

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gölnur SUN

**Cu₂O İNCE FİMLERİNİN OPTİK, YAPISAL, MORFOLOJİK
VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA-2022

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cu₂O İNCE FİLMLERİNİN OPTİK, YAPISAL, MORFOLOJİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gölnur SUN

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Cebrail GÜMÜŞ
Yıl: 2022, Sayfa: 125
Jüri : Prof. Dr. Cebrail GÜMÜŞ
: Prof. Dr. Ramazan BİLGİN
: Prof. Dr. Mustafa GÜNEŞ

Bu tez çalışmasında, bakır (I) oksit (Cu₂O) ince filmleri, SILAR yöntemi ile 10-, 20-, 30- ve 40-daldırma çevrimlerinde 50 ° C sıcaklığında cam alt taşlar üzerinde sentezlendi. İnce filmlerin kalınlığa bağlı yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel özellikleri incelendi ve detaylı bir şekilde yorumlandı. XRD sonuçlarından, Cu₂O ince filmlerin polikristal yapıda, kübik fazda ve kristale ait tercihli yönelimin (111) Miller düzlemi boyunca olduğu görüldü. Cu₂O ince filmlerin daldırma çevrim sayısı arttıkça kalınlık değerlerinin de arttığı buna bağlı olarak oda sıcaklığında bulunan optik geçirgenlik değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Cu₂O ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri sırasıyla 2.47 eV, 2.44 eV, 2.41 eV ve 2.38 eV olarak hesaplanmıştır. Bakır oksit ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri ince filmlerin kalınlık değerlerinin artışı ile azaldığı görülmüştür. FE-SEM görüntülerinden Cu₂O ince filmlerin karnabahar-benzeri bir yapıda oluştukları görüldü.

Anahtar Kelimeler: SILAR, Cu₂O, XRD, Fiziksel Özellikler, FE-SEM

ABSTRACT

MSc THESIS

INVESTIGATION OF OPTICAL, STRUCTURAL, MORPHOLOGICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF Cu₂O THIN FILMS

Gölnur SUN

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Prof. Dr. Cebrail GM
Year: 2022, Pages: 125
Jury : Prof. Dr. Cebrail GM
: Prof. Dr. Ramazan BLGN
: Prof. Dr. Mustafa GNE

In this thesis, copper (I) oxide (Cu₂O) thin films were synthesized by SILAR method on glass substrates at 50 ° C in 10-, 20-, 30- and 40-immersion cycles. Structural, optical, morphological and electrical properties of thin films were examined interpreted in detail. From the XRD results, it was seen that the Cu₂O thin films were in polycrystalline structure, cubic phase and the preferential orientation of the crystal (111) along the Miller plane. It has been determined that the thickness values of Cu₂O thin films increase as the number of immersion cycles increases, and accordingly, the optical transmittance values at room temperature decrease. It has been determined that the thickness values of Cu₂O thin films increase as the number of immersion cycles increases, and accordingly, the optical transmittance values at room temperature decrease. The energy band gap values of Cu₂O thin films were calculated as 2.47 eV, 2.44 eV, 2.41 eV, and 2.38 eV, respectively. It has been observed that the energy band gap values of the copper oxide thin films decrease with the increase of the thickness values of the thin films. It was seen from the FE-SEM images that the Cu₂O thin films were formed in a cauliflower-like structure.

Key Words: SILAR, Cu₂O, XRD, Fiziksel zellikler, FE-SEM

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Bu tez çalışmasında, Cu_2O filmleri $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak SILAR (Ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu) yöntemi ile 50°C gibi düşük bir sıcaklıkta cam alt taşlar üzerinde 10-, 20-, 30- ve 40-daldırma çevrimleri ile hazırlandı. Cu_2O ince filmlerin yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel özellikleri sistematik bir şekilde araştırıldı. Bakır (I) oksit filmlerin X-ışını analizleri Rigaku SmartLab aleti ($\text{CuK}_{\alpha 1}$, $\lambda=1.54 \text{ \AA}$, 30–50 kV, 5–60 mA, tarama hızı 2 derece/dakika) ile yapıldı. X-ışınları yüksek enerjili ve düşük dalga boylu ışınımlardır. Karakteristik ve sürekli ışınlar yayarlar. Hızlandırılmış elektronlar hedef malzemenin atomlarına çarpması ile oluşurlar. X-ışınları kırınım açısı (2θ) değerlerini, düzlemler arası (d) uzaklıkları, tanecik boyutu ve yönelimini, yarıiletkenin kristal kafes parametrelerini (a , b , c) ve yansıma düzlemleri (hkl) bulmamıza olanak sağlar. X-ışını kırınımı çalışmaları hazırladığımız Cu_2O ince filmlerin hangi yapıda kristalleştiğini ve simetrisini göstermesi açısından önemlidir. X-ışını için üç önemli parametre vardır. Bunlar ışınım, dedektör ve ölçülecek malzemedir. X-ışını kırınımı (XRD) analizleri sonucu Cu_2O ince filmleri kübik fazda ve polikristal yapıda bulundular. Cu_2O ince film kalınlığının artmasıyla kristalleşmenin arttığı görülmüştür.

Filmlerin optik özellikleri laboratuvarımızda bulunan spektrofotometre yardımı ile yapıldı. Spektrofotometrenin ölçüm dalga boyu 190–1100 nm arasında olup monokromatik ışığa sahiptir. Ultraviolet-visible (UV-vis) spektrofotometresi verilerden; Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik değerleri ($T\%$) farklı daldırma çevrimleri (10, 20, 30 ve 40) için bulundu. 10-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için değerleri 400 nm de %5.26, 550 nm %50.55, 700 nm deki değeri ise %66.20 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %70.39–%78.93 aralığında bulunmuştur. 20-daldırma çevriminde hazırlanan bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için değerleri 400 nm de %1.84, 550 nm %33.67, 700 nm deki değeri ise %55.20 bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %63.04–%73.81 aralığında bulunmuştur. 30-daldırma çevriminde Cu_2O ince filmin 400 nm deki optik geçirgenlik değeri %0.14'ten başlayarak dalga boyunun artışı ile 550 nm de %11.64, 700 nm deki değeri %30.25

olarak bulunmuştur. Aynı film için yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %37.59–%48.82 aralığında bulunmuştur. 40-daldırma çevriminde hazırlanan Cu₂O ince filmin görünür bölge (400–700 nm) için değerleri 400 nm de %0.87, 550 nm %11.42, 700 nm deki değeri ise %20.21 bulunmuştur. İnce filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik değeri ise %25.10–%31.94 aralığında bulunmuştur. Spektrofotometrenin dalga boyu 190–1100 nm arasında olup monokromatik ışığa sahiptir. Ultraviolet-visible (UV-vis) spektrofotometresi verilerden; Cu₂O ince filmlerin optik soğurma değerleri (A) farklı daldırma çevrimleri (10, 20, 30 ve 40) için bulundu. 10 daldırma çevriminde ince filmin 400 nm deki soğurma değeri 1.18, 550 nm deki değeri 0.28 ve 700 nm deki değeri 0.17 olarak bulunmuştur. 20 daldırma çevriminde bakır oksit ince filmin 400 nm deki soğurma değeri 1.70, 550 nm deki değeri 0.48 ve 700 nm deki değeri 0.25 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.18–0.12 aralığında bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.13–0.10 aralığında bulunmuştur. 30 daldırma çevriminde ince filmin 400 nm deki soğurma değeri 2.50, 550 nm deki değeri 0.97 ve 700 nm deki değeri 0.53 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.42–0.31 aralığında bulunmuştur. 40 daldırma çevriminde ince filmin 400 nm deki soğurma değeri 2.36, 550 nm deki değeri 1.07 ve 700 nm deki değeri 0.66 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.59–0.45 aralığında bulunmuştur. Şekillerden görüleceği gibi görünür bölge başlangıcında optik soğurma değerleri büyük ve dalga-boyunun artışı ile soğurma değerleri bir miktar azalış göstermiştir. 10-daldırma çevriminde depolanan Cu₂O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için yansıma değerleri 400 nm de %55.46, 550 nm %19.23, 700 nm deki değeri ise %11.37 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %9.45–%6.96 aralığında bulunmuştur. 20-daldırma çevriminde depolanan Cu₂O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için yansıma değerleri 400 nm de %67.22, 550 nm %26.07, 700 nm deki değeri ise %16.54 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %12.14–%8.17 aralığında bulunmuştur. 30-daldırma çevriminde depolanan bakır oksit ince filminin görünür bölgedeki yansıma değerleri 400 nm de %82.80, 550

nm %44.27, 700 nm deki değeri ise %29.03 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %24.20–%18.28 aralığında bulunmuştur. 40-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için yansımaya değerleri 400 nm de %75.15, 550 nm %45.15, 700 nm deki değeri ise %37.73 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %34.21–%28.89 aralığında bulunmuştur. Dalga boyunun artışı ile yansımaya değerlerinin azaldığı görülmektedir. %R değerleri, filmin kırılma indisine doğrudan bağlı olup kırılma indisi artığında bakır oksit ince filmin %R değerleri dalga boyuna bağlı olarak artış gösterir. 10-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin Cu_2O ince filmlerinin enerji bant aralığı (E_g) değerleri 10-, 20-, 30-, ve 40-daldırma çevrimlerinde sentezlenen Cu_2O ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri sırasıyla 2.47 eV, 2.44 eV, 2.41 eV ve 2.38 eV olarak hesaplanmıştır. Bakır oksit ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri ince filmlerin kalınlık değerlerinin artışı ile azaldığı görülmüştür. 10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için kırılma indisi değerleri 400 nm de 6.94, 550 nm 2.51, 700 nm deki değeri ise 1.98 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise 1.86–1.63 aralığında bulunmuştur. 20-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filminin görünür bölgedeki kırılma indisi değerleri 400 nm de 10.10, 550 nm 3.01, 700 nm deki değeri ise 2.72 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki kırılma indisi değerleri ise 800 nm de 2.27, 1100 nm deki değeri ise 1.84 olarak bulunmuştur. 30-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filminin görünür bölgedeki kırılma indisi değerleri 400 nm de 17.01, 550 nm 4.92, 700 nm deki değeri ise 3.14 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki kırılma indisi değerleri ise 800 nm de 2.97, 1100 nm deki değeri ise 2.30 olarak bulunmuştur. 40-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filminin görünür bölgedeki kırılma indisi değerleri 400 nm de 14.16, 550 nm 5.11, 700 nm deki değeri ise 3.88 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki kırılma indisi değerleri ise 800 nm de 3.70, 1100 nm deki değeri ise 3.27 olarak bulunmuştur. Şekillerden görüleceği gibi dalga-boyunun artışı ile Cu_2O ince filmin kırılma indisi değerlerinin azaldığı görülmektedir. 10-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değerleri 400 nm de 0.69, 550 nm 0.25, 700 nm deki değeri ise 0.19 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın

kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değeri ise 0.17–0.16 aralığında bulunmuştur. 20-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değerleri 400 nm de 0.42, 550 nm 0.16, 700 nm deki değeri ise 0.10 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değeri ise 0.09–0.08 aralığında bulunmuştur. 30-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değerleri 400 nm de 0.41, 550 nm 0.20, 700 nm deki değeri ise 0.14 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değeri ise 0.13–0.13 aralığında bulunmuştur. 40-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değerleri 400 nm de 0.27, 550 nm 0.16, 700 nm deki değeri ise 0.14 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değeri ise 0.15–0.16 aralığında bulunmuştur.

SILAR metodu ile 50 °C'de hazırlanan bakır (I) oksit filmlerin FE-SEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri Zeiss, Supra 55 ile yapıldı. Bir yarıiletken filmin morfolojik özellikleri filmin düzgün olup olmadığı, filmin alt taşa yapışması, filmin taneciklerinin dağılımı ve boyutları hakkında bize bilgiler verebilir. Farklı daldırma çevrimlerinde (10, 20, 30 ve 40) hazırlanan Cu₂O ince filmlerin FE-SEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntülerinden 10 daldırma çevriminde hazırlanan film haricindeki filmlerin küresel yapıda düzgün bir dağılım gösterdiği görülmüştür. 10 daldırma çevriminde hazırlanan filmin de küresel simetriye sahip olup tanecikler arasında boşlukların olduğu görülmüştür.

SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır (I) oksit (Cu₂O) ince filmlerin bulunan bu fiziksel özellikleri (yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel) nedeniyle bu yarıiletken polikristal ince filmlerin, ince film güneş hücrelerinin üretimi için uygun bir aday olduğu kanısındayız.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamı hazırlamamda danışmanlığımı üstlenerek bana inanan ve yol gösteren, sıcaklığını, hoşgörüsünü, desteğini, ilgisini, bilgisini ve tecrübelerini benimle paylaşan çalışmamın sonuçlanmasında her türlü katkı sağlayan çok değerli ve kıymetli hocam Prof. Dr. Cebail GÜMÜŞ'e en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Aynı zamanda benden desteğini esirgemeyen her zaman yanımda olan bana sonuna kadar inanan ikinci ailem Tülin ATICI ve çok değerli eşi benim abim Bahri ATICI'ya çok teşekkür ederim.

Dostluğu ve kardeşliğiyle her zaman yanımda olan Gamze BOZLU'ya ve kapılarını her daim bana açan çok değer verdiğim ailesine teşekkürlerimi borç bilirim.

Her koşulda her zaman en büyük destekçim olan AİLEM; başta arkamda sonsuz güvenle duran, bana her koşulda inanan annem Ferah SUN'a ve babam Edip SUN'a, ablalarım Nazife TURGUT, Hatice SUN, Yasemin CANSEVEN ve kardeşlerim Sevnur KAYA, Muhammed SUN, Veysel SUN ve Kübra SUN'a ve biricik yeğenlerime; başta dünya çiçeğim İncisu KAYA, Elif TURGUT, Yusuf Samet TURGUT, Aziz Kaan KAYA, Gül KAYA, Semih Elyesa TURGUT, Azra KAYA, Kumsal Ela CANSEVEN ve Lara KAYA'ya en derin duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XVIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Katı Cisimlerin Sınıflandırılması.....	5
1.2. Yalıtkan, İletken ve Yarıiletkenlerin Enerji Bandları	7
1.2.1. Yalıtkanlar	9
1.2.2. İletkenler	10
1.2.3. Yarıiletken Tipleri.....	11
1.2.4. Yarıiletkenler	13
1.2.4.1. Saf Yarıiletkenler	16
1.2.4.2. Katkılı Yarıiletkenler	18
1.2.5. Doğrudan ve Dolaylı Bant Aralığı	21
1.3. Hall Etkisi	22
1.4. Mobilite.....	24
1.5. İletkenlik, Özdirenç, Hareketlilik	26
1.6. Kristal Yapısı ve Birim Hücreler	27
1.7. Kristal Kafes Yapıları	30
1.7.1. Kübik Kristal Sistemi.....	31
1.7.1.1. Basit Kübik (BK) Kafes ve Atomlarının Sayısı.....	31
1.8. Kristal Doğrultuları ve Düzlemleri	33
1.8.1. Kristal Doğrultuları	33
1.8.2. Kristal Düzlemleri.....	36
1.9. X Işınları	38

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	45
3. MATERYAL VE METOT	55
3.1. Alt Taşların Hazırlanması.....	55
3.2. Çözeltilerin Hazırlanması	55
3.3. Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyon Yöntemi (SILAR)	56
3.3.1. SILAR Uygulaması.....	56
3.3.2. Hazırlık parametrelerinin etkisi.....	58
3.3.3. SILAR yönteminin avantaj ve dezavantajları	60
3.4. SILAR Metodu İle Cu ₂ O İnce Filmlerin Elde Edilmesi	61
3.5. SILAR Sürecinde Gerçekleşen Kimyasal Reaksiyonlar	62
3.6. Kullanılan Yöntem ve Teknikler	62
3.6.1. X-ışını Kırınımı (XRD)	63
3.6.2. Alan Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM).....	64
3.7. Optik Özelliklerin Belirlenmesi.....	65
3.8. Optik Özelliklerin Analizi	68
3.8.1. Optik Sabitlerin Hesaplanması	68
3.9. Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi.....	70
3.10. Elektriksel Özelliklerin Belirlenmesi.....	71
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	73
4.1. Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin Araştırılması	73
4.2. Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin Araştırılması	84
4.3. Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Morfolojik Özelliklerinin Araştırılması....	105
4.4. Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması	108
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
5.1. Sonuçlar	111
5.2. Öneriler	117
KAYNAKLAR	119
ÖZGEÇMİŞ	125

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 1.1. Yedi Farklı kristal sistemine ait kafes parametreleri ve aralarındaki ilişkiler	30
Çizelge 1.2. Düzlemler arasındaki uzaklık ve birim hücrelerin hacimleri.....	42
Çizelge 4.1. 10-daldırma çeviriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu ₂ O ince filmlerin XRD özellikleri	82
Çizelge 4.2. 20-daldırma çeviriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu ₂ O ince filmlerin XRD özellikleri	83
Çizelge 4.3. 30-daldırma çeviriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu ₂ O ince filmlerin XRD özellikleri	84
Çizelge 4.4. 40-daldırma çeviriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu ₂ O ince filmlerin XRD özellikleri	85
Çizelge 4.5. Bakır (I) oksit ince filmin elektriksel özellikleri.....	109



ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 1.1.	(a) Metalin (Fe) ve (b) yarıiletkenin (Si) öz direncinin sıcaklıkla değişimi	6
Şekil 1.2.	Katılarda enerji bantlarının gösterimi.....	8
Şekil 1.3.	Yalıtkan bir malzemenin enerji-bant diyagramı.....	9
Şekil 1.4.	İletken bir malzemenin enerji-bant diyagramı	11
Şekil 1.5.	N ve P tipi yarıiletkenlerin enerji seviyesi diyagramları	12
Şekil 1.6.	(a) Saf yarıiletkenin enerji bantlarının ve (b) enerji bant diyagramının şematik gösterimi	15
Şekil 1.7.	Elmas tipli kristal örgü	17
Şekil 1.8.	Silisyum örgüsünde atomlar arası bağların gösterimi: (a) $T = 0$, b) $T > 0$	18
Şekil 1.9.	Silisyumdaki (a) donör ve (b) akseptör tipli katkı atomunun şematik görünümü	19
Şekil 1.10.	(a) Donör ve (b) akseptör tipli yarıiletkenlerin bant diyagramları.....	19
Şekil 1.11.	(a) doğrudan ve (b) dolaylı bant aralığına sahip yarıiletkenler için bantlar arası optik geçişler.....	22
Şekil 1.12.	Akım taşıyan iletkeni etkileyen manyetik alan ve yüklerin durumu	23
Şekil 1.13.	Elektrik alanın etkisi altında elektronların ve boşlukların hareket yönleri.....	25
Şekil 1.14.	Metal kristal kafesi, birim hücre ve kafes noktası.....	27
Şekil 1.15.	x, y, z koordinat eksenlerine sahip bir birim hücrenin, kafes parametrelerinin (kenar uzunlukları ve eksenler arası açılar) gösterilmesi	28
Şekil 1.16	Yedi Kristal sistemine ait toplam 14 farklı kristal kafes geometrisi	31

Şekil 1.17. Basit kübik kafes yapısının birim hücresinde atomların yerleştiği yerler, atom sayısı ve kafes sabiti ile atom yarıçapı arasındaki ilişkinin gösterilmesi	32
Şekil 1.18. Koordinat sistemi üzerine yerleştirilmiş bir kristal kafes birim hücresi ve örnek bir kristal doğrultusu	33
Şekil 1.19. Eksi bölgede birleşen veren kristal doğrultusu	34
Şekil 1.20. Kübik kafesin kafes noktalarının koordinatları ve $[1\ 1\ 1]$ ve $[1\ 2\ 2]$ kristal doğrultuları.....	34
Şekil 1.21. (a) Hegzagonal kristal kafesi için kullanılan eksen takımları. (b) Hegzagonal kafese ait çeşitli kristal doğrultu örnekleri	35
Şekil 1.22. Hacim merkezli kübik kafeste $(1\ 1\ 0)$ kristal düzlemi ve bu düzlem içerisinde bulunan atomlar.....	36
Şekil 1.23. Kübik bir kafeste 100 kristal düzlemi ailesi	37
Şekil 1.24. X-ışınları elektromanyetik spektrumda gama ışınları ile ultraviyole(mor ötesi) ışınlar arasında kalır	39
Şekil 1.25. X-ışını oluşumunun şematik gösterimi.....	39
Şekil 1.26. X-ışını tüpünün şematik gösterimi	40
Şekil 1.27. Atom düzlemlerinde X-ışını yansıması	43
Şekil 1.28. X ışını difraktometrenin şematik gösterimi.....	44
Şekil 3.1. SILAR metodunun şematik gösterimi	57
Şekil 3.2. SILAR metoduyla Cu_2O ince film elde etmek için kullanılan deneysel düzeneğin şematik gösterimi.	61
Şekil 3.3. PANalytical EMPYREAN X-ışını Kırınımı (XRD)	65
Şekil 3.4. FEI Quanta 650 Field Emission SEM - Alan Taramalı Elektron Mikroskobu	66
Şekil 3.5. İnce film üzerine gelen ışığın temsili soğurma gösterimi	67
Şekil 3.6. Perkin-Elmer UV/Vis Lambda 2S spektrometresi	68
Şekil 3.7. Bir yarıiletkenin Soğurma Katsayısı-Enerji grafiği.....	73
Şekil 3.8. Ecopia marka hall ölçüm sistemi HS-3000	74

Şekil 3.9.	(a) Mıknatıs kiti (b) Dört nokta yöntemli sistem aparatı.....	72
Şekil. 4.1.	Cu_2O 'ya ait kristal yapı	76
Şekil. 4.2.	10-daldırma çevriminde 50°C sıcaklıkta depolanan Cu_2O ince filmin X-ışını kırınım deseni	79
Şekil. 4.3.	20-daldırma çevriminde 50°C sıcaklıkta depolanan Cu_2O ince filmin X-ışını kırınım deseni	82
Şekil. 4.4.	30-daldırma çevriminde 50°C sıcaklıkta depolanan Cu_2O ince filmin X-ışını kırınım deseni	83
Şekil. 4.5.	40-daldırma çevriminde 50°C sıcaklıkta depolanan Cu_2O ince filmin X-ışını kırınım deseni	84
Şekil. 4.6.	10-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik geçirgenlik grafiği	88
Şekil. 4.7.	20-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik geçirgenlik grafiği	89
Şekil. 4.8.	30-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik geçirgenlik grafiği	89
Şekil. 4.9.	40-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik geçirgenlik grafiği	87
Şekil. 4.10.	10-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik soğurma grafiği.....	92
Şekil. 4.11.	20-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik soğurma grafiği.....	92
Şekil. 4.12.	30-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik soğurma grafiği.....	93
Şekil. 4.13.	40-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik soğurma grafiği.....	93
Şekil. 4.14.	10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin dalga boyuna bağlı yansıma grafiği	95

Şekil. 4.15. 20-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin dalga boyuna bağlı yansıma grafiği	96
Şekil. 4.16. 30-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin dalga boyuna bağlı yansıma grafiği	96
Şekil. 4.17. 40-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin dalga boyuna bağlı yansıma grafiği	97
Şekil. 4.18. 10-daldırma çevriminde 50°C de hazırlanan Cu_2O ince filmlerin $(ah\nu)^2-h\nu$ değişimi.	98
Şekil. 4.19. 20-daldırma çevriminde 50°C de hazırlanan Cu_2O ince filmlerin $(ah\nu)^2-h\nu$ değişimi.	99
Şekil. 4.20. 30-daldırma çevriminde 50°C de hazırlanan Cu_2O ince filmlerin $(ah\nu)^2-h\nu$ değişimi.	99
Şekil. 4.21. 40-daldırma çevriminde 50°C de hazırlanan Cu_2O ince filmlerin $(ah\nu)^2-h\nu$ değişimi.	97
Şekil. 4.22. 10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin kırılma indisinin dalga boyuna bağlı grafiği	99
Şekil. 4.23. 20-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin kırılma indisinin dalga boyuna bağlı grafiği	100
Şekil. 4.24. 30-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin kırılma indisinin dalga boyuna bağlı grafiği	100
Şekil. 4.25. 40-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin kırılma indisinin dalga boyuna bağlı grafiği	101
Şekil. 4.26. 10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısının dalga boyuna bağlı grafiği	103
Şekil. 4.27. 20-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısının dalga boyuna bağlı grafiği	103
Şekil. 4.28. 30-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısının dalga boyuna bağlı grafiği	104

Şekil. 4.29. 40-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısının dalga boyuna bağlı grafiği	104
Şekil. 4.30. 10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü ve enine kesiti	106
Şekil. 4.31. 20-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü ve enine kesiti	107
Şekil. 4.32. 30-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü ve enine kesiti	107
Şekil. 4.33. 40-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü ve enine kesiti	108



SİMGELER VE KISALTMALAR

%T	: Optik Geçirgenlik
%R	: Yansıma
A	: Optik soğurma (Optik Yoğunluk)
BK	: Basit Kübik
CB	: İletkenlik Bandı
CBD	: Kimyasal Depolama Yöntemi
CTAB	: Setil- Trimetil- Amonyum Bromür
CuO	: Bakır (II) Oksit
Cu ₂ O	: Bakır (I) Oksit, $a=b=c=4,2685$, $\alpha=\beta=\delta=90^\circ$
CVD	: Kimyasal banyo depolaması Tekniği
DC	: Doğru akım
FE-SEM	: Alan Emisyonlu-Taramalı Elektron Mikroskobu
FTO	: Flor Katkılı Kalay Oksit
E_g	: Enerji Bant Aralığı
k	: Sönüm katsayısı
M	: Molar
M_i	: Film Oluşturulmadan Önce Alt taş Kütlesi
M_s	: Film Oluşturulduktan Sonra Alt taş Kütlesi
MB	: Metilen Mavisi
n	: Kırılma indisi
UV-VIS	: Ultraviyole Görünür Bölge Spektrofotometresi
UV-VIS-NIR	: Perkin-Elmer UV/Vis Lamda 2S spektrometresi
PEC	: Fotoelektrokimyasal
PL	: Fotolüminesans
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SILAR	: Sıralı İyonik Tabaka Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu
STS	: Taramalı Tünelleme Spektroskopisi

TFT	: İnce Film Transistörleri
TL	: Tauc-Lorentz Modeli
XRD	: X-Işını Kırınımı
XPS	: X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi
α	: Soğurma katsayısı
λ	: Dalga boyu
ρ	: Özdirenç
σ	: İletkenlik
θ	: Bragg Açısı
m_0	: Durgun Kütle
VB	: Valans bandı
ν	: Işığın frekansı
μ	: mobilite

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemelerin başlangıç tarihi, 1839 yılında Alexandre E. Becquerel'in bir elektrolit sıvısı içerisinde daldırılmış iki elektrottan birisine ışık düşürölüp, bu iki elektrot arasında potansiyel fark oluştuğunun kanıtlanmasıdır. Bu çalışmasıyla birlikte güneş pili (fotovoltaik) anlamlandırıldı. Katı cisimler üzerinde ise selenyum kristalini kullanan William G. Adams ve Richard E. Day 1876'da potansiyel fark gözlenmiştir. Bu gelişmeyi takiben 1883 yılında Faraday gümüş sülfatın direncinin sıcaklıkla azaldığını tespit etmiştir. 1914'te galen algılayıcılar, 1920 yılında bakır oksit ve selenyum algılayıcılar kullanılmaya başlanmıştır. Bakır oksit ve selenyum foto diyotlar yaygın olarak fotoğrafçılık sektöründe de ışık metreleri olarak kullanılmıştır. Yarıiletkenlerin teorik olarak incelenmesinin kabul gören ilk adımı, Schottky'nin 1923'te yayımladığı kuru doğrultmaçlar (redresör) teorisi olmuştur. İkinci Dünya Savaşı esnasında önemli bir ihtiyaç haline gelen radarlar, yarıiletken diyotların gelişmesine öncülük etmiştir. 1914'te ise fotovoltaik diyotlar üzerine yapılan çalışmalarda verimlilik %1 seviyelerine gelmiştir. Ancak, fotovoltaik diyotların %6 verimliliğe ulaşması ilk kez Chapin tarafından 1954'te silikon kristalinin üzerinde uygulanmıştır. 1962 yılında da William P. Dumke, galyum arsenik gibi yarıiletkenlerden lazer yapılabileceğini gösterdi. Bunun üzerine IBM ve Bell laboratuvarlarında çalışan bilim insanları yarıiletken lazerleri icat ettiler (Islam S. ve ark., 2006). Bu sayede optik elektroniği alanı oluştu. 1980'lerde ise kişisel bilgisayarların kullanımındaki artış elektronik malzeme endüstrisinde büyük bir sansasyon yarattı.

Günümüze kadar uzanan bu yarıiletken malzemelerdeki gelişmeler modern hayatın her yönünde karşımıza çıkmaktadır. Örnek verilecek olursa; televizyon, güneş pili, cep telefonları, gaz sensörleri vb. Yarıiletkenler sürekli bir şekilde yarıiletken esaslı teknolojik aletlerin sürekli gelişmesine önemli katkıda bulunmuştur. Bu alanın iyi bir şekilde yol katetmesini sağlayan en önemli materyaller ince film materyaller olmuştur. İnce filmler çeşitli üretim teknikleri ile kaplanarak oluşturulur. Kaplanacak malzemenin atomlarının veya moleküllerinin filmi oluşturmaya destek bir alt taş üzerine dizilmesi ile oluşturulan ve genellikle kalınlıkları 1 µm'nin altında olan malzemelere ince film olarak adlandırılır (Sönmezoğlu S. ve ark., 2012). İnce film yapısında bulunan nano kristaller sayesinde materyal ve araçların optik, mekaniksel ve elektriksel özelliklerinin yüksek oranda artırılması sağlanmaktadır. İnce film nano kristallerinin büyüklüğü, malzemenin bant yapısına etki ettiği için malzemeyi oluşturan parçacıkların uygun küçüklükte olmasını ve yük taşıyıcıların kuantum sınırında bulunmasını sağlar ve bant yapılarının da kuantum sınırında olmasını sağlar. Böylece bant yapılarının kesikli enerji seviyelerine ayrışmasına sebep olur (Pejova B. ve ark., 2006). Günümüzde de teknolojik birçok gelişmenin ana öğelerinden biri haline gelen ince film teknolojisi kişisel bilgisayar donanımlarından haberleşme sistemlerine kadar uzanan birçok elektronik araçta kullanılmaktadır. Bunun yanında film ve döküm malzeme arasında yapısal, optik ve elektriksel farklılıklar bulunur. Bu farklılıkların ana sebepleri ve film oluşturma prensipleri ile alakalı çalışmalar gün geçtikçe artmakta olup, en çok ses getiren çalışmalar entegre devrelerde kullanılan minyatür elemanların hızlı gelişmesini sağlama amacı ile gerçekleştirilmektedir (Mahan J.E., 2000). İnce filmler; yapısal, optik ve elektriksel özellikleri için bilim ve endüstri

uygulamalarının hemen hemen bütün alanlarında kullanılmaktadır. Elektriksel özelliklerinin avantajları ile yarıiletken/süper iletken aygıtlarda, yalıtım ve iletim kaplama malzemeleri ile entegre devre elemanlarının yapılmasında kullanılmaktadır. Optik özellikleri sebebi ile yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan kaplama yapımında, optik sürücü ve girişim filtrelerinde kullanılmaktadır. Manyetik özellikleri sayesinde ise oksidasyon veya korozyon önlemleri almada ve gaz sensörlerinde ince film teknolojisi kullanılmaktadır (Güneri E., 2009). Bu sebepten ötürü birçok uygulamadaki ince filmlerin verimliliğini, performansını ve yapısını geliştirmek ve bu teknolojiadaki gelişmeleri iletirmek için çok sayıda çalışma yapılmış, modeller geliştirilmiştir. Bu gelişmeler gün geçtikçe artarak devam etmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar ve teorik incelemeler doğrultusunda ince film teknolojisinin geliştirilmesine ek olarak morfolojik özelliklerinin iyileştirilmesi ve verimliliğin artırılmasının yanında maliyetli olmamasına da dikkat edilir. İnce filmlerin beklenen özellikleri göstermeleri için makul kalınlığa ve karakteristik özelliklere haiz olması gerekmektedir (Sönmezoğlu S. ve ark., 2012). Bu sebepten dolayı ince film üretimi için farklı metotlar ve bu metotları farklı altlık malzemeler üzerinde deneyerek kalitesi artırılmış filmler üretilmek istenmektedir. Dolayısı ile çalışmalar sürekli olarak devam etmektedir.

İnce filmler; metal veya ametal olabilecekleri gibi ergime sıcaklığı yüksek malzemeler üzerinde üretilen birkaç nanometre incelikteki kaplamalar olarak tanımlanabilir (Plummer E.W. ve ark., 1993). İnce filmler darbelere karşı dayanıma sahip, nispeten sert oldukları için ilgi çekici bir hal almıştır.

İnce film teknolojisi 1950'lerden beri üzerine yoğunlaşarak çalışılan bir alandır. Günümüzde daha çok elektronik alanlarda kendine geniş bir uygulama sahası bulmuştur. Bu alanlarda kullanılan ince filmler opak, şeffaf ve kristal örgü biçimlerinde üretilebilmektedir (Wen Q. ve ark., 2013, Hoffman R.L. ve ark., 2003).

Güneş pilleri ile ilgili uygulamalarda ince film teknolojisi kullanımı özellikle yaygınlaşmıştır. Saydam güneş pili uygulamalarında ince film tabanı olarak kullanılan malzemeler mor ışık spektrumunu kırmızı ışığa göre daha iyi süzmektedir (Selçuk A.,1986). Bu özelliği sayesinde gelecekte saydam güneş pillerinin binalarda elektrik üretiminde kullanılması hedeflenmektedir. Ayrıca daha büyük çaplı projeler de planlanmaktadır. Örnek olarak, atmosfer dışında kurulacak güneş pili santrallerinde üretilen enerjinin elektromanyetik ışıyım yolu ile yeryüzüne aktarılması ve Büyük Sahra'da kurulacak güneş pili santrallerinde üretilen enerji ile hidrojen elde edilmesi gibi projeler verilebilir.

Türkiye için ise Güneydoğu Anadolu gibi kurak ve güneşli bölgelerde üretilen enerji ile sulama yapılması öngörülmektedir. Hali hazırda düşük güçlerde (5–10 kW) güneş pilleri fosil yakıtlara göre ekonomik enerji üretimi sağlamaktadır.

Cu_2O 'nin kristal yapısı basit kübik yapıdadır ve örgü parametresi $a = 4.27 \text{ Å}$ dur (Akgül F.A., 2017). Bakır (I) oksit (Cu_2O) kırmızı renkte bir katıdır. Molekül ağırlığı 143.09, yoğunluğu 5.75 g.cm^{-3} , bant aralığı 2 eV değerindedir. Cu_2O p-tipi yarıiletkenidir. Kübik kristal yapıya sahiptir. Örgü sabiti $a = 4.27 \text{ Å}$ 'dur (Balamurugan and Mehta et al. 2001).

Ayrıca Cu_2O yarıiletken filmler; kimyasal buhar depolama, sol-jel, elektro depolama, kimyasal depolama ve SILAR metodu gibi birçok

yöntemle hazırlanabilmektedir. Bakır (I) oksit, yukarıda da bahsedildiği gibi zehirsiz olması ve doğaya zarar vermemesi bakımından tercih edilmektedir. Düşük maliyete ve yüksek güneş pili verimine (%18 civarında) sahip olmasından ötürü de birçok güneş pili uygulamasında kullanılabilmektedir (Akgül F.A., 2017).

1.1. Katı Cisimlerin Sınıflandırılması

Katı cisimler elektrik özelliklerine (özdirencine) göre üçe ayrılır: metallar (veya iletkenler), yarıiletkenler ve yalıtkanlar. Üstün iletkenler oda sıcaklığında metal özelliği göstermektedir ve düşük sıcaklıklarda (1–120 K) üstün iletkenliğe sahiptir. Katı cisimlerin bölümlendirilmesi aşağıdaki gibidir:

1. Metaller: $\rho = 10^{-6} - 10^{-4} \Omega\text{cm}$
2. Yarıiletkenler: $\rho = 10^{-4} - 10^{10} \Omega\text{cm}$
3. Yalıtkanlar: $\rho \geq 10^{10} \Omega\text{cm}$

Özdirenç kriteri kapalıdır. Çünkü bir cisimden diğerine geçtiğimiz zaman özdirenç değerleri üst üste gelmektedir. Metaller ve yarıiletkenler arasındaki fark, onların sıcaklık ile değişiminden daha açık görülmektedir. Kimyasal olarak temiz metallerde özdirenç sıcaklık ile lineer olarak artmaktadır

$$\rho = \rho_0 \alpha T \quad (1.1)$$

Burada ρ_0 metalin 0°C 'de özdirenci, $\alpha = 1/273$ direncin termal genleşme katsayısı, T mutlak sıcaklıktır. Şekil 1.1, metalin (Fe) ve yarıiletkenin (Si)

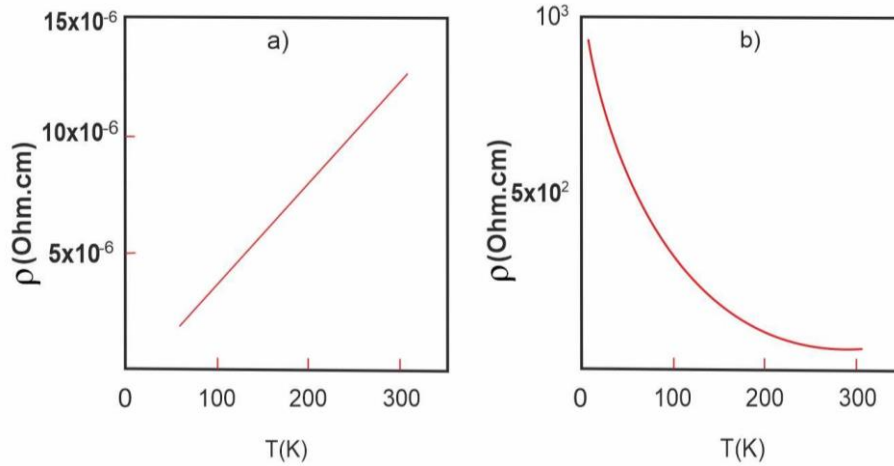
özdirencinin ısıyla varyasyonu şematize edilmiştir. Metallerde ısı arttıkça özdirenç artar (Şekil 2.1.a).

Saf (katkısız) yarıiletkenin özdirenci, metalin farklı olarak, sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak küçülür (Şekil .1.b).

$$\rho = A \exp\left[\frac{E_g}{kT}\right] \quad (1.2)$$

Burada E_g yarıiletkenin yasak bant genişliğidir, k Boltzmann sabitidir, A bir sabittir.

Metallerin ve yarıiletkenlerin özdirencinin veya iletkenliğinin (σ) Şekil 1.1'deki gibi bilinmektedir.



Şekil 1.1. (a) Metalin (Fe) ve (b) yarıiletkenin (Si) özdirencinin sıcaklıkla değişimi (Cafer T., 2000)

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ne\mu} \quad (1.3)$$

Buradaki n elektronların konsantrasyonu, e elektronun yükü ($e = 1.6 \times 10^{-19}$ C) ve μ elektronların mobilitesidir. Metallerde atomlar tam iyonlaşmış halindedir.

Neticesinde ise elektronların konsantrasyonu metallerde çok yüksektir ($n \approx 10^{22} \text{ cm}^{-3}$) ve sıcaklığa bağılı değildir. Metallerde sıcaklık arttıkça elektronların konsantrasyonu aynı kalmakta, fakat mobiliteleri biraz azalmaktadır. Sonuç olarak (1.3) eşitliğine uygun olarak metallerin özdirenci sıcaklıkla artmakta veya iletkenliği küçülmektedir. Saf (katkısız) yarıiletkenlerde, metallerin farklı olarak, elektronların konsantrasyonu sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak artmakta ve elektronların mobilitesi çok az küçülmektedir. Netice olarak, yarıiletkenlerin özdirenci sıcaklık arttıkça (1.3) eşitliğine uygun olarak keskin azalmaktadır.

