



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

FİZİK TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**GALYUM (Ga)–BORON (B) EŞ KATKILAMANIN CdO FİMLERİNİN  
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELVAN KILIÇ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ERMAN ERDOĞAN

BİLECİK, 2026

1079102

T.C  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
FİZİK TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**GALYUM (Ga)–BORON (B) EŞ KATKILAMANIN CdO FİMLERİNİN  
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELVAN KILIÇ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ERMAN ERDOĞAN

BİLECİK, 2026

1079102

## BEYAN

“Galyum (Ga)–Boron (B) Eş Katkılamasının Cdo Filmlerinin Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından TEZ-Y-2025-660 nolu proje ile desteklenmiştir.

**ELVAN KILIÇ**

../../2026

**İmza**

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışması, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı kapsamında hazırlanmıştır. Çalışmanın temel amacı, galyum (Ga) ve boron (B) eş katkılamanın CdO ince filmlerinin yapısal, optik ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemektir.

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi, deneyim ve yol gösterici katkılarıyla bana rehberlik eden, değerli danışmanım Doç. Dr. Erman Erdoğan'a içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans eğitimim süresince katkı sağlayan tüm öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Bu çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından TEZ-Y-2025-660 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Sağlanan bu destekten dolayı ilgili kuruma teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Gülizar ve babam Yaşar'a, sabır ve anlayışıyla bana güç veren eşim Zühtü'ye ve en büyük motivasyon kaynağım olan kızıma sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmanın, CdO ince filmler ve katkılama çalışmaları alanında yapılacak bilimsel araştırmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

**ELVAN KILIÇ**

**2026**

## ÖZET

### GALYUM (Ga)–BORON (B) EŞ KATKILAMANIN CdO FİMLERİNİN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada, saf ve hacim oranları (1.5% wt. ve 1.5% wt.) B ve Ga olan ve ayrı ayrı ve çift katkılı CdO ince filmler, elektrodepozisyon yöntemi kullanılarak ITO altlık üzerine kaplanmıştır. ITO üzerine kaplanan saf, B ve Ga çift katkılı CdO filmlerin yapısal, optik ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. XRD ölçümleri, B ve Ga çift katkılı CdO filmlerde CdO'nun kristal yapısının değiştiğini ve kristal boyutunun azaldığını ortaya koymuştur. Optik ölçümlerin sonucunda, katkı oranı arttıkça optik bant aralığının azaldığı gözlemlenmiştir. Morfolojik ölçümlerin sonucunda, tüm filmlerin yüzeyinin homojen olduğu gözlemlenmiştir. Spektroskopik elipsometri kullanılarak, kırılma indisi, sönüm katsayısı, dielektrik sabitleri ve kayıp faktörünün B ve Ga çift katkısının konsantrasyonu ile değiştiği belirlenmiştir. Kırılma indisi değerleri 0.8 ile 2 arasında, sönüm katsayısı değerleri ise 0.05 ile 1.2 arasında değişmektedir. Dielektrik sabit değerleri de görünür bölgede önemli farklılıklar göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** CdO ince film, Elektrodepozisyon, Yapı, Optik özellikler, Katkılı ve ortak katkılı CdO

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF GALLIUM (Ga)-BORON (B) Co-DOPING ON THE PROPERTIES OF CdO FILMS

In this study, CdO thin films with pure and volume ratios of (1.5% wt. and 1.5% wt.) B and Ga separately and dual-doped were coated on ITO substrate using electrodeposition method. Structural, optical and morphological properties of pure, B and Ga dual-doped CdO films coated on ITO were investigated. XRD measurements revealed that the crystal structure of CdO was disrupted and the crystal size decreased in the B and Ga dual-doped CdO films. As a result of optical measurements, it was observed that the optical band gap decreased as the doping ratio increased. As a result of morphological measurements, it was observed that the surface of all film was homogeneous. Spectroscopic ellipsometry was used to determine that the refractive index, extinction coefficient, dielectric constants, and dissipation factor were determined to change with the concentration of B and Ga dual doping. Refractive index values ranged from 0.8 to 2 and extinction coefficient values from 0.05 to 1.2. The dielectric constant values also show significant variation in the visible region.

**Keywords:** CdO thin film, Electrodeposition, Structure, Optical properties, Doped and co-doped CdO

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
TABLolar LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ .....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. YARIİLETKENLER VE ÖZELLİKLERİ METALLERİN, İLETKENLERİN VE YARI İLETKENLERİN SINIFLANDIRILMASI .....	3
2.1. Saf Yarıiletkenler .....	3
2.2. Katkılı Yarıiletkenler .....	5
2.2.1. n-tipi Yarı İletken.....	5
2.2.2. p-tipi Yarı İletken.....	6
2.3. Yarıiletken İnce Filmler .....	8
2.4. CdO Yarıiletken Bileşiğinin Özellikleri.....	10
2.5. Galyum (Ga) Elementinin Özellikleri .....	11
2.6. Bor (B) Elementinin Özellikleri .....	11
2.7. Elektrodepozisyon Yöntemi.....	11
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	14
4. MATERYAL VE YÖNTEM .....	19
4.1. Materyal .....	19
4.2. Yöntem .....	20
4.2.1. Saf ve Katkılı CdO İnce Filmlerin Üretilmesi .....	20
4.2.2. X-ışını kırınımı (XRD) .....	20
4.2.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	22
4.2.4. Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (EDS) .....	23
4.2.5. Ultraviyole ve Görünür Bölge Spektroskopisi (UV-VIS).....	23
4.2.6. Spektroskopik Elipsometri (SE).....	24
4.2.7. Film Kalınlıklarının Belirlenmesi .....	26
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	27
5.1. Elektrokimyasal karakterizasyon .....	27

<b>5.1.1. Döngüsel Voltammetri (CV) .....</b>	<b>27</b>
<b>5.1.2. Krono-amperometri (CA).....</b>	<b>28</b>
<b>5.2. XRD Sonuçlar .....</b>	<b>29</b>
<b>5.3. SEM Sonuçlar .....</b>	<b>35</b>
<b>5.4. Optik Sonuçlar .....</b>	<b>37</b>
<b>5.5. Spektroskopik Elipsometri (SE) Sonuçlar .....</b>	<b>42</b>
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>50</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>51</b>

## TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
<b>Tablo 2.1.</b> Farklı tipteki ince film biriktirme teknikleri.....	9
<b>Tablo 5.1.</b> Saf ve katkılı CdO ince filmlerin bazı yapısal parametrelerinin karşılaştırılması..	34

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. (a) $T = 0$ K'de saf bir yarıiletken yalıtkan gibi davranır. (b) $T > 0$ K'de, termal olarak üretilen dört elektron-delik çifti. Dolu daireler elektronları, boş daireler delikleri temsil eder (Kuldeep, 2022).....	4
Şekil 2.2. Bir yarıiletkende 0 K'daki enerji bandı konumları (Kuldeep, 2022). ....	4
Şekil 2.3. (a) Tetravalent Si veya Ge için katkılanmış beş değerlikli donör atom (As, Sb, P, vb.) n tipi yarıiletken verir ve (b) n-tipi malzemenin yaygın olarak kullanılan şematik gösterimi (Kuldeep, 2022).....	6
Şekil 2.4. (a) Tetravalent Si veya Ge kafes içinde katkılanmış üç değerlikli alıcı atom (In, Al, B vb.) p tipi yarıiletken verir. (b) p tipi malzemenin yaygın olarak kullanılan şematik gösterimi (Kuldeep, 2022).....	7
Şekil 2.5. a) $T > 0$ K'de n-tipi yarıiletkenin, (b) $T > 0$ K'de p-tipi yarıiletkenin enerji bantları (Kuldeep, 2022).....	8
Şekil 2.6. Kübik CdO kristal yapısı (siyah Cd, kırmızı O) (Spencer vd., 2022).....	10
Şekil 2.7. İnce filmlerin elektrokaplama yöntemiyle biriktirilmesi için kurulumun şematik diyagramı (Kalathur, 2005). ....	13
Şekil 4.1. Bragg koşulunu karşılamak için şematik çizim. (İç düzlemdeki parçacıklardan saçılan dalga cephesi, dış düzlemdeki saçılan dalga cepheleriyle aynı fazda kalmak için $2d \sin \theta$ ek bir yol uzunluğu kat etmelidir) (Ortega, 2024).....	21
Şekil 4.2. (a) Tipik Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) kolonunun şematik çizimi ve (b) SEM içindeki numune-ışın etkileşimleri (Walock, 2012). ....	22
Şekil 4.3. Tipik bir UV-VIS absorpsiyon spektrometresinin şematik diyagramı (Ortega, 2024). ....	23
Şekil 4.4. Elipsometri sisteminin geometrisi (Politano & Versace, 2023).....	25
Şekil 5.1. CdO ince film üretimi için akım-potansiyel (döngüsel voltametri) eğrisi.....	27
Şekil 5.2. CdO ince film üretimi için akım-zaman (kronamperometri) eğrisi. ....	28
Şekil 5.3. CdO/Cd(OH) <sub>2</sub> filmlerinin XRD grafiği .....	30
Şekil 5.4. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin Modifiye Scherrer grafiği.....	31
Şekil 5.5. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin W-H grafiği.....	32
Şekil 5.6. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin SSP grafiği.....	33
Şekil 5.7. (a) Saf CdO (b) CdO:B (c) CdO:Ga (d) CdO:B-Ga ince filmlerin SEM görüntüleri .....	36

<b>Şekil 5.8. (a) Saf CdO (b) CdO:B (c) CdO:Ga (d) CdO:B-Ga ince filmlerin EDS görüntüleri</b>	37
.....	37
<b>Şekil 5.9. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin UV-Vis Geçirgenlik grafiği</b>	38
<b>Şekil 5.10. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin UV-Vis Absorbans grafiği</b>	39
<b>Şekil 5.11. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin <math>(\alpha hv)^2</math>'ye karşı <math>hv</math>'sinin Tauc çizimi</b>	40
<b>Şekil 5.12. Psi (<math>\psi</math>) için saf ve katkılı CdO ince filmlerin elipsometrik verilerinin deneysel sonuçları</b>	43
<b>Şekil 5.13. Delta (<math>\Delta</math>) için saf ve katkılı CdO ince filmlerin elipsometrik verilerinin deneysel sonuçları</b>	43
<b>Şekil 5.14. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin kırılma indisi grafiği</b>	44
<b>Şekil 5.15. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin sönüm katsayısı grafiği</b>	45
<b>Şekil 5.16. Saf ve katkılı CdO ince filmler için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak dielektrik sabitlerinin gerçek kısmındaki değişiklikler</b>	47
<b>Şekil 5.17. Saf ve katkılı CdO ince filmler için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak dielektrik sabitlerinin sanal kısmındaki değişiklikler</b>	47
<b>Şekil 5.18. Saf ve katkılı CdO ince filmler için kayıp faktörü ile foton dalga boyu ilişkisi</b>	48

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

$\alpha$  : Soğurma katsayısı

**B** : Bor

**CA** : Kronoamperometri

**CdO** : Kadmiyum Oksit

**CV** : Döngüsel Voltammetri

**D<sub>SR</sub>** : Değiştirilmiş Scherrer yöntemiyle kristal boyutu

**D<sub>SSP</sub>** : SSP yöntemiyle kristal boyutu

**D<sub>W-H</sub>** : Williamson–Hall yöntemiyle kristal boyutu

**EDS** : Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

**E<sub>g</sub>** : Optik bant aralığı

**FWHM** : Tam genişlik yarı maksimum

**Ga** : Galyum

**h $\nu$**  : Foton enerjisi

**I–V** : Akım–gerilim karakteristiği

**ITO** : İndiyum Kalay Oksit

**SEM** : Taramalı Elektron Mikroskobu

**SSP** : Size–Strain Plot

**UV–Vis** : Ultraviyole–Görünür Bölge Spektroskopisi

**XRD** : X-Işını Kırınımı

$\epsilon$  : Mikrogerinim

$\Psi$  : Elektrik Alan Bileşeninin Genlik Oranı

$\Delta$  : Elektrik Alan Bileşeninin Faz Farkı

## 1. GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişen teknoloji, yarıiletken malzemelere olan ihtiyacı artırmakta ve bu malzemelerin farklı uygulama alanlarında kullanımını çeşitlendirmektedir. Optoelektronik cihazlardan fotovoltaiik sistemlere kadar geniş bir alanda kullanılan yarıiletken malzemeler, düşük maliyetli ve çevre dostu özelliklere sahip oksit tabanlı ince filmlerle daha da popüler hale gelmiştir. Kadmiyum oksit (CdO) ince filmler n-tipi yarıiletken malzemelerden olup yüksek optik geçirgenliğe, geniş bant aralığına (2.2-2.5eV) ve düşük elektriksel dirence sahip olması sebebiyle dikkat çekmektedir. Bu özelliklerinden dolayı CdO şeffaf iletken elektrotlar, gaz sensörleri ve güneş hücreleri gibi teknolojik uygulamalarda tercih edilmektedir. CdO'nun fiziksel ve morfolojik özelliklerini mevcut halinden daha fazla geliştirmek, bu malzemenin çok daha geniş bir uygulama alanında kullanılabilmesi için oldukça önemlidir. (Aydoğu, Çabuk & Çoban, 2019).

Katkılama işlemleri, CdO gibi yarıiletkenlerin özelliklerini kontrol etmek ve performanslarını en iyi hale getirebilmek için etkili bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Yarıiletken araştırmalarında yaygın olarak kullanılan katkılama işlemi, malzemelerin optik, elektriksel ve yapısal özelliklerini değiştirme kapasitesine sahiptir. Literatürde, CdO ince filmlerin katkılanması üzerine yapılan çalışmalarda galyum (Ga) ve boron (B) gibi katkı malzemelerinin, CdO'nun optoelektronik performansını anlamlı ölçüde artırdığı görülmektedir. (Al-Hardan et al., 2017). Galyum (Ga), yüksek iyonik yarıçapı ve iletkenlik özellikleriyle CdO ince filmlerine katkı yapıldığında bant aralığını genişletmekte ve serbest taşıyıcı yoğunluğunu artırmaktadır. Bu özellikler, optoelektronik cihazlarda yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesine olanak tanır. Ga katkısının ayrıca CdO'nun kristal yapısını stabilize ederek yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği literatürde rapor edilmiştir (Al-Hardan et al., 2017). Benzer şekilde, Boron (B), ametal bir katkılama olarak CdO'nun optik geçirgenliğini artırmak ve elektriksel iletkenliğini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bor katkısı, malzemenin mikro yapısında düzenlemeler yaparak daha homojen bir film oluşumunu sağlamaktadır (Chen et al., 2018). Ayrıca, bor katkılmasının CdO'nun optik band aralığını ayarlayarak fotovoltaiik uygulamalarda kullanım potansiyelini artırdığı ifade edilmektedir (Jain et al., 2021). Son yıllarda, iki farklı elementin eş zamanlı katkılanması (eş-katkılama) yöntemi, yarıiletken malzemelerin özelliklerini daha verimli bir şekilde iyileştirmek için umut vaat eden bir strateji olarak öne çıkmıştır (Singh & Bharti, 2022). Galyum ve boron elementlerinin eş-katkılanması, CdO ince filmlerinin fiziksel özelliklerinde sinerjik bir iyileştirme sağlamayı vaat etmektedir. Ancak literatürde, Ga ve B eş-katkılanmasının CdO'nun özellikleri üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde inceleyen çalışmalar

sınırlıdır. Bu eksikliği gidermek amacıyla, bu tez çalışmasında elektrodpozisyon yöntemi kullanılarak üretilen CdO ince filmleri üzerinde Ga ve B eş-katkılamasının etkileri araştırılmıştır.

Elektrodpozisyon yöntemi, düşük maliyeti, çevre dostu yapısı ve üretim sürecindeki kontrol kolaylığıyla, ince film üretiminde tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu çalışmada, elektrodpozisyon yöntemiyle üretilen CdO ince filmlerinin katkı oranları ve üretim koşulları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Katkılamasının CdO ince filmlerinin yapısal, optik ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve bu özelliklerin literatürdeki bulgularla karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçların, CdO tabanlı ince film malzemelerin geliştirilmesine yönelik çalışmalara önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, galyum ve boron eş-katkılamasının CdO ince filmlerinin özellikleri üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemek ve bu malzemelerin optoelektronik uygulamalardaki potansiyelini ortaya koymaktır.

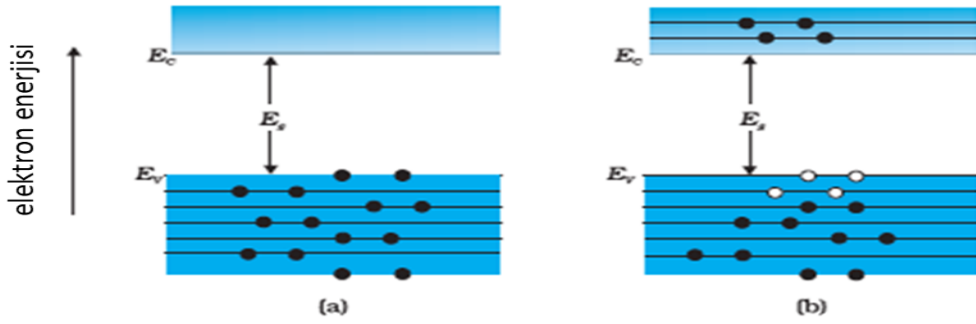
Literatürde, Ga ve B katkılarının ayrı ayrı CdO ince filmlerindeki etkileri üzerine birçok çalışma bulunmakla birlikte, bu iki elementin eş zamanlı katkılamasının malzeme özelliklerine olan sinerjik etkilerini sistematik ve kapsamlı biçimde ele alan araştırmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, elektrodpozisyon yöntemiyle üretilen CdO ince filmlerinde Ga ve B eş-katkılamasının yapısal, optik ve morfolojik özellikler üzerindeki etkilerini kapsamlı olarak değerlendirerek, literatürdeki bu önemli boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Elde edilen bulguların, CdO tabanlı ince film malzemelerin performansını artırmak ve optoelektronik cihazlarda daha verimli kullanımını sağlamak adına yeni stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

## 2. YARIİLETKENLER VE ÖZELLİKLERİ METALLERİN, İLETKENLERİN VE YARI İLETKENLERİN SINIFLANDIRILMASI

### 2.1. Saf Yarıiletkenler

Doğadaki tüm maddeler elektriksel iletkenliğe göre yalıtkanlar, yarıiletkenler ve iletkenler olarak sınıflandırılır. İletkenler, çok düşük özdirençlere (veya yüksek iletkenliğe) sahiptirler. Yalıtkanlar, yüksek özdirençlere (veya düşük iletkenliklere) sahiptirler. Yarıiletkenler, metaller ve yalıtkanların ara direncine veya iletkenliğine sahiptirler.

Bohr atom modeline göre, izole edilmiş bir atomda, elektronlarının enerjisi, içinde döndüğü yörünge tarafından belirlenir. Ancak atomlar bir katı oluşturmak için bir araya geldiklerinde birbirlerine yakındırlar. Bu nedenle, komşu atomların elektronlarının dış yörüngeleri birbirine çok yakın olur veya hatta örtüşebilir. Bu, bir katıdaki elektron hareketinin doğasını, izole edilmiş bir atomdakinden çok farklı hale getirir. Kristalin içinde her elektronun kendine özgü bir konumu vardır ve hiçbir iki elektron çevreleyen yüklerin tam olarak aynı modelini görmez. Bu nedenle, her elektronun farklı bir enerji seviyesi olacaktır. Sürekli enerji değişimine sahip bu farklı enerji seviyeleri, enerji bantları adı verilen şeyi oluşturur. Değerlik elektronlarının enerji seviyelerini içeren enerji bandına değerlik bandı denir. Değerlik bandının üzerindeki enerji bandına iletim bandı denir. Hiçbir dış enerji olmadığında, tüm değerlik elektronları değerlik bandında yer alacaktır (Balkan & Erol, 2021) İletkenlik bandındaki en düşük seviye, değerlik bandının en yüksek seviyesinden daha düşük olursa, değerlik bandındaki elektronlar kolayca iletkenlik bandına geçebilir. Normalde iletkenlik bandı boştur. Ancak değerlik bandında üst üste geldiğinde elektronlar serbestçe geçebilir. Bu, metalik iletkenlerde görülen bir durumdur. İletkenlik bandı ile değerlik bandı arasında bir boşluk varsa, değerlik bandındaki elektronların hepsi bağlı kalır ve iletkenlik bandında serbest elektron bulunmaz. Bu, malzemeyi bir yalıtkan yapar. Ancak değerlik bandındaki elektronların bazıları, iletkenlik bandı ile değerlik bandı arasındaki boşluğu geçmek için harici enerji kazanabilir. Daha sonra bu elektronlar iletkenlik bandına hareket edecektir. Aynı zamanda değerlik bandında diğer değerlik elektronlarının hareket edebileceği boş enerji seviyeleri yaratacaklardır. Böylece süreç, iletkenlik bandındaki elektronlar ve değerlik bandındaki boşluklar nedeniyle iletkenlik olasılığını yaratır (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1.** (a)  $T = 0$  K'de saf bir yarıiletken yalıtkan gibi davranır. (b)  $T > 0$  K'de, termal olarak üretilen dört elektron-delik çifti. Dolu daireler elektronları, boş daireler delikleri temsil eder (Kuldeep, 2022).

Yarıiletkenlerin bir formuna saf yarıiletken denir. Saf yarıiletkendeki iletim, termal uyarılma veya kristal kusurlarından kaynaklanır. Si ve Ge kullanılan en önemli iki yarıiletkendir. Diğer örnekler arasında Galyum Arsenit GaAs, İndiyum Antimonid (InSb) vb. bulunur.  $N$  atom içeren Si veya Ge kristali durumunda ne olduğunu düşünelim. Si için en dıştaki yörünge üçüncü yörüngedir ( $n = 3$ ), Ge için ise dördüncü yörüngedir ( $n = 4$ ). En dıştaki yörüngedeki elektron sayısı 4'tür (2s ve 2p elektronları). Dolayısıyla, kristaldeki toplam dış elektron sayısı  $4N$ 'dir. Dış yörüngedeki mümkün olan maksimum elektron sayısı 8'dir (2s + 6p elektronları). Dolayısıyla,  $4N$  değerlik elektronu için  $8N$  kullanılabilir enerji durumu vardır. Bu  $8N$  ayrı enerji seviyeleri, kristaldeki atomlar arasındaki mesafeye bağlı olarak sürekli bir bant oluşturabilir veya farklı bantlarda gruplanabilir (Tsirelson & Ozerov, 2020).



**Şekil 2.2.** Bir yarıiletkende 0 K'daki enerji bantı konumları (Kuldeep, 2022).

Si ve Ge'nin kristal kafeslerindeki atomlar arasındaki mesafede, bu  $8N$  durumlarının enerji bantı, bir enerji boşluğu  $E_g$  ile ayrılmış olan ikiye bölünür (Şekil 2.2). Mutlak sıfır sıcaklığında  $4N$  değerlik elektronları tarafından tamamen işgal edilen alt bant değerlik bantıdır.  $4N$  enerji durumlarından oluşan diğer bant, iletim bantı olarak adlandırılır ve mutlak sıfırda tamamen boştur. İletkenlik bantındaki en düşük enerji seviyesi  $E_c$  olarak gösterilir ve değerlik bantındaki en yüksek enerji seviyesi  $E_v$  olarak gösterilir.  $E_c$ 'nin üstünde ve  $E_v$ 'nin altında, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, çok sayıda birbirine yakın enerji seviyesi vardır. Değerlik bantının tepesi ile iletim bantının altı arasındaki boşluğa enerji bant aralığı (Band gap energy,

E<sub>g</sub>) denir. Malzemeye bağı olarak büyük, küçük veya sıfır olabilir. Saf bir yarıiletkende boşlukların sayısı serbest elektronların sayısına eşittir (Somano, 2022).

## 2.2. Katkılı Yarıiletkenler

Saf bir yarıiletkenin iletkenliği sıcaklığına bağıdır, ancak oda sıcaklığında iletkenliği çok düşüktür. Bu nedenle, bu yarıiletkenler kullanılarak önemli elektronik cihazlar geliştirilemez. Dolayısıyla iletkenliklerini iyileştirme zorunluluğu vardır. Bu, safsızlıklardan yararlanılarak yapılabilir. Saf yarıiletkene uygun bir safsızlıktan küçük bir miktar, örneğin birkaç milyonda bir parça eklendiğinde, yarıiletkenin iletkenliği çok fazla artar. Bu tür malzemelere katkı yarıiletkenler veya safsızlık yarıiletkenleri denir. İstenen bir safsızlığın kasıtlı olarak eklenmesine katkılama denir ve safsızlık atomlarına katkılayıcılar denir. Bu tür bir malzemeye katılanmış yarıiletken de denir. Katkılayıcı, orijinal saf yarıiletken kafesini bozmayacak şekilde olmalıdır. Kristaldeki orijinal yarıiletken atom yerlerinden yalnızca birkaçını kaplar. Bunu elde etmek için gerekli bir koşul, katkılayıcının ve yarıiletken atomlarının boyutlarının neredeyse aynı olmasıdır. Tetravalent Si veya Ge'yi katkılamak için kullanılan iki tür katkı vardır (Cook, 2022).

Beşli (değerlik 5); Arsenik (As), Antimon (Sb), Fosfor (P), vb. gibi.

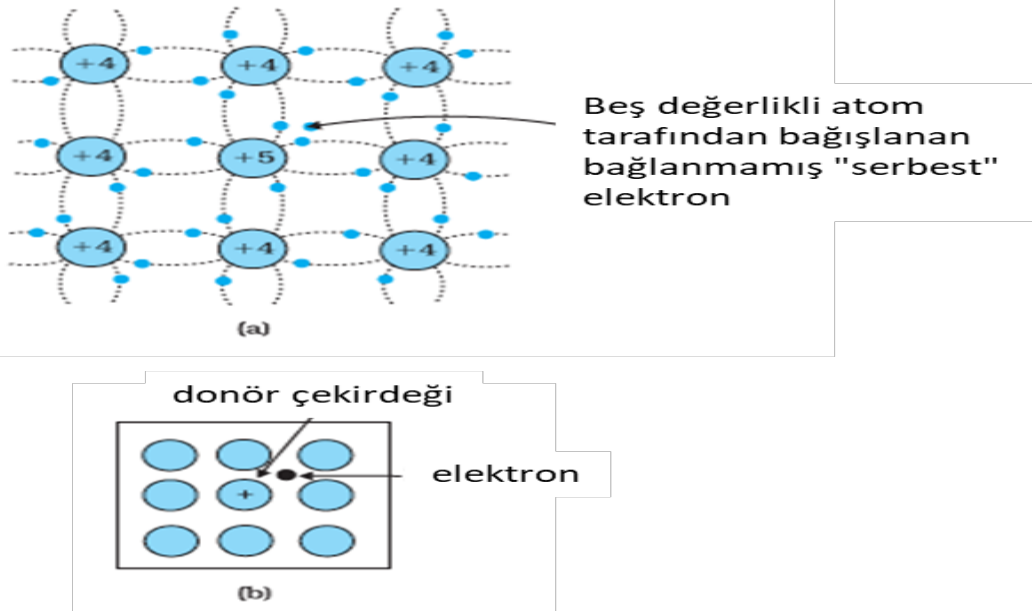
Üçlü (değerlik 3); İndiyum (In), Bor (B), Alüminyum (Al), vb. gibi.

