



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR İÇİN ZnO - Cu₂O FİMLERİNİN
ULTRASONİK SPREY PİROLİZ TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan Bilal ÖZCAN

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Tezli Yüksek Lisans Programı

MAYIS 2024

**FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR İÇİN ZnO - Cu₂O FİLMLERİNİN
ULTRASONİK SPREY PİROLİZ TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan Bilal ÖZCAN

20409732014

ORCID: 0000-0002-7062-0577

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof.Dr. Aslı Ayten KAYA

ORCID: 0000-0002-2963-6905

İkinci Danışman: Doç. Dr. Emrah SARICA

ORCID: 0000-0002-9339-5114

MAYIS 2024

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 20409732014 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hakan Bilal ÖZCAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Fotovoltaik Uygulamalar için ZnO – Cu₂O Filmlerinin Ultrasonik Sprey Piroлиз Tekniğı İle Üretilmesi ve Karakterizasyonu ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Aslı Ayten KAYA**
Bursa Teknik Üniversitesi

İkinci Danışman : **Doç. Dr. Emrah SARICA**
Başkent Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Ahmet PEKSÖZ**
Bursa Uludağ Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi Murat TÜREMİŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : **03 Mayıs 2024**



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 22Y001 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Hakan Bilal ÖZCAN

İmzası:



Biricik anne ve babama,

ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitimim boyunca gerek akademik desteği ve yol göstericiliği gerekse yönlendirmeleri ile beni bu tez çalışması sürecince yalnız bırakmayan danışmanlarım Prof. Dr. Aslı Ayten KAYA ve Doç. Dr. Emrah SARICA hocalarıma içten ve sonsuz şükranlarımı sunarım.

Yorucu ve zorlayıcı olan tüm çalışmalarım sırasında laboratuvar imkanları ile destek olan Prof. Dr. Vildan BİLGİN'e ve laboratuvarda tüm süreçlerde yardımına koşan Dr. Öğr. Görevlisi İbrahim GÜNEŞ'e tecrübelerini benimle paylaştıkları için teşekkür ederim.

Üretilen filmlere ait elektrokimyasal ölçümler konusunda yardımcı olan Prof.Dr. Ahmet PEKSÖZ ve Dr. Seyit Rıza TOKGÖZ'e teşekkür ederim.

Tüm süreç boyunca beni motive eden, Semanur NAZIF'e, umudumu kaybetmemem için verdiği tüm tavsiyeler için teşekkür ederim.

Yine süreç içerisinde motivasyonumu korumamda büyük destek olan Harun BATUR'a teşekkür ederim.

Hayatımın şimdiye kadarki en zor süreçlerini birlikte atlattığım, maddi ve manevi desteği ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, beni mücadelede her koşulda destekleyen Dr. Emre AKÇİL'e ve Ertuğrul ÖZTÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Ve tüm hayatım boyunca koşulsuz bir şekilde yanımda olduklarını her fırsatta belirten annem Zekiye ÖZCAN ve babam İsmail ÖZCAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2024

Hakan Bilal ÖZCAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	19
1.1 Yarıiletken Malzemeler.....	20
1.2 Yarıiletken p-n Eklemleri.....	23
1.3 Fotovoltaik Etki ve Güneş Hücresinin Çalışma Prensibi	24
1.4 İnce Film Güneş Hücreleri	25
1.5 Cu ₂ O Yarıiletken İnce Filmler	27
1.6 ZnO Yarıiletken İnce Filmler	28
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	30
3. MATERYAL YÖNTEM	33
3.1 GİRİŞ	33
3.2 Ultrasonik Sprey Piroliz Yöntemi	33
3.3 Yapısal Özelliklerin İncelenmesi	34
3.4 Yüzeysel Özelliklerinin İncelenmesi	38
3.4.1 Atomik kuvvet mikroskobu	38
3.4.2 Taramalı elektron mikroskobu	39
3.5 Optik Özelliklerin İncelenmesi	40
3.6 Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi	41
3.6.1 Hall etkisi ölçümleri.....	41
3.6.2 Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve lineer tarama voltametrisi	42
3.6.2.1 Elektrokimyasal empedans spektroskopisi	42
3.6.2.2 Mott-Schottky ölçümleri	45
3.6.2.3 Lineer tarama voltametrisi	46
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	48
4.1 ZnO ve Cu ₂ O:B İnce Filmlerinin Üretimi.....	48
4.1.1 Altaş temizliği.....	48
4.1.2 ZnO ince filmlerinin üretimi	48
4.1.3 Cu ₂ O:B ince filmlerinin üretilmesi	49
4.2 ZnO ince filmlerinin fiziksel özellikleri.....	50
4.2.1 ZnO ince filmlerinin yapısal özellikleri	50
4.2.2 ZnO İnce filmlerinin morfolojik özellikleri	51
4.2.3 ZnO ince filmlerinin optik özellikleri	53
4.2.4 ZnO ince filmlerinin elektriksel özellikleri.....	54

4.3 Cu ₂ O:B İnce Filmlerinin Fiziksel Özellikleri.....	56
4.3.1 Cu ₂ O:B ince filmlerinin yapısal özellikleri.....	56
4.3.2 Cu ₂ O:B ince filmlerinin morfolojik özellikleri.....	59
4.3.3 Cu ₂ O:B ince filmlerinin optik özellikleri.....	62
4.3.4 Cu ₂ O:B ince filmlerinin elektriksel özellikleri	67
4.3.4.1 Hall Etkisi analizleri.....	67
4.3.4.2 Elektrokimyasal empedans analizleri.....	67
4.3.4.3 Mott-Schottky analizleri	69
4.3.4.4 Lineer taramalı voltmetri analizleri.....	71
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR	74



KISALTMALAR

AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
CBD	: Kimyasal Banyo Çöktürme
CVE DİĞ	: Kimyasal Buhar Çöktürme
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi
EIS	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
ESP	: Elektrostatik Spray Pyrolysis
FF	: Doluluk Faktörü
LSV	: Liner Süpürme Voltametri
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi
M-S	: Mott-Schottky
NREL	: Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
PVE DİĞ	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SİO	: Saydam İletken Oksit
SP	: Spray Pyrolysis
TC	: Yapılanma Katsayısı
USP	: Ultrasonik Sprey Piroliz
UV	: Ultraviyole
XRD	: X-Işını Kırınımı

SEMBOLLER

a	: a-örgü Sabiti
b	: b-örgü Sabiti
c	: c-örgü Sabiti
A	: Yüzey Alanı, Soğurma Sabiti
Å	: Angstrom
α	: Soğurma Katsayısı
β	: Yarı Pik Genişliği
θ	: Bragg Açısı
λ	: Dalgaboyu
<i>h</i>	: Planck Sabiti
<i>hkl</i>	: Miller İndisleri
ν	: Frekans
<i>c</i>	: Işık Hızı
<i>d</i>	: Kalınlık
D	: Ortalama Kristal Büyüklüğü
E_U	: Urbach Parametresi
E_f	: Fermi Enerji Seviyesi
E_g	: Yasak Enerji Aralığı
ϵ	: Mikro Gerilme
I	: Akım, Işık Şiddeti
μ_e	: Elektron Mobilitesi
μ_h	: Deşik Mobilitesi
Ω_{cm}	: Ohm Santimetre
ρ	: Özdirenç
σ	: Öziletkenlik
°C	: Santigrat Derece

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4. 1: Başlangıç çözeltileri	50
Çizelge 4.2: Üretilen ZnO ince Filmlerine ait düzlemler arası mesafe (d), yapılanma katsayısı (TC), örgü parametreleri, kristal boyutları (D) ve mikro gerilme (ϵ) değerleri.	51
Çizelge 4.3: ZnO ince filmlerine ait yüzey pürüzlülük (R_a) ve film kalınlık değerleri.	52
Çizelge 4.4: ZnO ince filmlerine ait Hall Etkisi ölçümü ile elde edilen elektriksel özellikler.....	54
Çizelge 4.5: ITO/ZnO eklemine ait Mott-Schottky eğrisinden elde edilen değerler.	55
Çizelge 4.6: Cu ₂ O ince filmlerine ait yapılanma katsayısı (TC), örgü parametreleri (a), kristal boyutları (D) ve mikro gerilme (ϵ) değerleri.	58
Çizelge 4. 7 : Boron katkısı ile kristal boyutu ve örgü parametresinin değişimi.....	59
Çizelge 4.8: Üretilen Cu ₂ O ince filmlerine ait yüzey pürüzlülük (R_a) ve kalınlık (d) değerleri.....	60
Çizelge 4. 9: Cu ₂ O filmlerinin bant aralığı (E_g), Urbach enerji değerleri (E_U) ve soğurma katsayı (α) değerleri.....	67
Çizelge 4. 10: Cu ₂ O filmlerinin Hall etkisi ölçümü ile elde edilen öz direnç (ρ), taşıyıcı konsantrasyonu (n), mobilite (μ) değerleri ve elektriksel iletkenlik türü değerleri.	67
Çizelge 4. 11: Elektrokimyasal ölçümlere ait ölçüm şartları.....	68
Çizelge 4. 12: ITO/ZnO/Cu ₂ O filmlerine ait EIS değerleri.....	69
Çizelge 4.13: ITO/Cu ₂ O ince filmlerine ait Mott-Schottky verileri.....	70
Çizelge 4.14: ITO/ZnO/Cu ₂ O ince filmlerine ait Mott-Schottky verileri.....	71

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: İletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerde yasak enerji aralığı şematik gösterimi.....	20
Şekil 1.2: Fermi Enerji dağılımı.	21
Şekil 1.3: Katkılı yarıiletkenlerde bant yapısı.	23
Şekil 1.4: Bir p-n eklemine şematik gösterimi.	24
Şekil 1.5: Fotovoltaik güneş hücresinin çalışma prensibi.	25
Şekil 1.6: Güncel güneş hücresi verimlilikleri(Renewable Energy Lab.).....	26
Şekil 1.7: Farklı dizilimlerde oluşturulan ince film güneş hücreleri.	27
Şekil 1.8: Cu ₂ O kristal yapısı (basit kübik yapı)	28
Şekil 1.9: Würtzite yapılı ZnO kristali (Zn atomları sarı, O atomları gri ile gösterilmiştir.)	29
Şekil 3.1: USP sistemine ait bileşenler.	34
Şekil 3.2: Farklı kabuklardan elde edilen karakteristik X-ışını yayınımları.....	35
Şekil 3.3: Bir kristal düzlemine gelen ve kırılıma uğrayan X-ışınları.	36
Şekil 3.4: Bir XRD deseni örneği.	37
Şekil 3.5: Atomik Kuvvet Mikroskopunun çalışma prensibi.	39
Şekil 3.6: Hall Etkisi Metodu ölçümü şematik gösterimi(Horley ve diğ., 2019).	42
Şekil 3.7: Bir Nyquist grafiği ve eşdeğer devre.....	44
Şekil 3.8: EIS ölçümleri için kurulan düzenek.	45
Şekil 3.9: Mott – Schottky grafikleri. a) n-tipi bir yarıiletken için b) p-tipi bir yarı iletken için.	46
Şekil 4.1: Üretilen ZnO ince filmlerine ait XRD pikleri	51
Şekil 4.2: ZnO ince filmlerine ait AFM görüntüsü.	52
Şekil 4.3: ZnO ince filmlere ait yüzey ve kesit SEM görüntüleri.	52
Şekil 4.4: ZnO ince filmlerine ait SEM görüntüleri	53
Şekil 4.5: ZnO ince filmlerine ait geçirgenlik ve soğurma grafikleri.....	53
Şekil 4.6: ZnO ince filmlerinin yasak enerji aralığı Tauc metodu ile hesaplanmıştır.	54
Şekil 4.7: ITO/ZnO eklemine ait Mott-Schottky Eğrisi	55
Şekil 4.8: ITO/ZnO eklemine ait karanlık ve aydınlık ortamlarda alınan LSV eğrileri.	55
Şekil 4.9: Üretilen katkısız ve B katkılı Cu ₂ O ince filmlerine ait XRD desenleri.....	57
Şekil 4.10: Cu ₂ O ince filmlerine ait AFM görüntüleri (a, katkısız Cu ₂ O ince filmi, b, %3 B katkılı Cu ₂ O ince filmi, c, %6 B katkılı Cu ₂ O ince filmi, d, %9 B katkılı Cu ₂ O ince filmi, e, %12 B katkılı Cu ₂ O ince filmine ait AFM görüntüleri).....	60
Şekil 4.11: Katkısız Cu ₂ O ince filmlerine ait 100 K büyütme yüzey ve 90 K büyütme kesit SEM görüntüleri.	61
Şekil 4.12: %3 B katkılı Cu ₂ O ince filmlere ait 100 K büyütme yüzey ve 90 K büyütme kesit SEM görüntüsü.....	61

Şekil 4.13: %6 B katkılı Cu_2O ince filmlere ait 100 K büyütme yüzey ve 90 K büyütme kesit SEM görüntüsü.....	62
Şekil 4.14: %9 B katkılı Cu_2O ince filmlere ait 100 K büyütme yüzey ve 90 K büyütme kesit SEM görüntüsü.....	62
Şekil 4.15: %12 B katkılı Cu_2O ince filmlere ait 100 K büyütme yüzey ve 90 K büyütme kesit SEM görüntüsü.....	62
Şekil 4.16: $\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ ince filmlerinin soğurma spektrumları.....	63
Şekil 4.17: $\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ ince filmlerinin geçirgenlik spektrumları	64
Şekil 4.18: $\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ filmlerine ait $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ (Tauc) grafikleri.....	65
Şekil 4.19: $\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ filmlerine ait $\ln(\alpha) - h\nu$ grafikleri.....	66
Şekil 4.20: ITO/ Cu_2O ve ITO/ $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$ ince filmlerine ait (Re_z - -Im_z) EIS grafiği.	69
Şekil 4.21: ITO/ $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$ ince filmlerine ait EIS eşdeğer devresi.....	69
Şekil 4.22: ITO/ Cu_2O ince filmine ait Mott-Schottky eğrisi.....	70
Şekil 4.23: ITO/ $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$ ince filmine ait Mott-Schottky eğrisi.	71
Şekil 4.24: ITO/ $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$ ince filmlerinin karanlık ve aydınlık ortamda alınmış LSV eğrileri.....	72

FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR İÇİN ZnO ve Cu₂O FİLMLERİNİN ULTRASONİK SPREY PİROLİZ TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu tez çalışması, ince film güneş hücrelerinde kullanılan ve ayrıca toksik olmayan, doğada bolca bulunan bir yarıiletken ince film malzeme olan bakır (II) oksit (Cu₂O) ince filmleri olarak geliştirilmesine odaklanmaktadır. İnce film güneş hücresi olarak kullanılmak üzere, n-tipi elektriksel iletkenlik gösteren ZnO ince filmleri tampon katman olarak, p-tipi elektriksel iletkenlik gösteren katkısız ve farklı oranlarda (%3-6-9-12) Boron katkılı Cu₂O ince filmler soğurucu katman olarak, ultrasonik spreylendirme yöntemi kullanılarak cam alttaşlar üzerine büyütülmüştür.

Çalışmanın temel amacı, saydam iletken optik malzeme olan kalay katkılı In₂O₃ (ITO) alttaşlar üzerine, tampon katman olarak USP yöntemi ile büyütülen n-tipi ZnO ince filmi üzerine yine USP yöntemi ile büyütülmüş p-tipi Cu₂O ince filmlerinin fiziksel özelliklerine boron (B) katkısının etkisini anlamaktır. Bu kapsamda, katkısız Cu₂O ince filmlerinin yanı sıra farklı oranlarda B katkılı ince filmler (%3, 6, 9, 12) üzerinde detaylı bir araştırma yapılmıştır. Filmler, 280°C sıcaklıktaki cam ve ITO kaplı cam alttaşlar üzerine taşıyıcı gaz olarak hava kullanılarak büyütülmüştür.

ZnO ve Cu₂O ince filmlerinden alınan X-Işını Kırınım Desenleri (XRD) incelendiğinde, ZnO ve Cu₂O:B ince filmlerin polikristal kübik yapıda olduğu belirlenmiş ve Cu₂O ince filmlerinde (200) kırınım pikinin daha baskın olduğu gözlemlenmiştir. XRD desenlerinden elde edilen verilerle yapılan hesaplamalarda tanecik boyutları incelenmiş, Scherrer ve Modifiye Scherrer formülleri ile kristal büyüklükleri hesaplanmış, katkılama ile kristal büyüklüklerinin 27 nm'den 19 nm'ye kadar küçüldüğü tespit edilmiştir. Yapıya dahil olan boron iyonlarının yapı içerisine yerleşimi ile kristal düzlemlerinin katkılama ile ilgili olarak değişimleri raporlanmıştır.

Alınan geçirgenlik ve soğurma spektrumları ile yapılan analizlerde, Cu₂O:B filmlerin 500 nm'de %60 civarında optik geçirgenliğe sahip olduğunu ve katkılama oranının artışıyla bu geçirgenliğin değişmediğini göstermiştir. Soğurma katsayısının (α @500nm) $3,26 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ile $4,42 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

AFM ve SEM görüntüleri ile yapılan yüzey morfolojisi çalışmaları sonucunda, filmlerin homojen bir şekilde kaplandığı ve B katkısına bağlı olarak Cu₂O filmlerinin yüzey pürüzlülüğünün (Ra) 9,2 nm'den 11,9 nm'ye yükseldiği gözlemlenmiştir.

Hall Etkisi ölçümleri ile Cu₂O:B filmlerin p-tipi iletkenliğe, ZnO filmlerin n-tipi iletkenliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Cu₂O:B ince filmlerinin B katkılama ile taşıyıcı konsantrasyonu (n) $2,67 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 'ten $3,59 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 'e kadar arttığı, mobilite değerlerinin (μ) $13,4 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ 'den $11,01 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ 'e değiştiği ve öz dirençlerinin katkılama oranına bağlı olarak $174 \text{ }\Omega\text{cm}$ 'den $8,21 \text{ }\Omega\text{cm}$ 'ye kadar kayda değer bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, Cu₂O:B ince filmlerinin güneş hücreleri için potansiyel bir soğurucu katman olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Bakır (II oksit), Çinko Oksit, Yarı iletkenler, İnce film güneş hücreleri, Soğurucu katman, p-tipi iletkenlik.



DEPOSITON and CHARACTERIZATION of ZnO-Cu₂O FILMS for PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS by ULTRASONIC SPRAY PYROLYSIS METHOD

SUMMARY

This thesis focuses on the development of copper (II) oxide (Cu₂O) thin films, a non-toxic and abundantly available semiconductor material, for use in thin-film solar cells. For application as thin-film solar cells, n-type ZnO thin films exhibiting electrical conductivity were grown as buffer layers, and undoped and boron-doped (at various concentrations of 3%, 6%, 9%, and 12%) p-type Cu₂O thin films exhibiting electrical conductivity were grown as absorber layers on glass substrates using the ultrasonic spray pyrolysis technique.

The primary objective of the study is to understand the effect of boron (B) doping on the physical properties of p-type Cu₂O thin films grown on n-type ZnO thin films, which were deposited on ITO substrates using the USP method. In this context, a detailed investigation was conducted on undoped Cu₂O thin films as well as B-doped thin films at various concentrations (3%, 6%, 9%, and 12%). The films were grown on glass and ITO-coated glass substrates at a temperature of 280°C using air as the carrier gas.

X-ray diffraction patterns (XRD) obtained from ZnO and Cu₂O thin films revealed that both ZnO and B-doped Cu₂O thin films possess a polycrystalline cubic structure, with the (200) diffraction peak being more prominent in Cu₂O thin films. Grain sizes were examined using the data obtained from XRD patterns, and crystal sizes were calculated using the Scherrer and Modified Scherrer formulas, indicating that the crystal sizes decreased from 27 nm to 19 nm with doping. The incorporation of boron ions into the structure and the resulting changes in crystal planes due to doping were reported.

Analyses of the transmittance and absorption spectra showed that Cu₂O:B films have an optical transmittance of around 60% at 500 nm, which remained unchanged with increasing doping concentrations. The absorption coefficient (α @500nm) was observed to range between $3.26 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ and $4.42 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$.

When the surface morphology was examined, it was observed that the films were coated homogeneously and the surface roughness (Ra) changed from 9.2 nm to 11.9 nm depending on the B doping.

Electrical properties have been observed by Hall Effect measurement that the absorber layers used in solar cells have p-type electrical conductivity, and all films have p-type conductivity. Carrier concentration (n) increased from $2.67 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ to $3.59 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, mobilities (μ) changed from $13.4 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ to $11.01 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, and resistivities increased depending on doping. It was observed that it decreased significantly from $174 \text{ }\Omega\text{cm}$ to $8.21 \text{ }\Omega\text{cm}$.

Keywords: Copper (II) oxide, Zinc Oxide, Thin film solar cells, Semiconductors, Absorber layer, p-type conductivity.



1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler, modern teknolojinin temel taşlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Metaller kadar her sıcaklıkta yüksek elektriksel iletkenlik göstermeyen bu malzemeler, dışarıdan bir enerji uygulandıklarında (ısı, ışık, kimyasal tepkime vb.) iletken özellik sergilerler. Bu özellikleri sayesinde elektrik akımını belirli bir şekilde kontrol edebilme yetenekleri vardır. Bu nedenle, yarıiletkenlerin teknolojideki yeri oldukça önemlidir.

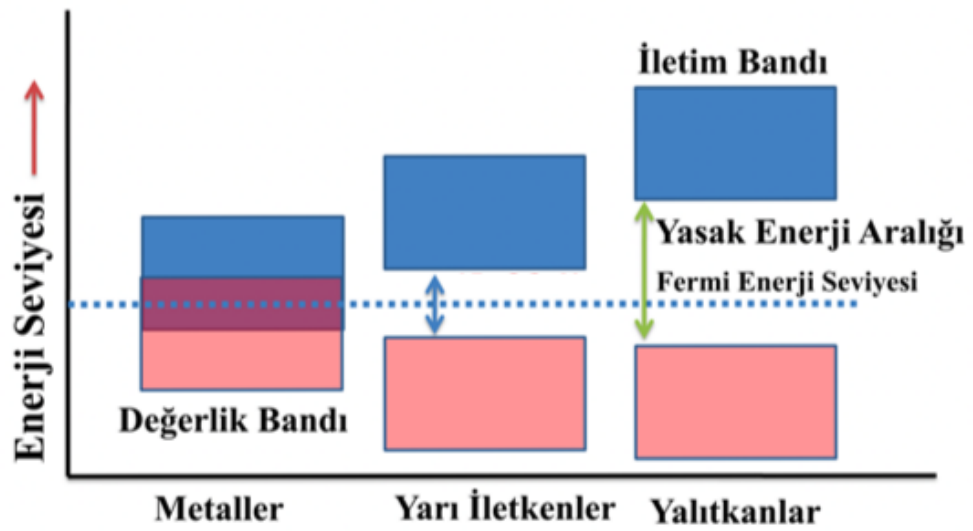
Yarıiletkenlerin en belirgin uygulama alanlarından biri elektronik endüstrisidir. Transistörler, entegre devreler, diyotlar gibi temel bileşenler yarıiletken malzemelerden üretilmektedir. Transistörler, elektrik sinyallerini yükseltmek, yönlendirmek veya anahtarlama işlevi görmek için kullanılır. Bu sayede, bilgisayarlar, cep telefonları, televizyonlar gibi günlük yaşantımızın ayrılmaz parçalarını oluşturan cihazlar çalışır. Entegre devreler ise çok sayıda transistörü bir araya getirerek karmaşık işlevleri yerine getirir ve elektronik cihazların daha küçük boyutta ve daha verimli olmasını sağlar (Neamen, 2012)

Yarıiletkenler aynı zamanda güneş enerjisi gibi güneş ışığının doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebildiği yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını da mümkün kılar. Bilindiği üzere güneş panelleri, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaiik hücrelerden oluşur ve bu hücreler de farklı özelliklerdeki yarıiletken katmanların bir araya gelmesiyle meydana gelir (Tseng ve diğ, 2009).

Geniş bir perspektiften bakıldığında internet erişimi, iletişim, eğlence ve bilgiye erişim gibi birçok temel aktivitenin yarıiletken teknolojilerine dayandığı görülmektedir. Elektronik cihazlardan güneş panellerine, tıbbi araçlardan iletişim sistemlerine kadar pek çok alanda yarıiletkenlerin kullanımı, modern hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu nedenle yarıiletken malzemeler teknolojinin ilerlemesi ve günlük yaşamın kolaylaştırılması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

1.1 Yarıiletken Malzemeler

Atomik ölçekte, yarıiletkenler belirli enerji seviyelerinde elektronlara sahip atomlardan oluşur. Elektronların bulunduğu en dış enerji seviyesine değerlik seviyesi denir. Atomlar, katıyı oluşturmak için bir araya geldiğinde, bireysel atomların değerlik seviyeleri birleşerek yarıiletken malzemedeki sürekli bir değerlik bandı oluşturur. Benzer şekilde, değerlik bandının hemen üstünde yer alan, elektronlar tarafından işgal edilmemiş, daha yüksek enerji seviyelerini içeren iletim bandı meydana gelir (Kittel, 2005). Bu değerlik bandı ve iletim bandı arasında yasak enerji aralığı adı verilen bir enerji boşluğu (E_g) bulunur. Değerlik ve iletim bantları arasındaki bu enerji boşluğu, yarıiletkenleri iletkenlerden (metaller gibi) ve yalıtkanlardan ayıran özelliktir. Metallerde bu yasak enerji aralığı yok denecek kadar az ya da iç içe geçmiş olup, yarıiletken malzemeler için $\sim 1-3$ eV mertebesinde, yalıtkan malzemeler için ise $E_g > 5$ eV şeklindedir. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi, iletkenlerde değerlik ve iletim bantları birbirine bindiği için elektronlar serbestçe hareket edebilir ve elektrik iletkenliği sağlar (Başlak, 2014). Yalıtkanlarda ise iki bant arasında büyük bir enerji boşluğu bulunur, bu da elektronların değerlik bandından iletim bandına geçişine ve serbest elektron oluşumuna izin vermez ve malzeme elektriksel olarak iletkenlik gösteremez (J, 2011). Yarıiletkenlerde ise, elektronların değerlik bandından iletim bandına ısı veya ışık gibi harici enerji uygulayarak kolayca geçebileceği yalıtkanlara nispeten küçük enerji boşluğu yer alır.



