

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**SILAR Yöntemi ile Farklı Altlıklar Üzerinde Depolanan Bakır
Oksit İnce Filmlerin Özelliklerine Tavlamanın Etkisi**

Onur YILMAZ

Fizik Anabilim Dalı

NİSAN, 2025

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZ ONAYI

**SILAR Yöntemi ile Farklı Altlıklar Üzerinde Depolanan Bakır
Oksit İnce Filmlerin Özelliklerine Tavlamanın Etkisi**

Onur YILMAZ

Fizik Anabilim Dalı

Bu Doktora Tezi 15/04/2025 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-2021-14140

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 İnce Filmler	2
1.2. Bakır (I) Oksit (Cu_2O) ve Özellikleri	3
1.3. Bakır (II) Oksit (CuO) ve Özellikleri	4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR:	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM	31
3.1. Katıların Kristal Yapısı	31
3.1.1. Kristal Sistemleri ve Bravais Örgüleri.....	32
3.1.2. Miller İndisleri.....	34
3.1.4. X-ışınları Kırınımı (XRD) ve Bragg Yasası.....	40
3.1.5. X-ışınları Kırınım Yöntemleri.....	42
3.2. Katıların Elektriksel Özelliklerine Göre Sınıflandırılması.....	43
3.2.1. Yalıtkanlar	45
3.2.2. İletkenler.....	45
3.2.3. Yarıiletkenler	46
3.2.4. Katılarda Enerji Seviyeleri ve Bant Yapıları	50
3.3. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri.....	57
3.3.1. Işığın Yarıiletkenlerle Etkileşmesi.....	57
3.3.2. Işığın Soğurulması.....	60
3.3.3. Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi.....	64
3.3.4. Soğurma Katsayısının Hesaplanması:	66
3.3.5. Film Kalınlıklarının Hesaplanması.....	71
3.4. Alan Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM)	73
3.5. Yarıiletken İnce Filmler ve Üretim Teknikleri.....	74
3.5.1. Sıralı (Ardışık) İyonik Tabaka Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu (SILAR) Yöntemi..	75
3.5.4. Cu_2O İnce Filmlerin Elde Edilmesi	78
3.5.5. Cu_2O İnce Filmlerin Tavlanması	79
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	81
4.1. Cu_2O ve CuO İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Analizleri	81

4.1.1. Cam Altlıklar Üzerinde 60 °C’de 36 SILAR Döngüsü ile Depolanan ve Farklı Sıcaklıklarda Tavlanan Cu ₂ O İnce Filmlerin X-Işını Kırınım Desenleri	82
4.1.2. ITO Altlıklar Üzerinde 60 °C’de 36 SILAR Döngüsü ile Depolanan ve Farklı Sıcaklıklarda Tavlanan Cu ₂ O İnce Filmlerin X-Işını Kırınım Desenleri	90
4.2. Cu ₂ O ve CuO Yarıiletken İnce Filmlerin Morfolojik Özellikleri.....	98
4.2.1. Cam Altlıklar Üzerinde 60 °C’de 36 SILAR Döngüsü ile Depolanan ve Farklı Sıcaklıklarda Tavlanan Cu ₂ O İnce Filmlerin FE-SEM Görüntüleri.....	98
4.2.2. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan Cu ₂ O ince filmlerin FE-SEM görüntüleri.....	103
4.3. Cu ₂ O ve CuO İnce Filmlerin Optik Özellikleri	109
4.3.1. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan Cu ₂ O ince filmlerin optik özellikleri	109
4.3.2. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan Cu ₂ O ince filmlerin optik özellikleri	117
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	125
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ	141
EKLER.....	142
1.1. Ek 1: Cu ₂ O standart PDF kartı	143
1.2. Ek 2: CuO standart PDF kartı.....	144
1.3. Ek 3: ITO standart PDF kartı.....	145

**SILAR Yöntemi ile Farklı Altlıklar Üzerinde
Depolanan Bakır Oksit İnce Filmlerin Özelliklerine
Tavlamanın Etkisi**

Onur YILMAZ

Danışman: Prof. Dr. Cebirail GÜMÜŞ

Fizik Anabilim Dalı

ÖZ

Bu tez çalışmasında, SILAR (Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu) yöntemi kullanılarak 60 °C sıcaklıkta 36 daldırma döngüsü ile cam (amorf) ve ITO (polikristal) altlıklar üzerinde Cu₂O (kuprit) yarıiletken ince filmler üretilmiştir. Üretilen Cu₂O yarıiletken ince filmler sırası ile 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıklarda hava atmosferinde bir saat boyunca fırınında ısısal işleme (tavlama) tabi tutuldu. Tavlama sıcaklığının filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerinde etkisi araştırılmıştır. X-ışını kırınımı (XRD) analizlerinden, cam ve ITO altlıklar üzerinde üretilen Cu₂O ince filmlerin kübik fazda ve polikristal yapıda büyüdüğü görüldü. Ayrıca, Cu₂O ince filmlerin 260 °C ve üzerindeki tavlama sıcaklıklarında tamamen CuO'ya (tenorit) dönüştüğü bulundu. CuO ince filmlerin monoklinik fazda ve polikristal yapıda büyüdüğü görüldü. Yarıiletken filmlerin temel optik parametre (%T, A, %R, n, k, ϵ_1 , ϵ_2 , E_g) değerleri UV-vis spektrofotometresinden elde edilen veriler kullanılarak hesaplandı. Cam ve ITO altlıklar üzerinde üretilen ve farklı sıcaklıklarda tavlanan ince filmlerin enerji bant aralığı (E_g) değerleri sırası ile 2,13 – 1,76 eV ve 2,11 – 1,70 eV olarak bulundu. Alan Emisyonlu-Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) görüntülerinden ince filmlerin genel olarak homojen ve küresel bir yapıya sahip oldukları, tavlama sıcaklığının artışı ile daha sıkı bir yapının oluştuğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Cu₂O, CuO, İnce Film, SILAR, XRD

**Effects of Annealing to The Properties of Copper Oxide
Thin Films Deposited on Different Substrates by SILAR
Method**

Onur YILMAZ

Advisor: Prof. Dr. Cebirail GÜMÜŞ

Department of Physics

ABSTRACT

In this thesis, Cu₂O (cuprite) semiconductor thin films were fabricated on glass (amorphous) and ITO (polycrystalline) substrates using SILAR (Sequential Ionic Layer Adsorption and Reaction) method at 60 °C for 36 immersion cycles. The produced Cu₂O semiconductor thin films were subjected to thermal treatment (annealing) in a furnace at 160 °C, 260 °C, 360 °C and 460 °C in air atmosphere for one hour. The effect of annealing temperature on the structural, morphological and optical properties of the films was investigated. X-ray diffraction (XRD) analysis showed that Cu₂O thin films grown on glass and ITO substrates grew in cubic phase and polycrystalline structure. It was also found that Cu₂O thin films were completely transformed into CuO (tenorite) at annealing temperatures of 260 °C and above. CuO thin films were found to grow in monoclinic phase and polycrystalline structure. The basic optical parameters (%T, %A, %R, n , k , ϵ_1 , ϵ_2 , E_g) of the semiconductor films were calculated using data obtained from UV-vis spectrophotometry. The energy band gap (E_g) values of the thin films fabricated on glass and ITO substrates and annealed at different temperatures were found to be 2,13 – 1,76 eV and 2,11 – 1,70 eV, respectively. Field Emission-Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) images show that the thin films have a homogeneous and spherical structure in general, and a tighter structure is formed with increasing annealing temperature.

Key Words: Cu₂O, CuO, Thin Film, SILAR, XRD

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarımın gerçekleşmesinde her zaman yanımda olan, yapıcı ve yönlendirici fikirleri ile bana her anlamda destek veren, kendisini tanımaktan ve çalışmaktan onur duyduğum kıymetli Hocam Prof. Dr. Cebail GÜMÜŞ'e gösterdiği ilgi, hoşgörü ve yardımlarından dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen ve onları tanımaktan çok mutlu olduğum kıymetli hoca arkadaşlarım Hüsnü Çağlar ÇEVİLİK ve Gülüzar TEZCAN'a teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca beni destekleyen, hayatımın her aşamasında yanımda olan ve evlatları olmaktan gurur duyduğum sevgili annem Sevinç YILMAZ'a ve yakın zamanda kaybettiğim rahmetli babam Bahir YILMAZ'a; manevi desteklerinden dolayı abim Mehmet Erдің YILMAZ'a; çalışmalarım esnasında onlardan aldığım zamana rağmen bana sabırla katlanan, beni sürekli destekleyen, her zaman ve her koşulda yanımda olan, varlığıyla hayatıma anlam ve mutluluk katan sevgili eşim Sera YILMAZ'a, çocuklarım Emre YILMAZ ve Cansu YILMAZ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kristal Sistemleri	34
Çizelge 4.1. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu ₂ O ince filmler için kristal parametre değerleri	83
Çizelge 4.2. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu ₂ O ince filmler için kristal parametre değerleri	84
Çizelge 4.3. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri	86
Çizelge 4.4. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri	87
Çizelge 4.5. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri	89
Çizelge 4.6. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu ₂ O ince filmler için kristal parametre değerleri	90
Çizelge 4.7. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu ₂ O ince filmler için kristal parametre değerleri	92
Çizelge 4.8. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri	93
Çizelge 4.9. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri	95
Çizelge 4.10. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Cu ₂ O'nun kristal yapısı.....	4
Şekil 1.2. CuO bileşiğinin (a) birim hücresi ve (b) kristal yapısının bir kısmı.....	5
Şekil 3.1. Kristal malzemelerde atom dizilişleri a) Tek kristal b) Polikristal c) Amorf yapı	31
Şekil 3.2. a) Basit örgü ve b) Birim hücre	32
Şekil 3.3. A[1 0 0], B[1 1 1], C[1 2 2] doğrultu indisleri.....	35
Şekil 3.4. S düzleminin xyz koordinat sisteminde gösterimi.....	36
Şekil 3.5. Miller indisleri ile birim hücredeki bazı kristal yüzeylerinin gösterimi	38
Şekil 3.6. Elektromanyetik Spektrum	39
Şekil 3.7. X-ışını tüpü.....	40
Şekil 3.8. Bragg Yasası	41
Şekil 3.9. X-ışını difraktometresinin şematik gösterimi	42
Şekil 3.10. PANalytical EMPYREAN X-ışını Kırınımı (XRD).....	43
Şekil 3.11. a) İletken (Fe) ve b) Yarıiletken (Si) malzemelerin sıcaklığa bağlı öz dirençlerinin değişim grafiği.....	44
Şekil 3.12. Yalıtkan bir malzemeye ait enerji-bant diyagramı	45
Şekil 3.13. İletken bir malzemeye ait enerji-bant diyagramı	46
Şekil 3.14. Yarıiletken bir malzemeye ait enerji-bant diyagramı	46
Şekil 3.15. Silisyum örgüsünde atomlar arası bağların gösterimi: a) $T = 0$ K, b) $T > 0$ K	48
Şekil 3.16. a) Antimon katkılı Silisyum atomu b) Antimon katkısının enerji bant diyagramı	49
Şekil 3.17. a) Bor katkılı Silisyum atomu b) Bor katkısının enerji bant diyagramı.....	50
Şekil 3.18. Metal, yalıtkan ve yarıiletken malzemelerin enerji-bant diyagramları.....	51
Şekil 3.19. Enerji Bantlarının Oluşumu.....	52
Şekil 3.20. Fermi –Dirac dağılım fonksiyonu a) $T = 0$ K b) $T > 0$ K	53
Şekil 3.21. Perkin Elmer UV/VIS Lambda 2S spektrofotometresi	58
Şekil 3.22. Bir yarıiletken malzeme üzerine gelen tek frekanslı bir ışık	58
Şekil 3.23. Doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkende bir fotonun soğurulması	61
Şekil 3.24. Dolaylı bant aralıklı bir yarıiletkende fonon yayınlama veya soğurma yoluyla fotonun soğurulması.....	62
Şekil 3.25. Bir yarıiletken malzemenin soğurma katsayısının enerjiye bağlı değişimi	65
Şekil 3.26. Bir yarıiletken ince filmde soğurma katsayısının enerjiye göre değişiminden, optik yasak enerji bant aralığının belirlenmesi	66
Şekil 3.27. İnce bir tabakadaki soğurma.....	67
Şekil 3.28. İnce Bir Filmde Çok Yansımali Işık Geçirimi.....	69
Şekil 3.29. FEI Quanta 650 Field Emission SEM - Alan Taramalı Elektron Mikroskobu	74
Şekil 3.30. İnce film üretme teknikleri	75

Şekil 3.31. SILAR yöntemi şematik gösterimi	77
Şekil 3.32. Nabertherm marka kül fırını	79
Şekil 3.33. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan Cu ₂ O yarıiletken ince filmler	80
Şekil 3.34. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan Cu ₂ O yarıiletken ince filmler	80
Şekil 4.1. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu ₂ O ince filmler için X-ışını kırınım deseni	82
Şekil 4.2. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu ₂ O ince filmler için X-ışını kırınım deseni	84
Şekil 4.3. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni.....	85
Şekil 4.4. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni.....	87
Şekil 4.5. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni.....	88
Şekil 4.6. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu ₂ O ince filmler için X-ışını kırınım deseni	90
Şekil 4.7. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu ₂ O ince filmler için X-ışını kırınım deseni	91
Şekil 4.8. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni.....	93
Şekil 4.9. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni.....	94
Şekil 4.10. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni.....	96
Şekil 4.11. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu ₂ O ince film için FE-SEM görüntüsü	98
Şekil 4.12. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu ₂ O ince film için FE-SEM görüntüsü	99
Şekil 4.13. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü.....	100
Şekil 4.14. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü.....	101
Şekil 4.15. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü.....	102

Şekil 4.16. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu ₂ O ince film için FE-SEM görüntüsü.....	103
Şekil 4.17. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu ₂ O ince film için FE-SEM görüntüsü	104
Şekil 4.18. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü.....	105
Şekil 4.19. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü.....	106
Şekil 4.20. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü.....	107
Şekil 4.21. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için optik geçirgenlik – dalga boyu grafiği	109
Şekil 4.22. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için optik soğurma – dalga boyu grafiği .	110
Şekil 4.23. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için yansım – dalga boyu grafiği	111
Şekil 4.24. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için kırılma indisi – dalga boyu grafiği...	112
Şekil 4.25. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için sönüm katsayısı – dalga boyu grafiği	113
Şekil 4.26. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için reel dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği	114
Şekil 4.27. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için imajiner dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği	115
Şekil 4.28. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için $(ah\nu)^2$ -foton enerjisi $(h\nu)$ grafiği	116
Şekil 4.29. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için optik geçirgenlik – dalga boyu grafiği	117
Şekil 4.30. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için optik soğurma – dalga boyu grafiği .	118
Şekil 4.31. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için yansım – dalga boyu grafiği	119

Şekil 4.32. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için kırılma indisi – dalga boyu grafiği...	120
Şekil 4.33. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için sönüm katsayısı – dalga boyu grafiği	121
Şekil 4.34. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için reel dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği	122
Şekil 4.35. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için imajiner dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği	123
Şekil 4.36. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için $(\alpha h\nu)^2$ -foton enerjisi $(h\nu)$ grafiği	124

SİMGELER VE KISALTMALAR

a, b, c	: Kristalografik örgü parametreleri
A	: Soğurma
B	: Manyetik alan
c	: Işık hızı
d	: Kristal düzlemler arası uzaklık
D	: Kristalit büyüklüğü
$D_e(E)$	: İletim bandındaki elektronların durum yoğunluğu
$D_h(E)$	: Değerlik bandındakideşiklerin durum yoğunluğu
E	: Elektrik alan
E_H	: Hall elektrik alan
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_B	: Boltzmann sabiti
k	: Sönüm katsayısı
m_e^*	: Elektronların etkin kütlesi
m_h^*	: Deşiklerin etkin kütlesi
N_c	: Valans bandındaki elektronların etkin durum yoğunluğu
N_v	: Değerlik bandındakideşiklein etkin durum yoğunluğu
R	: Direnç
R_H	: Hall katsayısı
n	: Elektron yoğunluğu
n	: Kırılma indisi
p	: Deşik (boşluk – hole) yoğunluğu
r	: Örgü vektörü
α	: Lineer soğurma katsayısı
λ	: Dalga boyu
θ	: Bragg açısı
φ	: Kristal doğrultuları veya düzlemleri arasındaki açı
u	: Frekans
ρ	: Özdirenç

σ	: Elektriksel iletkenlik
σ_e	: Elektronların iletkenliği
σ_h	: Boşlukların iletkenliği
J	: Akım yoğunluğu
μ	: Mobilite
μ_e	: Elektronların mobilitesi
μ_h	: Deşiklerin mobilitesi
ϵ_1	: Reel dielektrik sabiti
ϵ_2	: İmajiner dielektrik sabiti
ϵ_∞	: Yüksek frekans dielektrik sabiti
T	: Sıcaklık
$\% T$	: Optik geçirgenlik
V	: Gerilim (voltaj)
V	: Hacim
V_s	: Sürüklenme hızı
$\% R$	: Yansıma katsayısı
T_c	: Kritik sıcaklık
t_f	: Film kalınlığı
I	: Akım
I	: Işık şiddeti
Φ	: Foton (ışık) akısı
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
AgS	: Gümüş sülfür
AP – HCVD	: Atmosferik basınç altında halojenür kimyasal buhar depolama
Au	: Altın
AZO	: Alüminyum katkılı çinko oksit
CBD	: Kimyasal depolama yöntemi
CdS	: Kadmiyum sülfür
$(CH_3COO)_2Cu.H_2O$	: Bakır (II) asetat monohidrat
CVD	: Kimyasal buhar depolama
CP	: Kritik noktalar
Cr	: Krom
CTAB	: Setiltrimetilamonyum bromür
$C_6H_8O_7$	: Sitrik asit
Cu	: Bakır elementi
$CuCl_2.2H_2O$	: Bakır (II) klorür dihidrat
$Cu(NO_3)_2.3H_2O$	: Bakır (II) nitrat trihidrat

CuO	: Bakır (II) oksit
Cu(OAc) ₂	: Bakır (II) asetat
CuS	: Bakır sülfür
CuSO ₄	: Bakır (II) sülfat
CuSO ₄ .5H ₂ O	: Bakır (II) sülfat pentahidrat
3Cu ₂ S ₂ O ₃ .2Na ₂ S ₂ O ₃	: Bakır tiyosülfat
Cu ₂ O	: Bakır (I) oksit
DC	: Doğru akım
DRS	: Dijital refraktometre
ECD	: Elektrokimyasal depolama
EDS	: Enerji dağıtıcı spektrometri
EDX – EDAX	: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
EIS	: Elektrokimyasal empedans spektrometresi
FE-SEM	: Alan emisyon-taramalı elektron mikroskobu
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
FTO	: Flor katkılı kalay oksit
FWHM	: Maksimum yarısı tam genişlik
GAXRD	: Bakış açılı X-ışını difraktometresi
GES	: Güneş enerji santrali
GaAs	: Galyum arsenik
GaP	: Galyum fosfit
GaSb	: Galyum antimonit
Ge	: Germanyum
H ₂	: Hidrojen gazı
H ₂ O ₂	: Hidrojen peroksit
H ₂ O	: Su
H ₂ S	: Hidrojen sülfür
InAs	: İndiyum arsenür
InSb	: İndiyum antimonit
IR	: Kızılötesi
ITO	: İndiyum katkılı kalay oksit
KCl	: Potasyum klorür
LED	: Işık yayan diyot
MgO	: Magnezyum oksit
Mn	: Mangan
MO	: Metil turuncu
MWe	: Megawatt-elektrik

N ₂	: Azot gazı
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Na ₂ S ₂ O ₃	: Sodyum tiyosülfat
Nd:YAG	: Neodimyum yağ lazer
NiO	: Nikel (II) oksit
NW	: Nano teller
<i>n</i> -Cu ₂ O	: <i>n</i> -tipi bakır (I) oksit
O	: Oksijen
OY	: Optik yoğunluk
O ₂	: Oksijen gazı
PbTe	: Kurşun tellür
PEC	: Fotoelektrokimyasal Hücre
PEG	: Polietilen glikol
PET	: Polietilen tereftalat
PL	: Fotolüminesans
Ppm	: Milyonda bir birim
PV	: Fotovoltaik Sistemler
PWSCF	: Kuantum espresso ile yoğunluk fonksiyonel teorisi
<i>p</i> -CuO	: <i>p</i> -tipi bakır (II) oksit
<i>p</i> -Cu ₂ O	: <i>p</i> -tipi bakır (I) oksit
<i>p</i> -Si	: <i>p</i> -tipi silisyum
RF	: Radyo frekansı
RIP	: Reaktif iyon kaplama
RSM	: Karşılıklı uzay haritalaması
Sb	: Antimon
SCE	: Doymuş kalomel elektrot
Se	: Selenyum
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
SILAR	: Ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu
SnO ₂	: Kalay oksit
TCO	: Şeffaf iletken oksit
TEA	: Trietanolaminin
TEM	: Transmisyon elektron mikroskobu
TFT	: İnce Film Transistör
Ti	: Titanyum
TiO ₂	: Titanyum dioksit

TL	: Tauc-Lorentz
TSS	: Trisodyum sitrat
XANES	: X-ışını absorpsiyonu yakın kenar spektroskopisi
XPS	: X-ışını fotoelektron spektroskopisi
XRD	: X-ışını difraktometresi
UV-VIS	: Ultraviyole ve görünür bölge spektrofotometresi
UV-VIS-NIR	: Ultraviyole, görünür bölge ve yakın kızılötesi bölge spektrofotometresi
ZnO	: Çinko oksit



1. GİRİŞ

Yarıiletkenler, elektronik dünyasının ana yapı taşlarını oluşturan malzemelerden biridir. Yarıiletken malzemelerin bulunuşu ve geliştirilmesi, tarihin önemli teknolojik ve endüstriyel gelişmelerini başlatmıştır. Yarıiletken malzemelerin tarihsel süreci, 1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel tarafından bir elektrolit sıvısı içerisine daldırılmış elektrotlardan birisi üzerine düşürülen ışığın etkisiyle elektrotlar arasında bir potansiyel farkın meydana geldiğinin gözlenmesi ve buna bağlı olarak “Fotovoltaik (PV)” olayının açıklanması ile başlamaktadır (Aker, 2019). Fotovoltaikler, yarıiletken malzemelerden meydana gelen ve güneş ışığından gelen enerjiyi DC akım şeklinde elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemdir (Subaşı, 2020). 1873 yılında Willoughby Smith tarafından selenyumun (Se) foto iletkenliği keşfedildi ve katı maddelerde fotovoltaik etkisi oluşturulabileceği düşüncesinden yola çıkarak ilk PV düzeneğini oluşturmuştur (Erken, 2015). 1874 yılında Karl Ferdinand Braun bakır, demir ve kurşun sülfür gibi metal ve yarıiletken kontaklar arasındaki elektriksel iletkenliğin asimetrik doğasını keşfetmiştir ve elektronik devre elemanları için n ve p -tipi yarıiletkenlerin birleştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu devre elemanları dedektör olarak ilk radyo deneylerinde kullanılmıştır (Neamen, 2012). 1883 yılında Michael Faraday tarafından gümüş sülfür (AgS) içerisinde sıcaklığın artmasına bağlı olarak elektriksel direncin azaldığı bulundu. Bu olayın ışığında daha önceleri iletken ve yalıtkan olarak sınıflandırılan malzemelere “Yarıiletken” olarak nitelendirilen yeni bir malzeme sınıfı tanımlanmış oldu. Yine 1883 yılında Charles Fritts tarafından selenyum (Se) ve altın (Au) kullanılarak, güneş ışığının enerjisini elektrik enerjisine çeviren ilk solar hücre üretilmiştir (Özarslan, 2016). 1905 yılında Albert Einstein, fotoelektrik etkiyi (olayı) açıklayarak, güneş ışığının fotonlar halinde yayıldığını ve bu fotonların maddelere çarparak elektrik üretimini sağlayabileceğini ispatlamıştır. Bu çalışma, güneş paneli (fotovoltaik) teknolojisinin gelişiminde önemli bir rol oynamıştır. Albert Einstein, yapmış olduğu bu çalışma neticesinde 1921 yılında Nobel ödülünü kazanmıştır. 1923 yılında Schottky tarafından yarıiletkenlerin teorik incelenmesinin ilk adımı kabul edilen kuru doğrultmaçlar (redresör) teorisi yayınlandı (Sun, 2022). 1920’li yıllarda Grondhal tarafından bakır (I) oksit (Cu_2O) ilk defa yarıiletken doğrultucu olarak keşfedilmiş olup, 1930’lu yıllarda ışığa duyarlı cihazlarda temel malzeme olarak kullanılmak üzere çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 1942 yılında Hans Albrecht Bethe tarafından yarıiletkenler açısından en önemli gelişmelerden birisi olarak gösterilen ve metal-yarıiletken kontakların anlaşılmasında yardımcı olacak “Termo iyonik emisyon teorisi” ortaya konuldu. Bu teoriye göre akım, sürüklenme ve difüzyondan daha çok metal içerisinde bulunan elektronların emisyonu ile gerçekleşmektedir. Yarıiletken teknolojisindeki devrim niteliğindeki en önemli gelişme ise ilk transistörün icat edilmesi ile gerçekleşmiştir. 1947 yılında Bell telefon laboratuvarlarında William Shockley, Walter Brattain ve John Bardeen yüzlerce deneme sonucunda nokta-temaslı germanyum transistörünü üretmişlerdir (Neamen, 2012). İlk transistörün üretilmesinden bu yana yarıiletken teknolojisi çok

hızlı bir şekilde gelişmiş, daha küçük boyutlarda, daha dayanıklı, uzun ömürlü, verimi yüksek ve güç sarfiyatı az olan daha düşük maliyetli transistörler üretilmeye başlanmıştır (Çolak, 2010). 1954 yılında Chapin tarafından silikon kristali üzerinde, güneş ışığının enerjisini elektrik enerjisine % 6 verimlilikle dönüştüren fotovoltaiik diyotlar ilk kez üretilmiştir (Özaslan, 2016). 1914 yılında üretilen fotovoltaiik diyotlar da ise bu durum % 1 seviyelerinde idi (Aker, 2019). 1960'lı yılların başlarında fotovoltaiik güç sistemleri uzay çalışmalarında kullanılmaya başlandı. Son yıllarda çevre kirliliği, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi konularda toplumların geliştirmiş olduğu hassasiyetin artmasına bağlı olarak dünya genelinde meydana gelen baskılar, gelişmiş ülkeleri ve bunlara bağlı büyük küresel şirketleri fosil yakıtlara bağlı olmayan alternatif temiz enerji kaynakları ve teknolojileri geliştirme konusunda çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. 1982 yılında ABD'nin Kaliforniya (Hesperia) eyaletinde 1MWe gücüne sahip "Güneş Enerji Santrali (GES)" inşa edildi. 1994 – 1999 yılları arasında ABD'li yenilenebilir enerji araştırma merkezlerinden birisi olan NREL tarafından % 30 – 32 arasında verimli "Güneş Hücreleri" üretildi. Bu gelişmeler ışığında yakın bir zamana kadar elektrik enerjisi üretmek için kullanılan eski üretim yöntemlerin yerini artık güneş, rüzgâr, dalga (gel – git) enerjisi vb... gibi daha çevreci ve temiz enerji üretmek için kullanılan yeni sistemler almaktadır.

Geçmişten günümüze kadar uzanan bu süreçte yarıiletken malzemelerdeki bu gelişmeler, özellikle de bilim ve teknolojide kullanıldığı alanlar gözönünde bulundurulduğunda, günlük hayatımızın her noktasında karşımıza çıkmaktadır. İletişim amaçlı kullandığımız cep telefonları, evlerimizde uyarı sistemleri olarak kullanılan gaz algılayıcılar, temiz enerji üretebilmek için kullanılan güneş panelleri (pilleri) vb... bunlara örnek olarak gösterilebilir.

1.1. Yarıiletken İnce Filmler

Yarıiletken ince filmler, günlük yaşantımızda kullanmış olduğumuz yarıiletken cihaz teknolojisinin temelini oluşturmakta olup, bu teknolojinin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Yarıiletken ince film, filmi meydana getiren atomların ya da moleküllerin, altlık ya da kaplanılacak malzemenin üzerine farklı üretim yöntemleri kullanılarak ince bir tabaka halinde dizilmesi ile elde edilen yarıiletken malzemelerdir. Bir başka deyişle ince filmler, kalınlıkları genel olarak 1.5 μm 'nin altında olan yarıiletken malzemeler olarak da ifade edilmektedir.

Günümüzde sensörlerden diyotlara, koruyucu kaplamalardan güneş pillerine kadar birçok sektörde kullanılmakta olan yarıiletken ince filmlerin geçmişi yüzyıllar öncesine dayanmaktadır. İlk olarak cam ve seramik gibi eşyaların yüzey kısımlarına renk katmak için dekorasyon amaçlı olarak kullanılmıştır (Karakuş ve ark., 2023). Transistörler, diyotlar, sensörler vb... gibi birçok teknolojik cihazda kullanılan yarıiletken ince filmler özellikle son yıllarda en çok ilgi gören güncel çalışma alanlarından birisi haline gelmiştir. Kullanım alanlarına göre yarıiletken ince filmleri üretmek için birçok yöntem ve teknik kullanılmaktadır. Bu üretim yöntem ve tekniklerini; buhar fazda büyütme (kimyasal ve fiziksel buhar depolama), sıvı fazda büyütme (Sol-gel, kimyasal banyo

ve elektrokimyasal depolama) ve katı fazda büyütme (mekanik aşındırma ve devitnifikasyon) yöntemleri olmak üzere üç ana başlık altında yazabiliriz (Sönmezoğlu ve ark., 2012). İnce filmlerin kalitesi, kalınlığı ve maliyeti bakımından kullanılan üretim teknikleri üzerinde ise; çözeltinin pH değeri, sıcaklığı ve reaksiyon zamanı, çözücü konsantrasyonu, kullanılan katalizörlerin yapısı ve konsantrasyonu, tavlama sıcaklığı ve süresi, kurutma ve kurutma atmosferi, filmin kaplandığı altlık gibi parametrelerin etkisi oldukça önemlidir (Pathan ve Lokhande, 2004). İnce film üretiminde kullanılan her bir tekniğin kendi içerisinde avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır (Sönmezoğlu ve ark., 2012). Bu üretim teknikleri ile elde edilen yarıiletken ince filmler yapısal, morfolojik, elektriksel ve optik özellikleri açısından bilimsel araştırmalarda, teknolojik ve endüstriyel birçok uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektriksel özellikleri açısından yarıiletken/süperiletken cihazlarda, devre elemanı yapımında vb... uygulamalarda, optik özellikleri açısından yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan kaplamalarda, optiksel disklerde vb... uygulamalarda, manyetik özellikleri açısından hafıza disklerinde, kimyasal özellikleri açısından oksidasyon veya korozyona karşı korumada, sensörlerde vb... çok sayıda uygulamada ince filmler kullanılmaktadır (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

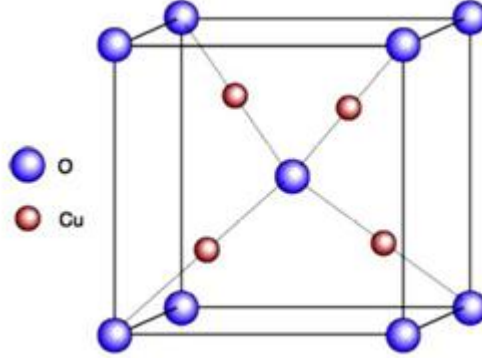
Korozyon, sıcaklık, sürtünme vb... gibi dış etkilere karşı kaplandıkları yüzeyleri ve malzemeleri koruma gibi uygulamalarda organik ve polimer yarıiletken ince filmler kullanılırken (Karakuş ve ark., 2023); elektronik cihazlar, LED'ler, güneş pilleri, sensörler vb... uygulamalarda genellikle metal oksit yarıiletken ince filmler kullanılmaktadır. Bakır (I) oksit (Cu_2O), bakır (II) oksit (CuO), çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO_2), kalay oksit (SnO_2) gibi filmler, metal oksit yarıiletken ince filmlerden bazılarıdır (Aker, 2019). Bu tez çalışması kapsamında, Cu_2O yarıiletken ince filmler incelenmiştir.

1.2. Bakır (I) Oksit (Cu_2O) ve Özellikleri

Bakır oksidin iyi bilinen iki yaygın formu vardır: Bakır (I) oksit [Cu_2O (kuprit)] ve Bakır (II) oksit [CuO (tenorit)] (Oral ve ark., 2004). Cu_2O malzemeler düşük maliyet, toksik olmama, doğada bol miktarda bulunması, % 18 teorik güneş pili verimliliği ve oksit tabakasının nispeten basit oluşumu gibi benzersiz özelliklere sahip olup (Alkoy ve ark., 2005), fotovoltaiik sistemler ve sensör uygulamaları için oldukça ilgi çekicidir (Mahalingam ve ark., 2005). Ayrıca 2,1 – 2,6 eV doğrudan bant aralığına sahip *p*-tipi bir yarıiletken malzemedir (Alkoy ve ark., 2005). Cu_2O basit kübik yapıda olup, örgü parametresi $a = b = c = 4,27 \text{ Å}$ 'dur (Oral ve ark., 2004). Aynı zamanda Cu_2O ; yoğunluğu $6,10 \text{ g.cm}^{-3}$, molekül ağırlığı $143,09 \text{ g.mol}^{-1}$, erime sıcaklığı 1235 °C ve kaynama sıcaklığı 1800 °C olan *p*-tipi bir yarıiletken malzemedir.

Cu_2O ince filmleri, sarıdan kırmızı – kahverengiye kadar değişen renkli bir filmidir (Eya ve ark., 2005). Cu_2O yarıiletken ince filmler; anodik oksidasyon, termal oksidasyon, kimyasal buhar depolama (CVD), sprey piroliz, sol-jel, elektrokimyasal depolama (ECD), kimyasal depolama yöntemi (CBD) ve SILAR metodu gibi birçok yöntemle üretilmektedir.

Şekil 1.1’de bakır ve oksijen atomlarının biraraya gelerek bağ yapması sonucu meydana gelen Cu₂O’ya ait kristal yapısı görülmektedir. Burada, oksijen atomları mavi renkli ve bakır atomları kırmızı renkli olarak gösterilmektedir (Subaşı, 2020).



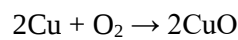
Şekil 1.1. Cu₂O’nun kristal yapısı (Subaşı, 2020)

Cu₂O ince filmler; fotovoltaik sistemler, diyotlar, transistörler, fotoelektrokimyasal hücreler (PEC), lityum-ion piller, opto-elektronik aygıtlar gibi elektronik teknolojisi ve endüstri ile ilgili birçok alanda kullanılmaktadır (Subaşı, 2020).

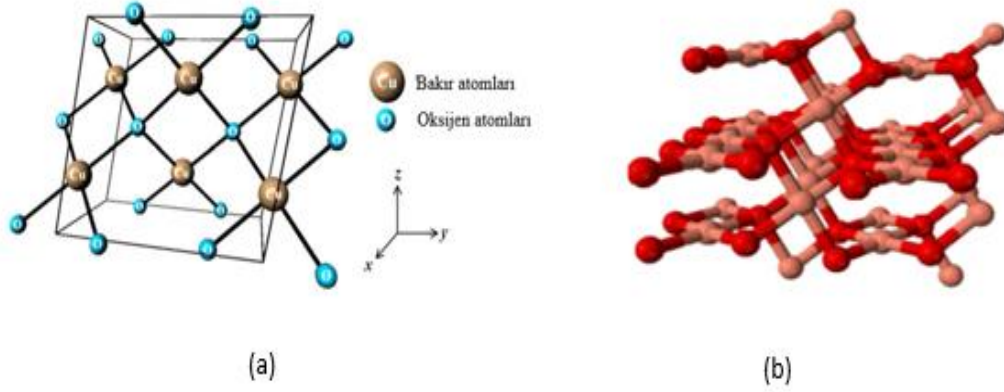
1.3. Bakır (II) Oksit (CuO) ve Özellikleri

CuO, uygun optik özelliklerinden dolayı güneş pili üretimi için kullanılan yarıiletken malzemelerden birisidir. Ayrıca, yüksek güneş soğuruculuğuna ve düşük ısı yayılımına sahip olduğundan dolayı seçici bir soğurucu olarak oldukça ilgi çekicidir ve bu özelliklerinden dolayı güneş enerjisi kolektörlerinde kullanılmaktadır (Oral ve ark., 2004). Ayrıca 1,2 – 1,9 eV doğrudan bant aralığına sahip *p*-tipi bir yarıiletken malzeme olup, elektromanyetik spektrumda yakın-kızılötesi bölgesinde bulunmasından dolayı optik anahtar uygulamaları ve fotodedektörlerde tercih edilmektedir (Aker, 2019).

CuO monoklinik yapıda olup, örgü parametreleri; $a = 4,685 \text{ Å}$, $b = 3,423 \text{ Å}$, $c = 5,132 \text{ Å}$ ve $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 99,54^\circ$ ve $\gamma = 90^\circ$ ’dir (Korzavyi ve Johansson, 2011). Aynı zamanda Cu₂O; yoğunluğu $6,31 \text{ g.cm}^{-3}$, molekül ağırlığı $79,54 \text{ g.mol}^{-1}$, erime sıcaklığı $1326 \text{ }^\circ\text{C}$ ve kaynama sıcaklığı $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ olan *p*-tipi bir yarıiletken malzemedir. CuO, Cu₂O’nun yüksek sıcaklıkta ($> 250 \text{ }^\circ\text{C}$) tavlınması sonucu veya hava ortamında bakır metalinin ısıtılması sonucu elde edilebilir (Subaşı, 2020).



Şekil 1.2’de CuO bileşiğine ait birim hücre ve kristal yapısının bir kısmı görülmektedir.



Şekil 1.2. CuO bileşiğinin (a) birim hücresi ve (b) kristal yapısının bir kısmı (Moura ve ark., 2010)

Bu tez çalışmasındaki amaç, sıralı iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) tekniği ile cam (amorf) ve ITO (polikristal) altlıklara depo edilen Cu_2O yarıiletken ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerinde ısısal tavlamanın etkisinin incelenmesidir. Cu_2O yarıiletken ince filmleri üretmek ve elde edilen filmlerin analizlerini yapmak için kullanmış olduğumuz yöntem ve tekniklerden “Materyal ve Yöntem” kısmında detaylı bir şekilde bahsedilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR:

Polikristal bakır oksit ince filmler, atmosferik basınçlı kimyasal buhar depolama (CVD) yöntemiyle 280 °C'nin üzerindeki reaksiyon sıcaklığında hazırlandı. Kaynak malzemeler bakır dipivaloilmetanat ve oksijendi. Deneyden, iki tür filmin, yani Cu₂O ve CuO'nun, oksijen kısmi basıncının kontrol edilmesiyle büyütüldüğü gösterildi. Taramalı elektron mikroskobu, X-ışını fotoelektron spektroskopisi, X-ışını kırınımı ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometresi kullanılarak film kalitesine ilişkin bir dizi karakterizasyon yapıldı ve üretilen filmlerde güneş termal dönüşümünün performansı da belirlendi (Maruyama, 1998).

Kalınlıkları 0,05 – 0,45 µm arasında değişen bakır oksit ince filmleri, her biri 20 saniye boyunca 1 M NaOH çözeltisine ve ardından bir bakır kompleksi çözeltisine art arda daldırılarak mikroskop cam altlıklar üzerine depolandı. NaOH çözeltisinin sıcaklığı 50 – 90 °C arasında değiştirilirken, bakır çözeltisinin sıcaklığı oda sıcaklığında tutuldu. X-ışını kırınım desenleri, hazırlanan filmlerin Cu₂O bileşimli kuprit yapısında olduğunu gösterdi. Filmlerin 350 °C'de havada tavlama ile bu filmler CuO'ya dönüştü. Bu dönüşüme, optik bant aralığında 2,1 eV'den (direkt) 1,75 eV'ye (direkt) bir kayma eşlik etmektedir. Filmler, 0,15 µm kalınlığındaki bir film için yaklaşık olarak $\sim 5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ ile *p*-tipi iletkenlik gösterdi. Bu filmin elektriksel iletkenliği, 1 kW.m⁻² tungsten halojen radyasyonu ile aydınlatıldığında 3 kat artmaktadır. Azot atmosferinde 400 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda tavlama işlemi filmlerin bileşimini değiştirmedir. Bununla birlikte, filmin fotoiletkenliği kadar karanlıkta iletkenliği de bir miktar arttı. 400 °C'de hava tavlama ile üretilen CuO ince filmlerin elektriksel iletkenliği $7 \times 10^{-3} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ değerine sahipti. Bunlar aynı zamanda fotoiletken ince filmlerdi (Nair ve ark., 1999).

Bakır oksit filmleri, farklı pişirme sıcaklıklarında sol-gel daldırma tekniği ile bakır klorürün (CuCl₂·2H₂O) metanolik bir çözeltisi kullanılarak hazırlandı. XRD çalışması, filmlerin 360 °C pişirme sıcaklığında hazırlandığında Cu₂O fazında, 400 – 500 °C pişirme sıcaklığında hazırlandığında ise CuO fazında olduğunu doğruladı. Optik absorpsiyon ölçümlerinden hesaplanan Cu₂O ve CuO filmler için optik doğrudan bant aralığı enerjileri sırasıyla 2,10 ve 1,90 eV olup, rapor edilen değerlerle karşılaştırılabilecek niteliktedir (Ray, 2001).

Nanokristal Cu₂O ince filmleri, aktifleştirilmiş reaktif buharlaştırma tekniği kullanılarak sentezlendi. Bu filmlerin yapısal ve optik karakterizasyonları aşağıdakiler kullanılarak gerçekleştirildi: bakış açısı X-ışını difraktometresi; Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometre; transmisyon elektron mikroskobu; UV-VIS-NIR spektrofotometresi. Bu filmlerdeki nanokristalit boyutu, değişen depolama parametreleriyle değiştirildi. Optik çalışmalar, bu filmlerin nanokristalit boyutu ve stokiyometrisi ile doğrudan izin verilen bir geçiş ve optik absorpsiyon kenarında toplu değerden bir kayma olduğunu gösterdi. Bu sonuçlar, tek fazlı nanokristal Cu₂O ince filmlerin, aktifleştirilmiş reaktif buharlaştırma tekniği kullanılarak nispeten düşük bir altlık sıcaklığında

sentezlenebileceğini gösterdi. Bu çalışmalar, nanokristalliğin bu filmlerde kübik Cu_2O fazının stabilitesine yol açtığını gösterdi (Balamurugan ve ark., 2001).

Bakır (II) oksit ince filmleri, mikroskop cam altlıklar üzerinde sol-jel benzeri bir yöntemle hazırlandı. Öncü çözeltiler bakır asetatın izopropil alkol içerisinde çözülmesiyle hazırlandı. Bakır asetatın çözünürlüğünü arttırmak ve filmler ile cam altlıklar arasındaki yapışmayı güçlendirmek için çeşitli stabilizatörler ve katkı maddeleri kullanıldı. Filmlerin 30 dakika boyunca 600 °C’de ısıtıl işlem sonrasında tenorit yapılu CuO ’ya kristalleştiği gözlemlendi. Filmlerin genel görünüşleri düzgün ve kahverengimsi siyah renkteydi. Filmlerin mikro yapıları öncül çözeltilerin kimyasından önemli ölçüde etkilendi. Filmlerin optik bant aralıkları 1,6 ila 1,75 eV arasında olduğu bulundu (Oral ve ark., 2004).

Son otuz yılda, ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) yöntemi, çeşitli bileşik malzemeleri ince film formunda depolamak için çözüm yöntemlerinden biri olarak ortaya çıktı. SILAR yöntemi ucuz, basit ve geniş alan kaplama için kullanışlı bir yöntemdir. Yalıtkanlar, yarı iletkenler, metaller ve sıcaklığa duyarlı altlıklar (polyester gibi) gibi çeşitli altlıklar, depolama oda sıcaklığında veya oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta gerçekleştirildiğinden kullanılabilir. Düşük sıcaklıkta bir işlem olduğundan, aynı zamanda altlık oksidasyonunu ve korozyonunu da önlemektedir. İyi kalitede ince film elde etmenin temel şartı, hazırlık koşullarının optimizasyonudur yani; öncüllerin konsantrasyonu, kompleksleştirici maddenin doğası, öncül çözeltilerin pH’ı ve adsorpsiyon, reaksiyon ve durulama süresi süreleri vb. Bu inceleme makalesinde, metal kalkojenit ince filmlerin ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) yöntemini ayrıntılı olarak anlatıldı. SILAR yönteminin çok yönlülüğünü göstermek için geçmiş yıllarda hazırlanan ince film malzemelerinin kapsamlı bir araştırması yapıldı. Hazırlayıcı parametreleri ve yapısal, optik, elektriksel özellikleri vb. açıklandı. SILAR yöntemi için gerekli teorik altyapı da tartışıldı (Pathan ve Lokhande, 2004).

Bakır oksit (Cu_2O) ince filmleri, potansiyostatik elektrodepolama yoluyla Cu ve kalay oksit kaplı cam (ITO) altlıklar üzerine depolandı. Optimum depolama parametreleri aralığı, deneysel olarak araştırıldı. X-ışını kırınım çalışmaları, SCE’ye göre - 0,355 ila - 0,555 V depolama potansiyeli aralığında tek fazlı kübik Cu_2O filmlerinin oluşumunu ortaya çıkardı. Çalışmalar, optimum pH 9,0’ın, gelişmiş kristalliğe sahip tek fazlı kübik filmler sağladığını ortaya çıkardı. (200) kübik Cu_2O pikin tercihli yöneliminin, 30 – 70 °C aralığındaki banyo sıcaklığıyla arttığı bulundu. Tercihli yönelim üzerinde tavlamanın etkileri, tane boyutu ve optik bant aralığı incelenmiştir. Fotoelektrokimyasal (PEC) güneş pillerinde fotokatot olarak depolandı ve tavllanmış $p\text{-Cu}_2\text{O}$ filmlerin enerji dönüşüm verimleri incelendi ve sonuçları tartışıldı (Mahalingam ve ark., 2005).

Bakır oksit (Cu_2O) ince filmleri, basit ve yüksek oranda tekrarlanabilir bir kimyasal banyo depolama tekniği ile hazırlandı ve 523 K’ya kadar çeşitli tavlama sıcaklıkları altında termal olarak işleme tabi tutuldu. Filmler, elektromanyetik spektrumun görünür/yakın kızılötesi bölgelerinde çok

yüksek geçirgenlik (% 80 – 95) gösterdi, bu da oksit filmi özellikle ılıman bölgelerdeki ısınma uygulamaları için çok iyi bir malzeme haline getirmektedir. Absorbans ve yansıma genellikle düşüktü ($< \% 10$), daha uzun dalga boylarıyla birlikte azaldığı görüldü. Oksit filmlerin bant aralığı 2,65 – 2,70 eV arasındadır; tavlama sıcaklıkları ve banyo konsantrasyonuyla sınırlı değişim göstermektedir. Sıcaklık aralığında kırılma indisinin maksimum değeri 2,63' tür (Eya ve ark., 2005).

Bakır oksit filmleri, pH = 10'da alkalın çözelti içinde bakır laktatın indirgenmesi yoluyla üç farklı altlık üzerine başarılı bir şekilde elektrodopolandı. Altlıklar arasında indiyum kalay oksit film kaplı cam (ITO), (001) yönelimli *n*-Si levha ve Si altlık üzerine buharlaştırılan Au film bulunmaktadır. Elektrodopolanmış filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerindeki altlık etkileri; yerinde voltametri, akıma karşı zaman geçici ölçümü, ex situ X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu, UV-vis geçirgenliği ve yansıması ve fotoluminesans teknikleri ile araştırıldı. Sonuçlar, altlık seçiminin filmin morfolojisini, yapısını ve optik özelliklerini güçlü bir şekilde etkileyebileceğini gösterdi (Liu ve ark., 2005).

Cam altlıklar üzerine kimyasal depolama yoluyla hazırlanan bakır oksit filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerine tavlama etkisi araştırıldı. Filmler 200 ila 350 °C arasında değişen farklı sıcaklıklarda havada tavlandı. X-ışını kırınım desenleri, depolanan ve 200 ve 250 °C'de tavlanan filmlerin Cu₂O bileşimli kuprit yapısında olduğunu gösterdi. 300 °C'de tavlama bu filmleri CuO'ya dönüştürdü. Bu dönüşüme optik bant aralığında 2,20 eV'den 1,35 eV'ye bir kayma eşlik ettiği görüldü. Ayrıca bu dönüşüm DC elektriksel iletkenlik ve FTIR spektroskopisi ölçümleri ile elde edildi (Serin ve ark., 2005).

Şeffaf iletken oksit (TCO) filmlerinin Cu₂O altlıkları üzerine depolanmasıyla yapılan heterojonksiyonlu güneş pillerinin üretimini rapor edildi. TCO filmleri, bakırın yüksek sıcaklıkta oksitlenmesiyle hazırlanan kaliteli Cu₂O levhalar üzerine iyon ışını püskürtme yoluyla büyütüldü. En iyi güneş pili, simüle edilmiş AM1.5G aydınlatma altında 0,595 V açık devre voltajına, 6,78 mA/cm² kısa devre akım yoğunluğuna, % 50 doldurma faktörüne ve % 2 dönüşüm verimliliğine ulaşmıştır ki, bu tür heteroeklemler için bildirilen en yüksek verimlilik değeridir. Bu cihazlar çok düşük maliyetli güneş pillerinin geliştirilmesi için iyi bir başlangıç noktasını temsil etmektedir (Mittiga ve ark., 2006).

Bakır oksit Cu – O ince filmi, reaktif iyon kaplama (RIP) yöntemiyle depolandı ve Cu – O ince filmlerin termoelektrik özellikleri değişen oksijen içeriğiyle araştırıldı. Bakır, elektron tabancasıyla buharlaştırıldı ve Cu – O ince filmi oksijen plazmasındaki reaksiyonla depolandı. Oksijen gazı akış hızının ayarlanması, depolanan ince filmin oksijen içeriğini kontrol edebilir. Cu₂O'nun Seebeck katsayısı ve direnci oda sıcaklığında sırasıyla 0,7 mV/K ve 83,5 $\Omega \cdot \text{cm}$ idi. Termoelektrik malzeme için direnç hala yüksek olduğundan, katkı malzemesi olarak bakır, oksijen gazı ve nitrojen gazı kullanarak Cu₂O ince film üretilmeye çalışıldı. Sonuç olarak Seebeck katsayısı

ve direnci, hidrojen işlemi olmadan bildirilen en düşük direnç olan 0,3 mV/K ve 2 $\Omega\cdot\text{cm}$ 'ye ulaşabildi (Uchiyama ve ark., 2006).

Bakır oksit filmleri, silikon altlıklar üzerinde vakumla buharlaştırılmış bakır katmanlarının oksidasyonu yoluyla büyütüldü. Oksidasyonlar atmosferik basınçta, %10 oksijen içeren nitrojen-oksijen karışımında ve 185 ila 450 °C arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirildi. X-ışını kırınımı (XRD) desenleri, oksidasyon sıcaklığına bağlı olarak filmlerin 225 °C' de Cu_2O 'dan veya 350 °C'nin üzerinde CuO 'dan oluştuğunu gösterdi. 185 °C'de elde edilen filmler, altlık ve Cu_2O ile arayüzeyin yakınında oluşturulan bakır silisitten oluştu. 280 °C'de filmler bakır silisit, Cu_2O ve CuO 'dan oluşmuştur. Fourier dönüşümü kızılötesi geçirgenlik spektrumları, XRD' den elde edilen sonuçları doğruladı. Filmlerin optik özellikleri, 1 ila 3,5 eV enerji aralığında spektroskopik elipsometri ölçümleriyle incelendi. Bu ölçümler, düzensiz filmlerin karmaşık kırılma indisinin dağılımını simüle etmek için Tauc – Lorentz (TL) modeli kullanılarak analiz edildi. TL modelinin bu bakır oksit filmlerin kırılma indisi dağılımını tatmin edici bir şekilde tanımladığı gösterildi. TL modeliyle tanımlandığı gibi bant aralığı Cu_2O için 2,3 eV'ye eşit ve CuO için 1,05 ile 1,2 eV arasında bulundu. Cu_2O filmlerinin boşluğunun yerel durumlardan arınmış olduğu gösterildi, ancak CuO boşluğu için durumun böyle olmadığı ifade edildi (Papadimitropoulos ve ark., 2006).

Bakır oksit (Cu_2O), oksijen plazma destekli moleküler ışın epitaksisi ile SrTiO_3 (STO)(100) üzerinde büyütüldü. Büyütülmüş katmanın mikro yapısı ve Cu değerlik durumu, elektron kırınımının yanı sıra X-ışını kırınımı (XRD), X-ışını foto-elektron spektroskopisi (XPS), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve kesitsel transmisyon elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak analiz edildi. Büyütülen katmana, altlığa göre $\text{Cu}_2\text{O}(001)\|\text{STO}(001)$ ve $\text{Cu}_2\text{O}(100)\|\text{STO}(100)$ 'nin epitaksiyel yönelimine sahip olan Cu_2O fazı hâkim oldu. Cu_2O filminin morfolojisi büyüme hızına bağımlılık göstermektedir. Tipik olarak hızlı büyüme, nispeten pürüzsüz bir yüzeye sahip ince bir filmin oluşmasına yol açtı. Yavaş büyüme, Cu_2O piramitlerinin oluşumunu içeren nanopartiküllerin gelişmesine yol açtı. Piramitler her zaman Cu_2O düzlemleriyle tanımlanmaktadır. {111} düzlemlerinin Cu_2O 'nun en düşük yüzey enerjisine karşılık geldiği gerçeği göz önüne alındığında , yavaş büyüme, sistemin genel enerjisinin en aza indirildiği piramit konfigürasyonunu benimsemesine izin vermek için sisteme yeterli zaman vermektedir (Yu ve ark., 2007).

Herhangi bir katkı maddesi kullanılmadan, bir altlık üzerine altıgen olarak dizilmiş, boyutu 20 nm'den küçük bakır oksit (Cu_2O) nanopartikülleri, nanoyapılı bir altlık üzerinde tohumların tercihli çekirdeklenmesine dayanan elektrokimyasal yöntemlerle hazırlandı. Nano boyutlu Cu_2O parçacıkları, Cu_2O 'nun tek biçimli mikro parçacıkları haline gelecek şekilde gelişti. Nanoyapılı altlığın, Cu_2O parçacıklarının çekirdeklenmesi için aşırı potansiyelin azaltılmasına yol açtığını ve cilalı bir altlıkla karşılaştırıldığında parçacıkların boyut dağılımını daralttığı bulundu (Choi ve ark., 2007).

Yüksek kaliteli Cu_2O ince filmleri, atmosferik basınç altında halojenür kimyasal buhar biriktirme yoluyla (AP-HCVD) MgO (110) altlık üzerinde epitaksiyel olarak büyütüldü. (220)

düzleminin yarı maksimum X-ışını kırınımı ω salınım ölçümündeki tam genişliği $0,1429^\circ$ ve $(1\bar{1}0)$ düzlemindeki $0,303^\circ$ idi. Bu sonuç, Cu_2O filmlerinin yüksek derecede düzlem dışı ve düzlem içi kristallığe sahip olduğunu gösterdi. Cu_2O filmlerinin kutup şekli ve karşılıklı uzay haritalaması (RSM), Cu_2O filminin gerilme olmadan büyüdüğünü gösterdi. Absorbsiyon spektrumlarından hesaplanan Cu_2O filminin optik bant aralığı enerjisi $2,38 \text{ eV}$ gösterdi. Bu sonuçlar AP-HCVD'nin yüksek kaliteli Cu_2O filmi için umut verici bir büyüme yöntemi olduğunu gösterdi (Kobayashi ve ark., 2007).

Cu_2O bazlı seyreltilmiş manyetik yarıiletkenlerin ferromanyetik davranışını anlamak amacıyla, Mn katkılı Cu_2O sinterlenmiş numunelerin elektronik yapıları hem deneysel hem de teorik yaklaşımlar kullanılarak incelenmiştir. Mn $L_{2,3}$ X-ışını emisyon ölçümleri ve birinci prensip hesaplamaları, 650 ve 800°C 'de sinterlenen Mn katkılı Cu_2O 'nun ikame Mn atomlarının yanı sıra Mn arayerleri de içerdiğini, ancak kusur konfigürasyonunun sinterleme sıcaklığına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Sinterleme sıcaklığı ile T_C 'nin azalması, oksijen yoluyla ikame Mn atomları arasında bir antiferromanyetik süper değişim etkileşiminin ortaya çıkmasıyla açıklanabilir (Chang ve ark., 2008).

Bakır oksit ince filmler, bakır oksit (Cu_2O) tozunun termal buharlaştırılmasıyla depolandı. Altlıklar ya ısıtılmadı ya da 300°C 'lik bir sıcaklıkta ısıtıldı. Filmler ayrıca 500°C sıcaklıkta 3 saat süreyle havada tavlandı. Filmler, X-ışını fotoelektron spektroskopisi, X-ışını kırınımı ve UV-görünür spektrofotometri ile karakterize edildi. Altlık sıcaklığının ve depolama sonrası tavlamanın filmlerin kimyasal, yapısal ve optik özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. Isıtılmamış altlıklar üzerine depolanan filmler, daha yüksek bir Cu_2O fazı konsantrasyonuna sahip karışık bakır oksit (CuO) ve Cu_2O fazlarından oluşmaktadır. Bununla birlikte, ısıtılmış altlıklar üzerine depolanan filmler ve tavllanmış filmler ağırlıklı olarak CuO fazındadır (Al-Kuhaili, 2008).

Bakır oksit filmleri, oda sıcaklığında havada sol-jel döndürmeli kaplama yöntemi ve ardından $\% 5 \text{ H}_2 + \% 95 \text{ N}_2$ atmosferinde tavlama yoluyla (100) yönelimli bir $n\text{-Si}$ altlık üzerinde başarılı bir şekilde büyütüldü. Tavlama sıcaklıkları $350 - 550^\circ\text{C}$ arasında değişmektedir. Oksit ince filmlerin kristallığı ve morfolojisi sırasıyla bakış açılı X-ışını difraktometresi (GAXRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. GAXRD, filmlerin kristallığının yüksek tavlama sıcaklığıyla arttığını gösterdi. SEM görüntüleri, Cu_2O filmlerinin pürüzsüz film yerine düzensiz tane boyutu oluşturduğunu ortaya çıkardı; bu da film büyümesinin Volmer-Weber büyüme modunu takip ettiğini gösterdi. Bakır oksit tanelerinin boyutu ve şekli de sıcaklıkla değişti. Tavlama sıcaklığı 350°C 'de ortalama boyutu 100 nm olan düzensiz şekil görülmekte olup, tavlama sıcaklığı 550°C 'de ortalama boyutu 200 nm olan dikdörtgen benzeri şekle dönüştü. Optik yansımada, 480 nm 'nin altındaki dalga boylarında her film için benzer bir model ortaya çıkardı. Absorbsiyonun Cu_2O 'nun enerji açığından kaynaklandığına inanılmaktadır. Her film için maksimum yansımada, farklı kaplama ve tane boyutları nedeniyle de değişiklik gösterdi (Halin ve ark., 2008).

Bakır oksit İnce filmleri, cam altlıklar üzerinde buharlaştırılmış metalik bakır (Cu) filmlerin termal oksidasyonu (100 – 450 °C) yoluyla elde edildi. X-ışını kırınımı (XRD) çalışmaları, depolanan filmlerin kübik Cu fazını doğruladı. 100 °C’de tavlanan filmler karışık Cu-Cu₂O fazı gösterirken, 200 ile 300 °C arasında tavlanan filmler tek kübik Cu₂O fazı gösterdi. 350 ile 450 °C arasında tavlanan filmlerden tek bir monoklinik CuO fazı elde edildi. Hall katsayısının pozitif işareti Cu₂O fazlı filmlerde *p*-tipi iletkenliği doğruladı. Bununla birlikte, bu filmlerin nispeten zayıf kristallliği *p*-tipi özelliklerini sınırlamıştır. Cu ve CuO fazına sahip filmler *n*-tipi iletkenlik göstermektedir. Depolanan malzemenin yüzeyi pürüzsüzdür (RMS pürüzlülüğü 1,47 nm) ve düzgün şekilde dağılmış tanelerden oluşmaktadır (AFM ve SEM analizi). Son tavlamanın tanelerin dağılımı ve boyutları üzerinde etkili olduğu bulunmuştur. Depolanan filmlerin zayıf geçirgenliği (< % 1), 200 °C’de tavlama sırasında maksimum ~ % 80’e (800 nm) çıkarıldı. Doğrudan izin verilen bant aralığı 2,03 ile 3,02 eV arasında değişmektedir (Figueiredo ve ark., 2008).

