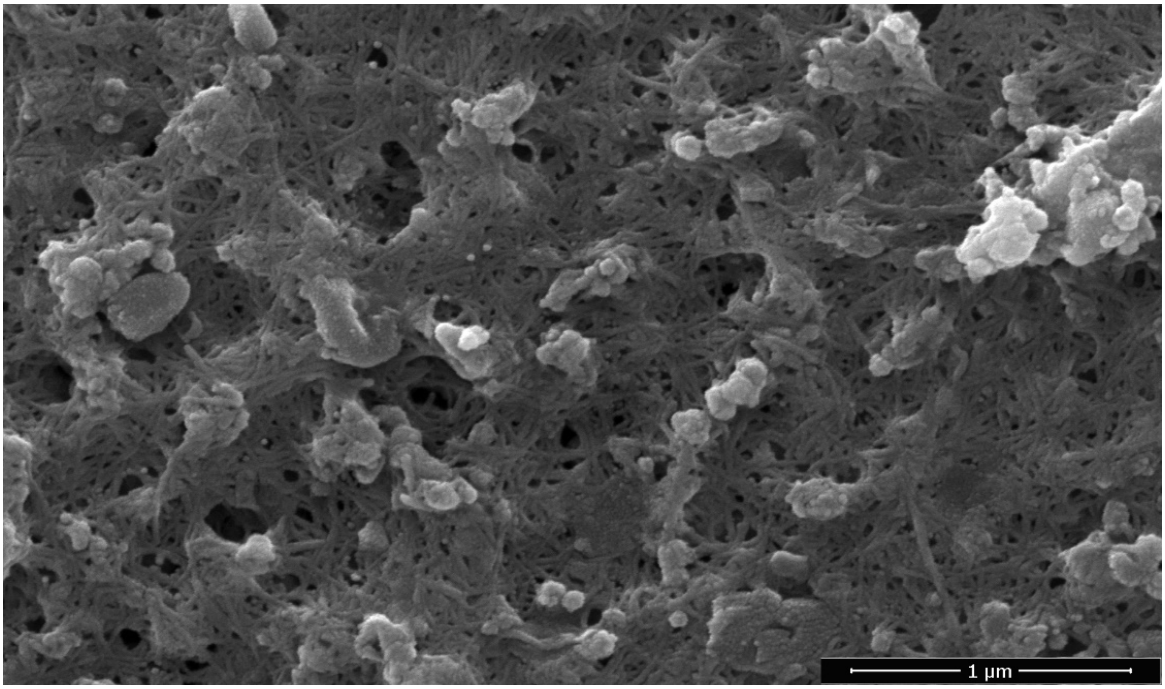
70 ^oC'de ve 20 daldırma döngüsüyle FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmede elde edilen FE-SEM görüntüsü Şekil 4.23'te verilmiştir. Görüntüde, filmin yüzeyinin büyük ölçüde homojen dağılmış küresel ve yarı-küresel nano-parçacıklardan oluştuğu gözlenmektedir. Cu_2O ince film, FTO alt tabanı genel olarak düzgün bir şekilde kaplamış olmakla birlikte, bazı lokal bölgelerde taneciklerin daha yoğun bir şekilde biriktiği ve bu bölgelerin kümeleşme eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak bu kümeler bile genel morfolojik düzeni bozmadan, nispeten homojen bir dağılım sunmaktadır. Filmin gözenekli yapısı bu örnekte de korunmuş olup, gözeneklilik seviyesi yüzey alanının artmasına katkı sağlayarak, özellikle katalitik ve sensör uygulamaları için önemli bir avantaj sunmaktadır.

70 ^oC'de ve 40 daldırma döngüsüyle FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filminin 100 kx büyütmede elde edilen FE-SEM görüntüsü Şekil 4.24'te verilmiştir. Görüntüde, taneciklerin büyük oranda birbiriyle bağlantılı zincir benzeri yapılar oluşturduğu görülmektedir. Bu tanecikler belirgin şekilde kümeleşmiş olup birbirine sıkı şekilde bağlanarak bir morfoloji meydana getirmiştir. Film oldukça gözenekli bir yapı sergilemekte ve bu gözenekler, zincir yapı ile birlikte üç boyutlu ağ şeklinde geniş boşluklar oluşturarak yüzey alanını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu tür gözenekli ve yüksek yüzey alanına sahip Cu_2O yapılar; katalitik uygulamalar, gaz sensörleri, elektrokimyasal cihazlar ve enerji depolama sistemleri gibi çeşitli teknolojik alanlarda kullanılmaya elverişlidir.

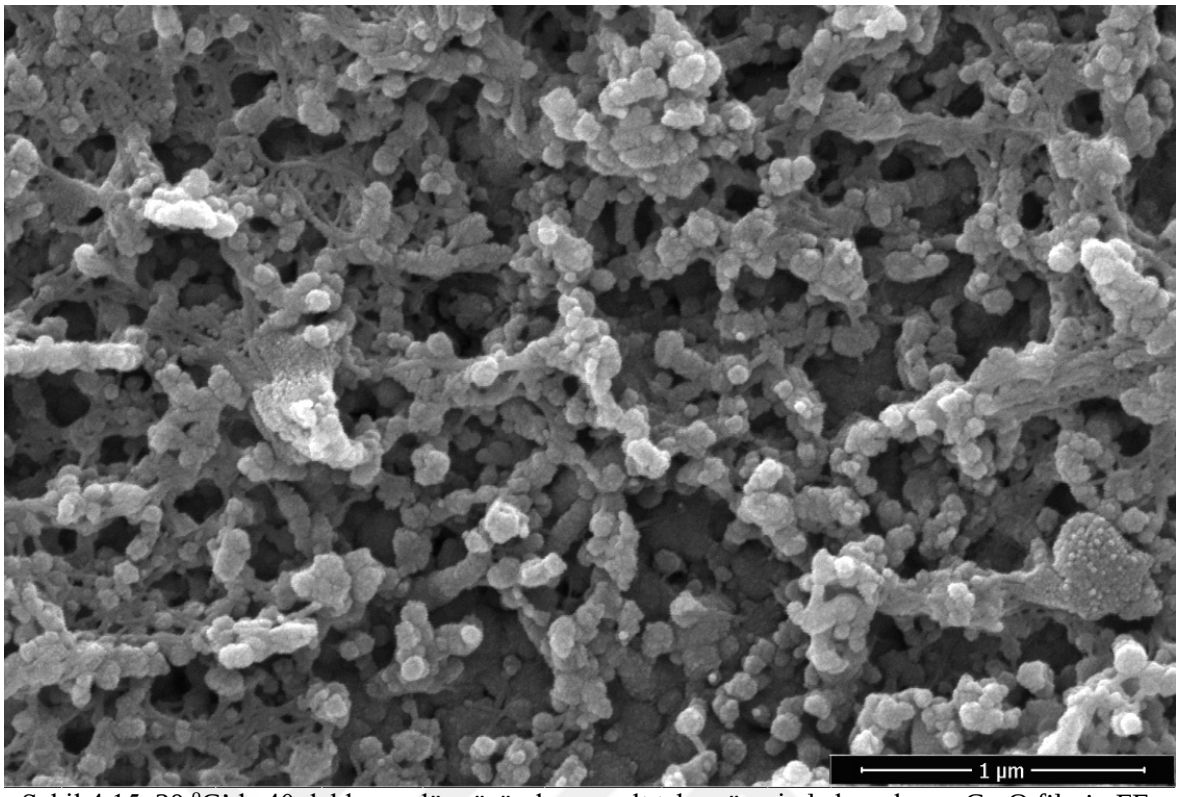
Elde edilen tüm bu bulgular hem sıcaklık hem de alt taban türü ile birlikte daldırma döngüsü sayısının Cu_2O ince filmlerin morfolojik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu, dolayısıyla bu parametrelerin kontrollü değişimiyle istenilen yüzey yapılarının elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.



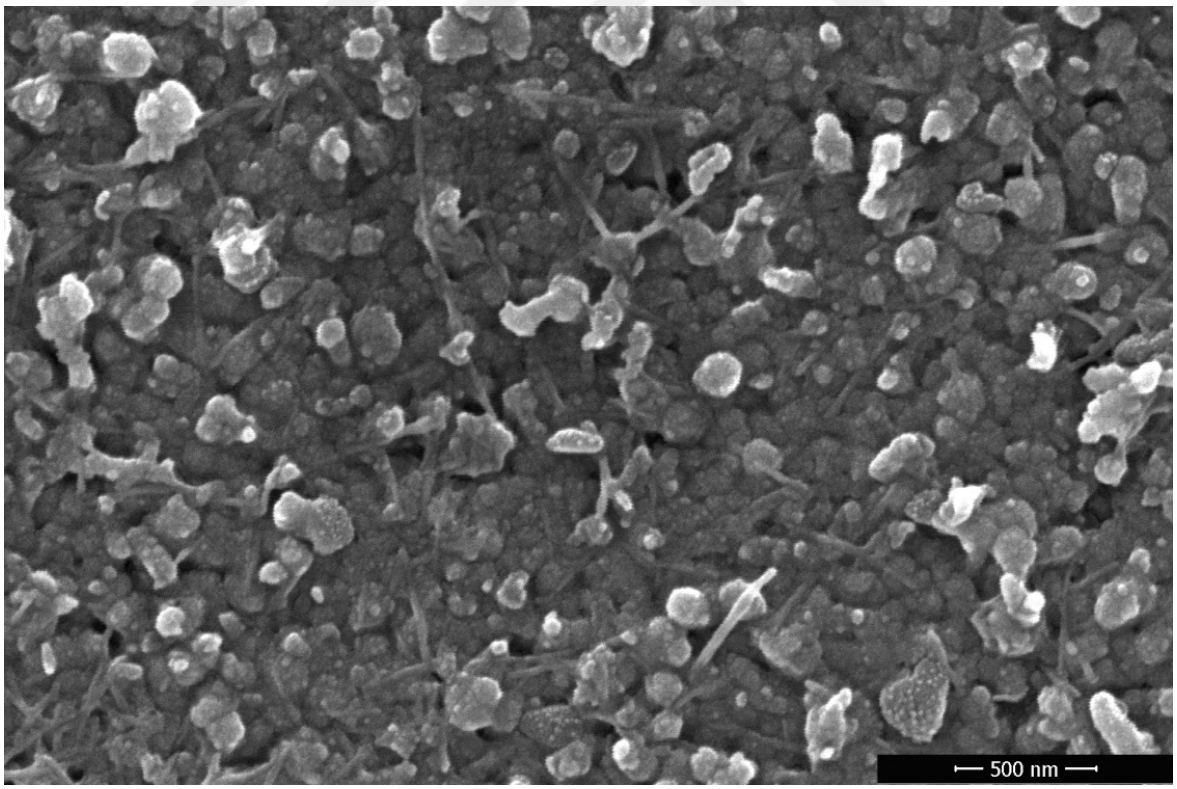
Şekil 4.13. 30 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü



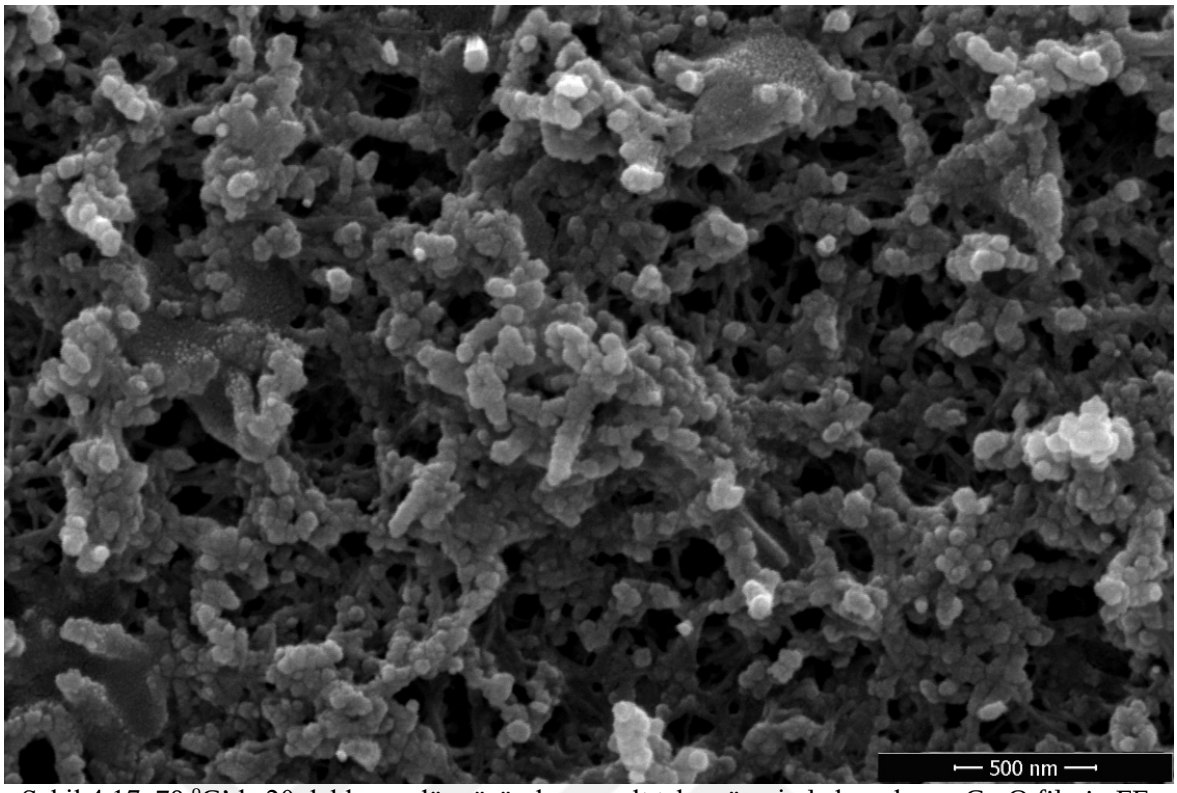
Şekil 4.14. 30 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü



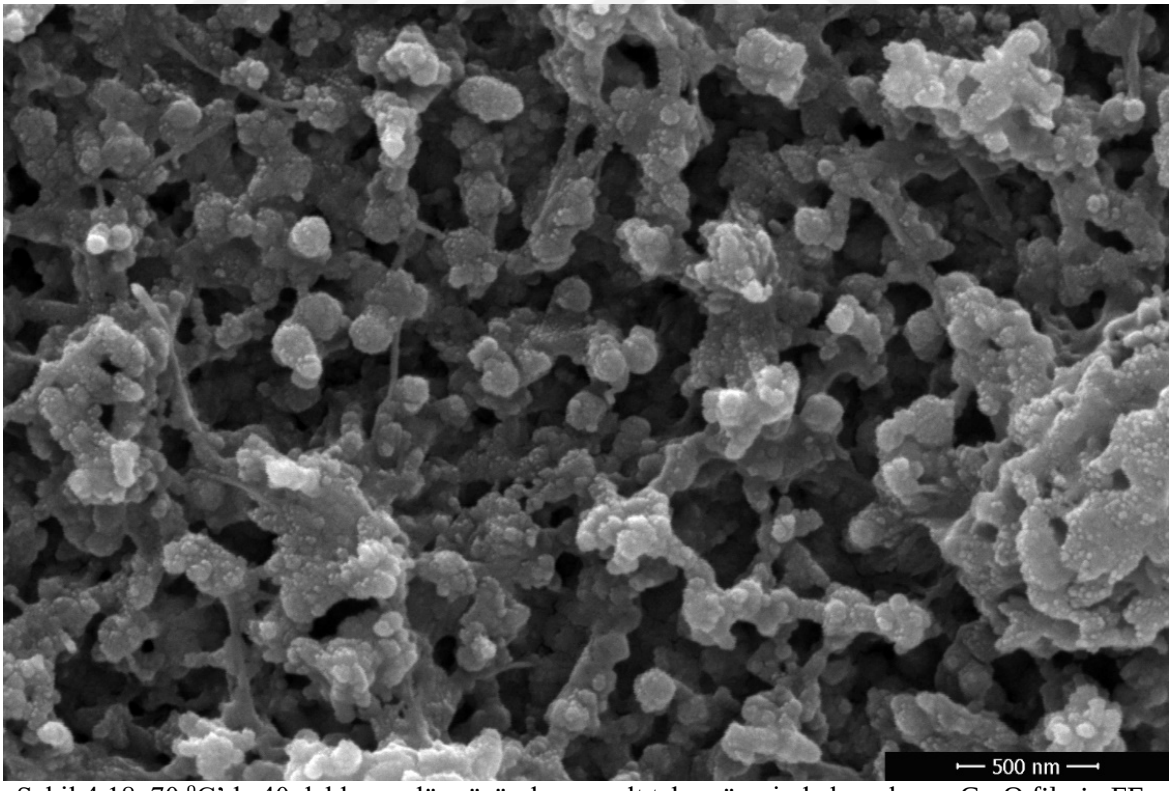
Şekil 4.15. 30 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü



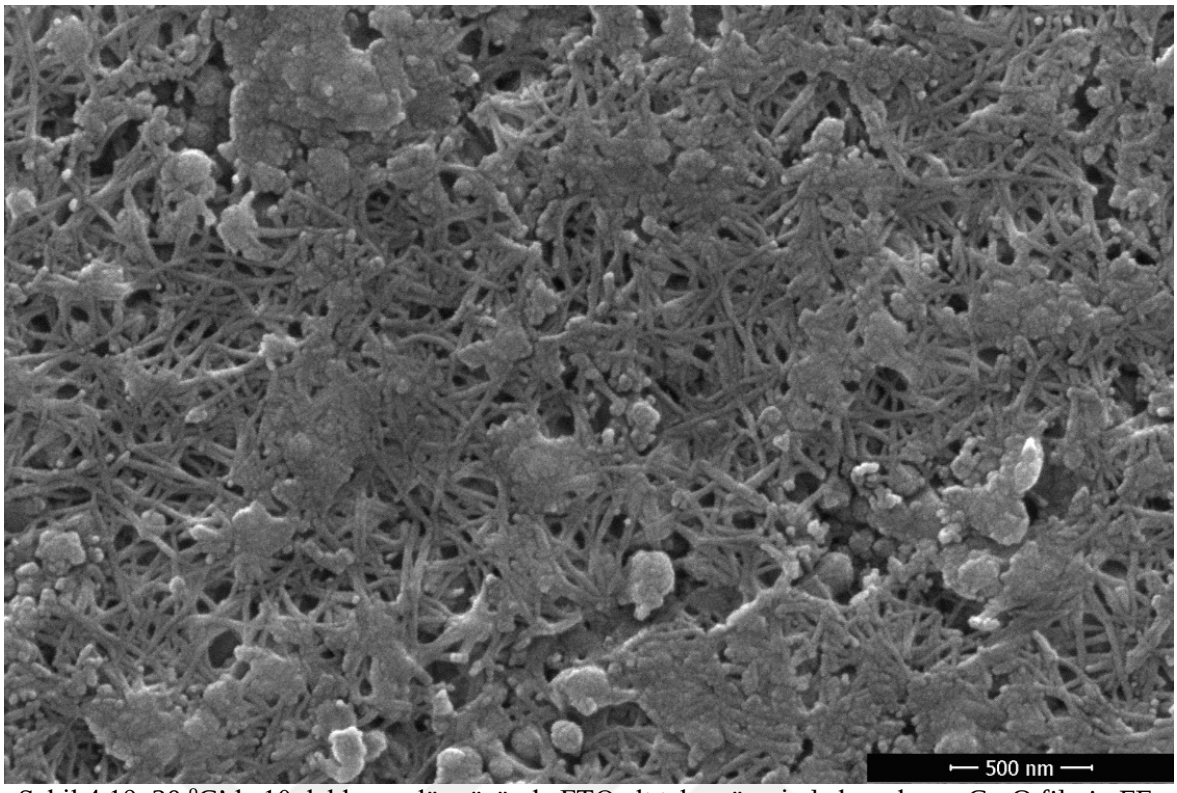
Şekil 4.16. 70 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü



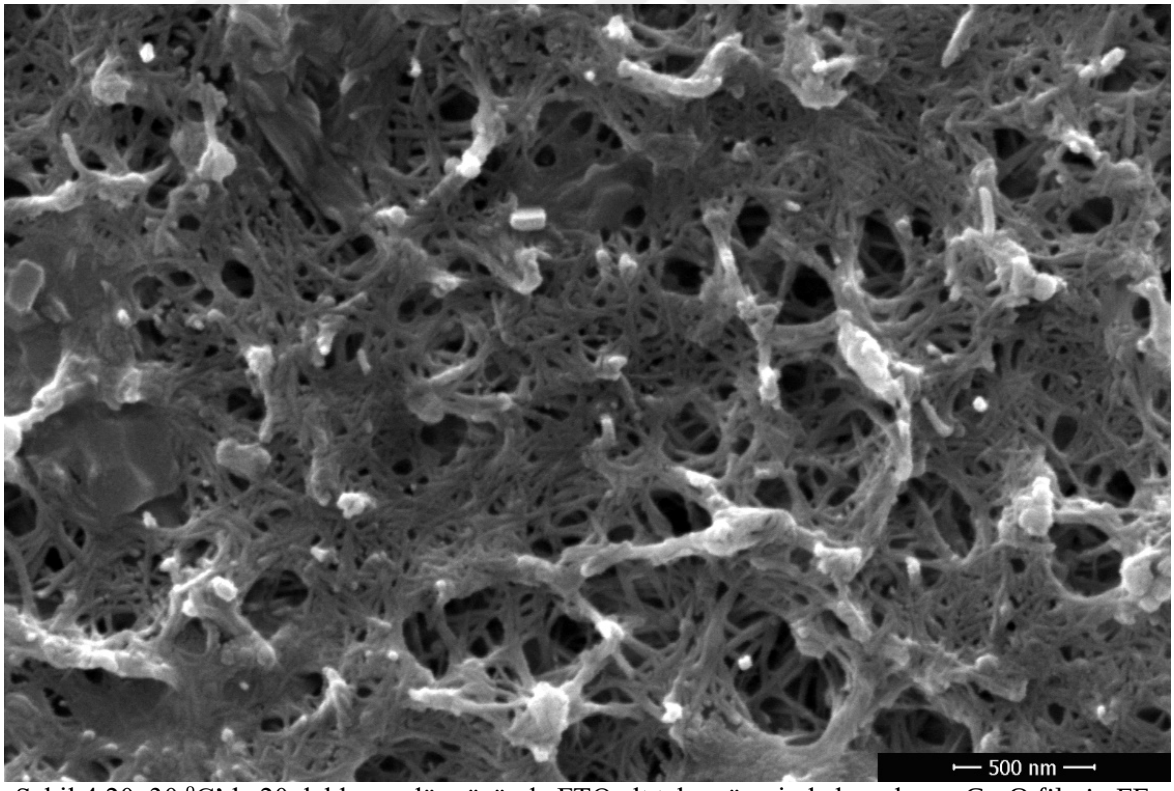
Şekil 4.17. 70 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü



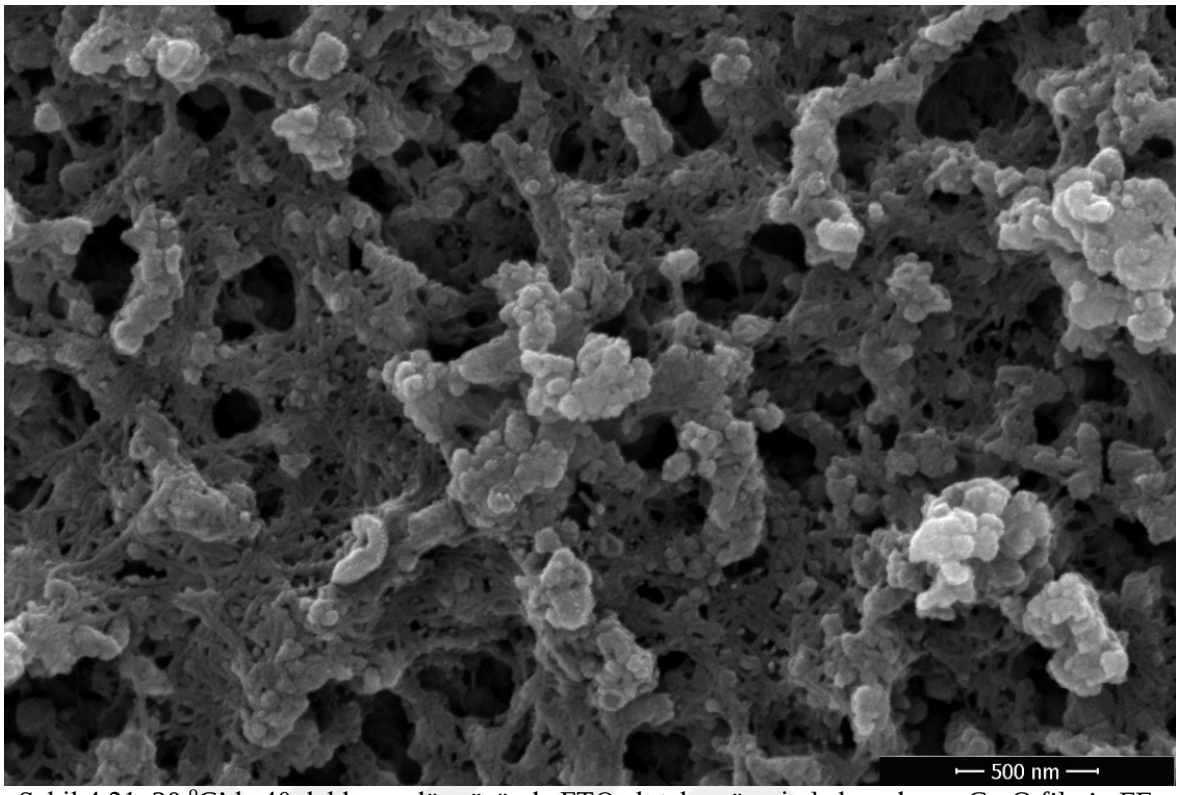
Şekil 4.18. 70 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü



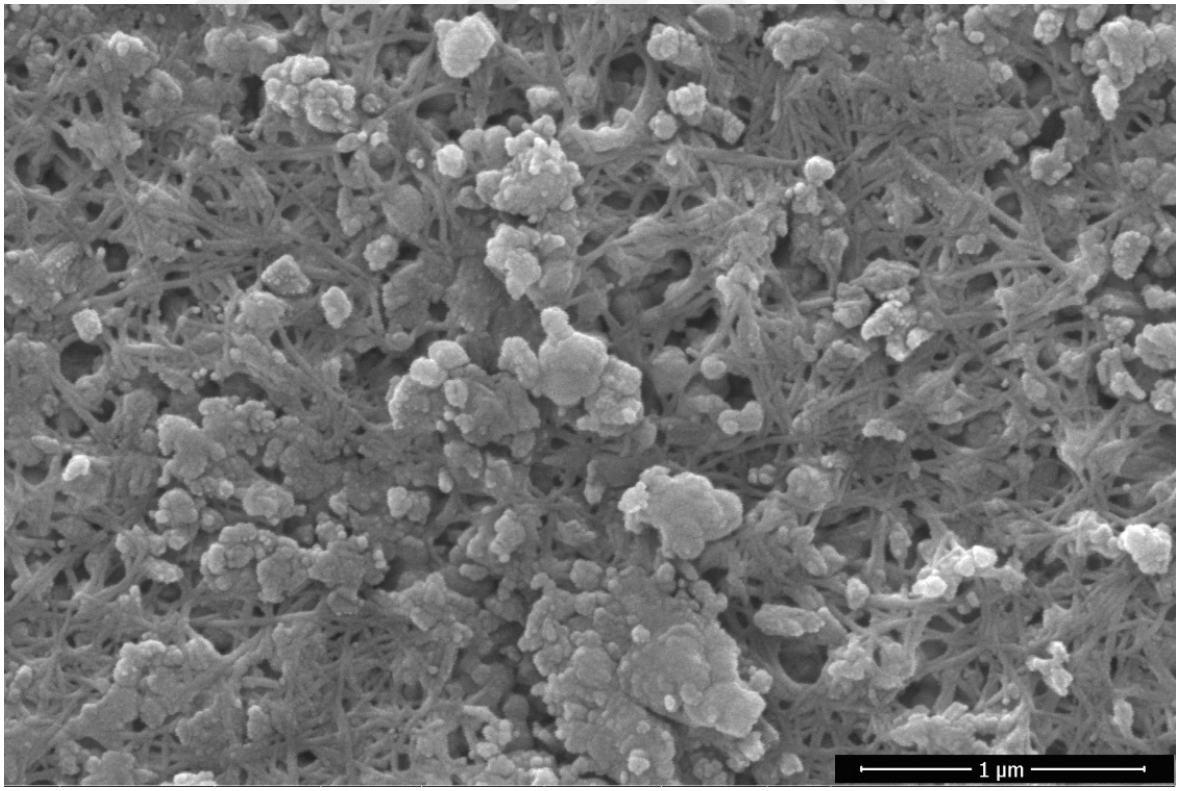
Şekil 4.19. 30 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü



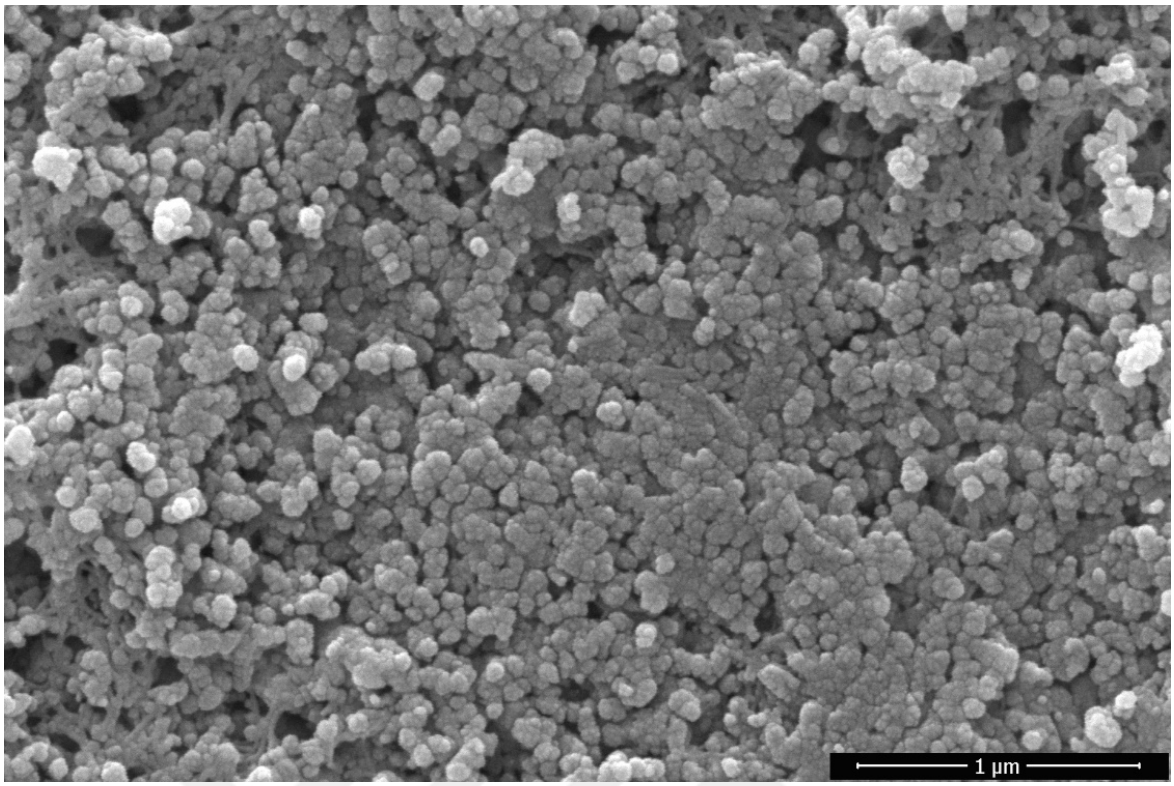
Şekil 4.20. 30 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü



