



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



Yüksek Lisans Tezi

**RF PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Ti KATKILI ZnO
NANO MALZEMENİN KARAKTERİZASYONU**

Chousein BAIRAM

Fizik Anabilim Dalı

Genel Fizik Programı

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Barış KINACI**

Eylül, 2021

İSTANBUL

Bu çalışma, 1.09.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Genel Fizik Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Barış KINACI(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Musa Mutlu CAN
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Doç. Dr. Yunus ÖZEN
Gazi Üniversitesi
Fen Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

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

Proje Destekleri

Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri

Bairam, C., Yalçın, Y., Efker, H.İ., Çokduygular, E., Çetinkaya, Ç., Kınacı, B., Özçelik, S., 2021, Structural, morphological, optical and electrical properties of the Ti doped-ZnO (TZO) thin film prepared by sputter technique, *Physics B: Condensed Matter*, 616, 413126.

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında bilgisi ve deneyimleri ile her zaman yanımda olan, yol gösteren ve tez çalışmam boyunca gösterdiği her türlü destek, ilgi ve yardımdan dolayı değerli tez danışman hocam Doç. Dr. Barış KINACI'ya en içten dileklerimle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda sundukları imkanlardan dolayı Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi müdürü Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e ve yapılan deneyler sırasında hem verdikleri bilgiler hem de göstermiş oldukları ilgilerinden dolayı merkez çalışanlarına teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Yeşim YALÇIN, Öğr. Gör. Erman ÇOKDUYGULULAR ve Araş. Gör. Çağlar ÇETİNKAYA'ya teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca beni hep destekleyen ve bugünlere gelmeme vesile olan anne ve babama, ayrıca kardeşime ve arkadaşlarıma da her türlü desteklerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2021

Chousein BAIRAM

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	viii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	6
2.1. YARIİLETKENLER.....	6
2.1.1. Yarıiletkenlerde Kusurlar ve Katkı Atomları.....	7
2.1.2. Yarıiletkenlerde Enerji Bantları	7
2.1.3. Yarıiletkenlerde İletkenlik	8
2.2. İNCE FİLM NANO MALZEMELER.....	10
2.3. ÇİNKO OKSİT İNCE FİMLER	14
2.3.1. Çinko Oksitin Yapısal Özellikleri	15
2.3.2. Çinko Oksitin Elektriksel Özellikleri	17
2.3.3. Çinko Oksitin Optik Özellikleri	18
2.3.4. Katkılı Çinko Oksit Yapısı	19
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	22
3.1. TZO NANO MALZEMESİNİN RF PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ.....	22
3.2. TZO NANO MALZEMESİNİN YAPISAL KARAKTERİZASYONU.....	23
3.3. TZO NANO MALZEMESİNİN YÜZEY KARAKTERİZASYONU.....	25
3.4. TZO NANO MALZEMESİNİN OPTİK KARAKTERİZASYONU.....	26
3.5. TZO NANO MALZEMESİNİN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU.....	26

4. BULGULAR.....	28
5. TARTIşMA VE SONUÇ	40
KAYNAKLAR.....	41
EKLER.....	50
ÖZGEÇMİş	50



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Silisyum veya Germanyum'un valans elektronları ve kristal yapısındaki kovalent bağları.....	6
Şekil 2.2: Tek bir kristal kafesin iki boyutlu gösteriminde (a) ikame safsızlık ve (b) dokular arası safsızlık.....	7
Şekil 2.3: N atomdan oluşan bir yapıda, elektron enerjisinin atomlararası mesafeyle değişim eğrisi (bant oluşumu).....	8
Şekil 2.4: (a) Bir kovalent bağın kopmasının iki boyutlu gösterimi ve (b) bir kovalent bağın kırılmasıyla negatif ve pozitif bir yükün oluşması.....	9
Şekil 2.5: İnce film oluşumunun atomik düzeydeki süreçleri.....	11
Şekil 2.6: Farklı yapılardaki çinko oksit (a) Kaya tuzu (b) Çinkoblend (c) Vurtzit.....	16
Şekil 3.1: Püskürtme sistemi çalışma prensibi.....	23
Şekil 3.2: Örgü düzlemlerinden kırınım için gerekli geometrik koşul.....	25
Şekil 4.1: TZO nano malzemesinin (a) XRD deseni, (b) $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ AFM görüntüsü.....	28
Şekil 4.2: TZO nano malzemesinin optik geçirgenlik spektrumları.....	29
Şekil 4.3: Au/TZO/n-Si yapısının 300 K ve 80 K'de ileri ve ters gerilim I - V eğrisi.....	30
Şekil 4.4: 300 K ve 80 K'de Au/TZO/n-Si yapısının $R_s - V$ eğrisi.....	31
Şekil 4.5: Au/TZO/n-Si yapısının 300 K ve 80 K'deki $\frac{dV}{d \ln(I)}$ - I eğrisi.....	32
Şekil 4.6: Au/TZO/n-Si yapısının 300 K ve 80 K'deki $H(I)$ ile I eğrisi.....	33
Şekil 4.7: Au/TZO/n-Si yapısının 0.3, 0.5 ve 1 MHz değerleri için (a) $C - V$ ve (b) $G / \omega - V$ eğrileri.....	34
Şekil 4.8: 0.3, 0.5 ve 1 MHz için gerilime bağlı olarak C ve G değerlerinin 1 V - 8 V arasında değişimi.....	35
Şekil 4.9: (a) 0.3 MHz, (b) 0.5 MHz ve (c) 1 MHz değerleri için C ve G karşılaştırılması.....	36
Şekil 4.10: Au/TZO/n-Si yapısının 0.3, 0.5 ve 1 MHz frekans değerleri için $R_s - V$ eğrileri.....	37
Şekil 4.11: Au/TZO/n-Si yapısının 0.3, 0.5 ve 1 MHz frekans değerleri için $C^{-2} - V$ eğrileri.....	38

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: İnce filmlerin çeşitli uygulama alanları.....	12
Tablo 2.2: Çinko oksitin özellikleri.....	17
Tablo 4.1: Au/TZO/n-Si yapısı için $C^{-2} - V$ eğrilerinden belirlenmiş parametreler	39



SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
a, b	: Latis parametreleri
A_v	: Soğurma
c	: Işık soğuran maddenin konsantrasyonu
C	: Kapasitans
d_{hkl}	: Latis aralığı
E_F	: Fermi enerjisi
E_g	: Bant aralığı
E_m	: Maksimum elektrik alan
G	: İletkenlik
I	: Akım
k_B	: Boltzmann sabiti
n	: Kırınım mertebesi
N_b	: İletim bandındaki birim hacim başına toplam durum sayısı
N_C	: Yarıiletkendeki iletkenlik bandındaki efektif durum yoğunluğu
n_e	: Dik kırılma indisi
n_t	: Düzensiz çinko oksitin tuzak durumlardaki yük taşıyıcı yoğunluğu
n_T	: Toplam tuzak durumları
n_o	: Paralel kırılma indisi
q	: Temel yük
R	: Püskürtme verimi
$r_{ev\ sahibi}$	: Ev sahibi atomun yarıçapı
$r_{katkılanan}$	: Katkılanan atomun yarıçapı
R_i	: Yapı direnci
R_s	: Seri direnç
T	: Sıcaklık
T^0	: Enerjik düzensizlikten sorumlu olan karakteristik sıcaklık
V	: Gerilim
V_0	: Sıfır ön gerilimdeki dahili gerilim
V_D	: Sıfır ön gerilimdeki difüzyon potansiyeli
V_R	: Geri besleme gerilimi
W_D	:Uzay yükü katmanı genişliği

$\Delta\Phi_B$	: Bariyer düşürücü görüntü kuvveti
ϵ_0	: Statik dielektrik sabiti
ϵ_∞	: Yüksek frekans dielektrik sabiti
ϵ_v	: Molar onlu yok olma katsayısı
θ	: Kristale gelen ışın ile kırınıma uğramış ışın arasındaki açı
λ	: Dalga boyu
μ	: Yük taşıyıcıların mobilitesi
μ_b	: Sonsuz sıcaklıkta bant mobilitesi
σ	: İletkenlik
$\sigma_{n,p}$	: Elektron yoğunluğu ve mobiliteye bağlı olarak iletkenlik
Φ_{bo}	: Sıfır gerilimdeki bariyer yüksekliği
ω	: Frekans

Kısaltmalar

Açıklama

TCO	: Geçirgen iletken oksit (Transparent Conducting Oxide)
RF	: Radyo frekansı (Radio Frequency)
XRD	: X-ışını kırınımı (X-Ray diffraction)
UV-VIS	: Mor ötesi – görünür (Ultraviolet Visible)
AFM	: Atomik kütle mikroskobu (Atomic Force Microscopy)
RMS	: Karekök ortalama (Root Mean Square)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RF PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Ti KATKILI ZnO NANO MALZEMENİN KARAKTERİZASYONU

Chousein BAIRAM

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Barış KINACI

Bu tez çalışmasında kapsamında, titanyum katkılı çinko oksit (TZO) nano malzeme yapısı radyo frekansı (RF) püskürtme sistemi ile hem corning cam (CG) hem de n-tipi Si alttaşlar üzerine biriktirildi. TZO nano malzemenin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel karakterizasyonu incelendi.

CG üzerinde biriktirilmiş olan TZO nano malzemenin iyi kristallik, iyi yüzey homojenliği, düşük yüzey pürüzlülüğü ve uygun bir bant aralığına sahip olduğu X-Işını kırınımı (X-Ray Diffractometer, XRD), atomik kütle mikroskopu (Atomic Force Microscopy, AFM) ve morötesi görünür bölge spektrometre (UV-Vis Spectrophotometer, UV-Vis) ölçümlerinden belirlenmiştir.

Elektriksel karakterizasyon için n-Si alttaş üzerine biriktirilen TZO nano malzemesinin fabrikasyonu yapılmıştır. Au/TZO/n-Si yapısının akım – gerilim ($I - V$) karakterizasyonu 80 K ve 300 K’de yapılmıştır. Burada yapının seri direncini (R_s) belirlemek için, Termiyonik Emisyon Teorisi ve Cheung-Cheung metodu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, Au/TZO/n-Si yapısının 0.3, 0.5 ve 1 MHz frekans değerleri için kapasitans-gerilim ($C - V$) ve kondüktans-gerilim ($G/\omega - V$) karakterizasyonu yapılmıştır. $C - V$ ve $G/\omega - V$ eğrilerinden R_s değeri belirlenmiştir. Artan frekans değerine bağlı olarak R_s değerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, $C^{-2} - V$ eğrisinden, sıfır ön gerilimdeki difüzyon potansiyeli V_D , Fermi enerjisi E_F , uzay yükü katmanı genişliği W_D ve $C - V$

ölçümünden elde edilen Schottky bariyer yüksekliği ϕ_{CV} değerleri belirlenmiştir. R_s 'nin aksine bu değerlerin artan frekans değerleri ile arttığı görülmüştür.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen TZO nano malzemesinin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel karakterizasyonu sonucunda optoelektronik uygulamalar için uygun bir malzeme olduğu belirlenmiştir.

Eylül 2021, 64. sayfa.

Anahtar kelimeler: Ti katkılı ZnO, RF püskürtme, yapısal karakterizasyon, optik karakterizasyon, elektriksel karakterizasyon



SUMMARY

M.Sc. THESIS

CHARACTERIZATION OF Ti-DOPED ZnO NANOMATERIAL PRODUCED BY RF SPUTTERING METHOD

Chousein BAIRAM

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Barış KINACI

In this thesis work, Ti doped ZnO (TZO) was prepared with RF magnetron sputtering. TZO nano materials were deposited on both corning glass (CG) and n-type Si substrates. The structural, morphological, optical and electrical properties of the TZO nano material were investigated.

It was determined that TZO nano material deposited on CG has good crystallinity, good surface homogeneity, low surface roughness and a suitable band gap value from X-Ray diffraction (XRD), atomic force microscopy (AFM), as well as UV-Vis analysis.

TZO nano material deposited on n-Si substrates was used for electrical characterization. The current-voltage ($I - V$) characterization of the Au/TZO/n-Si structure was done at 80 K and 300 K. Here, Thermionic Emission Theory and Cheung-Cheung method was used to determine the series resistance (R_s). The obtained results show that they are compatible with each other. In addition, the characterization of capacitance-voltage ($C - V$) and conductance-voltage ($G/\omega - V$) of the Au/TZO/n-Si structure was done for the frequency values of 0.3, 0.5 and 1.0 MHz. The R_s value was determined from the $C - V$ and $G/\omega - V$ curves. It was seen that R_s decreases with increasing frequency. Also the values of diffusion potential at zero bias V_D , Fermi energy E_F , space charge layer width W_D and Schottky barrier height from C-V

measurement ϕ_{CV} , were determined from the $C^{-2} - V$ curve. Contrary to the R_s , these values were found to increase with increasing frequency.

According to the results of the structural, morphological, optical and electrical characterization of the nano material that has been produced in this work, it was determined that this structure is suitable for optoelectronic applications.

September 2021, 64. pages.

Keywords: Ti doped Zn, RF sputtering, structural characterization, optic characterization, electrical characterization



1. GİRİŞ

Bu tez çalışması kapsamında titanyum katkılı çinko oksit (TZO) nano malzemesinin radyo frekansı (RF) püskürtme yöntemi ile üretilmiştir. Bu yapının yapısal ölçümü, yüzey morfolojisi, optik ölçümü ve elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır.

Elektronik ve optoelektronik cihazlar günlük hayatımızın birçok alanında yer edinmiş durumdadır: basit ev aletleri ve multimedya sistemleri, iletişim, bilgisayar ve medikal cihazlar veya güneş hücreleri gibi enerji sektörü dahil bu alanlar bunlardan bazılarıdır. Bu tarz cihazların kullanımlarının sürekli arttığını göz önünde bulundurunca, daha kompakt, güçlü ve mümkün olduğunca daha uygun maliyetli cihazlara olan talep de artmaktadır. Bununla beraber, nanoteknoloji ve ince film nano malzeme yarıiletkenler gibi alanlarda yapılan araştırmaların da artması, bu talebi karşılamaya yardım edebilecek niteliktedir. Bu gibi alanlarda yapılan araştırmalar sonucu elde edinilen bilgi birikimi, birçok farklı alanda kullanılabileceği için de bu çalışmaların sürdürülmesi birçok sektör için oldukça önemlidir. Yukarıda bahsi geçen cihazların genelde yarıiletken tabanlı olduğu göz önünde bulundurulunca, yarıiletkenlerin önemi açıkça ortaya çıkmaktadır. Bu yarıiletkenlerden ince film nano malzeme şeklinde üretilenler birçok farklı kısımdan oluşacak şekilde üretilmektedir. Cihazlardaki bu kısımların en önemli olanlarından biri de hem geçirgen hem de iletken olmalarından dolayı güneş hücreleri, ekranlar vs. gibi uygulamalarda, geçirgen kontaklar olarak kullanılabilen geçirgen iletken oksitlerdir (Transparent Conducting Oxide, TCO) [1]. Tarihteki ilk TCO 1907 yılında Baedeker tarafından, püskürtülmüş Cd filmlerinin termal oksidasyonu ile yapılmıştır ve o zamandan beri çok büyük bir ilgi görmüştür. Artık günümüzde çok iyi bilinen ve optoelektronik endüstrisinde uzun bir süredir yaygınca kullanılan bu TCO'lar, hala birçok araştırma alanının konusu olmaya devam etmektedir [2]. TCO'ların uygulandığı yerler düşünüldüğünde, yaygın bir şekilde düz ekranlarda ön elektrot, düşük emisyonlu pencereler, video görüntü terminallerinde katot ışını tüplerinin elektromanyetik kalkan, arabaların dikiz aynalarında elektrokromik materyal, elektrokromik camlar (diğer adıyla akıllı camlar), fırın camları, dokunmaya duyarlı kontrol panelleri, buzdolabı ve uçaklarda buzlanma önleyici pencere, görünmez güvenlik devreleri, gaz sensörleri, biyosensörler, organik ışın yayan diyotlar (Organic Light Emitting Diode, OLED), polimer ışık yayan diyotlar (Polymer Light Emitting Diode, PLED), antistatik kaplamalar, soğuk ısı aynaları [3], aşınmaya dayalı uygulamalar [4]

ve fotovoltaik cihazlarda ise elektrot, yapısal şablon, difüzyon bariyeri gibi amaçlarla kullanılabilirler [5]. Bunların dışında son zamanlarda bazı yeni uygulama alanları da ortaya çıkmıştır, bunlardan bazıları holografik kayıt ortamı, sensörler ve telekomünikasyon uygulamaları için yüksek kırılma indisli dalga kılavuzu katmanları, tek sefer yazılabilir çok sefer okunabilir hafıza çipleri (Write Once Read Many, WORM)'dir [2]. TCO'larda genel olarak iki yön vardır: bunlardan birisi düşük direnç elde etmektir ve özellikle bazı cihazlarda ekran boyutunun artması gibi artan bir talep olduğu göz önünde bulundurulunca, bu önemli bir noktadır. Diğer önemli bir nokta ise optik geçirgenliktir, bu da örneğin ultraviyole (UV) optoelektronik cihazlarda geçirgen elektrot veya mikro litografide faz değişimi maskelerinin anti statik elektrik katmanı olarak kullanılabilmesi açısından önemlidir [6]. Yeni üretilecek bir TCO'nun elektriksel direnci yaklaşık olarak $1.0 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$ civarında, tipik soğurma katsayısı yakın UV ve görünür bölge için 10^4 cm^{-1} ten küçük, bant aralığı (E_g) ise yaklaşık 3.0 eV civarında olmalıdır. Bu arada, bu istenen özellikler birçok cihaz için aynı olabilmektedir, yani bu özelliklere sahip TCO ince film nano malzemenin üretilmesi, tabi ki cihaza yönelik belirli özelliklerin gereksiniminin yanında, aynı anda birçok cihazın iyileştirilebilmesine katkı sağlayabilir [5]. Yukarıda da bahsedildiği gibi TCO'lar, eşlenik özellikli materyaller olarak düşünülebilecek bir malzeme sınıfından oluşurlar, ki bu özelliklerden biri olan iletkenlik, ikinci bir özelliğe yani kırılma indisinin kayıplı kısmı veya yok olma katsayısına, diğer bir deyişle geçirgenliğe sıkıca bağlıdır. Bu bakımdan, metaller gibi iletkenliği yüksek olan materyaller normalde görünür ışığı geçirmezlerken, oksit camlar gibi oldukça yalıtkan materyaller ise yalıtkan davranış gösterirler. Hem iletken hem de optik olarak geçirgen olan malzemeleri elde etmedeki zorluk, bu özellikleri yönlendiren temel malzeme yapısı ve özellik ilişkilerini anlamaktır. Böylece malzeme elektriksel olarak yeterince iletken hale gelirken şeffaflığı koruyacak şekilde ayrılabilirler ve bu sayede de çeşitli cihazlarda kullanıma uygun duruma gelebilirler [7]. TCO ince film nano malzemelerin kullanışlılığı hem optik hem de elektriksel özelliklerine bağlı olduğundan, her iki parametre de çevresel kararlılık, aşınma direnci, elektron iş fonksiyonu ve uygulamaya uygun olarak belirli bir cihazın alttaş ve diğer bileşenleriyle uyumluluğu ile birlikte düşünülmelidir. TCO'nun özellikleri, kristal veya amorf oksit yapılarındaki katyon metallerinin doğasından, sayısından, atomik düzenlerine, yerleşik morfolojilerinden ve içsel veya kasıtlı olarak eklenen kusurlara kadar çeşitli sebeplerden kaynaklanmaktadır ve bunlara bağlıdır. TCO olarak üretilecek en uygun materyali seçmedeki en önemli unsurlardandır bazıları ise ham maddelerin bulunabilirliği ve biriktirme metotlarının

maliyetleridir [8]. Belirli bir noktaya kadar, zaten çeşitli alanlarda kullanılmalarından da anlaşılabilceği gibi, uygun koşullarda ve istenen özelliklere sahip, TCO üretiminde kullanılabilecek birçok materyalin elde edildiği bildirilmiştir [7].