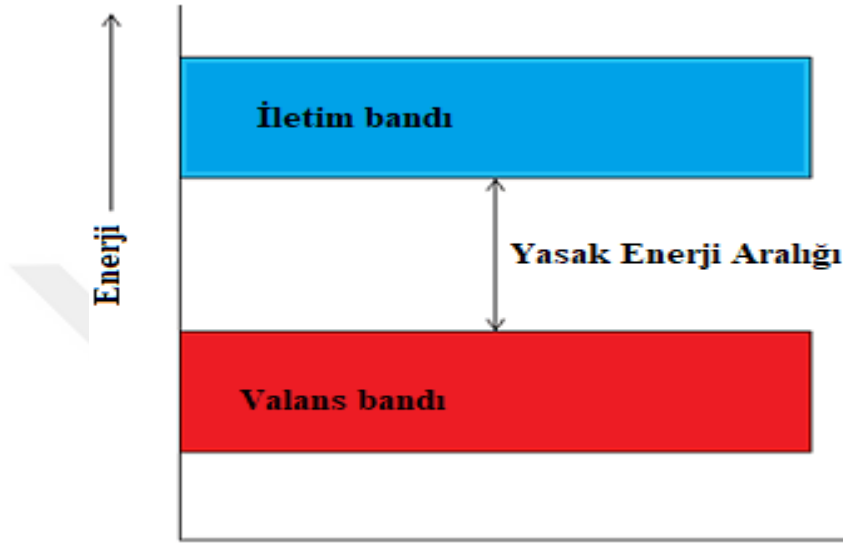
Metallerin, yalıtkanların ve yarıiletkenlerin özdirenç kriterine göre ayrılması her zaman geçerli değildir. Zira yarıiletkenlerin özdirenci, bazı sıcaklık aralığında metallere benzer veya bazı sıcaklıklarda da (mutlak sıfıra yakın olduğunda) yalıtkanlar benzer davranış göstermektedirler. Metallerin, yarıiletkenlerin ve yalıtkanların ayrımı ise çok net bir şekilde bant teorilerinin açıklanmasıyla belirlenebilir (Cafer T., 2000).

1.2. Yalıtkan, İletken ve Yarıiletkenlerin Enerji Bandları

Tek bir izole edilmiş atomda, her bir yörüngedeki elektronlar, kendisiyle ilişkilendirilmiş belirli bir enerjiye sahiptir. Fakat katı madde olması durumunda tüm atomlar birbirine yakındır, bu nedenle en dıştaki yörünge elektronlarının enerji seviyeleri komşu atomlardan etkilenir. İki tekli veya izole edilmiş atom birbirine yaklaştığında, iki atomun en dıştaki yörüngesindeki elektronları birbirleriyle etkileşime girer veya paylaşılır. Yani, bir atomun en dış yörüngesindeki elektronlar, en yakın veya komşu atom çekirdeğinden bir çekim kuvvetine maruz kalırlar.

Bundan dolayı, elektronların enerjileri aynı seviyede olmayacaktır, elektronların enerji seviyeleri, elektronun orijinal enerji seviyesinden daha yüksek veya daha düşük bir değere değişecektir. Aynı yörüngedeki elektronlar farklı enerji seviyelerine sahip olabilirler. Bu farklı enerji seviyelerinin gruplandırılmasına enerji bandı denir. Bununla birlikte, iç yörünge elektronlarının enerji seviyeleri,

komşu atomların varlığından çok fazla etkilenmez. Katılardaki enerji bandlarını üç grupta inceleyelim (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Katılarda enerji bantlarının gösterimi (Gmş C., 1998)

a) Valans Bandı

En dıştaki yörünge elektronlarının enerji seviyelerinin aralığını gruplandırarak oluşturulan enerji bandı valans bandı olarak adlandırılır. Valans bandı, şekilde gösterildiği gibi iletken bandın altında bulunur. Valans bandındaki elektronlar, iletim bandındaki elektronlardan daha düşük enerjiye sahiptir. Valans bandında bulunan elektronlar gevşek bir şekilde atom çekirdeğine bağlanır.

b) İletim bandı

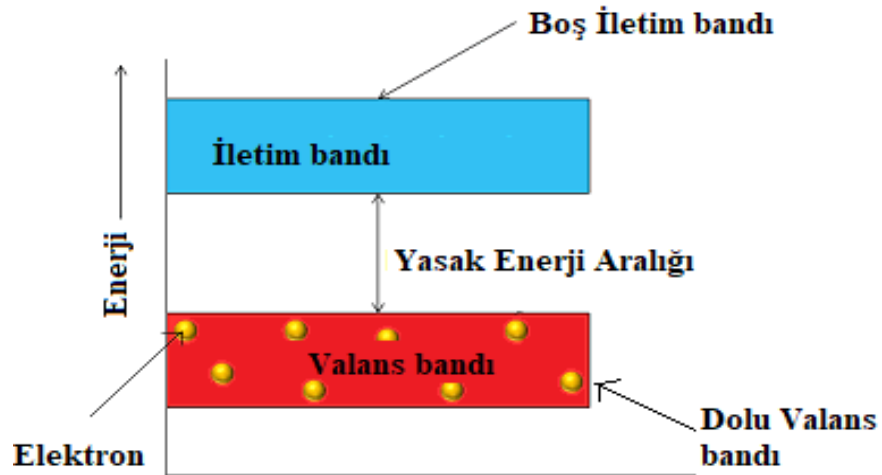
Serbest elektronların enerji seviyeleri aralığı gruplanarak oluşturulmuş olan enerji bandına iletken bant denir. Genel olarak, iletken bant boştur, ancak harici enerji uygulandığında değerlik bandındaki elektronlar iletkenlik bandına atlar ve serbest elektron haline gelir. İletim bandındaki elektronlar değerlik bandındaki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahiptir. İletim bandı elektronları atom çekirdeğine bağlı değildir.

c) Yasak enerji aralığı

Katılarda, elektronlar yasak enerji aralığında kalamazlar çünkü bu bölgede izin verilen enerji durumu yoktur. Yasak enerji aralığı, bir katının elektrik iletkenliğini belirlemek için ana faktördür. Malzemelerin yalıtkanlar, iletkenler ve yarıiletkenler olarak sınıflandırılması temelde yasak enerji aralığına bağılıdır. Yasak enerji aralığının birimi elektron volt (eV) cinsinden ölçölür. Bir elektronu valans bandından iletkenlik bandına itmek için uygulanan ısı ya da ışık şeklindeki dış enerjinin yasak enerji aralığına eşit olması gerekir (Gümüş C., 1998).

1.2.1. Yalıtkanlar

Elektrik akımının içlerinden geçmesine izin vermeyen malzemelere yalıtkan (Şekil 1.3.) denir. Yalıtkanlarda valans bandı, dış yörünge elektronlarının komşu atomlarla paylaşılmasından dolayı elektronlarla tamamen doludur. Yani, iletim bandında elektron yoktur. Valans bandı ile iletken bant arasındaki yasak enerji aralığı yalıtkanlarda çok büyüktür. Yalıtkanların yasak enerji aralığı değerleri 5 eV ve üzerindedir.

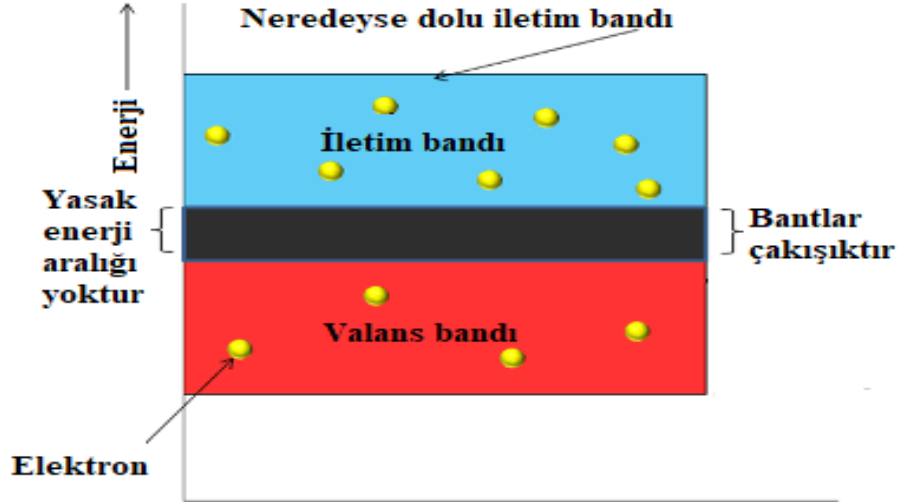


Şekil 1.3. Yalıtkan bir malzemenin enerji-bant diyagramı (Gümüş C., 1998)

Valans bandındaki elektronlar hareket edemez çünkü atomlar arasında kilitlidirler. Valans bandı elektronlarını iletim bandına taşımak için, yasak enerji aralığına eşit miktar ya da yasak enerji aralığından daha büyük miktarda dış enerji uygulanması gerekir. Ancak, yalıtkanlarda, valans bandı elektronlarını iletim bandına taşımak neredeyse pratik olarak imkansızdır. Kauçuk, ahşap, elmas, plastik gibi bazı maddeler yalıtkan maddelere örnektirler. Plastik gibi yalıtkanlar, elektrik tellerinin kaplanması için kullanılır. Bu yalıtkanlar elektrik akımının istenmeyen noktalara akmasını önler ve bizi elektrik şoklarından korur (Gömüş C., 1998).

1.2.2. İletkenler

Elektrik akımının içlerinden kolayca geçmesini sağlayan malzemeler iletken (Şekil 1.4.) olarak adlandırılır. Bakır, gömüş, demir, alüminyum vb. metaller iyi elektrik iletkenleridir. Bir iletken, valans bandı ve iletken bant, şekilde gösterildiği gibi üst üste gelir. Bu nedenle, bir iletken yasak enerji aralığı yoktur. Küçük bir miktarda uygulanan dış enerji, valans bandı elektronlarının iletim bandına girmesi için yeterli enerji sağlar. Valans bandı elektronları iletim bandına geçtiğinde serbest elektron haline gelirler. İletim bandında bulunan elektronlar, bir atomun çekirdeğine bağlı değildir. İletkenlerde, iletken bantta oda sıcaklığında çok sayıda elektron bulunur, yani iletken bant neredeyse elektronlarla doludur. İletim bandında bulunan elektronlar, elektrik akımını bir noktadan diğerine taşıyarak serbestçe hareket eder (Gömüş C., 1998).



Şekil 1.4. İletken bir malzemenin enerji-bant diyagramı

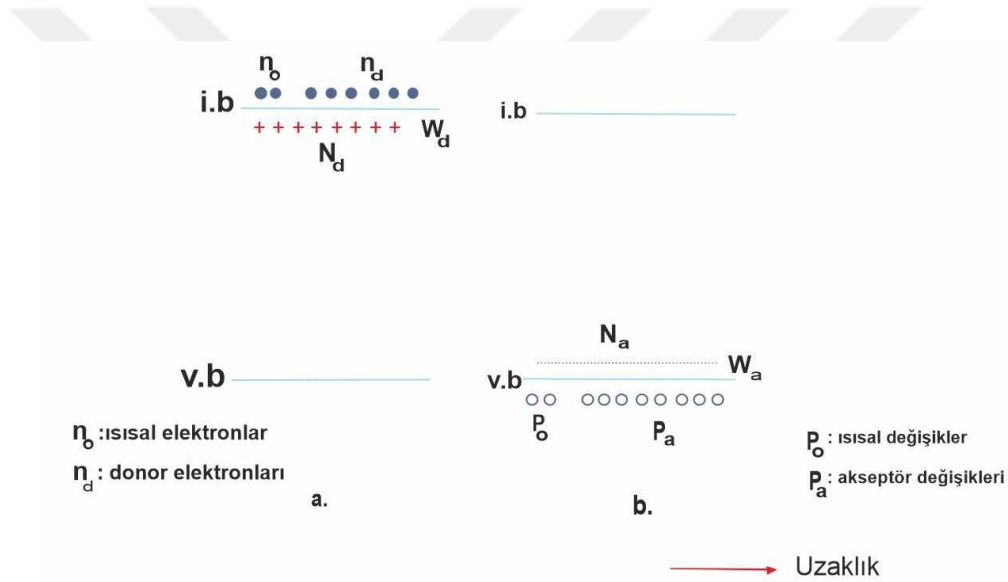
1.2.3. Yarıiletken Tipleri

Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) özellikleri en iyi bilinen ve elektronik endüstrisinde çok geniş uygulama alanı bulunan yarıiletkenlerdir. Bu sebeple yarıiletkenlerle ilgili bundan sonra yapılacak tüm incelemelerde Si ve Ge örnekleri üzerinde durulacaktır.

Yarıiletkenler, önce saflıklarına göre, saf ve saf olmayan yarıiletkenler olmak üzere iki gruptadır. Saf yarıiletkenler, içinde safsızlık maddesi olmayan katılardır. İletkenlik bandındaki elektron sayısı, valans bandındaki boşluğa eşittir. Örnek olarak, Si bu sayı yaklaşık olarak cm^3 başına 10^{10} , Ge ise 10^{13} kadardır. Saf Si ve Ge'nin öz dirençleri de yüksektir; Si'nin $2.10^5 \Omega\text{cm}$, Ge'nin $42 \Omega\text{cm}$ 'dir.

İçerisine belli bir miktarda safsızlık maddesi karıştırılan yarıiletkene "saf olmayan yarıiletken" adı verilir. Bu maddeler, iletkenliğin çoğunlukla elektronların yardımı ile sağlandığı n (negatif) tipi, iletkenliğin daha ziyade boşluklarla taşındığı p (pozitif) tipi olmak üzere iki tiptir.

n -tipi yarıiletken, 4 değerli Si veya Ge a, belirli yöntemlerle, As, Sb, P, N, vb. gibi 5 değerli maddelerin katılması ile elde edilir. Safsızlık maddesinin 4 elektron kristalin 4 elektronu ile “elektron-çifti” bağı yapar; bir elektron serbest kalır. Yani safsızlık atomları iyonize olur. Safsızlık atomlarına “donor”, bulundukları enerji seviyesine “donor seviyesi” denir. n -tipi yarıiletkenin enerji diyagramı Şekil 1.5.a’da gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi donor seviyesi iletkenlik bandına çok yakındır; serbest olan donor elektronları ise iletkenlik bandında bulunarak, yarıiletkenin serbest elektron sayısını artırır.



Si ve Ge yarıiletkenlerine, B, Ga, In, Al, vb. gibi 3 değerli maddelerin katılması ile p -tipi yarıiletken oluşur. Safsızlık atomlarının 3 elektronu Si veya Ge un 4 elektronu ile “elektron-çifti” bağı yapar, fakat her bir bağ için bir boşluk, yani deşik oluşur. Deşik, kristal örgü içinde serbesttir ve valans bandındadır. İyonize olan 3 değerli safsızlık atomlarına “akseptör”, işgal ettikleri enerji seviyesine de “akseptör seviyesi” denir. Valans bandına çok yakın olan akseptör seviyesine Şekil 1.5.b’de gösterilmiştir. Bu suretle yarıiletkenin serbest deşik sayısı artmış, akımın

çoğunlukla deşikler yardımı ile taşınması sağlanmış olur. Yasak enerji bölgeleri sırasıyla 1.12 eV ve 0.72 eV olan Si ve Ge yarıiletkenlerinde genellikle donör seviyeleri iletkenlik bandının 0.04 – 0.08 eV kadar altında, akseptör seviyeleri ise valans bandının aynı enerji büyüklüğü kadar üstünde uzanır.

n-tipi yarıiletkenlerde elektronlara “çoğunluk taşıyıcıları”, deşiklere “azınlık taşıyıcıları” denilmektedir. *p*-tipi yarıiletkenlerde ise tanım terstir; yani deşikler çoğunluk, elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır (Büget U. , 1984).

1.2.4. Yarıiletkenler

Elektrik akımını geçiren iki çeşit iletken vardır: iyonik geçişli ve elektronik geçişli iletkenler. Metallerde elektrik akımı taşıyıcıları elektronlar olduğundan metaller elektron iletkenlerdir. İyonik iletkenlerde elektrik akımı malzemenin iyonlarıyla taşınır ve iyonik iletkenin kompozisyonu akımın geçtiği zaman ile değişmektedir. Elektrolitler de iyon iletkenler grubundadır. Yarıiletken malzemeler hem elektron hem de iyon iletkenliğine sahiptirler.

Isı enerjisi etkisi ile yarıiletkenlerde serbest yük taşıyıcılarının (elektronların ve deşiklerin) yoğunluğu artmaktadır. Böylece meydana gelen yük taşıyıcılarına dengeleyici veya ısısal yük taşıyıcıları denilmektedir. Ek olarak, serbest yük taşıyıcıları basınç, ışık, γ -ışınları, elektrik alan, hızlı parçacıkların (protonların, elektronların, iyonların, nötronların vb bombardımanı) etkisi ile oluşabilir. Bu yöntemler ile oluşan yük taşıyıcıları denkleştirilmemiş yük taşıyıcılarıdır.

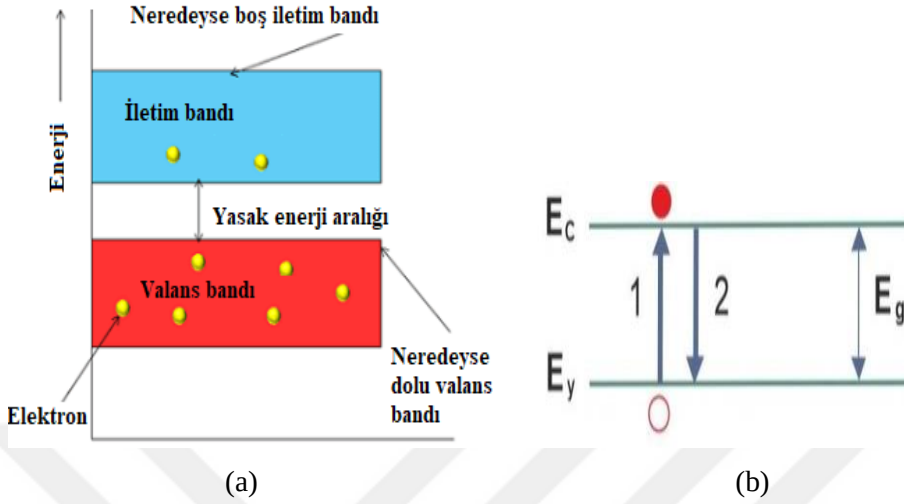
Metallerde atomlar iyonlaşmış durumdadır ve serbest elektronların konsantrasyonu ($n \approx 10^{22} \text{ cm}^{-3}$) atomların konsantrasyonuna eşit durumdadır. Bu sebeple metallerin özellikleri dış etmenler ile çok az değişmektedir. Saf yarıiletkenlerde ise serbest elektronların konsantrasyonu ($n = 10^{13}-10^{15} \text{ cm}^{-3}$) ana atomların konsantrasyonundan (10^{22} cm^{-3}) çok azdır. Yarıiletken atomların dış etkilerle (ışık, elektrik alanı, basınç, hızlı parçacıklarla bombardıman vb) iyonlaşması ve serbest elektron konsantrasyonunu keskin değiştirmek mümkündür.

Bunun neticesinde yarıiletkenin özellikleri de keskin değişebilmektedir.

Serbest yük taşıyıcılarının oluşma yöntemleri yarıiletkenin kristal yapısına, kompozisyonuna ve katkı atomlarının bulunmasıyla ilişkilidir. Çok az miktardaki (10^{-3} – 10^{-8}) katkı atomları yarıiletkenin iletkenliğini keskin (10^8 kata kadar) değiştirebilir.

Böylece, yarıiletkenin öz direnci oda sıcaklığında $\rho=10^{-4}$ – 10^{10} Ωcm (veya iletkenliği $\sigma=10^{-10}$ – 10^4 $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) aralığında olabilir. Öz direncin katkılama ile veya dış etkilerle (ısı, ışınlama, elektrik ve manyetik alanlar, basınç, γ -ışınları, hızlı parçacıklarla bombardıman vb) kuvvetli bağımlılığı yarıiletkenin esas niteliğidir.

Kuantum teorisine göre, izole edilmiş atomda elektronların enerjisi kesikli olarak değişebilir. Pauli ilkesine göre, atomun her enerji düzeyine en çok iki ters yönlendirilmiş spinlere sahip elektronlar yerleşebilir. Yarıiletken malzeme oluştuğunda, yani atomlar birbirine çok yaklaştığında (yaklaşık 10^{-8} cm), komşu atomların kuvvetli elektrik alanı etkisiyle valans elektronlarının enerji düzeyi bandı ayrılır. Valans elektronlarından oluşmuş enerji bandına valans bandı denir (Şekil 1.6.a). Atomlardaki valans elektronlarının uyarılma düzeylerinden oluşan bant serbest veya iletim bandı olarak tanımlanır. İletim ve valans bantlarının arasında yasak bant bulunmaktadır. Saf yarıiletkenin enerji bant diyagramı Şekil 1.6.b’de gösterilmektedir. Burada E_c , iletim bandındaki elektronların en küçük enerjisidir. Bu enerji düzeyine iletim bandının dişi denir. E_v , valans bandındaki elektronların en büyük enerjisidir ve bu enerji seviyesi valans bandının tavanı olarak tanımlanır. İletim bandının dişi ve valans bandının tavan enerjilerinin farkı $E_c - E_v = E_g$ yarıiletkenin yasak enerji bant genişliğini karakterize eder. Kusursuz ve katkısız yarıiletkenlerde elektronların enerjisi yasak bant enerjileri içinde olamaz. Yasak bant genişliği yarıiletkenlerin kimyasal bağ türü ve atomların türüyle belirlenmektedir. Farklı yarıiletkenlerin yasak enerji bant genişliği 0.1 eV’dan 5 eV’a kadar değişebilmektedir.



Şekil 1.6. (a) Saf yarıiletkenin enerji bantlarının (Gümüş C., 1998) ve (b) enerji bantdiagramının şematik gösterimi (Cafer T., 2000).

Yarıiletkenlerin yasak enerji bant genişliği sıcaklık arttıkça değişiklik gösterir. Bu olayın sebepleri kristaldeki atomların ısısal titreşim genliğinin ve atomlar arası uzaklığın sıcaklıkla değişmesine bağlıdır. Yarıiletkenlerin çoğunda sıcaklık arttıkça yasak bant genişliği küçülmektedir.

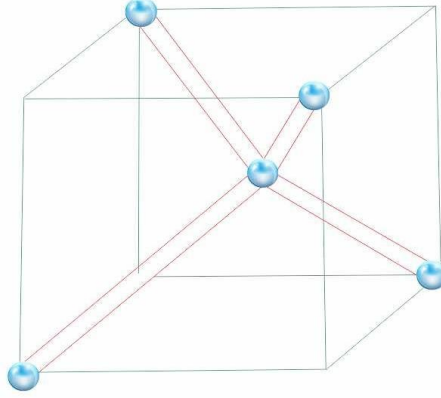
Isı enerjisinin etkisiyle kristaldeki atomlar arasında bağlar kopabilir ve bu bağın elektronu serbest kalabilir. Atomlar arası bağdan kopan elektronun yerinde boşluk meydana gelir ve bu boşluk deşik olarak adlandırılır. Bu olay elektron-deşik çiftlerinin oluşması (veya jenerasyonu) olarak tanımlanmaktadır. Bu olayın sonucunda iletim bandında serbest elektron ve valans bandında serbest deşik oluşur. Aynı zamanda yarıiletkende bu olayın ters olayını da gözlemlemek mümkündür. Bu olaya elektron-deşik çiftlerinin birleşmesi (veya rekombinasyonu) olarak adlandırılır. Şekil 3.3'de bu iki olay, elektron-deşik çiftlerinin oluşması ve birleşmesi, şematik olarak 1 ve 2 geçişleriyle gösterilmektedir. Termodinamik denge durumunda yük taşıyıcılarının (elektronların ve deşiklerin) oluşma ve birleşme olayları karşılıklı denkleştirilmiştir. Bu durumda yarıiletkende, dengeleyici elektronlar (n_o konsantrasyonlu) ve deşikler (p_o konsantrasyonlu)

gözenmektedir. Isısal olmayan etki ile de (elektrik alanı, ışık, hızlı iyonlar, basınç, elektronlar ve protonlarla bombardıman vb.) yarıiletkende yeni yük taşıyıcıları meydana getirilebilir. Bu durumda elektronların (n) ve deşiklerin (p) dengeleyici olmayan konsantrasyonu, dengeleyici konsantrasyonlarından (n_o ve p_o) daha artıktır. Yani $\Delta n = n - n_o$ ve $\Delta p = p - p_o$ dır (Cafer T., 2000).

1.2.4.1. Saf Yarıiletkenler

Saf (yani katkısız ve kusursuz) silisyum yarıiletken örneğinde saf yük taşıyıcılarının üretimine bakalım. Silisyum atomu periyodik cetvelin dördüncü grubunda bulunmaktadır ve atom kabuklarında elektronların dağılımı şu şekildedir: $_{14}\text{Si}$ ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$). Silisyum atomunun dış (veya valans) kabuğunda dört elektron ($3s^2 3p^2$) yerleşmektedir. Silisyum kristali oluştuğunda, her silisyum atomunun dört valans elektronları ($3s^2 3p^2$) durumundan (sp^3) durumuna geçmektedir. Silisyum örgüsünde her atom tetraedrin merkezinde yerleşmektedir ve etrafında dört komşu atom bulunmaktadır. Yarıiletken silisyumun yapısı elmas (C) kristalin yapısına benzemektedir. Elmas yapıya benzer tipteki kristal örgüsü kübik yapıya sahiptir ve bu yapıda her silisyum atomunun dört valans elektronu komşu atomlarla kovalent bağla birleşir (Şekil 1.7). Silisyumun her kovalent bağında iki elektron bulunmaktadır (Şekil 1.7’de kovalent bağlar çift çizgilerle işaretlenmektedir).

Silisyum örgüsündeki kovalent bağların iki-boyutta gösterimi Şekil 1.8’de gösterilmiştir. Burada örgü düğümlerinde +4 yüklü silisyum iyonları yerleşmektedir. Her silisyum iyonu dört valans elektronuna sahiptir. Kovalent bağı oluşturan valans elektronları (her bağda iki elektron) Şekil 1.8’de koyu noktalar ile gösterilmektedir.

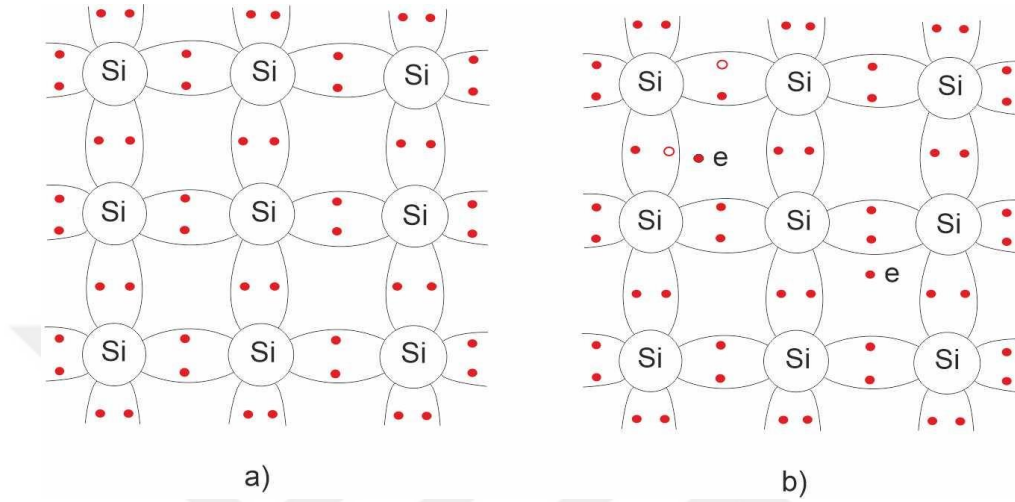


Şekil 1.7. Elmas tipli kristal örgü (Cafer T., 2000)

Mutlak sıfırda kovalent bağlarda hiç bir elektron eksikliği söz konusu olamaz (Şekil 1.8.a). Isısal enerjinin etkisiyle bazı kovalent bağlarda kopma oluşabilir. Bunun sonucunda kopan elektron serbest kalır ve elektronunun boş yerinde deşik meydana gelir (Şekil 1.8.b). Bu sayede ısısal etkisiyle silisyumda elektron ve deşik çifti meydana gelir. Saf yarıiletkenler, valans bağların kopması nedeniyle, eşit sayılı serbest elektronlar ve deşikler oluşmasıyla tanımlanır. Saf yarıiletkende yasak bant genişliği (E_g) ana atomlar arası bağların kopma enerjisinin veya elektron-deşik çiftlerin aktivasyon enerjisini karakterize etmektedir. Dış elektrik alan saf yarıiletkene uygulandığında, elektrik akımı elektron ve deşik yönlendirilmiş hareketinden meydana gelmektedir.

Saf yarıiletkende iletkenliğe katkı atomlarının etkisi ihmal edilebilir. Mutlak sıfırda saf yarıiletkende serbest yük taşıyıcıları bulunmamaktadır, yani valans bandı elektronlar ile tam olarak doldurulmuştur (deşikler yok) ve iletim bandında serbest elektronlar bulunmamaktadır. Sıcaklık arttıkça kırılmış valans bağların sayısı fazlalaşır ve bu sebeple serbest elektronların ve deşiklerin konsantrasyonu artmaktadır. Saf yarıiletkenin bant diyagramında serbest elektron ve deşiklerin sayısının ısısal yöntemle oluşturulması, elektronların valans bandından iletim bandına geçişler ile ve deşiklerin valans bandında oluşmasıyla

şematik olarak gösterilebilir (Şekil 1.8.b).

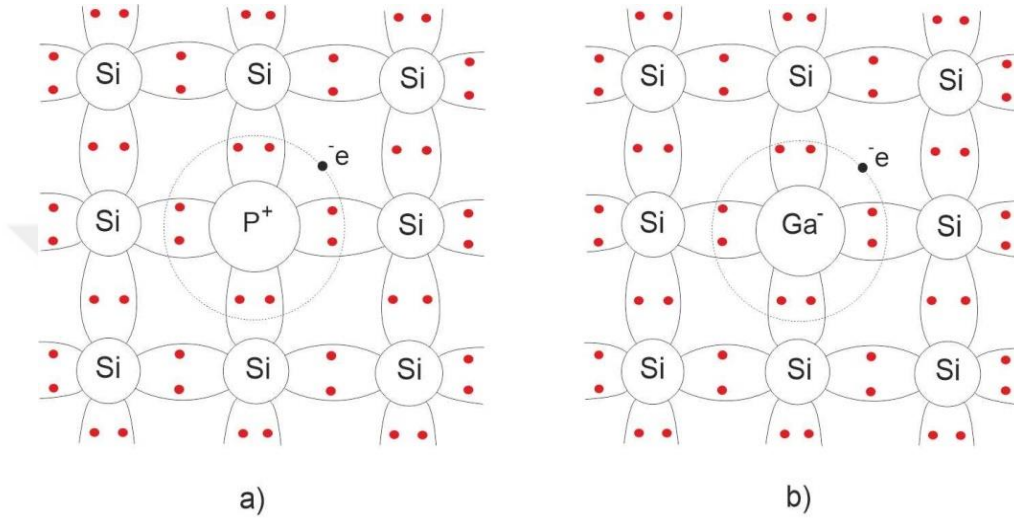


Şekil 1.8. Silisyum örgüsünde atomlar arası bağların gösterimi: (a) $T = 0$, b) $T > 0$ (Cafer T., 2000)

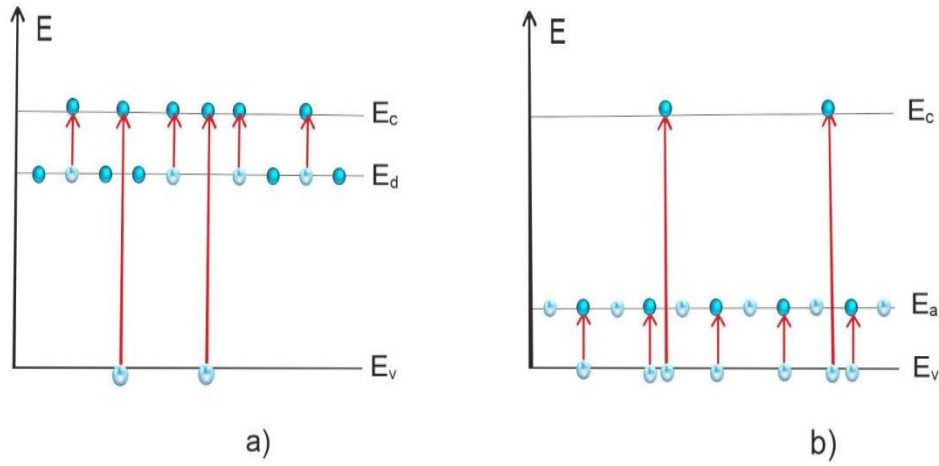
1.2.4.2. Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin büyük kısmı oda sıcaklığında iletkenlik katkı atomlarının etkisiyle değişmektedir. İletkenliği katkılarla belirlenen yarıiletkenler katkı yarıiletken olarak tanımlanır. Yüksek sıcaklıklarda katkıyla belirlenen iletkenlik saf iletkenliğe geçebilir. Silisyum yarıiletkeninde katkı iletkenliğin meydana gelme mekanizması göz önüne alınır. Silisyum örgüsünün bir düğümüne beşinci grup atomu olan fosforun P yerleştiği kabul edilir. Elektronların fosfor atomunun kabuklarında dağılımı $_{15}\text{P} (1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3)$ şeklindedir ve dış (valans) kabuğunda beş elektron ($3s^2 3p^3$) durumunda yerleşmektedir. Fosfor atomu silisyum örgüsünün bir düğümünü işgal ettiğinde, fosforun dört valans elektronu komşu dört silisyum atomlarıyla kovalent bağlar oluşturmaktadır (Şekil 1.9.a). Fosforun beşinci elektronunun kovalent bağ kurmaya imkânı yoktur. Çünkü komşu silisyum atomlarının tüm elektronları bağlara yerleşmektedir. Bu sebeple beşinci elektron fosfora zayıf bağlıdır, çünkü bu elektron komşu pozitif yüklü silisyum iyonlarının

etkisi altındadır. Düşük sıcaklıklarda beşinci elektron fosfor atomunun etrafında bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise bu elektron fosforun etkisinden ayrılabilir ve sonra kristalde serbest hareket edebilirler.



Şekil 1.9. Silisyumdaki (a) donör ve (b) akseptör tipli katkı atomunun şematik görünümü (Caferov, 1998)



Şekil 1.10. (a) Donör ve (b) akseptör tipli yarıiletkenlerin bant diyagramları (Cafer T., 2000)

Fosforun iyonlaşma süreci nedeniyle, fosfor atomu pozitif yüklü iyonla çevrilir. Yarıiletkenle elektron veren katkı atomuna verici veya donör denir. İletkenliği donör katkısıyla karakterize olunan yarıiletkenle elektron veya *n*-tipi yarıiletken denir. *n*-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar ve azınlık yük taşıyıcıları deşiklerdir.

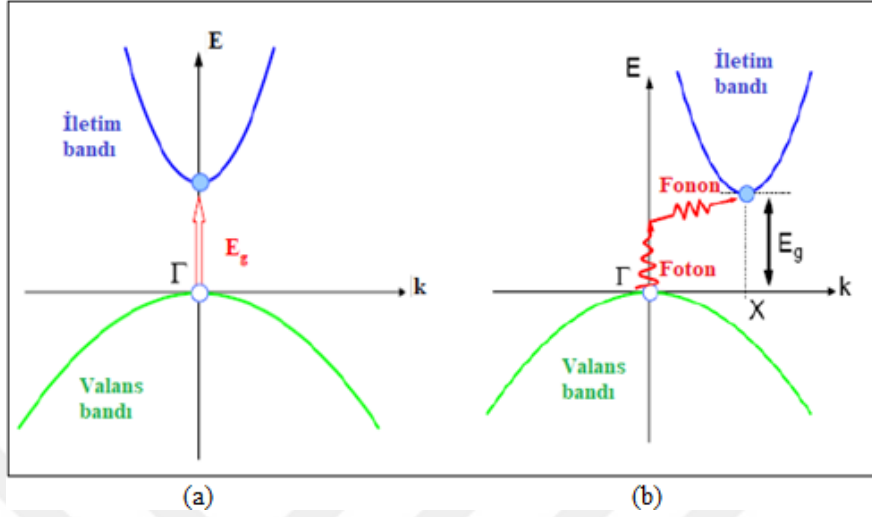
Donör tipli katkı, yarıiletkenin yasak bandının içinde izin verilmiş enerji düzeyinin oluşmasına yol açmaktadır (Şekil 1.10.a). Bu enerji düzeyi iletim bandının dibinden biraz aşağıda yerleşmektedir. Çünkü donör tipli fosfor atomunun iyonlaşma enerjisi (E_d) yarıiletkenin ana silisyum atomları arası kovalent bağların kopma enerjisinden (E_g) çok küçüktür.

Mevcut periyodik cetvelin üçüncü grubunda bulunan galyum (Ga) atomunun silisyumdaki değişiklikleri göz önüne alınır. Galyum atom kabuklarında elektronların dağılımı $_{31}\text{Ga} (1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1)$ şeklinde ve valans kabuğunda üç elektron ($4s^2 4p^1$) durumlarında yerleşmektedir. Dört değerlikli silisyum yarıiletkenle üç değerlikli galyum atomu girdiğinde, komşu silisyum atomlarının birinin bağı dolmamaktadır (Şekil 1.10.b). Galyum atomunun dolmamış bağına komşu silisyum atomundan bir elektron geçebilir. Bunun sonucunda, negatif yüklü galyum iyonu oluşur ve silisyum bağları ile hareket eden serbest deşik meydana gelir (Cafer T., 2000).

Yarıiletkenlerde elektronları alan katkı atomları alıcı veya akseptör olarak tanımlanır ve iletkenliği akseptör tipli katkı ile belirlenen yarıiletken, deşik veya *p*-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. *p*-tipi yarıiletkenle çoğunluk yük taşıyıcıları deşiklerdir ve azınlık yük taşıyıcıları elektronlardır. Akseptör tipli katkı, yarıiletkenin yasak bandının içinde (valans bandının tavanının üstünde) enerji düzeyi (E_a) oluşturur (Şekil 1.10.b). Akseptör atomlarının iyonlaşma süreci Şekil 1.10.b’de şekillerle gösterilmektedir. İyonlaşma sonucunda valans bandında serbest deşikler oluşmaktadır (Cafer T., 2000).

1.2.5. Doğrudan ve Dolaylı Bant Aralığı

Bant aralığı, valans bandının tepesi ile iletim bandının altı arasındaki minimum enerji farkını temsil eder, ancak değerklik bandının tepesi ve iletken bandın tabanı elektron momentumunun her zaman aynı değerkinde olmayabilir. Doğrudan bir bant aralığına (Şekil 1.11.a) sahip bir yarıiletkende, valans bandının tepesi ve iletken bandın altı, aşağıdaki şekilde olduğu gibi aynı momentum değerkinde meydana gelir. Dolaylı bir bant aralığına (Şekil 1.11.b) sahip bir yarıiletkende, valans bandının maksimum enerjisi, iletim bandının minimum enerjisinden farklı bir momentum değerkinde meydana gelir. İkisi arasındaki fark optik cihazlar için önemlidir. Yarıiletkenlerde bir foton bir elektron-deşik çifti üretmek için enerji sağlayabilir. Bir foton, doğrudan bantlı bir yarıiletkende bir elektron-deşik çiftini oldukça kolay bir şekilde üretebilir, çünkü elektrona çok fazla momentum verilmesi gerekmez. Bununla birlikte, bir elektron dolaylı bir bant aralığına sahip bir yarıiletkeninde bir elektron-delik çifti üretmek için bir fotonunun momentumunda da önemli bir değışiklik geçirmelidir. Bu mümkündür, ancak böyle bir elektronun enerji elde etmek için sadece fotonla değil, aynı zamanda momentum kazanmak veya kaybetmek için fonon adı verilen bir kafes titreşimiyle de etkileşime girmesi gerekir. Bu sebeple dolaylı bant aralığına sahip bir yarıiletkende süreç daha yavaş ilerler. Bunun sonucu olarak, galyum arsenit ve diğer doğrudan bant aralıklı yarıiletkenler, LED'ler ve yarıiletken lazerler gibi optik aygıtlar yapmak için kullanılabilir. (Gmş C., 1998)

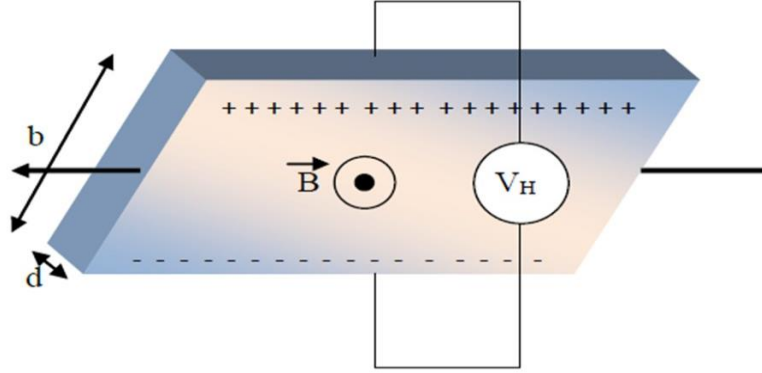


Şekil 1.11. (a) doğrudan ve (b) dolaylı bant aralığına sahip yarıiletkenler için bantlar arası optik geçişler (Gümüş C., 1998).