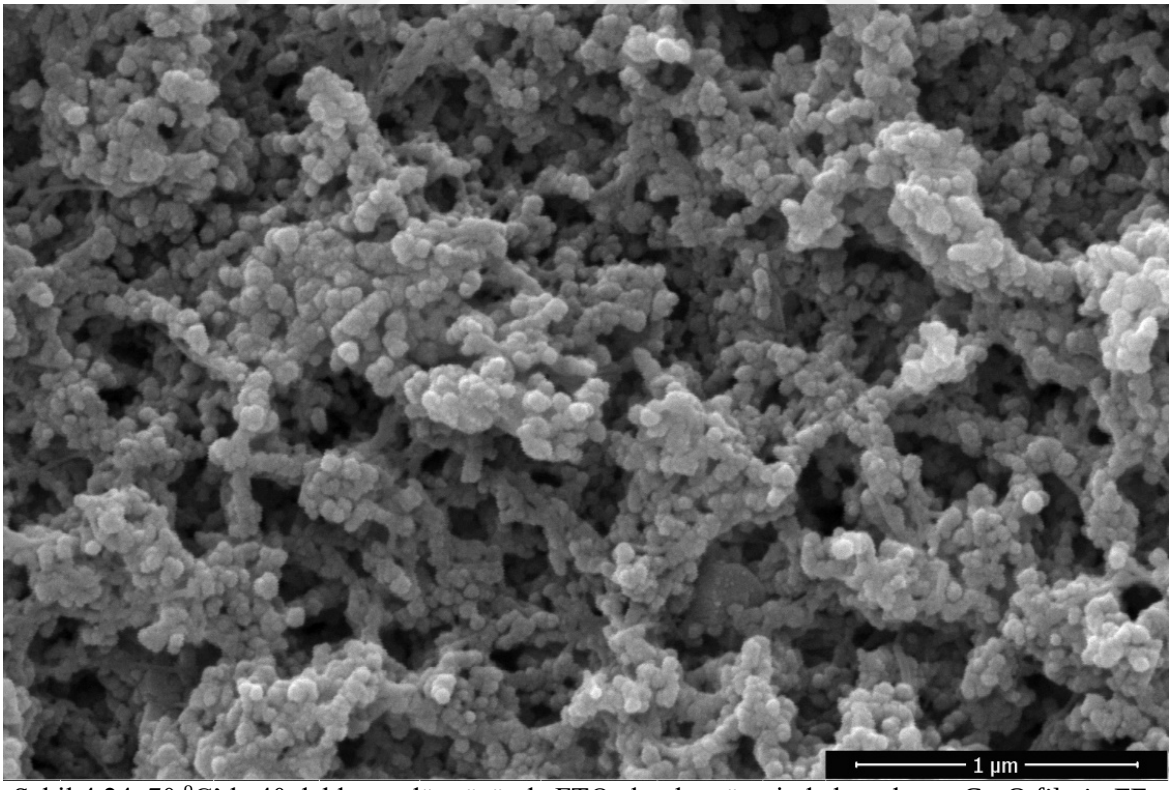
Şekil 4.21. 30 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü



Şekil 4.22. 70 ^{o}C'de 10 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE SEM görüntüsü



Şekil 4.23. 70 ^{o}C'de 20 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü



Şekil 4.24. 70 ^{o}C'de 40 daldırma döngüsünde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmin FE-SEM görüntüsü

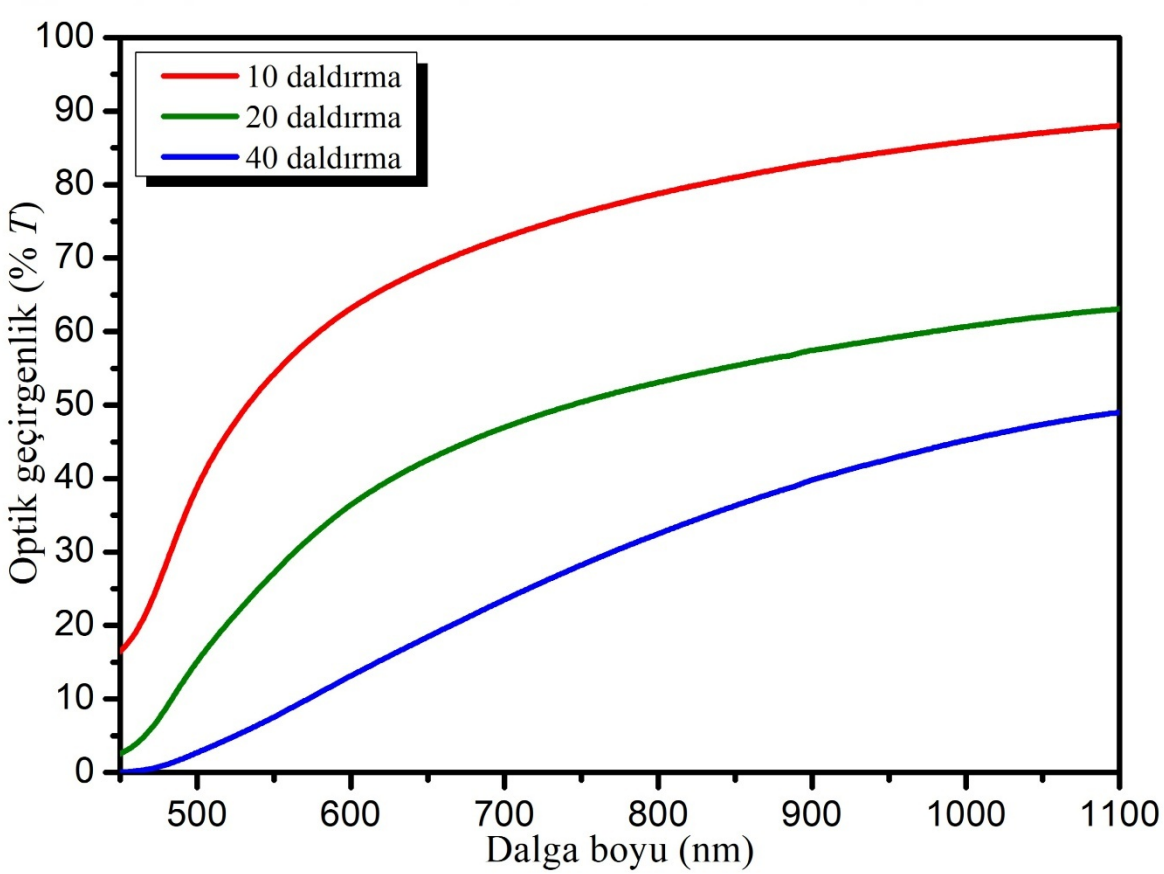
4.3. SILAR Yöntemi ile Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerin İncelenmesi

Cu_2O, *p*-tipi elektriksel iletkenlik gösteren, doğrudan bant geçişli ve 2–2,6 eV yasak enerji aralığına sahip, kübik kristal yapıda bir yarıiletken malzemedir. Bu bant aralığı sayesinde elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde yüksek soğurma kabiliyeti sergileyerek, Cu_2O'yu özellikle güneş pillerinde soğurucu tabaka olarak kullanım için uygun bir aday haline getirmektedir. Cu_2O ince filmlerin optik özellikleri; üretim yöntemi, çözelti konsantrasyonu, filmin kalınlığı, çözeltinin pH değeri, kullanılan alt tabanın türü ve işlem sıcaklığı gibi birçok parametreye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. SILAR yöntemi ile depolanan filmlerin optik geçirgenlik (%T), soğurma (A), soğurma katsayısı (α), yansıma katsayısı (%R), enerji bant aralığı (E_g), kırılma indisi (n), sönüm katsayısı (k) ile reel (ε_1) ve sanal dielektrik (ε_2) sabitleri gibi optik parametreleri, filmlerin optik özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Cu_2O ince filmlerin optik karakterizasyonu kapsamında ilk olarak oda sıcaklığında optik geçirgenlik ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler, 190–1100 nm dalga boyu aralığında çalışan UV-vis Lambda 2S spektrofotometresi kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm öncesinde cihazın zemin kalibrasyonu gerçekleştirilmiş, referans olarak cam ve FTO alt tabanlardan geçen monokromatik ışınım %100 olarak normalize edilmiştir. Böylece Cu_2O filmlerin optik geçirgenlik verileri, cam ve FTO alt tabanlarının soğurmasından arındırılarak elde edilmiş ve gerçek optik özellikleri ortaya konulmuştur.

4.3.1. Cam Alt Taban Üzerinde 30 ^oC Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi

SILAR yöntemi ile 30 ^oC sıcaklıkta, 10, 20 ve 40 daldırma döngüsü uygulanarak hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik değerlerinin dalga boyuna karşı değişimi Şekil 4.25'te verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O filminin optik geçirgenlik değeri, 550 nm dalga boyunda %54,19 olarak ölçülmüş, bu değer 800 nm'de %78,77'e ve 1100 nm'de %88,06'a kadar yükselmiştir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmde ise 550 nm'de %27,13 olan geçirgenlik değeri, 800 nm'de %53,10'a, 1100 nm'de ise %63,12'ye ulaşmıştır. 40 daldırma döngüsünde elde edilen film için 550 nm'de optik geçirgenlik değeri %7,53 iken, 800 nm'de %32,46'ya ve 1100 nm'de %49,04'e kadar çıkmaktadır. Bu sonuçlar, daldırma döngüsü sayısının artmasıyla birlikte film kalınlığının da arttığını ve buna bağlı olarak optik geçirgenliğin azaldığını açıkça göstermektedir. Artan film kalınlığı, Cu_2O ince filme gelen monokromatik ışığın film içerisinde daha fazla soğrulmasına ve saçılmasına neden olarak, filmden geçen ışık miktarının azalmasına yol açmaktadır. Özellikle 800 nm dalga boyunda sırasıyla yaklaşık %78, %53 ve %32 geçirgenlik değerlerinin ölçülmesi, artan daldırma döngüsü sayısının film kalınlığına etkisini doğrulamaktadır. Buna ek olarak tanecik boyutlarının artışı tanecik sınırlarında daha fazla ışık saçılmasına neden olduğu bununda soğurma şeklinde kendini gösterdiği düşünülmektedir. 450–1100 nm spektral aralığında incelenen tüm filmler, kısa dalga boylarında (özellikle görünür spektrumun mavi-mor kısmında) düşük geçirgenlik, uzun dalga boylarında (kırmızıdan

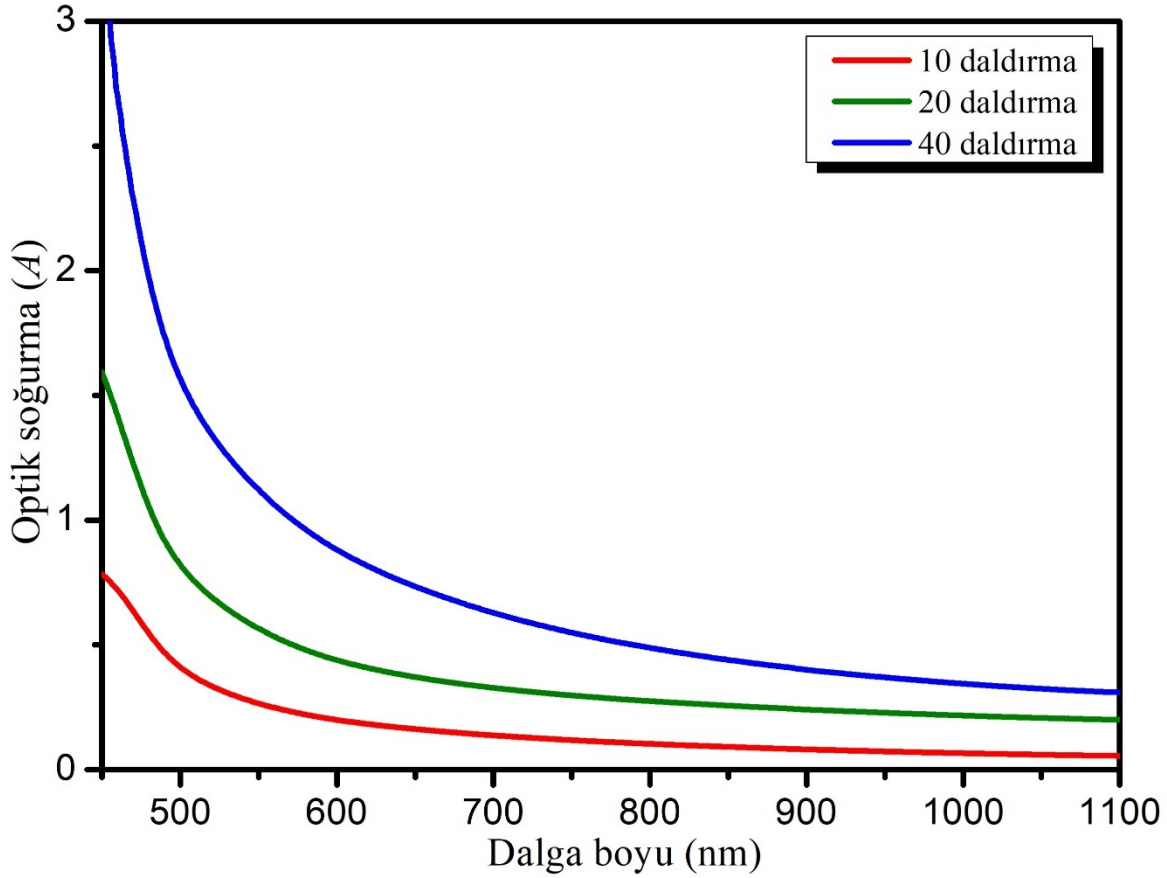
kızılötesine) ise artan geçirgenlik sergilemiştir. Bu davranış, Cu_2O'nun karakteristik yarıiletken yapısını yansıtmaktadır. Cu_2O ince filmlerde optik geçirgenliğin kristal yapıya, oksijen boşluklarına, tanecik sınırlarına, yüzey pürüzlülüğüne ve yapısal safsızlıklara bağlı olduğu literatürde belirtilmiştir (Venkateswarlu ve ark., 2011). Özellikle 40 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin 800 nm dalga boyunda yalnızca %30 geçirgenliğe sahip olması, bu yapının yüksek soğurma kapasitesine işaret etmektedir. Farklı daldırma döngüleri ile 30 °C'de amorf cam alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik sonuçları, özellikle 40 döngüde elde edilen filmin görünür bölgedeki düşük geçirgenlik (yüksek soğurma) özelliği sayesinde optoelektronik uygulamalarda, özellikle de fotovoltaik hücrelerde soğurucu tabaka olarak kullanım açısından uygun bir aday olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, literatürde yer alan benzer çalışmalarla uyumludur (Xu ve ark., 2014).



Şekil 4.25. 30 °C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik-dalga boyu grafiği

SILAR yöntemi ile 30 °C sıcaklıkta, cam alt tabanlar üzerinde 10, 20 ve 40 daldırma döngüsü uygulanarak hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma değerlerinin dalga boyuna karşı değişimi Şekil 4.26'da verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O ince filminin optik soğurma değeri 550 nm'de 0,26 olarak belirlenmiş, dalga boyunun artmasıyla birlikte bu değer 800 nm'de yaklaşık 0,10'a ve 1100 nm'de yaklaşık 0,05'e kadar düşmüştür. 20 daldırma

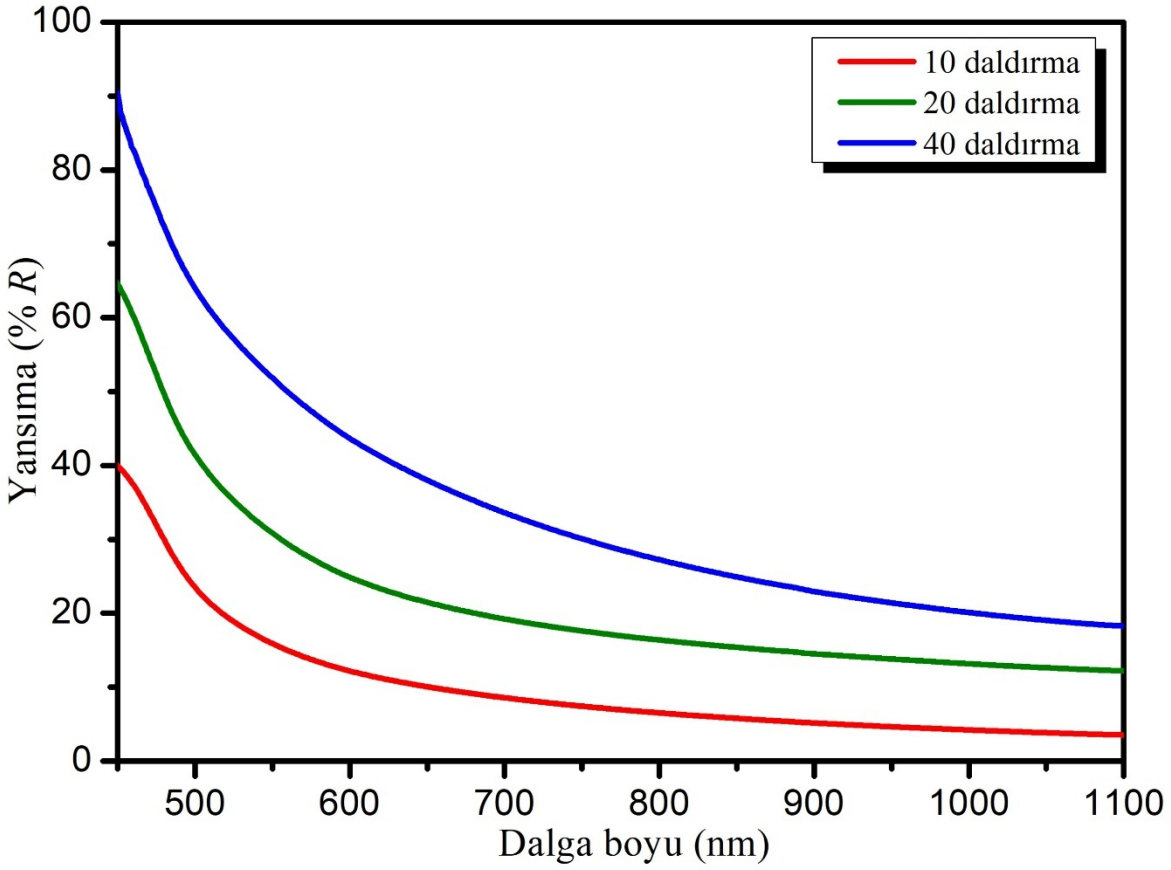
döngüsüyle hazırlanan filmin 550 nm'deki soğurma değeri 0,56 olup, 800 nm'de 0,27'ye ve 1100 nm'de 0,19'a düşmüştür. 40 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O filminin 550 nm'deki soğurma değeri 1,12 olup, bu değer 800 nm'de 0,48'e ve 1100 nm'de 0,31'e kadar azalmıştır. Elde edilen sonuçlar, daldırma döngüsü sayısının artışıyla (dolayısıyla film kalınlığının artışıyla) optik soğurma değerlerinin tüm dalga boylarında belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Ayrıca, tüm filmlerin kısa dalga boylarında yüksek soğurma gösterdiği, dalga boyu arttıkça soğurma değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, Cu_2O'nun bant yapısından kaynaklanan karakteristik yarıiletken davranışını yansıtmaktadır. Özellikle 40 daldırma döngüsüyle elde edilen filmin görünür bölgede yüksek soğurma özelliği sergilemesi, bu filmin fotovoltaik uygulamalar açısından daha uygun bir aday olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.26. 30 °C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği

30 °C'de SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde cam alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumunun dalga boyuna karşı değişimi Şekil 4.27'de verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmin yansıma değeri, 550 nm'de %15,9 seviyesindeyken, dalga boyunun artmasıyla birlikte azalarak 800 nm'de %6,5'e, 1100 nm'de ise %3,5 seviyesine düşmektedir. 20 daldırma döngüsüyle hazırlanan Cu_2O filmin 550 nm'deki yansıma değeri %30,8 olup, bu değer 800 nm'de %16,3'e, 1100 nm'de ise %12,2'ye

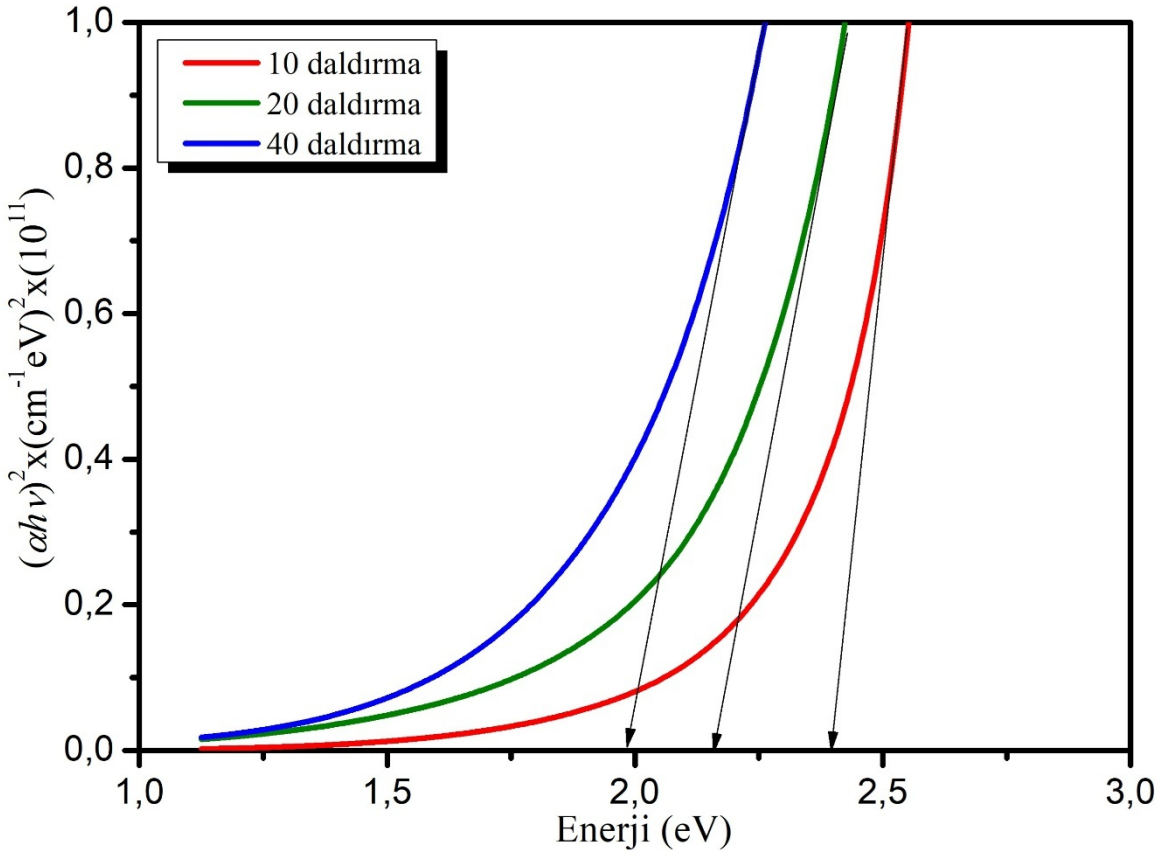
gerilemektedir. 40 daldırma döngüsünde depolanan Cu_2O filminin yansıma değeri ise 550 nm'de %51,8 iken, dalga boyu arttıkça düşerek 800 nm'de %27,2'ye, 1100 nm'de ise %18,2'ye inmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, daldırma döngüsü sayısının artmasıyla yansıma değerlerinin tüm dalga boylarında belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Tüm filmler, kısa dalga boylarında yüksek yansıma değerleri sergilerken; uzun dalga boylarına doğru yansıma değerlerinde azalma gözlenmektedir. Bu durum, filmlerin morfolojik özellikleri ve yüzey pürüzlülüğü ile doğrudan ilişkili olabilir. Özellikle 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmin görünür bölgedeki yansıma değerinin daha yüksek olması, bu filmin yüzey özelliklerinin ve kristal yapısının diğerlerine göre farklılaştığını göstermektedir.



Şekil 4.27. 30 ^oC'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngülerinde 30 ^oC'de cam alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yasak enerji aralığı değerlerini gösteren grafik Şekil 4.28'de verilmiştir. Bu tür grafikler, Tauc eşitliği olarak bilinir ve yarıiletken malzemelerin optik bant aralığını belirlemek amacıyla kullanılır. $(\alpha hv)^2$–hv grafiğinde, eğrinin doğrusal kısmının hv eksenini (yani $(\alpha hv)^2 = 0$ noktasında) kestiği değer, yasak enerji aralığı (E_g) olarak belirlenir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince film için $(\alpha hv)^2$–hv grafiğinde doğrusal kısmın enerji eksenini kestiği nokta yaklaşık 2,39 eV olarak belirlenmiştir. 20 daldırma döngüsünde bu değer

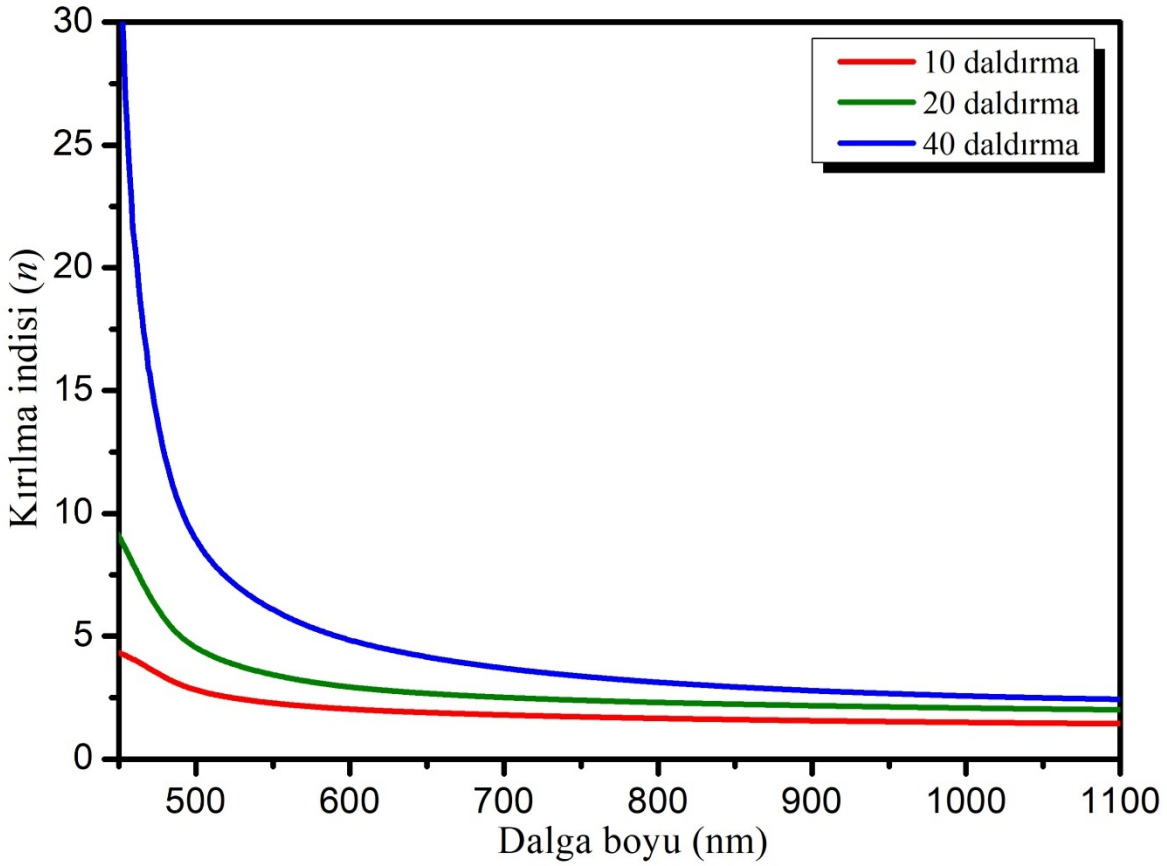
yaklaşık 2,18 eV, 40 daldırma döngüsünde ise yaklaşık 1,98 eV olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, daldırma döngüsü sayısı arttıkça (film kalınlığı arttıkça), Cu_2O ince filmlerin optik bant aralığında bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, Moss-Burstein kayması ile izah edilebilir. Bir yarıiletkende Moss-Burstein kayması; iletim bandı kenarının alçalması ve değerlik bandı kenarının simetrik olarak yukarı itilmesi ile ilişkilidir (Sivakumar ve ark., 2007). Cu_2O ince film için hesaplanan bant aralığı değerleri (2,39–1,98 eV) literatürde verilen değer ile uyumlu bulunmuştur (Baig ve ark., 2018 ve Laidoudi ve ark., 2013). Bu bulgular, daldırma döngüsü sayısının ayarlanmasıyla Cu_2O ince filmlerin optik ve elektronik özelliklerinin kontrollü bir şekilde düzenlenebileceğini ve böylece farklı optoelektronik uygulamalar için optimize edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.28. 30 ^oC'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2$'nin enerjiye ($h\nu$) karşı grafiği

10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde SILAR yöntemi ile 30 ^oC'de hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 4.29'da görülmektedir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmin kırılma indisi, 550 nm'de 2,28 iken, dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de 1,66'ya ve 1100 nm'de ise 1,44'e düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin 550 nm'deki kırılma indisi 3,43 olup, bu değer 800 nm'de 2,31 ve 1100 nm'de 2,01'e gerilemektedir. 40 daldırma döngüsünde depolanan filmde

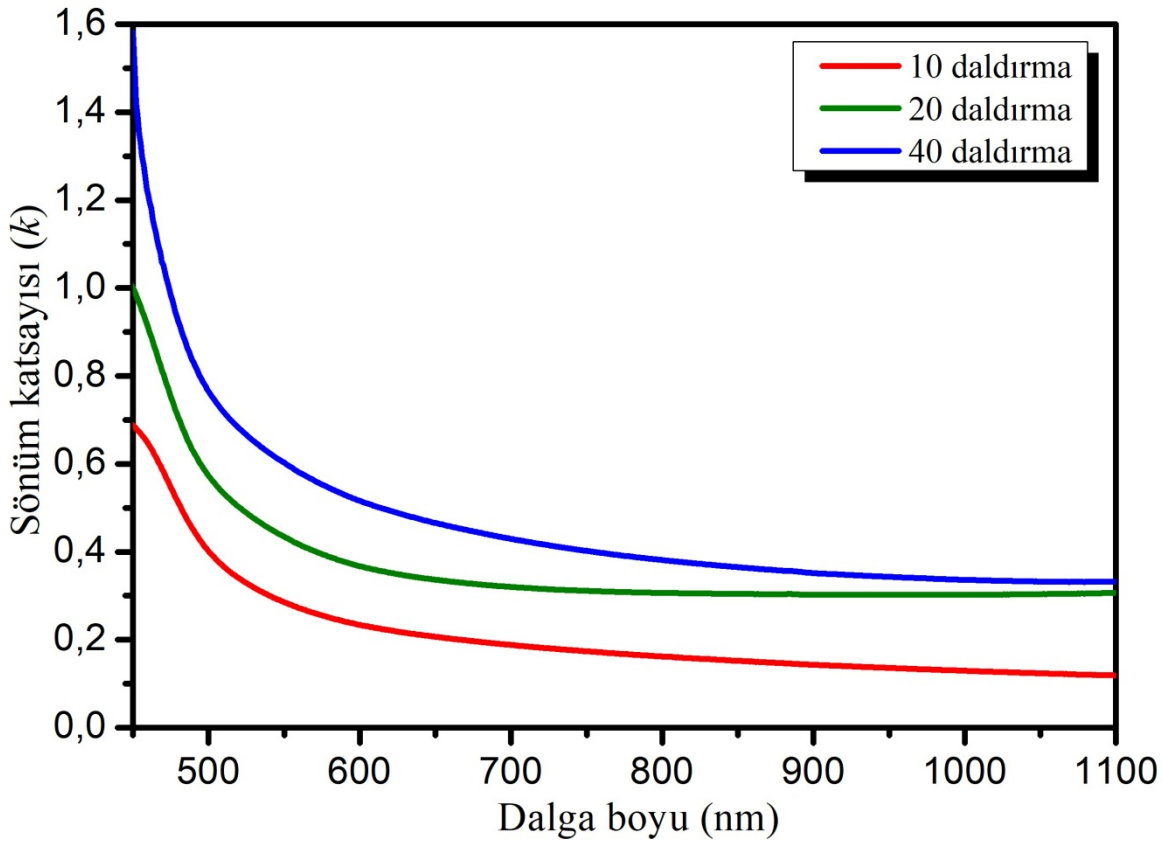
ise, kırılma indisi 550 nm'de 6,08 iken, 800 nm'de 3,13'e ve 1100 nm'de 2,43'e düşmektedir. Bu veriler, daldırma döngüsü sayısındaki artışa paralel olarak (film kalınlığı arttıkça) kırılma indisi değerlerinde belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Bu durum, artan film kalınlığı ile birlikte malzeme yoğunluğunun ve kristallenme derecesinin arttığını işaret etmektedir. Tüm filmler, kısa dalga boylarında (mor-mavi bölge) yüksek kırılma indisi sergilerken, uzun dalga boylarında (kırmızı–kızılötesi bölge) bu değerlerin azaldığı gözlenmiştir. Kırılma indisinin dalga boyuna bağlı olarak değişimi Cu_2O'nun elektromanyetik dalgalarla etkileşimini ve optik performansını belirlemede kritik bir parametredir. Yüksek kırılma indisi değerleri, ışığın malzeme içerisinde daha yavaş ilerlediğini ve daha fazla kırılmaya uğradığını göstermektedir. Özellikle 40 daldırma döngüsü ile hazırlanan filmlerde gözlenen yüksek kırılma indisi, bu filmlerin fotovoltaik aygıtlar, optik sensörler ve yansıma önleyici kaplamalar gibi çeşitli uygulamalar için uygun optik özelliklere sahip olabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.29. 30 ^oC'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin-dalga boyuna karşı grafiği