Şimdiye kadar TCO ince film nano malzemeler çoğunlukla SnO_2 ve In_2O_3 gibi ikili bileşiklerden oluşup kimyasal ve fiziksel biriktirme metotları ile geliştirilmişlerdir. Katkılanmış SnO_2 (Sb- veya F katkılı SnO_2 , örn. SnO_2Sb veya SnO_2F) ve $\text{In}_2\text{O}_3\text{Sn}$ günümüze kadar çokça kullanılmış olanlardandır. Bunlar gibi ikili bileşiklerin yanında Cd_2SnO_4 , CdSnO_3 ve CdIn_2O_4 gibi üçlü yapıda olanları da 1980'lerden önce geliştirilmişlerdir [9, 10] ama bu çeşit TCO filmler pek yaygın kullanılmamıştır. İndiyum kalay oksit (Indium Tin Oxide, ITO) ve katkılı SnO_2 gibi TCO ince film nano malzemelerden daha düşük dirençli olanlarını elde etmek amacıyla ise alternatif TCO materyaller de üretilmiştir [11]. Ayrıca şu ana kadar geçirgen elektrot olarak pratikte en sık kullanılan TCO çeşidi ITO olmasına rağmen, daha az miktarda indiyum içeren veya içermeyen TCO'lar, ITO'nun ana malzemesi olan indiyumun maliyeti ve kıtlığı nedeniyle, son zamanlarda şeffaf elektrot uygulamaları için ikame malzemeler olarak çok dikkat çekmiştir. Bununla beraber eğer ITO, düz panel ekranlar ve güneş hücreleri gibi uygulamalarda kullanımı artmaya devam ederse, yakın gelecekte tükenecektir [12]. Buna karşı en iyi alternatiflerden biri 1980'lerde, ucuz, bol bulunan ve ikili bileşik yapıda geliştirilmiş olan katkılı çinko oksit (ZnO) çeşitleridir [11].

ZnO , birçok yerde kullanışlı olan özellikleri sayesinde, kaçınılmaz olarak farklı alanlarda uygulamaları olan materyallerden biri olmuştur. ZnO bir II-VI grubu, 3.37 eV'luk geniş bir E_g ve oda sıcaklığında 60 eV'luk büyük bir bağlanma enerjisine sahiptir [13]. Çinko elementinin bolluğu ve ZnO 'in düşük maliyeti [14], toksik olmaması ve kimyasal olarak reaksiyona girmeyen halde olması [15] onu daha da ilgi çekici yapmaktadır. Bunların yanında, çok iyi geçirgenliğe [16] ve kararlılığa sahip olması [17] ve esasen düşük altta sıcaklıklarında (<200 °C) iletkenlik özellik göstermesi [18] onun çeşitli alanlar için uygun bir aday olmasını sağlar ve halihazırda LED (Light Emitting Diode), UV (Ultra Violet) fotodedektörler, güneş hücreleri, pH sensörleri, nanolazerler [19-21], esnek cihazlar, ince film transistörler, transparan elektrotlar, spintronikler, biyosensörler, optik hafızalar [22], LCD'ler, dokunmatik paneller, OLED'ler [23-28] gibi alanlarda kullanılmışlardır.

Saf ZnO her ne kadar çok farklı alanlarda kullanışlı olsa da elektriksel, yapısal, optik ve manyetik özelliklerinin geliştirilebilmesi için, ZnO 'in de buna uygun olmasıyla, çeşitli geçiş

metalleri ile (Ti, Cu, Mn, Al, Ga) katkılanabilirler [29-38]. ZnO, titanyum (Ti) ile katkılendiğinde bazı yapısal ve mikro yapısal değişiklikler ortaya çıkar ve böylece bunlar da uygulamalarında performans artışına yol açar. Ti'un diğer elementler ile birleşip farklı alaşımlar oluşturması, Çinko da olduğu gibi, görece kolaydır. Ti^{+4} 0.068 nm iyonik boyuta sahiptir, bu da Zn^{+2} sahip olduğu 0.072 nm iyonik boyutundan birazcık küçüktür [39, 40]. Böylece Ti atomları, ZnO kristal yapısına hiçbir değişiklik veya herhangi bir mikro yapısal kusur yaratmadan katkılanırlar [40]. Bu durum, Ti'un d kabuklarının kısmen dolu olup ev sahibi yarıiletken iyonlarının kolayca yerini alabilmesiyle [41] ve aynı zamanda, kristal yapı içinde katkılananın olabilmesi için ev sahibi ve katkılanan materyallerin iyonik boyutlarının farkının %15'ten az olması gerektiğini belirten Hume-Rothery kurallarıyla açıklanabilir [42].

Ti katkılı ZnO'in elektronik özelliklerinin anahtar karakteristikleri, katkı konsantrasyonu ve dağılımıdır. Ti donör olarak davranıp, ZnO içine katkılanmasıyla ortama iki tane serbest elektron sağlamasından dolayı, bu elektriksel özelliğin gelişmesine sebep olan elektriksel direnç azalır [43], elektriksel özellikler sayesinde de ışık ve gaz tepkisini de değiştirir [44-46]. Ayrıca, Ti'un iki valans elektronuna sahip olmasından dolayı, düşük miktarda bir katkılama bile diğer geçiş metallerine görece yüksek bir iletkenliğe yol açar [47]. Katkılı ve katkısız ZnO üretiminde, ince film nano malzemelerin yapısal ve fiziksel özellikleri büyük ölçüde kullanılan büyütme sistemine bağlıdır [34]. Püskürtme yöntemi, düşük maliyeti, iyi yüzey morfolojisi, kontrol edilebilir büyütme parametreleri ve düşük alttaşı sıcaklığı özellikleri sayesinde en çok tercih edilen yöntemlerden biridir [34,48-54].

Şimdiye kadar, literatürde Ti-katkılı ZnO ile ilgili birkaç çalışma bulunmaktadır [47,55-57]. Liu vd., RF püskürtme yöntemi ile elde edilmiş, farklı Ti kompozisyonlarına sahip Ti katkılı ZnO (TZO) ince film nano malzemelerin kristal yapısı ve optik özellikleri X-Işını difraksiyonu (X-Ray Diffraction, XRD), taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) ve floresan spektrometre analizleri ile belirlendiğini bildirdiler. Rajasekaran vd. [56], katkılama konsantrasyonunun, Ti katkılı ZnO yapısının morfolojik, yapısal ve optik özelliklerine etkisini XRD, SEM ve fotoluminesans (Photoluminescence, PL) ölçümlerini kullanarak bildirdiler. Tseng vd. [57], farklı katkılama konsantrasyonlarındaki Ti-katkılı ZnO nanoparçacıkların optik ve yapısal özelliklerini XRD, SEM, PL ve Raman ölçümleri kullanarak bildirdiler. Sagadevan vd. [47], kimyasal banyo deposisyonu ile sentezlenmiş Ti katkılı ZnO yapısının yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini XRD, Fourier Dönüşümü Kızılötesi

Spektrofotometresi (Fourier Transform Infrared Spektrophotometry, FTIR) ve Fourier Dönüşüm Raman Spektroskopisi (Fourier Transform Raman Spectroscopy, FT-Raman), Transmisyon elektron mikroskobu (TEM), ve Ultraviyole -Görünür (Ultra Violet Visible, UV-Vis) ölçümlerini kullanarak bildirdiler. Fakat literatürde katkılı ZnO yapısının elektriksel karakterizasyonu ile ilgili yeterli çalışma yoktur.

Bütün bunlar göz önünde bulundurularak, bu çalışmanın amacı, TZO yapısının kristal kalitesi, yüzey morfolojisi, geçirgenlik, E_g ve aynı zamanda seri direnci gibi önemli fiziksel parametrelerini detaylıca incelemektir. Kristal kalitesi XRD analizi, yüzey morfolojisi AFM ölçümleri, geçirgenlik spektrumları ve E_g değeri UV-Vis, seri direnci ve elektriksel özellikleri ise sıcaklığa bağlı (80 K ve 300 K) akım-gerilim ($I-V$) ve frekansa bağlı (0.3, 0.5 ve 1 MHz) kapasitans-gerilim ($C-V$) ve kondüktans-gerilim ($G/\omega-V$) ölçümleri ile belirlenmiştir.

Genel kısımlar bölümünde; yarıiletkenler, ince film nano malzemeler, vakum sistemleri ve bu çalışmada kullanılan ZnO hakkında bilgiler ve literatür taraması sunuldu.

Malzeme ve yöntem bölümünde; TZO nano malzemesinin üretiminde ve karakterizasyonunda kullanılan sistemler hakkında bilgiler verildi.

Bulgular bölümünde; TZO nano malzemesinin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel karakterizasyonundan elde edilen sonuçlar verildi.

Tartışma ve Sonuç bölümünde; deneysel verilerden elde edilen bulgular yorumlandı.

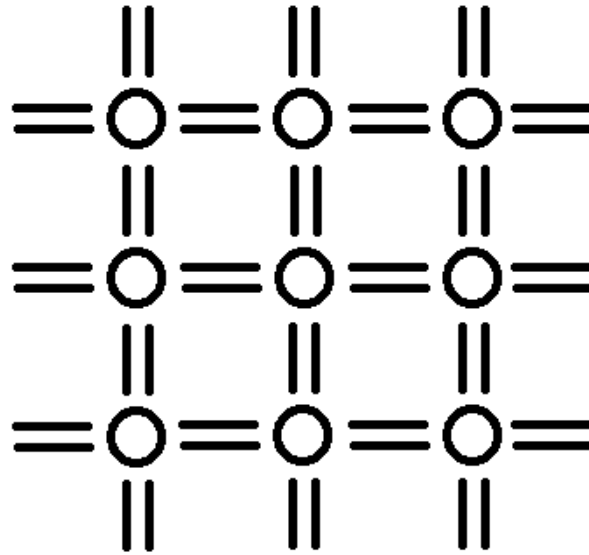
2. GENEL KISIMLAR

2.1 YARIİLETKENLER

Yarıiletkenler, son yüzyılda hayatlarımıza en çok yeniliğin gelmesini sağlayan yeniliklerden biridir. Özellikle transistörlerin elde edilmesiyle başlayan yeni bir çağda, günlük hayatımızda kullandığımız birçok cihaz yarıiletken tabanlıdır.

Genel anlamda bakılacak olursa iki sınıf yarıiletken vardır: periyodik tabloda IV grubunda bulunan elementel olanlar ve III-V grubu veya II-VI grubu elementlerin belirli oranda birleşimiyle oluşan bileşik yarıiletkenler. Elementel yarıiletkenler tek atomdan oluşurlar ve bunlara örnek olarak silisyum (Si) ve germanyum (Ge) verilebilir. İkili yapıda bileşik yarıiletkenler için örnek olarak GaAs ve ZnO gösterilebilir. Bunların haricinde, AlGaAs gibi üçlü yapıda da yarıiletkenler vardır.

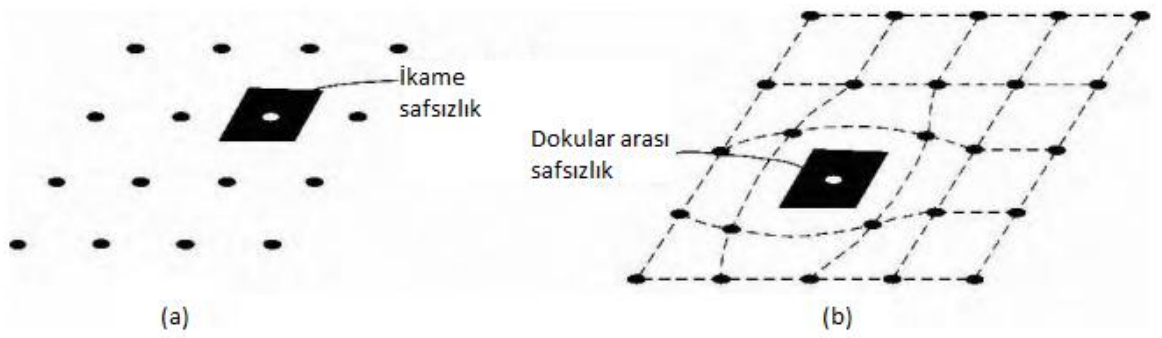
IV grubundaki elementler, Si ve Ge gibi, aralarında kovalent bağ oluştururlar; her bir elementin dört valans elektronu vardır ve her bir atom dört komşusuyla kovalent bağ yapar ki valans enerji kabuğu doldurulsun. Bu bağlardan dolayı Si tetrahedral yapıdadır, ki buradan da görüldüğü gibi atomik bağlar ile kristal yapısı arasında direkt bir ilişki vardır.



Şekil 2.1: $T = 0 \text{ K}$ 'de bir yarıiletkende kovalent bağlanmanın iki boyutlu temsili.

2.1.1 Yarıiletkenlerde Kusurlar ve Katkı Atomları

Bir yarıiletkende yabancı bir atom veya daha doğru adıyla katkı atomu bulunabilir. Bunlar, bir kristal yapısında bulunan atomlardan birinin yerinde yani latis noktalarında (ikame safsızlık) veya bunların arasında bir yerde (dokular arası safsızlık) bulunabilir. Bunlar aslında latis kusurlarıdır ve bazıları istenmiyor olmasına rağmen bazı durumlarda bu tarz safsızlıklar isteniyorlar, çünkü yarıiletkenin belirli özelliklerini, örneğin elektriksel iletkenliğini geliştirirler.



Şekil 2.2: Tek bir kristal kafesin iki boyutlu gösteriminde (a) ikame safsızlık ve (b) dokular arası safsızlık [58].

2.1.2 Yarıiletkenlerde Enerji Bantları

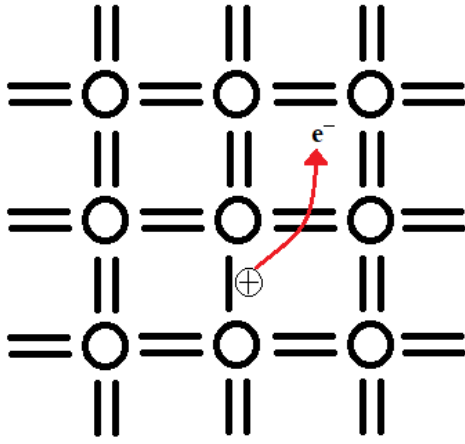
Yarıiletkenlerle çalışırken göz önünde bulundurulması gereken en önemli noktalardan biri onun enerji bantlarıdır. Bunlar bize bir yarıiletken hakkında oldukça önemli bilgiler vermektedir. Bu bantlar izinli ve yasak enerji bantları olarak iki farklı şekilde karşımıza çıkmaktadır.

Belirli bir yapıda, yarıiletken haricinde metal ve yalıtkanlar için de geçerlidir, enerji bantları kavramının nasıl ortaya çıktığını anlamak için öncelikle tek bir elektronu olan bir Hidrojen atomuna baktığımız zaman bu bağlı elektronun enerjisi kuantize yani elektron enerjisinin sadece belirli değerlerinin izinli olduğu ve böylece elektronun sadece belirli enerji seviyelerinde bulunabileceği bilinmektedir. Elektron için radyan yoğunluk fonksiyonu, böyle bir elektronu çekirdekten belirli bir uzaklıkta bulma olasılığını verir ve buradan da elektronun belirli bir yarıçapta lokalize olmadığını gösterir. Bu tek atom için geçerli olan sonucu bir kristale uyarlayıp kuantum mekaniği ve Schrödinger dalga denklemini uygularsak, elektronik enerji

Yarıiletkenlerde elektriksel akımı anlayabilmek için elektronların nasıl davrandıklarının iyice bilinmesi gerekir. Bunun için Si'un kristal yapısına bakılabilir. Si, 4 valans elektronu olan bir yapıdadır ve bu valans elektronlar komşu Si atomlarının elektronlarının valans elektronlarıyla kovalent bağ oluşturur. T = 0 K'de her Si atomu etrafında 8 elektron vardır ve bu elektronların

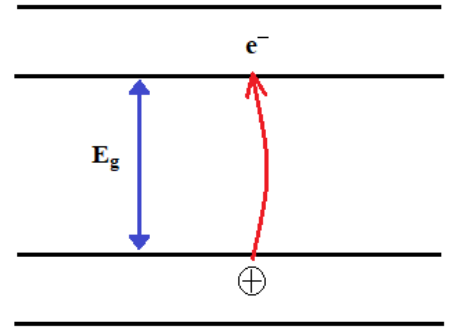
tamamı en düşük enerji seviyelerinde olup hepsi valans bandında, yani bu durumda dolu olan en üst bantta bulunur. Bir üst enerji bandı, iletkenlik bandı tamamen boştur.

Sıcaklık artmaya başladıkça bazı elektronlar, kovalent bağı kırıp bir üst seviye olan iletkenlik bandına geçebilecek kadar enerji almaya başlarlar. Sıcaklık arttıkça daha fazla elektron iletkenlik bandına geçer. Burada elektronların hareketine olanak sağlayacak yeteri kadar boş seviye vardır ve bu durumda bu yarıiletken iletkenliğe sahip olmuş olur.



(a)

İletkenlik bandı



Valans bandı

(b)

Şekil 2.4: (a) Bir kovalent bağı kopmasının iki boyutlu gösterimi ve (b) bir kovalent bağı kırılmasıyla negatif ve pozitif bir yükün oluşması.

Elektronlar iletkenlik bandına geçtikçe, valans bandında boş bıraktıkları yerler pozitif yüklü boşluklar olarak kalır, ki bunlar da akıma katkıda bulunabilen boşluklar olarak adlandırılırlar. Dış bir elektrik alanı uygulandığı zaman, iletkenlik bandındaki elektronların ve valans bandındaki boşlukların, bantlarda hareket edebileceği yeteri kadar boş seviyeler olduğu için bunlar artık hareket edebilirler; elektronlar uygulanan elektrik akımının tersine, boşluklar ise bu elektrik alanının doğrultusunda hareket edip net bir elektrik akımı oluştururlar. Böylece belirli bir sıcaklıkta, ki bu oda sıcaklığı da olabilir, yarıiletkenler iletkenlik kazanmış olurlar.

Bunlar göz önünde bulundurularak; enerji bantları tamamen dolu ya da tamamen boş olan malzemeler yalıtkan olduğu söylenebilir. Yalıtkanlarda E_g 3.5-6 eV civarındadır. Bu durumda da oda sıcaklığında bu E_g aşıp iletkenlik bandına elektronlar geçemediği için yalıtkanlarda iletkenlik neredeyse yoktur, ama dirençleri oldukça yüksektir.