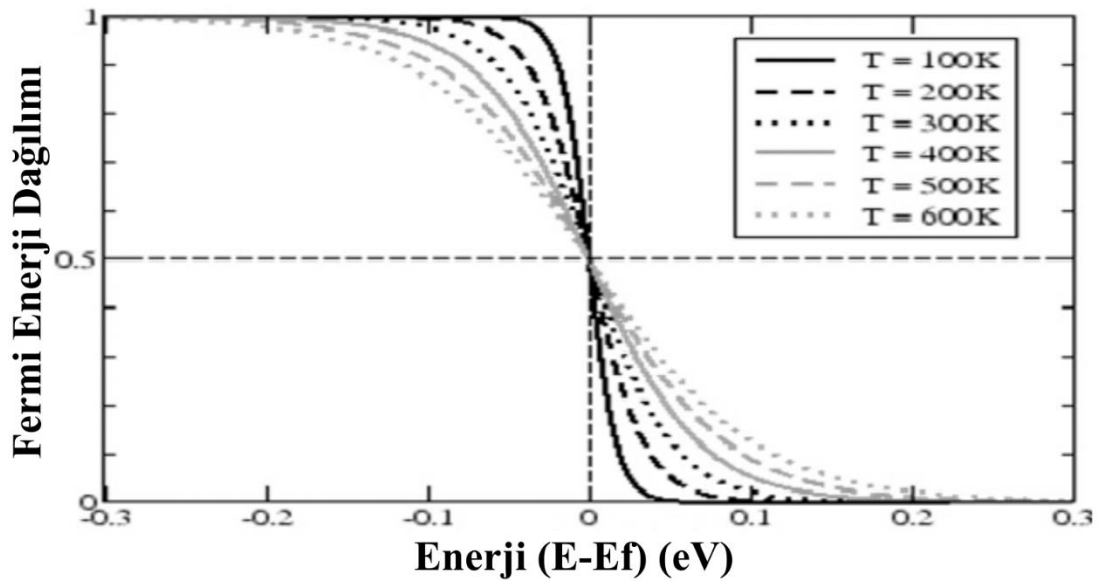
Şekil 1.1: İletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerde yasak enerji aralığı şematik gösterimi.

Yarıiletken malzemeye enerji uygulandığında değerlik bandındaki bir elektron arkasında deşik bırakarak iletim bandına geçer ve serbest hale geçer. Bu süreç serbest taşıyıcı oluşumu olarak adlandırılır ve iletim bandındaki serbest elektronlar ile değerlik bandındaki deşiklerin (hollerin) hareketi yarıiletkenlerde elektrik iletimini sağlar.

Yarıiletken malzemeler içindeki yük taşıyıcıları arasındaki dağılım Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ile ifade edilir.

$$f_n(E) = \frac{1}{e^{\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)} + 1} \quad (1.1)$$

Burada E_f , T ve k sırasıyla Fermi enerjisi, mutlak sıcaklık ve Boltzman sabitidir. Yukarıda verilen bağıntıya göre mutlak sıcaklıkta ($T=0$ K) $E < E_f$ durumunda $f_n(E)=1$ olduğu yani Fermi enerji seviyesinin altındaki bütün enerji seviyelerinin dolu olduğu, diğer bir ifadeyle elektronlar tarafından işgal edildiği, $E > E_f$ durumunda ise $f_n(E)=0$ olduğu yani Fermi enerji seviyesinin üzerindeki bütün enerji seviyelerinin boş olduğu ortaya çıkmaktadır. Bunlara ek olarak deşikler için ise dağılım fonksiyonu ise $f_p(E) = 1 - f_n(E)$ şeklinde ifade edilebilir (J.P. Colinge & C.A. Colinge, 2002). Şekil 1.2’de görüldüğü üzere sıcaklık arttığında ise valans bandındaki elektronların arkasında deşikler bırakarak iletim bandına geçmesi nedeniyle fermi fonksiyonunun karakteri farklılaşır.



Şekil 1.2: Fermi Enerji dağılımı.

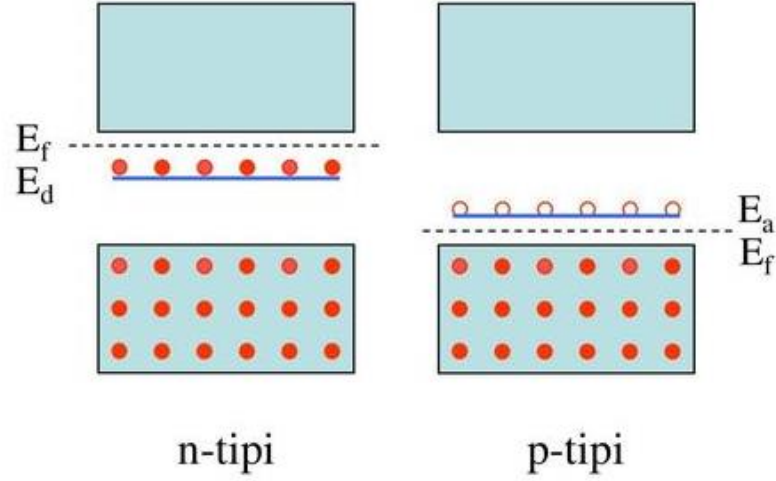
Bu noktadan bakıldığında Fermi enerji seviyesi, yarıiletken malzemelerin iletkenlik özelliklerini belirler ve sıcaklık arttıkça, Fermi Enerji Seviyesi'ne yakın enerji seviyelerindeki elektronlar iletkenlikte rol oynamaya başlar. Has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının tam ortasında yer alır.

Tüm bu anlatılanlardan görüleceği üzere, bir has yarıiletkene yasak enerji aralığından daha yüksek enerji uygulandığında değerlik bandındaki elektronun iletkenlik bandına uyarılması sonucunda oluşan serbes elektron konsantrasyonu (n) ile deşik konsantrasyonu (p) birbirine eşit olmaktadır. Ancak has yarıiletkenler elektriksel iletkenliklerinin nispeten zayıf olmasına neden olan düşük bir taşıyıcı konsantrasyonuna (elektronlar ve deşikler) sahiptir. Ayrıca, has yarıiletkenler, elektriksel özelliklerini tam olarak kontrol etme veya değiştirme yeteneğinden yoksundur. Bu kısıtlamalar nedeniyle bu tür malzemeler teknolojik açıdan çok kullanışlı değildir. Bu noktada yarıiletken malzemenin uygun elementler ile katkılanması sonucunda elektron konsantrasyonunun deşik konsantrasyonundan çok daha yüksek olduğu ($n > p$) n-tipi yarıiletken malzeme veya deşik konsantrasyonunun elektron konsantrasyonundan çok daha yüksek olduğu ($p > n$) p-tipi yarıiletken malzemeler elde edilir (Streetman B.G., 2009) (Martínez-Duart ve diğ., 2006).

Bu iki tür katkılama süreci Silisyum yarıiletken malzemesi üzerinden izah edilebilir. $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ elektron dizilimine sahip Si atomları, sp^3 hibritleşmesi sonucunda $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1 3p_x^1 p_y^1 p_z^1$ elektron dizilimine sahip olurlar ve her biri 4 değerlik elektronuna sahip Si atomu 4 komşu Si atomuyla kovalent bağ yaparak kristal yapıyı oluştur. Eğer 5. Grup elementlerinden olan fosfor (P), antimon (Sb) veya arsenik (As) gibi dörtten fazla değerlik elektronuna sahip katkı atomları Si ile yerdeğiştirdiğinde kovalent bağ yapmayan elektronlar atoma zayıfça bağlı olur ve oldukça düşük bir enerji ile serbest duruma geçerler. Böylelikle deşik konsantrasyonundan çok daha fazla elektron konsantrasyonuna sahip n-tipi yarıiletken malzeme elde edilebilir. Diğer yandan Si yarıiletken malzemesi bor (B), galyum (Ga) veya indiyum (In) gibi 3. Grup elementleri ile katkıldığında ise kovalent bağların tamamlanmamış olması neticesinde deşikler meydana gelir ve elektron konsantrasyonundan çok daha fazla deşik konsantrasyonu elde edilerek p-tipi yarıiletken malzeme elde edilir (J.P. Colinge & C.A. Colinge, 2002).

n-tipi katkılama neticesinde, yasak enerji aralığı içerisinde, iletim bandına yakın ve elektronlar tarafından işgal edilmiş donör enerji seviyeleri meydana gelir ve artık fermi

enerji seviyesi iletim bandı ile donör enerji seviyesi arasında yer alır. P-tipi katkılama neticesinde ise, yasak enerji aralığı içerisinde, değerlik bandına yakın ve elektronlar tarafından işgal edilmemiş akseptör seviyeleri meydana gelir ve artık fermi enerji seviyesi iletim bandı ile donör enerji seviyesi arasında yer alır. Şekil 1.3'te n-tipi ve p-tipi yarıiletken malzemelerin enerji bant diyagramını gösterilmiştir (J.P. Colinge & C.A. Colinge, 2002)



Şekil 1.3: Katkılı yarıiletkenlerde bant yapısı.

1.2 Yarıiletken p-n Eklemleri

Edmond Becquerel'in 1839'da laboratuvarında gerçekleştirdiği deneyler sırasında keşfettiği yarıiletken yapılar, günümüz malzeme geliştirme teknolojisi ile çok farklı alanlarda kullanılmak üzere çeşitlendirilerek geliştirilmiştir. Özellikle pn eklemlerinin üretilmesi ile başta yarıiletken teknolojisine dayanan elektronik bileşenlerin çok daha verimli ve daha küçük boyutlarda üretilmesi sağlanmıştır.

Yarıiletken pn eklemleri, bir p-tipi yarıiletken ve buna uyumluluk gösteren bir n-tipi yarıiletken malzemenin eklem oluşturacak şekilde üretilmiş şeklidir. Şekil 1.4'de bir pn ekleminin şematik diyagramı ve tükenme bölgesinin oluşumu gösterilmiştir.

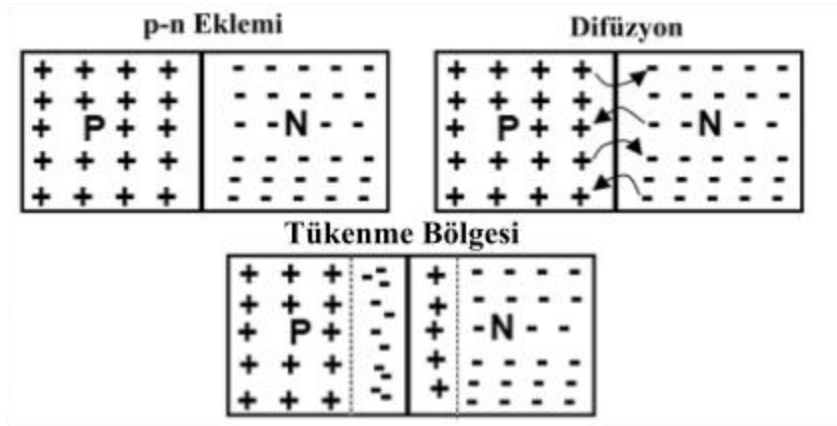
Bir pn eklemi oluşturulduğunda n-tipi bölgedeki fazlalık elektronlar, arkasında pozitif iyonlar bırakarak p-tipi bölgeye doğru, p-tipi bölgedeki fazlalık deşikler ise arkasında negatif iyonlar bırakarak n-tipi bölgeye doğru difüz eder ve böylece serbest taşıyıcılardan arındırılmış, kıtlık bölgesi olarak adlandırılan, bir eklem bölgesi meydana gelir. Bu bölgede pozitif yüklü iyonlardan negatif yüklü iyonlara doğru, elektron ve hollerin difüzyonunu engelleyen bir iç elektrik alan, diğer bir ifadeyle

eklem potansiyeli meydana gelir. Bu elektrik alan aynı zamanda elektronları n-tipi bölgeye, holleri ise p-tipi bölgeye sürüklenme eğilimindedir. Elektron ve hollerin bu difüzyon ve sürüklenmesi elektrik alan tarafından dengeye ulaşınca kadar devam eder ve denge durumunda difüzyon ve sürüklenme akımları birbirine eşit olur ve böylece ktlık bölgesi boyunca net bir yük taşıyıcı hareketi olmaz (Kenneth E. Train, 2009).

Bir pn eklemine p-tipi tarafa yüksek n-tipi tarafa düşük voltaj olacak şekilde bir potansiyel fark uygulandığında eklem potansiyeli azalır (bir diğr ifadeyle eklem bölgesinin genişliğı daralır) ve akım geçmesine olanak sağlarken, p-tipi bölgeye düşük voltaj n-tipi bölgeye yüksek voltaj olacak şekilde bir potansiyel fark uygulandığında eklem potansiyeli artar (eklem bölgesi genişler) ve eklem boyunca akım geçmesine izin vermez. Bu olgu bir pn eklemının doğrultucu özelliğı sahip olduğunu gösterir ve uygulanan gerilime bağılı olarak pn ekleminden geçen akım aşığıdaki eşitlikle verilir.

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Burada I_s , ters doyum akımı, V uygulanan potansiyel fark, k Boltzman sabiki, T ise mutlak sıcaklıktır (J.P. Colinge & C.A. Colinge, 2002; Kenneth E. Train, 2009).



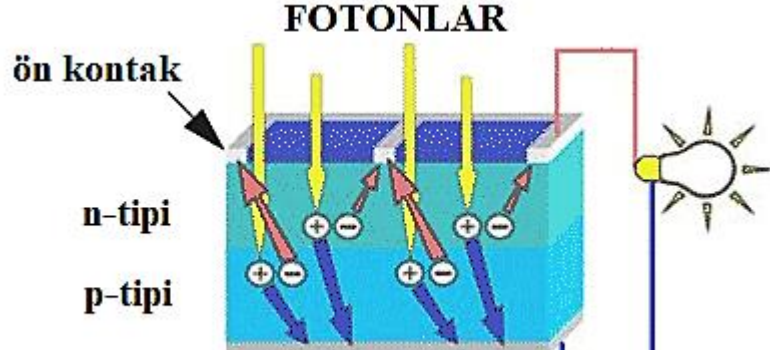
Şekil 1.4: Bir p-n eklemının şematik gösterimi.

1.3 Fotovoltaik Etki ve Güneş Hücresinin Çalışma Prensibi

Güneş hücreleri pn eklemine dayalı çalışan aygıtlara iyi bir örnektir. Etkili bir güneş pilinin çalışma mekanizması, dışarıdan gelen güneş ışığının, soğurularak elektrik enerjisine dönüştürülmesine dayanır. (J.P. Colinge & C.A. Colinge, 2002.)

Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi;

1. Güneş Işığının Absorbe Edilmesi: Fotovoltaik hücreler, güneşten gelen fotonları absorbe eder. Fotonlar, genellikle yarıiletken malzemenin atomlarına çarpar.
2. Elektron-Hol Çiftlerinin Oluşumu: Güneş ışığındaki, yarıiletken malzemenin bant aralığından daha büyük enerjiye sahip fotonlar, yarıiletken malzemenin atomlarına çarptığında, serbest elektronlar ve deşik adı verilen boşluklar oluşur.
3. Elektronların ve deşiklerin hareketi: Oluşan elektronlar ve deşikler, güneş hücresi içerisindeki eklem bölgesine doğru hareket eder ve buradaki potansiyel fark veya diğer bir ifadeyle elektrik alan tarafından ayrılarak, elektronlar n-tipi bölgeyi geçerek ön kontağa, deşikler ise p-tipi bölgeyi geçerek arka kontağa doğru yönlendirilirler.
4. Elektrik Akımının Oluşumu: Elektronlar ve holler, belirli bir yönde hareket ettiğinde, bu akım oluşturur. Bu akım, fotovoltaik hücrenin bağlı olduğu dış devre boyunca elektrik enerjisi sağlar. Şekil 1.5’de bir p-n eklemli güneş hücresinin temel çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 1.5: Fotovoltaik güneş hücresinin çalışma prensibi.

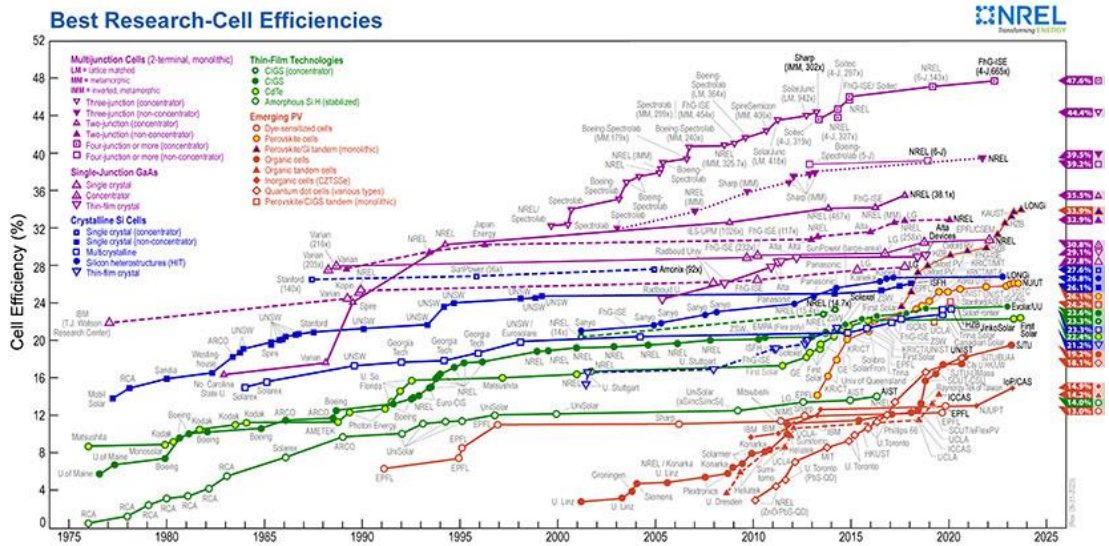
1.4 İnce Film Güneş Hücreleri

Bir güneş hücresi genellikle, soğurucu katman (genellikle p-tipi yarıiletken malzeme), tampon katmanı (genellikle n-tipi yarıiletken malzeme), saydam iletken ön kontak ve arka metal kontak olmak üzere farklı katmanlardan meydana gelir. Bu katmanların her biri, güneş hücresinin etkin bir şekilde çalışabilmesi için belirli bir göreve sahiptir. Güneş ışığı ilk olarak, hücrenin ön tarafında yer alan saydam ön kontakta geçer ve daha sonra tampon katmanı boyunca ilerler ve ışığın büyük bir bölümünün

soğurulduğu soğurucu katmana ulaşır.. Bu süreçte fotonlar güneş hücresi içerisinde yer alan malzemeler tarafından soğurularak elektronlar ve delikler oluşturulur ve bu taşıyıcılar arka kontak ve ön kontakt arasında bir akım oluşturmak için ayrılırlar. Bu akım, dış devreye bağlı yük veya cihazlara güç sağlamak için kullanılır.

Günümüz güneş pillerinin büyük bir kısmında silikon temelli yarıiletkenler kullanılır, silikon yarıiletken güneş pilleri uzun süre kullanım olanağı sağlamasına karşın, maliyeti, enerji verimliliği göz önünde bulundurulduğunda yerini ucuz ve toksik olmayan malzemelerin kullanıldığı yeni fotovoltaiik teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu kılıyor(McEvoy ve diğ, 2013).

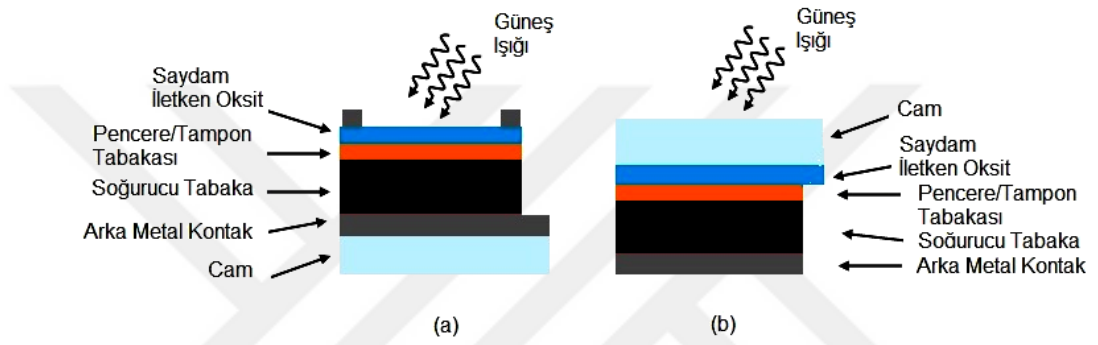
Gelişen malzeme teknolojisi sayesinde silikon yarıiletken güneş pilleri yerine alternatif olarak, organik malzemeler, perovskit malzemeler, kalkopirit malzemeler ve kalkojenit malzemeler, metal oksit yarıiletken temelli ince film güneş pilleri kullanılmaya başlanmıştır. Verimlilikleri oldukça yüksek değerlere ulaşan bu yeni malzemeler sayesinde daha ucuz, toksik olmayan, yüksek verimlilikli güneş pilleri pazara sunulmaktadır. Şekil 1.6'da güncel güneş hücresi çalışmalarının verimlilik sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 1.6: Güncel güneş hücresi verimlilikleri(Renewable Energy Lab.)

Metal oksit ince film güneş pilleri, doğada bolca bulunan, kolay işlenebilir, ucuz maliyetli ve toksik olmayan özellikleri sebebi ile oldukça revaçtadır. Farklı yabancı atomlarla katkılanarak optik, elektriksel ve yapısal özellikleri kolayca optimize edilebilen metal oksitler sayesinde yüksek verimlilikli ince film güneş pilleri elde edilebilir.

İnce film güneş hücreleri Şekil 1.7’de gösterildiği gibi iki farklı mimaride üretilebilir. Bunlardan ilki saydam bir alttaş üzerine sırasıyla saydam iletken ön kontak, tampon katmanı, soğurucu katman ve arka metal kontakın biriktirilmesiyle oluşturulan süperstrate (üst katman) dizilimi diğeri ise alttaş üzerine arka metal kontak, soğurucu katman, tampon katmanı ve saydam iletken ön kontakın biriktirilmesiyle oluşturulan substrate (alt katman) dizilimidir. Anlatılan bu ilk mimaride (süperstrate dizilim) ışık alttaştan geçerek soğurucu katmana ulaşacağı için alttaşın saydam olması gerekmektedir. Diğer mimaride (substrate dizilim) ise böyle bir zorunluluk söz konusu değildir (McEvoy ve diğ, 2013).



Şekil 1.7: Farklı dizilimlerde oluşturulan ince film güneş hücreleri.

1.5 Cu₂O Yarıiletken İnce Filmler

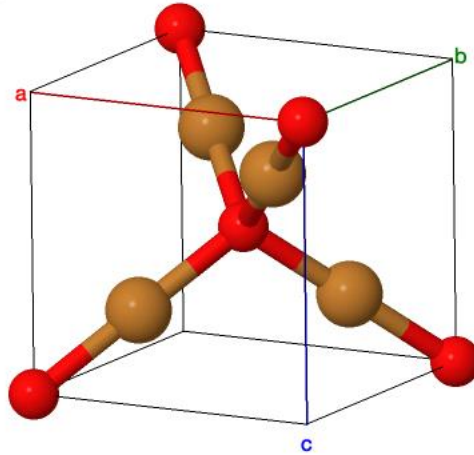
Cu₂O, toksik olmaması, doğaya zarar vermemesi, bakırın doğada bol bulunması ve ekonomik olarak kolayca elde edilebilmesi gibi avantajlarından dolayı bilim adamları tarafından ilgi gören bir malzemedir (McShane & Choi, 2009). Doğada yüzey merkezli kübik (fcc) yapıda ($a=b=c=4,252\text{\AA}$) bulunan Cu₂O, negatif yüklü Cu boşlukları nedeniyle p-tipi elektriksel iletkenliğe sahiptir. Şekil 1.8’de Cu₂O kristal yapısının birim hücresi verilmiştir (Naceur ve diğ., 2021).

Diğer yandan, direkt bant geçişli bir yarıiletken malzeme olup bant aralığı 2.0-2.6 eV arasında değişmektedir. Bant aralığına bağlı olarak Cu₂O, 500 nm'nin üzerindeki dalga boylarında yüksek bir optik geçirgenliğe ve altındaki dalga boyunda yüksek bir soğurma katsayısına ($\alpha \sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$) sahiptir (T. Minami ve diğ., 2013; Nguyen ve diğ., 2018; Tran ve diğ., 2018). Bu nedenle ince film güneş hücrelerinde soğurucu tabaka adayı olarak dikkat çeken bir malzemedir. Araştırmalar, Cu₂O'nun teorik olarak %20'lik bir fotoelektrik dönüşüm verimliliği gerçekleştirebileceğini göstermektedir (Minami ve diğ., 2016) (Olsen ve diğ., 1979). Ayrıca uzun bir taşıyıcı difüzyon

uzunluğuna sahip olması, Cu₂O'nun güneş hcerlerinde soğurucu katkıman olarak kullanılmasını destekleyen bir durumdur (Henni ve diğ, 2023).

