



**Ce KATKILI ZnO FİLMLEİNİN ELDE
EDİLMESİ, FİZİKSEL
KARAKTERİZASYONU VE AYGIT
UYGULAMALARI**

Yüksek Lisans Tezi

Fatma ÜNÜGÜR SAKARYA

Eskişehir 2025

**Ce KATKILI ZnO FİLMLEİNİN ELDE EDİLMESİ, FİZİKSEL
KARAKTERİZASYONU VE AYGIT UYGULAMALARI**

Fatma ÜNÜGÜR SAKARYA

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Mart 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Fatma ÜNÜGÜR SAKARYA'nın Ce KATKILI ZnO FİLMLERİNİN ELDE EDİLMESİ, FİZİKSEL KARAKTERİZASYONU VE AYGIT UYGULAMALARI başlıklı çalışması 24/03/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR

Üye

: Prof. Dr. Tülay HURMA

Üye

: Prof. Dr. Evrim HÜR

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

24/03/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Fatma ÜNÜGÜR SAKARYA, Ce KATKILI ZnO FİLMLEİNİN ELDE EDİLMESİ, FİZİKSEL KARAKTERİZASYONU VE AYGIT UYGULAMALARI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Yasemin AğLAR

ÖZET

Ce KATKILI ZnO FİLMLERİNİN ELDE EDİLMESİ, FİZİKSEL KARAKTERİZASYONU VE AYGIT UYGULAMALARI

Fatma ÜNÜGÜR SAKARYA

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mart 2025

Danışman: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR

Bu tez çalışması kapsamında, sol-jel spin kaplama tekniği ile cam ve p-Si alttaşlar üzerinde katkısız ve seryum (Ce) katkılı çinko oksit (ZnO) filmleri elde edilmiştir. p-Si alttaş üzerine elde edilen filmlerde ısı buharlaştırma yöntemi kullanılarak *p-Si/n-ZnO:Ce* heteroeklem diyotları oluşturulmuştur. Elde edilen filmlerin X-ışını kırınım desenlerinden filmlerin yapısal parametreleri olan yarı pik genişliği, örgü sabitleri, yapılanma sabiti ve dislokasyon yoğunlukları hesaplanmıştır. Filmlerin geçirgenlik spektrumlarından % geçirgenlik değerleri, absorpsiyon spektrumlarından optik bant aralığı değerleri bulunmuştur. Filmlerin morfolojik özellikleri incelemek için atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmış olup, film pürüzlülük değerlerinin ve tanecik boyutunun Ce katkı oranının artmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür. Elementel analiz yapılan filmlerde Zn, O ve Ce varlığı doğrulanmıştır. *p-Si/n-ZnO:Ce* heteroeklem diyotlarının elektriksel karakterizasyonları için akım-voltaj ölçümleri alınmış ve diyot parametreleri (idealite faktörü ve bariyer yüksekliği) hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler: ZnO, Ce, Sol-jel spin kaplama tekniği, Heteroeklem diyot.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION, DEPOSITION OF THE Ce DOPED ZnO FILMS AND ITS DEVICE APPLICATION

Fatma ÜNÜGÜR SAKARYA

Department of Physics

Programme in Solid State Physics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, March 2025

Supervisor: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR

In this thesis, undoped and Cerium (Ce) doped Zinc oxide (ZnO) films were on glass and p-Si substrates produced by sol-gel spin coating technique. *p-Si/n-ZnO:Ce* heterojunction diodes were fabricated by using thermal evaporation method. The structural parameters of the films such as full-width of the half maximum, lattice constants, texture coefficient and dislocation densities were calculated from the X-ray diffraction patterns of the films. The percent transmittance values were obtained from transmittance spectra of the films and the optical band gap values were obtained from absorption spectra. Atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM) were used to examine the morphological properties of the films and it was observed that the film roughness values and particle size decreased with the increase of Ce doping ratio. The elemental analysis confirmed the presence of Zn, O and Ce in the films. For electrical characterization of *p-Si/n-ZnO:Ce* heterojunction diodes, current-voltage measurements were obtained and diode parameters (ideality factor and barrier height) were calculated.

Keywords: ZnO, Ce, Sol-gel spin coating technique, Heterojunction diode.

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitim sürecim boyunca, yardımlarını esirgemeyen, laboratuvar imkanları sağlayan, bilgi ve birikimini benimle paylaşan, danışmanlığımı yürüten değerli hocam Prof. Dr. Yasemin Çağlar'a teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim sürecinde bilgi ve tecrübesiyle desteklerini esirgemeyen, değerli hocam Prof. Dr. Müjdat Çağlar'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen yöneticim Sedat Halaç'a ve arkadaşlarım Nagihan Eda Dömen'e, Cemil Elitez'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim sürecim boyunca her zaman yanımda olan, desteklerini esirgemeyen sevgili annem Feride Ünügür'e, babam Bülent Ünügür'e ve kardeşim Oğuzhan Ünügür'e çok teşekkür ederim,

Tez çalışmam boyunca bana destek olan ve anlayışlarını gösteren sevgili eşim Ayhan Sakarya'ya teşekkür ederim.

Fatma ÜNÜGÜR SAKARYA

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Fatma ÜNÜGÜR SAKARYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
GÖRSELLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti.....	1
1.2. Tezin Amacı	4
2. TEORİK BİLGİ	5
2.1. Yarıiletkenler.....	5
2.2. p-n Eklem Diyotları	7
2.3. Metal-Yarıiletken Kontaklar	9
2.3.1. Omik kontak	10
2.3.2. Schottky (doğrultucu) kontak	11
2.4. Çinko Oksit (ZnO)	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. Sol-Jel Yöntemi	15
3.2. Katkısız ve Ce Katkılı ZnO Filmlerinin Sol-Jel Spin Kaplama Tekniği ile Elde Edilmesi ve <i>p-Si/n-ZnO:Ce</i> Heteroeklem Diyotların Fabrikasyonu	16
3.2.1. Alttaşların temizlenmesi	16

3.2.2. Çözeltilerin hazırlanması.....	17
3.2.3. Filmlerin elde edilmesi	19
3.2.4. <i>p-Si/n-ZnO:Ce</i> heteroeklem diyotların fabrikasyonu.....	22
4. KATKISIZ VE SERYUM KATKILI ÇİNKO OKSİT FİMLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ.....	24
4.1. Giriş	24
4.1.1. X-ışını kırınımı.....	24
4.1.2. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin X-ışını kırınım desenleri	27
5. KATKISIZ VE SERYUM KATKILI ÇİNKO OKSİT FİMLERİN OPTİK ÖZELLİKLERİ	33
5.1. Giriş	33
5.1.1. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin temel absorpsiyon spektrumları ve optik bant aralıkları.....	38
6. KATKISIZ VE SERYUM KATKILI ÇİNKO OKSİT FİMLERİN YÜZEY ÖZELLİKLERİ	42
6.1. Giriş	42
6.1.1. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin AFM görüntüleri	45
6.1.2. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin SEM görüntüleri.....	47
6.1.3. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin EDS analizi	48
7. <i>p-Si/n-ZnO</i> VE <i>p-Si/n-ZnO:Ce</i> HETEROEKLEM DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ	49
7.1. Giriş	49
7.1.1. <i>p-Si/n-ZnO</i> ve <i>p-Si/n-ZnO:Ce</i> heteroeklem diyotların akım-voltaj karakteristikleri.....	51
8. TARTIŞMA VE SONUÇ	53
KAYNAKÇA.....	55
ÖZGEÇMİŞ	

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. İş fonksiyonuna göre değişen kontak tipleri	10
Tablo 3.1. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin elde edilme parametreleri ve kodları	21
Tablo 3.2. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin kalınlık değerleri	21
Tablo 4.1. Ce^{+3} , Ce^{+4} ve Zn^{+2} iyonlarının, iyonik yarıçapları	30
Tablo 4.2. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerine ait örgü sabiti (a_{hex} , C_{hex} ve $a_{küp}$) değerleri	31
Tablo 5.1. Literatür ile karşılaştırmalı optik bant aralığı değerleri	40
Tablo 6.1. Katkısız ve Ce katkılı ZnO film yüzeylerinin roughness (rms) değerleri	45
Tablo 7.1. $p-Si/n-ZnO:Ce$ heteroeklem diyotların idealite ve bariyer yüksekliği değerleri	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yarıiletkenin şematik bant yapısı	5
Şekil 2.2. Farklı tipteki a) has, b) n-tipi ve c) p-tipi yarıiletkenlerin fermi seviyelerinin şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.3. p-n eklemine ait şematik gösterim.....	8
Şekil 2.4. Kıtlık bölgesi oluşumuna ait şematik gösterim	8
Şekil 2.5. a) İleri beslemeli p-n eklemının enerji bant diyagramı b) Ters beslemeli p-n eklemının enerji bant diyagramı	9
Şekil 2.6. n-tipi yarıiletken ve metalin; a) omik kontak öncesi b) omik kontak sonrası, termal dengede, enerji bant diyagramları.....	10
Şekil 2.7. p-tipi yarıiletken ve metalin; a) omik kontak öncesi b) omik kontak sonrası, termal dengede, enerji bant diyagramları	11
Şekil 2.8. n-tipi yarıiletken ve metalin; a) schottky (doğrultucu) kontak öncesi b) schottky (doğrultucu) kontak sonrası, termal dengede, enerji bant diyagramları	12
Şekil 2.9. p-tipi yarıiletken ve metalin; a) schottky (doğrultucu) kontak öncesi b) schottky (doğrultucu) kontak sonrası, termal dengede, enerji bant diyagramları	13
Şekil 2.10. ZnO'nun kristal yapıları; a) kübik b) kübik çinko blend c) hegzogonal wurtzite	14
Şekil 3.1. Sol-jel spin kaplama tekniği	16
Şekil 3.2. p-Si/n-ZnO:Ce heteroeklem diyotlarına ait şematik gösterim	23
Şekil 4.1. Kristal tarafından kırınıma uğrayan X-ışınları	25
Şekil 4.2. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin X-ışını kırınım desenleri	28
Şekil 4.3. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerine ait dislokasyon yoğunlukları.....	29
Şekil 4.4. Ce katkı oranı ile kristal boyutu ve yarı pik genişliği değerlerinin değişimi	30
Şekil 4.5. Ce katkı oranlarına göre yapılanma sabitinin (TC) değişimi	32
Şekil 5.1. Bir yarıiletkende temel absorpsiyon spektrumu	34
Şekil 5.2. Bir yarıiletkende doğrudan (direkt) bant geçişinin şematik gösterimi	35
Şekil 5.3. Bir yarıiletkende dolaylı (indirekt) bant geçişinin şematik gösterimi	36
Şekil 5.4. UV cihazı bileşenleri	37

Şekil 5.5. Bir yarıiletkenin absorpsiyon katsayısının, fotonun enerjisine göre değişiminden optik bant aralığının belirlenmesi	38
Şekil 5.6. Katkısız ve Ce Katkılı ZnO filmlerin absorpsiyon spektrumu.....	39
Şekil 5.7. Katkısız ve Ce Katkılı ZnO filmlerin geçirgenlik spektrumu	39
Şekil 5.8. Katkısız ve Ce Katkılı ZnO filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ değişimi grafiği	41
Şekil 6.1. Atomik kuvvet mikroskopunda (AFM) görüntü oluşumuna ait şematik gösterim.....	42
Şekil 6.2. Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) görüntü oluşumuna ait şematik gösterim	44
Şekil 6.3. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin 2D ve 3D AFM görüntüleri; a) Z0-C, b) ZC5-C, c) ZC10-C, d) ZC15-C, e) ZC20-C	46
Şekil 6.4. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin 100k büyütmedeki SEM görüntüleri	47
Şekil 6.5. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin EDS spektrumları	48
Şekil 7.1. <i>p-Si/n-ZnO:Ce</i> heteroeklem diyotların I-V grafikleri	51

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. BANDELIN SONOREX marka ultrasonik banyo	17
Görsel 3.2. METTLER TOLEDO marka terazi	18
Görsel 3.3. DAIHAN SCIENTIFIC marka manyetik karıştırıcı	19
Görsel 3.4. LAURELL marka spin kaplama cihazı	20
Görsel 3.5. PROTHERM marka tüp fırın	20
Görsel 3.6. HARRICK PLASMA marka plasma cleaner cihazı	22
Görsel 3.7. VAKSIS marka fiziksel metal buharlaştırma sistemi.....	23
Görsel 3.8. Elde edilen $p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Ce}$ heteroeklem diyotların fotoğrafı.....	23
Görsel 4.1. BRUKER/D2 Phaser marka X-ışını kırınım cihazı (XRD).....	27
Görsel 5.1. SCHIMADZU marka UV 2450 model spektrofotometre cihazı.....	37
Görsel 6.1. NT-MDT NANOEDUCATOR II marka atomik kuvvet mikroskobu (AFM)	43
Görsel 6.2. ZEISS ULTRAPLUS marka taramalı elektron mikroskobu (SEM)	44
Görsel 7.1. KEITHLEY 4200-SCS/CVU elektriksel karakterizasyon sistemi.....	50
Görsel 7.2. KEITHLEY marka Adapter-Box-C prop istasyonu, SIGNATONE marka mikrokonumlandırma ünitesi	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\text{\AA}$	: Angstrom
A^*	: Richardson sabiti
a_{hex}	: Örgü sabiti (hekzagonal)
$a_{küp}$	: Örgü sabiti (kübik)
$^{\circ}C$	: Santigrad derece
c_{hex}	: Örgü sabiti (hekzagonal)
c	: Işık hızı
D	: Ortalama kristal boyutu
d_{hkl}	: Kristal düzlemleri arası mesafe
E_c	: İletim bandı enerji seviyesi
E_g	: Optik bant aralığı
E_{Fi}	: Fermi enerjisi
E_{F_i}	: Asal Fermi enerjisi
E_{F_n}	: n bölgesindeki Fermi enerjisi
E_{F_p}	: p bölgesindeki Fermi enerjisi
eV	: Elektron volt
E_v	: Valans bandı enerji seviyesi
h	: Planck sabiti
(hkl)	: Miller indisleri
$\hbar\Omega$	: Fonon enerjisi
$h\nu$	: Foton enerjisi
I	: Akım
I_0	: Malzemeye gelen ışının şiddeti
I_1	: Malzemedен geçen ışının şiddeti
k	: Boltzmann sabiti
K	: Kelvin
N	: Yansıma sayısı
n	: Kırınım piklerinin sayısı
η	: İdealite faktörü
q	: Elektron yükü

TC	:	Yapılanma sabiti
$\%T$	:	% Geçirgenlik
R	:	Direnç
V	:	Voltaj
α	:	Absorpsiyon katsayısı
β	:	Yarı pik genişliği
θ	:	Bragg kırılma açısı
ϕ_m	:	Metalin iş fonksiyon
ϕ_s	:	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
λ	:	Dalgaboyu
δ	:	Dislokasyon yoğunluğu

1. GİRİŞ

Yarıiletken teknolojisinin tarihsel gelişimine bakıldığında oldukça uzun yıllardır üzerinde çalışmalar yapıldığı görülmektedir. G. Busch'a [1] göre 'yarıiletken' terimi, Volta tarafından 1782 yılında kullanılmıştır. Michael Faraday 1833'te gümüş sülfürün direncinin metallerde gözlemlenen bağımlılıktan farklı olarak sıcaklıkla azaldığını bulmuştur [1,2]. 1839 yılında Alexander Edmund Becquerel bir yarıiletken ile bir elektrolit arasındaki bağlantıda fotovoltaiik etkinin olduğunu keşfetti [2]. Gümüş sülfür ve Bakır sülfür'ün elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağımlılığına olan etkisinin analizi 1851 yılında Johann Hittorf tarafından yayınlanmıştır [2]. Metal ve yarıiletken kontaklar arasındaki elektriksel iletkenliğin doğasını 1874 yılında, Karl Ferdinand Braun keşfetmiştir. Bu keşif daha sonra en basit elektronik cihaz olan diyotun keşfine yol açmıştır [3,4]. 1909'da Marconi ve Braun Pierce radar sistemlerinde radyonun geliştirilmesi ve mikrodalga radyasyonun tespiti ile Nobel Fizik Ödülü almışlardır [2]. 1878'de katılardaki yük taşıyıcılarının manyetik alanda saptığı (Hall Etkisi) Edwin Herbert Hall tarafından keşfedildi. Walter Schottky 1929'da metal-yarıiletken bir bariyer varlığını keşfetti [2,3]. Yarıiletken üzerine metallerin püskürtülmesiyle oluşturulan diyotların karakteristiklerini 1907 yılında Pierce yayınlamıştır [4]. Selenyum Schottky diyotlar ve Silisyum nokta kontak diyotlar 1935'den itibaren radyo dedektörleri olarak kullanılmaktadır [4]. 1939 yılında Russell Shoemaker Ohl pn bariyerini keşfetti [5].

II-VI grubu geniş bant aralıklı yarıiletkenler, ışık yayan diyotlar (LED'ler) ve heteroeklem diyotlardaki uygulamaları nedeniyle son yıllarda birçok araştırma grubunun ilgisini çekmiştir. II-VI grup yarıiletkenler arasında olan Çinko oksit, geniş bant aralığı (3,37eV) ve büyük eksiton bağlanma enerjisi (60meV) nedeniyle mor ve mavi bölgelerde kullanım için önemli bir optoelektronik cihaz malzemesidir. ZnO ince filmler kısa dalga boylu ışık yayan cihazlarda [6], alan emisyon cihazlarında [7], güneş pillerinde [8] ve sensörlerde [9] kullanılan umut verici adaydır.

Son zamanlarda, araştırmacılar dikkatlerini Ce katkılı ZnO malzemelerine çevirmişlerdir. En yaygın nadir toprak metali olan Seryum'un (Ce) örgü yapısı, atomik boyutu ZnO'ya kolaylıkla entegre olmasını sağlar ve böylece ZnO bazlı nanoyapıların yapısal, optik ve elektriksel özelliklerini değiştirir [10].

1.1. Literatür Özeti

Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin fiziksel özellikleri literatürde yaygın olarak rapor edilmiştir. Hazırlama, karakterizasyon ve Ce katkısının ZnO'nun özellikleri

üzerindeki etkisi üzerine yapılan kapsamlı çalışmalara rağmen, katkı maddesinin oranı veya hazırlama prosedürlerinin bazı etkileri hala belirsizliğini korumaktadır. Literatürde ağırlıklı olarak çözelti bazlı vakumsuz yöntemlerle sentezlenen Ce katkılı ZnO filmleri yer almaktadır. Bu çalışmalarda, Ce katkılı ZnO filminin morfolojisinin, bant yapısının ve kristal yapısının sentez yöntemine, sentez parametrelerine ve Ce miktarına bağlı olduğu araştırılmıştır.

M.A.M Ahmed ve arkadaşları [11], sol-jel spin kaplama tekniği kullanarak, Ce ve Al katkılı ZnO filmlerini ($Zn_{1-x-y}Ce_xAl_yO$ ($x=0.0, 3.0, 5.0$ ve 7.0 at.%, $y=1.0$ at.%) elde etmişlerdir. Ce ve Al katkısının yapısal, morfolojik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Katkı oranının artmasıyla birlikte, yarı pik genişliğinin arttığını ve pik şiddetlerinde azalma olduğunu rapor etmişlerdir. Kristal kalitesindeki bu azalmanın katkı konsantrasyonuna bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Ce ve Al katkılanan ZnO örgüsündeki piklerinde (100), (002) ve (101) kayma olduğunu rapor etmişlerdir. Bu kaymanın sebebini Ce ve Al'nin Zn'nin yerini alması ile açıklamışlardır. Örgüdeki bu değişikliklerin ise iyonik yarıçap farkından dolayı kristal kusura sebep olabileceğini rapor etmişlerdir. Katkı oranındaki artış ile kristal boyutunun azaldığını rapor etmişlerdir. Bunun sebebini, ZnO kristal örgüsüne Al ve Ce katyonlarının dahil edilmesine bağlamışlardır. Al^{+3} ve Ce^{+3}/Ce^{+4} 'ün Zn^{+2} 'ye göre yüksek iyonik yarıçapa sahip olması ve bunun da örgünün bozulmasına neden olduğu sonucuna varmışlardır. Katkı oranının artmasıyla beraber optik bant aralığının $3,22eV$ 'tan $3,10eV$ 'a kadar azaldığını rapor etmişlerdir. Katkı oranındaki artışla idealite faktörünün azaldığı, idealite faktörünün de metal-yarıiletken bağlantısı boyunca voltaj düşmesi, bariyer yüksekliklerindeki homojensizlikler gibi durumları minimize ederek diyot kalitesini iyileştirdiğini rapor etmişlerdir.

A.K. Soğuksu ve arkadaşları [12], püskürtme piroliz tekniği kullanarak Ce katkılı ZnO filmlerini elde etmişlerdir. Katkı oranının artmasıyla birlikte optik geçirgenliğin %78'den %89'a arttığını rapor etmişlerdir. Optik geçirgenlikteki bu değişimi kristal kusurlarına ve safsızlıklara bağlamışlardır. Ce katkısının artmasıyla birlikte optik bant aralığının $3,24eV$ 'tan $3,27eV$ 'a çıkardığı sonucuna varmışlardır. Bunun sebebini katkının artmasıyla birlikte Ce taşıyıcılarının arttığını ve taşıyıcılarla birlikte fermi enerji seviyesinin değiştiğini, dolayısıyla valans bant ve iletkenlik bandı arasındaki mesafenin artmasıyla açıklamışlardır.

C. Ge ve arkadaşları [13], daldırma kaplama tekniği kullanarak Ce katkılı ZnO ince filmlerini elde etmişlerdir. Katkı konsantrasyonunun artmasıyla birlikte tane boyutunun azalma eğiliminde olduğunu ve filmlerin yüzeylerinin pürüzlü bir yapıya sahip olduğunu rapor etmişlerdir. ZnO filmlerinin artan Ce katkısıyla birlikte direncinin azaldığını bulmuşlar ve bunun sebebini Ce^{+4} iyonik yarıçapının Zn^{+2} göre fazla olmasından dolayı Ce^{+4} ile Zn^{+2} 'nin yer değiştirmesinin taşıyıcı konsantrasyonunda artışla açıklamışlardır.

C.K. Kasar ve arkadaşları [14], sol-jel spin kaplama tekniği kullanarak Ce katkılı ZnO filmlerini üretmişlerdir. Üretilen numunelerin optik ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Katkısız ZnO filmde kristal boyutun 30nm ve Ce katkılı ZnO filminin kristal boyutun 15nm olduğu bulmuşlardır. Seryum katkısıyla birlikte kristal boyutta azalma olduğunu rapor etmişlerdir. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin tercihli yönelimi (002) olup, Ce katkılı ZnO filmlerde Ce'ye karşılık gelen bir pikle karşılaşmamışlardır. Ce katkısıyla birlikte kristal yapıda herhangi bir değişiklik olmadığını söylemişler ve bunu da Ce iyonların ZnO örgüsünde ikame edilmesiyle açıklamışlardır. Katkıyla birlikte optik bant aralığının 3,24eV'tan 3,27eV'a yükseldiğini hesaplamışlardır.

