

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ag: ZnO FOTOSENSÖRLERİN ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğrul YAVUZ

FİZİK ANABİLİM DALI

FİZİK PROGRAMI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Burhan COŞKUN

Eşdanışman: Doç. Dr. Tarık ASAR

TEMMUZ 2019

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ag: ZnO FOTOSENSÖRLERİN ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğrul YAVUZ
(1128201004)

FİZİK ANABİLİM DALI

FİZİK PROGRAMI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Burhan COŞKUN

Eşdanışman: Doç. Dr. Tarık ASAR

TEMMUZ 2019

Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 1128201004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **TUĞRUL YAVUZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**Ag:ZnO FOTSENSÖRLERİN ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Burhan COŞKUN**
Kırklareli Üniversitesi

.....>B. Coşkun

Eş Danışman : **Doç. Dr. Tarık ASAR**
Gazi Üniversitesi

.....T. Asar

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Serpil AKÖZCAN**
Kırklareli Üniversitesi

.....S. Aközcan

Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU
Fırat Üniversitesi

.....F. Yakuphanoglu

Teslim Tarihi : 02 Temmuz 2019
Savunma Tarihi : 19 Temmuz 2019



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarım sürecinde gösterdikleri destek nedeniyle değerli danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Burhan COŞKUN ve Doç. Dr. Tarık ASAR' a;

Çalışmam boyunca katkılarını esirgemeyen Fizik Bölümünün değerli öğretim üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Mümin Koç ve Dr. Berna Akgenç 'e;

Numunelerimin hazırlanması ve deneysel ölçümleri aşamasında yardımlarını esirgemeyen Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünden Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU ve Dr. Ayşegül DERE hocalarıma;

Ve son olarak süreç boyunca bana en büyük desteği veren sevgili eşim Özlem YAVUZ'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma, Kırklareli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından, KLÜBAP 136 No'lu Proje kapsamında desteklenmiştir.

TEMMUZ 2019

Tuğrul YAVUZ



İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----------|
| ÖNSÖZ..... | v |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ..... | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xi |
| ÇİZELGE DİZİNİ | xiii |
| ÖZET | xv |
| SUMMARY | xvii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. TEORİK BİLGİLER..... | 5 |
| 2.1. Band Teorisi..... | 5 |
| 2.2. Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması | 6 |
| 2.2.1. Katkısız Yarıiletkenler | 7 |
| 2.2.2. Katkılı Yarıiletkenler | 8 |
| 2.2.2.1. N-Tipi Yarıiletkenler | 8 |
| 2.2.2.2. P-Tipi Yarıiletkenler | 9 |
| 2.3. Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik..... | 9 |
| 2.4. Yarıiletkenlerde Optik Soğurma | 10 |
| 2.5. ZnO Bileşiğinin Özellikleri..... | 10 |
| 2.5.1. ZnO Nanopartiküllerinin Özellikleri..... | 12 |
| 2.5.2. ZnO Nanoyapılarının Kullanım Alanları | 12 |
| 2.5.3. Sol-Jel Yöntemi..... | 13 |
| 2.5.4. ZnO Filmlerinin Elde Edilmesi..... | 16 |
| 2.5.5. ZnO Filmlerinin Optik Özellikleri | 20 |
| 2.5.6. ZnO Filmlerinin Elektriksel Özellikleri..... | 21 |
| 2.3 Ag'nin özellikleri..... | 22 |
| 3. MATERYAL VE METOD..... | 23 |
| 3.1. Deneysel İşlemler | 23 |
| 3.1.1. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO Filmlerin Optik Özellik Analizi | 24 |
| 3.1.2. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO Filmlerin Yüzey Özellik Analizi | 24 |
| 3.1.3. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO Filmlerin Elektriksel Özellik Analizi | 25 |
| 4. ÖLÇÜM SONUÇLARI | 27 |
| 4.1. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO İnce Film Numunelerinin Yüzey Analiz Sonuçları | 27 |
| 4.2. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO İnce Film Numunelerinin Optik Analiz Sonuçları | 28 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO İnce Filmlerin Elektriksel Ölçüm Sonuçları..... | 33 |
| 4.3.1 Al/Ag: ZnO/p-Si/Al Diyotların Foto Akım-Zaman (I-t) Karakteristikleri | 33 |
| 4.3.2. Al/Ag: ZnO/p-Si/Al Diyotların C-V ve G/ω-V karakterizasyonları | 37 |
| 4.3.3. Al/Ag: ZnO/p-Si/Al Diyotların Foto Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri | 49 |
| 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA | 57 |
| KAYNAKLAR | 59 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 65 |
| | 65 |