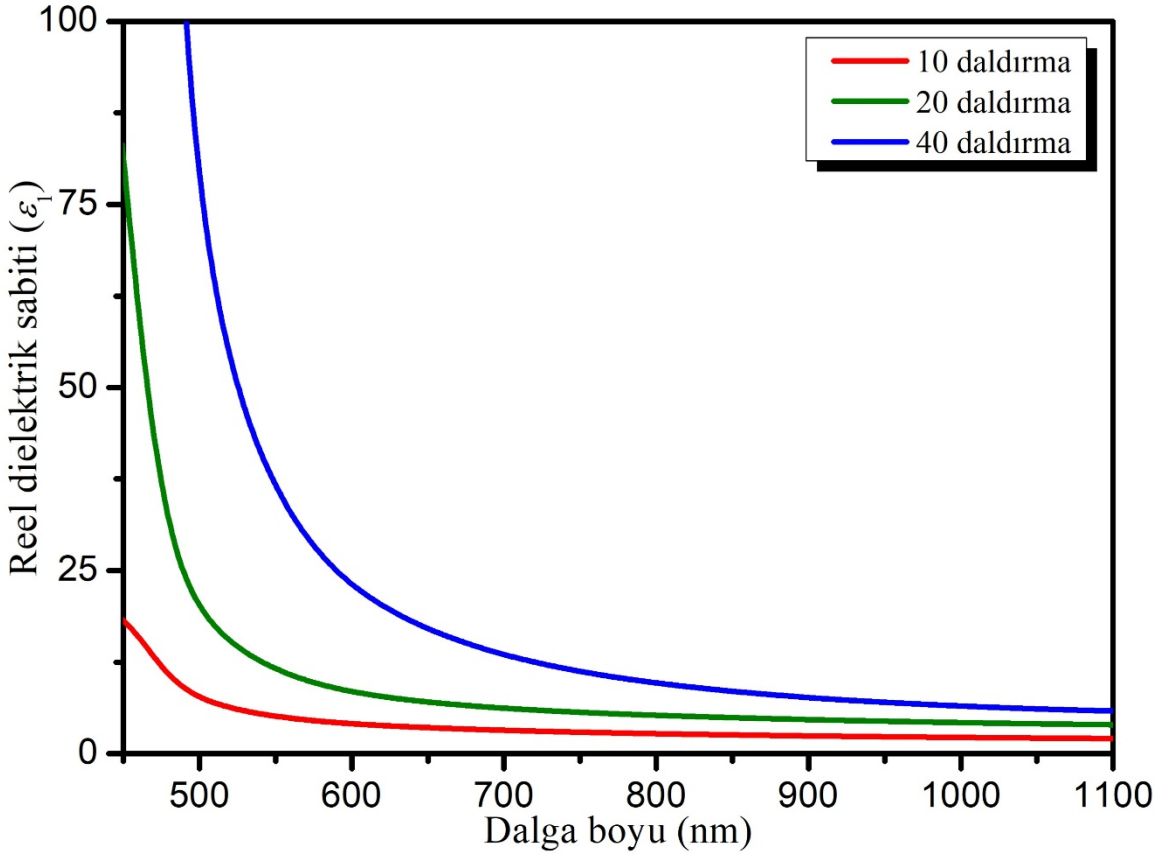
SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 ^oC sıcaklıkta hazırlanan Cu_2O filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.30'da sunulmaktadır. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısı, 550 nm'de 0,28 değerindeyken, dalga boyunun artmasıyla azalarak 800 nm'de 0,16'ya, 1100 nm'de ise 0,11'e

düşmektedir. 20 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmde 550 nm'de 0,43 olan sönüm katsayısı, 800 nm'de 0,31'e ve 1100 nm'de 0,30'a gerilemektedir. 40 daldırma döngüsünde elde edilen filmde ise bu değerler sırasıyla 0,60, 0,38 ve 0,33 şeklindedir. Sönüm katsayısı (k), malzemenin ışığı ne ölçüde soğurduğunu gösteren ve doğrudan soğurma katsayısı ($\alpha = 4\pi k/\lambda$) ile ilişkili bir optik parametredir. Bu çalışmanın bulguları, daldırma döngüsü sayısının artışıyla birlikte film kalınlığının da arttığını ve bu artışa paralel olarak sönüm katsayısı değerlerinin tüm dalga boylarında belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. Bu durum, kalın Cu_2O filmlerin daha fazla ışık soğurduğunu ortaya koymaktadır. Tüm örneklerde sönüm katsayısının kısa dalga boylarında (mor-mavi bölge) yüksek, uzun dalga boylarında ise düşük olması, Cu_2O'nun bant yapısıyla tutarlıdır. Yüksek enerjili fotonlar kısa dalga boylarında malzeme tarafından daha etkin bir şekilde soğurulurken, düşük enerjili fotonların (uzun dalga boyları) soğurulma eğilimi daha düşüktür. Özellikle 40 daldırma döngüsü ile hazırlanan Cu_2O filmin görünür bölgedeki yüksek sönüm katsayısı, bu malzemenin soğurucu tabaka olarak güneş hücreleri gibi fotovoltaik uygulamalarda kullanılabilirliğini desteklemektedir. Dalga boyuna bağlı sönüm katsayısı değişimleri, malzemenin renk özellikleriyle birlikte ışık–madde etkileşimini belirlemekte olup, yüksek sönüm katsayısına sahip dalga boylarındaki ışık daha fazla soğurulurken, düşük sönüm katsayılı bölgelerde ışığın daha fazla geçmesi beklenmektedir.



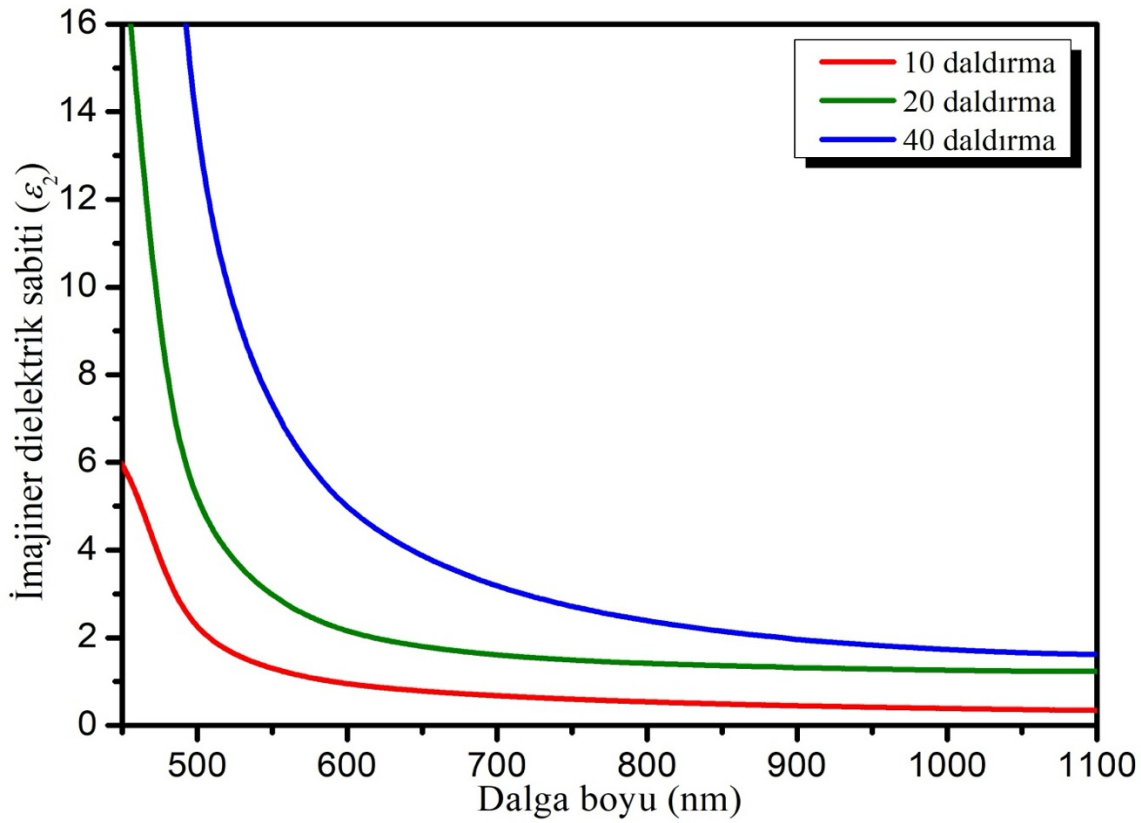
Şekil 4.30. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

SILAR yöntemiyle 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 ^{o}C sıcaklıkta hazırlanan Cu_2O filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.31'de sunulmuştur. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmin 550 nm'de yaklaşık 5,13 olan reel dielektrik sabiti, dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de yaklaşık 2,73'e, 1100 nm'de ise 2,07'ye düşmektedir. 20 daldırma döngüsüyle elde edilen filmde bu değer, 550 nm'de yaklaşık 11,64 olup, 800 nm'de 5,24'e ve 1100 nm'de yaklaşık 3,95'e gerilemektedir. 40 daldırma döngüsünde ise 550 nm'de yaklaşık 36,71 olan değer, dalga boyu arttıkça hızla azalarak 800 nm'de yaklaşık 9,67'ye, 1100 nm'de ise yaklaşık 5,83'e kadar düşmektedir. Reel dielektrik sabiti (ε_1), malzemenin elektrik alan altında gösterdiği polarizasyon yeteneğini ifade eder ve kırılma indisi (n) ile doğrudan ilişkilidir ($\varepsilon_1 \sim n^2$). Elde edilen bulgular, daldırma döngüsü sayısının artmasıyla birlikte (film kalınlığındaki artışla), reel dielektrik sabiti değerlerinde tüm dalga boyu aralığında belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Tüm filmlerde özellikle kısa dalga boyu aralığında yüksek reel dielektrik sabiti değerleri gözlenmiştir. Özellikle 40 daldırma döngüsüyle elde edilen filmlerde görünür bölgede elde edilen yüksek dielektrik sabiti değerleri, bu malzemelerin optoelektronik uygulamalarda, sensörlerde ve dielektrik tabakalı cihazlarda kullanım potansiyelini önemli ölçüde artırmaktadır.



Şekil 4.31. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

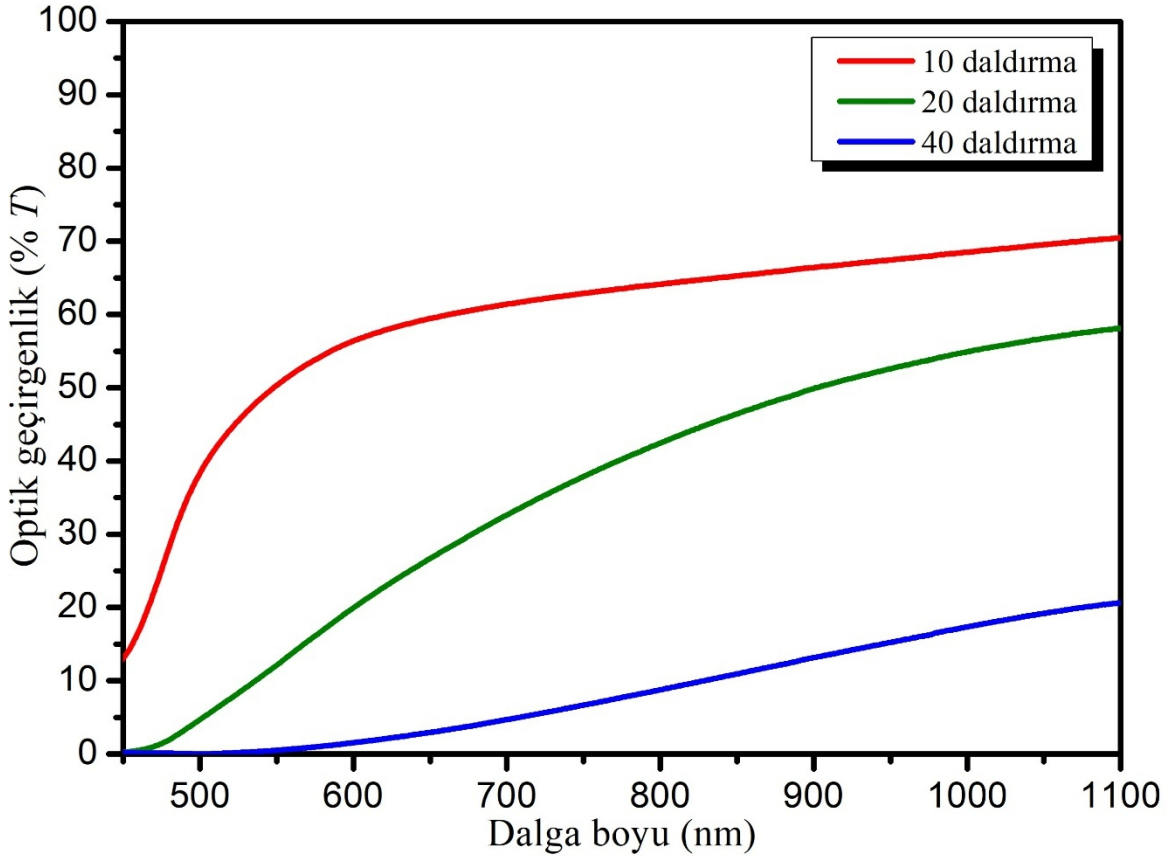
SILAR yöntemiyle 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 ^{o}C'de hazırlanan Cu_2O filmlerin imajiner dielektrik sabiti (ε_2) değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.32'de verilmiştir. 10 daldırma döngüsüyle elde edilen Cu_2O ince filminin 550 nm'deki imajiner dielektrik sabiti yaklaşık 1,30 olup, dalga boyunun artmasıyla birlikte 800 nm'de 0,53'e, 1100 nm'de ise yaklaşık 0,34'e düşmektedir. 20 döngüde bu değerler sırasıyla 2,98, 1,41 ve 1,23; 40 döngüde ise 7,34, 2,38 ve 1,61 olarak ölçülmüştür. İmajiner dielektrik sabiti (ε_2), malzemenin enerji soğurma kapasitesini ifade eder ve sönüm katsayısı (k) ile doğrudan ilişkili olup yaklaşık olarak $\varepsilon_2 \sim 2nk$ bağıntısıyla tanımlanır. Bu parametre, elektromanyetik enerjinin malzeme içinde ısıya dönüşüm miktarını belirleyen önemli bir göstergedir. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça, yani film kalınlığı büyüdükçe, imajiner dielektrik sabiti değerlerinin tüm dalga boylarında belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir. Bu artış, kalın filmlerin daha fazla ışık soğurduğunu göstermektedir. 40 daldırma döngüsünde elde edilen filmin görünür bölgedeki yüksek imajiner dielektrik sabiti değerleri, bu filmin güneş hücrelerinde soğurucu tabaka olarak kullanılma potansiyelini desteklemektedir. Imajiner dielektrik sabitinin yüksek olduğu dalga boylarında, elektromanyetik dalga malzeme içerisinde hızla sönümlenirken enerji verimli şekilde soğurulmaktadır. Bu özellik, optoelektronik cihazların tasarımı açısından dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Sonuç olarak, Cu_2O ince filmlerin daldırma döngüsü sayısı değiştirilerek imajiner dielektrik sabiti kontrol edilebilir; böylece malzemenin soğurma özellikleri optimize edilerek farklı uygulamalara uygun hale getirilebilir.



Şekil 4.32. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

4.3.2. Cam Alt Taban Üzerinde 70 ^{o}C Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi

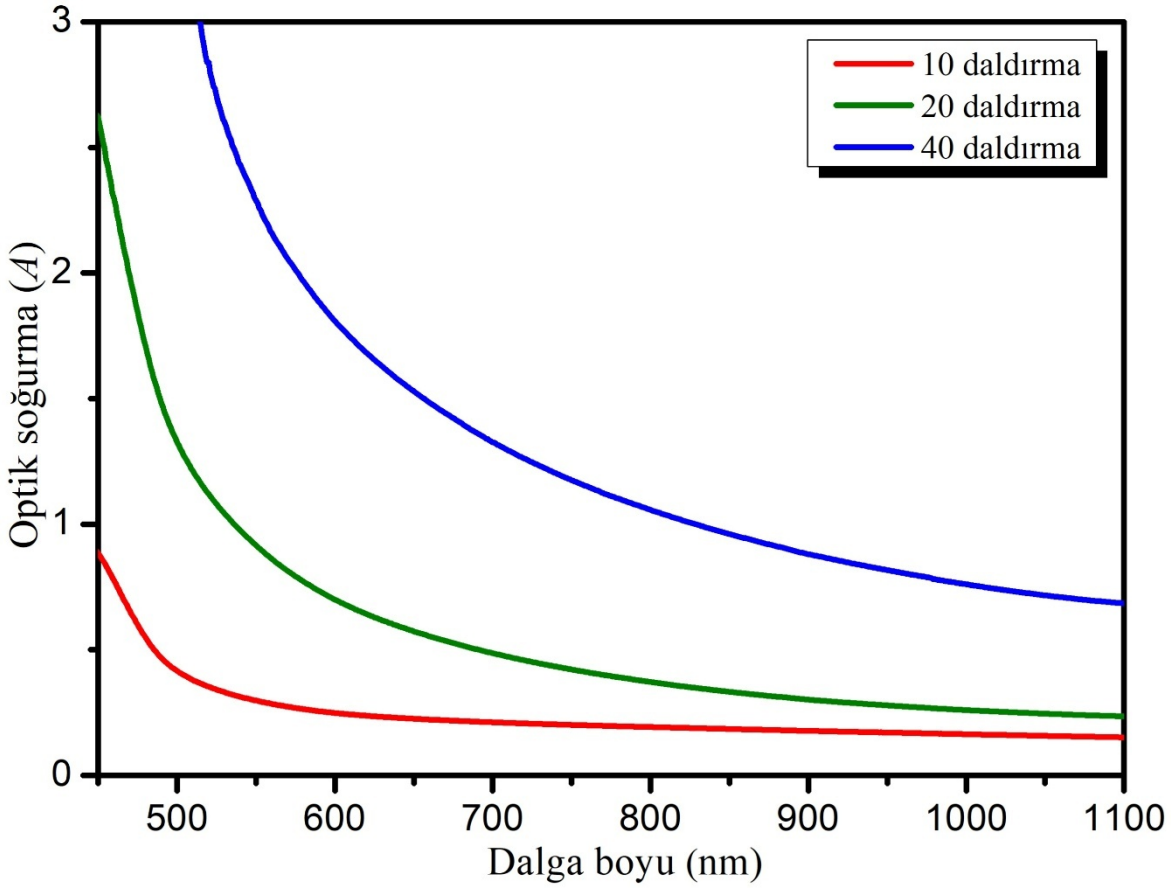
SILAR yöntemi ile 70 ^{o}C sıcaklıkta, 10, 20 ve 40 daldırma döngüsü uygulanarak hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik değerlerinin dalga boyuna karşı değişimi Şekil 4.33'te verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O filminin geçirgenlik değeri 550 nm dalga boyunda %50,35 olarak ölçülmüş, bu değer 800 nm'de %64,13'e, 1100 nm'de ise yaklaşık %70,44'e kadar yükselmiştir. 20 daldırma döngüsünde elde edilen filmin geçirgenlik değeri 550 nm'de %12,13 iken, bu değer 800 nm'de %42,45'e ve 1100 nm'de yaklaşık %56,10'a ulaşmıştır. 40 daldırma döngüsünde hazırlanan filmde ise 550 nm'de %0,51 olan geçirgenlik değeri, 800 nm'de %8,77'ye ve 1100 nm'de çok yavaş bir artışla %20,62'ye kadar yükselmiştir. Bu veriler, daldırma döngüsü sayısının artışıyla birlikte film kalınlığının arttığını ve buna bağlı olarak optik geçirgenliğin azaldığını ortaya koymaktadır. Özellikle 70 ^{o}C'de hazırlanan filmlerin genel olarak daha düşük geçirgenlik değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca, bu sıcaklıkta daldırma döngüsü sayısının artmasıyla geçirgenlikteki azalma daha belirgin hale gelmiştir. Özellikle 40 daldırma döngüsünde bu fark daha da çarpıcıdır. Bu durum, Cu_2O'nun yarıiletken özellikleri ile doğrudan ilişkilidir ve sıcaklığın, filmlerin kristalleşme derecesi, yapısal yoğunluğu ve dolayısıyla optik özellikleri üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Artan sıcaklık, taneciklerin birleşme eğilimini artırarak daha kompakt ve daha az geçirgen film yapıları oluşmasına neden olabilir. Bu sonuçlar, SILAR yöntemi ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik performansının hem daldırma döngüsü sayısı hem de işlem sıcaklığı gibi parametrelere duyarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.33. 70 °C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik-dalga boyu grafiği

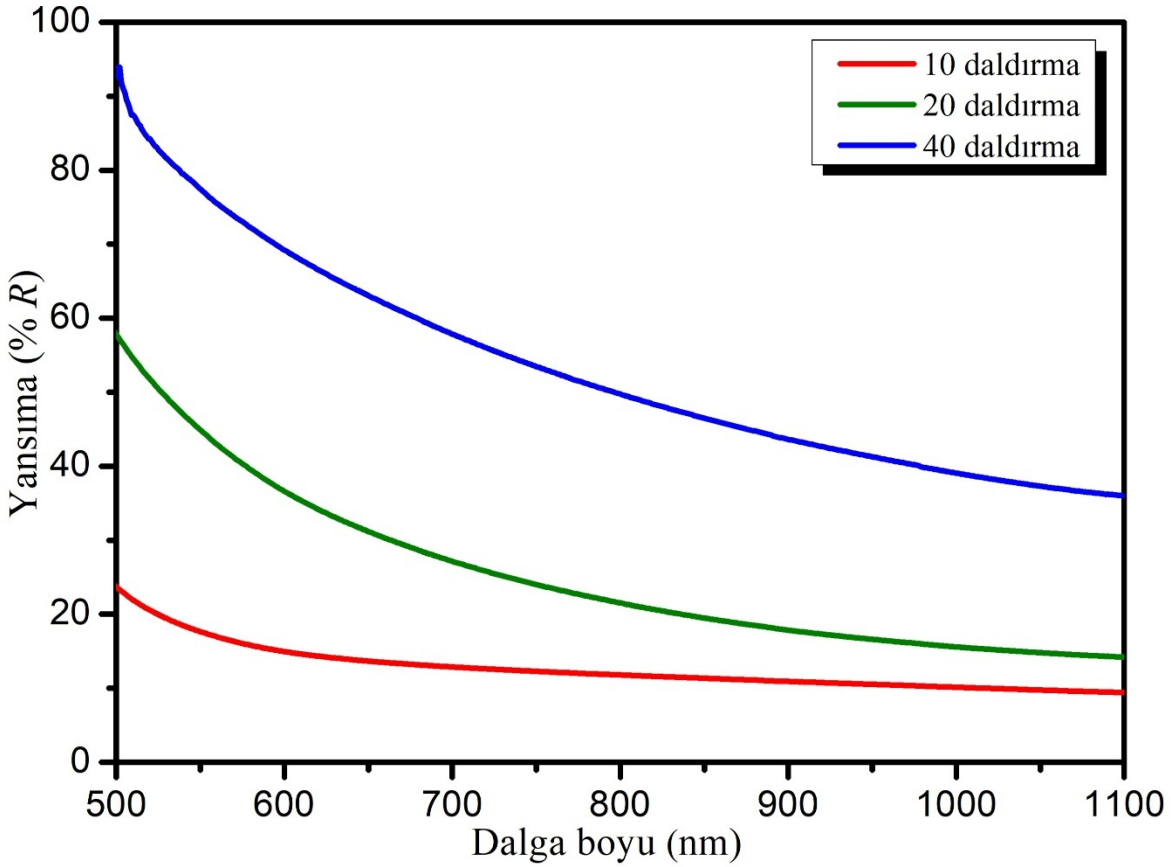
10, 20 ve 40 daldırma döngüsü uygulanarak SILAR yöntemi ile 70 °C sıcaklıkta cam alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma değerlerinin dalga boyuna karşı değişimi Şekil 4.34'te verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O ince filminin 550 nm'de 0,29 ile başlayan soğurma değeri, dalga boyu arttıkça hızlı bir şekilde azalarak 800 nm'de 0,18'e ve 1100 nm'de 0,15'e düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin 550 nm'deki soğurma değeri 0,91 olup, bu değer 800 nm'de 0,33'e ve 1100 nm'de 0,23'e gerilemektedir. 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan Cu_2O filminin 550 nm'de ölçülen soğurma değeri 2,28 iken, bu değer 800 nm'de 0,96'e ve 1100 nm'de 0,68'e düşmektedir. Elde edilen veriler, daldırma döngüsü sayısının artmasıyla birlikte (film kalınlığının artmasıyla) optik soğurma değerlerinin tüm dalga boylarında belirgin şekilde yükseldiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, tüm filmler kısa dalga boylarında yüksek soğurma göstermekte; dalga boyu arttıkça soğurma değerleri azalmaktadır. Özellikle 40 daldırma döngüsüyle elde edilen filmin görünür spektrum bölgesinde yüksek soğurma sergilemesi, bu yapının fotovoltaik uygulamalar açısından daha uygun nitelikler taşıdığını göstermektedir. Cu_2O'nun yarıiletken karakteri, kısa dalga boylarında yüksek soğurma göstermesiyle daha etkin şekilde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, 70 °C sıcaklıkta hazırlanan filmlerin, özellikle 40 daldırma döngüsüyle elde edilen yapının, daha yüksek soğurma değerleri sergilemesi,

bu sıcaklıkta hazırlanan filmlerin kalınlaştığını dolayısıyla yapısal özelliklerinin daha iyi olduğunu ve kristalleşme derecelerinin yüksekliğini işaret etmektedir.



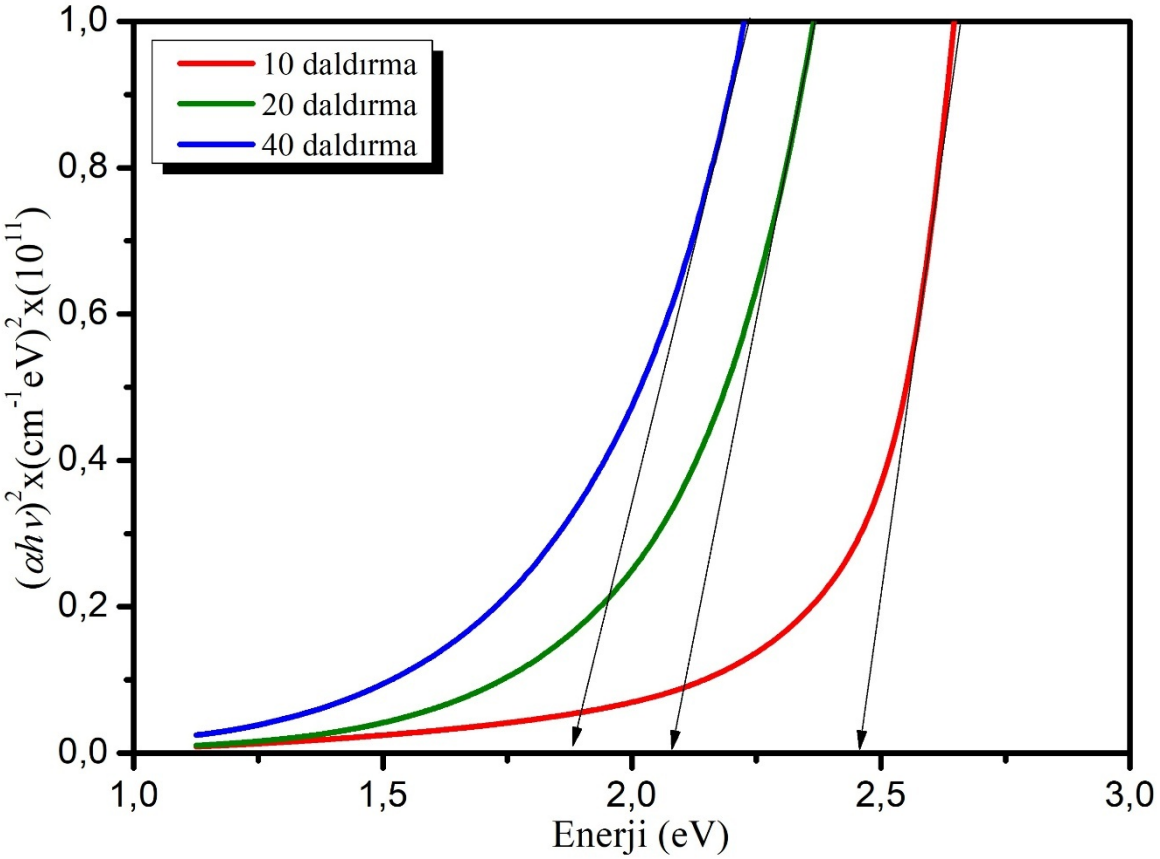
Şekil 4.34. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği

SILAR yöntemiyle, 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 70 ^{o}C'de cam alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumunun dalga boyuna karşı değişimi Şekil 4.35'te sunulmaktadır. 10 daldırma döngüsüyle hazırlanan Cu_2O ince filmin yansıma değeri, 550 nm'de %17,6 olup, dalga boyu arttıkça hafif bir azalma göstererek 800 nm'de %11,8'e, 1100 nm'de ise %9,4 seviyelerine düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde depolanan filmin 550 nm'deki yansıma değeri %44,9 iken, bu değer 800 nm'de %21,5'e, 1100 nm'de %14,2'ye kadar azalmaktadır. 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmin 550 nm'de %77,4 olan yansıma değeri, dalga boyu arttıkça hafifçe azalarak 800 nm'de %49,7'ye ve 1100 nm'de %36'ya düşmektedir. Daldırma döngüsü sayısının artışıyla birlikte yansıma değerlerinde belirgin bir artış gözlenmektedir. Bu artış, film kalınlığının artması ve buna bağlı olarak yüzey morfolojisinin değişmesiyle ilişkilendirilebilir. Tüm filmlerde, artan dalga boyu ile yansıma değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu eğilim, Cu_2O'nun optik özelliklerinin dalga boyuna bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmin yüksek yansıma değerleri, bu filmin daha düzgün ve yoğun bir yüzey morfolojisine sahip olduğunu düşündürmektedir.