Cu₂O ince filmlerinin uygun yabancı atomlar ile katkılanması, malzemelerin fiziksel özelliklerini iyileştirebilmektedir. Katkı atomları kristal örgü içerisinde Cu ya da O konumlarına yerleşebilir. Literatürde yer alan çalışmalarda azot, magnezyum ve germanyum gibi atomların katkılanmasıyla Cu₂O'nun deşik konsantrasyonunun arttığı ifade edilmiştir (Duan ve diğ, 2012). (Ishizuka ve diğ, 2001a), Si katkısı ile deşik konsantrasyonunu 10¹⁵cm⁻³ den 10¹⁷cm⁻³'e çıkartmışlardır(Ishizuka ve diğ, 2001b) . Bind ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada ise Na katkısının Cu₂O rgs içerisinde Cu boşluklarını ve böylelikle deşik konsantrasyonunu artırdığı ifade edilmiştir (Bin ve diğ, 2019).Shaji ve ark. (2020) ise, B katkısı ile Cu₂O'nun deşik konsantrasyonunun arttığını ve elektriksel özdirencin azaldığını göstermişler ve elde edilen B katkılı Cu₂O filmlerinin c-Si güneş hücrelerinde deşik seçici katman olarak kullanılabileceklerini ileri sürmüşlerdir (Shaji ve diğ, 2020).

HM:P n -3 m :1 #224
a=4.252Å
b=4.252Å
c=4.252Å
α=90.000°
β=90.000°
γ=90.000°



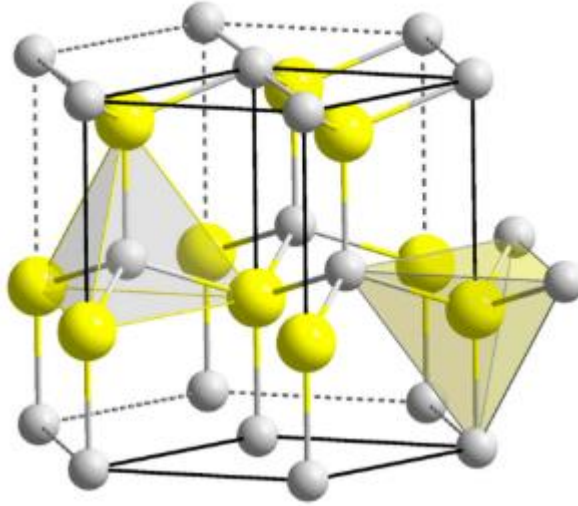
şekil 1.8: Cu₂O kristal yapısı (basit kübik yapı)

1.6 ZnO Yarıiletken İnce Filmler

Çinko oksit (ZnO) doğrudan geçiş bant yapısına sahip, ~3.3 eV değerinde yasak enerji aralığına sahip, toksik olmayan ve doğada bolca bulunan bir yarı iletkendir (Sarica ve diğ, 2021). Optik spektrumun görünür dalga boyu aralığında yüksek geçirgenlik gösteren ZnO büyük bir eksiton bağlanma enerjisine sahiptir (~60 meV). Özellikle UV

ve mavi bölge dalga boylarında etkin olan optoelektronik uygulamalar için uygundur(Borysiewicz, 2019).

Wurtzite kristal yapıya sahip olan ZnO, $a=3.2495 \text{ \AA}$ ve $c=5.2062 \text{ \AA}$ örgü parametrelerine sahiptir. Zn^{2+} iyonlarının dört tane O^{2-} iyonu tarafından tetrahedral bir düzen ile sarıldığı iç içe geçmiş sıkı paket altıgen kristal yapıya sahiptir (Borysiewicz, 2019; Demirselçuk, 2012).



Şekil 1.9: Würtzite yapılı ZnO kristali (Zn atomları sarı, O atomları gri ile gösterilmiştir.)

Yapısındaki O boşlukları ve Zn arayer atomlarından dolayı n-tipi elektriksel iletkenlik gösteren ZnO $\sim 60 \text{ cm}^2 \text{Vs}^{-1}$ değerinde yüksek taşıyıcı mobilitesi ile özellikle yarıiletken ince güneş pilleri için ideal bir tampon tabaka adayı olarak karşımızda çıkmaktadır (Sarica, 2012).

Çok farklı yöntemlerle üretilabilen ZnO ince filmleri özellikle katkılama yapılarak değiştirilebilen yasak enerji aralığı sayesinde bir çok uygulamaya sahiptir(Baruah & Dutta, 2009; Jeong ve diğ, 2008; Ku ve diğ, 2009; Sarica ve diğ, 2021).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Cu₂O ince filmleri toksik olmayışı ve doğada bolca bulunması sebebi ile hem katkısız hem de farklı elementler ile katkılanarak yarı iletken olarak çok fazla alanda kullanılabilirliği sebebi ile çalışılan malzemelerdir. Bu bölümde katkısız Cu₂O ve çeşitli elementler ile katkılanmış Cu₂O ince filmlerine ait literatürde yer alan bazı çalışmalar listelenmiştir. Ayrıca Cu₂O ince filmlerinin ince film güneş hücrelerine uygulandığı çalışmalara da bu bölümde değinilmiştir.

Kumar ve ark., 2021 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, katkısız ve Zn katkılı Cu₂O ince filmleri, cam alttaşlar üzerine 280°C’de çözeltinin nebulizer yardımı ile püskürtüldüğü spreylendirilerek büyütülmüş, XRD analizleri ile Cu₂O ince filmlerinin polikristal yapısında olduğunu (111) kristal düzleminin baskın pik olduğunu, katkılama oranlarının artması ile (%3-5-7) kristal boyutlarının 20 nm’den 46 nm’ye arttığını, AFM görüntülerinde katkılama oranının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını, optik çalışmalarında katkılama oranı arttıkça soğurmanın artması ile birlikte yasak enerji aralığında azalma olduğunu göstermiştir(Kumar Jacob ve diğ., 2021) .

Kurias K. Markose ve ark. 2020 yılında yaptığı çalışmada, ITO alt taşlar üzerine Cu₂O:B ince filmlerini rf-saçırtma metoduyla büyütülmüş, XRD sonuçlarına göre kübik yapıda Cu₂O polikristallerini ayırt eden 4 pikini gözlemlediklerini raporlamışlardır.. Elektriksel özelliklerini incelemek için van der Pauw geometrisi ile Hall etkisi ölçümleri alınmıştır. Ölçümler sonucunda p-tipi iletkenliğe sahip ince filmlerin katkısız olanlarda deşik konsantrasyonu (n) $1.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, mobilite değerlerini(μ) $1.05 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, iletkenlik $3 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ olarak ölçülmüşken B katkılı ince filmlerde deşik konsantrasyonu (n) 1.47×10^{18} , mobilite (μ) $0.6 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, iletkenlik $1.49 \times 10^{-1} \text{ mS/m}$ olarak ölçülmüştür. Elektriksel özelliklerdeki bu değişim B³⁺ iyonlarının Cu₂O örgüsü içine girmesi ve örgü içersinde bakır boşluklarının yerini almasıyla açıklanmıştır. Optik ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre yasak enerji aralığı katkısız filmlerde 2.5 eV olarak hesaplanmışken katkılı filmlerde 2.55 eV olarak hesaplanmış, direkt geçiş soğurması olarak belirtilmiş, yasak enerji aralığındaki bu değişimin sebebinin katkılamanın, yapının daha az oksijen ile d-d çiftlenmesinden kaynaklandığı öne sürülmüştür(K. Markose ve diğ., 2020).

Chatterjee S. ve ark. 2016 yılında yaptığı çalışmada, ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) yöntemi ile Cu_2O ince filmleri oluşturulmuştur. p-tipi Cu_2O tabakası ve n-tipi SnO_2 nanopartikül tabakası ile pn eklemleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bakır oksit ince film güneş pillerinin veriminin %1'den fazla olduğu bildirilmiştir(Chatterjee ve diğ., 2016).

Yurddaşkal M. ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptığı çalışmada bakır (I) oksit (Cu_2O) ve bakır (II) oksit (CuO) yapıları, titanyum altaşlar üzerinde kimyasal elektrodpozisyon yöntemi ile büyütülmüş, 200°C – 600°C arasındaki farklı tavlama sıcaklıklarında Cu_2O ve CuO yapılarının morfolojisi, kristal yapısı ve fotokatalitik aktivitesi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Farklı fazlarda ortaya çıkan yapılar için ideal tavlama sıcaklığını 500°C olarak belirlenmiştir(Yurddaşkal M. ve diğ., 2016).

Maruyama T. ve arkadaşlarının 1998 yılında yaptığı çalışmada, polikristal Cu_2O ince filmler, atmosferik ortamda kimyasal depolama yöntemi ile 280°C 'nin üzerindeki sıcaklıkta hazırlanmıştır. Cu_2O ince filmlerinin kızılötesi bölgede $2,17 - 25 \mu\text{m}$ bölgesine reflektans gösterdiğini çalışmalarında belirtmişlerdir(Maruyama T., 1998). Ray S.C.'nin 2001 yılında yaptığı çalışmada sol-gel yöntemi ile farklı sıcaklıklarda Cu_2O ince filmleri cam altaşlar üzerine büyütülmüştür. Filmlerin XRD çalışmaları yapılmıştır. 360°C 'de Cu_2O fazı ve 360°C üzerindeki sıcaklıklarda ise CuO fazı elde edilmiştir. Optik enerji bant değerleri optik soğurma yolu ile bulunmuştur. Cu_2O ve CuO için sırasıyla 2.1 eV ve 1.9 eV olarak hesaplanmıştır(Ray, 2001).

Balamurugan B. Ve arkadaşlarının 2001 yılında yaptığı çalışmada, Cu_2O ince filmleri aktif reaktif buharlaştırma tekniği ile büyütülmüş. Cu_2O ince filmlerinin yapısal ve optik özellikleri XRD ve FTIR, SEM ve UV-VIS-NIR spektrofotometresi yardımı ile alınmıştır. Cu_2O filmlerinin kübik fazda oluşan polikristal yapılarını gözlemlemişlerdir(Balamurugan ve diğ., 2001).

Hameş Y. ve arkadaşlarının 2004 yılında yaptıkları çalışmada, Cu_2O ince filmler, kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile cam altaşlar üzerinde büyütülmüştür. Polikristal Cu_2O ince filmlerin optik geçirgenlikleri 400–900 nm aralığında ölçülmüş ve yasak enerji aralıklarının 2.1 eV olarak hesaplamışlardır. olarak ölçülmüştür. Cu_2O ince filmlerin bant aralığı, optik geçirgenlik değerleri yardımıyla 2.1 eV olarak hesaplanmıştır(Hameş & Eren San, 2004).

Özaslan D. ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptığı çalışmada, Cu_2O ince filmleri SILAR yöntemi ile cam altaşlar üzerine 70°C 'de büyütülmüştür. Polikristal Cu_2O ince

filmlerinin XRD analizleri yapılmış, optik hesaplamalarla görünür bölgede %50-%70 arasında geçirgenlik gösterdiği belirlenmiş, yasak enerji aralıklarının 2.53-2,62 eV arasında değiştiği incelenmiştir(Ozaslan ve diğ., 2017).



3. MATERYAL YÖNTEM

3.1 GİRİŞ

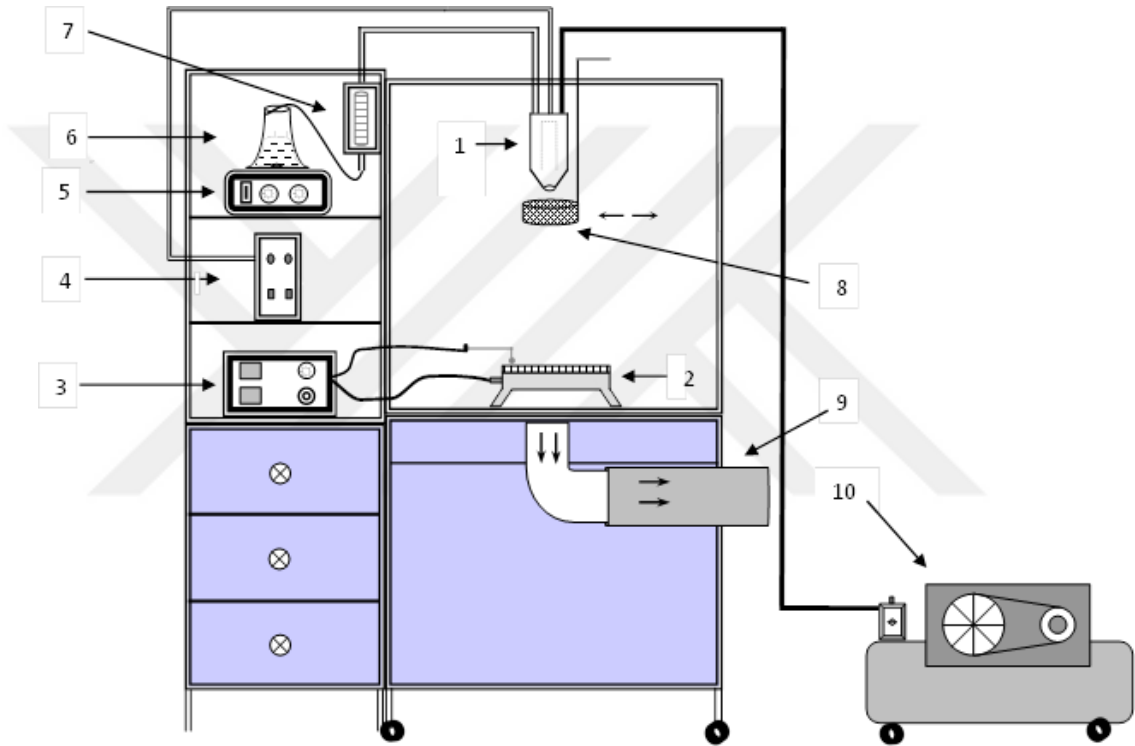
İnce filmler kullanım alanlarına ve kazandırılması istenilen özelliklerine göre, farklı üretim yöntemleri ile elde edilebilirler. Temelde fiziksel ve kimyasal yöntem olarak sınıflandırılan ince film üretim yöntemleri her iki ana sınıf altında da kullanılan tekniğe bağlı olarak çeşitlenmektedir. Fiziksel ince film üretim yöntemleri, vakum buharlaştırma ve sıçratma yöntemleri olarak iki ana sınıfa ayrılırken, vakum buharlaştırma teknikleri, elektron demeti buharlaştırma (EBV), lazer buharlaştırma (LE), radyo frekans buharlaştırma (RFE) şeklinde sıralanabilir. Sıçratma ile fiziksel ince film üretim yöntemleri olarak, radyo frekans sıçratma (RFS), serbest hedef sıçratma, iton demeti sıçratma (IBS), alternatif akım sıçratma ve manyetik sıçratma olarak sıralanabilir. Kimyasal ince film üretim yöntemleri olarak, gaz fazında, buhar biriktirme (CVE DİĞ), lazer destekli buhar biriktirme (LCVE DİĞ), plazma destekli buhar biriktirme (PCVE DİĞ) şeklinde sıralanmaktadır. Kimyasal ince film üretim yöntemlerinde likit fazda üretim yöntemlerinden, sol-jel yöntemi, elektrodepozisyon yöntemi, SILAR yöntemi ve sprej piroliz yöntemi olarak sınıflandırılabilir. Üretilmesi hedeflenen ince filmin, elektriksel, optik ve yapısal özellikleri, seçilen üretim metoduna göre değişiklik göstermektedir. Bu teknikler arasında sprej piroliz tekniği, kolay kullanım sağlaması, düşük maliyet sunması sebebi ile tercih edilmektedir. Ultrasonik sprej piroliz tekniği ile farklı alttaş sıcaklıklarında, farklı akış hızlarında, farklı taşıyıcı gaz ve gaz basıncı ile üretilen ince filmlerin fiziksel özellikleri optimize edilebildiği, kolay ve düşük maliyet gerektirdiği için tercih edilmektedir(Rudan, 2014).

3.2 Ultrasonik Sprej Piroliz Yöntemi

Kimyasal ince film üretim yöntemlerinden biri olan ultrasonik sprej piroliz yönteminde ince film oluşumu, hazırlanan solüsyonun belirli akış hızında, ultrasonik atomizerden geçirilerek mikron boyutunda damlacıklar haline getirilmesi ve bu oluşturulan damlacıkların çeşitli taşıyıcı gazlar (Argon, Azot, Hava vb) yardımıyla, önceden ısıtılmış alttaşların üzerine ulaştırılması ile gerçekleştirilir. Bu teknikte ince filmlerin fiziksel özellikleri üretim sırasında belirlenen parametrelere bağlıdır. Bu parametrelerin kontrol edilebilir olması, deney süresince sabit olması ve tekrarlanabilir

olması önem arz etmektedir. Şekil 3.1’de USP sistemine ait temel bileşenler şematik olarak gösterilmiştir.

Bu çalışmada, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü, Katıhal Fizigi Laboratuvarında bulunan, 100 kHz frekansında çalışan ultrasonik atomizere sahip, alttaşıların 500°C’ye kadar ısıtılmasına imkan veren ve taşıyıcı gaz olarak istenilen basınca ayarlanabilen sıkıştırılmış hava kullanılan ultrasonik sprej piroliz sistemi kullanılmıştır(Patil P. S., 1999).



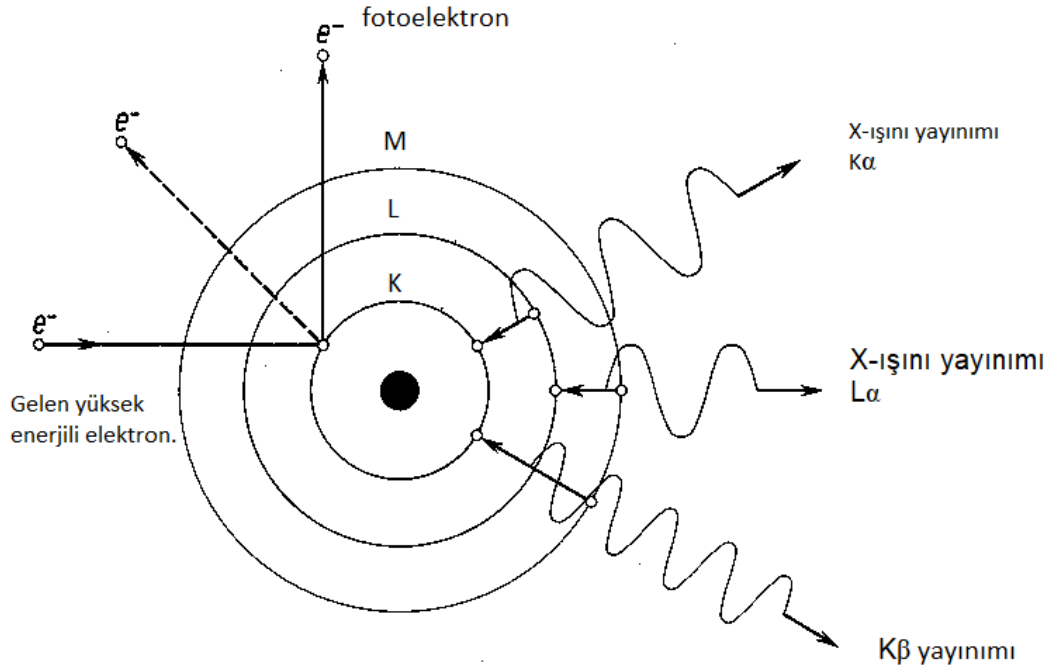
Şekil 3.1: USP sistemine ait bileşenler.

USP sisteminin temel bileşenleri, atomizer (1), ısıtıcı plaka (2), sıcaklık kontrol ünitesi (3), atomizer güç kaynağı (4), manyetik karıştırıcı (5), başlangıç çözeltisi (6), akış kontrol ünitesi (7), akışı kesmek için mekanik kol (8), içerideki gazı dışarı taşıyan aspirasyon birimi ve taşıyıcı gazı sıkıştırmak için kullanılan kompresörden (10) oluşmaktadır(Akyüz İ., 2005; Perednis D., 2003; Perednis D. & Gauckler L. J., 2005).

3.3 Yapısal Özelliklerin İncelenmesi

X-ışınları 1895 yılında Alman fizik profesörü Wilhelm Conrad Röntgen tarafından keşfedilmiş ve günümüzde özellikle malzemelerin yapısal özelliklerinin

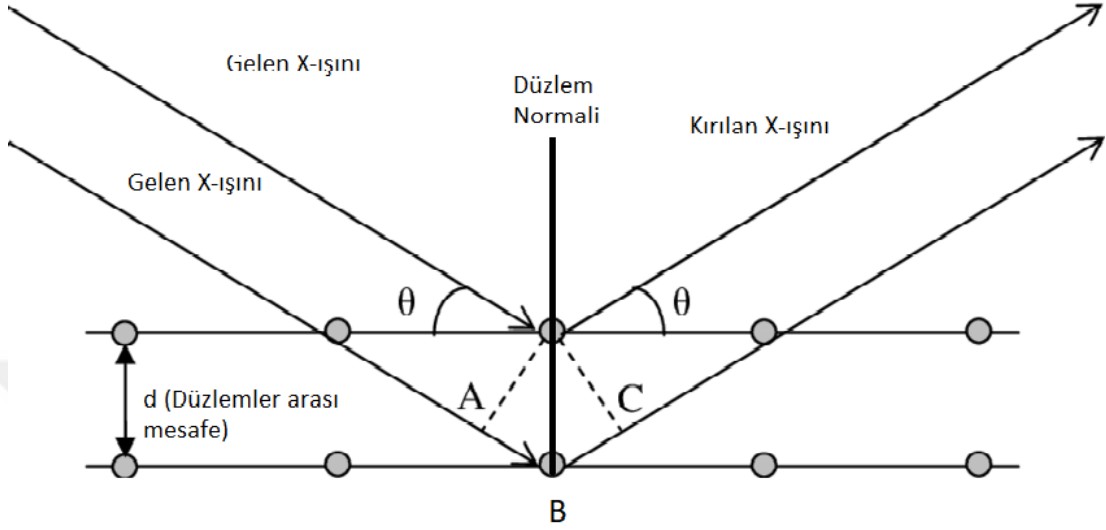
incelenmesinde sıkça kullanılmaktadır. Elektromanyetik spektrumun küçük dalga boyuna karşılık gelen X-ışınları yüksek enerjiye sahiptirler. Dalgaboyları ortalama 0,5 Å ila 2,5 Å arasındadır. Yüksek enerjileri sayesinde giricilik özelliğine sahiptirler. X-ışınları, bir elektronun vakum ortamında, katot plakanın ısıtılarak serbest hale gelmesi ve uygulanan potansiyel fark altında hızlandırılıp anot plakanın (hedef) atomlarının ağır çekirdekleri ile etkileşmesi ile ivmelenerek enerji kaybetmesi sonucu oluşur. Sürekli ve karakteristik (kesikli) spektrum gösterirler. Sürekli spektrum elektronların frenlenmesi ile oluşurken, karakteristik X-ışınları atomun K tabakasındaki elektronların uyarılmaları ile oluşur, oluşturulması için yüksek enerjili elektronlar kullanılır(Seibert, 2004). Şekil 3.2’de K, L kabuklarından yayılan X-ışınları gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Farklı kabuklardan elde edilen karakteristik X-ışını yayınımları.

X-ışınlarının malzemelerin yapısal özelliklerinin belirlenmesinde en çok kullanılan uygulaması, X-ışını kırınım (XRD) deseni incelenmesidir. Kristal yapılarda, yapıyı meydana getiren atomların periyodik tekrarını ilk gözlemleyen 1773’de Haüy’ün çalışmalarından sonra kırınım ağı teorisini inceleyen Laue’nin deneyleri sonrasında W.H. Bragg ve oğlu W.L. Bragg yansıyan ışınların kırınım için gerekli şartlarını ortaya koymuştur. Temelde Bragg yasasına uygun şekilde iki kristal düzlemi arasındaki mesafe ile aynı metrebeğe sahip dalga boylu (0,1 Å -10 Å) X-ışını malzeme yüzeyine

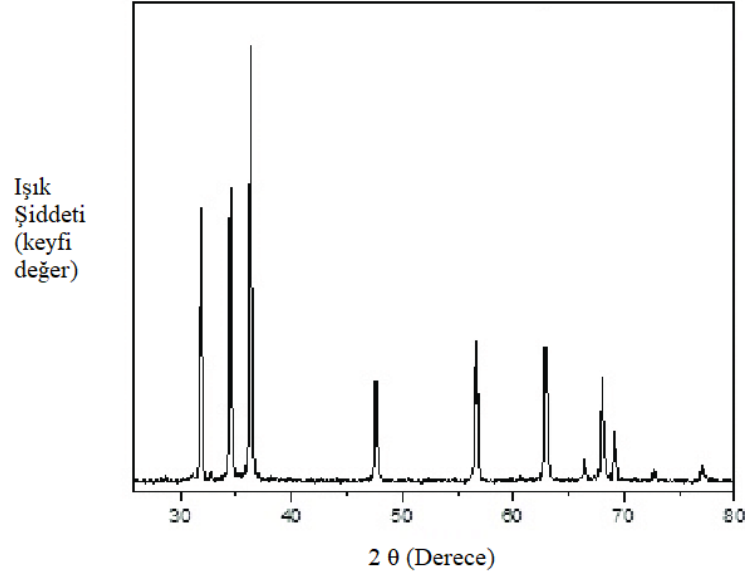
belirli bir açı ile gönderildiğinde düzlemler arasında bir kırınımına uğrayarak yansır, bu yansıma sonucunda detektör üzerinden kontrol edildiğinde yapıcı ve yıkıcı girişim desenleri incelenir. Şekil 3.3'te yansıma düzlemi gösterilmiştir. Bragg yasası (1) ile belirtilen denklem olarak uygulanmaktadır(Kittel, 2005).