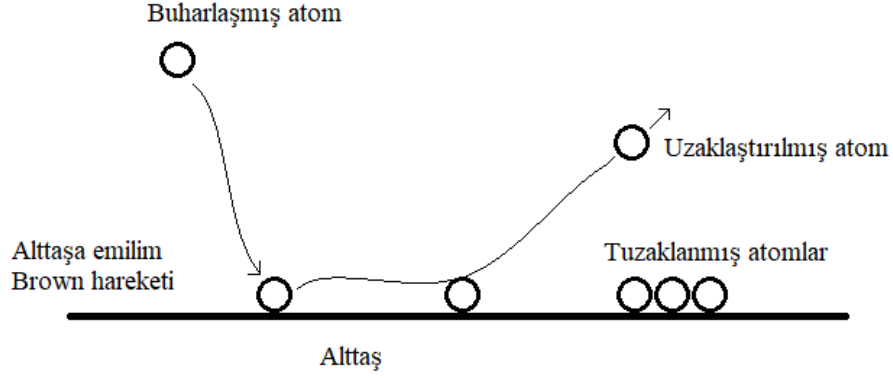
Metallerin enerji bantlarına bakıldığı zaman ise, birinci durumda iletkenlik bandı kısmen elektron doludur, bu da yüksek bir iletkenlik sağlar. İkinci durumda ise izinli ve yasak bantlar iç içe geçmiştir ve bu durumda da hem yüksek sayıda elektron hem de bu elektronların hareket edebileceği bol sayıda seviyeler olduğu için bu durumda da yüksek bir iletkenlik sağlanır [58].

2.2 İNCE FİLM NANO MALZEMELER

Bir ince film nano malzeme, fiziksel veya kimyasal bir işlemle buharların, iyonların veya moleküllerin kontrollü bir şekilde yoğunlaştırılmasıyla destekleyici bir malzeme (alttaş) üzerinde biriken, 10 nm ile 1-2 nm kadarlık çok ince bir tabaka olarak tanımlanabilir.

İnce filmlerin çok geniş bir uygulama alanı olduğu göz ardı edilemez bir gerçektir. Birçok alanda çok önemli oldukları gibi optoelektronik cihazlarda da sıkça kullanılmaktadırlar. Yarıiletkenlerde katmanlar şeklinde biriktirilebilen bu filmler farklı çeşitlerde, farklı fonksiyonlarda kullanılmaktadırlar. Yarıiletkenlerde birçok katman ince film şeklinde büyütülür, bunlardan biri de örneğin TCO ince film nano malzemelerdir. Bunların da kullanımı özellikle son yıllarda çokça ilgi görmüştür çünkü geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örneğin dokunmatik ekranlar, güneş pilleri, LCD ekranlar, LED'ler bunlardan en önde gelenleridir. İnce film teknolojisi, yarıiletken bir materyalin bir alttaş üzerine çok ince katmanlar şeklinde (birkaç nm'den birkaç Angstrom'a kadar) biriktirilmesi işlemidir. Bu şekilde büyütülen filmler yeni mekanik, optik, kimyasal ve elektriksel özellikler gösterirler, ki aslında bunun sebebi de yüzey ve kuantum sınırlama etkileridir [59].

İnce film teknolojisi eski bir teknoloji olmasına rağmen günümüzde materyal teknolojisi alanında hala önemli bir rol oynamaktadır. İnce film büyütme, materyal atomlarının bir alttaş üzerine biriktirilmesi ile yapılır. Temel olarak biriktirme işlemi; filmi oluşturan parçacıkların hazırlanması, kaynaktan alttaşa aktarılması ve bu parçacıkların alttaşa emilmesidir. Şekil olarak bir filmin alttaş üzerinde birikmesi süreci şöyle gösterilebilir;



Şekil 2.5: İnce film oluşumunun atomik düzeydeki süreçleri [58].

İnce film büyütmenin gösterdiği özellikler şunlardır;

- Her materyalin ince film nano malzeme olarak oluşmaya başlaması rastgele çekirdeklenme ile başlar ve bunu takip eden süreçler çekirdeklenme ve büyüme aşamalarıdır.
- Çekirdeklenme ve büyüme aşamaları çeşitli biriktirme koşuluna bağlıdır, örneğin büyütme sıcaklığı, büyütme hızı, alttas yüzey kimyası.
- Çekirdeklenme aşaması dışsal araçlar ile kontrol edilebilir, mesela elektron veya iyon bombardımanı.
- Film mikro yapısı, ilgili kusur yapısı ve film gerilimi, çekirdeklenme aşamasındaki biriktirme koşullarına bağlıdır.
- İnce filmlerin kristal fazı ve kristal yönelimi biriktirme koşullarına tabidir [60].

İnce filmlerin kimyasal kompozisyonu, yapısal özellikleri, film kalınlığı gibi temel özellikleri biriktirme koşulları ile kontrol edilebilir. İnce filmler bu sayede külçe hallerindeki materyallerinin gösteremeyeceği benzersiz özellikleri kazanabilirler, bunlar;

- Alttas üzerindeki atomik büyüme sürecinden kaynaklanan malzeme özellikleri.
- Kalınlık, kristal oryantasyonu ve çok katmanlı özelliklerle karakterize edilen kuantum boyut etkilerini içeren boyut etkileri.

İnce film büyütme işleminin sonuçlarından biri de çözünürlük gevşemesidir. Biriktirme esnasındaki atomik büyüme süreci, filmleri katkılama ve alaşım oluşturma izin verir. İnce

filmler bireysel atomik, moleküler veya iyonik türlerden oluşur. Bunların buhar fazında herhangi bir kısıtlamaları söz konusu olmadığı için, farklı materyaller arasındaki çözünürlük koşulları oldukça rahattır. Bu durum, alaşımlar ve bileşikler gibi çok bileşenli malzemelerin geniş bir bileşim yelpazesinde hazırlanmasını mümkün kılmaktadır. Böylece, istenen özelliklere sahip özel yapım malzemeler üretmek mümkündür [60].

İnce film teknolojisi çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu alanlardan bazıları Tablo 2.1’de verilmiştir;

Tablo 2.1: İnce filmlerin çeşitli uygulama alanları [59].

Mühendislik ve İşleme	Aşınmayı, korozyonu ve erozyonu azaltmak için koruyucu katmanlar ve düşük sürtünmeli kaplamalar, Yüksek sıcaklıkta korozyon, Yüksek sıcaklıkta korozyon, Yüzey pasivasyonu, Dekoratif kaplamalar, Katalitik kaplamalar.
Optoelektronik	Fotodedektörler, LCD, İnce film tranzistör (Thin Film Transistor, TFT), Optik hafızalar, LED
Optik	Entegre optik, Yansıma önleyici ve yüksek yansıtıcı kaplamalar (lazer aynalar, girişim filtreleri, aynalar), Işın ayırıcı, İnce film polarizör
Elektronik	Aktif ince film elemanları (diyot, transistör), Pasif ince film elemanları (ara bağlantılar), dirençler, kondansatörler); Çok büyük ölçekli entegre devreler (Very Large Scale Integration, VLSI)
Kriyoteknik	Süperiletken ince filmler, Anahtarlar, Hafızalar
Sensörler	Gaz sensörleri, Biyosensörler

İnce film teknolojisi gündelik hayatlarımızda birçok alanda önemli bir yer kaplamaktadır. Bu nedenle, ince film nano malzeme teknolojisini sürekli geliştirmenin ve mümkün olduğunca verimli bir şekilde üretmenin çeşitli yöntemleri geliştirilmiştir.

İnce film biriktirme yöntemleri genel olarak iki kategoriye ayrılabilirken, vakum bazlı yöntemler de kendi arasında kimyasal ve fiziksel buhar biriktirme olmak üzere genel olarak ikiye ayrılabilir;

Vakum bazlı yöntemler:

Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD);

- Plazma destekli CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)
- Düşük basınç CVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD)
- Metal organik CVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)

Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition, PVD);

- Püskürtme
- Termal buharlaştırma
- Elektron ışın buharlaştırma
- Darbeli lazer biriktirme
- Moleküler ışın epitaksi
- Atomik katman biriktirme

Solüsyon bazlı yöntemler

- Baskı
- Elektrot biriktirme
- Spin kaplama
- Koloidal sentez
- Katman katman sentez [61]

Bütün bu film biriktirme yöntemleri arasından en önemli ve en çok kullanılanlarının başında genel olarak buharlaştırma ve püskürtme yöntemleri gelmektedir. Bu yöntemlerin amacı kontrollü bir şekilde atomları bir kaynaktan altaşa iletmektir ve böylece filmin büyümesini atom atom yapmaktır. Buharlaştırmada atomlar kaynaktan termal yöntemlerle ayrıştırılıp altaşa taşınırken, püskürtmede atomları kaynaktan çıkartmak için gaz iyonların kullanılır. PVD

ve CVD hem buharlaştırma hem de püskürtmeyi içinde barındırmakla birlikte, farklı versiyonları ile en çok kullanılan yöntemler arasındadır [62].

PVD ile CVD arasındaki farkları belirleyen bazı noktalar şunlardır;

- Katı veya erimiş kaynakları bağlılık
- Kaynak atomlarının gaz fazına girmedeki fiziksel mekanizmalar
- Gaz türlerinin taşındığı, basıncı azaltılmış ortamlar
- Alttaş yüzeyindeki ve gaz fazındaki kimyasal reaksiyonların olmaması (reaktif PVD hariç)

CVD; biriktirilecek bir malzemenin uçucu bir bileşiğini diğer gazlarla kimyasal olarak reaksiyona girmesini sağlayıp bu şekilde film birikiminin oluşmasını sağlayan bir yöntemdir [62].

PVD ise, alttaş üzerine biriktirilecek buhar parçacıklarının fiziksel yollarla kaynaktan çıkarılmasını sağlayıp, bir vakum ortamına aktarılması şeklinde olan bütün yöntemleri içermektedir. Büyük alttaşlara geniş bir çeşitlilikte malzeme büyütme için basit ve güçlü bir yöntemdir. PVD'yi daha detaylı olacak şekilde iki ana kategoriye ayırabiliriz. Bunlardan birisi buharlaştırma, diğeri ise püskürtmedir. Buharlaştırma; termal, elektron ışını, iyon kaplama, lazer ablasyon ve moleküler ışın epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) yöntemlerini, püskürtme ise direkt akım, radyo frekansı, magnetron, reaktif ve bias yöntemlerini içermektedir. Bu tez kapsamında büyütülen örnekler için RF püskürtme kullanılmıştır. Hem buharlaştırma hem de püskürtme yöntemleri tipik olarak mikron altı tane boyutuna sahip polikristal filmler elde edilmesini sağlar. Bahsedilen bu biriktirme yöntemleri sayesinde, 1 nm'den bile daha düşük kalınlıklardan başlayıp 10 mm civarı kalınlıklara kadar çok geniş bir aralıkta biriktirme yapmak mümkündür [63].

2.3 ÇİNKO OKSİT

Birçok farklı uygulama alanı için farklı şekillerde ve birçok değişik yöntemlerle ince film nano malzeme biriktirme yapılmaktadır. İnce filmler, birçok yarıiletken TCO olarak kullanılmak

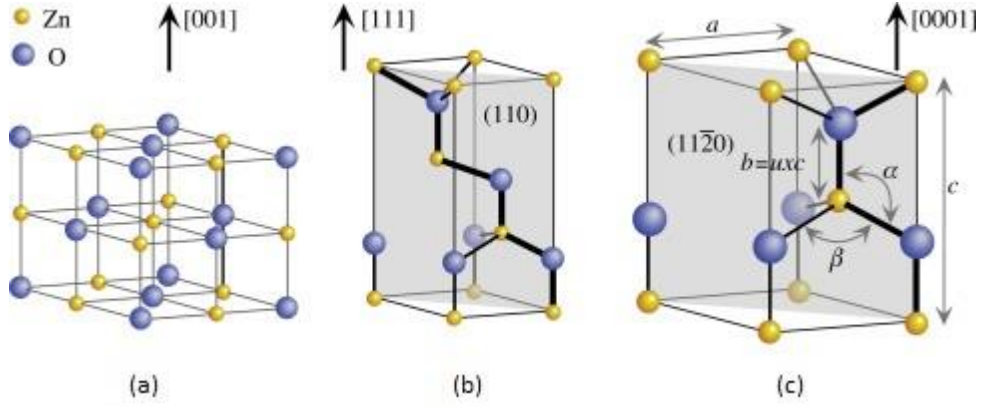
için de çok uygundurlar ve şimdiye kadar TCO olarak kullanılmak üzere çeşitli materyaller kullanılmıştır.

Günümüzde TCO olarak kullanılan en önemli materyallerden biri ZnO'tir. ZnO de diğer TCO çeşitleri gibi birçok farklı alanda kullanılmıştır. Bunlardan en önde gelenler elektronik, optoelektronik, biyomedikal ve algılama alanlarıdır. Bunun bu kadar farklı alanda kullanılmasının sebeplerinden biri 60 meV gibi büyük bir eksiton enerjisine sahip olmasıdır. Bu özelliği ZnO'in UV spektral bölgesinde etkili bir ışık yayıcı olmasına sebep olduğu için optoelektronik uygulamalar için çok uygun bir seçenek olduğu anlamına gelmektedir. Bunun dışında yüksek iletkenlik ve geçirgenliği ZnO'in birçok farklı cihaz için uygun bir aday olmasına sebep olmaktadır [59].

ZnO'e olan talep büyüyen artmaktadır. Çünkü çok iyi optik, elektriksel, manyetik, piezoelektrik, katalitik ve gaz algılama özelliklerine sahiptir ve bunlardan dolayı özellikle nanoelektronik, optoelektronik, nanofotonik ve piezoelektrik cihazlar için gayet ilgi çekicidir [64,65]. Farklı nanoyapılar, örneğin nanorodlar, nanoteller, nanotüpler ve nanoribonlar [66,67] çeşitli yüzeylerde biriktirilebilir, bunun için de RF püskürtme, termal buharlaştırma veya sol-jel gibi geleneksel yöntemler kullanılabilir [68]. Büyük tek kristalli ZnO'in uygunluğu göz önünde bulundurularak, çok az kusurlu epitaksiyel filmler elde edilebilir. Bu sayede de çok yüksek performanslı elektronik ve optoelektronik cihazlar üretilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca biriktirme sonrası, tavlama, yüzey işlemleri ve alüminyum, galyum indiyum, kalay, bakır ve Ti gibi malzemeler ile katkılama gibi işlemlerle ZnO'in elektrik ve optik özellikleri ayarlanabilir [69-73].

2.3.1 Çinko Oksitin Yapısal Özellikleri

ZnO kristal yapısında, çinko ve oksijen tetrahedral bir geometride bulunurlar, her çinko atomu dört oksijen atomu tarafından çevrelenmiştir veya tam tersi yapıdadır. ZnO üç farklı kristal yapıda bulunabilir; bunlar vurtzit, çinkoblend ve kaya tuzu yapılarıdır.



Şekil 2.6: Farklı yapılarıdaki çinko oksit (a) Kaya tuzu (b) Çinkoblend (c) Vurtzit [74].

Çevre koşullarında ZnO vurtzit halinde bulunmaktadır, en stabil ve kararlı bileşik durumu budur [75]. Bu yapı için a ve b latis parametreleri eşittir ve 3.2475–3.5201 Å aralığındayken c ise 5.2042–5.2075 Å civarındadır. Sabit bir çinkoblend fazı elde etmek için ZnO’i kübik alttaş üzerine büyötmek gerekmektedir. Kaya tuzu yapısını elde etmek için ise vurtzit yapısına çok yüksek basınç uygulamak gerekmektedir. Kristal içerisinde çinko ve oksijen arasındaki bağ çok güçlü bir iyonik bağ şeklindedir, bundan dolayı ZnO’in iyonik ile kovalent arasında bir bileşik olarak sınıflandırılır [13].

ZnO II-VI grubu bir yarıiletkenidir ve yapısı itibariyle kendiliğinden n tipidir [76]. Bunun yanında bazı önemli fiziksel özellikleri yüksek bir termal kararlılık, ki erime sıcaklığının 1975 °C olması yüksek bir termal kararlılığa sahip olduğunu gösterir, yüksek geçirgenlik ve 3.4 eV’luk direkt E_g , $1-2 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ civarında düşük direnç, 60 meV’lik yüksek bağlanma enerjisi olarak verilebilir [75].

Bunlar haricinde ZnO’in birçok cihaz için uygun olmasına sebep olan temel özellikleri Tablo 2.2’de özetlenmiştir;

Tablo 2.2: Çinko oksitin özellikleri [77].

Parametreler	Değer
Bant aralığı	3.4 eV (direkt bant aralığı)
Yoğunluk	5.606 g cm ⁻³
Kristal yapılar	Vurtzit, kaya tuzu, çinkoblend
300 K'de kararlı faz	Vurtzit
Görünüm	Amorf beyaz veya sarımtırak beyaz toz
Erime noktası	1975°C
Koku	Kokusuz
Oksitin doğası	Amfoterik oksit
300 K'de latis sabitleri	a ₀ : 0.32495 nm, c ₀ : 0.52069 nm
Bağıl dielektrik sabiti	8.66
Kırılma indisi	2.0041
Sudaki çözünürlük	0.16 mg 100 ml ⁻¹
İçsel taşıyıcı konsantrasyonu	1016 - 1020 cm ⁻³
Kırılma gerilimi	5.0 × 106 V cm ⁻¹
Elektron etkin kütlesi	0.24 m ₀
Eksiton bağlanma enerjisi	60 meV
300 K'de elektron Hall mobilitesi	200 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
300 K'de boşluk Hall mobilitesi	5–50 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
İyoniklik	%62
Taşıyıcı konsantrasyonu	Maksimum p-tipi katkılama ~10 ¹⁷ cm ⁻³ ; Maksimum n-tipi katkılama ~10 ²⁰ cm ⁻³

2.3.2 Çinko Oksitin Elektriksel Özellikleri

İnce film yarıiletkenlerde iletkenlik genel olarak taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilitesine bağlıdır. İletkenlik, mobilite ve taşıyıcı yoğunluğu arasındaki bağıntı şu şekilde verilebilir;

$$\sigma_{n,p} = nq\mu \quad (2.1)$$

Bu denklemde n iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu, p valans bandındaki boşluk yoğunluğu, q elektronun yükü, μ ise yük taşıyıcıların mobilitesidir. Yük yoğunluğu ve mobilite

kusurlara önemli derecede bağlıdır. Düzensiz, kusur içeren bir çinko için 2011'de Toricelli ve ark. ZnO'te yük taşıma mekanizması için yeni bir model önerdiler. Bu modele göre iletkenlik şu iki formülle açıklanabilir;

$$\sigma = \sigma_0 \left[\frac{T^0 \sin\left(\frac{T}{T^0\pi}\right)}{N_t \pi} \right]^{\frac{T^0}{T}} n_t \frac{T^0}{T} \quad (2.2)$$

$$\sigma_0 = qN_b\mu_b \quad (2.3)$$

Burada μ_b sonsuz sıcaklıkta bant mobilitesi, N_b iletim bandındaki birim hacim başına toplam durumlar, T^0 enerjik düzensizlikten sorumlu olan karakteristik sıcaklık, N_t toplam tuzak durumları, n_t ise düzensiz ZnO'teki tuzak durumlardaki yük taşıyıcı yoğunluğu olup, n_t 'nin iletim bandındaki yük yoğunluğu n 'den çok daha büyük olduğu varsayılmıştır, bu durumda toplam taşıyıcı yoğunluğu yaklaşık olarak aşağıdaki gibi olur;

$$n_T = n + n_t \sim n_t \quad (2.4)$$

ZnO'teki kusurlar ve dolayısıyla taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitesi biriktirme yöntemi ve biriktirme koşullarına çok önemli derecede bağlıdır. ZnO için elektron yoğunluğu ve mobilitesi sırasıyla $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ve $20 \sim 400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ aralıklarında bulunmuştur [68, 73, 78-80].