1.3. Hall Etkisi

Akım taşıyan bir iletken şekildeki gibi bir manyetik alan içine bırakılırsa manyetik alanın uyguladığı kuvvetten dolayı sapan elektronlar akıma ve manyetik alana dik bir potansiyel fark oluştururlar. Bu olaya Hall Etkisi denir ve ilk defa Edwin Hall tarafından 1879 yılında keşfedilmiştir. Hall Etkisi bize taşıyıcı yüklerin işareti ve yoğunluğu hakkında bilgi verdiği gibi manyetik alanın büyüklüğü de ölçülebilir.

Yük taşıyıcıları manyetik kuvvetin etkisinde iletkenin kenarlarına doğru itilir. Yüklerin kenarlarda toplanması elektriksel kuvvetin manyetik kuvvete eşit hale gelmesine kadar devam eder. Kenarlarda biriken yüklerin oluşturduğu potansiyel farka Hall potansiyeli (V_H) denir.



Şekil 1.12. Akım taşıyan iletkeni etkileyen manyetik alan ve yüklerin durumu (Tombak A., 2012).

Hall gerilimi,

$$V_H = \frac{IB}{ned} \quad (1.4)$$

ile ifade edilir.

Burada iletkenin geçen akım I ile gösterilmiştir, B uygulanan manyetik alan, n taşıyıcı yoğunluğu ve d ise iletkenin kalınlığıdır. Akım Ohm Kanunu'ndan $I = V/R$ ' dir. Öyleyse iletkenin direncini

$$R = \frac{l}{\sigma bd} \quad (1.5)$$

ile ifade edebiliriz. Burada l iletkenin boyu, b iletkenin genişliği ve σ iletkenliktir. Bu direnç değeri yine Ohm Kanunu'nda yerine yazılıp akım çekilirse

$$I = \frac{V\sigma bd}{l} \quad (1.6)$$

olur. Denklem 1.6'da akım değeri yerine yazılırsa Hall gerilimi denklem 1.7'deki gibi yazılır.

$$V_H = \frac{V \sigma b B}{neI} \quad (1.7)$$

Buna göre V_H deneysel olarak ölçüldüğünde taşıyıcı yoğunluğu bulunabilir.

$$n = \frac{V \sigma b B}{V_H I e} \quad (1.8)$$

İletkenlik hesaplanacak olursa

$$\sigma = ne\mu_H = \frac{\mu_H}{R_H} \quad (1.9)$$

Burada R_H Hall katsayısıdır ve denklem 1.10'daki gibi yazılır.

$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (1.10)$$

n -tipi yarıiletkenlerde ($n \gg p$) $R_H < 0$;

p -tipi yarıiletkenlerde ($p \gg n$) $R_H > 0$;

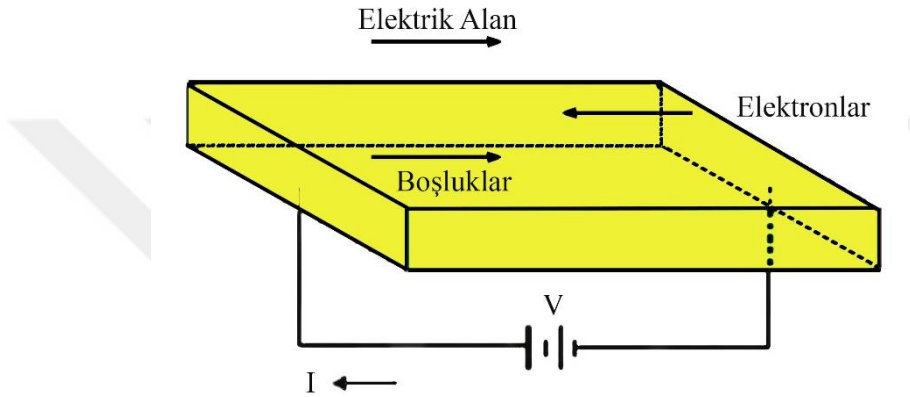
sonuç itibariyle Hall katsayısına bakarak malzemenin ne tür bir iletkenlik gösterdiğini bulabiliriz (Tombak A., 2012).

1.4. Mobilite

Mobilite (μ), yük taşıyıcılarının birim elektrik alan (E) başına ortalama sürüklenme hızı olarak adlandırılır.

$$\mu = \frac{|\vec{v}|}{|\vec{E}|} \quad (1.11)$$

Yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları elektronlar veya boşluklar olduğundan ortalama sürüklenme hızı iki tip için farklıdır. Elektrik alan uygulanan bir yarıiletkende serbest elektronlar uygulanan alana zıt yönde atomlar arasında rastgele bir şekilde hareket ederler. Boşluklar ise alan yönünde hareket etmektedir (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. Elektrik alanın etkisi altında elektronların ve boşlukların geçiş yönleri (Bar-Lev A., 1979).

Bu durumda toplam mobilité,

$$\mu = \mu_e + \mu_b = \frac{|\vec{v}_e|}{|\vec{E}|} + \frac{|\vec{v}_b|}{|\vec{E}|} \quad (1.12)$$

Elektronun elektrik alan yönündeki ortalama sürüklenme hızı,

$$\vec{v}_e = -\frac{e\tau_e}{m_e^*} \vec{E} \quad (1.13)$$

eşitliğiyle verilmektedir. Eşitlikteki eksi işareti hız vektörüyle alan vektörünün ters yöne sahip olduğunu gösterir. τ_e , elektronun çarpışmalar arasında harcadığı ort. serbest zamandır. Boşluğun sürüklenme hızı ise,

$$\vec{v}_b = \frac{e\tau_b}{m_b^*} \vec{E} \quad (1.14)$$

eşitliğiyle adlandırılır. Elektron ve boşluğun hızı (1.12) eşitliğinde yerlerine yazılırsa toplam mobilite,

$$\mu = \frac{e\tau_e}{m_e^*} + \frac{e\tau_b}{m_b^*} \quad (1.15)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Mobilite, yarıiletkenin sıcaklığa, cinsine ve saflığına bağlıdır. Fononların ve iyonize katkı atomlarının bulunması, serbest yüklerin ortalama serbest yollarını küçültür ve çarpışma sayısını azaltır. Bu durum mobilitenin azalmasına sebep olur (Bar-Lev A., 1979).

1.5. İletkenlik, Özdirenç, Hareketlilik

Bir elektrik alan altında bulunan yarıiletkenlerden geçen elektron ve deşik sürüklenme akım yoğunlukları

$$J_n = e.n.v_n \quad (1.16)$$

$$J_p = e.p.v_p \quad (1.17)$$

olarak verilir. Burada e elektron yüklü, v_n ve v_p sırası ile elektron ve deşik sürüklenme hızıdır. Yarıiletkenden geçen toplam akım yoğunluğu, bu ikisinin toplamı olacağından

$$J = e (nv_n + pv_p) \quad (1.18)$$

dir. “Birim elektrik alan başına geçen akım yoğunluğu” olarak tarif edilen iletkenliği bulmak için , (1.18) eşitliğinin her iki tarafı elektrik alan şiddeti E ye bölünürse

$$\sigma = \frac{J}{E} = e \left(n \frac{v_n}{E} + p \frac{v_p}{E} \right) \quad (1.19)$$

elde edilir. (1.19) eşitliğinde v_n/E ve v_p/E terimleri, birim alan başına sürüklenme hızını gösterir ve sırası ile elektron ve deşik hareketliliğini (μ_n ve μ_p) tanımlar. Şu halde (1.20) eşitliğini

$$\sigma = e (n \mu_n + p \mu_p) \quad (1.20)$$

şeklinde yazmak mümkündür. İletkenliğin tersi olarak tarif edilen öz direnç ifadesi ise

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e (n \mu_n + p \mu_p)} \quad (1.21)$$

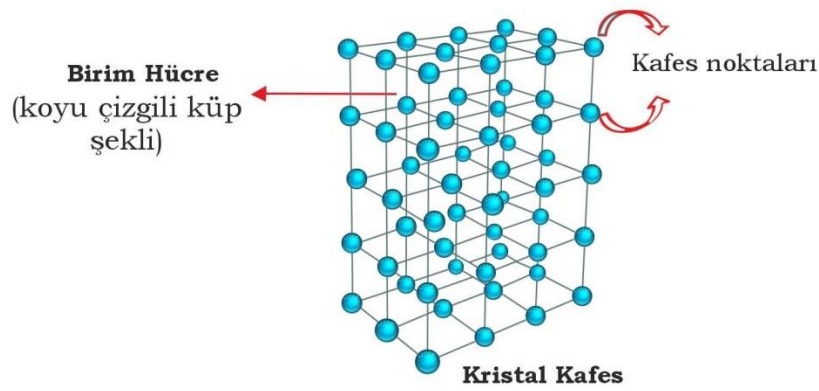
olur (Büget, 1984).

1.6. Kristal Yapısı ve Birim Hücreler

Atomların üç boyutlu olarak belirli geometrik düzene göre dizilimleri sonucu oluşan yapıya kristal yapı veya kristal kafesi adı verilir. Bir malzemenin kristal yapısı, kristal kafesi içerisindeki atomların dizilişi, kafesin boyutu ve kafesin şekline bağlı olarak belirlenir. Metalleri erittiğimiz zaman sıvı haldeki metal atomları düzensiz bir biçimde dağılmışlardır. Sıvı haldeki metal soğutularak

katılaştırıldığında ise, atomlar belirli bir geometrik düzene göre dizilerek kristal yapıyı meydana getirirler.

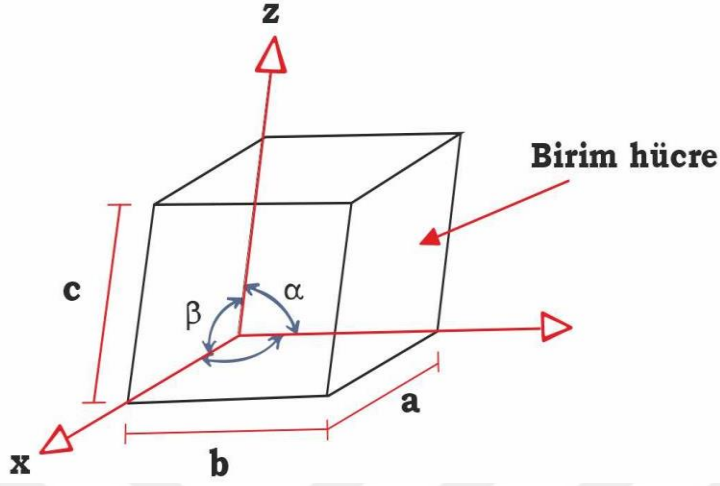
Kristal yapının tekrarlanan hacimsel en küçük birimine birim hücre denir. Kristal kafes birim hücrelerin yan yana gelmesiyle oluşur. Birim hücre kristal kafesin bütün geometrik özelliklerini taşıdığından birim hücrenin yapı düzeni bilinirse, kristal kafesinin de yapı düzeni de kolayca bulunur. şekil 1.14’de bir kristal kafesi ve birim hücresi gösterilmektedir.



şekil 1.14. Metal kristal kafesi, birim hücre ve kafes noktası (Uzun ve ark., 2003).

Kristal kafesi içerisinde atomların bulunduğu yerlere kafes noktaları denir. Atomlar birim hücrenin merkezlerinde, köşelerinde, her bir yüzeyinde veya yüzey kenarlarında bulunabilir. Dolayısıyla atomların bulundukları bu yerler kafes noktaları olarak tanımlanır.

Bir birim hücrenin geometrisi, iki farklı parametrenin etkileşimi sonucu bulunur. Bu parametrelerden birincisi x, y, z eksenleri veya birim hücre kenarları arasındaki α , β , γ açılarıdır. İkincisi ise a, b, c harfleri ile belirtilen birim hücre kenarlarının uzunluğudur. Birim hücrenin boyut ve şeklini tarif eden bu parametrelere, kafes parametreleri denir. şekil 1.15’de bir birim hücrenin kafes parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 1.15. x, y, z koordinat eksenlerine sahip bir birim hücrenin, kafes parametrelerinin (kenar uzunlukları ve eksenler arası açılar) gösterilmesi (Uzun ve ark., 2003).

Kafes parametrelerinin farklı kombinasyonları sonucu ortaya çıkan ve farklı geometrik şekillere sahip kristal sistemleri mevcuttur. Kübik, hegzagonal, tetragonal, rombohedral, ortorombik, monoklinik ve triklinik olmak üzere yedi adet kristal sistemi bulunmuştur.

Yedi kristal sistemine ait toplam 14 ayrı kristal kafes geometrisi, Şekil 1.16.'da gösterilmiştir. Çizelge 1.1'de de bu kristal sistemlerinin kafes parametreleri ve arasında bulunan ilişkiler gösterilmektedir.

Bu yedi kristal sistemden bazılarının farklı kristal kafesi tipleri olması nedeniyle, metallerde karşılaştırılan toplam 14 adet farklı kristal kafes vardır. Kübik kristal sistemin basit kübik, yüzey merkezli kübik ve hacim merkezli kübik olmak üzere üç farklı tipi vardır. Tetragonal kristal sistemin basit tetragonal ve hacim merkezli tetragonal olmak üzere iki farklı tipi mevcuttur. Ortorombik kristal sistemin basit ortorombik, hacim merkezli ortorombik, taban merkezli ortorombik ve yüzey merkezli ortorombik olmak üzere dört farklı tipi vardır. Monoklinik

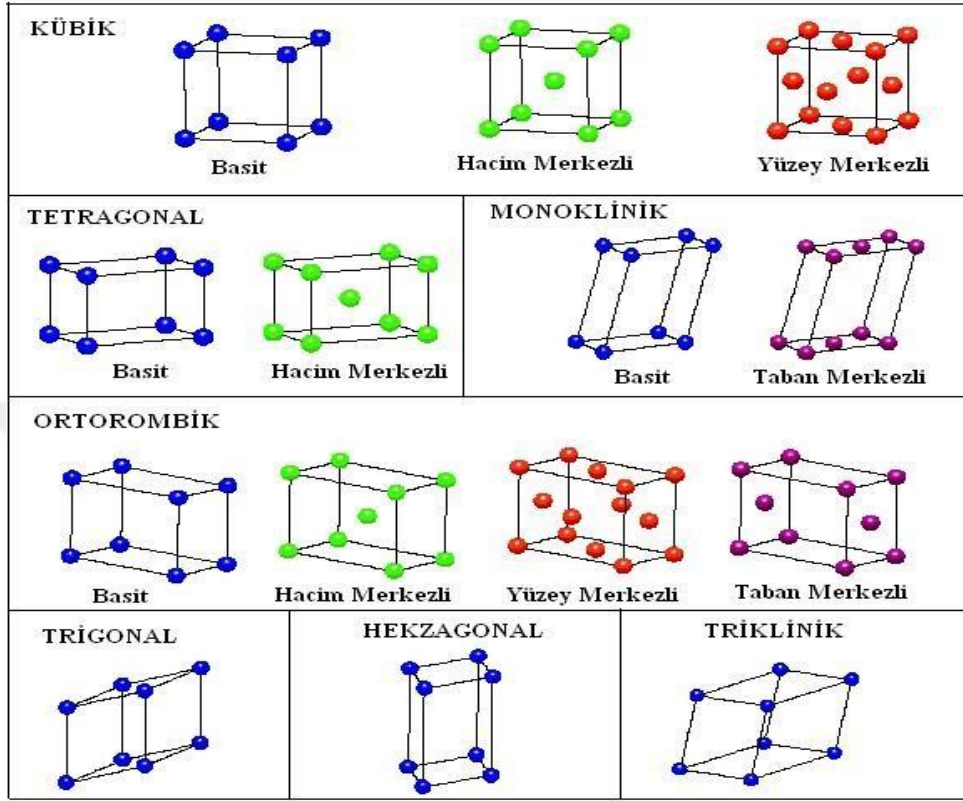
kristal sistemin taban merkezli monoklinik ve basit monoklinik olmak üzere iki farklı tipi bulunur (Uzun ve ark., 2003).

1.7. Kristal Kafes Yapıları

On dört adet kristal kafes olmasına rağmen metalik malzemelerde en fazla gözüken kübik ve hegzagonal sıkı paket kristal kafesleridir. Bu nedenle iki kafes sistemini geometrik yapısı, kafes parametreleri incelenecek ve birim hücrenin bulundurabileceği atom sayıları hesaplanacaktır

Çizelge 1.1. Yedi Farklı kristal sistemine ait kafes parametreleri ve aralarında bulunan ilişkiler (Uzun ve ark., 2003).

Kristal Sistemi	Kafes Parametreleri	
	Kafes Kenarları Arasındaki İlişki	Eksenler Arası Açı Değerleri
Kübik Kafes	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Hegzagonal Kafes	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma = 120^\circ$
Tetragonal Kafes	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ortorombik Kafes	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Triklirik Kafes	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Monoklinik Kafes	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Rombohedral Kafes	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$



Şekil 1.16 Yedi Kristal sisteminde bulunan toplam 14 farklı kristal kafes geometrisi (Uzun ve ark., 2003).

1.7.1. Kübik Kristal Sistemi

Kübik kristal sisteminde kafes geometrisi, kenarları eşit bir küp şeklindedir. Kübik kristal sisteminde atomlar üç farklı şekilde dizilerek basit kübik, yüzey merkezli kübik ve hacim merkezli kristal kafeslerini meydana getirebilirler (Uzun ve ark., 2003).

1.7.1.1. Basit Kübik (BK) Kafes ve Atomlarının Sayısı

Şekil 1.17’de gösterildiği gibi, basit kübik (BK) kafeste atomlar küpün her bir köşesinde yerleşir. Dolayısıyla her bir köşede bir atom olursa, birim hücrede

toplam sekiz atom vardır. Basit kübik kafeste birim hücredeki tüm kenarların uzunluğu birbirine eşit olup, eksenleri arasındaki bütün açılar 90° dir. Kararsız bir atom dizilişi sebebiyle tabiatta bu kafese sahip bir madde yoktur.

Birim hücredeki atom sayısını bulmak için, komşu birim hücre ile paylaşılan atom sayısı göz önünde bulundurulur. Genel bir ifade şekli olarak kübik sistem için toplam atom sayısı şu şekilde ifade edilir:

$$N_T = N_{\text{köşe}} \frac{1}{8} + N_{\text{yüzey}} \frac{1}{2} + N_{\text{iç}} \frac{1}{1} + N_{\text{kenar}} \frac{1}{4} \quad (1.22)$$

N_T = Birim hücredeki toplam atom sayısı

$N_{\text{köşe}}$ = Birim hücrenin köşelerinde bulunan atom sayısı

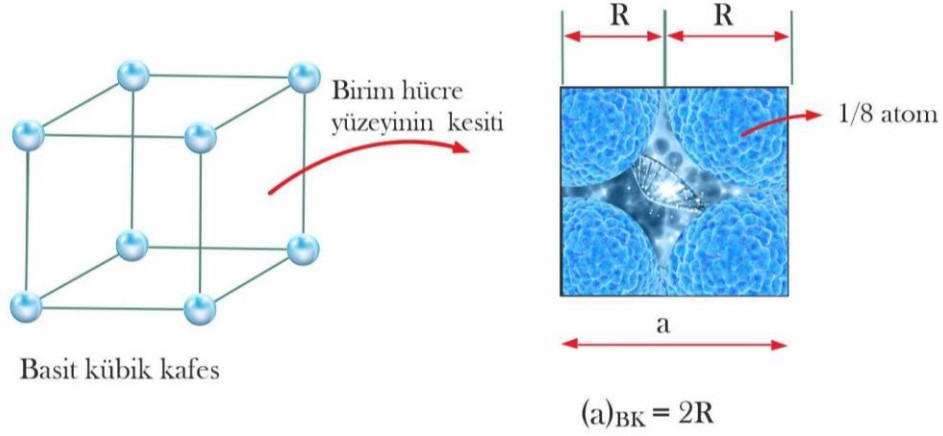
$N_{\text{yüzey}}$ = Birim hücrenin yüzeylerinde bulunan atom sayısı

$N_{\text{iç}}$ = Birim hücrenin iç kısmında bulunan atom sayısı

N_{kenar} = Birim hücrenin kenarlarında bulunan atom sayısı

Şekil 1.17’de görüleceği gibi, birim hücredeki a kenar uzunluğu (kafes sabiti) ile atom yarıçapı (R) arasındaki bağıntı vardır. Kafes sabiti a ile atom yarıçapı arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir:

$$a_{\text{BK}} = 2R \quad (1.23)$$



Şekil 1.17. Basit kübik kafes yapısının birim hücresinde atomların yerleştiği yerler, atom sayısı ve kafes sabiti ile atom yarıçapı arasındaki ilişkinin gösterilmesi (Uzun ve ark., 2003).

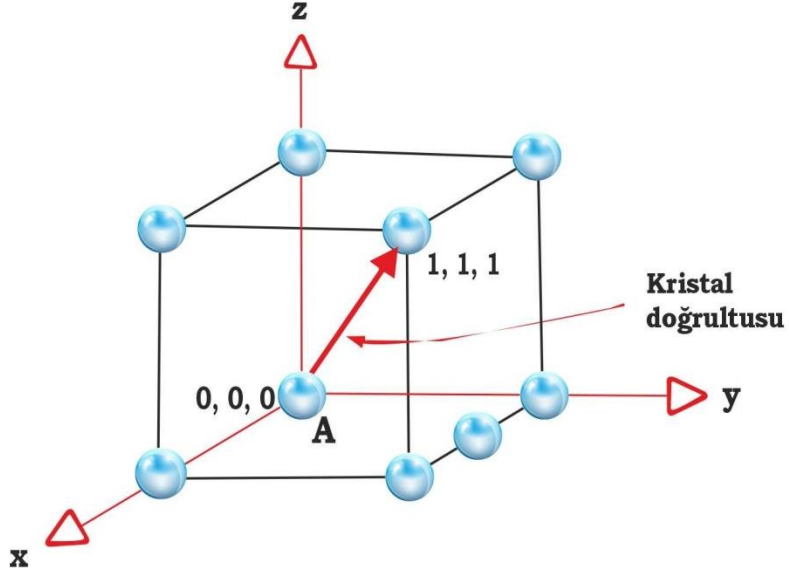
1.8. Kristal Doğrultuları ve Düzlemleri

Kristal yapılarının farklı özelliklerini inceleyebilmek için kristal doğrultularını ve düzlemlerini belirlemek gerekir. Ayrıca kristal yapısı içerisindeki atomlar kristal düzlemleri boyunca dizilirler. Bu atom dizilişinin sıkı ve seyrek olması metalin özelliklerini değiştirmektedir. Örneğin, metaller atomların çok sıkı dizildikleri kristal düzlemleri ve kristal doğrultuları boyunca şekil değiştirirler. Bu nedenle kristal düzlemlerini ve doğrultularını iyi tanımak oldukça önemlidir (Uzun ve ark., 2003).

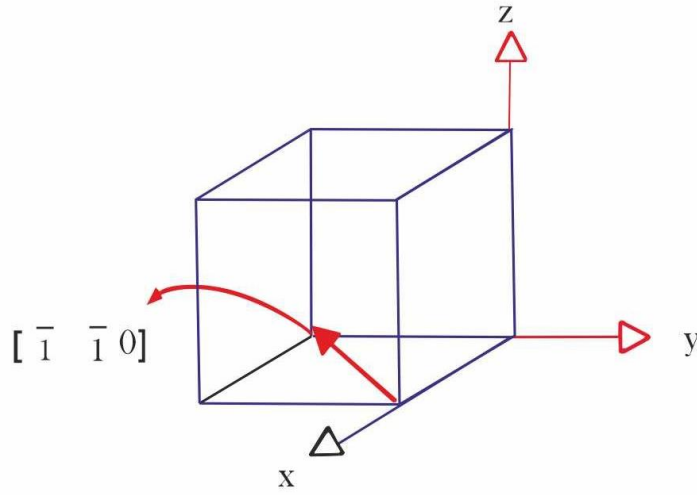
1.8.1. Kristal Doğrultuları

Kristal Doğrultuları, miller indisleri yardımıyla bulunur. Şekil 1.18’de x, y, z koordinat sistemi üzerine yerleştirilmiş bir kristal kafes birim hücresi gösterilmektedir. Kristal doğrultusunu bir doğrultu vektörü olarak düşünün. Birim hücre içindeki herhangi bir doğrultunun belirlenebilmesi için, ilk yapılacak iş, bu doğrultu vektörünün başlangıç ve bitiş noktalarının koordinatlarını belirlemektir.

Şekilde de görüleceği gibi, A noktası kristal doğrultusunun başlangıç noktası ve B noktası ise bitiş noktasıdır (ok işaretinin olduğu nokta).

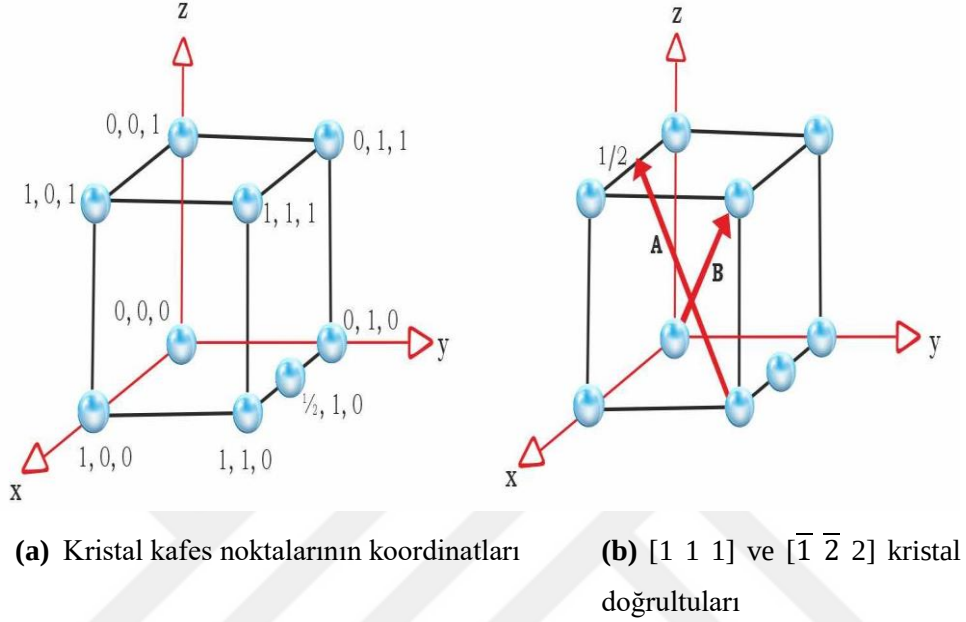


Şekil 1.18. Koordinat sistemi üzerine yerleştirilmiş bir kristal kafes birim hücresi ve örnek bir kristal doğrultusu (Uzun ve ark., 2003).



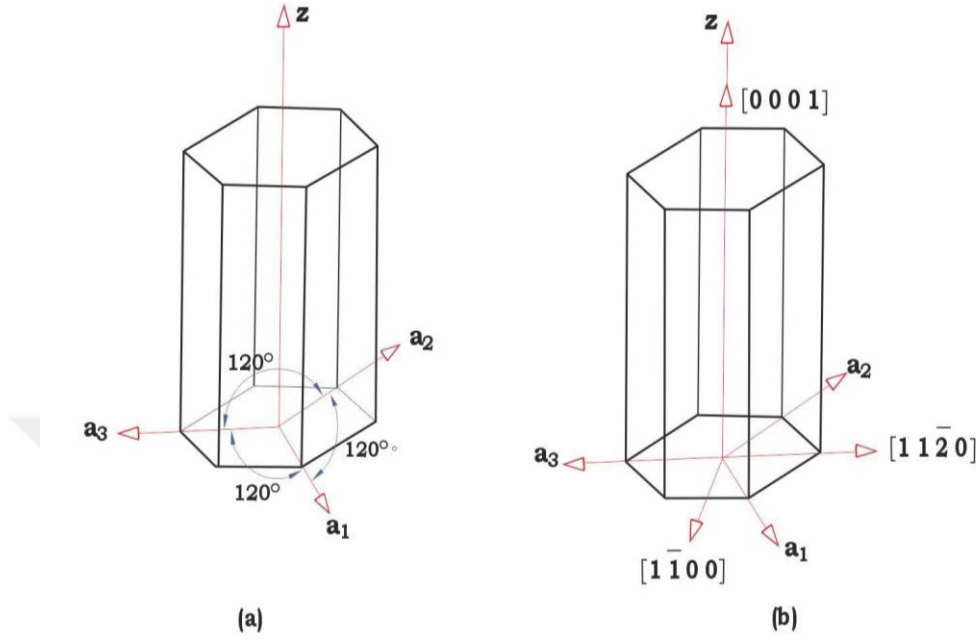
Şekil 1.19. Eksi bölgede birleşen veren kristal doğrultusu (Uzun ve ark., 2003).

Şekil 1.20. (a)'da kristal kafes noktalarının koordinatları, 1.20. (b)'de gösterilen A ve B kristal doğrultularının Miller indisleri (Uzun ve ark., 2003).



Şekil 1.20. Kübik kafesin kafes noktalarının koordinatları ve $[1 \ 1 \ 1]$ ve $[\bar{1} \ \bar{2} \ 2]$ kristal doğrultuları (Uzun ve ark., 2003).

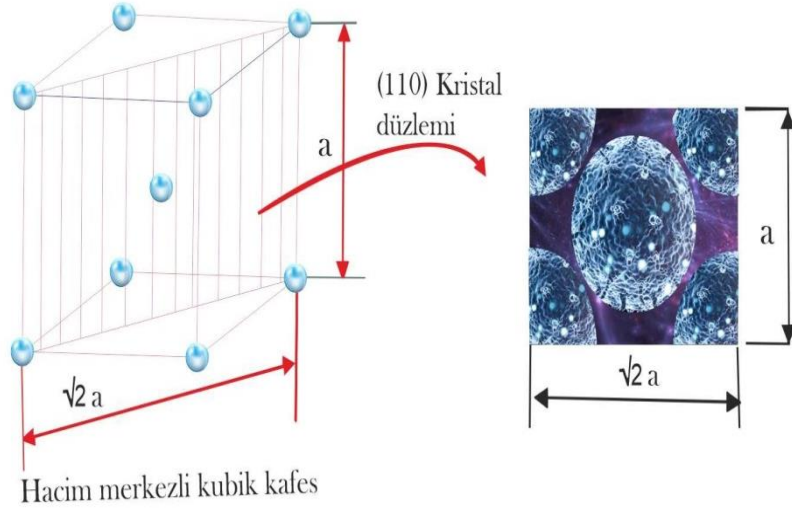
Hegzagonal kafesin kristal doğrultularının Miller indislerini bulurken x, y, z üç eksen takımı yerine, a_1 , a_2 , a_3 , z olmak üzere dört eksen takımı kullanılır. Dolayısıyla kristal doğrultusu üç rakamla değil, dört rakamla ifade edilir. Şekil 1.21 (a)'da hegzaonal kristal kafesi için kullanılan eksen takımları gösterilmektedir. Şekil 1.21 (b)'de de hegzaonal kafese ait çeşitli kristal doğrultu örnekleri verilmektedir (Uzun ve ark., 2003).



Şekil 1.21. (a) Hegzagonal kristal kafesi için kullanılan eksen takımları (Uzun ve ark., 2003). (b) Hegzagonal kafese ait çeşitli kristal doğrultu örnekleri (Uzun ve ark., 2003).

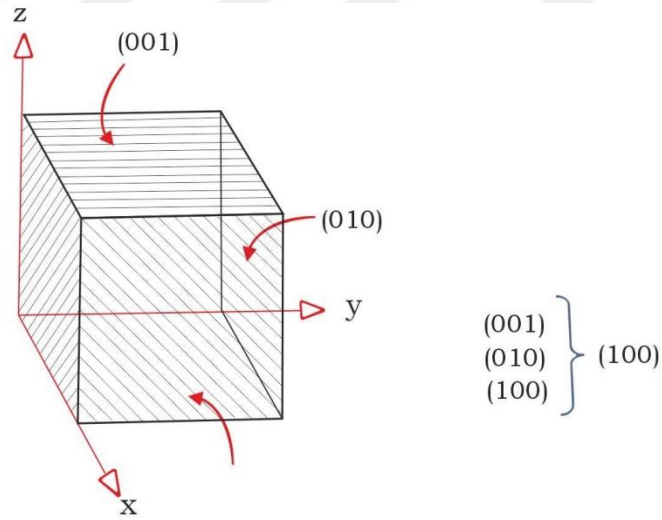
1.8.2. Kristal Düzlemleri

Kafes içerisinde atomlar kristal düzlemleri boyunca dizilirler. Atom dizilişlerinin sıklık veya seyrekliğine göre, malzeme özellikleri değişir. Şekil 1.22’de hacim merkezli kübik kafeste $(1\ 1\ 0)$ kristal düzlemi ve bu düzlem içerisinde bulunan atomlar gösterilmektedir.



Şekil 1.22. Hacim merkezli kübik kafeste (110) kristal düzlemi ve bu düzlem içerisinde bulunan atomlar (Uzun ve ark., 2003).

Kristal düzlemlerini tanımlarken yine Miller indislerinden yararlanılır.



Şekil 1.23. Kübik bir kafeste {100} kristal düzlemi ailesi (Uzun ve ark., 2003).

1.9. X Işınları

X-ışınları, Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından 8 Kasım 1895'te bulunmuştur. Bu tarihte Würzburg'da fizik profesörü olan W.C. Röntgen (1845–1923) tümüyle havası boşaltılmış vakum tüp kullanarak gazlarda elektriğin iletilmesi konusunda deneyler yaparken raslantı sonucu; baryum platin siyanür kaplı bir kağıt yaprağının, yakınında duran tamamen siyah karton kaplı bir katot ışını tüpünü açtığında ışıdamaya başladığı fark edildi. Katot ışını tüpünde elektronlar vakumda, bir elektrik alanıyla hızlandırılmıştır. Bu elektronların tüpün cam ucuna vurmaları, tuzun parlamasına yol açan girici X-ışınlarını oluşturmuştur. Bu ışığın doğası tam olarak bilinmediğinden X-ışını olarak adlandırılan bu ışınlar, günümüzde de Röntgen'in adına ithafen aynı şekilde kullanılmaktadır.

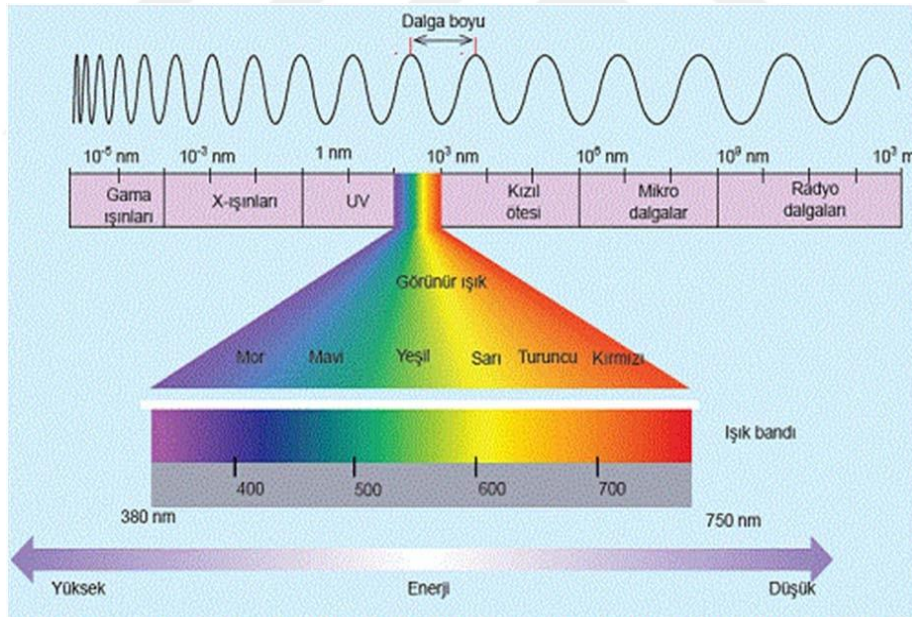
X-ışınlarının doğru çizgiler üzerinde yol aldıkları, elektrik alan ve manyetik alanlardan etkilenmedikleri, saydam olmayan malzemeden kolaylıkla geçtikleri, fosfor gibi ışıdayan maddelerin ışıdamasına sebep oldukları ve fotoğraf filmlerinde iz bıraktıkları bulunmuştur. Başlangıçtaki elektronların hızı arttıkça, oluşan X-ışınları da o kadar girici ve X-ışını hüzmesinin şiddeti de o kadar fazla olmaktadır.

Saydam olmayan cisimlerin içyapısını tetkik etmek isteyen fizikçiler ve mühendisler tarafından X-ışınları kullanılmaya başlanmıştır. Cismin bir tarafına bir X-ışını kaynağı ve diğer tarafına da fotoğraf filmi koyarak, cismin daha az yoğun kısımları daha yoğun kısımlarına göre daha çok X-ışınları geçmesine müsaade ettiğinden bir gölge fotoğraf veya radyoğraf elde edilmiştir. Bu sayede kırılan bir kemikteki kırık veya metal dökümündeki çatlağın yeri bulunmuştur.

1912'ye kadar X-ışınlarının gerçek doğası belirlenmemiştir. 1912'de X-ışınlarının dalga boylarını ölçmek için bir metot geliştirilmiştir. Bu amaç için bir difraksiyon deneyinin ideal olacağı düşünülmüştür; ancak difraksiyon ağının gelen X-ışını demetini difraksiyona uğratabilmesi için dalga boyuyla difraksiyon ağındaki çizgiler arası mesafenin mukayese edilebilir mertebede olması gerekir ve X-ışınlarının gerektirdiği darlıkta aralıklarla bir difraksiyon ağını yapmak o tarihte

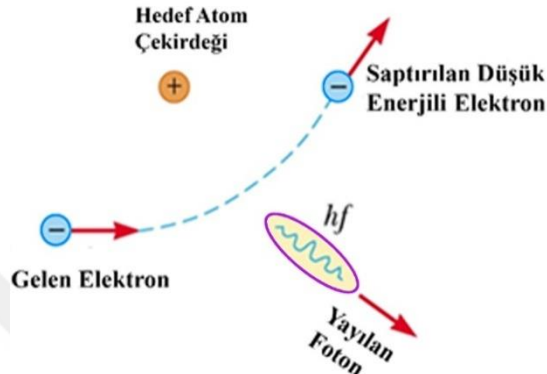
mümkün değildir. Bu zorluğu aşmak için Max Von Laue, X-ışınları için öngörülen dalga boylarının kristallerdeki iki komşu atom arasındaki uzaklıkla kıyaslanabileceğini görmüştür ve örgüleri üç boyutlu difraksiyon ağı gibi davranacak olan kristallerin X-ışınlarını difraksiyona uğratmak için kullanılmalarını önermiştir. Ertesi yıl yapılan deneylerde, X-ışınlarının 0.0013 ile 0.048 nm arasında dalga boylarına sahip olduğu bulunmuştur. Bunlar görünür ışığın dalga boylarının 10^{-4} 'ü kadar olduğundan X-ışını fotonları görünür ışıktan 10^4 kat kadar daha fazla enerjiye sahiptir.