Şekil 3.3: Bir kristal düzlemine gelen ve kırılıma uğrayan X-ışınları.

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (3.1)$$

Burada, λ , kullanılan X-ışını dalga boyunu; d , düzlemler arası mesafesi; θ , gelen ve saçılan ışının düzlem ile yaptığı açısı; n , tam sayı (1 alınır) ifade etmektedir. Bir XRD kırınım deseni, yatay ekseninde kırınım açısı (2θ) ve düşey ekseninde X-ışını şiddeti (yansıyan) (I) olarak tanımlanan grafik ile verilir. Bu grafikte şiddet değerleri keyfi ve gelen X-ışınının şiddeti olan I_0 ile karşılaştırılarak yapısal özellikler incelenir. Şekil 3.4'de bir XRD deseni gösterilmiştir(Cullity B.D., 1996).



Şekil 3.4: Bir XRD deseni örneği.

Üretilen ince filmlerin yapısal analizleri elde edilen X-ışını kırınım desenleri (XRD) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen XRD desenleri yardımıyla filmlerin hangi kristal yapıya sahip oldukları belirlenebilir. Filmlerin kristalleşme seviyeleri ve tercihli yönelimleri hakkında bilgi veren yapılanma katsayısı(Rau U. ve diğ., 2011);

$$T_c = \frac{I/I_0}{\frac{1}{N} \sum N I/I_0} \quad (3.2)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada “ I ” ilgili kırınım pikine ait şiddet değeri, “ I_0 ” JCPDS kartından alınan standart şiddet değeri, “ N ” ise kırınım pik sayısını temsil etmektedir.

Tercihli yönelime ait kırınım pikinden elde edilen veriler yardımıyla ortalama kristalit büyüklüğü ve mikro gerilmeler sırasıyla literatürde iyi bilinen (3) eşitliği ile verilen Debye-Scherrer bağıntısı ve (4) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır(Nasser S.A. ve diğ., 1998).

$$D = 0,94\lambda/\beta \cos\theta \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = \beta \cot\theta/4 \quad (3.4)$$

Burada “ D ” ortalama kristalit büyüklüğü, “ λ ” kullanılan x-ışınının dalgaboyu, “ β ” radyan türünden yarı pik genişliği, “ θ ” ise radyan türünden Bragg açısını temsil etmektedir. Örgü sabitleri ise kübik kristal yapıya sahip malzemeler için;

$$\frac{1}{d^2} = (h^2 + k^2 + l^2) \frac{1}{a^2} \quad (3.5)$$

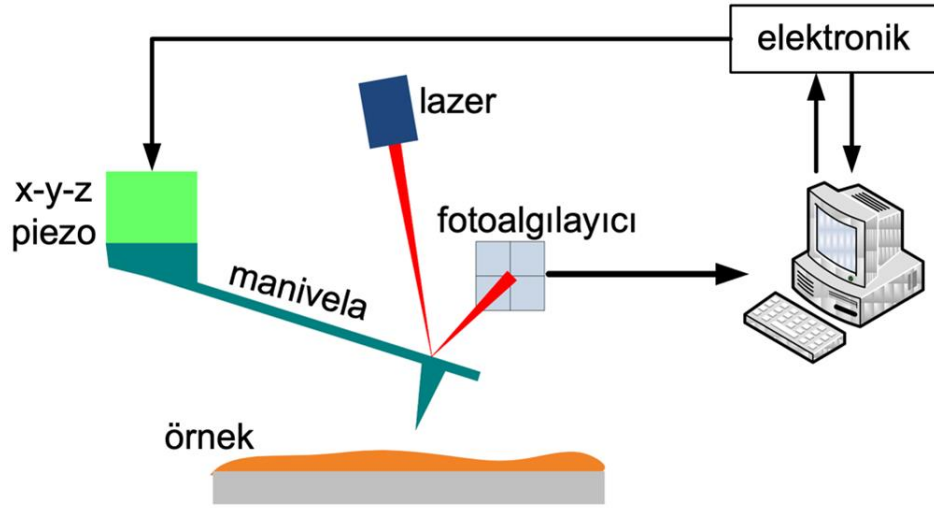
bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada “ d ” düzlemler arası mesafe, “ h ”, “ k ” ve “ l ” miller indisleri, “ a ” ise örgü sabitidir. Kristalleşme seviyeleri, ortalama kristalit boyutları, mikro gerilme değerleri başta olmak üzere hesaplanan yapısal parametreler filmlerin yapısal özelliklerindeki değişimler hakkında bilgiler sunmaktadır.

3.4 Yüzeysel Özelliklerinin İncelenmesi

Üretilen ince filmlere ait yüzey özelliklerini incelemek için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile görüntüler elde edilmiştir.

3.4.1 Atomik kuvvet mikroskobu

Atomik kuvvet kuvvet mikroskobu (AFM), örnek ile özel bir rezonans frekansında titreşen bir uç (prob) arasındaki etkileşim kuvvetlerini ölçerek çalışan bir cihazdır. Bu etkileşim kuvvetleri, örnek malzemesinin özellikleri, uç ile örnek arasındaki mesafe ve malzeme yüzeyinin kirlilik durumu gibi faktörlere bağlıdır. AFM, temassız ve temaslı olmak üzere iki ana modda işlev görebilir. Atomik Temaslı modda, kantilever adı verilen uç, örnek yüzeyi üzerinde tarama yaparken atomlar arası kısa menzilli itici kuvvetlerin baskın olduğu durumları belirler. Özellikle reaktif yüzeylerde, örnek ile kantilever arasında güçlü adezyon kuvveti oluştuğunda, kantilever ve örnek birbirine yapışabilir ve bazen örnek yüzeyinde hasara neden olabilir. Temassız modda ise, temaslı mod ve taramalı tünelleme mikroskobisine kıyasla bazı avantajlara sahiptir. Bu modda, örnek yüzeyi ile kantilever arasındaki etkileşim, manyetik, elektrostatik ve van der Waals gibi uzun menzilli çekici kuvvetler aracılığıyla gerçekleşir. İtici kuvvetlerin olmaması, yumuşak örneklerin görüntülenmesine olanak sağlamanın yanı sıra örnek malzemenin iletken olma zorunluluğunu ortadan kaldırır. Ayrıca, yüzeydeki boşluklar ve yüzeye eklenmiş atomların atomik ölçekte görüntülenmesine olanak tanır. Atomik kuvvet mikroskobunun çalışma prensibi Şekil 3.5'te gösterilmiştir(Rau U. ve diğ., 2011).



Şekil 3.5: Atomik Kuvvet Mikroskobunun çalışma prensibi.

3.4.2 Taramalı elektron mikroskobu

Nanoteknolojik araştırmalarda yapıların boyutları optik mikroskoplar ile gözlenemeyecek kadar küçüktür. Bu yüzden deneysel çalışan bilim insanları daha yüksek çözünürlüklü görüntülere ihtiyaç duymaktadır. Taramalı elektron mikroskobunda (SEM), örneğin büyütülmüş görüntüsünü elde etmek için bir elektron demeti kullanılır. SEM bir elektron tabancası, mercekle sistemi, tarama bobini, elektron toplayıcı ve detektörlerden oluşmaktadır. Elektronların görünür bölge fotonlarına oranla daha küçük dalga boyuna sahip olmaları, daha geniş büyütme oranları sağlama ve alan derinliği daha fazla olması nedeniyle optik mikroskoplara kıyasla avantajlara sahiptir. Bir SEM görüntüsü, örneğin odaklanmış elektron demeti ile taraması sonucu ikincil elektronların ve/veya geri saçılmış elektronların tespit edilmesi ile de elde edilebilir.

Örnek ile elektron demeti arasındaki etkileşim sonucu karakteristik x-ışınları oluşur. Oluşan bu x-ışınlarının analiz edilmesine dayanan ve malzemenin nitel ve nicel analizinin yapılmasına olanak sağlayan bu teknik, enerji dağılımlı x-ışınları spektrometresi (EDS) olarak bilinir. Günümüzde kullanılan SEM cihazları aynı zamanda EDS ölçümü yapabilme kapasitesine sahiptirler.

3.5 Optik Özelliklerin İncelenmesi

Büyütülen filmlerin optik özellikleri 300-900 nm dalga boyu aralığında, optik geçirgenlik ve soğurma spektrumları ile oda sıcaklığında alınan spektrofotometre spektrumları yardımıyla incelenmiştir.

Elde edilen geçirgenlik ve soğurma spektrumları doğrudan malzemelerin görünür bölge içerisinde optik geçirgenlik ve soğurmanın değişimi hakkında bilgi vermektedir. Bu spektrumlardan faydalanarak filmlerin soğurma katsayısı ;

$$\alpha = 2.303(A/d) \quad (3.6)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada “ A ” optik soğurma, “ d ” ise film kalınlığıdır. Filmlere ait sönüm katsayısı (k) ve kırılma indisi (n) sırasıyla;

$$k = \alpha\lambda/4\pi \text{ ve } n_0 = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \quad (3.7)$$

eşitlikleri yardımıyla hesaplanmaktadır. Burada “ λ ” gelen ışığın dalgaboyu, “ R ” ise optik yansımayı temsil etmektedir. Malzemelerin dielektrik sabiti ise;

$$\varepsilon = (n + ik)^2 = \varepsilon_r + \varepsilon_{im} = (n^2 - k^2) + i(2nk) \quad (3.8)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Burada ε_r dielektrik sabitinin reel kısmını, ε_{im} ise sanal kısmını temsil etmektedir. Diğer yandan, optik bant aralıkları ise Tauc bağıntısı olarak bilinen;

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (3.9)$$

eşitliğine uygun olarak çizdirilen $(\alpha h\nu)^2 \sim (h\nu)$ grafiğinin lineer bölgesinin $(h\nu)$ eksenini kestiği nokta kullanılarak belirlenebilmektedir. Burada “ E_g ” optik bant aralığı, “ h ” Planck sabiti, “ A ” bir sabit, “ ν ” frekanstır. Yasak bant aralığı içerisinde yerleşmiş durumların genişliğini temsil eden ve bant sarkmalarının bir ölçüsü olan Urbach enerjileri;

$$\alpha = \alpha_0 e^{(h\nu/E_U)} \quad (3.10)$$

bağıntısına uygun olarak çizdirilen $\ln(\alpha) \sim (h\nu)$ grafiğinin doğrusal kısmının eğimi kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada α_0 bir sabit ve E_U ise Urbach enerjisini temsil etmektedir(Grundmann M, 2010; Nasser S.A. ve diğ., 1998).

3.6 Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi

3.6.1 Hall etkisi ölçümleri

Yarıiletken ince filmlerin elektriksel öz direnç değerleri aygıt uygulamaları açısından oldukça önemlidir. Çünkü malzemenin elektriksel iletimini elektron ve deşik konsantrasyonu ve hareketliliği belirler. Aşağıdaki eşitlikten görüleceği üzere elektriksel öz direnç ise serbest elektron ve deşik yoğunluğunun yanısıra elektron ve deşik mobilitelerine bağlıdır.

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (3.11)$$

Burada μ_n elektron mobilitesi, μ_p deşik mobilitesi, n elektron yoğunluğunu, p deşik yoğunluğunu, q ise elementer yük miktarını temsil etmektedir. Elektriksel özelliklerini belirlenmesi amacıyla, iki-nokta uç tekniği, dört-nokta uç tekniği ölçümü gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Dört-nokta uç tekniğinin ölçüm için kullanılan kabloların direncini, metal kontak direncini elimine etmesi nedeniyle iki-nokta uç tekniğine kıyasla avantaja sahiptir.

Hall etkisi ölçümü ise, bir yarı iletken malzemenin iletkenlik türünü belirlemek, serbest taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilitesi ile birlikte ve öz direnç gibi elektriksel özelliklerini ölçmek için kullanılan bir tekniktir. Ölçüm, bir iletken üzerinden geçen elektrik akımının yönüne dik bir manyetik alan uygulandığında meydana gelen olay olan Hall etkisine dayanır.

Hall etkisi ölçüm düzeneği tipik olarak iki elektrot arasına yerleştirilmiş yarı iletken malzeme örneğinden oluşur. Numune düzlemine dik bir manyetik alan uygulanır ve numuneden bir elektrottan diğerine bir akım geçirilir. Akım numune boyunca akarken, manyetik alan taşıyıcıların (elektronlar veya delikler) numunenin bir tarafına sapmasına neden olarak numunenin kenarlarında yük birikmesine neden olur.

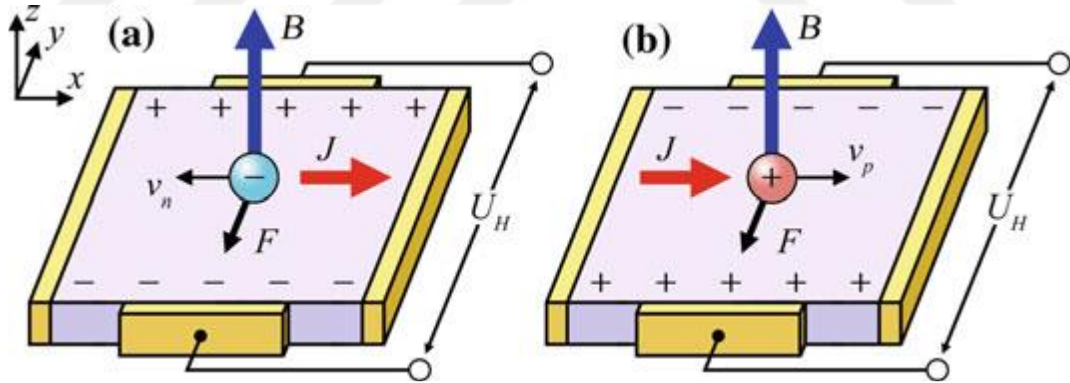
Yük birikimi, manyetik alana zıt bir elektrik alanı oluşturarak numunenin iki kenarı arasında ölçülebilir bir voltaj farkı oluşturur. Bu voltaj farkına Hall voltajı denir ve manyetik alan kuvveti, akım ve taşıyıcı konsantrasyonu ve tipi ile orantılıdır.

Hall voltajını ve akımı ölçerek, aşağıdaki formülü kullanarak yarı iletken malzemenin taşıyıcı konsantrasyonunu ve türünü belirlemek mümkündür:

$$n = \frac{1}{R \cdot B}, \quad (3.12)$$

burada n , taşıyıcı konsantrasyonudur, R , Hall katsayısıdır ve B , manyetik alan kuvvetidir. Hall katsayısı R , malzemeye özgü bir parametredir ve Hall voltajına karşı manyetik alan eğrisinin eğiminden deneysel olarak belirlenebilir. Taşıyıcı tipi, taşıyıcıların elektron (negatif Hall voltajı) veya delikler (pozitif Hall voltajı) olmasına bağlı olarak Hall voltajının işaretinden de belirlenebilir (Horley ve diğ., 2019).

Özetle Hall etkisi ölçümü, içinden geçen elektrik akımının yönüne dik bir manyetik alan uygulayarak yarı iletken bir malzemenin taşıyıcı konsantrasyonunu ve türünü belirlemek ve hareketlilik ve özdirenç gibi elektriksel özelliklerini ölçmek için kullanılan bir tekniktir. Şekil 3.7’de Hall Etkisi Ölçüm metodunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.6: Hall Etkisi Metodu ölçümü şematik gösterimi (Horley ve diğ., 2019).

Bu çalışmada $\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ filmlerinin elektriksel özdirenç değerleri Hall Etkisi ölçüm sistemi kullanılarak oda sıcaklığında ölçülmüştür.

3.6.2 Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve lineer tarama voltametri

3.6.2.1 Elektrokimyasal empedans spektroskopisi

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS), elektrokimyasal sistemlerin elektriksel özelliklerini araştırmak için elektrokimyada yaygın olarak kullanılan,

tahribatsız bir analitik tekniktir. Elektrot yüzeylerinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların kinetiği ve elektrolit çözeltilerdeki iyonların ve yük taşıyıcıların taşınma süreçleri hakkında değerli bilgiler sağlar.

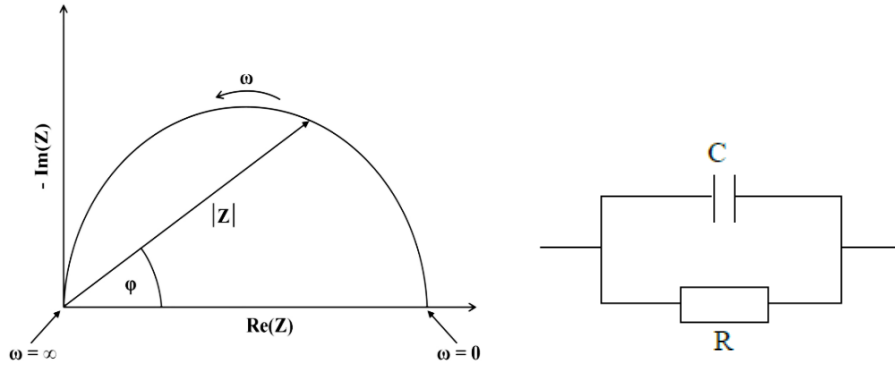
EIS, alternatif akımın (AC) akışına karşı olan bir elektrokimyasal sistemin empedansını ölçer. Sisteme bir frekans aralığı üzerinden küçük genlikli bir AC sinyalinin uygulanmasını ve sonuçta ortaya çıkan akım tepkisinin ölçülmesini içerir. Daha sonra sistemin empedansı, uygulanan voltajın her frekansta ölçülen akıma oranı olarak hesaplanır. Eğer uygulanan potansiyel $E_t = E_0(\sin(\omega t))$ olarak verilirse, akım $I_t = I_0(\sin(\omega t + \phi))$ olur. Burada ω açısal frekans ve ϕ ise faz farkıdır. Bu durumda empedans 13 numaralı denklemdeki gibi hesaplanabilir.

$$Z = \frac{E_t}{I_t} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \phi)} = Z_0 \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \phi)} \quad (3.13)$$

Empedansın ölçümünde reel ve imajiner kısımları ayrı ayrı gözlemlemek için 3.13 numaralı denklemi aşağıdaki formda düzeltmek gerekmektedir.

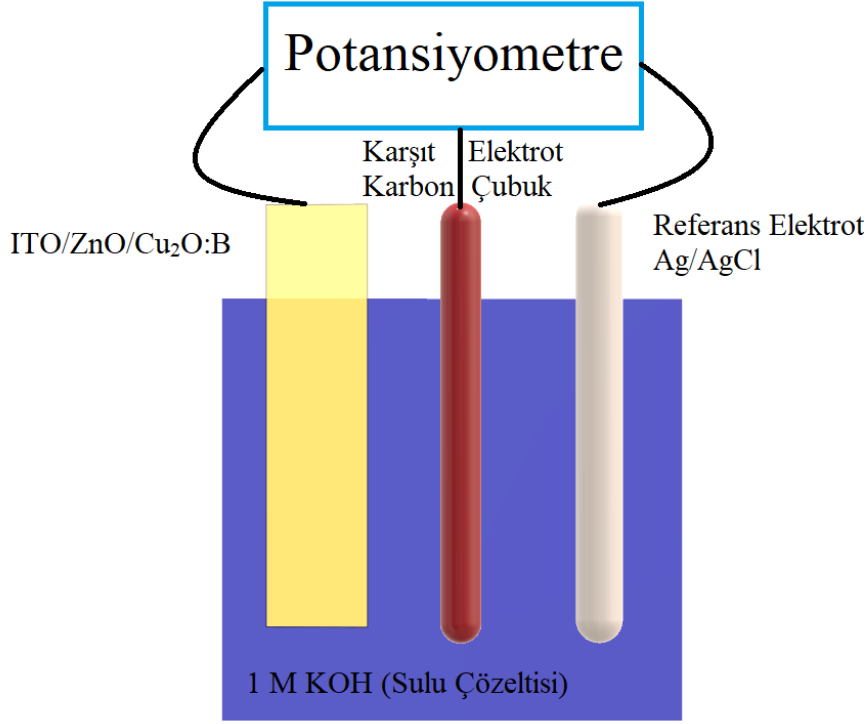
$$Z(\omega) = \frac{E}{I} = Z_0(\cos\phi + j\sin\phi) \quad (3.14)$$

Bir EIS deneyinde, elektrokimyasal hücre tipik olarak bir elektrolit çözeltisine daldırılmış bir elektrottan oluşur. Elektrot, spesifik uygulamaya bağlı olarak çeşitli malzemelerden yapılabilir. AC sinyalinin hücreye uygulamak ve bir frekans aralığında ortaya çıkan akım tepkisini ölçmek için bir potansiyostat/galvanostat kullanılır. EIS'den elde edilen empedans verileri genellikle gerçek kısım (direnç) ve sanal kısım (reaktans) ile karmaşık biçimde temsil edilir. Bu bileşenler, elektrot-elektrolit arayüzündeki yük aktarımı, çift katmanlı kapasitans ve kütle taşınımı olayları gibi farklı elektrokimyasal süreçler hakkında bilgi sağlar. EIS analizleri için $Re Z - (-Im Z)$ grafiği olan Nyquist grafiği çizdirilir. Şekil 3.8'de tipik bir Nyquist eğrisi ve eşdeğer devre gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Bir Nyquist grafiği ve eşdeğer devre

Empedans verilerini yorumlamak için araştırmacılar sıklıkla sistemde meydana gelen elektrokimyasal süreçleri taklit eden eşdeğer devre modellerini kullanır. Bu modeller tipik olarak elektrokimyasal hücrenin çeşitli bileşenlerini temsil eden dirençler, kapasitörler ve bazen indüktörlerden oluşur. Deneysel empedans verilerinin eşdeğer devre modeline uyarlanmasıyla, genel empedansa katkıda bulunan farklı elektrokimyasal süreçler hakkında niceliksel bilgi elde edilebilir. EIS, elektrokimya ve ilgili alanlarda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Koruyucu kaplamaların etkinliğini değerlendirmek için korozyon araştırmalarında, şarj/deşarj mekanizmalarını anlamak için pil araştırmalarında, performansı optimize etmek için yakıt hücresi geliştirmede ve biyomoleküler etkileşimleri tespit etmek için biyosensör teknolojisinde yaygın olarak kullanılır. Temelde, EIS, elektrokimyasal sistemlerin elektriksel davranışının ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlar ve bu da onu çeşitli bilimsel ve mühendislik disiplinlerindeki hem temel araştırmalar hem de pratik uygulamalar için güçlü bir araç haline getirir. EIS, yarıiletken malzemelerde yük transfer yoğunluğunun ölçülmesi için kullanılmaktadır. İletken bir çözelti içerisinde bulunan, referans elektrot (Ag/AgCl vb), karşıt elektrot (karbon çubuk) ve yük transfer yoğunluğu ölçülmesi istenilen yapının çalışma elektrotu olarak kullanıldığı bir düzeneğin potansiyometre ile bağlanması ile ölçüm alınır(Magar ve diğ., 2021). Şekil 3.8’de EIS ölçüm düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.8: EIS ölçümleri için kurulan düzenek.

Üretilen filmlerin EIS ölçümleri, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fizik Bölümünde bulunan, GAMRY Reference 3000 Potansiyometre ile alınmış olup, karşıt elektrot olarak karbon çubuk, referans elektrot olarak Ag/AgCl seçilmiştir. İletken sıvı çözelti olarak 1 M KOH sulu çözeltisi kullanılmıştır. EIS ölçümleri, (-1 V , +1 V) aralığında 300 kHz - 0,1 Hz aralığında taranarak alınmıştır.

3.6.2.2 Mott-Schottky ölçümleri

EIS çalışmaları elektrotlar arasındaki elektron transferini vermektedir.

Mott-Schottky ölçümleri, yarıiletken malzemelerin karakteristik özelliklerinin ortaya çıkartılması için kullanılan bir ölçüm yöntemidir. Bu yöntemde yarıiletken malzemelerin yük taşıyıcı konsantrasyonları ve düz bant (V_{fb}) potansiyel bilgileri elde edilir.

Mott-Schottky eğrileri malzemeye uygulanan potansiyel (V) ile arayüzey kapasitans (C) değerleri arasındaki ilişkiyi incelememize olanak sağlar.