2.3.3 Çinko Oksitin Optik Özellikleri

ZnO ince film nano malzemelerin optik özelliğini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak ince film nano malzemenin tavlama sıcaklığı, ince filmin nano malzemenin hazırlanma metodu, kullanılan alttaşlar ve ince film nano malzemelerin kalınlığı gibi faktörler daha önce bahsedildiği gibi yapısal özelliklerini etkilediği gibi kaçınılmaz bir şekilde optik özelliklerini de etkilemektedir [81].

ZnO'nin optik özelliklerine bakıldığı zaman, ağırlıklı olarak enerji bantlarından ve latif dinamiklerinden etkilendikleri görülmektedir. Bir malzemenin optik olarak değerlendirebilmek için bilinmesi gereken en önemli özellikler kırılma indisi ve dielektrik sabiti olduğu söylenebilir. Bunları bulabilmek için şimdiye kadar kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bütün bu ölçümler daha önce spektroskopik elipsometri ile yapılmıştır. Vurtzit yapıdaki ZnO için kırılma indisi $n_o = 2.008$ ve $n_e = 2.029$ olarak elde edilmiştir.

ZnO yüksek kırılma indisine (2.008) sahip olduğu için, bunun yanında direkt E_g ve görece yüksek eksiton enerjisine de sahip olmasından dolayı oda sıcaklığı ve üzerinde eksiton rekombinasyonu mümkündür. Bundan dolayı da ZnO görece dengeli bir ışık yayıcıdır. Eksitonik süreçten dolayı, UV bölgesinde (380 nm) ZnO'in emisyon yaptığı gözlemlenmiştir. Fakat, daha düşük enerji durumlarının içsel kusurlarından dolayı mor, mavi ve yeşil ışık emisyonları da gözlemlenmiştir [82-84]. Böylece ZnO fosfor uygulamaları için de uygundur [85]. Optik pompalama altında uyarılmış emisyon da ZnO'ten gözlemlenmiştir. Bu olay eksitonik-eksitonik saçılma veya yayılma sebebiyle olabilir [86, 87]. ZnO nanotellerinden elektrikle pompalanan lazerleme de elde edilebilmiştir. Kısacası, ZnO bu optik özelliklerinden dolayı optik yayıcı cihaz olarak kullanılması uygundur [88-90].

2.3.4 Katkılı Çinko Oksit Yapısı

ZnO saf olarak birçok iyi özelliğe sahiptir ve çok ilgi çekici bir materyal olmasına rağmen bazı özelliklerini geliştirmek ve çeşitli uygulama alanları için daha da uygulanabilir olmasını sağlamak için katkılanması sıkça yapılan bir işlemdir. Katkılama yapmak, saf ZnO'te yapısal ve mikroyapısal modifikasyonlar oluşturur ve bu da beraberinde materyalin özelliklerinin geliştirilmesini getirir [21].

En temel olarak artırılması istenen özelliklerin başında iletkenlik gelmektedir. Saf ZnO'in iletkenliği, onun n-tipi olmasının da sebebi olan, latis yapısındaki içsel kusurlardan kaynaklanmakta olup bunların en ciddi olanları oksijen boşlukları, yani oksijen atomu olması gereken yerde bunların eksik olmaları, diğeri ise çinko ara atomlarıdır, yani boşluk olması gereken yerlerde fazladan çinko atomu bulunmasıdır [91]. Böyle bir yapıya belirli katkı / safsızlık atomları ekleyerek yani katkılama yaparak iletkenlik artırılabilir [92]. Bununla beraber, saf haldeki ZnO yüksek sıcaklıklarda elektriksel ve kimyasal olarak yeterince kararlı değildir ama katkılama yaptıktan sonra bu durum da giderilebilir [93]. ZnO'i katkılamanın diğeri bir getirisi de yük taşıyıcılarını durdurmak suretiyle onların rekombinasyonlarını azaltmaktır ki bu da bazı uygulamalar için oldukça önemli bir durumdur [94].

ZnO'i katkılamanın oldukça fazla avantajları vardır, bu yüzden de uzun yıllar boyunca farklı grup safsızlık atomları ile katkılama işlemi yapılmıştır ve hala da yapılmaya devam etmektedir. Grup II elementlerinden Mg ve Cd, Zn ile katı solüsyonlar oluşturmaktadır ve potansiyel bant aralıkları 2-8 eV aralığında değişmektedir. MgZnO ve CdZnO ile çoklu yapıda ZnO halihazırda

yapılmıştır ve gelecek vaat ettiği söylenebilir. Grup III elementlerinden B, Al, Ga ve In iyi bilinen donör dopantlarından ve her biri 10^{20} cm^{-3} civarından daha büyük bir aralıkta taşıyıcı yoğunluğu üretebilir. Grup IV elementlerinin C ve Si için optik ve elektriksel aktivitesi hakkında fazla bir şey bilinmiyor. Bu grup elementlerden Ti hakkında daha fazla çalışma yapılmıştır. Bu tez kapsamında incelenen örnekler de Ti katkılı ZnO olduğu için buna ayrıca değinilecektir. Grup V elementlerinden N, P, As ve Sb p-tipi ZnO için uygun olabilirler. Bunlardan N oldukça iyi bir akseptör katkısıdır, çünkü elektronik çekirdeği ve iyonik çapı O'inkine benzer ve O'in yerine geçmek için uygundur. Hali hazırda N katkılı ZnO için 10^{20} cm^{-3} gibi bir taşıyıcı yoğunluğu değeri ölçülmüştür. Grup VI elementlerinden Zn-VI üçlü bileşiklerden bazıları detaylıca çalışılmıştır mesela $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ gibi ama $\text{ZnVI}_x\text{O}_{1-x}$ gibi bileşikler hakkında oldukça az rapor vardır. Grup VII elementlerinden F, Cl, Br ve I, ZnO yapısındaki O'nin yerine geçip donör olarak davranabilirler. Halihazırda, kimyasal sprey teknikleri ile F katkılanan ZnO filmlerdeki direnci ciddi oranda azalttığı yapılan bazı çalışmalar ile gösterilmiştir. Bunun haricinde bu konuda yapılan pek fazla yeni çalışma literatürde mevcut değildir [25].

Katkılama işlemi yapmak için kullanılacak safsızlık atomlarını seçerken dikkat edilecek en önemli noktalardan biri, serbest elektron oluşturmak ve n-tipi iletkenliği arttırmak için katkılanan safsızlık atomlarının ev sahibi iyonlardan daha küçük veya eşit çapta olmaları ve aynı zamanda bu iyonlara göre katkı atomlarının fazladan elektrona sahip olması gerekmektedir [95]. Örnek vermek gerekirse, katkılanan safsızlık atomlarından bazıları olan Ga'un iyonik çapı 0.062 nm [96], Mn'ın 0.066 nm, Ti'un 0.068 nm iken, katkılanan yapıdaki ev sahibi iyonu yani Zn'un iyonik çapı 0.072 nm'dir [97]. Bu durum katkılama için en önemli şartların başında gelmesinin haricinde aynı zamanda daha az kristal kusurları anlamına da gelmektedir, çünkü böyle bir durumda örgü gerilimi daha az olmaktadır ve bununla beraber yüksek elektrokimyasal dengeye de yol açar [96]. Görüldüğü gibi ZnO katkılanmak için elimizde farklı seçenekler mevcuttur. Bu tez kapsamında karakterizasyonu yapılan örnekler Ti ile katkılanmıştır. Ti çinko içine kolayca yerleşebilmesinin sebeplerinden bir kısmı dolulukta d kabuklarına sahip olmasıdır ve böylece ev sahibi yarıiletkeninin iyonlarının yerine kolayca geçebilmektedir. Ayrıca Ti, yukarıda da bahsedilen şartlara tamamı ile uymaktadır. Hem iyonik hem kovalent çapları (0.068 nm ve 0.136 nm) çinkonunkine (0.072 nm ve 0.131 nm) en yakın olanlarıdır [36]. Bu şekilde Ti'un iyonik boyutunun çinkonun iyonik boyutundan daha küçük olması, Ti'un yapı içerisine kolayca yerleştikten sonra bu yapıda herhangi bir yapısal değişiklik veya mikro yapısal kusur

oluşumuna sebebiyet vermemesine neden olur [21]. Bu olay Hume-Rothery kuralları ile açıklanabilir. Bu kurallara göre, Ti'un ZnO yapısı içine yerleşip katı bir solüsyon oluşturabilmesi için, katkı atomu ile ev sahibi iyonların iyonik çaplarının farkları %15'ten daha az olması gereklidir, diğer bir deyişle [98];

$$\% fark = \left(\frac{r_{katkılanan} - r_{ev sahibi}}{r_{ev sahibi}} \right) \times 100 \leq \% 15 \quad (2.5)$$

Ti bu şartı sağladığı gibi gerekli olan diğer bir şartı da sağlar, yani katkılıandığında yapı içerisinde donör olarak davranıp iki serbest elektron sağlar ve bunun sayesinde de istenen etkiyi gösterir, yani başta iletkenlik artışı ve bununla gelen diğer özelliklerin geliştirilmesi [36].

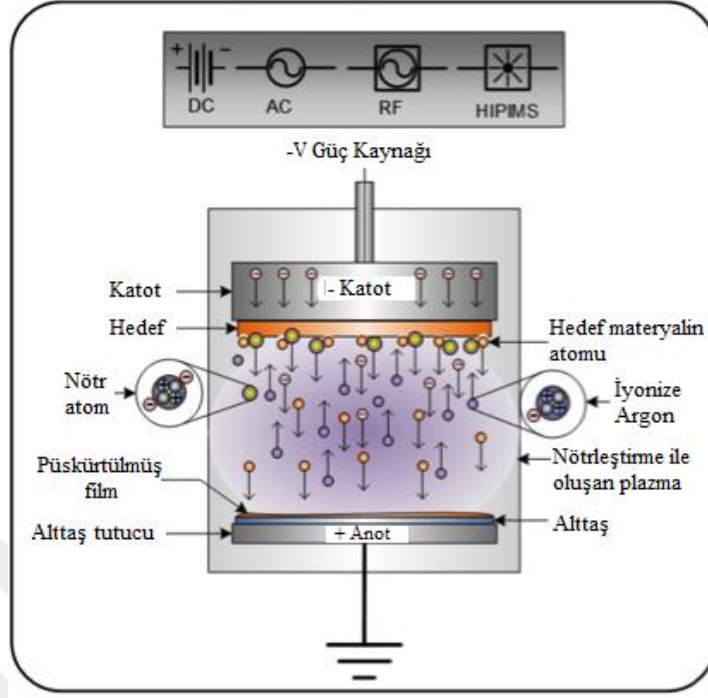
ZnO'te Ti katkılamanın pek çok etkisi söz konusudur. Öncelikle, daha önce de bahsedildiği gibi, elektriksel özelliğini artırır. Çünkü Ti'dan gelen fazladan serbest elektronlar elektriksel direnci azalttığı gibi iletkenliği de artırır [99]. Ti'un fazladan iki serbest elektron sağlaması aynı zamanda, yüksek derecede iletkenlik elde etmek için daha düşük bir konsantrasyonda katkılama yapmanın yeterli olmasını sağlamaktadır ki bu da maliyet açısından önemlidir [47]. Bu durumun bir diğer artısı da elektriksel özelliklerin gelişmesinden dolayı yapının gaz tepkisi de artmakta, direncin azalması genel olarak daha fazla sensör tepkisine sebep olmaktadır [100]. Bunun dışında Ti safsızlık atomlarının eklenmesi örneklerin kristal boyutlarını azaltıp ilgili örneklerin spesifik yüzey alanlarını geliştirebilir. Katkı atomu eklenmesi ayrıca ZnO'in iletkenlik bandının altında ek bir enerji seviyesi oluşumunu sağlayıp elektron ve boşlukların rekombinasyonunu önler [101]. Ti katkılamanın diğer bir getirisi de cihaz kapasitansını artırması ve ortamdaki neme olan reaktiviteyi azaltmasıdır. Kimyasal olarak stabil bir materyal olması da onu biyokimyasal olarak algılama için uygun yapmaktadır [102]. Yalnız, Ti ile katkılama yaparken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri Ti miktarıdır, çünkü Ti gereğinden fazla olursa yapı içerisinde atomlar arası bölgelere yerleşip istediğimiz özellikleri elde etmemizi engelleyebilir [103].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 TZO NANO MALZEMESİNİN RF PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ

Bir katı veya sıvı herhangi bir sıcaklıkta yeterince yüksek enerjili atomik parçacıklar tarafından bombardımana uğrarsa, kaynak materyalin yüzeyindeki bazı atomlar yeteri kadar enerjiye sahip bulundukları yüzeyden çıkarılabilirler. Atomların bu şekilde yüzeyden çıkarılmasına püskürtme denir. Bu atomları daha sonra bir alttaş üzerinde biriktirmek mümkündür. Böyle bir püskürtme işlemi için uygun enerjilere hızlandırılmaya en uygun olan parçacıklar iyonlardır, genelde de soy gazlardan biri olan argon (Ar) kullanılır [104].

Bir soy gaz, genelde Ar, içeren bir vakum odasına, kaplanacak olan alt tabaka yerleştirildiği ve alt tabaka üzerine biriktirilecek olan hedef malzemeye, plazmanın parlamasına neden olacak şekilde negatif bir yük uygulandığı zaman püskürtme işlemi başlar. Böyle bir durumda serbest elektronlar, negatif yüklü hedef malzemedan plazma ortamına akar ve Ar atomlarının dış elektronik kabuğu ile çarpışarak bu elektronları benzer yükleri nedeniyle uzaklaştırır. Bunun sonucunda Ar atomları pozitif yüklü iyonlar haline gelir ve çok yüksek bir hızda negatif yüklü hedef malzemeye doğru çekilip buraya çarpar ve bu çarpışmaların momentumuna bağlı olarak hedef malzemedeki atomik boyuttaki parçacıkları “püskürtür”. Bu parçacıklar, vakumlu biriktirme odasında kaplanacak olan alttaşın yüzeyinde ince bir film olarak biriktirilir [105]. Püskürtme işlemi aşağıdaki şekilde gösterilmektedir;



Şekil 3.1: Püskürtme sistemi çalışma prensibi [106].

Bu tez kapsamında incelenen TZO nano malzemeler, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Nanovak NVTs – 500 RF püskürtme sistemi kullanılarak, Corning Cam (CG) ve (100) – yönelimli n-tipi Si alttaslar üzerinde biriktirilmiştir. Bunun için, CG ve Si alttaslar, yüksek saflıkta (%99.99) ZnO (2" çapında) seramik hedef, yüksek saflıkta (%99.99) Ti (2" çapında) seramik hedef püskürtme sistemine yerleştirilmiştir. Sistem 10^{-6} mbar vakum değerine ulaştığında, 250 nm kalınlığında, 0.2 Å/s biriktirme hızı ile TZO nano malzeme CG ve Si alttaslar üzerinde biriktirilmiştir.

3.2 TZO NANO MALZEMESİNİN YAPISAL KARAKTERİZASYONU

Bu tez çalışması kapsamında TZO nano malzemesinin yapısal karakterizasyonu XRD ölçümü ile gerçekleştirildi. TZO nano malzemenin yapısal analizi için Bruker D8 Advanced XRD cihazı kullanılmıştır. Elde edilen XRD grafiği 2θ ya bağlı şiddet değerlerini kapsar.

X ışını kırınım yöntemleri, kristallerin X ışınlarını karakteristik bir şekilde kırınımına uğratmasına dayanan bir karakterizasyon yöntemidir ve bunun sayesinde kristal fazları ile ilgili net çalışmalar yapılabilir.

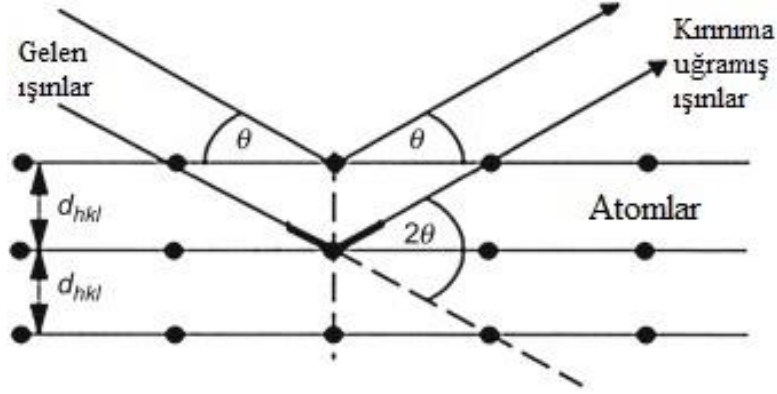
Bu ölçümlerde kaydedilen kırınım desenleri, örneklerin bazı mikro ve makro yapısal özellikleri hakkında ek bilgiler içerir. Bunlardan tepe (pik) pozisyonu, örgü parametreleri, kimyasal kompozisyon, makro stres veya nitel faz analizi incelenebilir. Tepe yoğunluğuna bağlı olarak, kristal yapısı hakkında, örneğin atomik pozisyonlar, sıcaklık faktörü, doluluk gibi bilgiler elde edilebilir. Son olarak tepe şekilleri, mikro gerginlik ve kristalit boyutu gibi özellikler hakkında da bilgiler vermektedir [106].

X ışınları yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar olup, dalga boyları 10^{-3} ve 10^1 nm arasındadır [107]. Kristallere X ışını gönderildiğinde, yapılarının periyodik olmasından dolayı, yapıcı ve yıkıcı saçılmış radyasyon ortaya çıkmaktadır, bu da karakteristik kırınım durumuna yol açtığı için materyallerin kristal yapısının incelenmesi için kullanılabilir.

XRD yöntemlerinin ilkesi, X ışınlarının periyodik atom düzlemleri tarafından kırınımına uğraması ve kırınımına uğramış sinyalin açısı veya enerji çözömlü tespitine dayanmaktadır. XRD olayının geometrik yorumu (yapıcı girişimler) W.L. Bragg tarafından verilmiştir [107]. Şekil 3.4 kırınım için gerekli geometrik koşulu ve Bragg yasasının belirlenmesi hakkında ayrıntıları vermektedir;

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin(\theta) \quad (3.5)$$

Bu formülde n kırınım mertebesi, λ gelen ışının nm cinsinden dalga boyu, d_{hkl} nm cinsinden latis aralığı ve θ derece cinsinden kırınımına uğrayan ışının örgü düzlemi ile yaptığı açıdır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Örgü düzlemlerinden kırınım için gerekli geometrik koşul [107].

3.3 TZO NANO MALZEMESİNİN YÜZEY KARAKTERİZASYONU

Bu tez çalışmasında TZO nano malzemesinin morfolojik analizi, yüksek performanslı temassız modda AFM (NanoMagnetics Instruments LTD., Oxford, UK) cihazı ile $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ tarama alanında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda iki boyutlu yüzey mikrografik görüntüsü üzerinden yüzey pürüzlülüğü değeri belirlenmiştir.

AFM, diğer benzerlerine göre daha yeni bir teknolojidir ve mikron altı ile nanometre boyutlarında yerel yüzey karakteristiklerinin görüntülemesini yapar. AFM yıkıcı olmayan bir analiz yöntemi olup, hava, sıvı ve vakum ortamlarında kullanılabilir [108]. AFM yönteminde, incelenecek olan örneğin yüzeyini taramak için bir keskin uçlu bir konsol (cantilever) kullanılır. Bu konsol, yüzey ile uç arasındaki kuvveti hisseder ve yüzey incelemesini bu şekilde yapar.