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

nm: Nanometre

μm : Mikrometre

I_0 : Işık şiddeti

λ : Dalga boyu

P: Özdirenç

σ : İletkenlik

ν : Frekans

C_m : Ölçülen kapasitans

G_m : İletkenlik

$\omega = 2\pi$: Frekans

$C_{i\text{ yalıtkan}}$: Arayüzey katmanının (ZnO) kapasitans değeri

A: Düzeltici kontak (Au) alanı

d: Yalıtkan katman kalınlığı

ϵ_0 : ($=8.85 \times 10^{-14}$) Fcm^{-1}) boşluğun elektriksel geçirgenliği

ϵ'' : Dielektrik Kayıp

I_0 : Ters doyum akımı

I_{Rs} : Seri direnç boyunca voltaj düşüşü

q: Elektronik yük

k: Boltzman sabiti

n: İdealite faktörü

T: Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık

A: Doğrultucu kontak alanı

A^* : ZnO için etkin Richardson sabiti

Φ_B : Sıfır ileri denetlemede bariyer yüksekliği ZnO için A^* değeri

m_e : ZnO için etkin kütle

α : Sıralama empirik faktörü

R_s : Seri direnç

n: İdealite faktörü

Φ_b : Şotki bariyer yüksekliği

R_{sh} : Paralel direnç

R_s : Seri direnç R_i Yapı direnci

V_i : Uygulanan ileri denetleme voltajı

α : Soğurma katsayısı,

$h\nu$: Foton enerjisi

A: Sabit

Sol-Jel (Malzeme Üretim Tekniği)

ZnO (Çinko Oksit)

AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu)

SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

XRD (X Işınları Kırınımı)

CVD (Kimyasal buhar kaplama)

SP (Püskürtme yöntemi (spray-pyrolysis))

VE (Vakumlu buharlaştırma yöntemi (vacuum evaporation))

UV-VIS (Ultraviyole-VISIBLE (Mor ötesi görünür bölge))

Ag: ZnO (Gümüş katkılı ZnO)

I-V (Akım- Voltaj)

C-V (Kapasitans- Voltaj)

I-t (Akım-Zaman)

UV (Morötesi ışınlar)

p-Si (P-tipi Si Tabaka)

E_g (Yasak Band)

E_v (Değerlik Bandı)

E_c (İletim Bandı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 3.1: Numunelerin hazırlandığı deney düzeneği..... | 23 |
| Şekil 3.2: Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO diyotlarının U-V ölçümleri için kullanılan UV-VIS spektrofotometre cihazı | 24 |
| Şekil 3.3: Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO diyotlarının yüzey ölçümleri için kullanılan AFM cihazı..... | 25 |
| Şekil 3.4: Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO diyotlarının I-V, C-V ve I-t ölçümleri için kullanılan deney düzeneği..... | 26 |
| Şekil 4.1: Katkısız ZnO ince filmin AFM görüntüsü (a) 5x5 µm, (b) 40x40 µm, % 0,5 Ag katkılı ZnO ince filmin AFM görüntüsü (c) 5x5 µm (d) 40x40 µm, % 2 Ag katkılı ZnO ince filmin AFM görüntüsü (e) 5x5 µm, (f) 40x40 µm..... | 27 |
| Şekil 4.2: Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin Absorbans-Dalga boyu grafiği | 29 |
| Şekil 4.3: Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin Geçirgenlik-Dalga boyu grafiği | 30 |
| Şekil 4.4: Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin Yansıma (%) -Dalga boyu grafiği | 31 |
| Şekil 4.6: Katkısız Al/Ag: ZnO/p-Si/Al diyotlarının Foto Akım- Zaman (I-t) karakteristikleri | 34 |
| Şekil 4.7: % 0,5 Ag katkılı Al/Ag: ZnO/p-Si/Al diyotlarının Akım - Zaman (I-t) karakteristikleri | 35 |
| Şekil 4.8: % 2 Ag katkılı Al/Ag: ZnO/p-Si/Al diyotlarının Akım - Zaman (i-t) karakteristikleri | 36 |
| Şekil 4.9: Katkılanmamış ZnO ince filme ait Kapasitans- Voltaj grafiği..... | 38 |
| Şekil 4.10: % 0,5 Ag katkılı ZnO ince filme ait Kapasitans- Voltaj grafiği..... | 38 |
| Şekil 4.11: % 2 Ag katkılı ZnO ince filme ait Kapasitans- Voltaj gafiği..... | 39 |
| Şekil 4.12: Katkılanmamış ZnO ince filme ait İletkenlik – Voltaj grafiği | 40 |
| Şekil 4.13: % 0,5 Ag katkılanmış ZnO ince filme ait İletkenlik- Voltaj grafiği | 40 |
| Şekil 4.14: % 2 Ag katkılanmış ZnO ince filme ait İletkenlik- Voltaj grafiği | 41 |
| Şekil 4.15: Katkısız ZnO diyotunun Dielektrik Sabiti (ϵ') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik | 43 |
| Şekil 4.16: % 0,5 Ag katkılı ZnO diyotunun Dielektrik Sabiti (ϵ') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik | 43 |
| Şekil 4.17: % 2 Ag katkılı ZnO diyotunun Dielektrik Sabiti (ϵ') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik | 44 |
| Şekil 4.18: Katkısız ZnO diyotunun Dielektrik Kayıp (ϵ'') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik | 45 |
| Şekil 4.19: % 0,5 Ag katkılı ZnO diyotunun Dielektrik Kayıp (ϵ'') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik | 45 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.20: % 2 Ag katkılı ZnO diyotunun Dielektrik Kayıp (ϵ'') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik | 46 |
| Şekil 4.21: Katkısız ZnO diyotunun $\tan\delta$ değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik | 47 |
| Şekil 4.22: % 0,5 Ag katkılı ZnO diyotunun $\tan\delta$ değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik | 47 |
| Şekil 4.23: % 2 Ag katkılı ZnO diyotunun $\tan\delta$ değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik | 48 |
| Şekil 4.24: Al/Ag:ZnO/p-Si/Al diyotların Akım- Voltaj (I-V) karakteristikleri | 49 |
| Şekil 4.25: Diyotlara ait $dV/d\ln(I)-I(A)$ grafiği..... | 52 |
| Şekil 4.26: Diyotlara ait $H(I)(V)-I(A)$ grafiği..... | 53 |
| Şekil 4.27: Diyotlara ait R_i-V grafiği..... | 54 |
| Şekil 4.28: Diyotlara ait $F(V)-V$ grafiği | 55 |