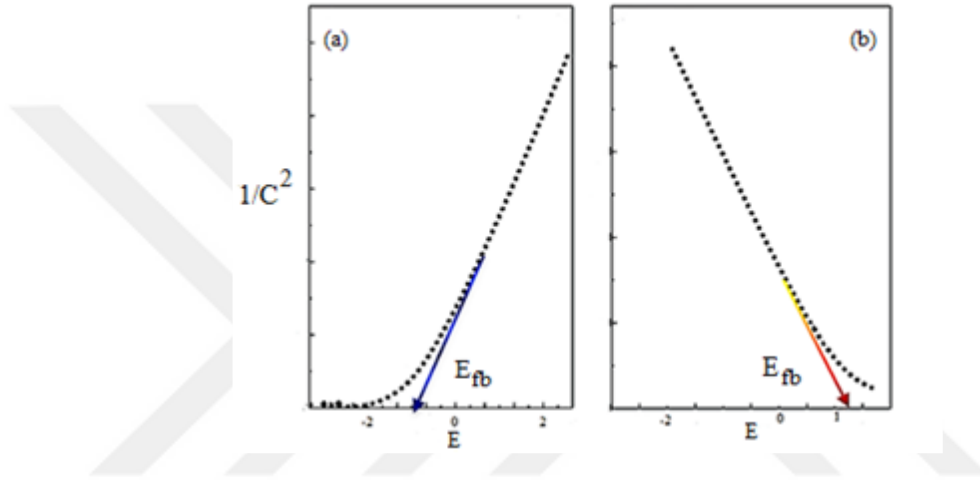
$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{e\epsilon_0\epsilon_s N_D} \left(V - V_{FB} - \frac{kT}{e} \right) \quad (3.15)$$

$$\frac{1}{C^2} = -\frac{2}{e\epsilon_0\epsilon_s N_A} \left(V - V_{FB} - \frac{kT}{e} \right) \quad (3.16)$$

3.15 denklemi ile donör taşıyıcı konsantrasyonu belirlenebilirken, 3.16 numaralı denklem akseptör taşıyıcı konsantrasyonunu vermektedir, denklemde C, arayüzey yük

kapasitansını ($F.cm^{-2}$), $N_D (cm^{-3})$ ve $N_A (cm^{-3})$ sırası ile donör ve akseptör sayılarını, V uygulanan voltajı, V_{fb} düz bant potansiyelini, k ($8,617 \times 10^{-5} eV.K^{-1}$) Boltzman sabitini, e ($1.602 \times 10^{-19} C$) elektron yükünü, ϵ_0 ($8,85 \times 10^{-14} F.cm^{-1}$) ve ϵ_s sırası ile boşluğun dielektrik sabiti ve yarıiletkenin dielektrik sabitini vermektedir (Gelderman ve diğ., 2007).

Bir malzemenin $1/C^2$ - V eğrisinde, doğrusal fitin x ekseninde kestiği nokta düz bant potansiyelini (V_{FB}) vermektedir. P tipi elektriksel iletme sahip malzemelerde eğim negatifken, n-tipi elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerde bu eğim pozitiftir (Tokgoz ve diğ., 2021).



Şekil 3.9: Mott – Schottky grafikleri. a) n-tipi bir yarıiletken için b) p-tipi bir yarıiletken için.

Ayrıca M-S grafiğinde lineer doğrunun eğimi malzemenin donör ve akseptör yoğunluklarını vermektedir. Denklem 3.17 n-tipi iletkenliğe sahip malzemelerin donör yoğunluğunu, denklem 3.18 ise p-tipi elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerin akseptör yoğunluğunu verir (Kosukoglu ve diğ., 2022; Tokgoz ve diğ., 2021b).

$$N_D = \frac{2}{e\epsilon_0\epsilon_s(eğim)} \quad (3.17)$$

$$N_A = \frac{2}{e\epsilon_0\epsilon_s(eğim)} \quad (3.18)$$

3.6.2.3 Lineer tarama voltametrisi

Doğrusal Tarama Voltammetrisi (LSV), uygulanan potansiyelin bir fonksiyonu olarak akım tepkisini ölçerek elektrokimyasal sistemlerin davranışını incelemek için kullanılan bir elektrokimyasal tekniktir. Redoks işlemleri, elektrot reaksiyonlarının kinetiği ve çeşitli malzemelerin elektrokimyasal davranışları hakkında değerli bilgiler sağlar.

LSV, ortaya çıkan akımı ölçerken çalışma elektroduna uygulanan potansiyelin zamanla doğrusal olarak taranmasını içerir. Potansiyel tipik olarak bir başlangıç değerinden bir bitiş noktasına sabit bir hızda kaydırılır. Potansiyel değıştikçe elektrot yüzeyinde elektrokimyasal reaksiyonlar meydana gelir ve bu da akım akışında değışikliklere yol açar. Akım tepkisini potansiyelin bir fonksiyonu olarak analiz ederek sistemin elektrokimyasal davranışı hakkında değeri bilgiler elde edilebilir.

Bir LSV deneyinde, elektrokimyasal hücre tipik olarak üç elektrottan oluşur: bir çalışma elektrotu, bir referans elektrotu ve bir karşı elektrot. Çalışma elektrodu, elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiğı ilgilenilen elektrottur. Referans elektrot, çalışma elektrotunun potansiyelinin ölçüldüğü sabit bir potansiyeli korurken, karşı elektrot elektrik devresini tamamlar. Çalışma elektroduna uygulanan potansiyeli kontrol etmek ve ortaya çıkan akımı ölçmek için bir potansiyostat kullanılır. Bir LSV deneyi sırasında potansiyel, sabit bir tarama hızında başlangıç değerinden son değere kadar zamanla doğrusal olarak taranır. Tarama hızı deneyin özel gereksinimlerine bağı olarak ayarlanabilir. Potansiyel değıştikçe çalışma elektrotunda elektrokimyasal reaksiyonlar meydana gelir ve bu da akım akışında değışikliklere yol açar. Ortaya çıkan akım tepkisi, uygulanan potansiyelin bir fonksiyonu olarak kaydedilir. LSV deneylerinden elde edilen akım tepkisi tipik olarak akımın uygulanan potansiyele karşı grafiğı olan bir voltammogram olarak çizilir. Voltammogramdan tepe akımı, tepe potansiyeli ve yarı dalg potansiyeli gibi çeşitli elektrokimyasal parametreler belirlenebilir. Bu parametreler, elektrot reaksiyonlarının kinetiğı, redoks işlemlerinin tersine çevrilebilirliğı ve incelenen sistemin elektrokimyasal özellikleri hakkında bilgi sağlar. LSV'nin elektrokimya ve ilgili alanlarda geniş bir uygulama yelpazesi vardır. Korozyon süreçlerinin incelenmesinde, elektrokatalizörlerin karakterizasyonunda, redoks aktif malzemelerin araştırılmasında ve elektrokimyasal sensör ve cihazların geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılır.

Doğrusal Taramalı Voltammetri, elektrokimyasal sistemlerin davranışına ilişkin değeri bilgiler sağlayan çok yönlü bir elektrokimyasal tekniktir ve bu teknik, onu çeşitli bilimsel ve mühendislik disiplinlerindeki hem temel araştırmalar hem de pratik uygulamalar için değeri bir araç haline getirir(Chang & Park, 2010).

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında Ultrasonik Sprey Piroiliz tekniği ile üretilen ZnO ve katkısız ve farklı oranlarda (%3-6-9-12) B katkılı Cu₂O ince filmlerin yapısal, optik, morfolojik ve elektrik ölçümleri alınarak incelenmiştir.

4.1 ZnO ve Cu₂O:B İnce Filmlerinin Üretimi

4.1.1 Altaş temizliği

Cu₂O ince filmlerinin üzerine büyütüleceği cam ve ITO kaplı cam altaşların temizliğinde, altaşlar üzerinde olabilecek kirlerin giderilmesi için, deterjanlı saf su (DI) su içerisinde 20 dakika boyunca ultrasonik su banyosu içerisinde yıkanmış, sonrasında saf su ile 20 dakika boyunca ultrasonik su banyosu içerisinde durulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında sırası ile aseton ve metanol ile 20 dakika boyunca ultrasonik banyo içinde yıkanmış, her bir basamak arasında da saf su ile durulama işlemi yapılmıştır. Yıkama işlemi biten altaşlar, kurutma kağıtları üzerine yerleştirilerek kurutulmuştur.

4.1.2 ZnO ince filmlerinin üretimi

ZnO ince filmlerinin cam ve ITO kaplı cam altaşlar üzerine büyütülmesi için hazırlanan çözeltide, 0.075M çinko asetat dihidrat ((CH₃COO)₂Zn•2H₂O) (Merck) 100 ml saf su içerisine eklenip, 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılarak çözdürülmüştür.

ITO kaplı cam ve cam altaşlar, ısıtıcı yüzeyine dizilmiş, ısıtıcı 400°C'ye kadar ısıtılmıştır. Hazırlanan çözelti, şırıngalar yardımı ile şırınga pompası sistemine takılmış, 4 ml/dk akış hızında, 0,7 bar taşıyıcı gaz (hava) vasıtası ile ısıtıcı yüzeyden 25 cm yukarıda bulunan ultrasonik atomizer (100 kHz) yardımı ile altaşlar üzerine 20 dakika boyunca püskürtülmüştür. 100 ml'lik çözelti püskürtme süresince altaş yüzey sıcaklığı termoçift vasıtası ile kontrol edilmiştir. Deneyin sonunda ısıtıcıya güç girişi kesilmiş, altaşların kendiliğinden soğuması sağlanmıştır.

4.1.3 Cu₂O:B ince filmlerinin üretilmesi

Cu₂O:B ince filmlerinin ultrasonik sprey metodu ile üretilmesi için, bakır kaynağı olarak, 0,025M bakır asetat monohidrat ((CH₃COO)₂Cu•H₂O) (Merck), Cu²⁺ iyonlarını Cu⁺ iyonlarına indirgemek için indirgeyici madde olarak 0,075M d-glucose (C₆H₁₂O₆) (AfgScience) 200 ml saf su içerisine alınıp, 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda ısıtılmadan karıştırılarak çözündürülmüştür. Bor katkılama için, toz halinde 0,025M borik asit (H₃BO₃) (AfgScience) 100 ml saf su içerisine alınarak, 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda ısıtılmadan karıştırılarak çözündürülmüştür.

İlk deneyde, katkısız Cu₂O ince filmleri, hazırlanan püskürtme çözeltisi önceden 280°C'ye kadar ısıtılmış ITO kaplı cam, ITO/ZnO kaplı cam ve cam altaşlar üzerine 0,7 bar basınçlı taşıyıcı gazile, ısıtıcı yüzeyden 25 cm yukarıda bulunan ultrasonik atomizer (100 kHz) kullanılarak 40 dakika boyunca, 5 ml/dk akış hızında püskürtülerek elde edilmiştir.

Katkılama işlemleri için, %3 bor katkılı Cu₂O filmleri için, bakır asetat monohidrat ve D-glucose yukarıda anlatıldığı gibi hazırlanmış, 6 ml çözelti çıkartılıp, yerine 6 ml suda çözündürülmüş borik asit ilavesi yapılmıştır. %6 bor katkılı Cu₂O filmleri için, 12 ml çözelti çıkartılıp, 12 ml borik asit ilavesi, %9 bor katkılı Cu₂O filmleri için, 18 ml çözelti çıkartılıp, 18 ml borik asit ilavesi, %12 bor katkılı Cu₂O filmleri için, 24 ml çözelti çıkartılıp, 24 ml borik asit ilavesi yapılmış, tüm deneyler boyunca sıcaklık 280°C, 40 dakika ve 5 ml/dk akış hızı ile gerçekleştirilmiştir.

Katkısız ve farklı oranlarda (%3-6-9-12) B katkılı Cu₂O ince filmlerine ait başlangıç çözeltileri bilgileri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4. 1: Başlangıç çözeltileri

İnce Film	Bakır Asetat Molaritesi (M)	D-Glukoz Molaritesi (M)	200 ml Bakır Asetat Çözeltisi içindeki Borik Asit miktarı (0,025M)
Cu₂O	0,025	0,025	0
% 3 Cu₂O:B	0,025	0,025	6 ml
% 6 Cu₂O:B	0,025	0,025	12 ml
% 9 Cu₂O:B	0,025	0,025	18 ml
% 12 Cu₂O:B	0,025	0,025	24 ml

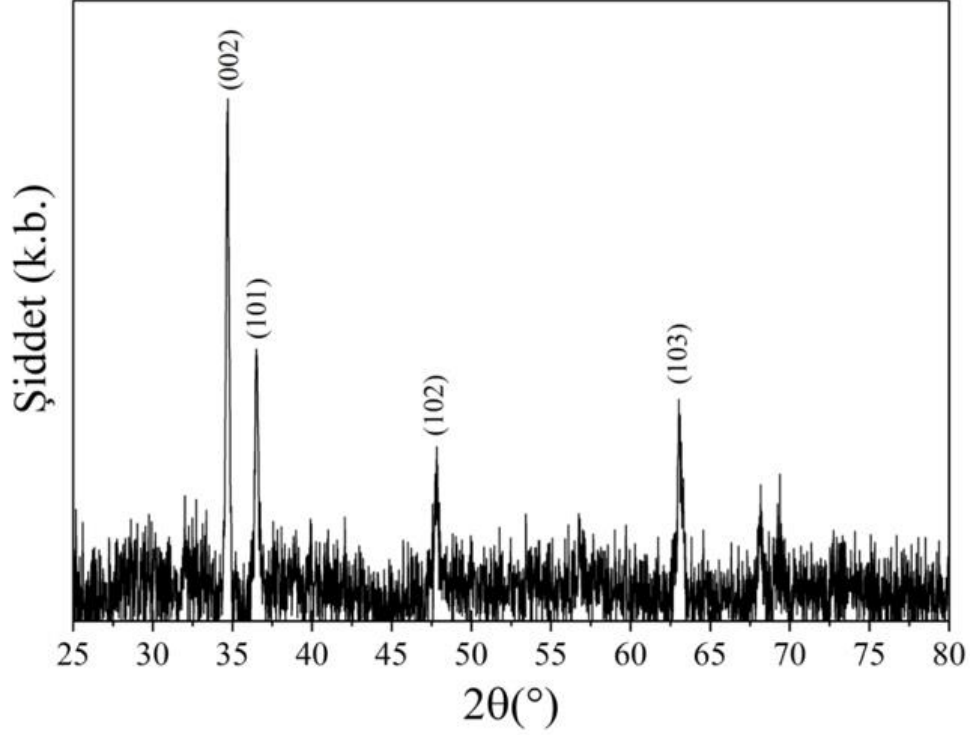
4.2 ZnO ince filmlerinin fiziksel özellikleri

Ultrasonik Sprey Piroliz Tekniği ile üretilen ZnO ince filmlerinin yapısal özellikleri X-ışını Kırınım Deseni tekniği ile, yüzeyel ve morfolojik özellikleri, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile, optik özellikleri UV-Vis optik spektrofotometre spektrum ölçümleri ile, elektriksel özellikleri is Hall Etkisi yöntemi ile incelenmiştir.

4.2.1 ZnO ince filmlerinin yapısal özellikleri

Üretilen ZnO ince filmlerinin yapısal özelliklerinin detaylıca incelenmesi için, X-ışını Kırınım tekniği kullanılmıştır. X-ışını Kırınım ölçümleri Bursa Teknik Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Bruker AXS/Discovery D8 X-ray Diffractometer marka cihaz ile alınmıştır. XRD ölçümlerinde 1,5405Å dalga boyuna sahip CuK α ışını kullanılarak, toz kırınım metodu ile 20°<2 θ <80° aralığında alınmıştır. Kırınım desenlerinde oluşan piklerin miller indisleri ve ait oldukları kristal sistemleri ASTM kartları (JCPDS PDF no 36-1451) kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan analizlerde, ZnO ince filmlerinin polikristal hekzagonal sıkı paket yapıda olduğu belirlenmiştir. (002), (101), (102) ve (103) düzlemlerinde büyümenin gerçekleştiği, yapılanma katsayısı en yüksek olan (002) pikinin baskın pik olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.1’de üretilen ZnO ince filmlerine ait X-ışını kırınım desenleri gösterilmiştir. Çizelge

4.2’de ise ilgili piklere ait, eşitlik (3.2) ile hesaplanan yapılanma katsayısı (TC), eşitlik (3.3) ile hesaplanan kristal boyutları (D), eşitlik (3.5)’e uygun şekilde hesaplanan örgü parametreleri (a ve c) verilmiştir.



Şekil 4.1: Üretilen ZnO ince filmlerine ait XRD pikleri

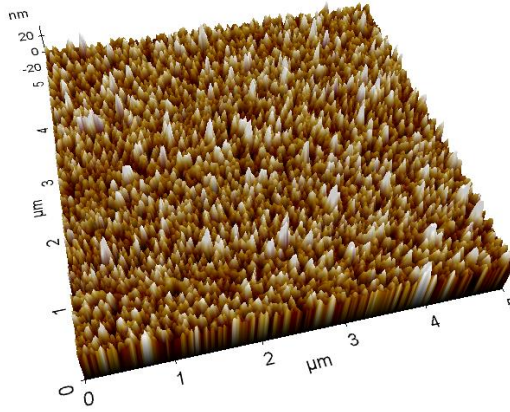
Çizelge 4.2: Üretilen ZnO ince Filmlerine ait düzlemler arası mesafe (d), yapılanma katsayısı (TC), örgü parametreleri, kristal boyutları (D) ve mikro gerilme (ϵ) değerleri.

2- θ (°)	(hkl)	d (Å)	TC	a (Å)	c(Å)	ϵ	D (Å)
34,68	002	2,812	2,155	3,247	5,625	0,00337	360,13
36,51	101	2,598	1,561	3,000	5,197	0,00331	348,64
47,82	102	2,472	0,353	2,855	4,945	0,00279	319,04
63,10	103	1,908	1,929	2,2040	3,817	0,00289	239,08

4.2.2 ZnO İnce filmlerinin morfolojik özellikleri

Üretilen ZnO ince filmlerinin morfolojik özelliklerini incelemek için, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fizik Bölümü’nde bulunan Park Systems XE 100 marka ve

model atomik kuvvet mikroskobu ile AFM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan, HITACHI SU5000 FE-SEM marka taramalı elektron mikroskobu ilse SEM görüntüleri elde edilmiştir.. Şekil 4.3’de verilen ZnO ince filmlerine ait AFM görüntüsü incelendiğinde filmlerin homojen bir yüzey dağılımına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca ortalama yüzey pürüzlülüğünün (R_a) 4,179 nm olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 4.3’de de yüzey pürüzlülüğü ve film kalınlık değerleri verilmiştir.

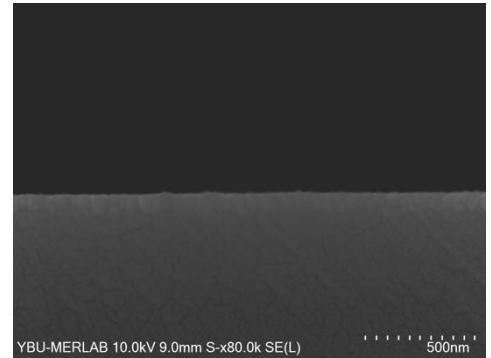
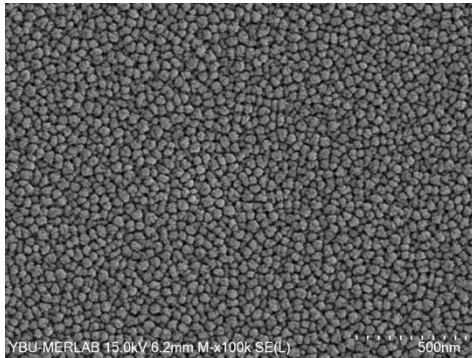


Şekil 4.2: ZnO ince filmlerine ait AFM görüntüsü.

Çizelge 4.3: ZnO ince filmlerine ait yüzey pürüzlülük (R_a) ve film kalınlık değerleri.

	R_a (nm)	Kalınlık (nm)
ZnO	4,179	183

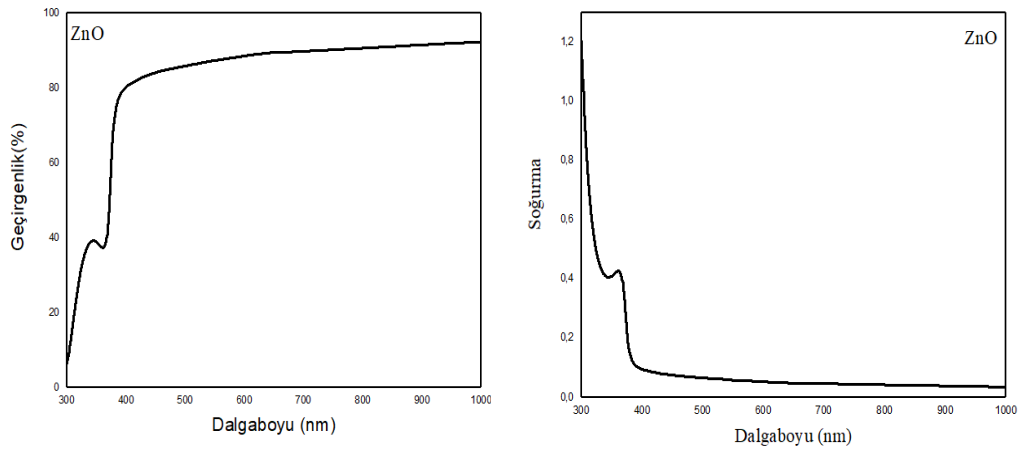
Üretilen ZnO ince filmlerinin Şekil 4.3’de gösterilen yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, filmlerin homojen bir şekilde büyütüldüğü, herhangi bir oyuk ya da tepe yapısı gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.3: ZnO ince filmlere ait yüzey ve kesit SEM görüntüleri.

4.2.3 ZnO ince filmlerinin optik özellikleri

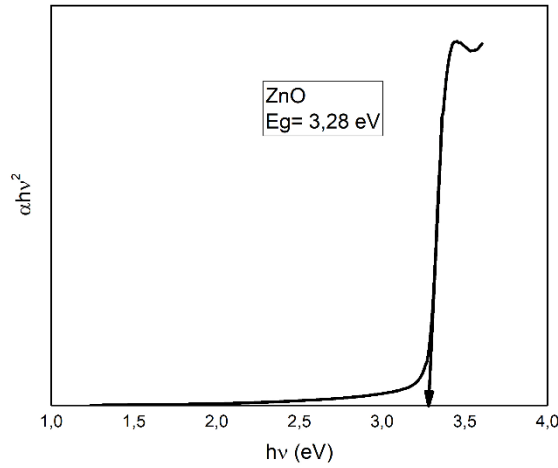
Üretilen ZnO ince filmlerinin optik analizleri için, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü, Optoelektronik Laboratuvarında bulunan RIGOL 3600 Spectrophotometer marka cihaz ile alınan spektrumlar kullanılmıştır. Şekil 4.5'te ZnO ince filmlerine ait geçirgenlik (T) ve soğurma (A) spektrumları verilmiştir.



Şekil 4.5: ZnO ince filmlerine ait geçirgenlik ve soğurma grafikleri.

Üretilen ZnO ince filmlerinin geçirgenlik (T) ve soğurma (A) grafiklerinden de görüleceği üzere, görünür bölge spektrumunda (400-700 nm) %80 üzerinde optik geçirgenlik göstermiştir. ZnO ince filmlerinin soğurma kenarı 370-400 nm arasında gözlemlenmiştir. İnce film güneş hücrelerinde tampon katman olarak kullanılan ince filmlerin özellikle görünür bölgede yüksek optik geçirgenlik göstermesi beklenir(Özdal ve diğ., 2021a). Üretilmiş olan ZnO ince filmlerimizin tampon katman olarak kullanılmasının uygun olabileceğini belirtebiliriz.

Üretilen ZnO ince filmlerinin yasak enerji değeri, Tauc metodu ile belirlenmiş olup, 3.28 eV olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.6'da ZnO ince filmlerine ait Tauc grafiği $((\alpha h\nu)^2 - h\nu)$ verilmiştir.



Şekil 4.6: ZnO ince filmlerinin yasak enerji aralığı Tauc metodu ile hesaplanmıştır.

4.2.4 ZnO ince filmlerinin elektriksel özellikleri

Cam alttaşlar üzerine büyütülen ZnO ince filmlerinin elektriksel özellikleri Hall Etkisi ölçümleri ile belirlenmiş olup, filmlerin n-tipi elektriksel iletkenliğe sahip oldukları görülmüştür., Ayrıca taşıyıcı konsantrasyonu (n) $17,2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, mobilite değeri $3,71 \text{ cm/V.s}$ ve özdirençleri $14,1 \text{ } \Omega\text{cm}$ olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.4: ZnO ince filmlerine ait Hall Etkisi ölçümü ile elde edilen elektriksel özellikler

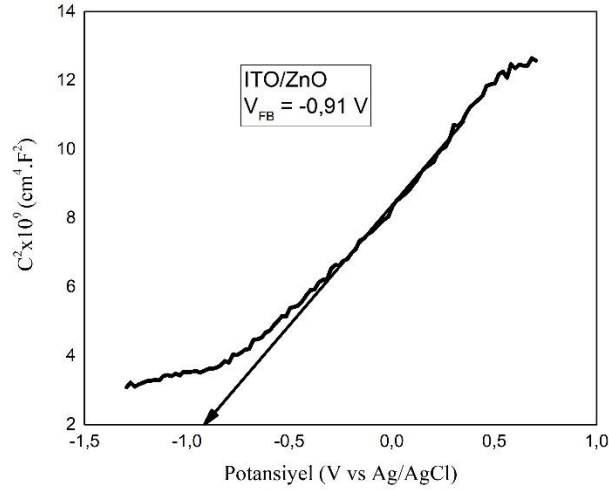
	Özdirenç (ρ)	Taşıyıcı Konsantrasyonu (n) $\times 10^{17}$	Mobilite μ (cm/V.s)	Elektriksel İletim Türü
ZnO	14,1	1,22	3,71	n

Ayrıca Mott-Schottky, ve LSV ölçümleri, ITO kaplı cam alttaşlar üzerine büyütülmüş ZnO ince filmleri için incelenmiştir. Alınan Mott-Schottky ölçümlerinde filmlerin n-tipi elektriksel iletkenlik gösterdiği, $V_{FB} = -0,075 \text{ V}$ düz bant potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 4.5'te Mott-Schottky Eğrilerinden elde edilen veriler belirtilmiştir. Şekil 4.7 ITO/ZnO eklemine ait Mott-Schottky Eğrisini göstermektedir. Şekil 4.8 ise ITO/ZnO eklemine ait aydınlık ve karanlık ortamda alınan liner taramalı voltametri spektrumunu göstermektedir.