AFM ile bir örnek malzemenin yüzeyinin çok yüksek çözünürlükte topografik görüntüleri oluşturulur. Bu çözünürlük atomik seviyededir ve bu yüzden de malzeme yüzeyi hakkında çok detaylı bilgi sağlamaktadır. AFM ayrıca nano mertebede kimyasal, elektriksel, manyetik veya modül, sertlik, viskoelastik veya sürtünme gibi mekaniksel özelliklerin elde edilmesi için de kullanılabilir [109]. Bunların yanında AFM çizikler, oyuklar, korozyon çukurları gibi yüzey kusurlarının üç boyutlu bilgilerinin elde edilmesi için kullanılır [110].

3.4 TZO NANO MALZEMESİNİN OPTİK KARAKTERİZASYONU

Bu çalışma kapsamında TZO nano malzemesinin optik karakterizasyonu Ultraviyole görünür (UV-Vis) ölçümü ile gerçekleştirildi. Ölçümler Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis spektrometresi kullanılarak 200-1100 nm dalgaboyu aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen UV-Vis spektrumu dalgaboyuna bağlı geçirgenlik değerlerini kapsar.

Ultraviyole görünür (UV-Vis) spektroskopisi, çözelti veya katı olarak bir bileşiğin spektrumlarını elde etmek için kullanılır. Aslında spektroskopik olarak gözlemlenen şey, elektronların temel durumdan bileşiğin veya malzemenin ilk tekli uyarılmış durumuna uyarıcı ışık enerjisinin veya elektromanyetik radyasyonun soğurma edilmesidir. Elektromanyetik spektrum için UV-Vis enerji bölgesi, 800-200 nm dalga boyu aralığında olan 1.5-6.2 eV enerji aralığını kapsar. Bu soğurma spektroskopisinin arkasında yatan ilke Beer – Lambert yasasıdır [111];

$$\lg \left(\frac{I_0}{I} \right)_{\bar{\nu}} = \lg \left(\frac{100}{T(\%)} \right)_{\bar{\nu}} = A_{\bar{\nu}} = \varepsilon_{\bar{\nu}} c d \quad (3.7)$$

Burada $A_{\bar{\nu}}$ soğurma, T geçirgenlik, $\varepsilon_{\bar{\nu}}$ molar onlu yok olma katsayısı, I_0 örneğe gelen monokromatik ışığın şiddeti, I örnekten çıkan ışık şiddeti, c ışığı soğurma eden maddenin konsantrasyonu, d ise cm cinsinden örneğin yol uzunluğudur. $\varepsilon_{\bar{\nu}}$ maddeye özgü bir büyüklüktür ve dalga sayısına / boyuna bağlıdır. $\varepsilon_{\bar{\nu}}$ ile dalga sayısı arasındaki fonksiyonel ilişkiye “soğurma spektrumu” denir. Bir soğurma spektrumu grafiği çizilirken $\varepsilon_{\bar{\nu}}$ ’un logaritması da kullanılabilir [112].

UV-Vis spektroskopik veriler, belirli bir bileşik veya molekül hakkında nitel ve nicel bilgiler verebilir [111]. Örneğin, bu tez kapsamında da yapıldığı gibi UV-Vis spektroskopisi, geçiş spektrumları ve E_g değerinin bulunabilmesi için kullanılmıştır.

3.5 TZO NANO MALZEMESİNİN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Bu çalışma kapsamında TZO nano malzemesinin elektriksel karakterizasyonu sıcaklığa bağlı (80 K ve 300 K) $I - V$ ve frekansa bağlı (0.3, 0.5 ve 1 MHz) $C - V$ ve $G/\omega - V$ ölçümleri ile gerçekleştirildi. $I - V$ ölçümleri Keithley 4200 yarıiletken parametre analizör sistemi, frekansa

bağlı $C-V$ ve $G/\omega-V$ ölçümleri ise oda sıcaklığında Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analizör ile yapılmıştır.

Bir cihazın ölçümünden elde edilen $I-V$ eğrisi, cihaza uygulanan gerilim ile içinden geçen akım arasındaki ilişkiyi gösteren grafiklerdir. Bir elektriksel cihazın bir devre içerisinde nasıl davranacağını gösteren en önemli metotlardan birisidir. Bu cihazların bazı temel elektriksel özellikleri, bu eğrilerin şekillerinden ve detaylarından elde edilebilir ve çalışmaları hakkında daha fazla bilgi sağlanabilir.

Admitans spektroskopisi, bir cihaza uygulanan küçük bir alternatif gerilimine verilen akım tepkisini belirleyip, kapasitans ve iletkenliğin frekans ve sıcaklığa nasıl bağlı olduklarını elde etme yöntemidir. Genel olarak admitans, bir kapasitans ve bir kondüktansın oluşturduğu paralel bir devre olarak yorumlanır. Admitans spektroskopisinde temel olarak kapasitans değeri ile bunun frekansa ve sıcaklığa olan bağlılığı kullanılır. Buna alternatif olarak, analiz için kondüktans kullanılır. Bununla beraber, kapasitans ve kondüktans birbirlerine Kramers-Kronig bağıntılarıyla bağlantılı oldukları için herhangi bir bilgi kaybı olmadan sadece birisi kullanılıp analiz edilebilir. Yine de en iyisi bu ikisinin beraber kullanılması, çünkü bu sayede parasitik dirençlerin admitans verisine etkisi engellenebilir.

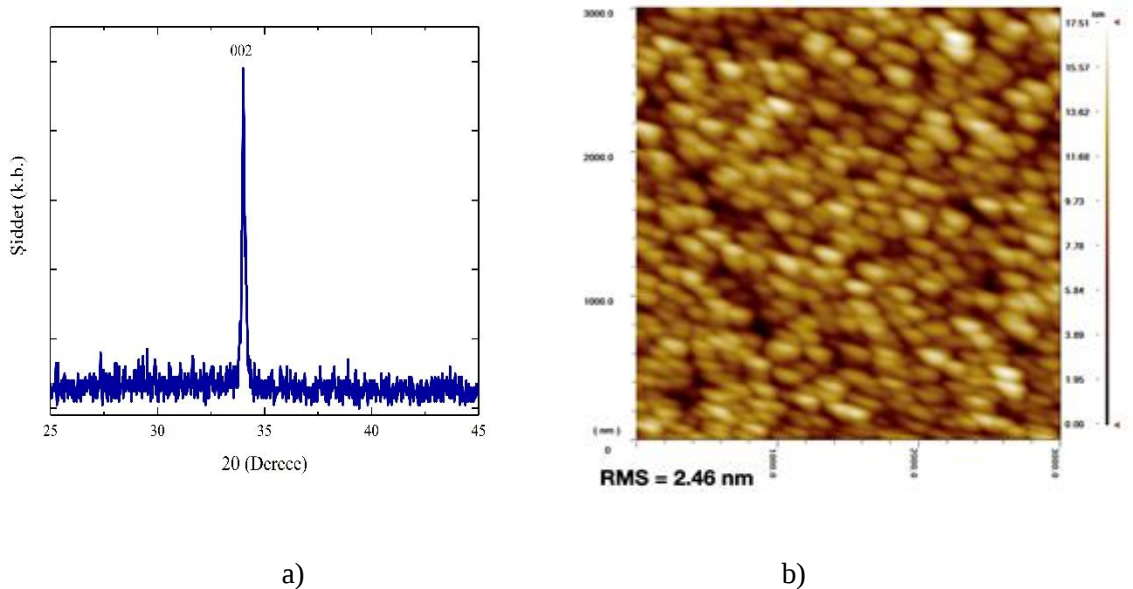
Bu karakterizasyon yönteminin en önemli avantajı görece basit uygulanabilmesidir. Frekans aralığının 1-10 MHz olması herhangi bir temel teknik sorun oluşturmadığı gibi, sıvı nitrojen ile soğutulan bir kriyostatta 80 K ile oda sıcaklığı arasındaki bir sıcaklık aralığında ölçümler alınabilir. Ayrıca bazı durumlarda birkaç yüz pF gibi küçük değerlerde kapasitans değerlerinin de ölçülmesinin gerekmesi ciddi bir sorun teşkil etmemektedir [113].

Admitans spektroskopisi tekniğinin, çoğunluk taşıyıcı tuzaklarını analiz etmek için çok uygun bir araç olduğu gösterilmiştir: enerji seviyesi, yakalama kesiti ve konsantrasyonları, karmaşık matematiksel işlemler olmadan kolayca elde edilir. Schottky veya pn bağlantısının altında yatan malzemedeki seri direnç, serbest taşıyıcılar donarken de tespit edilebildiği gibi en sıg seviyede enerji ve kompensasyon oranının elde edilmesini de sağlar [114]. Bu sayede admitans spektroskopisi sayesinde incelenen malzemenin elektriksel özellikleri hakkında bilgi sahibi olabiliyoruz.

4. BULGULAR

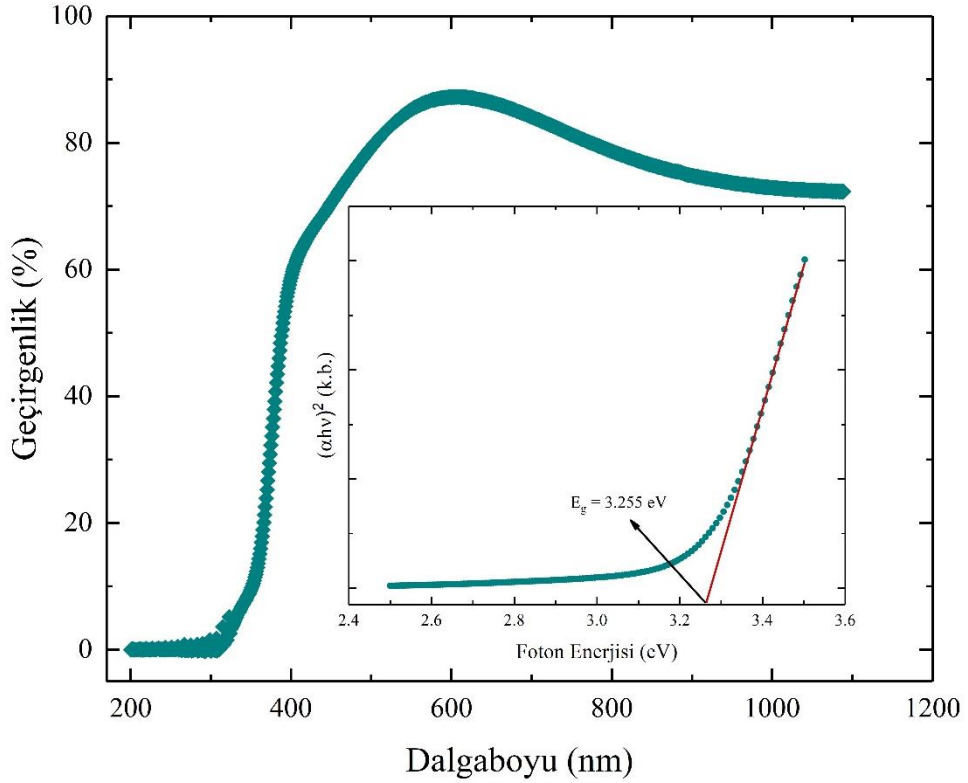
Tez çalışması kapsamında, Nanovak NVTS - 500 RF püskürtme yöntemi ile hazırlanmış TZO nano malzemenin karakterizasyonu yapılmıştır. Yapısal karakterizasyon için XRD ölçümleri yapılmıştır ve bunun için Bruker D8 Advanced XRD cihazı kullanılmıştır. Morfolojik analiz için yüksek performans AFM ölçümleri $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ tarama alanında yapılmıştır. Optik analiz Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis spektrometresi ile 200-1100 nm ölçüm aralığında yapılmıştır. Elektriksel karakterizasyon için Au/TZO/n-Si yapısının $I - V$ ölçümleri, Keithley 4200 yarıiletken parametre analizör sistemi ile 80 ve 300 K'de, $C - V$ ve $G/\omega - V$ ölçümleri ise oda sıcaklığında Hewlett Packard 4192 LF empedans analizör sistemi ile farklı frekans değerleri için yapılmıştır.

2θ açısında taranmış olan TZO nano malzemesinin XRD deseni Şekil 4.1a'da gösterilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü üzere, TZO yapısı için güçlü kırınım piki (002)'ye aittir [9,43–45]. TZO yapısının 2 boyutlu AFM görüntüsü ise Şekil 4.1b'de verilmiştir. TZO yapısının yüzey topolojisi, $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ tarama alanı ile AFM ölçümü kullanılarak incelenmiştir. Yapının RMS değerinin 2.46 nm olduğu bulunmuştur [115]. Bu RMS değerinden TZO yapısının uygun bir pürüzsüz yüzeye sahip olduğu görülmüştür. Sagadevan vd. [35], TZO filmlerin RMS değerlerinin 1.45–1.60 arasında taneciklerin film yüzeyinde düzenli bir dağılımının olduğunu göstermiştir.



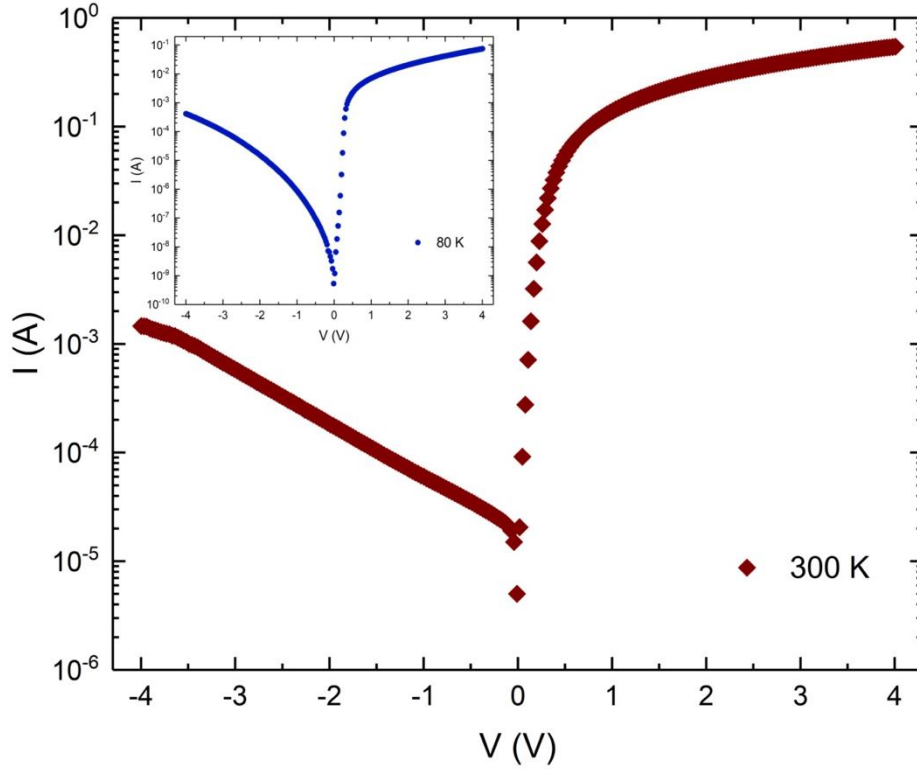
Şekil 4.1: TZO nano malzemesinin (a) XRD deseni, (b) $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ AFM görüntüsü [115].

Şekil 4.2, TZO yapının geçirgenlik spektrumlarını göstermektedir. TZO nano malzeme, direkt E_g 'na sahiptir. Bu nedenle, Şekil 4.2'de gösterilen optik geçirgenlik spektrumlarından elde edilen soğurma kenarları, optik bant aralıklarını belirleyen Tauc denklemini kullanılarak analiz edilmiştir [43,46]. TZO yapının $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ eğrisi Şekil 4.2'de ek olarak verilmiştir. Eğrinin düz bir çizgi şeklinde olan kısmı, sıfıra ekstrapole edildiğinde, optik E_g 'nı verir. TZO yapının E_g değeri 3.255 eV olarak bulunmuştur [115]. Saf ZnO ile karşılaştırıldığında ($E_g = 3.219$ eV), TZO yapının maviye kaydığı görülmektedir.



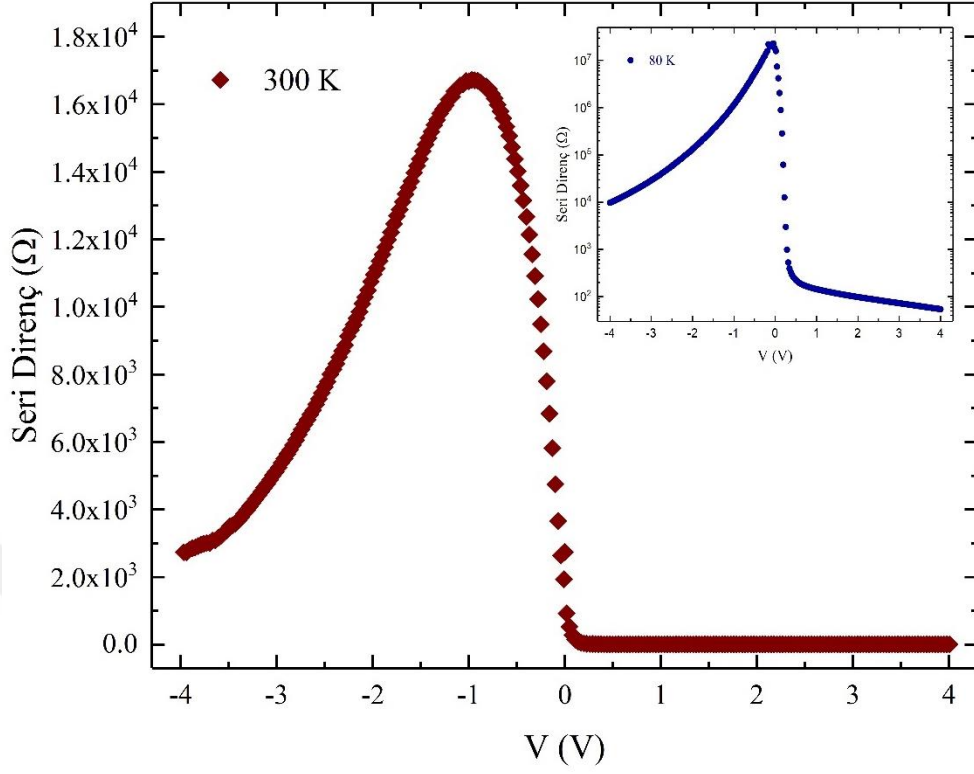
Şekil 4.2: TZO nano malzemesinin optik geçirgenlik spektrumları [115].

Au/TZO/n-Si yapısının 300 K için $I - V$ eğrisi Şekil 4.3'te verilmiştir [115]. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere, $I - V$ eğrisi 0.5 V'a kadar lineer bir davranış gösterirken, arayüzey durumları, bariyer düzensizlikleri ve aynı zamanda seri direnci (R_s) gibi sebeplerden dolayı 0.5 V'tan sonra doğrusallıktan saparak içbükey bir davranış göstermektedir. 80 K için TZO yapının $I - V$ eğrisi Şekil 4.3'te iç şekil olarak verilmiştir. 80 K'de TZO yapısının $I - V$ eğrisi, 300 K'deki ile aynı davranışı sergilemektedir.