Şekil 4.35. 70 °C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği

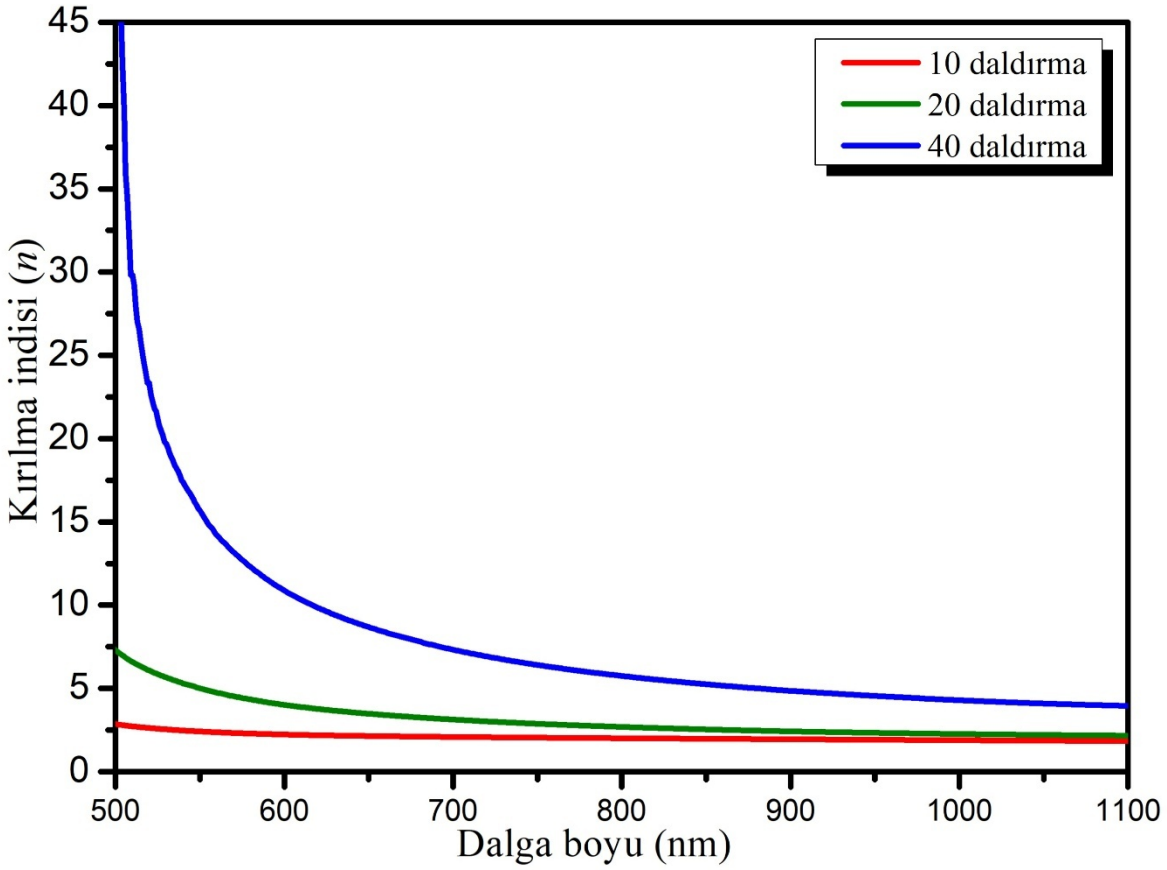
70 °C sıcaklıkta cam alt tabanlar üzerinde SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yasak enerji aralığı değerlerini gösteren grafik Şekil 4.36'da verilmiştir. Daha önce açıklanan Tauc yöntemi ile oluşturulan $(\alpha hv)^2$–hv grafiklerinden, yasak enerji (E_g) değerleri belirlenmiştir. 10 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O ince filmin enerji bant aralığı değeri yaklaşık 2,45 eV'tur. 20 daldırma döngüsünde bu değer yaklaşık 2,08 eV, 40 daldırma döngüsünde ise yaklaşık 1,88 eV olarak bulunmuştur. Daldırma sayısının artmasıyla birlikte Cu_2O ince filmlerin optik bant aralığında bir azalma gözlenmiştir. 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan film, en düşük bant aralığına sahip olması nedeniyle, kızılötesine yakın bölgede daha etkili soğurma gerçekleştirebilmekte ve bu özelliği sayesinde güneş pilleri, fotokataliz ya da diğer optoelektronik uygulamalar için avantaj sağlamaktadır. Bu veriler, Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığının daldırma döngüsü sayısı yoluyla kontrol edilebileceğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.36. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmleri için $(\alpha hv)^2$'nin enerjiye (hv) karşı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 70 ^{o}C'de hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 4.37'de verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde depolanan Cu_2O ince filmin kırılma indisi, 550 nm'de 2,42 olup, dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de 2,01'e ve 1100 nm'de ise 1,84'e düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin 550 nm'deki kırılma indisi 5,01 iken, bu değer 800 nm'de 2,69'a ve 1100 nm'de 2,17'ye gerilemektedir. 40 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O ince filmde ise, 550 nm'de 15,66 olan kırılma indisi, dalga boyu arttıkça hızla azalarak 800 nm'de 5,75'e ve 1100 nm'de 3,96'ya düşmektedir. Bu sonuçlar, daldırma döngüsü sayısındaki artışla birlikte (film kalınlığı arttıkça) kırılma indisi değerlerinin belirgin şekilde yükseldiğini ortaya koymaktadır. Tüm filmlerde dalga boyu arttıkça kırılma indisi değerlerinde azalma gözlenmiştir. Özellikle kısa dalga boylarında kırılma indisi değerlerindeki keskin düşüş, bu bölgede malzemenin güçlü optik soğurma özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmde gözlenen çok yüksek kırılma indisi değeri, filmin kalınlık değerinin artışı ile ilişkilendirilebilir. Bu veriler, Cu_2O ince filmlerin optik özelliklerinin daldırma döngüsü sayısıyla önemli ölçüde kontrol edilebildiğini ve bu nedenle çeşitli optik uygulamalar için uyarlanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Yüksek kırılma indisli filmler; özellikle optik sensörler, güneş

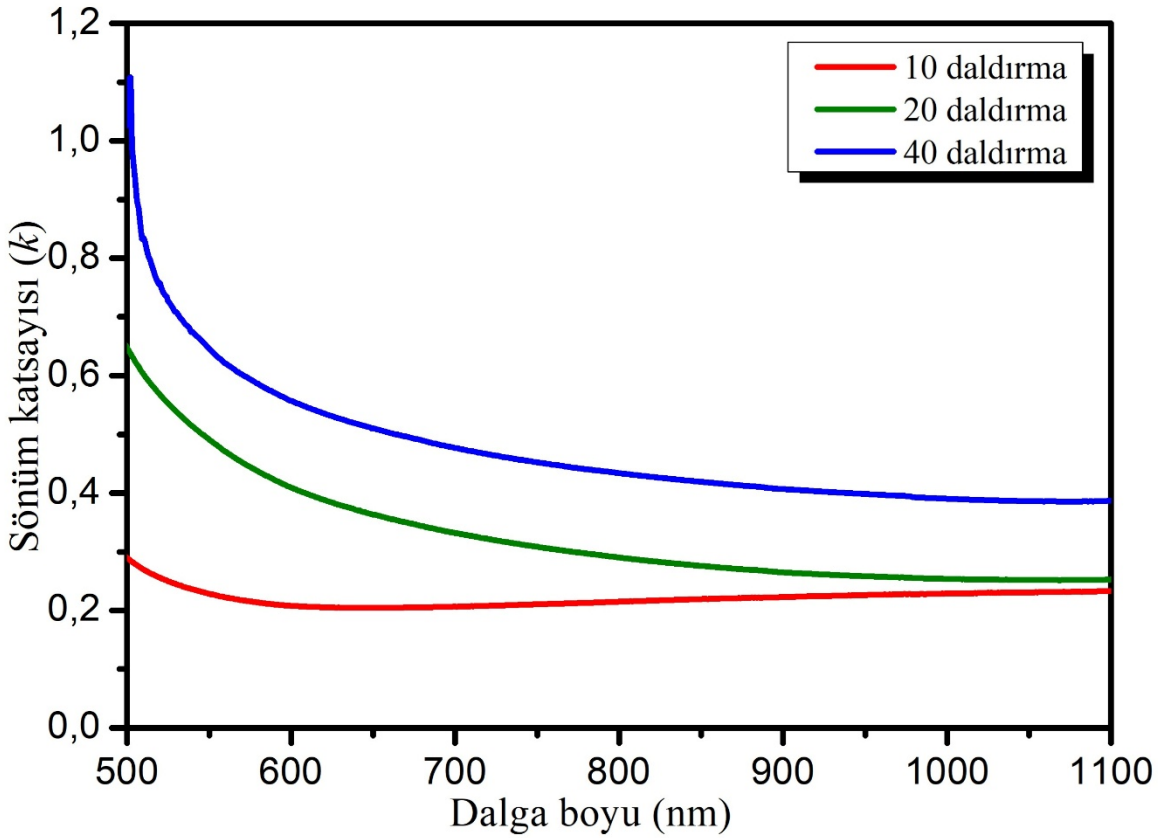
pillerinin verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan yansıma önleyici kaplamalar ve fotonik cihazlar gibi uygulamalar için potansiyel taşımaktadır.



Şekil 4.37. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin-dalga boyuna karşı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 70 ^{o}C sıcaklıkta hazırlanan Cu_2O filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.38'de verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısı 550 nm'de 0,22 değerindeyken, dalga boyunun artmasıyla birlikte bu değer 800 nm'de 0,21'e, 1100 nm'de ise 0,23 olarak değişmektedir. 20 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmde 550 nm'de 0,49 olan sönüm katsayısı, 800 nm'de 0,29'a, 1100 nm'de ise 0,25'e düşmektedir. 40 daldırma döngüsünde elde edilen filmde ise bu değerler sırasıyla 0,64, 0,43 ve 0,38 şeklinde azalmaktadır. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça, Cu_2O filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir. Bu durum, film kalınlığının artmasıyla birlikte malzemenin ışık soğurma kapasitesinin de yükseldiğini göstermektedir. Tüm numunelerde dalga boyu arttıkça sönüm katsayısı değerlerinin genel olarak azaldığı görülmektedir. Bu eğilim, Cu_2O malzemesinin kısa dalga boyu bölgede daha yüksek enerjiye sahip fotonları soğurduğunu, uzun dalga boyu bölgede ise soğurmanın azaldığını göstermektedir. 10 daldırma döngüsü ile hazırlanan filmin sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna bağlı olarak daha az değişim göstermesi, bu filmin daha homojen bir optik soğurma

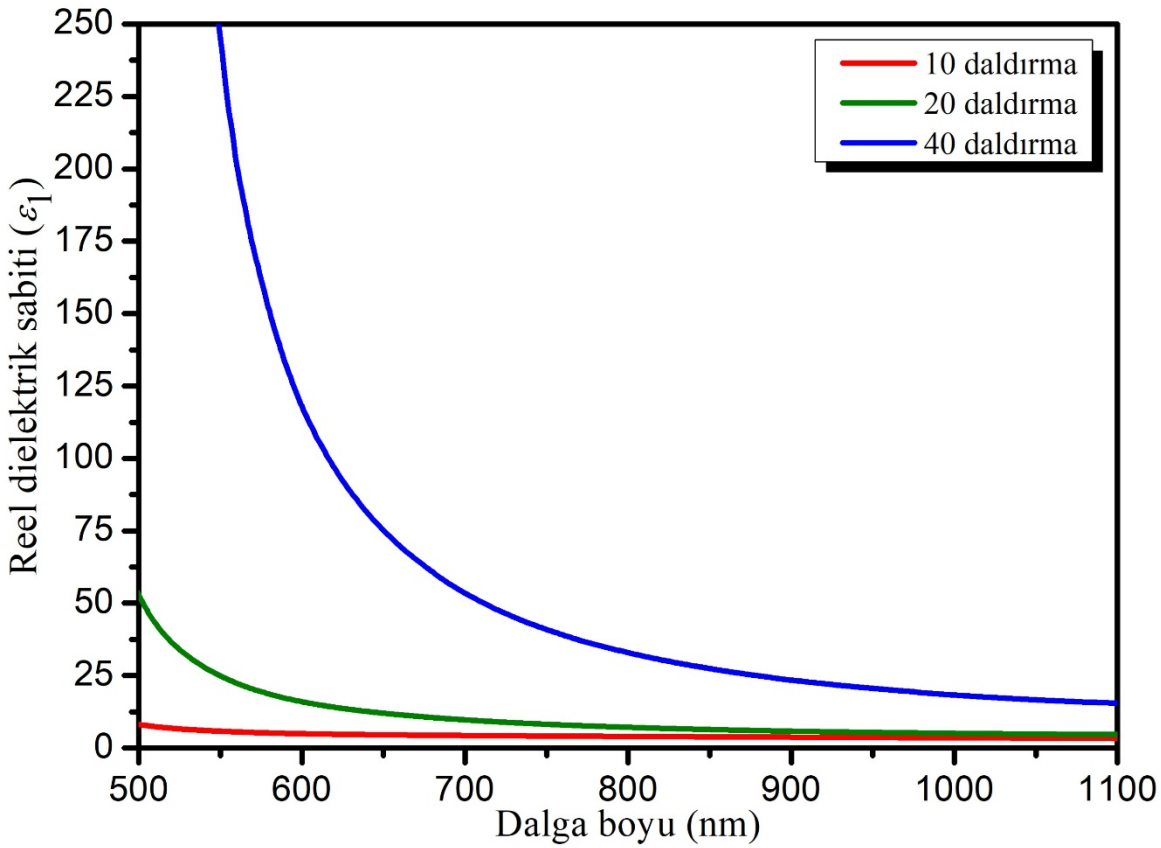
özelliğine sahip olduğunu ve film kalınlığının belirli bir eşik değerin altında kaldığını düşündürmektedir. Buna karşılık, 40 daldırma döngüsü ile hazırlanan filmde sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna bağlı olarak daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durum, filmin en yüksek optik soğurmaya sahip olduğunu ve ışığı daha verimli şekilde soğurduğunu göstermektedir.



Şekil 4.38. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 70 ^{o}C sıcaklıkta hazırlanan Cu_2O filmlerin reel dielektrik sabiti (ε_1) değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4,39'da görülmektedir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmin 550 nm'de 5,79 olan reel dielektrik sabiti, dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de 4,02'ye, 1100 nm'de ise 3,35'e düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmde bu değer, 550 nm'de 24,65 olup, 800 nm'de 7,17'ye ve 1100 nm'de 4,66'ya gerilemektedir. 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan Cu_2O filminin 550 nm'de 240,41 olan reel dielektrik sabiti ise, dalga boyu arttıkça hızla azalarak 800 nm'de 32,92'ye, 1100 nm'de ise 15,54'e kadar düşmektedir. Daldırma döngüsü sayısındaki artışa paralel olarak reel dielektrik sabiti değerlerinin de belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir. Tüm numunelerde, dalga boyunun artmasıyla birlikte reel dielektrik sabiti değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. Bu eğilim, Cu_2O'nun optik özelliklerinin dalga boyu ile nasıl değiştiğini göstermesi bakımından önemlidir. Özellikle 40 daldırma döngüsü ile elde edilen filmde kısa dalga

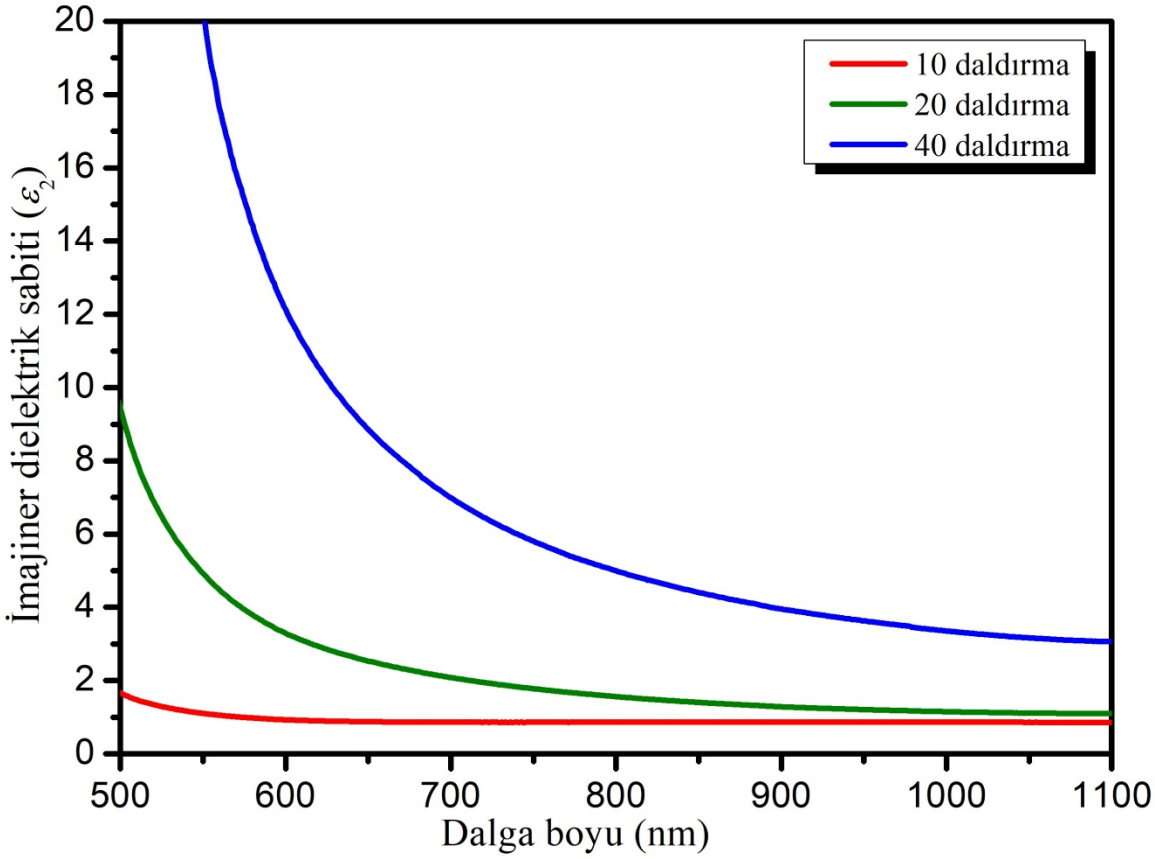
boylarında gözlenen oldukça yüksek reel dielektrik sabiti değerleri, bu malzemenin yüksek elektrik alan depolama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.39. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 70 ^{o}C'de hazırlanan Cu_2O filmlerin imajiner dielektrik sabiti (ε_2) değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.40'ta gösterilmektedir. 10 daldırma döngüsüyle elde edilen Cu_2O ince filminin 550 nm'deki imajiner dielektrik sabiti 1,10 olup, dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de 0,87'ye, 1100 nm'de ise 0,86'ya ulaşmaktadır. 20 daldırma döngüsüyle elde edilen filmin ε_2 değeri 550 nm'de 4,92 iken, bu değer 800 nm'de 1,56'ya ve 1100 nm'de 1,10'a düşmektedir. 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmin 550 nm'deki ε_2 değeri 20,23 olup, bu değer 800 nm'de 4,99'a, 1100 nm'de ise 3,06'ya gerilemektedir. Daldırma döngüsü sayısındaki artışa bağlı olarak imajiner dielektrik sabiti değerlerinin tüm dalga boylarında belirgin biçimde arttığı gözlenmiştir. Bu durum, film kalınlığındaki artışın, malzemenin ışık soğurma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Tüm filmlerde dalga boyunun artışıyla birlikte imajiner dielektrik sabiti değerlerinde bir azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu eğilim, Cu_2O'nun özellikle kısa dalga boylarında daha yüksek soğurma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, malzemenin yüksek enerjili fotonlara karşı daha etkin bir etkileşim sergilediğini işaret eder.

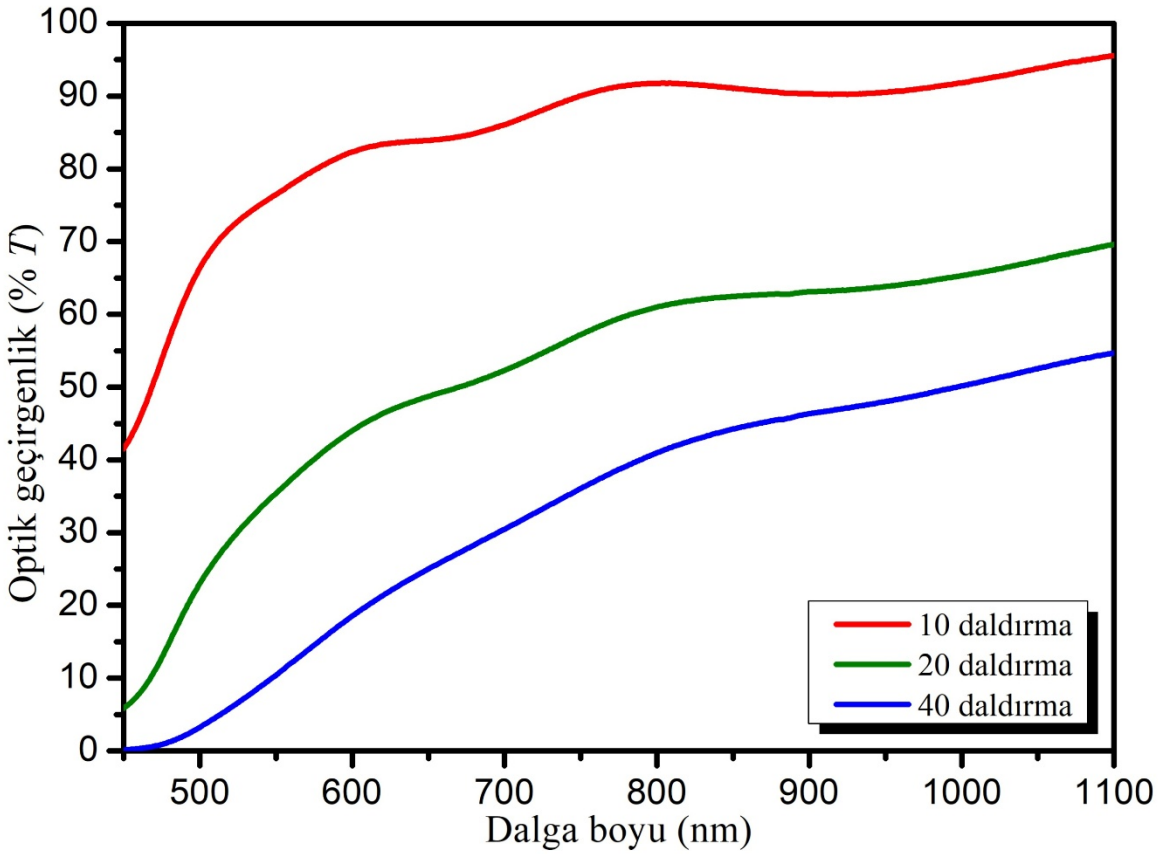
Özellikle 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmin kısa dalga boylarındaki yüksek imajiner dielektrik sabiti değerleri, Cu_2O'nun fotovoltaik uygulamalarda soğurucu tabaka olarak kullanılma potansiyelini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.40. 70 ^oC'de farklı daldırma döngülerinde cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

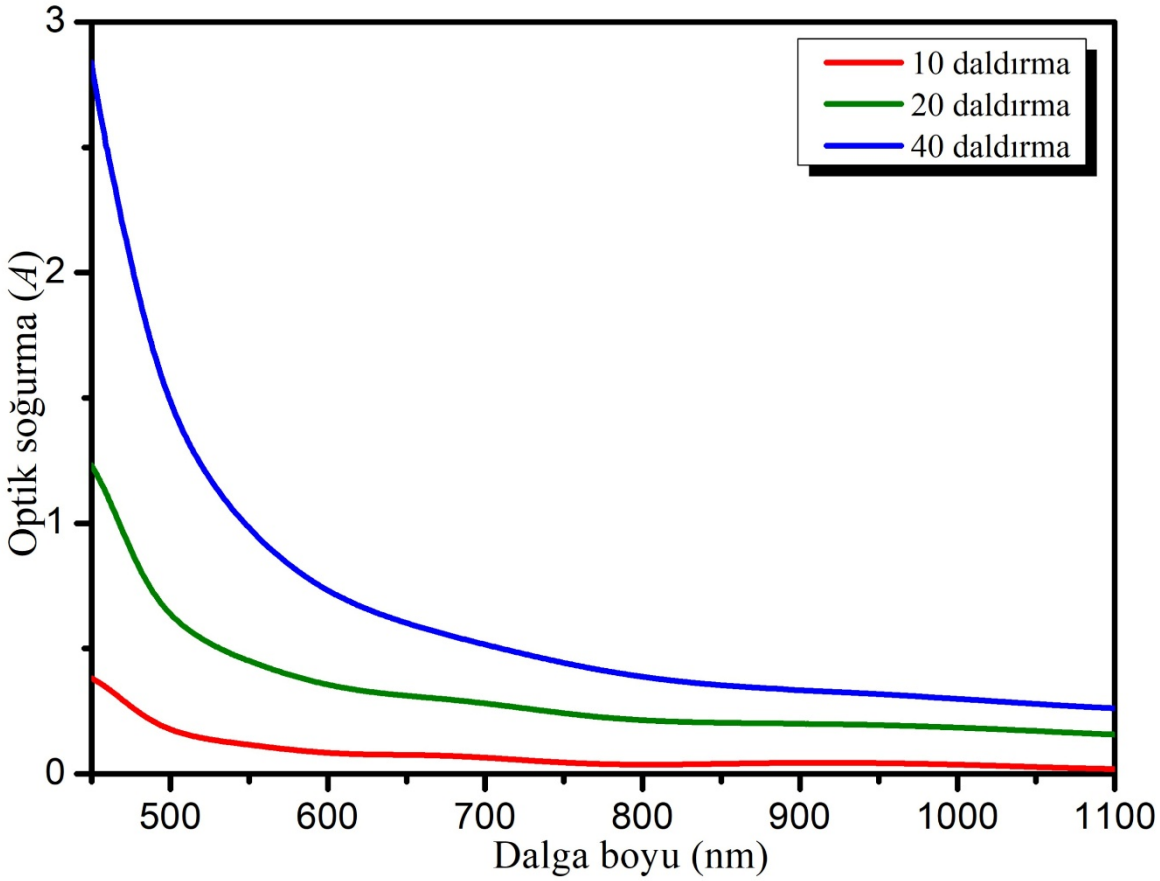
4.3.3. FTO Alt Taban Üzerinde 30 ^{o}C Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi

SILAR yöntemi ile 30 ^{o}C sıcaklıkta, FTO alt taban üzerinde 10, 20 ve 40 daldırma döngüsü uygulanarak hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik değerlerinin dalga boyuna karşı değişimi Şekil 4.41'de verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O filminin 550 nm dalga boyundaki geçirgenlik değeri %76,45 olarak ölçülmüş, bu değer 800 nm'de %91,76'ya ve 1100 nm'de %95,51'e kadar yükselmiştir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin geçirgenlik değeri 550 nm'de %35,36 olup, 800 nm'de %61'e ve 1100 nm'de %69,64'e ulaşmıştır. 40 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin 550 nm'de %10,40 olan geçirgenlik değeri, 800 nm'de %40,95'e ve 1100 nm'de çok yavaş bir artışla %54,70'e kadar yükselmiştir. Bu sonuçlar, daldırma döngüsü sayısı arttıkça filmlerin kalınlaştığını ve buna bağlı olarak optik geçirgenliğin azaldığını göstermektedir. Film kalınlığındaki artış, ışığın film içinden geçişini zorlaştırmakta ve soğurmayı artırmaktadır. Diğer yandan, tüm filmlerde dalga boyunun artmasıyla birlikte optik geçirgenlikte bir artış gözlenmiştir. Bu eğilim, Cu_2O'nun kısa dalga boylarında daha fazla ışık soğurduğunu, uzun dalga boylarında ise geçirgenliğinin arttığını göstermektedir. Geçirgenlikteki bu dalga boyuna bağlı değişim, Cu_2O'nun doğrudan bant aralığına sahip bir yarıiletken olmasıyla ve film kalınlığı gibi yapısal faktörlerle yakından ilişkilendirilebilir. Özellikle kısa dalga boylarındaki düşük geçirgenlik, bant aralığına karşılık gelen foton enerjisinin malzeme tarafından etkin bir şekilde soğurulmasıyla açıklanabilir. Bu bulgular, Cu_2O filmlerin optoelektronik uygulamalar için ışık soğurma özelliklerinin kontrolünde işlem parametrelerinin (sıcaklık, daldırma döngüsü sayısı, pH ve alt taban) önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.41. 30 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik-dalga boyu grafiği

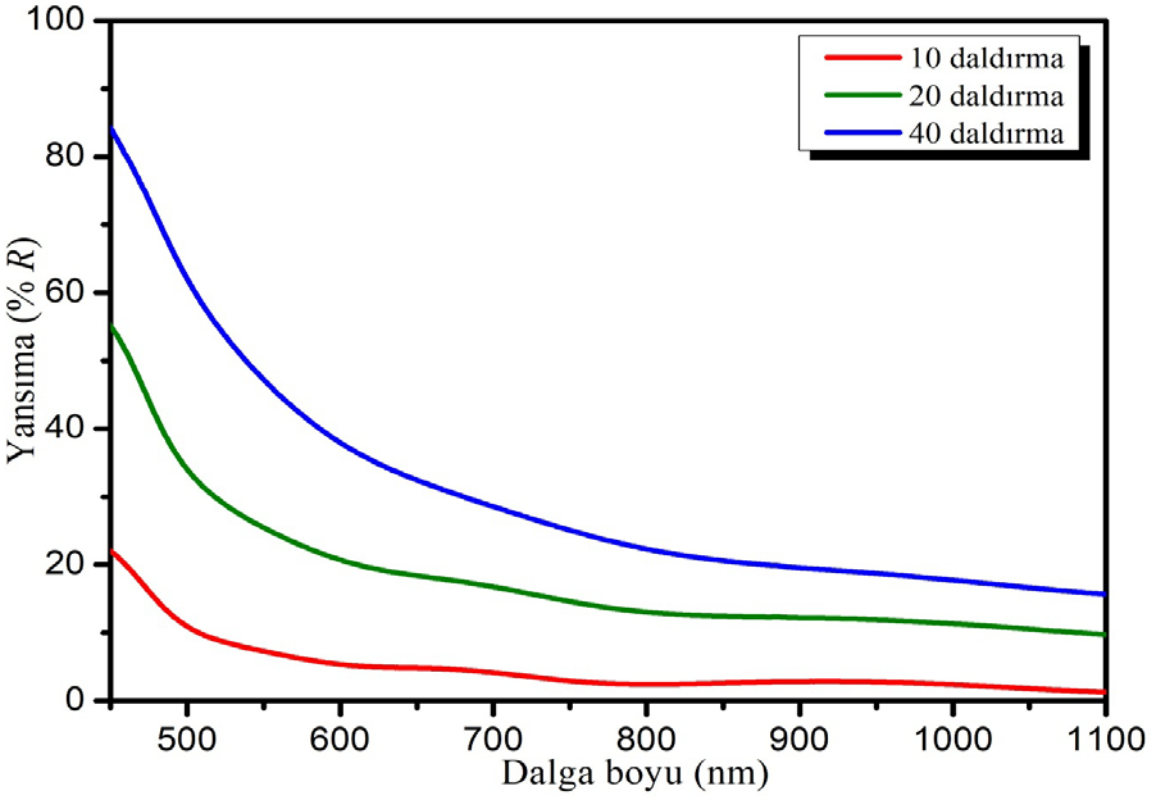
SILAR yöntemi ile 30 °C sıcaklıkta FTO alt tabanlar üzerinde 10, 20 ve 40 daldırma döngüsü uygulanarak hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma değerlerinin dalga boyuna karşı değişimi Şekil 4.42'de sunulmuştur. 10 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O filminin 550 nm'de 0,11 değerinde başlayan soğurma değeri, dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de 0,03'e ve 1100 nm'de 0,01'e düşmektedir. 20 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmin 550 nm'deki soğurma değeri 0,45 olup, bu değer 800 nm'de 0,21'e ve 1100 nm'de 0,15'e gerilemektedir. 40 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin 550 nm'deki soğurma değeri 0,98 olarak ölçülmüş, bu değer dalga boyunun artmasıyla birlikte 800 nm'de 0,38'e ve 1100 nm'de 0,26'ya düşmüştür. Elde edilen sonuçlar, daldırma döngüsü sayısı arttıkça (dolayısıyla film kalınlığı arttıkça) optik soğurma değerlerinin belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. Bu durum, artan kalınlıkla birlikte malzemenin ışık soğurma kapasitesinin arttığını ortaya koymaktadır. Tüm filmlerde dalga boyu arttıkça soğurma değerlerinde azalma gözlenmiş, bu da Cu_2O'nun özellikle kısa dalga boylarında daha güçlü soğurma gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu veriler, Cu_2O ince filmlerin optik soğurma özelliklerinin daldırma döngüsü sayısı ile etkin bir biçimde kontrol edilebileceğini göstermekte olup, çeşitli optoelektronik uygulamalar için bu parametrenin optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.42. 30 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği