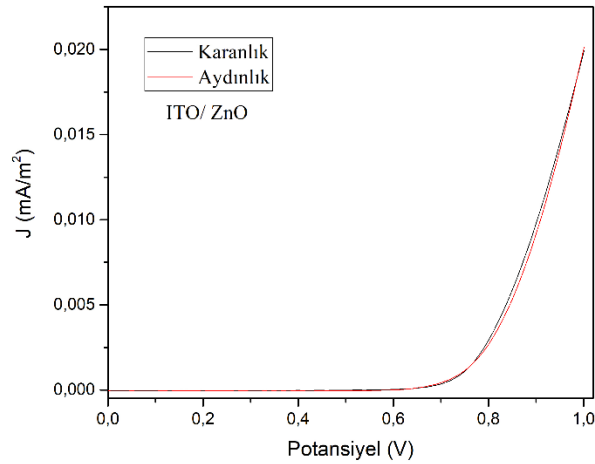
Çizelge 4.5: ITO/ZnO eklemine ait Mott-Schottky eğrisinden elde edilen değerler.

ϵ	ϵ_0	e	V_{fb}	Eğim	N_A
8,50	$8,85 \times 10^{-12}$	$1,6 \times 10^{-19}$	$-7,50 \times 10^{-2}$	$3,00 \times 10^9$	$1,38 \times 10^{17}$

Denlem 3.17 kullanılarak hesaplanan taşıyıcı konsantrasyonu; $1,38 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Literatürdeki çalışmalarla uyumlu bir sonuç olarak karşımızda çıkmaktadır (Bengas ve diğ., 2019; Lin ve diğ., 2014; Mandal ve diğ., 2014).



Şekil 4.7: ITO/ZnO eklemine ait Mott-Schottky Eğrisi



Şekil 4.8: ITO/ZnO eklemine ait karanlık ve aydınlık ortamlarda alınan LSV eğrileri.

Hall etkisi ölçümleri ve Mott-Schottky ölçümleri filmlere ait taşıyıcı konsantrasyonu ve elektriksel iletkenlik türlerini belirlemede birbirilerini tamamlayıcı sonuçlar vermiştir.

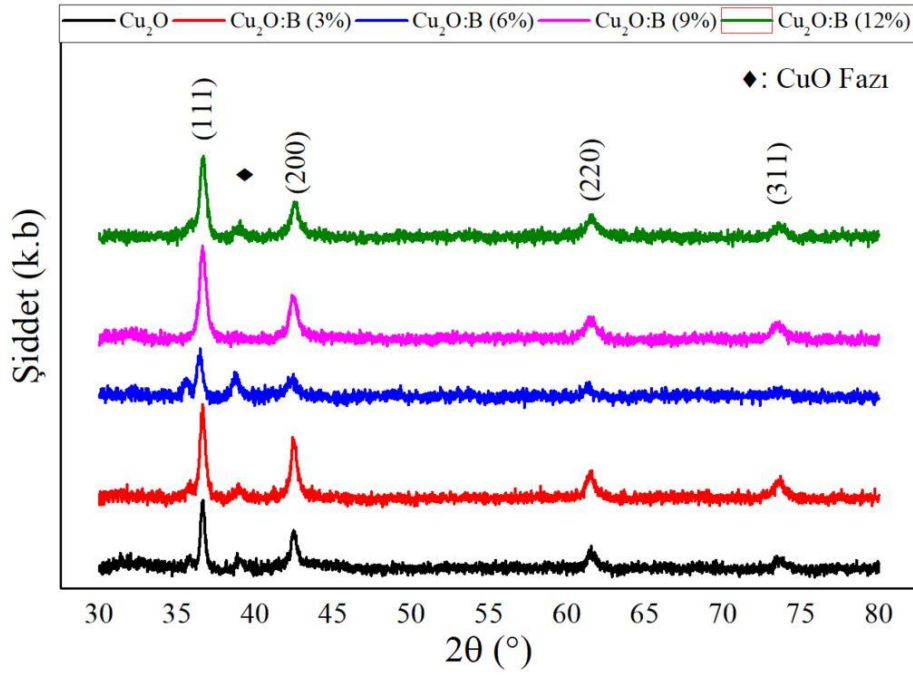
Tampon katman olarak kullanılması düşünölen ZnO ince filmleri gösterdiği elektriksel özellikler, bu filmlerin Cu₂O ince filmleri ile oluşturulacak olan güneş hücrelerinde tampon katman olarak kullanılmasının uygun olabileceğini düşöndürmektedir(Jeong ve diğ, 2008; Lv ve diğ, 2013; Özdaı ve diğ, 2021).

4.3 Cu₂O:B İnce Filmlerinin Fiziksel Özellikleri

Ultrasonik Sprey Piroiliz Tekniğı ile üretilen katkısız ve farklı oranlarda (%3-6-9-12) bor katkılı Cu₂O ince filmlerinin yapısal özellikleri X-ışını Kırınım Deseni tekniğı ile, yüzeysel ve morfolojik özellikleri, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntöleri ile, optik özellikleri UV-Vis optik spektrofotometre spektrum ölçömleri ile, elektriksel özellikleri is Hall Etkisi yöntemi ile incelenmiştir.

4.3.1 Cu₂O:B ince filmlerinin yapısal özellikleri

Katkısız ve farklı oranlarda (%3-6-9-12) B katkılı Cu₂O ince filmlerinin yapısal özelliklerinin incelenmesi için, Bursa Teknik Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Bruker AXS/Discovery D8 X-ray Diffractometer marka X-ışını Kırınım Cihazı kullanılmıştır. Tüm filmlerin x-ışını kırınım desenleri 1,5405 Å dalga boyuna sahip CuK α ışını kullanılarak toz kırınım metodu ile 20°<2 θ <80° aralığında alınmıştır. Büyütölen filmlerin ait olduğı kristal yapının tespiti için ve kırınım desenleri üzerinde yer alan piklerin hangi yönelimlere ait olduklarını belirlemek için ASTM kartları (JCPDS PDF No. 65-3288) referans alınmıştır. Filmlerin baskın yönelimlerinin tespiti için denklem (3.2) ile verilen yapılanma katsayıları hesaplanmıştır. Yapılanma katsayısı (TC) karşılaştırılması ile (200) yöneliminin baskın pik olduğı belirtlenmiştir.



Şekil 4.9: Üretilen katkısız ve B katkılı Cu₂O ince filmlerine ait XRD desenleri.

Filmlerin ortalama karıtal boyutlarını belirlemek için denklem (3.3) numaralı Scherrer bağıntısı kullanılmış, yapılanma katsayısı en büyük olan pik esas alınmıştır.

Katkısız Cu₂O ince filmlerinin ortalama kristal boyutunun 33,4 nm olduğu belirlenmiştir. XRD desenlerinden de anlaşılacağı üzere, filmler polisristal yapıya sahip olup, kübik kristal yapının olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 37 derecede CuO fazına ait pikin de gözlemlendiği not edilmiştir. Özellikle %6 Boron katkılı Cu₂O ince filmlerinde bu pikin maksimum şiddette olduğu gözlemlenmiş, optik verilerde de CuO fazının soğurmaya etkisi gösterilmiştir. Tüm XRD desenlerinde gözlemlenen, 2θ değerleri, miller indisleri, eşitlik (3.2) ile hesaplanan yapılanma katsayısı (TC), eşitlik (3.3) ile hesaplanan kristal boyutları (D), eşitlik (3.4) ile hesaplanan mikro gerilmeler (ε), eşitlik (3.5)'e uygun şekilde hesaplanan örgü parametreleri (a) verilmiştir.

Çizelge 4.6: Cu₂O ince filmlerine ait yapılanma katsayısı (TC), örgü parametreleri (a), kristal boyutları (D) ve mikro gerilme (ϵ) değerleri.

	2 θ (°)	TC	a(Å)	hkl	D(nm)	$\epsilon \times 10^{-3}$
Cu₂O	36.63	1.132	4.245	111	27,2	42
	42.50	1.551	4.250	200	33,4	29
	61.55	0.777	4.257	220	14,9	47
	73.63	0.539	4.263	311	11,4	52
Cu₂O:B (3%)	36.62	1.042	4.246	111	21,3	53
	42.47	1.642	4.252	200	18,9	52
	61.50	0.739	4.261	220	14,7	47
	73.59	0.575	4.265	311	12,6	47
Cu₂O:B (6%)	36.66	0.973	4.242	111	19,3	19
	42.54	1.175	4.246	200	16,4	23
	61.59	0.851	4.255	220	12,2	34
Cu₂O:B (9%)	36.63	1.130	4.268	111	17,5	65
	42.44	1.410	4.268	200	14,9	67
	61.49	0.718	4.268	220	10,7	66
	73.50	0.740	4.268	311	22,2	27
Cu₂O:B (12%)	36.66	0.973	4.268	111	19,3	59
	42.54	1.175	4.228	200	16,4	60
	61.59	0.851	4.228	220	12,2	57

Hesaplanan örgü parametreleri ile ASTM kartlarındaki (JCPDS PDF No. 65-3288) (a=4,252Å) veriler karşılaştırıldığında oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Filmlerin kristal boyutu (D) ve örgü parametresinin (a) katkılama oranına bağlı değişimi incelendiğinde, %9 B katkılı Cu₂O yapısına kadar kristal boyutunun azaldığı

gözlemlenmiştir fakat örgü sabiti (a) ve mikro gerilmelerin düzenli bir değişim söz konusu değildir (Madkour, 2021; Niu ve diğ, 2016; Zamzuri ve diğ, 2015).

Çizelge 4. 7 : Boron katkısı ile kristal boyutu ve örgü parametresinin değişimi.

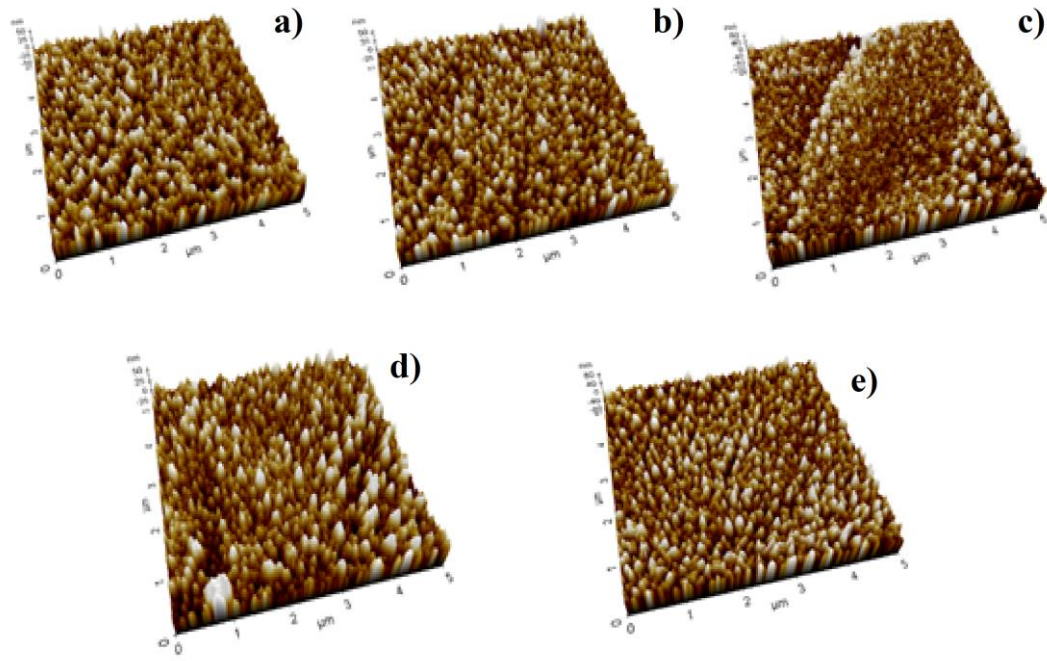
Katkılama Oranı (%)	D(nm)	a(Å)
0	33,4	4,245
3	18,9	4,252
6	16,4	4,246
9	14,9	4,268
12	16,4	4,228

Literatürde Cu₂O ile ilgili çok farklı atomlarla katkılanmış çalışmalar mevcuttur, Kurias ve arkadaşlarının Boron katkılı Cu₂O ince filmlerinde yaptığı çalışmada, katkılama seviyesi arttıkça kristalleşmenin azaldığını, buna sebep olarak da iyonik yarıçapı bakırın yarıçapından daha küçük olan bor dopant bölgesi çevresinde meydana gelen yapısal bozulma olabileceğini raporlamışlardır (Madkour, 2021; Scanlon ve diğ, 2009) (K. Markose ve diğ, 2020).

Yapıda meydana kristal boyutu farkı Cu⁺ (0,77Å) iyonlarının yarı çapı daha küçük B⁺³ (0,23Å) iyonları ile yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır (Abdelfatah ve diğ, 2023; Niu ve diğ, 2016; Shaji ve diğ, 2020)

4.3.2 Cu₂O:B ince filmlerinin morfolojik özellikleri

Üretilen katkısız ve farklı oranlarda (%3-6-9-12) B katkılı Cu₂O ince filmlerinin morfolojik özelliklerini incelemek için, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fizik Bölümü'nde bulunan Park Systems XE 100 marka/model Atomik Kuvvet Mikroskobu ile AFM görüntüleri elde edilmiştir. Ek olarak, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan, HITACHI SU5000 FE-SEM marka taramalı elektron mikroskobundan alınan SEM görüntüleri de analiz edilerek yüzey özellikleri hakkında bilgi edinilmiştir. Şekil 4.7'de verilen AFM görüntüleri üzerinden yapılan incelemelerde filmlerin neredeyse homojen bir yüzey dağılımına sahip olduğunu söyleyebiliriz. Diğer yandan filmlerin yüzey pürüzlülüğünün (Ra) 9.2-11.9 nm arasında değiştiği tespit edilmiş olup., Çizelge 4.5'de de yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmiştir.

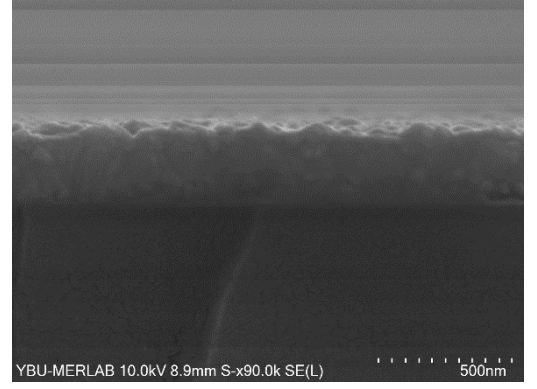
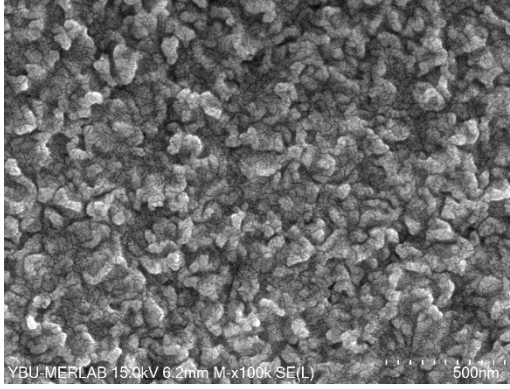


Şekil 4.10: Cu_2O ince filmlerine ait AFM görüntüleri (a, katkısız Cu_2O ince filmi, b, %3 B katkılı Cu_2O ince filmi, c, %6 B katkılı Cu_2O ince filmi, d, %9 B katkılı Cu_2O ince filmi, e, %12 B katkılı Cu_2O ince filmine ait AFM görüntüleri)

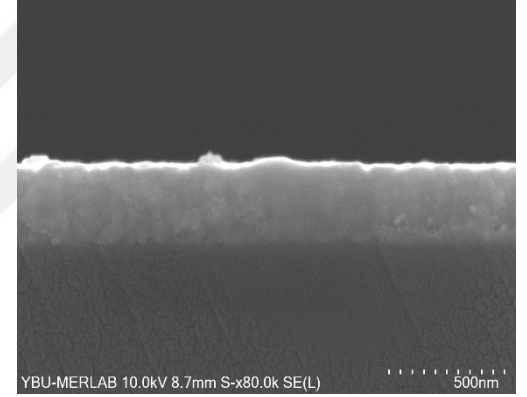
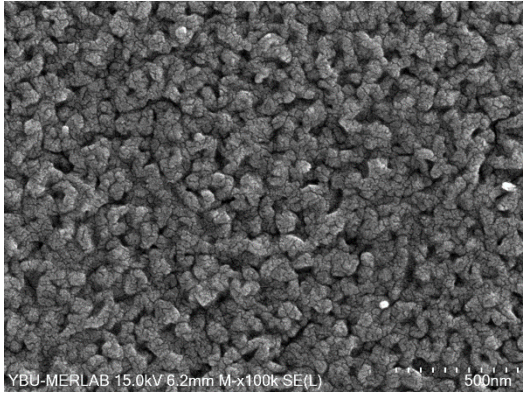
Ayrıca Şekil 4.8 ile Şekil 4.12 arasında katkısız ve farklı oranlarda B katkılı Cu_2O filmlerinin yüzey ve kesit SEM görüntüleri verilmiştir. Yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde katkısız filmlerin daha küçük tanelerden oluştuğu ve B katkısı ile birlikte bu tane görüntülerinin daha belirgin olduğu ve tane büyüklüklerinin arttığı görülmüştür. Diğer yandan, kesit SEM görüntülerini kullanarak ImageJ programı vasıtasıyla film kalınlıkları belirlenmiştir. Film kalınlıklarının 190 nm ile 315 nm arasında değiştiği görülmüştür. Belirlenen film kalınlıkları Çizelge 4.8’de listelenmiştir.

Çizelge 4.8: Üretilen Cu_2O ince filmlerine ait yüzey pürüzlülük (R_a) ve kalınlık (d) değerleri.

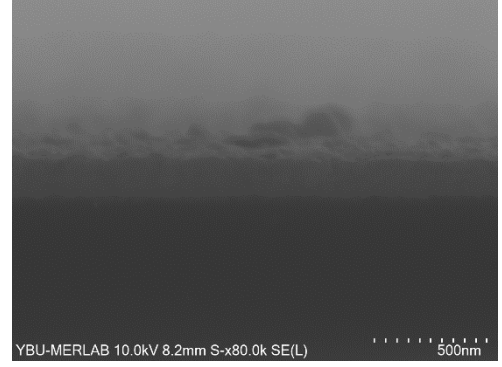
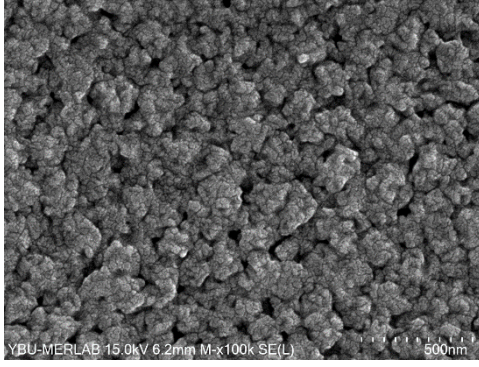
Film	Cu_2O	$\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ (3%)	$\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ (6%)	$\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ (9%)	$\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ (12%)
R_a (nm)	9.2	7.9	9.9	9.9	11.9
Kalınlık (nm)	280	280	230	190	315



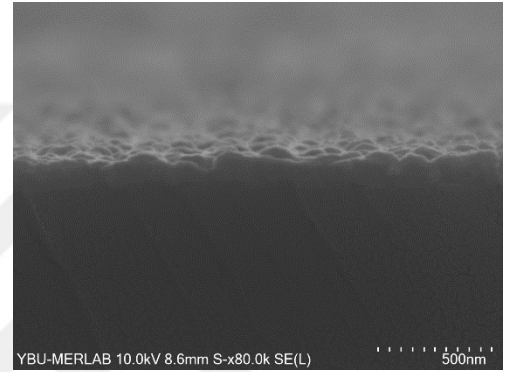
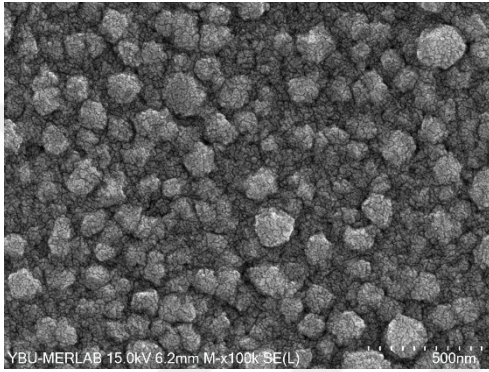
Şekil 4.11: Katkısız Cu_2O ince filmlerine ait 100 K büyötmeli yüzey ve 90 K büyötmeli kesit SEM göröntüleri.



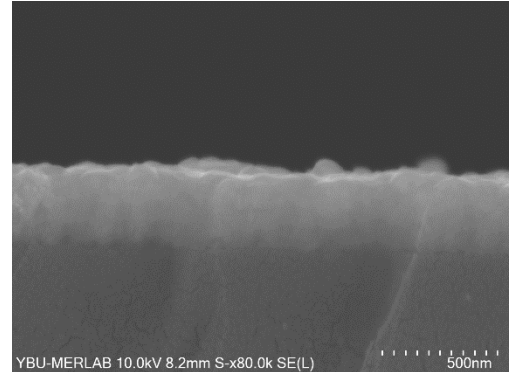
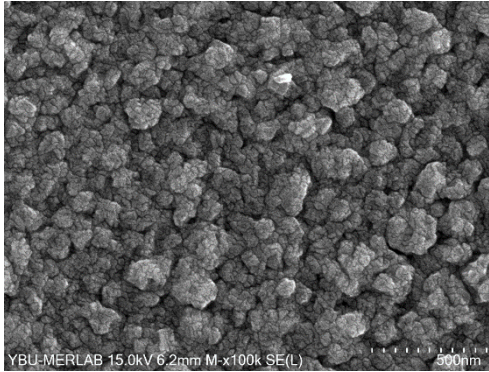
Şekil 4.12: %3 B katkılı Cu_2O ince filmlere ait 100 K büyötmeli yüzey ve 90 K büyötmeli kesit SEM göröntüsü



Şekil 4.13: %6 B katkılı Cu_2O ince filmlere ait 100 K büyütmeli yüzey ve 90 K büyütmeli kesit SEM görüntüsü



Şekil 4.14: %9 B katkılı Cu_2O ince filmlere ait 100 K büyütmeli yüzey ve 90 K büyütmeli kesit SEM görüntüsü

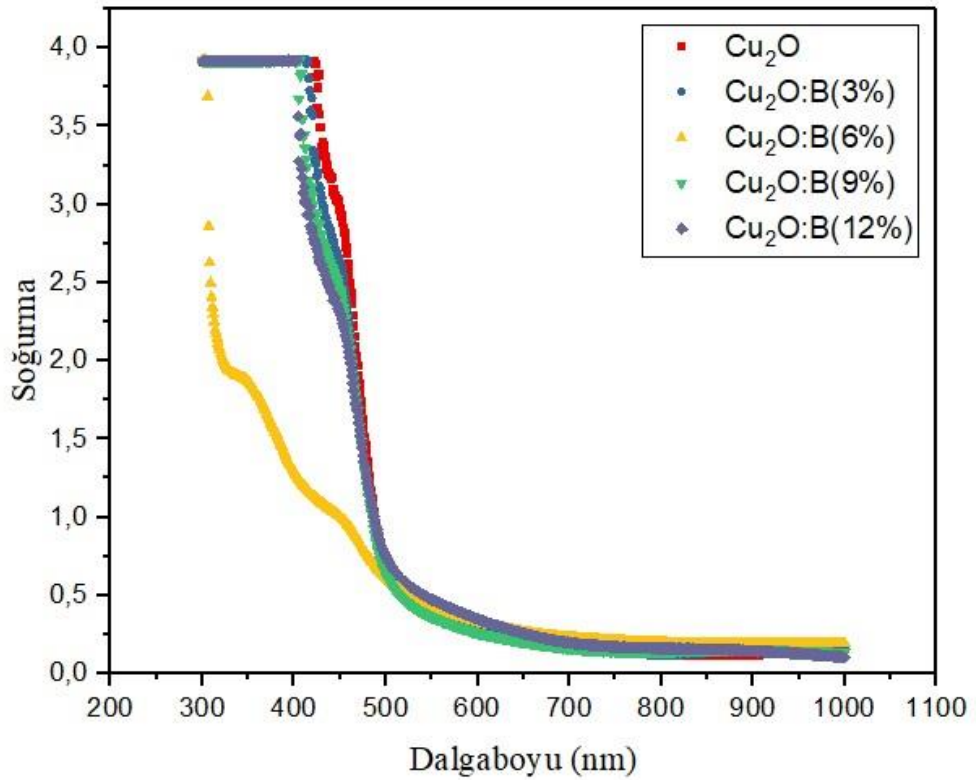


Şekil 4.15: %12 B katkılı Cu_2O ince filmlere ait 100 K büyütmeli yüzey ve 90 K büyütmeli kesit SEM görüntüsü

4.3.3 $\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ ince filmlerinin optik özellikleri

Üretilen $\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ ince filmlerinin optik analizleri için, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü, Optoelektronik Laboratuvarında bulunan RIGOL 3600 marka spektrofotometre cihazı ile 300-900 nm aralığında elde edilen soğurma ve geçirgenlik spektrumları kullanılmıştır.