Şekil 4.3: Au/TZO/n-Si yapısının 300 K ve 80 K'deki ileri ve ters gerilim $I - V$ eğrisi [115].

R_s , yapı direncinden (R_i) ve uygulanan ön geriliminden (V_i) hesaplanmıştır. Yapı direnci, $I - V$ grafiğinden $R_i = \frac{dV_i}{dI_i}$ bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.4, 300 K için Au/TZO/n-Si yapısının hesaplanmış R_s değerini göstermektedir [115]. Yapının seri direnci değerlerinin, yeteri kadar yüksek ön gerilim değerlerinde bir sabite yakınsadığı görülmüştür. 300 K için Au/TZO/n-Si yapısının R_s değerinin 7.37Ω olduğu bulunmuştur. 80 K için ise, Au/TZO/n-Si yapısının hesaplanmış R_s değeri ise Şekil 4.4'te iç şekil olarak verilmiştir. 80 K'de hesaplanmış R_s 'nin davranışı, 300 K'deki ile aynıdır ve değeri 53.65Ω olarak bulunmuştur [115]. Elde edilmiş sonuçlar, beklendiği üzere, R_s değerlerinin azalan sıcaklık ile arttığını göstermektedir.



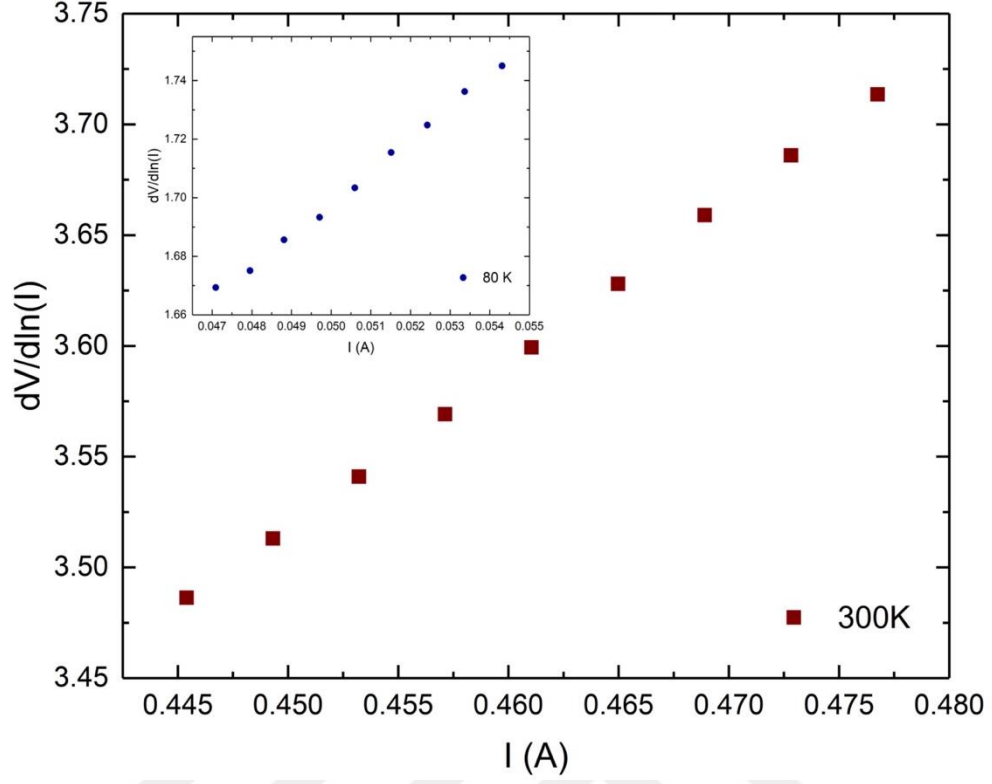
Şekil 4.4: 300 K ve 80 K'de Au/TZO/n-Si yapısının $R_s - V$ eğrisi [115].

R_s değerleri, Cheung ve Cheung metodu olarak da bilinen sıcaklığa bağlı ileri ön gerilim $I - V$ karakteristikleri ile de belirlenebilir [38, 47-52]. Bu metoda göre, Termiyonik Emisyon Teorisi ile ilişkili $I - V$ karakteristikleri:

$$\frac{dV}{d \ln(I)} = n \frac{k_B T}{q} + R_s I \quad (4.1)$$

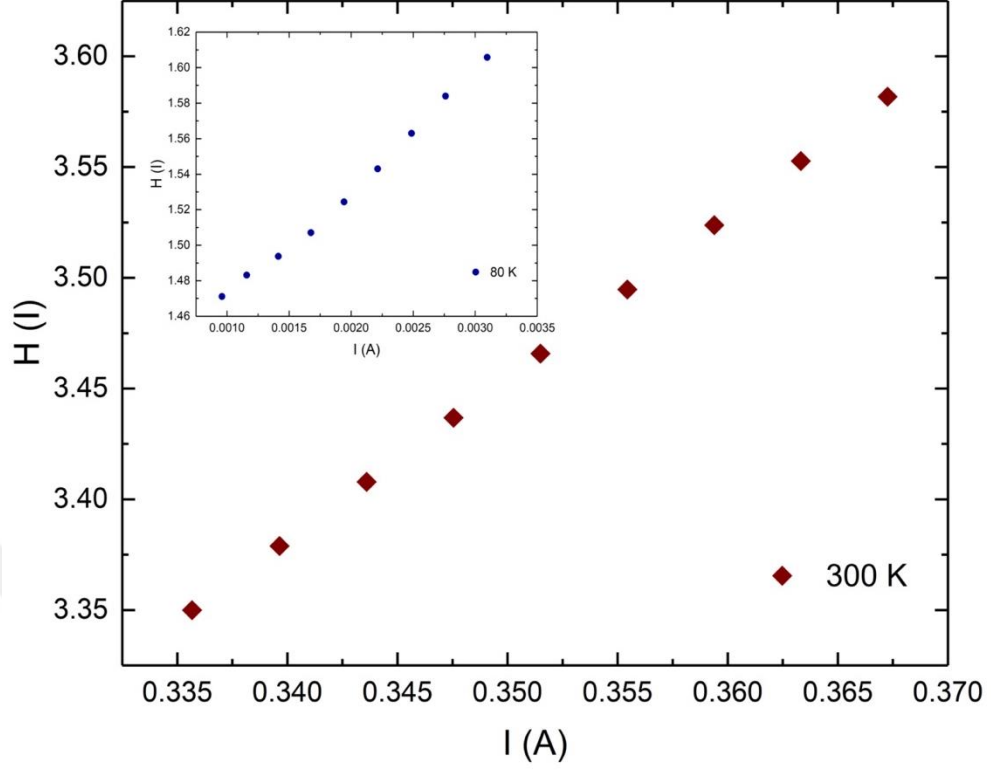
$$H(I) = V - n \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I}{A A^* T^2} \right) = n \phi_{b0} + R_s I \quad (4.2)$$

denklemleri ile verilebilir. Şekil 4.5 300 K için Au/TZO/n-Si yapısının $\frac{dV}{d \ln(I)} - I$ eğrisini gösteriyor. R_s , lineer çizginin eğiminden belirleniyor. Bu yapının R_s değeri 7.28 Ω olarak bulunmuştur [115]. 80 K için Au/TZO/n-Si yapısının $\frac{dV}{d \ln(I)} - I$ eğrisi Şekil 4.5'te iç şekil olarak verilmiştir. Bu yapının R_s değeri ise 10.84 Ω olarak bulunmuştur [115].



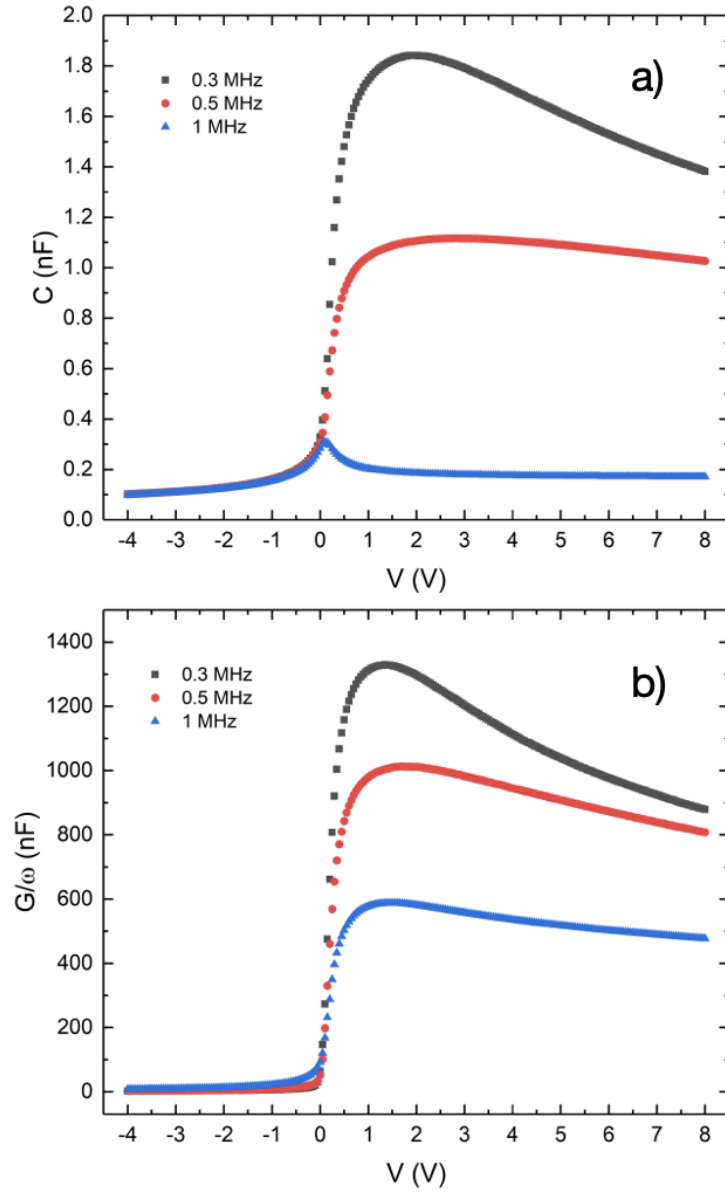
Şekil 4.5: Au/TZO/n-Si yapısının 300 K ve 80 K'deki $\frac{dV}{d \ln(I)}$ - I eğrisi [115].

Şekil 4.6, 300 K için Au/TZO/n-Si yapısının $H(I) - I$ eğrilerini göstermektedir. R_s lineer çizginin eğiminden belirlenir. Bu yapı için R_s değeri 7.34Ω olarak bulunmuştur [115]. 80 K için $H(I) - I$ eğrileri Şekil 4.6'da ek olarak verilmiştir. Bu yapının R_s değeri 63.51Ω olarak bulunmuştur [115]. Hem $\frac{dV}{d \ln(I)}$ - I hem de $H(I) - I$ eğrilerinden elde edilen sonuçlara göre R_s değerleri, $I - V$ 'den elde edilen sonuçlarda olduğu gibi, azalan sıcaklık ile artmaktadır.



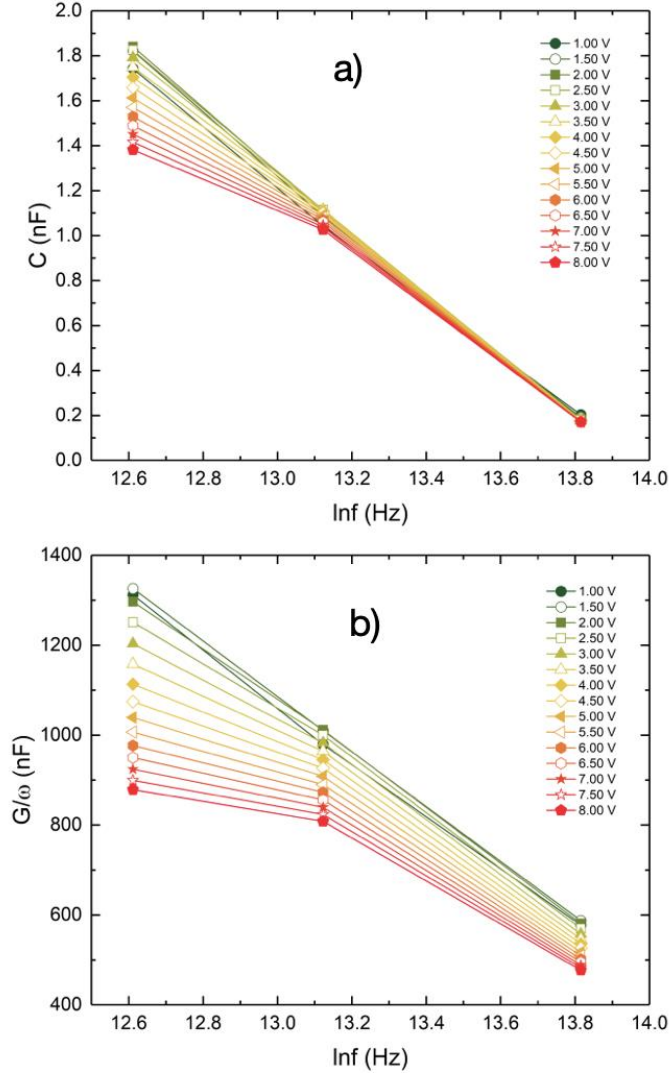
Şekil 4.6: Au/TZO/n-Si yapısının 300 K ve 80 K'deki $H(I) - I$ eğrisi [115].

Şekil 4.7.a ve b sırasıyla 0.3, 0.5 ve 1 MHz için Au/TZO/n-Si yapısının kapasitans ve iletkenlik eğrilerini göstermektedir [115]. Şekil 4.7.a'da özellikle birikim bölgesinde (ileri ön gerilim bölgesi), 0.3 MHz için C değerleri artan gerilim ile azalırken, 0.5 ve 1 MHz'te, iki frekans değeri için farklı sabit değerler almaktadır. Şekil 4.7.b'de özellikle birikim bölgesinde, G değerleri üç frekans değeri için de artan gerilim ile azalma eğilimindedir. Fakat, bu azalma 0.3 MHz'te daha baskınken, frekans değeri arttıkça bu baskınlık azalmaktadır.



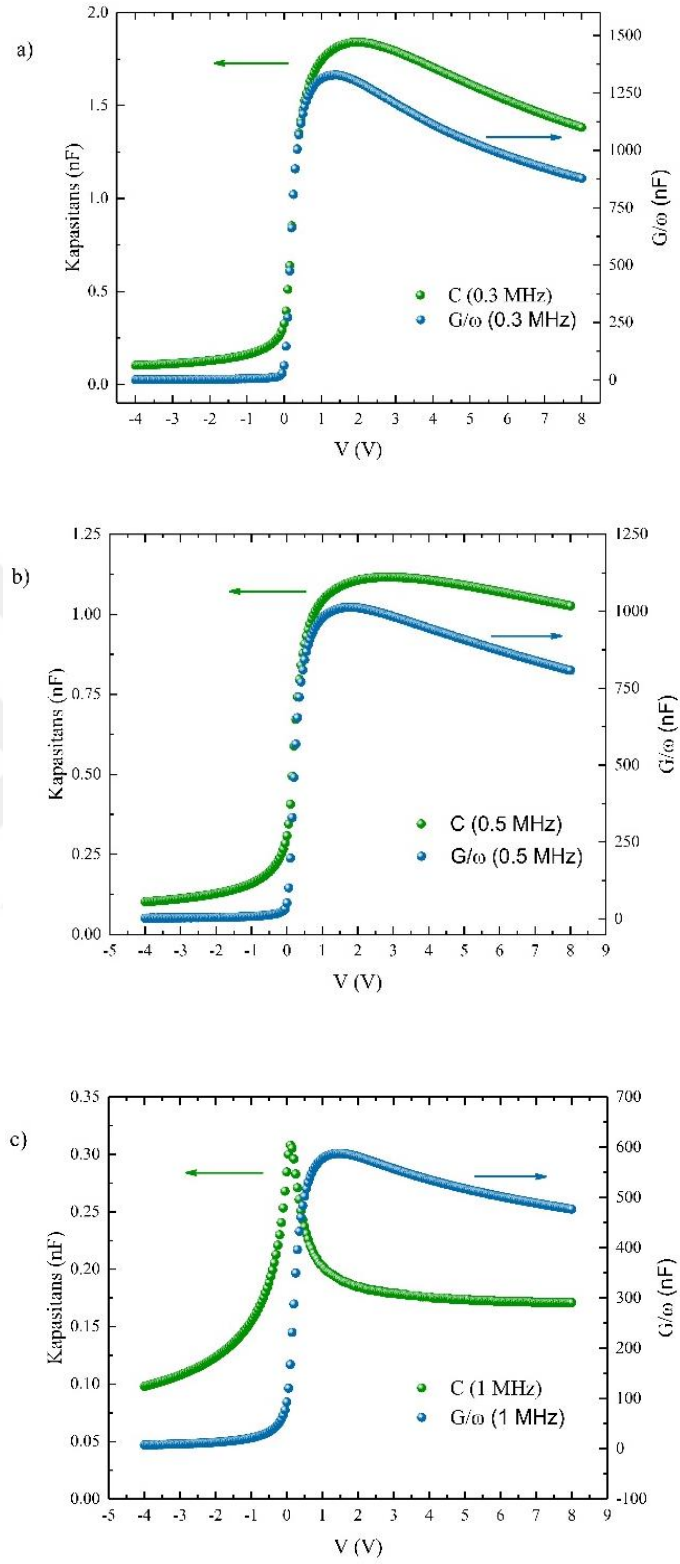
Şekil 4.7: Au/TZO/n-Si yapısının 0.3, 0.5 ve 1 MHz değerleri için (a) $C - V$ ve (b) $G / \omega - V$ eğrileri [115].

C ve G değerlerinin birikim bölgesindeki bu davranışları Şekil 4.8.a ve b'deki, 0.5 V'luk aralıklı 1 V ile 8 V arasındaki gerilime bağlı grafiklerle açıkça görülebilir.



Şekil 4.8: 0.3, 0.5 ve 1 MHz için gerilime bağlı olarak C ve G değerlerinin 1 V - 8 V arasında değişimi [115].

C ve G değerlerinin sırasıyla 0.3, 0.5 ve 1 MHz için gerilime bağlı değişimleri Şekil 4.9.a-c'de verilmiştir [115]. Şekil 4.9.a ve b'de görüldüğü üzere C ve G değerleri, 0.3 ve 0.5 MHz değerleri için aynı davranışı sergilemektedir. C ve G değerleri 1 V'a kadar artış gösterirken, 1 V'tan biraz sonra, R_s 'den dolayı ileri ön gerilim bölgesinde ise azalma eğilimi göstermektedirler. Şekil 4.9.c'de görüldüğü üzere, 0.3 ve 0.5 MHz için G değerleri aynı şekilde davranmasına rağmen, C değerleri 0 V'a kadar artış ve bu değerde bir pik, sonrasında ise seri direncinin güçlü etkisinden dolayı ileri ön gerilim bölgesinde hızlı bir düşüş göstermektedir.