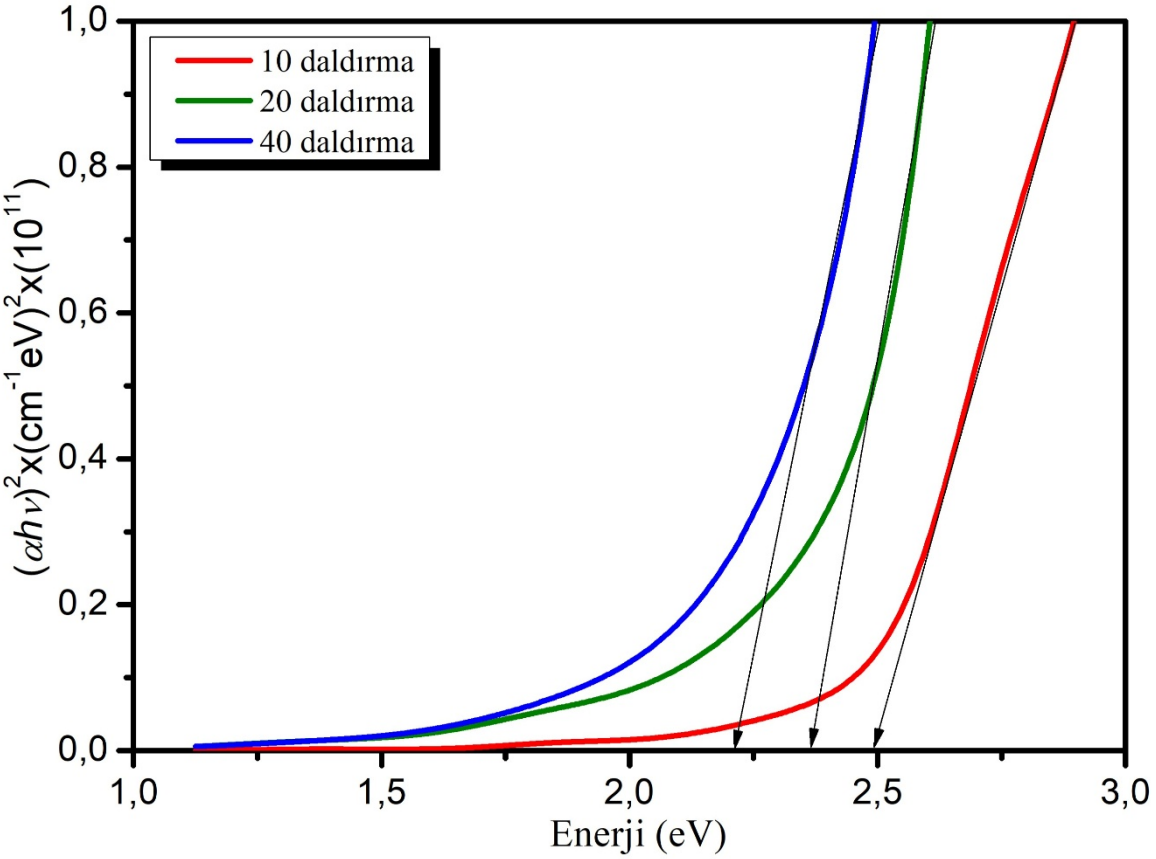
SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 °C'de FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumlarının dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.43'te verilmektedir. 10 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin 550 nm'de %7,3 olan yansıma değeri, dalga boyu arttıkça hafif bir azalma göstererek 800 nm'de %2,4'e, 1100 nm'de ise %1,3'e düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin 550 nm'deki yansıma değeri %25,4 olup, 800 nm'de %13, 1100 nm'de ise %9,7 seviyelerine gerilemektedir. 40 daldırma döngüsüyle elde edilen filmin 550 nm'deki yansıma değeri %47,2 olup, 800 nm'de %22,3'e ve 1100 nm'de %15,6'ya kadar azalmaktadır. Daldırma döngüsü sayısının artmasıyla birlikte yansıma değerlerinin tüm dalga boylarında belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir. Bu artış, film kalınlığındaki artış ile birlikte yüzey yansıtıcılığının da arttığını göstermektedir. Tüm filmlerde dalga boyu arttıkça yansıma değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. Bu eğilim, Cu_2O'nun özellikle kısa dalga boylarında daha yüksek yansıtıcılığa sahip olduğunu; buna karşın uzun dalga boylarında daha az yansıma gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu yansıma davranışı, Cu_2O'nun yüzey morfolojisiyle doğrudan ilişkilidir. Daldırma döngüsü sayısındaki artışa bağlı olarak film kalınlığı ve yüzeyindeki değişimler, optik yansımayı önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle 40 daldırma döngüsüyle elde edilen filmin kısa dalga boylarındaki yüksek yansıma performansı, bu yapının yansıtıcı kaplamalar

gibi uygulamalarda potansiyel taşıdığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin yansıma özelliklerinin daldırma döngüsü sayısıyla kontrol edilebildiğini ortaya koymaktadır.



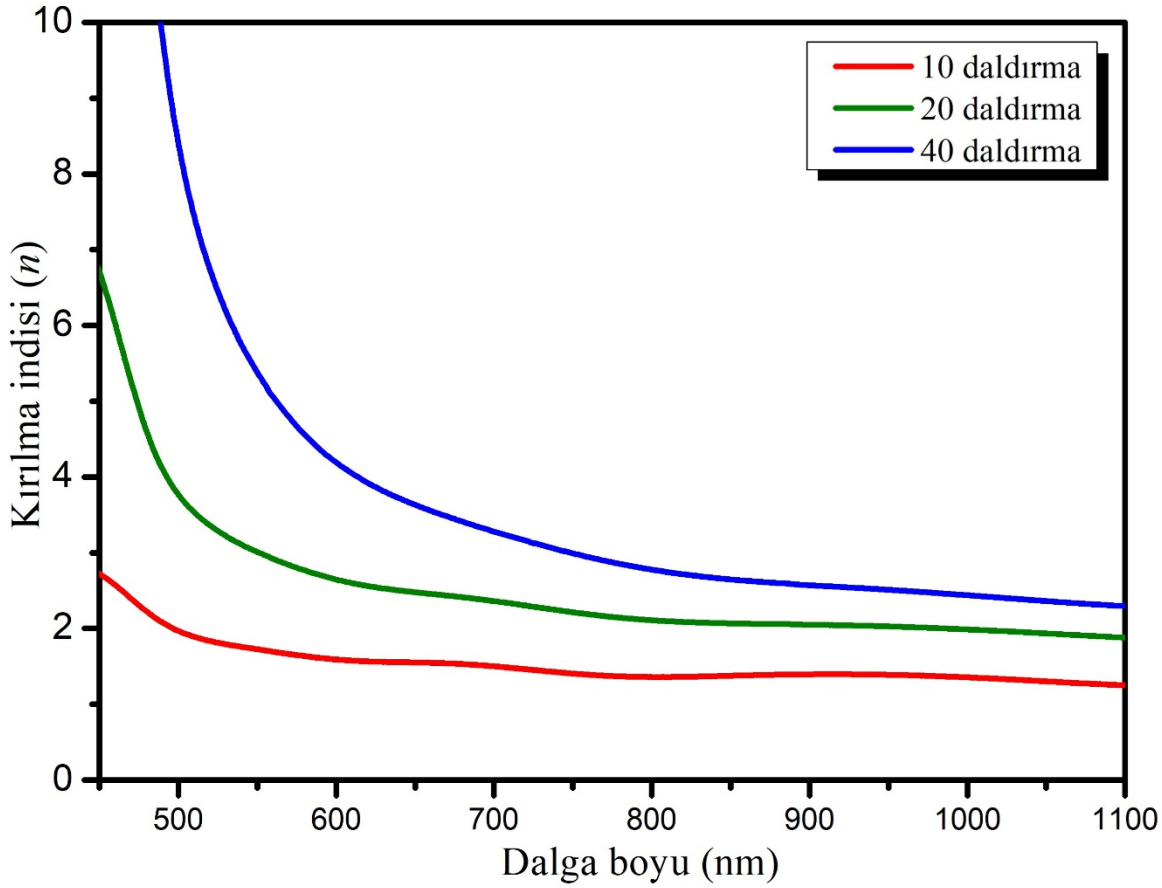
Şekil 4.43. 30 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 °C sıcaklıkta FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığı değerlerini gösteren grafik Şekil 4.44'te sunulmuştur. $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri kullanılarak yapılan Tauc analizine göre, 10 daldırma döngüsüyle elde edilen Cu_2O ince filmin bant aralığı yaklaşık 2,47 eV'dir. 20 daldırma döngüsünde bu değer yaklaşık 2,37 eV, 40 daldırma döngüsünde ise yaklaşık 2,19 eV olarak bulunmuştur. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça bant aralığı değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Bu azalma Moss-Burstein kayması ile açıklanabilir. Bir yarıiletkende Moss-Burstein kayması; iletim bandı kenarının alçalması ve değerlik bandı kenarının simetrik olarak yukarı itilmesi ile ilişkilidir (Sivakumar ve ark., 2007). Elde edilen bu sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin elektronik bant yapısının daldırma döngüsü sayısı ile kontrol edilebildiğini göstermektedir. Bant aralığı değerlerinde gözlenen bu değişim, Cu_2O malzemesinin fotovoltaik ve optoelektronik uygulamalarda performansının optimize edilmesi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.



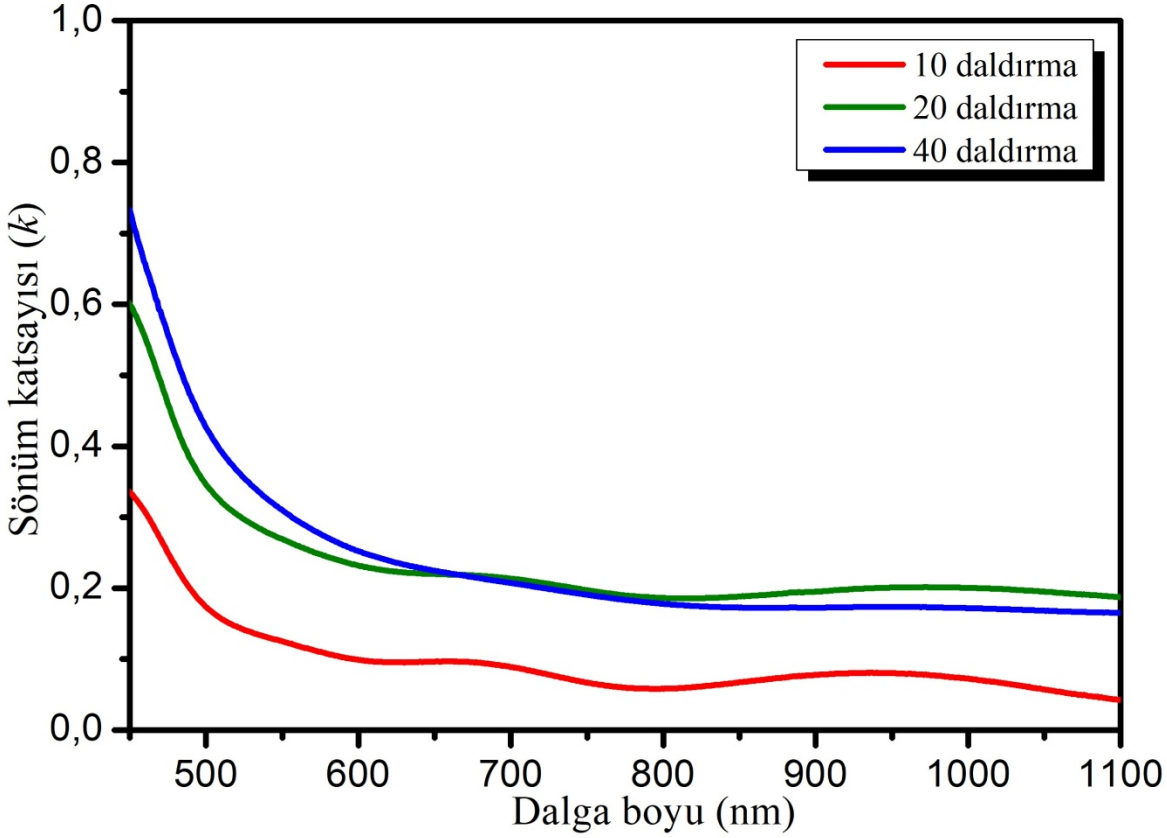
Şekil 4.44. 30 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2$'nin enerjiye ($h\nu$) karşı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 °C'de FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 4.45'te sunulmuştur. 10 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O ince filmin kırılma indisi, 550 nm'de 1,72 olup, dalga boyunun artmasıyla birlikte 800 nm'de 1,36'ya, 1100 nm'de ise 1,25'e düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmde kırılma indisi 550 nm'de 3,01 iken, 800 nm'de 2,10'a, 1100 nm'de ise 1,88'e gerilemektedir. 40 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O filminin 550 nm'deki kırılma indisi 5,38 olup, bu değer 800 nm'de 2,77'ye, 1100 nm'de ise 2,29'a düşmektedir. Bu sonuçlar, daldırma döngüsü sayısındaki artışla birlikte kırılma indisi değerlerinin belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. Tüm filmlerde dalga boyunun artmasıyla birlikte kırılma indisinde azalma gözlenmiştir. Özellikle kısa dalga boylarında kırılma indisinin yüksek olması, bu bölgelerde yoğun soğurma meydana geldiğini göstermektedir. 40 daldırma döngüsüyle elde edilen filmin yüksek kırılma indisi, bu malzemenin yüksek kırılma indisli kaplamalar için potansiyel kullanımını desteklemektedir. Elde edilen bu sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi özelliklerinin daldırma döngüsü sayısı ile kontrol edilebileceğini ve bu kontrolün optik filtreler ve diğer optoelektronik uygulamalar için önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.



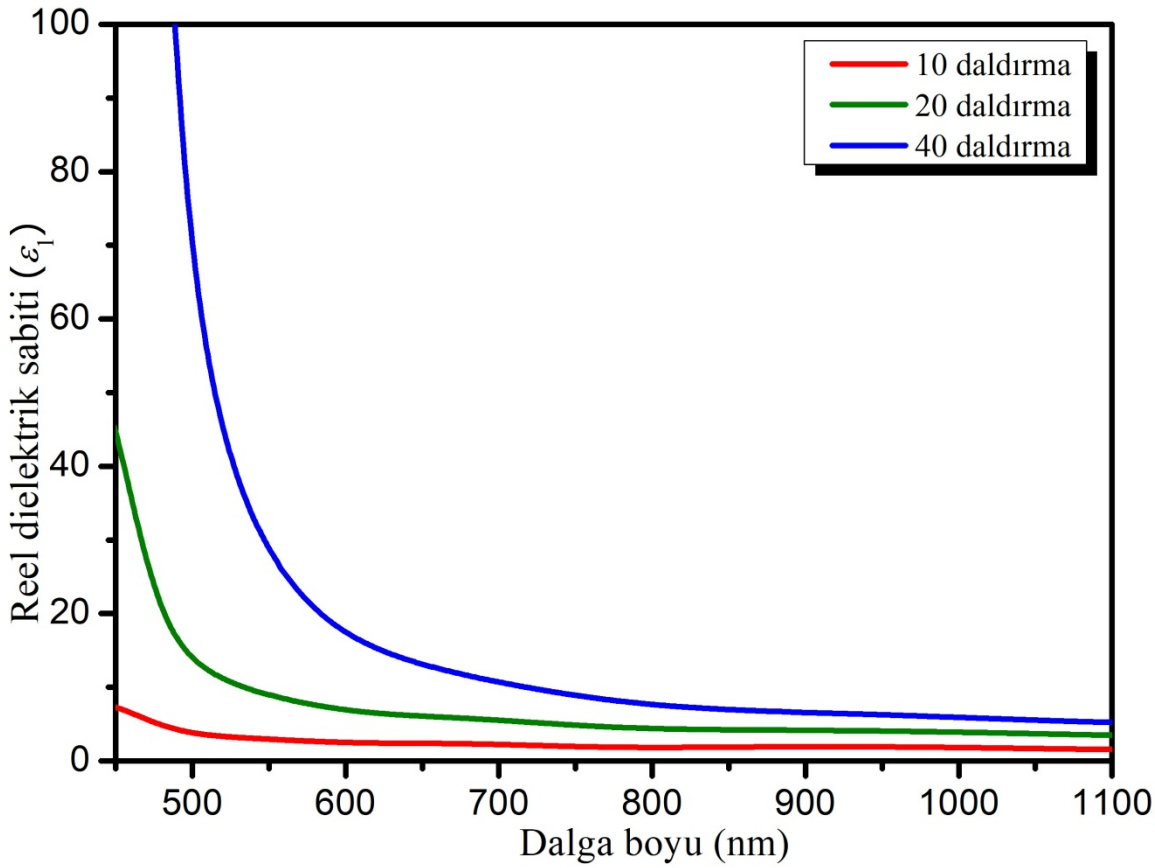
Şekil 4.45. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin-dalga boyuna karşı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 ^{o}C sıcaklıkta FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.46'da verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısı, 550 nm'de 0,12 değerinde iken, dalga boyunun artmasıyla birlikte bu değer 800 nm'de 0,06'ya, 1100 nm'de ise 0,04'e düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin sönüm katsayısı, 550 nm'de 0,27, 800 nm'de 0,17 ve 1100 nm'de ise yine 0,17 olarak tespit edilmiştir. 40 daldırma döngüsünde elde edilen filmde ise bu değerler sırasıyla 0,31, 0,17 ve 0,16 olarak azalmaktadır. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça sönüm katsayısı değerlerinde genel bir artış gözlenmiştir. Bu durum, artan film kalınlığıyla birlikte malzemenin ışık soğurma kapasitesinin de yükseldiğini göstermektedir. Tüm filmlerde dalga boyu arttıkça sönüm katsayısı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu eğilim, Cu_2O malzemesinin özellikle görünür kısa dalga boylarında daha güçlü soğurma özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Uzun dalga boylarında, 20 ve 40 daldırma döngüsünde hazırlanan filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin birbirine oldukça yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, belirli bir film kalınlığından sonra yakın kızılötesi bölgedeki soğurma özelliklerinin doyuma ulaştığı şeklinde değerlendirilebilir. Elde edilen sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısının daldırma döngüsü sayısı ile kontrol edilebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.46. 30 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

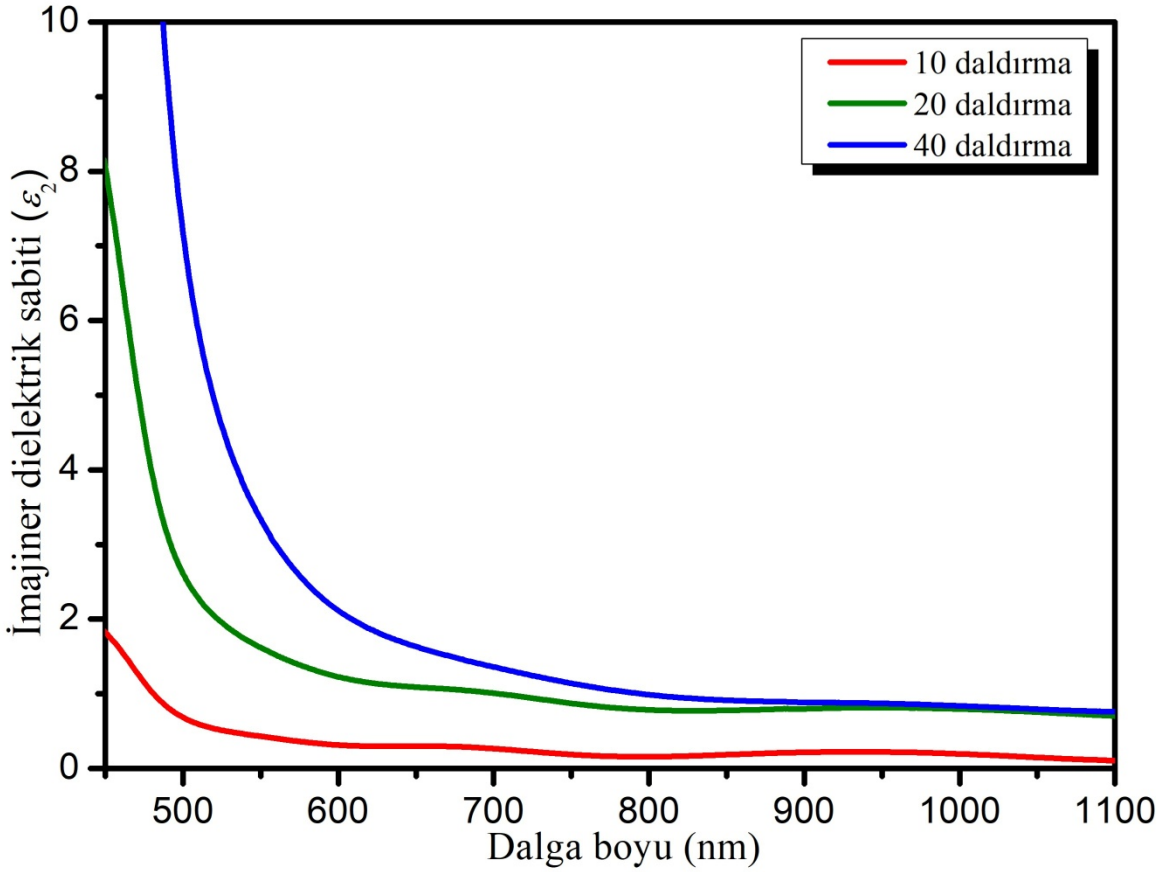
SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 °C sıcaklıkta FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.47'de sunulmaktadır. 10 daldırma döngüsüyle elde edilen Cu_2O ince filmin 550 nm'de 2,96 olan reel dielektrik sabiti, dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de 1,85'e, 1100 nm'de ise 1,56'ya düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmde bu değer, 550 nm'de 8,99 iken, 800 nm'de 4,41'e ve 1100 nm'de 3,50'ye gerilemektedir. 40 daldırma döngüsüyle elde edilen Cu_2O filminin 550 nm'de 28,88 olan reel dielektrik sabiti değeri, dalga boyunun artmasıyla hızla azalarak 800 nm'de 7,68'e ve 1100 nm'de 5,24'e düşmektedir. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça, reel dielektrik sabiti değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu artış, film kalınlığının artışıyla ilişkilendirilebilir. Tüm numunelerde, dalga boyunun artmasıyla reel dielektrik sabiti değerleri azalma eğilimi göstermektedir. Bu sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin daldırma döngüsü sayısıyla kontrollü şekilde ayarlanabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.47. 30 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 °C'de FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmlerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.48'de gösterilmektedir. 10 daldırma döngüsüyle elde edilen Cu_2O ince filminin 550 nm'deki ε_2 değeri 0,43 olup, dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de 0,16'ya ve 1100 nm'de 0,10'a düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmde bu değer 550 nm'de 1,62, 800 nm'de 0,78 ve 1100 nm'de 0,70 olarak belirlenmiştir. 40 daldırma döngüsüyle elde edilen filmin 550 nm'deki ε_2 değeri 3,34 olup, bu değer 800 nm'de 0,99'a, 1100 nm'de ise 0,76'ya gerilemektedir. Daldırma döngüsü sayısının artmasıyla birlikte imajiner dielektrik sabiti değerlerinin tüm dalga boylarında belirgin biçimde arttığı gözlenmektedir. Bu durum, daha fazla döngüyle oluşan kalın filmlerin ışığı daha etkin bir şekilde soğurduğunu göstermektedir. Ayrıca tüm örneklerde, dalga boyu arttıkça ε_2 değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu düşüş, Cu_2O'nun özellikle kısa dalga boylarında güçlü soğurma özelliği gösterdiğini ve uzun dalga boylarında bu özelliğin azaldığını ortaya koymaktadır. 800 nm'den sonraki spektral bölgede, tüm numunelerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin daha düşük ve nispeten sabit bir seviyeye yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, Cu_2O'nun yakın kızılötesi bölgede daha geçirgen ve daha az soğurucu bir davranış sergilediğini göstermektedir. 40 daldırma döngüsü ile hazırlanan filmin, diğerlerine kıyasla çok daha yüksek ε_2 değerleri göstermesi; artan film kalınlığı, daha yüksek kristallenme derecesi gibi yapısal faktörlerle açıklanabilir. Bu bulgular,

Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabitinin ve dolayısıyla optik soğurma özelliklerinin daldırma döngüsü sayısı aracılığıyla etkin bir şekilde kontrol edilebileceğini göstermektedir.

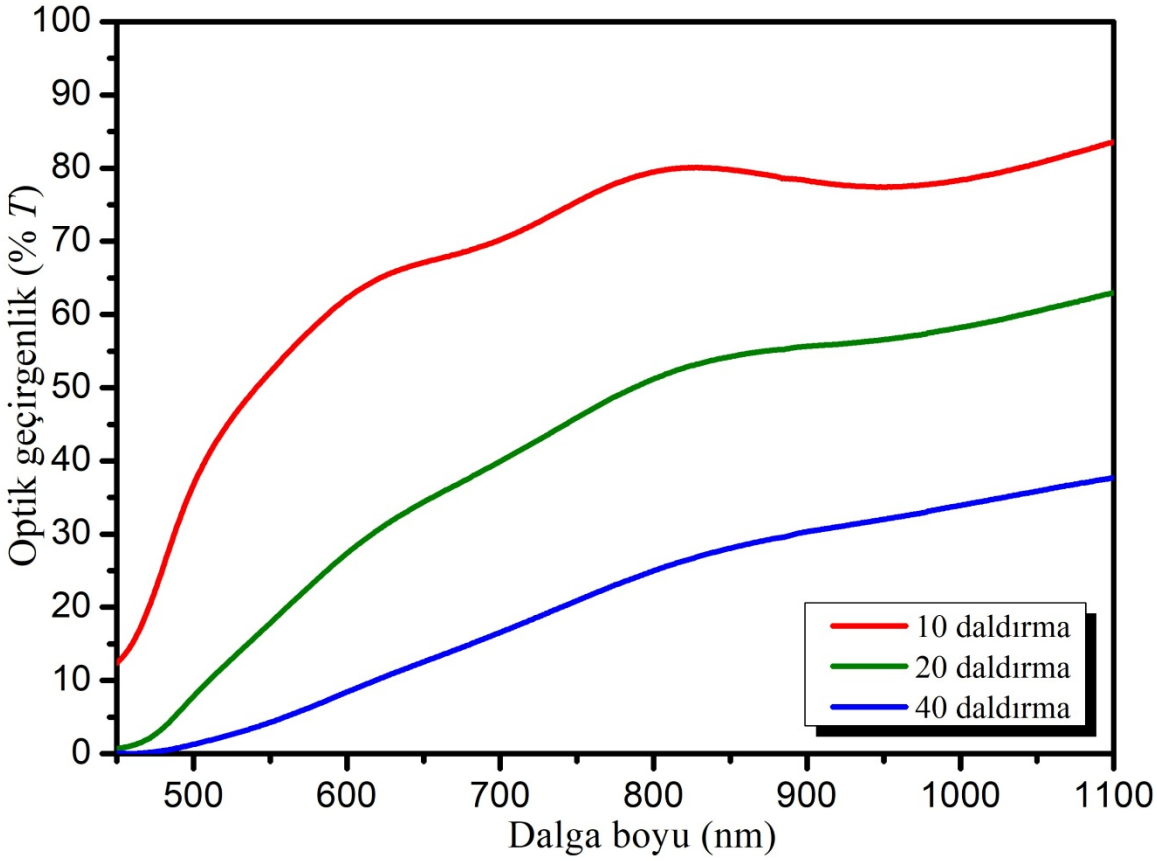


Şekil 4.48. 30 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

4.3.4. FTO Alt Taban Üzerinde 70 ^{o}C Sıcaklıkta Depolanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi

SILAR yöntemi ile 70 ^{o}C sıcaklıkta, FTO alt taban üzerinde 10, 20 ve 40 daldırma döngüsü uygulanarak hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik değerlerinin dalga boyuna karşı değişimi Şekil 4.49'da sunulmuştur. 10 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin 550 nm dalga boyundaki geçirgenlik değeri %52,10 olarak ölçülmüş, bu değer 800 nm'de %79,47'ye ve 1100 nm'de %83,57'ye kadar yükselmiştir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O filminin geçirgenlik değeri 550 nm'de %17,81 olup, 800 nm'de %51,19'a ve 1100 nm'de %62,94'e ulaşmıştır. 40 daldırma döngüsünde elde edilen filmin 550 nm'deki geçirgenlik değeri yalnızca %4,27 olup, 800 nm'de %24,97'ye ve 1100 nm'de %37,67'ye kadar yükselmiştir. Bu veriler, daldırma döngüsü sayısındaki artışla birlikte film kalınlığının da arttığını ve buna bağlı olarak tüm dalga boylarında optik geçirgenlik değerlerinin azaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Film kalınlığındaki bu artış, ışığın film boyunca geçişini zorlaştırmakta ve ışık soğurmasını artırmaktadır. Tüm örneklerde, dalga boyu arttıkça geçirgenlikte artış gözlenmiş olup, Cu_2O'nun

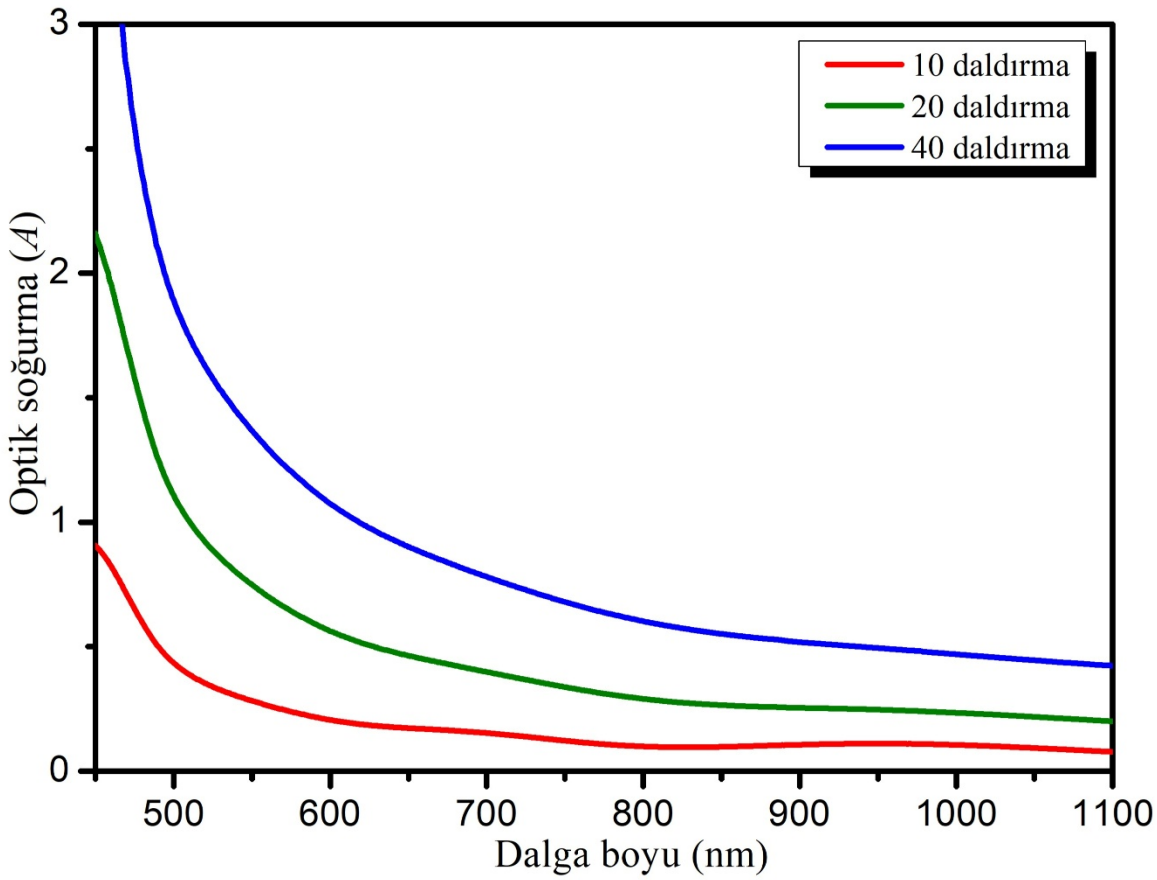
kısa dalga boylarında daha yüksek soğurma özelliği gösterdiği, uzun dalga boylarına doğru ise geçirgenliğinin arttığı görülmektedir. Özellikle 10 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmde, 800–900 nm dalga boyu aralığında gözlenen hafif bir düşüş ve ardından gelen artış, filmin bu aralıkta belirli bir optik etkileşim gösterdiğini düşündürmektedir. Bu durum, filmin kristal yapısı, yüzey morfolojisi veya FTO alt taban ile olan etkileşiminden kaynaklanabilir. Diğer yandan, 40 daldırma döngüsünde elde edilen filmin tüm spektral bölgede düşük geçirgenlik göstermesi, bu filmin daha kalın, yoğun ve ışığı daha fazla soğuran bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik özelliklerinin daldırma döngüsü sayısı ile etkin biçimde kontrol edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.49. 70 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik-dalga boyu grafiği