Katkılamamanın yarıiletkenlerin yük taşıyıcılarının sayısını (ve dolayısıyla iletkenliğini) nasıl değiştirdiğine baktığımızda; Si veya Ge, periyodik tabloda dördüncü gruba aittir ve bu nedenle, katkı elementi yakındaki beşinci veya üçüncü gruptan seçilmekte ve katkı atomunun boyutunun Si veya Ge'ninkiyle neredeyse aynı olması beklenmektedir. İlginç bir şekilde, Si veya Ge'deki beşli ve üç değerli katıklar aşağıda tartışıldığı gibi tamamen farklı iki tür yarıiletken verir.

### 2.2.1. n-tipi Yarıiletken

Diyelim ki Si veya Ge'yi Şekil 2.3'te gösterildiği gibi beş değerlikli bir elementle katıyoruz. +5 değerlikli bir element atomu Si'nin kristal kafesindeki bir atomun pozisyonunu işgal ettiğinde, elektronlarından dördü dört silikon komşusuyla bağı yaparken beşincisi ana atomuna çok zayıf bir şekilde bağı kalır. Bunun nedeni, bağlanmaya katılan dört elektronun beşinci elektron tarafından atomun etkin çekirdeğinin bir parçası olarak görülmesidir. Sonuç olarak, bu elektronu serbest bırakmak için gereken iyonlaşma enerjisi çok küçüktür ve oda sıcaklığında bile yarıiletkenin kafesinde serbestçe hareket edebilir. Beş değerlikli katkı maddesi iletkenlik için bir ekstra elektron bağışlar ve bu nedenle donör kirliliği olarak bilinir. Katkı maddesi atom-

ları tarafından iletkenlik için kullanılabilir hale getirilen elektron sayısı büyük ölçüde katkılama seviyesine bağlıdır ve ortam sıcaklığındaki herhangi bir artıştan bağımsızdır (Venkatesh vd., 2024).

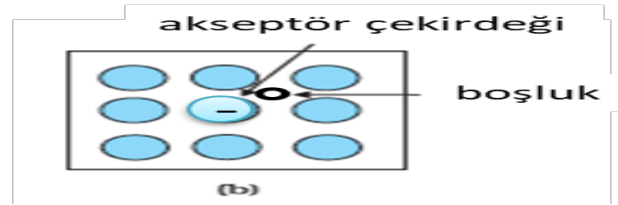
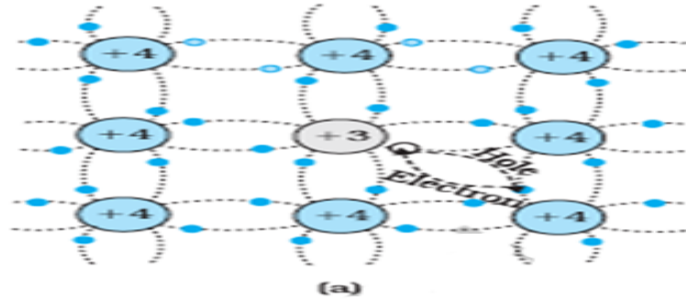


**Şekil 2.3.** (a) Tetravalent Si veya Ge için katkılanmış beş değerlikli donör atom (As, Sb, P, vb.) n tipi yarıiletken verir ve (b) n-tipi malzemenin yaygın olarak kullanılan şematik gösterimi (Kuldeep, 2022).

Öte yandan, Si atomları tarafından üretilen serbest elektronların (eşit sayıda deliğe sahip) sayısı sıcaklıkla zayıf bir şekilde artar. Katkılanmış bir yarıiletkende, toplam iletken elektron sayısı  $n_e$ , donörler tarafından sağlanan elektronlardan ve saf olarak üretilenlerden kaynaklanırken, toplam delik sayısı  $n_h$  yalnızca içsel kaynaktan gelen deliklerden kaynaklanır. Ancak deliklerin yeniden birleşme oranı, elektron sayısındaki artış nedeniyle artacaktır. Sonuç olarak, delik sayısı daha da azalacaktır. Böylece, uygun katkılama seviyesiyle iletken elektronların sayısı deliklerin sayısından çok daha büyük yapılabilir. Bu nedenle, beş değerlikli safsızlıkla katkılanmış bir katkılı yarıiletkende, elektronlar çoğunluk taşıyıcıları ve delikler azınlık taşıyıcıları haline gelir. Bu yarıiletkenler, bu nedenle, n-tipi yarıiletkenler olarak bilinir (Jain, 2022).

### 2.2.2. p-tipi Yarıiletken

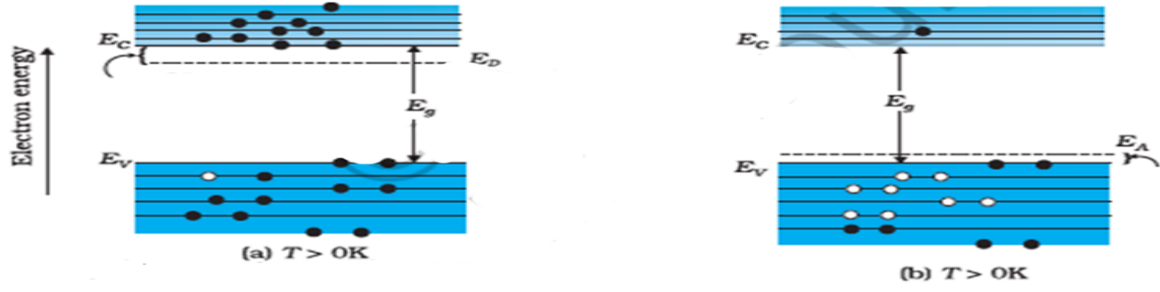
Bu tip bir yarıiletken, Si veya Ge'nin Al, B, In, vb. gibi üç değerlikli bir safsızlıkla katılanmasıyla elde edilir. Katkı maddesinin Si veya Ge'den bir değerlik elektronu eksiktir ve bu nedenle bu atom komşu üç Si atomuyla kovalent bağlar oluşturabilir ancak dördüncü Si atomuna sunacak elektronu yoktur. Bu nedenle dördüncü komşu ile üç değerlikli atom arasındaki bağ, Şekil 2.4 de gösterildiği gibi bir boşluğa veya deliğe sahiptir.



**Şekil 2.4.** (a) Tetravalent Si veya Ge kafes içinde katkılanmış üç değerlikli alıcı atom (In, Al, B vb.) p tipi yarıiletken verir. (b) p tipi malzemenin yaygın olarak kullanılan şematik gösterimi (Kuldeep, 2022).

Kafesteki komşu Si atomu bir boşluk yerine bir elektron istediğinden, komşuluktaki bir atomun dış yörüngesindeki bir elektron bu boşluğu doldurmak için atlayabilir ve kendi yerinde bir boşluk veya delik bırakabilir. Böylece delik iletim için kullanılabilir hale gelir. Üç değerlikli yabancı atom komşu Si atomuyla dördüncü elektronu paylaştığında etkili bir şekilde negatif yüklü hale gelmektedir. Bu nedenle, p-tipi malzemenin katkı maddesi atomu, Şekil 2.4 (b)'de gösterildiği gibi ilişkili deliğiyle birlikte bir negatif yükün çekirdeği olarak ele alınabilir. Bir alıcı atomun bir delik verdiği açıktır. Bu delikler, saf olarak üretilen deliklere ek olarak bulunurken, iletim elektronlarının kaynağı yalnızca saf üretimdir. Bu nedenle, böyle bir malzeme için delikler çoğunluk taşıyıcıları ve elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır. Bu nedenle, üç değerlikli safsızlıkla katkılanmış yarıiletkenlere p-tipi yarıiletkenler denir (Nogueira vd., 2024)

Yarıiletkenin enerji bandı yapısı katkılamadan etkilenir. Katkılı yarıiletkenlerde, verici safsızlıkları ( $E_D$ ) ve alıcı safsızlıkları ( $E_A$ ) nedeniyle ek enerji durumları da mevcuttur. n-tipi Si yarıiletkeninin enerji bandı diyagramında, verici enerji seviyesi  $E_D$ , iletim bandının alt  $E_C$ 'sinin biraz altındadır ve bu seviyedeki elektronlar çok az enerji kaynağıyla iletim bandına hareket eder. Oda sıcaklığında, verici atomların çoğu iyonlaşır ancak çok az Si atomu iyonlaşır. Bu nedenle, Şekil 2.5 (a)'da gösterildiği gibi, iletim bandında verici safsızlıklarından gelen en fazla elektron olacaktır. Benzer şekilde, p-tipi yarıiletken için, alıcı enerji seviyesi  $E_A$ , Şekil 2.5(b)'de gösterildiği gibi, değerlik bandının üst  $E_V$ 'sinin biraz üzerindedir. Çok az enerji kaynağıyla değerlik bandından bir elektron  $E_A$  seviyesine atlayabilir ve alıcıyı negatif olarak iyonlaştırabilir. Alternatif olarak, çok az enerji verilmesiyle  $E_A$  seviyesindeki deliğin valans bandına doğru batmasını da söyleyebiliriz. Elektronlar dışarıdan enerji aldıklarında yükselir ve delikler aşağı düşer (Sze, Li, & Ng, 2021).



Şekil 2.5. a)  $T > 0K$ 'de n-tipi yarıiletkenin, (b)  $T > 0K$ 'de p-tipi yarıiletkenin enerji bantları (Kuldeep, 2022).

### 2.3. Yarıiletken İnce Filmler

Yarıiletken ince filmler, optoelektronik, malzeme bilimi ve daha fazlası gibi endüstrileri kapsayan çeşitli teknolojik uygulamalarda önemli bir rol oynar. Esasen, mekanik esneklik, optik şeffaflık ve elektriksel iletkenlik gibi artan özellikler göstermelerini sağlayan yüksek bir yüzey-hacim oranına ve nanometre ölçeğinde kalınlığa sahiptirler. Bu benzersiz özellikler, malzemelere belirgin ve genellikle geliştirilmiş özellikler kazandırarak onları toplu muadillerinden ayırır. Kişiyeye özel özellikler, yüzey modifikasyonu, minyatürleştirme, geliştirilmiş verimlilik, çok yönlülük, maliyet etkinliği, araştırma ve geliştirme ve uyarlanabilirlik gibi benzersiz nitelikleri nedeniyle son derece avantajlıdır ve bu da onları çağdaş endüstri ve teknoloji için vazgeçilmez kılar. Bu nedenle, yarıiletken ince filmler çeşitli sektörlerde ve teknolojik alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Qi vd., 2025). Sensörlerde, ince film transistörlerinde ve entegre devrelerde işlevsel katmanlar olarak elektronik ve yarıiletken üretiminde kullanılırlar, elektronik cihazları daha küçük hale getirir ve daha iyi performans göstermelerine yardımcı olurlar. Işık geçirgenliğini, soğurma ve yansımaları kontrol etmek için optik ve elektronik uygulamalarda fotovoltajik hücreler, yansıma önleyici kaplamalar, optik filtreler vb. gibi çeşitli ince film kaplamalar bulunmaktadır (Naveed, 2025).

Yarıiletken ince filmler, örneğin çizilmez, korozyona dayanıklı ve kendi kendini temizleyen kaplamaların dayanıklılığını ve görsel çekiciliğini artırmak için otomobil sektöründe kullanılır (Shabbir vd., 2025). Ayrıca, elektrokimyasal reaksiyonlar, ışık emilimi ve şarj depolama için aktif katmanlar olarak işlev gören yakıt hücreleri, piller ve güneş hücreleri gibi enerjiyle ilgili teknolojiler için de önemlidir. Dahası, yarıiletken ince filmler ilaç verme sistemleri, biyosensörler ve tıbbi implantlar gibi biyomedikal uygulamalarda tedaviler ve teşhisler için biyouyumlu ve işlevsel yüzeyler sağlar (Fan vd., 2024). Ayrıca, ince filmler paketleme, havacılık, NASA, telekomünikasyon ve diğer birçok alan dahil olmak üzere çok çeşitli endüstrilerde kullanılır ve çeşitli endüstrilerdeki çok yönlülüğünü ve etkisini gösterir (Orlandi vd., 2024). Yarıiletken ince filmler çeşitli teknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığından, bunların

hazırlanması ve optik ve elektriksel özellikleri hakkında daha fazla bilgi edinmemiz gerekir. Yarıiletken ince filmlerin hazırlama tekniklerine ilişkin derinlemesine bir anlayışla, film bileşimi, kalınlığı ve yapısı üzerinde hassas kontrol geliştirilebilir ve hedeflenen uygulamalar için özelleştirilmiş özellikler sağlanabilir. Uygun ışık emilimi, iletimi ve yansıtma özelliklerine sahip cihazlar tasarlamak, ince filmlerin optik özelliklerinin anlaşılmasını da gerektirir. Ancak, cihaz performansının elektrik ve optoelektronik uygulamalar için optimize edilmesi, yarıiletken ince filmlerin özdirenç, bant aralığı ve iletkenlik gibi özelliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektirir. Yeniliği teşvik etme ve çeşitli sektörleri dönüştürme potansiyeline sahip olduğundan, ince film bilimi ve teknolojisine ilişkin anlayışımızı genişletmeye devam etmek hayati önem taşımaktadır (Seshan & Schepis, 2018).

**Tablo 2.1.** Farklı tipteki ince film biriktirme teknikleri.

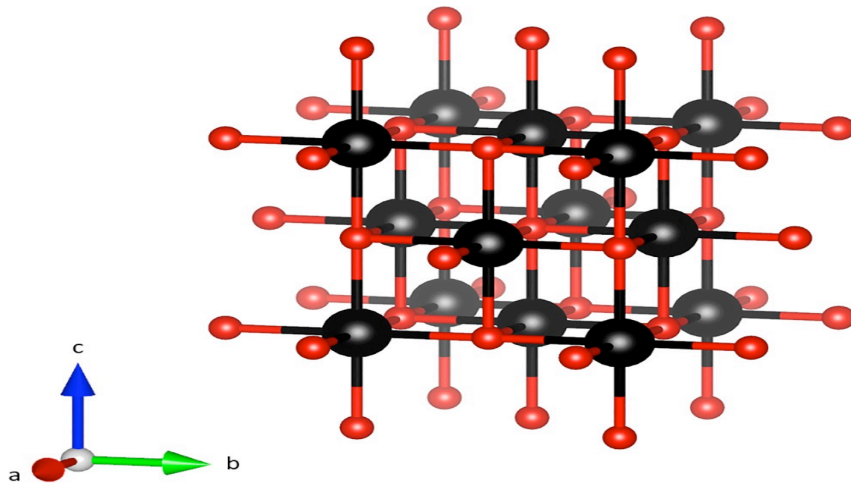
Vakum tabanlı	Fiziksel Buhar Biriktirme
	Düşük Basıncı Kimyasal Buhar Biriktirme
	Plazma Destekli Kimyasal Buhar
	Sıcak duvar ve soğuk duvar CVD
	Atomik Katman Biriktirme
Çözelti süreçli (vakum gerektirmeyen)	Atmosferik Basıncı Kimyasal Buhar Biriktirme
	Kimyasal Banyo Biriktirme
	Spin-kaplama
	Elektrodepozisyon
	Sol-jel
	Sprey Piroliz
	Anotlama İşlemi
Karma	Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme

Yarıiletken ince filmler için biriktirme çeşitli yollarla elde edilebilir. Daha fazla son işlem veya tavlama prosedürleri yapısal bütünlüğü ve iletkenliği daha da iyileştirebilir. Bu işlem seçimi mevcut kaynaklara, maliyete, doğruluğa ve belirli uygulamalara bağlıdır. İzlenecek tekniğe bağlı olarak kaplama işleminde farklı malzemeler kullanılır. Kaplamaya bağlı olarak ince filmler farklı özellikler gösterir. Bazen, ince filmin performansını değiştirmek veya iyileştirmek için yabancı elementler eklenir. Biriktirme teknikleri genel olarak vakum tabanlı ve çözeltiyle

işlenmiş (vakum tabanlı olmayan) olarak ayrılabilir (Butt, 2022). Vakum tabanlı teknikler için düzgün bir şekilde yüksek kaliteli ince filmler üretmek için düzenlenmiş bir vakum ortamı gereklidir. Çözelti ile işlenmiş yöntemler gibi vakum tabanlı olmayan teknikler, atmosfer basıncında çalışır ve vakum işlemlerinden daha basit kurulumlara sahiptir, ancak film kalitesi özellikleri genellikle farklıdır. Yukarıdaki Tablo 2.1’de, üç tür yöntemi göstermektedir: vakum tabanlı, çözelti süreçli ve karma kategori.

#### 2.4. CdO Yarıiletken Bileşiminin Özellikleri

CdO dolaylı bir bant geçişine sahiptir. CdO, güneş spektrumunun spektral bölgesinde yüksek optik geçirgenliğe sahiptir. Bu nedenle, fotovoltaik uygulamalarda tercih edilir (Meshram vd., 2024). CdO direnci çok düşüktür, yaklaşık  $10^{-3} \Omega\text{cm}$ 'dir. CdO'dan yapılan malzemeler düşük dirence ve yüksek kızılötesi görünür dalga boyu geçirgenliğine sahiptir. Bu özelliğinden dolayı, CdO ışık yayan diyotlarda (LED) ve yarıiletken lazerlerde kullanılabilir. Günümüzde birçok optoelektronik uygulamada, hem saf hem de çeşitli metalik iyonlarla katılanmış CdO yarıiletken filmleri kullanılmaktadır (İbrahim, Azab, & Hameed, 2024). CdO'nun elektriksel ve optik özellikleri ( $\text{Cd}^{+2}$ 'nin yarıçapı 0.097 nm'dir) atom yarıçapı ve katlanmış iyonlarının özellikleriyle kontrol edilebilir (Şekil 2.6). CdO, literatürde çeşitli yöntemlerle sentezlenmiştir. Bu yöntemler arasında kimyasal banyo biriktirme (Al-Gaashani vd., 2022), çözelti büyütme (Yılmaz & Şahin, 2023), sol-jel (Kumar & Singh, 2021), kimyasal püskürtme (Zhang & Wang, 2022), DC reaktif manyetik püskürtme (Dubois & Lefebvre, 2023) ve darbeli lazer biriktirme (Al-Dujayli & Ali, 2022) bulunmaktadır.



Şekil 2.6. Kübik CdO kristal yapısı (siyah Cd, kırmızı O) (Spencer vd., 2022).

## 2.5. Galyum (Ga) Elementinin Özellikleri

Periyodik tabloda, galyum elementi IIIA grubunda 31 atom numarasıyla bulunabilir. İlk keşfini yapan kişi olarak Fransa'daki Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran kabul edilir. Bu metalin adının Fransa için kullanılan Latince "Gallia" kelimesinden alındığı anlaşıyor. Oda sıcaklığında neredeyse sıvı olan ve elde tutulduğunda eriyebilen birkaç metalden biri olarak parlak gümüş-beyaz bir renge ve 28.7°C'lik bir erime noktasına sahiptir. Ayrıca canlı renklere sahip birkaç metalden biridir. Ancak galyum insan vücudunda herhangi bir fizyolojik amaca hizmet etmez. İlâveten, galyum; kömür, boksit ve diğer minerallerde bulunan metalik bir eser elementtir. Ortam sıcaklığında neredeyse sıvıdır. Katı halde genişler ve geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Birçok düşük erime noktalı alaşımda önemli bir bileşendir ve yarıiletken teknolojisinde uygulama alanı bulur (de Oliveira vd., 2021).

## 2.6. Bor (B) Elementinin Özellikleri

Bor, Al, Ga ve In gibi bir grup III elementidir ve periyodik tabloda atom numarası 5 ve B sembolü ile gösterilen yarıiletken bir metaldir. Bu elementlerin CdO yapısına katkılanması düşük öz direnç ve n tipi iletkenlik gösterir. Grup III elementleri arasında bor, en düşük iyonik yarıçapa (0.23 Å), en yüksek elektronegatifliğe (2.04 Pauling) ve en yüksek asit mukavemetine (10.7) sahiptir. Bu özelliklerden dolayı, CdO yapısının fiziksel ve kimyasal gelişimine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Düşük bir yarıçapa sahip olmak yüzey alanını artırır ve asit mukavemeti kararlılığı iyileştirmeye yardımcı olabilir. Ek olarak, bor güçlü bir radyasyon kalkanı olabilir (Sicius, 2024).

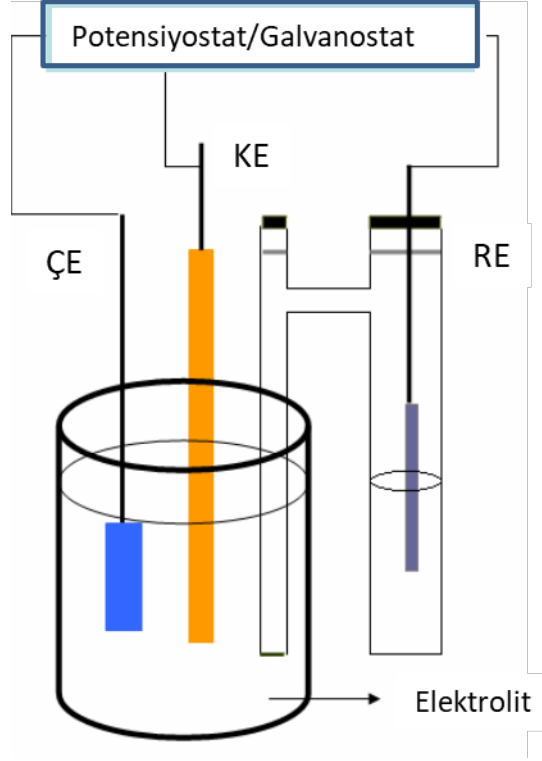
## 2.7. Elektrodepozisyon Yöntemi

Elektrodepozisyon, iletken malzemelerin yüzeyinde katı tortuların hazırlanmasına izin veren bir elektrokimyasal işlemdir. Ticari olarak oldukça önemli bir işlemdir ve elektro-kazanma, rafinasyon ve metal kaplama gibi birçok endüstriyel uygulama için temel oluşturur. Elektrodepozitler, bir elektrokimyasal hücrede geçen bir elektrik akımının etkisiyle oluşur; bu, bir elektrolit içine daldırılmış iki iletken veya yarıiletken elektrottan oluşan bir cihazdır (Erdoğan & Kıyak Yıldırım, 2023). Elektrotlara, elektrodepozitin planlandığı nesneden ve elektrik devresini tamamlamak için gerekli olan karşıt elektrottan (anot) oluşan çalışma elektrodu (katot) denir. Elektrodepozit için elektrolitler genellikle metal tuzlarının çözülmesiyle hazırlanan pozitif ve negatif iyonlar içeren sulu çözeltilerdir. Harici bir voltaj varlığında iki iletken elektrot arasında akan elektrik akımı, yüklü türlerin göç ve difüzyon yoluyla polarize elektrotların yüzeylerine doğru hareket etmesinden kaynaklanır. Elektrotların yüzeyinde, iletim mekanizması

iyonik olandan elektroniğe, iyonik türlerin indirgenmesini veya oksidasyonunu (redoks reaksiyonları) teşvik eden elektrokimyasal reaksiyonların meydana gelmesiyle aracılık edilen bir arayüz işlemine dönüşmelidir (Nazli vd., 2020).

Endüstriyel ölçekte elektrodpozisyon, bir elektrokimyasal hücre ve bir DC akım güç kaynağı gerektirir. Bu yaklaşım nispeten basit ve ucuzdur ve galvanostatik kaplama sistemi olarak bilinir, çünkü elektrotlar arasındaki akım kontrol edilir (sabit tutulur). Bir diğer önemli biriktirme modu ise potansiyatiktir. Bu mod, elektrot yüzeylerindeki elektrokimyasal reaksiyonların dikkatlice incelendiği elektrokimyasal bilimin gelişmesinin bir sonucudur. Elektrokimyacılar, elektrotların yüzeyinin yakınındaki potansiyel düşüşünü ölçmek için referans elektrotlar geliştirdiler. Elektrolitin, elektrotlar arasındaki elektrolitin direnci nedeniyle herhangi bir ohmik voltaj düşüşünü önlemek için yeterli iyon içerdiğini (yeterince yüksek iletkenliğe sahip olduğunu) varsayarsak, pilin uyguladığı tüm voltaj elektrotların yüzeyine yakın bir yerde görünecektir, burada yüklü bir bölge oluşur (genellikle çift katman olarak adlandırılır) (Akhter & Alam, 2023). Bu yüklü bölgelerdeki voltaj düşüşünü ölçmek çok önemlidir, çünkü iyondan indirgenmiş duruma faz dönüşümü için itici gücü kontrol eder. Basit bir metal folyo referans elektrot olarak kullanılabilir; ancak, farklı elektrolitlerle temas halindeki farklı tipteki çalışma elektrotlarının yüzeyindeki potansiyel düşüşlerini ölçmek için standart bir elektrota ihtiyaç duyulması nedeniyle bir hidrojen elektrotu (SHE) seçilmiştir ve artık tüm elektrot potansiyelleri bu keyfi olarak seçilen referans elektrota göre belirtilmektedir. Her zaman ölçülen şey iki elektrot arasındaki potansiyel farkıdır. Hidrojen elektrotunun potansiyelini sıfır olarak tanımlayarak, bu elektrota göre tüm olası redoks reaksiyon potansiyellerinin bir tablosunu oluşturmak mümkündür ve bu potansiyellere standart potansiyeller denir. SHE'den daha sağlam, kararlı ve kolayca inşa edilebilen diğer referans elektrotları laboratuvarında sıklıkla kullanılır ve sabit bir değer eklenerek veya çıkarılarak standart potansiyellere dönüştürülebilen potansiyel ölçümleri verir. En yaygın olanları kalomel elektrot ( $Hg/Hg_2Cl_2$ ) ve gümüş/gümüş klorür elektrottur ( $Ag/AgCl$ ) (Bruno vd., 2023).