ÇİZELGE DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Çizelge 1: Yüzeysel Ölçüm Sonuçları..... | 28 |
| Çizelge 2: Katkısız ve Ag Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yasak Enerji Değerleri..... | 32 |
| Çizelge 3: Al/Ag: ZnO/p-Si/Al Diyotların FotoAkım-Zaman(I-t) Karakteristikleri. | 37 |
| Çizelge 4: Diyotların Foto Akım-Voltaj (I-V) Sonuçları | 56 |





Ag: ZnO FOTOSENSÖRLERİN ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada, katkısız ZnO, % 0,5 Ag katkılı ZnO ile % 2 Ag katkılı ZnO ince filmler Sol-jel metoduyla Si alttaşlar üzerine oda sıcaklığında büyütüldü. Elde edilen ZnO ince filmlerin yapısal, elektriksel ve optiksel özelliklerine Ag katkısının etkisi araştırıldı. Numunelerin yüzey özelliği Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile incelendi. AFM görüntüleri, ince filmlerin nanofiber yapıda olduğunu ve nanofiberlerin alttaşın üzerinde homojen bir şekilde depolandığını gösterdi. Büyütülen ince film numunelerinin elektriksel özelliklerinin incelenmesi amacıyla, Akım-Voltaj (I-V), Kapasitans-Voltaj (C-V) ve Akım-Zaman (I-t) ölçümleri farklı ışık şiddetleri altındaki aydınlatmalarda yapıldı ve numunelerin fotoiletken olduğu görüldü. Hazırlanan ince filmlerin UV ölçümleri yapılarak Geçirgenlik, Soğurma, Yansıma ve Yasak Enerji Aralığı (E_g) grafikleri çizildi. Her üç numunenin de görünür bölgede geçirgen özelliği, 400 nm dalga boyundan küçük dalga boylarında ise soğurma özelliği gösterdiği, yansıma sınırının nano yapıya bağlı olarak daha yüksek dalga boylarına kaydığı belirlendi. Numunelerin geçirgenliği, UV bölgede düşük, görünür bölgede ise % 78-88 Aralığında yüksek olduğu değerlendirildi.

Anahtar Kelimeler: Ag Katkılı ZnO, Elektriksel Özellikler, Optiksel Özellikler, ZnO



FABRICATION AND ELECTRICAL CHARACTERISATION OF Ag: ZnO PHOTODETECTORS

SUMMARY

In this work, undoped ZnO, % 0,5 Ag doped ZnO and 2% Ag doped ZnO thin films deposited on Si substrates. Films were produced by Sol-Gel method at room temperature. Ag effect on structural, electrical and optical properties on ZnO thin films were studied. Surface properties of the samples were assessed by using Atomic Force Microscopy (AFM). AFM results revealed that thin films are in nanowire like structure that nanowires spread homogeneously on the substrate. To investigate the electrical properties of the produced thin films, Current – Voltage (I-V), Capacitance – Voltage (C-V), Current – Time (I-t) measurements were made in different illumination intensities. It was seen that samples show photoconductive properties. After the UV investigation of thin films, permittivity, absorbance, reflectivity and band gap energies were calculated. Each sample shows permittivity properties in the visible region; samples show absorption properties in the region where the applied wavelength is smaller than 400nm. Reflecting boundaries were shift to higher boundaries with increased dopant effect. The transmittance of samples was found low in the UV region, but it shows higher characteristics which is between %78 and %88 in the visible region.

Keywords: Ag Doped ZnO, Electrical Properties, Optical Properties, ZnO



1. GİRİŞ

Modern toplumlarda kullanım potansiyelinin fazla olması nedeniyle yarıiletkenlerin büyütülmesi ve geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yarıiletken üretimi hem Kimya hem Fizik bilimlerini beraber çalışmaya itmiştir. Yarıiletken ince filmler, farklı üretim metodlarının kullanılmasıyla filmle kaplanacak malzemenin taneciklerinin filmi destekleyerek filmin oluşmasını sağlayan bir altlık üzerine kümelenmesi ile ince bir tabaka halinde oluşturulan yarıiletken formlar olarak tanımlanmaktadır [1] [2].

1945-1950'lerden beri bu konu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. İlk olarak basit laboratuvar çalışmaları ve daha sonra farklı tekniklerin geliştirilmesi ile detaylı yöntemler denenmiştir. İnce film elde edilmesinde ilk yöntem olarak elektroliz yöntemi kullanılmıştır. Teknolojinin daha fazla gelişmesi ile birlikte yarıiletken filmlerin büyütülmesinde kimyasal buharla biriktirme yöntemi (chemical vapour deposition; CVD), vakumlu buharlaştırma yöntemi (vacuum evaporation, VE) püskürtme yöntemi (spray-pyrolysis, SP), kullanılmıştır [3].