Dalga boyları 0.01 ile 10 nm civarına kadar olan elektromanyetik ışınlamalar, X-ışınları kategorisine girmiştir. Bu kategorinin sınırları keskin değildir: Kısa dalga boyu ucu gama ışınlarıyla, uzun dalga boyu ucu ise morötesi ışıkla karışır (Özyetiş, 2005).



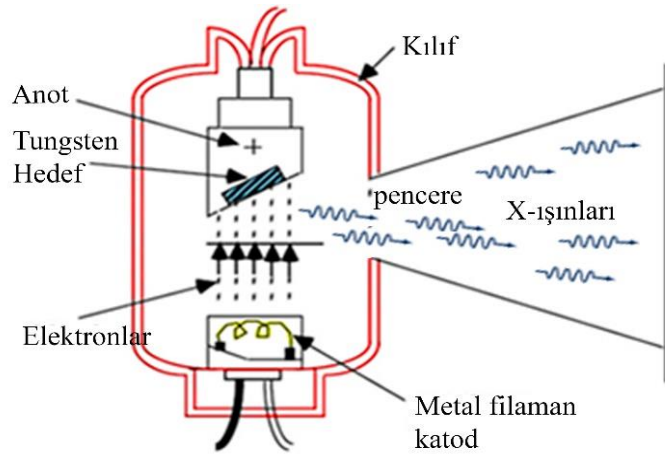
Şekil 1.24. X-ışınları elektromanyetik spektrumda gama ışınları ile ultraviyole (mor ötesi) ışınlar arasında kalır (Arslan, 2010).

Sürekli X-ışınları, bir atoma yaklaşan elektronun büyük bir ivmeyle frenlenmesi veya atom çekirdeği alanında ivmeli hareket yapması sonucu oluşmuştur (Şekil 1.25).



Şekil 1.25. X-ışını oluşumunun şematik gösterimi (Arslan, 2010).

Böyle bir radyasyon elde etmek için, havası boşaltılmış cam tüpün bir ucunda, elektrik akımı geçirilerek ısıtılmış iletken telden oluşan katot (negatif elektrot), diğer ucundaysa ısıya dayanıklı hedef levha olarak anot (pozitif elektrot) bulunan X-ışını tüpü kullanılmıştır (Şekil 1.26).



Şekil 1.26. X-ışını tüpünün şematik gösterimi (Arslan, 2010).

Tungsten materyalinden yapılmış olan katot, ısıtıldığında elektron salmıştır. Anot ve katot arasında uygulanan yüksek potansiyel farkı, elektronları anoda veya hedef metale doğru sürüklemiştir. Sürüklenen elektronlar çok büyük bir hızla hedefe çarpmıştır. Yüksek hızlı elektronlar metal hedefe çarptıklarında enerjilerini aktararak foton yayınlarlar ve hedef maddesinin X-ışınlarının sürekli spektrumunu ortaya çıkarmıştır. Oluşan X-ışınlarının dalga boyu, tüp gerilimine bağlı olarak değişmiştir. Ancak hedef metalden bağımsızdır. 35 kV'de molibden hedef metali ile elde edilen spektrumun dalga boyu ile aynı gerilim değerinde tungsten metali ile elde edilen dalga boyu aynıdır. X-ışını demetindeki en büyük enerjili fotonun enerjisi, kendisini oluşturan elektronun kinetik enerjisine eşittir. Bir X-ışını fotonunun enerjisi onun dalga boyuna

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.24)$$

eşitliği ile verilen Einstein bağıntısıyla bağlıdır (Cullity, 1967).

X-ışınları bir metalin kristal yapısını, kristal parametrelerini ve düzlemler arası mesafeleri belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Ayrıca bilinmeyen bir malzemenin X-ışınları analizi yapılarak, hangi malzeme olduğu tespit edilebilir.

X-ışınları dalga boyu (λ) bilinen X-ışınları kristal yapılı bir maddeye çarptığı zaman, bu X-ışınları kristal düzlemlerinde bulunan atomlar tarafından belirli bir açıda yansıtılırlar. Şekil 1.27'de atom düzlemlerinde X-ışını yansıması gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi, A-A' ve B-B' olarak adlandırılan birbirine paralel ve aynı Miller indislerine sahip kristal düzlemlerini düşünelim. Bu iki düzlem arasındaki mesafe d_{hkl} olarak tanımlanmaktadır. h, k, l harfleri bitişik olarak ifade edilen Miller indislerini gösterir. Bilinen dalga boyuna sahip X-ışını θ açısı ile kristal düzlemindeki bir atoma çarparak, yine θ açısı yapacak şekilde yansır. Şekil 1.27. deki 1 ve 2 numaralı X-ışınları, H ve U atomlarına çarparak, 1'

ve 2' numaralı ışın olarak yansımakta olduğu gösterilmektedir. Gönderilen X-ışınları, Bragg kanunu olarak bilinen aşağıdaki eşitliğe göre yansır:

$$\lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta \quad (1.25)$$

λ = X-ışını dalga boyu(Å)

d_{hkl} = Kristal düzlemleri arasındaki mesafe (hkl , Miller indisleridir) (Å)

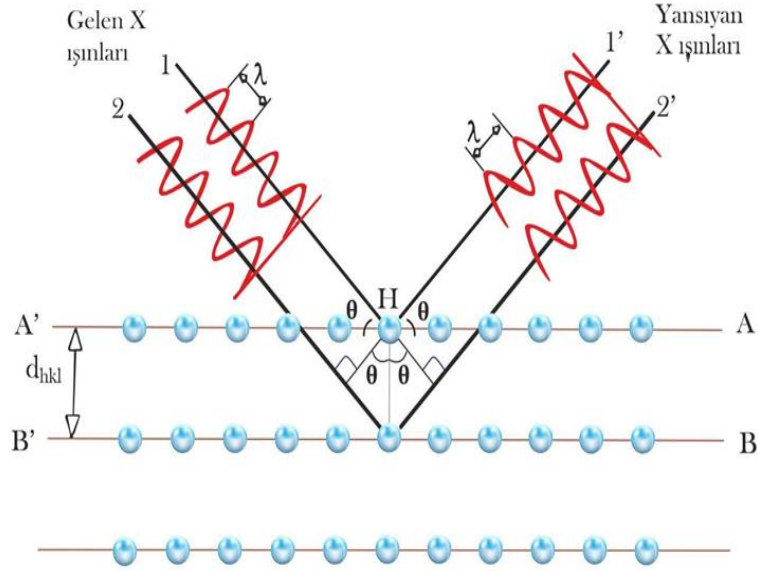
θ = X-ışınının yansıma açısı (derece)

Kübik kristal yapıya sahip metallerde kristal yapıya sahip metallerde kristal düzlemleri arasındaki mesafe aşağıdaki eşitlikle verilir (a: kafes sabitidir) :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (1.26)$$

Çizelge 1.2. Düzlemler arasındaki uzaklık ve birim hücrelerin hacimleri. (Neamen, 2011)

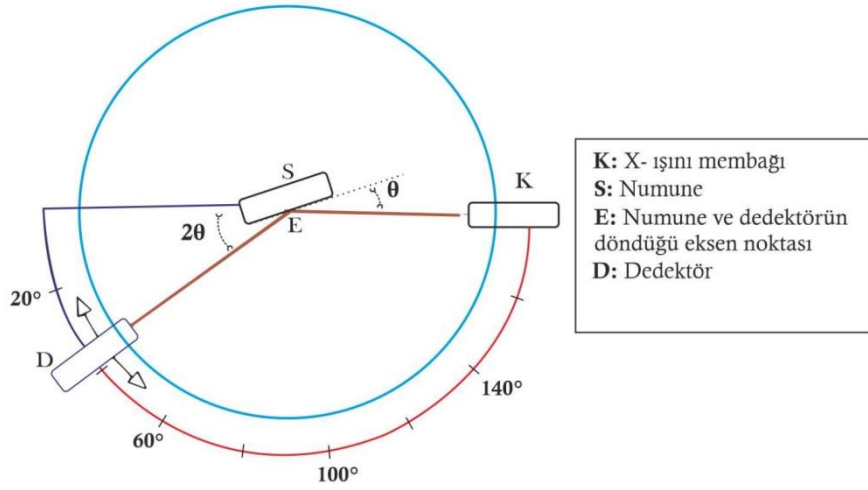
DÜZLEMLER ARASI UZAKLIK	
Kübik	$d^2 = \frac{a^2}{h^2 + k^2 + l^2}$
Tetragonal	$d^2 = \frac{a^2}{h^2 + k^2} + \frac{c^2}{l^2}$
Ortorombik	$d^2 = \frac{a^2}{h^2} + \frac{b^2}{k^2} + \frac{c^2}{l^2}$
Heksagonal	$d^2 = \frac{3}{4} \left(\frac{a^2}{h^2 + hk + k^2} \right) + \frac{c^2}{l^2}$
Monoklin	$d^2 = \sin^2 \beta \left(\frac{a^2}{h^2} + \frac{b^2}{k^2 \sin^2 \beta} + \frac{c^2}{l^2} - \frac{ac}{2hl \cos \beta} \right)$
BİRİM HÜCRE HACİMLERİ	
Kübik	a^3
Tetragonal	$a^2 c$
Ortorombik	abc
Heksagonal	$((\sqrt{3}a^2 c)/2) = 0.866 a^2 c$
Monoklin	$abc \sin \beta$



Şekil 1.27. Atom düzlemlerinde X-ışını yansıması (Uzun ve ark., 2003).

En yaygın olarak kullanılan X-ışını analizi tekniğinde, kristal yapıya sahip toz halindeki partiküllerin sıkıştırılmasından oluşturulan numuneye, dalga boyu bilinen X-ışınları çarptırılır. Partiküller gelişi güzel dağıldığı için, mümkün olabilecek tüm kristal düzlemlerinden X-ışını yansıması meydana gelecektir. Böylece kristal yapıli partiküller için bir X-ışını yansıma şablonu oluşturulur.

Numunelerdeki X-ışını yansımasının hangi yansıma açılarında meydana geldiğini belirlemek için, Şekil 1.28’de şematik olarak gösterilen difraktometre kullanılır. Difraktometre içine yerleştirilen numuneye, şekilde T ile işaretlenen yerden X-ışını gönderilir. Gönderilen X-ışınları numunedeki kristal düzlemlerindeki atomlara çarpınca yansır. Yansıyan X-ışınları hareket halindeki dedektör tarafından 2θ açılarında kayıt edilirler (Uzun ve ark., 2003).



Şekil 1.28.X ışını difraktometrenin şematik gösterimi (Uzun ve ark., 2003).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bakır (II) asetat kaynağı ve sol-jel yöntemi kullanılarak *p*-tipi ince film transistörleri (TFT) elde edilmiştir. Sol-jel yöntemi ile başlangıçta Cu üretildi daha sonra Cu₂O ve CuO sinterleme yolu ile oksitlendi. Bu işlemler, 500 °C'den yüksek olmayan sıcaklıklarda gerçekleştirildi. Sol-jel yöntemi ile hazırlanmış bakır oksit tabakasının film morfolojisini bulmak için öncü çözeltiye ilave su eklenmiştir. Su da alkoksit oranı arttıkça, hidroliz derecesinin arttığı ve böylece CuO ve Cu₂O'nun tanecik boyutlarının arttığı belirtilmiştir. Elde edilen CuO ve Cu₂O *p*-tipi iletkenlik sergilediği bildirilmiştir (Jang J. ve ark., 2016).

Ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) yöntemi ile Cu₂O ince filmleri oluşturulmuştur. Cu₂O ince filmleri atmosferik koşullarda büyütülmüş ve vakumsuz ortamda karakterize edilmiştir. Oksijen ortamında çökeltme sonrası tavlama, CuO ince filmlerin oluşumuna neden olmuştur. *p*-tipi bakır oksit tabakası ve *n*-tipi SnO₂ nanopartikül tabakası ile pn-eklemleri oluşturulmuştur. Taramalı tünelleme spektroskopisi (STS) ölçümlerinden, malzemelerin Fermi enerjilerine göre bant kenarları tespit edilmiştir. Merdiven benzeri bir enerji seviyesine sahip NiO / Cu₂O / ZnO / SnO₂ farklı eklem cihazları, elektronların ve deşiklerin zıt elektrotlar ile kolay taşındığı bildirilmiştir. Bakır oksit ince film güneş pillerinin enerji veriminin %1'den fazla olduğu bildirilmiştir (Chatterjee S. ve ark., 2016).

Bakır oksit (Cu₂O) ve bakır oksit (CuO) yapıları, titanyum yüzeyler üzerinde elektrolizle kaplanmış bakır (Cu) kaplamaların ısı oksidasyonu ile hazırlanmıştır. 200 ile 600 °C arasındaki farklı tavlama sıcaklıklarının Cu₂O ve CuO yapılarının morfolojisi, kristal yapısı ve fotokatalitik aktivitesi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Fotokatalizörler, X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edildi. Örneklerin fotokatalitik aktiviteleri, UV ışığı ışıması altında metilen mavisinin (MB) bozunması ile incelenmiştir. Spektroskopik analiz UV-vis spektrofotometre ile incelenmiştir.

Sonuçlar, numunelerin mikroyapısının ve yüzey morfolojisinin farklı tavlama sıcaklıklarında önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. 500 ° C'de tavlanan numune en yüksek fotokatalitik aktiviteyi sergilediği görülmüştür (Yurddaskal M. ve ark., 2016).

Polikristal bakır oksit ince filmler, atmosferik ortamda kimyasal depolama yöntemi ile 280 ° C'nin üzerindeki sıcaklıkta hazırlanmıştır. Kaynak malzemeler bakır dipivaloilmetanat ve oksijendir. Deneyden, iki tür filmin, yani Cu₂O ve CuO'nun oksijen kısmi basıncını kontrol ederek büyütüldüğü gösterilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu, X-ışını fotoelektron spektroskopisi, X-ışını kırınımı ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometresi ile film kalitesine ilişkin bir dizi karakterizasyon yapılmış ve üretilen filmler üzerinde güneş ısısal dönüşüm performansı da belirlenmiştir. Sonuçlar, iyi kristalize edilmiş CuO filmin, ışığın optik olarak anizotropik monoklinik yapı boyunca saçılması nedeniyle daha düşük kızılötesi geçirgenliğe sahip olduğunu göstermiştir (Maruyama T., 1998).

Sol jel yöntemi ile farklı fırınlama sıcaklıklarında bakır oksit ince filmleri CuCl₂ 2H₂O kaynağı kullanılarak elde edilmiştir. Filmlerin XRD çalışmaları yapılmıştır. 360 ° C'de Cu₂O fazı ve 400–500 ° C'de ise CuO fazı elde edilmiştir. Optik enerji bant değerleri optik soğurma yolu ile bulunmuştur. Cu₂O ve CuO için sırasıyla 2.1 eV ve 1.9 eV olarak hesaplanmıştır (Ray S.C., 2001).

Nanokristal Cu₂O ince filmleri aktif reaktif buharlaştırma tekniği ile sentezlenmiştir. Bu filmlerin yapısal ve optik özellikleri X ışını kırınımı ve fourier transform spektrometresi, taramalı elektron mikroskobu ve UV-VIS-NIR spektrofotometresi ile yapılmıştır. Bu filmlerin nanokristal boyutları depolama parametreleriyle değişmiştir. Optik çalışmalar, bu filmlerin nanokristal boyutu ve stokiyometrisi ile yığın değerinden optik absorpsiyon kenarında doğrudan izin verilen bir geçiş ve bir kayma olduğunu göstermektedir. Bakır oksit filmlerin kübik fazda olduğu görülmüştür. (Balamurugan B. ve ark., 2001).

Cu₂O ince filmler, kimyasal biriktirme yöntemi ile cam alttabanlar üzerinde büyütülmüştür. Cu₂O ince filmlerin optik geçirgenlikleri, oda sıcaklığında

400–900 nm aralığında %3–8 olarak ölçülmüştür. Cu_2O ince filmlerin bant aralığı, optik geçirgenlik değerleri yardımıyla 2.1 eV olarak hesaplanmıştır. X ışını kırınım spektrumları, filmlerin polikristalin olduğunu göstermiştir. Cu_2O için Van der Pauw yöntemi ile ölçülen direnç değerleri yaklaşık $10^3 \Omega\text{cm}$ bulunmuştur (Hames Y. ve ark., 2004).

Bakır oksit (Cu_2O) ince filmler, potansiyostatik elektrodpozisyon yoluyla Cu ve kalay oksit kaplı cam alttabanlar üzerinde hazırlanmıştır. Optimum çökeltme parametreleri aralığı deneysel olarak araştırılmıştır. X-ışını kırınım çalışmaları ile filmin tek fazlı kübik yapıda olduğu bulunmuştur. Çalışmalar pH'ın 9 da kristalliğin arttığı ve tek fazlı kübik filmler ortaya çıkarmıştır. Cu_2O filmine ait (2 0 0) pikinin tercihli yöneliminin $30\text{--}70^\circ \text{C}$ aralığında banyo sıcaklığı ile arttığı bulunmuştur. Tavlamanın tercih edilen yönelim, tanecik boyutu ve optik bant aralığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Fotoelektrokimyasal (PEC) güneş pillerinde fotokatot olarak depolanmış ve tavllanmış p- Cu_2O filmlerin enerji dönüşüm verimleri incelenmiş ve sonuçlar tartışılmıştır (Mahalingam T. ve ark., 2005).

Bakır oksit (Cu_2O) ince filmler, basit ve yüksek oranda tekrarlanabilir kimyasal depolama yöntemi ile hazırlanmış ve 523 K'ya kadar çeşitli tavlama sıcaklıklarında çalışılmıştır. Filmler elektromanyetik spektrumun görünür / yakın kızılötesi bölgelerinde çok yüksek geçirgenlik (%80–95) gösterdiği, bu nedenle oksit filmlerin özellikle ılıman bölgelerde ısınma uygulamaları için çok iyi bir malzeme olduğu bildirilmiştir. Filmlerin soğurma ve yansıma değerlerinin düşük olduğu (<%10) bulunmuştur. Filmlerin enerji bant aralığı değerleri 2.65–2.70 eV olarak hesaplanmıştır. Filmin kırılma indisi değeri 2.63 olarak bulunmuştur (Eya D.D.O. ve ark., 2005).

Bakır oksit filmler, alkali çözelti içinde (pH = 10) bakır laktatın indirgenmesi ile üç farklı alttaban üzerinde elektro depolama yöntemi ile elde edilmiştir. Alttabanlar; indiyum kalay oksit, (0 0 1) yönelimli n-Si ve altın buharlaştırılmış Si alttaban. Filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerindeki

alttaban etkileri; yerinde voltametri, akım-zaman geçiş ölçümü, X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu, UV-vis geçirgenliği ve yansıma ve fotoluminesans teknikleri ile araştırılmıştır. Sonuçlar, alttaban seçiminin film morfolojisini, yapısını ve optik özelliklerini güçlü bir şekilde etkileyebileceğini göstermiştir (Liu Y.L. ve ark., 2005).

Bakır oksit filmler, silikon alttabanlar üzerinde vakumla buharlaştırılmış bakır tabakaların oksidasyonu ile büyütülmüştür. Oksidasyonlar atmosferik basınçta, oksijende %10 nitrojen-oksijen karışımında ve 185 ile 450 ° C arasında değişen sıcaklıklarda yapılmıştır. X ışını kırınımı (XRD) modelleri, oksidasyon sıcaklığına bağlı olarak filmlerin 225 ° C'de Cu₂O'dan veya 350 ° C'nin üzerinde CuO'dan oluştuğunu göstermiştir. Filmlerin optik özellikleri, 1 ila 3.5 eV enerji aralığında spektroskopik elipsometri ölçümleri ile incelenmiştir. Bu ölçümler, düzensiz filmlerin karmaşık kırılma indisinin dağılımını simüle etmek için Tauc-Lorentz (TL) modeli kullanılarak analiz edilmiştir. TL modeli tarafından tanımlanan bant aralığı Cu₂O için 2.3 eV'ye ve CuO için 1.05 ile 1.2 eV arasında bulunmuştur (Papadimitropoulos G. ve ark., 2006).

İnce bakır oksit filmleri, bakır oksit (Cu₂O) tozunun termal buharlaştırılmasıyla depolanmıştır. Alttabanlar 300 ° C'ye kadar ısıtılmıştır. Filmler ayrıca 3 saat boyunca 500 ° C'lik bir sıcaklıkta havada tavlansmıştır. Filmler X-ışını fotoelektron spektroskopisi, X-ışını kırınımı ve UV-vis spektrofotometresi ile karakterize edilmiştir. Yüzey sıcaklığının ve depolama sonrası tavlamanın filmlerin kimyasal, yapısal ve optik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Isıtılmamış alttabanlar üzerine depolanmış filmler daha yüksek konsantrasyonda Cu₂O fazı ile karışık bakır oksit (CuO) ve Cu₂O fazlarından olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, ısıtılmış alttabanlar üzerinde depolanan filmler ve tavlansmış filmler, ağırlıklı olarak CuO fazında bulunmuştur (Al-Kuhaili M.F., 2008).

Doğru akım reaktif magnetron saçılma yöntemi ile ince bakır oksit (Cu₂O) filmler cam alttabanlar üzerinde hazırlanmıştır. Burada farklı basınç değerleri (0,133–4Pa) arasında değişen püskürtme basınçları altında argon gazı

kullanılmıştır. Püskürtme gücü ve basıncının Cu_2O ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Depolanan filmler, X-ışını kırınımı, atomik kuvvet mikroskobu, profilometre ve spektrofotometre kullanılarak karakterize edilmiştir. Filmlerin optik geçirgenliği görünür bölgede ölçülmüştür. Basıncıdaki artış, artan püskürtme gücünden daha yüksek bir büyüme oranıyla sonuçlanmıştır (Rastkar A.R. ve ark., 2009).

Cu_2O filmleri kimyasal depolama yöntemi ile hazırlanmış olup bu filmler farklı geometrik şekillerde elde edilmiştir. Filmler hazırlanırken önce alttabanlar bir bakır tiyosülfat çözeltisine daldırılmıştır daha sonra NaOH'ye daldırılarak oluşturulmuştur. Cu_2O filmlerinin boyutu ve morfolojisi, NaOH çözeltisinin konsantrasyonu ayarlanarak ve daldırma döngüleri (biriktirme süreleri) ayarlanarak kontrol edilmiştir. NaOH çözeltisinin konsantrasyonu 1.2 M'den az ve daldırma döngüleri 10'dan fazla olduğunda daldırma döngülerinin artması ile periyodik olarak üç boyutlu küre, tek boyutlu çubuk ve üç boyutlu koni Cu_2O filmleri oluşturulabilmiştir. Büyüme mekanizması Cu_2O filmlerinin bu tür periyodik desen transferi için araştırılmış ve önerilmiştir. Cu_2O filmlerinin fotovoltaiik özellikleri, çubuk benzeri ve koni benzeri Cu_2O filmlerinin, görünür ışık ışıması altında küre benzeri Cu_2O filminden daha iyi fotoelektrik özelliğe sahip olduğunu göstermiştir. Bu kolay yöntem, özel yapılara ve iyi özelliklere sahip diğer metal oksit filmlerin sentezi için kullanılabileceği bildirilmiştir (Xiong L. ve ark., 2010).

İnce *n*-tipi bakır oksit (Cu_2O) filmleri, asetat banyosunda Ti alttabanı üzerinde elektrodepolama yöntemiyle elde edilmiştir. Cu_2O ince filmler, *p*-tipi bakır oksit (CuO) ince filmler büyütmek için 500 ° C'de 30 dakika süreyle havada tavlannmıştır. *n*- Cu_2O ince filmleri, *p*- CuO / *n*- Cu_2O heterojonksiyonunu fabrikasyonu için Ti / CuO elektrotlar üzerinde bir asetat banyosunda elektrodepolanmıştır. CuO / Cu_2O heterojonksiyonunun yapısal, morfolojik ve optoelektronik özellikleri, X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve karanlık ve aydınlık akım-voltaj özellikleri kullanılarak incelenmiştir. XRD ve SEM, Ti / CuO elektrot üzerinde iyi kaplanmış tek fazlı polikristal Cu_2O

ince filmin, asetat banyosunda doymuş kalomel elektroda (SCE) karşı -550 mV biriktirme potansiyelinde mümkün olabileceğini ortaya koymuştur (Wijesundera P.F., 2010).

Çelik üzerinde ince Cu_2O tabakalarının depolanması için ekonomik bir yöntem olan ardışık iyonik tabaka adsorbsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) yöntemi kullanılmıştır. Alkali banyosundaki Cu^+ iyonlarının OH^- iyonlarına mol oranları farklı olduğu ve bunların özelliklerindeki değişiklikler X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), fotolüminesans (PL) spektroskopisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve UV- vis ile karakterize edilmiştir. SEM çalışmaları Cu_2O ince filmler için yoğun ve homojen bir mikroyapıyı doğruladığı bildirilmiştir. Cu boşluğuna bağlı filmlerin fotolüminesans (PL) çalışmaları yapılmıştır. 580 nm'de PL için en güçlü pik $\text{Cu}^+ / \text{OH}^-$ mol oranında 1:15 bulunmuştur (Chowdhury A. ve ark., 2014).

Bakır oksit ince filmleri, Silar yöntemi ile 30 döngü boyunca farklı zamanlarda cam alttaban üzerinde depolanmıştır. Filmler, bakırtiyosülfat sulu çözeltileri kullanılarak sırasıyla 15, 20, 25 ve 30 saniye gibi farklı daldırma sürelerinde büyütülmüştür. Tüm daldırma seviyelerinde kristal fazlara ulaşılmıştır. Bakır oksit, stokiyometrik olmayan *p*-tipi şeffaf yarıiletken oksit malzemeler için en umut verici adaylardan biridir. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopi çalışmaları, bakır oksit oluşumunu doğrulamıştır ve CuO 'nun karakteristik titreşim modu belirlenmiştir. Bakır oksit ince filmlerin hem yapısal hem de yüzey özellikleri, depolama süresinin artmasıyla iyileştirilmiştir. Bunun sonucunda bakır oksidin optik soğurma kenarı daha uzun dalga boylarına doğru kaymıştır, optik bant aralığı enerjisi 1.43 ile 1.96 eV arasında bulunmuştur. Filmin kristallliği, maksimum çekirdeklenme sürecine izin verecek şekilde yüksektir. Bu ince filmlerin optik yayınım özelliklerini açıklamak için oda sıcaklığında fotolüminesans ölçümü yapılmıştır (Ravichandran A.T. ve ark., 2015).

Nanokristal bakır oksit (Cu_2O) ince filmler, amorf cam alttabanlar üzerinde oda sıcaklığında kimyasal depolama yöntemi (CBD) kullanılarak sentezlenmiştir.

Depolama kinetiği, tek tip kalınlığa sahip kaliteli nanokristal filmlerin elde edilmesinde önemli bir rol oynadığı bildirilmiştir. Filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Kristalizasyon ve büyüme süreçleri, daha küçük nanopartiküllerin yığılması nedeniyle mikro küresel şekilli Cu_2O taneleri elde edilmiştir. Filmin optik enerji bant aralığı ve elektriksel iletkenlik türü incelenmiştir (Ahirrao P.B. ve ark., 2011).

Nanokristal kübik Cu_2O ince filmler, basit ve uygun maliyetli modifiye edilmiş ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyon yöntemi ile geliştirilmiştir. Bu yöntem, büyüme oranını artırmış ve toplam depolama süresini azaltmıştır. Sentezlenen Cu_2O ince filmler, farklı fiziko-kimyasal özellikleri nedeniyle karakterize edilmiştir. 25 döngü için depolanan filmin, optik bant aralığı enerjisi 2.16 eV bulunmuştur. Cu_2O filmi kübik fazda bulunmuştur. Cu_2O ince film kullanılarak üretilen fotoelektrokimyasal pil %0.35'lik bir verimlilik göstermiştir (Nikam S.S. ve ark., 2016).

Cu_2O filmleri, ITO alttabanı üzerine Sılar yöntemi ile farklı sıcaklıklarda (40°C , 60°C , 80°C) elde edilmiştir. Filmlerin kristal yapısı, optik geçirgenliği, optik bant aralığı, yüzey morfolojisi çalışılmıştır ayrıca Cu_2O filmlerinin fotokatalitik aktivitesi bulunmuştur. Sıcaklığın artışı ile filmin kristalliliğinin kademeli olarak arttığı ve kristal yapının tercihli yöneliminin kübik yapıda (111) düzlemi boyunca olduğu bulunmuştur. Ayrıca sıcaklıkla Cu_2O filmlerin optik geçirgenliklerinin ve bant aralığının etkilendiği bildirilmiştir. SEM görüntüleri, ITO alttabanı üzerinde biriken Cu_2O filminin morfolojisinin nanotel benzeri yapılarda olduğunu ve anyonik banyo teli yapısının sıcaklığının artmasıyla daha kompakt hale geldiğini ortaya koymuştur. Fotoelektrokimyasal (PEC) çalışmalar, 80°C 'de depolanan Cu_2O 'nun yüksek foto akım ve iyi kararlılıkta olduğunu ortaya çıkarmıştır (Baig F. ve ark., 2018).

Farklı nanoyapılara sahip bakır oksit (Cu_2O) filmler, setil-trimetil-amonyum-bromür (CTAB) ile kimyasal depolama yöntemi (CBD) kullanılarak sırasıyla flor katkılı SnO_2 (FTO) cam, Cu ve Ti alttabanları üzerinde elde

edilmiştir. Filmler X-ışını difraktometresi, taramalı elektron mikroskobu ve UV-VIS spektrofotometresi ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar, hazırlanan Cu_2O filmlerinin reaksiyon sisteminde setil- trimetil- amonyum bromit (CTAB) varken nano çubuk yapılı olduğunu göstermiştir. CTAB olmadan, nano-kürelili yapılı Cu_2O filmler oluşturulmuştur. CTAB konsantrasyonu, farklı uzunluk / çap oranına sahip nano çubuk yapılı Cu_2O filmlerinin kontrol edilebilir sentezi için çok önemlidir ve nano çubuk yapılı dizi yoğunluğu hem alttabanlara hem de CTAB'ye bağlı olduğu bildirilmiştir. Cu_2O nano çubukların oluşumu için olası bir mekanizma tartışılmıştır. Ek olarak, Cu_2O nano çubukları için UV-vis soğurma özelliği nanokürelerinkinden çok daha iyidir. Cu_2O nano çubuk filmler için görünür ışık altında üretilen fotovoltaj, nanokürelerinkinden daha yüksektir. Ti folyo üzerindeki Cu_2O nano çubukları en görünür ışığı soğurabilse de, Cu folyo üzerindeki, diğer alttabanlardakinden daha iyi ve daha kararlı fotoelektrokimyasal özellik sergilemiştir. Bu çalışma, nanoyapılara sahip Cu_2O tabanlı cihaz için son derece yararlı olduğu bildirilmiştir (Aref A.A. ve ark., 2011).

Bakır oksit (Cu_2O), fotovoltaiik uygulamalar için umut verici bir yarıiletkenidir. Malzemeyi optimize etmek için *p*-tipi iletim mekanizması hakkında bir anlayış geliştirmek hayati önem taşır. Cu_2O ince filmler üretmek için reaktif magnetron püskürtme sistemi kullanılmıştır. Filmlerdeki bant aralığı, kırılma indisi, mobilite, deşik yoğunluğu ve elektriksel iletkenlik araştırılmıştır. Çalışmada, nitrojen açısından zengin koşullar altında üretilen filmlerin geniş bant aralıkları ve düşük elektriksel iletkenlikler sergilediğini, oksijen açısından zengin koşullar altında depolanan filmlerin ise dar bant aralıklarına ve yüksek elektrik iletkenliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Bant aralığının gaz bağımlılığını açıklamak için yoğunluk fonksiyonel teorisinin sonuçları bulunmuştur. Fermi-Dirac istatistiklerine dayanan geliştirilmiş bir teorik model, yüksek elektriksel iletkenliklerin filmde Fermi seviyesinin altında bulunan alıcı seviyelerinden kaynaklandığını göstermiştir (Zhang L. ve ark., 2013).

Silar metodu kullanılarak 70°C 'de cam alttabanlar üzerine polikristal Cu_2O ince filmleri elde edilmiştir. XRD analizleri filmlerin kübik yapıda olduğunu gösterdi ve örgü parametreleri hesaplanmıştır. Filmlerin yüzey morfolojisi alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile görüntülenmiştir. Filmlerin optik özelliklerini belirlemek için UV/VIS spektrofotometresi kullanılmıştır. Filmlerin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik (% T) değerleri 300–1100 nm dalga boyu aralığında belirlenmiştir. Yarıiletken Cu_2O ince filmlerinin görünür bölgedeki optik geçirgenlik değerleri %50–70 olarak bulunmuştur. Filmlerin enerji bant aralığı değerleri (E_g) 2.53–2.62 eV bulunmuştur (Özaslan D. ve ark. 2017).

Bu makalede SILAR (Succesive Ionic Layer Adsorption and Reaction) yöntemi kullanılarak 70°C 'de cam alttaban üzerinde bakır (I) oksit (Cu_2O) ince filmi hazırlanmıştır. Cu_2O ince filmi 100, 300 ve 500°C 'de bir saat süre ile tavllanmış ve tavlama sıcaklığının filmin yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. X-ışını kırınım (XRD) analizlerinden Cu_2O filmin polikristal yapıda ve kübik fazda olduğu tavlama sıcaklığı ile Cu_2O filmin CuO filme dönüştüğü tespit edilmiştir. Hazırlanan filmin optik özellikleri soğurma spektrumu ile analiz edilmiştir. Tavlama sıcaklığının artışı ile filmin enerji bant aralığı (E_g) değerlerinin azaldığı (2.57–1.77 eV) bulunmuştur. Görünür bölgedeki ortalama kırılma indisi (n) değerleri 2.14–11 olarak hesaplanmıştır. Bakır oksit ince filmin FE-SEM (Alan Emisyonlu-Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntülerinden genellikle küresel yapıda homojen dağılım gösterdiği ve tavlama sıcaklığının etkisi ile daha sıkı bir yapının olduğu görülmüştür. Hall ölçümlerinden ince filmin p -tipi iletkenlik gösterdiği ve öz direnç (ρ) değerleri sırası ile 7.4×10^3 – $1.1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ (Cu_2O) ve 5.1×10^2 – $8.2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ (CuO) bulunmuştur (Özaslan D. ve ark. 2020).

Cu_2O filmleri dört farklı bakır tuzu ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu} \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) kullanılarak SILAR (Succesive Ionic Layer Adsorption and Reaction) metodu ile 60°C gibi düşük bir sıcaklıkta cam alttabanlar üzerinde 40 daldırma döngüsü ile hazırlanmıştır. Filmlerin yapısal,

optik, morfolojik ve elektriksel özellikleri araştırılmıştır. X-ışını kırınımı (XRD) analizlerinden Cu_2O ince filmlerin polikristal yapıda ve kübik fazda oldukları bulunmuştur. Elde edilen Cu_2O ince filmlerin yapısal özellikleri arasında büyük farklılıkların olmadığı tespit edilmiştir. Ultraviolet-visible (UV-vis) spektrofotometresi ile elde edilen verilerden Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlik ($T\%$), enerji bant aralığı (E_g) ve kırılma indisi (n) değerleri bulunmuştur. Cu_2O ince filmlerin kalınlık değerlerinin artışı ile enerji bant aralığı değerlerinin azaldığı görülmüştür. FE-SEM (Field Emission-Scanning Electron Microscope) görüntülerinden filmlerin genellikle küresel yığılmalar şeklinde oluştuğu bazı filmlerde ise küresel oluşum içinde kısmen çubuk yapılı taneciklerin olduğu görülmüştür. Hall ölçümlerinden Cu_2O ince filmlerin p -tipi elektriksel iletkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Filmlerin elektriksel özdirenç (ρ) değerleri sırasıyla, 1.24×10^4 , 4.06×10^4 , 2.86×10^3 , $1.67 \times 10^4 \Omega\text{cm}$ hesaplandı. Filmlerin mobilite (μ) değerleri sırasıyla 174, 87, 80, 23 cm^2/Vs bulunmuştur (Altındemir G. ve ark. 2020) .

3. MATERYAL VE METOT

Bu aşamada SILAR metodu ile bakır (I) oksit ince filmlerinin elde edilif aşamaları, alt taşların hazırlanması, çözeltilerin hazırlanması, film kalınlığının belirlenmesinde, kullanılacak yöntem hakkında, optik özelliklerin ve elektriksel özelliklerin belirlenmesiyle ilgili genel bilgiler verilecek.

3.1. Alt Taşların Hazırlanması

SILAR metodu kullanılarak depolanan ince filmlerde hazırlanacak filmlerin kaliteli olması için alt taşların hazırlanması ve temizliği oldukça önemlidir. Alt taş ne kadar temizse o kadar kaliteli film elde edilir. Bu nedenle alt taş temizliğinde büyük bir titizlik gösterilmelidir. Çünkü elde edilecek filmin optik, yapısal ve elektriksel özellikleri cam alt taşların temizlenme durumu ile ilişkilidir. SILAR metodu düşük sıcaklıklarda uygulanabildiği için her çeşit alt taşlar kullanılabilir. Bu çalışmada film yapımında 75 mm×25 mm×1 mm ölçülerinde cam alt taşlar kullanılmıştır. Cam alt taşlar ilk olarak sabunlu su ile yıkanmıştır. Ardından seyreltik sitrik asitte bekletilerek saf su ile durulanmıştır. Son olarak etil alkolde 10 dakika bekletilen alt taşlar saf su ile durulanarak 100 ° C’deki etüvde kurumaya bırakılmıştır. 1 saatlik kurutma sürecinden sonra alt taşlar numaralandırılarak film oluşturulmadan önce boş olarak tartılmıştır.

3.2. Çözeltilerin Hazırlanması

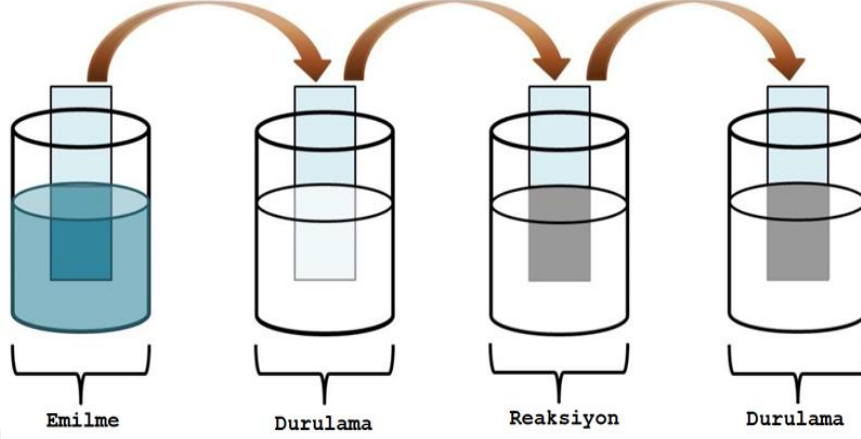
Cu₂O ince filmlerini elde etmek için soğuk ve sıcak olmak üzere iki çözelti hazırlandı. Bu zeltilerden soğuk olanı için 500 ml suda 1 M CuSO₄ elde etmek için 12.48 g CuSO₄ ve 200 ml suda 1 M Na₂S₂O₃ elde etmek için 48.63 g Na₂S₂O₃ kullanılmıştır. Bu iki çözelti bir beherde karıştırılarak 250 ml 1 M 3Cu₂S₂O₃2Na₂S₂O₃ elde edildi. Sıcak zelti için 500 ml suda 2 M NaOH elde etmek için 16 g NaOH hazırlanmış ve 50 ° C ye kadar ısıtılarak deney sırasında kontrollü ısıtıcı yardımıyla bu ısıda sabit tutulmuştur.