F. Du ve arkadaşları [15], sol-jel spin kaplama tekniği kullanarak cam alttaşlar üzerine Ce katkılı ZnO filmleri elde etmişlerdir. Ce katkılı ZnO filmlerin (101) tercihli yönelime sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Artan katkı oranıyla birlikte pik şiddetlerinin azaldığını bunun da kristal kalitedeki azalmaya neden olduğunu açıklamışlardır.

M. Yousefi ve arkadaşları [16], sol-jel daldırma kaplama tekniği kullanarak Ce katkılı (%2, 5, 10, 15, 20 ve 30) ZnO filmleri elde etmişlerdir. Elde edilen katkısız ve %2, 5, 10, 15, 20 Ce katkılı ZnO filmlerinin görünür bölgedeki geçirgenliği yaklaşık %97 iken %30 Ce katkılı ZnO ince filmlerinin görünür bölgedeki geçirgenliği yaklaşık %90'a düşmüştür. Geçirgenlikteki bu azalışın sebebi olarak, AFM analizlerinde elde edilen rms değerlerini göstermişlerdir. Rms değerleri, %5 katkılı filmde 0,64nm, %10 katkılı filmde 0,52nm ve %30 katkılı filmde ise 2,77nm'dir. En yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olan %30 Ce katkılı ZnO filminin, pürüzlülükten dolayı en yüksek saçılmaya ve en düşük geçirgenliğe sahip olmasını rapor etmişlerdir. Ce katkısının artmasıyla birlikte ortalama kristal boyutunun azaldığını bulmuşlar ve bunun nedeni olarak Ce^{+3} ve Ce^{+4} iyonik yarıçaplarının Zn^{+2} iyonundan daha büyük olmasıyla açıklamışlardır. %0'dan %10'a artan Ce katkısıyla beraber fotoakımın arttığı, %10'dan daha fazla katkılama yapıldığında fotoakımda azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir. En yüksek fotoelektrokimyasal performansı %10 Ce katkısına sahip olan ZnO filmde olduğunu rapor etmişlerdir.

M. R. Khanlary ve arkadaşları [17], sol-jel spin kaplama tekniği kullanarak katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerini elde etmişlerdir. Elde edilen filmlerin yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Öncelikle katkısız ve Ce katkılı ZnO filmleri incelemişler. Bunun sonucunda Ce katkısıyla birlikte ortalama tane boyutunun azaldığını ve örgü sabiti oranının arttığını rapor etmişlerdir. Daha sonra farklı katkı oranı ve sıcaklıklarda tavlanan filmleri karşılaştırmışlar ve bunun sonucunda katkı oranı arttıkça kristal kalitesinin düştüğünü açıklamışlardır. Aynı zamanda 28°C’de ortaya çıkan CeO₂ pikinin özellikle %5 Ce katkılı tavlama sıcaklığıyla birlikte bu pikin daha belirgin hale geldiğini bulmuşlardır. Ce katkısıyla birlikte ortalama kristal boyutunun azaldığını bunun nedeninin de Ce⁺⁴ ve Ce⁺³ iyonlarının yarıçapının Zn⁺² iyonunun yarıçapından daha büyük olmasından kaynaklanabileceğini rapor etmişlerdir. Zn⁺² iyonunun yarıçapının daha küçük olmasından dolayı kısmen seryum iyonlarıyla yer değiştirebileceği, aynı zamanda katkıya birlikte oksijen aralıklarının kusur kaynağı olabileceğini, bunların da daha fazla yük taşıyıcı konsantrasyonu oluşturarak iletkenliği artıracağını rapor etmişlerdir.

1.2. Tezin Amacı

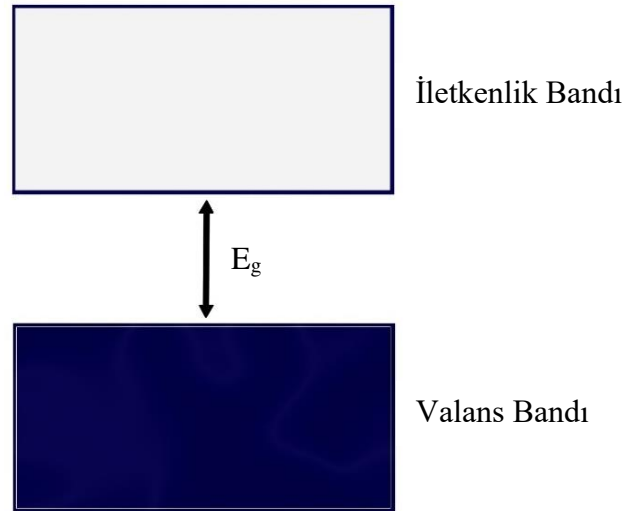
Bu tez çalışmasındaki amaç, sol-jel spin kaplama tekniği kullanarak cam ve p-Si alttaşlar üzerine katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerini elde ederek, X-Işını Difraktometresi (XRD) ile yapısal özelliklerini (kristal boyutu, örgü parametresi, dislokasyon yoğunluğu, yapılanma sabiti), UV-VIS ölçümlerinden optik bant aralığını, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüzey morfolojisini belirlemek, Enerji Dağılım Spektrofotometresi (EDS) ile filmlerin içerisindeki elementlerin varlığını tespit etmek, ve *p-Si/n-Ce:ZnO* heteroeklem diyotların fabrikasyonunu yaparak bu diyotların elektriksel özelliklerini belirlemektir.

2. TEORİK BİLGİ

2.1. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, katı malzemeler içerisinde en ilginç ve önemli bir sınıftır. Özdirençleri 10^{-2} ile 10^9ohm.cm aralığında olup bu değer iletkenler ve yalıtkanlar arasında yer alır. Yarıiletkenler 0K sıcaklığında yalıtkan özellik göstermektedirler. Fakat optik bant aralıkları öyle bir değere sahiptir ki, ısı uyarılmayla erime noktalarının altındaki sıcaklıklarda elektriksel iletkenlik gösterirler. Bu tür materyaller yarıiletkenler olarak bilinir. Yarıiletken ve yalıtkan arasında kesin bir ayrım yoktur. Ancak yarıiletkenlerin en önemli özelliği optik bant aralıkları değerlerinin 3,5eV olmasıdır [18].

Atomlar birbirine yakınlaştıkça; elektronlar, bitişik atomun elektronlarıyla ya da çekirdeğiyle etkileşirler. Bu etki çok büyüktür. Katının içindeki her bir ayrı atomik durum, birbirine yakın dizilmiş bir dizi elektron durumuna bölünebilir ve böylece enerji bantları oluşur [19]. Bantlar oluştuğunda, bantlar arasında Pauli dışarlama ilkesine uygun olarak elektron geçişleri başlar ve istatistiksel denge kuruluncaya kadar devam eder. Böylece alt bantlar üst banttaki elektronlarla doldurulur. Dolu banda “valans bandı” adı verilir. Üstteki boş banda ise “iletkenlik bandı” adı verilir. İletkenlik bandı ile valans bandı arasında bulunan enerji aralığı, optik bant aralığı (E_g) olarak adlandırılır. Bu iki bant arasında elektronlar bulunmaz [20]. Bir yarıiletkenin şematik bant yapısı Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Yarıiletkenin şematik bant yapısı

Yarıiletkenlerde elektriksel iletim, iletkenlik bandında yer alan elektronlar ve valans bandında yer alan holler ile sağlanır. Bu yüzden yarıiletkenleri temel olarak iki gruba ayırabiliriz.

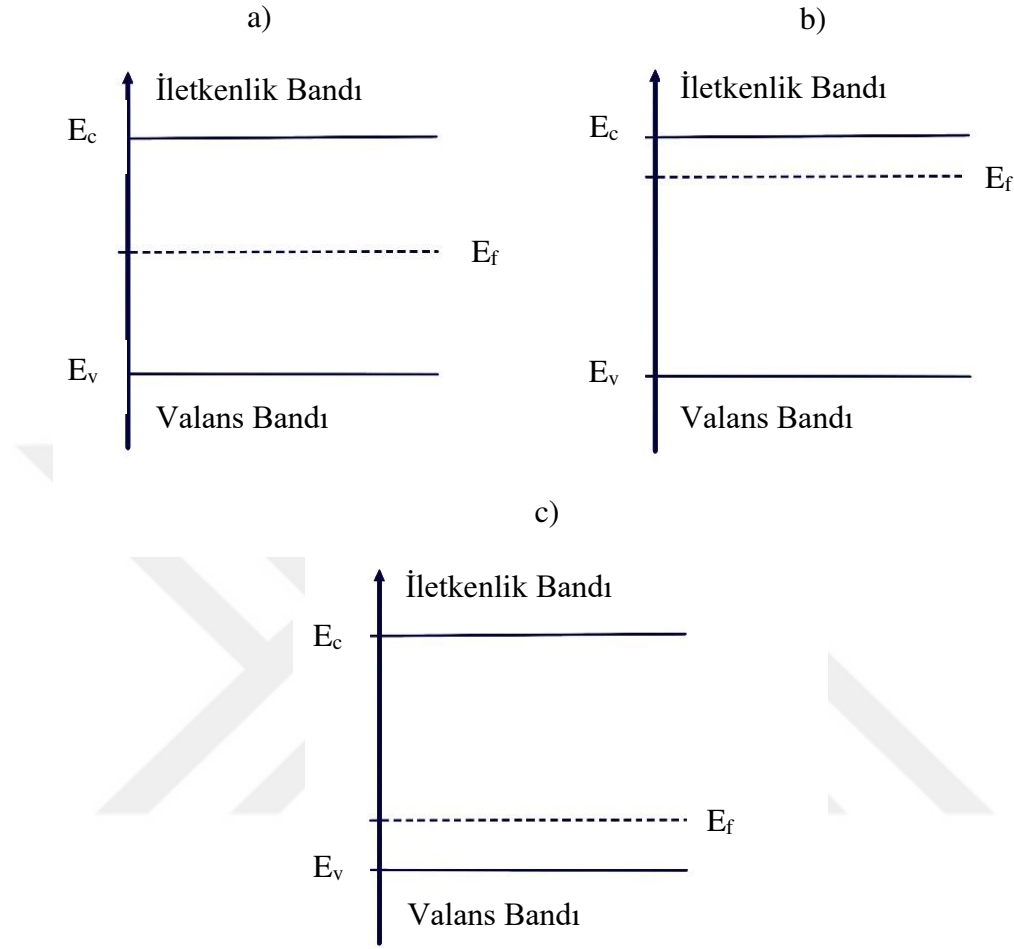
İletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu, valans bandındaki hol yoğunluğuna eşit olması durumunda yarıiletken, has yarıiletken olarak adlandırılır.

İletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu, valans bandındaki hol yoğunluğuna eşit olmadığı durumlarda ise has olmayan yarıiletken olarak adlandırılır. Has olmayan yarıiletkenlerde, yarıiletkenin özelliklerini artırmak için katkı veya kirlilik atomları yarıiletkene ilave edilir. Katkılama işlemi yarıiletkenin elektriksel özelliklerini, morfolojik özelliklerini ve yapısal özellikleri gibi birçok özelliği önemli ölçüde değiştirebilir. Yarıiletkene katkılanan atomlara safsızlık atomları denir. Katkılanan safsızlık atomları ya elektron verici (donör) ya da elektron alıcı (akseptör) olarak adlandırılır. Yarıiletkenlere yapılan katkılama işlemi sonucunda yarıiletkenler n-tipi veya p-tipi yarıiletken olarak adlandırılırlar.

Periyodik tablonun IV. grup elementlerinden olan Si veya Ge kristaline belirli metotlarla V. grup elementlerinden (As, P, Sb, N) herhangi birisinin katkılanması ile n-tipi yarıiletkenler elde edilebilir. Silisyum (Si) kristaline V. grup elementi olan Fosfor (P) katkılıandığında, bu elektronların dördü silisyum atomlarıyla kovalent bağ yapacak ve fosfor atomuna daha zayıf bağlı olan beşinci elektron atomdan ayrılacaktır. Eğer donör elektronu küçük bir termal enerji kazanırsa, geride pozitif olarak yüklenmiş bir fosfor iyonu bırakarak iletkenlik bandına çıkabilir. İletkenlik bandına bir elektron veren kirlilik atomları “donör kirlilik atomları” olarak adlandırılırlar. Donör kirlilik atomları, valans bandında hol oluşturmaksızın, iletkenlik bandında elektron oluşturlar. Bu şekilde elde edilen malzemeler n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır.

Periyodik tablonun IV. grup elementlerinden olan Si veya Ge kristaline, belirli metotlarla III. grup elementlerinden (In, Ga, Al, B) herhangi birisinin katkılanması ile p-tipi yarıiletkenler elde edilir. Silisyum (Si) kristaline III. Grup elementi olan Bor (B) katkılıandığında, bu elektronların hepsi Si'deki kovalent bağlanmaya katılır. Kovalent bağlanma pozisyonu boştur. Bu boşluk (hol) bir diğer bağdan kapılan bir elektron ile doldurularak hol bu elektronun yerine geçer. Böylece hol kristal içerisinde hareket eder. Buna karşılık, iletkenlik bandına bir elektron çıkmaz. Bu III. grup atom valans bandından bir elektron aldığı için “akseptör kirlilik atomları” olarak adlandırılır. Bu akseptör atomu, iletkenlik bandında elektron oluşturmaksızın valans bandında holler oluşturabilir. Bu

yarıiletken maddeler p-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Şekil 2.2’de has, n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin fermi enerji seviyelerinin şematik gösterimi verilmiştir.

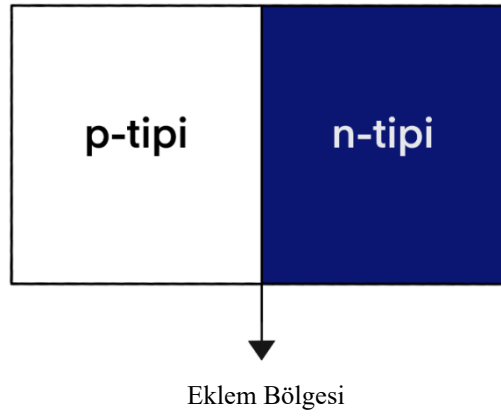


Şekil 2.2. Farklı tipteki; a) has, b) n-tipi ve c) p-tipi yarıiletkenlerin fermi enerji seviyelerinin şematik gösterimi

2.2. p-n Eklem Diyotları

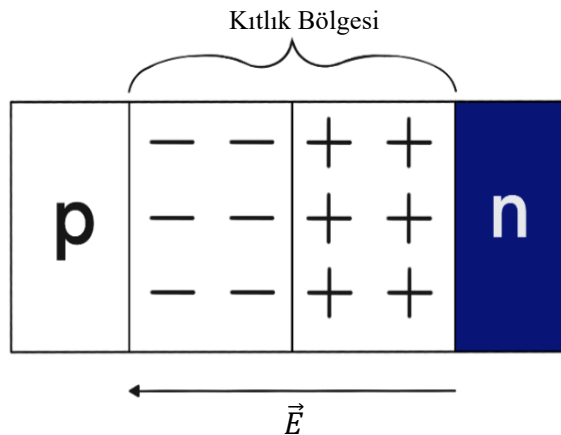
Elektrik akımını sadece tek bir yönde iletebilen devre elemanına diyot denir. Bir diyotun temel yapısı, biri n-tipi diğeri p-tipi p-n ekleminden oluşmaktadır [21].

p-n eklemleri iki tür eklem yapısında bulunabilir. p-tipi ve n-tipi yarıiletken malzemeler aynı yarıiletken malzemeden oluşuyorsa bu tür eklemlere homoecklem adı verilirken, p-tipi ve n-tipi yarıiletken malzemeler birbirinden farklı iki yarıiletkendeki oluşuyorsa bu tür eklemlere ise heteroecklem adı verilir [22,23]. Şekil 2.3’deki eklem bölgesi iki yarıiletkenin temas haline getirildiği kontak bölgesidir.



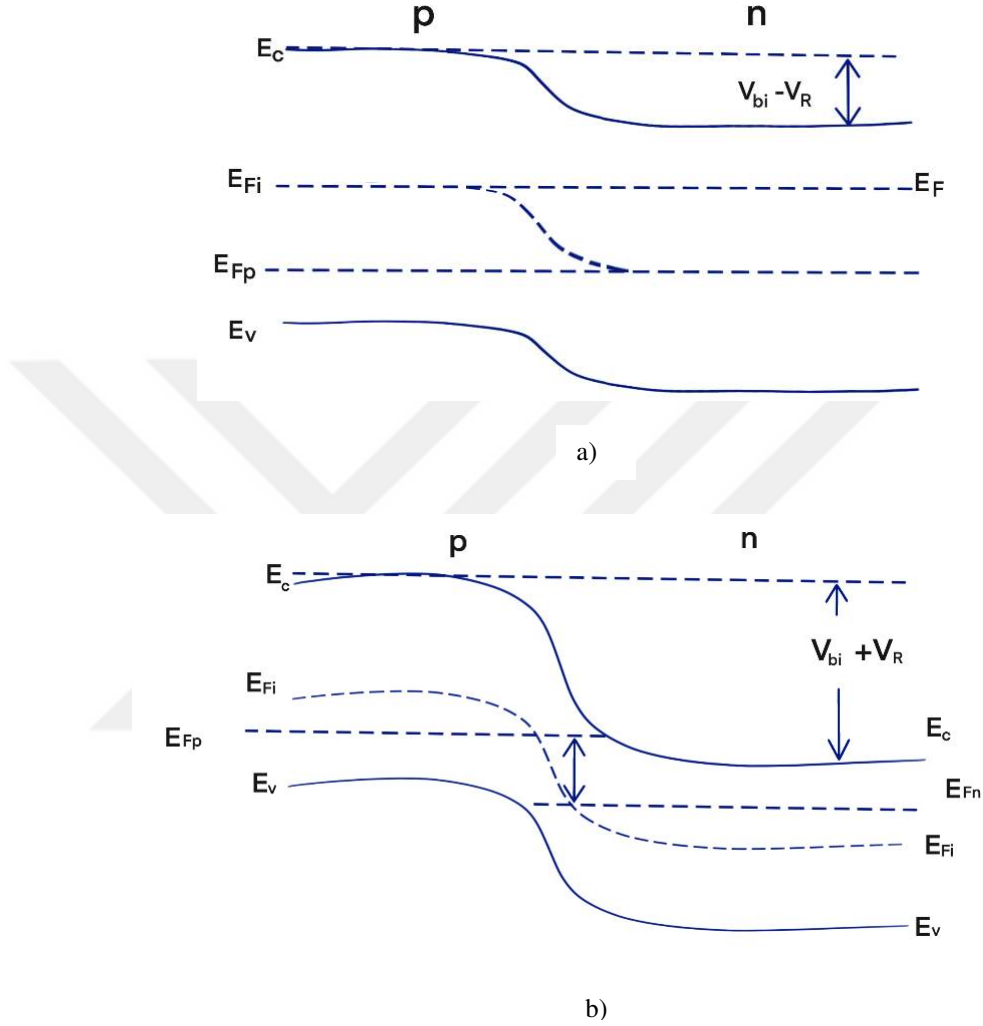
Şekil 2.3. *p-n eklemine ait şematik gösterim*

n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları elektronlar ve p-tipi yarıiletkenlerde ise çoğunluk taşıyıcıları donörlerdir. n-tipi yarıiletkende fermi enerji seviyesi iletkenlik bandının hemen altında yer alırken, p-tipi yarıiletkende fermi enerji seviyesi valans bandın hemen üstünde yer almaktadır. Bir p-tipi ve n-tipi yarıiletken birbiriyle temas haline getirildiğinde, bağlantı noktası tek başına her iki malzeme türünden çok farklı davranır. Fermi enerji seviyeleri farklı olan p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin bu şekilde kontak yapılmasıyla p-tipi yarıiletkendeki donörler n bölgesine ve n-tipi yarıiletkendeki elektronlar ise p bölgesine fermi enerji seviyeleri aynı seviyeye gelinceye kadar difüz ederler. n bölgesine difüz eden hollerin arkalarında negatif yüklenmiş akseptör atomları kalır. p bölgesine difüz eden elektronların arkalarında pozitif olarak yüklenmiş donör atomları kalır. Bu difüzyon sonucunda p ve n bölgelerinde kıtlık bölgesi oluşumu gerçekleşir. Şekil 2.4'te kıtlık bölgesi oluşumuna ait şematik gösterim yer almaktadır. Kıtlık bölgesinde pozitif ve negatif yükler bir elektrik alan oluşumu sağlar. Bu elektrik alanın yönü n bölgesinden p bölgesine doğrudur.



Şekil 2.4. *Kıtlık bölgesi oluşumuna ait şematik gösterim*

p-n eklemine bir potansiyel uygulandığında denge şartı bozulur ve fermi enerji seviyesinde değişiklik meydana gelir [24,25]. Şekil 2.5'te p-n eklemden ileri besleme ve ters besleme durumundaki p-n eklemine enerji bant diyagramları verilmiştir.



Şekil 2.5. a) İleri beslemeli p-n eklemine enerji bant diyagramı b) Ters beslemeli p-n eklemine enerji bant diyagramı

p bölgesi pozitif olacak şekilde voltaj uygulandığında ileri besleme, n bölgesi pozitif olacak şekilde voltaj uygulandığında ise ters besleme durumu oluşur. İleri besleme durumunda bariyer yüksekliğinin (ϕ_b) azalmasıyla taşıyıcı geçişleri kolaylaşır. Ters besleme durumunda ise bariyer yüksekliğinin (ϕ_b) artmasıyla birlikte geçişler zorlaşır.

2.3. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Metal ve yarıiletkenin bir araya getirilmesi ile metal-yarıiletken yapı oluşur. Yapıyı oluşturmak için uygun şartların sağlanması gerekmektedir. Metal kontak, yarıiletken malzemenin türüne ve yarıiletken ile metal kontak arasındaki iş fonksiyonu ilişkisine göre

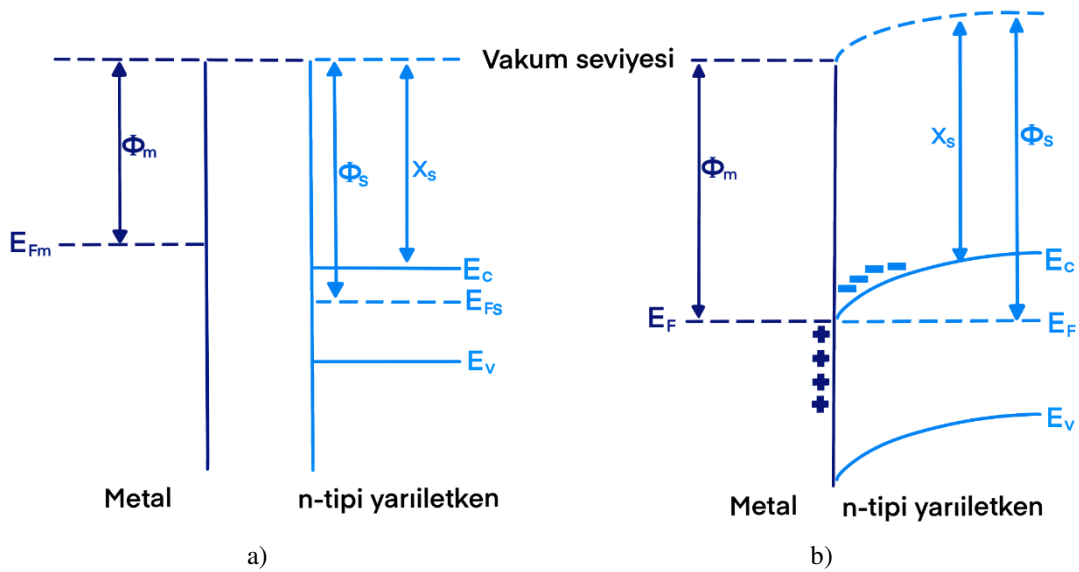
seçilir. Metalin iş fonksiyonu Φ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna da Φ_s olarak adlandırdığımızda, Tablo 2.1’de iş fonksiyonuna göre değişen kontak tipleri verilmiştir.