Elektrokimyasal bir hücrenin potansiyeli, hücre potansiyeli veya elektromotor kuvveti (emf) olarak da bilinir, indirgeme ve oksidasyon reaksiyonlarının gerçekleştiği katot ve anottaki potansiyel düşüşlerinin toplamıdır. Bir referans elektrodun tanıtılmasıyla, bu iki elektrodun potansiyelleri bağımsız olarak ölçülebilir ve bu da her bir elektrotta (çalışma veya karşı) gerçekleşen reaksiyonların bağımsız olarak incelenmesine olanak tanır (Rafiee vd., 2021).



Şekil 2.7. İnce filmlerin elektrokaplama yöntemiyle biriktirilmesi için kurulumun şematik diyagramı (Kalathur, 2005).

Referans elektrodun tanıtımı, elektrokimyasal ve elektrodepozisyon deneyleri için farklı bir deneysel kurulumla yol açtı. Şekil 2.7, üç elektrotlu çalışma elektrotu (ÇE), referans elektrotu (RE) ve karşı elektrotu (KE) bir elektrokimyasal hücre ve bir potansiyostat göstermektedir. Potansiyostat, çalışma ve karşı elektrotlar arasındaki potansiyel farkını kontrol ederek çalışma ve referans elektrotlar arasındaki potansiyel farkını koruyan bir elektronik cihazdır. Üç elektrotlu hücre ve potansiyostat, potansiyostatik biriktirme modunu etkinleştirir. Potansiyostatik mod, çalışma elektrodunun potansiyelinin deney veya biriktirme işlemi sırasında sabit tutulduğu anlamına gelir. Üç elektrotlu hücre ve potansiyostat, aynı zamanda elektrokimyasal araştırmalar için güçlü bir deneysel araçtır ve voltametri gibi farklı tekniklerin uygulanmasına izin verir. Bu teknik, çalışma elektroduna bir potansiyel rampası uygulanmasından oluşur ve bu, operasyonel amplifikatörün pozitif terminaline bir potansiyel rampası uygulanarak ve ortaya çıkan hücre akımının ölçülmesiyle elde edilir. Uygulanan potansiyel belirli bir seviyeden başlayıp bir süre sonra aynı değere geri döndüğünde, bu tekniğe döngüsel voltametri denir (Shin vd., 2024).

### 3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Z. Ganjiani ve arkadaşları (2016) elektrodepozisyon yöntemi kullanarak FTO kaplı cam alt tabakalar üzerine katılanmamış ve Sn katkılı CdO ince filmleri biriktirmişlerdir. SEM görüntülerinin nano boyutlarda Sn katkılı numuneler için çiçek ve çubuk benzeri morfolojiler gösterdiği belirtilmiştir. Elektriksel incelemeler, CdO ince filmlerinin yüksek yoğunluklu donör seviyelerine sahip n tipi iletkenlik ortaya koyduğunu ve bunun CdO ince filmlerinin kristal yapılarında Sn katyonlarının birleşmesiyle aşıldığını göstermişlerdir.

Yıldırım ve Altıokka (2017) CdO'nun ince filmleri, ITO kaplı cam alt tabakalar üzerine elektrodepozisyon tekniği ile biriktirmişlerdir. Farklı konsantrasyonlarda çeşitli Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> sulu çözeltileri kullanarak ve konsantrasyonun etkilerini detaylı olarak incelemişlerdir. XRD desenlerinden, 0.01 M konsantrasyonda iyi kristalleşmenin oluştuğu tespit etmişlerdir. 0.02 M konsantrasyonun altında, konsantrasyon azaldıkça kristalit boyutu yaklaşık 60 nm'den 38 nm'ye düştüğü ve bunun sonucunda CdO'nun optik bant aralığının 2.63 eV'ye kadar arttığı bulunmuştur. SEM görüntülerinde CdO'nun alt tabakayı iyi bir şekilde kapladığı ve herhangi bir delik, boşluk ve çatlak olmadığını rapor etmişlerdir.

Altıokka ve Yıldırım (2018) CdO'nun ince filmlerini, elektrodepozisyon yöntemi kullanılarak indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam alt tabakalara biriktirmişler. Optik çalışmalar, bant aralığının 2.04 ile 2.41 eV arasında değiştiğini ve pH'a bağlı olduğunu göstermiş. Yüzey morfolojileri SEM görüntüleri ile analiz edilmiş ve filmlerin kompakt bir şekilde biriktirildiğini ve boşluk, çatlak veya iğne deliği olmadığını ortaya koymuşlardır.

Ismail ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada düşük sıcaklık ve ekonomik bir yöntem olarak elektrokimyasal biriktirme tekniği kullanılarak CdO nanorod ince filmlerinin üretmişlerdir. Kadmiyum iyon öncülünün ve alt tabaka tipinin etkisi ile sırasıyla XRD, SEM, UV-Vis ve PL spektroskopisi teknikleri kullanılarak biriktirilen ince filmlerin yapısal, morfoloji ve optik özelliklerini incelenmişlerdir. Sonuçlar, farklı iyon konsantrasyonları ve her iki alt tabaka için CdO ince filmler için yüz merkezli kübik saf bir fazın oluşumunu göstermektedir. Büyüyen numunelerin, ITO alt tabakalar üzerinde artan Cd<sup>2+</sup> iyon konsantrasyonuyla nanotabakalara dönüşen nanorod yüzey morfolojisine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bant aralığı enerjilerinin, molaritenin artmasıyla ITO ve FTO için sırasıyla 2.5 ila 2.2 eV ve 2.5 ila 2.3 eV ortalama değerlere sahip olan Tauc denkleminde tahmin edildiğini belirtmişlerdir. Sonuçların, farklı bant aralığı enerjisine sahip elektrokaplama CdO nanoçubuklarının ve nanolevhalarının optoelektronik cihazların üretimi için umut verici bir aday olduğunu göstermişlerdir.

CdO ince filmlerinin sentezi için elektrodepozisyon yönteminin kullanıldığı, çeşitli hacimlerde elektrolit olarak  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  konsantrasyonunun etkisini araştıran bir çalışmada (Altıokka ve Yıldırım, 2021) CdO ince filmlerinin optik özelliklerinde dikkate değer sonuçların gözleendiği vurgulanmıştır. Kullanılan  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  hacmi arttıkça, bant aralığı da orantılı olarak 2.30 eV'den 2.63'e çıktığı ortaya koyulmuştur.

Busari ve diğerleri (2023) iki elektrotlu elektrodepozisyon tekniği ile, indiyum kalay oksit kaplı cam alt tabakalar üzerinde CdO ve Co-CdO'nun polikristalin ince filmini büyüttüklerini rapor etmişlerdir. EDX analizinden elde edilen sonuçlar beklenen tüm elementleri ortaya koymuştur. XRD analiziyle doğrulanan mikroyapısal SEM görüntüleri, biriktirilen numunelerin CdO ince filmlerinin polikristalin kübik yapısında olduğunu ortaya koymuştur. Optik ve incelenen tüm dielektrik parametreler, numunelerin özelliklerinin büyük ölçüde Co iyon konsantrasyonuna bağlı olduğunu göstermiştir. Optik bant aralığı ayarı, CdO kafesindeki dopantın molar konsantrasyonundaki değişimle gözlenmiştir. Çalışma, Co iyon dopantının dahil edilmesiyle CdO ince filmlerin fiziksel özelliklerinin ayarlanması için yeni bir çözelti büyüme yolunu başarıyla ortaya koymuştur.

Aktaş (2023) yaptığı çalışmasında, CdO ve CdGaO ince filmleri, elektrodepozisyon yöntemi ile düşük molariteli çözeltiler kullanarak iletken ITO kaplı cam alt tabakalar üzerine biriktirmiş ve bazı temel optik parametreleri incelemiştir. Bu analizler sonucunda, CdGaO ince filminin saf CdO'dan daha düşük bir enerji bant aralığına sahip olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, Ga atomlarının varlığının CdO'nun tüm dalga boylarındaki geçirgenlik değerlerini önemli ölçüde artırdığı da rapor etmiştir. Sonuç olarak, her iki ince filmin de düşük emilim kapasitelerine sahip olduğu ve ışığı emmeden ileten bir bileşen olarak güneş hücrelerinde kullanım için uygun olduğunu vurgulamıştır.

Dahivade ve arkadaşları (2024) tarafından tek adımlı elektrodepozisyon yöntemi ile, çeşitli çözelti konsantrasyonları kullanılarak ortam sıcaklığında kadmiyum oksit ince filmlerinin biriktirilmesi için bir araştırma yapmışlardır. Hazırlanan kadmiyum oksit ince filmlerin kübik kristal yapı gösterdiği vurgulanmıştır. Morfolojik inceleme, gözenekli ve granüler yüzey morfolojilerini göstermiştir. Elde edilen maksimum özgül kapasitans 1 M sulu KOH elektrolit çözeltisinde 0.2 M elektrot için 5 mV/S tarama hızında  $476.69 \text{ Fg}^{-1}$  olarak rapor edilmiştir.

Aydın ve Şahin (2017) Zn katkı maddesi ile, Zn-Li, Zn-Na ve Zn-K yardımcı katkı maddelerinin SILAR yöntemi ile büyütülen CdO filmlerinin fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yüzey morfolojisi, parçacık boyutu, kristal yapı, mikro gerinim, dislokasyon yoğunluğu ve optik bant aralığı değerlerindeki değişiklikleri araştırmışlardır. Bu araştırmanın en önemli sonucunu, yardımcı katkı maddesinin nanoyapılı CdO filmlerinin temel fiziksel özellikleri üzerinde etkisinin optoelektronik teknolojisindeki uygulama alanlarına katkısı olarak belirtmişlerdir.

Manjula ve Balu (2017) sprej tekniği ile cam alt tabakalar üzerinde katkısız CdO, Mn katkılı CdO ve (Mn+Cl) eş katkılı CdO ince filmlerin özelliklerini rapor etmişlerdir. XRD çalışmaları, Mn katkılı CdO ve (Mn+Cl) çift katkılı CdO ince filmlerinin, katkısız filme benzer güçlü bir kübik yapı sergilediğini vurgulamışlardır. Eş katkılı filmler için optik şeffaflığın arttığını gözlemlemişlerdir. Eş katkılı filmler için elektriksel özdirencin azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca antibakteriyel çalışmalardan, (Mn+Cl) eş katkılı CdO ince filmlerin patojenik bakterilerin büyümesine direnç gösteren bir antimikrobiyal madde olarak kullanılabileceği ve bu sayede nano ilaç tasarımı, tıbbi ve farmasötik uygulamalar için uygun olduğunu rapor etmişlerdir.

Manjula ve arkadaşları (2017) katkısız CdO, Mn katkılı CdO ve (Mn+F) eş katkılı CdO ince filmleri püskürtme tekniği ile hazırlayarak yapısal, morfolojik, optik, elektriksel, fotoluminesans, manyetik ve antibakteriyel özellikleri incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan, Mn (katyonik) ve F (anyonik) öncül iyonlarıyla eş katkılı CdO filmlerinin optik ve elektriksel özelliklerinin büyük ölçüde arttığı, manyetik ve antibakteriyel özelliklerinin ise orta düzeyde arttığı ve (Mn+F) eş katkılı CdO filmlerinin optoelektronik, spintronik ve farmasötik uygulamalar için uygun olduklarını belirtmişlerdir.

Gürbüz ve diğerleri (2018) SILAR yöntemi kullanılarak katkısız, Mn katkılı ve Mn/Ni eş katkılı CdO filmlerinin morfolojik, yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. SEM görüntüleri tüm numunelerin yanal boyutlu plaka benzeri parçacıklara sahip olduğunu göstermiştir. EDX sonuçlarıyla Mn ve Ni katkılarının herhangi bir kirlilik olmadan konakçı kafese başarıyla eklendiğini rapor etmişlerdir. Numunelerin XRD ölçümlerinin herhangi bir ikincil faz olmaksızın CdO oluşumunu gösterdiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, CdO filmlerinin fiziksel özelliklerinin Mn ve Mn/Ni eş katkı içeriğinin değiştirilerek düzenlenebileceğini ifade etmişlerdir.

Çavuşoğlu ve ark. (2019) SILAR tekniği ile katkısız, Co katkılı ve Co:Al eş katkılı CdO filmlerin yüzey morfolojisi, kristal yapısı ve optik özellikleri üzerindeki etkisi araştırmışlardır.

XRD sonuçlarına göre, tüm Co:Al eş katkılı numunelerin kübik yapıda kristalleştiği tespit edilmiştir. Filmlerin optik bant aralığı değerlerinin 2.45–3.05 eV aralığında olduğu ve Co katkısıyla filmlerin optik bant aralığı değerlerinde 2 bir azalma meydana geldiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, eş katkılı CdO filmlerinin yeni optoelektronik cihazların üretiminde kullanılabilirliğini ifade etmişlerdir.

Şahin (2019) tarafından yapılan bir çalışmada Cu ve Cu ile Ce eş katkılı CdO filmlerinin SILAR metoduyla başarıyla sentezlendiği vurgulanmıştır. Katkı türünün ince filmlerin mikro yapısını değiştirdiği ve elde edilen filmlerin kübik kristalin yapıda CdO olduğu rapor edilmiştir. UV-Vis incelemeleri ile üretilen numunelerin bant aralığı enerjisinin ve geçirgenlik değerlerinin artan Ce içeriği ile arttığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, eş katkılamanın CdO filmlerinin fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu ifade edilmiştir.

Kumar ve arkadaşları (2021) Si alt tabakalar üzerine püskürtme tekniği ile saf-CdO, CdO:Mn, CdO:Fe ve CdO:Fe:Mn ince filmlerini biriktirerek rapor etmişlerdir. Hazırlanan ince filmlerin şeffaf olduğu ve direnç değerlerinin CdO'da katkılama ile artan n tipi yarıiletken davranış gösterdiği vurgulanmıştır. Fototepkisellik ve dış kuantum verimliliğinin, (Mn,Fe) eş katkılama için CdO ince filmlerinde katkısız CdO filmine kıyasla 4 kat arttığını ifade etmişlerdir.

Ünal (2023) çalışmasında Cu ve In katkılı CdO ince filmleri tek adımlı elektrokimyasal biriktirme yöntemi kullanılarak üretmiş ve optik analizlerini UV-vis spektrofotometresi ile incelemiştir. Ayrıca, Cu ve In katkılı ince filmlerin optik dielektrik kayıp değerlerini belirleyerek, gerçek dielektrik sabiti değerlerinin sanal dielektrik sabiti değerlerinden önemli ölçüde yüksek olduğunu ve her iki filmde de dielektrik kayıp değerlerinin oldukça düşük olduğunu rapor etmiştir.

Naeem ve diğeri (2024) sprey pirolizli (Al-Zn) eş katkılı CdO ince filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. XRD analizi ile, (Al-Zn) eş katkılamanın CdO kristaline başarılı bir şekilde dahil edildiğini ve polikristalin doğanın belirgin olduğunu ifade etmişlerdir. Eş katkılamanın, bant aralığı değerlerinin genişlemesine neden olduğunu ve sönüm katsayısında bir azalmanın, Zn katkılama konsantrasyonunun bir fonksiyonu olduğunu vurgulamışlardır.

Karim ve arkadaşları (2025a) katkısız CdO ve Ag-Co eş katkılı CdO ince filmleri, püskürtme yöntemini kullanılarak bir cam alt tabaka üzerine biriktirmişlerdir. Elektronik, fotovoltaik ve güneş pili uygulamaları dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yenilikçi çözümler sunmak için önemli yapısal, morfolojik, optoelektrik özelliklerini araştırarak rapor etmişlerdir. XRD desenlerinde belirtilen hafif sağa doğru tepe konumu kayması, CdO kafesine Ag ve Co'nun başarılı bir şekilde katkıldığını göstermiştir. Taramalı elektron mikroskobu analizi, tüm filmlerin küresel şekilli aglomere tanelere sahip olduğunu ve %3 Ag-Co katkılı CdO filminin diğer filmlere kıyasla pürüzsüz bir yüzey sergilediğini göstermiştir. Bu çalışmadan elde edilen %89'luk maksimum optik geçirgenlik, ışık emiliminin enerji dönüşümü için kritik olduğu güneş pillerindeki uygulamalar için önemli olabileceğini ifade etmişlerdir. Termal analiz sonuçları, termal iletkenliğin, elektronik sensörler ve termoelektrik uygulamalarda yararlı olabilecek katkılama konsantrasyonunun artmasıyla arttığını belirtmişlerdir.

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmanın amacı, saf ve B-Ga tekli ve eş katkılı CdO ince filmleri ITO altlıklar üzerine basit ve uygun maliyetli elektrokimyasal yöntemle geliştirmektir ve eş katkılamanın ince filmlerin fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu hedefe ulaşmak için, öncelikle ITO camları temizlendi ve ardından CdO ince filmler üç elektrotlu bir düzenek elektrokaplandı. Elektrodepozisyon işlemi sırasında, Tek aşamalı üretim sürecinin tamamlanmasının ardından, kalan organik kalıntıları gidermek ve kristal oksit formuna dönüşümü tamamlamak için ısıtım işlemi uygulandı. Son olarak, üretilen ince filmler yapısal, morfolojik ve optik teknikler dahil olmak üzere bir dizi karakterizasyon yöntemi kullanılarak kapsamlı bir değerlendirmeye tabi tutuldu.

### 4.1. Materyal

Çalışmada, saf ve katkılı CdO filmlerinin büyütülmesi için alt tabaka olarak ITO camları (25x25 mm, LT-G001 ITO 15Ω, Lumtec) kullanılmıştır. Film büyütme öncesinde, ITO camlarının temizliği, ultrasonik temizleyicide (Everest CleanEx-2511) damıtılmış su, deterjan, aseton ( $\geq\%99.5$ , Sigma-Aldrich) ve etanol ( $\geq\%99.8$ , Sigma-Aldrich) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ardından alt tabakalar bir fırında (Binder, ED53) kurutulmuştur. Bahsedilen temizleme işlemi iyi yapışma, büyüme çekirdekleşme merkezi ve ince filmlerin homojen sentezini sağlar.

Elektrodepozisyon işlemi için sırasıyla saf, B katkılı, Ga katkılı ve B-Ga eş katkılı CdO oluşumu için dört farklı çözelti hazırlanmıştır. Kaplama çözeltisi olarak kullanılan kimyasallar; Sigma-Aldrich firmasından temin edilen 0.05 M Kadmiyum klorür [ $\text{CdCl}_2$ ] ( $\%99.995$  saflıkta), 0.05 M Sodyum hidroksit [ $\text{NaOH}$ ] ( $\%99.99$  saflıkta), Amonyum hidroksit ( $\%99.99$  saflıkta), ağırlıkça  $\%1.5$  Galyum nitrat [ $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$ ] ( $\%99.9$  saflıkta) ve ağırlıkça  $\%1.5$  Borik asit [ $\text{H}_3\text{BO}_3$ ]'tir ( $\%99.5$  saflıkta). Burada, çalışmada yer alan tüm maddelerin herhangi bir ek işlem yapılmadan satın alındığı gibi kullanıldığına dikkat etmek önemlidir. ITO camları,  $70^\circ\text{C}$ 'de deterjan ve damıtılmış su karışımını içeren bir temizleme işlemine tabi tutuldu, ardından her biri 20 dakika boyunca ultrasonik bir banyoda aseton ve etanol uygulandı ve ardından 15 dakika boyunca  $80^\circ\text{C}$ 'de bir fırında kurutuldu. Başarılı bir şekilde kaplanan numuneler (CdO/ITO) saf su ve alkol ile durulandı. Daha sonra, bu numuneler, istenen CdO fazını elde etmek için 2 saat boyunca  $400^\circ\text{C}$ 'de hava ortamında ısıtım işlemine tabi tutuldu.

## 4.2. Yöntem

### 4.2.1. Saf ve Katkılı CdO İnce Filmlerin Üretilmesi

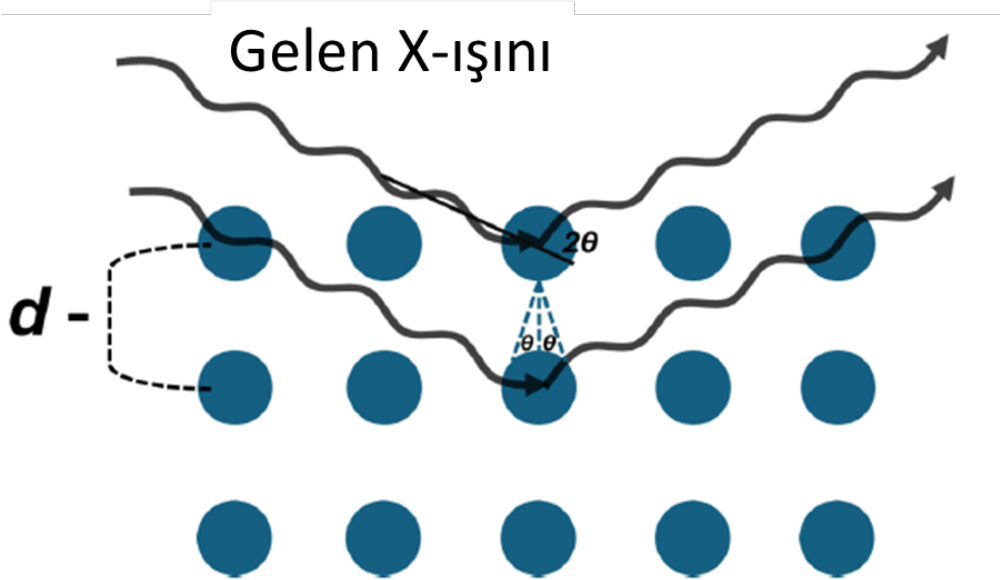
Elektrodepozisyon, özel olarak tasarlanmış kapalı bir cam hücrede bir CHI potansiyostat/galvanostat (CHI Elektrokimyasal Analiz Cihazı) kullanılarak gerçekleştirildi. İndiyum katkılı kalay oksit (ITO) şeffaf cam substrat çalışma elektrodu olarak kullanılırken, platin levha ve gümüş/gümüş klorür elektrottur (Ag/AgCl) sırasıyla karşıt ve referans elektrotlar için kullanıldı. Elektrodepozisyondan önce, ITO cam substratlar aseton, toluen, de-iyonize (DI) su ile durulandı ve ardından damıtılmış suda 20 dakika boyunca ultrasonikasyona tabi tutuldu. Bundan sonra, ITO substrat asit aktivasyonu için nitrik aside (%10 ağırlıkça) daldırıldı ve ardından DI suyu ile durulandı. Elektrolit (banyo) sıcaklığı 70°C'de tutuldu ve çözelti pH'ı 10.5 olarak NH<sub>4</sub>OH kullanılarak ayarlandı. Tüm kimyasallar ticari kaynaklardan temin edildi ve mevcut en yüksek saflıktaydı. Daha fazla saflaştırma yapılmadan kullanıldılar. CdO ince filmlerinin elektrokimyasal birikimi, 1200 saniye boyunca -0.8 V birikim potansiyelinde Kadmiyum Kloridin [CdCl<sub>2</sub>] 0.05M sulu çözeltisinden gerçekleştirildi. Biriktirmeden sonra numuneler elektrolitten çıkarıldı ve DI su ile yıkandı. Daha sonra numuneler sırasıyla 400°C'de 2 saat boyunca hava ortamında tavlandı. Yapısal çalışmalar için 20–80° 2θ aralığında CuK<sub>α</sub> (λ = 1.5405 Å) radyasyonu kullanan X-ışını difraktometresi (Model Philips Xpert Pro) kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Zeiss (Model EVO-50) kullanılarak elde edilmiştir. Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi Bruker-ASX'ten (Model QuanTax 200) elde edilmiştir. Büyütülen filmlerin geçirgenlik spektrumları Perkin Elmer'den (Model Lambda 650) UV-vis spektrofotometresi kullanılarak ölçülmüştür.

Sentezlenen malzemelerin yapısal, optik ve morfolojik özelliklerinin kapsamlı bir analizini gerçekleştirmek için X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (EDS) ve Ultraviyole ve görünür bölge spektrometresi (UV-VIS) metodolojileri kullanılmıştır.

### 4.2.2. X-ışını kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı, XRD olarak da bilinir, çok esnek bir yöntemdir ve element analizi ve faz analizi için kimyasal bilgi sunabilir. XRD incelenecek numunelerin kristalin olmasını gerektirir; yine de yöntem polimerlerdeki kristallik derecesi hakkında bilgi sunabilir. Tarihsel olarak, XRD toplu numuneleri analiz etmek için kullanılmıştır. Ancak, gelişmiş optik teknolojilerinin tanıtılmasıyla, XRD artık ince filmleri analiz etmek için de kullanılabilir. Yaklaşım Bragg kırınım yasasını kullanır. XRD'nin çalışma mekanizması şu şekildedir: Bir katot tüpü, daha

sonra bir numuneye yönlendirilen bir X-ışını demeti üretir. Bir ışık demeti 40 düzenli atom grubundan oluşan bir kristal yapıya çarptığında, dağılmaya neden olur ve ortaya çıkan dağılmış dalgalar birbirleriyle etkileşime girerek birbirlerini güçlendirir veya iptal eder. Kırınımına uğrayan ışınlar daha sonra  $2\theta$  açı yönlerine göre tanımlanır, analiz edilir ve nicelikleri belirlenir. Işınların yapıcı girişimi, Bragg kriterini sağlayan kristal birim hücrelerinin boyutları ve konfigürasyonu tarafından belirlenir (Ali vd., 2022).

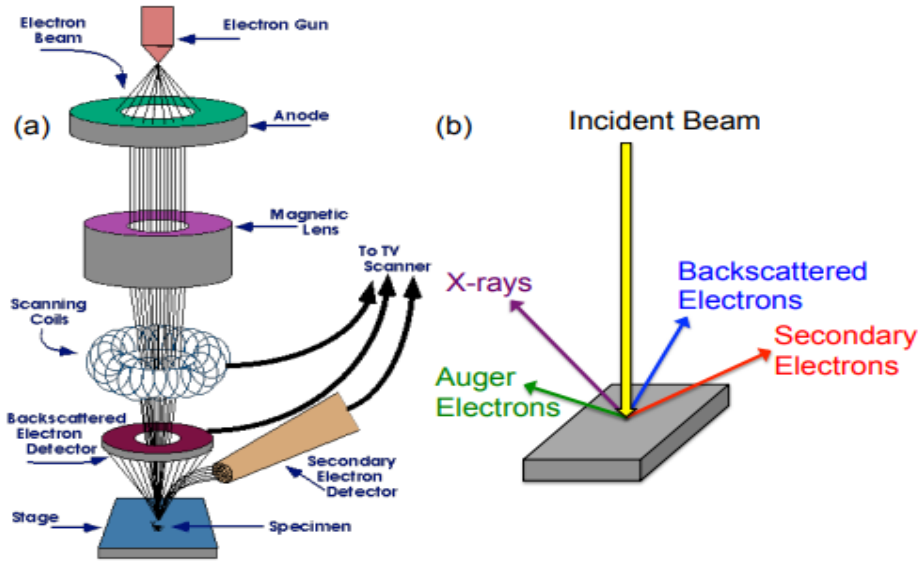


**Şekil 4.1.** Bragg koşulunu karşılamak için şematik çizim. (İç düzlemdeki parçacıklardan saçılan dalga cephesi, dış düzlemdeki saçılan dalga cepheleriyle aynı fazda kalmak için  $2d \sin \theta$  ek bir yol uzunluğu kat etmelidir) (Ortega, 2024).