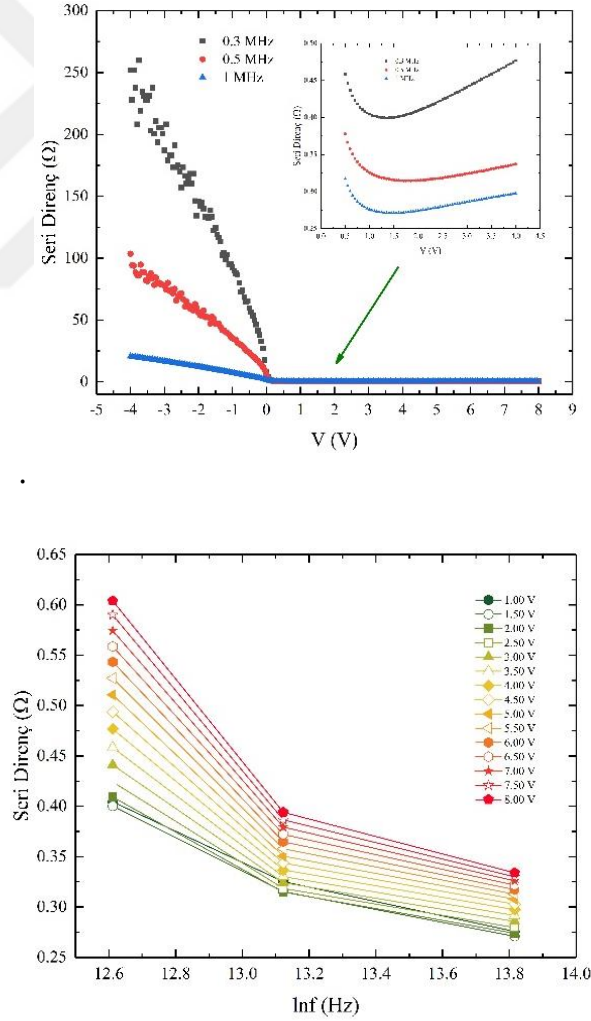


Şekil 4.9: (a) 0.3 MHz, (b) 0.5 MHz ve (c) 1 MHz değerleri için C ve G karşılaştırılması [115].

R_s hesaplamak için farklı yöntemler olmasına rağmen, tez kapsamında R_s hesaplamak için iyi bilinen Nicolian ve Brews yöntemini kullanılmıştır [53].

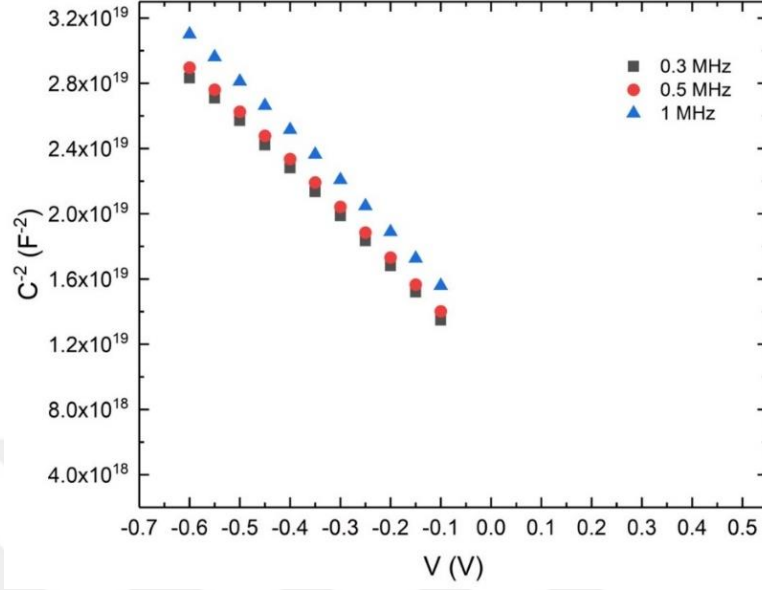
$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.3)$$

Denk. 4.3 kullanılarak 0.3, 0.5 ve 1 MHz için hesaplanan R_s değerleri Şekil 4.10a'da gösterilmiştir. Özellikle birikim bölgesinde (ileri ön gerilim bölgesi) R_s değerleri her frekans değeri için azalmaktadır ve 1.5 V'ta minimum değerine gitmektedir. Daha anlaşılır olması için, 1 – 4 V aralığı Şekil 4.10a'da ek olarak verilmiştir. R_s değerlerinin birikim bölgesindeki bu davranışları Şekil 4.10.b'deki, 0.5 V'luk aralıklı 1 V ile 8 V arasındaki gerilime bağlı grafiklerle açıkça görülebilir



Şekil 4.10: Au/TZO/n-Si yapısının 0.3, 0.5 ve 1 MHz frekans değerleri için R_s - V eğrileri [115].

Bunların haricinde, Şekil 4.11 farklı frekans değerleri için $C^{-2} - V$ eğrilerini göstermektedir.



Şekil 4.11: Au/TZO/n-Si yapısının 0.3, 0.5 ve 1 MHz frekans değerleri için $C^{-2} - V$ eğrileri [115].

Geri besleme bölgesinde düz bir davranış gösteren bu eğriler şu şekilde ifade edilirler [115]:

$$C^{-2} = \frac{2(V_R + V_0)}{q\epsilon_s N_D A^2} \quad (4.4)$$

Burada V_R ve V_0 sırasıyla geri besleme gerilimi ve sıfır ön gerilimdeki dahili gerilimdir.

Aşağıdaki denklemler kullanılarak 0.3, 0.5 ve 1 MHz için temel elektriksel parametreler hesaplanabilir:

$$V_0 = V_D - \frac{kT}{q} \quad (4.5)$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (4.6)$$

$$\phi_{CV} = V_0 + \frac{kT}{q} + E_F - \Delta\phi_B \quad (4.7)$$

$$\Delta\phi_B = \left(\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0}\right)^{0.5} \quad (4.8)$$

Burada V_D (Denk. 4.5), N_C (Denk. 4.6), $\Delta\phi_B$ (Denk. 4.7) ve E_m (Denk. 4.8) sırasıyla sıfır ön gerilimdeki difüzyon potansiyeli, yarıiletkendeki iletkenlin bandındaki efektif durum yoğunluğu, bariyer düşürücü görüntü kuvveti ve maksimum elektrik alanıdır. Tablo 4.1’de, frekansa bağlı olarak elde edilmiş V_D , E_F , W_D , ϕ_{CV} and R_s gibi temel elektriksel parametreler verilmiştir. V_D , E_F , W_D , ϕ_{CV} değerleri artan frekansla artarken R_s değeri azalmıştır.

Tablo 4.1: Au/TZO/n-Si yapısı için $C^{-2} - V$ eğrilerinden belirlenmiş temel parametrelerin [115].

Frekans (MHz)	V_D (eV)	E_F (eV)	$W_D \times 10^4$ (cm)	ϕ_B (eV)	R_s (8V için) (Ohm)
0.3	0.39	0.3242	2.78	0.713	0.60
0.5	0.41	0.3243	2.84	0.728	0.39
1.0	0.44	0.3251	3.01	0.762	0.33

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, RF püskürtme yöntemi ile hem CG hem de n-Si alttaşlar üzerinde biriktirilmiş TZO nano malzemesinin yapısal, morfolojik, optik ve aynı zamanda elektriksel karakterizasyonları yapılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

CG üzerinde biriktirilmiş TZO nano malzemesinin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri XRD, AFM ve UV-Vis ile belirlenmiştir. XRD analizinden görüldüğü üzere TZO nano malzeme yapısında güçlü kırınım piki (002) içindir. AFM analizinde, TZO yapısının tanecik boyutunun 15.5 nm ve RMS değerinin 2.46 nm olduğu bulunmuştur. UV-Vis analizinden Bu TZO yapısının E_g değerinin 3.255 eV olduğu tespit edilmiştir. XRD, AFM ve UV-Vis analizleri sonuçlarından bu yapının iyi kristallik, iyi homojenlik, düşük yüzey pürüzlülüğü ve uygun E_g değeri gösterdiği görülmüştür. n-Si alttaş üzerinde biriktirilmiş TZO nano malzemesinin elektriksel karakterizasyonunu yapmak için sıcaklığa bağlı (80 K ve 300 K) $I - V$ ölçümleri ve frekansa bağlı (0.3, 0.5 ve 1 MHz) $C - V$ ve $G/\omega - V$ ölçümleri kullanılmıştır.

Au/TZO/n-Si yapısının R_s değerleri, 80 K ve 300 K için $I - V$ karakterizasyonlarında Termiyonik Emisyon Teorisi ve Cheung ve Cheung metotları kullanılarak belirlenmiştir. Au/TZO/n-Si yapısının R_s değeri 80 K ve 300 K için sırasıyla 53.65 Ω ve 7.37 Ω olarak bulunmuştur. $I - V$ ölçümleri sonuçlarından, R_s değerlerinin artan sıcaklık ile azaldığı görülmüştür. Ayrıca, Au/TZO/n-Si yapısının R_s değerleri, 0.3, 0.5 ve 1 MHz için $C - V$ ve $G / \omega - V$ eğrilerinden belirlenmiştir. Burada R_s değerleri sırasıyla 0.60 Ω , 0.39 Ω ve 0.33 Ω olarak bulunmuştur. $C - V$ ve $G / \omega - V$ ölçümleri sonuçlarından, R_s değerlerinin artan frekans ile azaldığı görülmüştür. Bunların haricinde, 0.3, 0.5, ve 1 MHz için $C^{-2} - V$ eğrisinden V_D , E_F , W_D , Φ_{CV} , ve R_s değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerin R_s aksine artan frekans değeri ile arttığı görülmüştür.

Sonuç olarak, TZO yapısının iyi kristal kalitesi, ideal E_g değeri ve düşük seri direncine sahip olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak, Au/TZO/n-Si yapısının, hem $I - V$ hem de $C - V$ ve $G / \omega - V$ ölçümlerinden düşük bir R_s değerine sahip olduğu belirlenmiştir ve bu durumda bu yapının optoelektronik cihazlar için uygun olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1]. Grundmann, M., 2010, *Introduction in: the physics of semiconductors. Graduate texts in physics*, Springer Verlag GmbH, Heidelberg, ISBN: 978-3-642-13884-3.
- [2]. Banerjee, A.N., Chattopadhyay, K.K., 2005, Recent developments in the emerging field of crystalline p-type transparent conducting oxide thin films, *Progress in crystal growth and characterization of materials*, 50 (1-3), 52-105.
- [3]. Wager, J.F., 2003, Transparent electronics, *Science*, 300 (5623), 1245-1246.
- [4]. Martin, E.J.J., Martin, E.J.J., Lane M., Ireland J., Kannewurf, C.R., Chang R.P.H., 2004, Properties of multilayer transparent conducting oxide films, *Thin solid films*, 461 (2), 309-315.
- [5]. Fortunato, E., Ginley, D., Hosono, H., Paine D.C., 2011, Transparent conducting oxides for photovoltaics, *MRS Bulletin*, 32 (3), 242-247.
- [6]. Hosono, H., Ohta, H., Orita, M., Ueda, K., Hirano, M., 2002, Frontier of transparent conductive oxide thin films, *Vacuum*, 66 (3-4), 419-425.
- [7]. Exarhos, G.J., Zhou, X.-D., 2007, Discovery-based design of transparent conducting oxide films, *Thin solid films*, 55 (18), 7025-7052.
- [8]. Afre, R.R., Sharma, N., Sharon, M., Sharon, M., 2018, Transparent conducting oxide films for various applications: A review, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 53 (1), 79-89.
- [9]. Chopra, K.L., Major, S., Pandya, D.K., 1983, Transparent conductors – A status review, status review, *Thin solid films*, 102 (1), 1-46.
- [10]. Ray, S., Dutta, J., Barua, A.K., 1991, Bilayer SnO₂: In/SnO₂ thin films as transparent electrodes of amorphous silicon solar cells, *Thin solid films*, 199 (2), 201-207.
- [11]. Sharmin, A., Tabassum, S., Bashar, M.S., Mahmood Z.H., 2019, Depositions and characterization of sol-gel processed Al-doped ZnO (AZO) as transparent conducting oxide (TCO) for solar cell application, *J. Theor. Appl. Phys.*, 13 (2), 123-132.
- [12]. Minami, T., 2008, Substitution of transparent conducting oxide thin films for indium tin oxide transparent applications, *Thin solid films*, 516 (7), 1314-1321.
- [13]. Hassan, N.K., Hashim, M.R., Al-Douri, Y., 2014, Morphology and optical investigations of ZnO pyramids and nanoflakes for optoelectronic applications, *Optik.*, 125 (11), 2560-2564.
- [14]. Jiménez-García, F.N., Londoño-Calderón, C.L., Espinosa-Arbeláez, D.G., Del Real, A., Rodríguez-García, M.E., 2014, Influence of substrate on structural, morphological and optical properties of ZnO films grown by SILAR method, *Bull. Mater. Sci.*, 37 (6), 1238-1291.

- [15]. Xu, S., Wang, Z.L., 2011, One dimensional ZnO nanostructures: Solution growth and functional properties, *Nano research*, 4 (11), 1013-1098.
- [16]. Kim, J.H., Yer, I.H., 2016, Characterization of ZnO nanowires grown on Ga-doped ZnO transparent conductive thin films: Effect of deposition temperature of Ga-doped ZnO thin films, *Ceram. Int.*, 42 (2), 2907-3724.
- [17]. Zgura, I., Preda, N., Socol, G., Ghica, C., Ghica, D., Enculescu, M., Negut, I., Nedelcu, L., Frunza, L., Ganea, C.P., Frunza, S., 2018, Wet chemical synthesis of ZnO-CdS composites and their photocatalytic activity, *Materials Research Bulletin*, 99, 174-181.
- [18]. Suche, M., Christoulakis, S., Katharakis, M., Vidakis, N., Koudoumas, E., 2009, Influence of thickness and growth temperature on the optical and electrical properties of ZnO thin films, *Thin solid films*, 517 (15), 4303-4306.
- [19]. Vayssieres, L., 2003, Growth of arrayed nanorods and nanowires of ZnO from aqueous solutions, *Advanced Materials*, 15 (5), 464-466.
- [20]. Mohammed, S.M., Hassan, Z., Ahmed, Nase, M., Al-Harden, N.H., Bououdina, M., 2015, Fabrication of low-cost UV photo detector using ZnO nanorods grown onto nylon substrate, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*, 26 (3), 1322-1331.
- [21]. Bidier, S.A., Hashim, M.R., Al-Diabat, A.M., Bououdina, M., 2017, Effect of growth time on Ti-doped ZnO nanorods prepared by low-temperature chemical bath deposition, *Physics E: Low dimensional systems and nanostructures*, 88, 169-173.
- [22]. Lee, H.-Y., Ye, W.-Y., Lin, Y.-H., Lee, C.-T., 2014, Performance investigation of amorphous InGaZnO flexible thin-film transistors deposited on PET substrates, *J. Display Technol.*, 10 (9), 792-796.
- [23]. Lewis, B.G., Paine, D.C., 2000, Applications and processing of transparent conducting oxides, *MRS Bulletin*, 25 (8), 22-27.
- [24]. Shah. A., Torres. P., Tscharnner, R., Wyrsh, N., Keppner, H., 1999, Photovoltaic technology: The case for thin-film solar cells, *Science*, 285 (5428), 692-698.
- [25]. Jagadish, C., Pearton, S.J., 2011, Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing, properties and applications, Elsevier Science, Hong Kong, ISBN: 9780080464039.
- [26]. Shan, F.K., Liu, G.X., Lee, J., Shin, B.C., 2007, The role of oxygen vacancies in epitaxial-deposited ZnO thin films, *J. Appl. Phys.*, 101 (5), 053106.
- [27]. Pal, K., Thomas, S., Mohan, M.L.N.M., 2017, Evaluation of Versatile CdS Nanomaterials Based Liquid Crystals Switchable Device, *J. Nanosci. Nanotechnol*, 17 (4), 2401-2412.
- [28]. Pal, K., Maria, H.J., Thomas, S., Mohan M.L.N.M., 2017, Smart in-plane switching of nanowires embedded liquid crystal matrix, *Org. Electron.*, 42, 256-268.

- [29]. Akin, N., Ceren Baskose, U., Kinaci, B., Cakmak, M., Ozcelik, S., 2015 AZO thin film-based UV sensors: effects of RF power on the films, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process*, 119 (3), 965-970.
- [30]. Akin, N., Kinaci, B., Ozen, Y., Ozcelik, S., 2017, Influence of RF power on the opto-electrical and structural properties of gallium-doped zinc oxide thin films, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 28 (10), 7376-7384.
- [31]. Raskar, N., Dake, D., Khawal, H., Desphande, U., Asokan, K., Dole, B., 2020, Development of oxygen vacancies and surface defects in Mn-doped ZnO nanoflowers for enhancing visible light photocatalytic activity, *SN Appl. Sci.*, 2 (8), 1-11.
- [32]. Suo, X., Zhao, S., Ran, Y., Liu, H., Jiang, Z., Li, Y., Wang, Z., 2019, Effects of oxygen/argon pressure ratio on the structural and optical properties of Mn-doped ZnO thin films prepared by magnetron pulsed co-sputtering, *Surf. Coatings Technol.*, 357, 978-983.
- [33]. Almadi, A.K.M., Salameh, B., Shatnawi, M., 2020, A.K.M. Alsmadi, B. Salameh, M. Shatnawi, Influence of Oxygen Defects and Their Evolution on the Ferromagnetic Ordering and Band Gap of Mn-Doped ZnO Films, *J. Phys. Chem. C.*, 124 (9), 16116-16126.
- [34]. Çokduygular, E., Çetinkaya, Ç., Yalçın, Y., Kınacı, B., 2020, , A comprehensive study on Cu-doped ZnO (CZO) interlayered MOS structure, *J. Mater. Sci. Mater. Electron*, 31 (16), 13646-13656.
- [35]. Darma, Y., Nurfani, E., Purbayanto, M.A.K., Widita, R., Rusydi, A., Takasa, K., 2019, Post-annealing effects on excitonic states and defects in nanostructured Ti-doped ZnO thin films, *Mater. Res. Express.*, 6 (7), 076434.
- [36]. Kumar, M., Singh, J.P., Chae, K.H., Lee, H.H., 2018, Structure, optical and electronic structure studies of Ti:ZnO thin films, *J. Alloys Compd.*, 759, 8-13.
- [37]. Huber, S., Mardare, C.C., Kleber, C., Hassel, A.W., 2019, Structural, Electrical, and Optical Effects of Metal Doping on ZnO Thin Films, *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.*, 216 (12), 1-9.
- [38]. Coutancier, D., Zhang, S.-T., Bernardini, S., Fournier, O., Mathieu-Pennober, T., Donsanti, F., Tchernycheva, M., Foldyna, M., Schneider, N., 2020, ALD of ZnO:Ti: Growth Mechanism and Application as an Efficient Transparent Conductive Oxide in Silicon Nanowire Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 12 (8), 21036-21044.
- [39]. Hsu, C.L., Gao, Y.D., Chen, Y.S., Hsueh, T.J., 2014, Vertical Ti doped ZnO nanorods based on ethanol gas sensor prepared on glass by furnace system with hotwire assistance, *Sensors and Actuators B Chem.*, 192, 550-557.
- [40]. Shridar, R., Manoharan, C., Ramalingam, S., Dhanapandian, S., Bououdina, M., 2014, Spectroscopic study and optical and electrical properties of Ti-doped ZnO thin films by spray pyrolysis, *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, 120, 297-303.