Cu₂O ince filmleri, Cu₂O/*p*-Si heteroeklemleri oluşturmak için tek kristalli *p*-Si altlıklar üzerine kimyasal olarak depolandı. Cu₂O filmlerinin yapısı, x-ışını kırınım spektroskopisi ve UV-Vis-NIR geçirgenlik spektrumları ile analiz edildi. Cu₂O/*p*-Si heteroeklemlerindeki karanlık akım taşıma mekanizmasını araştırmak için akım-voltaj özellikleri 120 – 320 K sıcaklık aralığında ve kapasitans-voltaj özellikleri oda sıcaklığında ~1 MHz yüksek frekansında ölçüldü. *I* – *V* – *T* özellikleri, ileri akımın tuzak destekli çok adımlı tünelleme tarafından belirlendiğini ortaya koydu. Doyma akımından belirlenen aktivasyon enerjisi ve kapasitans-voltaj özelliklerinden belirlenen bağlantı yerleşik potansiyeli, oda sıcaklığında sırasıyla yaklaşık 0,18 eV ve 1,10 V idi (Serin ve ark., 2009).

Cu₂O – Cu_xS ince filmleri, kimyasal depolama yöntemi (CBD) tekniği ile cam altlık üzerine depolandı. Filmler bakır sülfürün (Cu_xS) bakır (I) oksit (Cu₂O) üzerine ve ardından Cu₂O’nun Cu_xS üzerine depolanmasıyla elde edildi. İnce filmler boyunca en yüksek güneş geçirgenliğinin % 40’ın altında ve % 10 kadar düşük olduğu ve enerjiyle birlikte kızıl ötesi bölgeye düştüğü bulundu. UV ve IR bölgelerinin yakınında absorbands daha yüksek olduğu tespit edildi. Yansımaya < %20’dir. Her iki kombinasyonun bant aralığı 2,19 – 2,32 eV aralığında ve film kalınlığı 0,54 µm – 1,30 µm’dir. Sönüm katsayısı ve kırılma indisi sırasıyla 5,41×10⁻² – 20,11×10⁻² ve 1,60 – 2,60 aralığındadır. IR bölgesine doğru gidildikçe absorbands arttığından, filmler tropik bölgelerde güneş kontrolünde (serin iç mekân sağlama) faydalı olabileceği öne sürüldü (Eya, 2009).

Dikey olarak hizalanmış geniş alanlı *p*-Cu₂O/*n*-AZO (Al-katkılı ZnO) radyal heteroeklem nanotel dizileri, termal kimyasal buhar depolama ve ardından e-ışını buharlaştırmada katalizörler kullanılmadan silikon üzerinde sentezlendi. Taramalı elektron mikroskobu ve yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu sonuçları, önceden büyütülmüş Al:ZnO tek kristalli nanotellerin tüm çevresinde uyumlu bir şekilde 10 nm civarında kalınlığa sahip polikristalin Cu₂O nano kabuklarının oluştuğunu göstermektedir. Çapları 50 nm civarında olan Al:ZnO nanotellerindeki Al

katkı konsantrasyonunun, elektron enerji kaybı spektroskopisi ile % 1,19 civarında olduğu belirlendi. Oda sıcaklığındaki fotoluminesans spektrumları, saf ZnO nanotellerinin geniş yeşil bantlarının Cu₂O nano kabukları ile kapatılarak ortadan kaldırıldığını göstermektedir. Akım-voltaj (I – V) ölçümleri, *p*-Cu₂O/*n*-AZO nanodiyotlarının iyi tanımlanmış akım düzeltme davranışına sahip olduğunu göstermektedir. Bu makale, nano piksel optoelektronik cihazlar ve güneş pilleri geliştirmek için üstün *p-n* radyal nanotel dizileri üretmek için basit bir yöntem sunmaktadır (Kuo ve ark., 2009).

Cu₂O ince filmleri kuvars altlık üzerinde reaktif doğru akım magnetron püskürtme yöntemiyle hazırlandı. Oksijen kısmi basıncının ve gaz akış hızının depolanan filmlerin yapıları ve özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. Oksijen kısmi basıncının değişmesi, farklı mikroyapılara sahip Cu₂O, Cu₄O₃ ve CuO sentezine yol açmaktadır. $6,6 \times 10^{-2}$ Pa sabit oksijen kısmi basıncında, gaz akış hızı 80 cm³/dk'nın altında olduğunda tekli Cu₂O filmleri elde edilebileceği düşünülmektedir. Depolanan Cu₂O ince filmleri görünür bölgede çok yüksek bir absorpsiyona sahip olduğu ve bununda görünür ışıkla indüklenen fotokatalitik aktiviteye neden olduğu görülmektedir (Zhu ve ark., 2009).

İnce bakır oksit (Cu₂O) katmanlarını cam yüzeyler üzerine depolamak için doğru akım reaktif magnetron püskürtme kullanıldı. Hedef olarak katı bir saf bakır disk, 0,133 ila 4 Pa arasında değişen püskürtme basınçları altında bir argon gazı içinde püskürtüldü. Püskürtme gücünün ve basıncının, Cu₂O ince filmlerinin yapısal ve optik özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelendi. Depolanan katmanlar, X-ışını kırınımı, atomik kuvvet mikroskobu, profilometri ve spektrofotometri kullanılarak karakterize edildi. Filmlerin optik geçirgenliği görünür bölgede ölçüldü. Basıncıdaki artış, artan püskürtme gücünden daha yüksek bir büyüme oranıyla sonuçlandı. Güçteki artış, filmlerin optik iletimine zarar veren Cu₂O ince filmleri oluşturdu (Rastkar ve ark., 2009).

Amorf bakır oksit filmleri SILAR tekniği kullanılarak depolandı. Hem Cu₂O hem de CuO kristalografik fazlar, depo edilmiş ve tavlama işlemine tabi tutulan filmlerde mevcutt olduğu görüldü. 823 K'ye kadar sıcaklıklarda tavlama yoluyla kristalleşme ve büyüme süreçleri, nano ve mikro küresel şekilli taneler oluşturdu. XRD ölçümünden hesaplanan kristal boyutunun 14 – 21 nm aralığında olduğu bulunurken, SEM mikrograflarında 50 – 100 nm çapında nano küreler gözlemlendi. Amorf film için bant aralığının 2,3 eV olduğu bulundu ve filmin 373 K'de tavllanmasıyla yavaş yavaş 2,4 eV'ye yükseldi. Bu, amorf filmlerdeki kusurların yeniden dağıtımıyla açıklandı. 373 – 673 K sıcaklık aralığında tavlama, bant aralığını kademeli olarak 1,85 eV'ye düşürdü. 373 – 673 K aralığındaki tavlama sıcaklığı ile bant aralığının azalması, nanoyapılı yarıiletken malzemelerdeki enerji aralığını sınırlandırma etkisine ilişkin Brus modeliyle iyi bir uyum içinde olduğu görüldü. 673 – 823 K sıcaklık aralığında tavlama, hapsedme etkisinin daha küçük katkısı nedeniyle bant aralığını yavaş yavaş 1,7 eV'ye düşürdü. 573 K'nin altında Cu₂O, filmdeki en muhtemel kristal fazdır; Cu₂O ve CuO kristal fazları ise Cu₂O'nun daha fazla

oksidasyonuna bağılı olarak 573 K'nin üzerindeki tavlama sıcaklıklarında bir arada bulunabilir. Amorf bakır oksit filmin tavlama koşulları kontrol edilerek görünür bölgede daha geniş bir geçirgenlik spektral penceresi elde edildi ve bunun güneş pilinin pencere katmanına uygulanabilirliği önerildi (Rafea ve ark., 2009).

100 ile keV Ne ve N iyonları ışınlamanın bakır oksidin (Cu_2O) optik özellikleri ve atom yapısı üzerindeki etkilerini araştırıldı. Cu_2O filmleri, RF magnetron saçıcı depolama yöntemi kullanılarak 700 °C'de MgO altlıkları üzerinde hazırlandı. X-ışını kırınımı, filmlerin (111) yönelimli polikristal olduğunu ve iyon ışınlaması nedeniyle düzensizliğin gözlemlendiğini gösterdi. Bileşimin, Rutherford geri saçılım spektroskopisi aracılığıyla iyon ışınlamasından önce ve sonra neredeyse stokiometrik olduğu bulundu. Optik absorpsiyon, spektrumda absorpsiyon kenarına yakın (yani 200 ila 500 nm dalga boyunda) küçük ama görünür salınımlar gösterdi ve bu iyon ışınlaması salınımını azalttı. İyon ışınlaması altında, bant aralığı ve yüzey morfolojisindeki değişiklikler açıklandı (Matsunami ve ark., 2009).

Kimyasal banyo depolama tekniği ile çubuktan koniye küreden periyodik boyut aktarımı ile Cu_2O filmlerinin sentezi için basit bir yaklaşım keşfedildi. Bu iki aşamalı işlem, önce altlıkların bir bakır tiyosülfat çözeltisine daldırılmasını, ardından NaOH'a daldırılmasını içermektedir. Cu_2O filmlerinin boyutu ve morfolojisi, NaOH çözeltisinin konsantrasyonunun ayarlanması ve daldırma döngülerinin (depolama süreleri) ayarlanmasıyla kontrol edilebilmektedir. NaOH çözeltisi konsantrasyonunun 1,2 M'den az ve daldırma döngülerinin 10'dan fazla olduğu durumlarda daldırma döngülerinin artmasıyla üç boyutlu küre, tek boyutlu çubuk ve üç boyutlu koni Cu_2O filmleri periyodik olarak oluşturuldu. Cu_2O filmlerinin bu tür periyodik desen transferine ilişkin büyüme mekanizması araştırıldı ve önerildi. Cu_2O filmlerinin fotovoltaiik özellikleri, çubuk benzeri ve koni benzeri Cu_2O filmlerinin görünür ışık ışınlaması altında küre benzeri Cu_2O filminden daha iyi fotoelektrik özelliğe sahip olduğunu gösterdi. Bu kolay yöntem, özel yapılara ve iyi özelliklere sahip diğer metal oksit filmlerinin sentezi için kullanılabileceği önerildi (Xiong ve ark., 2010).

n-tipi bakır oksit (Cu_2O) ince filmleri, bir asetat banyosunda bir Ti altlık üzerine potansiyostatik olarak elektrodepolandı. *p*-tipi bakır oksit (CuO) ince filmlerin büyütülmesi için Cu_2O ince filmleri 500 °C'de 30 dakika havada tavlandı. *p*- CuO/n - Cu_2O heteroeklemini oluşturmak için *n*- Cu_2O ince filmleri, Ti/ CuO elektrotları üzerindeki bir asetat banyosunda potansiyostatik olarak elektrodepolandı. $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$ heterojonksiyonunun yapısal, morfolojik ve optoelektronik özellikleri, X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikrografları (SEM'ler) ve karanlık ve açık akım-voltaj özellikleri kullanılarak incelendi. XRD ve SEM, Ti/ CuO elektrotu üzerindeki iyi kaplanmış tek fazlı çok kristalli Cu_2O ince filmin, bir asetat banyosunda doymuş kalomel elektrota (SCE) karşı – 550 mV depolama potansiyelinde mümkün olabileceğini gösterdi. Fotovoltaiik özellikler ayrıca $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$ heterobağlantısının oluşumunu da ortaya koydu (Wijesundera, 2010).

Cu₂O filmleri paslanmaz çelik altlıklar üzerine elektrodepolandı ve ardından fotoelektrokimyasal hidrojen üretimi için Ar tavlama yapıldı. İstenilen film kalitesini elde etmek için kaplama banyosu için zaman ve pH dâhil kaplama değişkenleri araştırıldı. X-ışını kırınımı (XRD) modelleri, biriktirilen Cu₂O filmlerinin, sırasıyla pH 9 ve pH 11 kaplama banyosundan (200) ve (111) düzlemlerde tercih edilen yönelimler sergilediğini gösterdi. Taramalı elektron mikroskopundan (SEM) alınan görüntüler, pH 9 kaplama banyosunda Cu₂O filmleri için 1 µm boyutunda piramit benzeri taneler ve pH 11 kaplama banyosundan 3 – 8 µm boyutunda büyük plaka benzeri taneler ortaya çıkardı. Daha uzun kaplama süresinde Cu₂O filmlerinden SEM ve XRD'den aynı sonuçlar elde edildi. 350 °C'de 30 ve 60 dakika tavlamanın ardından Cu₂O fazı iyi bir şekilde muhafaza edildi ancak SEM görüntüleri daha kaba taneler gösterdi. H₂ üretimi için fotoelektrokimyasal aktivite, tavlama öncesi ve sonra Cu₂O filmleri üzerinde, 0,5 M sulu Na₂SO₄ çözeltisinde – 0,3 V'de ilgili fotoelektrokimyasal akımların kaydedilmesiyle elde edildi. Her iki banyodan alınan Cu₂O filmleri için, depolanan numunelerin aksine, tavlama sonrası numunelerde fotoelektrokimyasal akımda önemli artışlar gözlemlendi. En büyük fotoelektrokimyasal akım, 60 dakikalık tavlama ile pH 9 kaplama banyosunun Cu₂O filminden 0,143 mA/cm²'de elde edildi; bu, depolanmış numuneye göre % 560'lık bir artış sergiledi. Geliştirilmiş fotoelektrokimyasal akımı, tavlama sonrası Cu₂O filmleri için geliştirilmiş kristallite ve azaltılmış kusurlara bağlandı (Liang ve ark., 2010).

Nanokristal bakır oksit (Cu₂O) ince filmleri, amorf cam altlık üzerinde basit oda sıcaklığında kimyasal yöntem yani kimyasal banyo biriktirme (CBD) yöntemi kullanılarak sentezlendi. Depolama kinetiği, düzgün kalınlıkta, kaliteli nanokristal filmler elde etmede önemli bir rol oynadı. Filmlerin yapısal, yüzey morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri araştırıldı. Kristalizasyon ve büyüme süreçleri, daha küçük nanopartiküllerin toplanmasından dolayı mikro küresel şekilli Cu₂O taneler oluştu. Filmin optik bant aralığını ve elektriksel iletkenlik tipini incelemek için optik ve elektriksel karakterizasyon yapıldı (Ahirrao ve ark., 2011).

Farklı nanoyapılara sahip bakır oksit (Cu₂O) filmleri, setiltrimetilamonyum bromür (CTAB) varlığında kimyasal banyo depolama (CBD) tekniği kullanılarak sırasıyla flor katkılı SnO₂ (FTO) cam, Cu ve Ti folyodan oluşan farklı altlıklar üzerine depolandı. Numuneler X-ışını kırınım ölçer, taramalı elektron mikroskobu ve UV-vis dağınık yansıma spektroskopisi ile karakterize edildi. Sonuçlar, reaksiyon sisteminde CTAB bulunduğunda hazırlanan Cu₂O filmlerinin nanoçubuk dizilerinden oluştuğunu gösterdi. CTAB olmadan nanosferli Cu₂O filmlerin oluştuğu görüldü. CTAB konsantrasyonu, farklı uzunluk/çap oranına sahip nanoçubuk yapıları Cu₂O filmlerinin kontrol edilebilir sentezi için çok önemlidir ve nanoçubuk dizi yoğunluğu hem altlıklara hem de CTAB'ye bağlıdır. Cu₂O nanoçubuklarının oluşumuna yönelik olası bir mekanizma tartışılmaktadır. Ek olarak Cu₂O nanoçubukların UV-vis absorpsiyon özelliği nanokürelerinkinden çok daha iyi olduğu tespit edildi. Cu₂O nanoçubuk filmleri için görünür ışık altında üretilen fotovoltaj, nanokürelerinkinden daha yüksek olduğu görüldü. Her ne kadar Ti folyo üzerindeki

Cu₂O nanoçubuklar görünür ışığın çoğunu soğursa bile, Cu folyo üzerindeki diğer altlıklardakilerden daha iyi ve daha kararlı fotoelektrokimyasal özellik gösterdiği tespit edildi. Bu çalışma nanoyapılı Cu₂O bazlı cihazlar için son derece faydalı olabileceği düşünülmektedir (Aref ve ark., 2011).

Cu₂O kristallerinin galvanik depolaması üzerindeki eklenen destekleyici elektrolitin etkileri, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını (EDX), X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak araştırıldı. Sonuçlar, destekleyici elektrolitlerin kimyasal yapısının Cu₂O kristallerinin galvanik depolanmasında çok önemli rol oynadığını gösterdi. Klorür, Cu₂O kristallerinin (100) düzlemlerini stabilize ederek kübik kristallerin oluşumuna yol açarken, nitrat, sülfat ve florür, Cu₂O kristallerinin (111) düzlemlerini stabilize ederek kesik oktahedral ve oktahedral Cu₂O kristallerinin depolanmasına neden oldu. İnorganik adsorpsiyon maddelerini dolaylı olarak ayarlayarak galvanik olarak elde edilen Cu₂O kristallerinin morfolojisini kontrol etmenin kolay bir yolunu sağlamaktadır (Wang ve ark., 2011).

Bakır oksit Cu₂O, fotovoltaik uygulamalar için umut verici, toprakta bol miktarda bulunan bir yarıiletkenidir. Reaktif DC magnetron püskürtme yoluyla depolanan çok kristalli Cu₂O ince filmlerin Hall hareketliliklerini rapor edildi. Yüksek alt tabaka büyüme sıcaklığı, film tanecik yapısını ve Hall hareketliliğini artırmaktadır. Bu filmlerde ölçülen sıcaklığa bağlı Hall hareketlilikleri, oda sıcaklığında 62 cm²/V·s'ye ulaşan, 250 K'nin üzerindeki sıcaklıklarda, monokristal Cu₂O ile karşılaştırılabilir. Daha düşük sıcaklıklarda Hall hareketliliği, iyonize merkezlerden gelen taşıyıcı saçılmasıyla sınırlı görüldü. Bu gözlemler, yüksek altlık büyüme sıcaklığındaki püskürtmeli Cu₂O filmlerinin ince film fotovoltaik uygulamalar için uygun olabileceğini gösterdi (Lee ve ark., 2011).

0,75 – 230 nm kalınlık aralığındaki ince Cu₂O filmleri, Cu hedeflerinin radyo frekansı magnetron püskürtmesi ve ardından hava altında bir fırında oksidasyonu yoluyla yüksek kaliteli cam, kuvars ve Si (100) altlıklar üzerinde hazırlandı. Ultraviyole-görünür ışık absorpsiyon spektroskopisi deneyleri, üst değerlik ile ilk uyarılmış iletim alt bantları arasındaki enerjinin maviye doğru kaydığını ortaya koydu. Film kalınlığı azaldıkça kayma düzgün bir şekilde artmaktadır. En ince film için gözlemlenen maksimum değer çok büyük olup, 1,2 eV değerine ulaşmaktadır. Cu₂O'nun Bohr yarıçapının çok küçük olması nedeniyle geçmişte böyle bir değişimin gözlemlenmesi kolay değildi. Yoğun kuantum sınırlama etkilerinin varlığını gösteren deneysel sonuçlar, Hartree-Fock yaklaşımındaki potansiyel dönüşüm yöntemine dayalı teorik hesaplamalarla iyi bir şekilde açıklandı (Poulopoulos ve ark., 2011).

Önceki çalışmalarda, sulu bakır laktat çözeltisinden titanyum altlıklar üzerine saf Cu₂O filmleri hazırlamak için elektrokimyasal depolama yöntemi kullanıldı. Son zamanlarda Li ile tersinir şekilde reaksiyona girdikleri gösterildi. Bu filmlerin faz bileşimi, mikro yapısı ve özellikle yüzey morfolojisi, kristal veya tane boyutu ve kalınlığı, elektrodepolama parametreleri değiştirilerek elde edilebilir. Bu filmlerin özellikleri Li⁺ ya karşı elektrokimyasal tepkiyi

belirlediğinden, bunların kinetiklerinin ve çekirdeklenme ve büyüme mekanizmalarının incelenmesi, bunların farklı tersinirlik davranışlarını tam olarak anlamamıza yardımcı olacaktır. Uygulanan üç farklı potansiyel değeri (– 150, – 400 ve – 575 mV) kullanılarak, değişen yüzey morfolojilerine ve tanecik veya kristal boyutlarına sahip saf Cu₂O ince filmleri elektro-depolandı. Yük aktarımı veya difüzyonel büyüme kontrolü altındaki iki ve üç boyutlu çekirdeklenme modelleri (anlık veya aşamalı), hazırlanan Cu₂O filmlerinin çekirdeklenme ve büyüme mekanizmalarını yüzey morfolojisini bir fonksiyonu olarak incelemek için deneysel potansiyostatik akım yoğunluk-zaman geçişlerini tanımlamak için kullanıldı. Elde edilen sonuçlar, SCE' ye karşı $E_d = -150$ ve -400 mV'de sentezlenen Cu₂O ince filmleri için yük transfer kontrolü altında bağımlılık süresine sahip 3 boyutlu aşamalı çekirdeklenme sürecine paralel olarak 2 boyutlu katman katman bir büyüme olduğunu gösterdi. SCE' ye karşı $E_d = -575$ mV'de depolanan filmler durumunda, ana katkı, difüzyon kontrollü 3 boyutlu aşamalı çekirdeklenmeye karşılık gelmektedir (Bijani ve ark., 2011).

Bu makalede, homojen bakır oksit (CuO) nano yapıları ince filmleri sentezlemek için basit, düşük sıcaklıkta ve uygun maliyetli bir çözüm yöntemi açıklandı. Bu yöntemle, iyi kristalliliğe sahip, yoğun ve sürekli CuO filmleri kısa bir sürede, örneğin 15 dakikada hazırlanabilmektedir. Taramalı elektron mikroskobu, sentezlenen CuO plaka benzeri nanoyapıların 100 nm RMS kalınlığına sahip olduğunu gösterdi. XRD ölçümleri sentezlenen CuO nanoyapılarının tercihen (111) ve (111) yönlerinde monoklinik kristal yapıya sahip yüksek kristalliliğe sahip olduğunu gösterdi. Sıcaklığa bağlı karanlık elektriksel direnç ölçümlerinden safsızlık seviyelerinin iyonlaşma enerjileri ve filmlerin termal bant aralığı enerjileri hesaplandı (Bayansal ve ark., 2011).

Yazarlar tarafından cam altlık üzerinde CuO nanotellerinin (NW'ler) büyümesini ve CuO NW nem sensörlerinin üretimini rapor edildi. Başlangıçtaki bakır film kalınlığını oksidasyondan sonra 0,5 μm 'den 1 ve 2 μm 'ye çıkardığımız için CuO NW'lerin ortalama uzunluğunun sırasıyla 0,4 μm 'den 2,8 ve 6 μm 'ye arttığı bulundu. CuO'nun *p*-tipi yapısından dolayı bağıl nemi arttırıldıkça CuO NW'lerin direncinin de arttığı bulundu. Ayrıca, daha büyük bir başlangıç bakır film kalınlığına ve dolayısıyla daha uzun bir ortalama CuO NW uzunluğuna sahip numunelerin daha büyük bir sensör tepkisi sağlayabileceği bulundu (Hsueh ve ark., 2011).

Bakır oksit (Cu₂O) ince filmleri, çeşitli sıcaklıklarda radyo frekansı püskürtme depolama yoluyla büyütüldü. Cu₂O ince filmlerinin dielektrik fonksiyonları ve lüminesans özellikleri sırasıyla spektroskopik elipsometri ve fotolüminesans kullanılarak ölçüldü. Fotolüminesans spektrumlarında yüksek enerji zirveleri gözlemlendi. Dielektrik fonksiyonların ikinci türev spektrumları ve standart kritik nokta modeli kullanılarak çeşitli kritik noktalar (CP'ler) bulundu. Elektronik bant yapısı ve dielektrik fonksiyonlar, yoğunluk fonksiyonel teorisi kullanılarak hesaplandı ve CP enerjileri, deneysel verilerle karşılaştırılarak tahmin edildi. Cu₂O ince filmlerinin granüler yapılarından ortaya çıkan yarı doğrudan geçişlere yönelik yüksek enerjili fotolüminesans tepeleri belirlendi (Park ve ark., 2011).

0,45 μm kalınlığındaki bakır oksit ince filmler, mikroskop cam altlıkların her biri 1 M NaOH ve bakır kompleksi çözeltilerine 20 saniye boyunca daldırılarak cam altlıklar üzerinde kimyasal olarak depolandı. NaOH çözeltisinin sıcaklığı 70 °C'ye çıkartıldı, bakır çözeltisi ise oda sıcaklığında tutuldu. Bakır oksit ince filmler 200 – 400 °C'lik farklı sıcaklıklarda havada tavlandı ve hazırlanan numune referans olarak kullanıldı. Filmlerin yapıları XRD ile incelenmiştir. Desenler, hazırlanan ve 200 °C' de tavlanan filmlerin Cu_2O bileşimli kuprit yapısında olduğunu gösterdi. 300 °C'de tavlanan filmler karışık tenorit (CuO) ve kuprit (Cu_2O) fazlarından oluşur. Filmlerin 400 °C'de havada tavlama, bu filmleri tamamen CuO bileşimli tenorit yapıya dönüştürdü. Bakır oksitin iki formunun oranı oksidasyon sıcaklığına göre değişmektedir. Yüzey özellikleri taramalı elektron mikroskobu kullanılarak karakterize edildi. UV-vis geçirgenlik spektrumları, optik bant aralığındaki 2,40'tan 1,73 eV'ye bir kayma ile XRD'den elde edilen sonuçları doğruladı. Dönüşüm aynı zamanda FTIR spektroskopisi ölçümüyle de doğrulandı. Tavlama sıcaklıklarındaki artışla birlikte fotoluminesans yoğunluğunun büyük ölçüde arttığı görüldü (Johan ve ark., 2011).

Nanokristal bakır oksit (CuO) ince filmleri, sulu bir bakır asetat çözeltisi kullanılarak bir döndürerek kaplama tekniği ile cam altlıklar üzerine depolandı. Bu filmler yapısal, morfolojik ve optoelektronik özellikleri açısından X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), UV spektroskopisi ve dört prob yöntemi kullanılarak karakterize edildi. CuO filmleri monoklinik kristal yapıya sahip (111) düzlemi boyunca yönlendirildi. Bu filmler H_2S sensörlerinde kullanıldı. H_2S tepkisinin çalışma sıcaklığına ve CuO filminin (700 °C'de tavlama) H_2S konsantrasyonuna bağımlılığı araştırıldı. CuO filmi H_2S için seçicilik gösterdi. CuO filmi için % 25,2'lik maksimum H_2S tepkisi, 200 °C çalışma sıcaklığında 100 ppm gaz konsantrasyonunda elde edildi (Jundale ve ark., 2011).

Bu makalede, darbeli 532 nm Nd:YAG laser kullanılarak cam altlıklar üzerinde nanokristal bakır oksitler Cu_2O ve CuO ince filmlerinin sentezi sunuldu. Filmlerin depolanması iki farklı altlık sıcaklığında gerçekleştirildi. Altlık sıcaklığının bakır oksit filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerindeki etkisi tartışıldı ve analiz edildi. X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları, depolanan filmlerin doğası gereği kristalin olduğunu gösterdi. 300 °C altlık sıcaklığında hazırlanan filmler Cu_2O idi ve (111) ve (200) kırınımli piklere sahipti; 500 °C'de büyütülen filmler ise CuO olup (111) ve (020) düzlemlerine sahipti. Depolanan filmlerin morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile karakterize edildi. Cu_2O ve CuO filmlerinin optik enerji aralığı belirlendi ve 2,04 olarak bulundu (Jawad ve ark., 2011).

Bu makalede Cu_2O , güneş pili uygulamalarında foton soğurucu olarak incelendi. Cu_2O , elektrokimyasal depolama (ECD) yöntemini kullanarak bir TiO_2 film üzerinde depolandı. Numunelerin fiziksel görünümüne dayanarak, Cu_2O parçacıklarının TiO_2 filmine nüfuz ettiği ve öncelikle TiO_2 film yüzeyinden ziyade TiO_2 /altlık arayüzünün yakınında depolandığı görüldü. Bu yöntem $p - n$ bulk heteroeklem arayüzü oluşturma bir yolu olarak düşünüldü. Filmin bir

Cu₂O/TiO₂ kompoziti olduğu, X-ışını kırınım ölçümleri yoluyla doğrulandı. Üst elektrot, I – V karakterizasyonu için indiyumun buharlaştırılmasıyla oluşturuldu ve üretilen hücre fotovoltaiik özellikler gösterdi (Zainun ve ark., 2012).

DC magnetron püskürtme tekniği kullanılarak işlenen CuO ince filmlerdeki elektriksel aktarım özellikleri, işleme koşulları ile elektriksel özellikler arasındaki ilişkiyi anlamak için araştırıldı. İncelenen filmlerin sıcaklığa bağlı iletkenliğinin çoklu fonon atlamalı iletim mekanizması tarafından kontrol edildiği tespit edildi. Taşıyıcı atlama parametreleri açısından ayrıntılı bir analiz, elektriksel taşıma özelliklerini DC magnetron atım koşullarıyla ilişkilendirmek için kullanıldı (Serin ve ark., 2012).

Homojen nano-yapılı bakır oksit (CuO) filmleri hazırlamak için seri üretime uygun, düşük sıcaklıklarda uygulanabilen ve uygun maliyetli iki basit, güvenli ve çevre dostu kimyasal çözüm yöntemi kullanıldı. Farklı türde altlıklar (cam, kuvars, Cu folyo ve Si) ve teknikler kullanılarak çeşitli türlerde CuO nanoyapıları (levha, iğne ve ađ benzeri) üretildi. Ürünler, altlığın filmlerin morfolojisi, kristalografik yapısı ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınımı ve sıcaklığa bağlı karanlık elektriksel direnç ölçümleri ile karakterize edildi. Bu karakterizasyonlardan farklı tekniklerle ve/veya farklı altlıklar üzerinde üretilen nanoyapıların morfolojik, kristalografik, yapısal ve elektriksel özelliklerinde önemli farklılıklar olduğu görüldü. Ayrıca CuO filmlerinin büyüme mekanizmaları araştırıldı (Bayansal ve ark., 2012).

Farklı parçacık şekillerine sahip bakır oksit (Cu₂O) filminin doğrudan depolanması, düşük sıcaklıkta (80 °C) indirgeyici olarak ucuz glikoz ve kompleks madde olarak trisodyum sitrat içeren basit, tek adımlı ve ucuz bir kimyasal banyo depolama yöntemiyle elde edildi. Glukoz, trisodyum sitrat ve bakır iyonu konsantrasyonunu içeren reaksiyon koşullarıyla belirlenen aşırı doygunluğun Cu₂O filmlerinin sayı yoğunluğu ve parçacık morfolojisi üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelendi. Filmin parçacık morfolojisi, aşırı glikozlu düşük bakır iyonu konsantrasyonunda oktahedraldi; aşırı glikozda artan bakır iyonu konsantrasyonu ile küresel parçacıklar elde edildi. Morfoloji kontrolünün mekanizmasına, iyon konsantrasyonunun belirlediği farklı kinetik koşullar altında difüzyonla sınırlı aşamalı büyüme modelinin temel teorisi üzerine yaklaşıldı (Xu ve ark., 2013).

Bu çalışma, bakır oksit (Cu₂O) ince filmlerinin, C₆H₈O₇ kenetleme maddesi ile Cu (II) sülfat çözeltisinden flor katkılı kalay oksit (FTO) kaplı iletken cam altlıkar üzerine elektrodpozisyonunu gösterdi. Döngüsel voltametri deneyimleri sırasında Cu₂O'nun elektrodpozisyonunun gerçekleştirildiği potansiyel aralığı belirlendi. İnce filmler potansiyostatik olarak elde edildi ve farklı tekniklerle karakterize edildi. Mott-Schottky ölçümlerinden Cu₂O ince filmleri için düz bant potansiyeli ve alıcı yoğunluğu belirlendi. Tüm filmler $2,41 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ile $5,38 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ arasında değişen taşıyıcı yoğunluğuına sahip *p*-tipi yarı iletken karakter gösterdi. Bu küçük fark, biriktirme potansiyeli ile filmlerdeki stokiyometrik kusurların artmasına bağlandı.

Atomik kuvvet mikroskobu analizi, yüksek potansiyelde elde edilen Cu₂O ince filmlerinin görünüş olarak daha homojen olduğunu ve daha düşük kristal boyutuna sahip olduğunu gösterdi. X-ışını kırınım ölçümleri, iyi kristalleşme durumuna sahip kübik bir yapıya işaret ettiği tespit edildi ve depolama potansiyelinin, kristallerin boyutu üzerinde bir etkiye sahip olduğu bulundu. Optik ölçümler, uygulanan potansiyele bağlı olarak 2,07 – 2,49 eV arasında doğrudan bant aralığı gösterdi (Laidoudi ve ark., 2013).

Oksitlerdeki yüksek termoelektrik performans, uygun bant yapılarına sahip kararlı iletken malzemeler gerektirmektedir. Burada, ilk prensip hesaplamaları ve gevşeme süresi yaklaşımında Boltzmann taşıma teorisi kullanılarak termogüç ve ilgili özelliklerin analizine dayanarak, delik katkı Cu₂O'nun böyle bir malzeme olabileceği gösterildi. Delik katkı Cu₂O'nun, esas olarak Cu₂O'nun ağır valans bantlarına atfedilen, 500 K'de $5,2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ kadar yüksek katkılama seviyelerinde bile $200 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$ 'in üzerinde yüksek bir termal güce sahip olduğu bulundu. Bu, yüksek performanslı oksit termoelektriklerin kobalt ailesini anımsatmaktadır ve delik katkı Cu₂O'nun uygun şekilde katkılanması durumunda mükemmel bir termoelektrik malzeme olabileceği anlamına gelmektedir (Chen ve ark., 2013).

Pürüzsüz ve düzgün Cu₂O ince filmleri, Cu(Ac)₂ elektrolitleri içindeki İndiyum katkı Sn oksit altlıklar (ITO) üzerinde tiyoüre ilavesi ile elektrodepolama yoluyla hazırlandı. Depolama potansiyeli ve tiyoüre konsantrasyonunun bu ince filmlerin oluşumu üzerindeki etkisi, X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak araştırıldı. Sonuçlar, görünür ışık aralığında bariz absorpsiyon ve fotoakım tepkisi sergileyen, 0,5 mM tiyoüre ile – 0,1 V (SCE' ye karşı) potansiyeli altında elektrodepolama yoluyla düzgün ve düzgün Cu₂O ince filmlerinin elde edildiğini gösterdi. Ayrıca tiyoüre konsantrasyonu arttıkça Cu₂O ince filmlerin yoğunluğu da azaldığı görüldü. Buna dayanarak, tiyoüre destekli büyüme prosesinin düzgün Cu₂O ince filmlerinin oluşumu için makul bir mekanizma olduğu ileri sürüldü (Xue ve ark., 2013).

Bakır oksit (Cu₂O), fotovoltaiik uygulamalar için umut verici, toprakta bol miktarda bulunan bir yarıiletkenidir. *p*-tipi iletim mekanizmasının anlaşılmasının geliştirilmesi, malzemeyi optimize etmek için hayati öneme sahiptir. Cu₂O ince filmleri üretmek için reaktif magnetron püskürtme sistemi kullanıldı. Filmlerdeki bant aralığı, kırılma indisi, hareketlilik, deşik yoğunluğu ve elektriksel iletkenlik de araştırıldı. Çalışmada, nitrojen açısından zengin koşullar altında üretilen filmlerin geniş bant aralıkları ve düşük elektrik iletkenlikleri sergilediği, oksijen açısından zengin koşullar altında depolanan filmlerin ise dar bant aralıklarına ve yüksek elektrik iletkenliklerine sahip olduğu görüldü. Yoğunluk fonksiyonel teorisinin sonuçları, bant aralığının gaza bağımlılığını açıklamak için sunuldu. Fermi-Dirac istatistiklerine dayalı geliştirilen teorik model, yüksek elektriksel iletkenliklerin filmdeki Fermi seviyesinin altında bulunan alıcı seviyelerinden kaynaklandığını gösterdi (Zhang ve ark., 2013).

n-katkılı Cu₂O filmleri, bir Cu₂O hedefi ile reaktif magnetron püskürtme yoluyla kuvars altlıklar üzerine depolandı. Filmlerin yapısı, depolama hızı ve elektriksel özellikleri, nitrojenin kısmi basıncından etkilendi. Farklı nitrojen kısmi basıncındaki filmlerin yapısının ve elektriksel özelliklerinin üç aşamaya ayrılabilceği bulundu: düşük, orta ve yüksek *n*-katkı aralıkları. 0,035 Pa'lık nitrojen kısmi basıncında depolanan filmin en düşük dirence sahip (0,112 Ω·cm) olduğu tespit edildi (Lai ve ark., 2013).

Cu₂O oktahedral mikro kristalleri, ITO camı üzerinde yüzey aktif madde olarak poli(vinilpirrolidon) içeren CuSO₄ çözeltisi içinde galvanostatik elektrodepolama yoluyla hazırlandı. Elektrodepolama süresinin kontrol edilmesiyle, mikrokristaller ITO camı üzerinde rastgele dağıtılabildi ve birbirlerinden ayrılabilir, bu da mümkün olduğu kadar çok sayıda {1 1 1} kristalin düzlemin açığa çıkmasına neden oldu. ITO camı üzerine sabitlenen bu tür mikrokristaller, 150 W halojen tungsten lamba altında H₂O₂ varlığında boya kirleticilerinin fotodegradasyonu için kullanıldı. Oktahedral Cu₂O mikrokristallerinin fotokatalitik aktivitelerini değerlendirmek için metilen mavisinin fotodegradasyonu örnek olarak alındı. Elektrodepolama süresinin ve H₂O₂ miktarının bozunma verimliliği üzerindeki etkileri, optimum koşullar ve karşılık gelen bozunma mekanizması verilerek tartışıldı. Katalizör aynı koşullar altında metilen mavisi, metil turuncu, rodamin B, eozin B ve bunların karışımlarının bozunmasında yüksek yetenek gösterdi (Zhai ve ark., 2013).

Nanokristal bakır oksit (Cu₂O) ince filmler, tek adımlı kimyasal banyo depolama (CBD) yöntemiyle hazırlandı. İnce filmlerin oryantasyonu, morfolojisi, kristal boyutu ve fotokatalitik aktivitesi üzerinde bir kenetleme maddesinin etkileri, X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve UV-vis spektrofotometrisi kullanılarak dikkatlice incelendi. Sonuçlar, filmlerin yöneliminin yanı sıra kristal boyutunun da trisodyum sitratın (TSS) hacmine bağlı olduğunu doğruladı; bu da bant aralığının 2,71 eV ile 2,49 eV arasında değiştiğini gösterdi. İnce filmlerin morfolojisi ve sayı yoğunluğu da TSS'nin hacmine bağlıydı. Ek olarak, elde edilen Cu₂O ince filmler, H₂O₂'nin varlığında görünür ışık ışınlaması altında metil turuncuyu (MO) verimli bir şekilde bozundurabildi ve Cu₂O ince filmlerinin H₂O₂'nin yardımıyla artırılmış fotokatalitik aktivitesine yönelik mekanizma da ayrıntılı olarak araştırıldı (Xu ve ark., 2014).

Uzun zincirli alkol indirgeme yöntemi kullanılarak yüksek oranda kristalize bakır oksit nanopartiküllerinin başarılı sentezi rapor edildi. Bu yöntemle elde edilen bakır oksidin saflığı büyük ölçüde reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve indirgeme kinetiğine yardımcı olan hidroksil iyon konsantrasyonu gibi sentez koşullarına bağlıdır. Yukarıdaki parametrelerin optimize edilmesiyle, parçacık boyutları 10 – 30 nm aralığında kontrol edilebilen kübik bakır oksit sentezlendi. X-ışını kırınım analizi, Cu₂O kristalinin tek fazlı doğasını doğruladı. Ayrıca üründeki bakır ve oksijen atomları arasındaki oran Rietveld analizi kullanılarak 1,96 olarak belirlendi ve Cu₂O nanopartiküllerinin saflığı doğrulandı. Ek olarak, I – V özellikleri, nanopartiküllerin yarıiletken olarak işlev gördüğünü öne sürdü ve bu bakırlı nanokristallerin, güneş enerjisi

cihazlarının hazırlanmasında fonksiyonel bir malzeme olarak kullanıldığını gösterdi (Nishimura ve ark., 2014).

Bu çalışmada, elektrokimyasal depolama yoluyla flor katkılı kalay oksit (FTO) altlık üzerinde Cu_2O ince filmlerinin büyümesi araştırıldı. Tavlama sıcaklıklarının yanı sıra tavlama sürelerinin pH değeri 11 ile büyütülen Cu_2O ince filmlerin morfolojik, yapısal, fotoelektrokimyasal ve optik özellikleri üzerindeki etkisi incelendi. Çalışma, pH 11’de büyütülen Cu_2O ince filmlerinin (111)’e doğru büyüme yönelimini tercih ettiğini ve bu filmlerin daha yüksek fotoakım yoğunluğuna sahip olduğunu gösterdi. Cu_2O ince filminin fotoelektrokimyasal özelliğinin büyük ölçüde kristallğine ve morfolojisine bağlı olduğu bulundu (Kim ve ark., 2014).

Bakır oksit ince filmleri, oda sıcaklığında oksijen kısmi basıncını değiştirerek cam altlıklar üzerine RF magnetron püskürtme yoluyla büyütüldü. XRD ve XPS analitik ölçümleri kullanılarak Cu_2O ve CuO fazlarının oluşumuna yönelik depolama koşulu optimize edildi. Cu_2O ve CuO ’nun optik bant aralığı sırasıyla 2,31 ve 1,41 eV idi. Alt geçit yapılı şeffaf TFT’ler, 10^4 açma/kapama oranı ve $0,01 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ alan etkisi hareketliliği ile geliştirme modunda çalıştırılan *p*-tipi CuO aktif katmanlar kullanılarak üretildi (Sanal ve ark., 2014).

Bakır oksit (Cu_2O) ince filmleri, polietilen glikol ve etilen glikol gibi farklı katkı maddeleri kullanılarak sol-jel döndürmeli kaplama tekniği ile indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam altlık üzerine depolandı. Eklenen organik katkı maddelerinin Cu_2O filmlerinin oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve farklı mikro yapılara ve optik özelliklere yol açtığı bulundu. Filmler, X-ışını kırınımı (XRD), alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ve ultraviyole görünür spektroskopisi (UV-Vis) ile karakterize edildi. FESEM mikrograflarına göre, polietilen glikol katkısı kullanılarak hazırlanan filmin tane boyutu, düzensiz şekilli, yaklaşık 83 nm’lik daha küçük tanelere sahipti. En yüksek optik absorpsiyon filmi polietilen glikol ilavesiyle elde edildi. Cu_2O ince filmleri, fotoelektrokimyasal güneş pili (PESC) uygulamasında çalışma elektrotu olarak kullanıldı (Halin ve ark., 2014).

Cu_2O ince filmleri, pH 5,6’da 0,02 M bakır (II) asetat [$\text{Cu}(\text{OAc})_2$] ve 0,1 M sodyum asetat (NaOAc) içeren bir Cu (II) asetat çözeltisinden, yaklaşık olarak aynı özelliklere sahip üç farklı çalışan kare dirençli indiyum katkılı kalay oksit cam (ITO/Cam), flor katkılı kalay oksit cam (FTO/Cam) ve indiyum katkılı kalay oksit polietilen tereftalat (ITO/PET) iletken elektrotlar kullanılarak ortak bir büyüme koşulu kullanılarak aynı koşullar altında elektrodepolandı. Cu_2O ince filmleri, taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınımı (XRD), Cu_2O filmleri için akım yoğunluğuna karşı büyüme süresi ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi aracılığıyla karakterize edildi. Sonuçlar, altlık malzemelerinin seçiminin Cu_2O büyümesinin kontrol edilmesinde çok önemli bir role sahip olduğunu gösterdi. FTO/Glass- Cu_2O ’nun yük aktarım direnci (R_{ct}) en düşük değeri gösterir; bu, FTO/Glas- Cu_2O ’nun en yüksek elektron transfer verimliliğine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Tüm Cu_2O filmleri $1,4 \times 10^{18} - 1,2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ arasında

değişen yük taşıyıcı yoğunluklarıyla *n*-tipi yarı iletken özelliği gösterdi (Elmezayyen ve ark., 2015).

Bu çalışmada Cu filmlerin 800 °C ve 900 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta termal oksidasyonu ile elde edilen kristal Cu₂O ince filmlerin yapısal ve optik karakterizasyonu incelendi. X-ışını kırınım ölçümleri, sentezlenen filmlerin herhangi bir ara faz içermeyen tek Cu₂O fazından oluştuğunu ve nano tanecikli bir yapıda olduğunu gösterdi. Taramalı Elektron Mikroskobu gözlemleri, Cu₂O filmlerinin mikro ölçekte bir pürüzlülüğe sahip olduğunu gösterirken, Yüksek Çözünürlüklü Transmisyon Elektron Mikroskobu, nanokristal yapının 30 nm'den daha küçük neredeyse küresel nanokristallerin üst üste bindirilmesiyle oluştuğunu vurguladı. Bu filmlerin fotoluminesans spektrumları, oda sıcaklığında, kusurlu enerji seviyeleri nedeniyle 1,34 eV'de ve her iki film serisinde de 1s ortoeksitonun fonon destekli rekombinasyonundan dolayı 1,97 eV'de iki iyi çözölmüş emisyon zirvesi sergilediği göröldü. Bu filmlerin fotoluminesans spektrumları, oda sıcaklığında, kusurlu enerji seviyeleri nedeniyle 1,34 eV'de ve her iki film serisinde de 1s ortoeksitonun fonon destekli rekombinasyonundan dolayı 1,97 eV'de iki iyi çözölmüş emisyon zirvesi sergilediği göröldü. Kaydedilen emisyonların kaynağını belirlemek için lazer gücüne bağı emisyon özellikleri derinlemesine araştırıldı. 1s ortoeksiton emisyonunun zamana entegre spektrumları, geniş bir uyarma dalga boyu aralığı kullanarak rezonanssız iki fotonlu uyarım altında iletim bandı kenarının altında oksijen kusurlarının varlığını ortaya çıkardı. Oda sıcaklığındaki optik absorpsiyon katsayıları, iletim ve yansıma spektrumlarının doğru bir analizinden elde edilirken, optik bant aralığı enerjisinin yaklaşık 2,11 eV olduğı tahmin edilmektedir. Elde edilen sonuçlar özellikle güneş pilleri, optik kaynaklar ve dedektörler gibi yarı iletken cihazlardaki potansiyel uygulamalar için oldukça önemlidir (Karapetyan ve ark., 2015).

Bakır oksit ince filmleri, ardışık iyonik katman adsorpsiyon reaksiyonu (SILAR) olarak bilinen basit, güvenli ve çevre dostu bir kimyasal çözüm yöntemi kullanılarak cam ve paslanmaz çelik altlıklar üzerine depolandı. Filmler, her birinin 20 saniye boyunca 1 M NaOH çözeltisine ve ardından 0,1 M bakır kompleksi çözeltisine art arda daldırılmasıyla hazırlandı. NaOH çözeltisinin sıcaklığı 70 °C iken (pH = 8 – 12) olan bakır kompleksi çözeltisinin sıcaklığı oda sıcaklığında tutuldu. Filmler X-ışını kırınımı (XRD), Enerji dağılımlı X-ışını analizi (EDAX) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edildi. XRD ölçümleri, cam altlıklar üzerinde CuO nanoyapılarının oluşumunun, paslanmaz çelik altlıklara göre daha kristalli olduğunu gösterdi. SEM görüntüleri, paslanmaz çelik üzerine depolanan CuO nanoyapılarının tane boyutlarının, cam altlık üzerine depolanan filmlerden daha büyük olduğunu ortaya koydu. Cam altlıklar kullanılarak depolanan bakır oksit filmleri, paslanmaz çelik altlıklar üzerine depolanan filmlere göre daha iyi bir morfoloji, daha yüksek kristallik ve Cu/O bileşiminin daha iyi yüzde oranını gösterdi (Umeri ve ark., 2015).

p-tipi bakır oksit (Cu₂O) ince filmleri reaktif püskürtme yöntemi kullanılarak üretildi. Depolanan *p*-tipi Cu₂O ince filmleri argon gazı ortamında sonradan tavlandı. Depolandığı gibi *p*-

tipi Cu₂O ince filmleri, Cu₂O (111), Cu₂O (220) ve Cu₂O (200) X-ışını kırınım zirvelerini sergiledi. Ar gazında tavlama sonrası sıcaklığın artırılması, Cu₂O (111) ve Cu₂O (200) kırınım tepe noktalarının sırasıyla daha düşük ve daha yüksek açılara doğru kaymasıyla sonuçlandı. 550 °C tavlama sıcaklığında Cu₂O (200) kırınım pikleri en güçlüydü. Tavlama sıcaklığı 550 °C olan *p*-tipi Cu₂O ince filmin öz direnci, deşik konsantrasyonu ve hareketliliği sırasıyla 179,7 Ω·cm, 1,994 × 10¹⁵ cm⁻³ ve 17,43 cm²/V·s idi (Jung ve ark., 2015).

Bakır Oksit ince filmler cam altlık üzerine farklı sürelerde 30 döngü boyunca ardışık iyonik katmanlar adsorpsiyon ve reaksiyon yöntemi tarafından depolandı. Katmanlar, bakırtiyosülfat sulu çözeltileri kullanılarak sırasıyla 15, 20, 25 ve 30 saniye gibi farklı daldırma süreleriyle büyütüldü. Tüm daldırma seviyelerinde kristal fazlara ulaşıldı. Bakır oksit, stokiometrik olmayan *p*-tipi şeffaf yarıiletken oksit malzemeler için en umut verici adaylardan biridir. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopi çalışmaları bakır oksit oluşumunu doğruladı ve CuO'nun karakteristik titreşim modu tanımlandı. Bakır oksit ince filmlerin hem yapısal hem de yüzey özellikleri, biriktirme süresindeki artışla iyileştirildi, bunun sonucunda bakır oksidin optik soğurma kenarı daha uzun dalga boylarına doğru kayar, optik bant aralığı enerjisi 1,43 ile 1,96 eV arasında değişir. Filmin kristallliği maksimum çekirdeklenme sürecine izin verecek kadar yüksektir. Bu ince filmlerin optik emisyon özelliklerini açıklamak için oda sıcaklığında fotoluminesans spektrumu da alındı (Ravichandran ve ark., 2015).

Nanokristal kübik Cu₂O ince filmler, basit ve uygun maliyetli, modifiye edilmiş ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyon yöntemi ile geliştirildi. Bu yöntem büyüme oranını arttırdı ve genel biriktirme süresini azalttı. Sentezlenen Cu₂O ince filmleri farklı fiziko-kimyasal özelliklerine göre karakterize edildi. 25 döngü boyunca biriktirilen film, 2,16 eV'lik optik bant aralığı enerjisi, saf kübik Cu₂O faz yapısı, sisli benzeri yüzey morfolojisi ve doğası gereği hidrofobik davranış sergilemektedir. Cu₂O ince film kullanılarak üretilen fotoelektrokimyasal cihaz % 0,35 verimlilik gösterdi (Nikam ve ark., 2015).

Mevcut çalışmada, ITO altlıklar üzerinde Cu₂O ince filmleri hazırlamak için elektrodopolama yöntemi kullanıldı. Banyo sıcaklığı 40 ila 80 °C arasında kontrol edildi ve katkı konsantrasyonu 2 ila 10 mM arasında değişti. Hazırlanan filmlerin yapısı, yüzey morfolojisi ve optik özellikleri, X-ışını difraktometresi (XRD), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (SEM), Raman spektrofotometresi ve UV-görünür (vis) spektrofotometresi ile araştırıldı. Cu₂O filmlerinin morfolojisi, farklı banyo sıcaklıklarında ve katkı maddesi konsantrasyonunda açıkça değişti. Raman piklerinin yoğunluğu KCl konsantrasyonunun artmasıyla arttığı görüldü. UV-vis absorpsiyon spektrumu ölçümleri, 80 °C' de depolanan filmin ortalama absorbansının, 40 ve 60 °C' de depolananlardan daha yüksek olduğunu gösterdi. Bu arada, 10 mM KCl'de depolanan Cu₂O ince filminin ortalama absorbansı, 2 ve 5 mM KCl'de depolananlardan daha büyüktü ve bu da morfolojiyle ilişkilendirildi (Jiang ve ark., 2015).

Ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) süreci yoluyla Cu₂O ince filmlerin oluşumu rapor edildi. Atmosfer koşullarında büyütülen ince filmler vakumsuz bir işlemle tamamen karakterize edildi. Oksijen ortamında depolama sonrası tavlama, CuO ince filmlerinin oluşumuna neden oldu. Bir *p*-tipi bakır oksit tabakası ve başka bir *n*-tipi SnO₂ nanopartikül tabakası ile *pn*-bağlantıları oluşturuldu. Bu tür *pn*-bağlantıları, taşıyıcı bloke edici katmanlar olarak diğer oksit yarıiletkenlerle birlikte, atmosferik bir durumda oluşturulan tüm oksit ince film güneş pilleri gibi davrandı. Arayüzde meydana gelen kimyasal değişiklikleri yasaklamak için NiO'nun deşik taşıyan ve elektron bloke eden bir katmanı olarak ve ZnO' nun *p* ve *n* katmanları arasında bir tampon katmanı olarak etkisi rapor edildi. Taramalı tünelleme spektroskopisi (STS) ölçümlerinden, malzemelerin bant kenarları Fermi enerjilerine göre tespit edildi. Merdiven benzeri bir enerji seviyesine sahip NiO/Cu₂O/ZnO/SnO₂ heteroeklem cihazları, elektronların ve deliklerin karşıt elektrotlara kolayca taşınmasına yol açtı ve böylece tamamı oksit ince film güneş pilleri gibi davranarak % 1'i aşan bir enerji dönüşüm verimliliği sağladı (Chatterjee ve ark., 2016).

Bu çalışmada, ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) yöntemi ile depolanan Cu₂O ince filmlerinin elektronik yapı üzerindeki kalınlık etkisini araştırıldı. Cu₂O ince filmlerinin kristal, optik ve elektronik özellikleri X-ışını kırınımı (XRD) ve X-ışını absorpsiyonu yakın kenar spektroskopisi (XANES) ile incelendi. Kristal yapı analizine göre, filmlerin çoğunlukla kübik Cu₂O yapılarında olduğu belirlendi. XANES çalışması, Cu *L*_{2,3} absorpsiyon kenarlarının Cu atomlarının kimyasal durumundan güçlü bir şekilde etkilendiğini ve tek bir iyonik resmin Cu₂O'nun *L*-kenar spektrumlarını tanımlamak için yeterli olmadığını gösterdi.

Örneklerin Cu *L*_{2,3}-kenar spektrumlarının hem tek değerlikli Cu (I) hem de iki değerlikli Cu (II) durumların tipik elektronik özelliklerini gösterdiği gözlemlendi. Taneciklerin ortalama boyutu 2,5 nm'dir ve XRD ölçümleri (111) düzleminin tercih edilen yönelim olduğunu ortaya koydu. Optik çalışmalar, optik emilim kenarının film kalınlığı arttıkça daha yüksek enerjilere kaydığını gösterdi. Optik bant aralığının film kalınlığından önemli ölçüde etkilendiği bulundu. Sonuçlar, Cu₂O ince filmlerinin optik bant aralığının artışının, film kalınlığındaki artışın bir sonucu olarak Cu-Cu etkileşiminde önemli bir azalma ile ilişkili olduğunu gösterdi (Özaslan ve ark., 2017).

Nanoyapılı bakır oksit ince filmler, çeşitli miktarlarda polietilen glikol (PEG) ile kolay ve uygun maliyetli Ardışık İyonik Katman Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu (SILAR) yöntemiyle oda sıcaklığında cam altlıklar üzerinde üretildi. PEG'in CuO ince filmlerinin optik özellikleri üzerindeki etkileri ultraviyole görünürlük (UV-Vis) spektroskopi analizi ile araştırıldı. Oda sıcaklığında yapılan UV-Vis analizi ile CuO ince filmlerin optik bant aralığı değerlerinin ve geçirgenlik özelliklerinin, büyütme çözeltisindeki PEG konsantrasyonunun artmasıyla birlikte değiştiği görüldü. CuO ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisinin artan PEG konsantrasyonuyla birlikte 1,30 eV'den 1,42 eV'ye çıktığı bulundu. CuO ince filmlerinin kalınlığının da PEG konsantrasyonuna bağlı olarak 137 nm ile 680 nm arasında değiştiği bulundu. İnce filmlerin kırılma indisi (*n*), yüksek frekans optik (ϵ_{∞}) ve statik (ϵ_0) dielektrik sabiti değerleri gibi diğer önemli

parametreler, film kalınlığının bir fonksiyonu olarak optik bant aralığı enerji değerleri kullanılarak hesaplandı. Araştırmalar, PEG konsantrasyonunun SILAR ile büyütülmüş CuO ince filmlerin optik özellikleri üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olduğunu ortaya çıkardı (Çavuşoğlu, 2018).

Bakır oksit (Cu₂O) ince filmleri, 60 °C’de sodyum tiyosülfat ilavesiyle sulu bakır asetat çözeltilerinden ITO kaplı cam altlıklar üzerine elektrodepolama tekniğiyle büyütüldü. Sodyum tiyosülfatın Cu₂O filmlerinin elektrokimyasal depolama üzerindeki etkileri döngüsel voltametri ve kronoamperometri teknikleriyle araştırıldı. Depolanan filmler SCE’ye karşı – 0,58 V’de elde edildi ve X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik, fotoelektrokimyasal ve elektriksel ölçümlerle karakterize edildi. X-ışını kırınımı sonuçları, sentezlenen Cu₂O filmlerinin, (200) düzlemi boyunca belirgin bir tercihli oryantasyon tepe noktasına ve $a = b = c = 0,425$ nm kafes sabitlerine sahip saf bir kübik faza sahip olduğunu gösterdi. FTIR sonuçları, 634 cm⁻¹ zirvesinde Cu₂O filmlerinin varlığını doğruladı. Cu₂O filmlerinin SEM görüntüleri daha iyi bir kompaktlık ve küresel şekilli kompozisyon göstermiştir. Cu₂O filmlerinin optik özellikleri görünür ışık bölgesinde yüksek optik geçirgenlik (> %80) ve yüksek soğurma katsayısını ($\alpha > 10^4$ cm⁻¹) ortaya koydu. Optik enerji bant aralığının 2,103 eV olduğu bulundu. Fotoelektrokimyasal ölçümler, Cu₂O filmlerinin *n*-tipi yarıiletken iletkenliğe sahip olduğunu gösterdi ve bu, Hall Etkisi ölçümleriyle de doğrulandı. Cu₂O filmlerinin elektriksel özellikleri, 61,30 $\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ ’lik düşük bir elektrik direnci, $- 4,94 \times 10^{15}$ cm⁻³ taşıyıcı konsantrasyonu ve 20,61 cm²·V⁻¹·s⁻¹ hareketlilik gösterdi. Elde edilen uygun özelliklere sahip Cu₂O ince filmler, fotovoltaiik güneş pillerinin üretimi için umut verici yarıiletken malzemelerdir (Rahal ve ark., 2018).