Şekil 4.1'te gösterildiği gibi, bir iç düzlemden saçılan dalgalar, yapıcı girişim için eş fazlı koşulu karşılamak için  $2d \sin \theta$ 'lik ek bir yol uzunluğu kat etmelidir. Bu yasa, düzenli bir engel dizisinden geçen hemen hemen her dalga cephesi için geçerlidir.

### 4.2.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Bir malzemeyi tarayıp resimler oluşturmak için odaklanmış bir elektron demeti kullanan bir tür elektron mikroskobu taramalı elektron mikroskobudur. Elektronlar numunenin içindeki atomlarla etkileşime girerek, tespit edilebilen ve numunenin yüzey topografisi ve bileşimine ilişkin değerli bilgiler taşıyabilen çeşitli sinyallerin üretilmesine neden olur. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), farklı numunelerin yüzeylerini optik bir mikroskoptan önemli ölçüde daha yüksek çözünürlükte görüntülemek için yüksek enerjili elektronlardan oluşan bir ışın kullanır. Geleneksel makineler, elektron üretmek için ısıtılmış bir telden termiyonik emisyon kullanır. Bu sıcak katottan gelen elektronlar, pozitif yüklü bir anoda çekilerek hızlandırılır. Daha yeni makineler genellikle bir Alan Emisyon Silahı (FEG) ile donatılmıştır. Bu tür bir kaynakta, sivri uçlu bir yayıcı, yakındaki bir elektroda göre yüksek negatif potansiyelde tutulur. Ortaya çıkan gradyan elektrik alanı, elektronların emisyonuna neden olur. Ortaya çıkan ışın, termiyonik kaynaklara kıyasla genellikle daha küçük, daha tutarlı ve daha yüksek parlaklığa sahiptir. Başka bir kaynak türü de Schottky FEG'dir. Bu, iki kaynağın bir tür birleşimidir. Bir elektrik alanı, ısıtılmış bir yayıcı ucundan elektron emisyonuna karşı enerji bariyerini düşürmek için kullanılır. Bu, sistemin termiyonik emisyonunu artırır (Khan, 2025).



Şekil 4.2. (a) Tipik Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kolonunun şematik çizimi ve (b) SEM içindeki numune-ışın etkileşimleri (Walock, 2012).

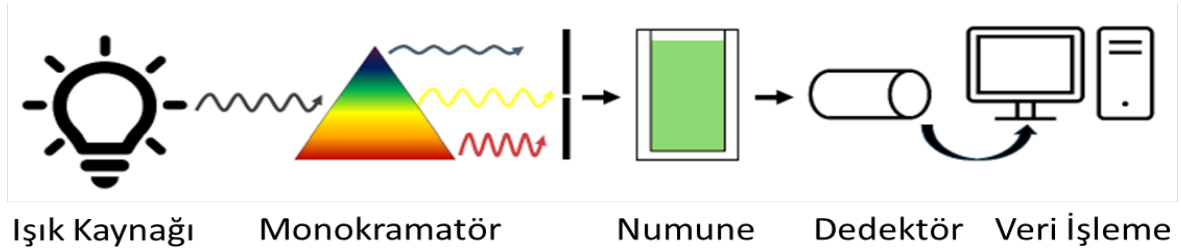
Kaynak ne olursa olsun, elektronların bir kısmı anottan geçecektir. Bunlar, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, bir dizi manyetik mercekle tarafından yalnızca birkaç nanometrelik bir nokta boyutuna odaklanır. Bu yüksek enerjili ışın, numune yüzeyiyle etkileşime girerek ikincil elektronlar, geri saçılmış elektronlar, Auger elektronları, x-ışınları ve ısı üretir.

#### 4.2.4. Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi (EDS)

SEM'e bağlı araçlardan biri de enerji dağılımlı spektrometredir. Bu tür ölçümlerin enerjilerini tanımlamaya dayalı bir işlemdir. Bu, elektron ışınının inişinden (membran ve taban) etkilenen tüm elementler için tablolar biçiminde çok önemlidir çünkü düşen elektronların yüksek yoğunluğu, elektronların malzemenin çekirdeğini söküp bileşimde bulunan her elementi ortaya çıkarma olasılığını artırır (Davies vd., 2022).

#### 4.2.5. Ultraviyole ve Görünür Bölge Spektroskopisi (UV-VIS)

UV/Görünür spektrometreler, bir numunenin belirli bir dalga boyunda veya bir spektrum aralığında tarama yaparak ultraviyole veya görünür ışığın emilimini ölçmek için kullanılır. UV bölgesi 190 ila 400nm arasındayken, görünür bölge 400 ila 800 nm arasındadır. Bir sopupurma spektrometresi, Şekil 4.3'te şematik diyagramı verilen spektrofotometreler, UV ve Görünür kaynaklar gibi ışık kaynakları, belirli dalga boylarını seçmek için bir monokromatör, bir ışın bölücü, numune tutucular, dedektörler, optik filtreler ve sinyal işlemcileri içerir. Ultraviyole alanda (160-375 nm) döteryum lambaları kullanılırken, görünür - yakın kızılötesi bölgede tungsten filamanlı ışıklar kullanılmıştır. Hem referanstan ( $I_0$ ) hem de numuneden ( $I$ ) geçen ışığın yoğunluğu her dalga boyu için ölçülür.  $I$  değeri  $I_0$ 'dan küçükse, numunenin gelen ışığın bir kısmını emdiğini gösterir (Khalid vd., 2024).



Şekil 4.3. Tipik bir UV-VIS absorpsiyon spektrometresinin şematik diyagramı (Ortega, 2024).

İnce filme ışık tuttuğumuzda, film üzerine odaklanan ışığın bir kısmını emer ve bu özelliğin optik emilim adı verilen kısmı, olay ışığın olay fotonlarının malzemedeki elektronlarla etkileşimi sonucu bir kısmını kaybetmesi nedeniyle oluşur. Madde yükleri ile elektromanyetik radyasyona eşlik eden elektrik alanı arasındaki etkileşim, madde emilimi ve optik özellikleri spektrumunun ortaya çıkmasına yol açar. Emilim işlemi yaptığımız modelin içinde veya dışında gerçekleşir ve  $A$ , ince film  $I_A$  tarafından emilen radyasyonun, üzerine düşen radyasyona oranı  $I_0$  olarak tanımlanır ve aşağıdaki ilişkide görüldüğü gibi, birimsizdir:

$$A = \frac{I_A}{I_0} \quad (F.1)$$

Geçirgenliğin sembolü T'dir, iletilen radyasyonun yoğunluğunun, gelen elektromanyetik radyasyonun yoğunluğuna ( $I_0$ ) oranı olarak tanımlanır ve geçirgenlik herhangi bir ölçü biriminden bağımsızdır, herhangi bir birimi yoktur.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (\text{F.2})$$

Radyasyon fotonlarının enerjisi  $h\nu$ , hazırlanan aralığın ( $E_g$ ) enerjisine yaklaşık olarak eşit olduğunda, emilimde hızlı bir artış meydana gelir. Bu, temel emilim kenarı olarak bilinir ve değerlik bandındaki en yüksek nokta ile iletim bandındaki en düşük nokta arasındaki en düşük enerji farkına karşılık gelir. Tüm yarıiletken malzemeler, gelen ışığı hızlı ve keskin bir şekilde emer, ancak bu özellik yalnızca monokristalin malzemelerde mevcuttur; polikristalin yarıiletkenlerde daha az belirgindir (Lee vd., 2022).

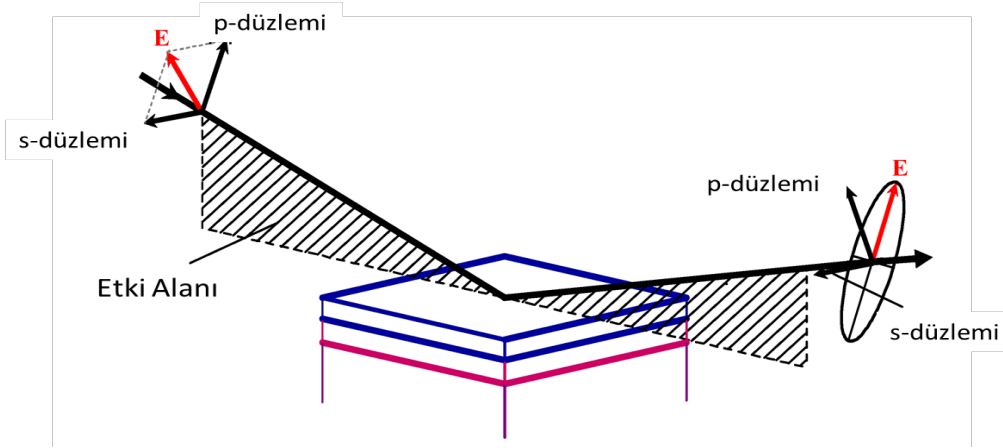
Optik enerji boşluğu, elektronların valans bandının tepesinden iletim bandının altına hareket etmesi için gereken en düşük enerji olarak bilinir. Güneş pilleri, dedektörler, fotodiyotlar ve her iki tipteki güneş kollektörü kaplamaları, iletici ve yansıtıcı gibi elektronik cihazların üretiminde ince film üzerine düşen fotonların enerji aralığı için uygun olan pratik uygulama türü, hazırlanan film için optik enerji boşluğunun değerini hesaplamak gerekir.

#### 4.2.6. Spektroskopik Elipsometri (SE)

Yüzeyleri, arayüzleri ve ince filmleri tanımlamak için etkili bir optik yöntem spektroskopik elipsometri (SE) dir. Şeffaf ince filmlerin kalınlığı ve kırılma indisi, tahribatsız bir yöntem olan SE kullanılarak belirlenebilir. Elipsometri, yansıma veya iletim sırasında ışığın polarizasyon durumundaki değişikliği analiz ederek ince film kalınlığı ( $t$ ) ve optik sabitler ( $n$ ,  $k$ ) gibi temel parametreleri belirler. Yansıma veya iletim sırasında ışığın polarizasyon durumundaki değişikliği inceleyerek, elipsometri ince film kalınlığı ( $t$ ) ve optik sabitler ( $n$ ,  $k$ ) gibi temel parametrelerin hesaplanmasını mümkün kılar. Kırılma indisi ( $n$ ) ve sönüm katsayısı ( $k$ ), her dalga boyunda optik sabitlerin tanımlarıdır. Şeffaf bir filme giren ışığın kırılması, faz hızını da belirleyen indis ( $n$ ) ile belirlenir. Bir maddeden geçen ışığın emilimi, sönüm katsayısı ( $k$ ) ile tanımlanır (Park vd., 2024).

Spektroskopik elipsometre cihazının bileşenleri arasında ışık kaynağı, polarizör, madde, dedektör ve analizör bulunur. Şekil 4.4, SE cihazının çalışma prensibini göstermektedir. Polarizör, Şekil 4.4'de gösterildiği gibi, ışık kaynağından gelen polarize olmayan ışığı doğrusal polarize ışık demetine dönüştürür. Sonuç olarak, incelenen madde doğrusal polarize ışığın polari-

zasyon durumunu değiştirir ve yansıyan ışık genellikle eliptik polarize olur. Malzemenin özellikleri, polarizasyondaki bu ölçülen kayma ile ortaya çıkar.



Şekil 4.4. Elipsometri sisteminin geometrisi (Politano & Versace, 2023)

Elipsometre,  $\Psi$  (Psi) ve  $\Delta$  (Delta) olarak adlandırılan elipsometrik parametreleri ölçmek için kullanılır. p ve s düzlemlerindeki elektrik alan bileşenlerinin genlik oranı ve faz farkı, sırasıyla  $\Psi$  ve  $\Delta$  parametreleri ile gösterilir (Agnihotri vd., 2024).

$\Psi$  ve  $\Delta$  ölçümleri polarizasyon kaymalarının göreceli ölçümleri olduğundan, bu yaklaşım yüksek derecede hassasiyete sahiptir. Bu, tekniğin mükemmel doğruluğunu, tekrarlanabilirliğini ve hassasiyetini açıklamaktadır. SE verileri, diğer tüm deneysel sonuçlar gibi hatalar içerebilir. SE'yi veri toplamak ve analiz görevlerini gerçekleştirmek için kullanırken hatalara yol açabilecek bir dizi durum vardır. Yüzey pürüzlülüğü, düzensiz yüzeyler, yüzey üzerinde dağılmış nanometre boyutundaki moleküller nedeniyle net tabakanın kalınlığının ölçülememesi ve malzemenin tüm yönlerde tutarsız optik özellikleri bu sorunların en yaygın olanlarıdır. Ortalama karesel hata (MSE) parametresi, hata ile ilişkili kavramlardan biridir. SE tekniğindeki ortalama kare hata parametresi, malzemenin kalınlığını ve optik sabitlerinin kesin kalitesini belirler. Ortalama kare hata parametresi, hata ile ilişkili kavramlardan biridir. SE tekniğindeki Ortalama Karesel Hata değeri, malzemenin kalınlığının ve optik sabitlerinin hassasiyetini gösterir. Teorik ve deneysel veriler arasındaki iyi uyum, düşük bir MSE puanı ile gösterilir (Mohamed vd., 2024).

#### 4.2.7. Film Kalınlıklarının Belirlenmesi

Filmlerin kalınlıkları, aşağıda verilen formülle gravimetrik ağırlık farkı yöntemi kullanılarak hesaplandı: (Erdoğan, 2024).

$$t = \frac{M_s - M_i}{A \cdot \rho} \quad (\text{F.3})$$

Bu yöntemde, önce ITO substratları biriktirilmeden önce hassas bir terazide tek tek tartıldı ( $M_i$ ) ve ardından film oluşturulduktan sonra tekrar tartıldı ( $M_s$ ).  $M_s - M_i$ , oluşturulan filmin ağırlığını verdi. Burada,  $\rho$  filmin yoğunluğu ve  $A$ , ITO substratının yüzey alanıdır. Film kalınlığı hesaplanırken, filmin homojen kalınlıkta olduğu varsayıldı ve CdO, bor ve galyum için yoğunluk değeri sırasıyla  $8.15 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.30 \text{ g/cm}^3$  ve  $5.90 \text{ g/cm}^3$  olarak alındı.

Ek olarak, kalınlık sonuçlarını desteklemek için, Faraday yasası aşağıdaki formülle elektrokaplanmış filme uygulanmıştır: (Begué, Cotón, & Ranchal, 2024).

$$T = \frac{(JtM)}{(nF\rho)} \quad (\text{F.4})$$

Burada  $T$  kalınlıktır,  $J$  akım yoğunluğudur ( $\text{A/cm}^2$ ),  $t$  biriktirme süresidir (s),  $M$  moleküler kütedir ( $\text{g/mol}^{-1}$ ),  $n$  biriktirme için gereken elektron sayısıdır,  $F$  Faraday sabitidir ( $96485 \text{ C/mol}$ ) ve  $\rho$  yoğunluktur ( $\text{g/cm}^3$ ).

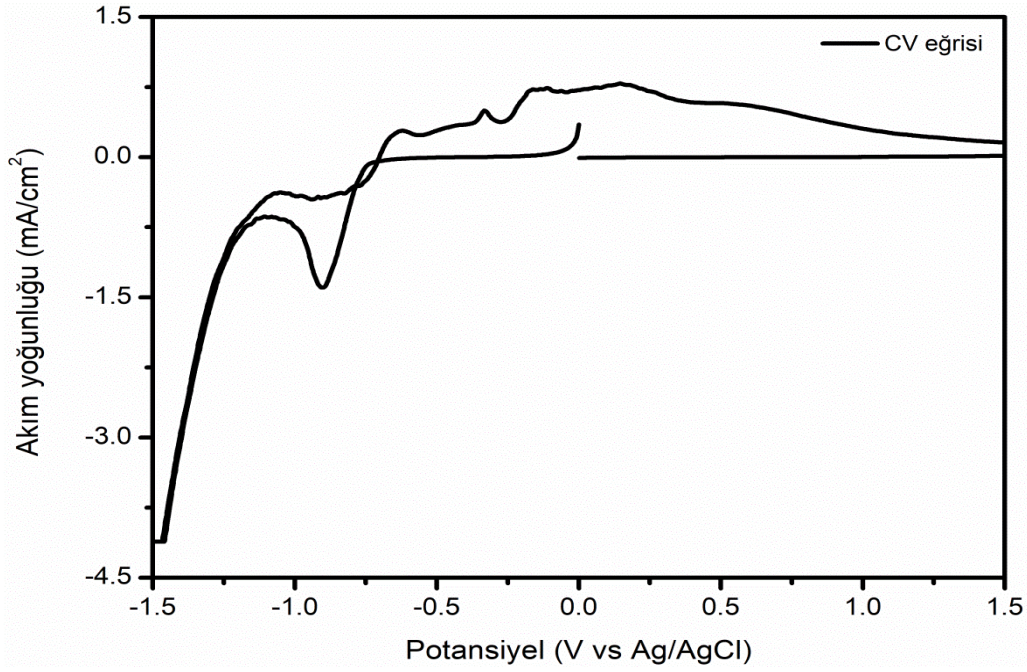
Saf CdO, CdO:B, CdO:Ga ve CdO:B-Ga ince filmler için kalınlık değerlerinin sırasıyla  $322 \text{ nm}$ ,  $324 \text{ nm}$ ,  $325 \text{ nm}$  ve  $330 \text{ nm}$  olduğu bulunmuştur.

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 5.1. Elektrokimyasal karakterizasyon

#### 5.1.1. Döngüsel Voltammetri (CV)

Voltamperometrik analiz sonuçları, uygulanan potansiyelin (E) bir fonksiyonu olarak akım yoğunluğunun evrimini gösteren döngüsel voltamperogramlarda gösterilir (Costa, Codognoto, & Valle, 2018).



Şekil 5.1. CdO ince film üretimi için akım-potansiyel (döngüsel voltametri) eğrisi

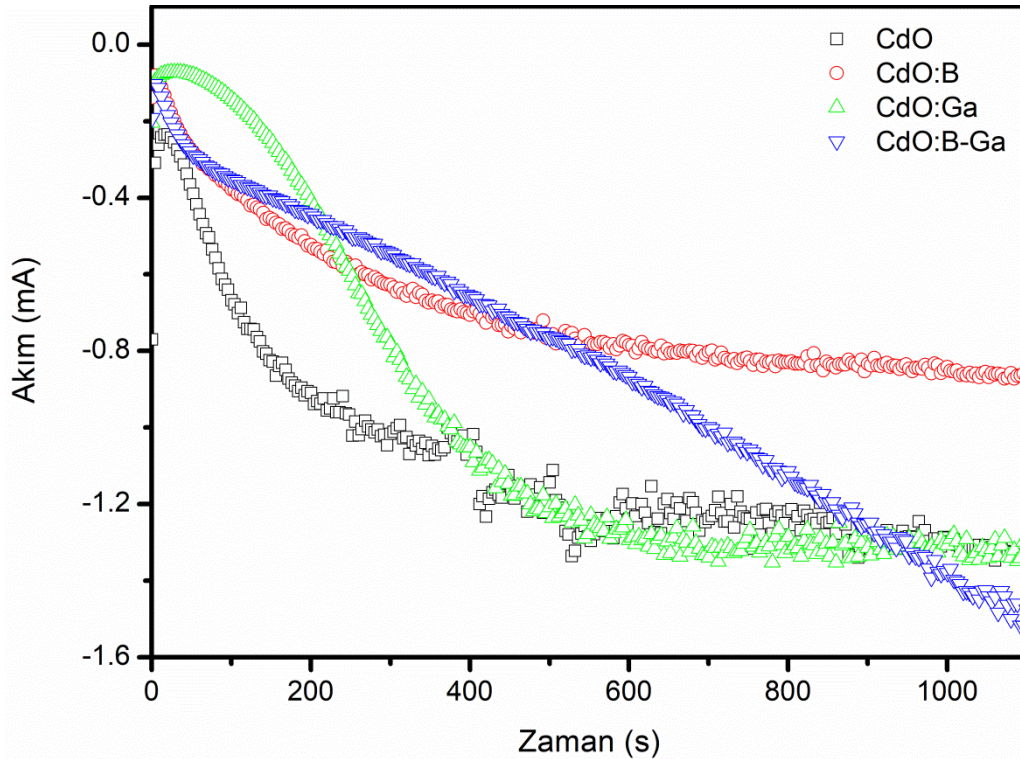
Şekil 5.1, 0.05 M NaOH ve CdCl<sub>2</sub> içeren elektrolitik banyo için, +1.5V ile -1.5 V aralığında oda sıcaklığında (25°C) 10 mV/s tarama hızında voltamogramı göstermektedir. İlk bakışta, yaklaşık -0.8 V potansiyelde görülen önemli bir indirgeme tepe noktası gözlemlenir, bu da metalik kadmiyumun birikimini ve ardından ITO alt tabakamızın yüzeyinde ince bir kadmiyum oksit (CdO) tabakasının oluşumunu açıkça gösterir. Voltogramın pozitif kesitinin potansiyelinde, bazik bir ortamda difüzyon platosundan önce gelen bir anodik alan da gözlemlenir. Bu, indirgemenin birkaç aşamada ve karışık bir elektrokimyasal ve kimyasal işleme göre gerçekleştiğini gösterir. Ayrıca, E=-0.7 V potansiyelinde katot ve anodik dalların kesişmesinin varlığını da not ediyoruz. Bu, ITO elektrodunda yeni bir fazın oluşumunun tipik bir örneğidir. Bu ayrıca, CdO biriktirme sürecinin bir çekirdeklenme fenomeni ve ardından kristal büyümesi yoluyla gerçekleştiğini gösterir.

Elektrokimyasal birikim yoluyla CdO oluşum mekanizması aşağıdaki dört elektrokimyasal reaksiyonla verilmektedir:



### 5.1.2. Krono-amperometri (CA)

Döngüsel voltametri (CV) sonuçlarından yararlanılarak, iyi kapasiteli filmler oluşturamamızı sağlayan en iyi parametreler (biriktirme için uygulanma potansiyeli) seçilebilir. Bu işlem, kadmiyum oksit (CdO) biriktirme sırasında elektrokimyasal karakterizasyon yöntemi için ve aynı zamanda elektrokimyasal çekirdeklenme-büyüme fenomenlerinin mekanizmalarını incelemek için uygun bir teknik olarak kullanılmıştır (Sahmi, Bensadok, & Trari, 2024).



Şekil 5.2. CdO ince film üretimi için akım-zaman (kronamperometri) eğrisi.

Şekil 5.2’de pH=10.5’te 1100 saniyelik bir biriktirme süresi boyunca ve hala elektrokimyasal biriktirme koşulları altında saf ve katkılı CdO ince filmler için kronoamperometri (CA) eğrisi sunulmaktadır. Kronoamperogramların iki bölüme ayrıldığı görülmektedir: birinci

bölüm: eğri, sabitlenmeden önce bir arkta devam eden akımda bir artışı göstermektedir. İkinci bölüm: süreç boyunca oldukça uzun bir süre boyunca bir plato şeklindedir ve elde edilen filmin büyüme olgusunu yöneten bir difüzyon rejiminin kurulduğunu göstermektedir.