Yarıiletken ince filmlerin yapısal ve yüzey özellikleri, elektrik ve optik düzenleri kullanılacağı cihaz performansını büyük oranda etkilemektedir. Malzemenin bu özellikleri üretim detaylarına bağlı olarak değişir. Filmlerin büyütülmesinde kimyasal buhar biriktirme, kimyasal banyo, sol-jel, kimyasal püskürtme, gibi birçok yöntem kullanılmaktadır [4] [5] [6].

Günümüze kadar ZnO üzerinde birçok çalışma yapılmıştır ve bu çalışmalar ZnO'nun en ilgi duyulan yarıiletken olduğunu göstermiştir. ZnO, şeffaf ve hekzagonal wurtzite yapıda kristalleşen bir malzemedir. ZnO ile ilgili çalışmalar 1930'lu yıllarda başlamış, 1970'lerde de ilgili çalışmaların sayısı en üst sayılara ulaşmıştır [5].

ZnO üzerinde yapılan araştırmalar 1990'larda tekrar artmaya başlamıştır. ZnO'nun tümüyle büyütülmesinde vakum, erime sıcaklığı ve buhar durumunun izlenmesi gereklidir. ZnO ile ilgili çalışmalarda ilk deneylerde filmlerin elde edilmesinde magnetron püskürtme tekniği sonrasında günümüzde de kullanılan pratik teknikler geliştirilmiştir. Ayrıca kimyasal buhar depolama yönteminin yaygınlaşması ile de ZnO polikristal formda elde edilmeye başlanmıştır.

Arşiv incelemelerine göre, özellikle son yıllarda ZnO filmlerin fiziksel özelliklerini değiştirmek ve geliştirmek amacı ile katkı elementi eklenmiş ve farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle tercih edilen elementlerden bazıları Ag, Al, Co, Fe, In, Ir, ve Mn olarak verilebilir [6].

Chena ve arkadaşları tarafından 2012 senesinde yapılan çalışmada, bazı optoelektronik cihazlarda ve özellikle yarıiletken ince film güneş hücrelerinde değerlendirilebilecek katkısız veya Ag katkılı ZnO filmlerini basit ve verimli bir teknik olan Sol-jel tekniği ile büyütme ve filmlerin yüzeysel, optik ve yapısal niteliklerine Ag etkisini incelemiştir. Ve zamanla, katkısız ZnO filmlerine farklı oranlarda Ag (%1, 3, 5) ekleyerek filmlerin optik band aralığı verimlerini arttırmayı amaç edinmiştir [7].

Sara ve arkadaşları Ag katkılı ve katkısız ZnO ince filmlerini Sol-jel yöntemi ile büyütmüş ve numunelerin elektriksel ve morfolojik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada, UV analizlerine göre ZnO ince filmlerin enerji band genişliklerinin Ag katkılanması ile düştüğünü, oluşturulan diyotların I-V ölçümlerinde doğrultucu kontak özellik sergilediğini görmüşlerdir [8].

Ahmet ve arkadaşları, Ag ile katkılanmış ZnO filmleri, değişik katkılama oranı ile sol-jel döndürmeli kaplama metodu ile hazırlamış, filmlerin morfolojik özelliklerini X-ışını difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazları ile incelemiştir. Katkılanmanın sonucunda kristallenmenin arttığını gözlemlemiştir [9].

Xu ve arkadaşları, Ag katkılı ZnO ince filmlerin sol-jel yöntemiyle hazırlanıp ince filmlerin tavlama süresinin numunelerin optik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, tüm numunelerin, bir wurtzite yapısına sahip saf ZnO fazı olduğunu, tavlama süresi arttıkça ZnO taneciklerinin büyüdüğünü, tavlamanın band aralığı açısından bir değişikliğe yol açmadığını belirtmişlerdir [10].

Rohintin ve arkadaşları, Ag katkılı ve katkısız ZnO nanopartiküllerinin iletkenlik, optik ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş olmakla birlikte katkılanmanın, numunelerin kristal boyutlandırmasındaki farklılıkları XRD sonuçları ile uyumlu bulmuşlardır. Ayrıca katkılı ZnO ince filmlerin band aralıklarında düşme olduğu gözlenmiştir [11].

Bu çalışmadaki amaç Sol-jel ince film büyütme tekniğiyle oda sıcaklığında üretilen katkısız ve % 0,5 ile % 2 Ag katkılı ZnO ince filmlerin optiksel (UV), elektriksel (I-V, C-V, I-t) ve yüzeysel morfolojik (AFM) zelliklerini incelemektir.





2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Band Teorisi

Metaller ile ilgili geliştirilen serbest elektron modeli çoğu özellikleri açığa çıkarmasının yanında metallerle, yarı iletkenler ve yalıtkanlar arasındaki farklı noktaları, metallerdeki iletim sağlayan elektronlar ile atomların değerlik elektronları arasındaki ilişkiyi, Hall katsayısının pozitif değerleri aldığı bazı durumlar gibi çoğu durumu açıklamada yetersiz olmuştur. Bu yüzden daha ayrıntılı bir modelin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuş ve ortaya atılan band teorisi ile bu cevapsız kısımlar giderilmeye çalışılmıştır. Yarıiletkende, eğer bandlar kısmen elektronlarla kapatılmış ise iletken; band aralığı dar, bağlanma bandı dolu ve iletkenlik bandı boş ise yarı iletken; bağlanma bandı dolu, iletkenlik bandı boş fakat band aralığı oldukça geniş ise yalıtkan olarak tanımlanmıştır [1] [2] [3].