- [41]. Kuroyanagi, A., 1989, Properties of Aluminum-Doped ZnO Thin Films Grown by Electron Beam Evaporation, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 66 (11), 219-222.
- [42]. Lin, Y.C., Hsu, C.Y., Hung, S.K., Wen, D.C., 2013, Influence of TiO₂ buffer layer and post-annealing on the quality of Ti-doped ZnO thin films, *Ceram. Int.*, 39 (5), 5759-5803.
- [43]. Lin, S.S., Huang, J.L., Šjgalik, P., 2005, The properties of Ti-doped ZnO films deposited by simultaneous RF and DC magnetron sputtering, *Surf. Coatings Technol.*, 191 (2-3), 286-292.
- [44]. Young, S.J., Ji, L.W., Fang, T.H., Chang, S.J., Su, Y.K., Du, X.L., 2007, ZnO ultraviolet photodiodes with Pd contact electrodes, *Acta Mater.*, 55 (1), 329-333.
- [45]. Zheng, K., Gu, L., Sun, D., Mo, X.L., Chen, G., 2010, , The properties of ethanol gas sensor based on Ti doped ZnO nanotetrapods, *Mater. Sci. Eng. B*, 166 (1), 104-107.
- [46]. Chakraborty, D., Gayen, R., Hussain, S., Bhar, R., Ghoshal, A.K., Pal, A.K., 2012 ZnO/Ti thin film: Synthesis, characterization and methane gas sensing property, *J. Phys. Conf. Ser.*, 390 (1), 012065.
- [47]. Sagadevan, S., Pal, K., Chowdhury, Z.Z., Podder, J., 2017, CBD progression of Ti-doped ZnO thin film spectroscopic characterizations, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 28 (21), 16554-16560.
- [48]. Kars Durukan, I., Bayal, Ö., Kurtuluş, G., Baş, Y., Gültekin, A., Öztürk, M.K., Çörekçi, S., Tamer, M., Özçelik, S., Özbay, E., 2015, Examination of the temperature related structural defects of InGaN/GaN solar cells, *Superlattices Microstruct.*, 86, 379-389.
- [49]. Güzelçimen, F., Tanören, B., Çetinkaya, Ç., Kaya, M.D., Efker, H.İ., Özen, Y., Bingöl, D., Sirkeci, M., Kınacı, B., Ünlü, M.B., Özçelik, S., 2020, The effect of thickness on surface structure of rf sputtered TiO₂ thin films by XPS, SEM/EDS, AFM and SAM, *Vacuum*, 182, 109766.
- [50]. Kınacı, B., Asar, T., Özen, Y., Özçelik, S., 2011, The analysis of Au/TiO₂/n-Si schottky barrier diode at high temperatures using I-V characteristics, *Optoelectron. Adv. Mater. Rapid Commun.*, 5, 434-437.
- [51]. Kınacı, B., Şebnem Çetin, S., Bengi, A., Özçelik, S., 2012, The temperature dependent analysis of Au/TiO₂ (rutile)/n-Si (MIS) SBDs using current–voltage–temperature (I–V–T) characteristics, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 15 (5), 531-535.
- [52]. Kınacı, B., Özçelik, S., 2013, Analysis of the Temperature Dependence of the Capacitance–Voltage and Conductance–Voltage Characteristics of Au/TiO₂(rutile)/n-Si Structures, *J. Electron. Mater.*, 42 (6), 1108-1113.
- [53]. Kınacı, B., Akın, N., Kars Durukan, İ., Memmedli, T., Özçelik, S., 2014, The study on characterizations of SrTiO₃ thin films with different growth temperatures, *Superlattices and Microstruct.*, 76, 234-243.

- [54]. Kınacı, B., Çetinkaya, Ç., Çokduygular, E., Efkere, H.İ., Sönmez, N.A., Özçelik, S., 2020, Negative capacitance phenomena in Au/SrTiO₃/p-Si heterojunction structure, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 31 (11), 8718-8726.
- [55]. Liu, J., Ma, S.Y., Huang, X.L., Ma, G.L., Li, F.M., Yang, F.C., Zhao, Q., Zhang, X.L., 2012, Effects of Ti-doped concentration on the microstructures and optical properties of ZnO thin films, *Superlattices Microstruct.*, 52 (4), 765-773.
- [56]. Rajasekaran, M., Arunachalam, A., Kumaresan, P., 2020, Structural, morphological and optical characterization of Ti-doped ZnO nanorod thin film synthesized by spray pyrolysis technique, *Mater. Res. Express.*, 7 (3), 036412.
- [57]. Tseng, Y.C., Lin, Y.J., Chang, H.C., Chen, Y.H., Liu, C.J., Zou, Y.Y., 2012, Effects of Ti content on the optical and structural properties of the Ti-doped ZnO nanoparticles, *J. Lumin.*, 132 (2), 491-494.
- [58]. Neamen, D.A., 2003, Semiconductor physics and devices: basic principles, 3rd ed., McGraw Hill, New York, ISBN: 0-07-232107-5.
- [59]. Vyas, S., 2020, A short review on properties and applications of zinc oxide based thin films and devices, *Johnson Matthey Technol. Rev.*, 64 (20), 202-218.
- [60]. Adachi, H., Wasa, K., 2012, *Thin film and nanomaterials*, Handbook of sputtering technology, In: Wasa K. (ed.), Kanno I. (ed.), Kotera H. (ed.), Chapter 1, William Andrew Publishing, Norwich, ISBN: 978-1-4377-3483-6, 3-39.
- [61]. Seshan, K., 2012, *Scaling and its implications for the integration and design of thin film and processes*, Handbook of thin film deposition, In: Seshan K. (ed.), Chapter 2, William Andrew Publishing, Norwich, ISBN: 978-1-4377-7873-1, 19-40.
- [62]. Ohring, M., 1992, *The materials science*, Academic Press, A division of Harcourt Brace & Company, San Diego, USA, ISBN: 0-12-524-990-X.
- [63]. Mashfegh, A.Z., 2003, PVD growth method: physics and technology, *Proceedings of the international workshop on physics and technology of thin films*, 22 Şubat – 6 Mart 2003 Tahran, Singapore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., ISBN: 981-238-770-6, 28-53.
- [64]. Özgür, Ü., Hofstetter, D., Morkoç H., 2010, ZnO devices and application: a review of current status and future prospects, *Proceedings of the IEEE*, 98 (7), 1255-1268.
- [65]. Norton, D.P., Heo, Y.W., Ivill, M.P., Ip, K., Pearton, S.J., Chisholm, M.F., Steiner, T., 2004, ZnO: growth, doping and processing, *Materials today*, 7 (6), 34-40.
- [66]. Wang, Z.L., 2004, Nanostructures of zinc oxide, *Materials today*, 7 (6), 26-33.
- [67]. Schmidt-Mende, L., MacManus-Driscoll, L., 2007, ZnO – nanostructures, defects and devices, *Materials today*, 10 (5), 40-48.

- [68]. Özgür, Ü., Alivov, Ya.I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M.A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S.-J., Morkoç, H., 2005, A comprehensive review of ZnO materials and devices, *Journal of applied physics*, 98 (4), 11.
- [69]. Park, S.-M., Ikegami, T., Ebihara, K., 2006, Effects of substrate temperature on the properties of Ga-doped ZnO by pulsed laser deposition, *Thin solid films*, 513 (1-2), 90-94.
- [70]. Tynell, T., Yamauchi, H., Karppinen, M., 2013, Atomic layer deposition of Al-doped ZnO thin films, *Journal of vacuum science technology*, 31 (1), 01A109.
- [71]. Gong, H., Hu, J.Q., Ong, C.H., Zhu, F.R., 2006, Nano-crystalline Cu-doped ZnO thin film gas sensor for CO, *Sensors and actuators B: chemical*, 115 (1), 247-251.
- [72]. Vyas, S., Giri, P., Singh, S., Chakrabarti, P., 2015, Comparative study of As-deposited ZnO thin films by thermal evaporation, pulsed laser deposition and RF sputtering methods for electronic and optoelectronic applications, *Journal of Electronic Materials*, 44 (10), 3401-3407.
- [73]. Periasamy, C., Chakrabarti, P., 2011, Tailoring the structural and optoelectronic properties of Al-doped nanocrystalline ZnO thin films, *Journal of electronic materials*, 40 (3), 259-266.
- [74]. Özgür, Ü., Avrutin, V., Morkoç, H., 2018, *Zinc oxide materials and devices grown by molecular beam epitaxy*, Molecular beam epitaxy (second edition), In: Henini M. (ed.), Chapter 16, Elsevier Science Publishing Co. Inc., Amsterdam, ISBN: 978-0-12-812136-8, 343-375.
- [75]. Muslin, E.Y., Munir, B., 2018, *Fabrication of ZnO thin film through chemical preparations*, Emerging solar energy materials, In: Ameen S. (ed.), Akhtar M.S. (ed.), Shin H.-S. (ed.), Chapter 3, IntechOpen Limited, London, ISBN: 978-178923582-1, 45-57.
- [76]. Munchuveni, E., Sathiaraj, T.S., Nyakoty, H., 2017, Synthesis and characterization of zinc oxide thin films for optoelectronic applications, *Heliyon*, 3 (4), e00285.
- [77]. Janotti, A., Van de Walle, C.G., 2009, Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor, *Reports on progress in physics*, 72 (12), 126501.
- [78]. Igasaki, Y., Saito, H., 1991, The effects of deposition rate on the structural and electrical properties of ZnO:Al films deposited on (1120) oriented sapphire substrates, *Journal of applied physics*, 70 (7), 3613-3619.
- [79]. Lau, S.P., Yang, H.Y., Yu, S.F., Li, H.D., Tanemura, M., Okita, T., Hatano, H., Hng, H.H., 2005, Laser action in ZnO nanoneedles selectively grown on silicon and plastic substrates, *Appl Phys. Lett.*, 87 (1), 013104
- [80]. Tsukazaki, A., Ohtomo, A., Yoshida, S., Kawasaki, M., Chia, C.H., Makino, T., Segawa, Y., Koida, T., Chichibu, F., Koinuma, H., 2003, Layer by layer growth of high optical

quality ZnO film on atomically smooth and lattice relaxed ZnO buffer layer, *Appl. Phys. Lett.*, 83 (14), 2784-2786.

- [81]. Johari, S., Muhammad, N.Y., Zakaria, M.R., 2017, Study of zinc oxide thin film characteristics, *EPJ Web of conferences*, 162, 01057.
- [82]. Wu, J.-J., Liu, S.-C., 2002, Low-temperature growth of well-aligned ZnO nanorods by chemical vapor deposition, *Advanced Materials*, 14 (3), 215-218.
- [83]. Samanta, P.K., Patra, S.K., Roy Chaudhuri, P., 2009, Violet emission from flower-like bundle of ZnO nanosheets, *Physica E: low-dimensional systems and nanostructures*, 41 (4), 664-667.
- [84]. Lin, B., Fu, Z., Jia, Y., 2001, Green luminescent center in undoped zinc oxide films deposited on silicon substrates, *Applied physics letters*, 79 (7), 943-945.
- [85]. Rodnyi, P.A., Khodyuk, I.V., 2011, Optical and luminescence properties of zinc oxide, *Optics and spectroscopy*, 111 (5), 776-785.
- [86]. Bagnall, D.M., Chen, Y.F., Zhu, Z., Yao, T., 1997, Optically pumped lasing of ZnO at room temperature, *Applied Physics Letters*, 70 (17), 2230-2232.
- [87]. Ohtomo, A., Kawasaki, M., Sakurai, Yoshida, Y., Y., Koinuma, H., Yu, P., Tang, Z.K., Wong, G.K.L., Segawa, Y., 1998, Room temperature ultraviolet laser emission from ZnO nanocrystal thin films grown by laser MBE, *Materials science and engineering: B*, 54 (1-2), 24-28.
- [88]. Chu, S., Wang, G., Zhou, W., Lin, Y., Chernyak, L., Zhao, J., Kong, J., Li, L., Ren, J., Liu, J., 2011, Electrically pumped waveguide lasing from ZnO nanowires, *Nature nanotechnology*, 6 (8), 506-510.
- [89]. Tian, Y., Ma, X., Jin, L., Yang, D., 2010, Electrically pumped ultraviolet random lasing from ZnO films: compensation between optical gain and light scattering, *Appl. Phys. Lett.*, 97 (25), 251115.
- [90]. Gao, F., Morshed, M.M., Bashir, S.B., Zheng, Y., Shi, Yi., Liu, J., 2015, Electrically pumped random lasing based on Au-ZnO nanowire Schottky junction, *Nanoscale*, 7 (21), 9505-9509.
- [91]. Schmidt-Mende, L., MacManus Driscoll, J.L., 2007, ZnO – nanostructures, defects and devices, *Materials today*, 10 (5), 40-48.
- [92]. Majumder, S.B., Jain, M., Dobal, P.S., Katiyar, R.S., 2003, Investigations on solution derived aluminium doped zinc oxide thin films, *Materials science and engineering: B*, 103 (1), 16-25.
- [93]. Ye, Y.-Z., Lu, H.-L., Geng, Y., Gu, Y.-Z., Xie, Z.-Y., Zhang, Y., Sun, Q.-Q., Ding, S.-J., Zhang, D.W., 2013, Structural, electrical and optical properties of Ti-doped ZnO thin films fabricated by atomic layer deposition, *Nanoscale research letters*, 8 (108), 1-6.

- [94]. Mozammel, M., Ilkhechi, N.N., Ghezelbash, B.G., Abad, S.N.K., 2019, Antibacterial and heavy ion removal properties of La- and Ti-doped ZnO nanoparticles, *Matter. Res. Express*, 6 (8), 085010.
- [95]. Lin S.-S., Huang, J.-L., Lii, D.-F., 2005, Effect of substrate temperature on the properties of T-doped ZnO films by simultaneous rf and dc magnetron sputtering, *Materials chemistry and physics*, 90 (1), 22-30.
- [96]. Liu, W.-S., Hsieh, W.-T., Chen, S.-Y., Huang, C.-S., 2018, Improvement of CIGS solar cells with high performance transparent conducting Ti-doped GaZnO thin films, *Solar energy*, 174, 83-96.
- [97]. Bidier, S.A., Hashim, M.R., Bououdina, M., 2017, Structural and optical characteristics of Ti-doped ZnO nanorods deposited by simple chemical bath deposition, *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, 28 (15), 11178-11185.
- [98]. Callister W.D., Rethwisch, D.G., 2009, *Materials science and engineering: an introduction*, John Wiley & Sons Inc., USA, ISBN: 978-0-470-41997-7.
- [99]. Hsu. S.-F., Weng, M.-H., Chou, J.-H., Fang, C.-H., Yang R.-Y., 2016, Effect on the Ti-target arc current on the properties of T-doped ZnO thin films prepared by dual-target cathodic arc plasma deposition, *Ceramics International*, 42 (13), 14438-14442.
- [100]. Shewale, P.S., Yu, Y.S., 2016, H₂S gas sensing properties of undoped and Ti doped ZnO thin films deposited by chemical spray pyrolysis, *Journal of alloys and compounds*, 684, 428-437.
- [101]. Darmadi, I., Taufik, A., Saleh, R., 2020, Analysis of optical and structural properties of Ti_doped ZnO nanoparticles synthesized by co-precipitation method, *Journal of physics: conference series*, 1442 (1), 012021.
- [102]. Lee, M.L., Wang, J.C., Kao, C.H., Chen, H., Lin, C.Y., Chang, C.W., Mahanty, R.K., Lin, C.F., Chang, K.M., 2018, Comparison of ZnO and Ti-doped ZnO sensing membrane applied in electrolyte-insulator-semiconductor structure, *Ceramics international*, 44 (6), 6081-6088.
- [103]. Wang, F.-H., Chao, J.-C., Liu, H.-W., Liu, F.-J., 2017, Physical properties of TiO₂-doped zinc oxide thin films: influence of plasma treatment in H₂ and/or Ar gas ambient, *Vacuum*, 140, 155-160.
- [104]. Stuart, R.V., 1983, *Vacuum technology, thin films, and sputtering*, Academic Press Inc., New York, ISBN: 0-12-674780-6.
- [105]. Hughes, M., 2014, *What is sputtering?* Magnetron sputtering, <http://www.semicore.com/what-is-sputtering>, [Ziyaret tarihi: 25 Nisan 2021].
- [106]. Epp, J., 2016, *X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization*, Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods, In: Hübschen, G. (ed.), Altpeter, I. (ed.), Tschunucky, R. (ed.), Herrmann, H.-G. (ed.), Chapter 4, Woodhead Publishing, Duxford, UK, ISBN: 978-0-08-100040, 81-124.

- [107]. Spiess, L., Teichert, G., Schwarzer, R., Behnken, R., Genzel, C., 2019, *Moderne Röntgenbeugung*, Vieweg+ Teubner, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-8232-5.
- [108]. Kageshimam M., Jensenius, H., Dienwiebel, M., Nakayama, Y., Tokumoto, H., Jarvis, S.P., Oosterkamp, T.H., 2002, Noncontact atomic force microscopy in liquid environment with quartz tuning fork and carbon nanotube probe, *Applied surface science*, 188 (3-4), 440-444
- [109]. Hendrych, A., Kubinek, R., Zhukov, A.V., 2007, The magnetic force microscopy and its capability for nano-magnetic studies – the short compendium, *Modern research and educational topics in microscopy*, 2, 805-811.
- [110]. Khan. M.K., Wang. Q.Y., Fitzpatrick, M.E., 2016, *Atomic force microscopy (AFM) for materials characterization*, Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods, In: Hübschen, G. (ed.), Altpeter, I. (ed.), Tschunucky, R. (ed.), Herrmann, H.-G. (ed.), Chapter 1, Woodhead Publishing, Duxford, UK, ISBN: 978-0-08-100040, 1-13.
- [111]. Raja, P.M.V., Baron A.R., 2021, *UV-Visible Spectroscopy*, <https://chem.libretexts.org/@go/page/55881>, [Ziyaret tarihi: 26 Nisan 2021].
- [112]. Perkampus, H.-H., 1992, *UV-Vis spectroscopy and its applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, ISBN: 978-3-642-77479-9.
- [113]. Walter. T., 2018, *Admittance spectroscopy*, Capacitance and spectroscopy of semiconductors, In: Li, J.V. and Ferrari, G. (ed.), Chapter 2, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., Singapore, ISBN: 978-981-4774-54-3, 25-84.
- [114]. Pautrat, J.L., Katircioglu, B., Magnea, M., Bensahel, D., Pfister, J.C., Revoil, L., 1980, Admittance spectroscopy: a powerful characterization technique for semiconductor crystals – application to ZnTe, *Solid state electronics*, 23 (11), 1159-1169.
- [115]. Bairam, C., Yalçın, Y., Efkere, H.İ., Çokduygular, E., Çetinkaya, Ç., Kınacı, B., Özçelik, S., 2021, Structural, morphological, optical and electrical properties of the Ti doped-ZnO (TZO) thin film prepared by sputter technique, *Physics B: Condensed Matter*, 616, 413126.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Chousein Bairam
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	Tarih girmek için tıklayın veya dokununuz.
Uyruğu	☐ T.C. ☒ Diğer: Yunan
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	13.09.2018

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Genel Fizik

Makale ve Bildiriler	
Bairam, C., Yalçın, Y., Efker, H.İ., Çokduygulular, E., Çetinkaya, Ç., Kınacı, B., Özçelik, S., 2021, Structural, morphological, optical and electrical properties of the Ti doped-ZnO (TZO) thin film prepared by sputter technique, <i>Physics B: Condensed Matter</i> , 616, 413126.	
Bairam, C., Kınacı, B., 2018, Efficiency analysis of CdTe/CdS solar cell with back surface field layer, <i>Turkish Physical Society 34th international Physics congress</i> , 5-9 September, Bodrum, Turkey	