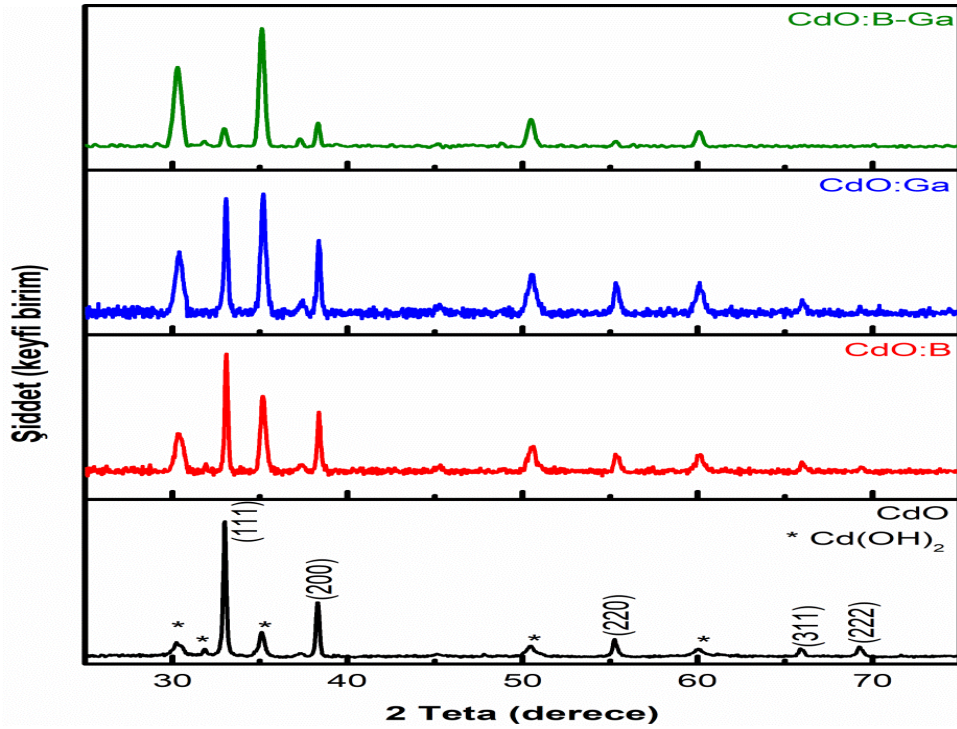
## 5.2. XRD Sonuçlar

X-ışını kırınımı çalışması, malzemelerin yapısını ve faz oluşumunu incelemek için etkili bir araçtır. Bu çalışmada, CdO ve B:Ga çift katkılı ince filmlerin yapısal özelliklerini araştırmak için bir X-ışını difraktometresi (Empyrean EMP 3, Malvern Panalytical) kullanıldı. X-ışını radyasyonu, oda sıcaklığında  $20^\circ$  ve  $80^\circ$  kırınım açıları arasındaki her numuneyi taramak için kullanıldı. Şekil 5.3, katkısız CdO ve Ga:B ile katkılanmış CdO ince filmlerinin XRD desenlerini göstermektedir. Ölçümlerde  $1.5406 \text{ \AA}$  dalga boyuna sahip Cu  $K\alpha$  X-ışını kullanılmıştır. Katkısız CdO ince filmleri, sırasıyla düzlem (100), (002), (101), (102), (110), (103) ve (112) Miller indekslerine karşılık gelen  $24.5^\circ$ ,  $26.0^\circ$ ,  $27.5^\circ$ ,  $36.5^\circ$ ,  $43.5^\circ$ ,  $47.7^\circ$  ve  $51.7^\circ$ 'de Bragg açıları sergilemektedir. Bu da CdO ince filmlerinin kübik polikristalin malzeme olduğunu göstermektedir (JCPDS No. 05-0640) (Desai vd., 2023). Ayrıca, CdS ince filmlerine Ga ve B eklenmesi, katkısız CdS ince filminin tepe konumlarını değiştirmemiştir. Cd(OH)<sub>2</sub>'nin XRD desenleri de aynı şekilde gösterilmiştir.  $2\theta$ 'de tespit edilen kırınım tepeleri içeren pikler monoklinik simetriye karşılık gelmektedir. (JCPDS kart no. 84-1767) (Mirzaei vd., 2021). Dikkat çekici bir şekilde, tüm örneklerde, safsızlıkların, yani katkı metali veya oksit/hidroksitlerin ek zirveleri olmadan iyi çözülmüş, keskin ve belirgin kırınım zirveleri elde edilmiştir, bu durum sentezlenen malzemelerin yüksek kristalin doğasını doğrulamaktadır. Dahası, katkı iyonları B ve Ga'nın, CdO'nun kübik yapısında hiçbir değişiklik olmadan CdO konak matrisinde etkili bir şekilde ikame edildiğini (Cd iyonlarının yerini aldığını) veya dâhil edildiğini göstermektedir. İki atom düzlemi arasındaki düzlemler arası mesafe (d), Bragg yasası kullanılarak hesaplandı (Wahab, 2024):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (\text{F.5})$$

Burada  $\lambda$ , X-ışınının dalga boyu ve Bragg açısıdır, Tablo 5.1'de gösterildiği gibi. (hkl) düzlemleri için gözlenen d değerleri teorik değerlerle oldukça örtüşmektedir. CdS filminin Ga ve B ile katkılanması, kristallerin büyüme sürecinde kristal kusuruna atfedilebilen kafes sabitinde değişime yol açar. Ayrıca, çift katkılı numunelerdeki kırınım tepelerinin yoğunluğunun azaldığı gözlemlendi, bu da CdO:B-Ga ince filmin kristalliğinin azaldığı anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, en yüksek kristallik, filmlerin diğer kompozisyonlarına kıyasla  $34^\circ$ 'lik  $2\theta$  değerinde (002) düzleminin kırınım tepe yoğunluğundaki artışla CdO ince filminde gözlemlendi. Benzer bir sonucun literatürde araştırmacılar tarafından rapor edildiği görülmektedir (Ali vd.,

2024). (111) pikindeki yoğunluk azalması, konak  $\text{Cd}^{2+}$ 'nin (0.097 nm) iyonik yarıçaplarından nispeten daha küçük olan  $\text{B}^{3+}$  (0.025 nm) ve  $\text{Ga}^{3+}$ 'nin (0.062 nm) iyonik yarıçaplarıyla ilişkilidir. Bu,  $\text{B}^{3+}$  ve  $\text{Ga}^{3+}$  iyonlarının  $\text{Cd}^{2+}$  bölgelerini işgal ederek CdO matrisine etkili bir şekilde dâhil edildiğini göstermektedir. Benzer bir fenomen M.A.H. Naeem ve arkadaşları (2024) tarafından da gözlemlenmiştir. Bu araştırmada, Zn-Al eş katkılanmış CdO ince filmleri için, tercihli yönelimin daha yüksek katkılama konsantrasyonunda (111)'den (002) yönlerine kaydığı, yani bu katkılama konsantrasyonunda daha fazla atomun bu yönde hizalandığı bulunmuştur. Atomlar arası aralıktaki azalmanın eş katkılama bir sonucu olarak meydana geldiğini ve ayrıca bu fenomenin nispeten daha büyük iyonların yerini daha küçük iyonların aldığı anda meydana geldiğini bildirmişlerdir.

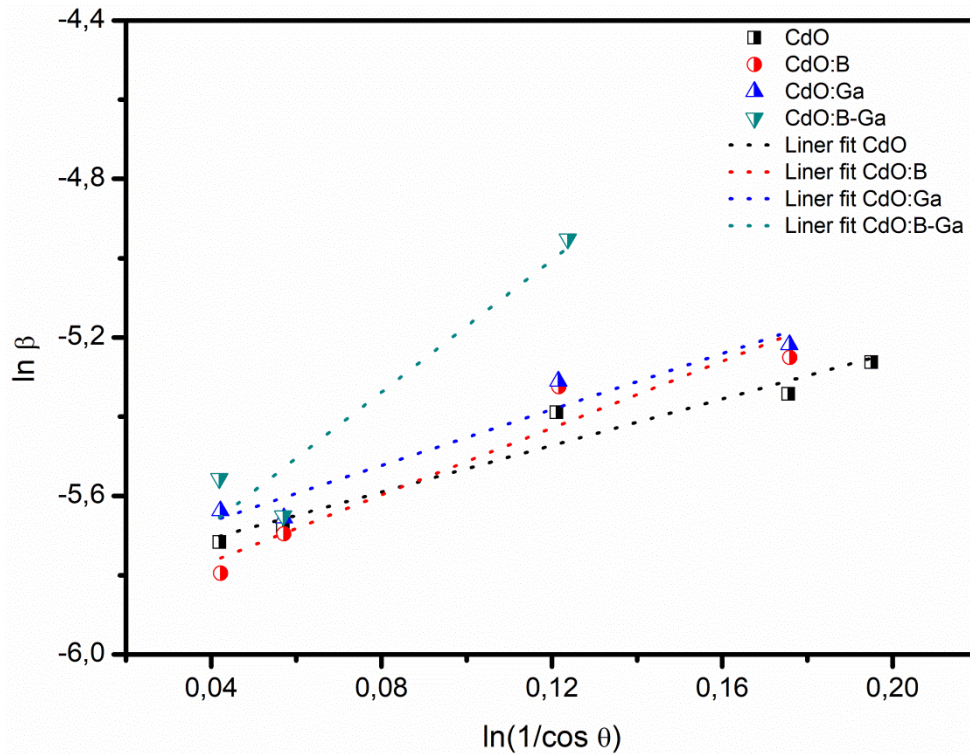


Şekil 5.3. CdO/Cd(OH)<sub>2</sub> filmlerinin XRD grafiği

Ek olarak, ortalama kristalin boyutu (D) ve mikro gerinim ( $\epsilon$ ) de farklı modeller kullanılarak ölçüldü (Debye Scherrer denklemi, Scherrer çizimi (Şekil 5.4), W-H çizimi (Şekil 5.5) ve Size-Strain çizimi (Şekil 5.6) tartışıldı ve değerler Tablo 5.1'de toplandı. CdO filmlerinin ortalama kristalit boyutu (D), aşağıdaki ilişkiyle tanımlanan iyi bilinen modifiye edilmiş Scherrer ilişkisi kullanılarak hesaplanır (Erdoğan & Kiyak Yildirim, 2023):

$$\ln \beta = \ln \frac{K\lambda}{D} + \ln \frac{1}{\cos \theta} \quad (\text{F.6})$$

Burada  $\lambda$  (0.15406 nm)  $\text{CuK}\alpha$  radyasyonunun dalga boyu,  $\theta$  Bragg açısı ve  $\beta$  yarı maksimumdaki tam genişliktir (FWHM). Elde edilen XRD verilerinden ve modifiye edilmiş Scherrer denkleminde, CdO filmlerinin kristalit boyutunun 46.03-56.15 nm aralığında olduğu bulundu.



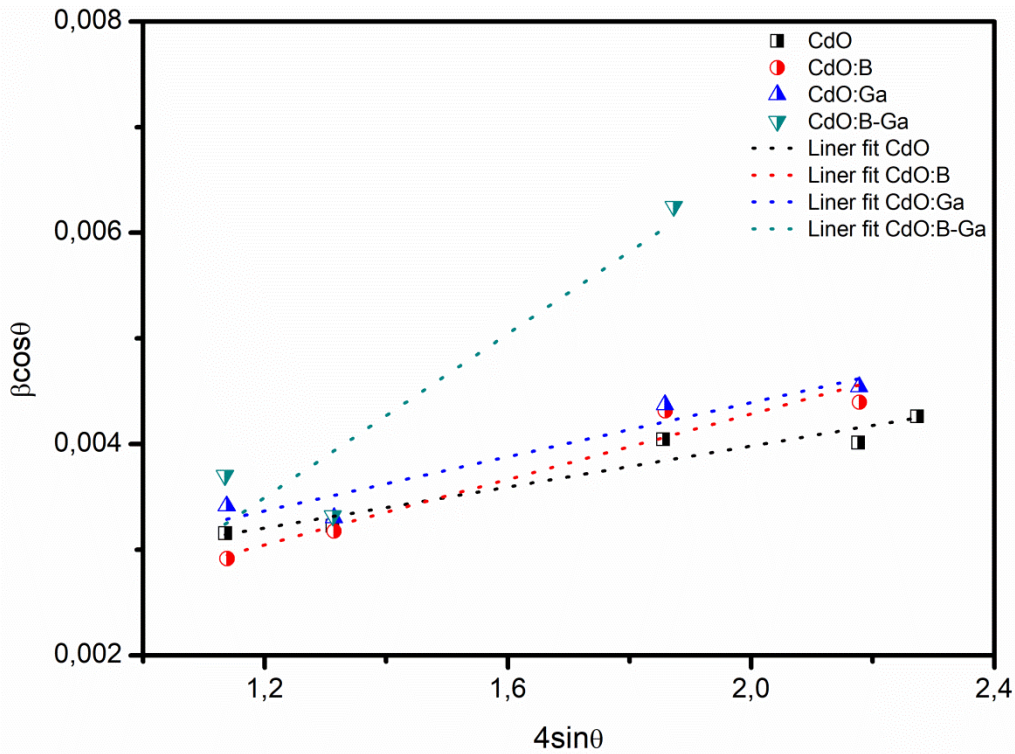
Şekil 5.4. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin Modifiye Scherrer grafiği

Williamson-Hall yöntemi, kristalit boyutu (D) ve Mikrogerinimi inceleyerek polikristalin malzemelerin yapısal özelliklerini araştırmak için kullanılmıştır (Erdoğan, 2019):

$$\beta \cos \theta = \frac{K\lambda}{D} + 4\epsilon \sin \theta \quad (\text{F.7})$$

Burada  $\beta$  radyan cinsinden yarı maksimumdaki tam genişliktir (FWHM) ve K sabittir, yani 0.9'a eşittir. Kristalin boyutu D ve mikrogerinim, x ekseninde ( $4\sin\theta$ ) ile y ekseninde

( $\cos\theta$ ) çizilerek hesaplanmıştır. Bu nedenle, uydurulan doğrunun eğimi mikrogerinimdir ve ( $\cos$ ) eksenine kesişimi kristalit boyutu  $D$ 'yi hesaplamak için kullanılmıştır. Katkılanmamış CdO için mikrogerinim  $9.7 \times 10^{-4}$ 'tür. Çeşitli konsantrasyonlarda Ga ve B'nin tanıtılmasının mikrogerinimi artırarak CdO:B-Ga için  $38.8 \times 10^{-4}$ 'e eşit bir maksimum değere ulaştığı açıkça görülmektedir. Mikrogerinimdeki bu artış Cd atomlarının Ga ve B atomlarıyla değiştirilmesine bağlanabilir. Ayrıca, katkısız CdO için kristalit boyutu  $D$  yaklaşık 67.94 nm iken, Ga ve B eklenmesi  $D$  değerlerini katkısız CdO değeri aralığında değiştirirken, numune CdO:B-Ga için,  $D$  değeri keskin bir şekilde artarak 79.65 nm'ye çıkmaktadır,  $D$ 'deki bu artış daha yüksek değere sahip numunenin bant aralığı enerji değeriyle uyumludur.

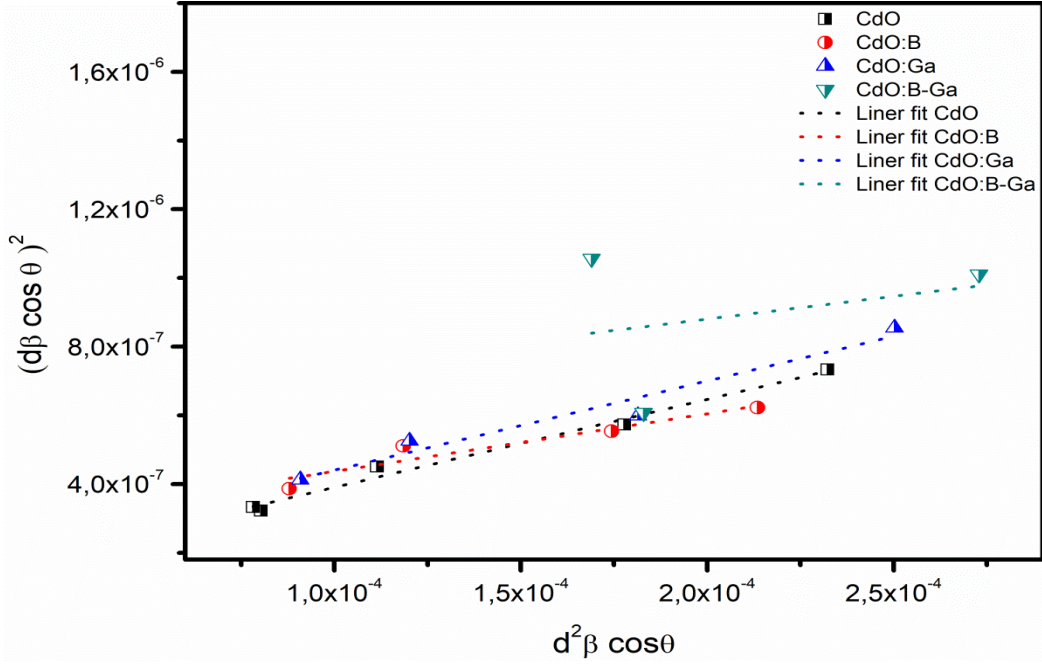


Şekil 5.5. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin W-H grafiği

Boyut-gerinim grafiği yöntemi kristal yapının izotropik doğası için dikkate alınır. Kristalit boyut profilinin bir Lorentzian fonksiyonu ve gerilim profilinin bir Gauss fonksiyonu ile tanımlandığı varsayılır (Alam vd., 2024):

$$(d_{hkl}\beta_{hkl}\cos\theta)^2 = \frac{K}{D}(d_{hkl}^2\beta_{hkl}\cos\theta) + \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 \quad (F.8)$$

$(d_{hkl}\beta_{hkl}\cos\theta)^2$  terimi  $(d_{hkl}^2\beta_{hkl}\cos\theta)$  'ye göre çizilir. Grafikler Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Kristalit boyutu eğimden belirlenir ve y-kesişimi gerinimi verir. Grafiklerin incelenmesiyle, SSP modelinin sonucunun diğer yöntemlerden daha doğru olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin SSP grafiği

Tüm modellerin sonuçları, D değerlerinin eş-katkılamaya arttığını ve CdO:B-Ga'nın büyük bir ortalama kristalin boyutuna sahip olduğunu gösterdi. Öte yandan, mikro gerinimin pozitif değeri, dopantlar tarafından oluşan kafes bozulmasından kaynaklanan çekme gerinimini önermektedir. Tablo 5.1'de Scherrer yöntemiyle tahmin edilen kristalit boyutları W–H yöntemiyle tahmin edilenlerden daha düşüktür. Scherrer yönteminin X-ışını tepe genişlemedeki gerilme etkisini almaması ve bunun da kristalit boyutunun tahminini etkilemesi göz önüne alındığında bu sonuçlar normaldir. Bu nedenle W–H yöntemi Scherrer yönteminden daha doğrudur. Öte yandan, her biri farklı kristalit doğaları varsayan çeşitli modifiye edilmiş modelleriyle W–H yöntemi gerilmede önemli bir fark gözlemlenemedi. Farklı koşullar altında, SSP yöntemiyle hesaplanan gerilme değerleri W–H yöntemi değerlerinden çok daha yüksektir. Gözlemlenen bu büyük fark, SSP yöntemindeki daha düşük açı katkılarına bağlanabilir. Noktaların doğrusal ifade uydurma çizgisinden uzağa saçılması, Şekil 5.4 ve 5.5 ile karşılaştırıldığında Şekil 5.6 için çok daha azdır. Sonuç olarak, SSP modelinin D ve  $\epsilon$ 'nin doğru değerlendirilmesi için daha tutarlı olduğu, çünkü üstün bir doğrusal uyuma sahip olduğu ve neredeyse tüm noktaların doğrusal uyum çizgisiyle karşılaştığı düşünülmektedir. W. Azzaoui ve diğerleri (2023) XRD analizini yürüttüler ve sonuçlar CdO kristalit boyutunun Zn katkılanması ve Al-Zn eş katkılanmasından önemli ölçüde etkilenmediğini gösterdi. Boyut 21-22 nm aralığında kaldı. Başka bir çalışmada, M.H. Kabir ve diğerleri (2022), XRD analizinden %3 Ga katkılı CdO filminin sadece minimum mikro gerinim ve dislokasyon yoğunluğu gibi optimum mikro yapısal özelliklere sahip olmadığını, aynı zamanda diğer Ga katkılı CdO ince filmlerine kıyasla yüksek kristallığe sahip olduğunu doğruladılar.

**Tablo 5.1.** Saf ve katkılı CdO ince filmlerin bazı yapısal parametrelerinin karşılaştırılması

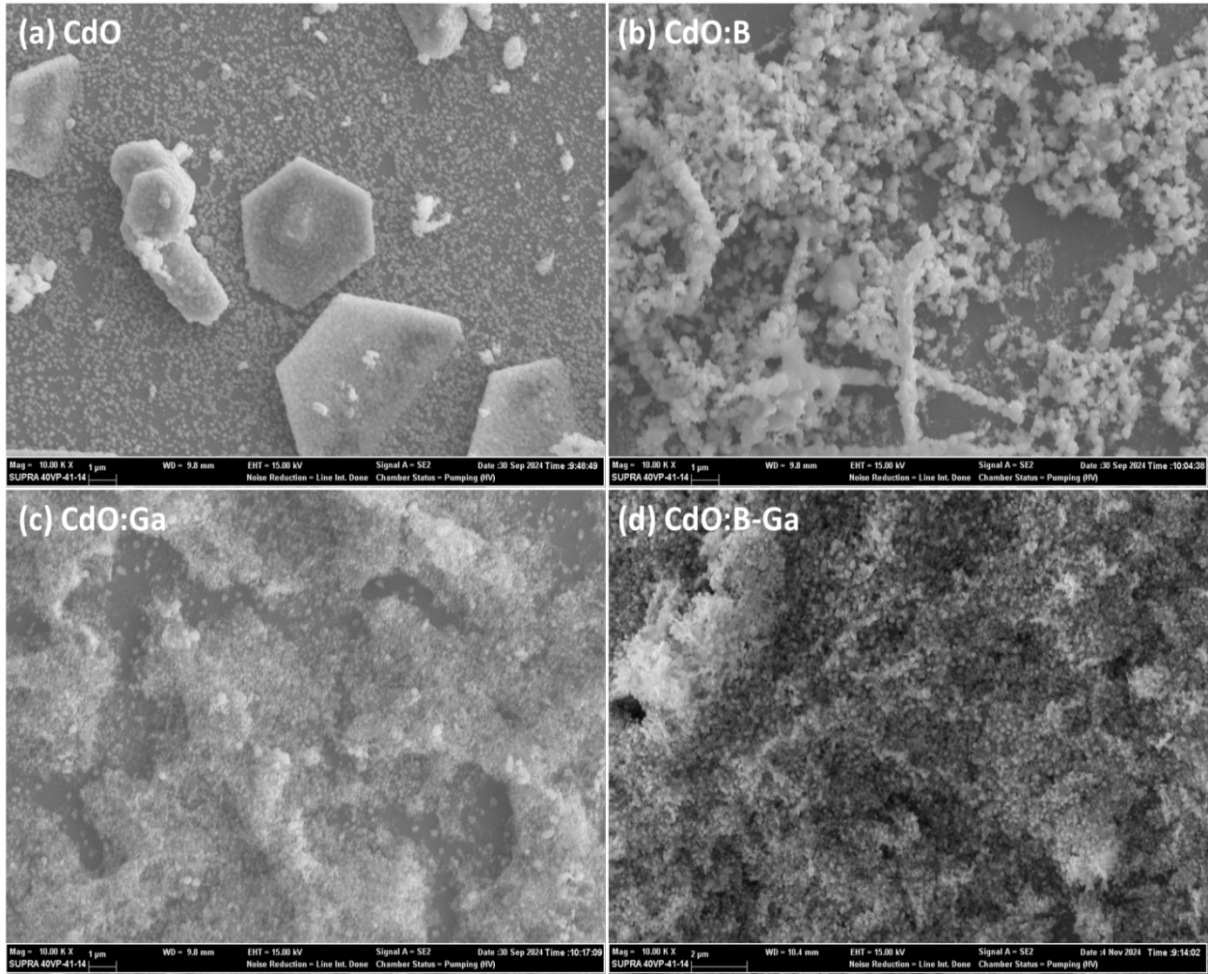
	(hkl)	$d_{hkl}$ (Å)	$2\theta$ (°)	FWHM(°)	$D_{SR}$ (nm)	$D_{W-H}$ (nm)	$D_{SSP}$ (nm)	$\epsilon_{WH}$ ( $\times 10^{-4}$ )	$\epsilon_{SSP}$ ( $\times 10^{-4}$ )
CdO	(111)	2.7127	32.98	0.1886	46.93	67.94	78.12	9.7	7.33
	(200)	2.3478	38.29	0.1956					
	(220)	1.6600	55.27	0.2616					
	(311)	1.4151	65.93	0.2740					
	(222)	1.3548	69.27	0.2968					
CdO:B	(111)	2.7055	33.07	0.1743	52.40	77.64	82.41	15.5	10.3
	(200)	2.3437	38.36	0.1926					
	(220)	1.6570	55.38	0.2792					
	(311)	1.4139	65.99	0.3004					
	(222)	-	-	-					
CdO:Ga	(111)	2.7071	33.05	0.2041	46.03	75.73	86.53	12.8	8.50
	(200)	2.3437	38.36	0.2004					
	(220)	1.6575	55.36	0.2830					
	(311)	1.4143	65.97	0.3103					
	(222)	-	-	-					
CdO:B-Ga	(111)	2.7143	32.96	0.2213	56.15	79.65	90.22	38.8	15.6
	(200)	2.3472	38.30	0.2014					
	(220)	1.6444	55.84	0.4052					
	(311)	-	-	-					
	(222)	-	-	-					

**Not:**  $d_{hkl}$ : düzlemler arası mesafe, FWHM: tam genişlik yarı maksimum,  $D_{SR}$ : değiştirilmiş Scherer grafiğinden kristal boyutu,  $D_{W-H}$ : WH grafiğinden kristal boyutu,  $D_{SSP}$ : SSP grafiğinden kristal boyutu,  $\epsilon_{W-H}$ : WH grafiğinden mikrogerinim,  $\epsilon_{SSP}$ : SSP grafiğinden mikrogerinim.)

### 5.3. SEM Sonuçlar

SEM, ince filmlerin yüzey morfolojisini analiz etmek için etkili bir yöntemdir ve yüzey yapısının cihaz teknolojisi uygulamalarında önemli bir rol oynadığı yaygın olarak kabul edilmektedir. SEM analizinden elde edilen biriktirilmiş saf ve katkılı CdO ince filmlerinin yüzey mikro yapıları Şekil 5'te karŐılaŐtırılmıştır. SEM mikro yapılarına göre, tüm filmler küresel veya yuvarlak Şekilli kümelenmiş tanelere sahiptir. Saf ve katkılı CdO ince filmleri yuvarlak Şekilli tanelerden ve parçacıkların daha yoğun bir Şekilde kümelendiği birkaç yamadan oluŐmaktadır. Ayrıca ince filmlerde düzgün dağılmış, küresel Şekilli taneler ve homojen olan bazı küçük kümelenmelerin olduğu görülmektedir.