Cu₂O filmlerini ITO altlık üzerine depolamak için farklı anyonik banyo sıcaklıklarında (40 °C, 60 °C, 80 °C) ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) tekniği kullanıldı. Bu çalışmada yürütülen ve bildirilen çalışmalar, Cu₂O’nun (XRD) kristal yapısı, geçirgenliği, optik bant aralığı, Cu₂O’nun yüzey morfolojisi ve depolanan Cu₂O filmlerinin fotokatalitik aktivitesidir. Yapısal çalışma, banyo sıcaklığının artmasıyla birlikte kristal kalitesinin kademeli olarak arttığını ve kristal yapının tercihli yöneliminin (111) boyunca yani kübik yapıda olduğunu ortaya çıkardı. Cu₂O filmi için yapılan optik çalışma, anyonik banyo sıcaklığının, depolanan Cu₂O numunelerinin geçirgenliğini ve optik bant aralığını etkilediğini gösterdi. SEM görüntüleri, ITO altlık üzerinde depolanan Cu₂O filminin morfolojisinin nanotel benzeri yapılara sahip olduğunu ve anyonik banyo teli yapısının sıcaklığının artmasıyla birlikte daha kompakt büyüdüğünü ortaya çıkardı. Fotoelektrokimyasal (PEC) çalışmaları, 80 °C’de depolanan Cu₂O’nun yüksek fotoakım ve iyi stabilite gösterdiğini ortaya çıkardı (Baig ve ark., 2018).

Bu çalışmada kimyasal banyo yöntemi ile farklı Au konsantrasyonlarına sahip cam üzerinde elde edilen Cu₂O filmlerinin yapısal ve optik özelliklerindeki değişimler incelendi. Filmlerin kafes parametresi, kristal boyutu, tercihli yönelimi ve yüzey gerilimi, tüm filmlerin polikristal formda olduğunu gösteren X-ışını kırınım verileri kullanılarak hesaplandı. Katkı oranı

arttıkça tüm filmlerin yapısal parametrelerinin değiştiği belirlendi. Filmlerin yüzey morfolojisi, alan emisyon taramalı elektron mikroskobu kullanılarak görüntülendi. Filmlerin optik özellikleri optik spektrometre kullanılarak keşfedildi. Au oranının bir fonksiyonu olarak optik özelliklerdeki değişiklikler keşfedildi. Filmlerin enerji bant aralığı değerinin (2,12 eV – 2,02 eV), kırılma indisinin, sönüm katsayısının, gerçek ve dielektrik katsayılarının, optik iletkenliğin ve yüzey derinliğinin Au katkılama oranına göre değiştiği belirlendi (Güneri, 2019).

Bu makalede, yüksek fotoelektrokimyasal aktiviteye sahip Cu₂O küpleri, ultrason destekli ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) yöntemiyle TiO₂ nanotüp dizilerinin yüzeyinde depolandı. Element bileşimi ve morfolojisi XPS ve SEM ile karakterize edildi. TiO₂ NT'ler/Cu₂O mükemmel fotoelektrik dönüşüm ve organik boyaların ve Cr(VI)'nın fotoelektrokatalitik (PEC) uzaklaştırılması gösterdi. Sonuçlar, SILAR depolama döngüsünün görünür ışık tepkisini ve PEC özelliklerini büyük ölçüde etkilediğini ve 6 SILAR döngüsüyle hazırlanan TiO₂ NTs/Cu₂O' nun (6), optimum görünür ışık fotoakımını (1,08 mA/cm²), görünür ışık fotovoltajını (– 0,044 V/cm²), MO (% 77,62), RhB (% 61,83) ve MB'nin (% 98,30) güneş PEC bozunma verimleri ve Cr(VI)'nın (% 97,16) PEC azaltımını gösterdiğini doğruladı. TiO₂ NT'ler/Cu₂O fotoelektrotları, önemli ölçüde geliştirilmiş fotoelektrokimyasal performans nedeniyle güneş pillerinde ve atık su arıtımında ileriye dönük uygulamalar göstereceği düşünülmektedir (Wang ve ark., 2019).

Bu çalışmada, bakır oksit (Cu₂O) ince filmleri, hem soda kireç camı (SLG) mikroskopi slaytları hem de flor katkılı kalay oksit (FTO) altlıkları üzerinde değiştirilmiş bir SILAR yöntemiyle büyütüldü. Asetik asit ve sülfürik asidin ayrı ayrı eklenmesiyle ayarlanan katyonik öncül pH seviyesi ve ayrıca anyonik öncül (NaOH) konsantrasyonu, depolanan filmlerin fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini aydınlatmak için değiştirildi. XRD ölçümü, tüm filmlerin doğası gereği polikristal olduğunu ancak (111) tercihli yönelime sahip tek fazlı Cu₂O olduğunu gösterdi. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenen yüzey morfolojisi, depolanan filmlerin mikro çatlak ve iğne deliği içermediğini ve alttaki altlığı tutarlı bir şekilde kapladığını ortaya çıkardı. Depolanan ürünlerin tahmini optik bant aralığı ve direncinin sırasıyla 2,05 – 2,16 eV ve 180 – 380 Ω·cm aralığında olduğu bulundu; burada ikincisi, benzer yöntemlerle büyütülen Cu₂O ince filmler için rapor edilen sonuçlardan en az bir büyüklük sırası daha azdır. Katyonik öncül çözeltilerin pH seviyesinin azalmasıyla hem optik bant aralığının hem de elektriksel direncin azaldığı bulundu ve bu, çökeltinin kristalleşmesinin iyileşmesine bağlandı. Değiştirilmiş SILAR ile büyütülmüş Cu₂O elektrotunun LED AÇIK/KAPALI modülasyonlu geçici yüzey fotovoltajı, sıcak nokta prob sonuçlarıyla tutarlı p-tipi iletkenlik gösterdi ve bu foto katotların, sulu elektrolitle doldurulmuş bir fotoelektrokimyasal hücrede 1 saatten fazla stabil olduğu bulundu (Farhad ve ark., 2019).

Bu çalışmada, düşük sıcaklıkta (60 °C) cam altlık üzerine 40 daldırma çevrimi ile dört farklı bakır tuzu ((CH₃COO)₂Cu·H₂O, CuSO₄·5H₂O, Cu(NO₃)₂·3H₂O ve CuCl₂·2H₂O) kullanılarak SILAR yöntemi ile bakır oksit (Cu₂O) filmleri hazırlandı. Filmlerin yapısal, optik, morfolojik ve

elektiriksel özellikleri incelendi. X-ışını kırınımı (XRD) analizinde, Cu₂O ince filmlerin polikristal olduğu ve filmlerin yapısal özellikleri arasında büyük farklılıklar olmadığı bulundu. Cu₂O ince filmin optik özellikleri, absorpsiyon spektrumu sonuçlarına göre analiz edildi. Cu₂O ince filmlerin kalınlık değeri arttıkça enerji bant aralığı değeri azaldığı tespit edildi. FE-SEM (Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntülerinde, filmlerde genel olarak küresel kümelenmenin meydana geldiği ve bazı filmlerde küresel formda çubuk yapıları parçacıkların bulunduğu görüldü. Hall ölçümlerinde, Cu₂O ince filmlerinin *p*-tipi elektiriksel iletkenliğe sahip olduğu ve filmlerin elektiriksel özdirenç değeri (ρ) sırasıyla 1,24×10⁴, 4,06×10⁴, 2,86×10⁴ ve 1,67×10⁴ Ω·cm olduğu bulundu. Filmlerin mobilite değeri (μ) sırasıyla 174, 87, 80 ve 23 cm²/V olduğu bulundu (Altındemir ve Gümüş, 2020).

Cu₂O filmi, SILAR (Ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyonu) yöntemi ile 70 °C’de bir cam altlık üzerine depolandı. Cu₂O filmi, 100 °C, 300 °C ve 500 °C sıcaklıklarında 1 saat boyunca bir hava atmosferinde tavlandı ve tavlama sıcaklığının fiziksel özellikler üzerindeki etkisi incelendi. Cu₂O’dan CuO’ya dönüşüme karşılık gelen faz geçiş sıcaklığı, tavlama işlemi ile yaklaşık 300 °C’de meydana geldi. Enerji bant aralığı (E_g), artan tavlama sıcaklığıyla 2,57 eV’ den 1,91 eV’ye düştü. Hall ölçümü, filmin *p*-tipi iletkenlik gösterdiğini ve 70 °C’de depolanan ve 100 °C’de tavlanan Cu₂O’nun özdirençini (ρ) sırasıyla 6,12×10⁴ ve 7,44×10³ Ω·cm olarak hesaplandığını ortaya koyarken, filmin 300 °C ve 500 °C’de tavlama ile CuO’nun özdirençini sırasıyla 8,23×10³ ve 5,11×10² Ω·cm olarak bulundu (Özaslan ve ark., 2020).

Düşük maliyetli elektrodepolama yöntemi, farklı iletken altlıklar (Au, ITO ve FTO) üzerinde Cu₂O nanoyapılı ince filmler büyötmek için kullanıldı. Burada ilk kez, güneş pili uygulamaları için aktif tabaka olarak elektrodepolanmış ince filmlerin morfolojisi, yapısal ve optik özellikleri üzerinde alt tabakanın etkisi, taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınımı, UV-vis spektroskopisi ve fotoluminesans kullanılarak araştırıldı. Sonuçlar, üç altlık üzerinde Cu₂O ince filminin polikristalin kübik yapısının tek fazlı oluşumunu gösterdi. ITO ve Au altlıklarında yalnızca (111) kırınım düzlemi belirmiş olup, iyi bir kristal kalitesi gösterdiği tespit edildi. Au altlık üzerinde oluşan Cu₂O, en küçük tane boyutlarına ve en yüksek yüzey alanına sahipti. Optik sonuçlar, üretilen Cu₂O filmlerinin Au, ITO ve FTO altlıklar için sırasıyla 2,03, 2,03 ve 1,93 eV bant aralığına sahip olduğunu gösterdi. Au altlıkta büyütölen Cu₂O kristalleri, fotojenlenmiş taşıyıcıları ayırmada daha yüksek performansı ve en düşük rekombinasyon oranını ve yüksek kristal kalitesini gösteren en düşük PL yoğunluğuna sahipti. Üretilen ince filmlerin I – V karakteristik eğrileri, numunelerin doğrusal olmayan bir düzeltme davranışına sahip olduğunu, Au altlıkta depolanan Cu₂O’nun ise en yüksek ileri akıma sahip olduğunu gösterdi. I – V sonuçları, XRD, SEM ve PL tekniklerinden elde edilen diğer tüm sonuçları doğruladı ve destekledi. Bu nedenle, sonuçlar Au altlıkta elektrodepolanmış Cu₂O ince filmin güneş pili uygulamaları için uygun olduğunu gösterdi (Ismail ve ark., 2020).

Bu çalışmada, Cu₂O ince filmlerin elektrodepolama tekniği ile sentezi rapor edildi. Bazik çözeltide (pH = 9) 15 dakika süreyle – 0,5 V potansiyelde elektrodepolanan filmlerin, (111) tercihli yönelime ve $a = 4,26 \text{ Å}$ örgü parametresi ile kübik yapıda iyi kristalleştiği görüldü. Cu₂O filmlerin 2,23 eV düzeyinde doğrudan bant aralığı enerjisi ile yüksek optik geçirgenliğe (> % 70) sahip olduğu ortaya konuldu. Cu₂O'nun bazı özelliklerini belirlemek için PWSCF kullanan yoğunluk fonksiyonel teorisi uygulandı. Teorik analizler, Cu₂O'nun 2,01 eV değerinde doğrudan bant aralığına sahip olduğunu gösterdi ki bu da deneysel sonuçlarla tutarlıdır (Hssi ve ark., 2020).

Metal oksitler, fiziksel, kimyasal ve optik özellikler gibi belirgin özellikleri nedeniyle endüstride ilgi görmektedir. Bu çalışmada bakır oksit ince filmlerinin kalınlığı, film bileşimi, yapısal ve optik özellikleri üzerinde duruldu. Düşük maliyetli, ekonomik olarak uygun bir elektrodepolama tekniği, indiyum katkılı kalay oksit iletken cam altlıklar üzerinde bakır oksit ince filmler hazırlamak için kullanıldı. Yapısal özellikler, depolanan filmlerin kübik yapıda polikristal yapıya sahip olduğunu gösterdi. Ağırlık farkı yöntemi, depolanan filmlerin kalınlık aralığını bulmak için kullanıldı. Depolanan filmlerin film stokiometrisini belirlemek için enerji dağılımlı X-ışını analizi yapıldı. Optik özellikler, depolanan filmlerin yaklaşık 2,42 eV bant aralığı değerine sahip olduğunu gösterdi (Kumar ve ark., 2020).

Bakır oksit (Cu₂O) ince filmleri, köşeli cam altlıklar üzerinde kimyasal banyo depolama yoluyla sentezlendi. İnce filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri üzerine kompleks oluşturu maddenin ve depolama süresinin etkisi araştırıldı. Kompleks oluşturu madde trietanolaminin (TEA), yalnızca Cu₂O'nun yapışmasını ve kristalliğini arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda Cu⁺ iyonlarının salınımını düzenleyerek kalınlığı kontrol etmede de önemli bir rol oynadığı bulundu. Kompleksleştirici ajanın artması ve depolama sürelerinin uzaması, daha kalın filmler üretilmesine neden oldu. Kalınlığın tercihli yönelim ile güçlü bir ilişkiye sahip olduğu bulundu. Daha ince filmler (50 – 100 nm), kalınlık arttıkça (200) düzlemine değişen (111) düzlemi boyunca yönelim sundu. Film kalınlaştıkça elektriksel iletkenliğin azaldığı görüldü. 50 ve 920 nm için sırasıyla $10 \text{ (ohm}\cdot\text{cm)}^{-1}$ ve $10^{-4} \text{ (ohm}\cdot\text{cm)}^{-1}$ değerleri kaydedildi. Başta Cu boşlukları olmak üzere yapısal kusurların, elektriksel özellikler üzerindeki değişikliklerden sorumlu olduğu ve Urbach enerji (AB) bozukluğuyla ilişkili olabileceği düşünüldü. Tercihli yönelim (111) düzleminden (200) düzlemine geçtiğinde EU'da bir azalma gözlemlendi, bu da daha az düzensizlik ve dolayısıyla daha az kusur anlamına gelmektedir, bu durumunda öz direnci artırdığı görüldü (Vallejo ve ark., 2022).

Bakır (I) oksit (Cu₂O), *p*-tipi iletkenlik ve dar bant gibi olumlu özellikleri nedeniyle fotoelektrokimyasal sistemlerde fotokatotlar için en umut verici adaylardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, Cu₂O ince filmleri, 0,2 M CuSO₄ ve 3 M laktik asit (pH = 12) içeren banyoda, SCE'ye karşı – 0,5 V'luk potansiyelde 1 saat boyunca üç farklı sıcaklıkta (20 °C, 40 °C, ve 60 °C) FTO kaplı cam üzerine fotoelektrokimyasal olarak depolandı. Elde edilen malzemeler SEM/EDS, XRD, UV-vis DRS ve EIS ölçümleri dâhil olmak üzere çeşitli teknikler kullanılarak

karakterize edildi. Elektrodepozisyon sıcaklığının artırılmasının yalnızca oksit büyüme hızında bir artışa neden olmadığı, aynı zamanda kristalit yönelim tercihinin etkilendiği gözlemlendi [(111) düzleminin daha yüksek tercih edilen yönelimi yüksek sıcaklıklarda gözlemlendi]. Fotoelektrokimyasal ölçümler, büyük olasılıkla yüksek malzeme dokusunun yanı sıra depolama kalınlığının büyüklüğü nedeniyle, çalışılan en yüksek sıcaklıkta (60 °C) sentezlenen FTO/Cu₂O katodun üstün performansını onayladı. Aksine optik ve elektrokimyasal bant aralıklarının biriktirme sırasında uygulanan sıcaklıktan bağımsız olduğu bulundu. Son olarak, güneş ışığı kaynaklı amonyak sentezi için bu tür elektrokimyasal olarak sentezlenmiş FTO/Cu₂O fotokatotların kullanılma olasılığı da gösterildi (Syrek ve ark., 2022).

Bu çalışmada, SnO₂:F (FTO) altlıklar üzerine elektrodepolanmış Cu₂O ince filmlerinin morfolojisi, mikro yapısı ve optik özelliklerinin kapsamlı bir analizi sunuldu. Filmler, farklı pH seviyelerinde (9 ve 12) ve sıcaklıklarda (40, 45, 50, 55, 60 ve 65 °C) galvanostatik yöntem kullanılarak sentezlendi. Kullanılan karakterizasyon teknikleri arasında taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM), X-ışını kırınımı (XRD), Raman ve UV-vis spektroskopisi, fotoluminesans (PL) ve elektrokimyasal ölçümler yer aldı. Ayrıca, sentez ortamının büyüme süreci üzerindeki etkisini araştırmak için Wulff teoremine dayalı teorik bir çalışma yürütüldü. Elde edilen filmler, tekdüzelik, tekrarlanabilirlik, kararlılık, saflık (sadece Pn3m Cu₂O fazı) ve kristalinite sergiledi. Ayrıca, çeşitli morfolojilere (kübik ve oktahedron, kesik veya kesiksiz), büyüme yönelimlerine [(111) veya (100)], nispeten yüksek yoğunlukta bakır boşluklarına ve yük taşıyıcısına sahip ince filmler elde ederek, fotokataliz, fotovoltaiik hücreler, fotoelektrokimya ve diğer ileri teknolojilerdeki uygulamalar için çok işlevli yarıiletken malzemelerin keşfine önemli bir katkı sağladı (Gonçalves ve ark., 2023).

Yıllar boyunca Cu₂O veya CuO ve CuO veya Cu₂O nanopartikülleri bilimsel çalışmalarda büyük ilgi gördü. CuO ve Cu₂O nanopartikülleri, elektrodepolama, metalik püskürtme, hidrotermal, termal ayrıştırma, reaktif radyo frekanslı magnetron püskürtme yöntemi, ıslak kimyasal, sulu çöktürme, eş-çöktürme, ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyon yöntemi, yanma yöntemi, reaktif magnetron püskürtme ve sprej pirolizi dâhil olmak üzere çeşitli işlemler kullanılarak oluşturuldu. Bu incelemede, sentez yöntemlerinin nanomalzemelerin boyutlarını, morfolojilerini ve şekillerini nasıl etkilediğini tartışıldı. CuO ve Cu₂O nanopartiküllerini oluşturmak için kullanılan koşullar ve yöntemler, bunların nasıl doğrudan etkilendiğini gösterdi. CuO nanopartikülleri olağanüstü antibakteriyel, antioksidan ve boya bozunma fotokatalitik yeteneklerine sahipti. CuO ve CuO:Zn nanopartikülleri biyoteknolojik ve tarımsal alanlarda antibakteriyel ajan olarak kullanılma potansiyeline sahipti ve CuO millerinin endüstriyel atık su arıtımında fotokatalizör olarak kullanımı mümkündü. Yüksek performanslı glikoz sensörleri CuO nanopartikülleri kullandı. Optimize edilmiş Cu₂O filmlerinin bant aralığı 2,34 eV olup, bu durum onları güneş pili uygulamaları için uygun hale getirdi. Güneş pili uygulamaları için daha kalın filmler kullanabilmesine rağmen, yük transferi uygulamalarına 100 nm'den daha az kalınlığa sahip daha ince filmler en iyi şekilde hizmet

edmektedir. Bir Cu_2O filmi, kimyasal banyo depolama işlemi kullanılarak yapılan yarıiletken ince filmler için bir altlık olarak ve ikinci tabakanın cam altlıklara yapışmasını artırmak için bir elektrokromik malzeme olarak kullanılabileceği düşünüldü (Okoye ve ark., 2023).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Cu_2O yarıiletken ince filmleri birden fazla değişik yöntemlerle elde edilebilmekte olup, yapmış olduğumuz tez çalışmasında bu filmleri üretmek için sıralı (ardışık) iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu olarak adlandırılan SILAR yöntemi kullanılmıştır.

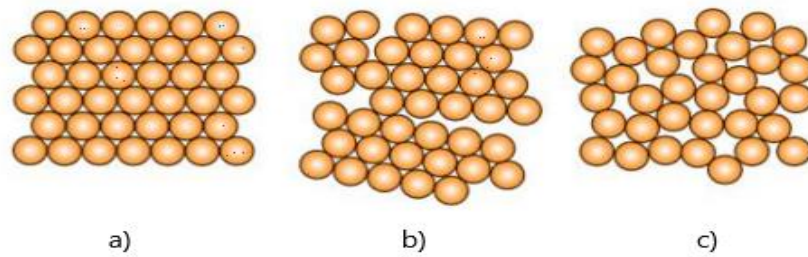
Çalışmamızın bu kısmında, Cu_2O yarıiletken ince filmlerin üretim süreci ve elde edilen filmlerin fiziksel özelliklerini incelemek amacıyla kullanılan ölçüm sistemlerinin yanı sıra bunlarla ilgili temel bilgilere de yer verilmiştir.

3.1. Katıların Kristal Yapısı

Katılar, atomların malzeme içerisindeki dizilimlerine bağlı olarak sınıflandırılabilir: Amorf, tek-kristal ve polikristaller. Her malzeme, kendi içerisindeki düzenli bölgelerin boyutlarına göre karakterize edilebilir. Bir düzenli bölge, atom ve atom gruplarının oluşturduğu moleküllerin geometrik olarak düzenli ya da periyodik olarak dizilmeleri ile oluşturdukları uzaysal bir hacimdir. Katı malzemeleri meydana getiren atomların, üç boyutlu ve periyodik şekilde sonsuz sayıda tekrarlanması sonucu oluşturdukları bu yapıya kristal adı verilir. Kristal katılar atom, iyon veya moleküllerden oluşan ve oldukça düzenli yapılara sahip olan katılardır (Neamen, 2011).

Kristal yapılarda dikkat çeken en önemli özelliklerden birisi simetridir. Bir kristal yapıyı incelediğimizde gerek dış görünümünde, gerekse de malzeme içerisindeki atomların yerleşiminde çok açık bir simetri özelliği vardır. Katı malzemelerin kristalleşme durumları incelendiğinde, atomlar arası uzun mesafelerin olduğu söylenebilir ancak böyle bir durum söz konusu değilse kristalleşme durumlarından söz etmek mümkün olmayacaktır (Subaşı, 2020).

Amorf katılar, çeşitli büyüklükte rastgele parçacıklardan oluşan ve belirli bir düzenli yapıya sahip olmayan katılardır. Bundan dolayı bu tür malzemelerde kesinlikle kristal özellik bulunmaz. Amorf malzemelerde düzen sadece birkaç atom veya atom mertebesinde iken, polikristallerde atom ve moleküllerin boyutlarındaki düzenlilik daha yüksek mertebelerdedir (Neamen, 2011). Amorf, polikristal ve tek-kristal malzemelerin iki boyutlu gösterimleri Şekil 3.1’de görülmektedir.

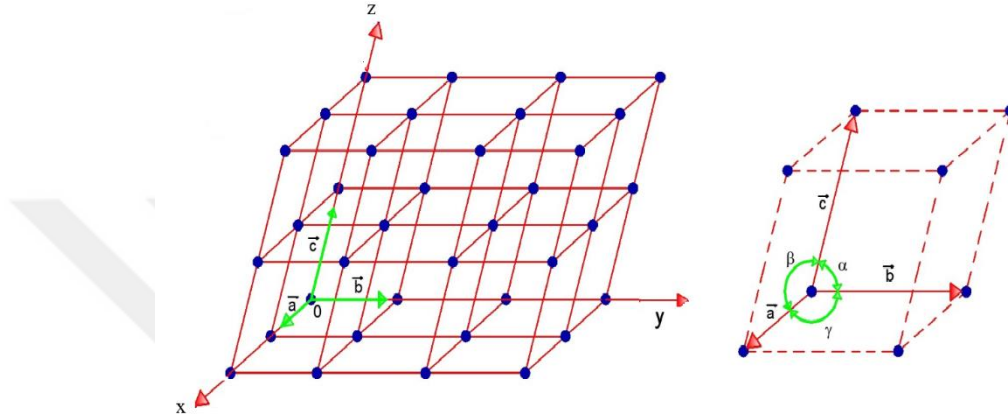


Şekil 3.1. Kristal malzemelerde atom dizilişleri a) Tek kristal b) Polikristal c) Amorf yapı (Özcandan, 2018)

3.1.1. Kristal Sistemleri ve Bravais Örgüleri

İdeal bir kristal, özdeş atom gruplarının uzayda birbiri ardına, üç boyutlu bir şekilde periyodik olarak, eşit aralıklarla ve aralarında belirli bir mesafe bırakarak sonsuz sayıda tekrarlanması sonucu meydana gelmiştir. Bu genel ağ yapısına kristal örgü ve iki atom arasındaki ortalama uzaklığa ise kristal örgü sabiti adı verilmektedir (Akat, 2012).

Örgüde alınan bir noktadan çıkan üç boyutta $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$ vektörlerinin kristal içerisinde belirlediği hacme birim örgü hücresi denir ve bir örgü üç temel öteleme vektörü ile ifade edilmektedir (Kırmızıgül, 2008).



Şekil 3.2. a) Basit örgü ve b) Birim hücre (Caferov, 1998)

Örgü öteleme vektörleri kullanılarak basit kristaldeki herhangi bir örgü noktasının yeri;

$$\vec{r} = u.\vec{a} + v.\vec{b} + w.\vec{c} \quad 3.1$$

denklemleri ile verilmektedir. Burada u, v ve w her değeri alabilen tamsayılarıdır ve orijinin seçimi keyfi olduğu için u, v, w tamsayıları pozitif tamsayılar olarak seçilecektir. Herhangi bir örgü noktası bu üçlü ile gösterilir (Ulutaş, 2009).

Eşitlik (3.1) ile verilen $\vec{r}$ noktalarının oluşturduğu topluluğa örgü adı verilir. Bir kristali, örgü ve bazdan oluşan iki ayrı parça gibi düşünebiliriz. Bir örgünün düğüm noktalarında bulunan atomlar grubuna ise baz adı verilmektedir. Bir bazın uzayda tekrarlanması sonucunda da kristal yapı meydana gelmektedir (Koç, 2010).

$$\text{Örgü} + \text{Baz} = \text{Kristal Yapı}$$

$\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$ vektörleri birbirlerine dik olabilecekleri gibi, aralarında farklı açı değerleri de oluşabilir. Kristalin örgü parametreleri, bu vektörlerin uzunlukları ile aralarındaki açılara bağlı olarak oluşturulmaktadır ve bu parametreler kristalin özelliklerini tanımlamakta kullanılmaktadır (Özaslan, 2016).

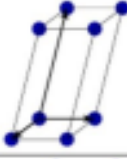
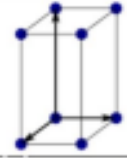
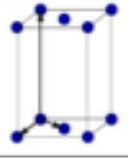
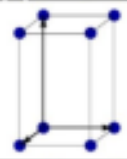
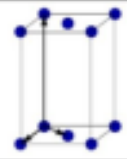
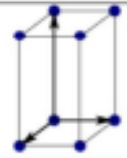
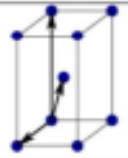
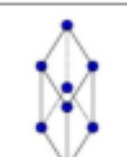
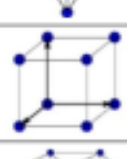
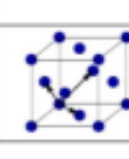
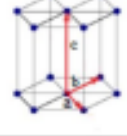
Kristallerdeki örgü kavramını açıklayan ilk gösterim, 1848 de Bravais tarafından bulunmuştur ve bu yapılar Bravais Örgüleri olarak adlandırılmıştır. Bravais, atomların birim hücrelerin köşelerinde bulunması ile oluşan yedi birim hücrenin değişik konumlarında (yüzeylerinde, hacim merkezlerinde) da başka noktaların bulunması ile en fazla on dört çeşit nokta örgü olabileceğini ispatlamıştır (Özaslan, 2016).

Bir birim hücreyi karakterize etmek için altı parametreye ihtiyaç duyulmaktadır: hücrenin kenar uzunlukları a, b, c ve onların arasındaki açılar α, β, γ (Şekil 3.2). $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ değerleri örgü parametreleri olarak tanımlanır.

Örgüyü oluşturan tüm birim hücrelerin hacmi ve biçimi aynıdır. Doğada şimdiye kadar gözlenen kristal eksenleri, aralarındaki açı değerlerine ve uzaklıklara bağlı olarak sınıflandırılırsa: Kübik, tetragonal, hekzagonal, rombohedral, ortorombik, monoklinik ve triklinik (Ulutaş, 2009).



Çizelge 3.1. Kristal Sistemleri (Usta, 2010)

Bravais Örgüsü	Parametreler	Basit	Cisim merkezli	Taban merkezli	Yüzey merkezli
Triklinik	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$				
Monoklinik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$				
Ortorombik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Tetragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Trigonal (rombohedral)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$				
Kübik	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Hekzagonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$				

Katıların kristal örgüsünün yapısının belirlenmesinde, yani bir başka deyişle a, b, c örgü parametrelerinin ve α, β, γ açılarının belirlenmesinde, X-ışınları, elektron ışınları ve nötron ışınları kırınımı gibi yöntemlerden yararlanılmaktadır (Kırmızıgül, 2020).

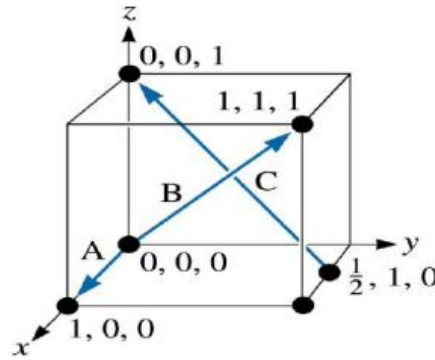
3.1.2. Miller İndisleri

Kristal yapı, atomun bir üst seviyesinde incelenen ve atomların katı halde oluşturduğu düzeni ifade eden, birim hücrenin (kafes) geometrik parametreleri ve atom dizilimi ile tarif edilen bir kavramdır. Kristal yapıların özelliklerini daha iyi anlamak ve bunları açıklayabilmek için kristal yapı içerisinde düzlem ve doğrultu kavramlarını iyi tanımlamak ve birim hücre içinde belirli bir nokta, doğrultu veya düzlem üzerinde analiz yapmak gerekebilir. Kristal yapıların analizlerini yapabilmek için ise, kristalografik doğrultuları ve düzlemleri belirleyecek özel bir gösterim şekline

ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için “Miller İndisleri” olarak adlandırılan bir gösterim şekli kullanılmıştır. Bu yöntem İngiliz Kristalograf W.H. Miller tarafından ilk defa öne sürüldüğü için kendi ismi ile ifade edilmiştir (Cullity, 1967).

Kristal yapılarda, düzleme ait Miller indisleri “()” biçiminde parantez ile doğrultulara ait Miller indisleri ise “[]” şeklinde köşeli parantez ile gösterilir. Basit örgüdeki herhangi bir düğümün yeri üç koordinat (x, y, z) ile belirlenir.

Kristal yapıların birçok özelliği, kristal doğrultusuna bağlı olarak farklılıklar gösterebilir. Bir kristal doğrultusu, biri koordinat sisteminin orijinden başlayan ve bir sonraki birim hücre köşesinde veya yüzeyinde sonlanan bir doğrultu vektörünün çiziminden yararlanılarak tanımlanır. Bu vektör $[u\ v\ w]$ şeklinde gösterilir. Burada u, v ve w ile ifade edilen sayılar doğrultu indisleri olup, sırasıyla vektörün x, y ve z eksenleri üzerindeki indirgenmiş izdüşümleridir. u, v ve w ‘nin değerleri ne olursa olsun, uygun bir sayı ile hepsini birden çarparak ya da bölerek en küçük tam sayılara dönüştürülür. Burada negatif indisleri belirtmek için, sayının üstüne $(-)$ çizgi yerleştirilerek yazılır (Cullity, 1967).

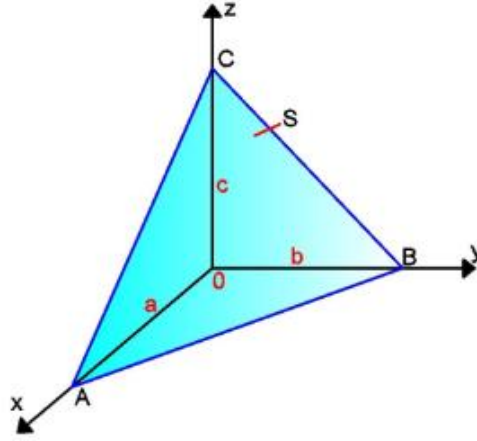


Şekil 3.3. A[1 0 0], B[1 1 1], C[$\bar{1}$ $\bar{2}$ 2] doğrultu indisleri

(https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/196927/mod_resource/content/3/Bolum_5.pdf)

Düzlemlerin kristal yapılar içerisindeki yeri, miller indisleri kullanılarak belirlenir. Şekil 3.4’de gösterilen xyz koordinat sistemini göz önüne aldığımızda, bu koordinat sisteminin orijini, kristal örgüsünün herhangi bir düğüm noktasına yerleşmektedir.

Kristal kafes düzlemleri üç Miller indisi ile $(h\ k\ l)$ şeklinde belirtilir. Burada h, k ve l indisleri sırasıyla, düzlemin x, y ve z eksenlerine ait indislerdir. Düzlemin eksenleri kestiği noktaların orijine olan uzaklıkları a, b ve c kafes parametreleri türünden belirlenerek çarpma işlemine göre tersleri alınır. İndislerin tamamı uygun bir sayı ile çarpılarak ya da bölünerek en küçük bir tamsayı olacak şekilde ifade edilirler (Cullity, 1967).



Şekil 3.4. S düzleminin xyz koordinat sisteminde gösterimi (Kırmızıgül, 2020)

Şekil 3.4’de gösterilen ABC (S) düzlemiyle x, y, z eksenlerinde kesilen parçalar,

$$m = \frac{OA}{a}, n = \frac{OB}{b}, p = \frac{OC}{c} \text{ dir.}$$

Burada düzlem denklemi,

$$\frac{x}{m} + \frac{y}{n} + \frac{z}{p} = 1 \quad 3.2$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemin tüm terimleri ortak paydaya (bölene) (D) getirilirse ve sonra payda atılırsa, (3.3) eşitliği aşağıdaki şekli alır:

$$hx + ky + lz = D \quad 3.3$$

Genellikle, düzlemler arası uzaklık (veya düzlem mesafesi) d , düzlem takımının indisleri ve örgü parametreleri ile belirlenmektedir. Herhangi bir $(h \ k \ l)$ düzlem takımı içinde sırasıyla komşu iki düzlem arasındaki uzaklık (d) aşağıdaki denklemlerden belirlenebilir:

$$\text{Kübik} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad 3.4$$

$$\text{Tetragonal} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad 3.5$$

$$\text{Hekzagonal} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad 3.6$$

$$\text{Ortorombik} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad 3.7$$

$$\text{Monoklinik} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2 \sin^2 \beta} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2 \sin^2 \beta} - \frac{2hl \cos \beta}{ac \sin^2 \beta} \quad 3.8$$

$$\text{Rombohedral} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{[(h^2 + k^2 + l^2) \sin^2 \alpha + 2(hk + kl + hl)(\cos^2 \alpha - \cos \alpha)]}{a^2(1 - 3\cos^2 \alpha + 2\cos^3 \alpha)} \quad 3.9$$

$$\text{Triklinik} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{1}{V^2} (S_{11}h^2 + S_{22}k^2 + S_{33}l^2 + 2S_{12}hk + 2S_{23}kl + 2S_{13}hl) \quad 3.10$$

Burada, $S_{11} = b^2 c^2 \sin^2 \alpha$, $S_{22} = a^2 c^2 \sin^2 \beta$, $S_{33} = a^2 b^2 \sin^2 \gamma$, $S_{12} = abc^2 (\cos \alpha \cos \beta - \cos \gamma)$, $S_{23} = a^2 bc (\cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha)$, $S_{13} = ab^2 c (\cos \gamma \cos \alpha - \cos \beta)$ 'dir.

V birim hücrelerinin hacmi;

$$\text{Kübik} \quad V = a^3 \quad 3.11$$

$$\text{Tetragonal} \quad V = a^2 c \quad 3.12$$

$$\text{Hekzagonal} \quad V = \frac{\sqrt{3} a^2 c}{2} = 0.866 a^2 c \quad 3.13$$

$$\text{Ortorombik} \quad V = abc \quad 3.14$$

$$\text{Monoklinik} \quad V = abc \sin \beta \quad 3.15$$

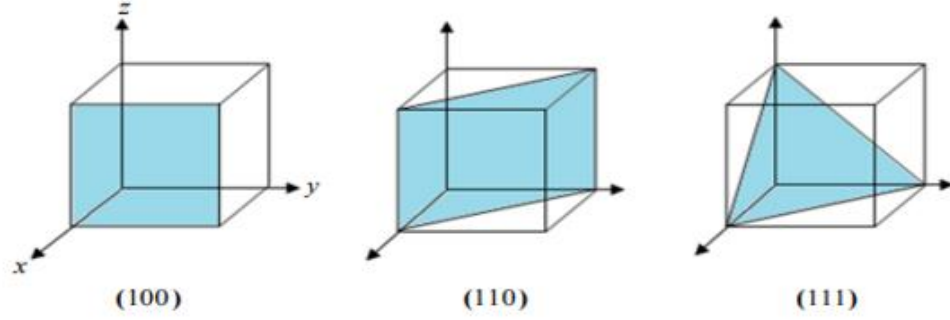
$$\text{Rombohedral} \quad V = a^3 \sqrt{1 - 3 \cos^2 \alpha + 2 \cos^3 \alpha} \quad 3.16$$

$$\text{Triklinik} \quad V = abc \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma} \quad 3.17$$

İki $[h_1 \ k_1 \ l_1]$ ve $[h_2 \ k_2 \ l_2]$ doğrultuları veya $(h_1 \ k_1 \ l_1)$ ve $(h_2 \ k_2 \ l_2)$ düzlemleri arasındaki φ açısı bir kübik kristal için;

$$\cos \varphi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)}} \quad 3.18$$

olarak bulunur (Kırmızıgül, 2020).

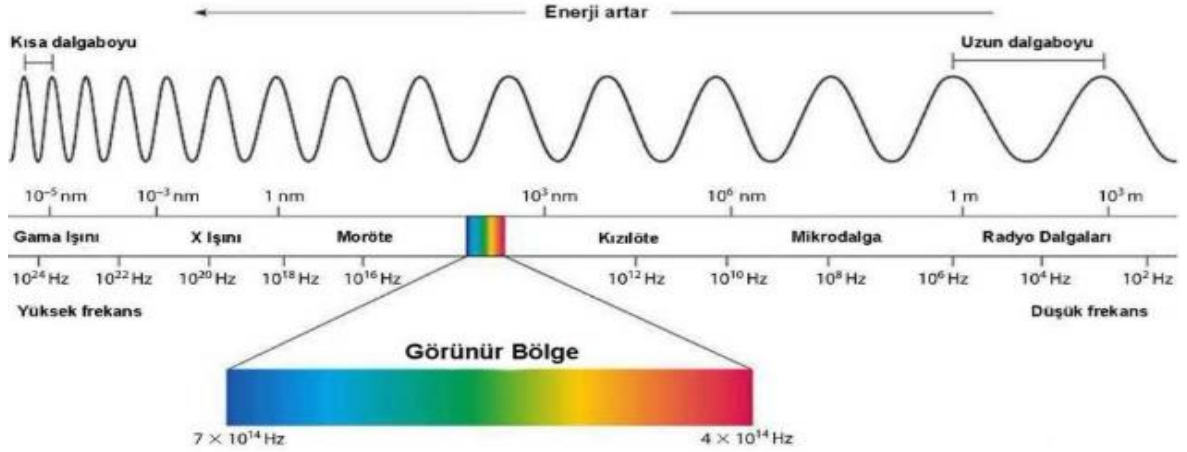


Şekil 3.5. Miller indisleri ile birim hücredeki bazı kristal yüzeylerinin gösterimi (Usta, 2010)

3.1.3. Kristalografik Yapı Analizi ve X-ışınları

Katıların kristal yapısı hakkında bilgi edinebilmek için, malzemelerin hem mikroskopik hem de makroskopik açıdan incelenmesi gerekmektedir. Katıların kristal yapısını inceleme çalışmalarında görünür ışık kullanılmamaktadır. Bunun nedeni, görünür ışığın dalga boyunun, kristal yapının atom ve molekülleri arasındaki boşluklara kıyasla oldukça büyük olmasıdır. Bunun yerine, dalga boyları görünür ışığa kıyasla çok daha küçük olan X-ışını, nötron ve elektronlar kullanılmaktadır. X-ışınları, bunlar içerisinde en fazla tercih edilendir (Kırmızıgül, 2020).

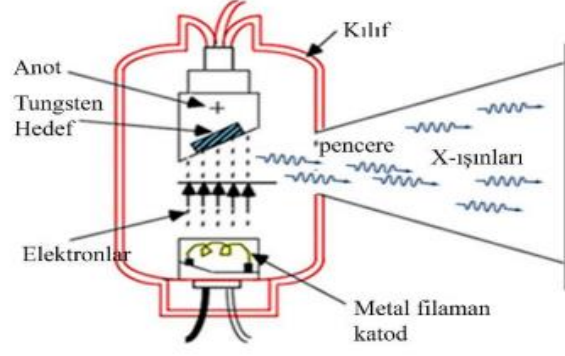
X-ışınları, ivmeli yüksek enerjili elektronların metal hedefteki atomlarla çarpışarak yavaşlamasıyla veya bu çarpışmalarla atomların iç yörüngelerindeki elektronların elektronik geçişleriyle oluşan dalga boyu $10^{-1} - 10^2 \text{Å}$ arasında değişen (kısa dalga boylu) elektromanyetik ışınlardır. X-ışınları ilk olarak 1895 yılında Alman fizikçi W.C. Röntgen tarafından keşfedilmiştir. Bu yüzden bu ışınlar “Röntgen Işınları” olarak da ifade edilmektedir. Şekil 3.6’daki elektromanyetik spektruma bakıldığında X-ışınlarının, γ -ışınları ile mor ötesi (ultraviyole) bölge arasında yer aldığı görülmektedir (Ulutaş, 2009).



Şekil 3.6. Elektromanyetik Spektrum (<https://muhendistan.com/elektromanyetik-radyasyon-nedir/>)

Dalga boyları küçük, giricilik dereceleri fazla olan X-ışınlarına “sert X-ışını”, dalga boyları büyük, giricilik dereceleri az olan X-ışınlarına ise “yumuşak X-ışını” denir. Kristalografide $0,5 - 2,5 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip yumuşak X-ışınları, radyolojide ise $0,5 - 1 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip sert X-ışınları kullanılmaktadır.

X-ışını elde etmek için, havası boşaltılmış (vakumlu) cam tüpün içerisinde bir ucunda, elektrik akımı geçirilerek ısıtılmış iletken telden oluşan katot (negatif) elektrot, diğer ucunda ise ısıya dayanıklı hedef metal olarak anot (pozitif) elektrot bulunan X-ışını tüpü kullanılır. X-ışını tüpü, yüksek voltajlı bir katot ışını tüpüdür. Katot, ısıtıldığında ortama elektron salan tungsten materyalinden yapılmış bir flamandır. Anot ise, kalın bir çubuktan oluşur ve bu çubuğun ucunda bir metal hedef bulunmaktadır. Anot metali olarak genellikle Cu, Mo, Ni, Fe vb... materyalleri kullanılmaktadır. Anot ve katot arasında yüksek voltaj uygulandığında tungsten flamandan elektron yayınlanmaya başlar. Yayınlanmaya başlayan bu elektronlar yüksek gerilim altında anottaki hedef metale doğru hızlandırılır. Metal hedefe yüksek hızla çarpan bu elektronlar, hedefe çarptıklarında enerjilerini aktararak bir foton yayınlanmasına neden olur ve hedef metalin X-ışınlarının sürekli spektrumunu ortaya çıkarır. Oluşan X-ışını demeti, Şekil 3.7’de gösterilen ince cam pencereden geçer ve bu ışınların dalga boyu tüp gerilimine bağlı olarak değişmektedir. Bu durum, hedefte bulunan metalin cinsinden tamamen bağımsızdır. Örneğin; tungsten ve molibden hedef metallerine, 35 kV büyüklüğünde bir gerilim uygulandığında elde edilen spektrumların dalga boylarının, aynı değere sahip olduğu görülmüştür (Sun, 2022). Uygulamaların çoğunda tek dalga boylu X-ışını demeti kullanılması önerilmektedir ve bu amaçla hem filtreler ve hem de monokromatörler kullanılmaktadır.



Şekil 3.7. X-ışını tüpü (Sun, 2022)

X-ışını demetindeki en büyük enerjiye sahip olan fotonun enerjisi, kendisini meydana getiren elektronun kinetik enerjisinin büyüklüğüne eşit olacaktır. Bir X-ışını fotonunun enerjisi ile onun dalga boyu arasındaki ilişkiyi gösteren Einstein bağıntısı aşağıdaki eşitlikle verilmiştir (Özaslan, 2016):

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad 3.19$$

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{E} = \frac{12398\text{\AA}}{kV} \quad 3.20$$

3.1.4. X-ışınları Kırınımı (XRD) ve Bragg Yasası

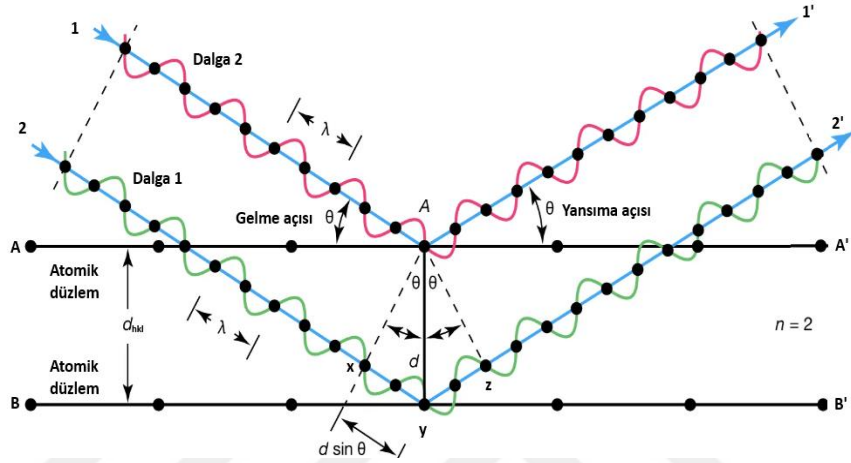
Kristal yapı, üç boyutlu uzayda periyodik olarak tekrarlanan bir yapının atom ve atom gruplarından oluşmuş bir katı olarak ifade edilmektedir. Yüksek çözünürlüğe sahip elektron mikroskopları kullanılarak bir malzemenin atomik yapısını görüntülemek mümkün olsa da, malzemelerin kristal yapılarını belirtmek veya malzemeye ait yapısal parametreleri tayin etmek için çeşitli kırınım teknikleri kullanılmaktadır. Katıların kristal yapılarını incelemek için en çok kullanılan kırınım tekniği X-ışını kırınımıdır. Kristal yapı ve bu yapı içerisindeki atomların dizilişleri ilk kez Max van Laue tarafından X-ışını kırınım desenleri kullanılarak incelenmiştir (Subaşı, 2020).

X-ışını kırınım tekniği ile filmlerin kalınlıkları, kimyasal bileşimleri, amorflik, tek kristal ya da polikristal durumları, kristal yapı bozuklukları, kristal içerisinde bulunabilecek katkı atomları, kristalografik yönelimleri, örgü parametreleri, tane boyutu ve benzeri pek çok özellikleri incelenebilmektedir (Kırmızıgül, 2020).

X-ışını kırınımı olayında, tek dalga boyulu (monochromatic) X-ışını demetleri bir kristal üzerine gönderildiğinde kristale ulaşan X-ışını demetleri kristal atomlarına ait elektronlarla etkileşime girecektir. Bu ışınlardan bir kısmı saçılmaya uğrarken, bir kısmı da atomların yörüngesinde bulunan elektronlar tarafından absorbe edilecektir. Saçılmaya uğrayan belirli yönlerdeki bazı ışınlar aynı fazda olması durumunda birbirlerini kuvvetlendirerek yapıcı bir girişim

meydana getirirken, bir kısmı da aynı fazda olmamasından dolayı birbirlerini sönümleyecek ve yıkıcı bir girişimin oluşmasına neden olacaktır (Subaşı, 2020).

W. L. Bragg tarafından geliştirilen teori, X-ışınları kırınım teorileri içinde en yaygın olarak kullanılandır. Aralarında “ d ” kadar mesafe bulunan kristal düzlemlerinden saçılan “ λ ” dalga boylu X-ışınları, “ θ ” açısını oluştururlar. Deneysel parametre olan 2θ değeri ise saçılan ve geldiği doğrultusunda devam eden X-ışınları demeti arasındaki açıdır. Birbirine paralel bütün kristal düzlemler arasındaki mesafe d kadardır.



Şekil 3.8. Bragg Yasası (<https://www.britannica.com/science/Bragg-law>)

İki X-ışını ışın demeti 1 ve 2, kristalin içindeki A ve B komsu düzlemlerinden yansıtılır ve 1' ve 2' yansıyan ışın demeti görülür. 2-2' ışın demeti, 1-1' ışın demeti ile kıyaslandığında 2-2' ışın demeti xyz ekstra mesafesi boyunca yol alır. xyz mesafesi dalga boyuna eşit olmalıdır. Komsu düzlemler arası “ d_{hkl} ” mesafesi ve rastgele açılar veya Bragg açısı θ arasında paralel düzlem mesafesi xy mesafesi ile ilişkilidir.

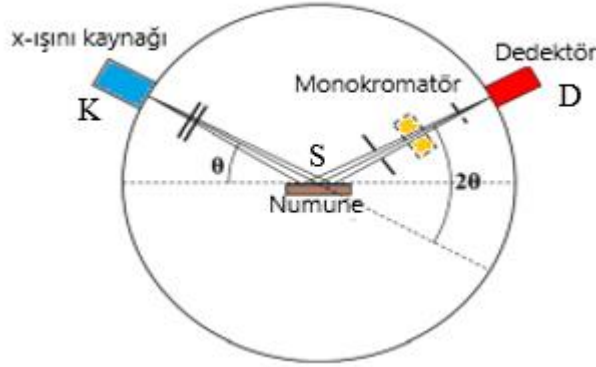
$$xy = yz = d \sin \theta \quad 3.21$$

$$xyz = xy + yz = 2d \sin \theta \quad \text{ve} \quad xyz = n\lambda \quad 3.22$$

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad 3.23$$

olmalıdır. n bir tam sayıdır. Işınlardan θ açısıyla kırınıma uğraması Bragg Yasası olarak ifade edilir ve θ Bragg açısı olarak bilinir. Kırınımın gerçekleşebilmesi için d uzaklığı $\lambda/2$ 'den daha küçük olmalıdır.

Deneyisel açıdan, Bragg yasasından iki şekilde faydalanabiliriz: İlk olarak λ dalga boyu bilinen bir X-ışını demeti kullanılarak θ açısını ölçerek kristal yapı içerisindeki farklı düzlemlerin d mesafelerini ölçmek için kullanabiliriz ki bu yapı tayini (herhangi bir malzemenin içyapısal dokusu) olarak ifade edilmektedir. Diğer taraftan kristal yapı içerisindeki d düzlemler arası mesafenin bilindiği durumlar için θ açısını ölçerek kullanılan ışının λ dalga boyunu ölçmek için kullanabiliriz ki bu X-ışınları spektroskopisi olarak bilinmektedir (Cullity, 1967).



Şekil 3.9. X-ışını difraktometresinin şematik gösterimi (Jung ve ark., 2022)

X-ışınları difraktometresinin Şekil 3.9'daki gibi şematik olarak gösterilmiştir. K tüpünden çıkan X-ışınları, difraktometrenin merkezinden geçen bir eksen etrafında döndürülerek, gelen ışın demetine göre istenilen açıda yerleştirilebilen S numunesinin üzerine düşürülür. Burada D, difraksiyona uğramış X-ışınlarını ölçen bir dedektör veya sayaçtır. K kaynağından gönderilen X-ışınları için S numunesine öyle özel durumlar verilir ki, numunenin yansıtıcı yüzeyleri ile gelen ışın arasında θ açı değerleri meydana gelir ve D dedektörü tarafından bu açılara karşılık gelen 2θ değerleri kaydedilir. İlk X-ışını spektrometresi W.H. Bragg tarafından yapıldı ve kullanıldı. İsveçli fizikçi Siegbahn tarafından daha duyarlı hale getirildi (Cullity, 1967).

3.1.5. X-ışınları Kırınım Yöntemleri

Kırınım (difraksiyon) olayının gerçekleşebilmesi için, eşitlik (3.23) ile verilen Bragg yasasına uyması gerekir. Bu eşitlik, herhangi bir kristal malzeme için verilen λ ve θ değerleri için bazı sınırlandırıcı şartlar koymaktadır. Buna göre, kırınım olayının gerçekleşebilmesi için λ ve θ değerlerinin birbirleri ile uyumlu olması gerekmektedir. Tek dalga boyulu (monochromatic) bir ışınla, bir kristal malzeme bir X-ışını demeti içine gelişigüzel yerleştirilmesi durumunda, genellikle hiç kırınım deseni meydana gelmeyecektir. Kırınım olayını gerçekleştirebilmesi için, ya λ dalga boyu ya da θ açı değerlerinin sürekli değiştirilmesi gerekmektedir (Cullity, 1967).

λ ve θ değerlerinin değişimine bağlı olarak üç temel kırınım yöntemi ifade edilmiştir:

- Laue Yöntemi λ değişken, θ sabit
- Döner Kristal Yöntemi λ sabit, θ değişken
- Toz Kırınım Yöntemi λ sabit, θ değişken

Tez çalışması kapsamında farklı altlıklar üzerinde üretilen bakır (I) oksit (Cu_2O) ve CuO (tenorit) yarıiletken ince film numunelerin kristal yapısının tespit edilebilmesi için XRD ölçümleri, Adana Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında (ÇÜMERLAB) bulunan PANalytical marka ve EMPYREAN XRD model difraktometre sistemi ($\text{CuK}\alpha_1$, $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$, 20 –50 kV, 5–60 mA, tarama hızı 2 derece/dakika) ile otomatik veri hafızası kullanılarak $10^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ aralığında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Ölçümler için Cu_2O ince film depolanmış cam ve ITO altlıklar 1 cm x 1cm boyutlarında olacak biçimde kesilmiştir.



Şekil 3.10. PANalytical EMPYREAN X-ışını Kırınımı (XRD)

3.2. Katıların Elektriksel Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

Tüm maddeler atomlardan oluşur ve atomik yapılarına göre sınıflandırılarak incelenebilir. Atom, merkezinde (+) yüklü bir çekirdek ve bu çekirdek çevresinde belirli enerji seviyelerinde (yörünge veya orbital) bulunan (–) yüklü elektronlardan oluşur. Elektronların çekirdek etrafında bulunabileceği yedi farklı enerji seviyesi bulunmaktadır. Elektronlar negatif (–) yüklüdür ve bulundukları o yörüngede sahip oldukları elektron sayılarına bağlı olarak bir potansiyel ve kinetik enerjiye sahiptir. Elektronlar atom çekirdeğine yaklaştıkça enerji seviyeleri artar ve elektronu atomdan koparmak oldukça zorlaşır. Atomların çekirdeklerinde ise, protonlar ve nötronlar bulunur (Hidrojen atomunun çekirdeğinde sadece bir proton bulunur, nötron yoktur). Protonların pozitif (+) yüklüdür ve elektron ile aynı büyüklükte yük miktarına sahiptir. Protonlar, elektronlardan kütlece 1836 kat daha büyüktür. Nötronlar ise yüksüzdür. Nötronlar yüksüz olduklarından dolayı, atom içerisinde gerçekleşen elektriksel ve kimyasal etkileşmelerde etkileri yoktur. Maddelerde

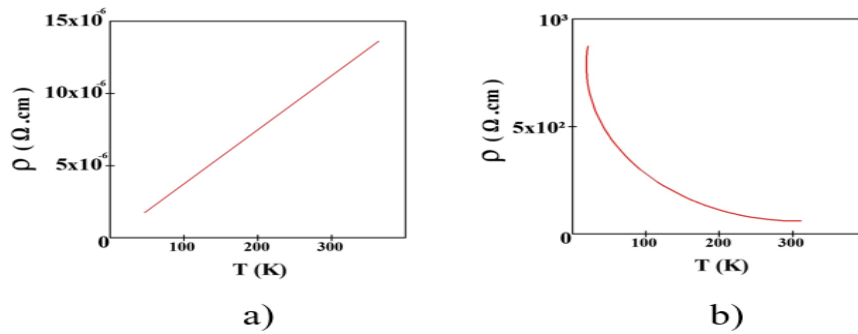
elektiriksel olayların tamamı, son orbitalde meydana gelmektedir. Atomların son yörüngelerinde bulunan elektronlarına valans elektronları veya serbest elektronlar adı verilir. Elektrik akımının oluşmasına neden olan yine bu yörüngelerde bulunan elektronlardır. Her madde az veya çok elektrik akımını iletir ve bunları endüstriyel uygulamalarda kullanabilmek için yapılacak işlemlerle, daha iyi iletken veya yalıtkan malzemeler haline dönüştürülebilirler (Selek, 2023).

Bir maddenin akıma karşı göstermiş olduğu zorluk direnç olarak tanımlanmaktadır. Maddelerin iletkenlikleri, dirençleri ile ters orantılıdır. Direnç değeri büyüdükçe maddenin içerisinde geçen akım değeri azalır, direnç değeri azaldıkça da maddeden geçen akım değeri artar. Burada bir maddenin direncinin büyüklüğü; malzemenin türüne, uzunluğuna ve kesit alanına bağlıdır. Bir malzemenin direncinin büyüklüğü, yapıldığı malzemenin türü (özdirenç) ile doğru orantılı olarak değişecektir. Özdirenç ne kadar büyükse (Sıcaklık gibi bazı etkenler sabit iken) direncin büyüklüğü de o kadar büyük olur.

Katı maddelerin elektiriksel özelliklerine (özdirenç) göre sınıflandırılmasını aşağıdaki şekilde de ifade edebiliriz:

- İletkenler $\rho = 10^{-6} - 10^{-4} \Omega\text{m}$
- Yarıiletkenler $\rho = 10^{-4} - 10^{10} \Omega\text{m}$
- Yalıtkanlar $\rho \geq 10^{10} \Omega\text{m}$

Malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak elektiriksel davranışları değişiklik gösterebilir. İletken malzemelerde sıcaklığa bağlı olarak direnci ve dolayısıyla özdirenç değeri doğrusal olarak artacaktır. Yalıtkan ve yarıiletken malzemelerde ise, sıcaklığa bağlı olarak logaritmik bir azalma meydana gelir. İletken (Fe) ve yarıiletken (Si) malzemelerin sıcaklığa bağlı özdirençlerinin değişimleri Şekil 3.11’de verilmektedir:

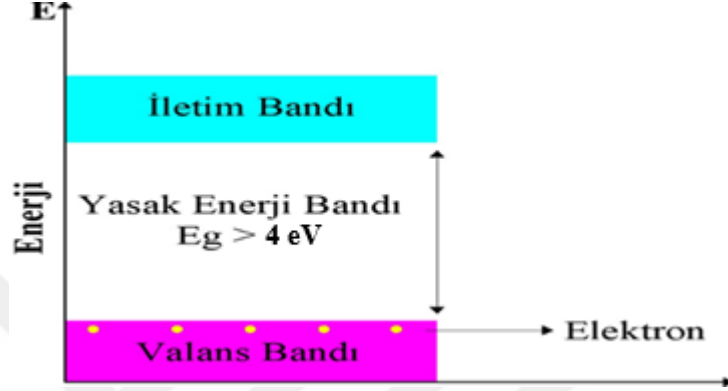


Şekil 3.11. a) İletken (Fe) ve b) Yarıiletken (Si) malzemelerin sıcaklığa bağlı özdirençlerinin değişim grafiği (Sun, 2022)

Katı malzemelerin elektiriksel özellikleri ile ilgili en önemli sınırlandırmalar, bant yapılarının (bant teorisi) tanımlanmasıyla daha iyi açıklanacaktır.

3.2.1. Yalıtkanlar

Elektrik akımını iletmeyen maddelere yalıtkan madde denir. Bir gerilim altında iletkenlikleri yok denecek kadar az olsa da madde içerisinde bir akım geçer ancak bu akım ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Yalıtkan malzemeler atom yapıları açısından incelendiğinde, son yörüngelerinde 5, 6, 7 veya 8 elektron olduğu görülmektedir ve malzemelerin yalıtkanlık derecesi son yörüngesinde (valans yörüngesi) bulunan elektron sayısı ile doğru orantılıdır (Selek, 2023).