SILAR yöntemi ile 70 °C sıcaklıkta FTO alt tabanlar üzerinde 10, 20 ve 40 daldırma döngüsü uygulanarak hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma değerlerinin dalga boyuna karşı değişimi Şekil 4.50'de sunulmuştur. 10 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin 550 nm'deki optik soğurma değeri 0,28 olarak ölçülmüş, bu değer dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de 0,10'a ve 1100 nm'de 0,07'ye düşmüştür. 20 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmin 550 nm'deki soğurma değeri yaklaşık 0,74 olup, 800 nm'de 0,23'e ve 1100 nm'de 0,20'ye gerilemiştir. 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan Cu_2O filminin 550 nm'deki optik soğurma değeri 1,36 olarak ölçülmüş,

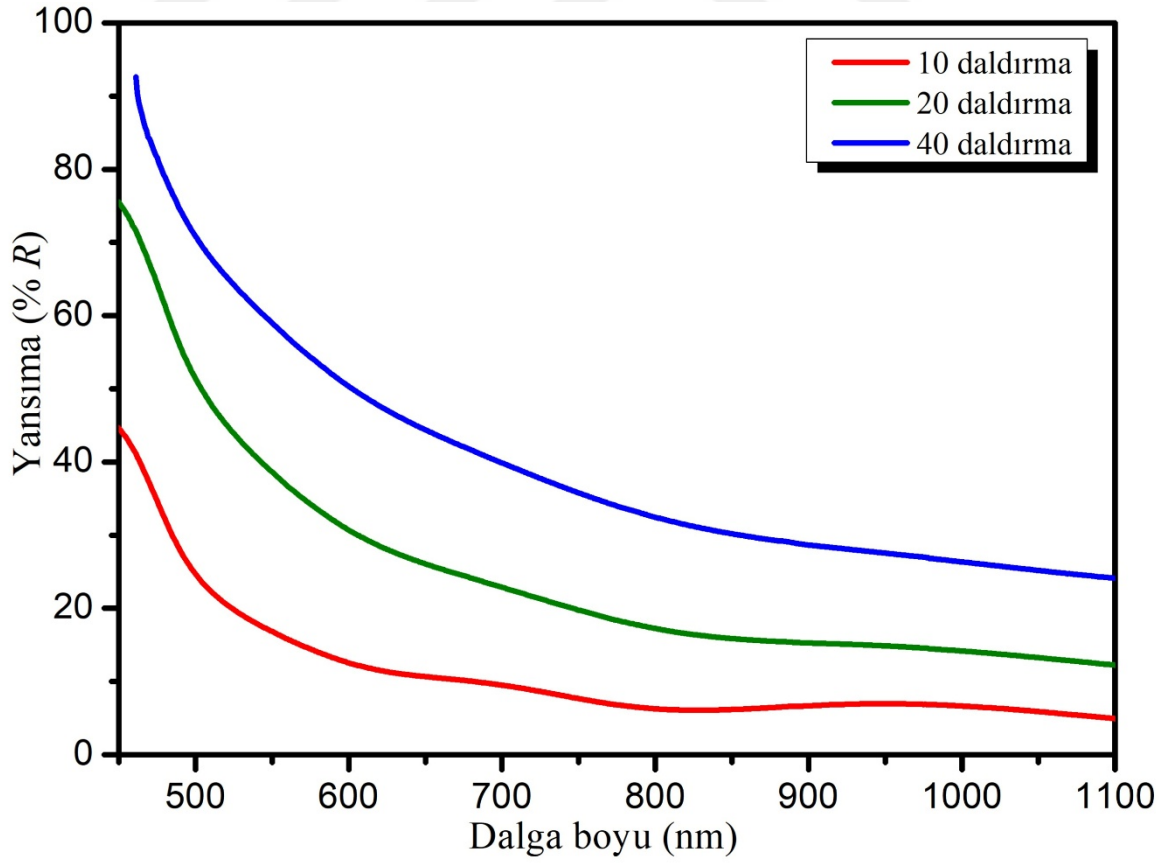
dalga boyunun artmasıyla birlikte bu değer 800 nm'de 0,60'a ve 1100 nm'de 0,42'ye düşmüştür. Elde edilen bu veriler, daldırma döngüsü sayısı arttıkça (dolayısıyla film kalınlığı arttıkça) tüm dalga boylarında optik soğurma değerlerinin belirgin biçimde yükseldiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, film kalınlığındaki artışla ışık yolunda daha fazla soğurucu Cu_2O malzemesinin bulunmasıyla doğrudan ilişkilidir. Tüm filmler için ortak bir eğilim olarak, dalga boyu arttıkça soğurma değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Özellikle 40 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin tüm spektral aralıkta gösterdiği yüksek soğurma davranışı, bu tür filmlerin optik uygulamalarda soğurucu tabaka olarak kullanılabilme potansiyelini vurgulamaktadır. Elde edilen sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin optik soğurma özelliklerinin daldırma döngüsü sayısıyla kontrol edilebileceğini göstermektedir. Bu kontrol parametresi, güneş hücreleri, fotodetektörler, optik filtreler ve diğer optoelektronik uygulamalarda Cu_2O ince filmlerin performansını optimize etmek açısından önem arz etmektedir.



Şekil 4.50. 70 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği

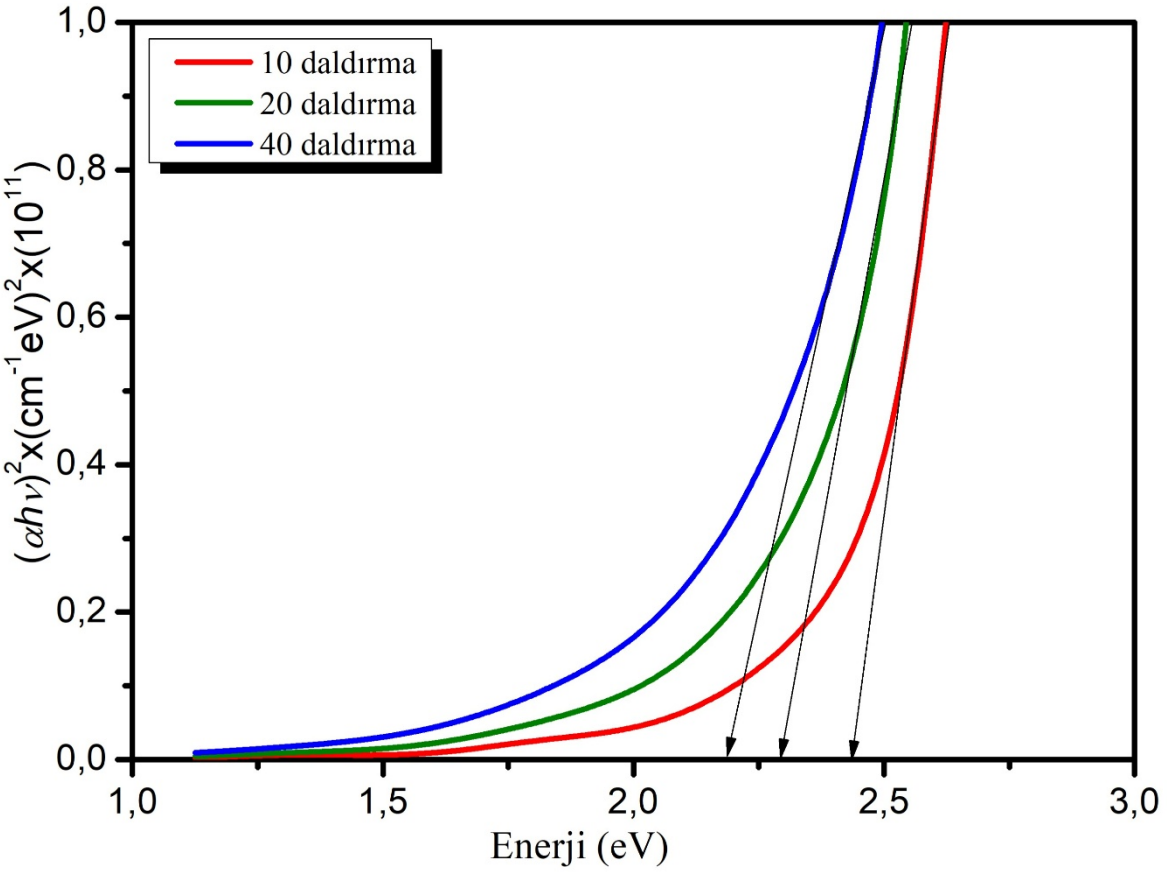
SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 70 °C'de FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumlarının dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.51'de sunulmaktadır. 10 daldırma döngüsü ile elde edilen Cu_2O ince filmin 550 nm'de %16,8 olan yansıma değeri, dalga boyu arttıkça hafif bir azalma göstererek 800 nm'de %6,2'ye, 1100 nm'de

ise %4,9'a düşmektedir. 20 daldırma döngüsü ile hazırlanan filmin 550 nm'deki yansıma değeri %38,6 olup, 800 nm'de %17,2'ye ve 1100 nm'de %12,2'ye kadar azalmaktadır. 40 daldırma döngüsüyle elde edilen filmin 550 nm'deki yansıma değeri %59 olup, dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de %32,4'e ve 1100 nm'de %24,1'e düşmektedir. Daldırma döngüsü sayısının artmasıyla birlikte, tüm dalga boylarında yansıma değerlerinin belirgin şekilde yükseldiği gözlenmiştir. Bu artış, film kalınlığındaki büyüme ve yüzey morfolojisindeki değişimlerin yansıma davranışları üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Tüm filmlerde dalga boyunun artmasıyla yansıma değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Özellikle 10 daldırma döngüsü ile hazırlanan filmin 800–900 nm aralığında gözlenen minimum yansıma ve sonrasındaki hafif artış, interferans etkilerine bağlı olarak özel bir optik davranış sergilediğine işaret etmektedir. 40 daldırma döngüsü ile hazırlanan filmin tüm spektrumda göreceli olarak yüksek yansıma göstermesi, filmin daha kalın ve yoğun olmasıyla; ayrıca yüzey pürüzlülüğündeki artış ya da kristallenme derecesindeki yükselme ile açıklanabilir. Bu sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin yansıma özelliklerinin daldırma döngüsü sayısıyla etkin bir şekilde kontrol edilebildiğini göstermektedir. Özellikle düşük yansıma gerektiren güneş pili uygulamaları için 10 daldırma döngüsüyle elde edilen filmler daha uygun görülürken, belirli dalga boylarında yüksek yansıma istenen optik filtre uygulamaları için daha fazla daldırma döngüsü tercih edilebilir.



Şekil 4.51. 70 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yansıma spektrumunun-dalga boyuna karşı grafiği

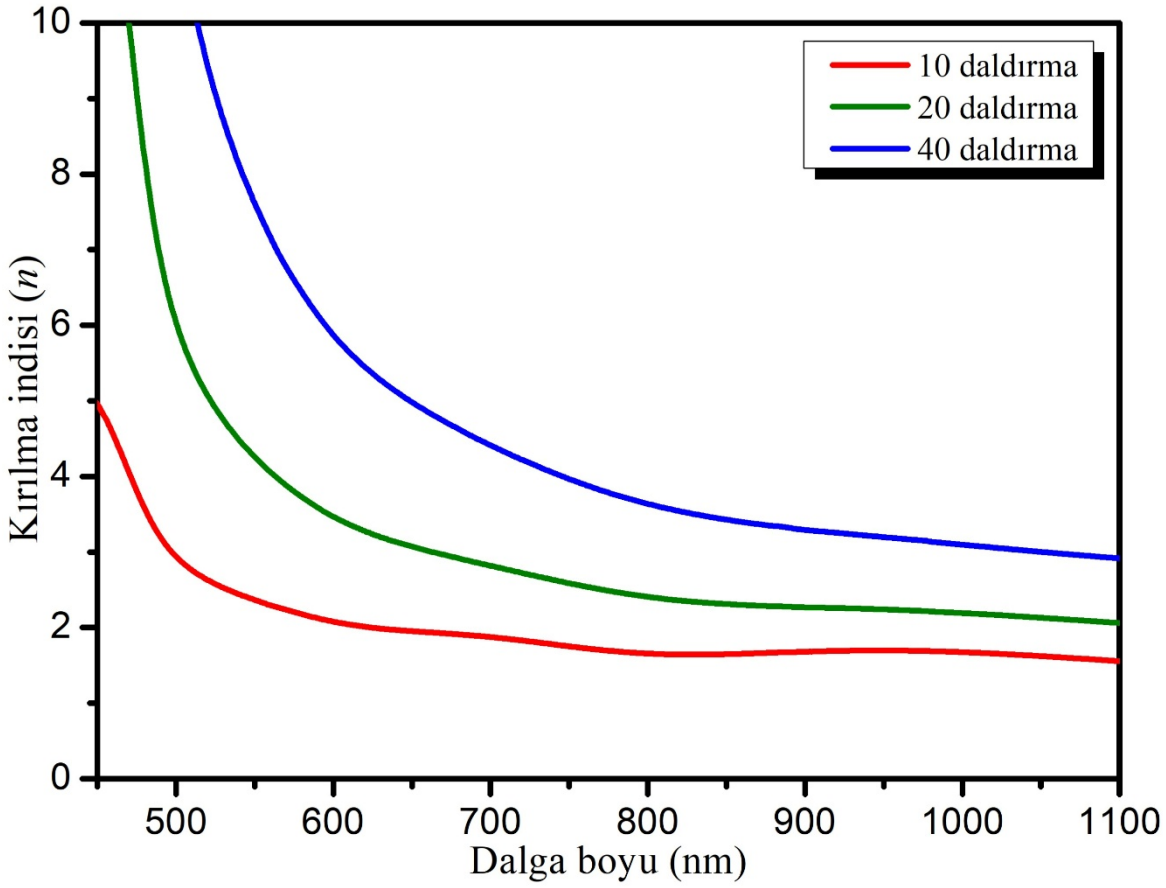
SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde 70 °C'de FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığı değerlerini gösteren grafik Şekil 4.52'de verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde depolanan Cu_2O ince filmin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiğinde, doğrusal kısmın enerji eksenini kestiği nokta yaklaşık 2,42 eV civarındadır. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O ince film için bu değer yaklaşık 2,33 eV, 40 daldırma döngüsünde ise yaklaşık 2,20 eV olarak belirlenmiştir. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça enerji bant aralığı değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Bu sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin optik özelliklerinin daldırma döngüsü sayısı aracılığıyla kontrol edilebileceğini ve bu yolla güneş pilleri, fotokataliz ve diğer optoelektronik uygulamalar için uygun hale getirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.52. 70 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2$'nin enerjiye ($h\nu$) karşı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 70 °C'de FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmlerin kırılma indisi değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 4.53'te verilmiştir. 10 daldırma döngüsü ile hazırlanan Cu_2O ince filmin kırılma indisi, 550 nm'de 2,36 olup, dalga boyunun artmasıyla birlikte 800 nm'de 1,65'e, 1100 nm'de ise 1,55'e düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmin 550 nm'deki kırılma indisi 4,26 iken, bu değer 800 nm'de 2,40'a, 1100 nm'de ise 2,06'ya gerilemektedir. 40 daldırma döngüsünde hazırlanan Cu_2O filminin 550 nm'deki kırılma indisi 7,61 olup, bu değer 800 nm'de 3,63'e,

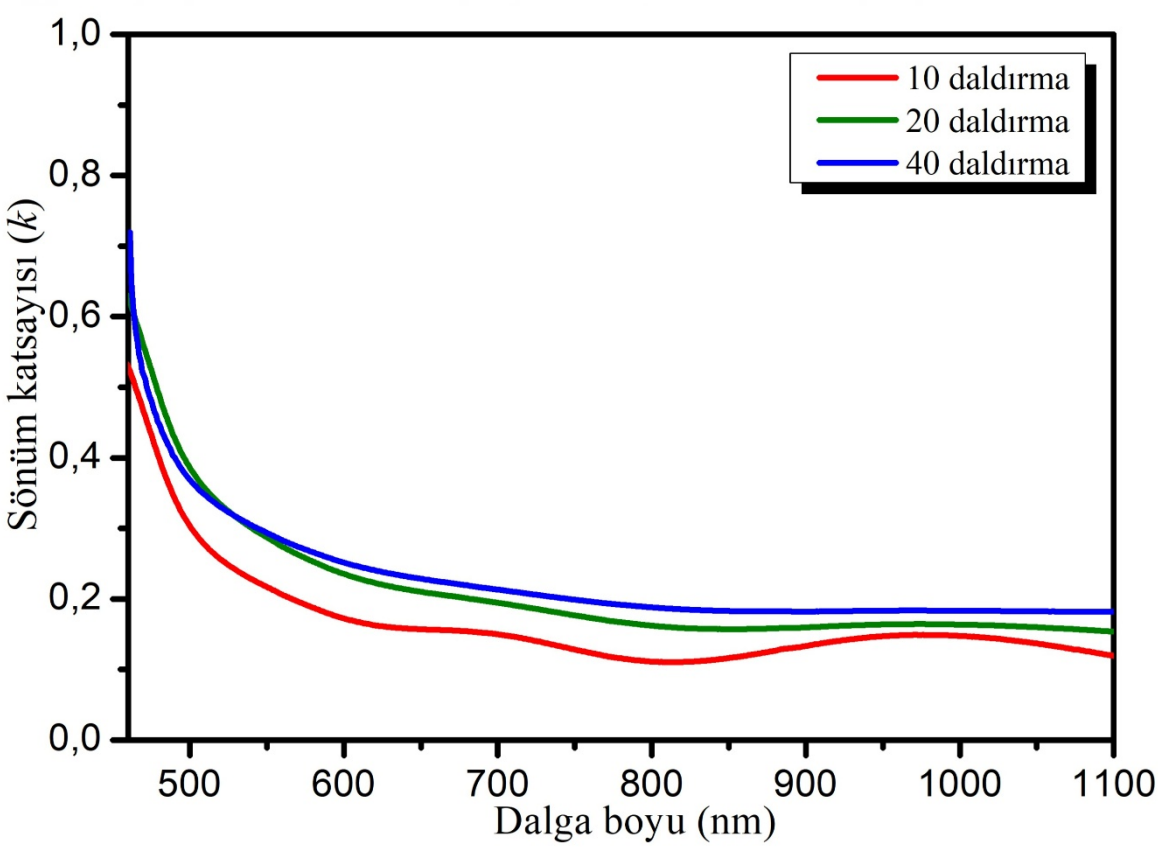
1100 nm'de ise 2,91'e düşmektedir. Daldırma döngüsü sayısının artışıyla birlikte, tüm dalga boylarında kırılma indisi değerlerinin belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu artış, film kalınlığı ve kristallenme derecesindeki artışlarla ilişkilendirilebilir. Tüm numunelerde, dalga boyu arttıkça kırılma indisi değerleri azalma eğilimi göstermektedir. 800 nm'den sonra kırılma indisi değerlerindeki azalma eğiliminin yavaşladığı ve nispeten sabit bir seyir izlediği görülmektedir. 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmin tüm spektrum boyunca yüksek kırılma indisi değerlerine sahip olması, filmin daha yoğun bir yapıya ve daha yüksek kristallenme derecesine sahip olduğunu düşündürmektedir. Öte yandan, 10 daldırma döngüsüyle elde edilen filmin düşük kırılma indisi değerleri, filmin daha gözenekli bir yapıya sahip olabileceğini veya FTO alt tabanın etkilerinin daha belirgin şekilde hissedildiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin daldırma döngüsü sayısıyla kontrol edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.53. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin-dalga boyuna karşı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 70 ^{o}C sıcaklıkta FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.54'te verilmiştir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısı, 550 nm'de 0,21 değerindeyken, dalga boyunun artmasıyla birlikte bu değer 800 nm'de 0,11 ve 1100 nm'de ise 0,12 değerindedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmde bu değerler sırasıyla 0,28,

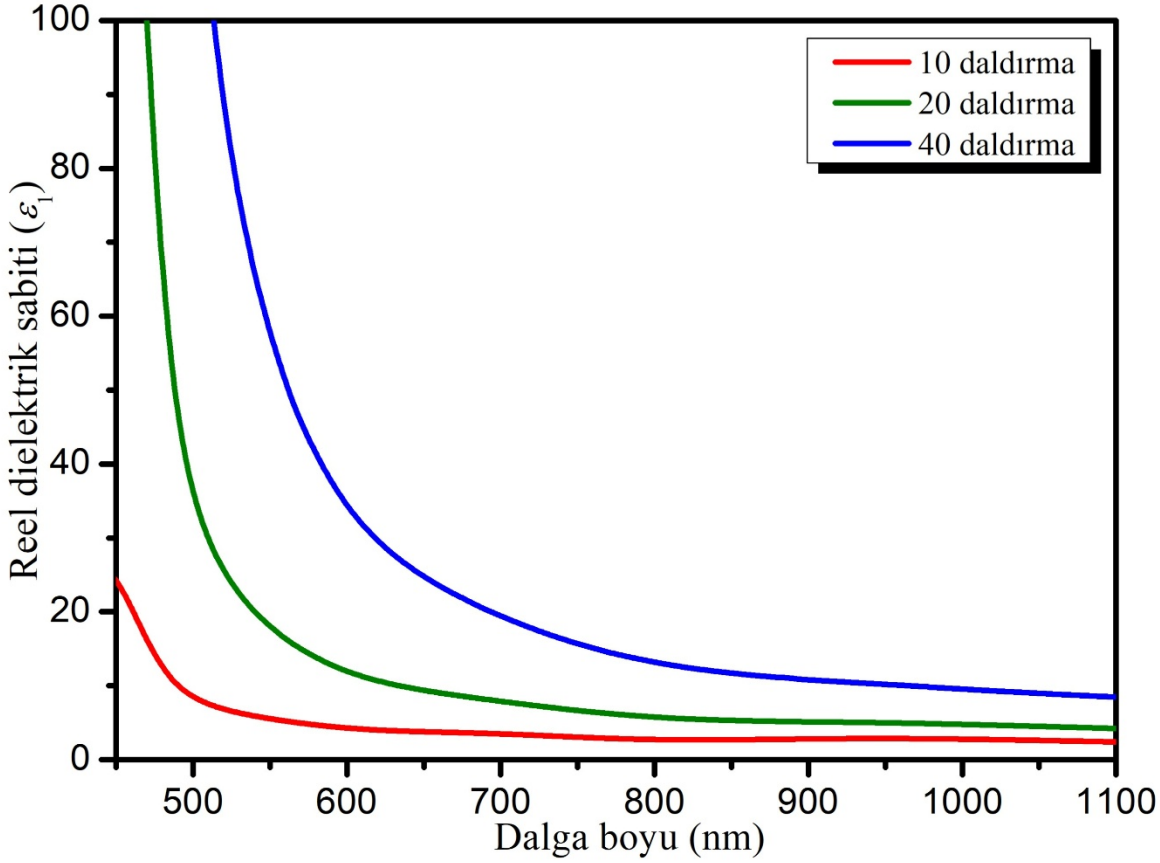
0,16 ve 0,15 şeklinde azalma göstermektedir. 40 daldırma döngüsünde hazırlanan filmde ise sönüm katsayısı 550 nm'de 0,29 iken, 800 nm'de 0,18 ve 1100 nm'de ise yine 0,18 seviyesindedir. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça sönüm katsayısı değerlerinde genel bir artış gözlenmiştir. Bu artış, film kalınlığının artmasına bağlanabilir bu da ışığın film içerisinde daha etkin şekilde soğurulduğunu göstermektedir. Tüm filmlerde, kısa dalga boyu aralığında sönüm katsayısı değerlerinin yüksek olması, Cu_2O'nun bu spektral bölgede güçlü soğurma özellikleri gösterdiğini ortaya koymaktadır. 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmin tüm spektrum boyunca daha yüksek sönüm katsayısı değerleri göstermesi, bu filmin diğer numunelere göre daha fazla ışık soğurabilen ve dolayısıyla daha yüksek optik yoğunluğa sahip bir yapıda olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin optik özelliklerinin daldırma döngüsü sayısıyla kontrol edilebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.54. 70 ^{o}C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 70 ^{o}C sıcaklıkta FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.55'te verilmiştir. 10 daldırma döngüsü ile hazırlanan Cu_2O ince filmin 550 nm'de 5,55 olan reel dielektrik sabiti, dalga boyu arttıkça azalarak 800 nm'de 2,73'e, 1100 nm'de ise 2,41'e düşmektedir. 20 daldırma döngüsünde bu değer, 550 nm'de 18,08 iken, 800 nm'de 5,77'ye ve 1100 nm'de 4,23'e gerilemektedir. 40 daldırma döngüsüyle elde edilen Cu_2O filminin 550 nm'de

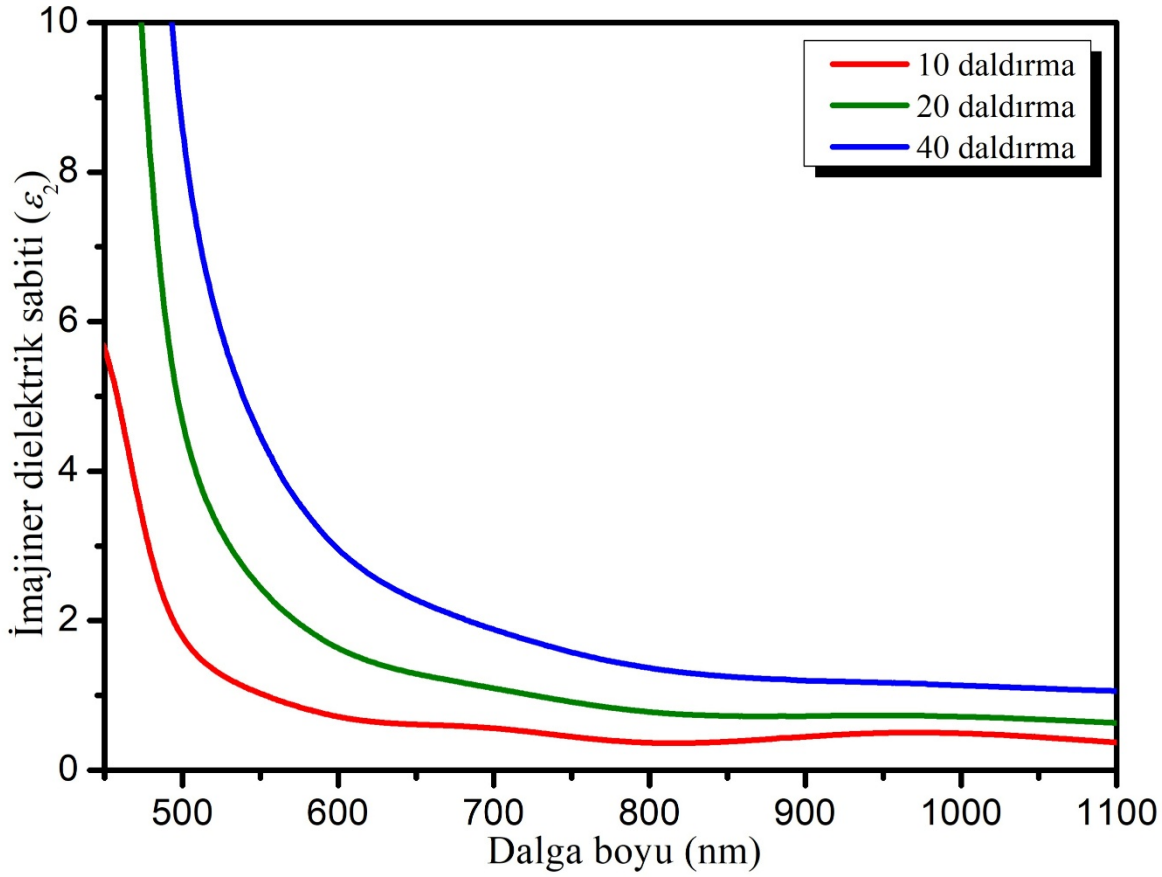
yaklaşık 57,93 olan değeri, dalga boyunun artmasıyla hızla azalarak 800 nm'de 13,19'a ve 1100 nm'de yaklaşık 8,48'e düşmektedir. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça, tüm dalga boyları boyunca reel dielektrik sabiti değerlerinin belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu durum, film kalınlığının ve kristallenme derecesinin artmasının malzemenin dielektrik özelliklerini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bu sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin dielektrik özelliklerinin daldırma döngüsü sayısıyla kontrollü olarak ayarlanabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.55. 70 °C'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin reel dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

SILAR yöntemiyle, 70 °C'de FTO alt taban üzerinde 10, 20 ve 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi Şekil 4.56'da sunulmaktadır. 10 daldırma döngüsüyle elde edilen Cu_2O filminin 550 nm'deki ε_2 değeri 1,03 olup, dalga boyunun artmasıyla birlikte bu değer 800 nm'de 0,37'ye, 1100 nm'de ise yaklaşık 0,36'ya düşmektedir. 20 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmde ε_2, 550 nm'de 2,44, 800 nm'de 0,78 ve 1100 nm'de 0,63 olarak gözlenmiştir. 40 daldırma döngüsünde ise 550 nm'de 4,47 olan ε_2 değeri, 800 nm'de 1,36'ya ve 1100 nm'de 1,06'ya gerilemektedir. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça, tüm dalga boylarında imajiner dielektrik sabiti değerlerinin belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. Bu artış, film kalınlığındaki artışla birlikte malzemenin optik soğurma kapasitesinin arttığını ortaya koymaktadır. Tüm örneklerde, kısa dalga boylarında ε_2 değerlerinin

yüksek olması, Cu_2O'nun bu spektral bölgede güçlü ışık soğurma özelliği sergilediğini göstermektedir. 40 daldırma döngüsü ile elde edilen filmin tüm spektrum boyunca daha yüksek ε_2 değerleri sergilemesi, bu filmin daha fazla ışık soğurduğunu ve dolayısıyla daha kalın, yoğun ya da daha az kusurlu bir yapıya sahip olduğunu düşündürmektedir. Öte yandan, 10 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmin düşük ε_2 değerleri, malzemenin daha az ışık soğurduğunu ve muhtemelen daha ince veya gözenekli bir yapıda olduğunu göstermektedir. Uzun dalga boylarında, tüm numunelerde imajiner dielektrik sabiti düşük ve nispeten sabit değerlere yaklaşmakta, bu da Cu_2O'nun kızılötesi bölgede daha geçirgen olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, Cu_2O ince filmlerin optik soğurma özelliklerinin daldırma döngüsü sayısı ile kontrol edilebileceğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, Cu_2O bazlı optoelektronik aygıtların tasarımında daldırma döngüsü sayısının, optik soğurma özelliklerinin optimizasyonunda etkili bir kontrol değişkeni olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.56. 70 ^oC'de farklı daldırma döngülerinde FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabiti değerlerinin-dalga boyuna bağlı grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. 30 °C ve 70 °C'de Cam ve FTO Alt Tabanlar Üzerinde Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin XRD Analizlerinin Sonuçları

Bu çalışmada, Cu_2O ince filmleri SILAR (Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu) yöntemi kullanılarak başarı ile üretilmiştir. Üretim sürecinde, farklı alt tabanlar [cam ve flor katkılı kalay oksit (FTO)] kullanılmış ve filmler, iki farklı sıcaklık koşulunda (30 °C ve 70 °C) kaplanmıştır. Film kalınlığını ve fiziksel özellikleri (yapısal, morfolojik ve optik) kontrol edebilmek amacıyla, her iki sıcaklık koşulunda 10, 20 ve 40 daldırma döngüsü uygulanmıştır. Elde edilen Cu_2O ince filmler, X-ışını kırınımı (XRD), alan yayınımlı taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve UV-vis spektrofotometresi kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, alt taban türü, sıcaklık ve daldırma döngüsü sayısının Cu_2O ince filmlerin kristal yapısı, yüzey morfolojisi ve optik bant aralığı üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemektir. Yapılan analizler sonucunda, ince filmlerin fiziksel özelliklerinin söz konusu parametrelere bağlı olarak belirgin biçimde değiştiği gözlenmiştir. Elde edilen bulgular, Cu_2O temelli yarıiletken malzemelerin üretiminde optimal koşulların belirlenmesi açısından önemli katkılar sunmakta olup, gelecekteki optoelektronik cihaz uygulamalarına yönelik çalışmalara yol gösterici niteliktedir.