Tablo 2.1. İş fonksiyonuna göre değişen kontak tipleri

Metal-yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki ilişki	Yarıiletken	Kontak
$\Phi_m > \Phi_s$	n-tipi	Schottky (Doğrultucu)
$\Phi_m < \Phi_s$	n-tipi	Omik
$\Phi_m > \Phi_s$	p-tipi	Omik
$\Phi_m < \Phi_s$	p-tipi	Schottky (Doğrultucu)

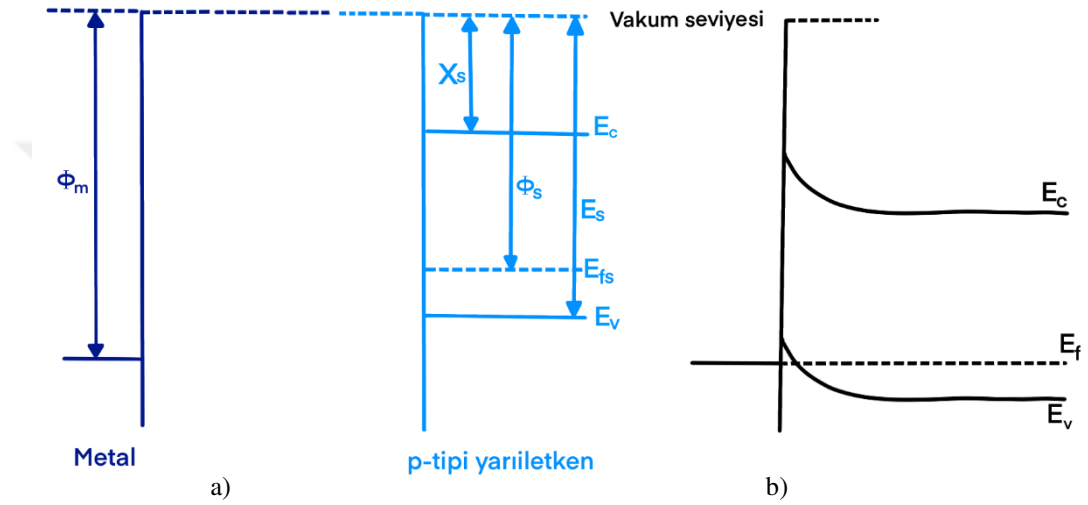
2.3.1. Omik kontak

Metal yarıiletken kontaklarda taşıyıcıların (elektron veya hol) her iki doğrultudan kolayca akabileceği kontaklara denir. n-tipi bir yarıiletken ve metalin omik kontak öncesi enerji bant diyagramları Şekil 2.6 a’da verilmiştir. Kontak öncesindeki enerji bant diyagramına göre metalin ve yarıiletkenin fermi enerji seviyeleri birbirinden farklıdır. Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar metalin fermi enerji seviyesinden aşağıda yer alır. Kontak oluşturulduğunda fermi enerji seviyelerinin eşitlenmesi için metalde bulunan elektronlar yarıiletkene geçiş yaparlar. Bu durum fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder. Şekil 2.6 b’de kontak sonrası termal dengede enerji bant diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.6. n-tipi yarıiletken ve metalin; a) omik kontak öncesi b) omik kontak sonrası, termal dengede, enerji bant diyagramları

p-tipi yarıiletkenin ve metalin omik kontak öncesindeki enerji bant diyagramları Şekil 2.7 a’da verilmiştir. Kontak öncesinde yarıiletkenin fermi enerji seviyesi metalin fermi enerji seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıda yer alır. Kontak oluşturulduğunda elektronlar yarıiletkenin metale doğru geçiş yaparlar. Metale geçiş yapan elektronların arkalarında boş holler kalır. Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar alçaldığında metalin fermi enerji seviyesi ile aynı seviyede eşitlenir. Şekil 2.7 b’de kontak sonrası termal dengede enerji bant diyagramı verilmiştir.

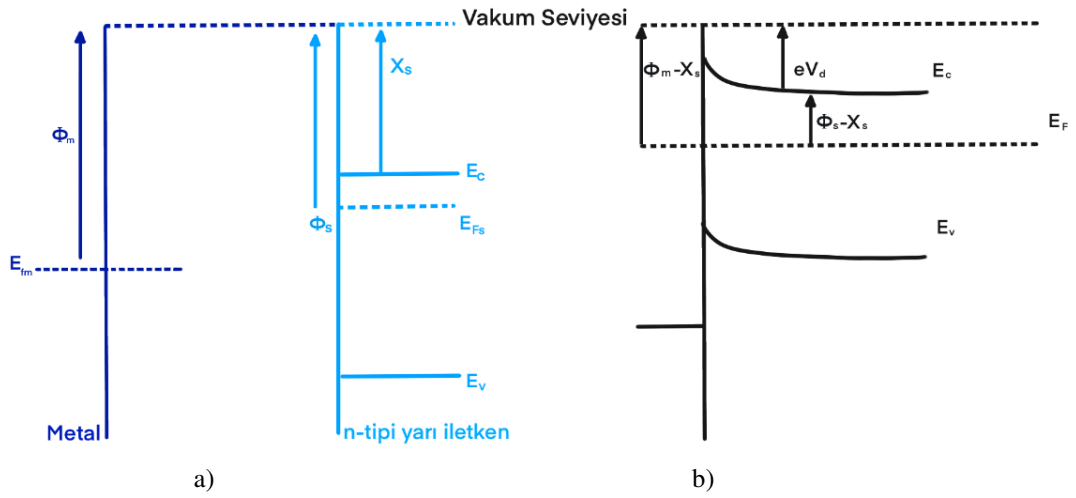


Şekil 2.7. p-tipi yarıiletken ve metalin; a) omik kontak öncesi b) omik kontak sonrası, termal dengede, enerji bant diyagramları

2.3.2. Schottky (doğrultucu) kontak

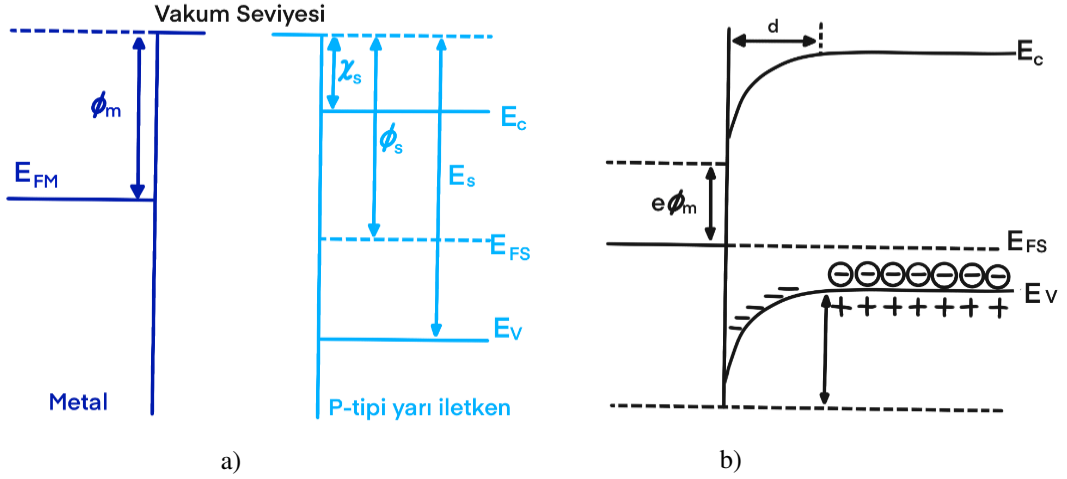
Akım taşınmasında etkin olan taşıyıcıların (elektron veya hol) bir yönde diğerine nazaran daha kolay geçiren kontaklara Schottky kontağı ya da doğrultucu kontak denir. Bu yapılar metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna, yarıiletkenin cinsine göre iki türde incelenir: a) $\Phi_m > \Phi_s$ metal-n tipi yarıiletken b) $\Phi_m < \Phi_s$ metal-p tipi yarıiletken. Burada Φ_m metalin iş fonksiyonu ve Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonudur ve iş fonksiyonundaki farklılık metal yarıiletken arayüzeyinde bariyere neden olur. Bu bariyer, elektrik akımının tek yönde kolayca akmasına, diğer yönde direnç göstermesine sebep olur. Bu kontakta omik kontaktakinden farklı olarak elektronlar ve boşluklar bir doğrultudan diğer doğrultuya daha hızlı akar.

n-tipi yarıiletken ve metalin schottky (doğrultucu) kontak öncesi ve kontak sonrası enerji bant diyagramları Şekil 2.8’de verilmiştir. Metal ve n-tipi yarıiletkenin fermi enerji seviyeleri birbirinden farklıdır. Bu fark n-tipi yarıiletkende bulunan elektronların enerjilerinin metalde bulunan elektronların enerjilerinden yüksek olduğunu gösterir. Kontak oluşturulduğunda yarıiletkenin iletkenlik bandında bulunan elektronlar, metalin ve yarıiletkenin fermi enerji seviyeleri çakışınca kadar metale doğru hareket eder. Bu olay, yarıiletkenin arayüzeyinde tükenme bölgesi oluşturur [26,27]. Termal dengeye gelindiğinde iletkenlik ve valans bandı kenarı Şekil 2.8 b’de görüldüğü gibi kıvrılır.



Şekil 2.8. n-tipi yarıiletken ve metalin; a) schottky (doğrultucu) kontak öncesi b) schottky (doğrultucu) kontak sonrası, termal dengede, enerji bant diyagramları

p-tipi yarıiletken ve metalin schottky (doğrultucu) kontak öncesi ve sonrasına ait enerji bant diyagramları Şekil 2.9’da verilmiştir. p-tipi yarıiletken-metal kontak, n-tipi yarıiletken-metal kontaklara benzer şekilde açıklanabilir. Kontak sonrası, termal dengeye gelip fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar metalden yarıiletkene elektron akışı olur. Yarıiletkene geçiş yapan elektronlar, metal-yarıiletken arayüzeyinin metal tarafında pozitif yüklü bir tabaka oluştururlar ve yarıiletkenin metale bakan sınırında hollerle birleşirler.

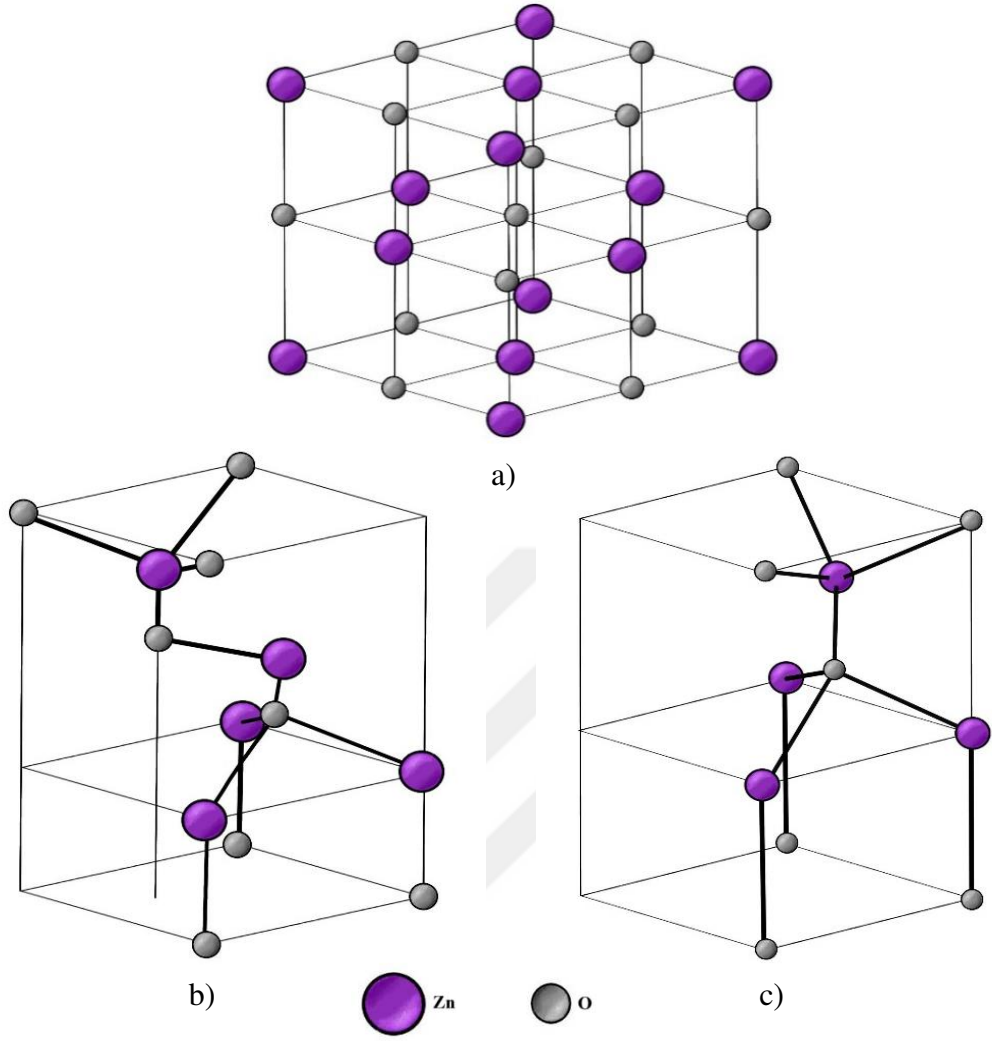


Şekil 2.9. *p*-tipi yarıiletken ve metalin; a) schottky (doğrultucu) kontak öncesi b) schottky (doğrultucu) kontak sonrası, termal dengede, enerji bant diyagramları

2.4. Çinko Oksit (ZnO)

Yarıiletken aygıt yapımında kullanılan en yaygın malzemeler metal oksitlerdir. Metal oksitler arasında en yaygın olarak bilinenler çinko oksit (ZnO), kadminyum oksit (CdO), titanyum oksit (TiO₂), kalay oksit (SnO₂) ve nikel oksit (NiO) yarıiletkenleridir. Bu yarıiletkenler transistörler, gaz sensörleri, fotovoltaiik aygıtlar, elektrotlar, enerji toplama aygıtları gibi pek çok uygulama alanında kullanılırlar.

Metal oksit yarıiletkenler arasında yer alan ZnO aynı zamanda en yaygın olarak kullanılan metal oksitlerden biridir ve II-VI grup elementlerinden oluşan bir bileşiktir. ZnO filmlerini üretmek için farklı yöntemler kullanılsa bile bunlar arasında ekonomik olan yöntem sol-jel yöntemidir. Normal koşullarda hekzagonal wurtzite kristal yapıda olan ZnO, kübik ve kübik çinko blend kristal yapıda da olabilir. Şekil 2.10'da ZnO kristal yapıları verilmiştir.



Şekil 2.10. *ZnO'nun kristal yapıları; a) kübik b) kübik çinko blend c) hekzagonal wurtzite*

Hekzagonal wurtzite yapıda bulunan ZnO için a_{hex} ve c_{hex} olmak üzere iki örgü sabitleri değerleri sırasıyla $3,25\text{\AA}$ ve $5,20\text{\AA}$ aralığındadır. %80-%90 arasında bir optik geçirgenliğe ve yaklaşık $3,2\text{eV}$ optik bant aralığına sahiptir.

n-tipi bir yarıiletken olan ZnO, katkılama işleminin oldukça kolay uygulandığı bir malzeme olduğundan elektriksel özellikleri değiştirilebilir. Elektriksel direnci 10^{-3} - $10^{+2}\Omega\text{cm}$ arasında olup yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

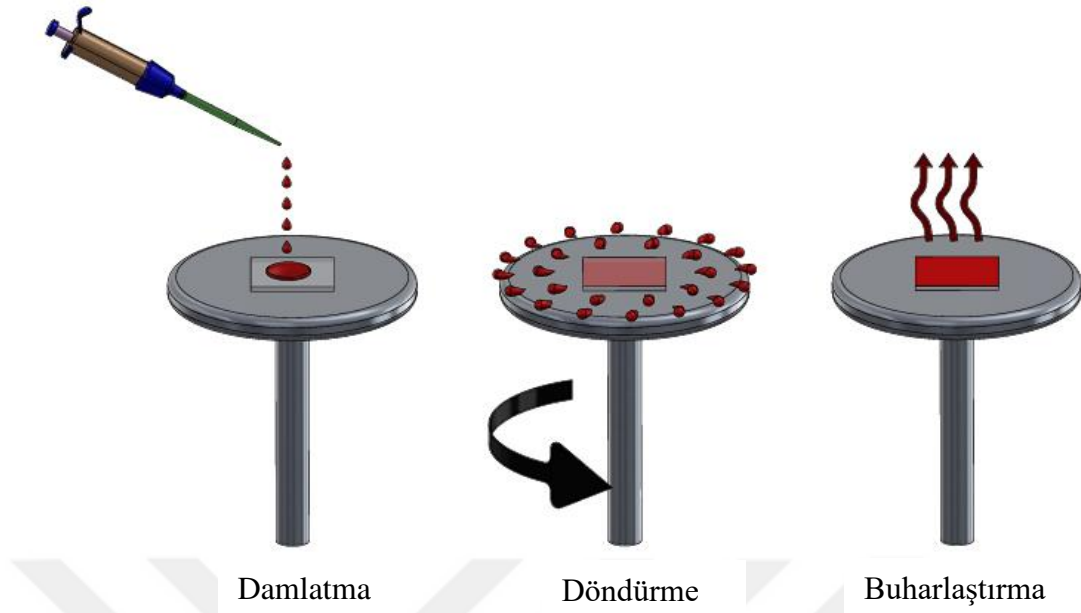
3.1. Sol-Jel Yöntemi

Sol-jel, bir sol ya da jeli kullanıp düşük sıcaklıkta çözeltiden katı bir malzemenin hazırlanması esasına dayanır. Metal tuzları ve alkoksitler ön başlatıcı; su veya organik çözücüler çözücü; asetik asit, amonyum hidroksit ve inorganik asitler katalizör olarak kullanılır [28]. Sol, sıvı içindeki kolloidal katı taneciklerinin stabil bir karışımıdır. Kolloid olarak tanımlanan tanecikler oldukça küçük boyutlara sahip taneciklerdir. Boyutları 1nm ile 1000nm arasındadır. Jel, iç yapısında yüksek yoğunlukta katı ve sıvı dağılımı olan, sıvı bileşen içeren gözenekli durumdur. Jel olmayan sollarde bulunmaktadır. Jeli oluşturan moleküller birbirlerine kuvvetli ve zayıf bağlarla bağlıdırlar. Jeller sıvı bağlarıyla sıvı ortamının birleşmesi sonucu oluşurlar. Jel, iç yapısında yüksek yoğunlukta sıvı ve katı dağılımındaki gözenekli durumdur. Sollerin jel olmadığı durumlarda mevcuttur.

Sol-jel yöntemi, farklı geometrilere sahip numuneleri çok ince kalınlıklarda kaplayabilmekte ve geniş yüzeyli alanlara uygulanabilmekte olduğu için tercih edilen bir yöntemdir. Sol-jel yöntemi; drop kaplama, dip kaplama ve spin kaplama gibi alt tekniklere ayrılmaktadır. Sol-jel spin kaplama tekniğinde, yatay alttaşın üzerine (cam, ITO) hazırlanan çözeltinin mikropipet yardımıyla damlatılması ve sonrasında sabit bir hızla döndürülerek çözeltinin merkezci kuvveti etkisinde alttaşın üzerine yayılması prensibine dayanır. Bu tez çalışmasında da kullanılan teknik sol-jel spin kaplama tekniğidir.

Sol-jel spin kaplama tekniğinde ise 3 aşama vardır. Bu aşamalar aşağıdaki gibi olup Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

- 1) Birikim
- 2) Döndürme
- 3) Buharlaştırma



Şekil 3.1. Sol-jel spin kaplama tekniği

Spin kaplama tekniğinde uygun alttaşlar kullanılarak alttaş vakum ile sabitlenir. İlk aşama olan damlatma aşamasında, mikropipet yardımıyla damlatılan çözelti alttaşın yüzeyine yayılır. Alttaşın tamamının kaplanması için damlatılan çözelti miktarının işlem boyunca alttaşın nemli kalmasını sağlayacak şekilde olması gerekmektedir. İkinci aşama olan döndürmede, alttaş belirlenen hıza ulaşır ve alttaş üzerine damlatılan çözelti merkezciil kuvveti sayesinde merkezden dışa doğru akar. En kısa süre içerisinde alttaş istenilen dönme hızına ulaşmalıdır. Bu sağlanmadığı takdirde dönme hızı sabit olmayacak bu nedenle oluşan film kalınlığı düzgün olmayacaktır. Alttaşın yüzeyine damlatılan fazla çözelti alttaştan dışarı savrulurak yüzeyi terk eder. Film kalınlığı azaldıkça durdurma aşamasında yüzeyi terk eden çözelti miktarında azalma olmaktadır. Bunun nedeni, azalan film kalınlığıyla birlikte akışkanlığa karşı direncin büyümesidir. Son aşama ise buharlaşma aşamasıdır. Tüm aşamalarda da bir miktar buharlaşma görülmektedir. Alttaş en son ısıtım fırınına atılır. Bu aşamalar istenilen katman sayısına kadar uygulanır.

3.2. Katkısız ve Ce Katkılı ZnO Filmlerinin Sol-Jel Spin Kaplama Tekniği ile Elde Edilmesi ve *p-Si/n-ZnO:Ce* Heteroeklem Diyotların Fabrikasyonu

3.2.1. Alttaşların temizlenmesi

Bu tez çalışmasında sol-jel spin kaplama yöntemi ile cam ve bir tarafı mat diğer tarafı parlak olan *p-Si* alttaşları üzerine, katkısız ve Ce katkılı ZnO filmleri elde edilmiştir.

Sol-jel spin kaplama tekniği kullanılarak elde edilen filmlerin homojen olabilmesi için alttaşların olabildiğince temizlenmesi gerekmektedir.