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

En eski ve en yaygın bir şekilde kullanılan film büyültme tekniği Kimyasal banyo depolaması Tekniği (CVD)'dir. CVD tekniğinde ince film çökelti için ihtiyaç duyulan öncüllerin tümü eř zamanlı bir şekilde kapsayan bir reaksiyonda büyütülür. SILAR yöntemi CVD tekniğinin geliştirilmiş hali olarak kabul edilir. SILAR da ince film büyümesi belli bir döngü ile yapılan ardışık bir işlemidir. SILAR yöntemi alt malzeme yüzeyinde sıralı reaksiyona dayanan nispeten yeni ve daha az araştırılan bir yöntemdir. Çözeltideki katı faz ile çözülmüş iyonlar arasında heterojen reaksiyona olanak sağlayan her bir döngüde tekrarlanan durulama işlemi vardır. SILAR'ı diğer kimyasal yöntemlerle karşılaştırıldığında, oda sıcaklığında kaliteli nanokristalin ince filmler üretmek için basit, düşük maliyetli ve doğa dostu bir kimyasal yöntemdir. Elektronik uygulamalarında kullanılan ince filmleri oluşturmak için son senelerde çözelti fazlı teknikler basit kurulum, düşük fiyat ve düşük sıcaklıklarda çalışabilme gibi avantajlarından dolayı daha çok tercih edilmektedir.

3.3.1. SILAR Uygulaması

SILAR metodu, esas olarak iyonların çözeltilerden adsorpsiyonu ve reaksiyonuna ve çözeltide homojen çökelmeyi önlemek için her daldırma arasında damıtılmış su durulamaya dayanmaktadır. şekil 1.32. SILAR metodunun şematik gösterimidir.



Şekil 3.1. SILAR metodunun şematik gösterimi (Çevlik H. Ç. 2019).

SILAR metodu dört adımdan oluşur:

- 1) Adsorpsiyon, 2) İlk durulama, 3) Reaksiyon ve 4) İkinci durulama.

1) Adsorpsiyon:

SILAR metodunun ilk basamağında, öncü çözeltisinde bulunan katyonlar alt taşın yüzeyine adsorbe edilir ve Helmholtz elektrikli çift tabakayı oluşturur. Bu katman iki katmandan oluşur: ilk önce iç (pozitif yüklü) ve dış (negatif yüklü) katmanlar. Pozitif katman katyonlardan ve negatif olanı katyonların karşı iyonlarından oluşur.

2) İlk Durulama:

Bu adımda, gevşek biçimde adsorbe edilmiş iyonlar difüzyon katmanından uzakta durulanır. Bu durum doymuş elektriksel çift katman ile sonuçlanır.

3) Reaksiyon:

Bu reaksiyon adımımda, anyonik öncü çözeltiden anyonlar sisteme dahil edilir. İyonların düşük stabilitesinden dolayı, katyon ve anyon arasındaki reaksiyon, alt taş üzerinde katı faz oluşumuna yol açar.

4) İkinci Durulama:

SILAR metodunun son aşamasında, fazla ve tepkimeye girmemiş atomlar veya moleküller ve difüzyon katmanından tepkimeye giren yan ürünler uzaklaştırılır.

Bu şekilde, SILAR metodu, katyonların adsorpsiyonu ve yeni adsorbe edilmiş anyonların önceden emdirilmiş katyonlarla reaksiyona sokulmasıyla sonuçlanır, bu, istenen malzemenin ince filminin oluşumuna yol açar. Çözeltinin sıcaklığı, alt taşın doğası, pH ve çözeltinin konsantrasyonu, alt taşın alanı, daldırma ve durulama süresi vb. gibi faktörler depolama işlemini etkiler (Çevlik H. Ç. 2019).

3.3.2. Hazırlık parametrelerinin etkisi

Depolama oranı ve uç kalınlığı, çözeltideki adsorpsiyon ve reaksiyon süresine bağlıdır. SILAR metoduyla, büyüme kinetiği iyonların konsantrasyonuna, adsorpsiyon ve reaksiyon süresine, durulama süresine, sıcaklığa ve kompleksleştirici maddeye bağlıdır. Çeşitli depolama koşullarının bu parametreler üzerindeki etkisi aşağıda değerlendirilmiştir:

a) İyonların konsantrasyonu

Bileşik konsantrasyonundaki artış, katyon ve anyon konsantrasyonunda bir artışa neden olur ve daha kalın bir film elde edilir. Bunun aksine, reaksiyon hızı yükseldiğinde ve çökelme alt taş üzerinde daha az miktarda gerçekleştiğinde belirli bir katyon ve anyon konsantrasyonunun üstündeki kalınlık azalır. Öncü çözeltinin konsantrasyonunun değiştirilmesi, depolanan malzemenin stokiyometrisi ile kontrol edilebilir.

b) Adsorpsiyon ve reaksiyon süresi

İnce film oluşumunda adsorpsiyon ve reaksiyon süresi önemli rol oynar. Adsorpsiyon süresi, reaksiyon sresinden daha büyük olduğundan, film oluşumu çeşitli reaksiyonlarla gerçekleşir, daha yüksek terminal kalınlığı sağlar. Eşit adsorpsiyon ve reaksiyon süresi, tutarlı reaksiyonla sonuçlanır. Tutarlı büyüme, düzgün bir film oluşumu sağlar.

c) Durulama süresi

Her daldırma arasında durulama reaksiyon banyosunda keltilmeyi önlemek için önemlidir. Durulama banyosunda gevşek bir şekilde bağlı atomlar ve moleküller alt taş yüzeyinden soyulur. Yeterli durulama süresi kaliteli bir film sağlayabilir.

d) Sıcaklık

Atomların veya moleküllerin ve anyon bileşiğinin ayrırması sıcaklığa bağlıdır. Daha yüksek sıcaklıklarda, ayrırma daha fazladır ve bu da daha yüksek depolama oranına neden olan daha yüksek katyon ve anyon konsantrasyonları oluşturur.

e) Kompleksleştirici

Metal iyonunun salınımı veya adsorpsiyonu, kompleksleştirici kullanılarak kontrol edilebilir. Metal iyonlarının yavaş salınımı, filmin yavaş büyüme hızına yol açar. Bu nedenle büyüme kinetiği, kompleksleştirici kullanılarak kontrol edilebilir. SILAR metodu aşağıdaki avantajlara sahiptir:

1. Filmlerin kalınlığı ve morfolojisi, hazırlık parametreleri değiştirilerek kolayca kontrol edilebilir.
2. Farklı şekilli alt tabakalarda nispeten tek biçimli filmler elde edilebilir.

3. İhtiyaç duyulan ekipman pahalı değildir ve karmaşık aletler ve vakum gerektirmez.
4. SILAR metodu genellikle düşük sıcaklıkta çalıştırılır.

SILAR metodunun ve CBD metoduna göre ek bir avantajı ise, SILAR metodunda çözeltide çökelti oluşmaması nedeniyle malzeme maliyetini düşürmesidir. SILAR metodu, sulu veya sulu olmayan banyolardan depolama için ve polimerlerin, yarıiletkenlerin veya oksitlerin hazırlanmasında da kullanılabilir (Çevlik H. Ç. 2019).

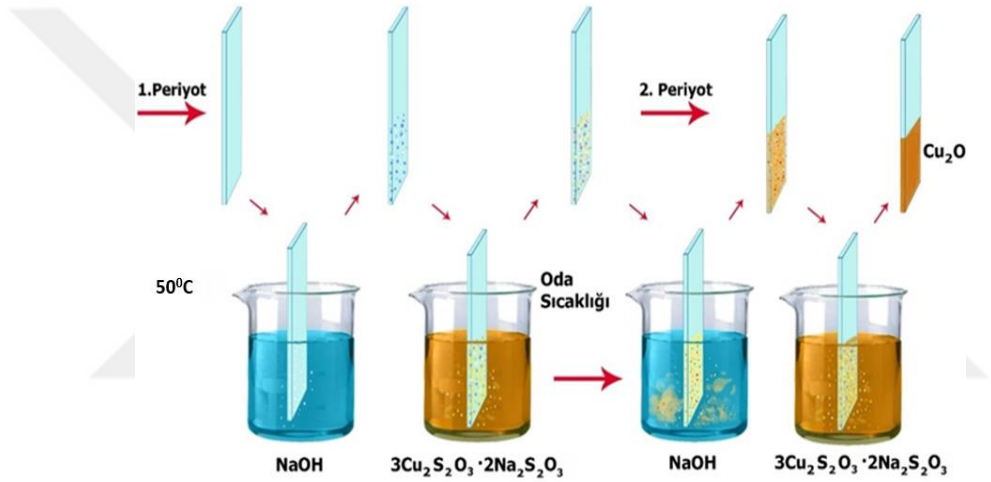
3.3.3. SILAR yönteminin avantaj ve dezavantajları

SILAR yöntemin katmanlı büyüme modu, mükemmel malzeme kullanım verimliliği, ince film oluşma sürecinde çok iyi kontrol ve herhangi bir yüzeye yüksek oranda biriktirme kabiliyeti gibi kendine özgü avantajları vardır. Oda sıcaklığında ve normal basınçta iyi kalitede ince film büyütme olasılığı, SILAR yönteminin diğer tekniklere göre en büyük avantajıdır. Ayrıca, vakum sistemleri gerekli olmadığından, SILAR biriktirme ekipmanı basit ve ucuzdur. Benzer şekilde, SILAR'da daha kolay ve daha güvenli bir çözüm olarak selenyum bileşikleri gibi, toksik kimyasallar da, SILAR'da daha kolay ve basit bir şekilde kullanılabilirler. Çevresel açıdan bakıldığında, SILAR'ın kayda değer bir avantajı, sistemin tamamen kapalı olması ve kullanılan tüm kimyasalların geri dönüştürülebilir olmasıdır. Diğer çözüm fazı yöntemleri ile karşılaştırıldığında, özellikle CVD ile karşılaştırıldığında, SILAR'ın önemli bir avantajı, birikme döngüleri sayısını kullanarak film kalınlığı üzerinde kolay kontrolünün sağlanmasıdır. Birazda dezavantajlarından bahsederek SILAR işleminin, özellikle buhar-faz tekniklerinden daha yavaş biriktirme yaptığından, diğer biriktirme tekniklerine göre dezavantajları da vardır. Bununla birlikte, ihtiyaç duyulan uzun durulama aşaması nedeniyle daha uzun çevrim süresi, birikmenin SILAR'da oluşmasını daha yavaş olduğu anlamına gelir. Öte yandan, SILAR henüz

endüstriyel olarak kullanılmadığından, işlem süreleri tam olarak optimize edilmemiştir. SILAR'ın yavaş büyüme oranını, geniş alanlı altlık malzemede de kullanılabilmesi ve aynı anda çok sayıda kullanılabildiğinden kusurlarını telafi edilebildiğini söyleyebiliriz (Mitzi D. B., 2009).

3.4. SILAR Metodu İle Cu_2O İnce Filmlerin Elde Edilmesi

Cu_2O ince filmler elde etmek için deney şu şekilde gerçekleştirilmiştir;



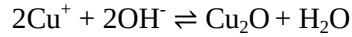
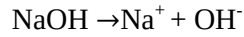
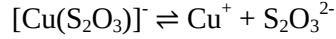
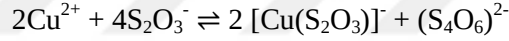
şekil 3.2. SILAR metoduyla Cu_2O ince film elde etmek için kullanılan deneysel dzeneğın şematik gösterimi. (zaslan D., 2016)

Kontrollü ısıtıcı üzerinde bir beher içinde 50°C 'de 200 ml suda 2 M NaOH zeltisi, 250 ml 1 M $3\text{Cu}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ zeltisi ve beher içerisinde saf su konulmuştur. Bir eldiven ile tutulan isimlendirilmiş alt taş 2 saniyelik sürelerle öncelikle 2 M NaOH çözeltisine dik olarak daldırıldıktan sonra saf su ile dolu behere daldırılmış daha sonra aynı alt taş 1 M $3\text{Cu}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ çözeltisine ve son olarak saf su ile dolu behere daldırılmıştır. Bu süreç 1 SILAR döngüsünü tamamlar. Bu işlem farklı alt taşlar için 10, 20, 30 ve 40'ar daldırma çevrimleri ile uygulanmıştır. Bu metotla oluşturulan ince filmlerde her çevrimde film renginin

koyulaştığı ve film kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir. Her iki yüzeyinde Cu₂O ince filmi biriken alt taşlar kurutulduktan sonra bir yüzeyi amonyum klorür (NH₄Cl) kullanılarak bir parça pamuk yardımıyla temizlenmiştir. İnce film depolanmış alt taşlar tekrardan tartılmıştır. Bu şekilde alt taşlar incelenmeye hazır hale gelmiştir.

3.5. SILAR Sürecinde Gerçekleşen Kimyasal Reaksiyonlar

Na₂S₂O₃ ve CuSO₄, sırasıyla tiyosülfat (S₂O₃⁻²) ve kuprik iyonlar (Cu⁺²) verecek şekilde suda çözülür. Tiyosülfat ile aredox reaksiyonu bağlamında, Cu⁺² iyonları anoksitleyici bir madde olarak görev yaparken, S₂O₃⁻² bir azaltıcı ve aynı zamanda bir karıştırıcı madde olarak görev yapar. S₂O₃⁻² iyonları Cu⁺² 'yi Cu⁺'ye düşürür, böylece çözeltinin rengi mavi (kuprik iyon) iken renksiz (kupas iyon) olarak değişir. Hazırlanan bu bakır karmaşıklığı bir katyon kaynağı olarak kullanılır. (Aref A.A. ve ark., 2011)



3.6. Kullanılan Yöntem ve Teknikler

Bu çalışmada, SILAR metodu kullanılarak alt taşlar üzerine, 50 °C'de 10, 20, 30 ve 40 daldırma çevriminde, depolanan ince filmlerin optik ve elektriksel özellikleri X-ışını kırınımı (EMPYREAN XRD, PANalytical), Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM, FEI, Quanta 650) ve Perkin Elmer UV-vis Lambda 2S Spektrofotometresi (λ=190–1100 nm) kullanılarak bulunmuştur.

3.6.1. X-ışını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), toplu ve ince film örneklerinin karakterizasyonu için iyi bilinen bir tekniktir. Yapısal tanımlama ve kafes parametrelerinin belirlenmesi, XRD yorumlanmasına dayanır. X-ışını Kırınım lm ile (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristalin fazı için bu kırınım desenleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-ışını Kırınım analiz yöntemi, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar. X-ışını Kırınım cihazıyla kayaçların, kristal malzemelerin, ince filmlerin ve nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir.



Şekil 3.3. PANalytical EMPYREAN X-ışını Kırınımı (XRD)

3.6.2. Alan Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM)

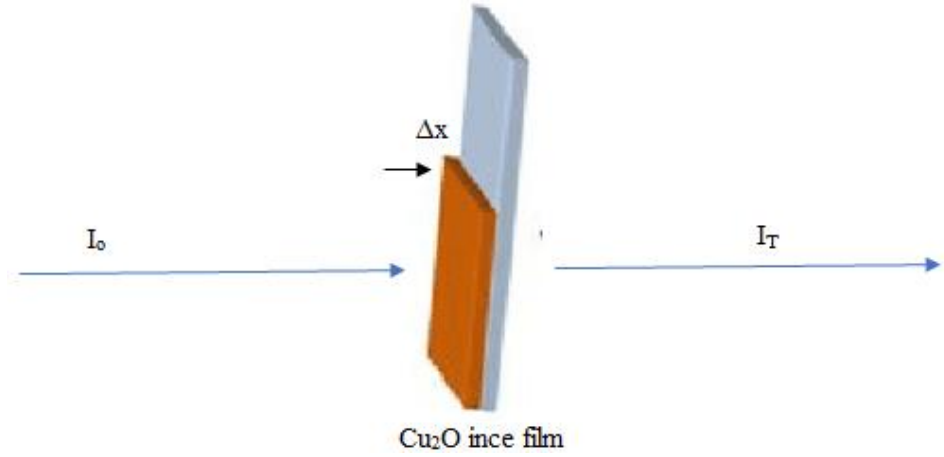
Alan Taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM), bir kaynaktan hızlandırılmış yüksek enerjili elektronların incelencek malzeme yüzeyini taraması sonucunda yansıyan elektronların bir dedektör tarafından toplanması ve bir bilgisayar yazılımı yardımı ile değeriendirilerek malzemenin yüzey morfolojisini yüksek çözünürlükte analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir. Taramalı Elektron Mikroskobu'nda (SEM) sıvı olmayan ve sıvı özellik taşımayan her türlü iletken olan ve olmayan numune incelenebilir. Her çeşit metaller, tekstiller, fiberler, plastikler polimerler, parçacıklar(kum, çakıl, sıvı ihtiva etmeyen biyolojik örnekler gibi) vs. incelenebilir. İletken olmayan numuneler çok ince (yaklaşık 2Å/saniye) iletken malzemeyle kaplanarak incelenebilir hale getirilir.



Şekil 3.4. FEI Quanta 650 Field Emission SEM - Alan Taramalı Elektron Mikroskobu

3.7. Optik zelliklerin Belirlenmesi

Bu çalışmada oluşturulan Cu_2O ince filmlerinin optik geçirgenlik ve soğurma lmleri Perkin Elmer UV/vis Lamda 2S spektrofotometresi kullanılmıştır. Ölçümler 300–1100 nm arasında gerçekleşmiştir. Öncelikle temizlenmiş boş alt taşlar kullanılarak sistemin kalibrasyonu gerçekleştirilmiş ve böylece elde edilen ince filmlerin ölçümlerinde alt taş etkisi ortadan kaldırılmıştır. Tek renkli ışın demeti bir ince film üzerine düştüğünde kırılma, soğurma ve yansıma olayları meydana gelir. Gelen ışığın yansıma ve kırılmadan kaynaklı şiddetindeki azalmayı ihmal edersek şekil 3.5'te grleceği gibi iki farklı ışık şiddeti karşımıza çıkar.



şekil 3.5. İnce film üzerine gelen ışığın temsili soğurma gösterimi (evlik H. . 2019).

ışığın birden fazla katmandan art arda geçtiğini varsayalım. ışık her katmandan geçtiğinde şiddeti biraz daha azalacak fakat gelen ışığın şideti ile katmandan geçen ışığın şiddetinin oranı sabit kalacaktır. Böylece soğurma katsayısı ışık şiddetinden bağımsız olacak ve üzerine ışık gönderilen filmin özelliklerini gösterecektir. Buradan, gelen ışık Δx kalınlığındaki filmden geçtikten sonra şiddeti $-A\Delta x$ kadar azalacaktır. Böylece,

$$-\Delta I = I - I_o = I_o \alpha \Delta x \quad (1.28)$$

denklemleri yazılabilir. Bu denklemden soğurma katsayısı (α),

$$\alpha = -\frac{1}{I_o} \frac{\Delta I}{\Delta x} \quad (1.29)$$

şeklinde yazılabilir. Burada Δx katmanını çok daha ince kalınlıkta dx olarak alırsak, ışığın her katmanı geçerken soğurulma oranı dI/I_o şeklinde yazılabiliriz. Bu oranı çok ince katmanlar için,

$$\frac{dI}{I_o} = -\alpha dx \quad (1.30)$$

şeklinde yazabiliriz. Katmanlardan geçen ışığın şiddetindeki azalmayı hesaplaya bilmek için eşitliğin integralini alırsak,

$$I_T = I_o e^{-\alpha x} \quad (1.31)$$

denklemleri elde edilir. Lambert tarafından bulunan bu denklem Soğurma Yasası olarak adlandırılır. Beer-Lambert tarafından geliştirilen optik soğurma yasası şu şekildedir.

$$\alpha = \frac{1}{I(\lambda)} \frac{dI(\lambda)}{dx} \quad (1.32)$$

Burada $I(\lambda)$ ışık şiddetini ve x ortam içinde alınan yolu göstermektedir. Yansıma katsayısı dik açı ile gelen ışık için,

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (1.33)$$

burada n_1 ve n_2 , ortamların kırılma indisleri ve R yansıma katsayısıdır. Yansıma katsayısı hesaba katıldığında x kalınlığındaki filmin içine giren ışığın şiddeti,

$$I = (1 - R)I_0 \quad (1.34)$$

şeklinde yazılabilir. Burada I filmin içine giren ışığın şiddeti ve I_0 gelen ışığın şiddetidir. Filmin içerisindeki elektrik yükleri ile etkileşerek filmin sonuna gelen ışığın şiddeti,

$$I = I_0(1 - R)e^{-\alpha x} \quad (1.35)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Filmden çıkan ışığın şiddeti,

$$I = I_0(1 - R)^2 e^{-\alpha x} \quad (1.36)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Filmin içine geriye yansıyan ışığın şiddeti,

$$I = R(1 - R)I_0 e^{-\alpha x} \quad (1.37)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Filmin içerisinde geçen ışığın iç katmanlardan da yansıdığı dikkate alındığında toplam geçirgenlik,

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha x}}{1-R^2 e^{-2\alpha x}} \quad (1.38)$$

denklemleri ile bulunabilir. Burada T toplam geçirgenliktir. Buradan soğurma katsayısını çektiğimizde,

$$\alpha = -\frac{1}{x} \ln \left[-\frac{(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^2 + 4R^2 T^2}}{2TR^2} \right] \quad (1.39)$$

denklemleri elde edilir (evlik H. . 2019).

3.8. Optik zelliklerin Analizi

Cu₂O ince filmlerin bant aralığı eneręisi (E_g), bant yapısı, geçirgenlik (% T), yansıma (% R), soğurma (A) gibi fiziksel özellikleri hakkında bilgi verir. SILAR yöntemi ile amorf cam alt taşlar üzerine depo edilen saf Cu₂O ince filmlerin optik karakterizasyonu için optik geçirgenlik (% T) ve soğurma (A) spektrum lmleri Perkin Elmer UV/Vis Lamda 2S spektrofotometresi kullanılarak alındı. Bu lmler, oda sıcaklığında spektrofotometrede 300–1100 nm dalga boyu aralığında yapıldı. Spektrofotometreye yerleştirilen boş camların üzerinden ışık geçmesi sağlanarak sistem %100 olarak normalize edildi. Böylece ince filmlerin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik değerleri cam alt taştan bağımsız hale getirildi.



şekil 3.6. Perkin-Elmer UV/Vis Lamda 2S spektrometresi

3.8.1. Optik Sabitlerin Hesaplanması

Perkin Elmer UV/VIS Lamda 2S spektrofotometresi kullanılarak elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda soğurma katsayısı (α), optik yoğunluk (A), optik geçirgenlik (% T), sönüm katsayısı (k), yansıma katsayısı (R) ve kırılma indisi (n) hesaplanmıştır.

Filmden çıkan ışığın şiddetini hesaplamak için kullanılan (1.36) denkleminde $I/I_o = T_s/T_o$ ve $d=t_f$ değışikliğı yapıldığında,

$$\frac{T_s}{T_o} = (1 - R)^2 e^{-\alpha t_f} \quad (1.40)$$

şeklini alır. Bu denklemden soğurma katsayısı,

$$\alpha = -\frac{1}{t_f} \ln \left(\frac{T_s}{T_o} \right) \quad (1.41)$$

şeklinde yazılabilir. Burada t_f film kalınlığı, T_o spektrofotometreden gelen ışığın şiddeti ve T ışığın filmde geçtikten sonraki spektrofotometre tarafından ölçülen şiddetidir. Soğurma (A) veya optik yoğunluk denklemini;

$$A = \log_{10} \left(\frac{T_o}{T_s} \right) \quad (1.42)$$

ile ifade edilebilir. Burada optik geçirgenliği (T) optik soğurma (A) cinsinden ifade etmek istersek $T_o/T_s = T$ olarak aldığımızda,

$$T = 10^{-A} \quad (1.43)$$

denklemini elde edilir. Burada A spektrofotometreden elde edilen optik soğurma değeri, T ise spektrofotometreden elde edilen optik geçirgenliği (%T) değeri ifade eder. Sönüm katsayısını (k) soğurma katsayısı (α) cinsinden,

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (1.44)$$

denklemini ile ifade ederiz. (1.40) denkleminde yararlanarak yansıma katsayısı,

$$R = 1 - \left[\left(\frac{T_s}{T_0} \right) e^{\alpha t_f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.45)$$

şeklinde ifade edilir.

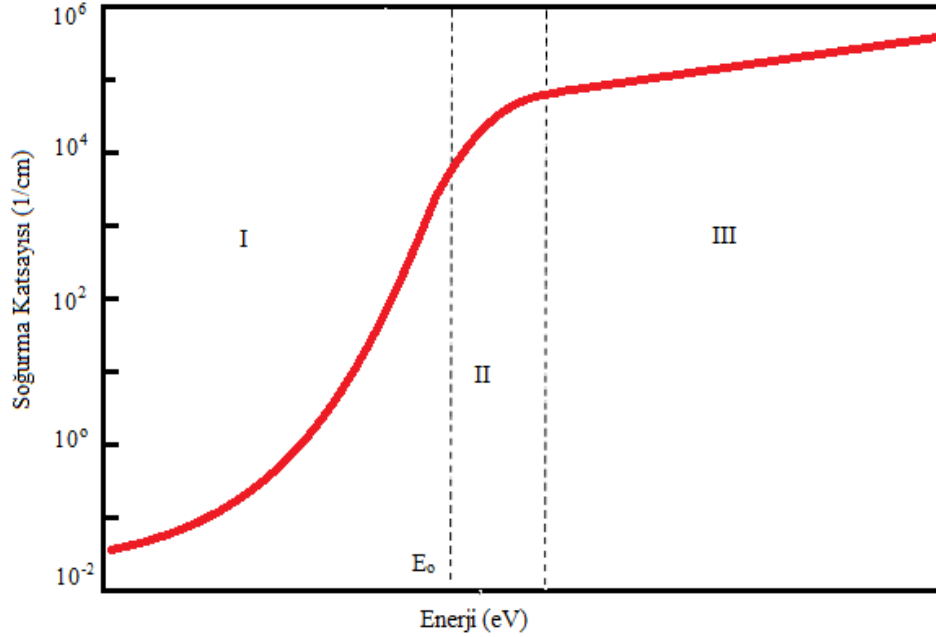
Kırılma indisi (n) ise,

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \quad (1.46)$$

denklemleri ile bulunabilir (Çevlik H. Ç. 2019).

3.9. Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi

Bir yarıiletkenin yasak enerji aralığını belirlemek için soğurma katsayısının enerji ile değişim grafiğinden yararlanılır.



Şekil 3.7. Bir yarıiletkenin Soğurma katsayısı-Enerji grafiği (Çevlik H. Ç. 2019).

Ŗekil 3.7'deki grafiği  bölüme ayırarak incelediğinde I. Bölümde amorf yapıdaki bir kristalin yapı kusurlarının sebep olduğu elektron enerji durumlarından kaynaklı soğurma gerekleŖiyor. II. Bölüm valans bandı ile iletkenlik bandı arasında bulunan elektron enerji durumlarını göstermektedir. Bu bölüm bir yarıiletkenin yasak enerji aralığını belirtir. III. Bölüm valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki geiŖlerin meydana geldiği bölgedir (evlik H. ., 2019).

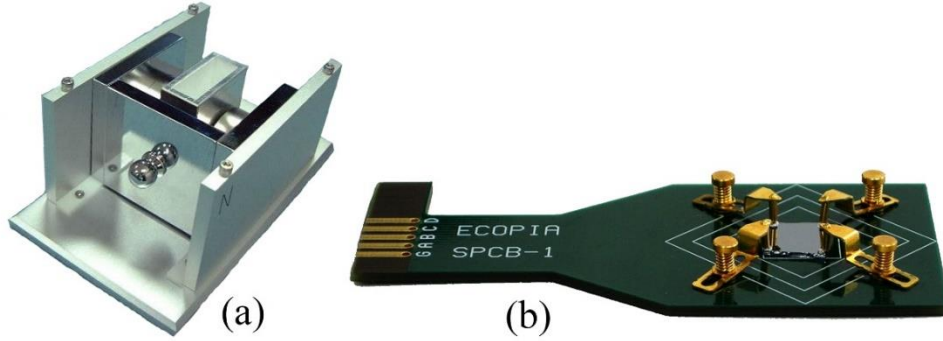
3.10. Elektriksel zelliklerin Belirlenmesi

Elde edilen ince filmlerin, oda sıcaklığında yapılan Hall ölçümleriyle mobilite (μ), taŖıyıcı yoğunluğu, iletkenlik tipi, özdirenç (ρ) gibi elektriksel özellikleri belirlenmiŖtir.

Tez kapsamında elde edilen ince filmlerin Hall lmleri için Ecopia marka HS-3000 Ver 3.5 Hall lm sistemi kullanılmıŖtır (Ŗekil 3.8).



Ŗekil 3.8. Ecopia marka hall ölçüm sistemi HS-3000.



Şekil 3.9. (a) Mıknatıs kiti (b) Dört nokta yöntemli sistem aparatı.

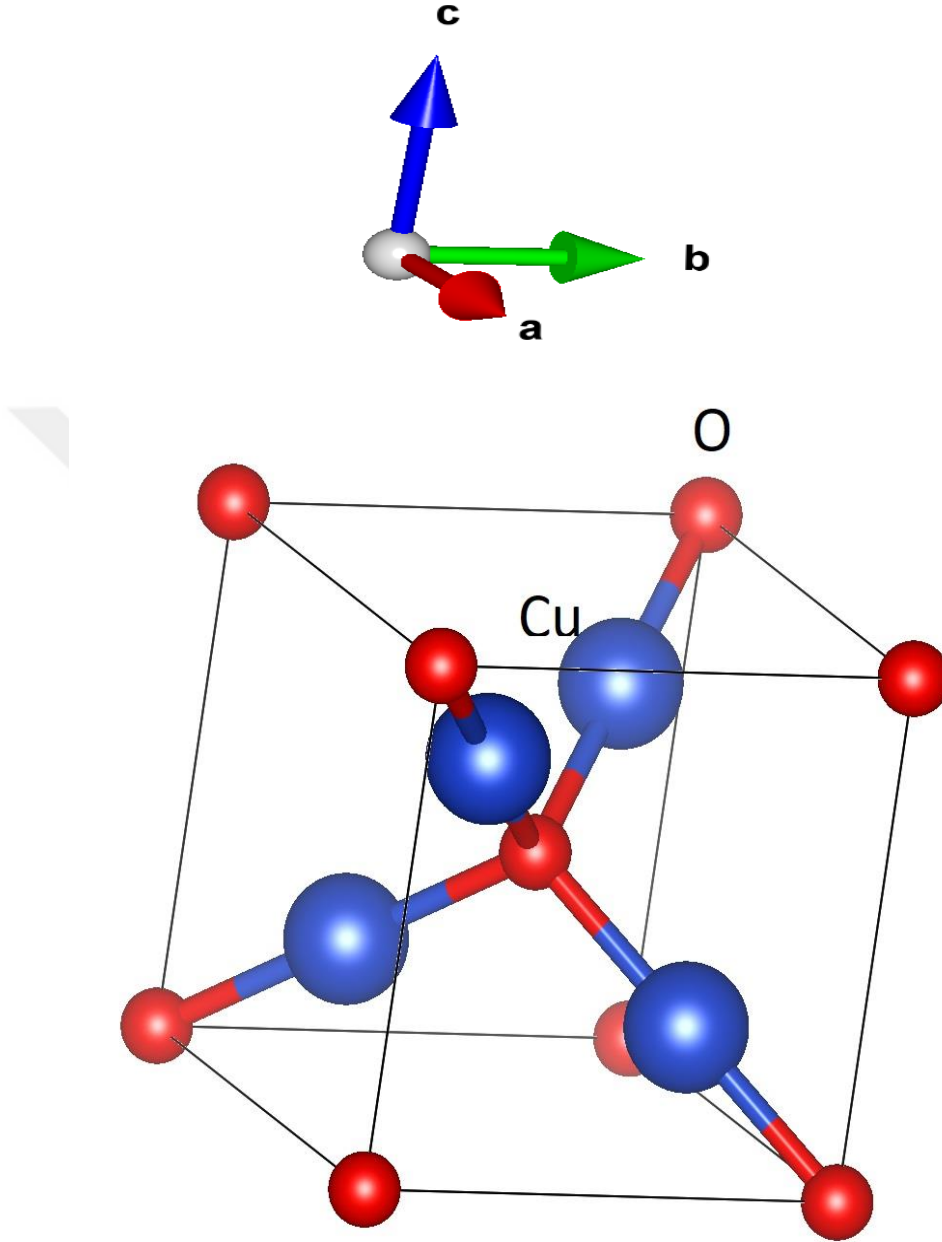
Elektriksel zelliklerin belirlenebilmesi için kare Şeklinde kesilen örnekler, dört nokta yöntemine göre tasarlanmış aparata Şekil 3.9. (b) klipsler yardımı ile tutturularak mıknatıs kitine Şekil 3.9. (a) yerleştirilmiş ve bilgisayar yardımı ile ölçümler gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, bakır (I) oksit (Cu_2O) ince filmleri, SILAR (Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyonu) yöntemi ile 10-, 20-, 30- ve 40-daldırma çevrimlerinde 50°C sıcaklığında cam alt taşlar üzerinde sentezlendi. Daha sonra, bu filmlerin kalınlığa bağlı yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel özellikleri incelendi ve detaylı bir şekilde yorumlandı.

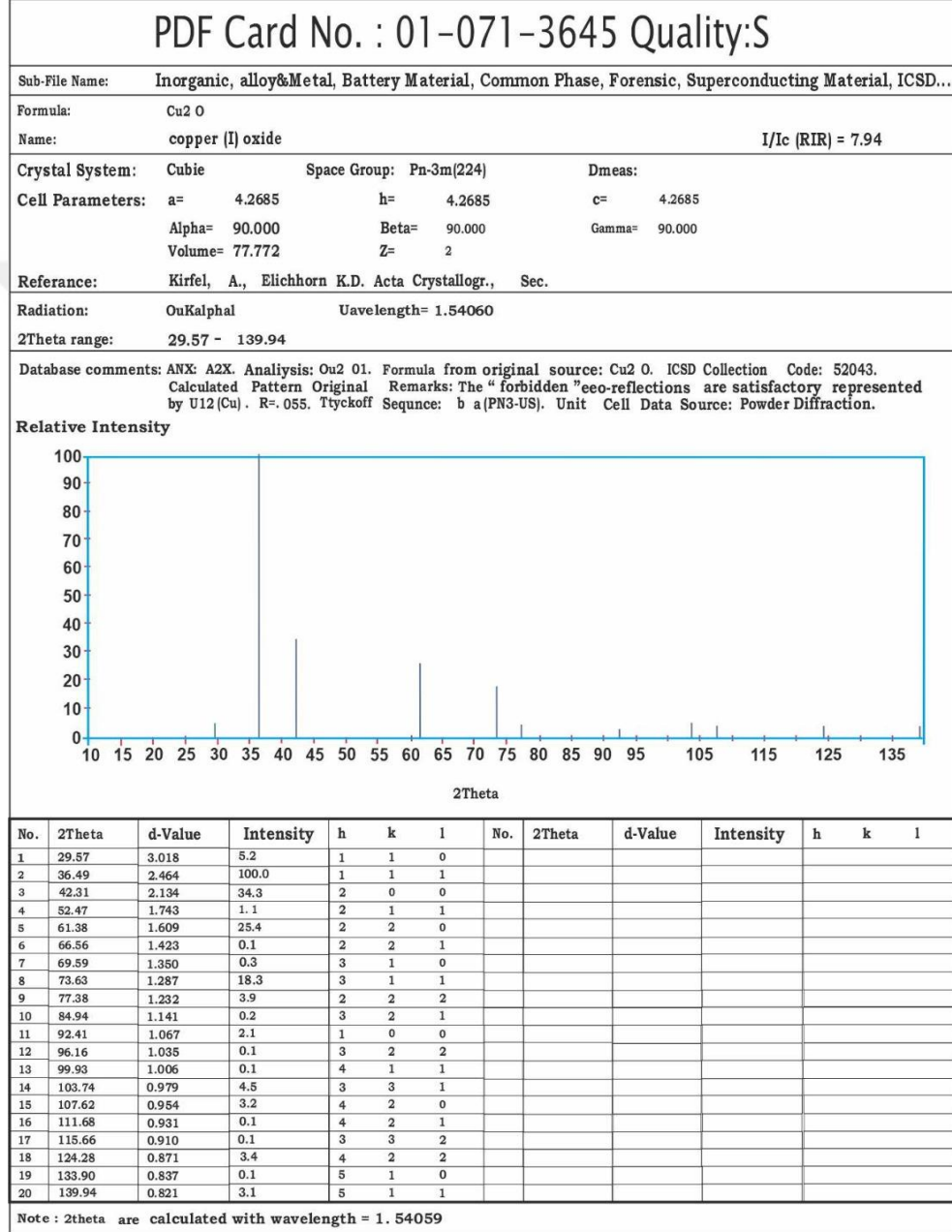
4.1. Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin Araştırılması

X-ışını kırınımı analizleri, ince filmlerin içerdėi kristallenme şekillerini (amorf, polikristal, mono kristal) ve fazlarını (kübik, tetragonal, monoklinik, ortorombik, trigonal, hegzagonal, triklinik), sıcaklık ve basınç gibi fiziksel parametrelere bağlı faz değişimlerini, tanecik boyutu ve yönelimlerini, filmlerin kimyasal kompozisyonunu (stokiyometri), birim hacime ait örgü sabitlerini (a , b , c), filmlere ait kırınım düzlemlerini (hkl), ince filmlere ait düzlemler arası uzaklığı (d) ve ince filmlerin birim hacim yoğunluğunu belirlemede çok iyi bir yöntemdir. Bakır oksit ince filmlerin karakterizasyonu için X-ışını kırınım ölçümleri PANalytical marka ve EMPYREAN XRD model cihaz ($\text{CuK}_{\alpha 1}$, $\lambda=1.5405\text{ Å}$, 20–50 kV, 5–60 mA, tarama hızı 2 derece/dakika) ile otomatik veri hafızası kullanılarak $2\theta=10^\circ\text{--}70^\circ$ aralığında ve oda sıcaklığında elde edilmiştir. Bakır oksit (Cu_2O) opto-elektronik aletlerde çok kullanılan bir yarıiletkendir. Tarihte birçok deneysel çalışma ilk olarak bu yarıiletken üzerinde yapılmıştır. Cu_2O , kübik fazda kristallenmiş olup örgü uzunlukları ($a = b = c$), $a = 4.268\text{ Å}$, birim hücre uzay grubu $Pn-3m$ ve birim hücre eksen açıları; $\alpha=90.00^\circ$, $\beta=90.00^\circ$, $\gamma=90.00^\circ$ dir. VESTA 3 programı ile çizilmiş tipik bir Cu_2O 'nun kristal yapısı Şekil 4.1'de verilmiştir (Momma K. ve ark. 2011).



Şekil. 4.1. Cu_2O 'ya ait kristal yapı

Bakır (I) oksite (Cu_2O) ait PDF kart numarası 01-071-3645 dir ve aşağıda verilmiştir. Hesaplanan X-ışını kırınımı sonuçları bu kart a göre değerlendirildi.



10-daldırma çevriminde 50 °C sıcaklığında SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır oksit (Cu₂O) ince filmin X-ışını kırınım deseni (XRD) Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’de düşey eksen X-ışını şiddetini, yatay eksen ise Bragg kırınım açısını (2θ) yı göstermektedir. Şekilde dört ayrı kırınım piki görölmektedir, bu pikler; $2\theta = 29.25^\circ$, $2\theta = 36.20^\circ$, $2\theta = 42.14^\circ$ ve $2\theta = 61.10^\circ$ bulunmuştur. Bu açı değerleri aşağıda verilen Bragg kırınım kanununda kullanılarak düzlemler arası uzaklık (d) değerleri hesaplanıp Çizelge 4.1’de verilmiştir.

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

Bulunan 2θ ve d -değerleri PDF kartındaki (No:01–071–3645) değerler ile uyum içinde olduğu görölmüştür. Bu piklere karşılık gelen kırınım düzlemleri sırasıyla (110), (111), (200) ve (220) olarak bulunmuştur. Ayrıca, şekilden de göröleceği gibi 15°–30° aralığında cam alt taştan kaynaklı amorf bir yapı görölmüştür. Yine şekilden göröleceği gibi en büyük pik $2\theta = 36.20^\circ$ de (111) düzlemi boyunca olduğu görölmektedir (pik şiddeti yaklaşık 400 değerinde). Buradaki bu pik diğer üç pikten daha şiddetli olduğu görölmektedir. Bu da bize kristallenmenin diğerlerinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca, burada tercihli yönelimin bu düzlem boyunca olduğu açıkça görölmektedir.