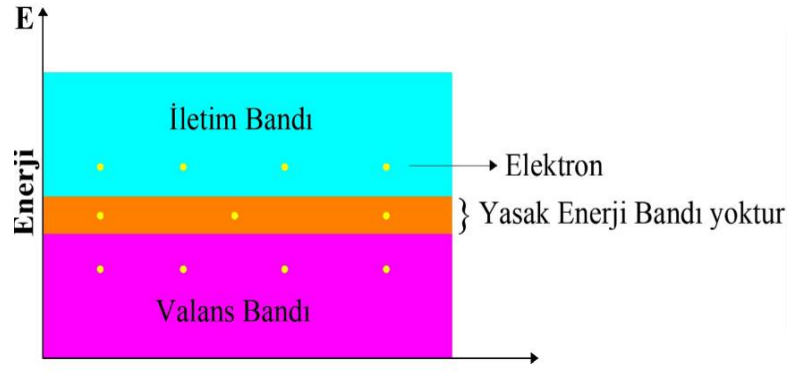


Şekil 3.12. Yalıtkan bir malzemeye ait enerji-bant diyagramı

Şekil 3.12’de bir yalıtkan malzemeye ait enerji-bant diyagramı gösterilmektedir. Bu durumu enerji bantları açısından ifade edecek olursak, iletim ve valans bantları arasında bulunan yasak enerji aralığı, dışarıdan uygulanacak enerji ile aşılamayacak kadar çok büyüktür ($E_g > 4 \text{ eV}$). Bundan dolayı bu tür malzemeler çok iyi yalıtandır. Hava, cam, seramik vb... gibi maddeler yalıtkan malzemelere örnek verilebilir (Gümüş, 1998).

3.2.2. İletkenler

Elektrik akımını iyi ileten maddelere iletken madde denir. Bir başka deyişle elektriksel iletkenlik açısından, öz dirençleri düşük olan malzemeler olarak da ifade edilebilirler. İletken malzemeler atom yapıları açısından incelendiğinde, son yörüngelerinde 1, 2 veya 3 elektron bulunduğu görülmektedir ve atomlarının son yörüngesinde bulunan valans elektron sayısının miktarı, malzemenin iletkenlik derecesini belirlemektedir. Elektron sayısı azaldıkça iletkenlik derecesi artar (Selek, 2023).

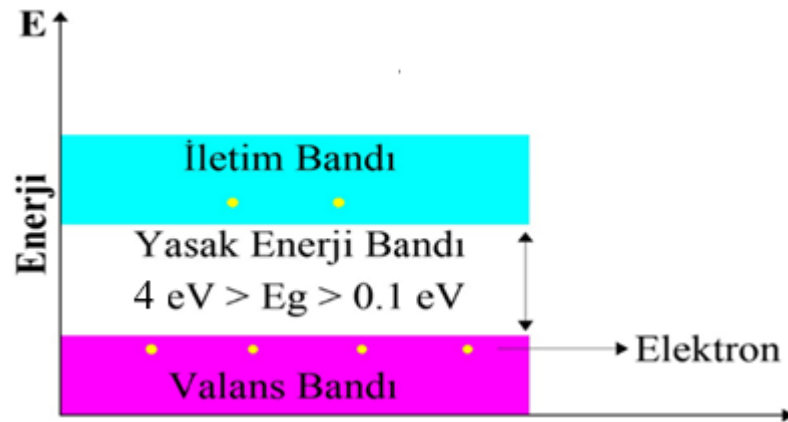


Şekil 3.13. İletken bir malzemeye ait enerji-bant diyagramı

Şekil 3.13’de bir iletken malzemeye ait enerji-bant diyagramı gösterilmektedir. İletken malzemelerde iletkenlik bandı ile valans bandı iç içe geçmiş çakışık bir durumdadır. Yani, iletken malzemelerde yasak enerji aralığı bulunmamaktadır. Dışarıdan uygulanacak çok az bir enerji ile valans bandında bulunan elektronlar rahatlıkla iletim bandına geçebilirler ve burada serbest elektron haline dönüşürler. İletim bandında bulunan serbest elektronlar bir atoma bağlı değildirler. Oda sıcaklığında iletken malzemelerde iletim bandı serbest elektronlar ile doludur. Bakır, gümüş, demir, altın vb... malzemeler elektriksel açıdan iyi iletkenlerdir (Gümüş, 1998).

3.2.3. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlik açısından incelendiğinde, iletken ve yalıtkan malzemeler arasında yer almaktadır. Yarıiletken malzemelerin saf ve kusursuz kristalleri, mutlak sıfır sıcaklığında ($T = 0$ K) yalıtkandır ve bu sıcaklık değerinde enerji-bant diyagramları yalıtkanların enerji-bant diyagramları ile benzerlik gösterir. Şekil 3.14’de yarıiletken bir malzemeye ait enerji-bant diyagramı verilmektedir.



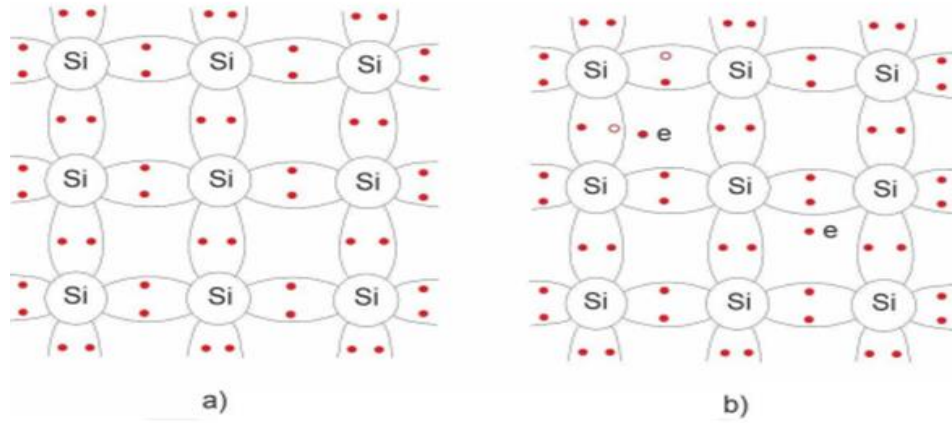
Şekil 3.14. Yarıiletken bir malzemeye ait enerji-bant diyagramı

Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı ($E_g \approx 0.1 \text{ eV} - 4 \text{ eV}$) ise, yalıtkan malzemelerden farklı bir yasak enerji aralığına sahiptir (Bulun, 2010). Bir yarıiletken malzemenin elektriksel iletkenliği sıcaklığa ve içerisindeki yabancı madde konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklık artmasına bağlı olarak, öz direncinin küçülmesi, bir yarıiletken malzemenin en belirgin özelliklerindendir. Aynı zamanda yarıiletken malzemelerde yabancı madde konsantrasyonu arttıkça, öz direnç küçülecektir. Bu durumlara bağlı olarak, yasak enerji aralığında bir azalma meydana gelecektir. Yarıiletken malzemeler element ve bileşik halde bulunurlar. Element yarıiletkenlere örnek olarak, IV. grup elementleri olan Karbon (C), α -Kalay (α -Sn), Germanyum (Ge) ve Silisyum (Si) gösterilebilir. Bunlar özellikleri açısından en iyi bilinen ve elektronik uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılan yarıiletkenler elementleridir. Bileşik yarıiletkenlere örnek olarak ise; III. ve V. grup bileşikleri (GaAs, InSb, GaP, InAs, GaSb vb...), II-VI grup bileşikleri (ZnS, ZnO, CdS vb...) ve IV. ve VI. grubu bileşikleri (PbTe) gösterilebilir (Dikici, 2012).

Yarıiletken malzemelerin elektriksel ve optik özellikleri, kimyasal bileşimi ve kristal yapısı ile ilgilidir. Yarıiletken malzemelerde elektriksel iletim, iletim bandında bulunan taşıyıcı elektronlar ve valans bandında bulunan boşluklar (boşluk-hole) tarafından gerçekleştirilir. Değerlik (valans) bandındaki boşlukların (hole) yoğunluğu (p) ile iletim bandındaki taşıyıcı elektronların yoğunluğu (n) birbirine eşit ise, bu tip yarıiletken malzemelere saf (intrinsic) yarıiletkenler denir. Eğer değerlik bandındaki boşlukların yoğunluğu, iletim bandındaki taşıyıcı elektronların yoğunluğuna eşit değilse, bu tip yarıiletken malzemelere katkılı (saf olmayan-extrinsic) yarıiletkenler denir (Çolak, 2010).

3.2.3.1. Saf Yarıiletkenler

Saf yarıiletken malzemeler, içerisinde herhangi bir yabancı atomun olmadığı kusurlarından arındırılmış malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Subaşı, 2020). Saf (katkısız) yarıiletken malzemelerde, mutlak sıfır sıcaklığında ($T = 0 \text{ K}$) iletim bandı boş durumdadır ve yalıtkandırlar. Sıcaklık mutlak sıfır sıcaklığın üzerine çıktığında elektronların enerjisinde bir artış meydana gelir ve bu artış yasak enerjiye ulaştığı anda elektronlar valans bandından iletim bandına doğru harekete geçecektir ve elektronların valans bandında boşalttığı bölgelerde boşluklar meydana gelecektir. Boşlukların ve elektronların yükü aynı değere sahip olup, zıt işaretlidir. Valans bandında oluşan boşluklar, yine valans bandı içerisinde bulunan elektronlar tarafından doldurulur ve bu elektronların yerinde yeni boşluklar meydana gelir. Bu şekilde boşlukların hareketinden bahsedebiliriz. Yarıiletken malzemelerde elektriksel iletim, hem elektron hem de boşluklar tarafından sağlanır (Aker, 2019).



Şekil 3.15. Silisyum örgüsünde atomlar arası bağların gösterimi: a) $T = 0$ K, b) $T > 0$ K (Sun, 2022)

3.2.3.2. Katkılı Yarıiletkenler

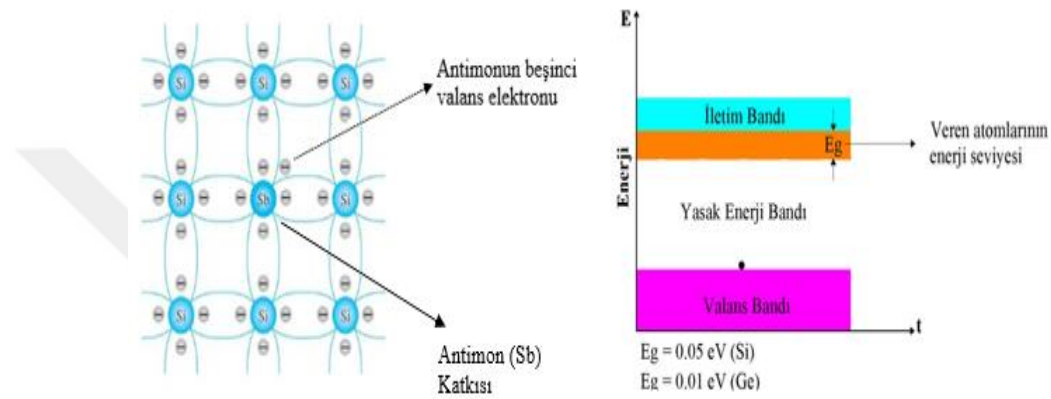
Yarıiletken malzemeler içerisine farklı katkı atomlarının belli oranda eklenmesiyle, bu malzemelerin elektriksel özellikleri üzerinde elektronik uygulamalar için istenilen değişiklikler elde edilebilir. Periyodik tablodaki IV. grup elementlerinden olan Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge), en çok bilinen yarıiletken elementlerdir. Bu elementlerin atomlarının son yörüngelerinde dört elektron bulunmaktadır ve bu elektronlar kovalent bağ ile birbirlerine bağlanmak suretiyle ortaklaşa kullanılmaktadır. Silisyum ve germanyum saf kristallerinin içerisine bazı katkı malzemeleri eklenerek iletken özellikleri değiştirilebilir. Yarıiletken malzemeler içerisine katkılanan bu atomlara safsızlık atomları (impurity) adı verilmektedir. Yarıiletken malzeme içerisindeki çoğunluk taşıyıcıları da ya elektronlar ya da deşikler olacaktır. *p*-tipi ve *n*-tipi yarıiletkenleri, germanyum veya silisyum elementlerinin içerisine belirli oranda safsızlık atomları katkılanması sonucu elde edilirler ve elektronik uygulamalar için kullanışlı hale getirilirler. Katkılama oranı, istenilen özelliğe ve kullanım alanlarına göre değişiklik göstermektedir (Çolak, 2010).

3.2.3.3. *n*-tipi Yarıiletkenler

Son yörüngesinde 4 elektron olan Germanyum (Ge) veya Silisyum (Si) elementlerinin içerisine, son yörüngesinde 5 elektron bulunduran VA grubu elementlerden fosfor, arsenik, antimon vb... maddelerinden birinin katkılanması sonucu elde edilen yarıiletken malzemelere *n*-tipi yarıiletkenler denir. Burada, Silisyum atomlarının (veya Germanyum) son yörüngesinde bulunan 4 elektron ile bunlara komşu olan son yörüngesinde 5 elektron bulunduran Antimon (Sb) atomunun 4 elektronu kovalent bağ yapacak ve her seferinde ortamda 1 elektron açıkta olacaktır. Bu şekilde katkılama sonucunda ortamda çok sayıda elektron bulunacaktır. Bu elektronların atom ile arasında az da olsa elektriksel bir etki bulunduğundan dolayı serbest elektron olması söz konusu

değildir. Bu elektronun, serbest elektron olabilmesi için Fermi enerjisine gelmesi gerekir (Subaşı, 2020).

n-tipi yarıiletken malzemelerde, elektron yoğunluğu, deşik (boşluk-hole) yoğunluğundan fazladır. Bundan dolayı *n*-tipi malzemelerde çoğunluk taşıyıcıları elektronlar, azınlık taşıyıcıları deşiklerdir ve bundan dolayı malzeme negatif bir görünüm alacaktır. Az bir enerji harcayarak bu elektronlar koparılabilir, bu durum malzemenin iletkenliğini önemli bir şekilde artırır (Selek, 2023). *n*-tipi yarıiletken malzemelerde Si (veya Ge) kristalinin içerisine katkılanan atomlar, elektron verici ya da donör olarak ifade edilmekte olup, bunların bulunduğu enerji seviyelerine de donör enerji seviyesi denir (Kittel, 1996).

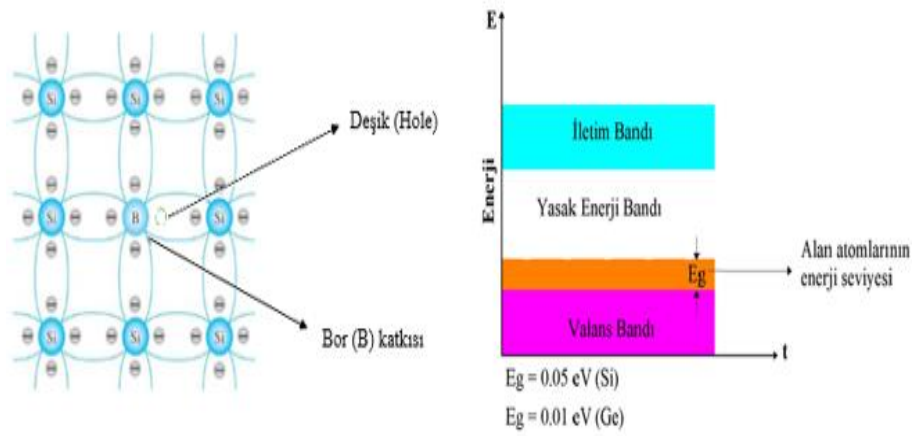


Şekil 3.16. a) Antimon katkılı Silisyum atomu b) Antimon katkısının enerji bant diyagramı (Subaşı, 2020)

3.2.3.4. *p*-tipi Yarıiletkenler

Son yörüngesinde 4 elektron olan Germanyum (Ge) veya Silisyum (Si) elementlerinin içerisine, son yörüngesinde 3 elektron bulunduran IIIA grubu elementlerinden İndiyum, Galyum, Boron vb... maddelerinden birinin katkılanması sonucu elde edilen yarıiletken malzemelere *p*-tipi yarıiletkenler denir. Yine burada, Silisyum atomlarının (veya Germanyum) son yörüngesinde bulunan 4 elektron ile bunlara komşu olan son yörüngesinde 3 elektron bulunduran Bor (B) atomunun 3 elektronu kovalent bağ yapacak ve her seferinde bir Silisyum atomu ile bağ yapılamayacak. Bunun sonucunda ortamda bir elektron boşluğu ya da deşik (boşluk-hole) meydana gelecektir. Bu şekilde katkılama sonucunda ortamda çok sayıda deşikler bulunacaktır. Deşikler, boşluk veya hole olarak da ifade edilmektedir.

p-tipi yarıiletken malzemelerde, deşik yoğunluğu, elektron yoğunluğundan fazladır. Bundan dolayı *p*-tipi malzemelerde çoğunluk taşıyıcıları deşikler, azınlık taşıyıcıları elektronlardır ve malzeme bundan dolayı pozitif bir görünüm alacaktır (Selek, 2023). *p*-tipi yarıiletken malzemelerde Si (veya Ge) kristalinin içerisine katkılanan atomlar, elektron alıcı ya da akseptör olarak ifade edilmekte olup, bunların bulunduğu enerji seviyelerine de akseptör enerji seviyesi denir (Kittel, 1996).



Şekil 3.17. a) Bor katkılı Silisyum atomu b) Bor katkısının enerji bant diyagramı (Subaşı, 2020)

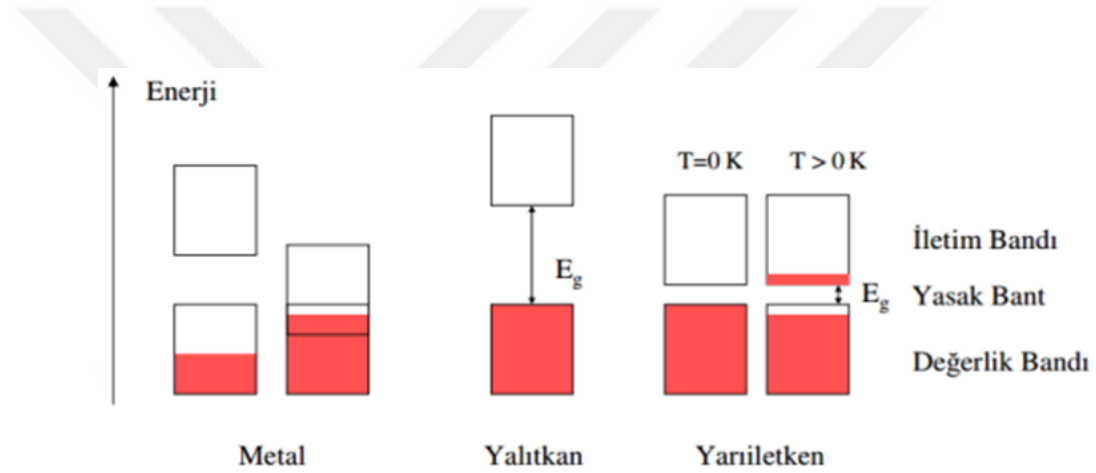
3.2.4. Katılarda Enerji Seviyeleri ve Bant Yapıları

Katı maddeleri, elektriksel ve optik özelliklerine göre iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olarak sınıflandırabiliriz ve bu özellikler maddeden maddeye değişiklikler gösterebilir. Katıların elektriksel iletkenlik (özdirenç) özellikleri “Enerji Bant Teorisi” ile açıklanabilmektedir. Bu teoriye göre; gaz (veya buhar) halindeki maddeler için, atomlar arası mesafeler katı maddelere göre oldukça büyük, atomların birbirleri ile etkileşimleri ise yok sayılabilecek kadar azdır. Birbirinden bağımsız ve serbest haldeki her atom için uygun olarak belirlenmiş bir elektron düzeni ve elektronların bulundukları belirli enerji seviyeleri vardır. Gazlardan farklı olarak katı haldeki maddelerde ise atomlar arası mesafelerin azalması karşılıklı bağ kuvvetlerinin etkinlik kazanmasına, bu durum ise maddeye özgü bir kristal yapının ve belirli bir simetri düzeninin oluşmasına yol açacaktır. Böyle bir durumda kristal örgü içindeki elektriksel alan etkisinde kalan elektronların belirli bir enerji bandına sahip olduğu görülür (Bulun, 2010).

20. yüzyılın başlarında Bohr gibi bilim adamları tarafından yapılan çalışmalar, atom çekirdeği etrafında elektronların bulunabileceği belirli enerji seviyelerinin veya yörüngelerin (orbital) olduğunu göstermiştir. Atom çekirdeği etrafındaki elektron enerji seviyeleri, çekirdeğe olan uzaklıklarına bağlı olarak *K*, *L*, *M*, *N*, *O*, *P* ve *Q* harfleri ile ifade edilmektedir. Bu enerji seviyelerinin atom çekirdeğine yakınlığına bağlı olarak, sahip oldukları enerji düzeyleri değişecektir. Her bir enerji seviyesi belirli sayıda elektron bulundurabilir. Çekirdeğe en yakın ve en düşük enerji seviyesine sahip *K* katmanı en fazla 2 elektron bulundurabilir. Elektronlar enerji seviyelerine yerleşirken, önce en düşük enerji seviyesine yerleşir ve daha sonra artan elektronlar olursa diğer enerji seviyelerini maksimum dolduracak şekilde yerleşirler (Özaslan, 2016).

Elektronlar en düşük enerji seviyesinden başlayarak, daha yüksek enerji seviyelerine doğru yerleşirler; fakat bir katıda atomların dalga özelliklerinden dolayı bazı enerji seviyeleri yasaklanmıştır. İzin verilen enerji seviyelerine bağlı olarak bant yapıları şekillenecektir (Ceylan, 2013). Mutlak sıcaklık değerinde elektronlar tarafından doldurulan en yüksek enerji seviyesi değerlik (valans) bandı olarak ifade edilmektedir. Değerlik bandında bulunan elektronlar iletme

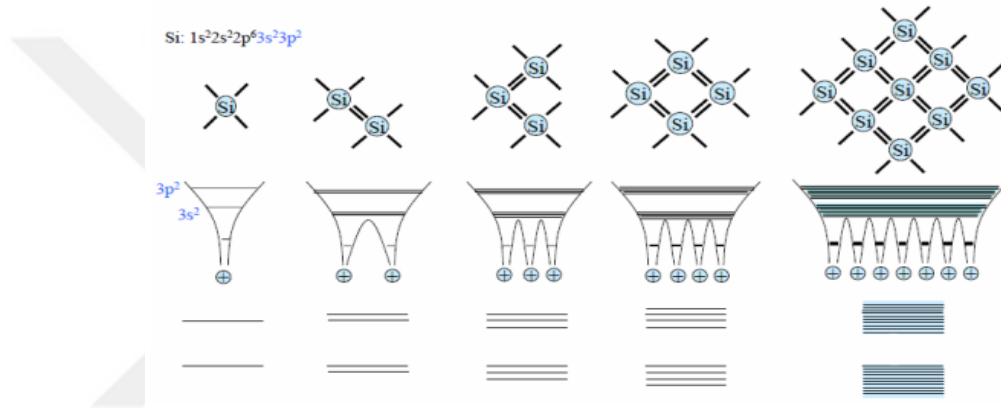
katılmazlar. Değerlik bandının üstündeki ilk boş seviye ise iletim bandı olarak ifade edilmektedir. $T = 0\text{ K}$ 'de, yani mutlak sıfır sıcaklığında elektronlar tarafından doldurulan en yüksek enerji seviyesi “Fermi Enerji Seviyesi” olarak ifade edilmektedir. Katı malzemelerin elektriksel iletkenliğini belirleyen en önemli özelliklerden birisi ise, değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki genişliktir. Elektronların enerjileri bakımından bulunmalarının mümkün olmadığı bu bölgeye yasak enerji aralığı denilmektedir. İletken malzemelerde değerlik bandı ile iletim bandı iç içe geçmiş durumda olduğundan, yasak enerji aralığı bulunmaz. Yarıiletkenler ve yalıtkanlarda ise, değerlik ve iletim bantlarının arasında yasak enerji aralığı bulunmaktadır. Yalıtkan malzemelerin yasak enerji aralığı oldukça büyüktür ($E_g > 4\text{ eV}$) ve bundan dolayı değerlik bandında bulunan bir elektronun iletim bandına geçmesi mümkün değildir. Yarıiletken malzemelerde ise yasak enerji aralığı, yalıtkan malzemelere göre daha küçük olup ($E_g \approx 0,1\text{ eV} - 4\text{ eV}$), oda sıcaklığında bile az bir enerji kazanarak değerlik bandından iletim bandına geçmesi mümkündür (Kırmızıgül, 2020).



Şekil 3.18. Metal, yalıtkan ve yarıiletken malzemelerin enerji-bant diyagramları (Ceylan, 2013)

İki özdeş atom arasındaki mesafe oldukça büyükse, bu iki atom birbirleri ile etkileşmezler ve elektronik enerji seviyeleri yalıtılmış atomlarınkine benzer bir şekilde düşünülebilir (Kahraman, 2010). Eğer bu iki atom birbirlerine yaklaştırılacak olursa, bu durumda her atomik enerji seviyesi ikiye yarılr. Eğer 3 atom birbirine yaklaştırılırsa her atomik enerji seviyesi bu defa üçe yarılacaktır (Kırmızıgül, 2020). Katı maddeyi oluşturmak üzere çok sayıda atom bir araya geldiğinde benzer durumlar meydana gelecektir. Atomlar birbirine yaklaştıkça, atomik enerji seviyeleri yarılmaya başlar (Kahraman, 2010). Katı bir cisim düşünüldüğünde, birbirlerine örgü sabiti mesafesi kadar yakın N sayıda atomun bir arada bulunduğunu söyleyebiliriz. Dolayısıyla atomik enerji düzeyleri N' ye yarılmış olacaktır. Bu enerji seviyeleri arasındaki mesafe o kadar küçüktür ki, bunlar sürekli bir enerji bandı olarak düşünülebilir (Kırmızıgül, 2020). Başka bir deyişle, katı bir cisim, farklı atomik enerji seviyelerinden oluşan çok sayıda izinli enerji bantlarına sahiptir (Kahraman, 2010).

Bir atomda bulunan elektronlar kuantum şartlarına uygun izinli enerji seviyelerinde bulunur ve Pauli Dışarlama İlkesine uygun bir şekilde bu enerji seviyelerine yerleşirler. Atom çekirdeğin etrafında bulunan enerji seviyeleri, kendi içerisinde orbital (yörünge) adı verilen alt enerji seviyelerine ayrılırlar. s , p , d , f vb... gibi harfler ile bu orbitaller ifade edilebilir (Özaslan, 2016). Örneğin; bir silisyum atomuna ait elektron konfigürasyonu $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ şeklinde verilmektedir. Buna göre, silisyum atomunun en dış yörüngede 4 elektron bulunmaktadır ve bunların 2 tanesi s seviyesinde, diğer 2 tanesi de p seviyesinde yer almaktadır. Serbest haldeki atomlar kristal yapıyı oluştururlarken, karşılıklı bağlanma kuvvetleri etkili hale gelir. Bu durumda enerji seviyeleri yarılmalara uğrayarak enerji bantlarını meydana getirirler (Şekil 3.19). Bu enerji seviyeleri arasındaki fark çok küçük olduğundan ($\sim 10^{-19}$ eV), bunların sürekli bir bant gibi olduğu söylenebilir. Bu yapı enerji bandı olarak ifade edilmektedir (Çolak, 2010).



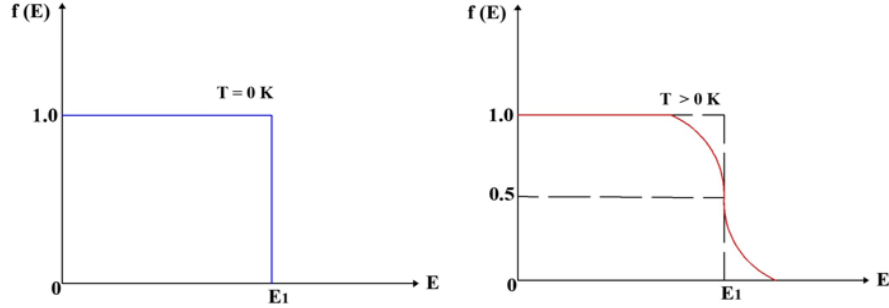
Şekil 3.19. Enerji Bantlarının Oluşumu (Çolak, 2010)

Yarıiletken malzemeler için birim hacimdeki taşıyıcı yoğunluğu malzemeler önemli özelliklerden birisi olup ve bu malzemelerin elektriksel özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. Yarıiletken malzemelerde elektriksel iletkenlik serbest yük taşıyıcıları olarak adlandırılan elektronlar ve deşikler tarafından gerçekleştirilmektedir ve bunların miktarının bilinmesi bu açıdan önemlidir. Bundan dolayı Fermi-Dirac dağılım fonksiyonundan yararlanılarak, serbest yük taşıyıcılarının miktarını tespit etmek mümkündür (Ulutaş, 2009). T sıcaklığına bağlı olarak elektronun belirli bir E enerjili durumda bulunma olasılığı için Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu;

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT} + 1} \quad 3.24$$

bağıntısı ile verilir. Burada; E_f , Fermi enerji seviyesi, k_B ise Boltzmann sabitidir. Fermi enerji seviyesi; mutlak sıfır sıcaklığında (0 K), elektronların doldurabileceği en yüksek enerji seviyesidir (Özaslan, 2016). Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu incelenirse; $T \rightarrow 0$ K iken, $E < E_f$ için de $(E - E_f)/k_B T \rightarrow \infty$ olur. Böylece $f(E < E_f) = 1$ ve $f(E > E_f) = 0$ elde edilir. Buna göre T

= 0 K iken Fermi enerjisi olan E_f 'nin altında kalan tüm enerji seviyeleri dolu ve E_f 'nin üstünde bulunan tüm enerji seviyeleri ise boştur. $T > 0$ K ve $E = E_f$ için $f(E) = 1/2$ olur (Şekil 3.20). Yani Fermi enerji seviyesinin işgal edilme olasılığı 1/2'dir (Ulutaş, 2009).



Şekil 3.20. Fermi –Dirac dağılım fonksiyonu a) $T = 0$ K b) $T > 0$ K (Kahraman, 2010)

Değerlik ve iletim bandında bulunan elektronların etkin kütlelerinin aynı olduğu durum için elde edilen bu matematiksel sonuç geçerli olacaktır (Özaslan, 2016). $E - E_f \gg k_B T$ olması halinde ise $\exp [(E_f - E)/k_B T]$ değeri 1'den çok büyük olacağından, $\exp[(E - E_f)/k_B T]$ ifadesinin yanında bulunan 1 sayısı ihmal edilebilir. Bu durumda denklem,

$$f(E) = \exp [(E_f - E)/k_B T] \quad 3.25$$

eşitliği ile gösterilen Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonuna dönüşmektedir. Elektronların yoğunluğu bu fonksiyon yardımı ile hesaplanabilir. $D_e(E)$ elektronlar için durum yoğunluğu olmak üzere, E ile $E + dE$ enerji aralığındaki bu bölge için elektron durumlarının sayısı $D_e(E)dE$ şeklinde olacaktır. $f(E)$, bu durumların her birinin işgal edilme olasılığı ise, elektronların bu enerji aralığındaki bulunma yoğunluğu $f(E)D_e(E)dE$ olur. Bu durumda iletim bandındaki elektronların yoğunluğu n ;

$$n = \int_{E_{c1}}^{E_{c2}} f_e(E) D_e(E) dE \quad 3.26$$

eşitliği ile bulunur. İntegralin belirttiği sınırlar, iletim bandının alt (E_{c1}) ve üst (E_{c2}) enerji değerlerine karşılık gelir. İletim bandında bulunan elektronlar için durum yoğunluğu $D_e(E)$;

$$D_e(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{1/2} \quad 3.27$$

eşitliği ile bulunur. $E < E_g$ için bu eşitlik tanımlı olmayacaktır. (3.24) eşitliğindeki $f(E)$ ve (3.27) eşitliğindeki $D_e(E)$, (3.26) eşitliğinde yerine yazılacak olursa;

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{E_f/(k_B T)} \int_{E_g}^{\infty} dE (E - E_g)^{1/2} e^{-E/(k_B T)} \quad 3.28$$

ifadesi elde edilir ve sınır koşullarına göre integral alınır;

$$n = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{(E_f - E_g)/(k_B T)} \quad 3.29$$

elektron yoğunluğuna ait eşitlik elde edilir. İletim bandında bulunan elektronlar için etkin durum yoğunluğu N_C ;

$$N_C = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad 3.30$$

olarak tanımlanacak olursa, elektron yoğunluğuna ait (3.29) eşitliği;

$$n = N_C e^{(E_f - E_g)/(k_B T)} \quad 3.31$$

şeklinde ifade edebiliriz. Benzer şekilde değerlik bandında bulunan deşik (hole) yoğunluğu p ise;

$$p = \int_{E_{v1}}^{E_{v2}} (1 - f(E)) D_h(E) dE \quad 3.32$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada $D_h(E)$ değerlik bandındaki deşik durum yoğunluğu, $D_h(E)dE$, deşikler için E ile $E + dE$ enerji aralığındaki bu bölge için durumların sayısı, E_{v1} ve E_{v2} değerlik bandının alt ve üst sınır değerleridir. Bu durumların her birinin işgal edilme olasılığı $(1 - f(E))$ dir. Değerlik bandındaki bu enerji bölgesinde bulunan deşiklerin yoğunluğu $(1 - f(E))D_h(E)dE$ 'ye eşittir. Değerlik bandındaki deşikler için durum yoğunluğu $D_h(E)$;

$$D_h(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_h^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (-E)^{1/2} \quad 3.33$$

$$1 - f(E) = f_h(E) \quad 3.34$$

$$f_h(E) = \frac{1}{e^{(E_f - E)/k_B T} + 1} \quad 3.35$$

$E - E_f \gg k_B T$ için,

$$f_h(E) \approx \exp [(E_f - E)/k_B T] \quad 3.36$$

şeklinde yazılacaktır. (3.36) ve (3.33) eşitlikleri (3.32) eşitliğinde yerine yazılacak olursa,

$$p = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_h^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_f/(k_B T)} \int_{-\infty}^0 dE (-E)^{1/2} e^{E/(k_B T)} \quad 3.37$$

eşitliği elde edilir. Değerlik bandındaki deşik yoğunluğu ise,

$$p = 2 \left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_f/(k_B T)} \quad 3.38$$

eşitliği ile bulunur. Değerlik bandında bulunan deşikler için etkin durum yoğunluğu N_V ,

$$N_V = 2 \left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \quad 3.39$$

şeklinde tanımlanacak olursa, deşik yoğunluğuna ait (3.38) ifadesi,

$$p = N_V e^{-E_f/(k_B T)} \quad 3.40$$

şeklinde yazılır. Elektron (n) ve deşiklerin (p) durum yoğunluğu, termal dengede bulunan saf veya katkıli yarıiletkenler için geçerlidir (Akat, 2012).

Saf, bir başka deyişle katkısız bir yarıiletken için kristalin içerisinde serbestçe dolaşan elektronlar, yerlerinde deşikler bırakarak atomlarından ayrıldıklarından, akım taşıyıcısı olabilecek bu elektronlarla yerlerinde bıraktıkları deşiklerin sayıları eşittir: $n = p$ (Özaslan, 2016).

$$2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{(E_f - E_g)/(k_B T)} = 2 \left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_f/(k_B T)} \quad 3.41$$

$$\exp\left(\frac{2E_f - E_g}{k_B T}\right) = \left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)^{3/2} \quad 3.42$$

$$\left(\frac{2E_f - E_g}{k_B T}\right) = \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)^{3/2} \quad 3.43$$

$$2E_f - E_g = \frac{3}{2} k_B T \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right) \quad 3.44$$

$$E_f = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right) \quad 3.45$$

şeklinde elde edilir. Buradan, elektronların ve deşiklerin yoğunlukları olan n ve p 'yi yasak enerji aralığı E_g cinsinden yazacak olursak;

$$n = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} e^{(E_f - E_g)/(k_B T)}, \quad E_f = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)$$

$$n = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} \exp\left[\frac{\left(\frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)\right) - E_g}{k_B T}\right] \quad 3.46$$

$$n = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} \left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad 3.47$$

$$n = p = 2 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} (m_h^* m_e^*)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad 3.48$$

elde edilir. (3.48) eşitliğinde n ya da p 'nin sıcaklığa bağlılığı, üstel fonksiyondaki T değerinden kaynaklanmaktadır. Bunun sebebi, $e^{f(T)}$ genel formundaki üstel değişim, polinom (T^n) formundakilere göre çok daha hızlı değişim gösterir (Akat, 2012).

$$n \propto e^{-1/T} \quad 3.49$$

Yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı $E_g = E_c - E_v$, sıcaklıkla değişmektedir. Bunun nedeni, yarıiletkenin örgü parametrelerinin sıcaklığın artmasına bağlı olarak büyümesinden kaynaklanmaktadır. Yine sıcaklık artışına bağlı olarak yasak enerji bant aralığı $E_g(T)$, yarıiletken malzemelerin çoğunda lineer olarak azalmaktadır.

$$E_g = E_{go} - \alpha T \quad 3.50$$

Burada E_{go} mutlak sıfırdaki ($T = 0 K$) yasak enerji bant aralığı, α (eV/derece) yasak enerji bandının sıcaklıkla değişim katsayısıdır (Ulutaş, 2009). (3.50) eşitliğini, (3.48) eşitliğinde yerine yazacak olursak,

$$n = p = 2 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_h^* m_e^*)^{3/4} \exp \left(-\frac{E_{go} - \alpha T}{2k_B T} \right) \quad 3.51$$

elde edilir.

3.3. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri

3.3.1. Işığın Yarıiletkenlerle Etkileşmesi

Bir atomun üzerine bir foton gönderildiğinde, atomda bulunan herhangi bir elektron bu fotonu soğurarak bulunduğu yörüngeden enerjisi daha yüksek olan başka bir yörüngeye uyarılabilir. Belli bir süre sonra (saniyenin binde biri ile milyarda biri arasında olabilir) uyarılmış olduğu yörüngede kalan bu elektron, eski yörüngesine geri dönerken, daha önce soğurduğu fotonu yayınlar. Bunun içinde gelen fotonun enerjisinin, ancak o iki yörüngenin enerji seviyesi (düzeyi) arasındaki fark kadar olması gereklidir. Enerji seviyeleri arasındaki bu fark, son yörüngenin enerjisi E_s ile ilk yörüngenin enerjisi E_i , ν frekans ve w açısal frekans olmak üzere şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta E = E_s - E_i = h\nu = \hbar w \quad 3.52$$

Eğer gelen ışık birden fazla frekansı içerisinde muhteva ediyorsa ve bunlar içerisinde herhangi biri içerisinde geçtiği o atomun enerji seviyeleri arasındaki farka eşitse, bu durumda atom tarafından o frekans soğrulur. Bir başka deyişle bu atomun sahip olduğu elektronlar, o frekandaki fotonları soğurarak üst enerji seviyelerine uyarılmış olurlar. Diğer frekanslar (eğer görünür ışıksa, renkler) ise, o madde içerisinde bulunan atomların uyarılmasını sağlayamayacaktır. Gönderilen ışık demeti tek renkli, yani tek frekanslı (monochromatic) ise, bu ışığın sahip olduğu enerjiyi bulmak için ışığın frekans değeri ile h Planck sabiti çarpılır. Bunun neticesinde elde edilen

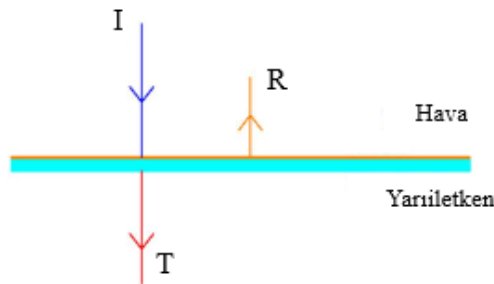
değer ile atomun değişik enerji seviyeleri arasındaki fark aynı olduğu durumda madde tarafından bu ışık soğurulacaktır (Akat, 2012).

Tez çalışması kapsamında farklı altlıklar üzerinde SILAR yöntemi kullanılarak üretilen bakır (I) oksit (Cu_2O) ve CuO (tenorit) yarıiletken ince film numunelerin optik karakterizasyonu için optik geçirgenlik ($\%T$) ve optik soğurma ölçümleri (A) Şekil 3.21'deki Perkin Elmer UV/Vis Lamda 2S spektrofotometresi (190 – 1100 nm) kullanılarak elde edildi. İnce filmlerin optik geçirgenlik ($\%T$), optik soğurma (A), yansırma ($\%R$), sönüm katsayısı (k), kırılma indisi (n), dielektrik sabiti (ϵ_1 , ϵ_2) ve yasak enerji bant aralığı (E_g) gibi parametreleri filmlerin fiziksel özellikleri hakkında bilgi sahibi olmamızda yardımcı olur.



Şekil 3.21. Perkin Elmer UV/VIS Lamda 2S spektrofotometresi

Güneş ışınlarının, Şekil 3.22'deki gibi yatay şekilde durmakta olan yarıiletken bir malzemenin üzerine dik olarak geldiğini düşünelim. Gelen bu ışınların R kadarlık bir kısmı geriye doğru yansırken, T kadarlık diğer kısmı ise yarıiletken malzemenin içine nüfuz edecektir. Yarıiletken malzeme içerisine nüfuz eden bu ışığın enerjisi $h\nu > E_g$ ise, yarıiletken içerisinde elektron-deşik çiftleri meydana getirecektir ve malzeme tarafından soğurulacaktır. Eğer bu ışığın enerjisi $h\nu < E_g$ ise, bu durumda sahip olduğu enerjisini yarıiletken malzemenin atomlarına aktararak yok olacak ve yarıiletkenin ısınmasına neden olacaktır (Kırmızıgül, 2020).



Şekil 3.22. Bir yarıiletken malzeme üzerine gelen tek frekanslı bir ışık (Gümüş, 1998)

Soğurucu bir malzemenin sahip olduğu kırılma indisi $n_c = n - ik$ olarak verilmektedir. k sönüm katsayısı olmak üzere R yansımaya katsayısı;

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \quad 3.53$$

eşitliği ile ifade edilmektedir (Ulutaş, 2009).

Yarıiletken malzeme içerisine nüfuz eden ışığın şiddeti soğurulmalar sonucunda azalacaktır. Belli bir dalga boyunda ışığın soğurulması, ışığın şiddeti ve dolayısıyla birim yüzeye birim zamanda gelen foton sayısı olarak ifade edilen foton akısı ile orantılı olacaktır. Yarıiletken malzemedeki foton akısının (Φ) azalışını,

$$\Phi(x) = \Phi(x_o)e^{-a(x-x_o)} \quad 3.54$$

eşitliği ile ifade edebiliriz. α soğurma katsayısı olup, foton akısının malzeme içerisine ne kadar nüfuz edeceği ile ilgili bir parametredir ve bu katsayı dalga boyuna bağlıdır. Işınım ile ilgili elektrik alanı bir düzlem dalga olarak,

$$E = E_o \exp\left(i2\pi v\left(t - \frac{x}{v}\right)\right) \quad 3.55$$

eşitliği ile verilsin. Dalganın yayılma hızı v , ışık hızı c ve kırılma indisi n_c olmak üzere bunlar arasındaki ilişki;

$$v = \frac{c}{n_c} \quad \text{veya} \quad \frac{1}{v} = \frac{n}{c} - \frac{ik}{c} \quad 3.56$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradan (3.55) eşitliğini,

$$E = E_o e^{i2\pi vt} e^{-i2\pi xnv/c} e^{-2\pi vkx/c} \quad 3.57$$

şeklinde yazabiliriz. Bu eşitlikteki son terim sönüm çarpanı olarak bilinmektedir. Bu ifadenin karesi alınacak olursa;

$$E^2 = E_o^2 \exp\left(-\frac{4\pi vk}{c}x\right) \quad 3.58$$

şeklinde elde edilir. Işınmının gücünün, elektrik alanın karesiyle azaldığı bilindiğinden, (3.58) ve (3.54) eşitliklerinin karşılaştırılmasından,

$$\alpha = \frac{4\pi \nu k}{c} \quad 3.59$$

ifadesi elde edilir. ν ışınım frekansıdır. Bu eşitliğe bakıldığında α soğurma katsayısı k sönüm katsayısı türünden ifade edilmiş olup birbirleri ile ilişkilidir ve bu durum güneş pili tasarımı içinde önemlidir (Kırmızıgül, 2020).

3.3.2. Işığın Soğurulması

3.3.2.1. Temel soğurma

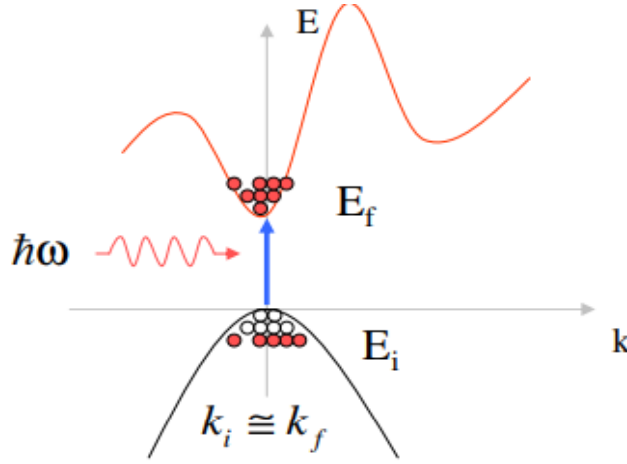
Temel soğurma olayı, yarıiletkenin değerlik bandında bulunan bir elektronun malzeme üzerine gelen ışıktan frekansı ν olan bir fotonu soğurarak iletim bandına geçmesi şeklinde tanımlanabilir (Özaslan, 2016). Temel soğurma olayı, doğrudan bant geçişli ve dolaylı bant geçişli soğurma olmak üzere ikiye ayrılır. Doğrudan geçişlerde fotonun enerjisi elektronun değerlik bandından iletim bandına geçmesi için yeterli iken, dolaylı geçişte ise fotonun enerjisinin yanı sıra birde fononun enerjisi gerekmektedir (Altındemir, 2016).

Temel soğurma olayı, yarıiletken bir malzemenin yasak enerji aralığını belirlemek için kullanılmaktadır. Bir fotonun momentumu (h/λ), kristalin momentumuna (h/a) göre çok küçük olacağından, fotonun soğurulması sırasında elektronun momentumu korunmalıdır. Bir fotonun enerjisi ($h\nu$) için soğurma katsayısı $\alpha(h\nu)$, elektronun ilk durumdan son duruma geçiş olasılığı P_{if} , ilk durumdaki elektron yoğunluğu n_i ve son durumdaki elektron yoğunluğu n_f ile orantılıdır ve bu durumlar arasında tüm olası geçişler $h\nu$ ya eşittir (Ulutaş,2009).

$$\alpha(h\nu) = A \sum P_{if} n_i n_f \quad 3.60$$

3.3.2.2. Yarıiletkenlerde Doğrudan Bant Geçişleri

Bir yarıiletkende iletim bandının minimumu ile değerlik bandının maksimumu enerji momentum uzayında aynı $\vec{k}$ değerine sahip olabilir ($\Delta\vec{k} = 0$). Bu tip bir malzemede değerlik bandında bulunan bir elektronun iletim bandına geçmesi doğrudan bant geçişi olarak ifade edilmektedir. Elektronlar, bu geçişleri esnasında dalga vektörlerini değıştirmmezler, yani momentumlarını korurlar. Doğrudan bant geçişleri sırasında, yasak enerji aralığının altında soğurma beklenmez (Özaslan, 2016).



Şekil 3.23. Doğrudan bant aralıklı bir yarıiletken bir fotonun soğurulması
(https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod_resource/content/2/Bolum-13.pdf)

Şekil 3.23’de doğrudan bant aralıklı bir yarıiletken malzeme için, enerji-momentum ilişkisi şematik olarak gösterilmiştir. $h\nu$ enerjili bir fotonun elektron tarafından soğurulması sonucunda, elektronun değerlik bandından iletim bandına geçişi için,

$$E_f - E_i = \hbar\omega = h\nu \quad 3.61$$

eşitliği yazılabilir (Enerjinin korunumu). Parabolik bantlar için, son durum enerji seviyesi ile yasak enerji aralığı arasındaki fark alınarak elektronlar için ilk enerji seviyesi,

$$E_f - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} = \frac{p^2}{2m_e^*} \quad 3.62$$

ve deşikler için ilk enerji seviyesi,

$$E_i = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} = \frac{p^2}{2m_h^*} \quad 3.63$$

eşitlikleri şeklinde yazılabilir. Burada m_e^* elektronun, m_h^* holün etkin kütesidir. (3.62) ve (3.63) eşitlikleri, (3.61) eşitliğinde yerine yazılacak olursa,

$$h\nu - E_g = \frac{p^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad 3.64$$

şeklinde elde edilir. Doğrudan bant aralıklı bir yarıiletken malzemede soğurma katsayısı ile gelen fotonun enerjisi arasında,

$$n_0 \alpha(h\nu) = A^* (h\nu - E_g)^n \quad 3.65$$

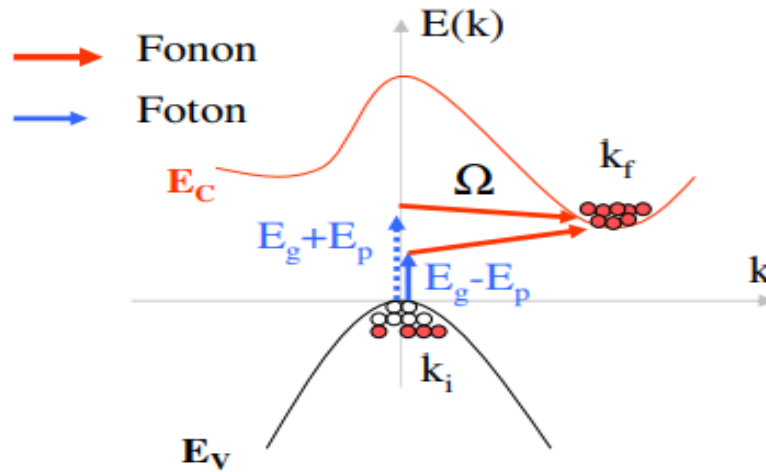
şeklinde bir bağıntı bulunmaktadır. Burada n_0 kırılma indisi, n ise bir sabit olup izinli doğrudan bant geçişleri için 1/2, yasaklı doğrudan bant geçişleri için ise 3/2 değerini almaktadır. A^* sabiti ise izinli doğrudan bant geçişleri için (3.66) eşitliği ve yasaklı doğrudan bant geçişleri (3.67) eşitliği ile tanımlanmaktadır (Özaslan, 2016).

$$A^* \approx \frac{q^2 \left(2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{3/2}}{n_0 c h^2 m_e^*} \quad 3.66$$

$$A^* \approx \frac{4 q^2 \left(2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)^{5/2}}{3 n_0 c h^2 m_e^* m_h^* (h\nu)} \quad 3.67$$

3.3.2.3. Yarıiletkenlerde Dolaylı Bant Geçişleri

Bir yarıiletkende değerlik bandının maksimumu ile iletim bandının minimumu enerji-momentum uzayında farklı $\vec{k}$ değerlerine sahipse ($\Delta\vec{k} \neq 0$), bu bant türü dolaylı bantlar olarak ifade edilmekte olup, bu bantlar arasında meydana gelen geçişler de dolaylı bant geçişleri olarak tanımlanmaktadır. Dolaylı bant geçişlerinde, değerlik bandından iletkenlik bandına geçişte elektronun enerjisi korunur, fakat elektronun momentumunun korunabilmesi için bir fonon yayınlanması ya da soğurulması gerekmektedir (Özaslan, 2016).



Şekil 3.24. Dolaylı bant aralıklı bir yarıiletkende fonon yayınlama veya soğurma yoluyla fotonun soğurulması (https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod_resource/content/2/Bolum-13.pdf)

Bu geiş esnasında, enerji ve momentumun her ikisinde birden geişim meydana geldiğinden dolayı iki aşamalı bir işlem gerekmektedir. Foton momentumu, Şekil 3.24’de görüldüğü gibi fonon etkileşmesi sonucu korunur. Fonon, örgü titreşiminin bir kuantumudur. Fononların ulaşılabilir geniş bir spektrumu olmasına rağmen yalnız birbirleri ile yeterli momentum geişimi yaparlar. Bunlarda genellikle yatay ve akustik fononları transfer yaparlar (Ulutaş, 2009).

Bir fononun sahip olduğı enerji E_p olmak üzere, $E_f - E_i$ geişimini gerçekleştirmek için bir fonon ya soğurulacak ya da yayınlanacak olursa, bu durumu;

$$h\nu_e = E_f - E_i + E_p \quad 3.68$$

$$h\nu_a = E_f - E_i - E_p \quad 3.69$$

eşitlikleri ile ifade edebiliriz. Dolaylı bant geişlerinde değerklik bandının tüm doldurulmuş durumları ile iletkenlik bandının tüm boş durumları birbirleriyle bağlantılı olabilir. E_i enerjisindeki ilk durum yoğunluğu,

$$N(E_i) = \frac{1}{2\pi^2\hbar^3} (2m_h^*)^{3/2} (E_i)^{1/2} \quad 3.70$$

eşitliği ile elde edilir. E_f enerjisindeki durum yoğunluğu ise,

$$N(E_f) = \frac{1}{2\pi^2\hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (E_f - E_g)^{1/2} \quad 3.71$$

eşitliği ile elde edilir. (3.68) ve (3.69) ve (3.71) eşitliklerinden

$$N(E_f) = \frac{1}{2\pi^2\hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (h\nu - E_g \mp E_p + E_i)^{1/2} \quad 3.72$$

eşitliğine ulaşabiliriz. Soğurma katsayısını elde edebilmek için, (3.70) ve (3.71) eşitlikleri birbirleri ile çarpılır. Fononların sayısı için, Bose-Einstein istatistiğı;

$$N_p = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_p}{k_B T}\right) - 1} \quad 3.108$$

şeklinde verilir. α , fononlarla etkileşme olasılığıyla orantılıdır. Böylece soğurma katsayısı,

$$\alpha(h\nu) = A_f(N_p) \int (E_i)^{1/2} (h\nu - E_g \mp E_p + E_i)^{1/2} dE_i \quad 3.74$$

şeklinde yazılabilir. (3.73) eşitliği, (3.74) eşitliğinde yerine yazılır ve gerekli matematiksel işlemler yapılırsa, fonon soğurulması sonucu meydana gelen dolaylı bant geçişleri için soğurma katsayısı ($h\nu > E_g - E_p$);

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^n}{\exp\left(\frac{E_p}{k_B T}\right) + 1} \quad 3.75$$

Fonon yayınlanması sonucu meydana gelen dolaylı bant geçişleri için soğurma katsayısı ($h\nu > E_g + E_p$) ise;

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^n}{1 - \exp\left(-\frac{E_p}{k_B T}\right)} \quad 3.76$$

şeklinde ifade edilir. Dolaylı bant geçişleri için soğurma katsayısını, meydana gelen her iki durumun toplamı şeklinde yazabiliriz. Böylece soğurma katsayısı, (3.75) ve (3.76) eşitliklerinin toplamından şu şekilde ifade edilebilir:

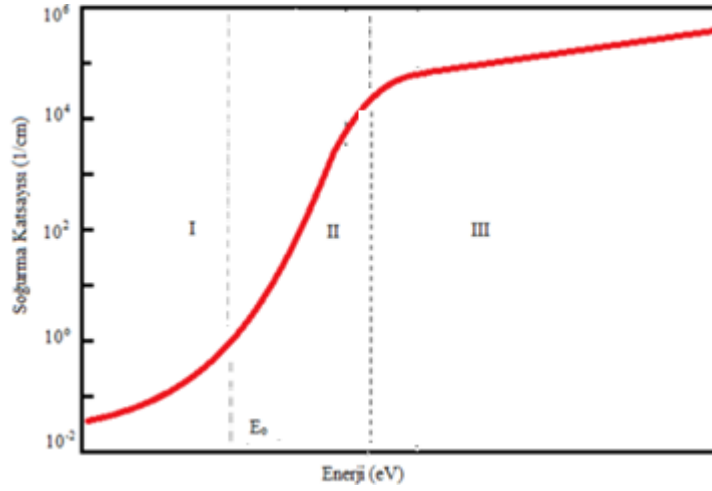
$$\alpha(h\nu) = \alpha_a(h\nu) + \alpha_e(h\nu) \quad 3.77$$

$$\alpha(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^n}{\exp\left(\frac{E_p}{k_B T}\right) + 1} + \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^n}{1 - \exp\left(-\frac{E_p}{k_B T}\right)} \quad 3.78$$

Burada n sayısı sabit bir sayı olup izinli dolaylı bant geçişleri için 2 ve yasaklı dolaylı bant geçişleri için 3 değerini almaktadır (Altundemir, 2016).

3.3.3. Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi

Şekil 3.25’de bir yarıiletken malzemeye ait soğurma katsayısının enerjiye bağlı değişim grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.25. Bir yarıiletken malzemenin soğurma katsayısının enerjiye bağlı değişimi (Çevlik, 2019)

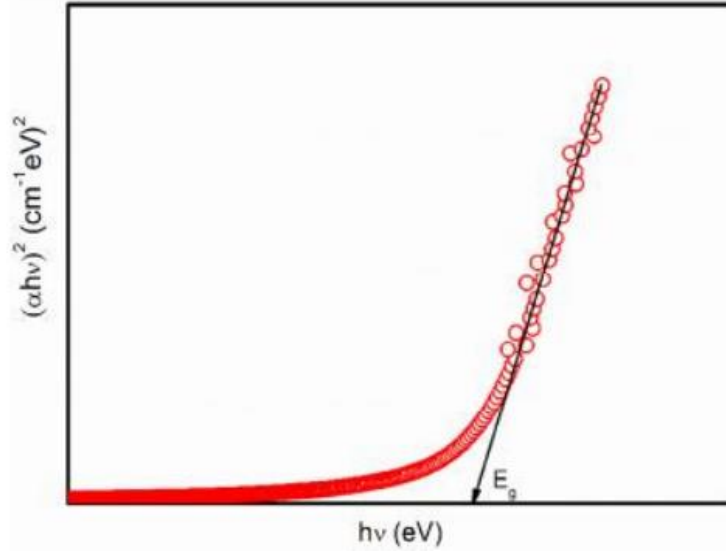
I bölgesi incelendiğinde $\alpha < 1 \text{ cm}^{-1}$ dir. I bölgesi, enerji aralığındaki yapı kusurlarının meydana getirdiği elektron enerji durumlarına bağlı soğurma olarak ifade edilebilir.

II bölgesi incelendiğinde $1 < \alpha < 10^4 \text{ cm}^{-1}$ arasındadır. II bölgesi, Urbach kuyruğu (Urbach Tail) diye bilinen değerlik ve iletkenlik bandındaki elektronların enerji durumlarının uzantılarının meydana getirdiği bölgedir. Bu bölgedeki sınırlar içi içe geçmiş bir durumda bulunmaktadır ve kesin değildir. Yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı bu bölgeye düşmektedir (Ulutaş, 2009).

III bölgesi incelendiğinde $\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$ dir ve bu bölge banttandır ve bu bölge banttandır (Altındemir, 2016).

Yarıiletken ince filmlerin yasak enerji aralıklarının belirlenmesinde genellikle optik soğurma yöntemi kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu yöntem, yarıiletkenlerin bant yapılarının belirlenmesinde de yine çok kullanılan bir yöntemdir (Özaslan, 2016). Optik bant aralığı, II. bölgeye düşer ($1 < \alpha < 10^4 \text{ cm}^{-1}$). Doğrudan bant aralıklı yarıiletken malzemelerde kristal soğurması ve amorf yarıiletken malzemeler için, II. bölgede soğurma katsayısı, (3.79) eşitliği ile ifade edilir (Altındemir, 2016).