Alttaşlara temizleme işlemi yapılmadan önce, alttaşlar 10x10mm² ebatlarında kesilmiştir. Cam alttaşlar ilk olarak temizleme çözeltilisinden (5g potasyum dikromat 250 ml sülfirik asit) geçirilerek deiyonize su ile durulanmıştır. Cam alttaşlar aseton dan geçirilip kurutularak temizlenmiştir. p-Si alttaşların temizliği için Görsel 3.1’de yer alan BANDELIN SONOREX marka ultrasonik banyo kullanılmıştır. İlk olarak aseton içine konulan alttaşlar 15 dakika ultrasonik banyoda temizlenmiş daha sonra alttaşlar etanol içinde 15 dakika ultrasonik banyoda tutulmuş ve son olarak alttaşlar deiyonize su içerisinde 15 dakika ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Temizlenen alttaşlar azot gazı ile kurutulmuştur.



Görsel 3.1. BANDELIN SONOREX marka ultrasonik banyo

3.2.2. Çözeltilerin hazırlanması

Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmleri cam ve p-Si alttaşları üzerine sol-jel spin kaplama tekniği ile elde etmek için çözeltiler hazırlanmıştır.

0,5M Çinko asetat (ZAC) çözeltisi hazırlamak için, başlangıç malzemesi olarak 219,49g/mol molekül ağırlığına sahip olan çinko asetat dihidrat [(ZnCH₃COO)₂.2H₂O)]

(Merck, $\geq$ %99,5 saflıkta) tuzu kullanılmış olup, tuzun ağırlığını ölçmek için Görsel 3.2’de verilen METTLER TOLEDO marka terazi kullanılmıştır.

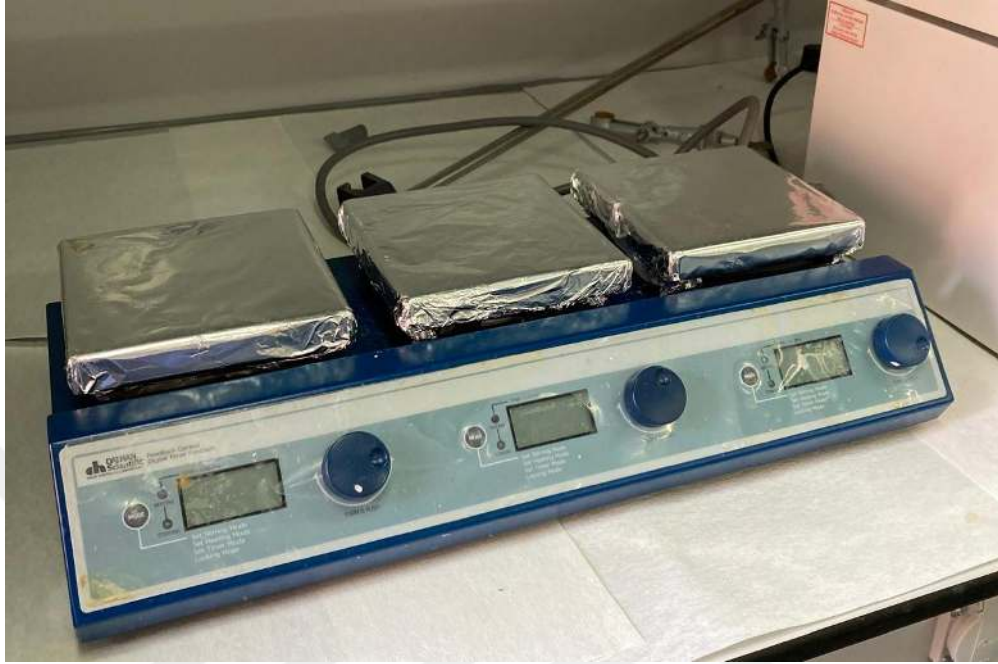
Çözücü ve sabitleyici olarak sırasıyla 2-metoksietanol (Sigma Aldrich, $\geq$ %99,5) ve monoetanolamin (MEA) (Merck, $\geq$ %99) kullanılmıştır. Çözeltiyi hazırlamak için 5,4873g çinko asetat dihidrat tuzu 20ml 2-metoksietanol içerisinde çözülmüş ve üzerine 1.497 μ l MEA eklenmiştir. Daha sonra çözelti üzerine 30ml 2-metoksietanol eklenerek çözelti 50ml’ye tamamlanmıştır.



Görsel 3.2. METTLER TOLEDO marka terazi

Seryum katkısı için, 0,5M seryum asetat (CAC) çözeltisi hazırlamak için, başlangıç malzemesi olarak 434,23g/mol molekül ağırlığına sahip seryum (III) nitrat heksahidrat ($\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (glentham life, $\geq$ %99,5 saflıkta) tuzundan 4,3123 gram kullanılmıştır. Sabitleyici olarak 598,8 μ l monoetanolamin (MEA) (Merck, $\geq$ %99 saflıkta) kullanılmıştır. Toplam çözelti miktarı 20ml olacak şekilde çözeltinin üzerine çözücü olarak 2-metoksietanol (Merck, $\geq$ %99,5 saflıkta) eklenmiştir.

Hazırlanan çözeltiler oda sıcaklığında 1 saat boyunca Görsel 3.3'te verilen DAIHAN SCIENTIFIC marka manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır.



Görsel 3.3. DAIHAN SCIENTIFIC marka manyetik karıştırıcı

Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerini elde etmek için bir önceki aşamada hazırlanan ZAC ve CAC çözeltileri kullanılmış ve toplam 10ml çözelti miktarı olacak şekilde kullanılmıştır. Bu iki çözeltiler uygun hacimlerde kullanılmıştır. %5 Ce katkılamak için 9,5ml ZAC çözeltisine, 0,5ml CAC çözeltisi eklenmiştir. %10 Ce katkılamak için, 9ml ZAC çözeltisine, 1ml CAC çözeltisi eklenmiştir. %15 Ce katkılamak için, 8,5ml ZAC çözeltisine, 1,5ml CAC çözeltisi eklenmiştir. %20 Ce katkılamak için, 8ml ZAC çözeltisine, 2ml CAC çözeltisi eklenmiş ve tüm çözeltiler 1 saat boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır.

3.2.3. Filmlerin elde edilmesi

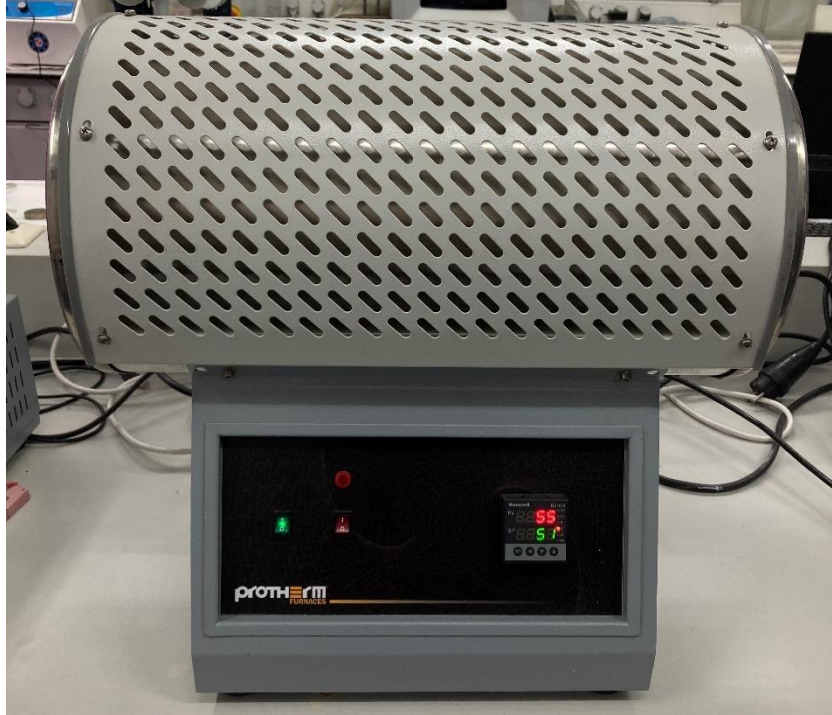
Katkısız ve Ce Katkılı ZnO filmleri Görsel 3.4'de verilen LAURELL marka spin kaplama cihazında sol-jel spin kaplama tekniği ile önceden temizlenerek hazırlanan cam ve p-Si alttaşları üzerine, bir önceki aşamada hazırlanan çözeltiler, döndürme hızı 3000rpm ve döndürme süresi 30s olacak şekilde kaplanmıştır.

Spin kaplama cihazının döndürme süresi ve hızı ayarlandıktan sonra 125µl çözelti mikropipet yardımıyla alttaş üzerine damlatılmış ve 30s döndürülmüştür.



Görsel 3.4. LAURELL marka spin kaplama cihazı

Bu işlemden sonra filmler Görsel 3.5’de verilen PROTHERM marka tüp fırında 300°C sıcaklıkta 10 dakika boyunca kurutulmuştur. İlk kat kurutulup soğutulduktan sonra diğer katlarda 100µl çözelti kullanılarak işlemler 10 kez tekrar edilmiştir.



Görsel 3.5. PROTHERM marka tüp fırın

Filmler 10. Katın sonunda 500°C sıcaklıkta 60 dakika boyunca tavlannmıştır. Aynı deney parametreleri kullanılarak katkısız ve Ce katkılı ZnO çözeltileri için de yapılmıştır.

Tablo 3.1’de Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin elde edilme parametreleri ve kodları verilmiştir.

Tablo 3.1. *Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin elde edilme parametreleri ve kodları*

Film Kodu	Molarite (M)	Alttaş	Katkı Oranı (%)
Z0-C	0,5	cam	0
ZC5-C			5
ZC10-C			10
ZC15-C			15
ZC20-C			20
Z0-S		p-Si	0
ZC5-S			5
ZC10-S			10
ZC15-S			15
ZC20-S			20

Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin kalınlıkları tartım yöntemi ile bulunmuştur. Bu yöntem kullanılırken,

$$t = \Delta m / (s \rho f) \quad (3.1)$$

formülü kullanılmıştır. Burada Δm kütle farkını, ρf filmin yoğunluğunu, s alttaşın yüzey alanını göstermektedir. Film kalınlıkları hesaplanırken gerekli olan ZnO filminin yoğunluk değeri 5,67g/cm³ olarak alınmıştır. Tablo 3.2’de elde edilen katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlere ait kalınlık değerleri verilmiştir.

Tablo 3.2. *Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin kalınlık değerleri*

Film Kodu	Kalınlık Değeri (nm)
Z0-C	492
ZC5-C	399
ZC10-C	503
ZC15-C	625
ZC20-C	467

3.2.4. *p-Si/n-ZnO:Ce* heteroeklem diyotların fabrikasyonu

Elde edilen katkısız ve Ce katılı ZnO filmlere omik kontaktların oluşturulabilmesi için filmlerin alt tabakalarının temizleme aşamasından geçmesi gerekmektedir.

Filmlerin alt tabakalarının fiziksel temizliği dremel ile yapılmıştır. Fiziksel temizlik aşamasından sonra seyreltilmiş HF çözeltisi ile temizlenip, ultra saf su ile silinmiş ve son olarak azot gazı ile kurutulmuştur. Filmle kaplı olan ön tabakanın temizliği Görsel 3.6’da verilen HARRICK PLASMA marka plasma cleaner cihazı ile temizlenmiştir. Filmlerin arka tabakalarına gümüş pasta yardımıyla omik kontak oluşturulmuştur.

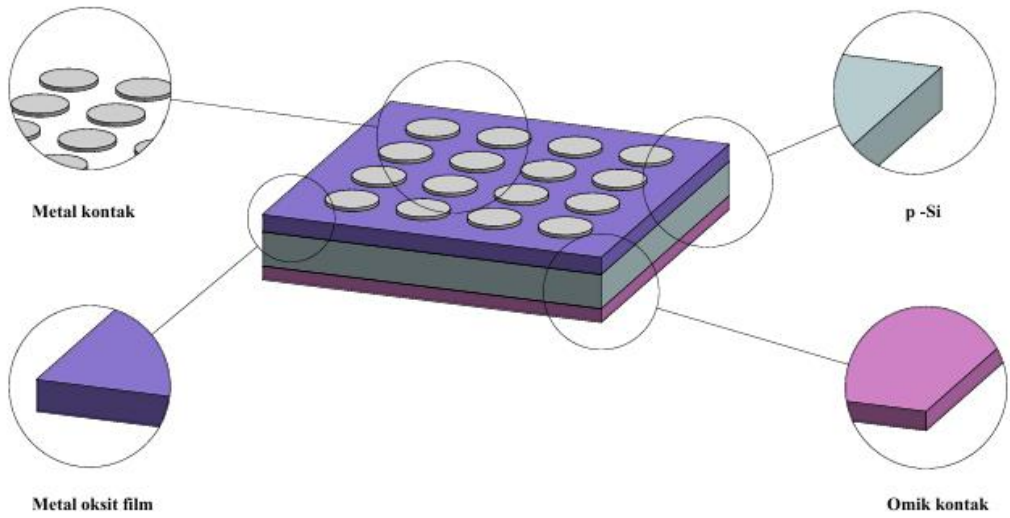


Görsel 3.6. HARRICK PLASMA marka plasma cleaner cihazı

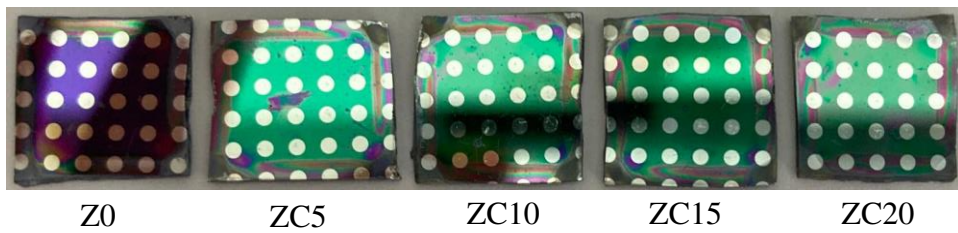
Filmlerin ön tabakalarına ise maske yardımıyla Görsel 3.7’de yer alan VAKSIS marka fiziksel metal buharlaştırma sistemi kullanılarak 100nm kalınlığında Al metali buharlaştırılmıştır. Bu işlem sırasında sistemin basıncı 5×10^{-5} torr ve sistemin hızı ise yaklaşık 1 Å/s ’dir. Bu işlemler sonucunda elde edilen *p-Si/n-ZnO:Ce* heteroeklem diyotlarına ait şematik gösterim Şekil 3.2’de verilmiştir.



Görsel 3.7. VAKSIS marka fiziksel metal buharlaştırma sistemi



Şekil 3.2. $p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Ce}$ heteroeklem diyotlarına ait şematik gösterim



Görsel 3.8. Elde edilen $p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Ce}$ heteroeklem diyotların fotoğrafı

4. KATKISIZ VE SERYUM KATKILI ÇİNKO OKSİT FİLMLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

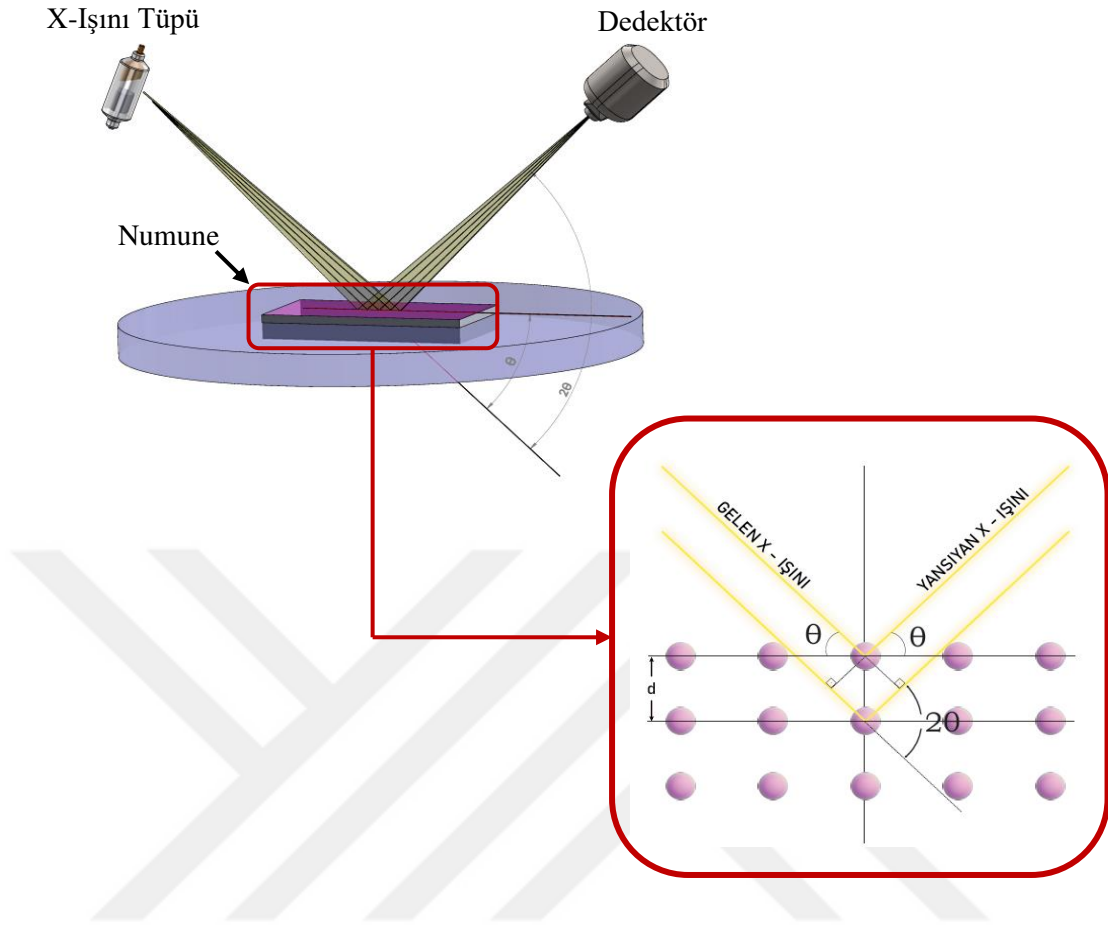
4.1. Giriş

X-ışınları ya da bir diğer adıyla Röntgen ışınları, 1895 yılında Alman Fizik Profesörü Wilhem Röntgen tarafından keşfedilmiştir [29]. Dalga boyu $0.1\text{\AA} - 100\text{\AA}$ aralığında olan elektromanyetik dalgalara X-ışınları adı verilir. X-ışınları dalga ve tanecik özelliği gösterdiği için çift karakterlidir. X-ışınlarının tanecik (foton) olarak davrandığı olaylara fotoelektrik etki, siyah cisim ışıması, Compton saçılması gibi kanıtlar verilirken, dalga olarak davrandığı olaylara Rayleigh saçılması, polarizasyon, interferans (girişim) ve difraksiyon (kırınım) gibi kanıtlar verilebilir [30].

4.1.1. X-ışını kırınımı

X-ışını Kırınımı (XRD) yöntemi malzemelerin ve ince filmlerin kristalografik yapısını belirlemek için kullanılan, tahribatsız bir yöntemdir. Bu yöntemle numune miktarının az olduğu durumlarda bile analiz yapmak mümkündür. XRD yöntemi, numune içindeki kristalin boyutunu, kristalin tercihli yönelimlerini ve örgü sabitlerini hesaplamaya olanak sağlar.

X-ışınlarının kristaller tarafından kırınıma uğratılması olayının genel yasaları ilk olarak 1912 yılında Max von Laue tarafından verilmiş olsa da bu yasaların tam olarak analiz edilmesi Wiliam Lawrence Bragg tarafından yapılmıştır. Kristal tarafından kırınıma uğrayan X-ışınları, Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Tek renkli bir X-ışını demeti bir kristalin yüzeyine düştüğünde, o kristalin paralel atomik düzlemleri tarafından yansıtılır. Her düzlem, X-ışını demetinin sadece küçük bir oranını yansıtır ve yansıma sadece gelme açısı uygun değerler aldığında meydana gelir. Bu değerler; X-ışınının dalga boyuna ve kristalin örgü sabitlerine bağlıdır.



Şekil 4.1. Kristal tarafından kırınıma uğrayan X-ışınları

Şekil 4.1’de gösterilen d aralıklı paralel örgü düzlemlerine sahip bir kristalin yüzeyine düşen X-ışını demeti ele alındığında, sayfa düzleminde ilerleyen X-ışını demeti, bu paralel düzlemlerin her biri tarafından yansıtılır. Yansıyan ışınların oluşturduğu küre yüzeyleri, aralarındaki yol farkı dalga boyunun tam katı olacak şekilde üst üste geldiklerinde kuvvetlendirici girişim meydana gelir. Bu ise, kırınım desenlerinin oluşmasına yol açar. Kırınımın olduğu noktalar algılayıcı bir yüzey üzerine düşürülür. Böylece kırınım deseni elde edilir. Kırınım meydana gelmesi için Denklem 4.1’deki şartın sağlanması gerekir.

$$\text{yol farkı} = n \lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.1)$$

İki ışın arasındaki yol farkının düzlemler arasındaki mesafe ile ilişkisi Denklem 4.2’de verilmiştir.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (4.2)$$

Buna Bragg kırınım yasası denir. Burada; d_{hkl} , kristalin düzlemleri arasındaki mesafeyi; n , tam sayıları; λ , gelen ışının dalga boyunu ifade etmektedir.

Deneysel olarak Bragg yasasından iki şekilde yararlanılabilir. λ dalga boyu bilinen X-ışını kullanılarak, θ açısının ölçülüp, kristal düzlemlerinin d_{hkl} mesafesi belirlenebilir. Diğer taraftan d_{hkl} düzlemler arası mesafesi bilinen kristal kullanılarak λ dalga boyu belirlenir [31].

Üretilen filmlerin ortalama kristal boyutlarını hesaplamak için Denklem 4.3’de yer alan Scherer Denklemi kullanılmıştır [31].

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.3)$$

Burada k sabit değeri (0,94), λ X-ışınının dalga boyunu (1,5405Å), β maksimum yarı pik genişliğini ve θ ise kırınım açısını temsil etmektedir.

Üretilen katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin örgü sabitlerini belirlemek için, öncelikle hekzagonal kristal yapıya sahip olan ZnO’nun örgü sabitleri Denklem (4.4)’den hesaplanmıştır.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + l^2}{a_{hex}^2} \right] + \frac{l^2}{c_{hex}^2} \quad (4.4)$$

Burada d düzlemler arası mesafeyi, (hkl) miller indislerini, a_{hex} ve c_{hex} ise örgü sabitleridir.

Kübik kristal yapıya sahip olan CeO’nun örgü sabitini belirlemek için ise Denklem 4.5 kullanılmıştır.