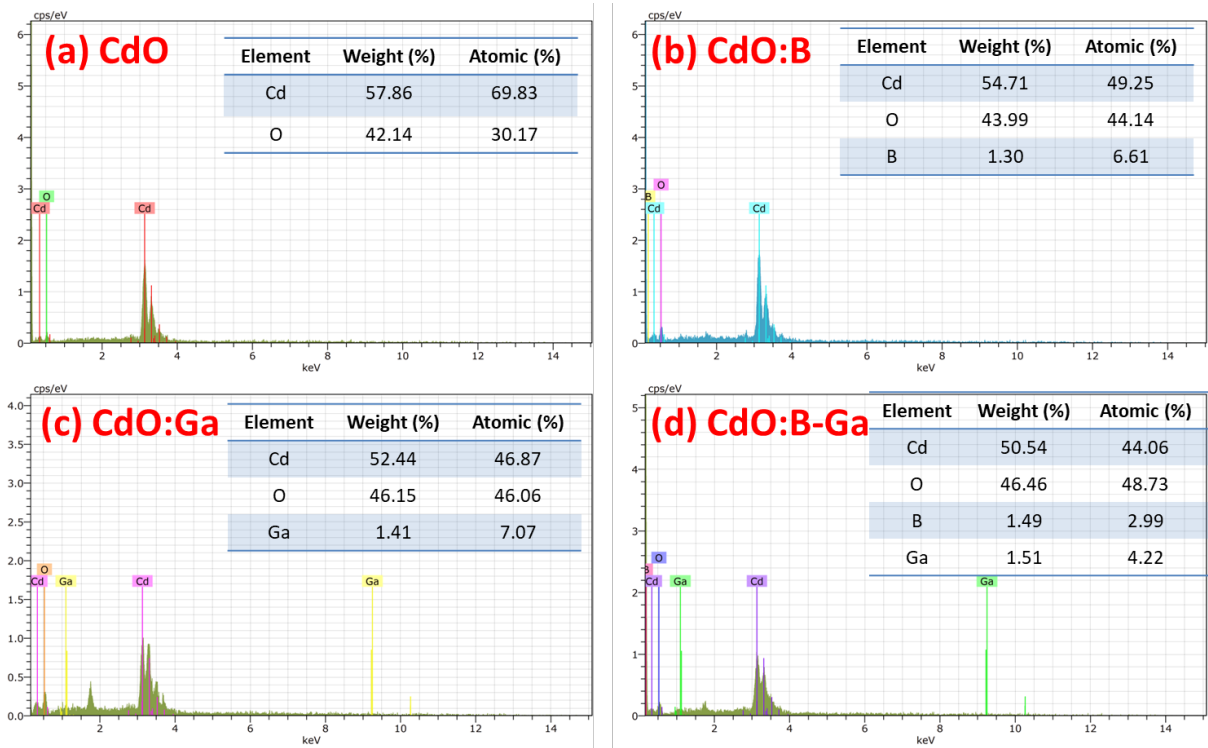
CdO ince filmini sadece galyumla (Şekil 5.7 (c)) katkılama edildiğinde, CdO ana yapısı ile Ga atomları arasında kısa zincir aralığına sahip küresel veya yuvarlak Şekilli CdO/Ga yapısını oluŐurmaktadır. Galyumun eklenmesi, CdO kristali arasında boşluk doldurmalarını ortaya çıkarır ve bu da galyum ile oksijen arasındaki bağlantıların varlığını ve yapıdaki adacıkların kümelerini oluŐturan kadmiyum-oksijen bağlarının varlığını gösterir. Dahası, Ga ve B'nin CdO filmine eş katkılı elementler olarak eklenmesi, daha küçük CdO yapıları üretir ve bu da yapının yeni formunda daha küçük taneciklerin ve hatta daha kısa çapraz bağlantıların varlığını gösterir. Borun CdO ana materyali üzerindeki etkisi mikrograf özelliklerine hkimdir. Galyum, ana matris boyunca iyi bir bağlantı sağlar. Buna karşılık, bor dispersiyonu kafes bölgeleri arasındaki boşlukları doldurmaya yardımcı olur ve materyali daha yoğun hale getirir. Borun (5) atom numarasının galyumun (31) atom numarasından çok daha az olduğunun bilinmesi, borun CdO'nun konak matrisine müdahale etme olasılığının daha yüksek olduğu ve bunun da nihai yoğunluğunu artırdığı gerçeğini desteklemektedir. H. avuŐođlu ve diğerleri (2019), CdO film yüzeylerinin Co katkılama ve Co:Al ikili katkılama ile nasıl değiştiğini araştırdılar. SEM fotoğraflarından filmlerin mikro morfolojilerinin sentez zeltisine Co ve Al elementleri eklenerek nano boyutlu parçacıklarla modifiye edilmiş gibi göründüğünü bildirdiler. Ayrıca, Co ve Al katkılamanın CdO filmlerinin yüzeyini Őekillendirmede hayati bir rol oynadığını bildirdiler.



**Şekil 5.7. (a) Saf CdO (b) CdO:B (c) CdO:Ga (d) CdO:B-Ga ince filmlerin SEM görüntüleri**

Saf ve katkılı CdO ince filmlerinin EDS spektrumları sırasıyla Şekil 5.7 a–d’de verilmiştir. Şekil 5.7 a’daki katkısız filmlerin EDS spektrumlarında öngörüldüğü gibi, Cd ve O atomlarına karşılık gelen pikler gözlenmiştir. Saf CdO yapısında, O atomlarından daha fazla Cd atomu olması dikkat çekicidir. Ayrıca, katkı elementlerinin yapı içerisine girmesiyle Cd oranı azalır. XRD desenlerinin verilerle korelasyonu, katkı atomlarının Cd atomlarının yerini aldığı bir ikame mekanizmasını önermektedir. Düşük katkılama konsantrasyonu ve kafes içindeki katkı maddelerinin eksik ikamesi nedeniyle, yeni fazların oluşması olası değildir. Deokate ve Lokhande (2014), saf ve Ga katkılı CdO ince filmlerin yüzey morfolojisini SEM ile incelediler ve yüksek Ga katkılı olduğunda düzgün ve düzenli yüzey morfolojisi sergilediklerini bildirdiler. Çok daha yüksek katkı oranlarında, tanelerin aglomerasyonu gözlemlendi. Şekil 5.8 b–d’deki CdO, B ve Ga’nın ölçülen ağırlık yüzdesi oranları, CdO ince filmlerinde B ve Ga’nın varlığını göstermektedir. Açıkça, spektrumda gözlenen pik yoğunlukları her bir numune için farklı oranları göstermektedir. Bu değişim, yapı içindeki Cd, B ve Ga oranlarındaki farklılıklardan kaynaklanıyor olabilir. Ayrıca, biriktirme işlemi sırasında bazı fiziksel ufak değişimlerin filmlerin yüzey kompozisyonunu etkilemiş olabileceğine ve çözeltideki beklenen B ve Ga

oranlarından sapmalara yol açmış olabileceğine inanmaktayız. Galyum, konak matrisi boyunca iyi bir bağlantı sağlar. Buna karşılık, bor dağılımı kafes bölgeleri arasındaki boşlukları doldurmaya yardımcı olarak malzemeyi daha yoğun hale getirir. Borun (5) atom numarasının galyumdan (31) çok daha az olduğunu bilmek, borun CdO'nun konak matrisine girme olasılığının daha yüksek olduğunu ve nihai yoğunluğunu artırdığını destekler (Ahmad vd., 2024).

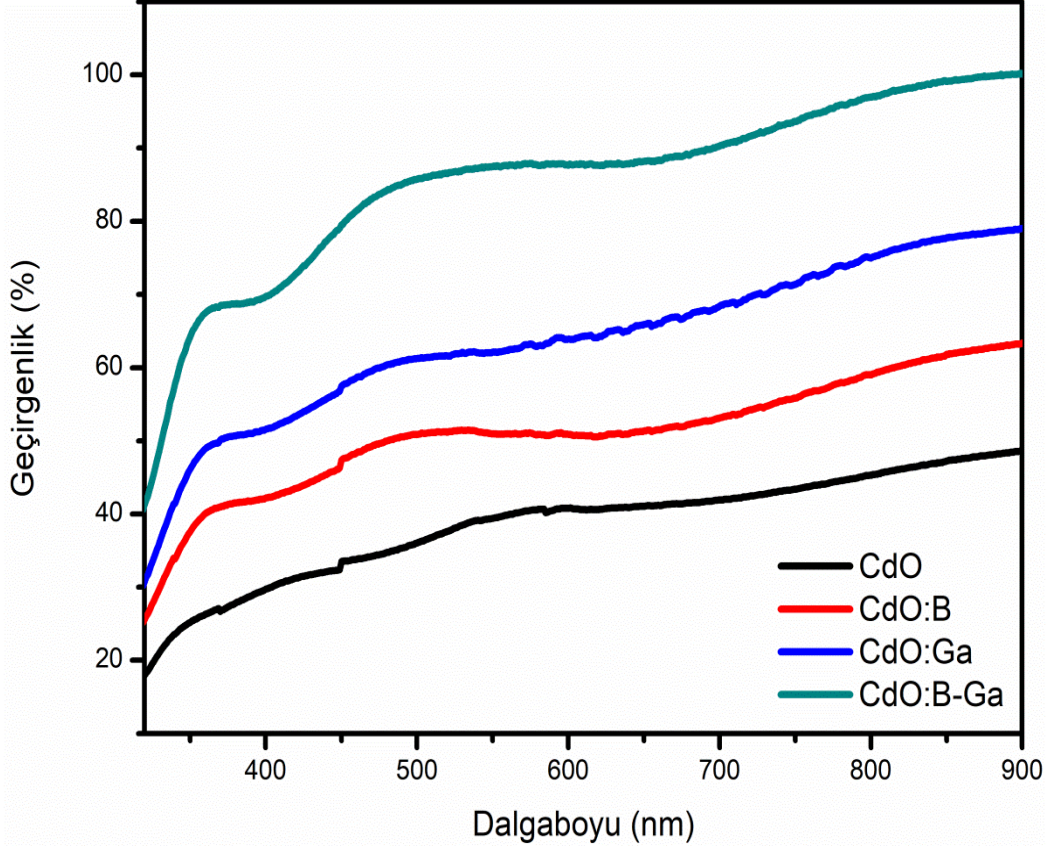


**Şekil 5.8.** (a) Saf CdO (b) CdO:B (c) CdO:Ga (d) CdO:B-Ga ince filmlerin EDS görüntüleri

Sonuç olarak, bu görüntülerden de anlaşılacağı üzere ince filmlerde beklenen elementlerin mevcut olduğu, başka herhangi bir yabancı elementin bulunmadığı görülmektedir.

#### 5.4. Optik Sonuçlar

Hazırlanan ince filmlerin optik davranışı, soğurma ve geçirgenlik modunda 250-900 nm dalga boyu aralığında UV-görünür spektroskopisi kullanılarak araştırıldı. Şekil 5.9, saf CdO ve CdO:B-Ga filmlerinin geçirgenliğini olay dalga boyuna bağlı olarak göstermektedir. Hazırlanan saf CdO, CdO:B, CdO:Ga ve CdO:B-Ga ince filmleri için görünür bölgede sırasıyla %36, %48, %59 ve %81 civarında geçirgenlik değerleri elde edilmiştir.



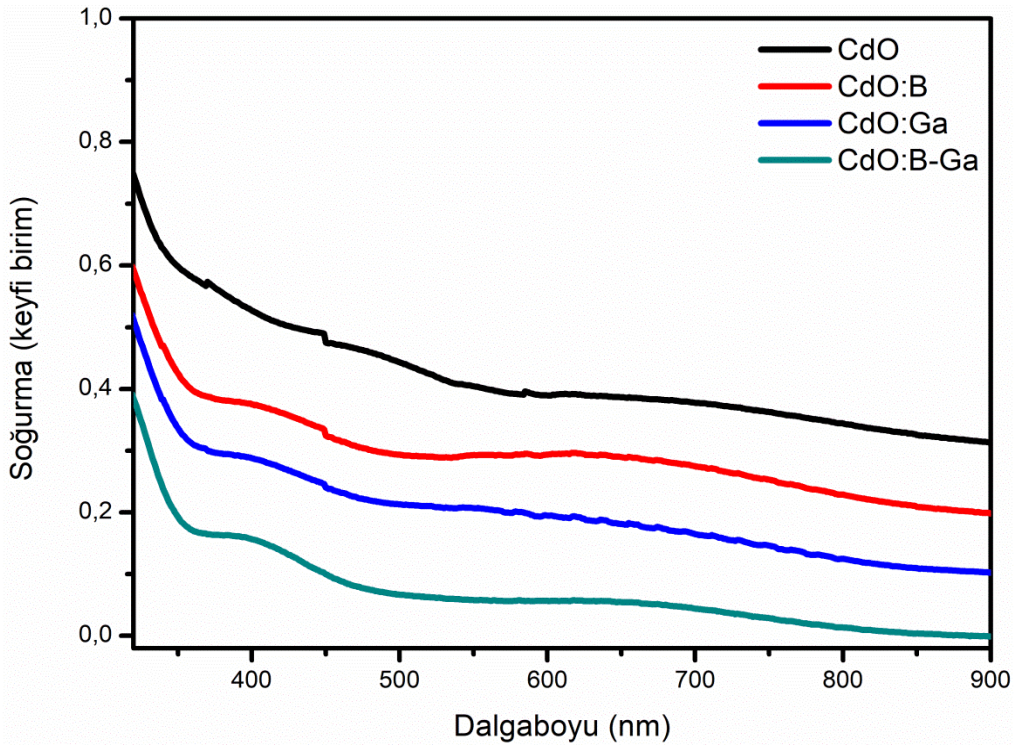
Şekil 5.9. Saf ve katkı CdO ince filmlerin UV-Vis Geçirgenlik grafiği

Tüm numunelerin bant kenarlarında geçirgenlik düşüşü olduğu ve bunun kristalliklerinde iyi bir iyileşmeye işaret ettiği fark edilmiştir. Ayrıca geçirgenlik düşüşünün, Ga ve B'nin CdO filmlerine eş katkılama uygulanmasıyla spektrumlarda görüldüğü gibi, emilim bant kenarının üzerinde mavi bir kayma (daha kısa dalga boyuna doğru kayma) kazandığı da fark edilmiştir. Daha kısa dalga boyuna doğru kayma, yapının optik bant aralığı enerjisindeki artışı işaret eder. CdO:B-Ga ince filmlerinin görünür bölgedeki geçirgenlik davranışı, onları güneş pili uygulamaları için şeffaf pencereler olarak uygulanabilir ve faydalı hale getirir.

Filmlerin yüksek geçirgenliği, görünüşte iyi kristallik ve stokiyometri ile yorumlanabilir. Ancak, düşük geçirgenlik, film kristallığının hafif bir bozulmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, T. Noorunnisha ve diğerleri (2020), Zn-Co eş katkılı CdO ince filmlerin geçirgenlik spektrumlarını araştırdı. Artan şeffaflık, hem katkılı hem de eş katkılı filmler için saf filmde daha fazla gerçekleştirildi. Eş katkılı film için tek katkılı ve saf filmde daha yüksek geçirgenliğin, daha az kusura sahip daha iyi kristal kalitesinden kaynaklanabileceğini bildirmişlerdir.

İnce filmlerin geçirgenliği, film kalınlığı, kristal seviyesi ve yüzey homojenliği gibi faktörlerle karmaşık bir şekilde bağlantılıdır. Bu nedenle, bu faktörlerin birleşik etkisi gözlenen optik geçirgenlik seviyesini belirler. Geçirgenlik değerlerinin önemi göz önüne alındığında, bu

değerlerin B ve Ga katkılı CdO ince filmler için görünür bölgede özellikle önemli olduğu dikkate değerdir. Dahası, filmlerin kristal yapısındaki değişiklikler geçirgenlikleri üzerinde önemli bir etki uygular. Filmlerin optik geçirgenliğinde gözlenen değişimler genel olarak tane boyutlarının küçülmesine ve homojenliğin artmasına bağlanabilir. XRD sonuçları bu numunenin en yüksek geçirgenlik değerini güçlü bir şekilde desteklemektedir. İlave olarak, yarıiletken malzemede oksijen boşluklarının varlığının yapısal kusurlara yol açtığı ve bunun da optik özellikleri etkileyebileceği düşünülmektedir. R. Halabi ve diğerleri (2023), saf ve (Mn, Sm) ko-doplanmış CdO nanoyapılarının UV-görünür bölgedeki absorbans spektrumlarını araştırdılar. Tüm numunelerin UV aralığında daha iyi emilim ve görünür aralıkta daha az emilim gösterdiği sonucuna vardılar. Kristalit boyutu ve yüzey özellikleri gibi özelliklerin geçirgenlik ve emilim grafikleri üzerindeki etkileri dikkate alındığında, bu sonuçlar sonucunda katkılama elemanına bağlı olarak bir kayma görülmektedir. Ayrıca bu sonuçların yapısal ve morfolojik özelliklerle uyumlu olduğu ve bunlar tarafından desteklendiği görülmektedir.



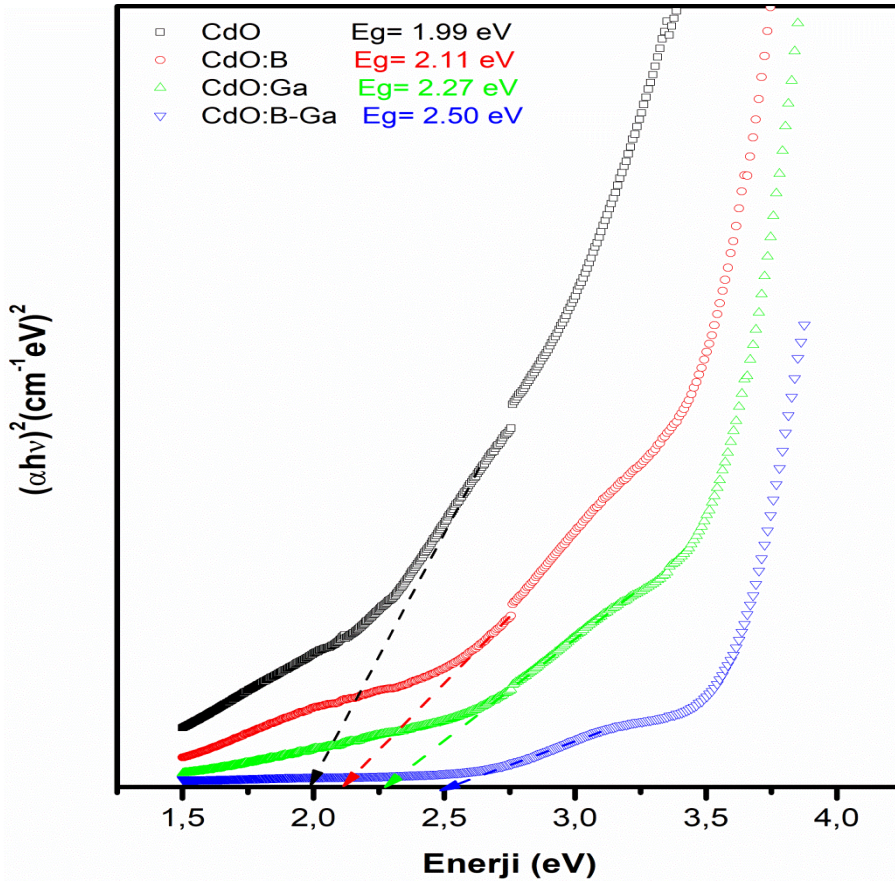
Şekil 5.10. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin UV-Vis Absorbans grafiği

Şekil 5.10, oda sıcaklığında hazırlanmış saf ve katkılanmış numuneler için 250-900 nm aralığında gelen foton dalga boyuna bağlı optik soğurmanın değişimini göstermektedir. Soğurmanın dalga boyundaki artışla birlikte sürekli olarak azaldığı görülmektedir. Katkı elementlerine bağlı olarak katkılı CdO ince filmlerinin 400 ile 500 nm arasında bir soğurma kenarı gösterdiği görülmektedir. Eş katkılama sonucunda ise, band kenar alt bölgeye doğru kaydığı görülmektedir. Bu durum da, eş katkılama sonucunda optik spektrumun genişlediği anlamına gel-

mektedir. Böylelikle eş katkılı CdO ince filmleri güneş hücrelerinde pencere katmanı olarak rahatlıkla kullanılabilir sonucunu bize vermektedir. Tüm örneklerde gözlenen soğurma kısa dalga boyu bölgesinde baskındır. Bu durum da, doğrudan izin verilen geçişin kristal momentumunun aynı değerinde meydana gelme olasılığının olduğunu bize söylemektedir. Bu şekilde, saf ve katkılı CdO ince filmlerin gözlenen bant aralığı enerjisi ( $E_g$ ) aşağıdaki denklemle tahmin edilir (Erdogan, 2021).

$$(\alpha h\nu)^2 = K(h\nu - E_g) \quad (F.9)$$

Burada K bir sabittir,  $E_g$  bant aralığı enerjisidir, h Planck sabitidir,  $\nu$  foton frekansdır ve  $\alpha$  emilim katsayısıdır.



Şekil 5.11. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin  $(\alpha h\nu)^2$ 'ye karşı  $h\nu$ 'sinin Tauc çizimi

Geçirgenlik ve soğurma ölçümlerinden, doğrudan boşluk yarıiletkenleri olarak kabul edilen hazırlanmış CdO ince filmlerinin optik bant aralıkları bu formül yardımıyla tahmin edilmiştir. Saf ve eş-katkılanmış CdO ince filmlerinin optik enerji bant aralığı ( $E_g$ ),  $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine ( $h\nu$ ) göre çizilmesi ve düz doğrusal kısmının ekstrapole edilmesiyle elde edilmiştir. Şekil 5.11'den de görüleceği üzere, saf CdO ince filmde 1.99 eV'lik bir bant aralığı bulundu ve B, Ga tekli ve B-Ga eş-katkılama ile sırasıyla 2.11, 2.27 ve 2.50 eV'lik bant aralıklarıyla

artan bir eğilim gözlemlendi. Saf ve tekli katkıya göre ortak katkılı CdO ince filminde bant aralığı değerinde bir artış, iki faktör arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu genişleme olgusu, filmlerin kristal kalitesindeki gelişmeler ve dislokasyonlardaki azalma ile bağlantılıdır. Ek olarak, bant aralığının genişlemesi Burstein-Moss etkisinin bir sonucu olabilir. Bu olgu, Fermi seviyesinin daha yüksek enerjiye doğru yer değiştirmesiyle sonuçlanan yükseltilmiş bir taşıyıcı konsantrasyonu ile ilişkilidir. Optik bant aralığı enerjisindeki artış, CdO kafes yapısındaki B ve Ga iyonlarının Cd iyonlarıyla yer değiştirmesi nedeniyle ortaya çıkabilen kuantum hapsedme etkisine de atfedilebilir. Ayrıca, hazırlanan ince filmlerin B ve Ga iyonlarının farklı atom kütleleri nedeniyle indirgenmiş kütlelerindeki değişim, indirgenmiş kütle ile doğrudan ilişkili olan eksiton bağlanma enerjisini de etkiler. CdO kafesindeki B ve Ga iyonlarının küçük atom kütleleri, genel sistemin eksitonik bağlanma enerjisini azaltabilir ve dolayısıyla bant kenarı soğurmasını azalır ve yük taşıyıcıları kolayca iletim bandına gidebilir ve bu da örneklerin optik bant aralığı enerjisinde mavi kaymaya neden olabilir. Bu davranış, B ve Ga iyonlarının Cd katyon bölgelerine dahil edilmesiyle artan yük taşıyıcılarından (elektronlar) sonra ortaya çıkan kusurlardan kaynaklanır. Bunun nedeni, Cd ve diğer katkı iyonlarının farklı elektronegatiflik ve iyonik yarıçaplara sahip olmasıdır. Benzer şekilde, E. Gürbüz ve çalışma arkadaşları (2018) SILAR yöntemini kullanarak saf, Mn katkılı ve Mn/Ni katkılı CdO filmlerinin bant aralığı enerjilerini araştırdılar. Saf CdO filmi için  $E_g$  değerinin 2.20 eV olduğunu bildirdiler. Mn katkılı CdO filmleri için optik enerji aralığının saf CdO ile karşılaştırıldığında arttığı ve Mn ve Mn/Ni katkılı CdO'nun bant aralığının saf CdO'dan daha büyük olması gerektiği açıktır. Ayrıca katkılı malzemelerin iletkenlik bandındaki serbest elektron yoğunluğunda bir değişikliğe yol açabileceği, bunun da Fermi seviyesinin konumunu etkilediği ve böylece metal oksitlerin bant aralığı özelliklerini değiştirdiği sonucuna vardılar.

Literatürde yer alan bir çalışmada, alüminyum (%3 mol) ve değişen çinko konsantrasyonları (%2–5 mol) ile birlikte katkılanmış CdO ince filmleri incelenmiştir. Filmler, %3 çinko katkısında maksimum geçirgenlik göstermiştir. Optik bant aralığı, çinko içeriğinin artmasıyla 2.61 eV'den 3.84 eV'ye yükselmiş olup, elde edilen değerlerin bizim çalışmamızda elde edilen değerlerden büyük olduğu görülmüştür (Naeem vd., 2024). Benzer şekilde, gümüş ve kalay ile birlikte katkılanmış CdO ince filmler incelenmiştir. Filmler, gelişmiş kristallik ve 3.891 eV'den 3.772 eV'ye düşen bant aralığı sergilemiştir; bu da optoelektronik cihazlar için uygun ayarlanabilir yarıiletken davranışa işaret etmektedir, çalışmamızda elde edilen değerlerden büyük olduğu gözlemlenmiştir (Karim vd., 2025b).

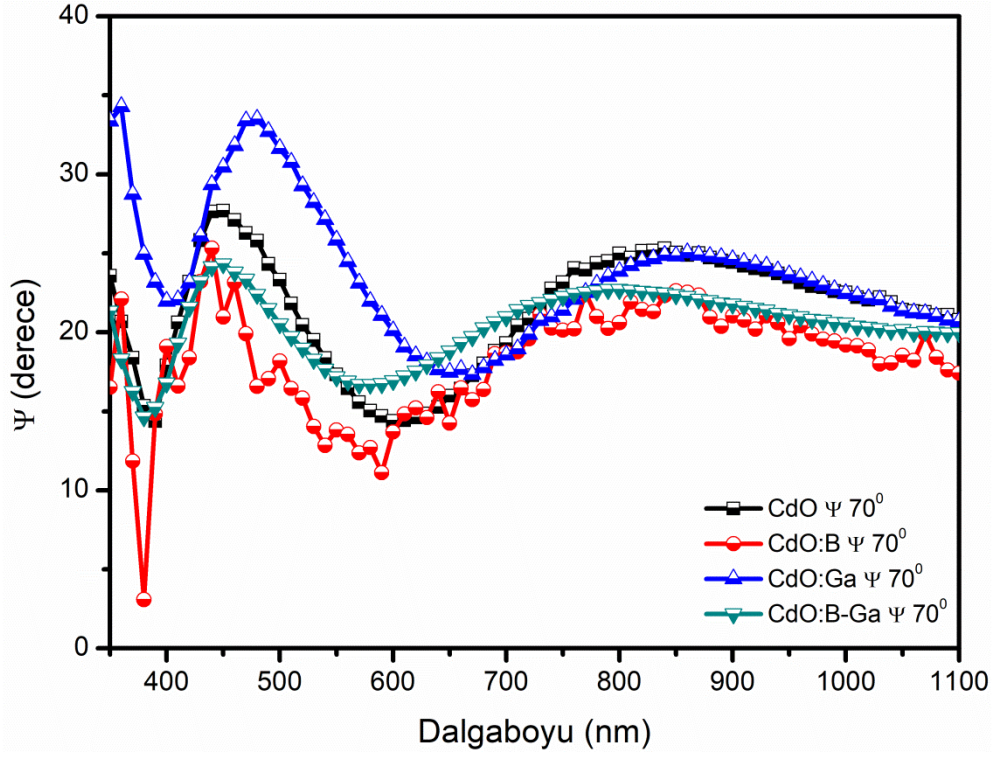
Bu araştırmada, CdO ince filmlerinin optik davranışının, CdO yapısına eklenen B ve Ga çift katkılı elementler tarafından etkilendiği ve bunun malzemenin optik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Tüm numuneler için bant aralığı değerleri optoelektronik ve fotovoltaik cihazlar için ümit verici bir uygulama olduğunu göstermektedir. Ayrıca, safsızlıkların varlığı, biriktirme koşulları, tane boyutu, kalınlık ve kristallik gibi faktörler enerji bant aralığı değerini etkileyebilir. Genel olarak, daha yüksek bir bant aralığı değerini, yüksek voltajların, sıcaklıkların ve frekansların gücünün yeterli şekilde işlenmesine izin vermek için askeri, güç dönüşümü ve radyo uygulamalarında uygulanabilir.