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^n \quad 3.79$$



Şekil 3.26. Bir yarıiletken ince filmde soğurma katsayısının enerjiye göre değişiminden, optik yasak enerji bant aralığının belirlenmesi (Özaslan, 2016)

Şekil 3.26’da, soğurma katsayısının enerji ile çarpımının karesinin $(\alpha h\nu)^2$ enerjiye karşılık $(h\nu)$ çizilen grafiğine teğet çekildiğinde bu teğetin $(\alpha h\nu)^2 = 0$ olduğunda alınan E enerji değeri (E_g), yarıiletken malzemenin optik bant aralık değeri olacaktır. (Erken, 2015). Cu_2O yarıiletken ince filmlerin optik bant aralığı,

$$\alpha(h\nu) = B(h\nu - E_g)^{n/2} \quad 3.80$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada, α soğurma katsayısı; B sabit sayı; E_g yarıiletkenin optik yasak enerji bant aralığı; $h\nu$ fotonun enerjisi; n elektronik geçişin doğasına bağlı olarak farklı değerler alabilen bir sabittir. Doğrudan bant aralıklı yarıiletken malzemelerde n değeri 1 olarak alınmaktadır. Buna bağlı olarak, (3.80) eşitliğini şu şekilde ifade edebiliriz (Altındemir, 2016):

$$\alpha(h\nu) = B(h\nu - E_g)^{1/2} \quad 3.81$$

3.3.4. Soğurma Katsayısının Hesaplanması:

Tek renkli bir ışık demetinin soğurucu özelliği olan bir numune üzerine düşürüldüğünü düşünelim ve gelen ışığın belli bir kısmının ilk yüzeyden geçtiğini ve geriye kalan kısmının da numuneden yansıdığı gerçeğini bir an için ihmal edelim. Bu durumda gelen ışığın şiddeti I_0 ve ortamdan geçen ışığın şiddeti I_T olmak üzere iki ifade elde etmiş oluruz. Alınan numunenin kalınlığının çok ince olduğunu varsayacak olursak, burada ışık tamamen numunenin kalınlığına (ΔX) bağlı olacaktır:

$$-\Delta I = I_T - I_o = I_o \alpha \Delta X \quad 3.82$$

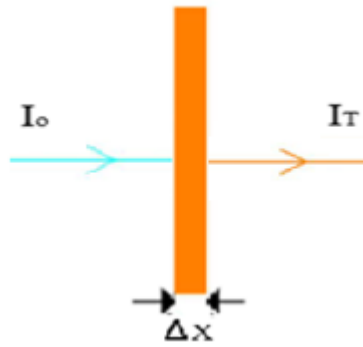
α , soğurma katsayısı olup, soğurucu ortamın ve ışığın dalga boyunun (λ) karakteristik özelliklerini göstermektedir. Işığın, iki veya daha fazla ΔX kalınlığındaki ince numunelerden geçtiğini varsayalım. Soğurma katsayısı, gelen ışığın şiddetinden bağımsız olup, verilen malzemenin (numune) karakteristiğini gösterecektir. Bunun sonucunda ΔX kalınlığına sahip numunenin arkasına yerleştirilen ikinci numuneyle, ilk numuneden geçerek gelen ışığın şiddeti biraz daha azalacaktır. İkinci numuneye gelen ışık şiddeti birinci numuneye gelenden az olduğundan, kayıp daha az olacaktır. Burada, mutlak kayıp az olsa bile, her iki numuneden dolayı meydana gelen ışık kaybı oranı eşit olacaktır.

$$\Delta I = -I_o \alpha \Delta X \quad 3.83$$

$$\alpha = -\frac{\Delta I}{I_o \Delta X} \quad 3.84$$

eşitliği elde edilecektir. Burada α , soğurucu malzemenin her birim kalınlıktan kaynaklanan azalma oranını ya da malzemenin soğurucu özelliğini göstermektedir. Katmanları dx gibi çok küçük kalınlıklara indirgeyecek olursak, ışık her katmanı geçerken ışıktan soğrulan ilk ışık şiddeti oranı 3.85'deki gibi ifade edilmektedir:

$$\left(\frac{dI}{I_o}\right) = -\alpha dx \quad 3.85$$



Şekil 3.27. İnce bir tabakadaki soğurma (Kırmızıgül, 2020)

Toplam x kalınlıktan geçen ışık şiddetinde meydana gelen azalmayı bulmak için bu eşitlik; $x = 0$ da, I_o ve $x = x$ te, I_T olacak şekilde her iki tarafın integrali alınacak olursa,

$$\int_{I_0}^{I_T} \frac{dI}{I} = -\alpha \int_0^x dx \quad 3.86$$

$$\ln\left(\frac{I_T}{I_0}\right) = -\alpha x \quad 3.87$$

$$\alpha = -\frac{1}{x} \ln\left(\frac{I_T}{I_0}\right) \quad 3.88$$

veya

$$I_T = I_0 \exp(-\alpha x) \quad 3.89$$

şeklinde elde edilecektir. Elde edilen bu ifade üstel soğurma yasası olup, Lambert tarafından geliştirilmiştir. Buradan hareketle, Beer-Lambert Yasasını şu şekilde yazabiliriz:

$$\alpha = \frac{1}{I(\lambda)} \frac{dI(\lambda)}{dx} \quad 3.90$$

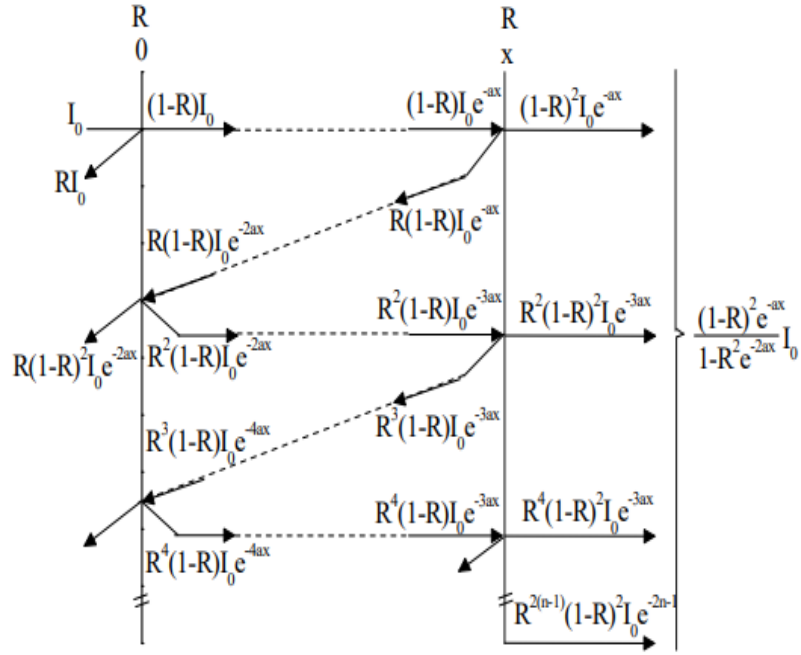
R , yansıma olmak üzere;

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k^2}{(n_2 + n_1)^2 + k^2} \quad 3.91$$

eşitliği ile ifade edilecektir. Burada n ve k ifadeleri, kırılma indisinin reel (gerçel) ve sanal (imajiner) kısımlarıdır. Görünür bölgede bu ifadeler oldukça küçük olduklarından, R ifadesi,

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad 3.92$$

olarak yazılabilir. Toplam geçirgenliği bulabilmek için Şekil 3.28'de gösterildiği gibi iki bölge alabiliriz:



Şekil 3.28. İnce Bir Filmde Çok Yansımali Işık Geçirimi (Pankove, 1971)

Girişim ihmal edildiğinde, x kalınlığına sahip bir ince filme I_0 şiddetinde tek renkli (monochromatic) birışık düşürülürse, filmin içerisine giren ışığın miktarı I şu şekilde ifade edilebilir:

$$I = (1 - R)I_0 \quad 3.93$$

Filmden geçen ışık miktarı ise,

$$I = I_0(1 - R) \exp(-\alpha x) \quad 3.94$$

İç yansıma olayları bu şekilde devam edecek olursa, yansıyan ışık miktarının her yansımada bir,

$$I = R^{2n}(1 - R)^2 I_0 \exp[(-2n + 1)\alpha x] \quad 3.95$$

ifadesi kadar artacağı görülecektir. Bu artış göz önünde bulundurulduğunda, filmin toplam ışık geçirgenliğinin,

$$I = (1 - R)^2 I_0 \exp(-\alpha x) \sum R^{2n} \exp(-2n\alpha x) \quad 3.96$$

olduğu görülecektir. Toplam geçirgenlik numune tarafından yansıtılan ışık şiddetinin numune üzerine gelen ışık şiddetine oranı şeklinde ifade edilecektir.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad 3.97$$

İç yansımalar bu şekilde devam edecek olursa, toplam geçirgenlik şu şekilde ifade edilebilir:

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha x)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha x)} \quad 3.98$$

Optik yoğunluk (OY) ise;

$$(OY) = \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad 3.99$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitliği geçirgenlik türünden ifade edecek olursak,

$$T = 10^{-(OY)} \quad 3.100$$

eşitliği elde edilecektir. (3.98) eşitliğinden,

$$IR^2 \exp(-2\alpha x) + (1 - R)^2 \exp(-\alpha x) - T = 0 \quad 3.101$$

eşitliği elde edilecektir. Burada, $y = \exp(-\alpha x)$ ve buradan $y^2 = \exp(-2\alpha x)$ tanımlaması yapılacak olursa, (3.101) eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$TR^2 y^2 + (1 - R)^2 y - T = 0 \quad 3.102$$

Bu eşitliğin kökleri bulunacak olursa,

$$y = \frac{-(1 - R)^2 \mp \sqrt{(1 - R)^4 + 4T^2 R^2}}{2TR^2} \quad 3.103$$

$\exp(-\alpha x)$ in alabileceği en küçük değer sıfır olacağından, (3.103) denkleminin negatif kökü alınmayacaktır. Buradan,

$$y = \frac{-(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2}}{2TR^2} \quad 3.104$$

$$\exp(-\alpha x) = \frac{-(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2}}{2TR^2} \quad 3.105$$

$$\alpha = -\frac{1}{x} \ln \left[-\frac{(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2}}{2TR^2} \right] \quad 3.106$$

eşitliği elde edilir. Buradan, optik yoğunluk yardımıyla geçirgenlik bulunabilir ve (3.106) eşitliğinden faydalanarak soğurma katsayısı hesaplanıp, optik karakterizasyonda kullanılabilir (Kırmızıgül, 2020).

3.3.5. Film Kalınlıklarının Hesaplanması

Bir boyutta, örneğin $+x$ yönünde ilerleyen bir elektromanyetik dalga için elektrik alan ifadesi (E);

$$E = E_0 \exp \left[i2\pi f \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] \quad 3.107$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada E ve E_0 , elektrik alanı, f frekansı, V elektromanyetik dalga'nın bulunduğu ortamdaki hızını ifade etmektedir.

Elektromanyetik dalga kırılma indisi n ve kalınlığı x olan bir film içine girdiğinde, film çıkışındaki faz değişimi,

$$\theta = \frac{n}{c} 2\pi f x = \frac{2\pi n}{\lambda} x \quad 3.108$$

olacaktır. Filmin içinden yansıyan bir ışığın ilk dalga ile arasındaki faz farkı $3\theta, 5\theta \dots (2\theta - 1)$ gibi değerler alacaktır. k bir tamsayı olmak üzere, film içerisinde yapıcı ve yıkıcı girişim olayları gözlenmektedir.

$$x = \frac{(2k+1)}{2n} \lambda \quad 3.109$$

$$x = \frac{(2k+1)}{4n} \lambda \quad 3.110$$

Böylece, filminden çıkan elektromanyetik dalganın şiddeti $\cos \theta$ gibi bir faz farkı oluşacaktır (Ulutaş, 2007).

Ardışık iki tepe değerinin gözlemlendiği λ_1 ve λ_2 dalga boylarının farkı alınacak olursa, (3.109) eşitliğinden,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(2k + 1)}{2nx} \quad 3.111$$

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{(2k - 1)}{2nx} \quad , \quad \frac{1}{\lambda_2} = \frac{(2k + 1)}{2nx} \quad 3.112$$

$$\frac{1}{\Delta\lambda} = \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \quad 3.113$$

olmak üzere,

$$\frac{1}{\Delta\lambda} = \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} = \frac{(2k + 1)}{2nx} - \frac{(2k - 1)}{2nx} = \frac{1}{nx} \quad 3.114$$

$$n = \frac{\Delta\lambda}{x} \quad 3.115$$

şeklinde elde edilir. Eğer kırılma indisi biliniyorsa, bu eşitlikten yararlanarak filmin kalınlığı hesaplanabilir. Farklı dalga boylarına ait kırılma indislerinin bulunduğu durumlar için eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz (Gümüş, 1998):

$$x = \left\{ 2 \left[\frac{n_1}{\lambda_1} - \frac{n_2}{\lambda_2} \right] \right\}^{-1} \quad 3.116$$

Film kalınlıklarını hesaplamak için kullanılan bir başka yöntemde tartım metodudur. Bu metotta, önce altlıkların üzerine film oluşturulmadığı durumdaki kütlesi ve daha sonra üzerine film oluşturulduğu durumdaki kütlesi hassas terazi ile ölçülür. İki ölçüm arasındaki kütle farkı (Δm), bize elde edilen filmin kütlesini verecektir. Filmin hacmi (V) ise, filmin altlık üzerinde oluşturduğu yüzey alanı (A) ile filmin kalınlığı (t_f)'nin çarpımına eşittir. Filmlerin kalınlıklarını bu verilerin ışığında şu şekilde hesaplayabiliriz:

$$\rho_f = \frac{\Delta m}{V} \quad 3.117$$

$$\Delta m = m - m_0 = m_f \quad 3.118$$

$$V = A t_f \quad 3.119$$

$$t_f = \frac{m_f}{\rho_f A} \quad 3.120$$

şeklinde elde edilir. Burada m ve m_0 kütle, A filmlerin kaplanacağı yüzeyin alanı, ρ_f filmin yoğunluğu, t_f ise filmin kalınlığıdır (Özaslan, 2016).

3.4. Alan Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM)

Taramalı elektron mikroskopları (SEM'ler), 1935 yılından bu yana çok sayıda araştırmacı tarafından mikro ölçekli yapıları incelemek için kullanılmış olup, günümüzde nano ölçekli yapıları incelemek için kullanılmaktadır. Bu yöntem, nispeten büyük örneklerin (numunelerin) görselleştirilebildiği, boyutsal ölçümlerin alınabildiği ve bileşim analizinin yapılabildiği çok yönlü bir tekniktir (Brabazon ve Raffer, 2009). Elektron mikroskopları fizik, kimya, biyoloji, tıp ve mühendislik gibi birçok bilimsel araştırma-geliştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alan taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM), bir kaynaktan hızlandırılmış yüksek enerjili elektronların incelenen numune yüzeyini taraması sonucunda yansıyan elektronların bir dedektör tarafından toplanması ve bir bilgisayar yazılımı yardımı ile değerlendirilerek numunenin yüzey morfolojisini yüksek çözünürlükte analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir (Özaslan, 2016).

Taramalı Elektron Mikroskopisi'nde, elektron kaynağından koparılan elektronlar vakum altında bulunan bir kolonda toplayıcı mercekler yardımıyla numune üzerine düşürülmekte, numune yüzeyinde bulunan atomlarla elektron demetinin etkileşmesi sonucunda ortaya çıkan parçacıklar ve X-ışınları detekte edilerek, incelenen numunenin topoğrafyası ve kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi edinilmektedir. Taramalı Elektron Mikroskobu'nda iletken ve iletken olmayan (sıvılar ve sıvı özelliği taşıyanlar hariç) birçok metaller, tekstil ürünleri, fiberler, plastikler, polimerler, kum, çakıl, polen vb... parçacıklar gibi her türlü numune incelenebilir. İletken olmayan numunelerin incelenebilir duruma getirilebilmesi için (yaklaşık 2 Å/saniye), numunenin üzerine altın, gümüş, platin vb... iletken malzemeler kullanarak çok ince bir kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir. (Sun, 2022).

Tez çalışması kapsamında farklı altlıklar üzerinde üretilen bakır (I) oksit (Cu_2O) ve CuO (tenorit) yarıiletken ince film numunelerin FE- SEM görüntüleri Adana Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında (ÇÜMERLAB) bulunan FEI Quanta 650 Field Emission SEM model alan taramalı elektron mikroskobu kullanılarak alınmıştır. 1 cm x 1 cm kesilen numuneler

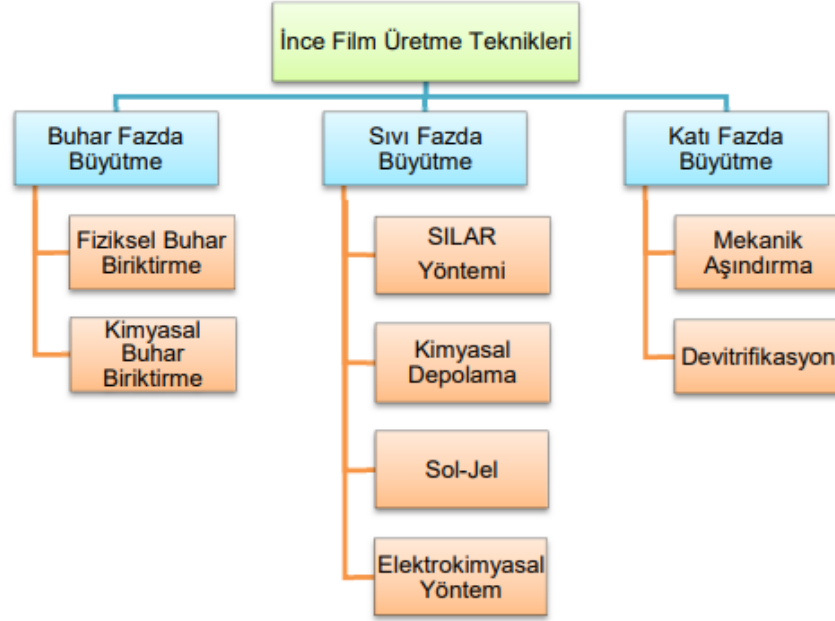
gümüş kaplandıktan sonra vakum ortamında 50kx, 100kx ve 150kx büyütme oranlarında SEM görüntüleri alındı.



Şekil 3.29. FEI Quanta 650 Field Emission SEM - Alan Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM)

3.5. Yarıiletken İnce Filmler ve Üretim Teknikleri

Malzeme biliminin ve buna bağlı teknolojilerin gelişimi, daha kaliteli ve dayanıklı malzemelerin üretilmesinde etkili olmuştur. Özellikle ince filmlerin bu teknolojilerin üretiminde yaygın olarak kullanılması, bu teknolojik gelişmelerin temelinde çok etkili olmuştur (Sönmezoğlu ve ark., 2012). İnce filmler, farklı üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, filmi destekleyerek filmin oluşumuna yardımcı olan bir taban üzerine dizilmesi ile ince bir tabaka halinde oluşturulan ve kalınlıkları genel olarak 1 μm 'nin altında olan malzemelerdir. İnce film üretim teknikleri akademik araştırmalarda, teknolojik uygulamalarda ve birçok endüstriyel faaliyetlerde olmak üzere çok geniş yelpazede kullanım alanına sahiptir (Karakuş ve Koç, 2023). Üretilen ince filmlerin performansları üretim teknikleri ile doğrudan ilişkilidir. İnce filmlerin üretilmesinde teknoloji ve bilimdeki gelişmelere bağlı olarak birbirine alternatif olabilecek yeni üretim teknolojileri kullanılmış ve geliştirilmiştir. Yarıiletken ince filmler katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç farklı fazda üretim tekniği ile elde edilebilmektedir.



Şekil 3.30. İnce film üretim teknikleri (Sönmezoğlu, 2012)

Yarıiletken ince filmleri elde edilebilmekte birden fazla değişik yöntem ve teknik kullanılmakta olup, yapmış olduğumuz tez çalışmasında Cu_2O yarıiletken ince filmleri farklı altlıklar üzerinde üretmek için sıralı (ardışık) iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu olarak adlandırılan SILAR yöntemi kullanılmıştır.

3.5.1. Sıralı (Ardışık) İyonik Tabaka Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu (SILAR) Yöntemi

Yarıiletken ince filmler, olağanüstü benzersiz özelliklerinden dolayı cihaz uygulamaları için önemli bir ilgi kazanmıştır. Modern bilimin ve teknolojinin gelişiminde önemli bir yere sahip olan yarıiletken ince filmlerin üretim tekniklerinin geliştirilmesi ile birlikte üretilen bu filmler sensörlerde, güneş pillerinde, laserlerde, elektronik gösterge panellerinde, bilgisayarlarda, cep telefonlarında ve daha birçok uygulama alanında kendisine yer bulmuştur (Çevlik ve Gümüş, 2019). Yarıiletken ince filmlerin üretimi için kullanılan yöntemleri fiziksel ve kimyasal yöntemler olarak iki başlık altında inceleyebiliriz. Metal filmler gibi tek bileşenli filmlerin üretiminde genel olarak kullanılan fiziksel yöntemlerde filmi meydana getirecek malzeme, hedef kaynaktan filmin oluşturulacağı veya kaplanacağı altlık üzerine hareket etmektedir. Kimyasal yöntemlerde ise bileşenler altlık malzemenin yüzeyinde ve etrafında kimyasal bir takım reaksiyonlara maruz kalmaktadır. Kimyasal buhar depolama (CVD), metal-organik kimyasal buhar depolama (MOCVD), kimyasal ışın epitaksisi (CBE) vb... gibi işlemler kimyasal yöntemlere örnek olarak verilebilir (Taşköprü, 2010).

Şekil 3.30'daki şemada verildiği gibi sıvı fazda büyütme teknikleri 4 kısma ayrılmıştır: Kimyasal depolama yöntemi, sol-gel yöntemi, elektrokimyasal depolama yöntemi ve sıralı iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) yöntemi.

SILAR yöntemi, sıvı fazdan katı faza ince film elde etmek için kullanılan yöntemlerinden birisidir. İnce film üretmek için kullanılacak çözeltiler uygun molarite ve miktarlarda hazırlandıktan sonra altlık sıvı çözeltilere sırayla daldırılır ve daldırma işlemi istenen sayı kadar tekrarlanır. Böylece çözeltiler arası daldırma işlemiyle bir çözeltiden altlık üzerine yapışan madde ile diğer çözeltiden yapışan madde arasında kimyasal reaksiyon meydana gelerek istenilen ince film oluşur (Özaslan, 2016). Yarıiletken film üretmek için en yeni çözüm tekniklerinden birisi olan SILAR yöntemi, modifiye edilmiş kimyasal banyo depolama yöntemi (CVD) olarak da bilinmektedir. SILAR yöntemi, kimyasal depolama yönteminde filmin oluşturulması esnasında çözelti içinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucu meydana gelen çökeltiden dolayı bir materyal kaybı olmasının önüne geçmek için geliştirilmiş bir yöntemdir (Altındemir, 2016). SILAR ismi 1985 yılında Nicolau ve arkadaşları tarafından ilk defa bahsedilmiş olup, bu yöntemi kullanarak ZnS, CdZnS ve CdS ince filmlerin üretimi ile ilgili olarak çalışmalar yapmışlardır. SILAR yöntemi I-VI, II-VI, III-VI, V-VI, VIII-VI ikili ve I-III-VI, II-II-VI, II-III-VI, II-VI-VI ve II-V-VI üçlü sülfür gruplarını ve diğer çeşitli filmleri depolamak için çok kullanışlıdır (Altındemir, 2016).

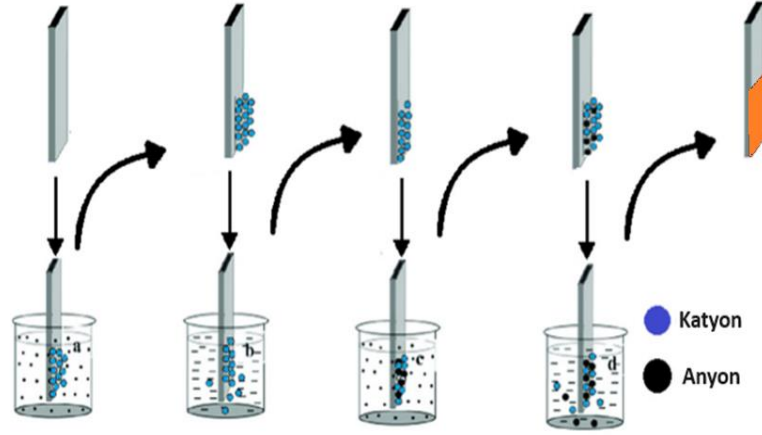
SILAR yöntemi dört aşamadan oluşmaktadır: Adsorpsiyon, ilk durulama, reaksiyon ve ikinci durulama.

a) **Adsorpsiyon:** SILAR yönteminin ilk aşamasında öncül çözelti içinde yer alan katyonlar altlık olarak kullanılan malzemenin yüzeyine adsorbe olurlar ve Helmholtz elektrikli çift tabakayı meydana getirirler. Bu tabaka katyonlardan oluşan pozitif (iç) ve katyonların karşı iyonlarından oluşan negatif (dış) yüklü iki katmandan meydana gelmektedir.

b) **İlk durulama:** Bu aşamada altlık yüzeyine gevşek bir biçimde tutunan katyon iyonları uzaklaştırılır ve bunun neticesinde doymuş elektriksel çift tabakaları meydana gelir.

c) **Reaksiyon:** Bu aşamada anyonik öncü çözelti içinde bulunan anyonlar sisteme dâhil olur ve altlık yüzeyinde katyon ve anyon iyonları arasında gerçekleşen reaksiyon neticesinde, katı bir madde oluşumu meydana gelir.

d) **İkinci durulama:** Son aşamada fazla ve reaksiyona girmemiş atomlar veya parçacıklar ve reaksiyon yan ürünleri altlık yüzeyinden ikinci bir durulama işlemi ile uzaklaştırılırlar.



Şekil 3.31. SILAR yöntemi şematik gösterimi (Baig ve ark., 2018)

Bu dört aşamanın defalarca tekrarlanması sonucunda yarıiletken ince filmler elde edilmektedir. İnce film üretim aşamasında çözeltinin sıcaklığı, altlık olarak kullanılan malzemenin özelliği, pH ve çözeltinin konsantrasyonu, daldırma sayısı ve durulama süresi vb... faktörler oldukça önemlidir (Çevlik, 2019).

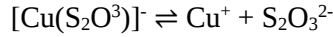
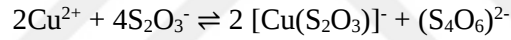
SILAR yöntemi ince film üretiminde kullanılan basit, kolay, ucuz ve doğa dostu yöntemlerden birisi olup birçok avantaja sahiptir:

- i) Altlık olarak kullanılacak malzemenin ebatları ve yüzey profili ile ilgili herhangi bir sınırlama yoktur.
- ii) Film üretimi için herhangi bir vakum sistemine ihtiyaç duyulmadığından, SILAR depolama ekipmanı basit ve ucuzdur.
- iii) Çökeltme döngüsünü değiştirerek altlık üzerinde depolanacak filmin kalınlığını kontrol etmek mümkündür.
- iv) Katkılama işlemi yapılacak maddenin belli oranlarda doğrudan katyonik çözeltinin içerisine eklenmesinden dolayı çok büyük bir kolaylık sağlar.
- v) Aynı zamanda normal atmosfer basıncında, oda sıcaklığında veya oda sıcaklığına yakın düşük sıcaklıklarda depolama işlemi gerçekleşmekte olup yalıtkan, yarıiletken, metal veya sıcaklığa duyarlı (polyester gibi) çeşitli malzemeler, altlık malzeme olarak kullanılmaktadır. Depolama işlemi esnasında altlığın oksidasyonu ya da korozyona uğraması da engellenmiş olur (Sun, 2022).

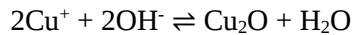
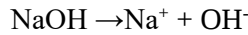
3.5.4. Cu₂O İnce Filmlerin Elde Edilmesi

Kaliteli ve düzgün bir ince filmin üretilebilmesi için öncelikle altlık olarak kullanılacak malzemelerin temizliği çok önemli bir faktördür. Bu çalışmada 76 mm x 26 mm x 1 mm boyutlarında cam ve ITO altlıklar kullanılmıştır. Sadece cam altlıklar için temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Cam altlıklar öncelikle deterjanlı sıcak suda temizlenerek çeşme suyu altında durulandı. Daha sonra cam altlıklar kromik asit içerisinde yaklaşık 10 dk bekletildi. Kromik asitten çıkarılan cam altlıklar yine çeşme suyu altında bir kez daha durulandı. Cam altlıklar daha sonra %99,99 saflıktaki etil alkol içerisinde 10 dk bekletildi ve son olarak saf sudan geçirildikten sonra 1 saat 100 °C sıcaklıkta etüv içerisinde kurutuldu. Temizlenen altlıklar hassas terazi yardımı ile tartıldı.

Cu₂O ince filmleri depolamak için 1 M 50 ml bakır sülfat pentahidrat (CuSO₄·5H₂O, Merck), kompleksleştirici öncül olarak 1 M 200 ml sodyum tiosülfat (Na₂S₂O₃, Merck) ve 2 M 500 ml sodyum hidroksit (NaOH, Merck) çözeltileri kullanılmıştır. Öncelikle hazırlanan 1 M 50 ml CuSO₄·5H₂O çözeltisi (mavi renkli) ve 1 M 200 ml Na₂S₂O₃ çözeltisi bir beher içerisine döküldü ve üzerine 250 ml saf su eklenip bir manyetik karıştırıcıda renksiz oluncaya kadar karıştırılarak 1 M 500 ml bakır tiosülfat (3Cu₂S₂O₃·2Na₂S₂O₃) kompleks çözeltisi elde edildi. 3Cu₂S₂O₃·2Na₂S₂O₃ çözeltisinin renksiz olmasının nedeni Cu²⁺ iyonlarının Cu⁺ iyonlarına indirgenmesidir.



2 M 500 ml'lik NaOH çözeltisi, sıcaklık kontrollü ısıtıcı üzerine yerleştirilerek çözeltinin sıcaklığının 60 °C'de sabit tutulması sağlandı. Filmin depolanacağı cam altlıklar 2 s süreyle (1 s daldırma, 1 s çıkarma) önce NaOH çözeltisinin içerisine dikey olacak şekilde daldırılır. Bu aşamada cam altlıklar üzerine (OH)⁻ iyonları yapışmaktadır. Daha sonra cam altlıklar benzer şekilde 3Cu₂S₂O₃·2Na₂S₂O₃ çözeltisi içerisine 2 s süreyle dikey olacak şekilde daldırılır. Bu aşamada ise Cu⁺ iyonları ile (OH)⁻ iyonları birbirleri ile reaksiyona girerek Cu₂O yarıiletken ince filmleri meydana getirir.



Son olarak cam altlıklar saf su içerisine 2 s süreyle dikey olarak daldırılır ve bu aşamada fazla ve reaksiyona girmemiş atomlar veya parçacıklar ve reaksiyon yan ürünleri cam altlık yüzeyinden uzaklaştırılmış olur. Bu süreç 1 SILAR döngüsü olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem

ince filmleri üretmek için 36 SILAR döngüsü olarak cam ve ITO altlıklar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Her iki yüzeyinde de Cu_2O ince film depolanmış altlıklar hava ortamında kurutulduktan sonra bir yüzeyi seyreltilmiş asit kullanılarak pamuk ile silindi ve filmlerin kalınlığının tespiti için tekrardan tartım işlemi yapıldı.

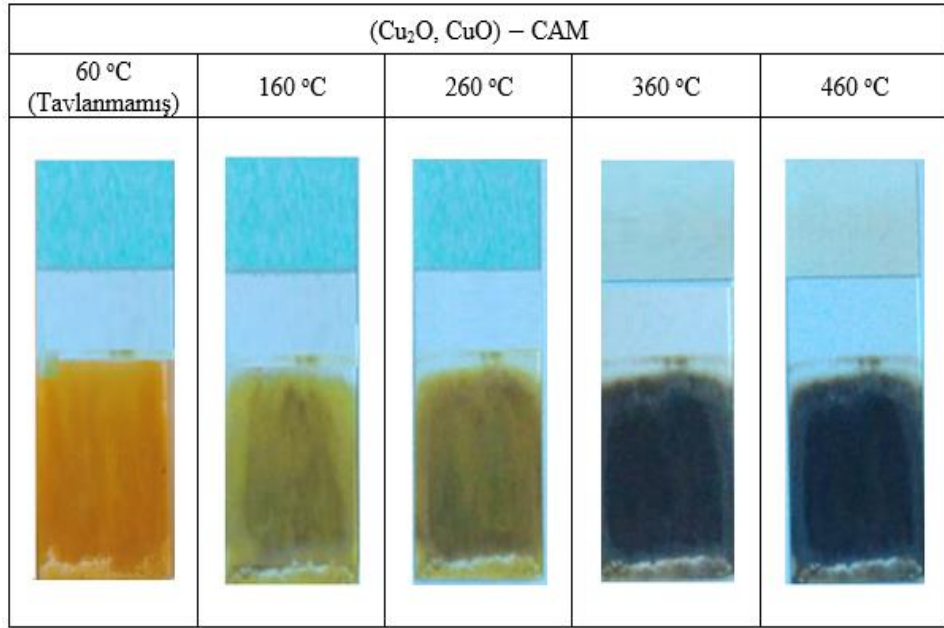
3.5.5. Cu_2O İnce Filmlerin Tavlama

Tez çalışması kapsamında SILAR yöntemi ile 60 °C sıcaklıkta cam ve ITO altlıklar üzerinde depolanan Cu_2O ince filmlerin yapısal, morfolojik, elektriksel ve optik özellikleri üzerinde tavlama işleminin etkisini incelemek amacıyla, ince filmler sırasıyla 160, 260, 360 ve 460 °C sıcaklıklarda 1 saat boyunca Şekil 3.32'deki Nabertherm marka kül fırınında tavlandı.

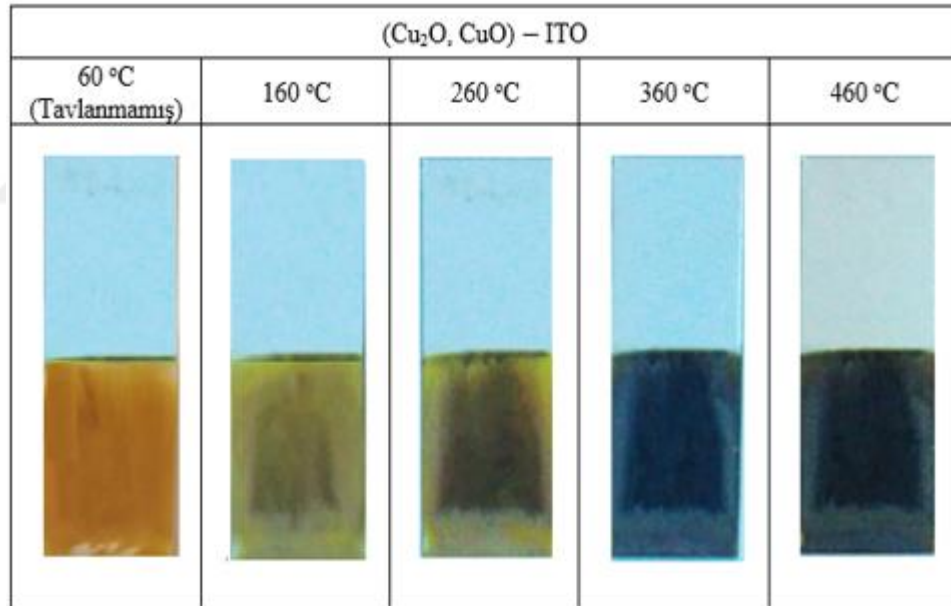


Şekil 3.32. Nabertherm marka kül fırını

Numuneler kül fırının içerisine oda sıcaklığında yerleştirildikten sonra istenilen tavlama sıcaklığı ayarlandı ve fırın bu sıcaklık değerinde 1 saat boyunca sabit tutuldu. Daha sonra kontrollü bir şekilde kül fırınında soğumaya bırakıldı ve fırının sıcaklığı oda sıcaklığına ulaştığında numuneler kül fırınından çıkartıldı. 60 °C sıcaklıkta cam ve ITO altlıklar üzerinde depolanan Cu_2O ince filmlere ait farklı sıcaklıklardaki tavlama görüntüleri sırasıyla Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'de gösterilmiştir.



Şekil 3.33. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan Cu₂O yarıiletken ince filmler



Şekil 3.34. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan Cu₂O yarıiletken ince filmler

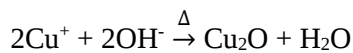
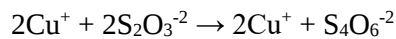
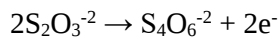
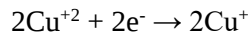
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Cu₂O ve CuO İnce Filmlerin X-ışını Kırınım Analizleri

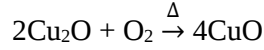
Bakır (I) oksit (Cu₂O) yarıiletken ince filmleri, farklı altlıklar (cam, ITO) üzerinde 60 °C gibi düşük sayılabilecek depolama sıcaklığında SILAR [Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu)] yöntemi ile depolandı. Bu filmler daha sonra sıcaklığı kontrol edilebilen kül fırınında farklı sıcaklıklarda (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) hava atmosferinde birer saat ısısal işleme (tavlama) tabi tutuldu. Cu₂O ve tavlama sonucu CuO' ya (tenorit) dönüşen yarıiletken ince filmlerin yapısal özelliklerini tespit etmek için X-ışını kırınım (XRD) analizi kullanıldı. XRD analizleri yarıiletken ince filmlerin kristal yapısını, sıcaklığa bağlı faz değişimini, 2θ değerlerini, (hkl) düzlemlerini, maksimum yarısi tam genişlik değerini, kristalit büyüklüğünü, kafese ait örgü parametresi değerlerini ve buna bağlı olarak birim hücre hacmi ve yoğunluğunu bulmaya yardımcı olur. SILAR metodu ile hazırlanan Cu₂O ve CuO yarıiletken ince filmleri X-ışını aletinde $2\theta = 10^\circ - 80^\circ$ aralığında ve 2°/dakika tarama hızı (sabit) ile yapıldı. XRD şekillerinde dikey eksen şiddeti, yatay ise kırınım açısı 2θ 'yı belirtir.

Ayrıca, Cu₂O ve CuO' nun kristal yapıları ve oluşumu hakkında kısa bilgi vermek gerekebilir; Cu₂O, basit kübik fazda olup $Pn-3m$ (224) birim hücre uzay grubuna sahiptir. Cu₂O'nun birim hücre eksen açıları; $\alpha=90,00^\circ$, $\beta=90,00^\circ$, $\gamma=90,00^\circ$ ve örgü parametre değerleri $a=b=c=4,268 \text{ Å}$ 'dur (PDF Kart No.: 00 – 071 – 3645). CuO ise monoklinik fazda olup, birim hücre uzay grubu $C2/c$ (15) ve örgü parametre değerleri $a=4,685$, $b=3,423$, $c=5,132 \text{ Å}$ 'dur. CuO' un birim hücrelerini oluşturan eksen açıları; $\alpha=90,00^\circ$, $\beta=99,52^\circ$, $\gamma=90,00^\circ$ (PDF Kart No.: 00 – 041 – 0254) dir (Özaslan, 2016).

Cu₂O ince film için oluşum reaksiyonu şu şekilde açıklanabilir; çözelti ortamında mevcut olan bakır (II) iyonları çözeltiye ilave edilen tiyosülfat ile bakır (I) iyonuna indirgenir. Çözelti ortamına sodyum hidroksit ilavesi ile bakır (I) iyonları hidrosit iyonları ile birlikte katı olan bakır (I) oksit (Cu₂O) yarıiletken ince filmini oluştururlar. İlgili reaksiyonlar aşağıda verilmiştir;

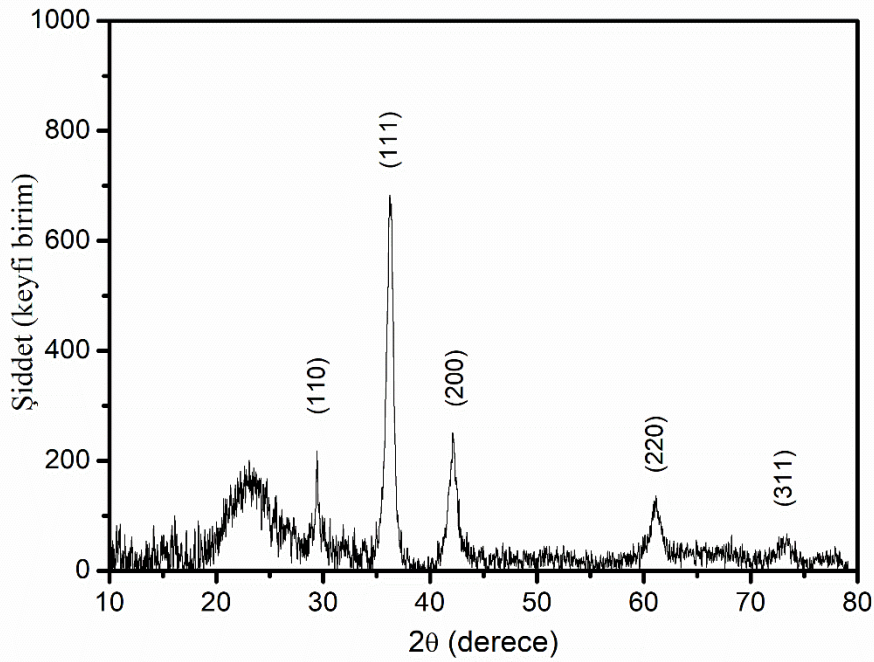


Tavlama sıcaklığı uygun bir sıcaklığa geldiğinde (250 – 300 °C) Cu₂O ince filmi CuO (tenorit) fazına dönüşür (Yeşilçubuk, 2002; Serin ve ark, 2005; Park ve ark., 2014). Bu sıcaklıkta değerinde bakır atomları elektron (e⁻) yitirerek Cu⁺ iyon durumundan Cu²⁺ iyon durumuna geçiş yaparlar yani yükseltgenir. Bu faz geçişi aşağıdaki reaksiyon ile ifade edilebilir;



Burada, Cu₂O ve O reaksiyona girmeye başlar ve CuO fazını oluşturur. Kristal yapı değişikliğe uğrar (Cu₂O kübik yapıdan CuO monoklinik yapıya geçiş olur). Dönüşümün verimliliği tavlama sıcaklığı, süre ve ortamdaki oksijen konsantrasyonu gibi parametrelere bağlıdır.

4.1.1. Cam Altlıklar Üzerinde 60 °C’de 36 SILAR Döngüsü ile Depolanan ve Farklı Sıcaklıklarda Tavlanan Cu₂O İnce Filmlerin X-Işını Kırınım Desenleri



Şekil 4.1. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu₂O ince filmler için X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.1. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu₂O ince filmler için kristal parametre değerleri

Ölçülen Değerler		Standart Değerler		(hkl) düzlemi	FWHM (°)	D (nm)	Örgü Parametreleri $a = b = c$ (Å)		V (Å) ³	ρ (g/cm ³)
2θ (°)	d (Å)	2θ (°)	d (Å)				Ölçülen	Standart		
29,42	3,03	29,57	3,02	(110)	-	-				
36,23	2,48	36,43	2,46	(111)	0,7348	11,4	4,269	4,268	77,80	6,11
42,14	2,14	42,31	2,13	(200)	0,8980	9,5				
61,15	1,51	61,38	1,50	(220)	-	-				
72,94	1,30	73,53	1,29	(311)	-	-				

Cam altlık üzerinde 60 °C’de (tavlanmamış) 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu₂O yarıiletken ince film için X-ışını kırınım deseni ($2\theta = 10^\circ - 80^\circ$) Şekil 4.1’de görülmektedir. X-ışını kırınım deseni incelendiğinde sırasıyla 29,42°, 36,23°, 42,14°, 61,15° ve 72,94° açı değerlerinde pikler gözlenmiştir (Ristov ve ark., 1985; Maruyama, 1998; Ahirrao ve ark., 2011; Wang, 2011). Bu piklerle eşleşen (hkl) düzlemleri sırasıyla (110), (111), (200), (220) ve (311) olarak bulunmuştur. Ayrıca, yaklaşık $2\theta = 10^\circ - 30^\circ$ aralığında bulunan pikin amorf cam altlığa ait olduğu bilgisi literatürde ifade edilmiştir (Altındemir ve Gümüş, 2020). Cu₂O ince film için Bragg yasası kullanılarak atom düzlemleri arasındaki d -açıklıkları hesaplanarak Çizelge 4.1’de verilmiştir.

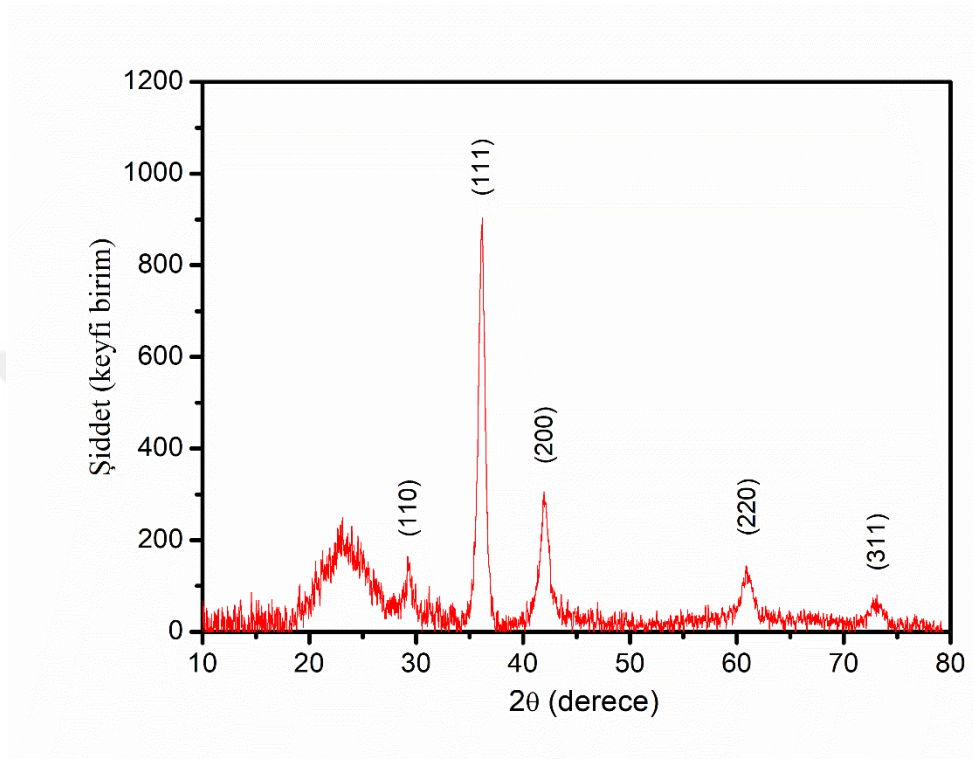
X-ışını kırınım deseni içerisinde Cu₂O yarıiletken ince filme ait en şiddetli pik $2\theta = 36.29^\circ$ de bulundu. Burada tercihli yönelimin (111) düzlemi boyunca olduğu görüldü. Bu pike ait kristalit büyüklüğü değeri Çizelge 4.1’de verilen maksimum yarıısı tam genişlik (FWHM) değeri kullanılarak Scherrer formülü (eşitlik – 4.1) ile hesaplandı. Hesaplanan kristalit büyüklüğü değeri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad 4.1$$

Cu₂O kafesine ait örgü parametre ($a=b=c$) değerleri; (hkl) değerleri ve atom düzlemleri (d) arasındaki değerler kullanılarak eşitlik – 4.2 yardımı ile $a=b=c=4,269$ Å olarak hesaplandı (Gupta ve ark., 2018).

$$\frac{1}{d_{(hkl)}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad 4.2$$

İnce filmin en şiddetli pikine ait hacim ve yoğunluk değerleri hesaplanarak Çizelge 4.1’de verilmiştir. Yine, Çizelge 4.1’de verilen 2θ , d ve örgü parametre değerleri incelendiğinde Cu_2O ’nun standart değerleri (PDF Kart No.: 00–071–3645) ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. X-ışını kırınım deseninden elde edilen sonuçlar ışığında; Cu_2O yarıiletken ince filmin amorf cam altlık üzerinde polikristal yapıda ve kübik fazda büyüdüğü görülmüştür.



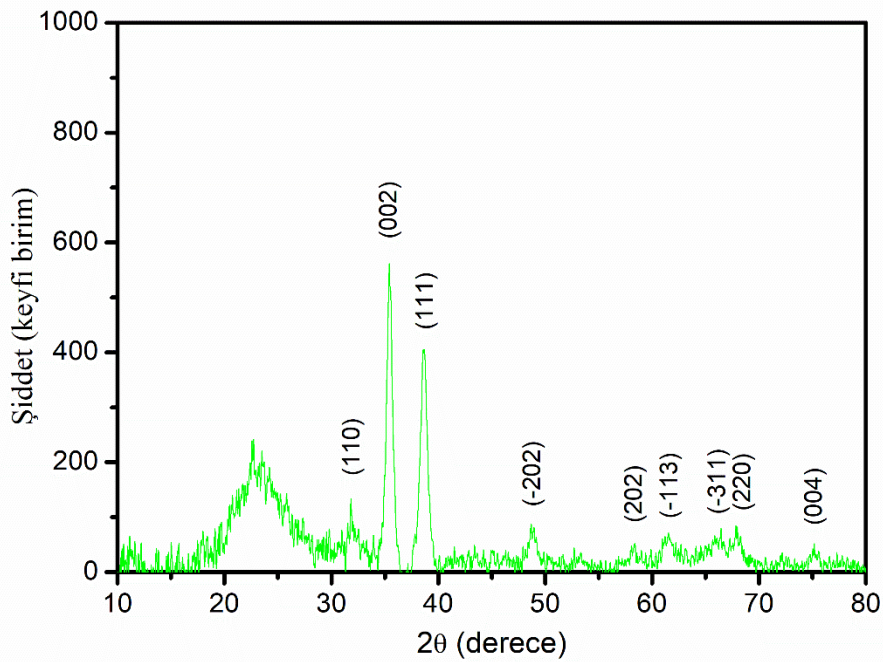
Şekil 4.2. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu_2O ince filmler için X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.2. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu_2O ince filmler için kristal parametre değerleri

Ölçülen Değerler		Standart Değerler		(hkl) düzlemi	FWHM (°)	D (nm)	Örgü Parametreleri $a = b = c$ (Å)		V (Å) ³	ρ (g/cm ³)
2θ (°)	d (Å)	2θ (°)	d (Å)				Ölçülen	Standart		
29,42	3,05	29,57	3,02	(110)	-	-				
36,22	2,49	36,43	2,46	(111)	0,7375	11,3	4,271	4,268	77,91	6,10
41,99	2,15	42,31	2,13	(200)	0,9982	8,5				
60,84	1,52	61,38	1,50	(220)	-	-				
73,08	1,30	73,53	1,29	(311)	-	-				

Cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan Cu_2O yarıiletken ince film için X-ışını kırınım deseni ($2\theta = 10^\circ - 80^\circ$) Şekil 4.2’de verilmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi yaklaşık $2\theta = 10^\circ - 30^\circ$ aralığında bulunan pik amorf cam

altlığı aittir. Şekil 4.2'deki X-ışını kırınım deseni incelendiğinde sırasıyla 29,42°, 36,22°, 41,99°, 60,84° ve 73,08° açı değerlerinde pikler gözlenmiş ve bu piklerle eşleşen (*hkl*) düzlemleri sırasıyla (110), (111), (200), (220) ve (311) olarak bulunmuştur. Şekil 4.2'deki X-ışını kırınım deseni incelendiğinde depolanan Cu₂O yarıiletken ince filme ait tercihli yönelimin (111) düzlemi boyunca olduğu ve kristallenmenin bu yönde daha baskın gerçekleştiği görüldü. Cu₂O filmine ait en büyük pik için kristalit büyüklüğü değeri Çizelge 4.2'de verilen maksimum yarısi tam genişlik değeri kullanılarak eşitlik – 4.1 ile hesaplandı. 160 °C sıcaklıkta tavlanan ince filmin örgü parametre değerleri (*a=b=c*) eşitlik – 4.2 ile hesaplandı. Hesaplanan örgü parametre değerleri Cu₂O'nun standart değerleri (PDF Kart No.: 00 – 071 – 3645) ile uyumlu olduğu görüldü. Ek olarak, Cu₂O filminin en şiddetli pikine ait hacim ve yoğunluk değerleri hesaplanarak Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu değerler literatürde (Özaslan, 2016) verilen değerler ile uyumludur. 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu₂O yarıiletken ince filmin de polikristal yapıda ve kübik fazda büyüdüğü görüldü.



Şekil 4.3. Cam altlıklar üzerinde 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni

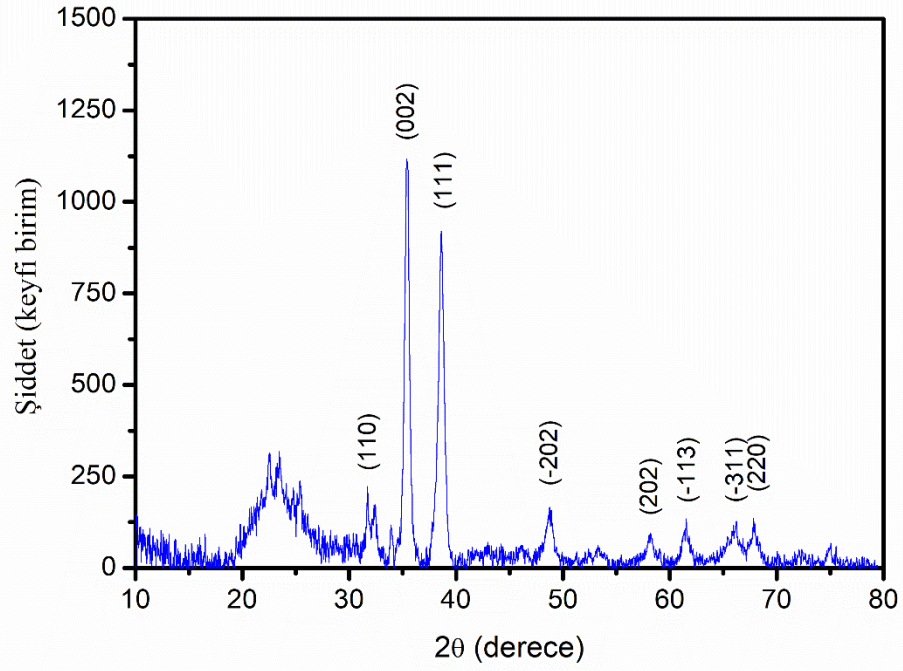
Çizelge 4.3. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri

Ölçülen Değerler		Standart Değerler		(hkl) düzlemi	FWHM (°)	D (nm)	Örgü Parametreleri $a \neq b \neq c$ (Å)		V (Å) ³	ρ (g/cm ³)
2θ (°)	d (Å)	2θ (°)	d (Å)				Ölçülen	Standart		
32,02	2,80	32,51	2,75	(110)	-					
35,43	2,53	35,44	2,53	(002)	0,6490	12,9	a=4,687 b=3,426 c=5,134	a=4,685 b=3,423 c=5,132	81,29	6,50
38,59	2,33	38,73	2,32	(111)	0,7622	11,0				
48,69	1,87	48,74	1,87	($\bar{2}$ 02)	-	-				
58,57	1,57	58,31	1,58	(202)	-	-				
61,45	1,51	61,55	1,51	($\bar{1}$ 13)	-	-				
66,45	1,41	66,28	1,41	($\bar{3}$ 11)	-	-				
67,83	1,39	68,15	1,38	(220)	-	-				
75,16	1,26	74,99	1,27	(004)	-	-				

Şekil 4.3’te cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO yarıiletken ince film için X-ışını kırınım deseni görülmektedir. X-ışını kırınım deseni incelendiğinde sırasıyla 32,02°, 35,43°, 38,59°, 48,69°, 58,57°, 61,45°, 66,45°, 67,83° ve 75,16° açı değerlerinde pikler gözlenmiş ve bu piklerle eşleşen (hkl) düzlemleri sırası ile (110), (002), (111), ($\bar{2}$ 02), (202), ($\bar{1}$ 13), ($\bar{3}$ 11), (220) ve (004) olarak belirlenmiştir (Maruyama, 1998; Oral ve ark., 2004; Park ve ark., 2014). 260 °C’de tavlanan ince filmin Cu₂O kübik fazından CuO (tenorit) monoklinik fazına geçtiği tespit edildi. Filmin en büyük iki pikine karşılık gelen kristalit büyüklüğü (D) değerleri Çizelge 4.3’te verilen maksimum yarısi tam genişlik değerleri kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 4.3’te verilmiştir. Filmin örgü parametre ($a \neq b \neq c$) değerleri aşağıdaki eşitlik – 4.3 yardımıyla hesaplanmış ve Çizelge 4.3’te verilmiştir. Elde edilen değerlerin CuO’nun standart değerleri (PDF Kart No. : 00 – 041 – 0254) ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

$$\frac{1}{d_{(hkl)}^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \beta}{ac} \right) \quad 4.3$$

CuO ince filmin en şiddetli pikine ait hacim ve yoğunluk değerleri hesaplanarak Çizelge 4.3’te görülmektedir. X-ışını kırınım desenine bakıldığında CuO ince film için tercihli yönelimin (002) ile (111) düzlemi boyunca olduğu ve kristallenmenin bu iki pik yönünde olduğu görüldü (Gupta ve ark., 2018).



Şekil 4.4. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni

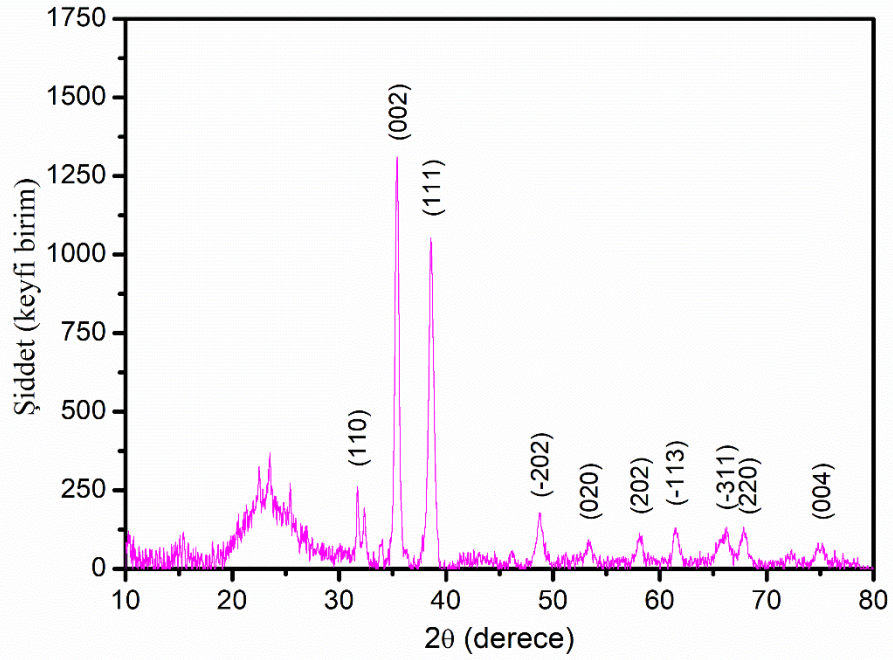
Çizelge 4.4. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri

Ölçülen Değerler		Standart Değerler		(hkl) düzlemi	FWHM (°)	D (nm)	Örgü Parametreleri $a \neq b \neq c$ (Å)		V (Å) ³	ρ (g/cm ³)
2θ (°)	d (Å)	2θ (°)	d (Å)				Ölçülen	Standart		
32,30	2,80	32,51	2,75	(110)	-	-				
35,38	2,54	35,44	2,53	(002)	0,4889	17,0	$a=4,681$ $b=3,425$ $c=5,133$	$a=4,685$ $b=3,423$ $c=5,132$	81,14	6,51
38,61	2,33	38,73	2,32	(111)	0,6129	13,7				
48,89	1,87	48,74	1,87	($\bar{2}$ 02)	-	-				
58,22	1,59	58,31	1,58	(202)	-	-				
61,49	1,51	61,55	1,51	($\bar{1}$ 13)	-	-				
66,22	1,42	66,28	1,41	($\bar{3}$ 11)	-	-				
67,83	1,38	68,15	1,38	(220)	-	-				

Şekil 4.4’te cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta 1 saat süresinde tavlanan CuO yarıiletken ince film için X-ışını kırınım deseni görülmektedir. X-ışını kırınım deseni incelendiğinde sırasıyla 32,30°, 35,38°, 38,61°, 48,89°, 58,22°, 61,49°, 66,22° ve 67,83° açı değerlerinde pikler gözlenmiş ve bu piklerle eşleşen (hkl)

düzlemleri sırasıyla (110), (002), (111), ($\bar{2}02$), (202), ($\bar{1}13$), ($\bar{3}11$) ve (220) olarak belirlenmiştir (Gupta ve ark., 2018). Çizelge 4.4'te verilen maksimum yarı tam genişlik değerleri kullanılarak filme ait en büyük iki pike karşılık gelen kristalit büyüklük (D) değerleri hesaplanmış olup bu değerler Çizelge 4.4'te gösterildi. Filme ait örgü parametre değerleri eşitlik – 4.3 ile hesaplanarak bu değerler Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Bu veriler ışığında elde edilen değerlerin CuO'nun standart değerleri (PDF Kart No.: 00 – 041 – 0254) ile uyumlu olduğu görüldü. Bunun yanısıra, 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmin en şiddetli pikine ait hacim ve yoğunluk değerleri hesaplanarak Çizelge 4.4'te verilmiştir.