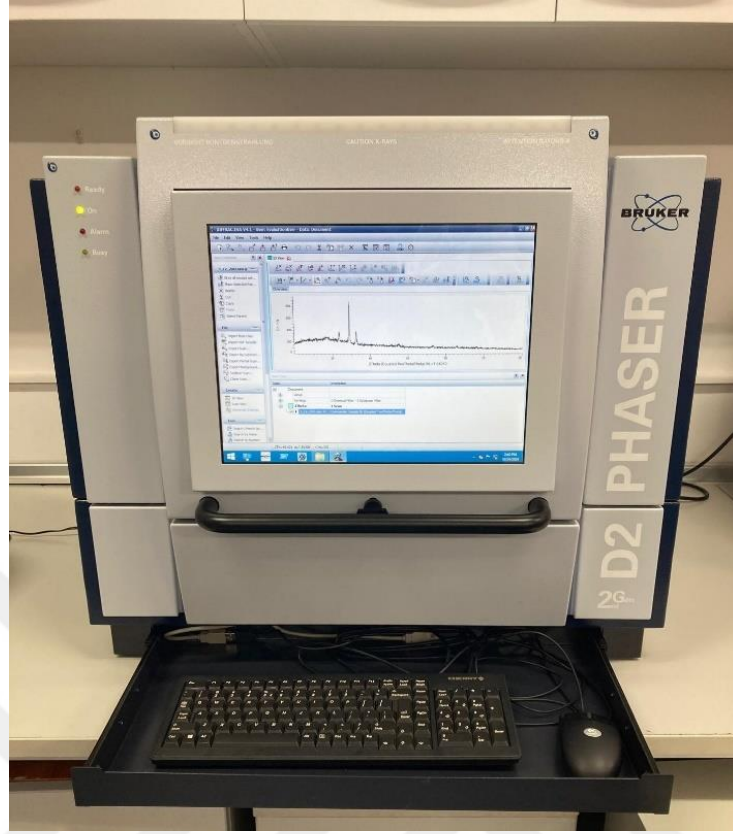
$$a_{küp} = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (4.5)$$

Kristalin tercihli yönelimini belirlemek için Denklem 4.6 kullanılmıştır [32].

$$TC = \frac{I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}}{\frac{1}{N}(\sum_n I_{(hkl)}/I_{0(hkl)})} \quad (4.6)$$

Burada $I(hkl)$ bir (hkl) düzleminin ölçülen bağıl yoğunluğu, $I_0(hkl)$ JCPDS verilerinden alınan düzlemin standart yoğunluğu, N yansıma sayısı ve n kırınım piklerinin sayısıdır [32].

Elde edilen katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin X- ışını kırınım desenleri, Görsel 4.1’de bulunan BRUKER D2 Phaser marka X-ışını kırınım cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu X-ışını cihazında $\lambda=1,5405\text{Å}$ dalga boylu $\text{CuK}\alpha$ ışını kullanılmakta olup, $25^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ sınır değerlerinde incelenmiştir.

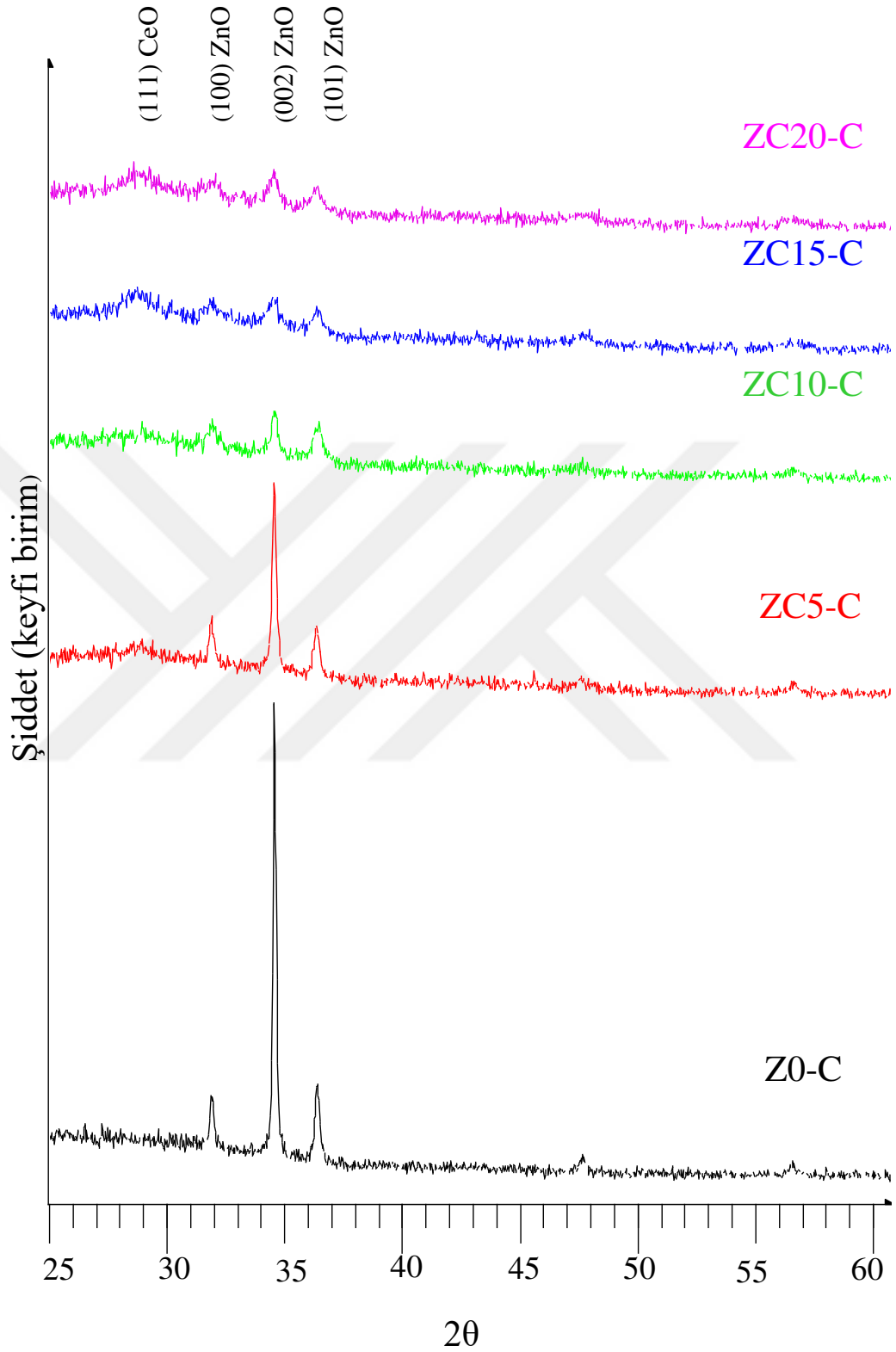


Görsel 4.1. BRUKER/D2 Phaser marka X-ışını kırınım cihazı (XRD)

4.1.2. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin X-ışını kırınım desenleri

Bir malzemenin kırınım desenindeki pik şiddetleri ve genişlikler o malzemenin kristalliği hakkında bilgi vermektedir. Pik şiddetinin büyük ve genişliklerinin dar olduğu pikler kristalleşmenin iyi olduğu anlamına gelirken, pik şiddetinin küçük ve genişliklerinin büyük olduğu pikler ise kristalleşmenin kötü olduğu anlamına gelmektedir [33]. Elde edilen katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin kırınım desenlerinde, piklerin üzerinde ilgili düzlemlerin miller indisleri belirtilmiştir.

Şekil 4.2’de katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerine ait X-ışını kırınım desenleri verilmiştir.



Şekil 4.2. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerine ait X-ışını kırınım desenleri

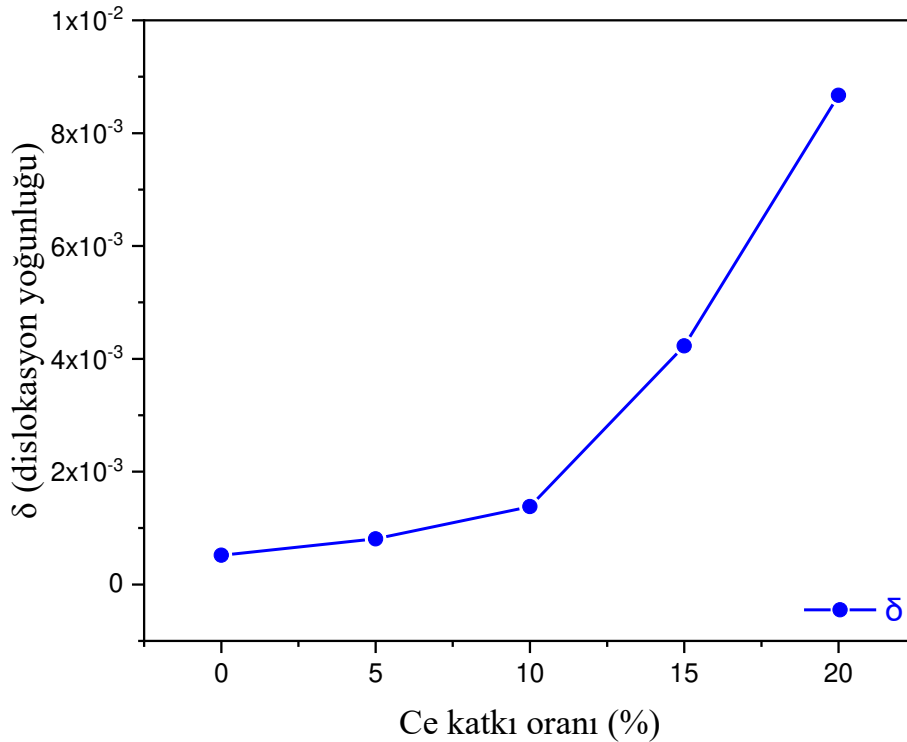
XRD desenlerindeki kırınım pikleri, hekzagonal wurtzite yapıya sahip olan ZnO JCPDS (kart no: 036-1451) ve kübik yapıya sahip olan CeO₂ JCPDS (kart no: 065-5923) kartlarıyla eşleşmiş olup, filmlerde birden çok pik bulunması filmlerin polikristal yapıda olduğunu göstermektedir. Z0-C, ZC5-C, ZC10-C filmlerindeki pikler, ZnO yapısında olan (100), (002), (101) düzlemlerine karşılık gelmektedir. ZC15 ve ZC20 filmlerinde ise ZnO piklerine karşılık gelen düzlemlerin yanı sıra CeO₂ kristal yapısında yer alan (111) düzlemine de rastlanılmıştır. Ce katkısının artmasıyla (111) düzlemine karşılık gelen pikin şiddetinde de artış gözlemlenmiştir.

Ayrıca, Z0-C filminin en yüksek şiddette pike sahip olduğu ve en iyi kristallenen film olduğu gözlemlenmiştir. Katkı oranının artmasıyla birlikte piklerin şiddeti azalmış ve genişliği artmıştır.

Kusur miktarını temsil eden dislokasyon yoğunluğu, aşağıdaki formülden belirlenir.

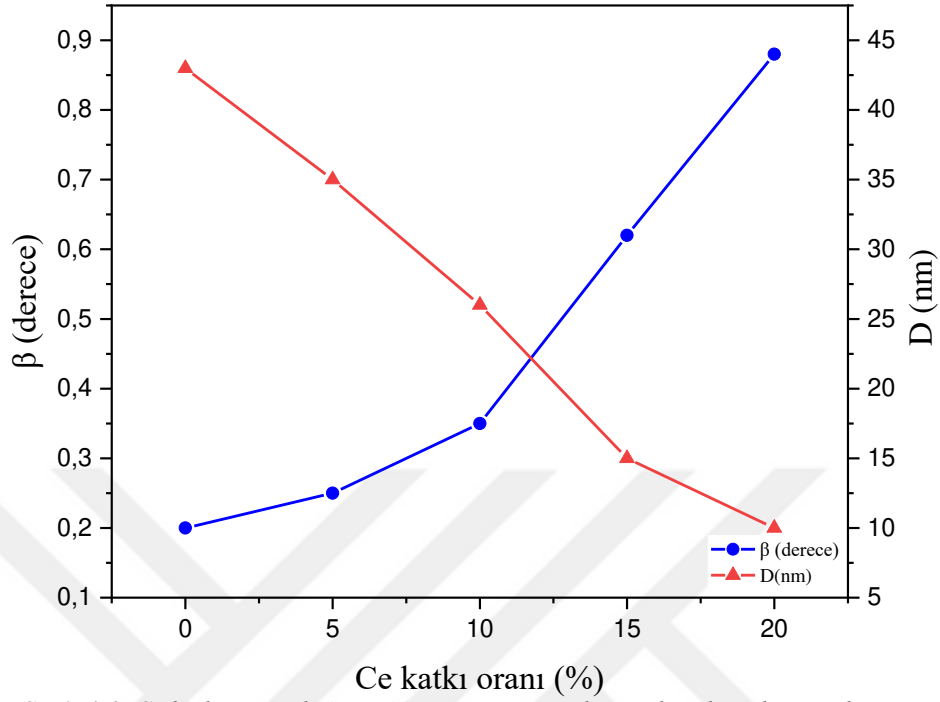
$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (4.7)$$

Şekil 4.3’de Ce katkı oranı ile dislokasyon yoğunluğunun değişimi verilmiştir. Ce katkı oranının artmasıyla birlikte dislokasyon yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Dislokasyon yoğunluğu malzemedeki kusur miktarını verdiğinden, Ce katkısı arttıkça kristal yapıda kusurlar artmıştır [34].



Şekil 4.3. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerine ait dislokasyon yoğunlukları

Şekil 4.4’de Ce katkı oranı kristal boyutu (D) ve yarı pik genişliğinin (β) değişimi verilmiştir.



Şekil 4.4. Ce katkı oranı ile kristal boyutu ve yarı pik genişliği değerlerinin değişimi

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi, yarı pik genişliği değerleri Ce katkı oranının artmasıyla birlikte artmıştır. Bu da piklerin şiddetinin Ce katkı oranının artmasıyla azaldığını göstermektedir. Kristal kalite aynı zamanda katkılama oranının artışına da bağlıdır [35].

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi, kristal boyutu değerleri, Ce katkı oranının artmasıyla birlikte azalmıştır. Bunun nedeni ise, iyonik çapları Tablo 4.1’de verilen, Ce^{+3} ve Ce^{+4} iyonlarının Zn^{+2} iyonunun yarıçapından daha büyük olmasıdır. Bu nedenle Ce^{+3} ve Ce^{+4} iyonlarının ZnO örgüsüne girerek Zn^{+2} iyonlarının yerini alması oldukça güçtür. Bunun yerine Ce^{+3} ve Ce^{+4} iyonlarının ZnO’nun yüzey oksijeniyle kompleks oluşturma ihtimali daha yüksektir [16].

Tablo 4.1. Ce^{+3} , Ce^{+4} ve Zn^{+2} iyonlarının, iyonik yarıçapları

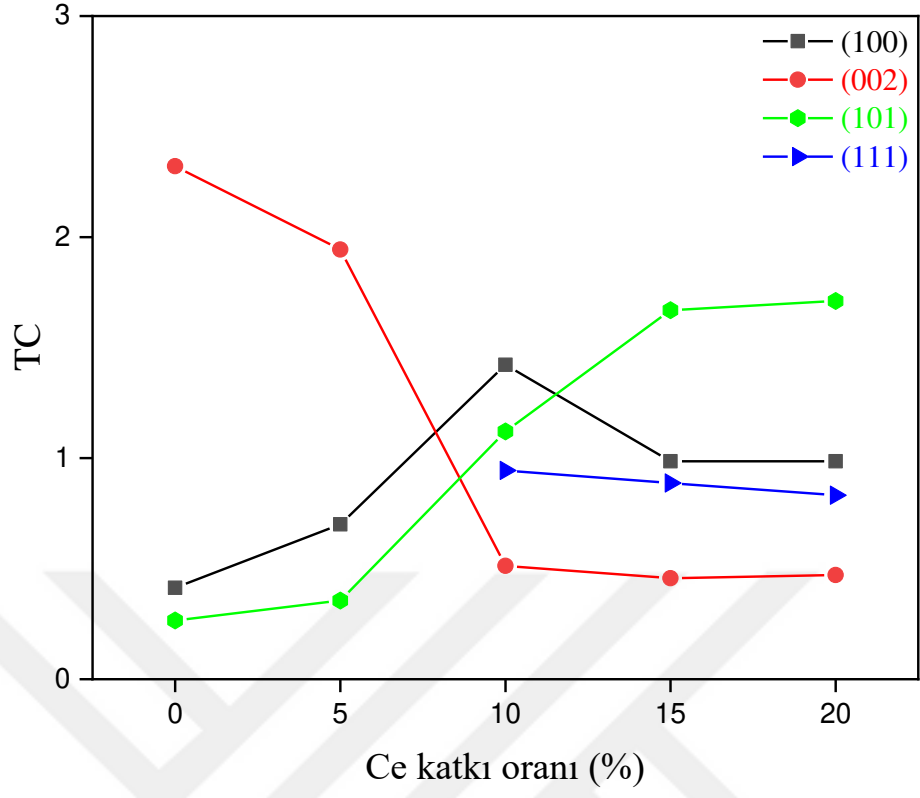
İyon	İyonik Yarıçap (nm)
Ce^{+3}	0,103
Ce^{+4}	0,092
Zn^{+2}	0,074

Tablo 4.2’de katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin örgü sabiti (a_{hex} , c_{hex} ve $a_{küp}$) değerleri verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi, katkı oranının artmasıyla örgü sabiti değerleri artmıştır. Şekil 4.2’den görüldüğü gibi, Ce katkısının artmasıyla 2θ değerleri sola doğru kaymaktadır. Örgü sabitlerindeki artışın sebebi, Ce^{+3} ve Ce^{+4} iyonları ile Zn^{+2} iyonlarının yarıçapları arasındaki farktan kaynaklı olarak örgü sabitlerinin artması ve 2θ değerlerinin daha düşük açılara kaymasından dolayıdır [16].

Tablo 4.2. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerine ait örgü sabiti (a_{hex} , c_{hex} ve $a_{küp}$) değerleri

Film kodu	ZnO (hexagonal)		CeO (kübik)
	a_{hex} (Å)	c_{hex} (Å)	$a_{küp}$ (Å)
ZO	3,2447	5,2004	-
ZC5	3,2498	5,2005	-
ZC10	3,2454	5,2024	-
ZC15	3,6008	5,6282	5,4012
ZC20	3,6020	5,6114	5,4030

Ce katkı oranı ile yapılanma sabiti değerlerinin değişimi Şekil 4.5’te verilmiştir. Rastgele yönlendirilmiş kristale sahip bir numune için $TC(hkl)=1$ değerini alırken, bu değer büyüdükçe (hkl) yönünde yönlendirilmiş kristallerin sayısı da artar [36]. Katkısız ZnO filminin TC (002) değerinin en yüksek olması bu filmin c eksenini boyunca yöneldiğini göstermektedir. Katkı oranının artmasıyla birlikte yönelim (002)’den (101)’e kaymıştır. Ortalama kristal boyutunun artması aynı zamanda TC (002) değerinin azalmasına da sebep olmaktadır [37].



Şekil 4.5. Ce katkı oranlarına göre yapılanma sabitinin (TC) değişimi

5. KATKISIZ VE SERYUM KATKILI ÇİNKO OKSİT FİLMLERİN OPTİK ÖZELLİKLERİ

5.1. Giriş

Işık, maddesel bir yüzey ile karşılaştığında geçebilir, yüzeyden yansıyabilir ya da absorplanabilir [38,39]. Absorpsiyon, yarıiletken gelen elektromanyetik dalga ile maddedeki elektrik yüklerinin etkileşmesi sonucu ortaya çıkan enerji kaybı olayıdır. Absorpsiyon olayında enerjisi belli bir foton, bir elektronu düşük enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine uyarır. Bu yüzden bu spektrumda mümkün olan tüm geçişler, yarıiletkenin yasak enerji aralığı ve bant tipi hakkında bilgi verebilir.

Yarıiletkende absorpsiyon olayı dört şekilde olur. Birincisi temel absorpsiyon olayı olarak adlandırılan, valans bandındaki elektronun bir fotonu iletkenlik bandına geçirmesi olayıdır. İkincisi, fotonlar tarafından optik bant aralığında bulunan eksitonların uyarılarak iletkenlik bandına geçmesiyle oluşur. Üçüncüsü, fotonlar tarafından valans bandında yer alan holler ile iletkenlik bandında yer alan serbest elektronların uyarılması ve bundan kaynaklı daha yüksek enerjili durumlarına geçilmesi ve dördüncüsü de fotonlar tarafından katkı atomlarının uyarılmasıdır [40].

Kalınlığı x olan numuneye I_0 şiddetli ışın gönderilirse, bu ışın I_1 şiddeti ile numuneyi geçecektir. I_0 ile I arasında üstel olarak [41],

$$\alpha x = \ln \left(\frac{I_0}{I_1} \right) \quad (5.1)$$

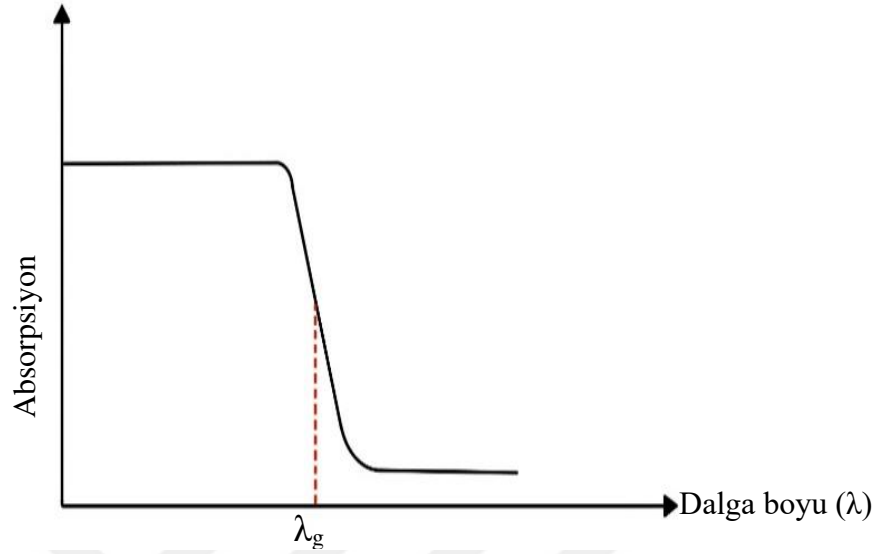
şeklinde olacaktır. Burada I_0 , malzemeye gelen ışının şiddeti; I_1 , malzemedan geçen ışının şiddeti; x , malzemenin kalınlığı; α , lineer absorpsiyon katsayısını ifade etmektedir. Gerekli matematiksel işlemlerden yapıldığında,

$$\frac{I_0}{I_1} = e^{-\alpha x} \quad (5.2)$$

olur. Absorpsiyonun maksimum olduğu durumda numuneyi geçen ışının şiddeti sıfır ($I=0$) olacaktır. Absorpsiyon spektrumunda temel absorpsiyon hızlı bir artış olarak kendini gösterdiğinden, yarıiletkenin yasak enerji aralığının belirlenmesinde kullanılır. Temel absorpsiyon olayı bir banttan diğer banda geçişi temsil etmektedir. Valans bandında bulunan bir elektron gelen ışının bir fotonunu absorplayarak iletkenlik bandına geçebilir. Bu da temel absorpsiyon olayı olarak adlandırılır.