### 5.5. Spektroskopik Elipsometri (SE) Sonuçlar

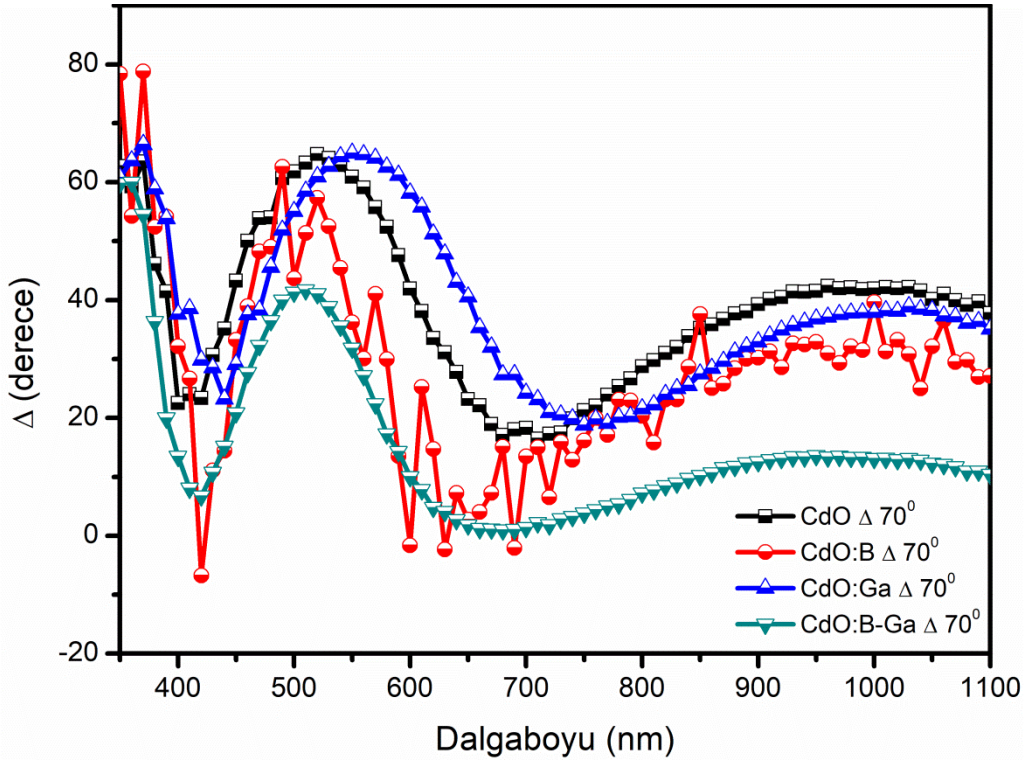
Spektroskopik elipsometrinin temeli, polarize ışık yansımaya malzemenin verdiği tepkinin ölçülmesidir. Spektroskopik elipsometre ölçümlerinde her dalga boyunda ve geliş açısında  $\psi$  ve  $\Delta$  spektrumları yakalanır. Aşağıdaki denklem, numunenin optik ve yapısal özellikleriyle ilişkili olan ve fresnel katsayılarına bağlı olan  $\psi$  ve  $\Delta$  parametrelerini ifade eder (Moradi vd., 2023):

$$\rho = \tan\Psi e^{i\Delta} = R_p/R_s \quad (\text{F.10})$$

Işığın, geliş düzlemine dikey (s) ve paralel (p) olarak polarize edildiği karmaşık yansımaya katsayıları, bu denklemde sırasıyla  $R_s$  ve  $R_p$  değişkenleri ile gösterilir. p polarize ve s polarize bileşenler için  $\Delta$ , gelen ve yansıyan dalgalar arasındaki faz farkındaki kaymayı temsil eder.  $\rho$ , karmaşık yansımaya oranıdır ve  $\tan\psi$ , gelen düzleme paralel polarize yansımaya katsayısının, gelen düzleme dik polarize yansımaya katsayısına oranıdır. İncelenen 300–1100 nm spektral aralık için, ölçümlerde kullanılan ışığın geliş açısı  $70^\circ$  dir. şekil 5.12 ve şekil 5.13, saf CdO, CdO:B, CdO:Ga ve CdO:B-Ga ince filmlerin  $\Delta$  ve  $\psi$  değerlerini dalga boyuna göre göstermektedir. Ortalama Karesel Hata (MSE), uyum sürecinde uyumun iyiliğini değerlendirmek için kullanılır. En iyi uyumların MSE'leri, modelin bu ince film örneklerini iyi bir şekilde tanımladığını gösterecek kadar düşüktür (30'dan az). Saf CdO, CdO:B, CdO:Ga ve CdO:B-Ga ince filmlerin MSE değerleri sırasıyla 4.195, 4.321, 3.264 ve 4.464'tür. SE ölçümlerinden elde edilen gelen ve yansıyan ışığın polarizasyon durumundaki göreceli değerim (genlik oranı ve faz farkı spektrumları) ile  $60^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $70^\circ$  ve  $75^\circ$  gelen açılarda büyütölmüş CdO filminden elde edilen ölçölen spektrumların model uyumları, Wang ve meslektaşları tarafından filmlerin dielektrik fonksiyonlarını, optik sabitlerini ve absorpsiyon katsayılarını belirlemek için kullanılmıştır. Sonuçlar, tüm spektral aralıkta modellerle mükemmel uyum göstermiştir (Wang vd., 2023).



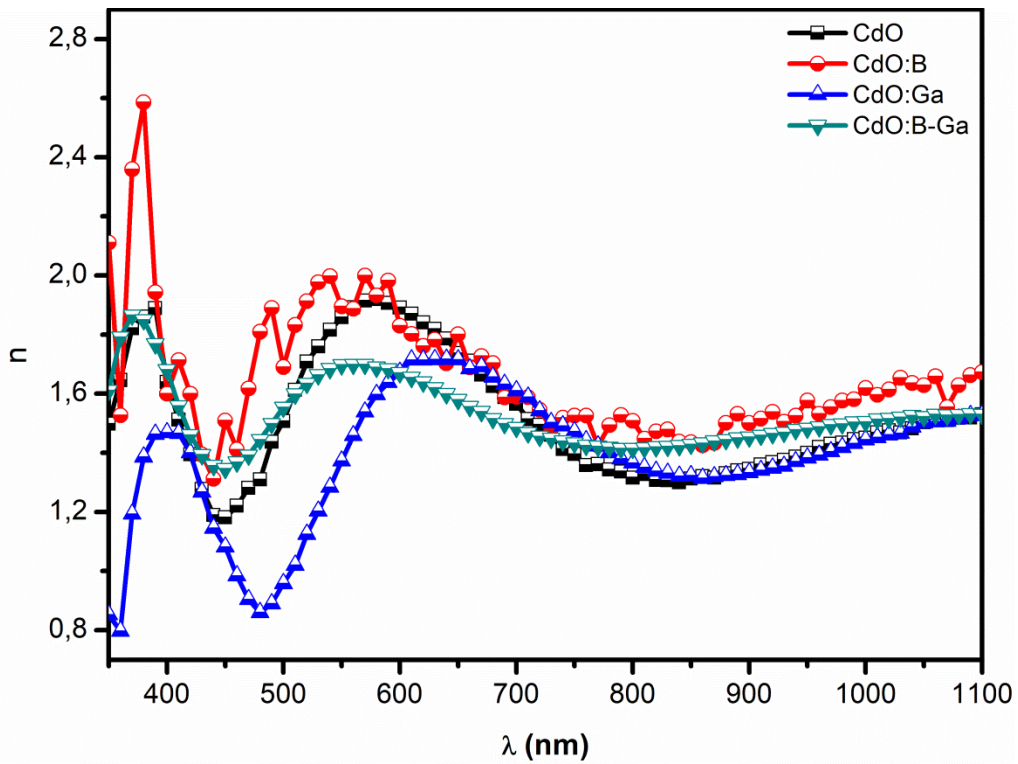
Şekil 5.12. Psi ( $\psi$ ) için saf ve katkılı CdO ince filmlerin elipsometrik verilerinin deneysel sonuçları



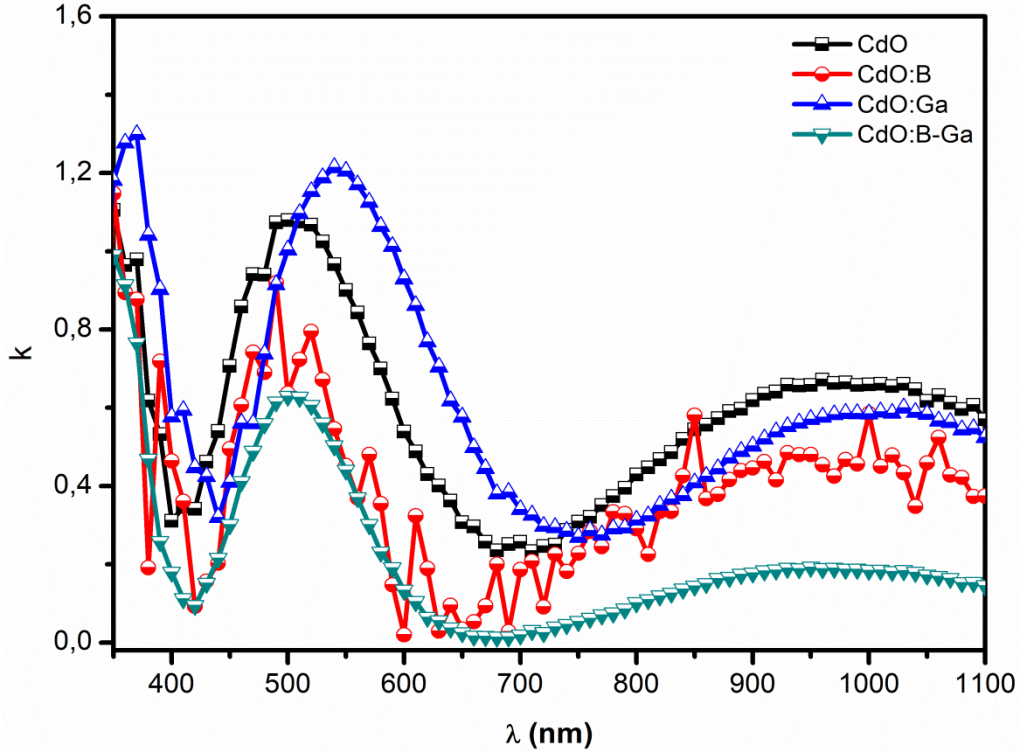
Şekil 5.13. Delta ( $\Delta$ ) için saf ve katkılı CdO ince filmlerin elipsometrik verilerinin deneysel sonuçları

Yarıiletken cihazların uygun şekilde üretilebilmesi için kırılma indislerinin dağılımı incelenmelidir. Filtreler, anahtarlar ve modülatörler gibi kırılma indisinin çok önemli olduğu birçok entegre cihaz çalışmasında, cihaz tasarımında malzemenin optik dağılımını ve diğer optik özelliklerini anlamak çok önemlidir. Optik ortamın kırılma indisi, bir ışının bu ortamda nasıl

ilerlediğini tanımlayan boyutsuz bir niceliktir (Khan vd., 2021). Hızlı ışığın bir nesne içinden geçiş şekli, kırılma indisi tarafından belirlenir. Şekil 5.14'den, saf ve katkılı CdO ince filmlerin görünür bölge kırılma indisi değerlerinin 0.8 ile 2 arasında değiştiği açıkça görülmektedir. Kırılma indisleri araştırıldığında, Ga katkısının değerlerinin saf CdO ince filmdekenden daha düşük olduğu bulunmuştur. Malzemenin optik dispersiyon davranışı, kırılma indisi değerindeki bu düşüşün nedenidir. Ek olarak, Ga ve B-Ga çift katkılı CdO ince filmlerin, saf ve B katkılı CdO ince filmlerden biraz daha düşük kırılma indislerine sahip olduğu gözlemlenebilir. Bunun nedeni, CdO yapısındaki B ve Ga elementlerinin elektronların polarizasyon kapasitesini azaltması olabilir.



Şekil 5.14. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin kırılma indisi grafiği



Şekil 5.15. Saf ve katkılı CdO ince filmlerin sönüm katsayısı grafiği

Malzeme içinden geçerken kaybedilen ışın yüzdesi, maddenin absorpsiyon özelliği ile bağlantılı olan sönüm katsayısı ile ölçülür. Ortamın birim mesafe başına saçılma ve absorpsiyon, radyasyon kaybına neden olur (Nagaraja vd., 2021). Şekil 5.15, tüm yarıiletken ince filmler için sönüm katsayısı değerlerinin 0.05 ile 1.2 arasında değiştiğini göstermektedir; bu, soğurma tabakası için iyi bir aralıktır. Ayrıca, özellikle 700 nm dalga boyundan sonra B ve Ga dopantlarının etkisiyle sönüm katsayısı azalmıştır. R. A. Zargar ve arkadaşları tarafından yapılan literatür çalışmasına göre,  $\text{TiO}_2\text{-CdO}$  kaplı filmlerin kırılma indisi değerleri, dalga boyu bant aralığı rejimine kadar arttıkça artmış, ardından doyuma ulaşmış ve %10 CdO içeriğinde 1.87'den 1.74'e düşmüştür. Kırılma indisi değerindeki bu değişiklik, kristallik değişikliklerine ve film paketleme yoğunluğunun artmasına atfedilmiştir. Bu, kırılma indisinin bant aralığı aralığında düzgün bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Ek olarak, filmlerin sönüm katsayısı (k) önce dalga boyu arttıkça artış eğilimi gösterirken, ardından bant aralığı alanında Cd katkısı ile birlikte dalga boyu arttıkça azalmaya başlamış ve son olarak daha yüksek dalga boylarında neredeyse sabit kalmıştır. Cd atomlarının ikamesi, bant aralığı bölümünde k ve n'nin bu kaymasını uyaran yerel bir yapısal değişikliklere neden olmuştur. Optoelektronik cihazlar oluşturma kapasiteleri, sırasıyla daha küçük ve daha büyük n ve k değerleri ile UV-görünür aralıkta artırılmıştır (Zargar ve ark., 2023).

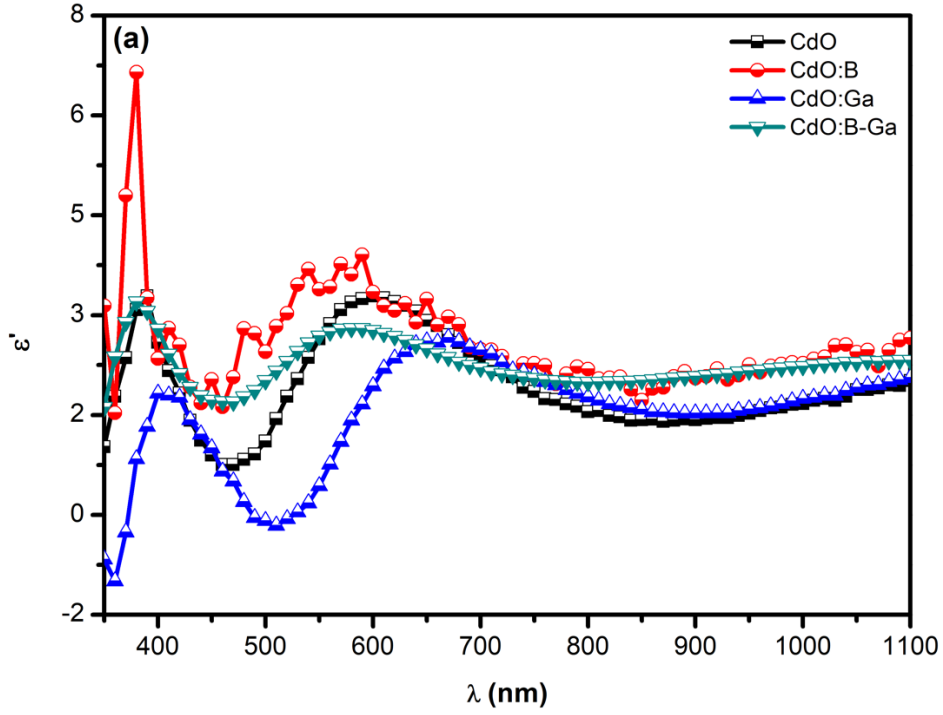
M.H. Kabir ve meslektaşları, Sr katkılı CdO filmlerin kırılma indisi değerlerinin, dalga boyu arttıkça önce belirli bir noktaya yükseldiğini, ardından düşmeye devam ettiğini keşfettiler. Bu, tüm filmlerin kırılma davranışının anormal olduğunu göstermiştir. Ayrıca, CdO filmlerin toplam kırılma indisinin Sr katkısının konsantrasyonu arttıkça yükseldiği keşfedilmiştir. Bunun nedeninin, filmlerin yüzeyinin daha pürüzlü hale gelmesinden kaynaklandığı rapor edilmiştir. Araştırmacılar, Sr katkısının konsantrasyonunun aynı spektral dalga boyu aralığındaki CdO filmlerin kırılma indisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Aynı ekip, katkısız ve Sr katkılı CdO ince filmlerin sönüm katsayısının dalga boyu ile nasıl değiştiğini de incelemiştir. Tüm numuneler, dalga boyu arttıkça sönüm katsayısında dramatik bir düşüş göstermiştir. Ayrıca, Sr katkılı filmler, katkısız filmlere göre daha yüksek sönüm katsayısı değerine sahiptir; yani, Sr katkısı konsantrasyonu arttıkça sönüm katsayısı da kademeli olarak artmıştır. Ayrıca, bu sönüm katsayısı davranışının, Sr katkısı konsantrasyonu arttıkça CdO filmlerin ışığı emme kabiliyetinin de arttığını gösterdiğini sonucuna varmışlardır (Kabir ve ark., 2021).

Genel olarak, dielektrik sabitleri büyük ölçüde malzemenin elektriksel yapısına bağlıdır ve malzeme içinden geçen elektromanyetik radyasyonu etkileyen bant aralığının belirtilen yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Dielektrik sabitlerinin sanal ve gerçek değerlerini hesaplamak için aşağıdaki ilişkiler kullanılmıştır [39]:

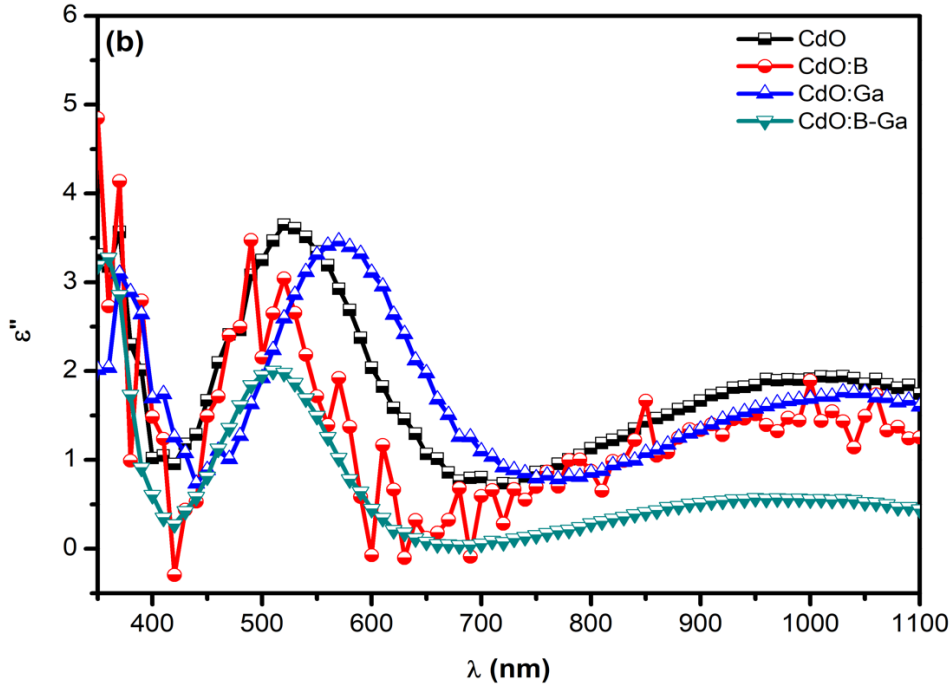
$$\epsilon' = n^2 - k^2 \quad (\text{F.11})$$

$$\epsilon'' = 2nk \quad (\text{F.12})$$

Saf, B ve Ga çift katkılı CdO filmlerin sanal ve gerçek dielektrik sabit değerlerinin dalga boyu ile birlikte arttığı Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de gözlemlenmiştir, bu da kırılma indisi grafikleriyle tutarlıdır. 400–600 nm dalga boyu aralığında, gerçek ve sanal dielektrik sabit değerlerinde daha keskin bir artış ve azalma görülmektedir. B ve Ga katkısı sonucunda dielektrik sabitlerinin azaldığı da açıktır. Tüm nanoyapılı ince filmlerin gerçek ve sanal dielektrik sabit değerleri de grafikler analiz edildiğinde görünür bölgede önemli farklılıklar göstermektedir. Her numunede ortalama  $\epsilon'$  değerlerinin  $\epsilon''$  değerlerinden daha büyük olduğu açıktır. Filmlerin enerji bandı boşluklarındaki durum yoğunlukları, gerçek ve sanal bileşenler arasındaki bu tutarsızlıkla bağlantılıdır.



Şekil 5.16. Saf ve katkılı CdO ince filmler için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak dielektrik sabitlerinin gerçek kısmındaki değişiklikler



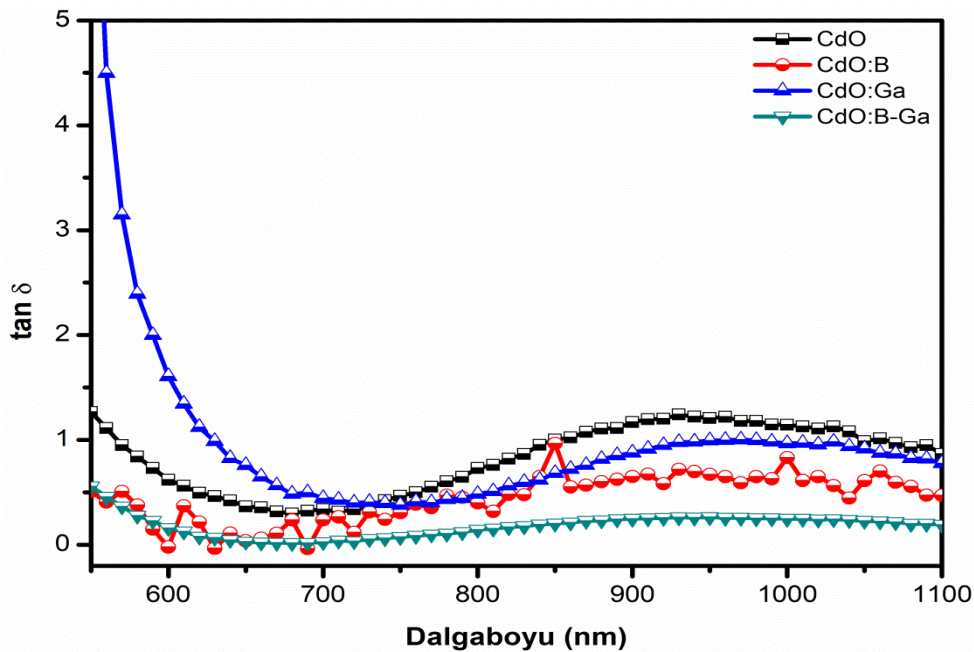
Şekil 5.17. Saf ve katkılı CdO ince filmler için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak dielektrik sabitlerinin sanal kısmındaki değişiklikler

R.S. Ibrahim ve arkadaşları, saf CdO ve K katkılı CdO ince filmler için dielektrik sabitinin gerçek bileşeninin dalga boyuna göre nasıl değiştiğini incelemişlerdir. K katkısının oranı arttıkça  $\epsilon'$ 'in arttığı gösterilmiştir. Ayrıca, CdO'da K katkısının artırılması, görünür aralıkta  $\epsilon'$  parametresinde dramatik bir artışa neden olmuş; bu, filmlerin yansıtma oranının artması ve emilim oranının azalmasıyla açıklanmıştır (Ibrahim ve ark., 2024). Ganesh ve arkadaşları, 300–

2400 nm aralığında gözlemlenen optik verileri kullanarak Tb katkılı CdO ince filmlerin dielektrik özelliklerini hesaplamışlardır. Filmin üzerine gelen dalga boyunun dielektrik sabiti üzerinde önemli bir etkisi olduğu keşfedilmiştir. Kırılma indisine benzer şekilde, en yüksek değerler spektrumun kızılötesi kısmında görüldüğü rapor edilmiştir. Ayrıca, Tb katkılamanın dielektrik sabitinin gözlemlenebilir aralığını artırdığı sonucuna varmışlardır (Ganesh ve ark., 2019). Optoelektronik cihazların kullanıldığı uygulamalarda, enerji kaybı fonksiyonu önemli bir rol oynar. Dielektrik aracılığıyla toplamda ne kadar güç kaybedildiği (hacim ve yüzey enerjisi) önemlidir. Kayıp faktörü ( $\tan(\delta)$ ), enerji kaybının neden olduğu malzemelerdeki faz farkını temsil eder ve malzemelerin yapısı ve kusurlarının değerlendirilmesinde değerli bir terimdir (Soylu & Kocuk, 2022). Düşük dissipasyon faktörü değerleri, dielektriğin arzu edilen bir özellik olarak mükemmelliğini gösterir. Kayıp modülü sistemindeki kayıp faktörü,  $\tan(\delta)$  güç kaybı oranı ile ilişkilidir.  $\tan(\delta)$ , aşağıda açıklanan şekilde dielektrik sabitlerinin gerçek ve sanal kısımlarına bağlıdır (Anwar ve ark., 2022):

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (5.9)$$

Bu durumda karmaşık dielektrik sabiti, gerçek ve sanal bileşenler  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$ 'den oluşan  $\epsilon$  ile gösterilir.



Şekil 5.18. Saf ve katkılı CdO ince filmler için kayıp faktörü ile foton dalga boyu ilişkisi

Dalga boyu ve  $\tan(\delta)$  grafiği Şekil 5.18'de gösterilmektedir. Saf ve katkılı CdO ince filmler, grafikteki tüm dalga boyu değerleri için neredeyse sabit bir bağımlılık gösterirken, Ga katkılı CdO ince filmler 600 nm civarındaki dalga boyları arasında yüksek bir bağımlılık gös-

termektedir. Absorpsiyon katsayısındaki ani düşüş bunun nedeni olabilir. M. Anitha ve arkadaşları, Zn katkılı CdO ince filmleri araştırmış ve dalga boyu arttıkça dissipasyon faktörünün azaldığını bulmuşlardır. Ayrıca, yayılma faktörünün 450 ile 500 nm arasında hızla azaldığı ve daha uzun dalga boylarında sabit kaldığı gösterilmiştir. Ayrıca, daha kısa dalga boylarında ince filmlerde foton-elektron etkileşiminin meydana geldiğini de bildirmişlerdir (Anitha ve ark., 2018).