CuO ince filmin X-ışını kırınım desenine bakıldığında, tercihli yönelimin (002) ile (111) düzlemi boyunca gerçekleştiği ve kristallenmenin bu iki pik yönünde meydana geldiği görüldü. X-ışını kırınım deseni sonucunda, CuO yarıiletken ince filmin polikristal yapıda ve monoklinik fazda büyüdüğü görüldü.



Şekil 4.5. Cam altlıklar üzerinde 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni

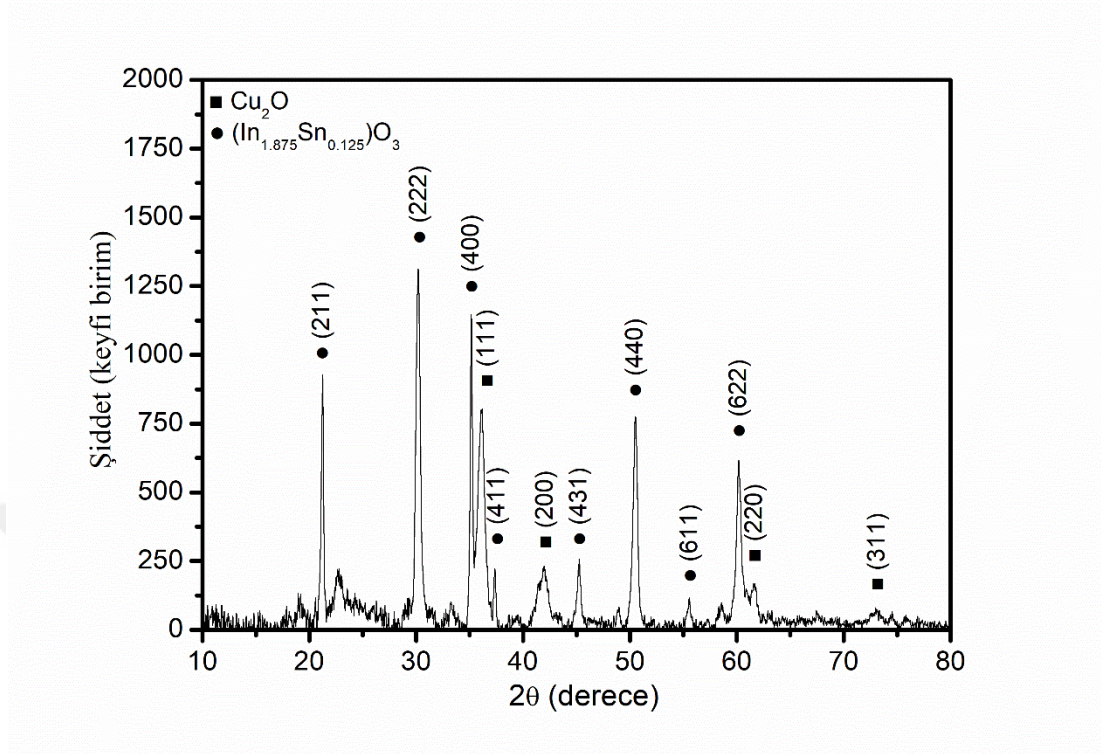
Çizelge 4.5. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri

Ölçülen Değerler		Standart Değerler		(hkl) düzlemi	FWHM (°)	D (nm)	Örgü Parametreleri $a \neq b \neq c$ (Å)		V (Å) ³	ρ (g/cm ³)
2 θ (°)	d (Å)	2 θ (°)	d (Å)				Ölçülen	Standart		
32,41	2,77	32,51	2,75	(110)	-	-				
35,40	2,54	35,44	2,53	(002)	0,4039	20,6	a=4,688 b=3,426 c=5,130	a=4,685 b=3,423 c=5,132	81,24	6,50
38,63	2,33	38,73	2,32	(111)	0,5421	15,5				
48,80	1,87	48,74	1,87	($\bar{2}$ 02)	-	-				
53,34	1,72	53,47	1,71	(020)	-	-				
58,25	1,59	58,31	1,58	(202)	-	-				
61,40	1,51	61,55	1,51	($\bar{1}$ 13)	-	-				
66,12	1,41	66,28	1,41	($\bar{3}$ 11)	-	-				
67,84	1,38	68,15	1,38	(220)	-	-				
75,35	1,26	74,99	1,27	(004)	-	-				

Cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile tavlanan CuO yarıiletken ince filme ait X-ışını kırınım deseni Şekil 4.5’te verilmiştir. X-ışını kırınım deseninde sırasıyla 32,41°, 35,40°, 38,63°, 48,80°, 53,34°, 58,25°, 61,40°, 66,12°, 67,84° ve 75,35° açı değerlerinde pikler gözlenmiş ve bu piklerle eşleşen (hkl) düzlemleri sırasıyla (110), (002), (111), ($\bar{2}$ 02), (020), (202), ($\bar{1}$ 13), ($\bar{3}$ 11), (220) ve (004) olarak belirlenmiştir (Chatterjee ve ark., 2016; Özaslan ve ark., 2020). Çizelge 4.5’te verilen maksimum yarısi tam genişlik değerleri kullanılarak filme ait en büyük iki pike karşılık gelen kristalit büyüklük (D) değerleri hesaplandı. Hesaplanan kristalit büyüklük değerleri Çizelge 4.5’te gösterilmiştir. 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmine ait örgü parametre değerleri, hacim ve yoğunluk değerleri hesaplanmış olup ve bu değerler Çizelge 4.5’te gösterilmiştir. Elde edilen değerlerin CuO’nun standart değerleri (PDF Kart No.: 00 – 041 – 0254) ile uyumlu olduğu görülmüştür.

X-ışını kırınım deseni incelendiğinde CuO ince film için tercihli yönelimin (002) ile (111) düzlemi boyunca gerçekleştiği ve kristallenmenin bu iki pik yönünde olduğu görüldü. Şekil 4.5’teki X-ışını kırınım desenine bakıldığında, CuO ince filmin polikristal yapıda ve monoklinik fazda büyüdüğü tespit edildi.

4.1.2. ITO Altlıklar Üzerinde 60 °C’de 36 SILAR Döngüsü ile Depolanan ve Farklı Sıcaklıklarda Tavlanan Cu₂O İnce Filmlerin X-Işını Kırınım Desenleri



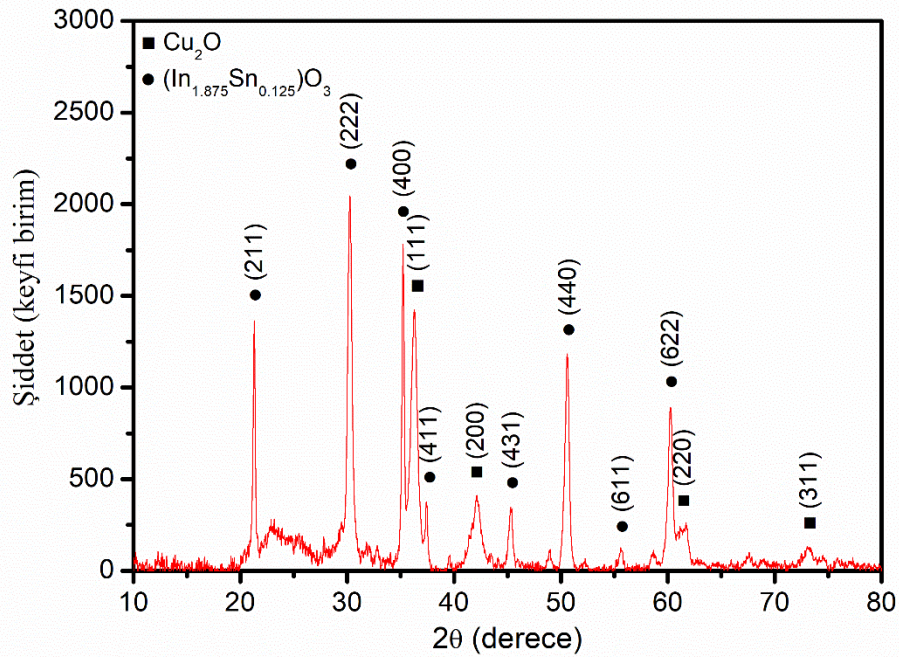
Şekil 4.6. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu₂O ince filmler için X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.6. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu₂O ince filmler için kristal parametre değerleri

Ölçülen Değerler		Standart Değerler		(hkl) düzlemi	FWHM (°)	D (nm)	Örgü Parametreleri $a = b = c$ (Å)		V (Å) ³	ρ (g/cm ³)
2 θ (°)	d (Å)	2 θ (°)	d (Å)				Ölçülen	Standart		
36,24	2,48	36,43	2,46	(111)	0,6992	11,9	4,271	4,268	77,91	6,10
42,11	2,14	42,31	2,13	(200)	1,0123	8,4				
61,40	1,50	61,38	1,50	(220)	-	-				
73,22	1,30	73,53	1,29	(311)	-	-				

ITO altlık üzerinde 60 °C’de ve 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu₂O yarıiletken ince film için X-ışını kırınım deseni Şekil 4.6’da verilmiştir. X-ışını kırınım desenine bakıldığında sırasıyla 36,24°, 42,11°, 61,40° ve 73,22° açı değerlerinde Cu₂O ya ait pikler gözlenmiş ve kare simgesi (■) ile belirtilmiştir. Bu piklerle eşleşen (*hkl*) düzlemleri sırasıyla (111), (200), (220) ve (311) olarak bulunmuştur (Liu ve ark., 2005; Elmezayyen ve ark., 2015). Bunların dışında daire simgesi (●) ile belirtilen pikler ise ITO’ya ait olup bunlara karşılık gelen (*hkl*) düzlemleri Şekil 4.6’da gösterildi. Cu₂O filmine ait en büyük iki pik için tanecik büyüklüğü değerleri Çizelge 4.6’da verilen maksimum yarı tam genişlik değeri kullanılarak hesaplandı. Hesaplanan kristalit büyüklük değerleri, örgü parametre değerleri (*a*=*b*=*c*), hacim ve yoğunluk değerleri Çizelge 4.6’da verildi. Elde edilen örgü parametreleri değerleri Cu₂O’nun standart değerleri (PDF Kart No.: 00 – 071 – 3645) ile uyum içerisinde olduğu görüldü.

Şekil 4.6’daki X-ışını kırınım deseni incelendiğinde bu filme ait tercihli yönelimin (111) düzlemi boyunca olduğu ve kristallenmenin bu yönde daha fazla gerçekleştiği görüldü. X-ışını kırınım deseninden elde edilen sonuçlardan, Cu₂O yarıiletken ince filmin ITO altlık üzerinde polikristal yapıda ve kübik fazda büyüdüğü görüldü.



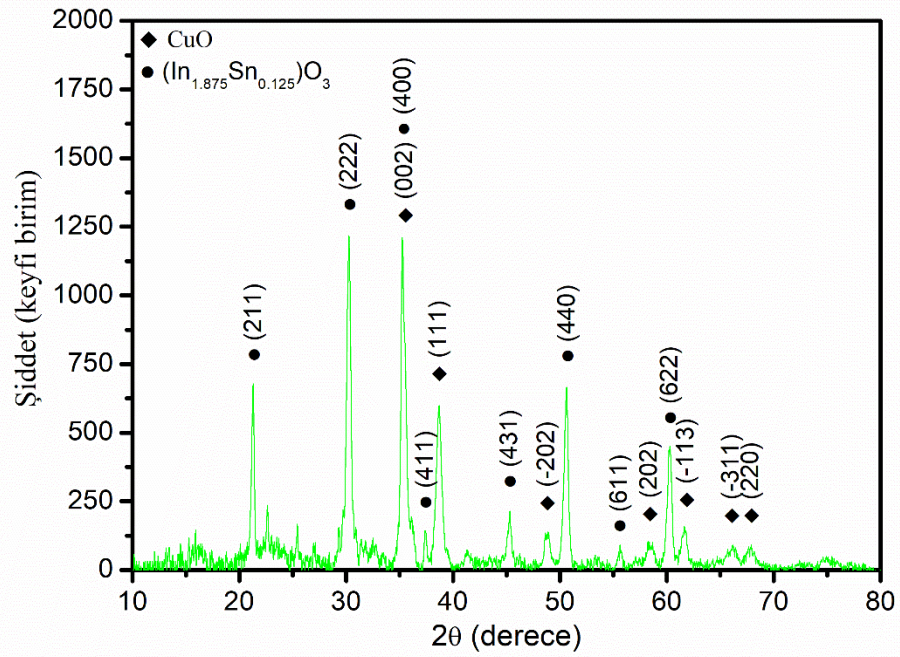
Şekil 4.7. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu₂O ince filmler için X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.7. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu₂O ince filmler için kristal parametre değerleri

Ölçülen Değerler		Standart Değerler		(hkl) düzlemi	FWHM (°)	D (nm)	Örgü Parametreleri $a = b = c$ (Å)		V (Å) ³	ρ (g/cm ³)
2θ (°)	d (Å)	2θ (°)	d (Å)				Ölçülen	Standart		
36,33	2,47	36,43	2,46	(111)	0,7467	11,2	4,269	4,268	77,80	6,11
42,11	2,15	42,31	2,13	(200)	1,1823	7,2				
61,40	1,50	61,38	1,50	(220)	-	-				
73,27	1,30	73,53	1,29	(311)	-	-				

ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan Cu₂O yarıiletken ince film için X-ışını kırınım deseni Şekil 4.7’de verilmiştir. X-ışını kırınım deseni incelendiğinde sırası ile 36,33°, 42,11°, 61,40° ve 73,27° açı değerlerinde pikler gözlenmiş ve bu piklerle eşleşen (hkl) düzlemleri sırasıyla (111), (200), (220) ve (311) olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.7’de verilen maksimum yarısı tam genişlik değerleri kullanılarak filme ait en büyük iki pike karşılık gelen kristalit büyüklüğü değerleri ve örgü parametresi değerleri hesaplandı ve Çizelge 4.7’de gösterildi. Ayrıca, 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu₂O ince filmin en şiddetli pikine ait hacim ve yoğunluk değerleri hesaplanarak Çizelge 4.7’de verildi. Hesaplanan örgü parametre değerlerinin Cu₂O’nun standart değerleri (PDF Kart No.: 00 – 071 – 3645) ile uyumlu olduğu görüldü.

Cu₂O yarıiletken ince filme ait X-ışını kırınım deseni incelendiğinde, 160 °C sıcaklıkta tavlanan filme ait tercihli yönelimin (111) düzlemi boyunca olduğu ve kristallenmenin daha fazla bu yönde gerçekleştiği görüldü. X-ışını kırınım deseninden elde edilen sonuçlardan ITO altlık üzerinde depolanan ve 160 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan Cu₂O yarıiletken ince filmin polikristal yapıda ve kübik fazda büyüdüğü görüldü.



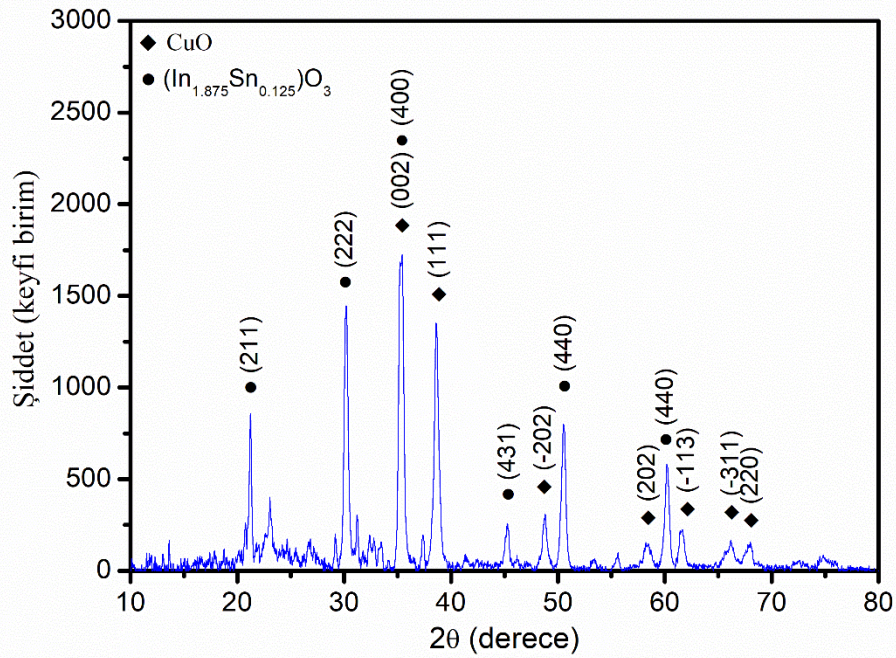
Şekil 4.8. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.8. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri

Ölçülen Değerler		Standart Değerler		(hkl) düzlemi	FWHM (°)	D (nm)	Örgü Parametreleri $a \neq b \neq c$ (Å)		V (Å) ³	ρ (g/cm ³)
2θ (°)	d (Å)	2θ (°)	d (Å)				Ölçülen	Standart		
35,30	2,54	35,44	2,53	(002)	0,3212	25,9	$a=4,684$ $b=3,426$ $c=5,128$	$a=4,685$ $b=3,423$ $c=5,132$	81,14	6,51
38,70	2,33	38,73	2,32	(111)	0,5850	14,4				
48,67	1,87	48,74	1,87	($\bar{2}$ 02)	-	-				
58,35	1,58	58,31	1,58	(202)	-	-				
61,66	1,51	61,55	1,51	($\bar{1}$ 13)	-	-				
66,39	1,40	66,28	1,41	($\bar{3}$ 11)	-	-				
67,88	1,39	68,15	1,38	(220)	-	-				

Şekil 4.8’de ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta 1 saat tavlanan CuO yarıiletken ince film için X-ışını kırınım deseni görülmektedir. X-ışını kırınım deseni incelendiğinde sırasıyla 35,30°, 38,70°, 48,67°, 58,35°, 61,66°, 66,39° ve 67,88° açı değerlerinde pikler gözlenmiş ve bu piklerle eşleşen (*hkl*) düzlemleri sırasıyla (002), (111), ($\bar{2}02$), (202), ($\bar{1}13$), ($\bar{3}11$) ve (220) olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.8’de verilen maksimum yarı tam genişlik değerleri kullanılarak filme ait en büyük iki pike karşılık gelen kristalit büyüklüğü değerleri hesaplandı ve hesaplanan bu değerler yine Çizelge 4.8’de gösterildi. Ayrıca, filme ait örgü parametresi, hacim ve yoğunluk değerleri hesaplandı ve Çizelge 4.8’de verildi. Elde edilen değerlerin CuO’nun standart değerleri (PDF Kart No.: 00 – 041 – 0254) ile uyum içerisinde olduğu görüldü.

Şekil 4.8’deki CuO ince filme ait X-ışını kırınım deseni incelendiğinde tercihli yönelimin (002) ile (111) düzlemi boyunca olduğu ve kristallenmenin daha çok bu iki pik yönünde gerçekleştiği görüldü. ITO altlık üzerinde 60 °C’de hazırlanan kübik fazdaki Cu₂O ince filmin, 260 °C sıcaklıkta tavlama sonucunda monoklinik fazdaki CuO yarıiletken ince filme dönüştüğü tespit edildi.



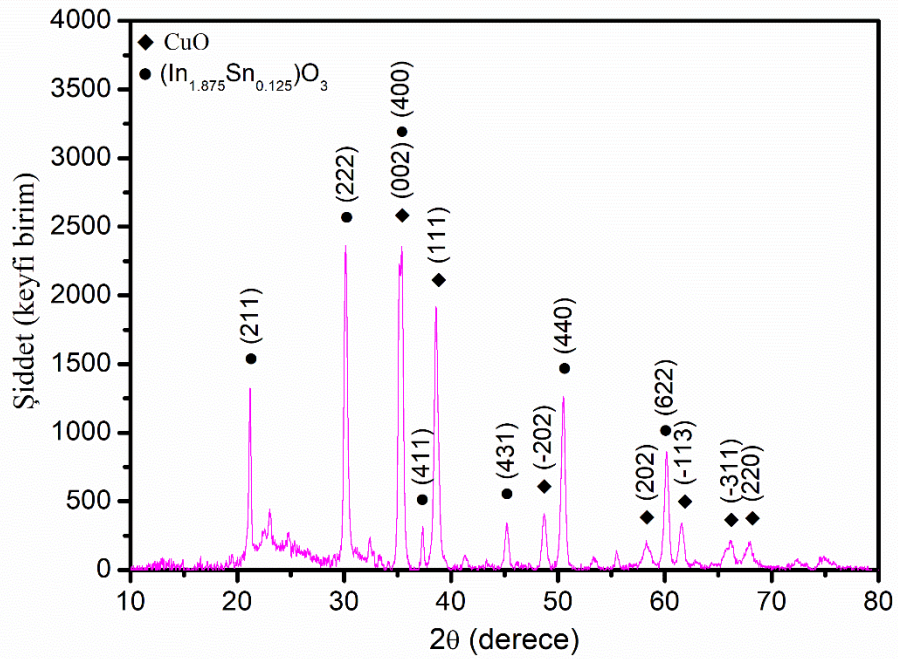
Şekil 4.9. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.9. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri

Ölçülen Değerler		Standart Değerler		(hkl) düzlemi	FWHM (°)	D (nm)	Örgü Parametreleri $a \neq b \neq c$ (Å)		V (Å) ³	ρ (g/cm ³)
2 θ (°)	d (Å)	2 θ (°)	d (Å)				Ölçülen	Standart		
35,38	2,53	35,44	2,53	(002)	0,2387	34,9	a=4,689 b=3,425 c=5,131	a=4,685 b=3,423 c=5,132	81,25	6,50
38,61	2,33	38,73	2,32	(111)	0,4495	18,7				
48,79	1,87	48,74	1,87	($\bar{2}$ 02)	-	-				
58,42	1,58	58,31	1,58	(202)	-	-				
61,62	1,51	61,55	1,51	($\bar{1}$ 13)	-	-				
66,18	1,41	66,28	1,41	($\bar{3}$ 11)	-	-				
68,02	1,39	68,15	1,38	(220)	-	-				

Şekil 4.9’da ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile tavlanan CuO yarıiletken ince film için X-ışını kırınım deseni görülmektedir. X-ışını kırınım deseni incelendiğinde sırasıyla 35,38°, 38,61°, 48,79°, 58,42°, 61,62°, 66,18° ve 68,02° açı değerlerinde pikler gözlenmiş ve bu piklerle eşleşen (hkl) düzlemleri sırasıyla (002), (111), ($\bar{2}$ 02), (202), ($\bar{1}$ 13), ($\bar{3}$ 11) ve (220) olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.9’da verilen maksimum yarısi tam genişlik değerleri kullanılarak filme ait en büyük iki pike karşılık gelen kristalit büyüklüğü değerleri hesaplanarak Çizelge 4.9’da gösterildi. 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO filme ait örgü parametresi değerleri eşitlik – 4.3 ile bulundu. Filmin en şiddetli pikine ait hacim ve yoğunluk değerleri hesaplanarak Çizelge 4.9’da verildi. Elde edilen değerlerin CuO’nun standart değerleri (PDF Kart No.: 00 – 041 – 0254) ile uyum içerisinde olduğu görüldü.

Şekil 4.9’daki X-ışını kırınım deseni incelendiğinde; CuO ince film için tercihli yönelimin (002) ile (111) düzlemi boyunca olduğu ve kristallenmenin daha çok bu iki pik yönünde olduğu görüldü. X-ışını kırınım deseni sonucunda, ITO altlık üzerinde depolanan CuO ince filmin polikristal yapıda ve monoklinik fazda büyüdüğü görüldü.



Şekil 4.10. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.10. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmler için kristal parametre değerleri

Ölçülen Değerler		Standart Değerler		(hkl) düzlemi	FWHM (°)	D (nm)	Örgü Parametreleri $a \neq b \neq c$ (Å)		V (Å) ³	ρ (g/cm ³)
2θ (°)	d (Å)	2θ (°)	d (Å)				Ölçülen	Standart		
35,40	2,53	35,44	2,53	(002)	0,2172	38,4	a=4,683 b=3,424 c=5,129	a=4,685 b=3,423 c=5,132	81,09	6,52
38,57	2,33	38,73	2,32	(111)	0,4152	20,3				
48,70	1,87	48,74	1,87	($\bar{2}$ 02)	-	-				
58,25	1,58	58,31	1,58	(202)	-	-				
61,59	1,51	61,55	1,51	($\bar{1}$ 13)	-	-				
66,18	1,42	66,28	1,41	($\bar{3}$ 11)	-	-				
67,98	1,39	68,15	1,38	(220)	-	-				

ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta 1 saat süresince tavlanan CuO yarıiletken ince filme ait X-ışını kırınım deseni Şekil 4.10’da verilmiştir. X-ışını kırınım deseninde sırasıyla 35,40°, 38,57°, 48,70°, 58,25°, 61,59° ve 66,18° açı değerlerinde pikler gözlenmiş ve bu piklerle eşleşen (hkl) düzlemleri sırasıyla (002), (111), ($\bar{2}$ 02), (202), ($\bar{1}$ 13), ($\bar{3}$ 11) ve (220) olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.10’da verilen maksimum yarısi tam genişlik

değerleri kullanılarak filme ait en büyük iki pike karşılık gelen kristalit büyüklüğü değerleri hesaplandı ve Çizelge 4.10'da gösterildi. 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmine ait örgü parametresi, hacim ve yoğunluk değerleri hesaplandı ve Çizelge 4.10'da verildi. Elde edilen değerlerin CuO'nun standart değerleri (PDF Kart No.: 00 – 041 – 0254) ile uyumlu olduğu görüldü.

Şekil 4.10'daki CuO ince filmin X-ışını kırınım desenine bakıldığında, tercihli yönelimin (002) ile (111) düzlemi boyunca gerçekleştiği ve kristallenmenin daha fazla bu iki pik yönünde gerçekleştiği görüldü. X-ışını kırınım deseni incelendiğinde, ITO altlık üzerinde depolanan CuO yarıiletken ince filmin polikristal yapıda ve monoklinik fazda büyüdüğü görüldü.

Cam altlık üzerinde depolanan tavlammamış ve tavllanmış bakır oksit ince filmlerin XRD yorumları;

60 °C'de cam altlık üzerinde depolanan tavlammamış Cu₂O yarıiletken ince filmi polikristal yapıda kübik fazda elde edildikten sonra 160 °C'de bir saat kül fırında hava atmosferinde tavlandı. Tavlama sonucu yapılan XRD analizinde Cu₂O ince filmde herhangi bir faz geçişi görülmedi ve bu tavlama sıcaklığı bileşim fazını etkilemedi. 160 °C'de tavlama sıcaklığı ile birlikte tercihli pik şiddetinde ve diğer pik şiddetlerinde bir miktar artışın olduğu görüldü. 60 °C'de depolanan filmin en büyük pik (111) şiddeti değeri 706 iken 160 °C'de tavlama sonucundaki pik şiddeti değeri 932 olarak bulundu. Artan tavlama sıcaklığı ile birlikte pik şiddetinin arttığı görüldü. Bu da Cu₂O yarıiletken filmin kristalizasyonunda bir iyileşme olduğunu gösterdi. Tavlama sıcaklığının 260 °C'ye çıkarılması ile kübik fazda bulunan Cu₂O [Bakır (I) oksit] ince filmin tamamen monoklinik fazdaki CuO'ya (tenorit) dönüştüğü XRD analizlerinden görüldü. Burada, CuO'ya ait karakteristik en büyük iki pikin şiddetleri sırası ile 609 ve 461 olarak bulundu. Tavlama sıcaklığı 360 °C'ye çıkartıldığında filme ait en büyük iki pikin şiddetlerinde bir artışın olduğu görüldü. Pik şiddeti değerleri sırası ile 1141 ve 957 olarak bulundu. Filmin 460 °C'de tavllanması sonucunda aynı piklere ait şiddet değerleri sırası ile 1339 ve 1083 olarak görüldü. Tavlama sıcaklığına bağlı pik şiddetlerindeki artış CuO ince filmin kristalizasyonunda bir iyileşme olduğunu gösterdi.

ITO altlık üzerinde depolanan tavlammamış ve tavllanmış bakır oksit ince filmlerin XRD yorumları;

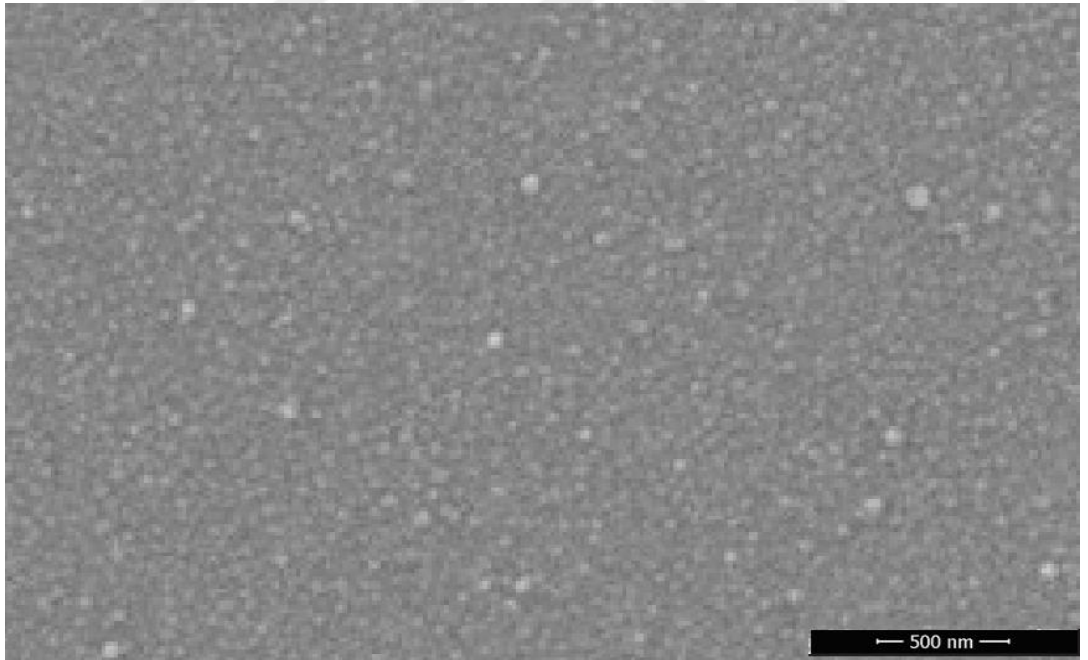
60 °C'de ITO altlık üzerinde depolanan tavlammamış Cu₂O yarıiletken ince filmi polikristal yapıda kübik fazda elde edildikten sonra bir saat kül fırında 160 °C sıcaklıkta hava atmosferinde tavlandı. Tavlama işlemi sonrası yapılan XRD analizinde Cu₂O ince filmde herhangi bir faz geçişi görülmedi ve bu tavlama sıcaklığı bileşim fazını etkilemedi. 160 °C'de tavlama sıcaklığı ile birlikte tercihli pik şiddetinde ve diğer pik şiddetlerinde bir miktar artışın olduğu görüldü. 60 °C'de depolanan filmin en büyük pik (111) şiddeti değeri 868 iken 160 °C'de tavlama sonucundaki pik şiddeti değeri 1482 olarak görüldü. Pik şiddetinin artan tavlama sıcaklığına bağlı olarak arttığı görüldü. Aynı zamanda bu artış Cu₂O yarıiletken filmin kristalizasyonunda bir iyileşme olduğunu gösterdi. XRD analizleri incelendiğinde, tavlama sıcaklığının 260 °C'ye çıkarılması ile birlikte

kübik fazda bulunan Cu_2O ince filmin tamamen monoklinik fazdaki CuO 'ya (tenorit) dönüştüğü görüldü. Tavlama sıcaklığı $360\text{ }^\circ\text{C}$ çıkartıldığında filme ait en büyük iki pikin şiddetlerinde bir artışın olduğu görüldü. Benzer şekilde Filmin $460\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavllanması sonucunda aynı piklere ait şiddet değerlerinde artış gözlemlendi. Tavlama sıcaklığına bağlı pik şiddetlerinde gözlenen artış, CuO ince filmin kristalizasyonunda iyileşme olduğunu gösterdi.

Genel olarak polikristal ITO alttaban üzerinde depolanan Cu_2O filmlerin XRD pik şiddetleri, aynı koşullarda amorf cam alttaban üzerinde depolanan Cu_2O filmlerin pik şiddetlerinden büyük çıktı. Bunun nedenini şöyle açıklayabiliriz; Cu_2O ince film kristallerinin oluşumu ve büyümesi için ITO alttabanın yüzey enerjisi ve kristal yapısı, amorf cama göre daha uygun bir yüzey sağlamış olabilir. Bu da daha iyi kristallenmeye ve dolayısıyla daha yüksek pik şiddetlerine yol açmış olabilir.

4.2. Cu_2O ve CuO Yarıiletken İnce Filmlerin Morfolojik Özellikleri

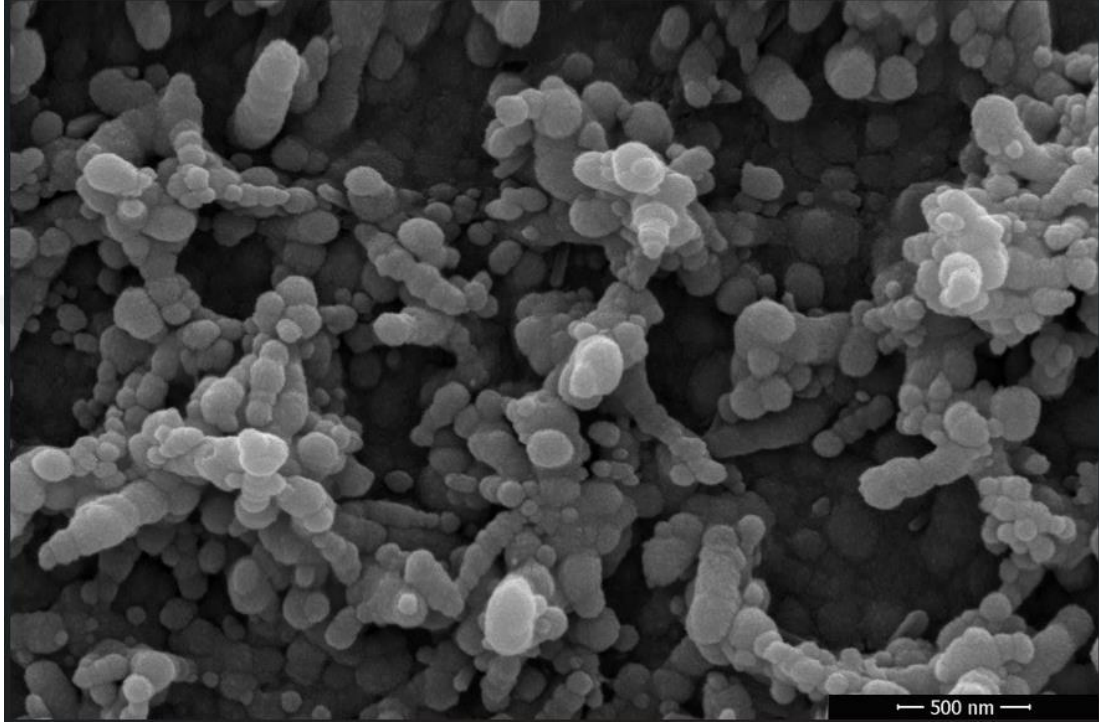
4.2.1. Cam Altlıklar Üzerinde $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 36 SILAR Döngüsü ile Depolanan ve Farklı Sıcaklıklarda Tavlanan Cu_2O İnce Filmlerin FE-SEM Görüntüleri



Şekil 4.11. Cam altlıklar üzerinde $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu_2O ince film için FE-SEM görüntüsü

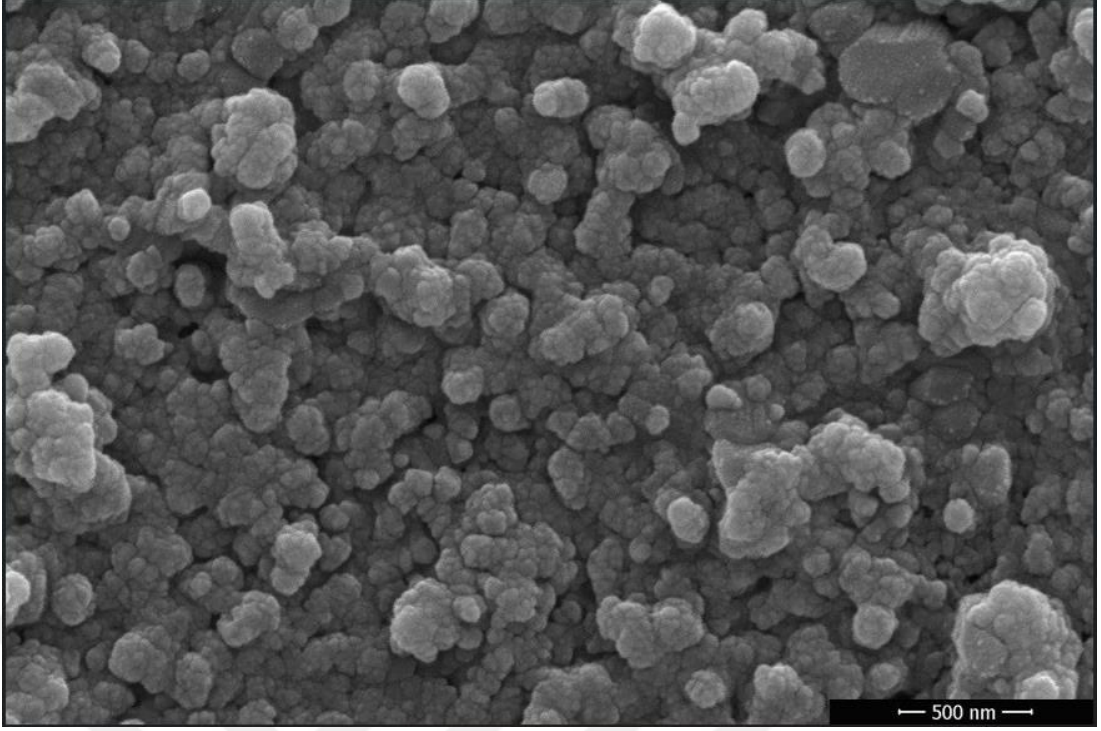
Şekil 4.11'de cam altlık üzerinde $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmin $100\times$ büyütmede FE-SEM görüntüsü verilmiştir. Cu_2O ince filmi cam altlık üzerinde yaklaşık 3,5 dakika gibi kısa bir zamanda depolandı. Film yüzeyinde homojen bir dağılım gösteren küçük tanecikli küremsi yapılar görülmektedir (Figueiredo ve ark., 2008). Yüzeyde belirgin çatlak

veya büyük yığılmalar (aglomerasyon) görülmemektedir, bu da depolama parametrelerinin (sıcaklık ve döngü sayısı) optimize edildiğini göstermektedir. Ölçek çubuğu 500 nm olarak belirtilmiş olup, nanometre seviyesinde bir inceleme yapılmıştır. Elde edilen filmin taneciklerinin boyutu yaklaşık 40 – 55 nm civarında olduğu tespit edilmiştir. 60 °C sıcaklıkta ve 36 SILAR döngüsü ile gerçekleştirilen büyütme işlemi, oldukça uniform bir film oluşumuna yol açmıştır.



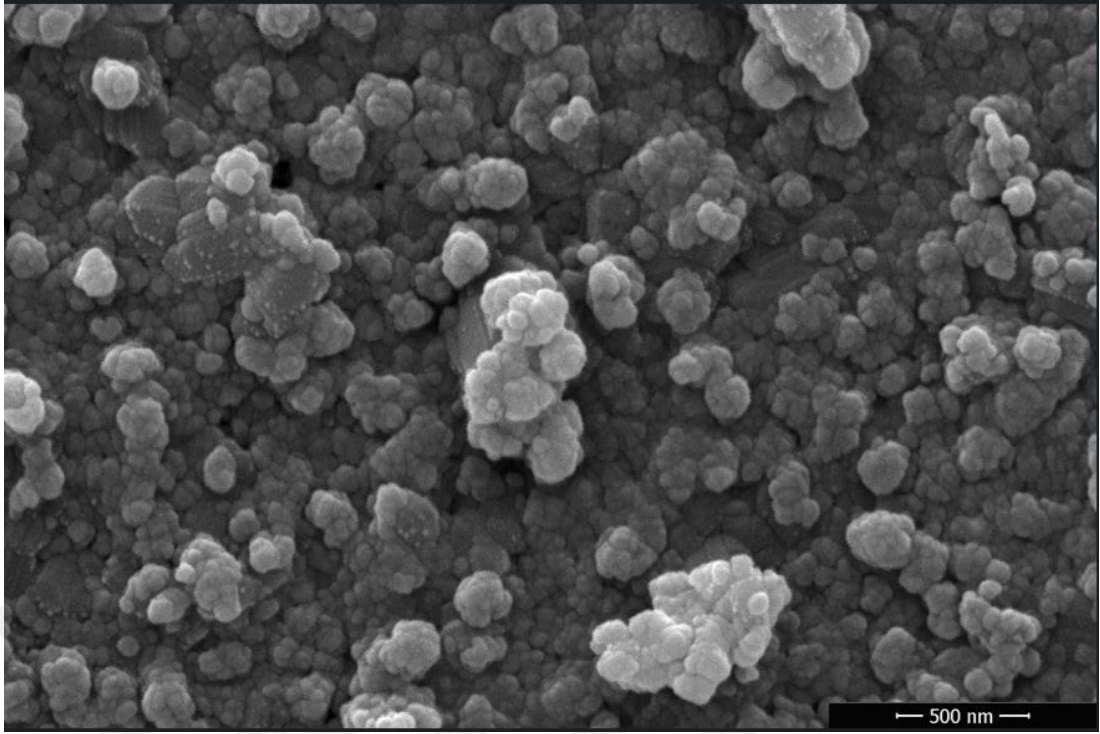
Şekil 4.12. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu₂O ince film için FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.12’de cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu₂O ince film için 100kx büyütmede FE-SEM görüntüsü verilmiştir. FE-SEM görüntüsü incelendiğinde, filmin tanecik yapısı homojen dağılımlı olmakla birlikte yer yer boşluklar bulunmaktadır. Tanecikler yaklaşık olarak küresel formda olup, benzer boyutlardadır. Tavlama sıcaklığına bağlı olarak filmi oluşturan tanecik boyutunda bir artış meydana geldiği görülmektedir. Görüntünün alt kısmındaki ölçek çubuğu 500 nm’yi göstermektedir. 160 °C sıcaklıkta 1 saat kül fırınında tavlanan Cu₂O ince filmin taneciklerinin boyutu yaklaşık olarak 110 – 172 nm arasında değişmektedir. Bu da nano boyutlu yapıların varlığını doğrulamaktadır. 36 SILAR döngüsü ve 160 °C’de tavlama işlemi, uniform bir yüzey morfolojisi oluşmasını sağlamıştır. Taneciklerin birbiriyle bağlantılı olduğu ve gözenekli bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Bu özellik, malzemenin yüzey alanını artırarak potansiyel uygulamalarda (örneğin, fotokatalitik uygulamalar veya gaz sensörleri) avantaj sağlayabilir.



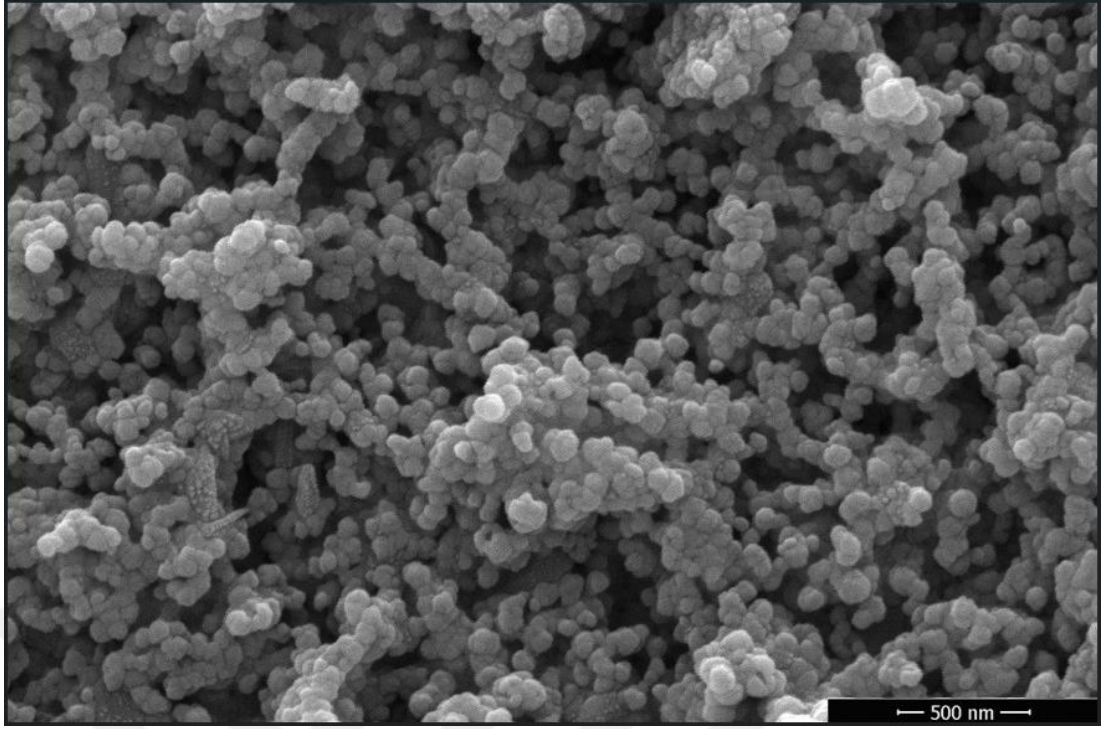
Şekil 4.13. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.13’de cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için 100kx büyütmede FE-SEM görüntüsü verilmiştir. 260 °C sıcaklıkta tavlanan Cu₂O ince film için, ısısal tavlamanın etkisine bağlı olarak CuO (tenorit) fazına dönüştüğü XRD verilerinden tespit edilmiştir ($\text{Cu}^{+1} \rightarrow \text{Cu}^{+2}$). Bu dönüşüm kimyasal değişimin yanı sıra morfolojik değişikliklere de neden olmuştur. Tavlama işlemi, Cu₂O’nun CuO’ya dönüşümünü sağlarken aynı zamanda kristal büyümesini ve parçacıkların birleşmesini teşvik etmiştir. 500 nm ölçek çubuğuna göre, parçacık boyutları değişkenlik göstermekte olup, hem tekil nano-parçacıklar hem de daha büyük topaklanmalar gözlenmektedir (Yeşilçubuk, 2002). CuO ince filmin taneciklerinin boyutu yaklaşık olarak 125 – 185 nm civarında değişmektedir. Tavlama sıcaklığının artışı ile film yüzeyindeki tanecik boyutlarında bir artış meydana geldiği görüldü. Yüzey pürüzlülüğü artmış olup, bu durum filmin yüzey alanının da artmasına neden olmuştur. Bu özellik, katalitik uygulamalar için avantaj sağlayabilir. Bu morfolojik yapı, CuO’nun gaz sensörleri, fotokataliz ve enerji depolama gibi uygulamalarda kullanımı için uygun özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Yüksek yüzey alanı ve nano-yapılı morfoloji, bu tür uygulamalar için istenen özelliklerdir.



Şekil 4.14. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü

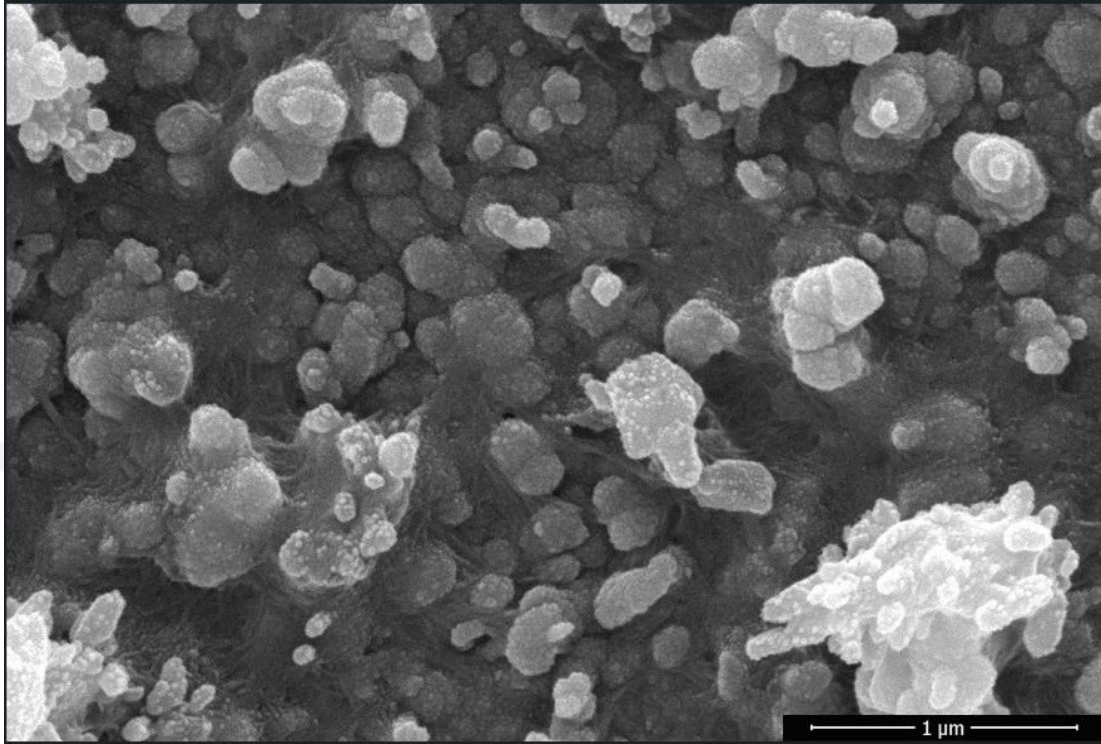
Şekil 4.14’de cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için 100kx büyütmede FE-SEM görüntüsü görülmektedir. Görüntü incelendiğinde, taneciklerin arasında boşlukların olmadığı ve homojen bir yapının olduğu görülmüştür. Yüksek tavlama sıcaklığı (360 °C), daha büyük topaklanmaların oluşumuna yol açmıştır. Küresel benzeri yapıların boyut dağılımı daha geniş bir aralığa yayılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü daha da artmış görünmektedir. 360 °C sıcaklıkta 1 saat kül fırınında tavlanan CuO ince filmin taneciklerinin boyutu yaklaşık olarak 115 – 240 nm civarında değişmektedir. Artan tavlama sıcaklığı, kristallenme derecesini artırmış olup film yapısı gözenekli karakterini korumaktadır. Bu morfolojik özellikler, filmin özellikle gaz sensörleri ve katalitik uygulamalar için uygun olabileceğini göstermektedir, çünkü yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapı bu tür uygulamalar için avantaj sağlar.



Şekil 4.15. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü

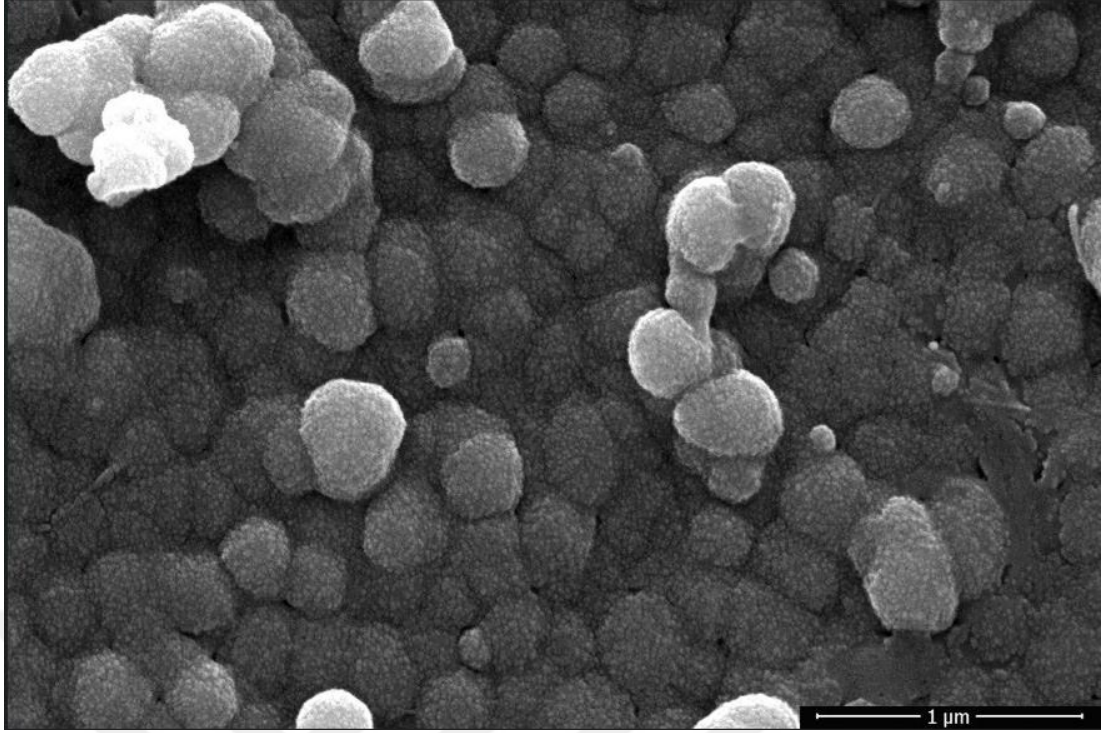
Şekil 4.15’de cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için 100kx büyütmede FE-SEM görüntüsü görülmektedir. Görüntü incelendiğinde, parçacıklar artık daha çok zincir benzeri yapılar oluşturma eğilimindedir. Literatürde benzer bir çalışma bulunmaktadır (Özaslan, 2016). Küresel parçacıklar birleşerek daha uzun, bağlantılı yapılar meydana getirmiştir. Film yapısı daha karmaşık ve üç boyutlu bir ağ görünümü kazanmıştır. Parçacıklar arası boşluklar daha belirgin ve düzenli hale gelmiştir. Artan tavlama sıcaklığı gözenekli yapının korunmasını sağlamıştır. Bu gözenekli yapı, yüzey alanının artmasına katkıda bulunmaktadır. 460 °C’deki tavlama işlemi, daha düzenli bir kristal yapısının oluşumunu sağlamıştır. Parçacıklar arası bağlantılar daha güçlü ve belirgin hale gelmiştir. Nanoyapıların boyutsal dağılımı daha homojen görünmektedir. 460 °C sıcaklıkta 1 saat kül fırınında tavlanan CuO ince filmin taneciklerinin çapı yaklaşık olarak 60 – 80 nm civarında değişmektedir. Bu tür yüksek gözenekli ve bağlantılı yapılar, özellikle gaz sensörleri, katalizörler ve elektrokimyasal uygulamalar için ideal özellikler sunmaktadır.

4.2.2. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan Cu₂O ince filmlerin FE-SEM görüntüleri



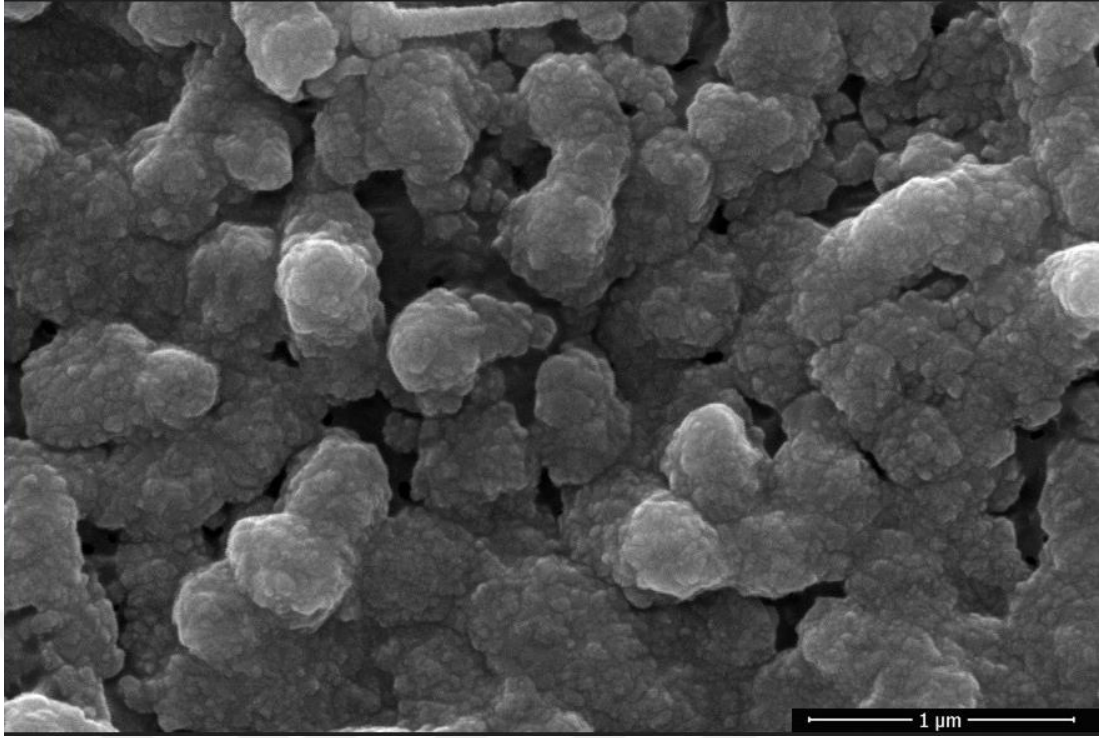
Şekil 4.16. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu₂O ince film için FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.16’da ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu₂O ince filmin 100kx büyütmede FE-SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde, film yüzeyinde küresel ve yarı-küresel formda Cu₂O tanecikleri oluşmuştur. Bu taneciklerin boyutları mikron-altı ölçektedir (görüntüdeki ölçek çubuğu 1 μ m’dir). Elde edilen filmin taneciklerinin çapı yaklaşık 90 – 125 nm civarında olduğu tespit edilmiştir. Tanecikler yüzey üzerinde göreceli olarak homojen bir dağılım göstermektedir, ancak bazı bölgelerde topaklanma gözlenmektedir. 60 °C’de gerçekleştirilen 36 SILAR döngüsü, adacık tipi (island-type) büyüme mekanizmasına işaret etmektedir. Film yüzeyi pürüzlü bir yapıya sahiptir ve bu özellik, filmin yüzey alanını artırarak, özellikle fotokatalitik uygulamalar veya güneş pilleri gibi uygulamalar için avantaj sağlayabilir. Bu morfolojik özellikler, depolama sıcaklığının (60 °C) ve döngü sayısının (36) film oluşumu üzerindeki etkisini göstermektedir. Oluşan yapı, Cu₂O ince filmlerin tipik karakteristik özelliklerini yansıtmaktadır.