30 °C sıcaklıkta ve cam alt taban üzerinde farklı daldırma döngüleri (10, 20 ve 40) kullanılarak elde edilen Cu_2O ince filmlerin XRD desenleri, filmlerin kristal yapıları hakkında önemli bilgiler sunmuştur. 10 daldırma döngüsünde elde edilen filmde (Şekil 4.1), (110), (111) ve (200) düzlemlerine karşılık gelen zayıf şiddetli piklerin varlığı, Cu_2O filminin polikristal yapıda olduğunu, ancak kristalleşmenin henüz başlangıç seviyesinde olduğunu göstermektedir. Bu örnekte, cam alt tabana ait amorf yapı kaynaklı geniş piklerin varlığı da belirgin şekilde gözlenmiştir. Daldırma döngüsü 20'ye çıkarıldığında (Şekil 4.2), (110), (111), (200) ve (220) düzlemlerine karşılık gelen daha belirgin ve şiddetli pikler ortaya çıkmış, özellikle (111) düzlemine ait pikin baskın hale gelmesiyle birlikte filmde tercihli yönlenmiş kristallenmenin başladığı gözlenmiştir. Bu durum, daldırma sayısındaki artışın kristal büyümesini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. 40 daldırma döngüsünde (Şekil 4.3) ise kristallenmenin en yüksek seviyeye ulaştığı görülmüştür. Bu örnekte de (110), (111), (200) ve (220) düzlemleri belirlenmiş olup, özellikle (111) düzlemine ait pikin hem şiddet hem de keskinlik açısından belirgin şekilde baskın hale geldiği tespit edilmiştir. Pik şiddetindeki artış ve daralma, kristalit boyutunda büyüme ve filmdeki kristal kalitesinin arttığını göstermektedir. Üç farklı daldırma döngüsünde elde edilen tüm XRD desenlerinde sadece Cu_2O'nin kübik fazına ait pikler gözlenmiş; CuO veya Cu gibi ikincil fazlara ait herhangi bir yansıma tespit edilmemiştir. Bu da film büyütme sürecinin faz saflığı açısından başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, 30 °C sıcaklıkta ve cam alt taban kullanılarak üretilen Cu_2O ince filmlerde daldırma döngüsü sayısının arttırılması, kristal yapının gelişimini doğrudan etkilemiş; kristalleşme derecesi, yönlenme ve kristal kalitesi önemli ölçüde artmıştır. Bu

bulgular, düşük sıcaklıkta bile uygun parametre seçimiyle kristal yapısı yüksek kaliteli Cu_2O filmler elde edilebileceğini göstermekte olup, Cu_2O'nun optoelektronik uygulamalara yönelik potansiyelini destekler niteliktedir.

70 ^oC sıcaklıkta cam alt taban üzerinde büyütülen Cu_2O ince filmlerin XRD analizleri, sıcaklık artışının kristal yapı üzerindeki belirgin etkilerini ortaya koymuştur. 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde elde edilen XRD desenleri, tüm örneklerde Cu_2O'nun yalnızca kübik fazına ait piklerin gözlendiğini ve herhangi bir ikincil faza ait yansımanın bulunmadığını göstermiştir. Bu sonuç, kullanılan büyütme parametrelerinin faz saflığı açısından uygun olduğunu ortaya koymaktadır. 10 daldırma döngüsünde elde edilen filmde (Şekil 4.4), (110), (111), (200) ve (220) düzlemlerine karşılık gelen karakteristik pikler tespit edilmiş olup, özellikle (111) düzlemine ait pik en şiddetli pik olarak gözlenmiştir. Bu durum, filmin bu düzlem boyunca tercihli yönelim gösterdiğini ve kristallenmenin 30 ^oC'ye kıyasla daha gelişmiş olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, sıcaklık artışı ile birlikte XRD deseninde pik şiddetlerinde gözle görülür bir artış meydana gelmiştir; bu da daha düzenli ve daha iyi kristallenmiş bir yapının oluştuğuna işaret etmektedir. 20 daldırma döngüsüne (Şekil 4.5), önceki düzlemlere ek olarak (311) düzlemine ait yeni bir pik gözlenmiş ve bu durum, kristal yapının daha kompleks ve iyi gelişmiş bir hale geldiğinin göstergesi olarak değerlendirilmiştir. (111) düzlemine ait pikin belirgin şekilde artması ise bu yöndeki tercihli yönelimin kuvvetlendiğini doğrulamaktadır. 40 daldırma döngüsünde (Şekil 4.6) ise kristallenmenin en üst düzeye ulaştığı tespit edilmiştir. XRD deseninde, daha önce gözlenen tüm düzlemlere ait pikler korunmuş, özellikle (111) düzlemine ait pikin şiddeti maksimum seviyeye ulaşmıştır. Piklerin daha keskin ve yoğun hale gelmesi, kristal boyutlarının büyüdüğünü ve kristal kusurlarının azaldığını göstermektedir. Ayrıca, daldırma döngüsü sayısındaki artış, daha kalın ve kristal kalitesi yüksek filmlerin elde edilmesine katkı sağlamıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, 70 ^oC sıcaklıkta cam alt taban üzerinde büyütülen Cu_2O ince filmler, kristal yapı bakımından 30 ^oC'ye kıyasla daha iyi gelişim göstermiştir. Daldırma döngüsü sayısındaki artış ile birlikte kristalleşmenin kuvvetlendiği, tercihli yönelimin (özellikle (111) düzlemi boyunca) belirginleştiği ve yapının daha saf ve homojen hale geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgular, sıcaklığın ve büyütme süresinin (daldırma döngüsü) film kristalliği üzerinde belirleyici etkiye sahip olduğunu ve SILAR yöntemiyle düşük sıcaklıklarda dahi kontrollü kristal büyümesinin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.

30 ^oC sıcaklıkta ve FTO alt taban üzerinde büyütülen Cu_2O ince filmlere ait XRD analizleri, düşük sıcaklık ve alt taban özelliklerinin film kristalliği üzerindeki belirleyici etkilerini açıkça ortaya koymuştur. 10 ve 20 daldırma döngüsünde elde edilen XRD desenlerinde yalnızca (200) düzlemine ait zayıf bir pik gözlenmiş, bunun dışında FTO alt tabana ait yüksek şiddetli piklerin baskın olduğu belirlenmiştir. Cu_2O'ya ait diğer karakteristik pikin gözlenmemesi, kristalleşmenin henüz başlangıç aşamasında olduğunu ve belirgin bir tercihli yönelimin oluşmadığını göstermektedir. Bu durum, FTO alt tabanın kristal yapısının, Cu_2O film oluşumuna

müdahale ederek kristal büyümesini sınırladığını düşündürmektedir. Ancak daldırma döngüsü 40'a çıkarıldığında (Şekil 4.9), (111) ve (200) düzlemlerine ait piklerin ortaya çıktığı ve özellikle (111) düzlemine ait pik şiddetinin belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu gelişim, film kalınlığının ve kristal kalitesinin arttığını, kristallenmenin güçlendiğini ve alt taban ile film arasındaki ilk etkileşimlerin zamanla aşılabildiğini ortaya koymaktadır. Pik genişliğindeki daralma ve şiddetteki artış, ortalama kristal boyutunda büyümeyi ve yapının daha düzenli hale geldiğini destekler niteliktedir. Ayrıca, hesaplanan kristal boyutu (*D*) değerlerinin artış eğiliminde olması da bu yorumu doğrulamaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük sıcaklıkta (30 ^{o}C) ve FTO alt taban kullanılarak üretilen Cu_2O ince filmlerin başlangıçta zayıf kristal özellikler sergilediği, ancak daldırma döngüsünün artırılmasıyla birlikte kristal yapı ve tercihli yönelim bakımından belirgin bir gelişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Yine de FTO alt tabanın yüzey morfolojisi ve kristal yapısının, özellikle film büyümesinin erken evrelerinde Cu_2O kristallenmesi üzerinde baskın bir etki oluşturduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bu bulgular, düşük sıcaklıkta ve yarıiletken alt tabanlar üzerinde yapılan film büyütmelerinde yüzey-malzeme etkileşimlerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamakta ve büyütme parametrelerinin dikkatle optimize edilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

70 ^{o}C sıcaklıkta ve FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlere ait XRD analizleri, sıcaklığın kristal yapı oluşumu üzerindeki belirgin etkilerini ortaya koymuştur. 10 daldırma döngüsünde, (111) ve (200) düzlemlerine ait piklerin gözlenmesi, Cu_2O kristalleşmesinin erken aşamalarda dahi belirginleşmeye başladığını göstermektedir. Özellikle (111) düzlemine ait pikin baskınlığı, yüksek sıcaklığın kristal büyüme kinetiğini hızlandırdığını ve tercihli yönelimin oluşumunu desteklediğini ortaya koymaktadır. FTO alt tabana ait pikler yine gözlenmekle birlikte, Cu_2O'ya ait karakteristik pikin daha belirgin hale gelmesi, alt taban etkisinin sıcaklıkla birlikte azaldığını düşündürmektedir. 20 daldırma döngüsünde (Şekil 4.11), (111) ve (200) düzlemlerine ait piklerin şiddetinin daha da arttığı gözlenmiştir. Bu durum, artan daldırma döngüsünün film kalınlığını ve kristal büyümesini destekleyerek kristal kalitesini iyileştirdiğini göstermektedir. Sıcaklık ve daldırma sayısının bir arada değerlendirilmesi, Cu_2O filmlerinin (111) düzlemi boyunca güçlü bir tercihli yönelim geliştirdiğini ve kristalleşmenin giderek düzenli hale geldiğini ortaya koymaktadır. 40 daldırma döngüsünde elde edilen XRD deseninde (Şekil 4.12), (110), (111), (200) ve (311) düzlemlerine ait piklerin gözlenmesi, filmin artık polikristal bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle (111) düzlemine ait pikin yüksek şiddeti, bu düzlemdeki yönelimin baskınlığını teyit ederken, diğer düzlemlere ait piklerin belirginliği, kristal çeşitliliğinin ve yapısal bütünlüğün arttığını göstermektedir. Pik şiddetindeki artış ve genişliğindeki daralma, ortalama kristal boyutunda büyümeye ve kristal kusurlarının azaldığına işaret etmektedir. Tüm sıcaklık ve daldırma koşulları dikkate alındığında, FTO alt tabanın başlangıçta kristal büyümesi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu, ancak sıcaklığın yükselmesiyle birlikte bu etkinin azaldığı ve Cu_2O kristallerinin daha düzenli ve tercihli yönelimli bir yapıya kavuştuğu anlaşılmaktadır.

Cam ve FTO alt tabanlar üzerinde 30 °C ve 70 °C sıcaklıklarında SILAR yöntemi ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerin XRD analizi ile sonucunda elde edilen veriler hem sıcaklığın hem de alt taban türünün Cu_2O filmlerinin kristalleşme davranışı üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuştur. 30 °C sıcaklıkta hazırlanan örneklerde, cam alt taban üzerinde üretilen Cu_2O filmlerde kristalleşmenin sınırlı düzeyde olduğu, ancak daldırma döngü sayısının artırılmasıyla birlikte (111) ve (200) düzlemlerine ait Cu_2O piklerinin belirginleştiği gözlenmiştir. Bu durum, düşük sıcaklıkta dahi yeterli film kalınlığına ulaşıldığında kristalleşmenin başlayabildiğini göstermektedir. FTO alt tabanlı örneklerde ise 10 ve 20 döngüde Cu_2O'ya ait pikin zayıf olduğu, FTO'nun kendi kristal yapısına ait piklerin baskın şekilde yer aldığı tespit edilmiştir. Ancak 40 daldırma döngüsünde, özellikle (111) düzlemine ait pik belirginleşmiş ve Cu_2O kristalleşmesinin ilerlediği görülmüştür. Bu da düşük sıcaklık koşullarında FTO alt tabanın başlangıçta kristalleşmeyi sınırlayıcı bir etki yarattığını, ancak artan film kalınlığının bu etkinin üstesinden gelebildiğini göstermektedir. Buna karşılık, 70 °C sıcaklıkta üretilen örneklerde kristalleşmenin daha erken evrelerde başladığı ve daha belirgin yapısal özellikler sergilediği belirlenmiştir. Cam alt taban üzerindeki filmlerde, 10 döngüde dahi (111) düzlemi boyunca anlamlı bir pik oluşumu gözlenmiş; 20 ve 40 döngüde ise bu piklerin şiddeti artarak kristal kalitesi ve tercihli yönelimin güçlendiği anlaşılmıştır. Benzer şekilde, FTO alt tabanlı filmlerde de sıcaklık artışı ile birlikte Cu_2O'ya ait (111), (200) ve bunlara ek olarak 40 döngüde (110) ve (311) düzlemlerine ait piklerin oluştuğu, kristalleşmenin hızlandığı ve yapıların polikristal hale geldiği görülmüştür. FTO alt tabanın başlangıçta kristal büyümesini sınırlayan etkisi, yüksek sıcaklıkta belirgin şekilde azalmış, Cu_2O kristallerinin büyümesi ve yönelimi üzerinde pozitif bir gelişim sağlanmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde hem sıcaklık artışı hem de daldırma döngü sayısının artırılması, Cu_2O ince filmlerinin kristalleşmesini teşvik eden başlıca faktörler olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, cam alt tabanlar kristalleşmeyi doğrudan desteklerken, FTO alt tabanlar ilk aşamalarda kristal oluşumunu sınırlayabilmekte; ancak yeterli film kalınlığına ve uygun sıcaklığa ulaşıldığında bu etki ortadan kalkmaktadır. Tüm örneklerde elde edilen XRD desenleri, Cu_2O'nun karakteristik düzlemlerine ait pikleri içermekte olup, hesaplanan yapısal parametrelerin Cu_2O PDF kartı (No: 01–071–3645) ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, deneysel koşulların uygun şekilde optimize edilmesiyle yüksek kristal kalitesine sahip Cu_2O ince filmlerin üretilebileceğini ortaya koymaktadır.

5.2. 30 °C ve 70 °C' de Cam ve FTO Alt Tabanlar Üzerinde Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin Morfolojik Analizlerinin Sonuçları

30 °C sıcaklıkta cam alt tabanlar üzerinde farklı daldırma döngü sayıları (10, 20 ve 40) ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerin morfolojik yapıları, alan yayınımlı taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile incelenmiştir. Elde edilen görüntüler, Cu_2O taneciklerinin büyüme davranışı, yüzey yapısı ve film yoğunluğunun, daldırma döngüsü sayısına bağlı olarak anlamlı bir değişim gösterdiğini ortaya koymuştur. 10 daldırma döngüsünde elde edilen film yapısı, birbiriyle bağlantılı

taneciklerden oluşan ağ benzeri bir morfoloji sergilemiştir. Film oldukça gözenekli bir yapıya sahip olup, yüzeyde küresel tanecikler arasında belirgin boşluklar gözlenmiştir. Bu yapı, yüksek yüzey alanı sağlaması bakımından özellikle sensör ve katalitik uygulamalar açısından avantajlı olarak değerlendirilmiştir. 20 daldırma döngüsünde ise film ağ yapısının belirginleştiği ve tanecikler arası boşlukların kısmen azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, artan döngü sayısının film kalınlığı ve kompaktlığı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Bu yapısal gelişim, Cu_2O filminin daha sürekli ve fonksiyonel bir yüzey morfolojisine sahip olduğunu göstermektedir. 40 daldırma döngüsünde hazırlanan filmlerde ise ağ yapısı daha yoğun bir hal almış, tanecikler arası bağlantılar güçlenmiş ve gözenekli yapı az da olsa korunmuştur. Bu değişim, film oluşumunun arttığını ve yüzeyin daha kompakt bir hal aldığını göstermektedir. Bu morfolojik yapı, artan daldırma döngüsünün yüzey yoğunluğunu artırarak film kalitesini geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak, 30 ^oC sıcaklıkta cam alt tabanlar üzerinde elde edilen Cu_2O ince filmlerde, artan daldırma döngüsü sayısıyla birlikte film yapısında daha kompakt ve ağ benzeri morfolojilerin geliştiği gözlenmiştir. Bu morfolojik yapıların, özellikle gaz sensörleri, fotokataliz ve elektrokimyasal uygulamalar için yüksek potansiyel taşıdığı söylenebilir.

70 ^oC sıcaklıkta cam alt tabanlar üzerinde 10, 20 ve 40 daldırma döngüsü ile hazırlanan Cu_2O ince filmlerin morfolojik özellikleri FE-SEM görüntüleri üzerinden detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek sıcaklığın kristal büyümesi, tanecik morfolojisi ve yüzey kompaktlığı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince film, çoğunlukla küresel ve yarı-küresel morfolojiye sahip taneciklerden oluşmakta, az sayıda çubuk benzeri yapılar da içermektedir. Tanecikler hem bireysel olarak hem de kümelenmiş halde gözlenmiş, film genel olarak gözenekli bir yapı sergilemiştir. Bu gözeneklilik, filmin özgül yüzey alanını artırmakta ve özellikle sensör ile katalitik uygulamalar açısından işlevsel avantaj sunmaktadır. Bu yapı, 70 ^oC sıcaklığın film oluşum sürecinde daha hızlı kristallenme ve büyüme kinetiği sağladığını göstermektedir. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan film, daha belirgin ağ yapıları ve daha kompakt bir yüzey morfolojisi sergilemiştir. Küresel ve çubuksu taneciklerin birlikte oluşturduğu bu yapı, artan daldırma döngüsünün film yoğunluğu üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Bu morfoloji, özgül yüzey alanının korunmasını sağlarken aynı zamanda film kalınlığının ve homojenliğinin arttığını göstermektedir. Bu gözlemler, yüksek sıcaklık ve daldırma döngüsü sayısının etkisiyle kristallenme ve yoğunlaşma süreçlerinin hızlandığını ortaya koymaktadır. 40 daldırma döngüsünde elde edilen Cu_2O ince film ise oldukça yoğun ve kompakt bir yapıya sahiptir. Tanecikler arası boşlukların azaldığı ve daha bütünleşik bir morfolojinin oluştuğu gözlenmiştir. Filmin genel yapısı daha pürüzlü ve kompleks hale gelmiştir. Sonuç olarak, 70 ^oC sıcaklıkta cam alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin morfolojik özellikleri, sıcaklık artışının ve artan daldırma döngüsü sayısının film yoğunluğu, gözenek dağılımı ve genel yüzey yapısı üzerinde doğrudan ve belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bu kompakt, gözenekli ve homojen yapılar, Cu_2O ince filmleri; gaz sensörleri,

fotokatalizörler, elektrokimyasal sensörler ve fotovoltaik cihazlar gibi geniş bir uygulama yelpazesi için uygun hale getirmektedir.

30 ^{o}C sıcaklıkta FTO alt taban üzerinde 10, 20 ve 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yüzey morfolojileri FE-SEM görüntüleri aracılığıyla detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, düşük sıcaklık koşullarında dahi FTO alt tabanın Cu_2O kristal oluşumu ve nanoyapı gelişimi üzerinde anlamlı etkiler yarattığını göstermektedir. 10 daldırma döngüsüyle hazırlanan örnekte, yüzeyde belirgin şekilde gelişmiş bir nanotel (nanowire) ağı gözlenmiş ve bu yapıların birbirleriyle bağlantılı, homojen bir şekilde yayıldığı belirlenmiştir. Yüksek düzeyde gözeneklilik sunan bu ağsı yapı, filmin özgül yüzey alanını önemli ölçüde artırarak, elektriksel iletkenlik, katalitik aktivite ve sensör performansı gibi uygulamalarda önemli potansiyel taşıyabilir. Bu morfoloji, düşük sıcaklık ve sınırlı daldırma koşullarında dahi işlevsel nanoyapıların oluşabileceğini ortaya koymaktadır. 20 daldırma döngüsüne ulaşıldığında, nanotel yapısının yoğunluğu ve karmaşıklığı belirgin biçimde artmıştır. Ağ yapıları daha kompakt hale gelmiş, nanoteller arasındaki bağlantı noktaları sıklaşarak yüzeyin daha kompleks ve pürüzlü bir görünüm kazanmasına neden olmuştur. Nanotellerin bazı bölgelerde birleşerek daha kalın lif benzeri yapılara dönüştüğü ve bu birleşme noktalarında yerel kalınlaşmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Artan daldırma döngüsü, Cu_2O filmlerin morfolojik çeşitliliğini artırmakta ve yüzeydeki aktif bölgelerin miktarını çoğaltarak uygulama potansiyelini genişletmektedir. 40 daldırma döngüsünde hazırlanan film ise hem nanotel hem de küresel tanecik yapılarının birlikte bulunduğu hibrit bir morfoloji sergilemiştir. Bu örnekte, küresel tanecikler daha baskın bir dağılım göstermekte ve karmaşık bir ağ yapısı oluşturmaktadır. Yüzey genelinde gözeneklilik ve pürüzlülük artmış, tanecikler ve gözenekler homojen bir şekilde dağılmıştır. Sonuç olarak, 30 ^{o}C gibi düşük bir sıcaklıkta FTO alt taban kullanılarak elde edilen Cu_2O ince filmler, gelişmiş nano yapısal özellikler sergileyerek morfolojik olarak oldukça zengin bir yapı ortaya koymuştur. Nanotel yapısının gelişimi, artan daldırma döngüsü ile birlikte daha kompleks ve fonksiyonel hale gelirken, küresel taneciklerin katkısıyla hibrit yapılar oluşmuştur. Bu morfolojik çeşitlilik, düşük sıcaklıkta büyütülen Cu_2O filmlerin çok çeşitli uygulamalarda yüksek performans sergileme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

70 ^{o}C sıcaklıkta FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmler, artan daldırma döngüsü ile birlikte belirgin morfolojik farklılıklar göstermektedir. 10 daldırma döngüsünde elde edilen filmde, kümeleşmiş küresel tanecikler ile bunların arasında ağ benzeri yapılar oluşturan nanotel formları birlikte gözlenmiştir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle kristallenme süreci hızlanmış ve tanecikler birleşerek daha büyük yapılar oluşturmuştur. Filmde gözlenen belirgin gözeneklilik, yüzey alanını artırarak işlevsel özellikleri geliştirebilecek bir yapı sunmuştur. 20 daldırma döngüsünde hazırlanan filmde ise, yüzeyin büyük oranda homojen dağılmış küresel ve yarı-küresel nano parçacıklarla kaplandığı gözlenmiştir. Taneciklerin bazı bölgelerde yoğunlaştığı ve yer yer kümeleşmelerin meydana geldiği görülse de genel dağılım homojenliğini korumuştur. Filmin

gözenekli yapısı bu örnekte de belirgindir. 40 daldırma döngüsünde ise tanecikler, birbirine bağlı zincir benzeri yapılar oluşturarak daha kompakt bir morfoloji sergilemiştir. Bu yapı, ağ benzeri boşluklarla birlikte oldukça gözenekli bir yüzey meydana getirmiştir. Bu gözenekli yapı sayesinde film, yüzey alanını önemli ölçüde artırarak katalitik, sensör ve enerji uygulamalarına uygunluk gösterebilir. Sonuç olarak, 70 ^{o}C sıcaklıkta FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmler, artan daldırma döngüsüyle birlikte daha organize, gözenekli ve fonksiyonel yüzey morfolojileri sergilemiş; nanotel ve küresel yapıların birlikte bulunması film performansı açısından çeşitli avantajlar sunabilir.

Elde edilen tüm bu bulgular hem sıcaklık hem de alt taban türü ile birlikte daldırma döngüsü sayısının Cu_2O ince filmlerin morfolojik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu, dolayısıyla bu parametrelerin kontrollü değişimiyle istenilen yüzey yapılarının elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

5.3. 30 ^{o}C ve 70 ^{o}C'de Cam ve FTO Alt Tabanlar Üzerinde Hazırlanan Cu_2O İnce Filmlerin Optik Analizlerinin Sonuçları

SILAR yöntemi ile 30 ^{o}C ve 70 ^{o}C sıcaklıkta cam ve FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik özellikleri detaylı biçimde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, optik geçirgenliğin hem daldırma döngüsü sayısına hem de uygulama sıcaklığı ve alt taban türüne bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. 30 ^{o}C'de cam alt taban üzerinde hazırlanan filmlerde, daldırma döngüsü arttıkça film kalınlığı artmış ve buna bağlı olarak optik geçirgenlik azalmıştır. Bu azalma, artan kalınlığın soğurmayı artırması ve ışık geçişini zorlaştırmasıyla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, tüm filmler kısa dalga boylarında düşük, uzun dalga boylarında ise artan geçirgenlik göstermiştir; bu durum Cu_2O'nun tipik yarıiletken karakterini yansıtmaktadır. 70 ^{o}C'de cam alt tabanlı filmlerde benzer eğilimler gözlenmiş, ancak daha düşük geçirgenlik değerleri elde edilmiştir. Bu durum, artan sıcaklığın film kristalleşme derecesini artırarak daha kompakt ve soğurucu yapılar oluşturduğunu göstermektedir. FTO alt taban üzerinde hazırlanan filmler ise genel olarak cam alt tabana kıyasla daha yüksek geçirgenlik göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik özelliklerinin daldırma döngüsü sayısı, film kalınlığı, tanecik boyutu, uygulama sıcaklığı ve alt taban türü gibi parametrelerle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Daldırma döngüsü sayısının artmasıyla birlikte film kalınlığında meydana gelen artış, ışığın film içerisinden geçişini zorlaştırarak optik geçirgenliğin azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, film kalınlığına paralel olarak kristalit boyutunda da bir artış gözlenmiş ve bu durum, tanecik sınırlarında artan ışık saçılmasıyla birlikte soğurmanın yükselmesine yol açmıştır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda hazırlanan filmlerde daha kompakt ve yoğun yapıların oluştuğu, bunun da geçirgenliği azaltarak filmin optik performansını etkilediği görülmüştür. Diğer yandan, FTO alt taban kullanımı, cam alt tabana kıyasla daha yüksek geçirgenlik değerlerinin elde edilmesini sağlamış ve bu durum, alt taban malzemesinin film

morfolojisi ve optik özellikleri üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Bu bulgular, Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenliğinin çeşitli üretim parametreleri aracılığıyla kontrollü bir şekilde ayarlanabileceğini ve bu yönüyle fotovoltaik hücreler gibi optoelektronik uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

SILAR yöntemiyle 30 ^oC ve 70 ^oC sıcaklıkta cam ve FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik soğurma özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, optik soğurma davranışının hem daldırma döngüsü sayısına hem de uygulama sıcaklığı ve alt taban türüne bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Cam alt tabanlar üzerinde 30 ^oC sıcaklıkta hazırlanan Cu_2O ince filmlerde, daldırma döngüsü sayısının artmasıyla optik soğurma değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Benzer eğilim, daha yüksek sıcaklık olan 70 ^oC'de de gözlenmiştir. Bu durum, 70 ^oC'de hazırlanan filmlerin daha yüksek kristalleşme derecesine ve gelişmiş yapısal özelliklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. FTO alt tabanlar üzerinde elde edilen sonuçlar da benzer bir eğilim sergilemiştir. Özellikle 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmlerin tüm spektral aralıkta yüksek soğurma sergilemesi, bu yapıların optik uygulamalarda soğurucu katman olarak kullanılabilme potansiyelini güçlendirmektedir. Tüm örneklerde ortak bir eğilim olarak, kısa dalga boylarında yüksek optik soğurma gözlenmiş, dalga boyu arttıkça soğurma değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu eğilim, Cu_2O'nun bant yapısına bağlı karakteristik yarıiletken davranışıyla tutarlıdır. Genel olarak, elde edilen sonuçlar Cu_2O ince filmlerin optik soğurma özelliklerinin üretim sıcaklığı, alt taban türü ve daldırma döngüsü sayısı gibi parametreler aracılığıyla etkin şekilde kontrol edilebileceğini göstermektedir. Bu durum, özellikle güneş pilleri, fotodetektörler ve diğer optoelektronik uygulamalar için Cu_2O ince filmlerin performansını optimize etmek açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle yüksek optik soğurma gerektiren uygulamalar için daldırma döngüsü sayısının artırılması, film performansını anlamlı biçimde iyileştirebilecek bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

SILAR yöntemiyle 30 ^oC ve 70 ^oC sıcaklıkta ve cam ve FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin optik yansıma özellikleri detaylı biçimde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, film kalınlığına bağlı olarak artan daldırma döngüsü sayısının yansıma davranışları üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Cam alt taban üzerinde 30 ^oC sıcaklıkta hazırlanan Cu_2O ince filmler incelendiğinde, daldırma döngüsü sayısının artışıyla birlikte tüm dalga boylarında yansıma değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Benzer şekilde, 70 ^oC'de cam alt tabanlar üzerinde üretilen filmlerde de artan daldırma döngüsü sayısıyla yansıma değerlerinde artış meydana gelmiştir. Bu durum, film kalınlığının yanı sıra yüksek sıcaklığın kristal yapı ve yüzey morfolojisi üzerindeki iyileştirici etkisiyle açıklanabilir. FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan filmlerde de benzer bir eğilim mevcuttur. Tüm örneklerde gözlenen ortak bir eğilim, kısa dalga boylarında daha yüksek yansıma değerlerinin elde edilmesi ve dalga boyunun artmasıyla birlikte yansıma değerlerinde düşüş yaşanmasıdır. Bu durum, Cu_2O'nun karakteristik optik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Daldırma döngüsü sayısındaki artışa bağlı olarak film

kalınlığının ve yüzey morfolojisinin değişmesi, yansıma karakteristiklerini doğrudan etkilemiştir. Kalınlığı artan filmler daha yoğun ve düzgün yapılar sergilemiş, bu da görünür bölgede yansıma değerlerinin yükselmesine neden olmuştur. Özellikle 40 daldırma döngüsüyle hazırlanan filmlerin geniş spektral aralıkta yüksek yansıma göstermesi, bu yapıların optik filtreler ve yansıtıcı kaplamalar için uygun adaylar olabileceğini ortaya koymaktadır. Öte yandan, düşük yansıma değerlerinin tercih edildiği güneş pili uygulamaları için 10 daldırma döngüsüyle hazırlanan daha ince filmler uygun görünmektedir. Sonuç olarak, Cu_2O ince filmlerin optik yansıma özelliklerinin üretim sıcaklığı, alt taban türü ve daldırma döngüsü sayısı gibi parametrelerle etkin bir şekilde kontrol edilebildiği anlaşılmıştır. Bu kontrol kabiliyeti, Cu_2O'nun güneş pilleri, optik filtreler ve diğer optoelektronik uygulamalarda işlevsel olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır.