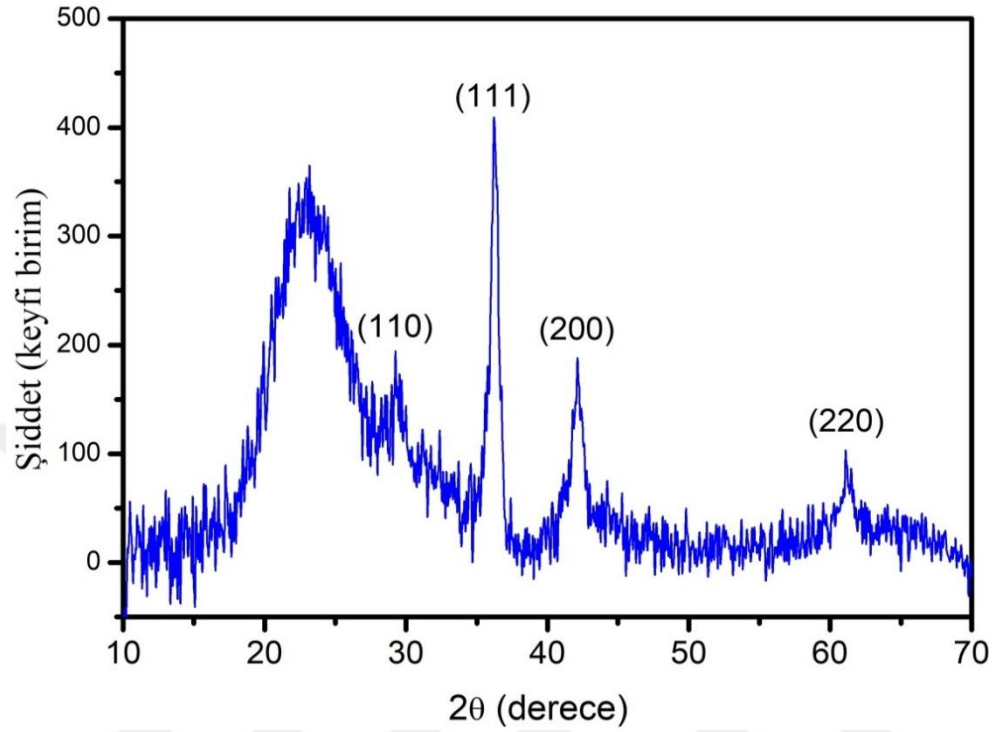
SILAR yöntemi ile 20-daldırma çevriminde 50 °C sıcaklığında sentezlenen bakır oksit (Cu₂O) ince filmin X-ışını kırınım deseni (XRD) Şekil 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.3’de yine dört ayrı kırınım piki görölmektedir, bu pikler; $2\theta = 29.48^\circ$, $2\theta = 36.27^\circ$, $2\theta = 42.21^\circ$ ve $2\theta = 61.24^\circ$ bulunmuştur. Bu açı değerleri Bragg kırınım kanununda kullanılarak düzlemler arası uzaklık (d) değerleri hesaplanıp Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bulunan 2θ ve d -değerleri PDF kartındaki (No:01–071–3645) değerler ile uyum içinde olduğu görölmüştür. Bu piklere karşılık gelen kırınım düzlemleri sırasıyla (110), (111), (200) ve (220) olarak bulunmuştur. Ayrıca, şekilden de göröleceği gibi 15°–30° aralığında cam alt taştan

kaynaklı amorf bir yapı görölmüştür. Bu yapı şiddetini bir miktar azaltmıştır. Yine şekilden göröleceğı gibi en büyük pik $2\theta = 36.27^\circ$ de (111) düzlemi boyunca olduğı görölmektedir (pik şiddeti yaklaşık 1086 değerinde). Buradaki bu pik diğer üç pikten daha şiddetli olduğı görölmektedir. Bu da bize kristallenmenin diğerlerinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca, burada tercihli yönelimin bu düzlem boyunca olduğı açıkça görölmektedir. Bakır oksit ince filmin kristallenmesinin arttığı X-ışını kırınım şiddetinden görölmektedir.

30-daldırma çevriminde 50°C sıcaklığında SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır oksit (Cu_2O) ince filmin X-ışını kırınım deseni (XRD) Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4'te yine dört ayrı kırınım piki görölmektedir, bu pikler; $2\theta = 29.48^\circ$, $2\theta = 36.32^\circ$, $2\theta = 42.26^\circ$ ve $2\theta = 61.30^\circ$ bulunmuştur. Bu açı değerleri Bragg kırınım kanununda kullanılarak düzlemler arası uzaklık (d) değerleri hesaplanıp Çizelge 4.3 de verilmiştir. Bulunan 2θ ve d -değerleri PDF kartındaki (No:01-071-3645) değerler ile uyum içinde olduğı görölmüştür. Bu piklere karşılık gelen kırınım düzlemleri sırasıyla (110), (111), (200) ve (220) olarak bulunmuştur. Ayrıca, şekilden de göröleceğı gibi 15° - 30° aralığında cam alt taştan kaynaklı amorf bir yapı görölmüştür. Bu yapı şiddetini bir miktar azaltmıştır. Yine şekilden göröleceğı gibi en büyük pik $2\theta = 36.32^\circ$ de (111) düzlemi boyunca olduğı görölmektedir (pik şiddeti yaklaşık 1229 değerinde). Buradaki bu pik diğer üç pikten daha şiddetli olduğı görölmektedir. Bu da bize kristallenmenin diğerlerinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca, burada tercihli yönelimin bu düzlem boyunca olduğı açıkça görölmektedir. Bakır oksit ince filmin kristallenmesinin arttığı X-ışını kırınım şiddeti değerinden görölmektedir.

SILAR yöntemi ile 40-daldırma çevriminde 50°C sıcaklığında sentezlenen bakır oksit (Cu_2O) ince filmin X-ışını kırınım deseni (XRD) Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5'te yine dört ayrı kırınım piki görölmektedir, bu pikler; $2\theta = 29.47^\circ$, $2\theta = 36.29^\circ$, $2\theta = 42.19^\circ$ ve $2\theta = 61.25^\circ$ bulunmuştur. Bu açı değerleri Bragg kırınım kanununda kullanılarak düzlemler arası uzaklık (d) değerleri

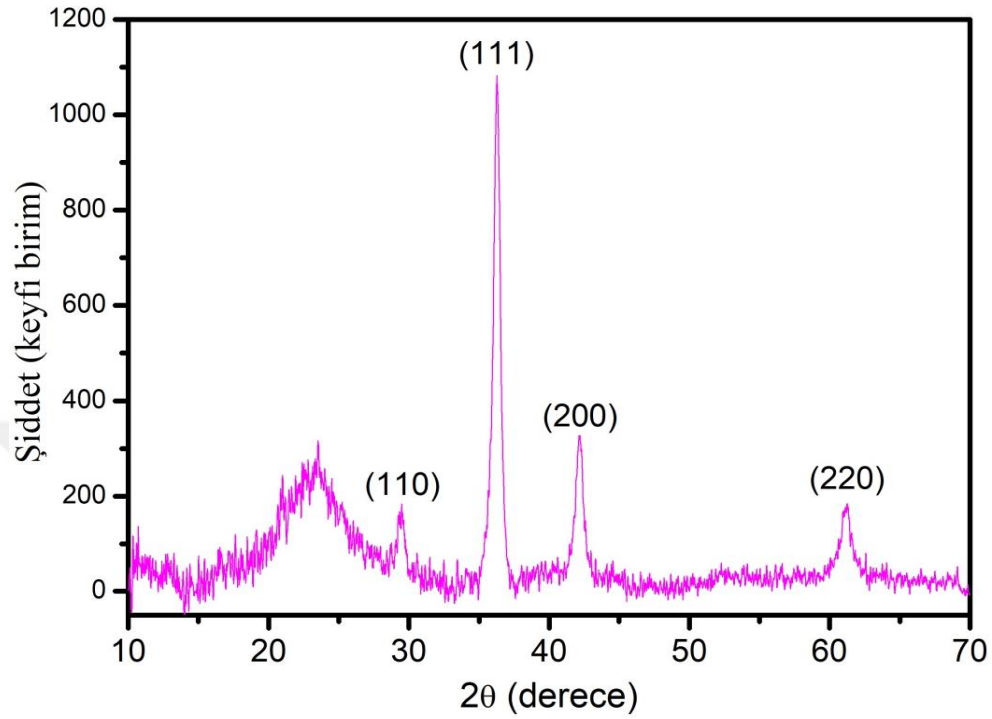
hesaplanıp Çizelge 4.4 de verilmiştir. Bulunan 2θ ve d -değerleri PDF kartındaki (No:01–071–3645) değerler ile uyum içinde olduğu görölmüştür. Bu piklere karşılık gelen kırınım düzlemleri sırasıyla (110), (111), (200) ve (220) olarak bulunmuştur. Ayrıca, şekilden de göröleceğı gibi 15° – 30° aralığında cam alt taştan kaynaklı amorf bir yapı görölmüştür. Bu amorf yapı film kalınlığının artışı ile şiddetini bir miktar azaltmıştır. Yine şekilden göröleceğı gibi en büyük pik $2\theta = 36.27^{\circ}$ de (111) düzlemi boyunca olduğu görölmektedir (pik şiddeti yaklaşık 2310 değerinde). Buradaki bu pik diğer üç pikten daha şiddetli olduğu görölmektedir. Bu da bize kristallenmenin diğerlerinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca, burada tercihli yönelimin bu düzlem boyunca olduğu açıkça görölmektedir. Bakır oksit ince filmin kristallenmesinin arttığı X-ışını kırınım şiddetinden görölmektedir. Bakır oksit ince filmlerinin kalınlık artışıyla beraber $2\theta = 15^{\circ}$ – 30° aralığında bulunan cam alt taştan kaynaklı amorf dokunun azaldığı görölmektedir. Genelde film kalınlığının artışıyla XRD desenlerinde görölen (dört pik) pik şiddetlerinin artığı görölmüştür. Özelde (111) düzlemine ait pik şiddetin arttığı başlangıçta 10-daldırma çevrimi için pik şiddetinin yaklaşık 400 olduğu, 20-daldırma çevrimi için pik şiddetinin yaklaşık 1080, 30-daldırma çevrimi için pik şiddetinin yaklaşık 1220 ve 40-daldırma çevrimi için pik şiddetinin ise yaklaşık 2315 olarak bulunmuştur. Bu da bize pik şiddetinin artışı ile filmlerin daha iyi kristalleştğini göstermektedir. X-ışını kırınımı (XRD) sonuçlarından, Cu_2O ince filmlerin polikristal şekilde, kübik fazda ve kristale ait tercihli yönelimin (111) Miller düzlemi boyunca olduğunu göstermektedir.



Şekil. 4.2. 10-daldırma çevriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu₂O ince filmin X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.1. 10-daldırma çevriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu₂O ince filmlerin XRD özellikleri

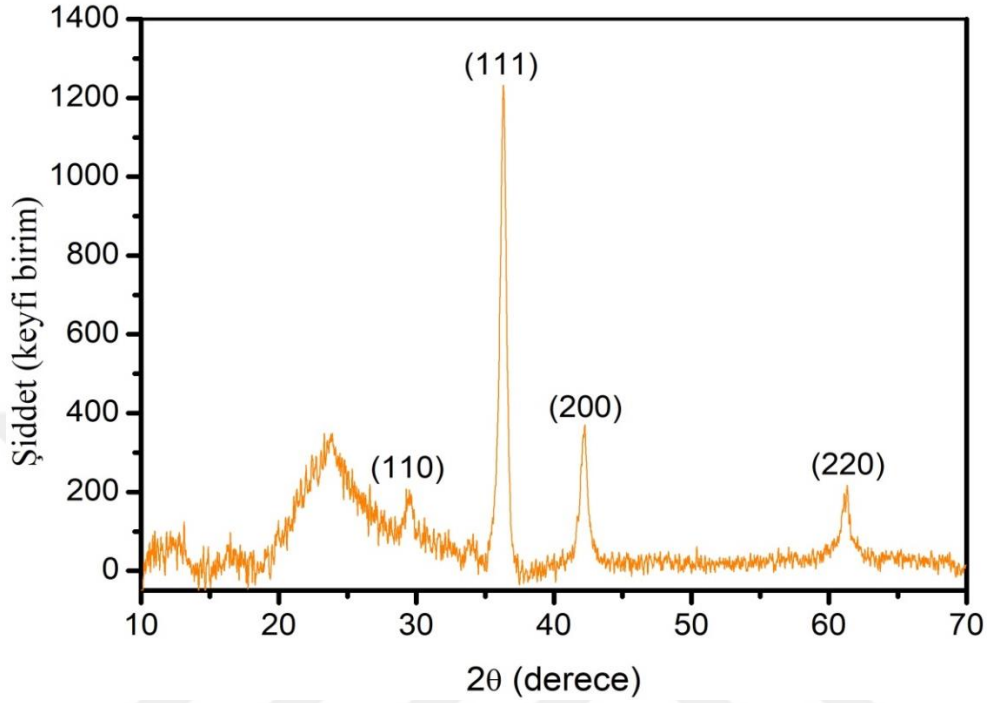
Standart değerler		Hesaplanan değerler		(hkl)	Hücre parametreleri		FWHM (der.)	Kristal boyutu (Å)
					$a=b=c$ (Å)			
					Standart	Hesaplanan		
$2\theta(^{\circ})$	d (Å)	$2\theta(^{\circ})$	d (Å)		Cu ₂ O	Cu ₂ O		
29.57	3.018	29.25	3.008	(110)	4.2685	4.2539	2.96	-
36.43	2.461	396.2	2.478	(111)	4.2685	4.2920	0.69	105
42.31	2.134	42.14	2.143	(200)	4.2685	4.2860	0.22	42
61.38	1.509	61.10	1.513	(220)	4.2685	4.2794	2.98	-



Şekil. 4.3. 20-daldırma çevriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu₂O ince filmin X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.2. 20-daldırma çevriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu₂O ince filmlerin XRD özellikleri

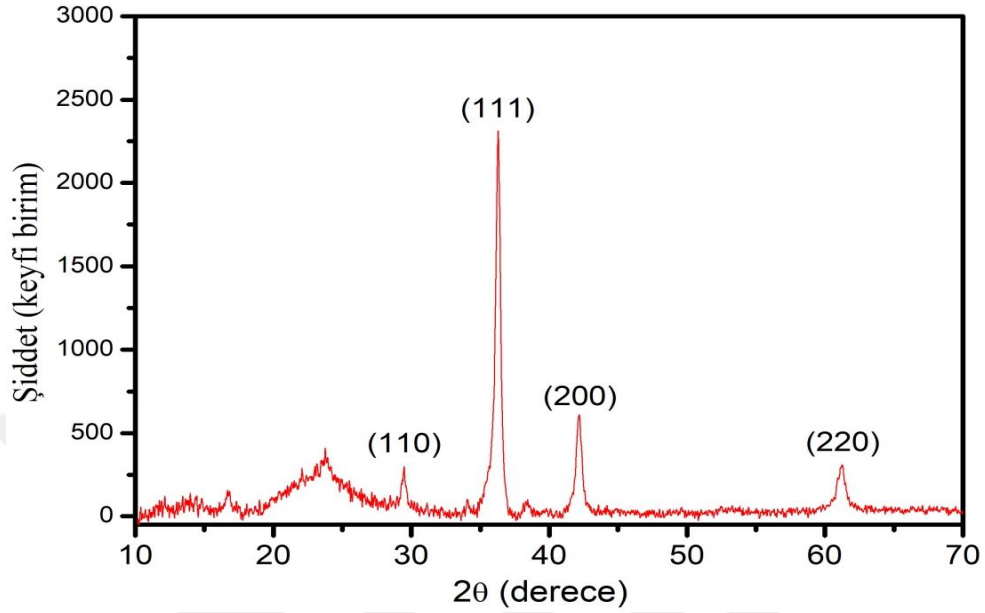
Standart değerler		Hesaplanan değerler		(hkl)	Hücre parametreleri		FWHM (der.)	Kristal boyutu (Å)
					$a=b=c$ (Å)			
					Standart	Hesaplanan		
$2\theta(^{\circ})$	d (Å)	$2\theta(^{\circ})$	d (Å)		Cu ₂ O	Cu ₂ O		
29.57	3.018	29.48	3.030	(110)	4.2685	4.2850	0.63	-
36.43	2.461	36.32	2.480	(111)	4.2685	4.2954	0.56	129
42.31	2.134	42.26	2.140	(200)	4.2685	4.2800	0.70	83
61.38	1.509	61.30	1.520	(220)	4.2685	4.2992	2.34	-



Şekil. 4.4. 30-daldırma çevriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu₂O ince filmin X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.3. 30-daldırma çevriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu₂O ince filmlerin XRD özellikleri

Standart değerler		Hesaplanan değerler		(hkl)	Hücre parametreleri		FWHM (der.)	Kristal boyutu (Å)
					$a=b=c$ (Å)			
					Standart	Hesaplanan		
$2\theta(^{\circ})$	d (Å)	$2\theta(^{\circ})$	d (Å)		Cu ₂ O	Cu ₂ O		
29.57	3.018	29.48	3.051	(110)	4.2685	4.3147	3.54	-
36.43	2.461	36.27	2.475	(111)	4.2685	4.2868	0.55	143
42.31	2.134	42.21	2.141	(200)	4.2685	4.2820	0.58	105
61.38	1.509	61.24	1.514	(220)	4.2685	4.2822	2.25	-



Şekil. 4.5. 40-daldırma çevriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu₂O ince filmin X-ışını kırınım deseni

Çizelge 4.4. 40-daldırma çevriminde 50 ° C sıcaklıkta depolanan Cu₂O ince filmlerin XRD özellikleri

Standart değerler		Hesaplanan değerler		(hkl)	Hücre parametreleri $a=b=c$ (Å)		FWHM (der.)	Kristal boyutu (Å)
					Standart	Hesaplanan		
2θ (°)	d (Å)	2θ (°)	d (Å)		Cu ₂ O	Cu ₂ O		
29.57	3.018	29.47	3.030	(110)	4.2685	4.2850	0.70	-
36.43	2.461	36.29	2.480	(111)	4.2685	4.2954	0.38	187
42.31	2.134	42.19	2.140	(200)	4.2685	4.280	0.45	151
61.38	1.509	61.25	1.510	(220)	4.2685	4.2709	0.91	-

Köbik yapıda bulunan bir kristale ait atom düzlemleri arasındaki mesafe (d) ile örgü parametre değeri ($a = b = c$) arasındaki ilişki aşağıda verilen eşitlik ile belirlenir (Cullity, 1967);

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

Burada, d atom düzlemleri arasındaki mesafeyi, (hkl) Miller indislerini, a birim hücreye ait örgü parametresini belirtmektedir. XRD çalışmalarımızda bakır oksit ince filmlere ait piklerin hücre parametreleri (örgü sabitleri; a, b, c) değeri yukarıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmış olup Çizelge 1, Çizelge 2, Çizelge 3, Çizelge 4 te verilmiştir. Hesaplanan bu örgü parametreleri değeri bakır oksite ait PDF kartındaki değeri ile uyumlu olduğu görölmüştür.

Kristalin boyutu, tanecik boyutundan daha küçüktür. Kristalin boyutu, XRD verileri kullanılarak Debye-Scherrer formülü ile belirlenebilir. Tanecik boyutu ise FE-SEM (Field Emission-Scanning Electron Microscopy) ile belirlenebilir. Kristal birim hücre içinden belirli bir düzlemsel yansıma ile bağlantılı bir kırınım modelinde X-ışını kırınımı (XRD) ait bir tepe noktası (hkl), maksimum yarı genişlik (FWHM) ile ters orantılıdır tepe noktası ne kadar dar olursa, kristalin boyutu o kadar büyük olur. Bunun nedeni, X-ışını demetinin kırınımını güçlendirerek, uzun ve dar bir tepe noktası ile sonuçlanan fazdaki bireysel kristalin alanlarının periyodikliğidir. Kristaller hatasız ve periyodik olarak düzenlenmişse, X-ışını, numunenin birden çok katmanı boyunca bile aynı açıda kırılır. Kristaller rastgele düzenlenmiş tanelere sahip ise veya düşük derecelerde periyodikliğe sahip ise, sonuç daha geniş bir tepe noktası olur.

Bakır oksit ince filmlerinin en büyük 2 piki olan (111) ve (200) a ait kristalin boyutu değeri aşağıdaki Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanıp Çizelge 1, Çizelge 2, Çizelge 3, Çizelge 4 te ayrı ayrı verilmiştir. Burada daldırma sayısına bağlı olarak bakır oksit ince filmlerin kalınlık değeri arttığı buna

bağlı olarakta kristalin pik şiddetlerinin arttığı görülmüştür. Eşitlik 4.3 ten görüleceği gibi β küçüldüğünde ters orantılı olarak G nin büyüdüğü görülmektedir.

$$G = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.3)$$

Burada, λ X-ışını dalga boyu, G kristal büyüklüğü, β pikin maksimum yarı genişliği ($FWHM$), θ Bragg kırınım açısıdır.

4.2. Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin Araştırılması

SILAR yöntemi ile sentezlenen Cu_2O ince filmlerin optik araştırmaları bize filmlerin ışığı ne kadar geçirdiğini ($\%T$), yansıttığını (R), soğurduğunu (A), optik bant aralığı (E_g), kırılma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) gibi optik sabitlerin değerleri hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlar. Bu da bize sentezlenen bakır oksit ince filmlerin nerelerde kullanılabileceği hakkında bilgi verir. Bakır (I) oksitin (Cu_2O) elektriksel iletkenliği p -tipi olup direkt bant aralıklı kübik yapıda bir yarıiletkenidir. Bu yarıiletkenin optik bant aralığı yaklaşık 2.00–2.6 eV dir. Bakır oksitin bu değerleri bu malzemenin güneş hücrelerinde (pillerinde) soğurucu bir tabaka olarak kullanılması uygundur. Ayrıca, bakır oksitin oda sıcaklığındaki optik değerleri; filmin sentezlenmesine, ince filmin kalınlığına, çözelti konsantrasyonu değerine, kullanılan çözeltinin pH ve sıcaklığına, kullanılan alt taşa, deneyde kullanılan kimyasalların saflık derecesine sıkı bir şekilde bağlıdır.

50 ° C'de 10-, 20-, 30- ve 40- daldırma çevrimlerinde SILAR yöntemi ile cam alt taşlar üzerinde sentezlenen Cu_2O ince filmlerin ($\%T$) optik geçirgenlik ve (A) optik soğurma değerleri laboratuvarımızda mevcut olan Perkin Elmer UV-vis-NIR Lambda 2S markalı spektrofotometre aleti yardımı ile $\lambda=190\text{--}1100$ nm aralığında ölçümler oda sıcaklığında yapıldı. Optik geçirgenlik ve optik soğurma ölçümlerden hemen önce sistemin zemin düzeltilmesi yapılmıştır. Cam alt taşlardan geçen tek renkli (monokromatik) ışınım $\%100$ olarak normalize edildi ve böylece

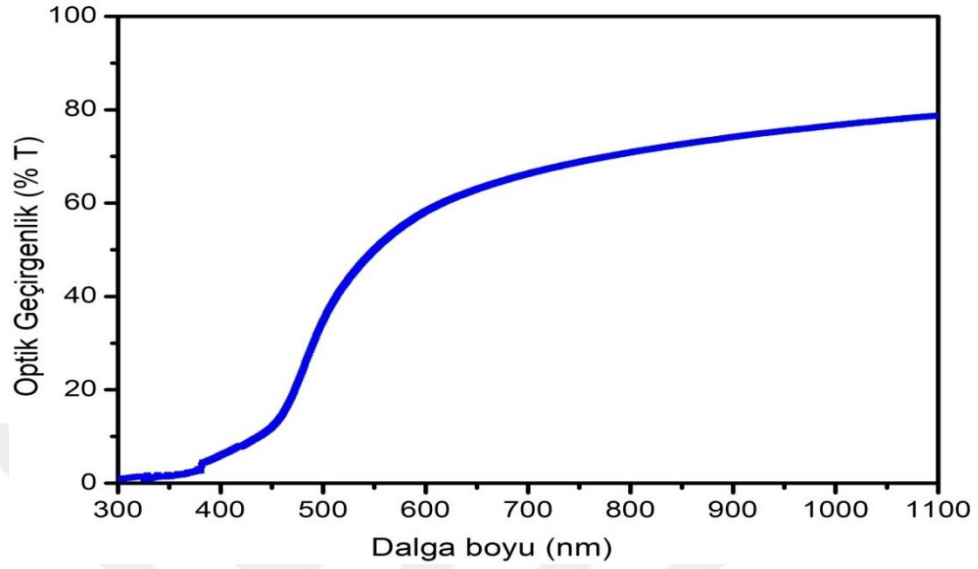
bakır oksit örnekleri üzerinden okunacak optik geçirgenlik (% T) ve optik soğurma (A) değerleri (oda sıcaklığında) cam alt taş soğurmasından bağımsız hale getirildi. Burada elde edilen veriler bakır (I) oksit üzerinden alınan verilerdir.

10-daldırma çevriminde 50 ° C de SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır oksit ince filmine ait optik geçirgenlik değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.6'da görölmektedir. 10-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için değerleri 400 nm de %5.26, 550 nm %50.55, 700 nm deki değeri ise %66.20 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %70.39–%78.93 aralığında bulunmuştur. Şekil 4.6'dan dalga boyunun artışı ile optik geçirgenlik değerlerinin arttığı görölmüştür.

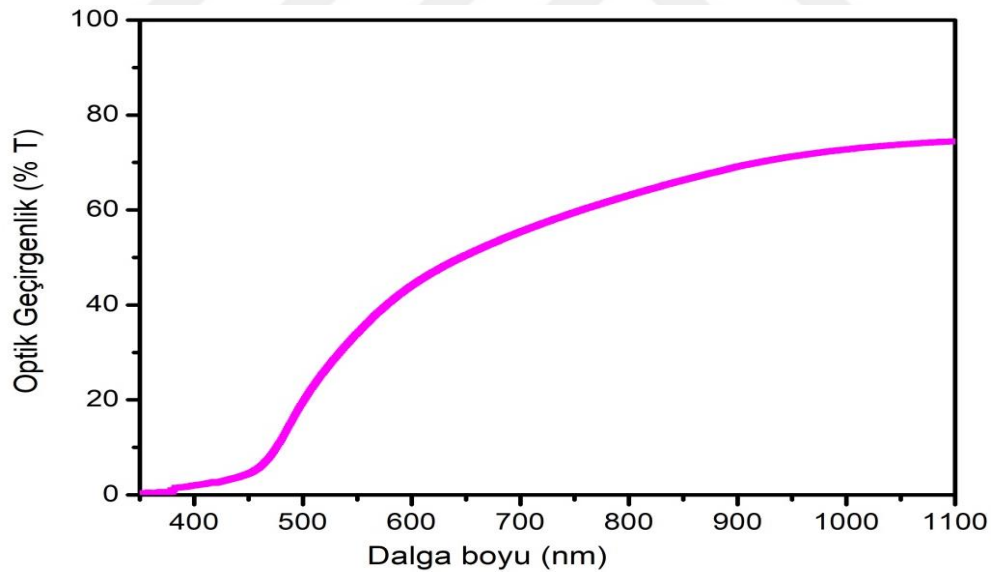
50 ° C de SILAR yöntemi ile 20-daldırma çevriminde hazırlanan bakır oksit ince filmin optik geçirgenlik değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.7'de verilmiştir. 20-daldırma çevriminde hazırlanan bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için değerleri 400 nm de %1.84, 550 nm %33.67, 700 nm deki değeri ise %55.20 bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %63.04–%73.81 aralığında bulunmuştur.

30-daldırma çevriminde 50 ° C de SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır oksit ince filmine ait optik geçirgenlik değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.8'de verilmiştir. Cu₂O ince filmin 400 nm deki optik geçirgenlik değeri %0.14 ten başlayarak dalga boyunun artışı ile 550 nm de %11.64 , 700 nm deki değeri %30.25 olarak bulunmuştur. Aynı film için yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %37.59–%48.82 aralığında bulunmuştur.

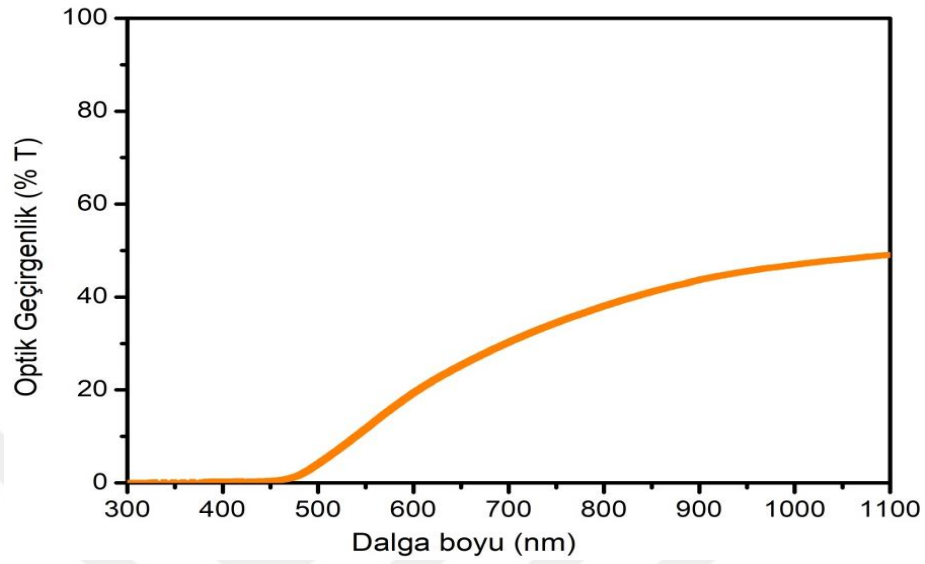
50 ° C de SILAR yöntemi ile 40-daldırma çevriminde hazırlanan bakır oksit ince filmin optik geçirgenlik değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.9'da görölmektedir. 40-daldırma çevriminde hazırlanan Cu₂O ince filmin görünür bölge (400–700 nm) için değerleri 400 nm de %0.87, 550 nm %11.42, 700 nm deki değeri ise %20.21 bulunmuştur. İnce filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %25.10–%31.94 aralığında bulunmuştur.



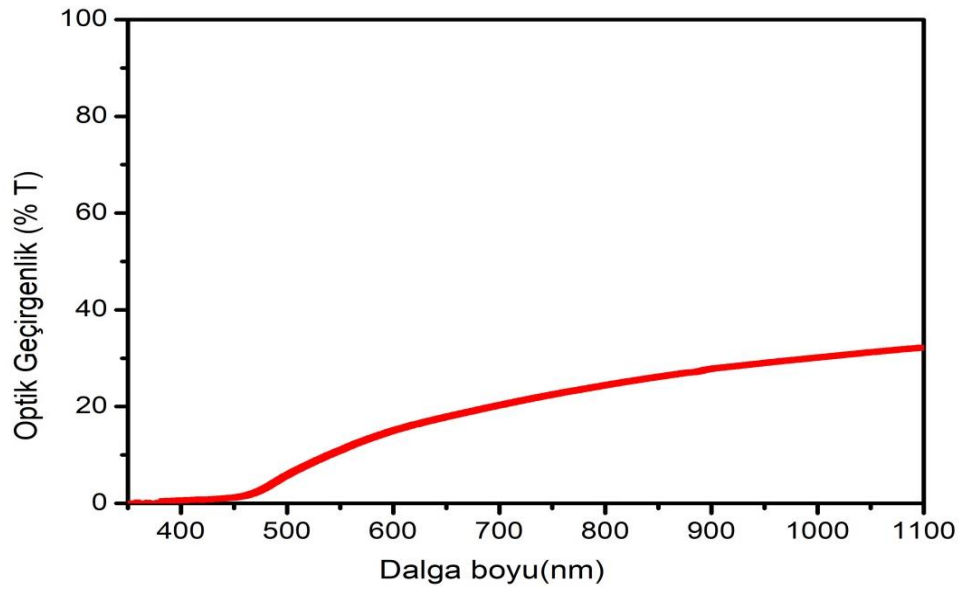
Şekil. 4.6. 10-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik geçirgenlik grafiği



Şekil. 4.7. 20-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik geçirgenlik grafiği



Şekil. 4.8. 30-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik geçirgenlik grafiği



Şekil. 4.9. 40-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik geçirgenlik grafiği

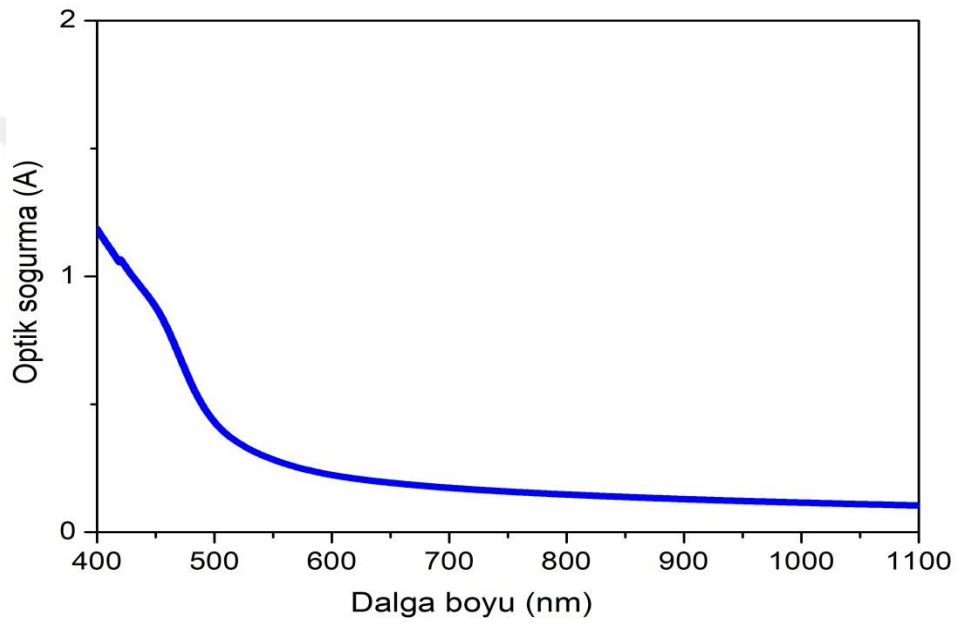
10-daldırma çevriminde 50 °C’de SILAR yöntemi ile cam alt taş üzerinde sentezlenen bakır (I) oksit (Cu₂O) ince filmin optik soğurma değerlerinin dalga boyuna bağı eğrisi Şekil 4.10’da görlmektedir. İnce filmin 400 nm deki soğurma değeri 1.18, 550 nm deki değeri, 0.28 ve 700 nm deki değeri 0.17 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.13–0.10 aralığında bulunmuştur. Şekil 4.10’dan da görleceğı gibi görünür bölge başlangıcında optik soğurma değerleri büyük ve bant içine doğru kaymakta, dalga-boyunun artışı ile soğurma değerleri bir miktar azalış göstermektedir. Buna benzer bir sonuç literatürde mevcuttur (Chatterjee ve ark., 2016).

20-daldırma çevriminde 50 °C’de SILAR yöntemi ile cam alt taş üzerinde sentezlenen bakır (I) oksit (Cu₂O) ince filmin optik soğurma değerlerinin dalga boyuna bağı eğrisi Şekil 4.11’de verilmiştir. Bakır oksit ince filmin 400 nm deki soğurma değeri 1.70, 550 nm deki değeri 0.48 ve 700 nm deki değeri 0.25 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.18–0.12 aralığında bulunmuştur. Şekil 4.11’den de görleceğı gibi görünür bölge başlangıcında optik soğurma değerleri dalga-boyunun artışı ile bir miktar azalış göstermektedir.

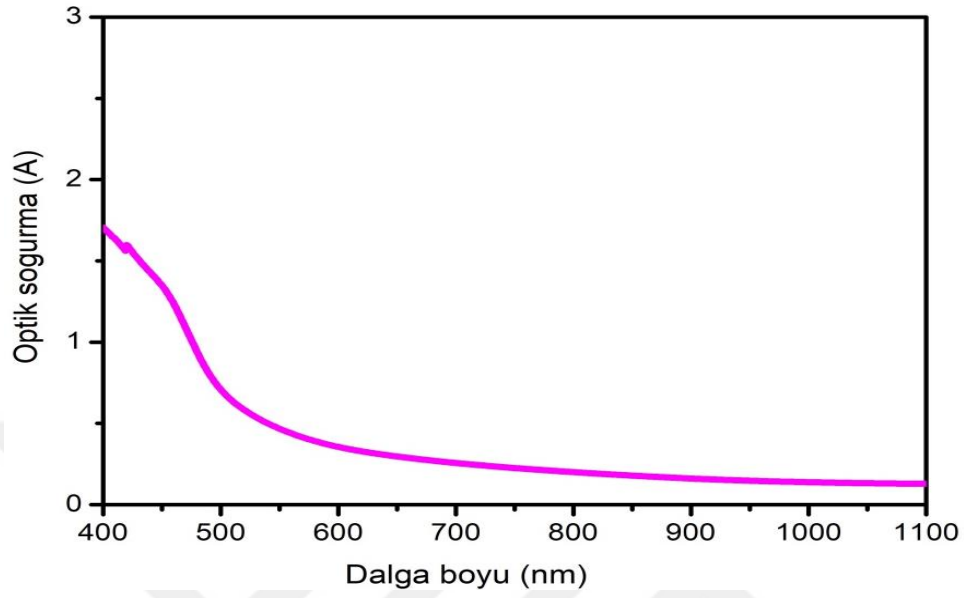
30-daldırma çevriminde 50 °C’de SILAR yöntemi ile cam alt taş üzerinde sentezlenen bakır (I) oksit (Cu₂O) ince filmin optik soğurma değerlerinin dalga boyuna bağı eğrisi Şekil 4.12’de görlmektedir. İnce filmin 400 nm deki soğurma değeri 2.50, 550 nm deki değeri, 0.97 ve 700 nm deki değeri 0.53 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.42–0.31 aralığında bulunmuştur. Şekilden görleceğı gibi görünür bölge başlangıcında optik soğurma değerleri büyük ve dalga-boyunun artışı ile soğurma değerleri bir miktar azalış göstermektedir.

40-daldırma çevriminde 50 °C’de SILAR yöntemi ile cam alt taş üzerinde sentezlenen bakır (I) oksit (Cu₂O) ince filmin optik soğurma değerlerinin dalga boyuna bağı eğrisi Şekil 4.13’de verilmiştir. İnce filmin 400 nm deki soğurma

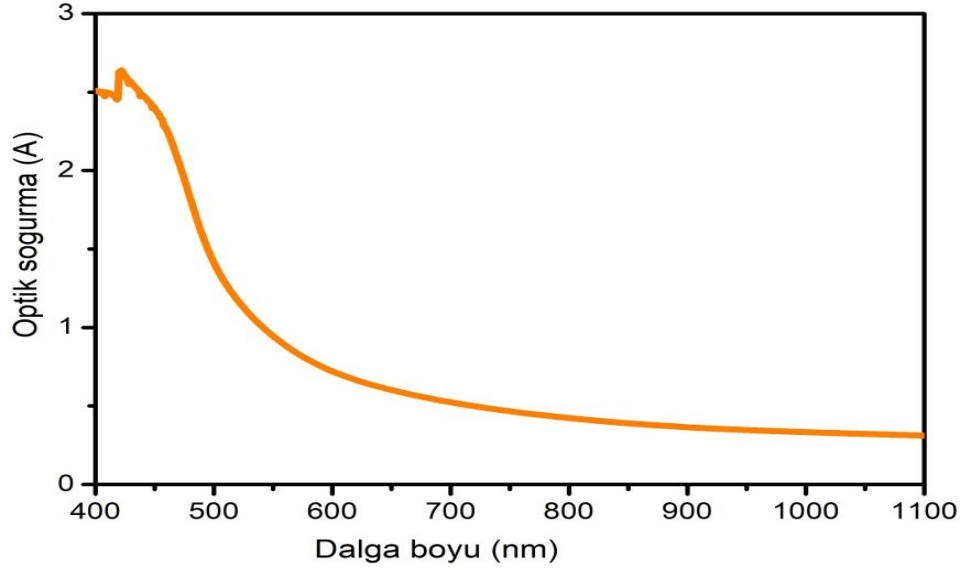
değeri 2.36, 550 nm deki değeri 1.07 ve 700 nm deki değeri 0.66 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.59–0.45 aralığında bulunmuştur. Şekilden grleceği gibi görünür bölge başlangıcında optik soğurma değerleri büyük ve dalga-boyunun artışı ile soğurma değerleri bir miktar azalış göstermiştir.