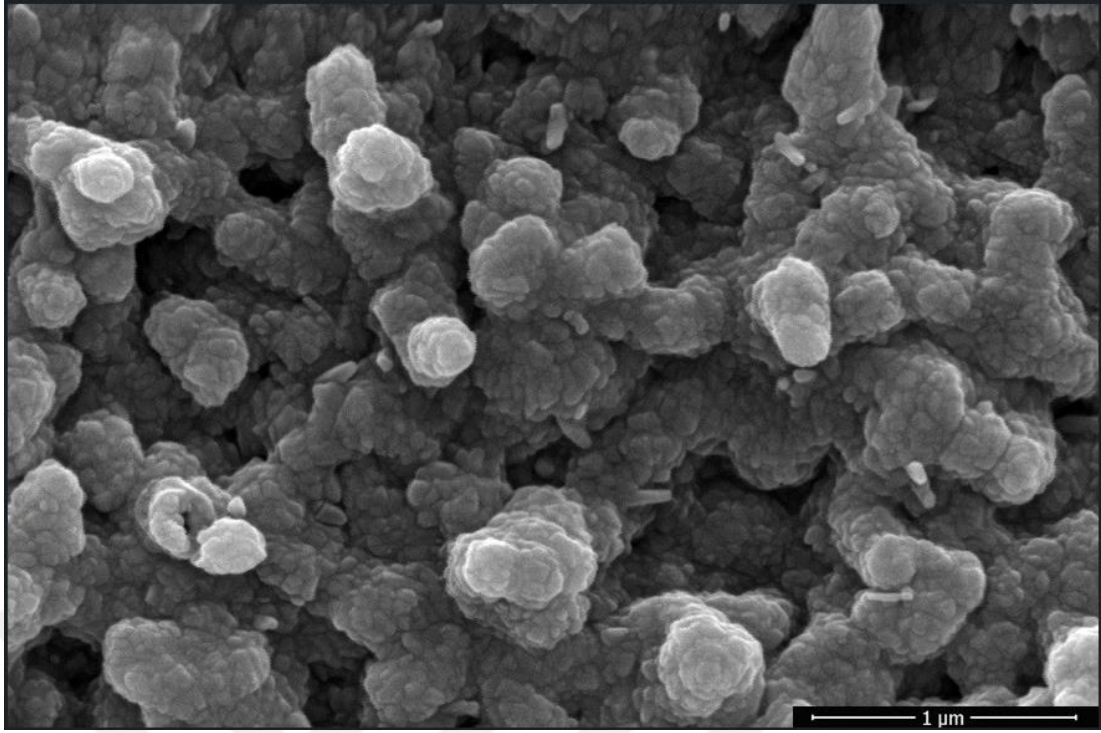
Şekil 4.17. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu₂O ince film için FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.17’de ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C sıcaklıkta tavlanan Cu₂O ince film için 100kx büyütmede FE-SEM görüntüsü verilmiştir. Tavlama sonrası tanecikler daha düzenli ve belirgin küresel formlar kazanmıştır. Bu, termal enerjinin taneciklerin yüzey enerjisini minimize edecek şekilde yeniden düzenlenmesine olanak sağladığını gösterir. Taneciklerin boyut dağılımı daha homojen hale gelmiştir. 160 °C sıcaklıkta 1 saat kül fırınında tavlanan Cu₂O ince filmin taneciklerinin çapı yaklaşık olarak 105 – 270 nm arasında değişmektedir (1 μm ölçek çubuğuna göre). Tavlama işlemi, taneciklerin kristal yapısının iyileşmesine ve daha düzenli bir morfoloji oluşmasına katkıda bulunmuştur. Film yüzeyi hala pürüzlü bir yapıya sahiptir, ancak tavlama öncesine göre daha düzenli bir topografya sergilemektedir. Bu durum, malzemenin yüksek sıcaklıkta yeniden yapılanmasının bir sonucudur. Tavlama işleminin Cu₂O ince filmin yapısal özelliklerini iyileştirmede etkili olduğunu göstermektedir. Bu tür iyileştirmeler, malzemenin özellikle optoelektronik uygulamalardaki performansını artırabilir.



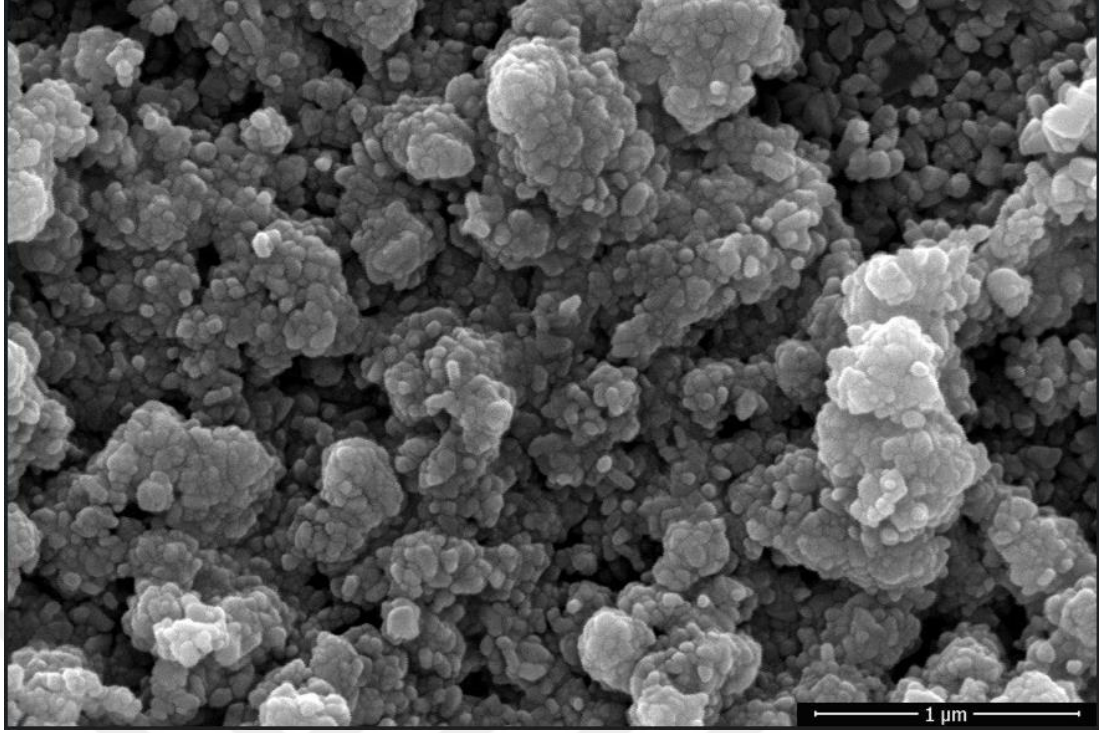
Şekil 4.18. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.18’de ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 260 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için 100kx büyütmeye FE-SEM görüntüsü verilmiştir. 260 °C sıcaklıkta tavlanan film için, ısısal tavlamanın etkisine bağlı olarak Cu_2O fazından CuO (tenorit) fazına dönüşüğü XRD verilerinden tespit edilmiştir. Cu_2O ’dan CuO’ya dönüşüm, tanecik morfolojisinde belirgin değişikliklere yol açmıştır. Önceki küresel yapılar yerine, daha kompleks ve pürüzlü yüzey morfolojisi gözlenmektedir. Tanecikler artık daha az küresel ve daha fazla topaklanmış durumdadır. Yüzeyde belirgin bir pürüzlülük ve gözeneklilik artışı gözlenmektedir. Tanecikler arası boşluklar artmıştır. 260 °C’deki sıcaklık taneciklerin birleşmesini ve yeniden kristalleşmesini teşvik etmiştir. 260 °C sıcaklıkta 1 saat kül fırınında tavlanan CuO ince filmin taneciklerinin çapı yaklaşık olarak 180 – 200 nm’dir. Bu morfolojik değişimler, tavlama sıcaklığının faz dönüşümü ve yüzey morfolojisi üzerindeki önemli etkisini göstermektedir. Oluşan yapı, özellikle gaz sensörleri veya fotokatalitik uygulamalar için avantajlı olabilecek yüksek yüzey alanına sahiptir.



Şekil 4.19. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.19’da ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 360 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için 100kx büyütmede FE-SEM görüntüsü verilmiştir. FE-SEM görüntüsü incelendiğinde, küresel benzeri nano yapılar gözlemlenmektedir. Tanecikler göreceli olarak homojen bir boyut dağılımına sahiptir. Taneciklerin birbirleriyle topaklanma oluşturduğu görülmektedir. Yapılar arasında gözenekli bir morfoloji mevcuttur. Yine ısısal tavlamaya bağlı olarak tanecik boyutlarında bir artış meydana geldiği görüldü. 360 °C sıcaklıkta 1 saat kül fırınında tavlanan CuO ince filmin taneciklerinin çapı yaklaşık olarak 230 – 270 nm civarında değişmektedir. 36 SILAR döngüsü ve 360 °C’deki tavlama işlemi, bu karakteristik morfolojinin oluşmasında etkili olmuştur. ITO altlık üzerindeki bu tür nano yapıları CuO filmler, özellikle güneş pilleri, gaz sensörleri ve fotokatalitik uygulamalarda kullanılabilir potansiyele sahiptir. Bu tür bir morfoloji, malzemenin yüzey alanını artırarak katalitik aktivite ve sensör performansı gibi özellikleri iyileştirebilir. Ayrıca gözenekli yapı, gaz algılama uygulamalarında gaz moleküllerinin difüzyonunu kolaylaştırabilir.



Şekil 4.20. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için FE-SEM görüntüsü

Şekil 4.20’de ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 460 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince film için 100kx büyütmede FE-SEM görüntüsü verilmiştir. FE-SEM görüntüsü incelendiğinde, küresel/yarı küresel şekilli nano-yapılar görülmektedir. Bu yapılar birbirleriyle topaklanmış durumdadır. Film yüzeyi genellikle homojen bir dağılım göstermektedir, bu da SILAR yönteminin kontrollü bir şekilde gerçekleştirildiğini gösterir. 460 °C’de gerçekleştirilen tavlama işlemi, kristal yapının oluşmasına ve tanelerin belirgin hale gelmesine katkıda bulunmuştur. Ölçek çubuğu (1 μm) referans alındığında, nano-yapıların boyutlarının yaklaşık 100 – 200 nanometre aralığında olduğu görülmüştür. Gözlemlenen gözenekli yapı ve nano-boyutlu taneler, malzemenin yüksek yüzey alanına sahip olduğunu göstermektedir. Bu özellik, malzemenin sensör veya katalizör uygulamalarında kullanım potansiyelini artırır. Bu tür morfoloji, CuO ince filmlerin optoelektronik, sensör veya fotokatalitik uygulamalarda kullanımı için uygun özellikler göstermektedir.

Cam altlık üzerinde depolanan tavlınmamış ve tavlınmış bakır oksit ince filmlerin FE-SEM yorumları;

Cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmin 100kx büyütmede FE-SEM görüntüsü incelendiğinde; film yüzeyinde homojen bir dağılım gösteren küçük tanecikli küremsi yapılar, belirgin çatlak veya büyük yığılmalar (aglomerasyon) görülmemekte olup gerçekleştirilen büyütme işlemi sonucunda uniform bir film oluşumu meydana gelmiştir. Daha sonra 60 °C’de cam altlık üzerinde depolanan Cu_2O yarıiletken ince film öncelikle 160 °C’de bir saat kül fırında hava atmosferinde tavlandı. Tavlama sonucu SEM görüntüleri incelendiğinde Cu_2O

ince filmi oluşturan tanecik boyutlarında 60 °C'deki tavlınmamış filme göre bir artış meydana geldiği ve her iki sıcaklıkta da bu taneciklerin küresel yapıya sahip olduğu görüldü. 60 °C'de depolanan filmin tanecik boyutu yaklaşık 40 – 55 nm civarında iken 160 °C'de filmin tavlınması sonucunda tanecik boyutu yaklaşık 110 – 172 nm civarında değiştiği tespit edildi. Tanecik boyutunda tavlama sıcaklığına bağlı bir artışın meydana geldiği, taneciklerin birbiriyle bağlantılı olduğu ve gözenekli bir yapı oluşturduğu görüldü. XRD analizlerinden, tavlama sıcaklığının 260 °C'ye çıkarılması ile birlikte kübik fazda bulunan Cu₂O ince filmin tamamen monoklinik fazdaki CuO'ya dönüştüğü tespit edilmişti. Tavlama sıcaklığının artmasına bağlı olarak monoklinik fazdaki CuO'ya dönüşen ince filmlerin tanecik boyutlarında bir miktar artış meydana geldiği ve yaklaşık olarak 125 – 185 nm civarında değiştiği görüldü. Tavlama sıcaklığı 360 °C çıkartıldığında CuO ince filme ait tanecik boyutlarında belirgin bir artış meydana geldiği ve ısısal tavlama ile tanecikler arasında boşlukların olmadığı homojen bir yapının oluştuğu görüldü. 360 °C'de filmin tavlınması sonucunda tanecik boyutu yaklaşık 115 – 240 nm civarında değiştiği tespit edildi. Filmin 460 °C'de tavlınması sonucunda filmi oluşturan taneciklerin biraraya gelerek iç içe geçmesi ile homojen sayılabilecek sıkı zincir benzeri bir ağ yapısının oluştuğu görüldü. 460 °C'deki film için termal enerjinin etkisiyle daha düzenli bir yapı meydana geldiği tespit edildi. Film oluşturan tanecik boyutu yaklaşık olarak 60 – 80 nm civarında olduğu görüldü.

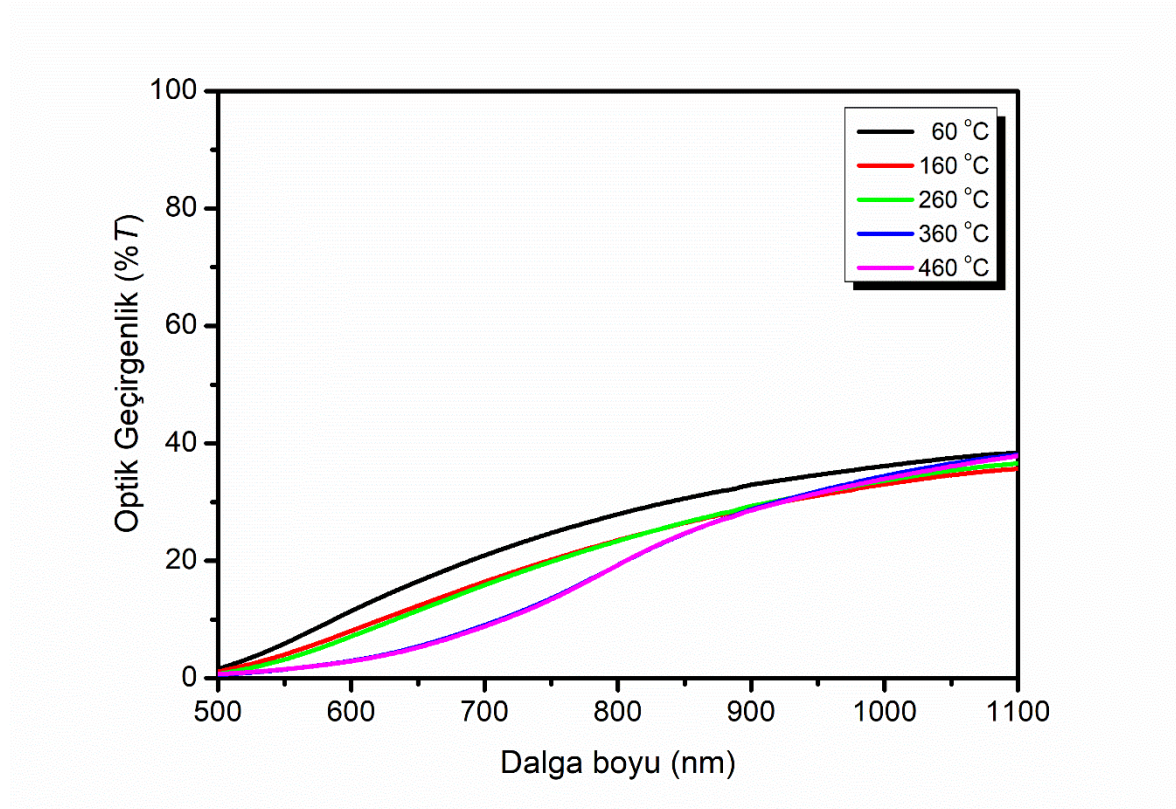
ITO altlık üzerinde depolanan tavlınmamış ve tavlınmış bakır oksit ince filmlerin FE-SEM yorumları;

ITO altlık üzerinde 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu₂O ince filmin 100kx büyütmede FE-SEM görüntüsü incelendiğinde; film yüzeyinde küresel ve yarı-küresel formda Cu₂O tanecikleri oluştuğu, taneciklerin film yüzeyi üzerinde göreceli homojen bir dağılım gösterdiği ancak bazı bölgelerde topaklanma meydana geldiği gözlemlendi. Aynı zamanda film yüzeyinin pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görüldü. Daha sonra 60 °C'de ITO altlık üzerinde depolanan Cu₂O yarıiletken ince film öncelikle 160 °C'de bir saat kül fırında hava atmosferinde tavlandı. Tavlama sonucu FE-SEM görüntüleri incelendiğinde Cu₂O ince filmi oluşturan tanecik boyutlarında 60 °C'deki tavlınmamış filme göre bir artış meydana geldiği görüldü. 60 °C'de depolanan filmin tanecik boyutu yaklaşık 90 – 125 nm civarında iken 160 °C'de filmin tavlınması sonucunda tanecik boyutu yaklaşık 105 – 270 nm civarında değiştiği tespit edildi. 160 °C sıcaklıkta tavlanan filmi meydana getiren taneciklerin daha düzenli ve belirgin küresel formlar kazandığı görüldü. Film yüzeyi 60 °C'de depolanan tavlınmamış Cu₂O yarıiletken ince filmdeki gibi hala pürüzlü bir yapıya sahip olmakla birlikte tavlama öncesine göre daha düzenli bir topografya sergilediği görülmektedir. 260 °C sıcaklıkta tavlanan filmin monoklinik fazdaki CuO'ya dönüştüğü XRD analizlerinden tespit edilmiş olup, filmin tanecik boyutlarında bir miktar artış meydana geldiği ve yaklaşık olarak 180 nm civarında olduğu tespit edildi. 260 °C sıcaklıkta tavlanan film yüzeyindeki tanecikler önceki küresel yapılar yerine, daha kompleks ve pürüzlü yüzey morfolojisi gösterdiği tespit edildi. Bununla birlikte, taneciklerin daha az küresel ve daha fazla topaklanmış

durumda olduğu görüldü. Aynı zamanda yüzeyde belirgin bir pürüzlülük ve gözeneklilik artışı gözlemlendi. Buna karşın tanecikler arası boşlukların arttığı görüldü. Tavlama sıcaklığı 360 °C çıkartıldığında film yüzeyindeki taneciklerin göreceli olarak homojen bir boyut dağılımına sahip olduğu ve birbirleriyle topaklanma oluşturduğu gözlemlendi. 360 °C’de filmin tavlama sonucu ısısal tavlama ile ilgili olarak tanecik boyutlarında bir artış meydana geldiği ve tanecik boyutunun yaklaşık 230 nm civarında değiştiği tespit edildi. 460 °C’deki film için tavlama sıcaklığının artışı ile birlikte ince filmin yüzeyinde küresel/yarı küresel şekilli nano-yapılar meydana geldiği ve bu yapıların birbirleriyle topaklanmış durumda olduğu tespit edildi. CuO ince film için 460 °C’de gerçekleştirilen tavlama işlemi sonucu film yüzeyinin genel olarak homojen bir dağılıma sahip olduğu görüldü. Bununla birlikte filmi oluşturan tanecik boyutunun yaklaşık olarak 100 – 200 nm civarında değiştiği tespit edildi.

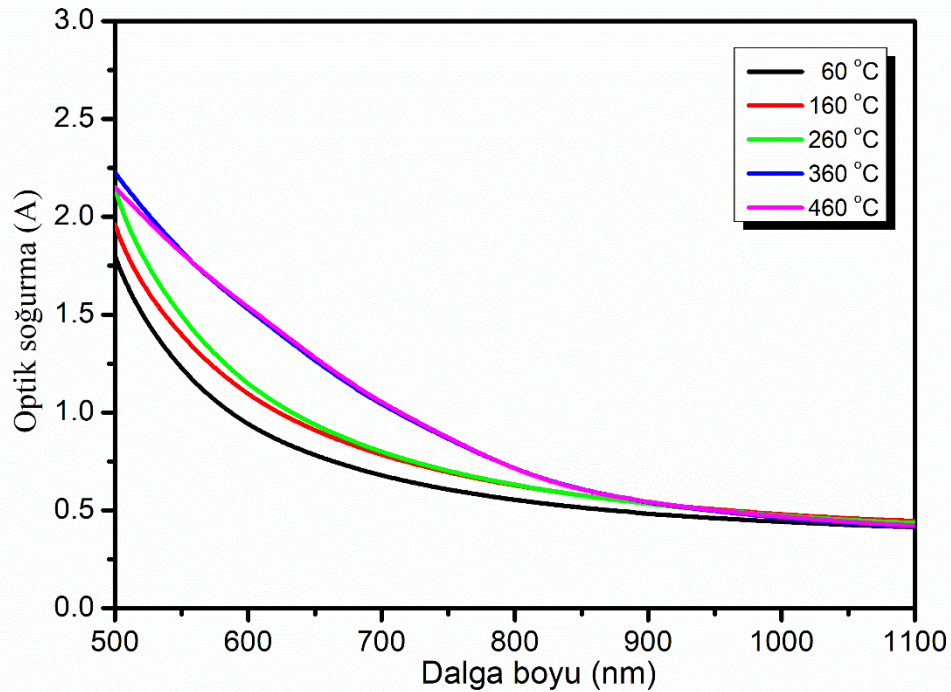
4.3. Cu₂O ve CuO İnce Filmlerin Optik Özellikleri

4.3.1. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan Cu₂O ince filmlerin optik özellikleri



Şekil 4.21. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için optik geçirgenlik – dalga boyu grafiği

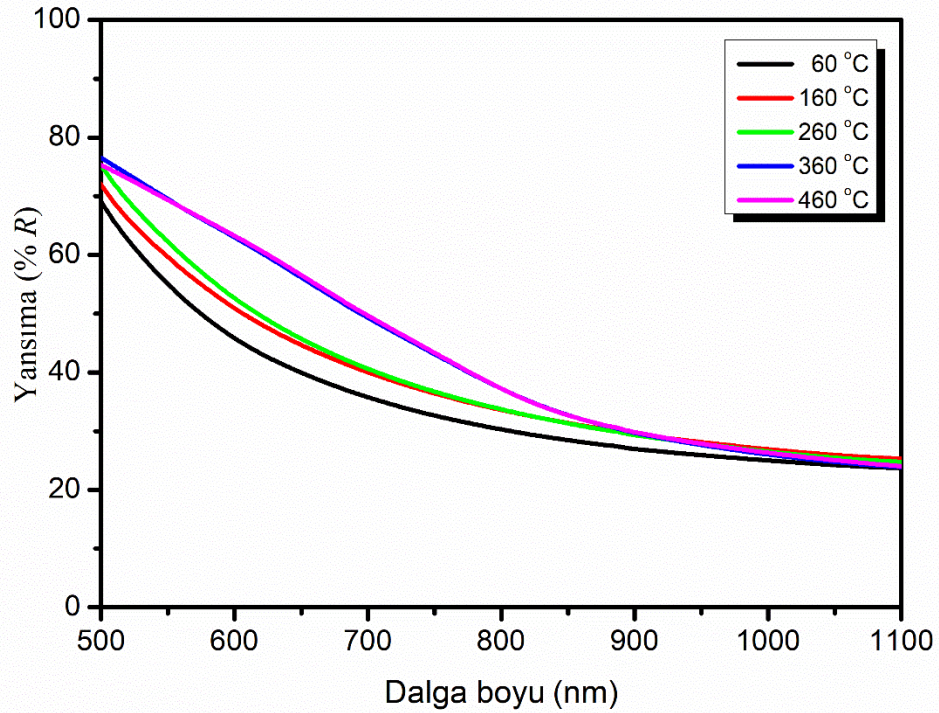
Şekil 4.21’de cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik – dalga boyu grafiği görülmektedir. 60 °C’de depolanan film için 550 nm’deki (görünür bölge ortasında) geçirgenlik değeri %6,4 iken, farklı sıcaklıklarda aynı filmin tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı geçirgenlik değerleri % 1,5 – 4,1 aralığında bulunmuştur (Rafea ve ark., 2009; Özaslan ve ark., 2020). Filmin 160 °C ve 260 °C’deki tavlama sonucu optik geçirgenlik değeri yaklaşık aynı çıkmıştır. Aynı şekilde 360 °C ve 460 °C’deki ısısal tavlamalarda da bir farklılık görülmemiştir. Tavlama sıcaklığı arttıkça, filmin tüm dalga boyu aralığındaki optik geçirgenlik değerleri genel olarak azalmaktadır. Bakır oksit filmin yakın kızılötesi bölgesinde (800 – 1100 nm) daha geçirgen olduğu görüldü. Farklı tavlama sıcaklıklarında işlem görmüş bakır oksit filmleri benzer optik geçirgenlik grafikleri göstermektedir ancak aralarında küçük farklılıklar mevcuttur. Oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik sonuçları; tavlama sıcaklığının bakır oksit filmin optik geçirgenlik özelliklerini etkilediğini, ancak bu etkinin özellikle görünür bölgede (400 – 700 nm) daha belirgin olduğunu göstermektedir. Bakır oksit filmi için optik geçirgenlik değerleri yaklaşık % 0 ile % 40 arasında değiştiği görüldü. Elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur (Serin ve ark., 2005).



Şekil 4.22. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için optik soğurma – dalga boyu grafiği

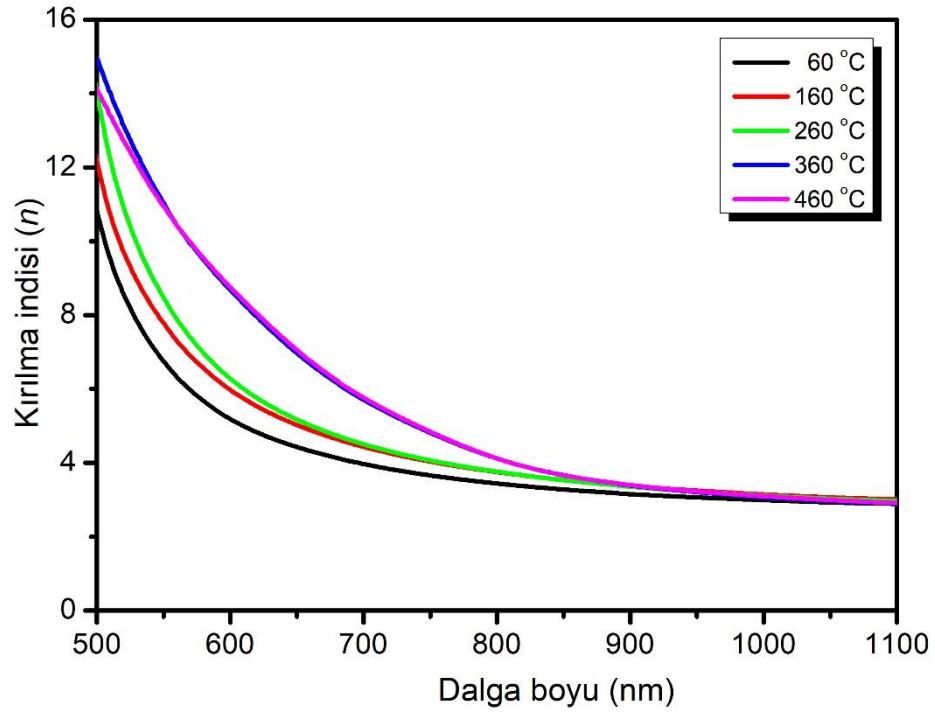
Şekil 4.22’de cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıklarda bir saat tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki optik soğurma – dalga boyu grafiği görülmektedir. 60 °C de depolanan Cu_2O film

için 550 nm'deki soğurma değeri 1,23 iken, aynı filmin farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı geçirgenlik değerleri 1,40 – 1,83 aralığında bulunmuştur (Özaslan ve ark. 2020). Burada tavlama sıcaklığının artışı ile soğurma değeri bir miktar artış göstermiştir. Filmin 360 °C ve 460 °C'deki tavllanması sonucu optik soğurma değerleri yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Bakır oksit ince filmin 500 – 800 nm bölgesinde soğurma değerlerinde bir azalma görüldü. Yakın kızılötesi bölgesinde (800 – 1100 nm) optik soğurma değerlerinin birbirine yaklaştığı ve büyük bir değişimin gözlenmediği görüldü. Buna benzer sonuçlar literatürde mevcuttur (Chatterjee ve ark., 2016).



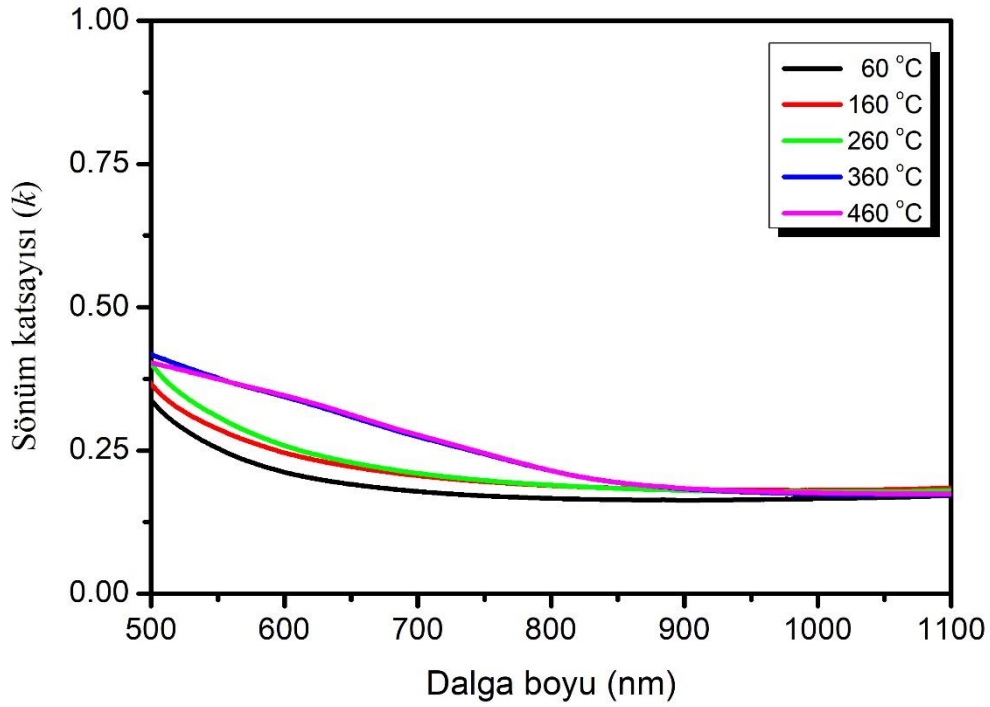
Şekil 4.23. Cam altlıklar üzerinde 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için yansımada – dalga boyu grafiği

Şekil 4.23'de cam altlık üzerinde 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıklarda bir saat tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki yansımada – dalga boyu grafiği görülmektedir. Şekil incelendiğinde tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak yansımada değerlerinde de bir miktar artış görüldü. Görünür bölge incelendiğinde 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmi için 550 nm'deki yansımada değeri %54,41 iken, aynı filmin farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı yansımada değerleri % 59,47 – 69,90 aralığında olduğu tespit edildi. CuO yarıiletken ince filmin 360 °C ve 460 °C'deki tavllanması sonucu yansımada değerleri yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800 – 1100 nm) yansımada değerleri yaklaşık olarak aynı değerlere sahip olduğu grafikten görülmektedir. Elde edilen yansımada değerleri literatür ile uyumludur (Özaslan ve ark., 2020)



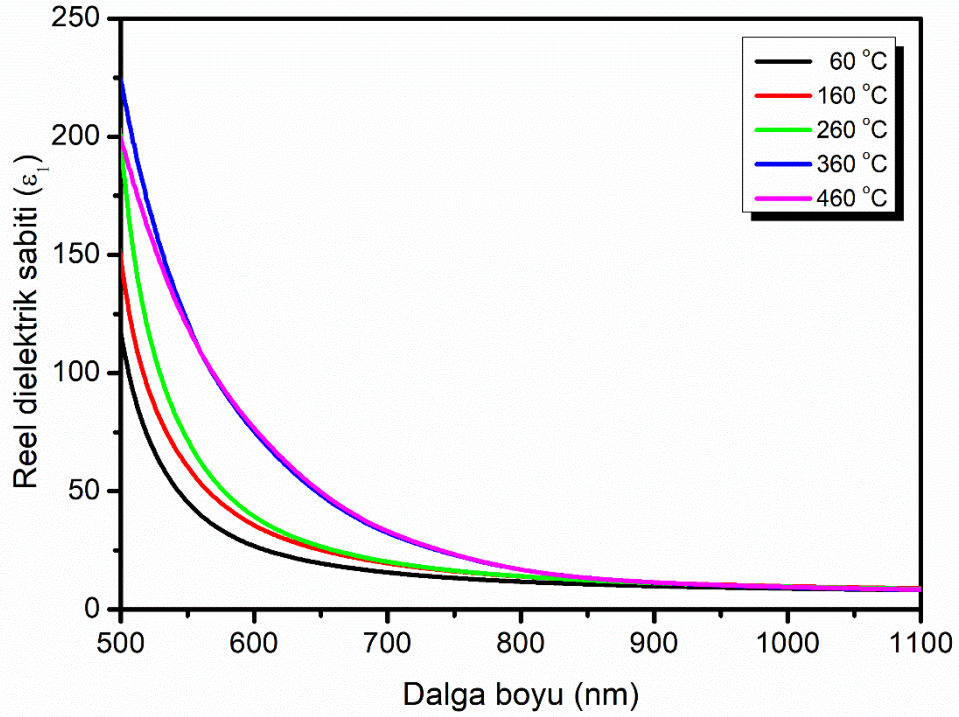
Şekil 4.24. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için kırılma indisi – dalga boyu grafiği

Şekil 4.24’de cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıklarda bir saat tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki kırılma indisi – dalga boyu grafiği görülmektedir. Kırılma indisi, bir malzemenin ışığı kırma özelliğini ifade eden önemli bir optik parametredir. Şekil incelendiğinde görünür bölge içerisinde 550 nm’de 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu_2O yarıiletken filmin kırılma indisi değeri 6,73 iken, aynı filmin farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı kırılma indisi değerleri 7,72 – 11,10 aralığında bulunmuştur (Özaslan ve ark., 2020). Şekil 4.24’e bakıldığında 360 ve 460 °C sıcaklıklarda tavlanan filmin kırılma indislerinin hemen hemen aynı değere sahip oldukları görülmektedir. Görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak kırılma indisinde de artış görüldü. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak bakır oksit ince filmin yakın kızılötesi bölgesinde (800 – 1100 nm) kırılma indisi değerlerinin birbirlerine yakın olduğu tespit edildi.



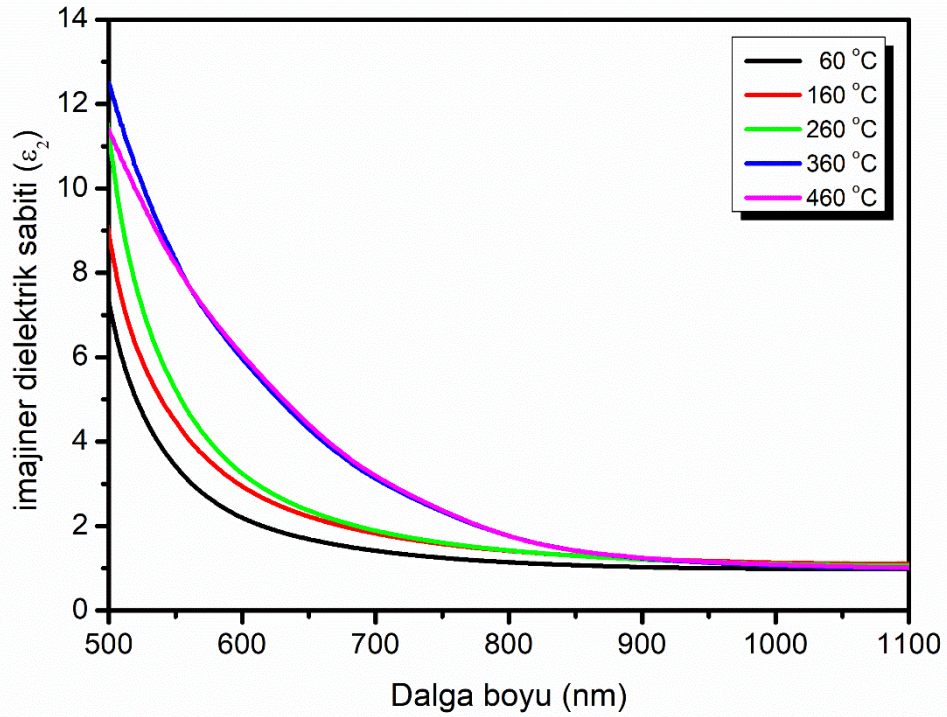
Şekil 4.25. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için sönüm katsayısı – dalga boyu grafiği

Şekil 4.25’de cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan Cu_2O yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki sönüm katsayısı – dalga boyu grafiği görülmektedir. Sönüm katsayısı, malzemenin ışığı soğurma ve dağıtma özelliğini temsil eden önemli bir optik parametredir. Şekil incelendiğinde görünür bölge içerisinde 550 nm’de 60 °C sıcaklıkta depolanan Cu_2O yarıiletken ince filmin sönüm katsayısı değeri 0,25 iken, aynı filmin farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı sönüm katsayısı değerleri 0,28 – 0,37 aralığında bulunmuştur. 360 ve 460 °C sıcaklıklarında tavlanan filmin sönüm katsayılarının hemen hemen aynı değere sahip oldukları tespit edildi. Görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artış ile sönüm katsayısında bir miktar artış olduğu görülmektedir. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak bakıroksit ince filmlerin yakın kızılötesindeki sönüm katsayısı değerlerinin yaklaşık aynı olduğu bulundu.



Şekil 4.26. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için reel dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği

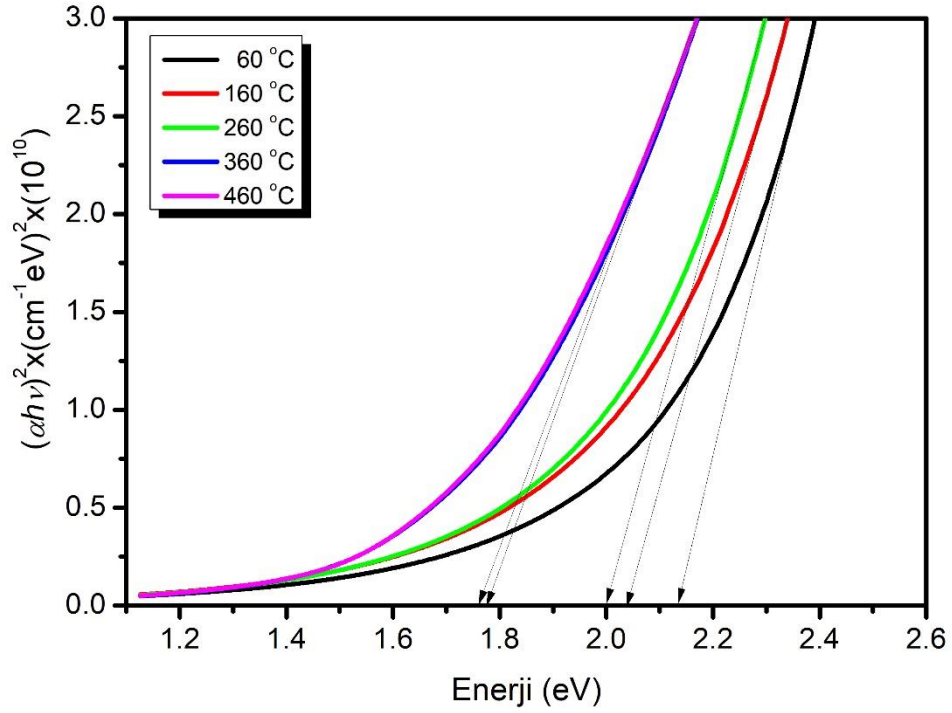
Şekil 4.26’da cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan Cu_2O yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki reel (gerçek) dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği görülmektedir. Dielektrik sabiti, malzemenin elektrik alan etkisi altındaki polarizasyon özelliğini yansıtır ve optoelektronik cihazların performansı için önemlidir. Burada ϵ_1 dielektrik sabiti depolanan enerjinin gerçek kısmını ifade etmektedir. Grafiğe bakıldığında görünür bölge içerisinde 550 nm’de 60 °C’de depolanan Cu_2O yarıiletken ince filmin reel dielektrik sabiti değeri 45,05 iken, aynı filmin farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı reel dielektrik sabiti değerleri 59,90 – 120,02 aralığında olduğu görüldü. 360 ve 460 °C sıcaklıklarında tavlanan filmin reel dielektrik sabitlerinin hemen hemen aynı değere sahip oldukları görülmektedir. Görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artış ile reel dielektrik sabitinde artış olduğu görülmektedir. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak Cu_2O ince filmin yakın kızılötesindeki reel dielektrik sabitlerinin hemen hemen aynı değere sahip olduğu görüldü. Bu veriler, Cu_2O ince filmlerin optoelektronik cihazlarda (örneğin kondansatörler, anten elemanları vb.) kullanımı için, uygun tavlama koşullarının belirlenmesi açısından önemli bilgiler sunuyor.



Şekil 4.27. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için imajiner dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği

Şekil 4.27’de cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıklarda bir saat tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki imajiner (sanal) dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği verilmiştir. ϵ_2 dielektrik sabitinin sanal kısmını ifade eder ve ortamdaki enerji kaybını gösterir.

Şekildeki grafik incelendiğinde görünür bölge içerisinde 550 nm’de 60 °C’de depolanan Cu_2O yarıiletken ince filmin imajiner dielektrik sabiti değeri 3,44 iken, aynı filmin yine aynı dalga boyundaki farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı imajiner dielektrik sabiti değerleri 4,47 – 8,31 aralığında olduğu tespit edildi. Şekil incelendiğinde 360 °C ve 460 °C sıcaklık değerlerinde tavlanan filmin imajiner dielektrik sabitlerinin yaklaşık aynı değere sahip oldukları görülmüştür. Görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artış ile imajiner dielektrik sabitinde artış olduğu görülmektedir. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak bakır oksit ince filmin yakın kızıl ötesi bölgesindeki imajiner dielektrik sabiti değerlerinin benzer olduğu görüldü.



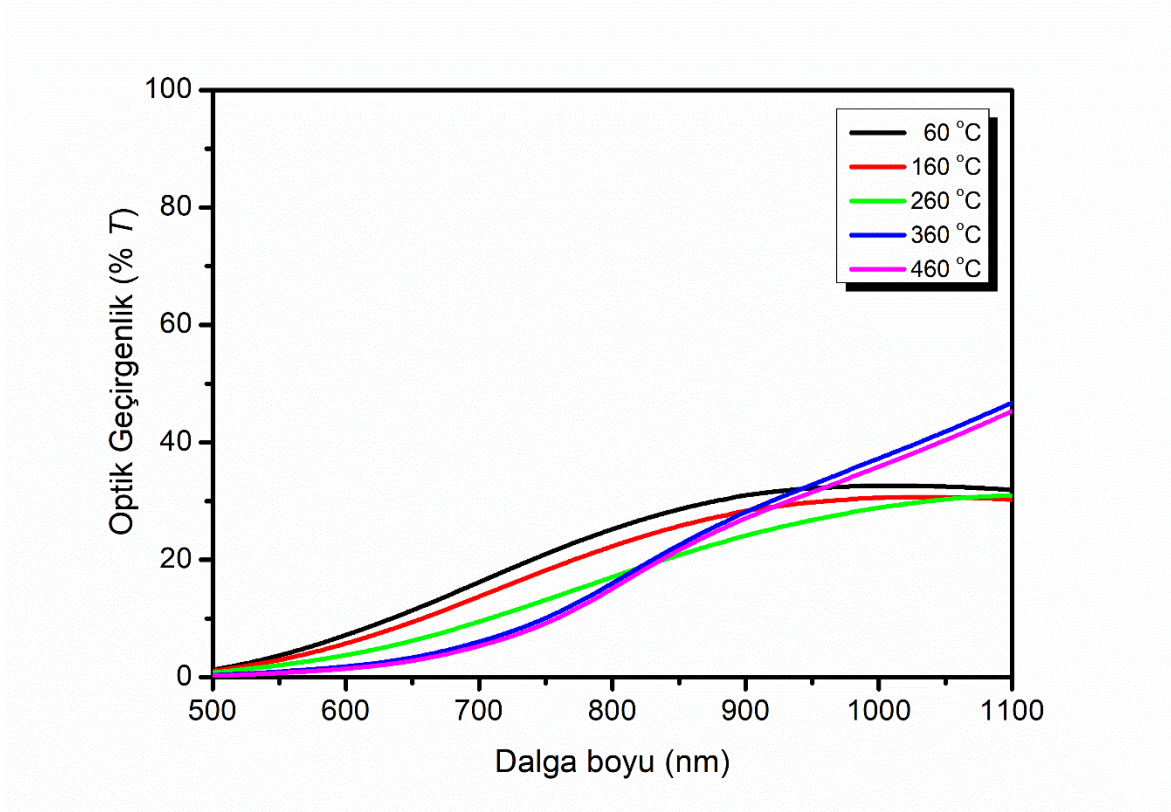
Şekil 4.28. Cam altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için $(\alpha h\nu)^2$ -foton enerjisi ($h\nu$) grafiği

Şekil 4.28’de cam altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2$ -foton enerjisi ($h\nu$) grafiği görülmektedir. Bakır oksit ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri aşağıda verilen Tauc eşitliği yardımı ile hesaplandı.

$$\alpha(h\nu) = B(h\nu - E_g)^n \quad 4.4$$

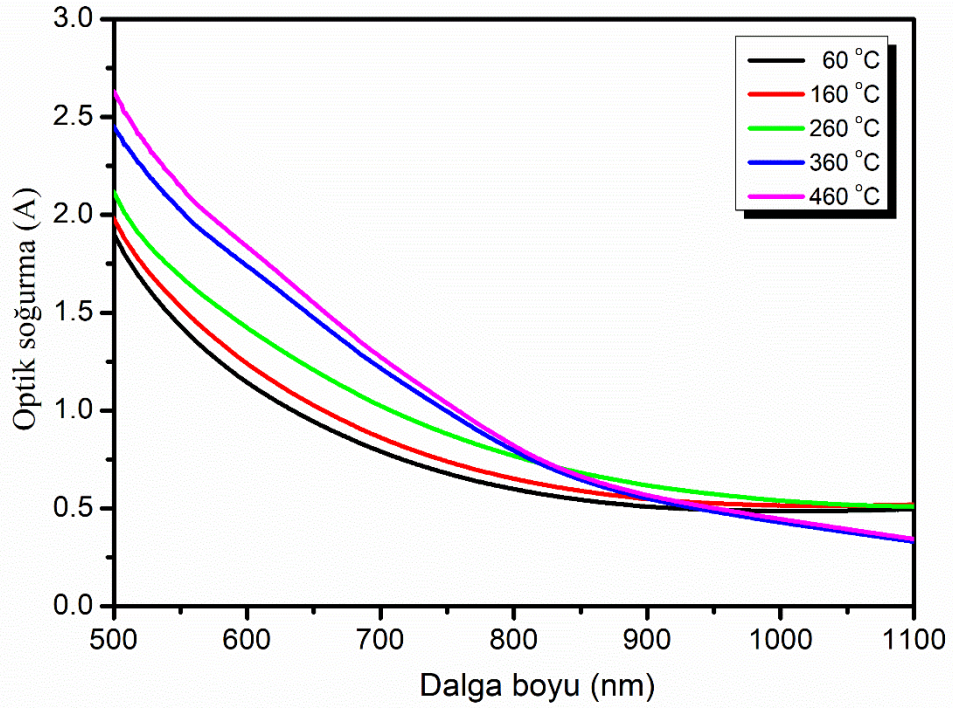
Burada α soğurma katsayısını, $h\nu$ foton enerjisini, B ise sabit bir sayıyı göstermektedir. Ayrıca “ n ” 1/2 değerini aldığında doğrudan bant aralıklı geçişlere, 2 değerini aldığında ise dolaylı bant aralıklı geçişlere karşılık gelmektedir. Tavlama sıcaklığına bağlı olarak bakır oksit ince filmlerin enerji bant aralıkları sırasıyla 2,13 eV, 2,04 eV, 1,99 eV, 1,78 eV ve 1,76 eV olarak bulundu. 60 °C de 36 SILAR döngüsü ile hazırlanan Cu_2O ince filmin, tavlama sıcaklığına bağlı olarak CuO (tenorit) fazına dönüştüğü görüldü. Ayrıca, XRD verilerinin bu durumu desteklediği görülmüştür. Elde edilen yasak enerji aralığı değerleri literatür ile uyumludur (Rafea ve ark., 2009; Johan ve ark., 2011; Özasan ve ark., 2020).

4.3.2. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan Cu₂O ince filmlerin optik özellikleri



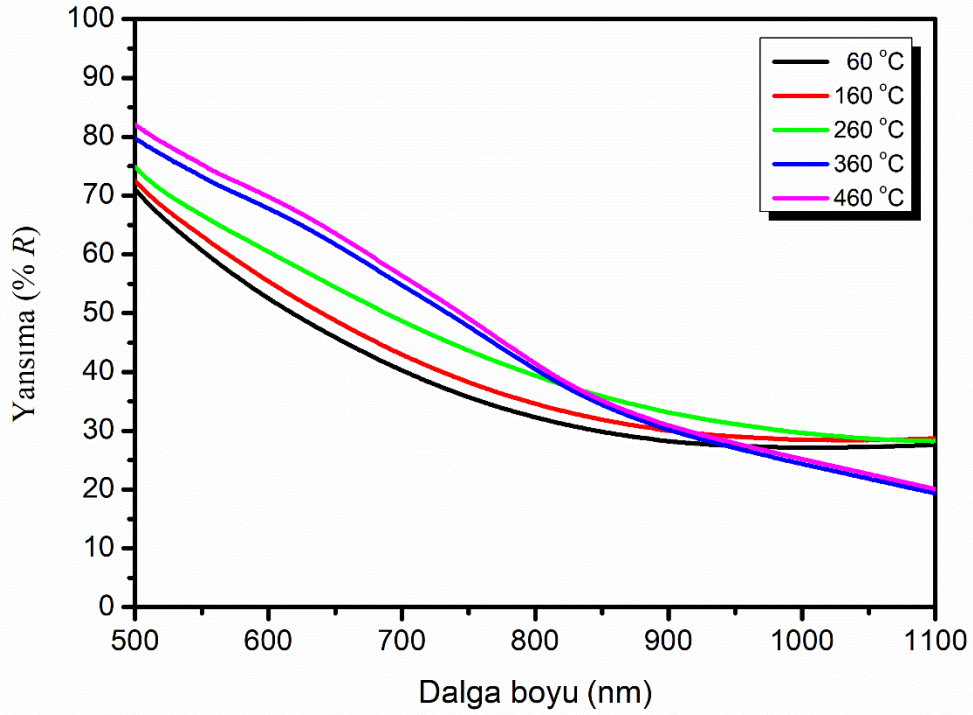
Şekil 4.29. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için optik geçirgenlik – dalga boyu grafiği

Şekil 4.29’da ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat fırında tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik – dalga boyu grafiği görülmektedir. 60 °C’de depolanan film için 550 nm’deki geçirgenlik değeri % 3,9 iken, farklı sıcaklıklarda aynı filmin tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı geçirgenlik değerleri % 0,4 – 3,4 aralığında bulunmuştur. Filmin 360 °C ve 460 °C’deki ısısal tavlama sonucu optik geçirgenlik değeri yaklaşık aynı çıkmıştır. Tavlama sıcaklığı arttıkça, filmin tüm dalga boyu aralığındaki optik geçirgenlik değerleri genel olarak azalmaktadır. Bakır oksit filmin yakın kızılötesi bölgesinde daha geçirgen olduğu görüldü. Farklı tavlama sıcaklıklarında işlem görmüş bakır oksit filmleri benzer optik geçirgenlik grafikleri göstermektedir ancak aralarında küçük farklılıklar mevcuttur. Oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik sonuçları; tavlama sıcaklığının bakır oksit filmin optik geçirgenlik özelliklerini etkilediğini, ancak bu etkinin özellikle görünür bölgede daha belirgin olduğunu göstermektedir. Bakır Oksit filmi için optik geçirgenlik değerleri yaklaşık % 0 ile % 46,6 arasında değiştiği görüldü.



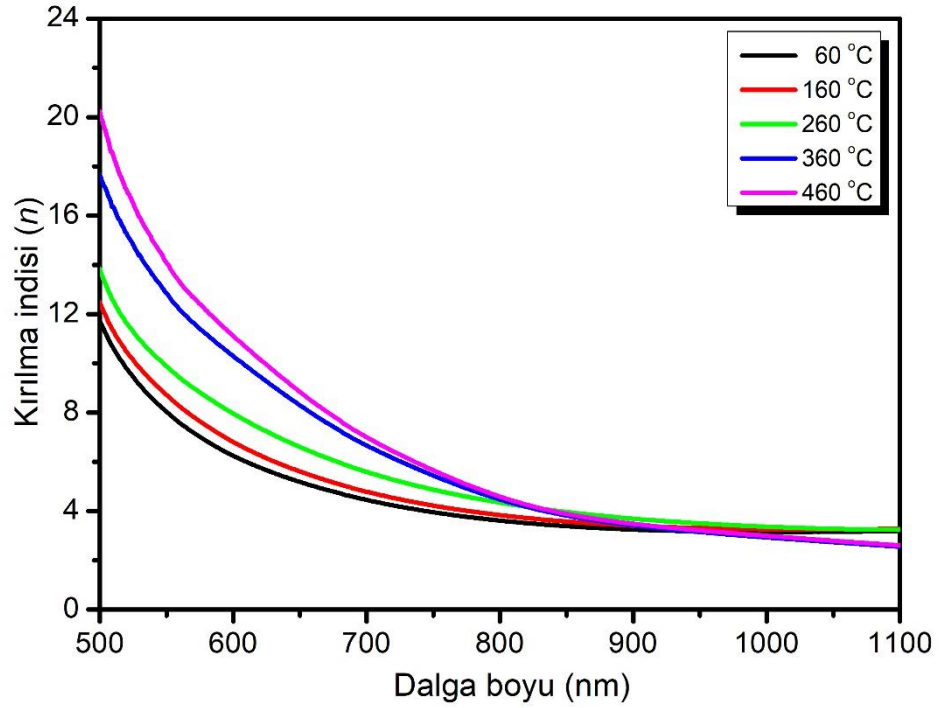
Şekil 4.30. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için optik soğurma – dalga boyu grafiği

Şekil 4.30’da ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki optik soğurma – dalga boyu grafiği görülmektedir. 60 °C’de depolanan Cu_2O film için 550 nm’deki soğurma değeri 1,43 iken, aynı filmin farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı geçirgenlik değerleri 1,52 – 2,14 aralığında bulunmuştur. Burada tavlama sıcaklığının artışı ile soğurma değeri bir miktar artış göstermiştir. Aynı zamanda bakır oksit ince filmin 500 – 800 nm bölgesinde soğurma değerlerinde bir azalma görüldü. Bakır oksit filmin yakın kızılötesindeki optik soğurma değerlerinin birbirine yaklaştığı ve büyük bir değişimin gözlenmediği görüldü.



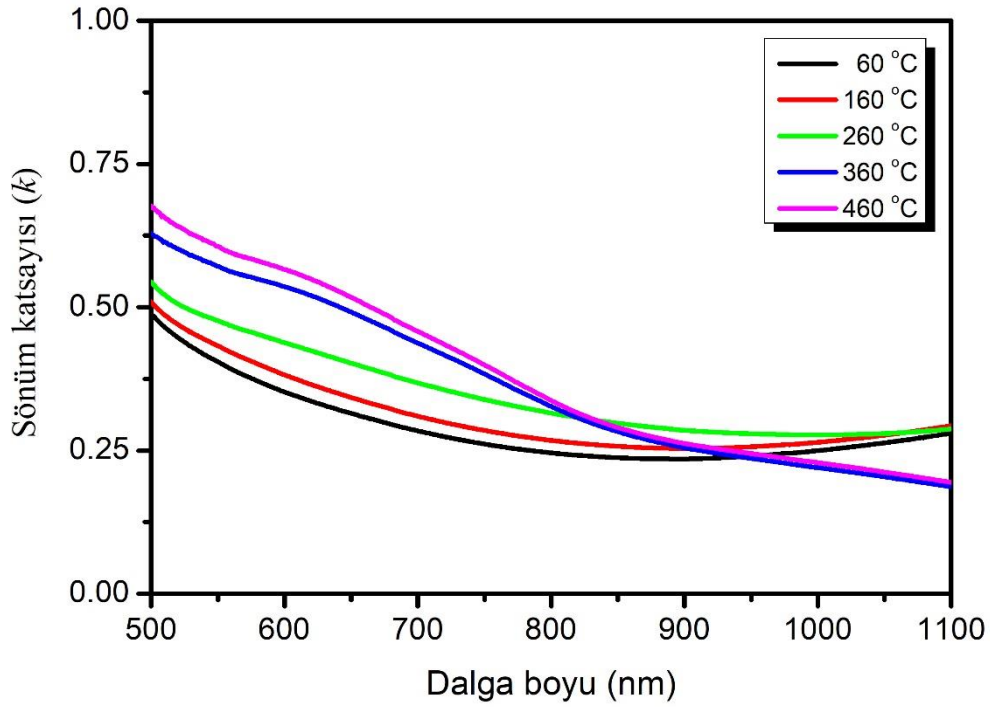
Şekil 4.31. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için yansım – dalga boyu grafiği

Şekil 4.31’de ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki yansım – dalga boyu grafiği görülmektedir. Şekil incelendiğinde tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak yansım değerlerinde de bir miktar artış gerçekleştiği görüldü. Görünür bölge incelendiğinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu₂O ince filmi için 550 nm’deki yansım değeri % 60,65 iken, aynı filmin farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı yansım değerleri % 63,37 – 75,36 aralığında olduğu tespit edildi. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak bakır oksit ince filmin 60 °C, 160 °C ve 260 °C sıcaklıklarına ait yakın kızılötesi bölgesindeki yansım değerleri yaklaşık olarak aynı olduğu görüldü. Aynı şekilde dalga boyunun artmasına bağlı olarak CuO yarıiletken ince filmin 360 °C ve 460 °C’de tavlınması sonucu yakın kızılötesi bölgesindeki yansım değerleri yaklaşık olarak aynı olduğu görüldü.