Şekil 5.1’de bir yarıiletkende temel absorpsiyon grafiği verilmiştir. Işının absorpsiyona uğraması için gerekli dalga boyu λ_g değeridir. λ_g değerinden büyük olan

ışınlarda yarıiletken absorplamaya uğramaz. Gelen ışının dalga boyu değeri λ_g değerinde olduğu durumlarda yarıiletkende absorpsiyon olayı gözlemlenir.



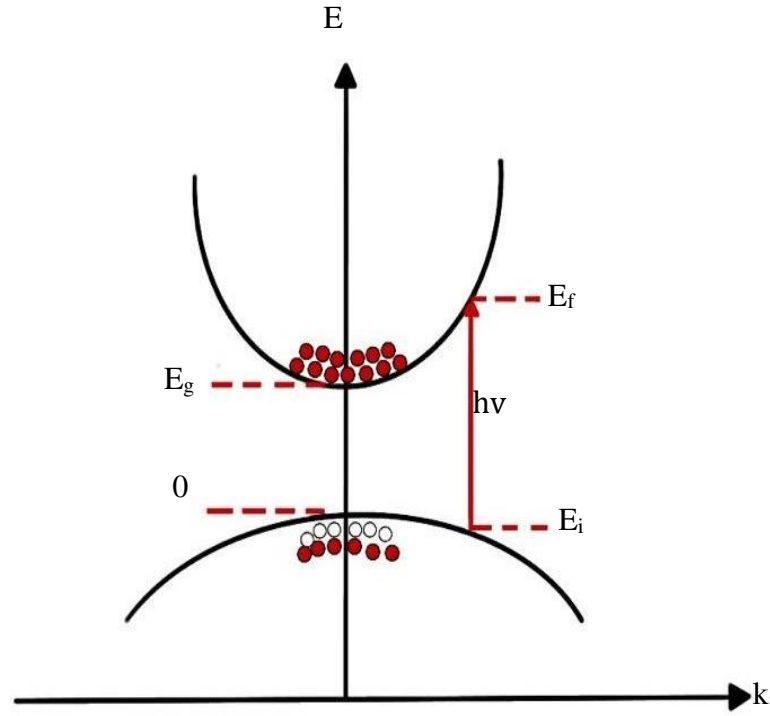
Şekil 5.1. Bir yarıiletkende temel absorpsiyon spektrumu

Absorpsiyon olayının gerçekleşebilmesi için Denklem 5.3’de yer alan, gelen fotonun enerjisinin optik bant aralığına (E_g) eşit ya da bu değerden büyük olması gerekir.

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \quad (5.3)$$

E_g , yarıiletkenin optik bant aralığını; h , Planck sabitini; c , ışık hızını temsil etmektedir.

Yarıiletkenler enerji bantlarında görülen farklılıklardan dolayı ikiye ayrılır. Bunlar doğrudan (direkt) bant geçişli yarıiletkenler ve dolaylı (indirekt) bant geçişli yarıiletkenler olarak adlandırılabilir [41]. Doğrudan (direkt) bant geçişi Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

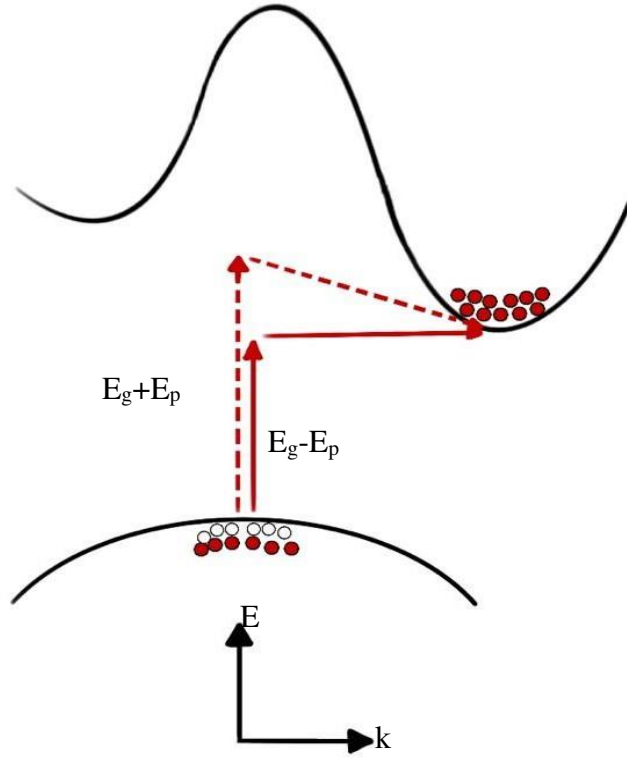


Şekil 5.2. Bir yarıiletkenin doğrudan (direkt) bant geçişinin şematik gösterimi

İletim bandının minimumu ile valans bandın maksimumu aynı momentum değerinde ($\vec{k}=0$) olan yarıiletkenlerde doğrudan bant geçişleri meydana gelir. Momentum değiştirmeden valans bandından iletkenlik bandına elektron geçişi sağlanır. Bu tür malzemelerde absorpsiyon katsayısı aşağıdaki Denklem 5.4 ile belirlenir [42].

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (5.4)$$

İletim bandının minimumu ile valans bandın maksimumu $\vec{k}$ değerleri birbirinden farklı olan ($\vec{k} \neq 0$) yarıiletkenlerde ise dolaylı bant geçişi oluşur. İndirekt bant geçişi Şekil 5.3’de dolaylı bant geçişi gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Bir yarıiletkende dolaylı (indirekt) bant geçişinin şematik gösterimi

Bu tür malzemelerde absorpsiyon katsayısı,

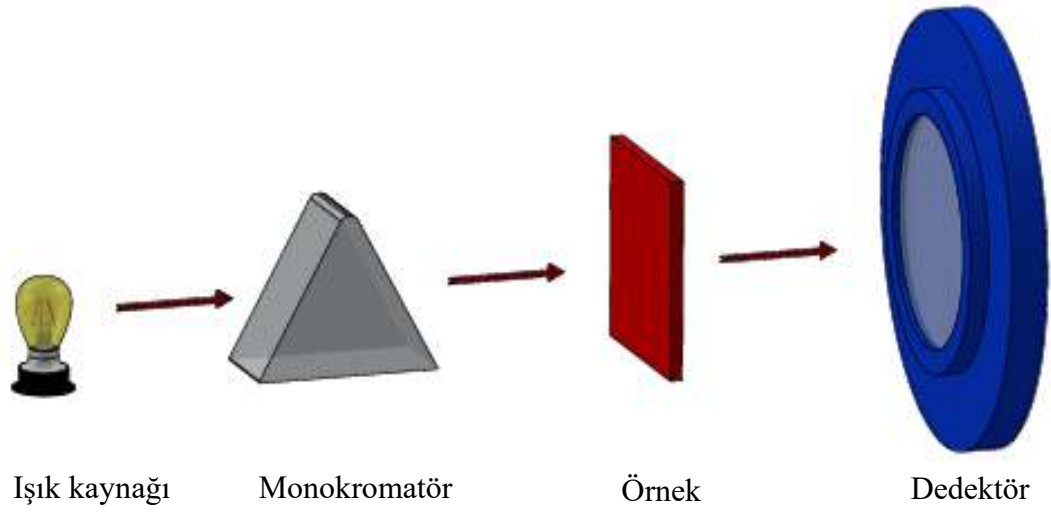
$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g \pm h\Omega)^2 \quad (5.5)$$

İndirekt geçişlerde aynı $\vec{k}$ değerleri bulunmadığından, momentumun değişimini sağlayabilecek olan üçüncü parçacık (fonon) yer alır.

Görsel 5.1’de SCHIMADZU marka UV 2450 model spektrofotometre cihazı kullanılarak, katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin optik karakterizasyonları yapılmış olup, cihaza ait bileşenler Şekil 5.4’de verilmiştir.



Görsel 5.1 *Schimadzu marka UV 2450 model spektrofotometre cihazı*

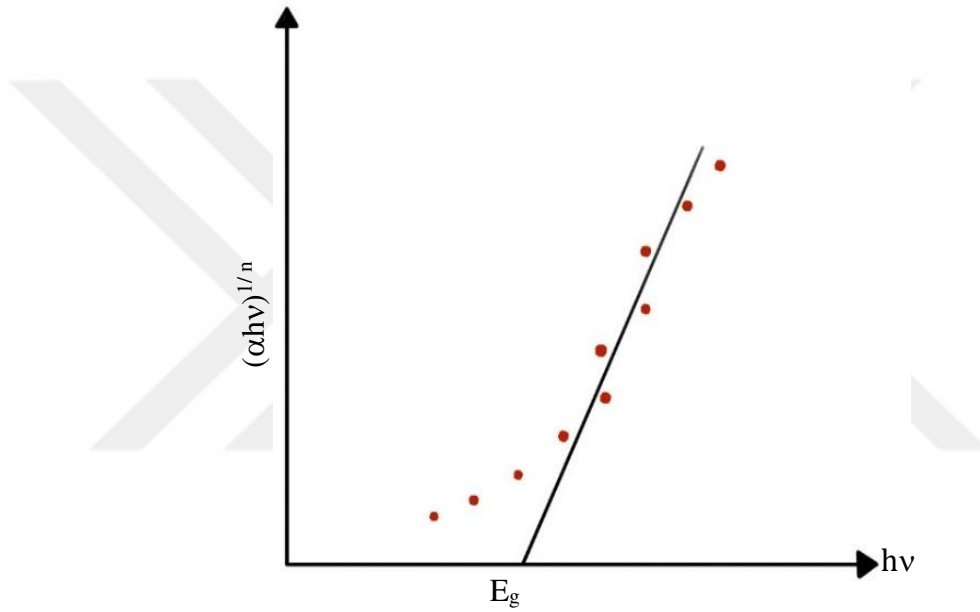


Şekil 5.4. *UV cihazı bileşenleri*

5.1.1. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin temel absorpsiyon spektrumları ve optik bant aralıkları

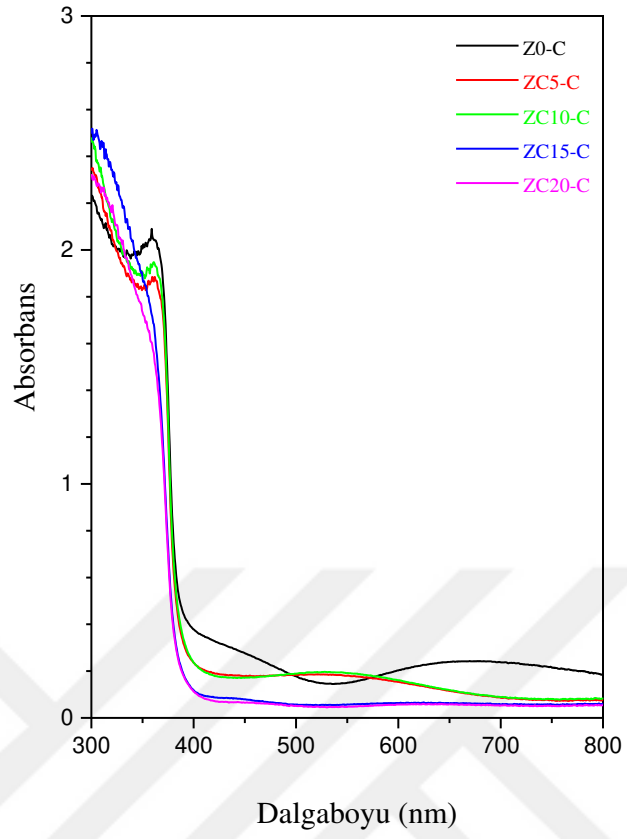
Spin kaplama metodu ile elde edilen katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin oda sıcaklığındaki absorpsiyon spektrumları 300-900nm arasında tarama bölgesi olan SHIMADZU marka 2450 UV-VIS Spektrofotometre cihazı kullanılarak elde edilmiştir.

Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin optik bant aralıklarının belirlenmesinde optik absorpsiyon metodu kullanılmıştır. Bu metotta $(\alpha h\nu)^{1/n}$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi çizilir (Şekil 5.5). Grafiğin lineer olduğu kısma karşı gelen doğrunun $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^{1/n} = 0$ 'da kestiği noktanın enerji değeri o materyalin optik bant aralığı değerini verir.

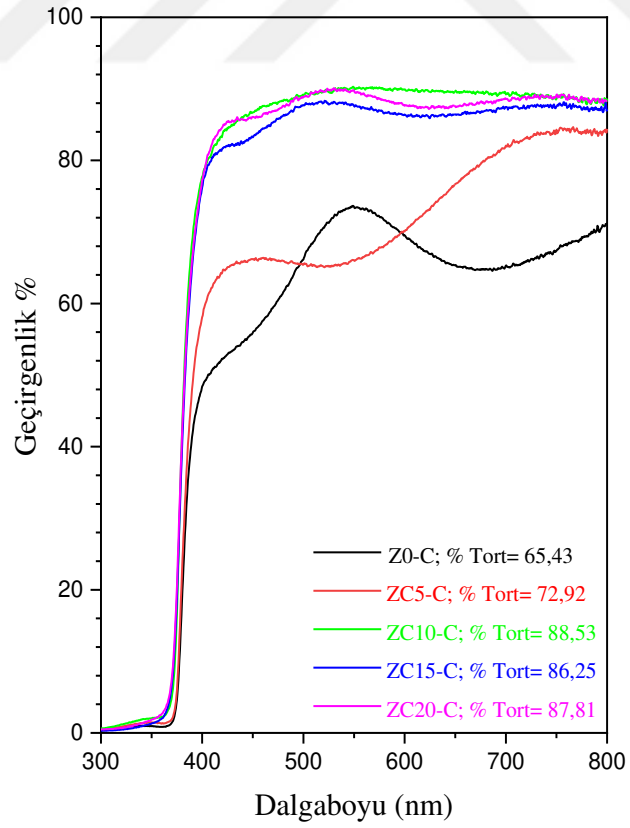


Şekil 5.5. Bir yarıiletkenin absorpsiyon katsayısının, fotonun enerjisine göre değişiminden optik bant aralığının belirlenmesi

Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin absorpsiyon ve geçirgenlik grafikleri Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekil 5.7’den görüldüğü gibi, katkısız ZnO filmin ortalama geçirgenlik değeri görünür bölgede yaklaşık %65,43 iken, Ce katkısı ile bu değer %87,81’e artmaktadır.



Şekil 5.6. Katkısız ve Ce Katkılı ZnO filmlerin absorpsiyon spektrumu



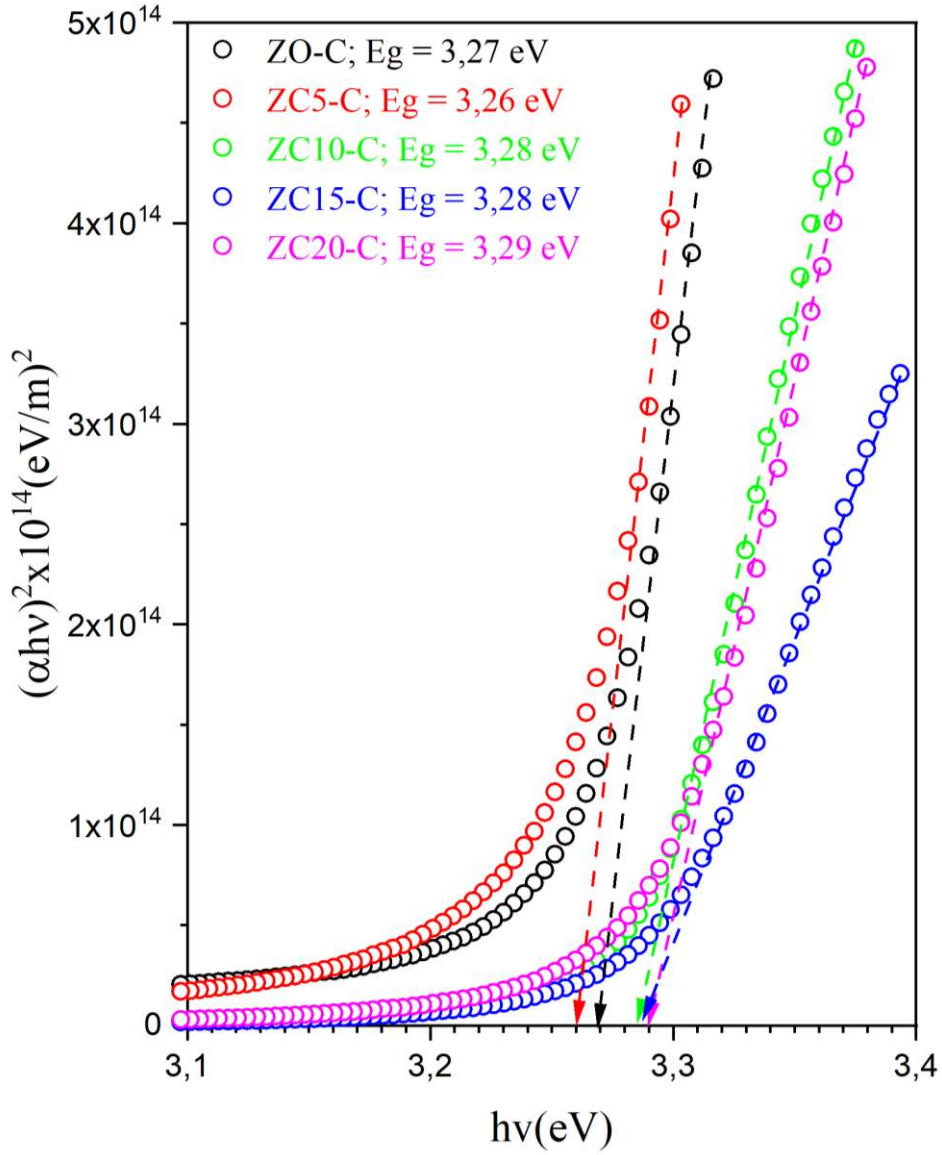
Şekil 5.7. Katkısız ve Ce Katkılı ZnO filmlerin geçirgenlik spektrumu

ZnO filmleri direkt bant aralığına sahip olduğu için, elde edilen filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ değişimi grafikleri çizilmiş ve Şekil 5.8’de verilmiştir. Optik absorpsiyon metodu kullanılarak bulunan E_g değerleri de bu grafik üzerinde verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, Ce katkısı ZnO’nun optik bant aralığını yaklaşık 3,27eV’den 3,29eV’a arttırmıştır, Benzer sonuçlara sahip çalışmalar literatürde de mevcuttur [12,43]. Literatür ile karşılaştırmalı optik bant aralığı değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. *Literatür ile karşılaştırmalı optik bant aralığı değerleri*

Çalışma Grubu	E_g (eV)
M.A.M Ahmed ve arkadaşları [11]	3,22-3,10
A.K. Soğuksu ve arkadaşları [12]	3,24-3,27
C.K. Kasar ve arkadaşları [14]	3,24-3,27
M. R. Khanlary ve arkadaşları [17]	3,20-3,40
Bu tez çalışmasında	3,27-3,29

Ce katkı oranının artmasıyla birlikte optik bant aralığının genişlemesi Burstein-Moss etkisiyle açıklanabilir [45]. Burstein-Moss etkisi, Ce konsantrasyonunun artması ile optik bant aralığındaki artışı açıklamak için uygun bir teoridir. Burstein-Moss etkisine göre, iletkenlik bandındaki taşıyıcı konsantrasyonunun artması, Fermi enerji seviyesinin iletkenlik bandına doğru hareket etmesine neden olur ve optik bant aralığı artar [46].



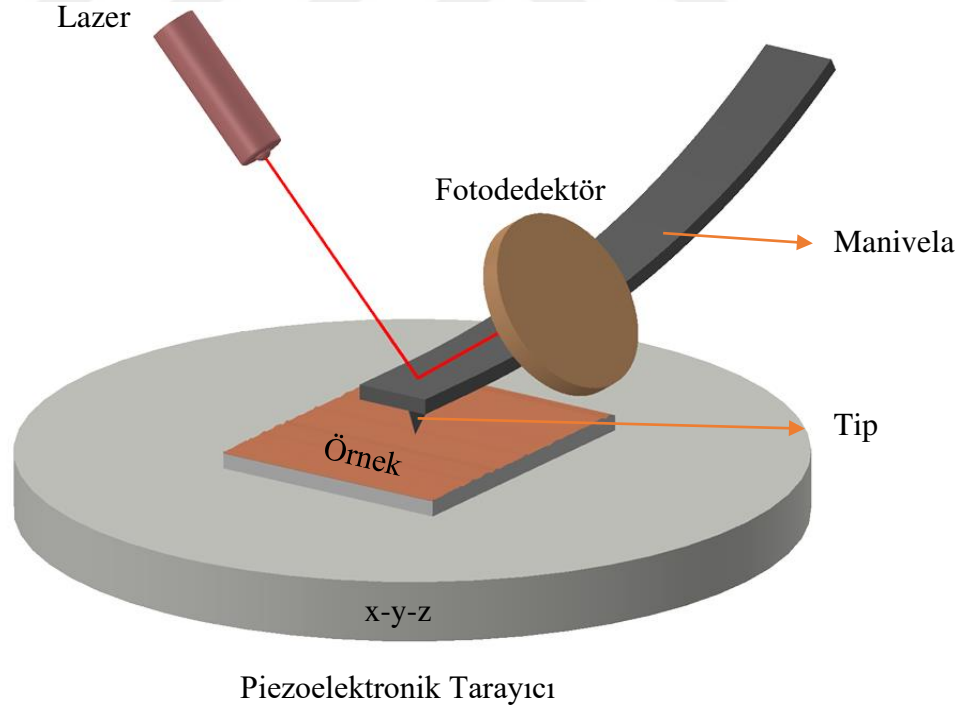
Şekil 5.8. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ değişimi grafiği

6. KATKISIZ VE SERYUM KATKILI ÇİNKO OKSİT FİLMLERİN YÜZEY ÖZELLİKLERİ

6.1. Giriş

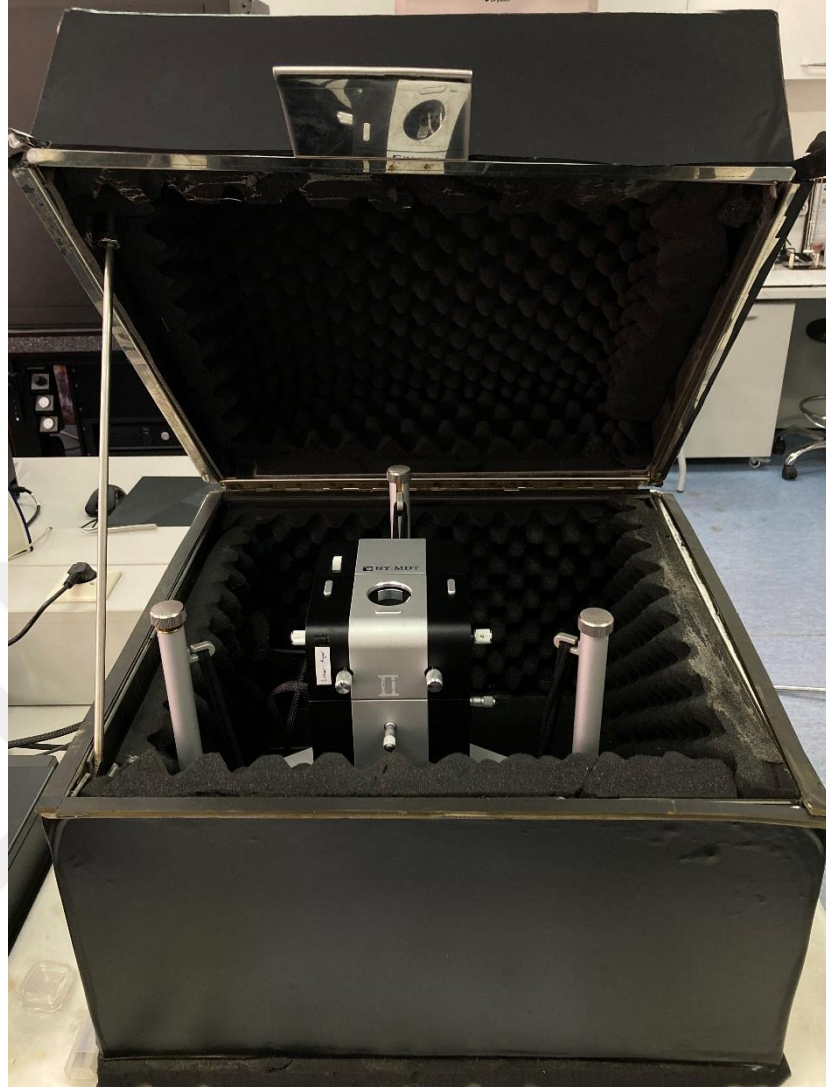
Atomik Kuvvet Mikroskobu, taramalı tünelleme mikroskobu ve stylus profilometre prensiplerinin bir kombinasyonudur. Yarıiletken, metal ve kompozit malzemelerin yüzey özelliklerini incelemek için kullanılan ve malzemeyi tahribata uğratmayan bir mikroskoptur [47]. Ayrıca, malzemenin homojen bir yapıya sahip olup olmadığı hakkında bilgi verir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesinde de kullanılmaktadır.