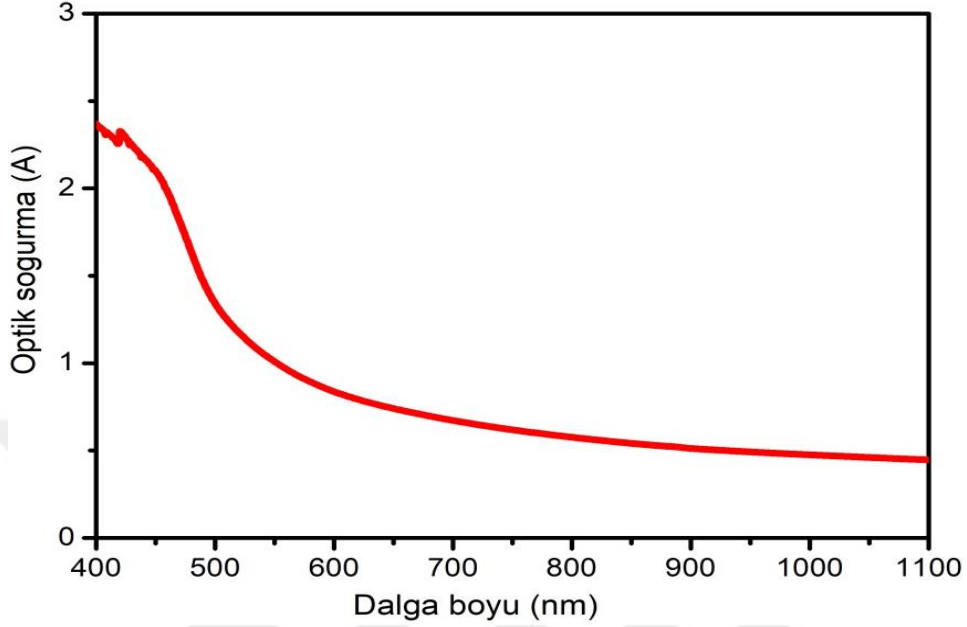
Şekil. 4.10. 10-daldırma çevriminde depolanan Cu₂O ince filmin optik soğurma grafiği



Şekil. 4.11. 20-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik soğurma grafiği



Şekil. 4.12. 30-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik soğurma grafiği



Şekil. 4.13. 40-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filmin optik soğurma grafiği

Şekil 4.14'te 50°C sıcaklıkta 10-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin dalga boyu-yansımaya eğrisi verilmiştir. Dalga boyuna bağlı yansımaya değerleri, optik soğurma ve optik geçirgenlik verileri yardımı ile hesaplandı. Gelen monokromatik ışık, bir ortamdan farklı bir ortama geçerken bir miktarı farklı ortamların ara kısmında yansımaya uğrar. Bu yansımaya (%R) değerleri dalga-boyuna bağlı olarak çizildi.

10-daldırma çevriminde 50°C de SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin %R-dalga boyu değişimi Şekil 4.14'te verilmiştir. 10-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için yansımaya değerleri 400 nm de %55.46, 550 nm %19.23, 700 nm deki değeri ise %11.37 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %9.45–%6.96 aralığında bulunmuştur. Şekil 4.14'ten görüleceği gibi dalga boyunun artışı ile yansımaya değerlerinin azaldığı görülmüştür.

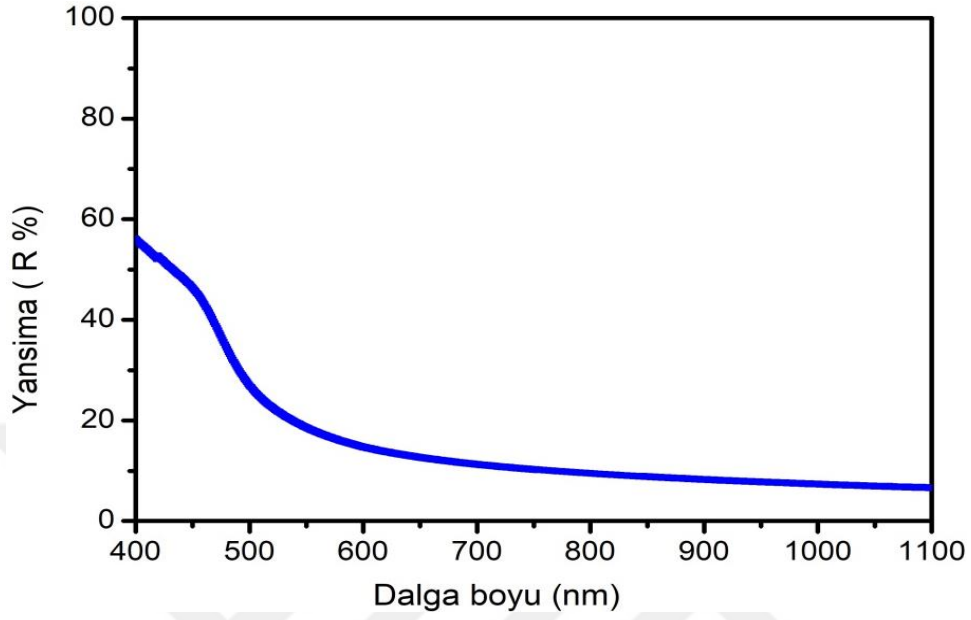
Bu sonuçlar literatürde verilen sonuçlar ile uyumludur (Ravichandran ve ark., 2015a).

20-daldırma çevriminde 50 ° C de SILAR yöntemi ile sentezlenen Cu₂O ince filmin %R-dalga boyu değişimi Şekil 4.15'te verilmiştir. 20-daldırma çevriminde depolanan Cu₂O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için yansıma değerleri 400 nm de %67.22, 550 nm %26.07, 700 nm deki değeri ise %16.54 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %12.14–%8.17 aralığında bulunmuştur. Şekilden görüleceği gibi dalga boyunun artışı ile yansıma değerlerinin azaldığı görülmektedir.

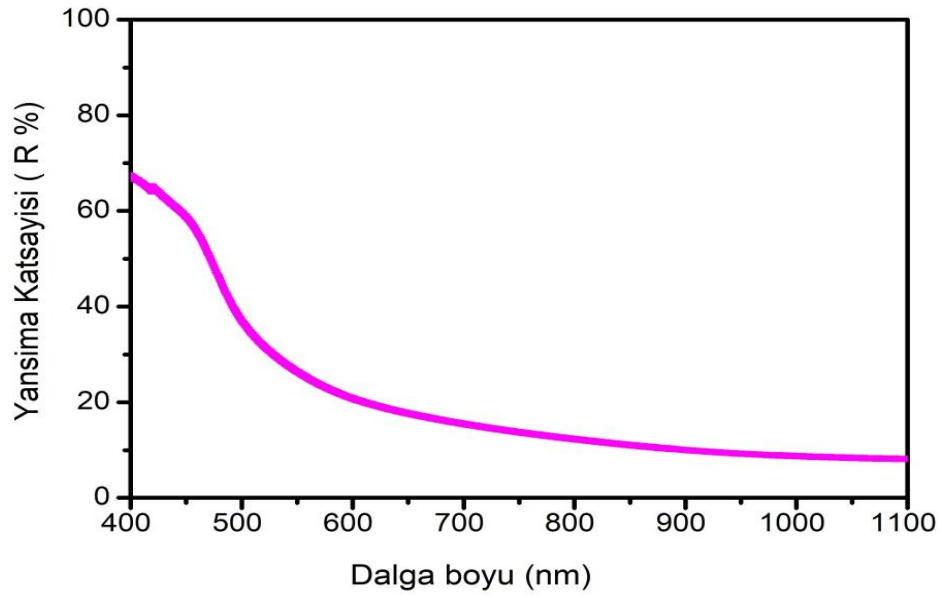
30-daldırma çevriminde 50 ° C de SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin %R-dalga boyu değişimi Şekil 4.16'da görülmektedir. 30-daldırma çevriminde depolanan bakır oksit ince filminin görünür bölgedeki yansıma değerleri 400 nm de %82.80, 550 nm %44.27, 700 nm deki değeri ise %29.03 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %24.20–%18.28 aralığında bulunmuştur. Şekilden görüleceği gibi dalga boyunun artışı ile yansıma değerlerinin azaldığı görülmüştür.

40-daldırma çevriminde 50 ° C de SILAR yöntemi ile sentezlenen Cu₂O ince filmin %R-dalga boyu değişimi Şekil 4.17'de verilmiştir. 40-daldırma çevriminde depolanan Cu₂O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için yansıma değerleri 400 nm de %75.15, 550 nm %45.15, 700 nm deki değeri ise %37.73 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %34.21–%28.89 aralığında bulunmuştur. Şekilden görüleceği gibi dalga boyunun artışı ile yansıma değerlerinin azaldığı görülmektedir.

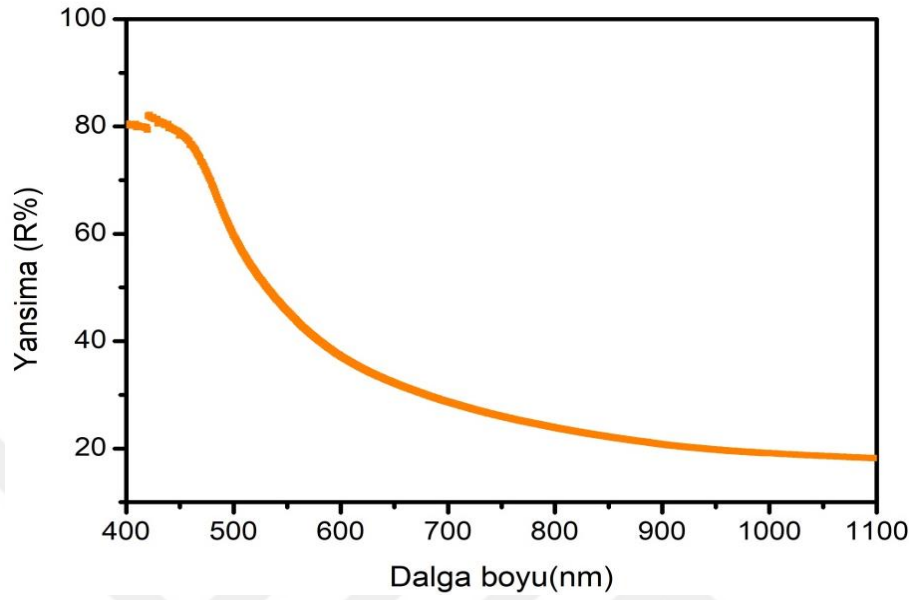
%R değerleri, filmin kırılma indisine doğrudan bağlı olup kırılma indisi artığında bakır oksit ince filmin %R değerleri dalga boyuna bağlı olarak artış gösterir.



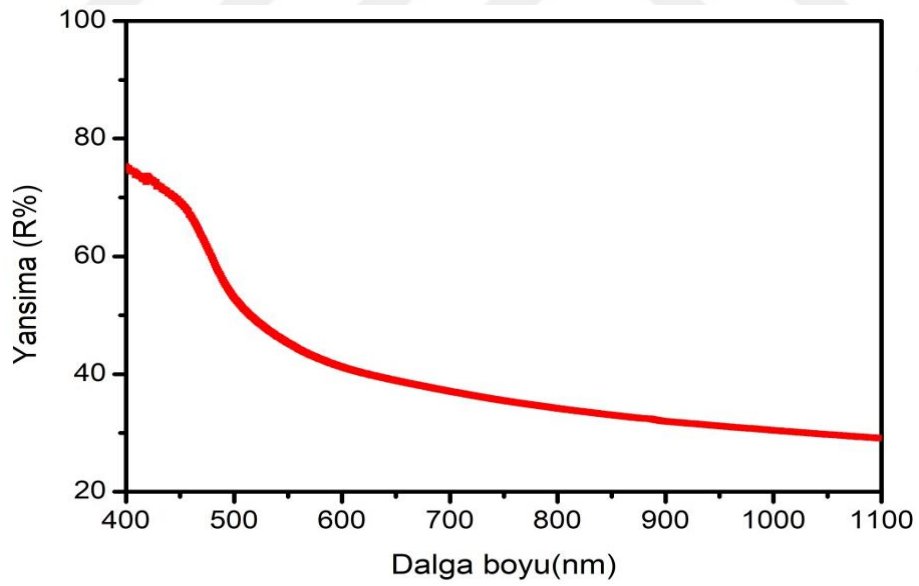
Şekil. 4.14. 10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin dalga boyuna bağlı yansima grafiği



Şekil. 4.15. 20-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin dalga boyuna bağlı yansima grafiği



Şekil. 4.16. 30-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin dalga boyuna bağlı yansima grafiği

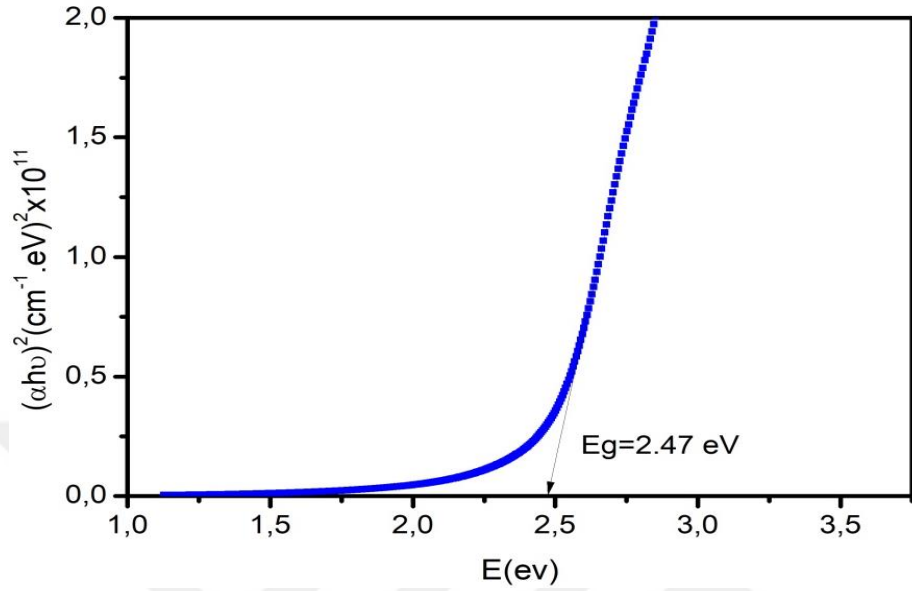


Şekil. 4.17. 40-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin dalga boyuna bağlı yansima grafiği

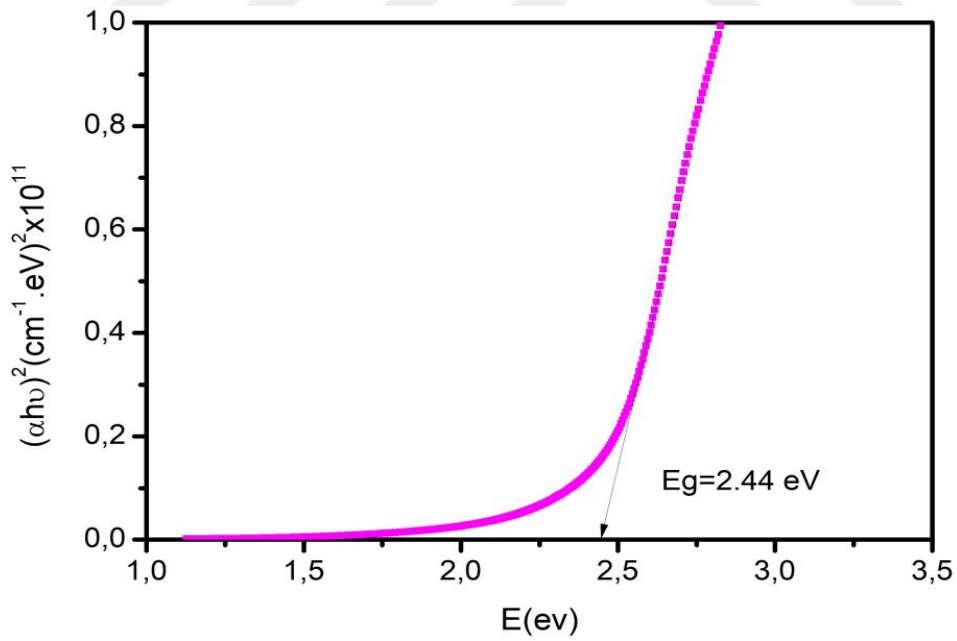
Bakır (I) oksit ince filmlerin enerji bant aralığı (E_g) değerleri aşağıda verilen Tauc eşitliği yardımı ile hesaplandı;

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

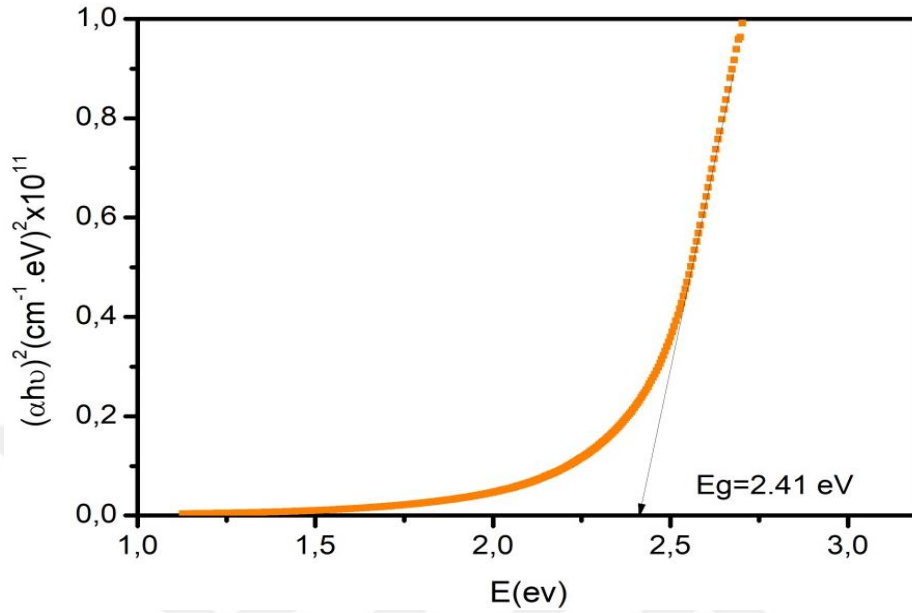
Burada, A sabit bir değeri, α soğurma katsayısını, h Planck sabitini ve ν foton frekansını göstermektedir. SILAR yöntemi ile 10-, 20-, 30-, ve 40-daldırma çevrimlerinde 50 °C de hazırlanan Cu₂O ince filmlere ait $(\alpha h\nu)^2$ nin enerjiye $E (h\nu)$ karşı grafikleri Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de görülmektedir. $(\alpha h\nu)^2 - E (h\nu)$ grafiğinde grafiğin lineer kısmının $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^2 = 0$ ’da kestiği nokta belirlenerek enerji bant aralığı (E_g) değerleri bulundu. $n=1/2$ değerini aldığımda direk geçişi, $n=2$ değerini aldığımda ise indirek geçişi göstermektedir. 10-, 20-, 30-, ve 40-daldırma çevrimlerinde sentezlenen Cu₂O ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri sırasıyla 2.47 eV, 2.44 eV, 2.41 eV ve 2.38 eV olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler literatürde verilen değerler ile uyumludur (Ahirrao P.B. ve ark., 2011, Kuo C.-H. Ve ark., 2007, Xu H. ve ark., 2013) . Bakır oksit ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri ince filmlerin kalınlık değerlerinin artışı ile azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın nedeni Moss-Burstein kayması ile açıklanabilir. Bir yarıiletkendeki Moss-Burstein kayması, iletim bandı kenarının alçalması ve değerlik bandı kenarının simetrik olarak yukarı itilmesi ile ilişkilidir (Sivakumar R. ve ark., 2007). Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13’deki soğurma grafiklerinde optik soğurma kenarlarının daha yüksek dalga boylarına doğru kaydığı (kırmızıya kayma) görülmektedir. Bu durum artan kalınlık değerleri ile Cu₂O filmlerin enerji bant aralığı değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Benzer şekilde, efektif enerji bant aralığındaki azalma, film kalınlığının artmasıyla enerji bant aralığında Urbach kuyruğu yakınında değerlik ve iletim bantlarının oluşması nedeniyle de açıklanabilir.



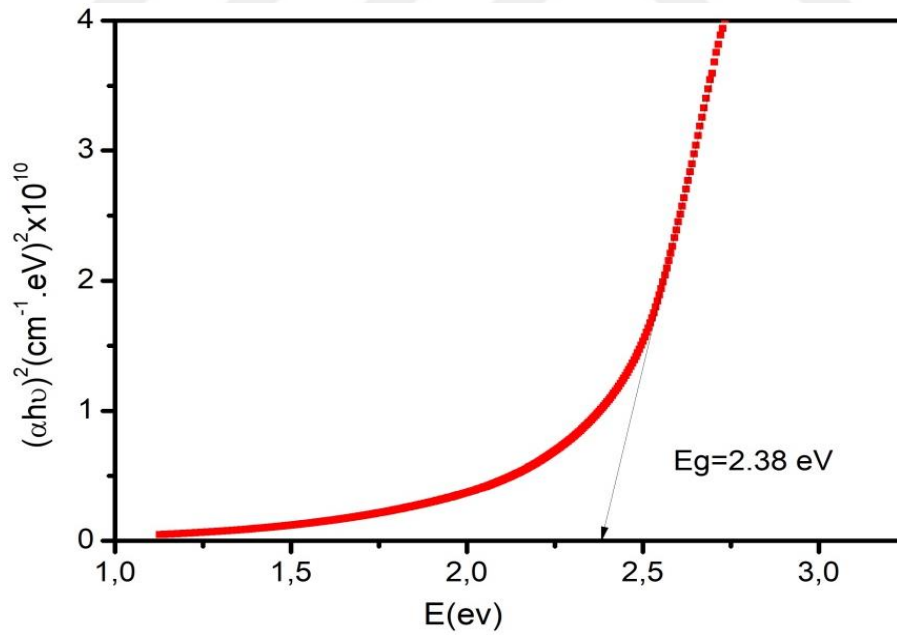
Şekil. 4.18. 10-daldırma çevriminde 50 ° C de hazırlanan Cu_2O ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ değışimi.



Şekil. 4.19. 20-daldırma çevriminde 50 ° C de hazırlanan Cu_2O ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ değışimi.



Şekil. 4.20. 30-daldırma çevriminde 50°C de hazırlanan Cu_2O ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ değışimi.



Şekil. 4.21. 40-daldırma çevriminde 50°C de hazırlanan Cu_2O ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ değışimi.

Bir yarıiletken ince filmin kırılma indisi (n), o yarıiletken ince film içinde yol alan ışığın ne kadar hızlı geçtiğini belirten boyutsuz bir katsayıdır. Kırılma indisi değerleri yarıiletken içindeki ışığın dalga boyuna bağılı olarak değışiklik gösterir. 10-daldırma çevriminde SILAR yöntemi ile 50 °C de sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin kırılma indisi değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.22’de verilmiştir. Cu₂O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için kırılma indisi değerleri 400 nm de 6.94, 550 nm 2.51, 700 nm deki değeri ise 1.98 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise 1.86-1.63 aralığında bulunmuştur. Şekil 4.22’den görüleceğı gibi dalga boyunun artışı ile bakır oksit ince filmin kırılma indisi değerlerinin azaldığı görlmektedir.

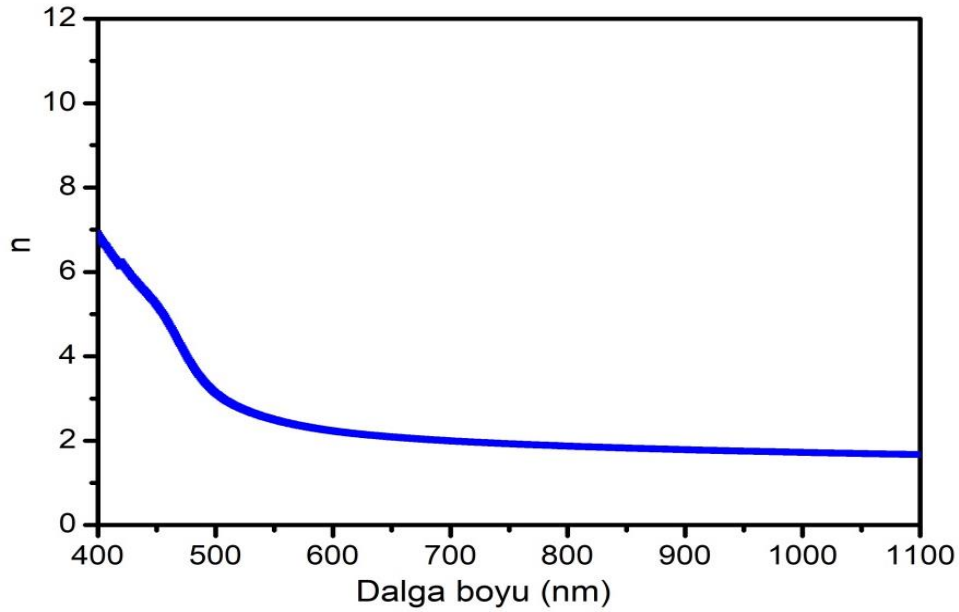
SILAR yöntemi ile 50 °C de 20-daldırma çevriminde sentezlenen Cu₂O ince filmin kırılma indisi değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.23’te verilmiştir. Cu₂O ince filminin görünür bölgedeki kırılma indisi değerleri 400 nm de 10.10, 550 nm 3.01, 700 nm deki değeri ise 2.72 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki kırılma indisi değerleri ise 800 nm de 2.27, 1100 nm deki değeri ise 1.84 olarak bulunmuştur. Şekil 4.23’ten görüleceğı gibi dalga-boyunun artışı ile Cu₂O ince filmin kırılma indisi değerlerinin azaldığı görlmektedir.

30-daldırma çevriminde SILAR yöntemi ile 50 °C de sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin kırılma indisi değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.24’te verilmiştir. Cu₂O ince filminin görünür bölgedeki kırılma indisi değerleri 400 nm de 17.01, 550 nm 4.92, 700 nm deki değeri ise 3.14 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki kırılma indisi değerleri ise 800 nm de 2.97, 1100 nm deki değeri ise 2.30 olarak bulunmuştur. Şekil 4.24’ten görüleceğı gibi dalga-boyunun artışı ile Cu₂O ince filmin kırılma indisi değerlerinin azaldığı görlmektedir.

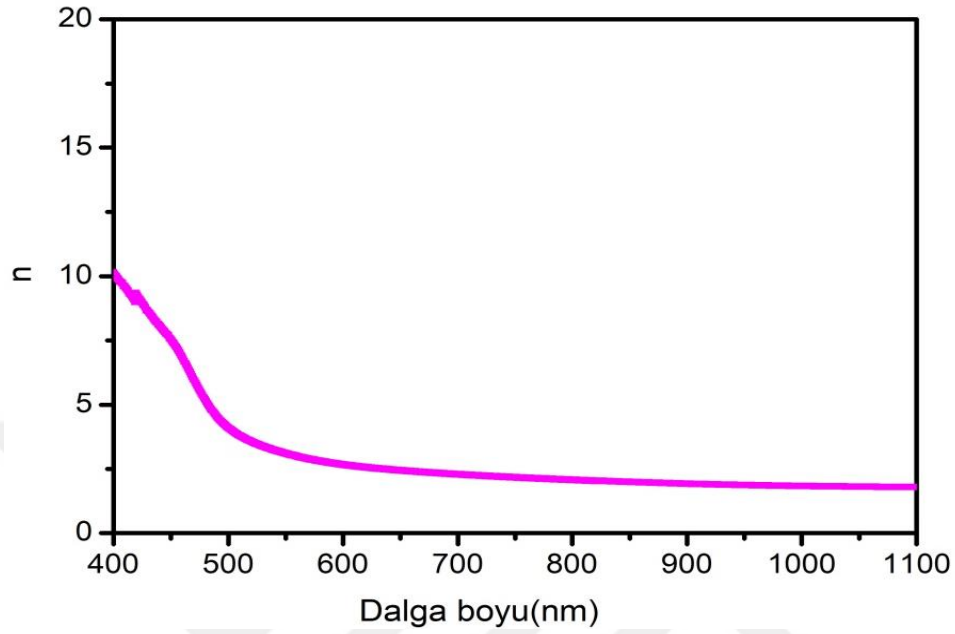
40-daldırma çevriminde SILAR yöntemi ile 50 °C de sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin kırılma indisi değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.25’te

verilmiştir. Cu₂O ince filminin görünür bölgedeki kırılma indisi değerleri 400 nm de 14.16, 550 nm 5.11, 700 nm deki değeri ise 3.88 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki kırılma indisi değerleri ise 800 nm de 3.70, 1100 nm deki değeri ise 3.27 olarak bulunmuştur. şekilden grleceği gibi dalga-boyunun artışı ile Cu₂O ince filmin kırılma indisi değerlerinin azaldığı grlmektedir.

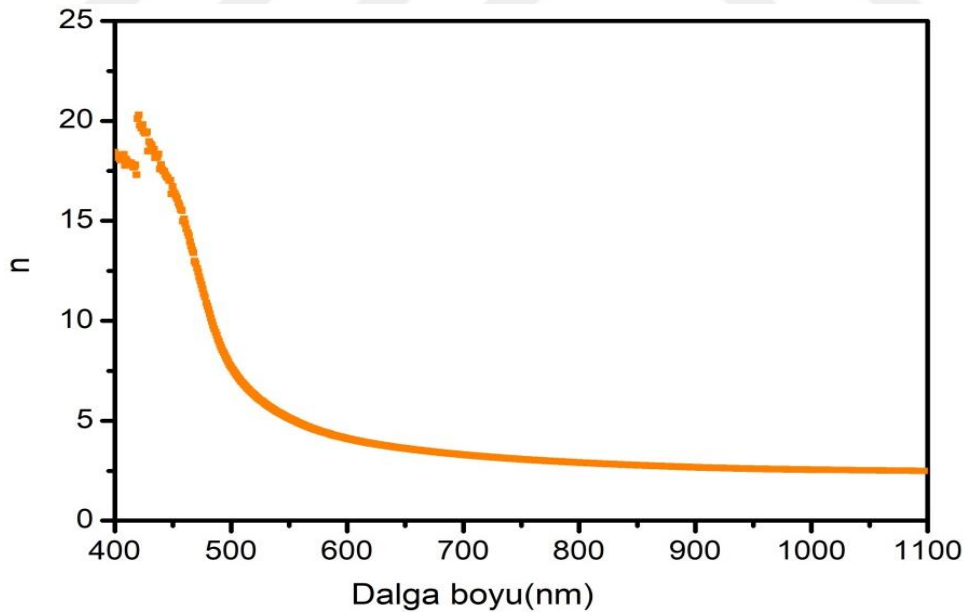
Bakır oksit ince filmlerin deneylerdeki çevrim sayıları (10, 20, 30 ve 40) arttıķa ince film kalınlıklarının arttığı buna bağlı olarakta ince filmlerin kırılma indisi değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ince filmlerin yansıma katsayısı değerlerinin filmlerin kalınlıklarına bağlı olarak arttığı yukarıda belirtilmişti buna bağlı olarak kırılma indisi değerleri yansıma değerleri ile doğru orantılıdır. Kalınlığa bağlı olarak yansıma değerleri arttığında filmlerin kırılma indisi değerleri de artmaktadır. Ek olarak, kırılma indisi değerlerindeki farklılıklar, bakır oksit ince filmlerin tanecik sınırlarından da kaynaklanabilir.



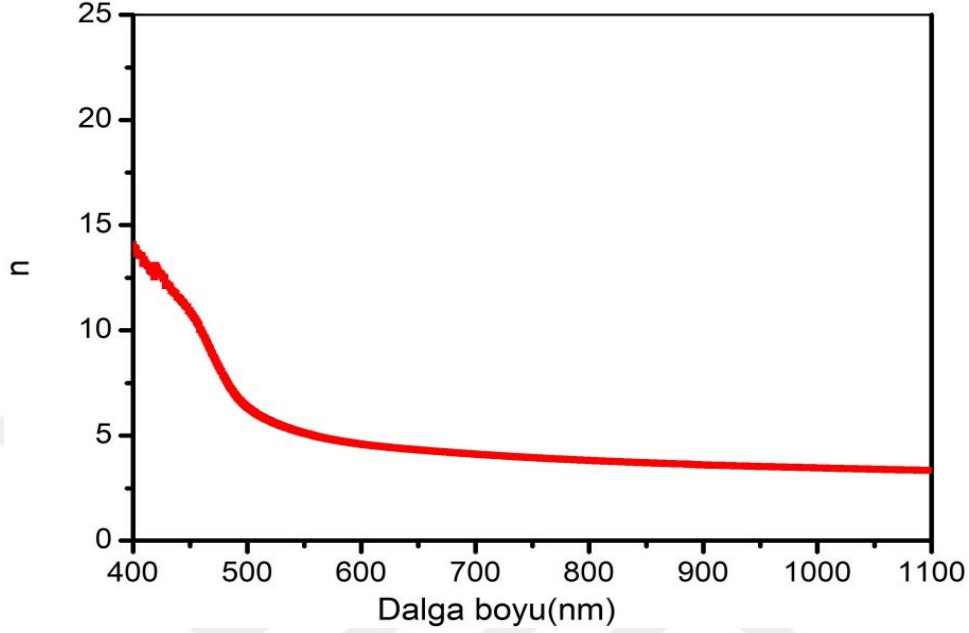
şekil. 4.22. 10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu₂O ince filmin kırılma indisinin dalga boyuna bağlı grafiği



Şekil. 4.23. 20-daldirma çevriminde sentezlenen Cu₂O ince filmin kırılma indisinin dalga boyuna bağlı grafiği



Şekil. 4.24. 30-daldirma çevriminde sentezlenen Cu₂O ince filmin kırılma indisinin dalga boyuna bağlı grafiği



Şekil. 4.25. 40-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin kırılma indisinin dalga boyuna bağlı kırılma indisi grafiğı

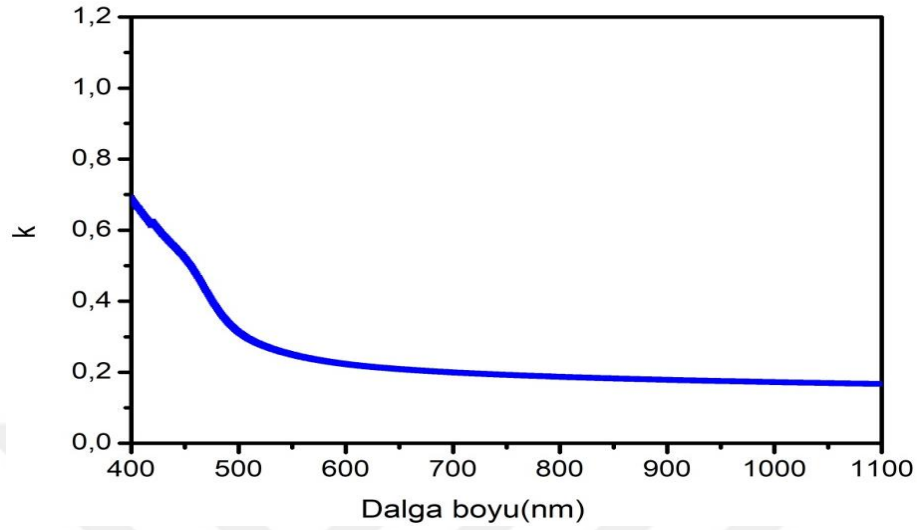
10-daldırma çevriminde 50°C de SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır oksit ince filmine ait sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.26'da verilmiştir. 10-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değerleri 400 nm de 0.69, 550 nm 0.25, 700 nm deki değeri ise 0.19 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değeri ise 0.17–0.16 aralığında bulunmuştur. Şekil 4.26'dan dalga boyunun artışı ile sönüm katsayısı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

50°C de SILAR yöntemi ile 20-daldırma çevriminde sentezlenen bakır oksit ince filmine ait sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.27'de görlmektedir. 20-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değeri 400 nm de 0.42, 550 nm 0.16, 700 nm deki değeri ise 0.10 olarak bulunmuştur. Aynı filmin

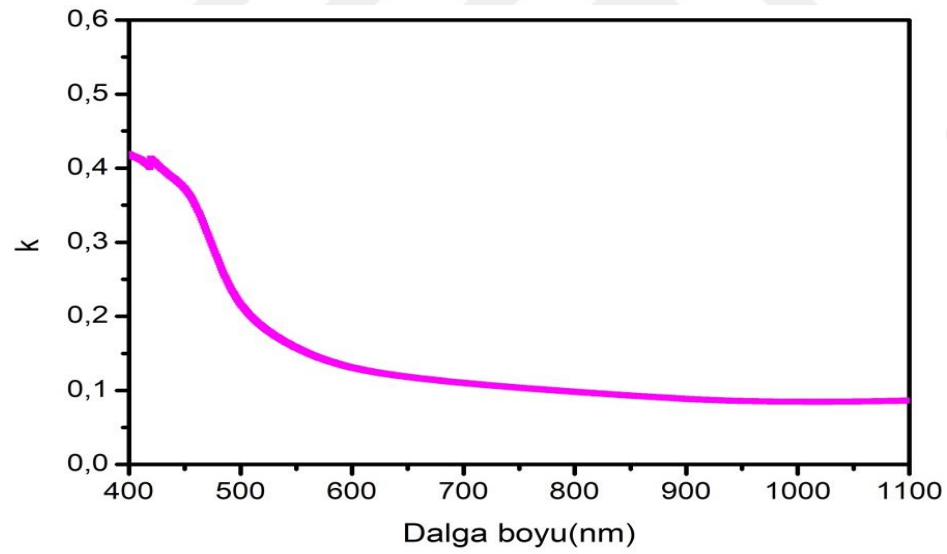
yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değeri ise 0.09–0.08 aralığında bulunmuştur. Şekilden dalga boyunun artışı ile sönüm katsayısı değerlerinin azaldığı bulunmuştur.

30-daldırma çevriminde 50 ° C de SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır oksit ince filmine ait sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.28’de verilmiştir. 30-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değerleri 400 nm de 0.41, 550 nm 0.20, 700 nm deki değeri ise 0.14 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değeri ise 0.13–0.13 aralığında bulunmuştur. Şekil 4.28’den dalga boyunun artışı ile sönüm katsayısı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

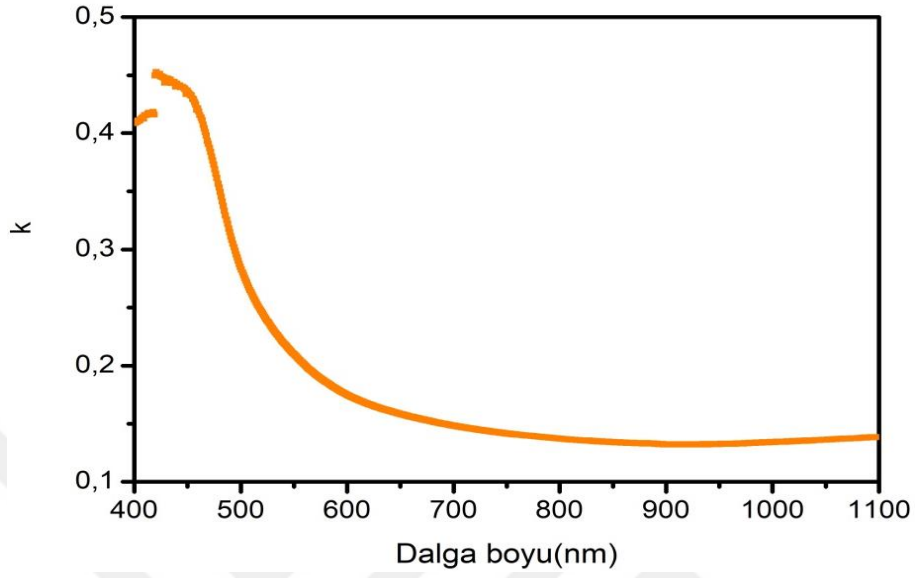
40-daldırma çevriminde 50 ° C de SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır oksit ince filmine ait sönüm katsayısı değerlerinin dalga boyuna karşı eğrisi Şekil 4.29’da verilmiştir. 40-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değerleri 400 nm de 0.27, 550 nm 0.16, 700 nm deki değeri ise 0.14 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değeri ise 0.15–0.16 aralığında bulunmuştur. Şekil 4.29’da dalga boyunun artışı ile sönüm katsayısı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.