Katılarda enerji bandları arasındaki fiziksel ilişkiler kuantum teorisiyle açıklanabilmektedir. Bu teoriye göre yalıtılmış atomlarda elektronların enerjisi kesikli olarak değişebilir. Pauli prensibine göre atomun her enerji düzeyine en fazla iki ters spinlerle yönelmiş elektronlar yerleşebilir.

Değerlik elektronlarından oluşmuş enerji bandına değerlik bandı ismi verilmektedir. Yarıiletken malzeme elde edildiğinde ve atomlar birbirine çok yaklaştığında (yaklaşık 10^{-8} cm) komşu atomları kuvvetli elektrik alanının etkisiyle değerlik bandına ayrılır. Atomlardaki değerlik elektronlarının uyarılma seviyelerinden oluşan band serbest band veya iletim bandı olarak isimlendirilir. İletim ile değerlik bandları arasında E_g yasak band bulunmaktadır. E_c iletim bandındaki elektronların en düşük enerjisidir. Bu enerji seviyesine iletim bandının minimumu denir. E_v ise değerlik bandında bulunan elektronların en yüksek enerjisidir ve bu enerji düzeyi değerlik bandın maksimumu olarak isimlendirilir. İletim bandının en alt ve değerlik bandının en üst enerjileri arasındaki fark miktarı ($E_c - E_v = E_g$) yarıiletkenin yasak enerji band aralığını belirler. Bu aralık yarıiletkenlerin kimyasal bağ cinsi ve atomların özelliği ile belirlenir. Değişik yarıiletkenlerin yasak band aralığı 0,1eV'dan 5 eV'a kadar çıkabilir.

Yarıiletkenlerin yasak band aralığı sıcaklık arttıkça değişime uğrar. Bunun nedeni kristallerdeki atomların titreşim genliğinin ve atomların arasındaki uzaklığın sıcaklığa bağlı olarak değişmesidir.

Herhangi bir atomun değerlik bandındaki elektronların hareket yörüngesinden kopartılarak iletkenlik bandına geçiş yapması için, bu iki band arasındaki engel olan yasak bandı aşması gerekir. Yarıiletkenlerdeki değerlik bandında bulunan elektronlar gerilim, ısı ve ışık gibi etkilerle iletkenlik bandına geçiş yapmaktadırlar. Elektronun geçiş yapması ile birlikte değerlik bandında elektron eksikliği oluşur. Bir dış kaynaklı elektrik alan ya da manyetik alan uygulandığında, bu boşluk kısımlar pozitif yüklü gibi karakterize olurlar. Bir yarıiletkende elektrik akımı, iletkenlik bandı seviyesinde bulunan elektronların hareketi ile değerlik bandında bulunan boş yapının hareketlerinin toplamı olarak ifade edilmektedir [12].

2.2. Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması

Katılar elektriksel özelliklerine bakılarak yalıtkanlar, yarıiletkenler ve metaller olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Enerji band teorisi incelendiğinde valans bandı tam olarak dolu olan ve iletim bandı tamamen boş olan katılar “yalıtkan” olarak adlandırılmaktadır. Eğer valans bandı yarı dolu ise bu katılara “metal” denmektedir. Valans ile iletim bandları arasındaki yasak enerji düzeyi yalıtkanlarda olduğu gibi geniş olmazsa bu katılar yarıiletken özelliktedir. Yarıiletkenler düşük sıcaklıklarda yalıtkanlık eğilimi gösterebilmektedir. Mutlak sıfır sıcaklıkta ($T=0$ K) ise yalıtkan gibi davranmaktadır [3].

Yarıiletken teknolojisinin bugün olduğu gibi gelecekte de önemli teknolojilerden birisi olacağı öngörülmektedir. Otomobillerin panel aydınlatmalarında, cep telefonlarının ekranlarında, trafik ışığı sistemlerinde ve işaretleme cihazlarında yarıiletken diyotlar kullanılmaktadır. Diğer yandan sensörlü algılama sistemlerinde, yangın ikaz sistemlerinin gaz analizinde, sağlık alanında üretilen cihazlarda, hızlı ve doğru sıcaklık ölçüm aletlerinde de kullanılmaktadır. Askeri alanda hedef belirleme sistemlerinde, gece görüşü sağlayan cihazlarda yarıiletkenler kullanılmaktadır. Ülkelerin en önemli ihtiyaç kalemlerinden biri olan yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılması bakımından yarıiletken malzemeler geleceğin vazgeçilmez malzeme gruplarından birisi olacaktır [13].