Şekil 6.1’de Atomik Kuvvet Mikroskobunda görüntü oluşumuna ait şematik gösterim yer almaktadır. AFM’de yer alan piezoelektrik tarayıcı hassas bir şekilde taramanın yapılmasını sağlar. Malzemenin yüzeyine yaklaştırılan tip-manivela numuneye dokunmadan sadece hissederek malzemeyi tarar. Tarama esnasında tip ile örnek arasında etkileşme kuvveti meydana gelir ve bu kuvvetle tip-manivela sisteminde sapmalar oluşur. Bu sapmalar, manivela üzerinden yansıyan lazerin fotodedektör tarafından algılanır.



Şekil 6.1. Atomik kuvvet mikroskobunda (AFM) görüntü oluşumuna ait şematik gösterim

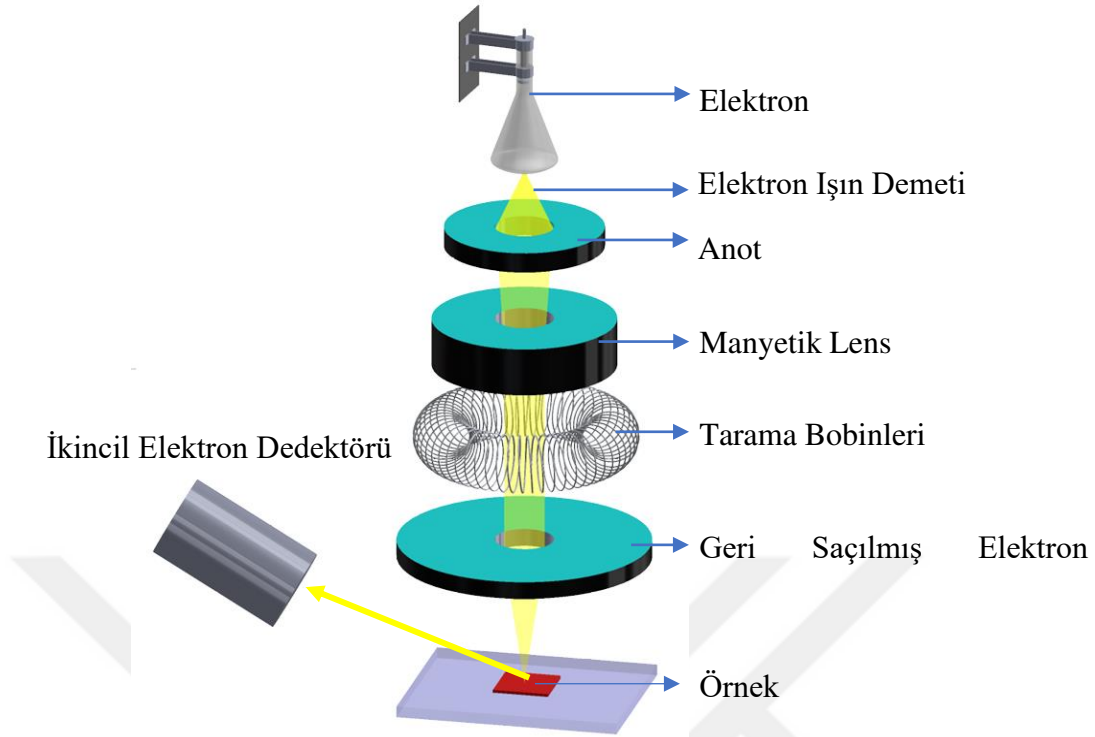
Bu tez çalışmasında, elde edilen katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin yüzeylerine ait morfolojik karakterizasyonu için Görsel 6.1’de verilen NT-MDT NANOEDUCATOR II marka AFM cihazı kullanılmıştır.



Görsel 6.1. NT-MDT NANOEDUCATOR II marka atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Son yıllarda, malzeme inceleme tekniklerinden en çok kullanılanlardan birisi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tekniğidir.

Şekil 6.2’de taramalı elektron mikroskobunda (SEM) görüntü oluşumuna ait şematik gösterim yer almaktadır. SEM yüksek vakum ortamında çalıştırılır ve yüksek vakum altında voltaj ile hızlandırılan elektronlar örnek üzerine doğru odaklanarak numune yüzeyini tarar. Bu elektronlar ile örnek yüzeyde bulunan atomlar arasında çeşitli girişimler meydana gelir. Meydana gelen etkiler uygun algılayıcılarda toplanır ve sinyal güçlendiricilerinden geçirilir. Daha sonra bu etkiler bir katot ışınları tüpü ekranına aktarılır ve böylece görüntü elde edilir [48].



Şekil 6.2. Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) görüntü oluşumuna ait şematik gösterim

Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin yüzey özelliklerini incelemek için Görsel 6.2’de verilen ZEISS ULTRAPLUS marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Görsel 6.2. ZEISS ULTRAPLUS marka taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Malzemelerin elementel analizlerini yapabilmek için Enerji Dağılım X-Işını Spektroskopisi (EDS) kullanılmaktadır. EDS, SEM ya da Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM) ile birlikte kullanılmaktadır. Bu çalışmada SEM cihazıyla entegre çalışan EDS dedektörü kullanılmıştır.

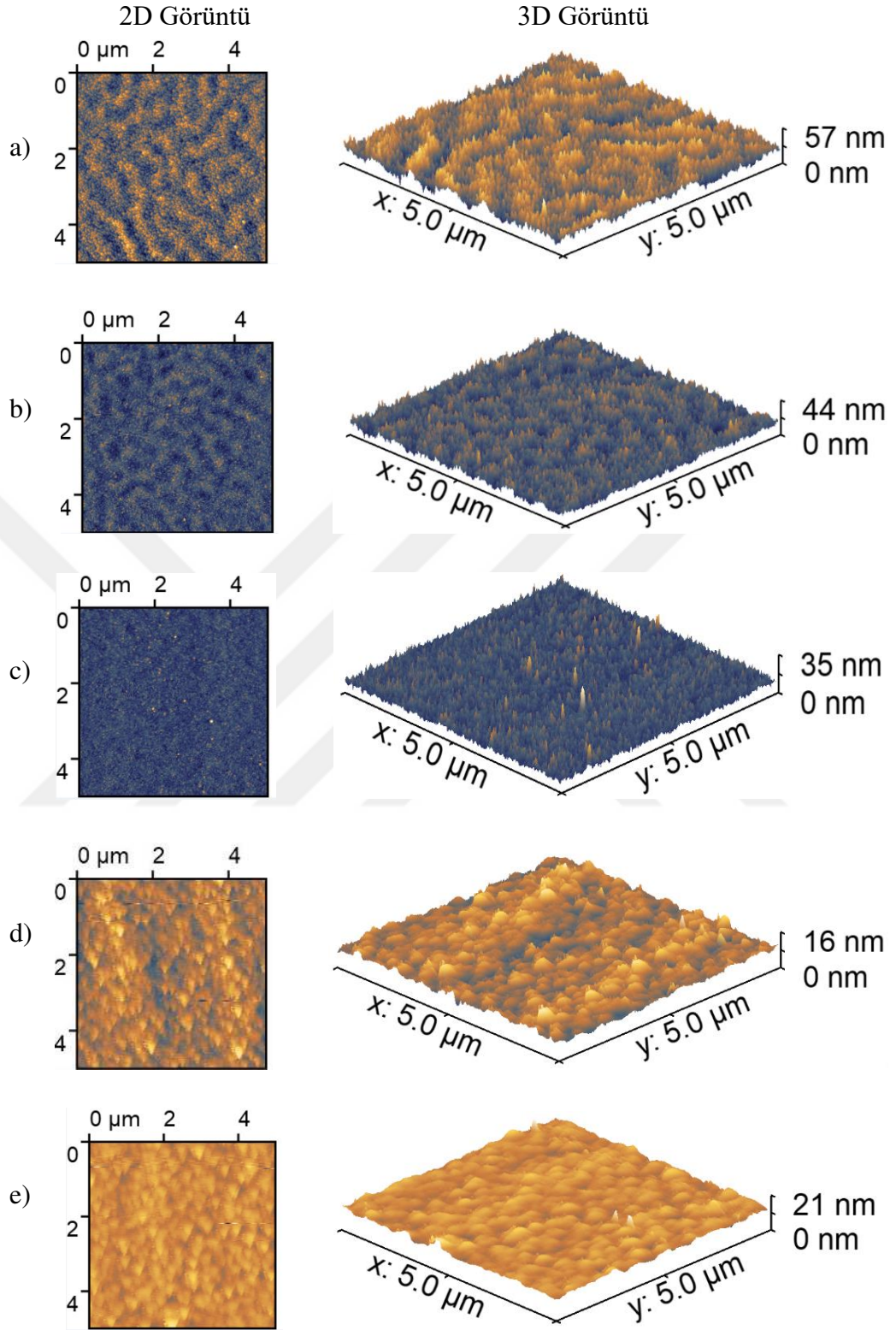
6.1.1. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin AFM görüntüleri

Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin 2D ve 3D AFM görüntüleri Şekil 6.3’de verilmiştir. AFM görüntüleri temassız mod ile 40mm x 40mm’lik bir alan üzerinde değerlendirilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, filmlerin yüzeyi homojen bir şekilde kaplanmıştır. AFM analizleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri olan roughness (RMS) değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir. AFM görüntülerinden ZnO filmlerinin yüzey morfolojisinin güçlü bir şekilde etkilendiği ve filmlerin RMS değerlerinin Ce içeriği ile azaldığı görülmektedir [49]. RMS değerlerindeki bu azalma eğilimi, katkılama nedeniyle birçok ince filmin yüzey morfolojisindeki değişimle uyumludur [50].

Ce katkısı ile filmlerin RMS değerlerindeki düşüş, filmlerin daha pürüzsüz hale geldiğini göstermektedir.

Tablo 6.1. Katkısız ve Ce katkılı ZnO film yüzeylerinin roughness (rms) değerleri

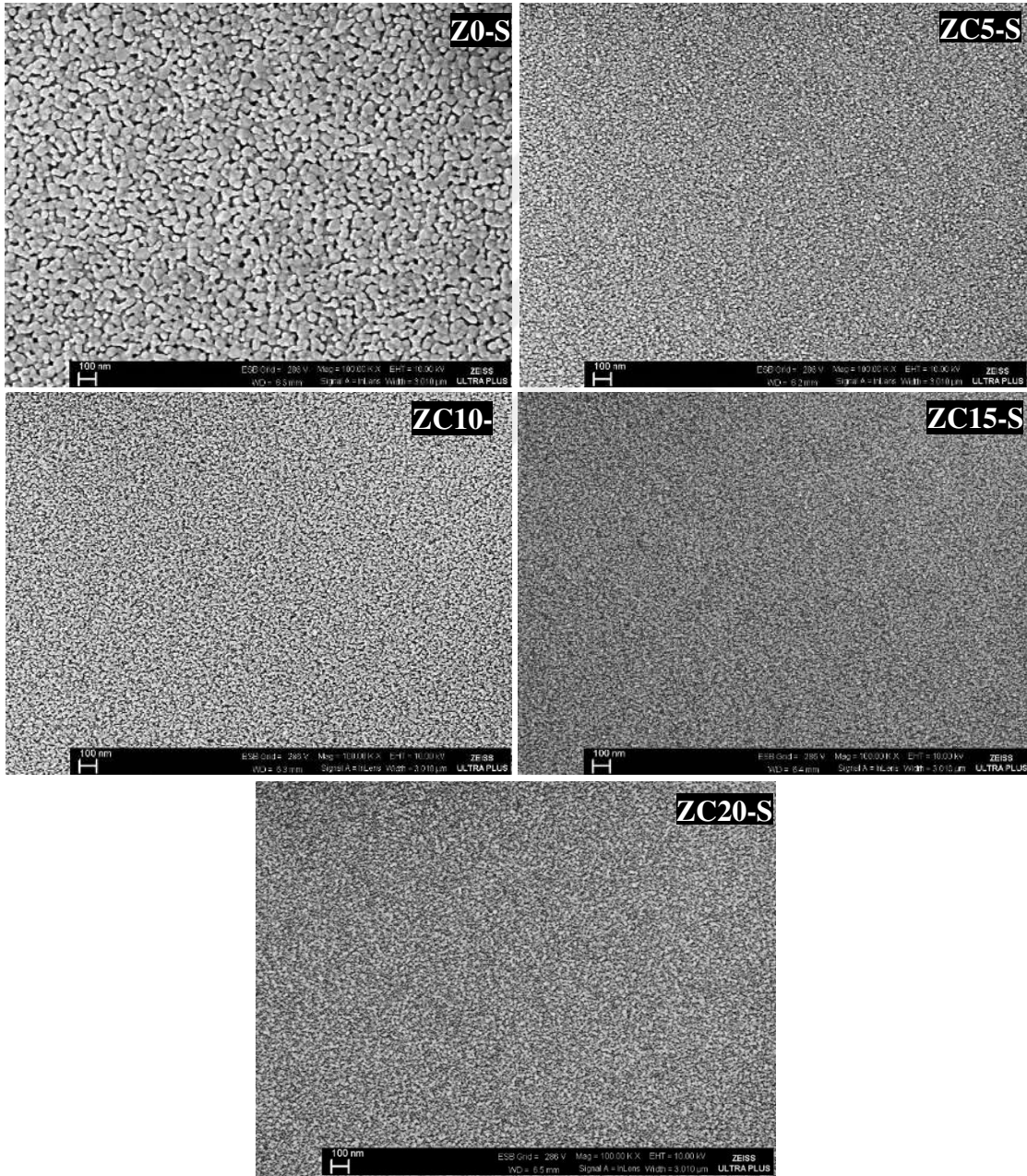
Film Kodu	Roughness (RMS) Değerleri (nm)
ZO-C	6.553
ZC5-C	3.811
ZC10-C	2.404
ZC15-C	1.248
ZC20-C	1.023



Şekil 6.3. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin 2D ve 3D AFM görüntüleri; a) Z0-C, b) ZC5-C, c) ZC10-C, d) ZC15-C, e) ZC20-C

6.1.2. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin SEM görüntüleri

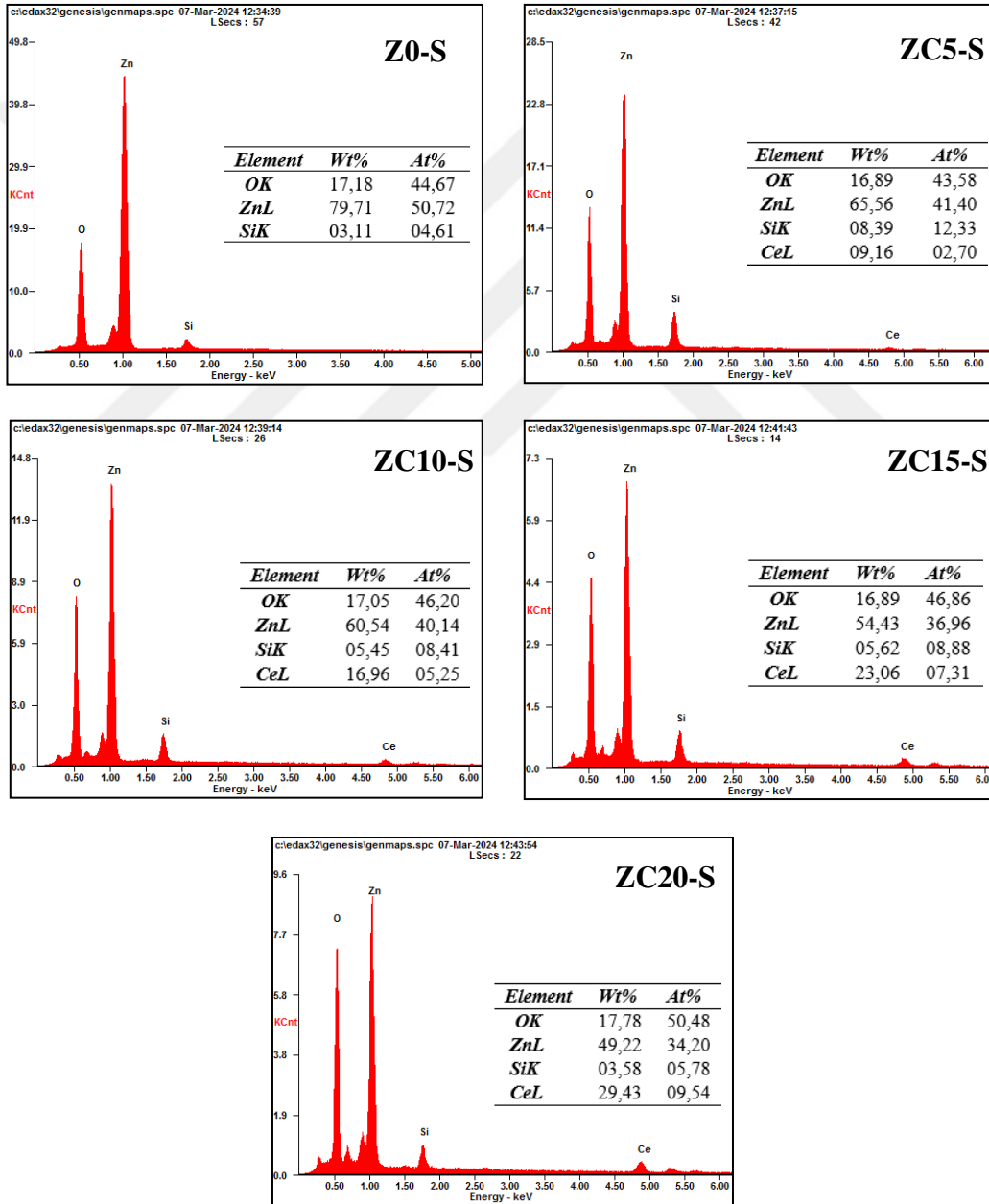
Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin 100k büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 6.4’de verilmiştir. Şekil 6.4’de görüldüğü gibi, katkısız ZnO filmlerin yüzeyinde tane sınırları neredeyse homojen olarak dağılmış parçacıklar açıkça görülmekte ve parçacıklar arasında hafif boşluklar olmasına rağmen neredeyse pürüzsüz bir yüzey görülmektedir. Ce katkı oranının artmasıyla birlikte ve taneler arası boşluklar da azalmıştır. Aynı zamanda Ce katkısı parçacık boyutunda azalmaya da sebep olmuştur ki bu azalma XRD sonuçlarında da gözlenmektedir [51].



Şekil 6.4. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin 100k büyütmedeki SEM görüntüleri

6.1.3. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin EDS analizi

Elde edilen katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin elementel dağılımları belirlemek için Enerji Dağılım X-Işını Spektroskopi (EDS) analizi kullanılmıştır. Şekil 6.5’de katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerinin EDS spektrumları verilmiştir. Tüm filmlerde Zn ve O pikine rastlanmıştır olup aynı zamanda Si tabakadan gelen Si pikine de rastlanmıştır. Ce katkısı yapılan filmlerde, Zn, O ve Si piklerine ek olarak Ce piki de görülmektedir. Ce katkısının artmasıyla birlikte beklenildiği gibi Ce elementi de yüzdelik olarak artmıştır [52].



Şekil 6.5. Katkısız ve Ce katkılı ZnO filmlerin EDS spektrumları

7. *p-Si/n-ZnO* VE *p-Si/n-ZnO:Ce* HETEROEKLEM DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

7.1. Giriş

Heteroeklem diyotların elektriksel özelliklerini tayin etmek için, akım-gerilim (I - V) ölçüm sistemi ile numuneye farklı voltajlar uygulanarak akım-voltaj ölçümleri yapılmaktadır. I - V karakteristiklerinin belirlenmesinde Termiyonik emisyon teorisi kullanılır. Bu teoriye göre, elde edilen heteroeklem diyotların karakteristikleri aşağıdaki standart diyot eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$I = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1\right] \quad (7.1)$$

Burada A diyotun alanı, A^* Richardson sabiti, T sıcaklık, q elektron yükü, Φ_b bariyer yüksekliği, k Boltzmann sabiti, V_d ön voltaj, n idealite faktörüdür. Bariyer yüksekliği (Φ_b) değeri aşağıdaki Denklem 7.2E den bulunur.

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{AA^* T^2}{I_0} \quad (7.2)$$

Buradaki I_0 değeri doyum akımıdır.