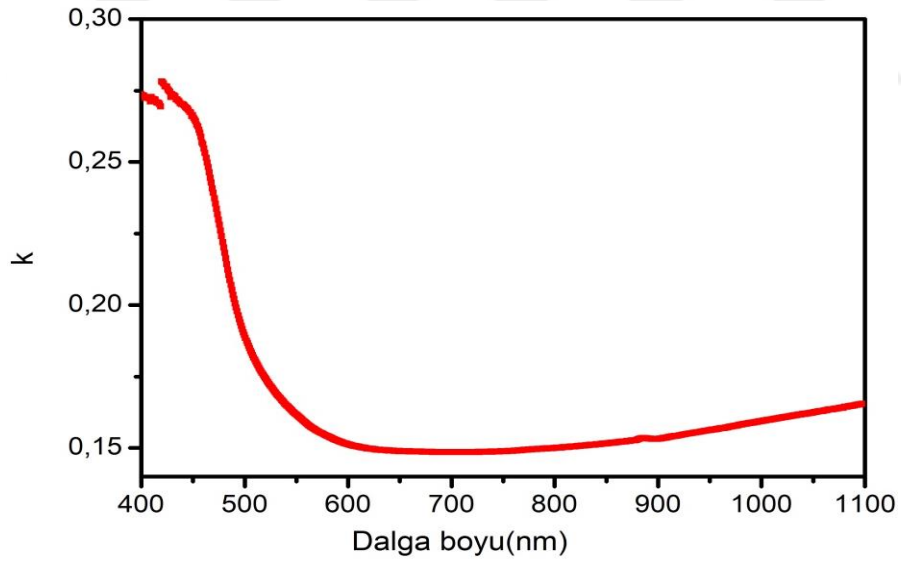
Şekil. 4.26. 10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısının dalga boyuna bağlı grafiği



Şekil. 4.27. 20-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısının dalga boyuna bağlı grafiği



Şekil. 4.28. 30-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısının dalga boyuna bağlı grafiğı



Şekil. 4.29. 40-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin sönüm katsayısının dalga boyuna bağlı grafiğı

4.3. Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Morfolojik zelliklerinin Araştırılması

50 ° C sıcaklıkta 10-, 20-, 30- ve 40-daldırma çevrimlerinde SILAR yöntemi ile cam alt taşlar üzerinde sentezlenen Cu₂O ince filmlerin görüntüleri Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ile alındı. FE-SEM görüntüleri bize herhangi bir yarıiletken ince filmin topografisi üzerinde temel bilgiler sağlar ve ince filmin tanecik şeklini, alt taş üzerinde dağılımını, tanecik boyutları hakkında bilgi verir.

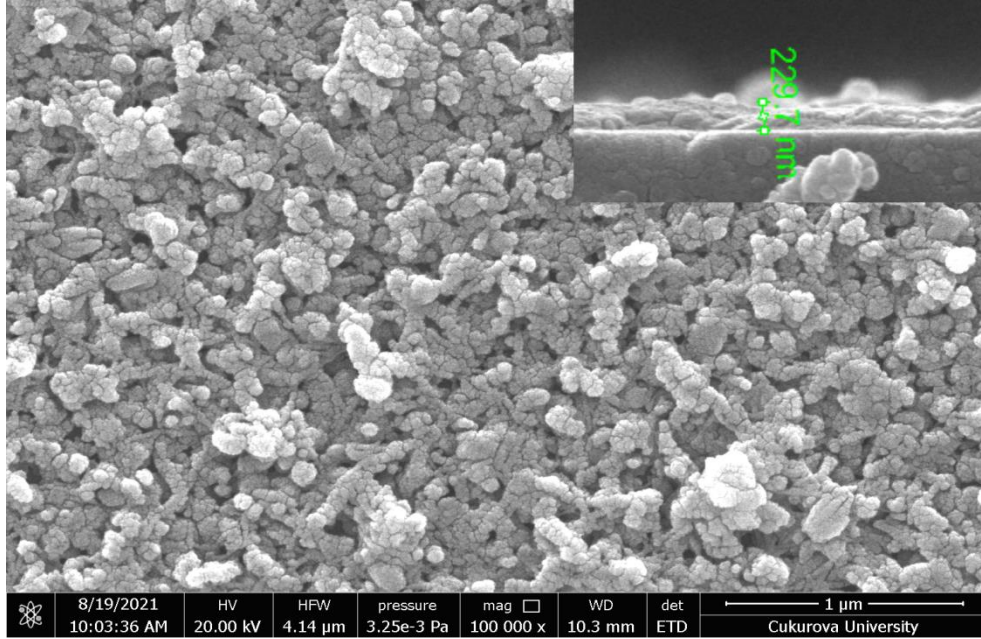
50 ° C de 10-daldırma çevriminde cam alt taş üzerinde SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin 100.000 büyütmede FE-SEM görüntüsü ve bu süre içinde oluşan ince filmin enine kesit FE-SEM görüntüsü şekil 4.30'da grlmektedir. şekil incelendiğinde cam alt taş üzerinde oluşan bakır oksit ince filmin karnabakar benzeri taneciklerden oluştuğu ve tanecik dağılımının hemen hemen homojen olduğu fakat yer yer boşlukların bulunduğu bir yapı grlmektedir. 10-daldırma çevriminde 50 ° C de cam alt taş üzerinde bakır oksit ince filmi yaklaşık 1.5 dakikada gibi kısa sürede hazırlandı. Bu süre çok kısa olduğundan filmi oluşturan iyonların çekirdeklenmesi yeterince oluşmamış olup ince filmin yeterli kalınlığa ulaşmadığı grlmektedir. Film kalınlığı yaklaşık 229 nm bulunmuştur.

50 ° C de 20-daldırma çevriminde cam alt taş üzerinde SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin 100.000 büyütmede FE-SEM görüntüsü ve bu süre içinde oluşan ince filmin enine kesit FE-SEM görüntüsü şekil 4.32'de verilmiştir. şekil 4.31'den grleceği gibi bakır oksit ince filmini oluşturan taneciklerin yine karabakar benzer yapılardan oluştuğu grlmektedir. Burada tanecik dağılımının homojen bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. 50 ° C de 20-daldırma çevriminde cam alt taş üzerinde bakır oksit ince filmi yaklaşık 2 dakika gibi bir sürede sentezlendi. Burada bakır (I) oksit ince film kalınlığı yaklaşık 420 nm olarak bulunmuştur.

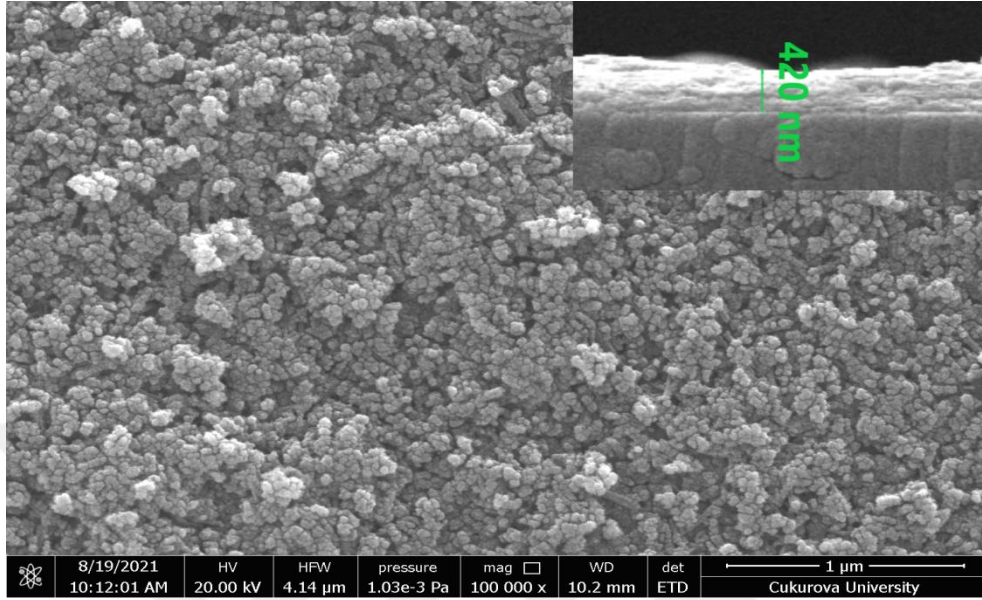
SILAR yöntemi ile 50 ° C de 30-daldırma çevriminde cam alt taş üzerinde sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin 100.000 büyütmede FE-SEM görüntüsü ve

bu süre içinde oluşan ince filmin enine kesit FE-SEM görüntüsü Şekil 4.32’de görölmektedir. Yine Cu_2O ince filmin karnabakar benzeri taneciklerden oluştuğu dağılımın homojen olduğu bir yapı görölmektedir. 30-daldırma çevriminde 50°C de cam alt taş üzerinde bakır oksit ince filmi yaklaşık 3 dakika gibi bir sürede sentezlendi. Burada bakır (I) oksit ince film kalınlığı yaklaşık 735 nm olarak bulunmuştur.

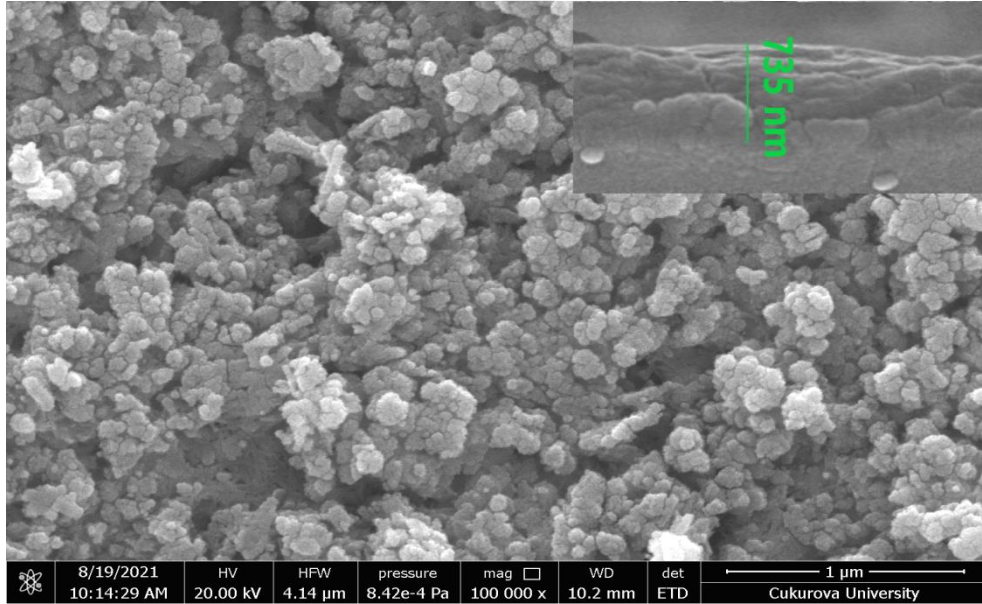
50°C de 40-daldırma çevriminde cam alt taş üzerinde SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin 100.000 büyütmede FE-SEM görüntüsü ve bu süre içinde oluşan ince filmin enine kesit FE-SEM görüntüsü Şekil 4.33’de verilmiştir. Şekilden göröleceğı gibi Cu_2O ince filmini oluşturan taneciklerin yine karabakar benzer yapılardan oluştuğu, tanecik arasındaki boşlukların azaldığı ve daha sıkı bir yapının oluştuğu görölmektedir. 50°C de 40-daldırma çevriminde cam alt taş üzerinde bakır oksit ince filmi yaklaşık 4 dakika gibi bir sürede sentezlendi. Cu_2O ince film kalınlığı yaklaşık 940 nm değeriinde bulunmuştur.



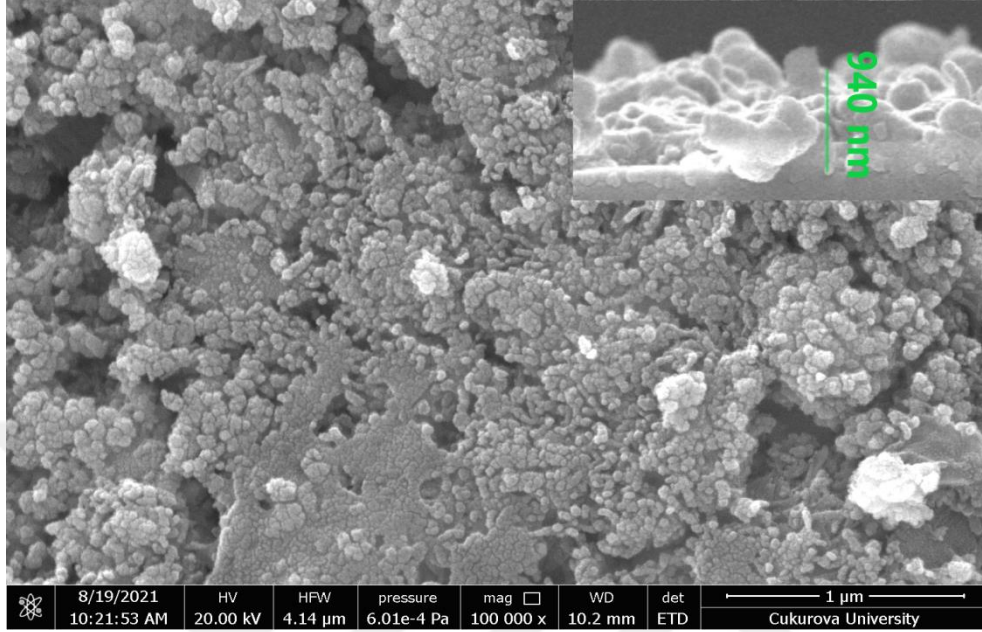
Şekil.4.30. 10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü ve enine kesiti



Şekil. 4.31. 20-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü ve enine kesiti



Şekil. 4.32. 30-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin FE-SEM görüntüsü ve enine kesiti



Şekil. 4.33. 40-daldırma çevriminde sentezlenen Cu₂O ince filmin FE-SEM görüntüsü ve enine kesiti

4.4. Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması

SILAR yöntemi ile 50 °C de cam alt taşlar üzerinde sentezlenen Cu₂O ince filmlerin elektriksel özellikleri; çevrim sayısına, alt taşa ve sıcaklığına, ince film kalınlığına sıkı bir şekilde bağlıdır. 10-, 20-, 30- ve 40-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu (n), hole mobilitesi (μ) ve elektriksel özdirenç (ρ) değerlerini bulmak için filmlere gümüş boyası ile düzlemsel kontaklar yapıldı. Oda sıcaklığında yapılan bütün ölçümler neticesinde bakır oksit ince filmlerin p -tipi elektriksel iletkenliğe sahip oldukları bulundu. Farklı daldırma çevrimleri ile hazırlanan bakır oksit ince filmlerin elektriksel özdirenç değerleri 6.13×10^4 - 3.02×10^3 Ω cm arasında değişmektedir. Filmlerin elektriksel özdirenci arasında küçük değişimler olmuştur. Bu değişim film kalınlığına, yapısal özelliklerine, kristal doğasına ve tane sınır saçılması ile ilişkilendirilebilir. Bulunan Cu₂O ince filmlerin elektriksel özdirenç değerleri

literatürde verilen değerler ile uyum içindedir (Kuo C.-H. ve ark., 2007). Bakır (I) oksit ince filmlerin taşıyıcı konsatrasyonu değerleri $3.32 \times 10^{12} - 1.50 \times 10^{11} \text{ 1/cm}^3$ aralığında bulunmuştur. İnce filmlerin hole mobilite değerleri $30.7 - 138 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ aralığında bulunmuştur. Bu sonuçlardan taşıyıcı konsatrasyon değerlerinin azalışı ile mobilite değerlerinin arttığı görülmüştür. En iyi mobilite değeri 40-daldırma çevriminde sentezlenen bakır oksit ince filmi için bulunmuştur. 10-, 20-, 30- ve 40-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu (n), hole mobilitesi (μ) ve elektriksel özdirenç (ρ) değerlerini Çizelge 4.5. te verilmiştir. Sonuç olarak, bakır oksit ince filmlerin elektriksel özelliklerinin farklı daldırma çevrimlerine ve film kalınlıklarına bağlı olduğu görüşündeyiz.

Çizelge 4.5. Bakır (I) oksit ince filmin elektriksel özellikleri

Daldırma sayısı	Film kalınlığı (nm)	Taşıyıcı konsatrasyonu ($1/\text{cm}^3$)	Mobilite (cm^2/Vs)	Elektriksel özdirenç (Ωcm)
10	229	3.32×10^{12}	30.7	6.13×10^4
20	420	7.11×10^{12}	46.2	1.90×10^4
30	735	5.77×10^{11}	81.4	1.33×10^4
40	940	1.50×10^{11}	138	3.02×10^3



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, bakır (I) oksit (Cu_2O) ince filmleri, SILAR (Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyonu) yöntemi ile 10-, 20-, 30- ve 40-daldırma çevrimlerinde 50°C sıcaklığında cam alt taşlar üzerinde sentezlendi. Daha sonra, bu filmlerin kalınlığa bağlı yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel özellikleri incelendi ve yorumlandı. Bu özellikleri sırası ile sıralarsak;

1-) X-ışını kırınım ölçümleri PANalytical marka ve EMPYREAN XRD model cihaz ($\text{CuK}_{\alpha 1}$, $\lambda=1.5405\text{ Å}$, 20–50 kV, 5–60 mA, tarama hızı $2^\circ/\text{dakika}$) ile otomatik veri hafızası kullanılarak $10^\circ < 2\theta < 70^\circ$ arasında ve oda sıcaklığında elde edilmiştir. 10-, 20-, 30- ve 40-daldırma çevrimlerinde ve farklı kalınlıklarda sentezlenen bakır oksit ince filmlerin; 2θ kırınım açıları ve pikleri bu piklere karşılık gelen (hkl) düzlemleri, filmlerin pik şiddetleri, pikin maksimum yarısı tam genişliği (FWHM), filmin örgü parametre (a , b , c) değerleri, filmlere ait düzlemler arası olan d -uzaklıkları bulundu. Bulunan bu değerler bakır (I) oksite ait olan standar PDF kart (No:01–071–3645) ile karşılaştırıldı. Bulunan bu değerlerin kartaki bakır oksite ait değerler ile uyumludur. Daldırma çevrim sayısının artışı ile film kalınlığının artışı ve buna bağlı olarak filmin daha iyi kristalleştiği XRD kırınım şiddeti değerlerinden tespit edildi. SILAR yöntemi ile sentezlenen bütün bakır oksit ince filmlerin polikristal yapıda ve kübik fazda oldukları bulundu. X-ışını kırınım desenlerinden bakır oksit filmlerin tercihli yönelimlerinin daha çok (111) ve (200) düzlemleri boyunca olduğu bulundu.

2-) SILAR yöntemi ile 50°C de cam alt taşlar üzerinde sentezlenen Cu_2O ince filmlerin oda sıcaklığında bulunan optik geçirgenlik grafikleri 400–1100 nm aralığında spektrofotometre aleti ile yapıldı. 10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için değerleri 400 nm de %5.26, 550 nm %50.55, 700 nm deki değeri ise %66.20 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %70.39–%78.93

aralığında bulunmuştur. Dalga boyunun artışı ile optik geçirgenlik değerlerinin arttığı görölmüştür. 20-daldırma çevriminde hazırlanan Cu_2O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için değerleri 400 nm de %1.84, 550 nm %33.67, 700 nm deki değeri ise %55.20 bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %63.04–%73.81 aralığında bulunmuştur. 30-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filmin 400 nm deki optik geçirgenlik değeri %0.14 ten başlayarak dalga boyunun artışı ile 550 nm de %11.64 , 700 nm deki değeri %30.25 olarak bulunmuştur. Aynı film için yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %37.59–%48.82 aralığında bulunmuştur. 40-daldırma çevriminde hazırlanan Cu_2O ince filmin görünür bölge (400–700 nm) için optik geçirgenlik değerleri 400 nm de %0.87, 550 nm %11.42, 700 nm deki değeri ise %20.21 bulunmuştur. İnce filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %25.10–%31.94 aralığında bulunmuştur. Bakır oksit ince filmlerin daldırma çevrim sayısı arttıkça kalınlık değerlerinin de arttığı buna bağılı olarak oda sıcaklığında bulunan optik geçirgenlik değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

10-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filminin 400 nm deki soğurma değeri 1.18, 550 nm deki değeri, 0.28 ve 700 nm deki değeri 0.17 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.13–0.10 aralığında bulunmuştur. Görünür bölge başlangıcında optik soğurma değerleri büyük ve bant içine doğru kaymakta, dalga-boyunun artışı ile soğurma değerleri bir miktar azalış göstermektedir. 20-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filminin 400 nm deki soğurma değeri 1.70, 550 nm deki değeri, 0.48 ve 700 nm deki değeri 0.25 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.18–0.12 aralığında bulunmuştur. Görünür bölge başlangıcında optik soğurma değerleri dalga-boyunun artışı ile bir miktar azalış göstermektedir. 30-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filminin 400 nm deki soğurma değeri 2.50, 550 nm deki değeri, 0.97 ve 700 nm deki değeri 0.53 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.42–0.31

aralığında bulunmuştur. Görünür bölge başlangıcında optik soğurma değerleri büyük ve dalga-boyunun artışı ile soğurma değerleri bir miktar azalış göstermektedir. 40-daldırma çevriminde sentezlenen Cu_2O ince filminin 400 nm deki soğurma değeri 2.36, 550 nm deki değeri, 1.07 ve 700 nm deki değeri 0.66 olarak bulunmuştur. Bakır oksit ince filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) optik soğurma değerleri ise 0.59–0.45 aralığında bulunmuştur. Görünür bölge başlangıcında optik soğurma değerleri büyük ve dalga-boyunun artışı ile soğurma değerleri bir miktar azalış göstermiştir. İnce film kalınlık değerlerinin artışı optik soğurma değerlerinin artışı tespit edilmiştir.

10-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için yansımaya değerleri 400 nm de %55.46, 550 nm %19.23, 700 nm deki değeri ise %11.37 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %9.45–%6.96 aralığında bulunmuştur. Dalga boyunun artışı ile yansımaya değerlerinin azaldığı görülmüştür. 20-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için yansımaya değerleri 400 nm de %67.22, 550 nm %26.07, 700 nm deki değeri ise %16.54 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %12.14 –%8.17 aralığında bulunmuştur. Dalga boyunun artışı ile yansımaya değerlerinin azaldığı görülmektedir. 30-daldırma çevriminde depolanan bakır oksit ince filminin görünür bölgedeki yansımaya değerleri 400 nm de %82.80, 550 nm %44.27, 700 nm deki değeri ise %29.03 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %24.20–%18.28 aralığında bulunmuştur. Aynı şekilde dalga boyunun artışı ile yansımaya değerlerinin azaldığı görülmüştür. 40-daldırma çevriminde depolanan Cu_2O ince filminin görünür bölge (400–700 nm) için yansımaya değerleri 400 nm de %75.15, 550 nm %45.15, 700 nm deki değeri ise %37.73 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise %34.21–%28.89 aralığında bulunmuştur. Dalga boyunun artışı ile yansımaya değerlerinin azaldığı görülmektedir. Burada, %R değerleri, filmin kırılma indisine doğrudan bağlı olup kırılma indisi

artığında bakır oksit ince filmin %R değerleri dalga boyuna bağı olarak artış göstermiştir. Aynı şekilde ince film kalınlığının artışı ile yansıma değerlerinde artış görölmüştür.

10-, 20-, 30-, ve 40-daldırma çevrimlerinde sentezlenen Cu₂O ince filmlerin enerji bant aralığı (E_g) değerleri sırasıyla 2.47 eV, 2.44 eV, 2.41 eV ve 2.38 eV olarak hesaplanmıştır. Bakır oksit ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri ince filmlerin kalınlık değerlerinin artışı ile azaldığı görölmüştür. Bu azalmanın nedeni Moss-Burstein kayması ile açıklanmıştır.

10-daldırma çevriminde 50 ° C de sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin görönr bölge (400–700 nm) için kırılma indisi değerleri 400 nm de 6.94, 550 nm 2.51, 700 nm deki değeri ise 1.98 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) geçirgenlik değeri ise 1.86–1.63 aralığında bulunmuştur. Dalga-boyunun artışı ile bakır oksit ince filmin kırılma indisi değerlerinin azaldığı görölmüştür. 20-daldırma çevriminde 50 ° C de sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin görönr bölgedeki kırılma indisi değerleri 400 nm de 10.10, 550 nm 3.01, 700 nm deki değeri ise 2.72 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki kırılma indisi değerleri ise 800 nm de 2.27, 1100 nm deki değeri ise 1.84 olarak bulunmuştur. Dalga-boyunun artışı ile Cu₂O ince filmin kırılma indisi değerlerinin azaldığı görölmektedir. 30-daldırma çevriminde 50 ° C de sentezlenen Cu₂O ince filmin görönr bölgedeki kırılma indisi değerleri 400 nm de 17.01, 550 nm 4.92, 700 nm deki değeri ise 3.14 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki kırılma indisi değerleri ise 800 nm de 2.97, 1100 nm deki değeri ise 2.30 olarak bulunmuştur. Dalga-boyunun artışı ile Cu₂O ince filmin kırılma indisi değerlerinin azaldığı görölmektedir. 40-daldırma çevriminde 50 ° C de sentezlenen Cu₂O ince filmin görönr bölgedeki kırılma indisi değerleri 400 nm de 14.16, 550 nm 5.11, 700 nm deki değeri ise 3.88 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki kırılma indisi değerleri ise 800 nm de 3.70, 1100 nm deki değeri ise 3.27 olarak bulunmuştur. Dalga-boyunun artışı ile Cu₂O ince filmin kırılma indisi değerlerinin azaldığı görölmektedir. Bakır oksit ince filmlerin

deneylerdeki çevrim sayıları arttıkça ince film kalınlıklarının arttığı buna bağılı olarakta ince filmlerin kırılma indisi değęerlerinin arttığı bulundu. Ayrıca, kırılma indisi ile yansıma katsayısı birbirine doğrudan bağılı olduklarında yansıma değęerleri artığında filmlerin kırılma indisi değęerleri de artmıştır.

10-daldırma çevriminde 50 ° C de sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değęerleri 400 nm de 0.69, 550 nm 0.25, 700 nm deki değęeri ise 0.19 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değęeri ise 0.17–0.16 aralığında bulunmuştur. Dalga boyunun artışı ile sönüm katsayısı değęerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. 20-daldırma çevriminde 50 ° C de sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değęerleri 400 nm de 0.42, 550 nm 0.16, 700 nm deki değęeri ise 0.10 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değęeri ise 0.09–0.08 aralığında bulunmuştur. Dalga boyunun artışı ile sönüm katsayısı değęerlerinin azaldığı bulunmuştur. 30-daldırma çevriminde 50 ° C de sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değęerleri 400 nm de 0.41, 550 nm 0.20, 700 nm deki değęeri ise 0.14 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değęeri ise 0.13–0.13 aralığında bulunmuştur. Dalga boyunun artışı ile sönüm katsayısı değęerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. 40-daldırma çevriminde 50 ° C de sentezlenen bakır (I) oksit ince filmin görünür bölge (400–700 nm) için sönüm katsayısı değęerleri 400 nm de 0.27, 550 nm 0.16, 700 nm deki değęeri ise 0.14 olarak bulunmuştur. Aynı filmin yakın kızılötesindeki (800–1100 nm) sönüm katsayısı değęeri ise 0.15–0.16 aralığında bulunmuştur. Dalga boyunun artışı ile sönüm katsayısı değęerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

3-) 10-daldırma çevriminde 50 ° C de cam alt taş üzerinde bakır oksit ince filmi yaklaşık 1.5 dakikada gibi kısa sürede hazırlanmıştır. Film kalınlığı yaklaşık 229 nm bulunmuştur. Cam alt taş üzerinde sentezlenen bakır oksit ince filmin karnabahar benzeri taneciklerden oluştuğı ve tanecik dağılımının hemen hemen

homojen olduğu fakat yer yer boşlukların bulunduğu bir yapı görölmüştür. 20-daldırma çevriminde 50 ° C de cam alt taş üzerinde bakır oksit ince filmini oluşturan taneciklerin yine karabakar benzer yapılardan oluştđu göröldü. Burada tanecik dağılımının homojen bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Bakır (I) oksit ince film kalınlığı yaklaşık 420 nm olarak bulunmuştur. 30-daldırma çevriminde 50 ° C de cam alt taş üzerinde bakır oksit ince filmini oluşturan taneciklerin karabakar benzeri taneciklerden oluştđu dağılımın homojen olduğu bir yapı görölmektedir. Bakır (I) oksit ince film kalınlığı yaklaşık 735 nm olarak bulunmuştur. 50 ° C de 40-daldırma çevriminde cam alt taş üzerinde SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır (I) oksit ince filmini oluşturan taneciklerin yine karabakar benzer yapılardan oluştđu, tanecik arasındaki boşlukların azaldığı ve daha sıkı bir yapının oluştđu görölmektedir. Cu₂O ince film kalınlığı yaklaşık 940 nm değeriinde bulunmuştur.

4-) 10-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu (n), hole mobilitesi (μ) ve elektriksel özdirenç (ρ) değeri sırasıyla 3.32×10^{12} 1/cm³, 30.7 cm²/Vs, 6.13×10^4 Ωcm, 20-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu, hole mobilitesi ve elektriksel özdirenç değeri sırasıyla 7.11×10^{12} 1/cm³, 46.2 cm²/Vs, 1.90×10^4 Ωcm, 30-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu, hole mobilitesi ve elektriksel özdirenç değeri sırasıyla 5.77×10^{11} 1/cm³, 81.4 cm²/Vs, 1.33×10^4 Ωcm, 40-daldırma çevriminde sentezlenen bakır (I) oksit ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu, hole mobilitesi ve elektriksel özdirenç değeri sırasıyla 1.50×10^{11} 1/cm³, 138 cm²/Vs, 3.02×10^3 Ωcm. Taşıyıcı konsantrasyon (n) değeriinin azalışı ile mobilite değeriinin arttığı görölmüştür. En iyi mobilite değeri 40-daldırma çevriminde sentezlenen bakır oksit ince filmi için bulunmuştur. Oda sıcaklığında yapılan bütün ölçümler neticesinde bakır oksit ince filmlerin p -tipi elektriksel iletkenliğe sahip oldukları bulundu. Bakır oksit ince

filmlerin elektriksel özelliklerinin farklı daldırma çevrimlerine ve film kalınlıklarına bağlı olduğu görüşüne varıldı.

5.2. neriler

SILAR yöntemi ile sentezlenen bakır (I) oksit (Cu_2O) ince filmlerin bulunan bu fiziksel özellikleri (yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel) nedeniyle bu yarıiletken polikristal ince filmlerin, ince film güneş hücrelerinin üretimi için uygun bir aday olduğu kanısındaız.





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
- Akgül, F.A. (2017). K prik oksit/silisyum heteroekleml  nanodiyotların fotovoltai k  zellikleri. *Selcuk Univ. J. Eng. ,Science Technol.*, 5 (4):460–471
- Altindemir 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.
- Al-Kuhaili M.F., Characterization of copper oxide thin films deposited by the thermal evaporation of cuprous oxide (Cu₂O). *Vacuum*, 82, 623–629
- 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, 433–439
- Arslan, T., 2010. X-Işınları ve Kullanım Alanları. Gazi  niversitesi Eğitim Fak ltesi Orta  ğretim Fen ve Matematik Alanları Eğitim B l m  Fizik Eğitim Anabilim Dalı Lisans Tezi, Ankara, 24s.
- Baig F., Khattaka Y. H., Soucase , Begc 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., 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

- Bar-Lev, A., 1979. Semiconductors and Electronic Devices. Prentice-Hall International, London, 381p.
- Büget U., 1984. PN Eklemleri- Kristal Diyot ve Transistörler. Meteksan Matbaacılık ve Teknik Sanayi Ticaret Limited Şirketi, Ankara, Birinci Baskı
- Cafer T., 2000. Katıhal Elektronik. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi Matbaası, İstanbul, 233 s.
- Caferov T., 1998. Yarıiletken Fiziği-1. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi Matbaası, İstanbul, 199 s.
- 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 & Solar Cells, 147, 17–26
- Chowdhury A., Bijalwana P. K., Sahu R. K., 2013. Investigations on the role of alkali to obtain modulated defect concentrations for Cu₂O thin films. Applied Surface Science, 289, 430–436
- Cullity, B. D., 1967. Elements of X-Ray Diffraction. Adison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, 514p.
- Çevlik H. Ç., 2019. “Sılar Yöntemi İle Hazırlanan Bakır (I) Oksit İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması “. Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 124 s.
- Eya D.D.O., Ekpunobi Ph.D., A.J., Okeke Ph.D., and C.E., FAS Ph.D., 2005. Optical Properties of Cuprous Oxide Thin Film Prepared by Chemical Bath Deposition Technique. The Pacific Journal of Science and Technology, Volume 6, number 2. 1–104
- Gümüş, C., 1998. ZnS:Mn İnce Film Elektrolüminesans Çalışması. Ç.Ü. Doktora Tezi, Adana, 145s.
- Güneri E., (2009). “Kimyasal Depolama Yöntemiyle Elde Edilmiş SnS İnce Filmlerin Yapısal, Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Doktora Tezi, Adana, 139 s.

- Hames Y., San S. E., 2004. CdO/Cu₂O solar cells by chemical deposition. *Solar Energy*, 77, 291–294
- Hoffman, R.L., Norris, B.J., & Wager, J.F., 2003. ZnO-based transparent thin-film transistors. *Applied Physics Letters*, 82(5), 733–735.
- Islam, S. K., Durisety, C., Vijayaraghavan, R., Blalock, B. J., Grundman, T., Baylor, L. R., & Gardner, W. L., 2006. All-inverter complementary metal oxide semiconductor based dose control circuit for using vertically aligned carbon nanofibers in mask less lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Micro electronic sand Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 24(2), 1026–1029.
- Jang J., Chung S., Kang H., Subramanian V., 2016. P-type CuO and Cu₂O transistors derived from a sol–gel copper (II) acetate monohydrate precursor. *Thin Solid Films*, 600, 157–161.
- Kuo C.-H., Chen C.-H., Huang M.H., 2007. Seed-mediated synthesis of monodispersed Cu₂O nanocubes with five different size ranges from 40 to 420 nm, *Adv. Funct. Mater.* 17, 3773–3780.
- Liu Y. L., Liu Y. C., Mu R., Yang H., Shao C. L., Zhang J. Y., Lu Y. M., Shen D. Z. and Fan X. W., 2005. The structural and optical properties of Cu₂O films electrodeposited on different Substrates. *Semiconductor Science And Technology*, 20, 44–49
- Mahan, J. E., 2000. Physical vapor deposition of thin films. *Physical Vapor Deposition of Thin Films*, by John E. Mahan (Vol. 1, No. 2000, p. 336). ISBN 0–471–33001–9. Wiley-VCH.
- Mahalingam T., Chitra J.S.P., 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 films prepared by chemical vapor deposition from copper dipivaloylmethanate. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 56, 85–92
- Mitzi, D. B., 2009. *Solution Processing of İnorganic Materials*. Wiley Publication, 239–240 s, United States of America.
- Momma K., Izumi F., 2011. VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data, *J. Appl. Crystallogr.* 44 1272–1276
- Neamen, D.A., 2011. *Semiconductor Physics and Devices Basic Principles*. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 758s.
- 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. *J Mater Sci: Mater Electron*, 27:1897–1900
- Özaslan D., Erken O, Güneş M., Gümüş C., 2020. The effect of annealing temperature on the physical properties of Cu₂O thin film deposited by SILAR method. *Phsica B*. 580, 411922.
- Özaslan D., Güneş M., Gümüş C., 2017. Physical properties of Cu₂O thin films prepared by silar method. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg.* 23(7), 854–857.
- Özaslan D., 2016. “Tavlama Sıcaklığının Farklı Kalınlıklarda Hazırlanan Cu₂O İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerine Etkisi”. Çukurova Üniversitesi, Doktora Tezi, 230 s.
- Özyetiş, A., 2005. X-Işınları Toz Difraksiyon Metodu ile Bazı Organik Bileşiklerin Kristal Yapılarının İncelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, Kayseri, 84s.

- Papadimitropoulos G., Vourdas N., Vamvakas V. Em., Davazoglou D., 2006. Optical and structural properties of copper oxide thin films grown by oxidation of metal layers. *Thin Solid Films*, 515,2428–2432
- Pejova B., & Grozdanov I., 2006. Structural and optical properties of chemically deposited thin films of quantum-sized bismuth (III) sulfide. *Materials chemistry and physics*, 99(1), 39–49.
- Plummer, E.W., & Dowben, P.A., 1993. When are thin films of metals metallic. *Progress in surface science*, 42(1–4), 201–216.
- 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., Vasuhi A., Chandramohan R., Mantha S., 2015. Morphology, Bandgap, and Grain Size Tailoring in Cu₂O Thin Film by SILAR Method. *Ieee Transactions On Nanotechnology*, VOL. 14, NO. 1. 1–108
- 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
- Selçuk A., 1986. “Geleceğin enerji kaynağı ince film fotovoltaik güneş pilleri”, *Elektr. Mühendisliği*, 31(330–331):68.
- Sivakumar R., Sanjeeviraja C., Jayachandran H., Gopalakrishnan R., Sarangi S.N., Paramanik D., Som T., 2007. Modification of WO₃ thin films by MeV N⁺-ion beam irradiation, *J. Phys.: Condens. Matter* 19 186204–18212
- Sönmezoğlu, S., Koç, M. & Seçkin A., 2012. İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28(5), 389–404.
- Tombak, A., 2012. Al:ZnO İnce Filmlerin Optik ve Elektriksel Özelliklerine Gama Işınlarının Etkisi. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, Diyarbakır, 61s.

- Uzun H., Fındık F., Salman S., 2003. Malzeme Biliminin Temelleri, Değişim yayınları Kitabevi, İstanbul, Birinci Baskı
- Wen, Q., Di, J., Jiang, L., Yu, J., & Xu, R., 2013. Zeolite-coated mesh film for efficient oil–water separation. *Chemical Science*, 4(2), 591–595.
- Wijesundera P. F., 2010. Fabrication of the CuO/Cu₂O heterojunction using an electrodeposition technique for solar cell applications. *Semiconductor Science And Technology*, 25, 045015
- Xiong L., Yu H., Yang G. , Qiu M., Chen J., Yu Y., 2010. A simplified chemical synthesis of Cu₂O films with periodic pattern transfer. *Thin Solid Films*, 518, 6738–6745.
- Xu H., Dong J., Chen C., 2013. One-step chemical bath deposition and photocatalytic activity of Cu₂O thin films with orientation and size controlled by a chelating agent, *Mater. Chem. Phys.* 143 (2) 713–719
- Yurddaskal M., Dikici T., Celik E., 2016. Effect of annealing temperature on the surface properties and photocatalytic efficiencies of Cu₂O/CuO structures obtained by thermal oxidation of Cu layer on titanium substrates. *Ceramics International*, 42, 17749–17753
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Gölnur SUN, İlk ve orta eğitimi Adana'da Vakıfbank İlköğretim okulunda tamamladı. 2010 yılında Adana Hacı Hatice Turgut Lisesi'nden mezun oldu. Üniversite eğitimi 2014 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde tamamladı. 2018 yılında Çukurova Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Sağlık Fiziği Yüksek Lisans programından mezun oldu. 2019 yılında Çukurova Üniversitesi Adana Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Programcılığı bölümünden mezun oldu. 2021 yılında Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Adalet bölümünden mezun oldu. Şu anda Adıyaman Eğitim Araştırma Hastanesi'nde Sağlık Fiziği Uzmanı olarak görev yapmaktayım.