Yarıiletkenler has olanlar ve bileşik olanlar olmak üzere iki başlık altında gruplandırılmıştır. Periyodik tablonun IV. Grubunda bulunan elementlerden meydana gelenler has yarıiletkenlerdir. Bileşik yarıiletkenler ise III-V veya II-VI gruplarında bulunan elementlerden oluşmaktadır. III-V bileşikleri periyodik tabloda üç ve beş grup

elementlerinin birleşmesiyle elde edilmektedir. Bu gruba GaAs, GaP, InSb ve InAs örnekleri dâhil olmaktadır. III-V bileşikleri kübik yapıda kristallenmektedir ve bağlanma şekilleri de ağırlıklı olarak kovalent bağ ile olmaktadır. Periyodik cetvelin II-B ve VI-A gruplarında bulunan değişik elementlerden oluşan II- VI grup yarıiletken bileşiklerin elektronegatifliklerindeki farklılıklardan dolayı bağlanma şekilleri iyonik veya kovalent olmaktadır. Bu bileşikler hem kübik hem de hekzagonal yapıda kristallenebilmektedir. Bu grubun bileşikleri arasında ZnO, CdS, CdO ve ZnS örnekleri bulunmaktadır. Alaşımlardan oluşan yarıiletkenler bir bileşiğe belirli miktarda elementin katkılanmasıyla oluşmaktadır. Üçlü ya da dörtlü alaşım ürünü yarıiletkenler olarak ifade edilmektedirler. Alaşım yarıiletkenlerde band morfolojisi ve örgü sabiti altyapısını oluşturan ikili yarıiletkenden daha farklı olmaktadır. Bunlara örnek $Al_xGa_{1-x}As$ ve $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ verilebilir [1].

2.2.1. Katkısız Yarıiletkenler

Yapısında büyük miktarda safsızlık veya örgü kusurları bulunmayan bir yarıiletken malzeme asal yarıiletken olarak tanımlanır. Böyle bir yarıiletkende, mutlak sıfır sıcaklıkta ($T=0$ K) valans bandı elektronlarla dolu olup iletkenlik bandında serbest elektronlar bulunmamaktadır. Sıcaklık arttıkça kırılmış valans bağların sayısı artar ve bu nedenle serbest elektronların ve deşiklerin konsantrasyonu artar. Katkısız yarıiletkenlerde iletkenlik bandındaki elektronların yoğunluğu, valans bandındaki deşiklerin yoğunluğuna eşittir. Çünkü bir elektron termal uyarma sonucu geride bir deşik bırakarak iletkenlik bandına geçer. Bu malzemelerde elektrik alan ve termal enerji ile uyarılan elektronlar yasak enerji aralığını atlayarak iletkenlik bandına geçerler ve böylelikle iletimi sağlarlar. Asal yarıiletkende yasak band genişliği (E_g) elektron-deşik çiftlerin aktivasyon enerjisini karakterize eder.

Katkısız yarıiletkende taşıyıcıların meydana gelmesi, kimyasal bağların kopması ve eşit sayılı elektron ve deşiklerin oluşumuna bağlıdır. Bu nedenle katkısız yarıiletkende Fermi seviyesi enerjisinin enerji band diyagramındaki yeri, elektronların iletkenlik bandındaki ve deşiklerin valans bandındaki konsantrasyonlarının eşitliğinden bulunur. Yarıiletkenlerin çoğunda, sıcaklık arttıkça yasak enerji aralığı lineer olarak küçülmektedir [4].

2.2.2. Katkılı Yarıiletkenler

Katkılı yarıiletkenlerde elemente bağlı olarak yükü iletim bandındaki elektronlar ya da değerlik bandındaki boşluklar taşır. Has bir yarıiletken incelendiğinde elektron ve boşluk yoğunluğunun birbirine eşit olduğu söylenebilir. Bir yarıiletken uygun katkı elementleri ile katkılama prosesine tabi tutulursa yükü boşluklar veya elektronlar taşır. Yarıiletkenler n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Has yarıiletken içerisine V. grup elementi katkılanırsa n-tipi yarıiletken meydana gelirken, III. grup elementi katkılanırsa p-tipi yarıiletken meydana gelmektedir [14].

Si doğada bol bulunan bir elementtir ve özellikleri iyi derecede bilinmektedir. Si katkılanarak hem n-tipi hem de p-tipi yarıiletken olarak üretilebilir. Günümüzde yarıiletken teknolojisinin vazgeçilmezi olan Si, birçok cihazın (işlemciler, flaş bellekler, güneş hücreleri) temel bileşenidir. Bu sebepten dolayı n-tipi ZnO ile heteroeklem meydana getirmek için p-tipi Si kullanılmıştır [5]

2.2.2.1. N-Tipi Yarıiletkenler

Saydam iletken oksit grubuna ait olan ZnO, II-VI grup bileşiği olup, yüksek elektriksel iletkenliğe ve oda sıcaklığında yaklaşık 3,2 eV' luk yasak enerji aralığına sahip direkt band geçişli n-tipi yarıiletkenidir [7].

Has yarıiletken olan Si ve germanyum kristallerine eğer katkı atomları katkılanırsa bu yapıların özelliklerinde değişme meydana gelir. Si ve germanyum elementleri elmas yapı da kristalleşir. Her atom komşu dört atomla kovalent bağlıdır ve değerliği dördür. Elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğundan fazla olursa bu tip yarıiletkenler n-tipi yarıiletkenler olarak adlandırılır [13].

Katkı atomu beş değerlik elektronuna sahiptir. 4 kovalent bağ vardır. Fazladan 1 elektronun herhangi bir bağla ilişkisi yoktur. Fazladan olan bu elektron katkı atomuna gevşek bir şekilde bağlıdır ve yeni meydana gelen n-tipi yarıiletken içerisinde hareket serbestliğine sahip olmaktadır. Sonuç olarak oda sıcaklığında iletkenlik bandında çok sayıda elektron oluşmakta ve malzemenin elektriksel iletkenliği önemli ölçüde artmaktadır [3] [15].