Termiyonik emisyon teorisine göre, akım-voltaj eğrilerinin eğiminden hesaplanan idealite faktörü değeri $n=1$ 'dir. Fakat, uygulamada $n>1$ değerlerindedir. Bu durum, metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey tabakanın varlığı, ara yüzeyde elektrik alandan dolayı hayali Schottky engel alçalması vb. sebeplerindendir [53,54].

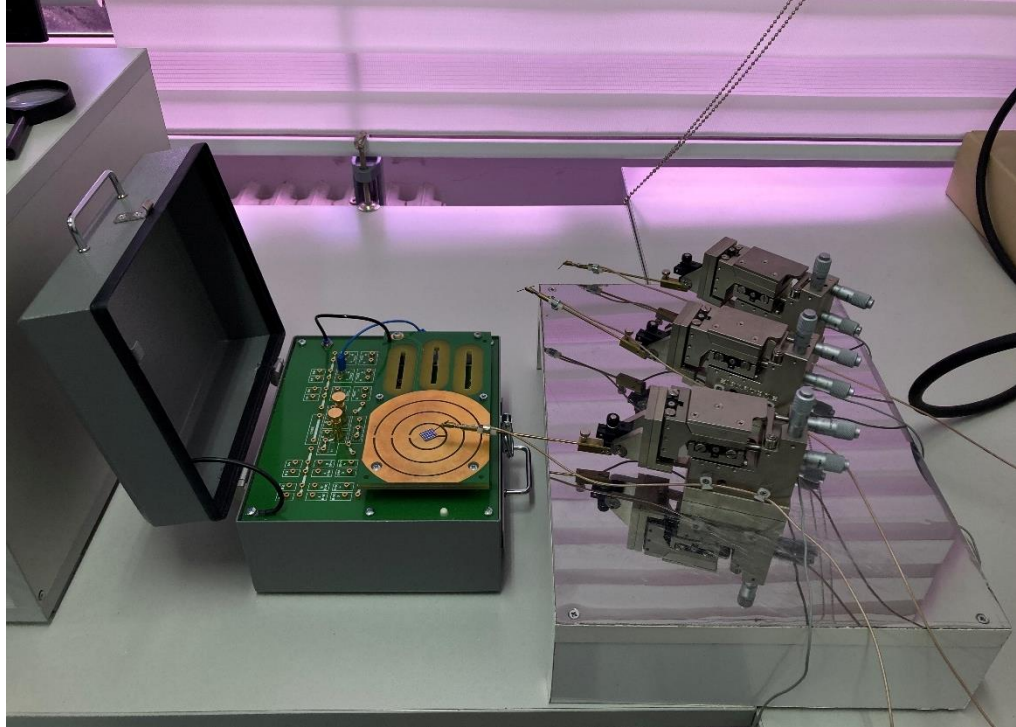
İdealite faktörü (n) hesaplamak için, aşağıda verilen Denklem 7.3 kullanılır.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (7.3)$$

Elde edilen *p-Si/n-ZnO:Ce* heteroeklem diyotların elektriksel ölçümlerinin alınabilmesi için, KEITHLEY marka Adapter-Box-C-10 prob istasyonuna bağlı Görsel 7.1'de verilen KEITHLEY 4200-SCS/CVU elektriksel karakterizasyon sistemi kullanılmıştır. Görsel 7.2'de ölçüm esnasında kullanılan SIGNATONE marka prob tutucu ve prob uçları gösterilmiştir.



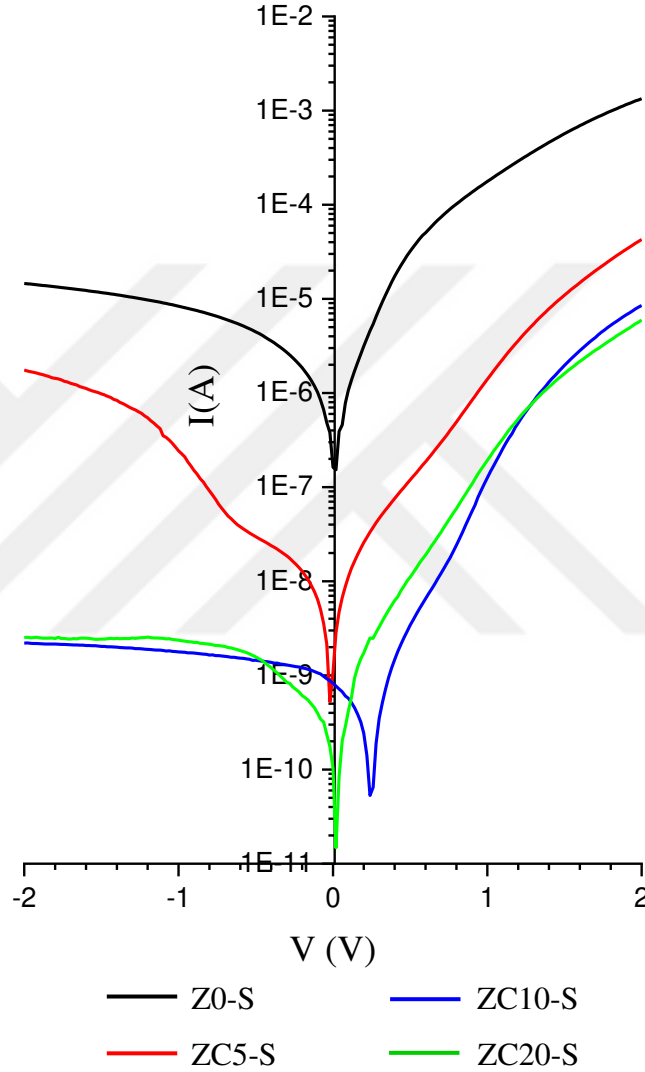
Görsel 7.1. KEITHLEY 4200-SCS/CVU elektriksel karakterizasyon sistemi



Görsel 7.2. KEITHLEY marka Adapter-Box-C prob istasyonu, SIGNATONE marka mikrokonumlandırma ünitesi

7.1.1. $p\text{-Si}/n\text{-ZnO}$ ve $p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Ce}$ heteroeklem diyotların akım-voltaj karakteristikleri

Şekil 7.1’de $p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Ce}$ heteroeklem diyotların oda sıcaklığındaki I - V karakteristikleri gösterilmiştir. Elde edilen metal-yarıiletken kontaklarının doğrultucu bir davranışa sahip olduğu ve bu davranışın Ce katkılanmasıyla kötüleştiği görülmektedir.



Şekil 7.1. $p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Ce}$ heteroeklem diyotların I - V grafikleri

Elde edilen diyotlar için Φ_b ve η değerleri Tablo 7.1’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi tüm idealite faktörü değerleri birden büyüktür. Diyotların η değerleri 5.20-7,08 arasında değişmektedir. İdealite faktörünün birden büyük olması diyotun idealiteden saptığı anlamına gelir. İdealite faktörü değerlerinin birden büyük olması, metal-yarı iletken bağlantısı boyunca voltaj düşüşü, metal ve yarıiletken arasındaki arayüz durumları ve bariyer yüksekliklerindeki homojensizliklerin varlığı gibi faktörlere atfedilir [55,56].

Φ_b değerleri Denklem 7.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 7.1’den görüldüğü gibi Ce katkı oranı arttıkça Φ_b değerleri artma eğilimindedir. Bu değerlerin, Si (4.97eV) ve ZnO (4.25eV) iş fonksiyonları farkı olan 0,72eV değerine yakın olduğu görülmektedir. M.A.M Ahmed ve arkadaşları [57], Ce katkı oranı arttıkça Φ_b değerlerini 0,55eV’tan 0,86eV’a arttığını bulmuşlardır. Bu sonuçlar elde edilen diyotlar için bulunan sonuçlarla uyushmaktadır.

Tablo 7.1. *p-Si/n-ZnO:Ce heteroeklem diyotların idealite ve bariyer yüksekliği değerleri*

Film kodu	η	Φ_b (eV)
Z0-S	5,20	0,58
ZC5-S	7,08	0,69
ZC10-S	5,38	0,82
ZC20-S	5,99	0,78

8. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında sol-jel spin kaplama tekniği kullanılarak cam ve p-Si alttaşlar üzerine katkısız ve farklı katkı oranlarında (%5, %10, %15 ve %20) Ce katkılı ZnO filmleri elde edilmiştir. p-Si alttaş kullanılarak elde edilen numunelerden *p-Si/n-ZnO:Ce* heteroeklem diyotları fabrikasyonu yapılmış, karanlık ortamda *I-V* karakteristiği incelenmiştir.

Elde edilen filmlerin yapısal özelliklerini tayin etmek için XRD cihazı kullanılmıştır. XRD desenlerinden filmlerin polikristal yapıda oldukları ve Ce katkı oranının artmasıyla birlikte yarı pik genişliğinin arttığı, pik şiddetinin azaldığı gözlemlenmiştir. XRD verilerinden ortalama tanecik boyutu, örgü sabitleri, yapılanma sabiti ve dislokasyon yoğunlukları gibi değerler hesaplanmıştır. Ce katkı oranının artmasıyla birlikte dislokasyon yoğunluğu değerlerindeki artmanın kristal yapıdaki kusurları arttırdığı söylenebilmektedir. Ortalama kristal boyutu ise Ce katkısının artmasıyla birlikte azalmıştır. Bunun nedeni ise, Ce^{+3} ve Ce^{+4} iyonlarının yarıçaplarının Zn^{+2} iyonunun yarıçapından daha büyük olmasının sonucu olarak bu iyonların ZnO'nun yüzey oksijeniyle kompleks oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Yapılanma sabiti değerinin en yüksek değeri, katkı oranının artmasıyla birlikte (002) düzleminden (101) düzlemine kaymıştır.

Elde edilen filmlerin optik karakterizasyonu yapabilmek için UV Spektrofotometre cihazı kullanılmıştır. %*T* spektrumlarından, Z0-C, ZC5-C ve ZC10-C filmlerindeki Ce katkısının artmasıyla birlikte geçirgenlik değerlerinin arttığı ZC10-C, ZC15-C ve ZC20-C filmlerinde hemen hemen aynı kaldığı gözlenmiştir. Alınan absorpsiyon spektrumlarından, Tauc-Plot yöntemi kullanılarak optik bant aralığı değerleri bulunmuştur. Optik bant aralığı değerleri 3,26 – 3,29eV arasındadır. Ce katkı oranının artmasıyla birlikte optik bant aralığı değeri artma eğilimi göstermektedir. Bu durum katkılama ile optik bant aralığının değişimini açıklayan Burstein-Moss etkisi ile açıklanabilir. Bu etkiye göre, katkı oranının artmasıyla birlikte, iletkenlik bandındaki taşıyıcı konsantrasyonunun artması, Fermi enerji seviyesinin iletkenlik bandına doğru hareket etmesine neden olur ve bu da optik bant aralığının artmasına sebep olur.

Elde edilen filmlerin morfolojik özelliklerini incelemek için atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. AFM sonuçlarından, elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin katkı oranının artmasıyla azaldığı ve yüzeydeki pürüzlü yapının da pürüzsüzleştiği görülmüştür. SEM

görüntülerinden Ce katkı oranının artmasıyla birlikte ortalama kristal boyutu ve taneler arası boşluklar azaldığı görülmüştür. Filmlerin elementel analizini yapmak için SEM cihazına entegre olan EDS dedektörü kullanılmıştır. EDS analizleri sonucuna göre, Zn, O, Ce varlığı doğrulanmış ve Ce katkısı artan filmlerde de Ce oranının arttığı görülmüştür.

p-Si/n-ZnO:Ce heteroeklem diyotlarının fabrikasyonu yapılmış ve elektriksel karakterizasyonları için akım-voltaj ölçümleri alınmıştır. *p-Si/n-ZnO:Ce* heteroeklem diyotlarının doğrultma özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir. Fabrikasyonu yapılan diyotların diyot parametreleri (idealite faktörleri ve bariyer yüksekliği) değerleri bu ölçümlerden yararlanılarak hesaplanmıştır.



KAYNAKÇA

- [1] Busch, G. (1989). Early history of the physics and chemistry of semiconductors-from doubts to fact in a hundred years. *European Journal Physics*, 10 (4), 254-264.
- [2] Łukasiak, L., Jakubowski, A. (2010). History of semiconductors. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 39 (1), (3–9).
- [3] Bernardo, Catarina P. Correla V., Lameirinhas, Ricardo A. Marques, Cunha, João P. de Melo, Torres, João Paulo N. (2024). A revision of the semiconductor theory from history to applications. *Discover Applied Sciences*, 6 (316),
- [4] Neamen, D.A. (2006). *Semiconductor Physics and Devices*. (3. Baskı). New York: McGraw-Hill Companies.
- [5] Yılmaz, H. (2024). Diyetun tarihçesi. *Takvim-i Vekayi*, 12 (1), 56–67.
- [6] Xia, C., Ji R., Jiang, S., Zhu, X., Tang, A., Yang, D., Ma, X. (2025). Enhanced electroluminescence from silicon-based light-emitting devices with $\text{Mg}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{O}$ /Erbium-doped ZnO heterostructures by using ITO/MoO₃ combined anode. *Applied Surface Science*, 682 (2), 161782
- [7] Sarvar, M., Aalam, S.M., Sadiq, M., Khan, M.S., Ali, J. (2023). An enhanced field emission for display devices arises from the assembling of ZnO@MOF/MWCNTs. *Inorganic Chemistry Communications*, 157 (3), 111229.
- [8] Yaka, A.P., Caglar, Y., Caglar, M. (2024). Electrical performance of dye-sensitized solar cells based nanostructured ZnO synthesized by addition CTAB with hydrothermal method. *Optical Materials*, 149 (6346), 114985.
- [9] Chandak, V.S., Kathwate, L.H., Kumbhar, M.B., Kulal, P.M. (2025). Spray deposited high performance Fe-doped ZnO ethanol sensor operating at low temperatures. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.
- [10] Tekin, S., Unveroglu Abdioglu, B., Bozer, C., Karaduman Er I., Acar, S. (2025). Enhanced linear and nonlinear optical characteristics of cerium (Ce) doped ZnO Film. *Ceramics International*, 51 (4), 5309-5328
- [11] Ahmed, M.A.M., Meyer, W.E., Nel, J.M., (2019). Effect of (Ce, Al) Co-doped ZnO thin films on the schottky diode properties fabricated using the sol-gel spin coating. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 103 (104642), 1-10.
- [12] Soguksu, A.K., Kerli, S., Kavun, Y., Alver, U. (2024). Synthesis and characterizations of Ce-Doped ZnO thin films for radiation shielding. *Optical Materials*, 148 (5), 114941.
- [13] Ge, C., Xie, C., Cai, S. (2007). Preparation and gas-sensing properties of Ce-doped ZnO thin-film sensors by dip-coating. *Materials Science and Engineering B*, 137 (1-3), 53-58.
- [14] Kasar, C., Sonawane, U., Bange, J., Patil, D.S. (2016). Optical and structural properties of nanoscale undoped and cerium doped ZnO with granular

- morphology. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27 (11) 11885-11889.
- [15] Du, F., Wang, N., Zhang, D., Shen, Y. (2010). Preparation, characterization and infrared emissivity study of Ce-doped ZnO films. *Journal of Rare Earths*, 28 (3), 391-395.
- [16] Yousefi, M., Amiri, M., Azimirad, R., Moshfegh, A.Z. (2011). Enhanced photoelectrochemical activity of Ce doped ZnO nanocomposite thin films under visible light. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 661 (1), 106-112.
- [17] Khanlary, M.R., Hajinorzi, A., Baghshahi, S. (2015). Influence of Ce doping concentration on the structural and optical properties of sol-gel derived ZnO:Ce nanostructures. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 25 (6), 1521-1528.
- [18] Mananga, E.S. (2018). Theoretical perspectives of spin dynamics in solid-state nuclear magnetic resonance and physics. *Journal of Modern Physics*, 09 (08), 1645-1649.
- [19] Callister W.D., Rethwisch D.G. (2009). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. (8. Baskı). United States of America: Wiley
- [20] McKelvey, J.P. (1966). *Solid State and Semiconductor Physics*. Japan. Harper&Row.
- [21] Dikici, M. (2012). *Katıhal Fiziği*. Türkiye: Seçkin Yayıncılık.
- [22] Milnes, A.G., Feucht, D.L. V (1972). *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions*. New York: Academic Press.
- [23] Cressler, J.D. (2017). *Silicon Earth Introduction to Microelectronics and Nanotechnology*. (2. Baskı). United States of America: CRC Press.
- [24] Kasap, S. (2001). *pn Junction Devices and Light Emitting Diodes*. Special Custom Published e-Booklet.
- [25] Sze, S.M., Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices*. (3. Baskı). Hoboken, New Jersey: Wiley
- [26] Tan, S.O. (2018). Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması, *Politeknik Dergisi*, 21 (4), 977-989.
- [27] Sharma, B.L. (1984). *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York: Plenum Press.
- [28] Toygun, S., Konecoglu, G., Kalpaklı, Y. (2013). General principles of sol-gel. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 31 (4), 456-476.
- [29] Gunduz, E. (1999). *Modern Fiziğe Giriş*. (2. Baskı). Türkiye: Ege Üniversitesi Fen Fakültesi.
- [30] Blakemore, J.S. (1985). *Solid State Physics*. (2. Baskı). United Kingdom: Cambridge University Press.

- [31] Cullity, B.D. (1956). *Elements of X-Ray Diffraction*. (2. Baskı). United Kingdom: Addison-Wesley Publishing Company.
- [32] Moon, W.S., Woo, S.I., Park, S.B. (2000). Preparation and characterization of lead zirconate titanate thin films by liquid source misted chemical deposition. *Thin Solid Films*, 359 (1), 77-81.
- [33] Mittemeijer, E.J., Scardi, P. (2004). *Diffraction Analysis of the Microstructure of Materials*. Germany: Springer
- [34] Temel, S., Nebi, M., Peker, D. (2017). Sol-gel döndürerek kaplama tekniği ile saydam iletken ZnO ince filmlerin üretilmesi ve karakterizasyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5 (3), 51-59
- [35] Xin, M. (2022). Crystal structure and optical properties of ZnO:Ce nano film. *Molecules*, 27 (16), 5308.
- [36] Ilıcan, S., Caglar, Y., Caglar, M., Yakuphanoglu, F. (2008). Structural, optical and electrical properties of F-doped ZnO nanorod semiconductor thin films deposited by sol-gel process. *Applied Surface Science*, 255 (5), 2353-2359.
- [37] Wang, Y., Tang, W., Zhang, L. (2015). Crystalline size effects on texture coefficient, electrical and optical properties of sputter-deposited Ga-doped ZnO thin films. *Journal of Material Science and Technology*, 31 (2), 175-181.
- [38] Brown, M. (2009). *Schaum's Outline of Physics for Engineering and Science*. (2. Baskı). United States of America: McGraw-Hill Education.
- [39] Ilıcan, S., Caglar, Y., Caglar, M. (2005). CdZnS ve ZnO yarıiletken filmlerinin yasak enerji aralıkları. *Sakarya University Journal of Science*, 9 (1), 48-54
- [40] Mott, N.F., Gurney, R.W. (1940). *Electronic Processes in Ionic Crystals*. New York: Oxford University Press.
- [41] Pankove, J.I. (1975). *Optical Process in Semiconductors*. New York: Dover Publications, Inc.
- [42] Mott, N.E., Davis, E.A. (2012). *Electronic Process in Non-Crystalline Materials*. Oxford: Oxford University Press.
- [43] Kavun, Y., Kerli, S., Eskalen, H., Kavgacı, M. (2022). Characterization and nuclear shielding performance of Sm doped In₂O₃ thin films. *Radiation Physics and Chemistry*, 194, 110014.
- [44] Soguksu, A.K., Kerli, S., Kavun, Y., Alver, U. (2024). Synthesis and characterizations of Ce-doped ZnO thin films for radiation shielding. *Optical Materials*, 148 (5), 114941.
- [45] Burstein, E. (1954). Anomalous optical absorption limit in InSb. *Physical Review*, 93 (3), 632-633.
- [46] Avci, B., Caglar, Y., Caglar, M. (2019). Controlling of surface morphology of ZnO nanopowders via precursor material and Al doping. *Material Science in Semiconductor Processing*, 99, 149-158.

- [47] Binnig, G., Quate, C.F., Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 56 (9), 930-933.
- [48] Erdin, N. (1986). Tarama elektron mikroskopunun temel prensipleri ve numune hazırlığı. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 36 (2), 102-124.
- [49] Chelouche, A., Touam, T., Tazerout, M., Boudjouan, F., Djouadi, D., Doghmane, A. (2017). Low cerium doping investigation on structural and photoluminescence properties of Sol-gel ZnO thin films. *Journal of Luminescence*, 181 (1), 448-454.
- [50] Ruzgar, S., Caglar, Y., Polat, O., Sobola, D., Caglar, M. (2020). The tuning of electrical performance of Au/(CuO:La)/n-Si photodiode with La doping. *Surfaces and Interfaces*, 21, 100750.
- [51] Oztel, H.O., Akcay, N., Algun, G. (2024). Deep-level transient spectroscopy analysis of interface defects in Ce:ZnO/p-Si heterostructures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35 (18), 1247.
- [52] Satpathy, S.K., Panigrahi, U.K., Biswal, R., Mallick, P. (2022). Investigation on the microstructural, optical and Magnetic Properties of Ce Doped ZnO Nanorods. *Materialia*, 25, 101536.
- [53] Rhoderick, E.H., Williams, R.H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford: Clarendon Press.
- [54] Cetinkara, H.A., Turut, A., Zengin, D.M., Erel, S. (2003). The energy distribution of the interface state density of Pb/p-Si schottky contacts exposed to clean room air. *Applied Surface Science*, 207 (1-4), 190-199.
- [55] Ruzgar, S., Caglar, Y., Polat, O., Sobola, D., Caglar, M. (2022). An investigation of the optoelectrical properties of n-TiO₂ Eu/p-Si heterojunction photodiode. *Surfaces and Interfaces*, 30, 101832.
- [56] Aydogan, S., Cinar, K., Asil, H., Coskun, C., Turut, A. (2009). Electrical characterization of Au/n-ZnO schottky contacts on n-Si. *Journal of Alloys Compounds*, 476 (1-2), 913-918.
- [57] Ahmed, M.A.M., Meyer, W.E., Nel, J.M. (2018). Structural, optical and electrical properties of a schottky diode fabricated on Ce Doped ZnO nanorods grown using a two step chemical bath deposition. *Materials Science Semiconductor Processing*, 87, 187-194.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0001-6346-7335

Ad Soyad : Fatma ÜNÜGÜR SAKARYA

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2021, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik
- 2021, Ar-Ge Araştırmacı, Tanatar Kalıp Pres İşleri San. Ve Tic. Ltd. Şti., Ar-Ge
- 2025, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziği Bilim Dalı, Yüksek Lisans

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan

Bildiriler:

Unugur, F., Celik, E., Caglar, Y., Caglar, M. (2021). Structural, Morphological and Optical Properties of NiO:Li Films by Sol–Gel Spin Coating Method. 8th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation, July 14-16, Elazığ, Türkiye.