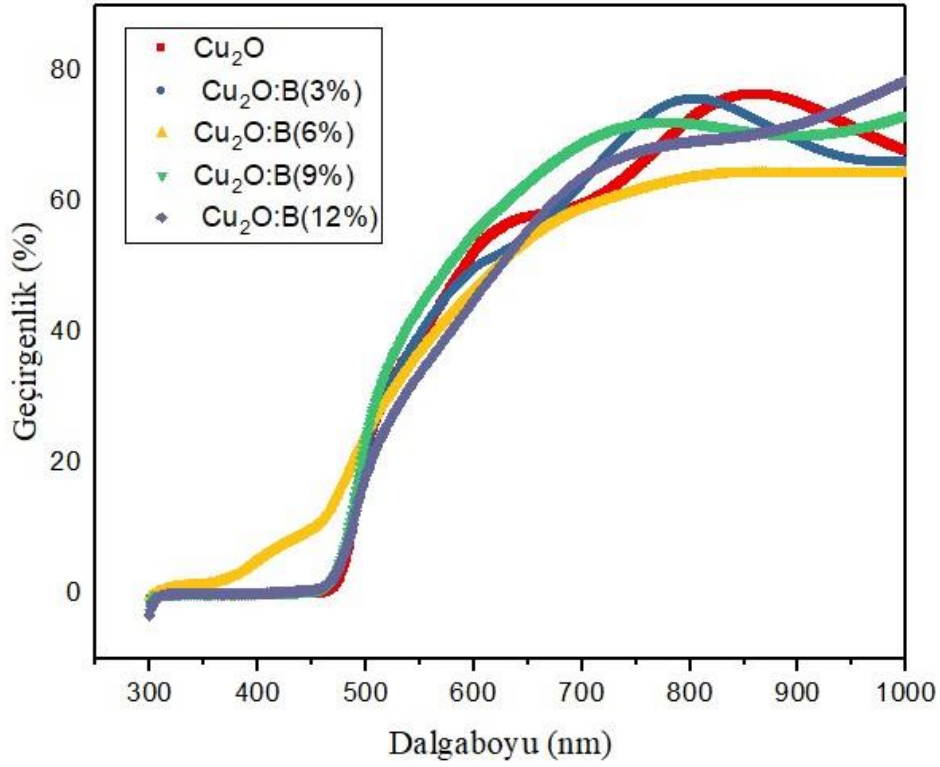
Şekil 4.13'te verilen soğurma spektrumlarından görüleceği üzere, katkısız ve B katkılı Cu_2O filmlerinin 500 nm'den uzun dalgalarda oldukça düşük soğurmaya sahip olduğu ve soğurma değerlerinin katkı oranıyla birlikte önemli bir değişim göstermediği görülmektedir. Diğer yandan katkısız ve %3-9-12 Cu_2O ince filmlerinin soğurma kenarının keskin ve hızlı bir şekilde artarken, %6 B katkısı ile birlikte soğurma kenarının daha yatık olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16: $\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ ince filmlerinin soğurma spektrumları

Şekil 4.14'de verilen geçirgenlik spektrumları ise, filmlerin 700 nm'den büyük dalgalarda %60'ın üzerinde geçirgenliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca katkısız ve düşük oranda (%3) B katkılı filmlerin geçirgenlik spektrumlarının uzun dalgalı boyu bölgesinde görülen saçaklar (dalgalanmalar) katkı konsantrasyonunun artmasıyla birlikte kaybolmuştur. Bu durum, katkı konsantrasyonu ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün artmış olabileceğini düşündürmektedir. Morfolojik analizler bölümünde tartışıldığı üzere, katkısız filmler oldukça pürüzsüz yüzeye sahip iken,

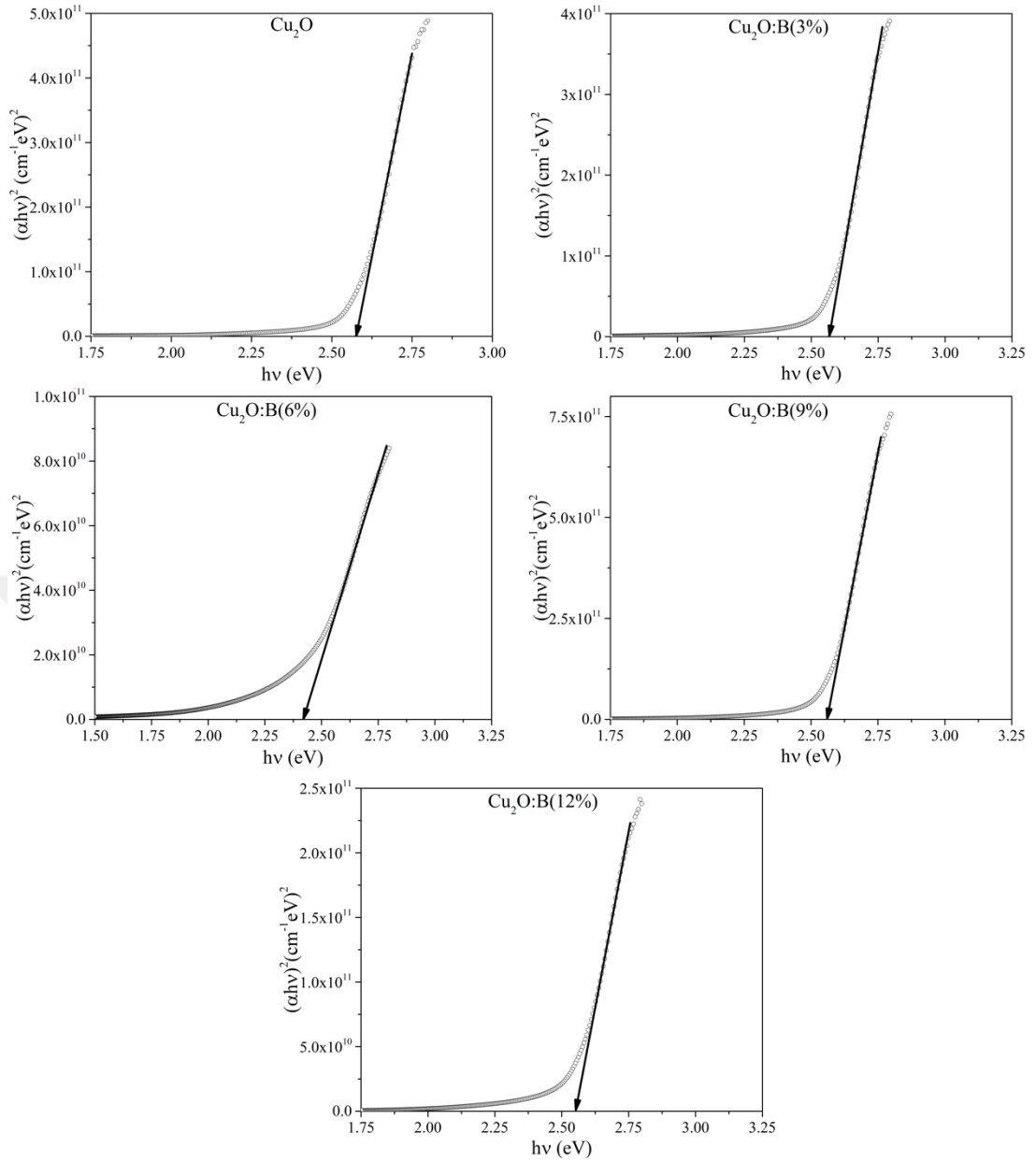
çözelti içerisindeki B miktarının artması ile birlikte filmlerin yüzey pürüzlülüğü arttırmış ve geçirgenlik spektrumunda görünen girişim saçaklarının kaybolmasına yol açmıştır.



Şekil 4.17: Cu₂O:B ince filmlerinin geçirgenlik spektrumları

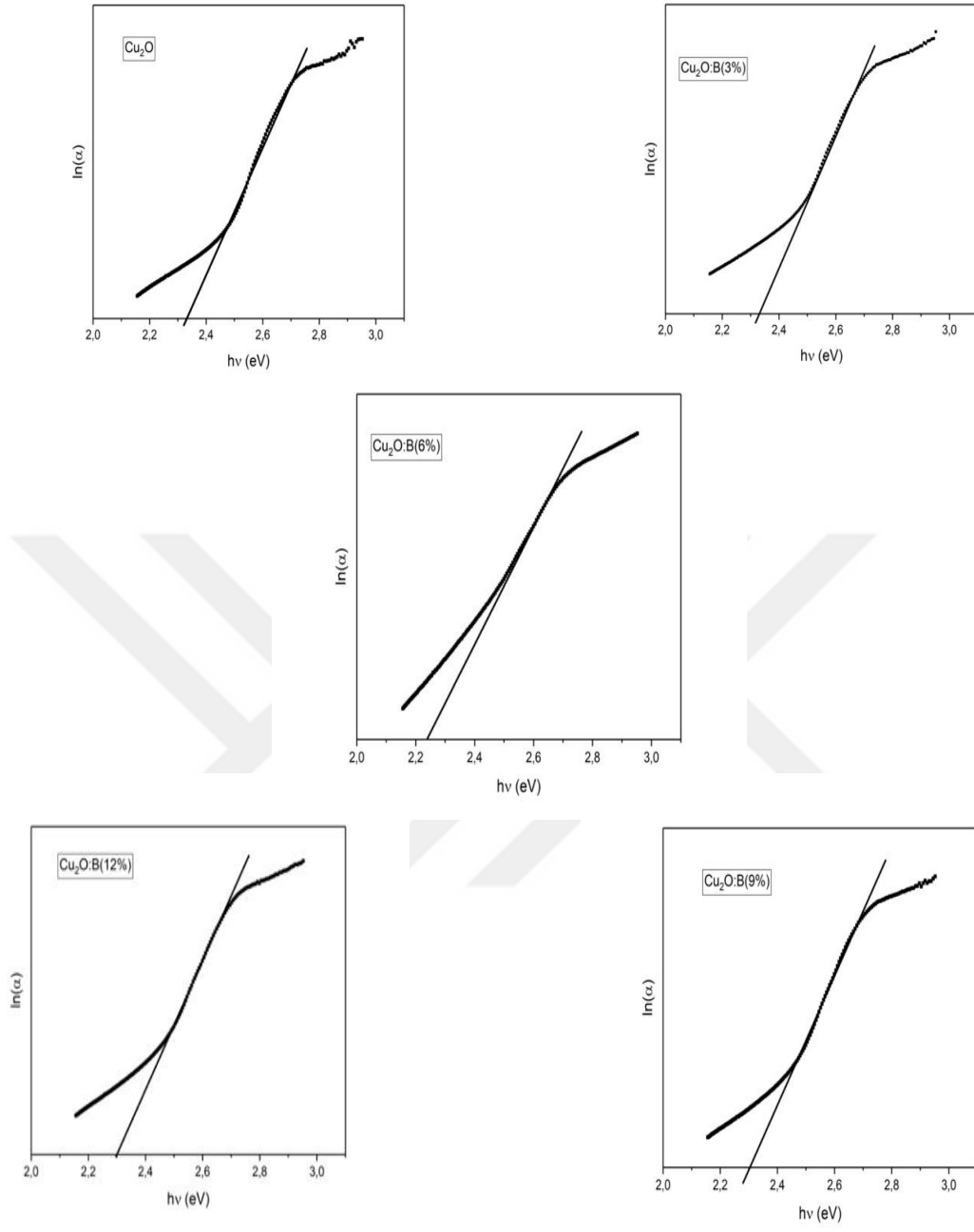
Elde edilen soğurma ve geçirgenlik spektrumlarından faydalanılarak filmlerin kırılma indisleri, sönüm katsayıları, yasak enerji aralıkları ve Urbach parametreleri belirlenmiştir.

Filmlere ait yasak enerji aralıkları (3.9) eşitliği ile verilen Tauc metodu ile belirlenmiştir. Buna göre, Şekil 4.15'te verilen $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ grafiğinin lineer kısmının $h\nu$ eksenini kestiği nokta kullanılarak yasak enerji aralıkları belirlenmiş ve katkısız ve %3, %6, %9 ve %12 oranında B katkılı Cu₂O filmlerinin yasak enerji aralığının sırasıyla 2.58 eV, 2.57 eV, 2.42 eV, 2.56 eV ve 2.54 eV olduğu görülmüştür.



Şekil 4.18: Cu₂O:B filmlerine ait $(\alpha hv)^2 - hv$ (Tauc) grafikleri.

Filmlere ait optik bant aralığında, B katkısıyla birlikte hafifçe azaldığı fakat ve dikkate değer bir değişim olmadığı görülmüştür. Diğer yandan, B katkısıyla birlikte yasak enerji aralığı içerisinde oluşan kusurların yol açtığı bant sarkmalarını değerlendirmek için Urbach enerji değerleri belirlenmiştir. Urbach enerjileri, yasak bant aralığı içerisindeki yerleşmiş durumların genişliği olarak yorumlanır ve (3.10) eşitliğine uygun olarak $\ln \alpha$ 'nın $h\nu$ 'ye karşı çizdirilen grafiğin lineer kısmı kullanılarak hesaplanır. Hesaplanan değerler ayrıca Çizelge 4.10'da verilmiş olup, Urbach enerji değerlerinde görülen ciddi artış, B katkısı ile Cu₂O filmlerinde elektronik düzensizliğe neden olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 4.19: $\text{Cu}_2\text{O}:\text{B}$ filmlerine ait $\ln(\alpha)$ - $h\nu$ grafikleri.

Çizelge 4. 9: Cu₂O filmlerinin bant aralığı (E_g), Urbach enerji değerleri (E_U) ve soğurma katsayı (α) değerleri.

Film	E _g (eV)	E _U (meV)	αx10 ⁴ (@550 nm) x 10 ⁴
Cu₂O	2,58	129	3.26
Cu₂O:B %3	2,57	165	3.29
Cu₂O:B %6	2,42	468	4.29
Cu₂O:B %9	2,56	162	4.42
Cu₂O:B %12	2,54	206	3.45

4.3.4 Cu₂O:B ince filmlerinin elektriksel özellikleri

4.3.4.1 Hall Etkisi analizleri

Üretilen Cu₂O ince filmlerinin elektriksel analizleri için, Ankara Başkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde bulunan ezHEMS Hall-Effect Measurement System marka Hall-etkisi ölçüm sistemi ile oda sıcaklığında alınan ölçümler kullanılmıştır.

Buna göre hesaplanan elektriksel değerler Çizelge 4.7'de listelenmiştir.

Çizelge 4. 10: Cu₂O filmlerinin Hall etkisi ölçümü ile elde edilen öz direnç (ρ), taşıyıcı konsantrasyonu (n), mobilite (μ) değerleri ve elektriksel iletkenlik türü değerleri.

Film	Cu ₂ O	Cu ₂ O:B (3%)	Cu ₂ O:B (6%)	Cu ₂ O:B (9%)	Cu ₂ O:B (12%)
ρ (Ωcm)	174	20.7	130	8.21	15.8
n (cm⁻³)	2.67x10 ¹⁵	3.28x10 ¹⁶	3.78x10 ¹⁵	6.98x10 ¹⁶	3.59x10 ¹⁶
μ (cm²/V.s)	13.4	9.19	13.0	10.89	11.01
İletkenlik Tipi	p	p	p	p	p

4.3.4.2 Elektrokimyasal empedans analizleri

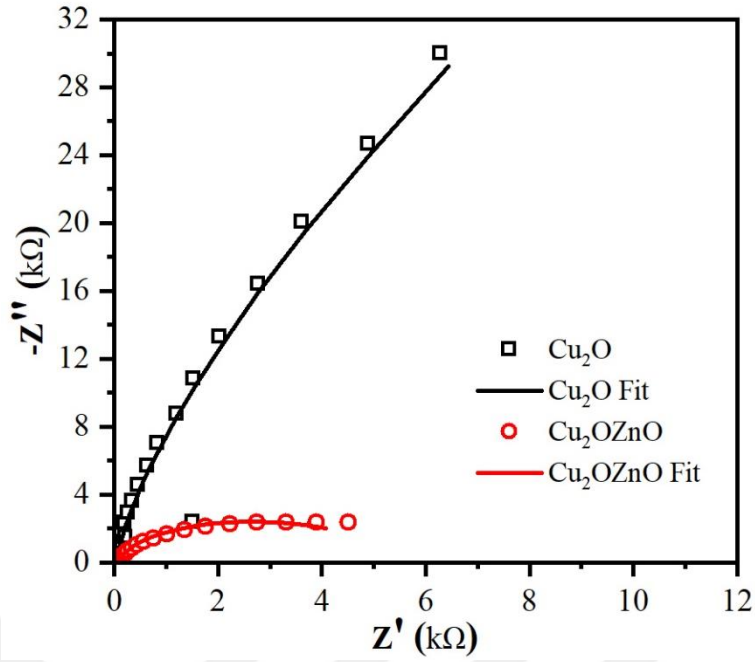
Hall Etkisi ölçümlerinde alınan sonuçlara ilaveten ITO/ZnO, ITO/Cu₂O ve ITO/ZnO/Cu₂O eklemlerinin, Uludağ Üniversitesi, Fizik Bölümü'nde bulunan GAMRY

3000 Potansiyometre cihazı ile elektrokimyasal empedans spektroskopisi, Mott-Schottky ölçümleri ve LSV ölçümleri alınmış, eşdeğer devreleri belirlenmiştir.

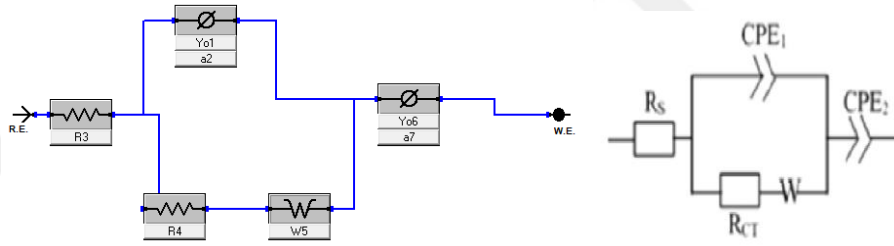
Çizelge 4. 11: Elektrokimyasal ölçümlere ait ölçüm şartları.

Ölçüm	Voltaj Aralığı (V)	Frekans (Hz)	Çözelti(H ₂ O)	Karşıtl Elektrot	Referans Elektrot
EIS	(-1, +1)	300 k – 0,1	1 M KOH	Karbon Çubuk	Ag/AgCl
Mott-Schottky	(-1, +1)	10 k	1 M KOH	Karbon Çubuk	Ag/AgCl
LSV	(-1, +1)	10 k	1 M KOH	Karbon Çubuk	Ag/AgCl

Üretilen filmlerin EIS ölçümleri, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fizik Bölümünde bulunan, GAMRY 3000 Potansiyometre ile alınmış olup, karşıtl elektrot olarak karbon çubuk, referans elektrot olarak Ag/AgCl seçilmiştir. İletken sıvı çözelti olarak 1 M KOH sulu çözeltisi kullanılmıştır. EIS ölçümleri, (-1 V , +1 V) aralığında 300 kHz - 0,1 Hz aralığında taranarak alınmıştır. Alınan EIS ölçümlerine ait empedans grafiği Şekil 4.18’de verilmiştir. Ayrıca ITO/ZnO/Cu₂O eklemine ait EIS ölçümlerinden elde edilen eşdeğer devre şekil 4.19’da verilmiştir(Benathmane ve diğ., 2024; Guo ve diğ., 2019; Li & Kanan, 2012; McShane & Choi, 2012; Wu ve diğ., 2010).



Şekil 4.20: ITO/Cu₂O ve ITO/ZnO/Cu₂O ince filmlerine ait ($\text{Re}z - -\text{Im}z$) EIS grafiği.



Şekil 4.21: ITO/ZnO/Cu₂O ince filmlerine ait EIS eşdeğer devresi.

Alınan ölçümlerden elde edilen eşdeğer devreye ait veriler Çizelge 4.9’da verilmiştir.

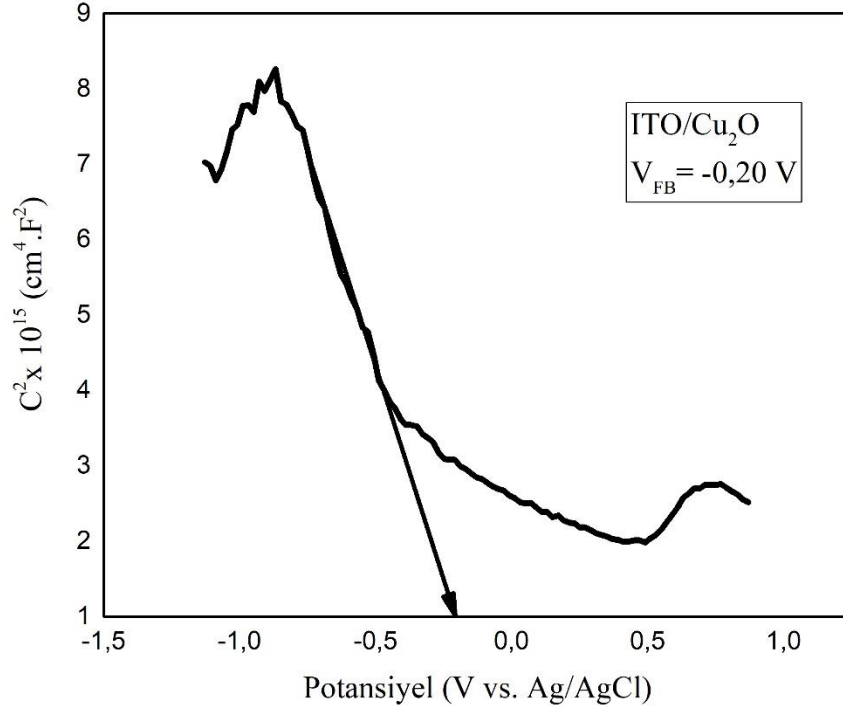
Çizelge 4. 12: ITO/ZnO/Cu₂O filmlerine ait EIS değerleri.

Film	R_s (Ωcm^2)	R_{CT}	CPE_1 (mF.cm^{-2})	n_1	CPE_2 (mF.cm^{-2})	n_2	W (Ω)	Fit uyumluluğu
Cu₂O	42.1	0.2 $\mu\Omega$	0.53 μF	1.000	23.6	0.920	12.1 μ	7.08×10^{-3}
ITO/Cu₂O/ZnO	44.0	5.25 $\text{M}\Omega$	16.0 mF	0.961	9.46	0.158	1.85 k	9.07×10^{-4}

4.3.4.3 Mott-Schottky analizleri

Mott-Schottky ölçümleri için, (-1 V , +1 V) aralığında 10 kHz frekansta ölçümler alınmış, potansiyel (V vs Ag/AgCl)’ye karşılık empedans değerleri (C^{-2}) grafiği elde edilmiştir Şekil 4.22’de ITO/Cu₂O ve Şekil 4.23’de ITO/ZnO/Cu₂O ince filmine ait Mott-Schottky eğrileri verilmiştir. Mott-Schottky analizleri ile eğrinin x-eksenini kestiği nokta üzerinden ITO/ZnO ekleminin V_{FB} değeri -0,9 V, ITO/Cu₂O ekleminin

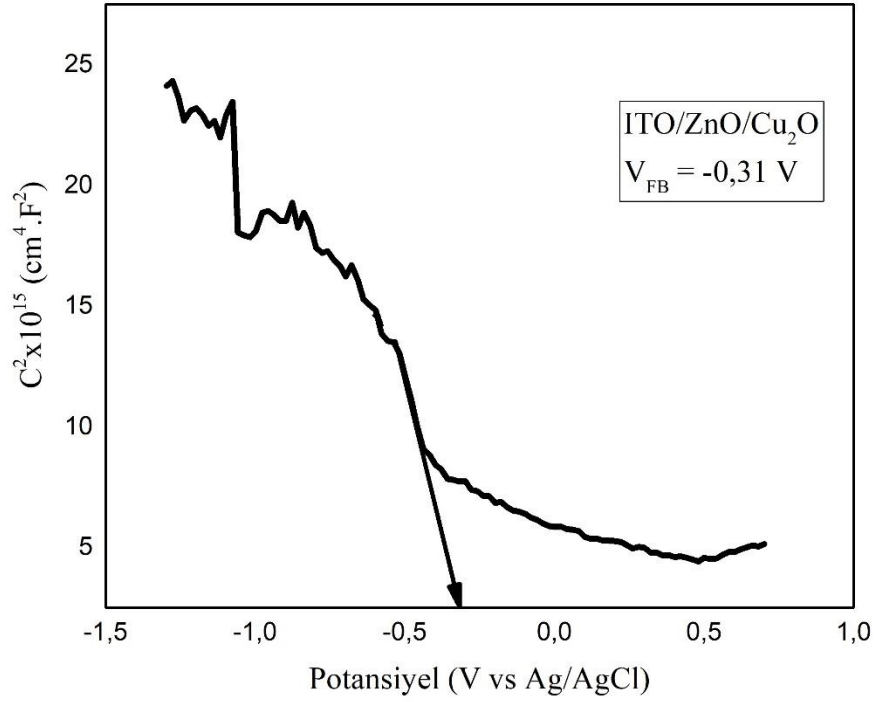
V_{FB} değeri -0,20 V ve ITO/ZnO/Cu₂O eklemine ait V_{FB} değeri -0,31 V olarak ölçülmüştür (Guo ve diğ., 2019; Wu ve diğ., 2010).



Şekil 4.22: ITO/Cu₂O ince filmine ait Mott-Schottky eğrisi.