2.2.2.2. P-Tipi Yarıiletkenler

p-tipi yarıiletkenler, germanyum ya da Si malzemelerine üç değerlik elektronu olan katkı atomlarının katkılanmasıyla oluşturulmaktadır. En çok kullanılan elementler bor (B), galyum (Ga) ve indiyum (In) elementleridir. İlave edilen katkı atomunda 3 değerlik elektronu bulunduğundan dolayı oluşturulmak istenen yapıda kovalent bağları tamamlamak için elektron sayısı yeterli değildir. Sonuç olarak boşluk oluşur. Bu boşluk pozitif yüklüdür. Ortaya çıkan bu boşluğun serbest elektron olma eğilimi de vardır. İlave edilen katkı atomlarına alıcı (akseptör) adı verilmektedir [16].

Katkılama işlemi tamamlandığında akseptörün enerji seviyesinin valans bandının biraz üstünde olduğu görülmektedir. Akseptörün enerji seviyesi akseptör civarında bir boşluk yakalayabilmesi için gerekli enerjiye eşit olmaktadır. Bir elektron iletkenlik bandından boşluğun bulunduğu yeri dolduracak şekilde uyarıldığında boşluk valans (değerlik) bandının tepesine gelmekte ve serbest bir taşıyıcı haline dönüşmektedir. Sonuç olarak oda sıcaklığında değerlik bandında çok sayıda boşluk oluşmakta ve malzemenin elektriksel iletkenliği artmaktadır [15].

2.3. Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik

Saydam iletken oksit yarıiletken filmler optik ve elektriksel özelliklerinin yüksek olmasından dolayı ilgi çeken ve son yıllarda yoğun bir şekilde çalışılan malzemeler sınıfına girmiştir. Saydam iletken oksitlerin elektriksel iletkenlikleri yüksektir. Görünür bölge içinde yüksek optik geçirgenliğe sahiptirler. Saydam iletken oksit grubundan olan ZnO filmlerinin görünür bölgede optiksel geçirgenliği % 80-90 civarında olup yüksektir. Aynı zamanda elektriksel iletkenliği de yüksektir. II-VI grubunda olan yarıiletken bileşik ZnO, oda sıcaklığında geniş bir band aralığına sahip n-tipi bir yarıiletkendir. ZnO bileşiğinin band aralığı 3,1-3,4 eV arasında bir değişim göstermektedir. ZnO doğada “mineral zinkit” olarak bulunmaktadır. ZnO gibi II-VI grup yarıiletken bileşikler genellikle hekzagonal wurtzite kristal yapısına sahip bileşikler olarak tanımlanmaktadır [16].

2.4. Yarıiletkenlerde Optik Soğurma

ZnO ince filmlerinde, görünür bölgede geçirgenlik oranı yaklaşık olarak % 80'ler civarındadır. Enerji band aralıkları katkı oranına göre 3.34-3.46 eV arasında bir değişim göstermektedir. Katkılı nanokristallerde soğurma başlangıcının maviye kaydığı gözlenmiştir. Katkı oranının artması taşıyıcı oranını arttırarak en düşük iletkenlik bandını doldurmuştur. Böylece Burstein-Moss adıyla bilinen etki oluşmuştur. Burstein-Moss etkisi, Fermi enerji düzeyinin iletkenlik bandındaki yukarı olan hareketinin yarı iletkenin dejenere olmasına ve enerji band aralığının genişlemesine, sonuç olarak maviye kaymasına sebep olur [17].

2.5. ZnO Bileşiminin Özellikleri

ZnO, doğada mineral halde bulunmaktadır. Hekzagonal yapıda kristallenen bir bileşiktir. Örgü sabitleri $a=3,24 \text{ \AA}$, $c=5,20 \text{ \AA}$ değerleri şeklindedir [18].

ZnO çok amaçlı bir inorganik malzeme olarak tanımlanabilir. ZnO partiküllerinin birden fazla pozitif özelliği vardır. Bunlar yüksek geçirgenliğe sahip olması, piezoelektrik özelliğe sahip olması, yarıiletkenlikte geniş band aralığına sahip olması, oda sıcaklığında ferromanyetizma özelliğe sahip olması, kimyasal duyarlılık özelliklerine ve özel yüzey, hacim ve kuantum boyut etkisine sahip olmasıdır. Bu pozitif özelliklerden ZnO'nun yarıiletkenlikte 3,37 eV band aralığına sahip olması ve diğer yüksek band aralığına sahip malzemelerle karşılaştırıldığında (ZnSe (20meV), GaN (21meV)) 60 meV gibi büyük bir bağlanma enerjisine sahip olması birçok farklı uygulamada ZnO'nun çok tercih edilmesine neden olmaktadır. Bunların yanısıra, ZnO nanopartiküller fotokatalitik özelliğe sahiptir ve güneş ışığında organik kirliliği ayrıştırabilmektedir. ZnO partiküller yeni katalizör, sensör, piezoelektrik güç çevirici, geçirgen iletken ve yüzey dalga aracı üretiminde çok büyük bir rol oynamaktadır. ZnO nanopartiküllerinin üstün özelliklere sahip olması ve geniş kullanım alanlarının var olmasından dolayı günümüze kadar birçok üretim yöntemi geliştirilmiştir. Bunlar sırasıyla sol-jel metodu, mikroemülsiyon sentezi, mekanokimyasal proses, sprey pirolizi ve kurutma, organik başlangıç çözeltilisinin termal dekompozisyonu, RF plazma sentezi, süperkritik akışkan prosesi, hidrotermal proses, buhar taşınım prosesi, sono-kimyasal ve mikrodalgayla sentez yöntemleridir. Kullanılacak metodun düşük

maliyete sahip olması, sürekli bir işlem olması ve yüksek üretim oranına sahip olması üretim yönteminin seçiminde en önemli faktörlerdir [19].