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 ^oC ve 70 ^oC sıcaklıklarda cam ve FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığı (E_g) değerleri Tauc metodu kullanılarak belirlenmiştir. $(\alpha h\nu)^2$–$h\nu$ grafikleri üzerinden yapılan analizler sonucunda elde edilen enerji bant aralığı değerleri aşağıda sunulmuştur. 30 ^oC sıcaklıkta cam alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmler için, 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde bant aralığı değerleri sırasıyla 2,39 eV, 2,18 eV ve 1,98 eV olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, daldırma döngüsü sayısındaki artışa paralel olarak bant aralığında azalma olduğunu göstermektedir. 70 ^oC sıcaklıkta cam alt tabanlar üzerinde hazırlanan filmler için, 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde elde edilen enerji bant aralığı değerleri sırasıyla 2,45 eV, 2,08 eV ve 1,88 eV'dir. Film kalınlığındaki artışın bant aralığını düşürdüğü gözlenmiştir. 30 ^oC sıcaklıkta FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O filmler için enerji bant aralığı değerleri, 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde sırasıyla 2,47 eV, 2,37 eV ve 2,19 eV olarak tespit edilmiştir. Daldırma sayısının artmasıyla birlikte bant aralığında düşüş olduğu gözlenmiştir. 70 ^oC sıcaklıkta FTO alt tabanlar üzerinde elde edilen filmlerde ise 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde bant aralıkları sırasıyla 2,42 eV, 2,33 eV ve 2,20 eV olarak bulunmuştur. Genel olarak, her iki sıcaklık ve alt taban koşulunda da daldırma döngüsü sayısının artmasıyla Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığında sistematik bir azalma gözlenmiştir.

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 ^oC ve 70 ^oC sıcaklıklarda cam ve FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimi incelenmiştir. Elde edilen veriler, kırılma indisinin hem film kalınlığına hem de üretim sıcaklığına duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Tüm örneklerde ortak olarak gözlenen eğilim, dalga boyu arttıkça kırılma indisi değerlerinde azalma olmasıdır. Kısa dalga boylarında yüksek olan kırılma indisinin, malzemenin yoğun optik soğurma kapasitesine sahip olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Daldırma döngüsü sayısı arttıkça kırılma indisinde belirgin bir artış gözlenmiştir. 70 ^oC'de hazırlanan filmlerde, kırılma indisinin daha da yükseldiği görülmüştür. Bu durum, yüksek sıcaklığın film yoğunluğu ve kristallenme derecesi üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, Cu_2O ince filmlerin optik özelliklerinin üretim parametreleri ile hassas bir şekilde kontrol edilebildiğini göstermektedir. Daldırma döngüsü

sayısının artması, film kalınlığı artmasına; dolayısıyla elektromanyetik dalgaların film içindeki ilerleyişinin yavaşlamasına ve kırılma indisinin yükselmesine neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise kristallenme düzeyinin artmasıyla birlikte daha kompakt ve homojen yapılar elde edilmekte, bu da kırılma indisi değerlerine doğrudan yansımaktadır. Tüm bu bulgular, Cu_2O ince filmlerin optik sensörler, yansıma önleyici kaplamalar, optik dalga kılavuzları ve fotonik cihazlar gibi çeşitli optoelektronik uygulamalarda kullanım potansiyelini ortaya koymakta ve bu malzemenin optik performansının üretim süreciyle uyumlu biçimde optimize edilebileceğini göstermektedir.

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 ^oC ve 70 ^oC sıcaklıklarda cam ve FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna bağlı değişimleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, sönüm katsayısının hem üretim sıcaklığına hem de daldırma döngüsü sayısına bağlı olarak anlamlı bir şekilde değiştiğini ortaya koymuştur. Genel olarak, tüm örneklerde dalga boyu arttıkça sönüm katsayısı değerlerinin azaldığı, yani Cu_2O filmlerin kısa dalga boylarında daha güçlü optik soğurma gösterdiği gözlenmiştir. Bu durum, Cu_2O'nun yüksek enerjili (kısa dalga boylu) fotonları etkin biçimde soğurduğunu göstermektedir. 30 ^oC'de cam alt taban üzerinde hazırlanan filmler incelendiğinde, daldırma döngüsü sayısının artışıyla birlikte sönüm katsayısı değerlerinde önemli bir artış görülmüştür. Benzer şekilde, uzun dalga boylarında da bu artış eğilimi sürmüş, ancak soğurma etkinliği nispeten azalmıştır. 70 ^oC'de hazırlanan cam alt tabanlı filmlerde ise, özellikle 40 döngüde sönüm katsayısının tüm spektrum boyunca daha da yükseldiği ve malzemenin optik yoğunluğunun arttığı tespit edilmiştir. Bu artış, yüksek sıcaklığın kristal yapıyı iyileştirmesi ve film kalınlığını artırması ile açıklanabilir. FTO alt taban üzerinde hazırlanan filmlerde de benzer eğilimler gözlenmiştir. Daldırma döngüsü arttıkça FTO tabanlı filmlerin soğurma kapasitelerinde belirgin artış gözlenmiş; bu durum, FTO'nun yüzey özelliklerinin film oluşumu üzerindeki etkisini göstermektedir. 70 ^oC'de hazırlanan FTO tabanlı filmler incelendiğinde, özellikle 40 döngüde elde edilen filmin tüm spektrum boyunca daha yüksek sönüm katsayısı değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu da yüksek sıcaklık ve yüksek döngü kombinasyonunun optik yoğunluğu artırdığını ve ışığın daha etkin bir şekilde soğurulmasına neden olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, Cu_2O ince filmlerin sönüm katsayısı değerlerinin hem üretim sıcaklığına hem de daldırma döngüsü sayısına duyarlı olduğu ve bu parametrelerin kontrollü bir şekilde değiştirilmesiyle optik soğurma özelliklerinin optimize edilebileceği anlaşılmıştır. Yüksek sönüm katsayısına sahip Cu_2O ince filmler, özellikle görünür bölgede ışığı etkin şekilde soğurduklarından dolayı, güneş hücreleri, fotodetektörler ve optik filtreler gibi optoelektronik uygulamalar için uygun olarak değerlendirilmektedir.

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 ^oC ve 70 ^oC sıcaklıklarda cam ve FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin reel dielektrik sabiti değerleri incelenmiştir. Cam alt taban üzerinde 30 ^oC ve 70 ^oC sıcaklıklarda hazırlanan filmler karşılaştırıldığında, sıcaklık artışının reel dielektrik sabiti üzerinde belirgin bir artırıcı etkisi olduğu

görülmektedir. Sıcaklık artışının özellikle yüksek daldırma döngüsünde çok daha belirgin bir etki yarattığı görülmektedir. Ayrıca tüm cam alt tabanlı filmlerde, dalga boyunun artmasıyla ε_1 değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. FTO alt taban üzerinde hazırlanan Cu_2O filmlerde de benzer bir eğilim gözlenmiştir. Bu sonuçlar, sıcaklığın ve daldırma döngüsü sayısının FTO alt tabanlı filmlerde de ε_1 üzerinde olumlu bir etki yarattığını, ancak cam alt tabana kıyasla değerlerin genel olarak daha düşük kaldığını göstermektedir. Genel olarak, tüm örneklerde ε_1 değerleri dalga boyu arttıkça düşüş göstermektedir. Özellikle 40 daldırma döngüsüyle ve 70 ^oC sıcaklıkta hazırlanan filmler, her iki alt taban türünde de çok daha yüksek ε_1 değerleri ile dikkat çekmiştir. Bu durum, film kalınlığındaki ve kristallik derecesindeki artış ile ilişkilendirilebilir. Reel dielektrik sabiti değerlerinin bu denli kontrollü biçimde değiştirilebilmesi, Cu_2O ince filmlerin kapasitörler, sensörler, optoelektronik bileşenler ve dielektrik tabanlı cihazlarda işlevsel olarak optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır.

SILAR yöntemi ile 10, 20 ve 40 daldırma döngüsünde, 30 ^oC ve 70 ^oC sıcaklıklarda cam ve FTO alt tabanlar üzerinde hazırlanan Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabitinin dalga boyuna bağlı değişimi incelenmiştir. Cam alt taban üzerinde, 30 ^oC'de hazırlanan örneklerde, ε_2 değerlerinin dalga boyu arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Daldırma döngüsü sayısının artmasıyla, yani film kalınlığının artışıyla birlikte ε_2 değerlerinin tüm dalga boylarında belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Bu durum, kalın filmlerin daha fazla ışık soğurduğunu ve optik enerjiyi daha etkin bir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle 40 döngü ile hazırlanan filmin görünür bölgedeki yüksek ε_2 değerleri, bu filmin güneş hücrelerinde soğurucu tabaka olarak kullanılabilirliğini desteklemektedir. Cam alt taban üzerinde 70 ^oC'de hazırlanan filmlerde de benzer eğilimler gözlenmiş, ancak ε_2 değerleri daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Yine, artan daldırma döngüsü sayısı ile ε_2 değerlerinde gözle görülür bir artış meydana gelmiştir. Bu artış, film kalınlığının yanı sıra sıcaklığın da kristallenme derecesini ve film yoğunluğunu artırarak optik soğurma kapasitesine katkı sağladığını göstermektedir. Dalga boyu arttıkça gözlenen düşüş eğilimi ise, Cu_2O'nun kısa dalga boylarında daha yüksek enerjili fotonlarla daha güçlü bir etkileşim sergilediğini, buna karşılık kızılötesi bölgede daha geçirgen bir davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır. FTO alt taban üzerinde, 30 ^oC'de hazırlanan Cu_2O ince filmlerde de benzer bir davranış gözlenmiştir. Yüksek daldırma döngüsüyle elde edilen kalın filmlerin ışığı daha etkin biçimde soğurduğu ve düşük dalga boylarında yüksek ε_2 değerleri gösterdiği görülmektedir. FTO alt taban üzerinde 70 ^oC'de hazırlanan Cu_2O ince filmlerde imajiner dielektrik sabiti daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Film kalınlığının artışı, optik soğurmanın tüm dalga boylarında daha etkin hale gelmesine neden olmuştur. Bu bulgular, Cu_2O ince filmlerin imajiner dielektrik sabitinin hem daldırma döngüsü sayısı hem de sıcaklık ve alt taban türüne bağlı olarak kontrol edilebildiğini ve bu sayede optik soğurma özelliklerinin istenen uygulamalara uygun şekilde optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, ε_2 değerlerinin belirlenmesi ve analizi, Cu_2O bazlı

optoelektronik cihazların tasarımında kritik bir rol oynamakta; özellikle soğurucu tabaka olarak kullanılacak filmlerin seçiminde temel bir kriter oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, farklı alt tabanlar (cam, FTO) ve sıcaklıklarda (30 ^{o}C, 70 ^{o}C) hazırlanan Cu_2O ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin, daldırma döngüsü sayısına, sıcaklığa ve alt taban türüne bağlı olarak anlamlı şekilde değiştiği belirlenmiştir. Her iki alt tabanda da artan döngü sayısı ve sıcaklık, kristal kalitesini artırmış, yüzey morfolojisini iyileştirmiş ve optik soğurma kapasitesini yükseltmiştir. Elde edilen bulgular, Cu_2O filmlerin optoelektronik uygulamalarda soğurucu tabaka olarak kullanılma potansiyelini ortaya koymuştur. Bu çalışma, ileride yapılacak araştırmalara Cu_2O temelli cihazların performans optimizasyonu ve üretim parametrelerinin belirlenmesi açısından katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Ahirrao, P. B., Sankapal, B. R., & Patil, R. S. (2011). Nanocrystalline p-type-cuprous oxide thin films by room temperature chemical bath deposition method. *Journal of Alloys and Compounds*, *509*(18), 5551-5554.

Altindemir, G., & Gumus, C. (2020). Cu_2O thin films prepared by using four different copper salts at a low temperature: An investigation of their physical properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *107*, 104805.

Aref, A. A., Xiong, 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*(3), 433-439.

Baig, F., Khattak, Y. H., Soucase, B. M., Beg, S., & Ullah, S. (2018). Effect of anionic bath temperature on morphology and photo electrochemical properties of Cu_2O deposited by SILAR. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *88*, 35-39.

Bayansal, F., Çetinkara, H. A., Kahraman, S., Çakmak, H. M., & Güder, H. S. (2012). Nano-structured CuO films prepared by simple solution methods: Plate-like, needle-like and network-like architectures. *Ceramics International*, *38*(3), 1859-1866.

Bayansal, F., Gülen, Y., Şahin, B., Kahraman, S., & Çetinkara, H. A. (2015). CuO nanostructures grown by the SILAR method: Influence of Pb-doping on the morphological, structural and optical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, *619*, 378-382.

Bayansal, F., Şahin, B., Yüksel, M., & Çetinkara, H. A. (2013). SILAR-based growth of nanostructured CuO thin films from alkaline baths containing saccharin as additive. *Materials Letters*, *98*, 197-200.

Bijani, S., Schrebler, R., Dalchiele, E. A., Gabás, M., Martínez, L., & Ramos-Barrado, J. R. (2011). Study of the Nucleation and Growth Mechanisms in the Electrodeposition of Micro- and Nanostructured Cu_2 O Thin Films. *The Journal of Physical Chemistry C*, *115*(43), 21373-21382.

Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction*. John wiley & sons.

Chatterjee, S., & Pal, A. J. (2016). Introducing Cu_2 O Thin Films as a Hole-Transport Layer in Efficient Planar Perovskite Solar Cell Structures. *The Journal of Physical Chemistry C*, *120*(3), 1428-1437.

Chatterjee, S., Saha, S. K., & Pal, A. J. (2016). Formation of all-oxide solar cells in atmospheric condition based on Cu 2 O thin-films grown through SILAR technique. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *147*, 17-26.

Choi, J., Kim, S. J., Lee, J., Nam, S.-C., Kang, J., & Chang, J. H. (2007). Controlled growth of Cu_2 O particles on a hexagonally nanopatterned aluminium substrate. *Nanotechnology*, *18*(21), 215303.

Chowdhury, A., Bijalwan, P. K., & Sahu, R. K. (2014). Investigations on the role of alkali to obtain modulated defect concentrations for Cu_2O thin films. *Applied Surface Science*, *289*, 430-436.

Cullity, B. D., & Smoluchowski, R. (1957). Elements of X-ray Diffraction. *Physics Today*, *10*(3), 50-50.

Dhanasekaran, V., & Mahalingam, T. (2012). Physical properties evaluation of various substrates coated cupric oxide thin films by dip method. *Journal of Alloys and Compounds*, *539*, 50-56.

Elmezayyen, A. S., Guan, S., Reicha, F. M., El-Sherbiny, I. M., Zheng, J., & Xu, C. (2015). Effect of conductive substrate (working electrode) on the morphology of electrodeposited Cu_2O. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *48*(17), 175502.

Emumejaye, D.-U. R. K. (2015). Comparatıve Studıes On The Morphologıcal And Structural Propertıes Of Sılar Deposıted Copper Oxıde Thın Fılm On Glass And Staınless Steel Substrates. *Global Journal of Advanced Engineering Technologies and Sciences*, *2*(7), Article 7.

Erken, Ö. (2015). *Kimyasal Depolama Yöntemi İle Hazırlanan ZnS VE Zn1-xSMnx (0.01≤x≤0.1) Yarıiletken İnce Filmlerin Optiksel, Yapısal, Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*.

Farhad, S. F. U., Hossain, Md. A., Tanvir, N. I., Akter, R., Patwary, Md. A. M., Shahjahan, M., & Rahman, M. A. (2019). Structural, optical, electrical, and photoelectrochemical properties of cuprous oxide thin films grown by modified SILAR method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *95*, 68-75.

Farhad, S. F. U., Majumder, S., Hossain, Md. A., Tanvir, N. I., Akter, R., & Patwary, Md. A. M. (2019). Effect of Solution pH and Post-annealing temperatures on the Optical Bandgap of the Copper Oxide Thin Films Grown by modified SILAR Method. *MRS Advances*, *4*(16), 937-944.

Güneri, E. (2019). The Role of Au Doping on the Structural and Optical Properties of Cu_2O Films. *Journal of Nano Research*, *58*, 49-67.

Halin, D. S. C., Talib, I. A., Hamid, M. A. A., & Daud, A. R. (2008). Characterızatıon Of Cuprous Oxıde Thın Fılms On N-Si Substrate Prepared By Sol-Gel Spın Coatıng. *Solid State Science and Technology*, *16*(1).

Hameş, Y., & Eren San, S. (2004). CdO/Cu_2O solar cells by chemical deposition. *Solar Energy*, *77*(3), 291-294.

Hossain, Md. A., Al-Gaashani, R., Hamoudi, H., Al Marri, M. J., Hussein, I. A., Belaidi, A., Merzougui, B. A., Alharbi, F. H., & Tabet, N. (2017). Controlled growth of Cu_2O thin films by electrodeposition approach. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *63*, 203-211.

Huang, M.-C., Wang, T., Chang, W.-S., Lin, J.-C., Wu, C.-C., Chen, I.-C., Peng, K.-C., & Lee, S.-W. (2014). Temperature dependence on *p*-Cu_2O thin film electrochemically deposited onto copper substrate. *Applied Surface Science*, *301*, 369-377.

Jawad, M. F., Ismail, R. A., & Yahea, K. Z. (2011). Preparation of nanocrystalline Cu_2O thin film by pulsed laser deposition. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *22*(9), 1244-1247.

Jiang, X., Lin, Q., Zhang, M., Song, X., & Sun, Z. (2015). Effect of temperature and additive on the structural, morphological and optical properties of Cu_2O thin films. *Optik*, *126*(24), 5544-5547.

Johan, M. R., Suan, M. S. M., Hawari, N. L., & Ching, H. A. (2011). Annealing Effects on the Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Chemical Deposition. *International Journal of Electrochemıcal Scıence, Int. J. Electrochem. Sci., Vol. 6, 2011*.

Kalubowila, K. D. R. N., Gunawardhana, L. K. A. D. D. S., Wijesundera, R. P., & Siripala, W. (2014). Methods for improving n-type photoconductivity of electrodeposited Cu_2O thin films. *Semiconductor Science and Technology*, *29*(7), 075012.

Karapetyan, A., Reymers, A., Giorgio, S., Fauquet, C., Sajti, L., Nitsche, S., Nersesyan, M., Gevorgyan, V., & Marine, W. (2015). Cuprous oxide thin films prepared by thermal oxidation of copper layer. Morphological and optical properties. *Journal of Luminescence*, *159*, 325-332.

Kim, T. G., Oh, H., Ryu, H., & Lee, W.-J. (2014). The study of post annealing effect on Cu_2O thin-films by electrochemical deposition for photoelectrochemical applications. *Journal of Alloys and Compounds*, *612*, 74-79.

Kim, T. G., Ryu, H., Lee, W.-J., & Yoon, J.-H. (2015). Effects of graphene oxide (GO) on GO-Cu_2O composite films grown by using electrochemical deposition for a PEC photoelectrode. *Journal of the Korean Physical Society*, *66*(10), 1586-1592.

Kittel, C., & McEuen, P. (2018). *Introduction to solid state physics*. John Wiley & Sons.

Laidoudi, S., Bioud, A. Y., Azizi, A., Schmerber, G., Bartringer, J., Barre, S., & Dinia, A. (2013). Growth and characterization of electrodeposited Cu_2O thin films. *Semiconductor Science and Technology*, *28*(11), 115005.

Lee, G. C., Jung, Y. S., & Kim, K. H. (2014). Properties of Cu_2 O Thin Films for All-Oxide Solar Cells. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, *598*(1), 62-68.

Lee, Y. S., Winkler, M. T., Siah, S. C., Brandt, R., & Buonassisi, T. (2011). Hall mobility of cuprous oxide thin films deposited by reactive direct-current magnetron sputtering. *Applied Physics Letters*, *98*(19), 192115.

Li, B. S., Akimoto, K., & Shen, A. (2009). Growth of Cu_2O thin films with high hole mobility by introducing a low-temperature buffer layer. *Journal of Crystal Growth*, *311*(4), 1102-1105.

Liang, R.-M., Chang, Y.-M., Wu, P.-W., & Lin, P. (2010). Effect of annealing on the electrodeposited Cu_2O films for photoelectrochemical hydrogen generation. *Thin Solid Films*, *518*(24), 7191-7195.

Liu, Y. L., Liu, Y. C., Mu, R., Yang, H., Shao, C. L., Zhang, J. Y., Lu, Y. M., Shen, D. Z., & Fan, X. W. (2005). The structural and optical properties of Cu_2 O films electrodeposited on different substrates. *Semiconductor Science and Technology*, *20*(1), 44-49.

Łukasiak, L., & Jakubowski, A. (2010). Invited paper History of Semiconductors. *Journal of Telecommunications and Information Technology*.

Mageshwari, K., & Sathyamoorthy, R. (2013). Physical properties of nanocrystalline CuO thin films prepared by the SILAR method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, *16*(2), 337-343.

Mahalingam, T., Chitra, J. S. P., Chu, J. P., Velumani, S., & Sebastian, P. J. (2005). Structural and annealing studies of potentiostatically deposited Cu_2O thin films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *88*(2), 209-216.

Nair, M. T. S., Guerrero, L., Arenas, O. L., & Nair, P. K. (1999). Chemically deposited copper oxide thin films: Structural, optical and electrical characteristics. *Applied Surface Science*, *150*(1-4), 143-151.

Nicolau, Y. F., & Menard, J. C. (1988). Solution growth of ZnS, CdS and Zn1-xCdxS thin films by the successive ionic-layer adsorption and reaction process; growth mechanism. *Journal of Crystal Growth*, *92*(1), 128-142.

Nikam, S. S., Suryawanshi, M. P., Bhosale, S. M., Gaikwad, M. A., Shinde, 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*(2), 1897-1900.

Odín Reyes-Vallejo, Escorcia-García, J., & Sebastian, P. J. (2022). Effect of complexing agent and deposition time on structural, morphological, optical and electrical properties of cuprous oxide thin films prepared by chemical bath deposition. *Materials Science in Semiconductor Processing, 138*, 106242.

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*(1), 140-144.

Ozaslan, D., Erken, O., Gunes, M., & Gumus, C. (2020). The effect of annealing temperature on the physical properties of Cu_2O thin film deposited by SILAR method. *Physica B: Condensed Matter, 580*, 411922.

Özaslan, D. (2016). *Tavlama Sıcaklığının Farklı Kalınlıklarda Hazırlanan Cu_2o İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerine Etkisi*.

Papadimitropoulos, G., Vourdas, N., Vamvakas, V. Em., & 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.

Park, J.-W., Jang, H., Kim, S., Choi, S.-H., Lee, H., Kang, J., & Wei, S.-H. (2011). Microstructure, optical property, and electronic band structure of cuprous oxide thin films. *Journal of Applied Physics, 110*(10), 103503.

Pathan, H. M., & Lokhande, C. D. (2004). Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. *Bulletin of Materials Science, 27*(2), 85-111.

Rahal, H., Kihal, R., Affoune, A. M., & Rahal, S. (2018). Electrodeposition and characterization of Cu_2O thin films using sodium thiosulfate as an additive for photovoltaic solar cells. *Chinese Journal of Chemical Engineering, 26*(2), 421-427.

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.

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.

Ray, S. C. (2001). *Preparation of copper oxide thin "lm by the sol-gel-like dip technique and study of their structural and optical properties*.

Reimer, L. (2000). Scanning electron microscopy: Physics of image formation and microanalysis. *Measurement Science and Technology*, *11*(12), 1826-1826.

Ristov, M., Sinadinovski, G., & Grozdanov, I. (1985). *Chemıcal Deposıtıon Of Cu_20 Thın Fılms*.

Sebastian, P. J., Quintana, J., Avila, F., & Mathew, X. (2000). Electrodeposited Cu_2 O thin films for solar conversion. *Surface Engineering*, *16*(1), 47-49.

Serin, N., Yildiz, A., Çam, E., Uzun, Ş., & Serin, T. (2012). Fluctuating in the hopping rate of CuO thin films with respect to substrate temperature. *Superlattices and Microstructures*, *52*(4), 759-764.

Sivakumar, R., Sanjeeviraja, C., Jayachandran, M., Gopalakrishnan, R., Sarangi, S. N., Paramanik, D., & Som, T. (2007). Modification of WO3 thin films by MeV N+-ion beam irradiation. *Journal of Physics: Condensed Matter*, *19*(18), 186204.

Streetman, B. G., & Banerjee, S. (2000). *Solid state electronic devices* (C. 4). Prentice hall New Jersey.

Tahir, D., & Tougaard, S. (2012). Electronic and optical properties of Cu, CuO and Cu_2 O studied by electron spectroscopy. *Journal of Physics: Condensed Matter*, *24*(17), 175002.

Tanaka, H., Shimakawa, T., Miyata, T., Sato, H., & Minami, T. (2005). Effect of AZO film deposition conditions on the photovoltaic properties of AZO–Cu_2O heterojunctions. *Applied Surface Science*, *244*(1-4), 568-572.

Tran, M. H., Cho, J. Y., Sinha, S., Gang, M. G., & Heo, J. (2018). Cu_2O/ZnO heterojunction thin-film solar cells: The effect of electrodeposition condition and thickness of Cu_2O. *Thin Solid Films*, *661*, 132-136.

Uchiyama, H., Hasegawa, Y., Morita, H., Kurokouchi, A., Wada, K., & Komine, T. (2006). Thermoelectric property of Cu_2O thin film deposited by Reactive Ion Plating method. *2006 25th International Conference on Thermoelectrics*, 379-381.

Venkateswarlu, A. R., Varma, G. D., & Nath, R. (2011). Optical and electrical properties of spray pyrolysis deposited nano-crystalline BiFeO3 films. *AIP Advances*, *1*(4), 042140.

Visalakshi, S., Kannan, R., Valanarasu, S., Kathalingam, A., & Rajashabala, S. (2016). Effect of adsorption time on structural, optical and electronic properties of SILAR

deposited CuO thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *27*(9), 9179-9185.

Wang, L., Liu, G., & Xue, D. (2011). Effects of supporting electrolyte on galvanic deposition of Cu_2O crystals. *Electrochimica Acta*, *56*(18), 6277-6283.

Wang, Y., Ghanbaja, J., Soldera, F., Boulet, P., Horwat, D., Mücklich, F., & Pierson, J. F. (2014). Controlling the preferred orientation in sputter-deposited Cu_2O thin films: Influence of the initial growth stage and homoepitaxial growth mechanism. *Acta Materialia*, *76*, 207-212.

Wijesundera, R. P. (2010). Fabrication of the CuO/Cu_2 O heterojunction using an electrodeposition technique for solar cell applications. *Semiconductor Science and Technology*, *25*(4), 045015.

Wijesundera, R. P., Hidaka, M., Koga, K., Sakai, M., & Siripala, W. (2006). Growth and characterisation of potentiostatically electrodeposited Cu_2O and Cu thin films. *Thin Solid Films*, *500*(1-2), 241-246.

Xiong, L., Yu, H., Yang, G., Qiu, M., Chen, J., & Yu, Y. (2010). A simplified chemical synthesis of Cu_2O films with periodic pattern transfer. *Thin Solid Films*, *518*(23), 6738-6745.

Xu, H., Dong, J., & Chen, C. (2014). 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.

Xu, H. Y., Chen, C., Xu, L., & Dong, J. K. (2013). Direct growth and shape control of Cu_2O film via one-step chemical bath deposition. *Thin Solid Films*, *527*, 76-80.

Xue, J., Shen, Q., Liang, W., Liu, X., Bian, L., & Xu, B. (2013). Preparation and formation mechanism of smooth and uniform Cu_2O thin films by electrodeposition method. *Surface and Coatings Technology*, *216*, 166-171.

YU, P., & Cardona, M. (2010). *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*. Springer Science & Business Media.

Yurddaskal, M., Dikici, T., & Celik, E. (2016). Effect of annealing temperature on the surface properties and photocatalytic efficiencies of Cu_2O/CuO structures obtained by thermal oxidation of Cu layer on titanium substrates. *Ceramics International*, *42*(15), 17749-17753.

Zainun, A. R., Tomoya, S., Mohd Noor, U., Rusop, M., & Masaya, I. (2012). New approach for generating Cu_2O/TiO2 composite films for solar cell applications. *Materials Letters*, *66*(1), 254-256.

Zhai, W., Sun, F., Chen, W., Zhang, L., Min, Z., & Li, W. (2013). Applications of Cu_2O octahedral particles on ITO glass in photocatalytic degradation of dye pollutants under a halogen tungsten lamp. *Materials Research Bulletin*, *48*(11), 4953-4959.

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

Hüsnü Çağlar ÇEVLİK; İlköğrenimini 7 Mart İlkokulunda, ortaöğrenimini Kadirli Ortaokulunda ve lise öğrenimini Kadirli Lisesinde tamamladı. 1993 yılında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2000 yılında mezun oldu. Aynı yıl Adana ilinde öğretmenlik görevine başladı. Halen Adana ili Seyhan ilçesinde bulunan Öğretmen Zeynep Erdoğdu Ortaokulunda görev yapmaktadır. 2019 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimini tamamlamıştır.

EKLER

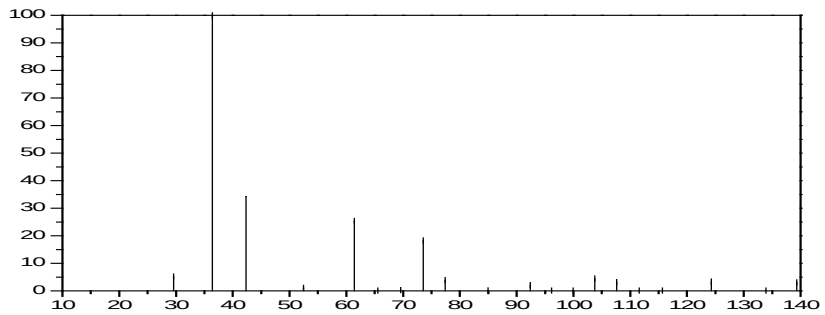
Ek 1: Cu_2O standart PDF kartı

PDF Card No.: 01-071-3645 Quality:S

Sub-File Name: Inorganic, Alloy&Metal, Battery Material, Common Phase, Forensic, Superconducting Material, ICSD...

Formula:	Cu_2O	
Name:	copper (I) oxide	I/Ic (RIR)= 7.94
Crystal System:	Cubic Space Group:Pn-3m(224)	Dmeas:
Cell Parameters:	a = 4.2685 b = 4.2685 c = 4.2685	
	Alpha = 90.000 Beta = 90.000 Gamma = 90.000	
	Volume = 77.772 Z = 2	
Reference:	Kirfel, A., Eichhorn, K.D. Acta Crystallogr., Sec.	
Radiation:	CuKalpha1 Wavelength = 1.54060	
2Theta range:	29.57 - 139.34	

Database comments:ANX: A2X. Analysis: Cu_2O 1.Formula from original source: Cu_2O . ICSD Collection Code: 52043. Calculated Pattern Original Remarks: The `forbidden` eeo-reflections are satisfactory represented by U12(Cu), R=.055. Wyckoff Sequence: b a(PN3-MS). Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.



No.	2Theta	d-Value	Intensity	h	k	l	No.	2Theta	d-Value	Intensity	h	k	l
1	29.57	3.018	5.2	1	1	0							
2	36.43	2.464	100	1	1	1							
3	42.31	2.134	34.3	2	0	0							
4	52.47	1.743	1.1	2	1	1							
5	61.38	1.509	25.4	2	2	0							
6	65.56	1.423	0.1	2	2	1							
7	69.59	1.35	0.3	3	1	0							
8	73.53	1.287	18.3	3	1	1							
9	77.38	1.232	3.9	2	2	2							
10	84.94	1.141	0.2	3	2	1							
11	92.41	1.067	2.1	4	0	0							
12	96.16	1.035	0.1	3	2	2							
13	99.93	1.006	0.1	4	1	1							
14	103.7	0.979	4.5	3	3	1							
15	107.6	0.954	3.2	4	2	0							
16	111.6	0.931	0.1	4	2	1							
17	115.7	0.91	0.1	3	3	2							
18	124.3	0.871	3.4	4	2	2							
19	133.9	0.837	0.1	5	1	0							
20	139.3	0.821	3.1	5	1	1							

Note: 2theta are calculated with wavelength = 1.54059

2014-Apr-17 10:11:22 Page-1/1