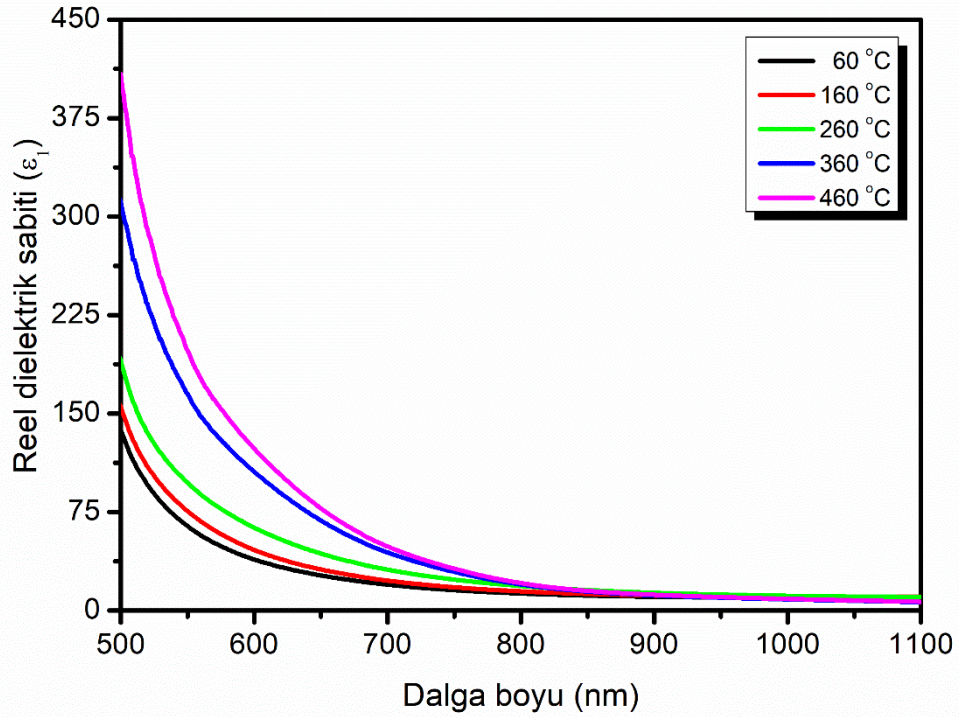
Şekil 4.32. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için kırılma indisi – dalga boyu grafiği

Şekil 4.32’de ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan Cu_2O yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki kırılma indisi – dalga boyu grafiği görülmektedir. Şekil incelendiğinde görünür bölge içerisinde 550 nm’de 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu_2O yarıiletken filmin kırılma indisi değeri 7,98 iken, aynı filmin farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı kırılma indisi değerleri 8,78 – 14,05 aralığında bulunmuştur. Grafik incelendiğinde görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artış ile kırılma indisinde de artış olduğu görülmektedir. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki kırılma indisi değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görüldü.



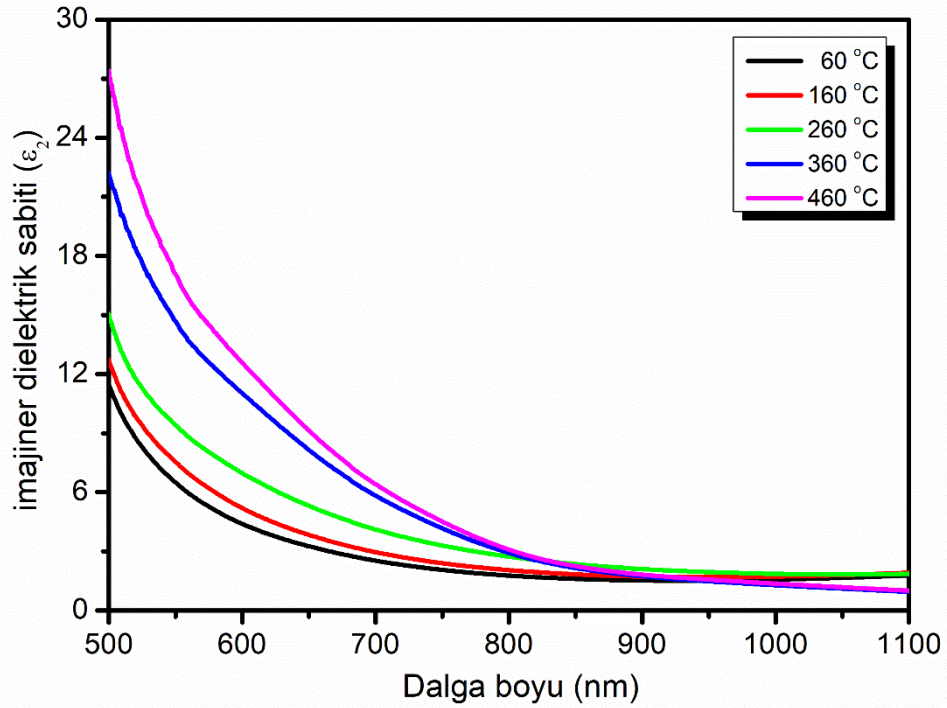
Şekil 4.33. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için sönüm katsayısı – dalga boyu grafiği

Şekil 4.33’de ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki sönüm katsayısı – dalga boyu grafiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde görünür bölge içerisinde 550 nm’de 60 °C’de depolanan Cu_2O yarıiletken ince filmin sönüm katsayısı değeri 0,40 iken, aynı filmin farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı sönüm katsayısı değerleri 0,43 – 0,60 aralığında olduğu görüldü. Şekil incelendiğinde görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artış ile sönüm katsayısında bir miktar artış olduğu görülmektedir. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak bakır oksit ince filmin 60 °C, 160 °C ve 260 °C sıcaklıklarına ait yakın kızılötesi bölgesindeki sönüm katsayısı değerleri yaklaşık olarak aynı olduğu görüldü. Aynı şekilde dalga boyunun artmasına bağlı olarak CuO yarıiletken ince filmin 360 °C ve 460 °C’de tavlama sonucu yakın kızılötesi bölgesindeki sönüm katsayısı değerleri yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.



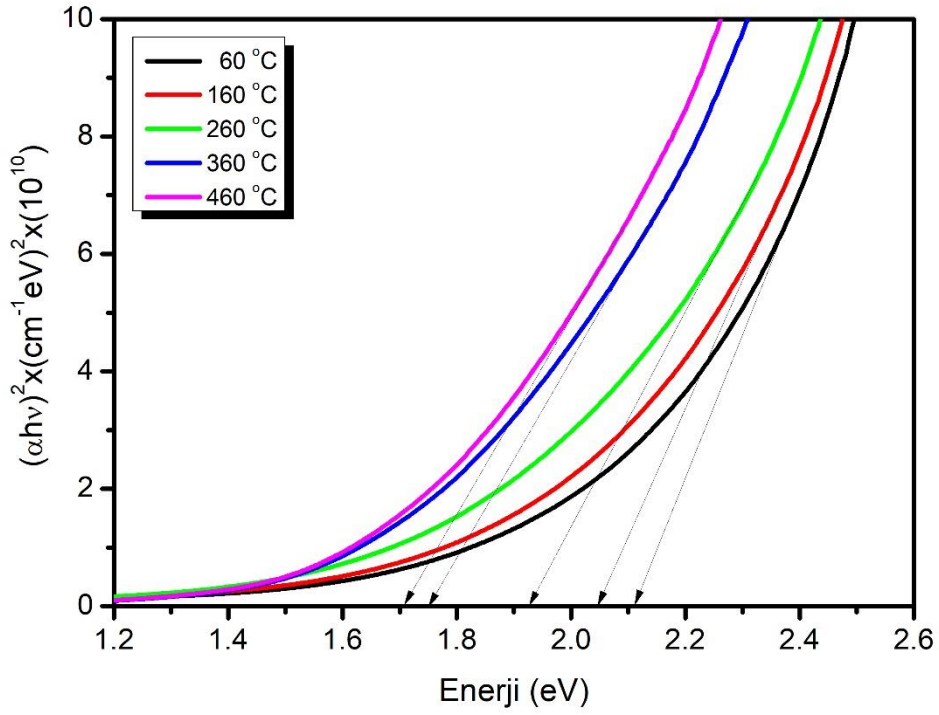
Şekil 4.34. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için reel dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği

Şekil 4.34’de ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan Cu₂O yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki reel (gerçek) dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği görülmektedir. Şekil incelendiğinde görünür bölge içerisinde 550 nm’de 60 °C’de depolanan Cu₂O yarıiletken ince filmin reel dielektrik sabiti değeri 63,19 iken, aynı filmin farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı reel dielektrik sabiti değerleri 76,09 – 195,2 aralığında olduğu görüldü. Grafiğe bakıldığında görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artış ile reel dielektrik sabitinde artış olduğu görülmektedir. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki reel dielektrik sabitlerinin hemen hemen aynı değere sahip olduğu görüldü.



Şekil 4.35. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için imajiner dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği

Şekil 4.35’de ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan Cu_2O yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki imajiner (sanal) dielektrik sabiti – dalga boyu grafiği görülmektedir. Şekildeki grafiğe bakıldığında görünür bölge içerisinde 550 nm’de 60 °C’de depolanan Cu_2O yarıiletken ince filmin imajiner dielektrik sabiti değeri 6,45 iken, aynı filmin yine aynı dalga boyundaki farklı tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı imajiner dielektrik sabiti değerleri 7,60 – 17,15 aralığında olduğu görüldü. Şekil incelendiğinde görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artış ile reel dielektrik sabitinde artış olduğu görülmektedir. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak bakır oksit ince filmin yakın kızıl ötesi bölgesindeki imajiner dielektrik sabiti değerlerinin benzer olduğu görüldü.



Şekil 4.36. ITO altlıklar üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan bakır oksit ince film için $(\alpha h\nu)^2$ -foton enerjisi ($h\nu$) grafiği

Şekil 4.36’da ITO altlık üzerinde 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan ve 160 °C, 260 °C, 360 °C ve 460 °C sıcaklıkta bir saat tavlanan bakır oksit yarıiletken ince filmin oda sıcaklığındaki $(\alpha h\nu)^2$ -foton enerjisi ($h\nu$) grafiği görülmektedir. Tavlama sıcaklığına bağlı olarak bakır oksit ince filmlerin enerji bant aralıkları sırasıyla 2,11 eV, 2,04 eV, 1,92 eV, 1,75 eV ve 1,70 eV olarak bulundu. 60 °C de 36 SILAR döngüsü ile hazırlanan Cu_2O ince filmin, tavlama sıcaklığına bağlı olarak CuO (tenorit) fazına dönüştüğü ve XRD verilerinin bu durumu desteklediği görülmektedir. Literatürde daha önceden yapılan çalışmalar incelendiğinde yasak enerji aralığı 1,73 – 2,40 eV arasında bulunmuş olup, elde ettiğimiz yasak enerji aralığı değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür (Johan ve ark., 2011).

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Cu_2O yarıiletken ince filmleri, farklı altlıklar (cam, ITO) üzerinde 60 °C gibi düşük sayılabilecek depolama sıcaklığında SILAR [Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu)] tekniği kullanılarak 36 daldırma döngüsü ile depolandı. Daha sonra depolanan bu filmler sıcaklığı kontrol edilebilen kül fırınında farklı sıcaklıklarda (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) doğal atmosferik şartlarda birer saat ısısal işleme (tavlama) tabi tutuldu. Cu_2O ve ısısal işlem sonucunda (250 – 300 °C) CuO 'ya dönüşen ince filmlerin; yapısal özelliklerini incelemek için X-ışını kırınımı (XRD) cihazı, morfolojik özelliklerini incelemek için alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve optik özelliklerini incelemek için UV-vis fotospektrometresi kullanıldı.

60 °C sıcaklıkta 36 SILAR döngüsü ile cam ve ITO altlıklar üzerinde depolanan Cu_2O ve CuO yarıiletken ince filmlerin yapısal özelliklerinin incelenmesi, X-ışını kırınımı (XRD) cihazı kullanılarak oda sıcaklığında $10^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ aralığında ve 2°/dakika tarama hızı (sabit) ile yapıldı. Elde edilen sonuçlar, Cu_2O 'ya ait standart PDF kartında (PDF Kart No.: 00 – 071 – 3645) ve CuO 'ya ait standart PDF kartında (PDF Kart No. : 00 – 041 – 0254) ifade edilen değerler ile karşılaştırıldı ve birbirleriyle uyum içinde oldukları görüldü. Cam ve ITO altlıklar üzerinde depolanan yarıiletken ince filmlere ait XRD kırınım desenleri incelendiğinde; Cu_2O 'ya ait tercihli yönelimin (111) ve (200) düzlemleri boyunca gerçekleştiği, CuO 'ya ait tercihli yönelimin ise (002) ile (111) düzlemleri boyunca gerçekleştiği ve kristallenmelerin bu pikler yönünde olduğu tespit edildi. Her iki altlık üzerinde depolanan Cu_2O yarıiletken ince filmlerin kübik fazda ve polikristal yapıda, CuO yarıiletken ince filmlerin ise monoklinik fazda olduğu ve polikristal yapıda oldukları görüldü. Her iki altlık için, özellikle tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak, CuO pik şiddetlerinde gözlenen artış yarıiletken ince filmlerin kristalizasyonunda iyileşme olduğunu gösterdi. Son durumda, polikristal ITO alttaban üzerinde depolanan Cu_2O filmlerin XRD pik şiddetlerinin, aynı koşullarda amorf cam alttaban üzerinde depolanan Cu_2O filmlerin pik şiddetlerinden büyük olduğu tespit edildi.

60 °C sıcaklıkta 36 SILAR döngüsü ile cam ve ITO altlıklar üzerinde depolanan Cu_2O ve CuO yarıiletken ince film numunelerinin morfolojik özelliklerinin incelenmesi için FE-SEM cihazı kullanıldı ve vakum ortamında 100kx büyütme oranında SEM görüntüleri alındı.

Cam altlık üzerinde 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü incelendiğinde; film yüzeyinde küçük tanecikli küremsi yapılar görülmekte olup, belirgin çatlak veya büyük yığılmalar (aglomerasyon) görülmemektedir. Aynı zamanda gerçekleştirilen büyütme işlemi sonucunda uniform bir film oluşumu meydana geldiği gözlemlendi. Elde edilen filmin taneciklerinin boyutu yaklaşık 40 – 55 nm civarında olduğu tespit edildi. ITO altlık üzerinde 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü incelendiğinde ise; film yüzeyinde küresel ve yarı-küresel formda Cu_2O tanecikleri olduğu,

taneciklerin film yüzeyi üzerinde göreceli homojen bir dağılım gösterdiği ancak bazı bölgelerde toplanma meydana geldiği gözlemlendi. Aynı zamanda film yüzeyinin pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görüldü. Elde edilen filmin taneciklerinin çapı yaklaşık 90 – 125 nm civarında olduğu tespit edilmiştir.

Cam altlık üzerinde depolanan Cu_2O yarıiletken ince filmin 160 °C’de bir saat kül fırında doğal atmosferik şartlarda tavlama sonucu elde edilen FE-SEM görüntüleri incelendiğinde; 60 °C’deki (tavlanmamış) filme göre tanecik boyutlarında bir artış meydana geldiği, taneciklerin küresel yapıya sahip olduğu ve gözenekli bir yapı oluşturduğu görüldü. Elde edilen filmin taneciklerinin çapı yaklaşık 110 – 172 nm civarında değiştiği tespit edildi. ITO altlık üzerinde depolanan Cu_2O yarıiletken ince filmin 160 °C’de bir saat kül fırında hava atmosferinde tavlama sonucu elde edilen FE-SEM görüntüleri incelendiğinde ise; tanecik boyutlarında bir artış meydana geldiği, filmi meydana getiren taneciklerin daha düzenli ve belirgin küresel formlar kazandığı ve film yüzeyinin hala pürüzlü olmasına karşın tavlama öncesine göre daha düzenli bir topografya sergilediği gözlemlendi. Elde edilen filmin taneciklerinin çapı yaklaşık 105 – 270 nm civarında değiştiği tespit edildi.

XRD analizleri incelendiğinde, tavlama sıcaklığının 260 °C’ye çıkarılması ile birlikte kübik fazda bulunan Cu_2O ince filmin tamamen monoklinik fazdaki CuO ’ya dönüştüğü tespit edilmişti. Cam altlık üzerinde depolanan CuO yarıiletken ince filmin 260 °C’de bir saat kül fırında hava atmosferinde tavlama sonucu elde edilen FE-SEM görüntüleri incelendiğinde; tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak film yüzeyindeki tanecik boyutlarında bir artış meydana geldiği ve yüzey pürüzlülüğünün artmış olduğu görüldü. Elde edilen filmin taneciklerinin çapı yaklaşık 125 – 185 nm civarında değiştiği tespit edildi. ITO altlık üzerinde depolanan CuO yarıiletken ince filmin 260 °C’de bir saat kül fırında hava atmosferinde tavlama sonucu elde edilen FE-SEM görüntüleri incelendiğinde ise; filmin tanecik boyutlarında bir miktar artış meydana geldiği, tavlama sonucu film yüzeyindeki taneciklerin önceki küresel yapılar yerine, daha kompleks ve pürüzlü yüzey morfolojisi gösterdiği ve bununla birlikte taneciklerin daha az küresel daha fazla toplanmış durumda olduğu ve tanecikler arası boşlukların arttığı tespit edildi. Aynı zamanda yüzeyde belirgin bir pürüzlülük ve gözeneklilik artışı gözlemlendi. Elde edilen filmin taneciklerinin çapı yaklaşık 180 – 200 nm civarında değiştiği tespit edildi.

Cam altlık üzerinde depolanan CuO yarıiletken ince filmin 360 °C’de bir saat kül fırında doğal atmosferik şartlarda tavlama sonucu elde edilen FE-SEM görüntüleri incelendiğinde; taneciklerin arasında boşlukların olmadığı ve homojen bir yapının oluştuğu, küresel benzeri yapıların boyut dağılımının daha geniş bir aralığa yayıldığı ve yüksek tavlama sıcaklığının daha büyük toplanmaların oluşumuna neden olduğu tespit edildi. Elde edilen filmin taneciklerinin çapı yaklaşık 115 – 240 nm civarında değiştiği tespit edildi. ITO altlık üzerinde depolanan CuO yarıiletken ince filmin 360 °C’de bir saat kül fırında hava atmosferinde tavlama sonucu elde edilen FE-SEM görüntüleri incelendiğinde ise; tanecik boyutlarında bir artış meydana geldiği,

göreceli olarak homojen bir boyut dağılımına sahip olduğu ve taneciklerin birbirleriyle topaklanma oluşturduğu tespit edildi. Aynı zamanda yapılar arasında gözenekli bir morfoloji mevcut olup, küresel benzeri nano yapılar gözlemlendi. Elde edilen filmin taneciklerinin çapı yaklaşık 230 – 270 nm civarında değiştiği tespit edildi.

Cam altlık üzerinde depolanan CuO yarıiletken ince filmin 460 °C’de bir saat kül fırında doğal atmosferik şartlarda tavlama sonucu elde edilen FE-SEM görüntüleri incelendiğinde; film yapısının daha karmaşık ve üç boyutlu bir ağ görünümü kazandığı, parçacıkların daha çok zincir benzeri yapılar oluşturma eğiliminde olduğu, küresel parçacıkların birleşerek daha uzun ve bağlantılı yapılar meydana getirdiği tespit edildi. Artan tavlama sıcaklığının gözenekli yapının korunmasını sağladığı, parçacıklar arası boşlukların daha belirgin ve düzenli hale geldiği, nano-yapıların boyutsal dağılımının daha homojen olduğu görüldü. Elde edilen filmin taneciklerinin çapı yaklaşık 60 – 80 nm civarında değiştiği tespit edildi. ITO altlık üzerinde depolanan CuO yarıiletken ince filmin 460 °C’de bir saat kül fırında hava atmosferinde tavlama sonucu elde edilen FE-SEM görüntüleri incelendiğinde ise; tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak ince filmin yüzeyinde küresel/yarı küresel şekilli nano-yapılar meydana geldiği, bu yapıların birbirleriyle topaklanmış durumda olduğu ve film yüzeyinin homojen bir dağılıma sahip olduğu görüldü. Elde edilen filmin taneciklerinin çapı yaklaşık 100 – 200 nm civarında değiştiği tespit edildi.

60 °C sıcaklıkta 36 SILAR döngüsü ile cam ve ITO altlıklar üzerinde depolanan Cu₂O ve CuO yarıiletken ince filmlerin optik özelliklerinin incelenmesi için spektrofotometri cihazı kullanıldı.

Cam altlık üzerine 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan film için 550 nm’deki (görünür bölge ortasında) optik geçirgenlik değeri % 6,4 iken, aynı sıcaklıkta ITO altlık üzerine depolanan film için 550 nm’deki (görünür bölge ortasında) optik geçirgenlik değeri % 3,9 olduğu görüldü. Cam altlık üzerinde 60 °C’de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı geçirgenlik değerleri % 1,5 – 4,1 aralığında bulunurken, ITO altlık üzerinde 60 °C’de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı geçirgenlik değerleri % 0,4 – 3,4 aralığında bulundu. Her iki altlık üzerine depolanan bakır oksit filmler için tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak optik geçirgenlik değerlerinde genel olarak bir azalış gözlemlendi. Her iki altlık için oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik sonuçları, tavlama sıcaklığının bakır oksit ince filmlerin optik özelliklerini etkilediğini ve bu etkinin en belirgin şekilde görünür bölgede gözlemlendiğini gösterdi.

Cam altlık üzerine 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan film için 550 nm’deki soğurma değeri 1,23 iken, aynı sıcaklıkta ITO altlık üzerine depolanan film için 550 nm’deki optik soğurma değeri 1,43 olarak tespit edildi. Cam altlık üzerinde 60 °C’de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı optik soğurma değerleri 1,40 – 1,83 aralığında bulunurken, ITO altlık üzerinde 60 °C’de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı soğurma değerleri 1,52

– 2,14 aralığında bulundu. Her iki altlık üzerinde de depolanan bakır oksit ince filmler için tavlama sıcaklığının artışına bağlı olarak soğurma değerlerinde bir miktar artış meydana geldiği gözlemlendi. Cam ve ITO altlık üzerine depolanan bakır oksit filmlerin 500 – 800 nm bölgesinde soğurma değerlerinde bir artış tespit edildi. Yine, cam ve ITO altlık üzerine depolanan bakır oksit filmlerin yakın kızılötesi bölgesinde (800 – 1100 nm) optik soğurma değerlerinin birbirine yaklaştığı ve büyük bir değişimin gözlenmediği görüldü.

Cam altlık üzerine 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan film için 550 nm’deki yansımaya değeri % 54,41 iken, aynı sıcaklıkta ITO altlık üzerine depolanan film için 550 nm’deki yansımaya değeri % 60,65 olduğu görüldü. Cam altlık üzerinde 60 °C’de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı yansımaya değerleri % 59,47 – 69,90 aralığında bulunurken, ITO altlık üzerinde 60 °C’de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı yansımaya değerleri % 63,37 – 75,36 aralığında bulundu. Dalga boyunun artmasına bağlı olarak cam altlık üzerinde depolanan bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800 – 1100 nm) yansımaya değerlerinin yaklaşık olarak aynı değerlere sahip olduğu grafikten görülmekte olup, ITO altlık üzerinde depolanan film için 60 °C, 160 °C ve 260 °C sıcaklıklarına ait yakın kızılötesi bölgesindeki yansımaya değerleri yaklaşık olarak aynı olduğu tespit edildi. Benzer şekilde 360 °C ve 460 °C’deki yansımaya değerlerinin de kendi içerisinde yaklaşık olarak aynı olduğu görüldü.

Cam altlık üzerine 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan film için 550 nm’deki kırılma indisi değeri 6,73 iken, aynı sıcaklıkta ITO altlık üzerine depolanan film için 550 nm’deki kırılma indisi değeri 7,98 olduğu tespit edildi. Cam altlık üzerinde 60 °C’de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı kırılma indisi değerleri 7,72 – 11,10 aralığında bulunurken, ITO altlık üzerinde 60 °C’de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı kırılma indisi değerleri 8,78 – 14,05 aralığında bulundu. Her iki altlık üzerine depolanan bakır oksit filmler için tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak görünür bölgede kırılma indisinde bir artış görüldü. Aynı şekilde, cam ve ITO altlıklar üzerinde depolanan bakır oksit ince filmler için dalga boyunun artmasına bağlı olarak yakın kızılötesi bölgesinde (800 – 1100 nm) kırılma indisi değerlerinin birbirlerine yakın olduğu tespit edildi.

Cam altlık üzerine 60 °C’de 36 SILAR döngüsü ile depolanan film için 550 nm’deki sönüm katsayısı değeri 0,25 iken, aynı sıcaklıkta ITO altlık üzerine depolanan film için 550 nm’deki sönüm katsayısı değeri 0,40 olduğu tespit edildi. Cam altlık üzerinde 60 °C’de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı sönüm katsayısı değerleri 0,28 – 0,37 aralığında bulunurken, ITO altlık üzerinde 60 °C’de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağlı sönüm katsayısı değerleri 0,43 – 0,60 aralığında bulundu. Her iki altlık için görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artış ile sönüm katsayısında bir miktar artış olduğu görülmektedir. Dalga boyunun

artmasına bağı olarak cam altlık üzerinde depolanan bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800 – 1100 nm) sönüm katsayısı değerlerinin yaklaşık olarak aynı değerlere sahip olduğu grafikten görülmekte olup, ITO altlık üzerinde depolanan film için 60 °C, 160 °C ve 260 °C sıcaklıklarına ait yakın kızılötesi bölgesindeki sönüm katsayısı değerleri yaklaşık olarak aynı olduğu tespit edildi. Benzer şekilde 360 °C ve 460 °C'deki sönüm katsayısı değerlerinin de kendi içerisinde yaklaşık olarak aynı olduğu görüldü.

Cam altlık üzerine 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan film için 550 nm'deki reel dielektrik sabiti değeri 45,05 iken, aynı sıcaklıkta ITO altlık üzerine depolanan film için 550 nm'deki reel dielektrik sabiti değeri 63,19 olduğu tespit edildi. Cam altlık üzerinde 60 °C'de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağı reel dielektrik sabiti değerleri 59,90 – 120,02 aralığında bulunurken, ITO altlık üzerinde 60 °C'de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağı reel dielektrik sabiti değerleri 76,09 – 195,20 aralığında bulundu. Cam ve ITO altlıklar üzerinde depolanan ince filmler için görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artış ile birlikte reel dielektrik sabitinde artış olduğu görüldü. Her iki altlık için ayrı ayrı dalga boyunun artmasına bağı olarak bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki reel dielektrik sabitlerinin hemen hemen aynı değere sahip olduğu görüldü.

Cam altlık üzerine 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan film için 550 nm'deki imajiner dielektrik sabiti değeri 3,44 iken, aynı sıcaklıkta ITO altlık üzerine depolanan film için 550 nm'deki imajiner dielektrik sabiti değeri 6,45 olduğu tespit edildi. Cam altlık üzerinde 60 °C'de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağı imajiner dielektrik sabiti değerleri 4,47 – 8,31 aralığında bulunurken, ITO altlık üzerinde 60 °C'de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağı imajiner dielektrik sabiti değerleri 7,60 – 17,15 aralığında bulundu. Cam ve ITO altlıklar üzerinde depolanan her iki film için ayrı ayrı görünür bölgede tavlama sıcaklığındaki artış ile birlikte imajiner dielektrik sabitinde artış olduğu tespit edildi. Benzer şekilde her iki altlık için ayrı ayrı dalga boyunun artmasına bağı olarak bakır oksit ince filmin yakın kızıl ötesi bölgesindeki imajiner dielektrik sabiti değerlerinin benzer olduğu görüldü.

Cam altlık üzerine 60 °C'de 36 SILAR döngüsü ile depolanan film için 550 nm'deki yasak enerji aralığı değeri 2,13 iken, aynı sıcaklıkta ITO altlık üzerine depolanan film için 550 nm'deki imajiner dielektrik sabiti değeri 2,11 olduğu görüldü. Cam altlık üzerinde 60 °C'de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağı yasak enerji aralığı değerleri 2,04 – 1,76 aralığında bulunurken, ITO altlık üzerinde 60 °C'de depolanan aynı filmin farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklıklarına (160 °C, 260 °C, 360 °C, 460 °C) bağı imajiner dielektrik sabiti değerleri 2,04 – 1,70 aralığında bulundu. Cam ve ITO altlıklar üzerinde depolanan ve farklı sıcaklıklarda tavlanan filmlerin her ikisi içinde yasak enerji aralığı değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu tespit edildi.

Tez kapsamında elde ettiğimiz Cu_2O ve CuO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optiksel özelliklerinden hareketle bu malzemelerin güneş pillerinde, optoelektronik, sensör veya fotokatalitik uygulamalarda kullanımının uygun olacağı kanaatindeyiz. Sonraki çalışmalarda tez kapsamında elde ettiğimiz ince film malzemelerin farklı altlıklar üzerinde daha farklı sıcaklıklarda, molaritelerde ve pH değerlerinde üretilmesi ile bu parametrelerin yapısal, morfolojik, elektriksel ve optik özelliklere etkilerinin araştırılması planlanmaktadır.



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*, 509:5551-5554.
- Akat, E., 2012. Katıhal Fiziği Temelleri. Papatya Yayıncılık, İstanbul, 569s.
- Aker, D., 2019. Kimyasal Depolama Yöntemiyle Üretilen Cu₂O İnce Filmlerin Yapısal ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 70s.
- Alkoy, E.M., Kelly, P.J., 2005. The structure and properties of copper oxide and copper aluminium oxide coatings prepared by pulsed magnetron sputtering of powder targets. *Vacuum*, 79(3-4), 221-230.
- Al-Kuhaili M.F., 2008. Characterization of Copper Oxide Thin Films Deposited by The Thermal Evaporation of Cuprous Oxide (Cu₂O). *Vacuum*, 82:623- 629.
- Altındemir, G., 2016. SILAR yöntemi ile farklı bakır tuz kaynakları kullanılarak yarıiletken Cu₂O ince filmlerin depolanması ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 139s
- Altındemir, G., Gumus, C., 2020. Cu₂O 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. Cu₂O nanorod thin films prepared by CBD method with CTAB: Substrate effect, deposition mechanism and photoelectrochemical properties, *Materials Chemistry and Physics*, 127(3), 433-439.
- Baiga, F., Khattak, Y.H., Soucase, B.M., Beg, S., Ullah, S., 2018. Effect of anionic bath temperature on morphology and photo electrochemical properties of Cu₂O deposited by SILAR, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 88, 35-39.
- Balamurugan, B. and Mehta, B.R., 2001. Optical and Structural Properties of Nanocrystalline Copper Oxide Thin Films Prepared by Activated Reactive Evaporation. *Thin Solid Films*, 396:90-96.
- Bayansal, F., 2009. Katkılı-Katkısız Bakır Oksit İnce Filmlerin Gaz Algılama Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 107s.
- Bayansal, F., Çetinkara, H.A., Kahraman, S., Çakmak, H.M., Güder, H.S., 2012. Nano-Structured CuO Films Prepared by Simple Solution Methods: Plate-Like, Needle-Like and Network-Like Architectures. *Ceramics International*, 38:1859-1866.

- Bayansal, F., Kahraman, S., Çankaya, G., Çetinkara, H.A., Güder, H.S., Çakmak, H.M., 2011. Growth of Homogenous CuO Nano-Structured Thin Films by A Simple Solution Method. *Journal of Alloys and Compounds*, 509:2094- 2098.
- Bijani, S., Schrebler, R., Dalchiele, E.A., Gabas, M., Martínez L., Ramos-Barrado, J.R., 2011. Study of the Nucleation and Growth Mechanisms in the Electrodeposition of Micro- and Nanostructured Cu₂O Thin Films. *J. Phys. Chem. C* 2011, 115, 21373–21382.
- Brabazon, D., Raffer, A., 2015. *Emerging Nanotechnologies for Manufacturing (Second Edition) Chapter3: Advanced Characterization Techniques for Nanostructures. Micro and Nano Technologies*, 2015, Pages 53-85.
- Bulun, G., 2010. 3d-Geçiş Metali Ni Katkılı Zn_{1-x}Ni_xO ve 4f-Lântanit Gd Katkılı Zn_{1-x}Gd_xO Bileşiklerinin Yapısal ve Manyetik Özellikleri. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 194s.
- Caferov, T., 1998. Yarıiletken Fiziği-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Basın-Yayın Merkezi, İstanbul, 200s.
- Ceylan, H. M., 2013. CuGaSe₂ İnce Filmlerinin Yapısal Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 76s.
- Chang, G.S., Kurmaev, E.Z., Boukhvalov, D.W., Moewes, A., Finkelstein, L.D., Wei, M., MacManus-Driscoll, J.L., 2008. Defect-induced ferromagnetism in Mn-doped Cu₂O. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20, 215216 (5pp).
- Chatterjee, S., Saha, S.K., Pal, A.J., 2016. Formation of all-oxide solar cells in atmospheric condition based on Cu₂O thin-films grown through SILAR technique. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 147, 17-26.
- Chen, X., Parker, D., Du, M-H., Singh, D.J., 2013. Potential thermoelectric performance of hole-doped Cu₂O. *New Journal of Physics* 15, 043029.
- Choi, J., Kim, S.J., Lee, J., Nam, S-C., Kang, J., Chang, J.H., 2007. Controlled growth of Cu₂O particles on a hexagonally nanopatterned aluminium substrate. *Nanotechnology* 18, 215303 (4pp).
- Cullity, B.D., 1967. *Elements of X-Ray Diffraction*. Adison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, 514p.
- Çavuşoğlu, H., 2018. Band-gap Control of Nanostructured CuO Thin Films using PEG as a Surfactant. *European Journal of Science and Technology* No. 13, pp. 124-128.
- Çevlik, Ç.H., 2019. SILAR Yöntemi ile Hazırlanan Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

- Çevlik, Ç.H., Gümüş, C., 2019. Sılar Yöntemi ile Hazırlanan Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması. Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi Yıl 2019 Cilt: 38-3.
- Çolak, H., 2010. Değişik Metal Katkılı II-VI Tipi Yarı İletkenlerin Sentezlenmesi, Karakterizasyonu ve Elektriksel İletkenliklerinin Ölçülmesi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 225s.
- Dikici, M., 2012. Katıhal Fiziği. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 424s.
- 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 Cu₂O. J. Phys. D: Appl. Phys. 48, 175502 (9pp).
- Eya, D.D.O., Ekpunobi, A.J., Okeke, C.E., 2005. Optical Properties of Cuprous Oxide Thin Film Prepared by Chemical Bath Deposition Technique. The Pacific Journal of Science and Technology, 6:98-104.
- Eya, D.D.O., 2010. Chemical bath deposition and characterization of Cu₂O–Cu_xS thin films. Turk J Phys 34, 51 – 57.
- Farhad, S.F.U., Hossain, M.A., Tanvir, N.I., Akter, R., Patwary, M.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.
- Figueiredo, V., Elangovan, E., Gonçalves, G., Barquinha, P., Pereira, L., Franco, N., Alves, E., Martins, R., Fortunato, E., 2008. Effect of post-annealing on the properties of copper oxide thin films obtained from the oxidation of evaporated metallic copper Applied Surface Science 254, 3949–3954.
- Gonçalves, C.B., Silva, R.T., Dalenogare, G., Gonzaga, I.M.D., Mascaro, L.H., Ferrer, M.M., Assis, M., Longo, E., Carvalho, H.B., Doriguetto, A.C., 2023. Comprehensive experimental and theoretical studies on the synthesis and characterization of electrodeposited nanostructured Cu₂O thin films. Surfaces and Interfaces 42, 103397.
- Gupta, D., Meher, S.R., Illyaskutty, N., Alex, Z.C., 2018. Facile synthesis of Cu₂O and CuO nanoparticles and study of their structural, optical and electronic properties. Journal of Alloys and Compounds 743, 737e745.
- Gümüş, C., 1998. ZnS:Mn İnce Film Elektrolüminans Çalışması. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora tezi, 145s.
- Güneri, E., 2019. The Role of Au Doping on the Structural and Optical Properties of Cu₂O Films. Journal of Nano Research 1661-9897, Vol. 58, pp 49-67.
- Halin, D.S.C., Talib, I.A., Hamid, M.A.A., Daud, A.R., 2008. Characterization of Cuprous Oxide Thin Films on N-Si Substrate Prepared By Sol-Gel Spin Coating. Solid State Science and Technology, Vol. 16, No 1, 232-237.

- Halin, D.S.C., Talib, I.A., Daud, A.R., Hamid, M.A.A., 2014. Characterizations of Cuprous Oxide Thin Films Prepared by Sol-Gel Spin Coating Technique with Different Additives for the Photoelectrochemical Solar Cell. *International Journal of Photoenergy* Volume 2014, Article ID 352156, 6 pages.
- Hssi, A.A., Atourki, L., Labchir, N., Abouabassi, K., Ouafi, M., Mouhib, H., Ihlal, A., Elfanaoui, A., Benmokhtar, S., Bouabid, K., 2020. Structural and optical properties of electrodeposited Cu₂O thin films. *Materials Today: Proceedings* 22, 89–92.
- Hsueh, H.T., Hsueh, T.J., Chang, S.J., Hung, F.Y., Tsai, T.Y., Weng, W.Y., Hsu, C.L., Dai, B.T., 2011. CuO Nanowire-Based Humidity Sensors Prepared on Glass Substrate. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 156: 906-911.
- Ismail, W., El-Shafai, N.M., El-Shaer, A., Abdelfatah, M., 2020. Impact of substrate type on the surface and properties of electrodeposited Cu₂O nanostructure films as an absorber layer for solar cell applications. *Materials Science in Semiconductor Processing* 120, 105335.
- Jawad, M.F., Ismail, R.A., Yahea, K.Z., 2011. Preparation of nanocrystalline Cu₂O thin film by pulsed laser deposition. *J Mater Sci: Mater Electron* 22:1244–1247.
- Jianga, X., Lina, Q., Zhang, M., Song, X., Sun, Z., 2015. Effect of temperature and additive on the structural, morphological and optical properties of Cu₂O thin films. *Optik* 126, 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. *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 6, 2011.
- Jundale, D., Pawar, S., Chougule, M., Godse, P., Patil, S., Raut, B., Sen, S., Patil, V., 2011. Nanocrystalline CuO Thin Films for H₂S Monitoring: Microstructural and Optoelectronic Characterization. *Journal of Sensor Technology*, 1, 36-46.
- Jung, H., Jeong, S., Park, Y., Shin, Y., Jeong, H., 2023. X-ray Diffraction Analysis of Damaged Layer During Polishing of Silicon Carbide. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 24:25–32.
- Jung, Y.S., Kim, K.H., 2015. Effects of post-annealing treatment on the properties of reactive sputtered cuprous-oxide thin films, *Journal of the Korean Physical Society*, 67, 1013-1017.
- Kahraman, S., 2010. ZnO Yarıiletken Yapıların Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 104s.
- Karakuş, E., Koç, M.M., 2023. Temel İnce Film Üretim Teknikleri Bir Bakış. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 213-236.

- 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.
- Kırmızıgül, F., 2008. CdO İnce Filmlerin Püskürtme Yöntemi ile Hazırlanması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 108s.
- Kırmızıgül, F., 2020. Kimyasal Depolama Yöntemi İle CuS İnce Filmlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 161s.
- Kim, T.G., Oh, H.B., Ryu, H., Lee, W.J., 2014. The Study of Post Annealing Effect on Cu₂O Thin-Films by Electrochemical Deposition for Photoelectrochemical Applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 612:74-79.
- Kittel, C., 1996. *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 434p.
- Kobayashi, H., Nakamura, T., Takahashi, N., 2007. Preparation of Cu₂O Films on MgO (110) Substrate by Means of Halide Chemical Vapor Deposition under Atmospheric Pressure. *Materials Chemistry and Physics*, 106:292– 295.
- Koç, H., 2010. Sb₂S₃ ve SbI₃ Kristallerin Enerji Band Yapısı ve Optik Özellikleri: Ab-İnitio (Temel Prensipte) Hesaplamaları. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 150s.
- Korzhavyi, P.A., Johansson, B., 2011. Literature review on the properties of cuprous oxide Cu₂O and the process of copper oxidation. Department of Materials Science and Engineering Royal Institute of Technology, 41p.
- Kumar, J.N., Thanikaikarasan, S., Marjorie, S.R., 2020. Electrochemical growth and characterization of Cu₂O thin films. *Materials Today: Proceedings* 33, 3402-3404.
- Kuo, C-L., Wang, R-C., Huang, J-L., Liu, C-P., Wang, C-K., Chang, S-P., Chu, W-H., Wang, C-H., Tu, C-H., 2009. The synthesis and electrical characterization of Cu₂O/Al:ZnO radial *p-n* junction nanowire arrays. *Nanotechnology* 20, 365603 (5pp).
- Lai, G., Wu, Y., Lin, L., Qu, Y., Lai, F., 2013. Low Resistivity of N-Doped Cu₂O Thin Films Deposited by RF-Magnetron Sputtering. *Applied Surface Science*, 285:7558-758.
- Laidoudi, S., Bioud, A.Y., Azizi, A., Schmerber, G., Bartringer, J., Barre, S., Dinia, A., 2013. Growth and characterization of electrodeposited Cu₂O thin films, *Semiconductor science and technology*, 28 (11), 115005.
- 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).

- Liang, R-M., Chang, Y-M., Wu, P-W., Lin, P., 2010. Effect of annealing on the electrodeposited Cu₂O films for photoelectrochemical hydrogen generation. *Thin Solid Films* 518, 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 Cu₂O films electrodeposited on different substrates. *Semiconductor Science and Technology*, 20, 44–49.
- Mahalingam, T., Chitra, C.S., Chu, J.P., Velumani, S., Sebastian, P.J., 2005. Structural and Annealing Studies of Potentiostatically Deposited Cu₂O Thin Films. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 88:209-216.
- Maruyama, T., 1998. Copper Oxide Thin Film Prepared by Chemical Vapor Deposition from Copper Dipivaloylmethanate. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 56:85-92.
- Matsunami, N., Fukuoka, O., Tazawa, M., Kakiuchida, H., Sataka, M., 2009. Electronic structure modifications of cuprous-oxide films by ions. *Surface & Coatings Technology* 203, 2642–2645.
- Mittiga, A., Salza, E., Sarto, F., Tucci, M., Vasanthi, R., 2006. Heterojunction solar cell with 2% efficiency based on a Cu₂O substrate. *Applied Physics Letters* 88, 163502.
- Moura, A.P., Cavalcante, L.S., Sczancoski, J.C., Stroppa, D.G., Paris, E.C., Ramirez, A.J., Varela, J.A., Longo, E., 2010. Structure and growth mechanism of CuO plates obtained by microwave-hydrothermal without surfactants. *Advanced Powder Technology* 21, 197–202.
- Neamen, D.A., 2011. *Semiconductor Physics and Devices Basic Principles*. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 758s.
- Nair, M.T., Guerrero, L., Arenas, O.L., Nair, P.K., 1999. Chemically Deposited Copper Oxide Thin Films: Structural, Optical and Electrical Characteristics. *Applied Surface Science*, 150:143-151.
- Nikam, S.S., Suryawanshi, M.P., Bhosale, S.M., Gaikwad, M.A., Shinde, P.A., Moholkar, A.V., 2016. Cu₂O thin films prepared using modified successive ionic layer adsorption and reaction method and their use in photoelectrochemical solar cells, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 1897-1900.
- Nishimura, K., Huaman, J.L.C., Hiroshi, M., Akiyama, T., Oku, T., Jeyadevan, B., 2014. Synthesis of crystalline Cu₂O nanoparticles using long chained alcohol. *Mater. Res. Express* 1, 015032.
- Okoye, P.C., Azi, S.O., Qahtan, T.F., Owolabi, T.O., Saleh, T.A., 2023. Synthesis, properties, and applications of doped and undoped CuO and Cu₂O nanomaterials. *Materials Today Chemistry* 30, 101513.

- Oral, A.Y., Menşur, E., Aslan, M.H., Başaran, E., 2004. The Preparation of Copper (II) Oxide Thin Films and the Study of Their Microstructures and Optical Properties. *Materials Chemistry and Physics*, 83:140–144.
- Özaslan, D., 2016, Tavlama Sıcaklığının Farklı Kalınlıklarda Hazırlanan Cu₂O İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerine Etkisi. Ç.Ü, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 207s.
- Özaslan, D., Güneş, M., Gümüş, C., 2016. Physical properties of Cu₂O thin films prepared by silar method. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 23(7), 854-857, 2017.
- Özaslan, D., Özkendir, O.M., Güneş, M., Ufuktepe, Y., Gümüş, C., 2018. Study of the electronic properties of Cu₂O thin films by X-ray absorption spectroscopy. *Optik* 157, 1325–1330.
- Özaslan, D., Erken, Ö., Güneş, M., Gümüş, C., 2020. The effect of annealing temperature on the physical properties of Cu₂O thin film deposited by SILAR method. *Physica B: Physics of Condensed Matter* 580 (2020) 411922.
- Özcandan, E., 2018. Bis (2-Chloro 4,6 diaminopyrimidine) Copper (II) dichloride [(C₄H₅N₄Cl)₂.CuCl₂] Tek Kristalin Sentezlenmesi, Kristal Yapı Analizi, FT-IR Spektrumunun Deneysel ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 79s.
- 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, 103503.
- Park, H.J., Choi, N.J., Kang, H., Jung, M.Y., Park, J.W., Park, K.H., Lee, D.S., 2014. A ppb-level formaldehyde gas sensor based on CuO nanocubes prepared using a polyol process. *Sensors and Actuators B* 203, 282–288.
- Pankove, J.I., 1971. *Optical Processes In Semiconductors*. Prentice- Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 429p.
- Papadimitropoulos, G., Vourdas, N., Vamvakas, V.E., Davazoglou, D., 2006. Optical and Structural Properties of Copper Oxide Thin Films Grown by Oxidation of Metal Layers. *Thin Solid Films*, 515:2428-2432.
- Pathan, H.M., Lokhande, C.D., 2004. Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 27, No. 2, pp. 85–111.
- Poulopoulos, P., Baskoutas, S., Pappas, S.D., Garoufalis, C.S., Droulias, S.A., Zamani, A., Kapaklis, V., 2011. Intense Quantum Confinement Effects in Cu₂O Thin Films. *J. Phys. Chem. C* 2011, 115, 14839–14843.
- Rahal, H., Kihal, R., Affoune, A.M., Rahal, S., 2018. Electrodeposition and characterization of Cu₂O thin films using sodium thiosulfate as an additive for photovoltaic solar cells, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26, 421-427.

- Rafea, M.A., Roushdy, N., 2009. Determination of the optical band gap for amorphous and nanocrystalline copper oxide thin films prepared by SILAR technique. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42, 015413 (6pp).
- Rastkar, A.R., Niknam, A.R., Shokri, B., 2009. Characterization of Copper Oxide Nanolayers Deposited by Direct Current Magnetron Sputtering. *Thin Solid Films*, 517:5464-5467.
- Ravichandran, A.T., Dhanabalan, K., Valanarasu, S., Vasuhi, A., Kathalingam, A., 2015. Role of Immersion Time on the Properties of SILAR Deposited CuO Thin Films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26:921-926.
- Ray, S.C., 2001. Preparation of Copper Oxide Thin Film by The Sol-Gel-Like Dip Technique and Study of Their Structural and Optical Properties. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 68:307-312.
- Ristov, M., Sinadinovski, G.J., Grozdanov, I., 1985. Chemical Deposition of Cu₂O Thin Films. *Thin Solid Films*, 123, 63-67.
- Sanal, K.C., Vikas, L.S., Jayaraj, M.K., 2014. Room Temperature Deposited Transparent *p*-Channel CuO Thin Film Transistors. *Applied Surface Science*, 297:153-157.
- Selek, H.S., 2023. Meslek Yüksekokulları ve Fakülteler İçin Elektronik – 1 (Analog Elektronik) . Seçkin Yayıncılık, İstanbul, 383s.
- Serin, N., Serin, T., Horzum, Ş., Çelik, Y., 2005. Annealing effects on the properties of copper oxide thin films prepared by chemical deposition. *Semiconductor Science and Technology*, 20, 398–401.
- Serin, T., Gürakar, S., Serin, N., Yıldırım, N., Özyurt Kuş, F., 2009. Current flow mechanism in Cu₂O/*p*-Si heterojunction prepared by chemical method. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42, 225108 (5pp)
- Serin, N., Yıldız, 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*, 52:759-764.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M., Akın, S., 2012. İnce Film Üretim Teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5):389-401.
- Subaşı, E., 2020. Cu₂O [Bakır (I) Oksit] İnce Filmlerin Elektrokimyasal Teknikle Üretilmesi ve Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 71s.
- Sun, G., 2022. Cu₂O İnce filmlerin optik, yapısal, morfolojik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 125s.
- Syrek, K., Jazdzewska, M., Kozieł, M., Zaraska, L., 2022. Photoelectrochemical activity of Cu₂O electrochemically deposited at different temperatures. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 115, 561–569.

- Taşköprü, T., 2010. SILAR Yöntemiyle In_2S_3 Yarıiletken Filminin Elde Edilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 77s.
- 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. IEEE:379-381.
- Ulutaş, C., 2009. Kimyasal Depolama Yöntemiyle Elde Edilmiş MnS İnce Filmlerin Özelliklerine Isısal Tavlamanın Etkisi. Ç.Ü. Doktora Tezi, Adana, 140s.
- Umeri, D. and Emumejaye, R.K., 2015. Comparative Studies on the Morphological and Structural Properties of Silar Deposited Copper Oxide Thin Film on Glass and Stainless Steel Substrates. Global Journal of Advance Engineering Technology and Sciences, 2:33-40.
- Usta, M., 2010. WO_3 İnce Filmlerinin Üretilmesi, Yapısal ve Elektriksel Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 100s.
- Wang, L., Liu, G., Xue, D., 2011. Effects of Supporting Electrolyte on Galvanic Deposition of Cu_2O Crystals. Electrochimica Acta, 56:6277- 6283. Materials Research Bulletin 111, 277-283.
- Wang, Q., Sun, C., Liu, Z., Tan, X., Zheng, S., Zhang, H., Wang, Y., Gao, S., 2019. Ultrasound-assisted successive ionic layer adsorption and reaction synthesis of Cu_2O cubes sensitized TiO_2 nanotube arrays for the enhanced photoelectrochemical performance.
- Wijesundera, R.P., 2010. Fabrication of the $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$ Heterojunction Using an Electrodeposition Technique for Solar Cell Applications. Semiconductor Science And Technology, 25:045015-045020.
- 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, 518:6738-6745.
- 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.
- 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, 143:713-719.
- 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 & Coatings Technology, 216:166-171.
- Vallejo, O.R., Albores, R.S., Madrigal, A.F., Arellano, S.T., Sebastian, P.J., 2022. Evaluation of hydrogen evolution reaction on chemical bath deposited Cu_2O thin films: Effect of copper source and triethanolamine content. International journal of hydrogen energy 47, 22775-22786.

- Yeşilçubuk, S.A., 2002. Reaktif DC Magnetron Sıçratma Tekniği ile n-Tipi Silisyum Altlık Üzerine Bakır Oksit İnce Film Biriktirme. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 239s.
- Yu, Z.Q., Wang, C.M., Engelhard, M.H., Nachimuthu, P., McCready, D.E., Lyubinsky, I.V., Thevuthasan, S., 2007, Epitaxial growth and microstructure of Cu₂O nanoparticle/thin films on SrTiO₃ (100), Nanotechnology, 18 (11), 115601.
- Zainun, A.R., Tomoya, S., Noor, U.M., Rusop, M., Masaya, I., 2012. New approach for generating Cu₂O/TiO₂ composite films for solar cell applications. Materials Letters 66, 254–256.
- Zhai, W., Sun, F., Chen, W., Zhang, L., Min, Z., Li, W., 2013. Applications of Cu₂O octahedral particles on ITO glass in photocatalytic degradation of dye pollutants under a halogen tungsten lamp. Materials Research Bulletin 48, 4953-4959.
- Zhang, L., Mcmillon, L., McNatt, J., 2013. Gas-Dependent Bandgap and Electrical Conductivity of Cu₂O Thin Films. Solar Energy Materials & Solar Cells, 108:230-234.
- Zhu, H., Zhang, J., Li, C., Pan, F., Wang, T., Huang, B., 2009. Cu₂O Thin Films Deposited by Reactive Direct Current Magnetron Sputtering. Thin Solid Films, 517:5700-5704.
- https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/196927/mod_resource/content/3/Bolum_5.pdf
- <https://muhendistan.com/elektromanyetik-radyasyon-nedir/>
- <https://www.britannica.com/science/Bragg-law>
- https://acikders.tuba.gov.tr/pluginfile.php/1074/mod_resource/content/2/Bolum-13.pdf

ÖZGEÇMİŞ

Onur YILMAZ, İlkokul, Ortaokul ve Lise eğitimini Hatay'ın Antakya ilçesinde tamamladı. 1999 yılında Kayseri Erciyes Üniversitesi, Fen Fakültesi Fizik Bölümünü kazandım ve bu bölümden 2003 yılında mezun oldu. 2007-2014 yılları arasında Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimimi tamamladı. 2020 yılında Adana Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora eğitime başladı. 2009 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi ünvanıyla göreve başladı ve halen Mustafa Kemal Üniversitesi Antakya Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.



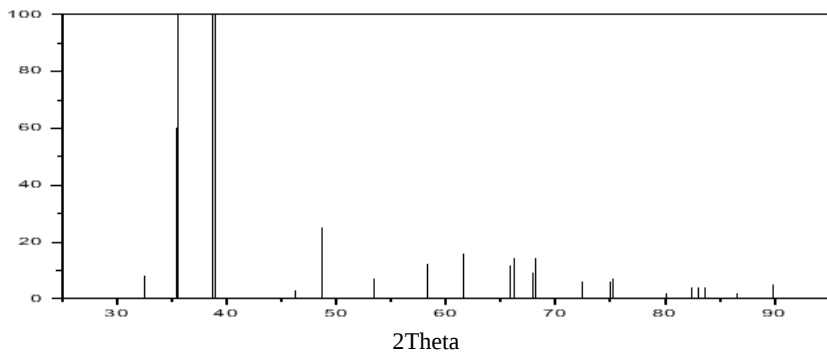


EKLER

1.1.Ek 1: Cu₂O 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 ₂ O											
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 ₂ O 1.Formula from original source: Cu ₂ O . 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.													
Relative Intensity 2Theta													
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													

1.2. Ek 2: CuO standart PDF kartı

PDF Card No.: 01-041-0254 Quality:S													
Sub-File Name: Inorganic, Mineral, Alloy&Metal, Battery Material, Common Phase, Educational Pattern, Forensic, ...													
Formula:		CuO											
Name:		Tenorite, syn								I/Ic (RIR) = 2.80			
Crystal System:		Monoclinic			Space Group:C2/c(15)				Dmeas: 6.450				
Cell Parameters:		a = 4.6850			b = 3.4230				c = 5.1320				
		Alpha = 90.000			Beta = 99.520				Gamma = 90.000				
		Volume = 81.167			Z = 4								
Reference:		Geyer, A., Eysel, W., Mineral. Petrograph, Inst., Univ. Heidelberg, Germany. ICDD Grant-in-Aid(1...											
Radiation:		CuKalpha1			Wavelength = 1.54056								
2Theta range:		32.51 – 89.82											
Database comments: Additional Patterns: See PDF 00-045-0937. Color: Black. Sample Source or Locality: Sample from Merck, purity > 99.0%													
													
No.	2Theta	d-Value	Intensity	h	k	l	No.	2Theta	d-Value	Intensity	h	k	l
1	32.51	2.752	8.0	1	1	0	21	83.69	1.155	4.0	4	0	0
2	35.44	2.531	60.0	0	0	2	22	86.57	1.123	2.0	-4	0	2
3	35.54	2.524	100.0	-1	1	1	23	89.82	1.091	5.0	-1	3	1
4	38.73	2.323	100.0	1	1	1							
5	38.94	2.311	100.0	2	0	0							
6	46.26	1.961	3.0	-1	1	2							
7	48.74	1.867	25.0	-2	0	2							
8	53.47	1.712	7.0	0	2	0							
9	58.31	1.581	12.0	2	0	2							
10	61.55	1.505	16.0	-1	1	3							
11	65.82	1.418	12.0	0	2	2							
12	66.28	1.409	14.0	-3	1	1							
13	67.93	1.379	9.0	1	1	3							
14	68.15	1.375	14.0	2	2	0							
15	72.44	1.304	6.0	3	1	1							
16	74.99	1.265	6.0	0	0	4							
17	75.26	1.262	7.0	-2	2	2							
18	80.19	1.196	2.0	-2	0	4							
19	82.38	1.17	4.0	-3	1	3							
20	83.1	1.161	4.0	2	2	2							
Note: 2theta are calculated with wavelength = 1.54059													

1.3.Ek 3: ITO standart PDF kartı

Name and formula

Reference code:	01-088-0773
ICSD name:	Indium Tin Oxide
Empirical formula:	$\text{In}_4\text{O}_{12}\text{Sn}_3$
Chemical formula:	$\text{In}_4\text{Sn}_3\text{O}_{12}$

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3
Space group number:	148
a (Å):	9.4604
b (Å):	9.4604
c (Å):	8.8584
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	120.0000
Calculated density (g/cm ³):	7.31
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	686.60
Z:	3.00
RIR:	10.00

Subfiles and Quality

Subfiles:	Inorganic Corrosion ICSD Pattern
Quality:	Calculated (C)

Comments

ICSD collection code:	085084
-----------------------	--------

References

Primary reference:	<i>Calculated from ICSD using POWD-12++</i>
Structure:	Nadaud, N., Nanot, M., Jove, J., Roisnel, T., <i>Key Eng. Mater.</i> , 132 , 1373, (1997)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	1	6.01480	14.716	0.1
2	1	1	0	4.73020	18.744	3.2
3	0	1	2	3.89628	22.805	3.0
4	0	2	1	3.71816	23.913	2.6
5	0	0	3	2.95280	30.244	33.5
6	1	2	-1	2.92318	30.557	100.0
7	3	0	0	2.73098	32.766	1.5
8	2	1	-2	2.53789	35.338	38.6
9	1	1	-3	2.50482	35.821	3.4
10	2	2	0	2.36510	38.015	0.7
11	3	1	-1	2.20105	40.971	1.5
12	1	0	4	2.13787	42.239	1.7
13	1	3	-2	2.02177	44.792	1.7
14	3	0	3	2.00493	45.189	3.0
15	4	0	1	1.99559	45.412	2.1
16	0	2	4	1.94814	46.582	1.7
17	0	4	2	1.85908	48.956	0.2
18	2	2	-3	1.84596	49.327	0.3
19	2	3	-1	1.83866	49.536	1.0
20	1	2	-4	1.80135	50.634	23.6
21	1	4	0	1.78785	51.043	23.9
22	3	2	-2	1.73024	52.872	4.0
23	2	0	5	1.62612	56.550	0.2
24	0	5	1	1.61126	57.119	0.3
25	3	1	-4	1.58597	58.116	1.4
26	3	3	0	1.57673	58.490	0.7
27	2	1	-5	1.53778	60.121	10.0
28	1	4	-3	1.52936	60.487	18.2
29	4	2	-1	1.52520	60.669	18.4
30	4	0	4	1.50370	61.630	2.0
31	0	0	6	1.47640	62.898	1.9
32	2	4	-2	1.46159	63.610	6.6
33	1	5	-1	1.45161	64.099	1.7
34	2	3	-4	1.43303	65.032	0.3
35	1	1	-6	1.40935	66.263	0.8
36	1	3	-5	1.39645	66.955	1.5
37	3	3	3	1.39086	67.260	0.7
38	6	0	0	1.36549	68.682	0.1
39	0	4	5	1.33996	70.181	0.2
40	4	3	1	1.33161	70.686	0.1
41	0	5	4	1.31723	71.576	0.7
42	2	5	0	1.31192	71.911	0.5
43	3	0	6	1.29876	72.755	0.6
44	3	2	-5	1.28923	73.380	1.9
45	4	2	-4	1.26895	74.751	4.5
46	2	2	-6	1.25241	75.912	0.1
47	1	0	7	1.25065	76.038	0.1
48	0	6	3	1.23939	76.854	0.6
49	1	6	1	1.23717	77.017	0.6
50	1	5	-4	1.22561	77.880	0.8
51	0	2	7	1.20911	79.149	0.5
52	6	1	2	1.20249	79.671	0.5
53	2	5	-3	1.19891	79.957	1.3
54	4	4	0	1.18255	81.293	0.6
55	1	2	-7	1.17144	82.229	2.4
56	2	4	-5	1.16585	82.710	2.8
57	7	0	1	1.16034	83.189	4.8
58	3	4	-4	1.15079	84.036	0.2
59	1	4	-6	1.13841	85.164	3.8
60	0	7	2	1.13158	85.801	3.5
61	3	1	-7	1.10559	88.331	0.6
62	2	6	2	1.10053	88.844	0.1
63	4	4	3	1.09779	89.124	1.3

Stick Pattern