M. Anitha ve meslektaşlarının araştırmasına göre, flor katkılı CdO ince filmlerin yayılma faktörünün dalga boyu ile azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yayılma faktörünün daha uzun dalga boylarında sabit kaldığı ve 450 ile 500 nm arasında önemli ölçüde düştüğü rapor edilmiştir. Bulgularına göre, foton-elektron etkileşimi daha kısa dalga boylarında ince film bölgesinde meydana gelmektedir (Anitha ve ark., 2019).

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, elektrodepozisyon tekniği kullanılarak ITO alt tabakalar üzerine saf ve B, Ga ve B-Ga çift katkılı CdO filmlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Tüm filmlerdeki kristal boyutu, hesaplama yöntemine bağlı olarak değişmiştir. Çift katkılı B ve Ga elementleriyle yapıda değişkenlik gözlenmiştir. Benzer bir durum tepe yoğunlukları için de geçerlidir. Saf CdO'da tepe yoğunluğu artarken, katkılama ile tepe yoğunluğu azalmaya başlamıştır. Bu durum, iyonlar arasındaki iyon yarıçapı farkından kaynaklanıyor olabilir. Elde edilen filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde, film yüzeylerinin çatlak, boşluk ve gözenek içermeyen pürüzsüz ve homojen sürekli bir yapıda olduğu ve ITO alt tabakaların iyi kaplandığı görülmüştür. Filmlerin absorpsiyon ve geçirgenlik ölçümleri 250-900 nm dalga boyu aralığında alınmıştır. CdO filmlerinin hesaplanan  $E_g$  değerleri incelendiğinde,  $E_g$  değerinin katkı maddesine bağlı olarak değiştiği ve en yüksek  $E_g$  değerinin CdO:B-Ga'da, en düşük  $E_g$  değerinin ise saf CdO'da elde edildiği görülmüştür. Spektroskopik elipsometri verileri, biriktirilen ince filmlerin optik özelliklerinde çift katkılama etkilerini göstermektedir. Katkı maddesi bileşenleri, biriktirilen filmlerin sönüm katsayısını, kırılma indislerini, gerçek dielektrik sabitini, sanal dielektrik sabitini ve kayıp faktörünü etkilemişti. Yapılan bu çalışma, katkı maddelerinin miktarı ve türünün, elde edilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar, CdO tabanlı ince film malzemelerinin performansını artırmak ve optoelektronik cihazlarda daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için yeni stratejiler geliştirmeye yardımcı olacaktır.

## KAYNAKÇA

- Agnihotri, P., Verma, A., Saini, A., Rani, R., Maudez, W., Wagner, E., & Rai, R. (2024). *A spectroscopic ellipsometry study of TiO<sub>2</sub>: ZrO<sub>2</sub> on TiN/Si thin films prepared by chemical beam vapor deposition*. *Surface and Interface Analysis*, 56(11), 808–816.
- Al-Hardan, N. H., Abdullah, M. J., Aziz, A. A., & Rashid, S. A. (2017). Gallium-doped CdO thin films: Structural and optical properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 65, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.03.013>
- Ahmad, A. A., Aljarrah, I. A., Bani-Salameh, A. A., & others. (2024). Optical, structural, electrical, and morphological properties of (Ga:B) co-doped CdS thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35, 1730. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-13500-9>
- Akhter, M., & Alam, M. M. (2023). Potentiometry. In *Physical Pharmacy and Instrumental Methods of Analysis* (pp. 123-156). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Aktas, S. (2023). Investigation and comparison of optical properties of CdO and CdGaO transparent conductive metal oxide thin films. *Journal of Materials Electronic Devices*, 1, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12648-019-01403-z>
- Alam, M. K., Hossain, M. S., Bahadur, N. M., & Ahmed, S. (2024). A comparative study in estimating of crystallite sizes of synthesized and natural hydroxyapatites using Scherrer method, Williamson-Hall model, size-strain plot and Halder-Wagner method. *Journal of Molecular Structure*, 1300, 130536. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.130536>
- Al-Dujayli, S. M. A., & Ali, N. A. (2022). The effects of CuO doping on structural, electrical and optical properties of CdO thin films deposited by pulsed laser deposition technique. *Journal of Ovonic Research*, 18(4), 579–590. <https://doi.org/10.15251/JOR.2022.184.579>
- Al-Gaashani, R., Radiman, S., Al-Douri, Y., Tabet, N., & Daud, A. R. (2022). Effect of annealing time on structure, morphology, and optical properties of nanostructured CdO thin films prepared by CBD technique. *Crystals*, 12(9), 1315. <https://doi.org/10.3390/cryst12091315>
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. *Minerals*, 12(2), 205. <https://doi.org/10.3390/min12020205>
- Ali, A. N. M., Ali, N. A., Hussein, S. I., Al-Ghamdi, S. A., Abd-Elnaiem, A. M., & Shamekh, A. M. A. (2024). Conversion of preferred crystalline orientation by annealing and its impacts on the structural, electronic, and optical properties of pulsed laser-deposited CdO thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 1002, 175498. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175498>
- Anitha, M., Anitha, N., Saravanakumar, K., Kulandaisamy, I., & Amalraj, L. (2018). Effect of Zn doping on structural, morphological, optical and electrical properties of nebulized spray-deposited CdO thin films. *Applied Physics A*, 124(8), Article 561.
- Anitha, M., Saravanakumar, K., Anitha, N., & Amalraj, L. (2019). Influence of fluorine doped CdO thin films by a simplified spray pyrolysis technique using nebulizer. *Optical and Quantum Electronics*, 51(6), Article 187.
- Anwar, N., Shakoob, A., Niaz, N. A., Ali, G., Qasim, M., Irfan, M., & Mahmood, A. (2022). Investigation of dielectric relaxation behavior, electric modulus and AC conductivity of low doped polyaniline cadmium oxide (PANI-CdO) nanocomposites. *Polymer Bulletin*, 79(8), 6581–6600.
- Altiokka, B., & Kiyak Yıldırım, A. (2018). Effects of pH on CdO films deposited onto ITO coated glass substrates by electrodeposition. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 12(1), 13–22. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2018.090052>

- Altıokka, B., & Kıyak Yıldırım, A. (2021). Effects of electrolyte on CdO films obtained by electrodeposition. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 91(3), 605–610. <https://doi.org/10.1007/s40010-020-00700-1>
- Aydin, R., & Şahin, B. (2017). Comprehensive research on physical properties of Zn and M (M: Li, Na, K) double doped cadmium oxide (CdO) nanostructures using SILAR method. *Ceramics International*, 43(10), 7383–7390. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.087>
- Aydoğu, S., Çabuk, G., & Çoban, M. B. (2019). The effects of different Ga doping on structural, optical and electrical properties of CdO films. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(1), 129-136. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.459950>
- Azzaoui, W., Medles, M., Miloua, R., & others. (2023). Rietveld refinement combined with first-principles study of Zn and Al–Zn doped CdO thin films and their structural, optical, and electrical characterizations. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(1010). <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10384-z>
- Balkan, N., & Erol, A. (2021). *Semiconductors for Optoelectronics*. Springer International Publishing.
- Begué, A., Cotón, N., & Ranchal, R. (2024). Magnetic anisotropy evolution with Fe content in electrodeposited Ni<sub>100-x</sub>Fe<sub>x</sub> thin films. *Journal of Materials Chemistry C*, 12, 10104. <https://doi.org/10.1039/D4TC01189A>
- Bruno, T. J., Robinson, J. W., Frame, E. M. S., & Frame, G. M. (2023). Electroanalytical chemistry. In *Undergraduate Instrumental Analysis* (pp. 815-881). CRC Press.
- Butt, M. A. (2022). Thin-film coating methods: A successful marriage of high-quality and cost-effectiveness A brief exploration. *Coatings*, 12(8), 1115. <https://doi.org/10.3390/coatings12081115>
- Busari, R. A., Omotoso, E., Animasahun, L. O., Adewinbi, S. A., Adewumi, E. O., Famoroti, C. T., Taleatu, B. A., & Fasasi, A. Y. (2023). Tuning the optical properties and some surface structure of Cd-O thin film electrodeposited by two-electrode: An effect of cobalt incorporation. *Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences*, 5(2), 1222. <https://doi.org/10.46481/jnsps.2023.1222>
- Chen, J., Li, Y., Zhang, Y., & Wang, H. (2018). Boron doping in CdO thin films: Effects on optical and electrical properties. *Thin Solid Films*, 645, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.12.010>
- Cook, B. (2022). Silicon–germanium: the legacy lives on. *Energies*, 15(8), 2957.
- Costa, I. M., Codognoto, L., & Valle, E. M. A. (2018). Voltammetric and spectroscopic studies of the interaction between copper (II) ions with the pesticide carbendazim and its effect in the soil. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 22, 1563–1570. <https://doi.org/10.1007/s10008-017-3746-5>
- Cavuşoğlu, H., Aydın, R., & Şahin, B. (2019). A comparative study on cobalt and aluminum as a dual doping element for CdO films. *Ceramics International*, 45(1), 899–906. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.265>
- Dahivade, P. B., Randive, S. G., Fugare, B. Y., Sathe, V. S., Thakur, A. V., & Lokhande, B. J. (2024). Nano-crystalline cadmium oxide thin films for supercapacitor application: Effect of solution concentrations. *ES Energy & Environment*, 23, 1104–1113. <https://doi.org/10.30919/esee1105>
- Davies, T. E., Li, H., Bessette, S., Gauvin, R., Patience, G. S., & Dummer, N. F. (2022). *Title of the article*. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 100(11), 3145. <https://doi.org/10.1002/cjce.24405>
- Deokate, R. J., & Lokhande, C. D. (2014). Liquefied petroleum gas sensing properties of sprayed nanocrystalline Ga-doped CdO thin films. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 193, 411-416. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.11.074>

- De Oliveira, R. P., Benvenuti, J., & Espinosa, D. C. R. (2021). A review of the current progress in recycling technologies for gallium and rare earth elements from light-emitting diodes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *145*, 111090. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111090>
- Desai, P. A., Admuthe, A. A., Bhairannavar, S. D., et al. (2023). [Makale başlığı]. *Journal of Nano- Electron. Physics*, *15*(5), 05033. [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(5\).05033](https://doi.org/10.21272/jnep.15(5).05033)
- Dubois, M., & Lefebvre, P. (2023). DC reactive magnetron sputtering of CdO thin films: Influence of oxygen flow rate. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, *19*, 9. <https://doi.org/10.1051/jeos/2023009>
- Erdoğan, E. (2019). X-ray line-broadening study on sputtered InGaN semiconductor with evaluation of Williamson–Hall and size–strain plot methods. *Indian Journal of Physics*, *93*(10), 1313–1318. <https://doi.org/10.1007/s12648-018-01376-1>
- Erdogan, E. (2021). Coronene organic films: Optical and spectral characteristics under annealing temperature influences. *Surface Review and Letters*, *28*(9). <https://doi.org/10.1142/S0218625X21500815>
- Erdoğan, E., & Kıyak Yıldırım, A. (2023). Synthesis of Zn-doped lead sulphide by electrodeposition: potential change on structural, morphological, and optical properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *34*, 880. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10286-0>
- Erdoğan, E. (2024). Production and characterization of electrodeposited cadmium sulfide semiconductor films with different boron content. *Crystal Research and Technology*, *59*, 2300353. <https://doi.org/10.1002/crat.202300353>
- Erdogan, E., Yilmaz, M., Aydogan, S., Incekara, U., & Kacus, H. (2021). Schottky barrier engineering in metal/semiconductor structures for high thermal stability. *Semiconductor Science and Technology*, *36*(7), 075020. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ac01a3>
- Erdogan, E., Yilmaz, M., Aydogan, S., Incekara, U., & Sahin, Y. (2021). *Optical Materials*, *121*, 111613. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111613>
- Fan, Y., Ran, H., Wang, Z., Ning, C., Zhai, J., & Yu, P. (2024). Semiconductive biomaterials for pathological bone repair and regeneration. *Advanced Functional Materials*, *34*(12), 2308310. <https://doi.org/10.1002/adfm.202308310>
- Ganesh, V., Manthrammel, M. A., Shkir, M., & AlFaify, S. (2019). Investigation on physical properties of CdO thin films affected by Tb doping for optoelectronics. *Applied Physics A*, *125*(4), Article 249.
- Ganjiani, Z., Jamali-Sheini, F., & Yousefi, R. (2016). Electrochemical synthesis and physical properties of Sn-doped CdO nanostructures. *Superlattices and Microstructures*, *100*, 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2016.10.064>
- Gürbüz, E., Aydın, R., & Şahin, B. (2018). A study of the influences of transition metal (Mn, Ni) co-doping on the morphological, structural and optical properties of nanostructured CdO films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *29*(3), 1823–1831. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-8091-z>
- Halabi, R., Abdallah, A. M., Khalil, M. I., & others. (2023). Investigation of structural, optical, electrical, magnetic, and antibacterial properties of (Mn and Sm) co-doped CdO nanostructures. *Applied Physics A*, *129*, 307. <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06606-0>
- Ibrahim, R. S., Azab, A. A., & Hameed, T. A. (2024). The effective role of potassium doping in improving the structural, morphological optical, and electrical properties of CdO thin film for optoelectronic application. *Optical Materials*, *157*, 115100. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115100>
- Ismail, W., Bakry, M., Elshobaki, M., El-Shaer, A., & Abdelfatah, M. (2021). Impact of precursor concentrations and substrate type on properties of electrodeposited CdO nanorod

- thin films for optoelectronic applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 133, 105899. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.105959>
- Jain, V. K. (2022). Semiconductors. In *Solid state physics* (pp. 295-330). Cham: Springer International Publishing.
- Jain, A., Patel, D. K., & Sharma, R. (2021). Enhancing photovoltaic performance through boron-doped CdO thin films. *Solar Energy*, 214, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.046>
- Kabir, M. H., Bhattacharjee, A., Islam, M. M., Rahman, M. S., Rahman, M. S., & Khan, M. K. R. (2021). Effect of Sr doping on structural, morphological, optical and electrical properties of spray pyrolyzed CdO thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(3), 3834–3842.
- Kabir, M. H., Hafiz, M., Urmı, S. A., Haque, M. J., Ali, M. M., Rahman, M. S., Khan, M. K. R., & Rahman, M. S. (2022). Effect of Ga doping on microstructure, morphology, optical and electrical properties of spray deposited CdO thin films. *Optical Materials*, 126, 112168. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112168>
- Kalathur, A. S. (2005). Cathodic electrodeposition of cadmium oxide, zinc oxide and mixed cadmium oxide-zinc oxide thin films (Yüksek lisans tezi, The University of Texas at Arlington).
- Karim, I., Naeem, M. A. H., Ayon, A. S. R., Sattar, M. A., Sabur, M. A., & Ahmed, A. N. (2025a). Effect of silver and cobalt on transparent conducting CdO thin films: Tuning the optoelectronic properties. *Materials Advances*, 6(2), 703-718. <https://doi.org/10.1039/D4MA00918E>
- Karim, I., Rokon, S. N., Naeem, M. A. H., Robin, I. K., Ahmed, A. N., Sattar, M. A., & Sabur, M. A. (2025b). Tunable Semiconducting Behavior and Linear-Nonlinear Optical Properties of Ag-Sn Dual-Doped Nanocrystalline CdO Thin Films for Optoelectronics. *ACS omega*, 10(42), 4949049505.
- Khan, M. M. (2025). Scanning electron microscopy. In *Photocatalysts: Synthesis and characterization methods* (pp. 281-294). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28913-2.00025-3>
- Khan, Z. R., Gandouzi, M., Alshammari, A. S., Bouzidi, M., Shkir, M., Alfaify, S., & Mohamed, M. (2021). Structural, linear and nonlinear optical properties of Zn@CdO nanostructured thin films: A quantitative comparison with DFT. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(13), 18304–18316.
- Kıyık Yıldıırım, A., & Altiokka, B. (2017). Effects of concentration on CdO films grown by electrodeposition. *Applied Nanoscience*, 7(1), 131–135. <https://doi.org/10.1007/s13204-017-0552-4>
- Kumar, B. R., Prasad, K. H., Kasirajan, K., Karunakaran, M., Ganesh, V., Bitla, Y., AlFaify, S., & Yahia, I. S. (2021). Enhancing the properties of CdO thin films by co-doping with Mn and Fe for photodetector applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 323, 112544. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112544>
- Kuldeep, S. (2022). *NCERT book class 12th physics part 2*. (Chapter 14, pp. 323-354). NCERT Publications.
- Kumar, P., & Singh, R. (2021). Sol-gel derived CdO thin films: Structural and optical properties. *Physica Scripta*, 96(10), 100069. <https://doi.org/10.1016/j.physo.2021.100069>
- Khalid, K., Ishak, R., & Chowdhury, Z. Z. (2024). UV-Vis spectroscopy in non-destructive testing. In *Non-Destructive Material Characterization Methods* (Chapter 15). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91150-4.00021-5>
- Lee, H. J., Gamel, M. M. A., Ker, P. J., et al. (2022). Absorption coefficient of bulk III-V semiconductor materials: A review on methods, properties and future prospects. *Journal of Electronic Materials*, 51(10), 6082–6107. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09846-7>

- Manjula, N., & Balu, A. R. (2017). Double doping (Mn+Cl) effects on the structural, morphological, photoluminescence, optoelectronic properties and antibacterial activity of CdO thin films. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 131, 360–371. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.10.074>
- Manjula, N., Suganya, M., Prabha, D., et al. (2017). Optoelectronic, magnetic and antibacterial properties of CdO thin films doubly doped with Mn (cationic) and F (anionic) ions. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(10), 7615–7621. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6454-0>
- Meshram, R. S., Panse, V. R., Waghare, S. M., Manap, A., Hadap, A., & Saregar, A. (2024). Structural and optical properties of CdO thin films deposited by spray pyrolysis technique. *Journal of Optics*, 53(1). <https://doi.org/10.1007/s12596-024-02437-1>
- Mirzaei, A., Jamshidi, E., Morshedloo, E., Javanshir, S., & Manteghi, F. (2021). Carrageenan assisted synthesis of morphological diversity of CdO and Cd(OH)<sub>2</sub> with high antibacterial activity. *Materials Research Express*, 8(6), 065006. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac0b76>
- Mohamed, R. A., El-Nahass, M. M., El-Bakry, M. Y., El-Dahshan, E. S. A., Aamer, E. H., & Habashy, D. M. (2024). Investigation of optical properties of molybdenum trioxide (MoO<sub>3</sub>) thin films using neural networks. *The European Physical Journal Plus*, 139 (5), 378.
- Moradi, S., Nazari Setayesh, A., & Sedghi, H. (2023). A comparative study on the structural and spectroscopic ellipsometry characterizations of (Co, Ni)-doped SnO<sub>2</sub> nanostructured films spin-coated on glass substrates. *Bulletin of Materials Science*, 46(1), Article 5. <https://doi.org/10.1007/s12034-022-02849-4>
- Naeem, M. A. H., Karim, I., Ayon, A. S. R., Sattar, M. A., Sabur, M. A., & Ahmed, A. N. (2024). Insights into the consequence of (Al–Zn) dual-doping on structural, morphological, optical, and electrical properties of spray pyrolyzed CdO thin films. *Heliyon*, 10(4), e26545. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26545>
- Nagaraja, B. S., Gurumurthy, S. C., Bairy, R., Ramam, K., & Rao, A. (2021). A systematic investigation on structural, electrical, linear and nonlinear optical properties of Zn:CdO thin films for optoelectronic applications. *Optical Materials*, 122, 111669. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111669>
- Naveed, N. (2025). Fundamentals of thin films. In *Thin films and coatings: Engineering applications* (pp. 25-47). Springer Nature Singapore.
- Nazli, H., Anjum, R., Iqbal, F., Awan, A., Riaz, S., Kayani, Z. N., & Naseem, S. (2020). Magneto-dielectric properties of in-situ oxidized magnesium-aluminium spinel thin films using electrodeposition. *Ceramics International*, 46(7), 8841-8849. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.12.091>
- Noorunnisha, T., Suganya, M., Karthika, M., et al. (2020). (Zn + Co) co-doped CdO thin films with improved figure of merit values and ferromagnetic orderings with low squareness ratio well suited for optoelectronic devices and soft magnetic materials applications. *Applied Physics A*, 126(8), 762. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03954-z>
- Nogueira, A. E., Ribeiro, L. S., Nogueira, F. G., & Torres, J. A. (2024). Semiconductors: An introduction. In *Handbook of semiconductors* (pp. 1-11). CRC Press.
- Orlandi, V., Kahn, M. L., Gregory, N., Paillet, A., & Clergereaux, R. (2024). Sustainability assessment of plasma-assisted processes for thin film deposition in space applications. In *75th International Astronautical Congress (IAC)* (pp. 13-p).
- Ortega, R. E. (2024). Understanding the Evolution of Carriers in Tin Cadmium Oxide Ternary Plasmonic Nanocrystals. Retrieved from [https://purl.lib.fsu.edu/diginole/Ortega\\_fsu\\_0071E\\_18970](https://purl.lib.fsu.edu/diginole/Ortega_fsu_0071E_18970)

- Qi, J.-J., Liu, M.-H., He, L., Wang, J.-X., & Zeng, X.-F. (2025). A general strategy for controllable preparation of nano-CaCO<sub>3</sub>. *Langmuir*, *41*, 1137. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c04458>
- Politano, G. G. & Versace, C. (2023). Spectroscopic ellipsometry: Advancements, applications and future prospects in optical characterization. *Spectroscopy Journal*, *1*(3), 163–181.
- Rafiee, M., Mayer, M. N., Punchedhewa, B. T., & Mumau, M. R. (2021). Constant potential and constant current electrolysis: An introduction and comparison of different techniques for organic electrosynthesis. *The Journal of Organic Chemistry*, *86*(22), 15866-15874. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.1c01391>
- Rouf, A., Rahman, M. S., Rahman, M. M., Sarker, M. S. I., & Khan, M. K. R. (2025). Synthesis of gallium (Ga) doped CdO/p-Si heterojunction and evaluation of junction parameters. *Physica B: Condensed Matter*, *706*, 417043. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2025.417043>
- Sahmi, A., Bensadok, K., & Trari, M. (2024). Efficient oxidation by sono-photo-electrocatalysis of rhodamine B using MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as photoanode. *Journal of Solid*
- Seshan, K., & Schepis, D. (Eds.). (2018). *Handbook of thin film deposition*. William Andrew
- Shabbir, M. K., Akhtar, J., Ramzan, Z., & Meeran, F. (2025). Design and fabrication of smart surface coating and thin films for future industrial applications. In *Multi-scale and multifunctional coatings and interfaces for tribological contacts*(pp. 44-67). CRC Press.
- Sicius, H. (2024). Earth metals: Elements of the third main group. In *Handbook of the chemical elements* (pp. 141-214). Springer Berlin Heidelberg.
- Singh, P., & Bharti, R. (2022). Synergistic effects of co-doping in CdO thin films: A comprehensive review. *Materials Research Bulletin*, *149*, 111725. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111725>
- Shin, Y., Ryu, J., Bai, T., Qiang, Y., Qi, Y., Li, G., Huang, Y., Seo, K. J., & Fang, H. (2024). Array-wide uniform PEDOT:PSS electroplating from potentiostatic deposition. *Biosensors and Bioelectronics*, *241*, 116715. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116418>
- State Electrochemistry*, *28*, 2937–2947. <https://doi.org/10.1007/s10008-024-05852-3>
- Soylu, M. (2024). Effect of Cr doping and photoresponse properties of photodiode based on CdO thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *35*, 771. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-12529-0>
- Soylu, M., & Kocuk, H. (2022). Effect of doping thiourea in CdO thin films for electronic applications. *Surface Review and Letters*, *29*(5), 2250063. <https://doi.org/10.1142/S0218625X22500639>
- Somano, T. T. (2022). Characteristics of semiconductor diode and its application. *International Journal of Engineering Management*, *6*(2), 20–29. <https://doi.org/10.11648/j.ijem.20220602.11>
- Spencer, J. A., Mock, A. L., Jacobs, A. G., Schubert, M., Zhang, Y., & Tadjer, M. J. (2022). A review of band structure and material properties of transparent conducting and semiconducting oxides: and . *Applied Physics Reviews*, *9* (1), 011315. <https://doi.org/10.1063/5.0078037>
- Sze, S. M., Li, Y., & Ng, K. K. (2021). *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons.
- Şahin, B. (2019). Dual doping (Cu with rare-earth element Ce): An effective method to enhance the main physical properties of CdO films. *Superlattices and Microstructures*, *136*, 106296. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2019.106296>
- Tsirelson, V. G., & Ozerov, R. P. (2020). Electron density and bonding in crystals: Principles, theory and X-ray diffraction experiments in solid state physics and chemistry. CRC Press.

- Ünal, F. (2023). Comparison of optical properties of Cu- and In-doped CdO thin films having low dielectric loss. *Journal of Materials and Electronic Devices*, 1(1), 67–72. <https://www.dergi-fytronix.com/index.php/jmed/article/view/234>
- Venkatesh, R., Selvakumar, D. S., Dhasneem, S., & Kannan, L. V. (2024). Semiconductor devices: An overview. *Futuristic Trends in Electrical Engineering Volume 3 Book, 1*, 11–37. <https://doi.org/10.58532/V3BDEE1P2CH1>
- Yılmaz, A., & Şahin, F. (2023). Growth and characterization of CdO thin films by solution growth technique. *Materials Chemistry and Physics*, 303, 128302. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128302>
- Zargar, R. A., Arora, M., Bhat, S. A., Mearaj, T., Manthrammel, M. A., & Shkir, M. (2023). Growth of TiO<sub>2</sub>–CdO coated films: A brief study for optoelectronic applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 179, 111390. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2023.111390>
- Zhang, L., & Wang, J. (2022). Chemical spray deposition of CdO thin films: Effect of substrate temperature. *Optical Materials*, 125, 112123. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112123>
- Wang, Y., Chow, Y. Y., Kwok, C. K. G., Leung, Y. F., & Yu, K. M. (2023). Effects of transition metal dopants (Mo and W) on electrical and optical properties of CdO thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 935, 168116.
- Wahab, M. A. (2024). Importance of d-spacing in diffraction of crystals. In *Mirror symmetry: The mother of all crystal symmetries* (pp. 105-142). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-8853-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-99-8853-2_5)
- Walock, M. (2012). *Nanocomposite coatings based on quaternary metal-nitrogen* [Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Arts et Métiers; University of Alabama in Birmingham].