Çizelge 4.13: ITO/Cu₂O ince filmlerine ait Mott-Schottky verileri

Eğim	ϵ	ϵ_0	e	V_{fb}	N_A
$-1,00 \times 10^{16}$	8,50	$8,85 \times 10^{-12}$	$1,60 \times 10^{-19}$	$-2,00 \times 10^{-01}$	$8,30 \times 10^{15}$



Şekil 4.23: ITO/ZnO/Cu₂O ince filmine ait Mott-Schottky eğrisi.

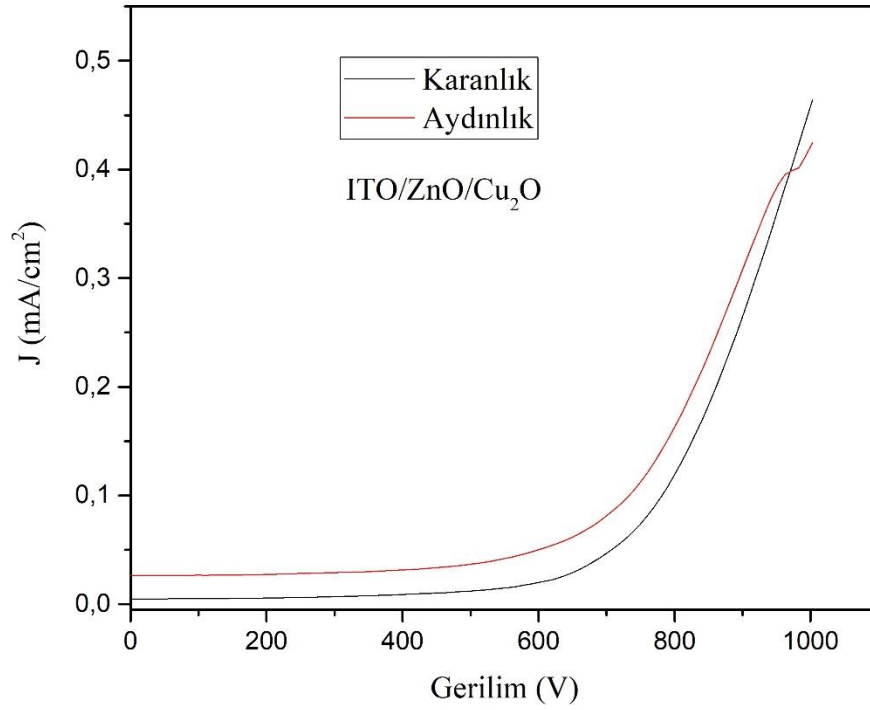
Çizelge 4.14: ITO/ZnO/Cu₂O ince filmlerine ait Mott-Schottky verileri

ϵ	ϵ_0	e	E_{fb}	Eğim	N_A
8,50	$8,85 \times 10^{-12}$	$1,60 \times 10^{-19}$	-0,31	$-2,0 \times 10^{16}$	$1,11 \times 10^{15}$

Mott-Schottky ölçümleri sonucunda ITO alttaşlar üzerine büyütülmüş olan Cu₂O ince filmleri p-tipi elektriksel iletkenlik gösterirken, ZnO ince filmleri n-tipi elektriksel iletkenlik göstermiştir.

4.3.4.4 Lineer taramalı voltmetri analizleri

Aynı düzenek ile lineer taramalı voltmetri (LSV) ölçümleri alınmış olup ITO/ZnO/Cu₂O eklemine ait aydınlık ve karanlık ortamda alınan ölçümler Şekil 4.24’de ITO/ZnO/Cu₂O eklemine ait aydınlık ortamda alınan J-V eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.24: ITO/ZnO/Cu₂O ince filmlerinin karanlık ve aydınlık ortamda alınmış LSV eğrileri.

4.24'den görüceği üzere, ITO alttaşlar üzerine büyütülen Cu₂O ince filmlerinden önce ZnO tampon katman büyütülmesi ile aydınlatma altında alınan I-V ölçümlerinde ince filmler ışığa karşı duyarlılık göstermiş, fotovoltaik uygulamalar için uygun bir aday olduklarını göstermişlerdir(Wu ve diğ., 2010).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ZnO ince filmler ve farklı oranlarda (%0-3-6-9-12) B ile katkılanmış Cu₂O ince filmleri USP tekniği ile cam alttaşlar ve ITO kaplı alttaşlar üzerine 280°C taban sıcaklığında üretilmiş, optik, yapısal ve elektriksel özellikleri elde edilmiştir. Ayrıca ITO/ZnO/Cu₂O:B heteroekleminin aygıt davranışı incelenmiştir.

Yapısal analizler neticesinde katkısız ve B katkılı Cu₂O filmlerinin (200) baskın yönelimli, yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. (200) kırınım pikini esas alarak hesaplanan ortalama kristalit boyutlarının B katkısı ile 33,4 nm'den 16,4 nm arasında değiştiği belirlenmiştir. AFM ve SEM görüntüleri, B katkısının film yüzey morfolojisinde çok büyük değişiklikler gerçekleştirmediği gözlemlenmiştir. Optik analizler gerçekleştirildiğinde ise, Cu₂O:B ince filmlerinin 500 nm'den büyük dalgaboyu bölgesinde %60'ın üzerinde optik geçirgenliğe sahip olduğu görülmüştür. Katkısız ve B katkılı Cu₂O filmlerin optik bant aralığı değerlerinin 2.5 eV civarında olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplanan Urbach enerjileri ise, B katkısı ile, Cu₂O filmlerinde bant sarkmalarının önemli derecede arttığını ortaya koymuştur. Elektriksel analizler neticesinde, Cu₂O filmlerinin elektriksel özdirenç değerlerinin $1.74 \times 10^2 \Omega \text{cm}$ 'den $8.21 \Omega \text{cm}$ 'ye dikkate değer bir biçimde azaldığı gözlemlenmiştir. ITO/ZnO/Cu₂O:B eklem yapısının detaylı bir şekilde incelenmesi için yapılan EIS ve Mott-Schottky ölçümlerinde ZnO ince filmlerinin n-tipi iletkenlik gösterdiği, Cu₂O:B ince filmlerinin p-tipi iletkenlik gösterdiği belirlenmiş ve bu durumun Hall etkisi ölçümleri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ayrıca eşdeğer devreleri çıkartılarak diyot karakteristiği belirlenmiştir. Yapılan LSV ölçümleri ile de aydınlık ve karanlık ortam altında alınan I-V ölçümleri üretilen ITO/ZnO/Cu₂O:B çok katmanlı yapının diyot karakteristiği gösterdiği ve ışığa duyarlı oldukları gözlemlenmiştir. İleriki çalışmalara ışık tutması açısından ZnO yerine Al katkılı ZnO ince filminin kullanılması faydalı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca filmlerin kalınlıklarının fotovoltaiik uygulamalar için yetersiz olduğunu, bu düşük kalınlıklarda kaçak akım yollarının artmasına sebep olabileceğini düşünmekteyiz. Bunu gidermek için kalınlık optimizasyonuna yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdelfatah, M., Darwesh, N., Atta, H., Beltagi, A. M., Sun, B., El-Shaer, A., & Ismail, W.** (2023). Inverting electrodeposited nanostructured Cu₂O thin films from n-type to p-type semiconductors and variation of their physical and photoelectrochemical properties for optoelectronic applications. *Ceramics International*, 49(18), 30732-30743.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.029>
- Akyüz İ.** (2005). *CdO Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri Üzerine Al Katkılama ve Tavlama İşlemlerinin Etkileri*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Balamurugan, B., Mehta, B. R., & Shivaprasad, S. M.** (2001). Surface-modified CuO layer in size-stabilized single-phase Cu₂O nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 79(19), 3176-3178. <https://doi.org/10.1063/1.1416478>
- Baruah, S., & Dutta, J.** (2009). Hydrothermal growth of ZnO nanostructures. *Science and Technology of Advanced Materials*, 10(1).
<https://doi.org/10.1088/1468-6996/10/1/013001>
- Başlak, C.** (2014). *Ağır Metal temelli alaşım kuantum nokta yapıların elde edilmesi, optik ve membran özelliklerinin incelenmesi*. [Konya Selçuk Üniversitesi].
[https://doi.org/10.1016/0008-8749\(79\)90404-0](https://doi.org/10.1016/0008-8749(79)90404-0)
- Benathmane, H., Belhadj, H., Guemmez, M., & Azizi, A.** (2024). Effect of bath temperature on the efficiency and properties of Cu₂O/ZnS/ZnO heterojunctions thin film prepared by electrodeposition and chemical bath deposition methods. *Optical Materials*, 148, 114842. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.114842>
- Bengas, R., Lahmar, H., Redha, K. M., Mentar, L., Azizi, A., Schmerber, G., & Dinia, A.** (2019). Electrochemical synthesis of n-type ZnS layers on p-Cu₂O/n-ZnO heterojunctions with different deposition temperatures. *RSC Advances*, 9(50), 29056-29069. <https://doi.org/10.1039/C9RA04670D>
- Bin, Y., Lin, G., Russo, S. E., Huang, Z., Shen, Y., Cao, H., Lian, J., & Ye, W.** (2019). Impact of buffer layer process and Na on shunt paths of monolithic series-connected CIGSs thin film solar cells. *Sci. Rep.*, 9(1), 1-11.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-50604-3>
- Borysiewicz, M. A.** (2019). ZnO as a Functional Material, a Review. *Crystals*, 9(10), 505. <https://doi.org/10.3390/cryst9100505>
- Chang, B.-Y., & Park, S.-M.** (2010). Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 3(1), 207-229.
<https://doi.org/10.1146/annurev.anchem.012809.102211>
- Chatterjee, S., Saha, S. K., & Pal, A. J.** (2016). Formation of all-oxide solar cells in atmospheric condition based on Cu₂O thin-films grown through SILAR technique. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 147, 17-26.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.11.045>
- Cullity B.D.** (1996). *Elements of X-ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Demirselçuk, B.** (2012). *ZnO İNCE FİLMLERİ: Co KATKISININ ETKİSİ*.
- Duan, Z., Du Pasquier, A., Lu, Y., Xu, Y., & Garfunkel, E.** (2012). Effects of Mg composition on open circuit voltage of Cu₂O/Mg_xZn_{1-x}O heterojunction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96(1), 292-297.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.09.047>

- Gelderman, K., Lee, L., & Donne, S. W.** (2007). Flat-Band Potential of a Semiconductor: Using the Mott–Schottky Equation. *Journal of Chemical Education*, 84(4), 685. <https://doi.org/10.1021/ed084p685>
- Grundmann M.** (2010). *The Physics of Semiconductors (2nd ed.)*. (2. bs). Springer-Verlag.
- Guo, L., Cao, J., Zhang, J., Hao, Y., & Bi, K.** (2019). Photoelectrochemical CO₂ reduction by Cu₂O/Cu₂S hybrid catalyst immobilized in TiO₂ nanocavity arrays. *Journal of Materials Science*, 54(14), 10379-10388. <https://doi.org/10.1007/S10853-019-03615-4/FIGURES/5>
- Hameş, Y., & Eren San, S.** (2004). CdO/Cu₂O solar cells by chemical deposition. *Solar Energy*, 77(3), 291-294. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.05.014>
- Henni, W., Rahal, W. L., Toki, G. F. I., Mohammed, M. K. A., Farhat, L. Ben, Ezzine, S., Pandey, R., Boukourt, A., & Hossain, M. K.** (2023). Effect of Adding Cu₂O as a Back Surface Field Layer on the Performance of Copper Manganese Tin Sulfide Solar Cells. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 14322, 15(19), 14322. <https://doi.org/10.3390/SU151914322>
- Horley, P., Gonçalves Ribeiro, P. J., Aguilar Martínez, J. A., & Rocha Vieira, V. J.** (2019). Semiconductor Fundamentals. İçinde *Semiconductors* (ss. 1-35). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02171-9_1
- Ishizuka, S., Kato, S., Maruyama, T., & Akimoto, K.** (2001a). Nitrogen Doping into Cu₂O Thin Films Deposited by Reactive Radio-Frequency Magnetron Sputtering. İçinde *Jpn. J. Appl. Phys* (C. 40, Sayı 4B). <http://iopscience.iop.org/1347-4065/40/4S/2765>
- Ishizuka, S., Kato, S., Maruyama, T., & Akimoto, K.** (2001b). Nitrogen Doping into Cu₂O Thin Films Deposited by Reactive Radio-Frequency Magnetron Sputtering. İçinde *Jpn. J. Appl. Phys* (C. 40, Sayı 4B). <http://iopscience.iop.org/1347-4065/40/4S/2765>
- Jeong, S. S., Mittiga, A., Salza, E., Masci, A., & Passerini, S.** (2008). Electrodeposited ZnO/Cu₂O heterojunction solar cells. *Electrochim. Acta*, 53(5), 2226-2231. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.09.030>
- J, J. A.** (2011). *Synthesis and Characterization of CdSe-ZnS Core-Shell Quantum Dots for Increased Quantum Yield*. California Polytechnic State University .
- J.P. Colinge, & C.A. Colinge.** (2002). Physics of Semiconductor Devices. İçinde *Physics of Semiconductor Devices*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/B117561>
- Kenneth E. Train.** (2009). Physics of Semiconductor Devices. *Discrete choice methods with simulation*, 47(6-7), 1148. <https://www.wiley.com/en-us/Physics+of+Semiconductor+Devices%2C+3rd+Edition-p-9780470068328>
- Kittel, Charles.** (2005). *Introduction to Solid State Physics*.
- K. Markose, K., Shaji, M., Bhatia, S., Nair, P. R., Saji, K. J., Antony, A., & Jayaraj, M. K.** (2020). Novel Boron-Doped p-Type Cu₂O Thin Films as a Hole-Selective Contact in c-Si Solar Cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(11), 12972-12981. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b22581>
- Kosukoglu, T., Carpan, M., Riza Tokgoz, S., & Peksoz, A.** (2022). Fabrication of a new rGO@PPy/SS composite electrode with high energy storage and long cycling life for potential applications in supercapacitors. *Materials Science and Engineering: B*, 286, 116032. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116032>
- Ku, C. S., Huang, J. M., Lin, C. M., & Lee, H. Y.** (2009). Fabrication of epitaxial ZnO films by atomic-layer deposition with interrupted flow. *Thin Solid Films*, 518(5), 1373-1376. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.09.018>

- Kumar Jacob, S. S., Kulandaisamy, I., Poul Raj, I. L., Abdeltawab, A. A., Mohammady, S. Z., & Ubaidullah, M.** (2021). Improved optoelectronic properties of spray pyrolysis coated Zn doped Cu₂O thin films for photodetector applications. *Optical Materials*, 116. <https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2021.111086>
- Li, C. W., & Kanan, M. W.** (2012). CO₂ reduction at low overpotential on Cu electrodes resulting from the reduction of thick Cu₂O films. *J Am Chem Soc*, 134(17), 7231-7234. <https://doi.org/10.1021/ja3010978>
- Lin, P., Chen, X., Yan, X., Zhang, Z., Yuan, H., Li, P., Zhao, Y., & Zhang, Y.** (2014). Enhanced photoresponse of Cu₂O/ZnO heterojunction with piezo-modulated interface engineering. *Nano Research*, 7(6), 860-868. <https://doi.org/10.1007/S12274-014-0447-6>
- Lv, P., Lin, L., Zheng, W., Zheng, M., & Lai, F.** (2013). Photosensitivity of ZnO/Cu₂O thin film heterojunction. *Optik*, 124(17), 2654-2657. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.07.040>
- Madkour, M.** (2021). Cu_xO thin films via ultrasonic spray pyrolysis as efficient solar photocatalysts: Single source polymeric coordinated precursor. *Colloids and Interface Science Communications*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100497>
- Magar, H. S., Hassan, R. Y. A., & Mulchandani, A.** (2021). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): Principles, Construction, and Biosensing Applications. *Sensors*, 21(19), 6578. <https://doi.org/10.3390/s21196578>
- Mandal, H., Shyamal, S., Hajra, P., Samanta, B., Fageria, P., Pande, S., & Bhattacharya, C.** (2014). Improved photoelectrochemical water oxidation using wurtzite ZnO semiconductors synthesized through simple chemical bath reaction. *Electrochimica Acta*, 141, 294-301. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.06.013>
- Martínez-Duart, J. M., Martín-Palma, R. J., & Agulló-Rueda, F.** (2006). Nanotechnology for Microelectronics and Optoelectronics. *Nanotechnology for Microelectronics and Optoelectronics*, 1-279. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044553-3.X5000-0>
- Maruyama, T.** (1998). Copper oxide thin films prepared by chemical vapor deposition from copper dipivaloylmethanate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 56(1), 85-92. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(98\)00128-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(98)00128-7)
- McEvoy, A. J.** (Augustin J., Castaner, Luis., & Markvart, T. (2013). *Solar cells : materials, manufacture and operation*.
- McShane, C. M., & Choi, K.-S.** (2009). Photocurrent Enhancement of n-Type Cu₂O Electrodes Achieved by Controlling Dendritic Branching Growth. *Journal of the American Chemical Society*, 131(7), 2561-2569. <https://doi.org/10.1021/ja806370s>
- McShane, C. M., & Choi, K.-S.** (2012). Junction studies on electrochemically fabricated p-n Cu₂O homojunction solar cells for efficiency enhancement. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14(17), 6112. <https://doi.org/10.1039/c2cp40502d>
- Minami, T., Nishi, Y., & Miyata, T.** (2013). High-efficiency Cu₂O-based heterojunction solar cells fabricated using a Ga₂O₃ thin film as n-type layer. *Applied Physics Express*, 6(4). <https://doi.org/10.7567/APEX.6.044101>
- Minami, T., Nishi, Y., & Miyata, T.** (2016). Efficiency enhancement using a Zn_{1-x}Gex-O thin film as an n-type window layer in Cu₂O-based heterojunction solar cells. *Applied Physics Express*, 9(5). <https://doi.org/10.7567/APEX.9.052301>

- Naceur, K., Tibermacine, T., Mehiri, F., Boumaaraf, R., Labed, M., Meftah, A., Meftah, A., & Sengouga, N.** (2021). Study and optimization of Cu₂O/AZO hetero-junction solar cell with different buffer layers. *Optical Materials*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111060>
- Nasser S.A., Afify H.H., El-Hakim S.A., & Zayed M.K.** (1998). Structural and Physical Properties of Sprayed Copper-Zinc Oxide Films. *Thin Solid Films*, 315, 327-335.
- Neamen, D. A.** (2012). *Semiconductor physics and devices : basic principles*. McGraw-Hill.
- Nguyen, H. Q., Van Nguyen, D., Fujiwara, A., & Trinh, B. N. Q.** (2018). Solution-processed CuO thin films with various Cu²⁺ ion concentrations. *Thin Solid Films*, 660, 819-823. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.03.036>
- Niu, W., Zhou, M., Ye, Z., & Zhu, L.** (2016). Photoresponse enhancement of Cu₂O solar cell with sulfur-doped ZnO buffer layer to mediate the interfacial band alignment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 717-723. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.10.013>
- Olsen, L. C., Bohara, R. C., Urie, M. W., Olsen, L. C., Bohara, R. C., & Urie, M. W.** (1979). Explanation for low-efficiency Cu₂O Schottky-barrier solar cells. *ApPhL*, 34(1), 47. <https://doi.org/10.1063/1.90593>
- Ozaslan, D., Güneş, M., & Gümüş, C.** (2017). Physical properties of Cu₂O thin films prepared by Silar method. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(7), 854-857. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.58672>
- Özdal, T., Kılıç, M., & Kavak, H.** (2021a). Impact of improvements in ZnO thin film solution process on ZnO/Cu₂O solar cell performance. *Superlattices and Microstructures*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106948>
- Özdal, T., Kılıç, M., & Kavak, H.** (2021b). Impact of improvements in ZnO thin film solution process on ZnO/Cu₂O solar cell performance. *Superlattices and Microstructures*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106948>
- Patil P. S.** (1999). Versatility of Chemical Spray Pyrolysis Technique. *Materials Chemistry and Physics*, 59(3), 185-198.
- Perednis D.** (2003). *Thin Film Deposition by Spray Pyrolysis and the Application in Solid Oxide Fuel Cells*. PhD dissertation (Doktora Tezi). Swiss Federal Institute of Technology.
- Perednis D., & Gauckler L. J.** (2005). Thin Film Deposition Using Spray Pyrolysis. *Journal of Electroceramics*, 14(2), 103-111.
- Rau U., Abou-Ras D, & Kirchartz T.** (2011). *Advanced characterization techniques for thin film solar cells*. John Wiley & Sons, Weinheim, Germany.
- Ray, S. C.** (2001). Preparation and Study of Cu₂O Thin Films Deposited by the Dip Technique. *Indian Journal of Physics*, 75, 453-455.
- Renewable Energy Lab, N.** (t.y.). *NREL Best Research Cell Efficiencies Chart*.
- Rudan, M.** (2014). *Physics of Semiconductor Devices*.
- Sarıca, E.** (2012). *ULTRASONİK KİMYASAL PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE VANADYUM KATKILI ZnO İNCE FİLMLEİNİN BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU*.
- Sarıca, E., Gunes, I., Akyuz, I., Bilgin, V., & Erturk, K.** (2021). Sol-gel derived ZnO:Sn thin films and fabrication of n-ZnO:Sn/p-Si heterostructure. *Optical Materials*, 118, 111283. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111283>
- Scanlon, D. O., Morgan, B. J., Watson, G. W., & Walsh, A.** (2009). Acceptor levels in p-type Cu₂O: Rationalizing theory and Experiment. *Physical Review*

- Letters*, 103(9), 096405.
<https://doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.103.096405/FIGURES/3/MEDIUM>
- Seibert, J. A.** (2004). X-ray imaging physics for nuclear medicine technologists. Part 1: Basic principles of x-ray production. *Journal of nuclear medicine technology*, 32(3), 139-147. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15347692/>
- Shaji, M., Markose, K. K., Saji, K. J., & Jayaraj, M. K.** (2020). Investigation on the improved electrical and optical properties of trivalent boron-doped Cu₂O thin film and fabrication of Cu₂O:B/c-Si heterojunction diode. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(13), 10724-10730.
<https://doi.org/10.1007/s10854-020-03622-1>
- Streetman B.G., B. S. K.** (2009). *Solid State Electronic Devices*. Pearson Education Inc.
- Tokgoz, S. R., Firat, Y. E., Akkurt, N., Pat, S., & Peksoz, A.** (2021a). Energy storage and semiconducting properties of polyaniline/graphene oxide hybrid electrodes synthesized by one-pot electrochemical method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106077>
- Tokgoz, S. R., Firat, Y. E., Akkurt, N., Pat, S., & Peksoz, A.** (2021b). Energy storage and semiconducting properties of polyaniline/graphene oxide hybrid electrodes synthesized by one-pot electrochemical method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 135, 106077.
<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106077>
- Tran, M. H., Cho, J. Y., Sinha, S., Gang, M. G., & Heo, J.** (2018). Cu₂O/ZnO heterojunction thin-film solar cells: the effect of electrodeposition condition and thickness of Cu₂O. *Thin Solid Films*, 661, 132-136.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.07.023>
- Tseng, C. C., Hsieh, J. H., Liu, S. J., & Wu, W.** (2009). Effects of Ag contents and deposition temperatures on the electrical and optical behaviors of Ag-doped Cu₂O thin films. *Thin Solid Films*, 518(5), 1407-1410.
<https://doi.org/10.1016/J.TSF.2009.09.116>
- Wu, L., Tsui, L. K., Swami, N., & Zangari, G.** (2010). Photoelectrochemical stability of electrodeposited Cu₂O films. *J Phys Chem C*, 114(26), 11551-11556. <https://doi.org/10.1021/jp103437y>
- 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(15), 17749-17753.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.08.102>
- Zamzuri, M., Sasano, J., Mohamad, F. B., & Izaki, M.** (2015). Substrate type 〈111〉 -Cu₂O/ 〈0001〉 -ZnO photovoltaic device prepared by photo-assisted electrodeposition. *Thin Solid Films*, 595, 136-141.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.10.054>

ÖZGEÇMİŞ

TARANMIŞ
VESİKALIK
FOTOĞRAFI

Ad-Soyad : Hakan Bilal ÖZCAN

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2024, Bursa Teknik Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **H. B. ÖZCAN, A. A. KAYA & E. SARICA**, Boron Doped Cuprous Oxide Thin Films: Morphological And Optical Properties Turkish Physical Society 38th International Physics Congress (TPS-38) MUĞLA, TÜRKİYE 31 Ağustos 2022

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **BEKTAN, M., Batı AKGÜN, Bilal Özcan & Vildan Bilgin**, n-ZnO:Al/p-Si Heteroyapıları: Elektrik, Optik ve Yüzeysel Özellikler (in Turkish), 3rd National Congress on Solar & Hydrogen Energy (UGHEK), Eskişehir, 14-15 June 2012
- **H. B. ÖZCAN, E. SARICA**, Deposition and Investigation of Tin Oxide Films Deposited by Ultrasonic Spray Pyrolysis at Different Substrate Temperatures for Solar Cell Applications Turkish Physical Society 38th International Physics Congress (TPS-38) MUĞLA, TÜRKİYE 31 Ağustos 2022
- **E.SARICA, H.B. ÖZCAN, İ. GÜNEŞ, M. TERLEMEZOĞLU, I. AKYUZ**, Fine-Tuning SnO₂ Films: Unleashing Their Potential through Temperature Optimization by Ultrasonic Spray Pyrolysis, Journal of Ceramics, 2023
- **I.GÜNEŞ, E. SSARICA, H.B. ÖZCAN, M. TERLEMEZOĞLU, I. AKYUZ**, Flow Rate-Dependent Properties Of SnO₂ Thin Films Deposited By Ultrasonic Spray Pyrolysis, Optical Materials, 2024