Nano boyutlara inildiğinde artan yüzey/hacim oranına bağlı olarak gösterdiği üstün özellikler ZnO'ya olan ilginin gün geçtikçe artmasını sağlamaktadır. Bu özellikler sayesinde ZnO'nun birçok kullanım alanı vardır ve dolayısıyla ZnO nanoyapı üretiminde çalışmalar son yıllarda gittikçe artmaktadır [15].

ZnO, saydam iletken oksit malzemeler içerisinde tercih edilen ve popülerliği yüksek olan bir malzemedir. Zn'nin doğada bol miktarda bulunabilir ve zehirsiz bir element olması, ZnO'nun saydam iletken oksit malzeme olarak kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır. ZnO, çinkonun periyodik tablonun II. grubunda, oksijenin VI. grubunda yer alması yüzünden II-VI grubu yarıiletken bileşikler içerisinde yer almaktadır. ZnO, wurtzite (hekzagonal), kübik ZnS ve nadiren gözlemlenen kübik NaCl yapıda bulunabilmektedir. Bu yapılar içerisinde, yarıiletken ince filmler için en genel rastlanan ZnO yapısı wurtzite kristal yapısı olarak belirtilebilir. ZnO doğrudan band yapılıdır ve oldukça geniş yasak enerji aralığı değerine (~3,3 eV) sahip bir yarıiletken olarak tanımlanabilir. Geniş band aralığından dolayı elektromanyetik dalga spektrumunun mavi ve morötesi bölgesinde LED yapımı için de uygun bir malzeme olarak kabul edilebilir. ZnO yarıiletkeni fotoelektrik, piezoelektrik ve termoelektrik özellikler açısından oldukça iyidir ve bu üstün özelliklerinden dolayı birçok uygulamada kullanılabilir. ZnO yarıiletkeninin uygulama alanları arasında gaz sensörleri, ince film transistörler, fotoelektrik cihazlar, optoelektronik cihazlar, güneş hücreleri, UV dedektörler, piezoelektrik güç çeviriciler, yüzey akustik devreleri, termoelektrik aygıtlar, pH sensörleri, biosensörler yer almaktadır [20].

ZnO'da yer alan oksijen boşlukları çinko atomlarının etkisi ile meydana gelen stokiyometresindeki sapmadan dolayı n-tipi iletim özelliğine sahiptir. p-tipi ZnO elde etmek çok zordur ve son yıllarda p-tipi ZnO üretmek için yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir. p-tipi ZnO filmler, elektriksel cihazlar için yapılan uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır [16].

ZnO, bir mol oksijen ve bir mol çinko atomundan oluşan bileşik formda olan bir yarıiletkendir. Genellikle wurtzite hekzagonal yapıda kristalleşen ZnO'nun, $a = 0,332$ nm ve $c = 0,519$ nm örgü sabitleri vardır [21].

2.5.1. ZnO Nanopartiküllerinin Özellikleri

ZnO, geleceğin malzemesi olarak gösterilebilecek bir malzemedir. Oda sıcaklığında 3,4 eV geniş iletim band aralığına ve 60 meV gibi büyük bir bağlanma enerjisine, yüksek geçirgenliğe sahip bir malzemedir. 3,4 eV'den daha büyük iletim band aralığına sahip bileşikler bulunsa da, 60 meV gibi bir bağlanma enerjisi değerine sahip olması, radyasyon direnci ve biyo-uyumluluğu gibi özellikleriyle birçok cihaz yapımı için ideal bir malzemedir. ZnO'nun ergime noktası yaklaşık 1975 °C, atom ağırlığı 81,408 g/mol, yoğunluğu 5,606 g/cm³ ve ısı kapasitesi 40,3 J/mol K'dir. ZnO toksik değildir. Cilde uyumlu bir malzemedir. UV azaltıcı etkisi vardır. Bundan dolayı insan sağlığı ile ilgili alanlarda da kullanımını mevcut olabilmektedir [19].

2.5.2. ZnO Nanoyapılarının Kullanım Alanları

ZnO'nun binlerce yıldır, güneş hücreleri, gaz sensörleri, dolgu malzemesi olarak tekstil sanayi, direnç malzemesi olarak seramik ve cam sanayi, antiseptik ve kurutucu özelliği sayesinde ilaç sanayi gibi farklı uygulamalarda kullanımını tercih edilmektedir. ZnO üretimi için hidrotermal, kimyasal buhar biriktirme, sol-jel, termal ayrışma, elektrokimyasal çöktürme, kimyasal çöktürme gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlere bakıldığında kimyasal çöktürme yöntemi maliyeti düşük ve pratik bir yöntem olduğundan dolayı tercih edilen bir yöntem olmuştur [22].

ZnO'nun kullanım alanları oldukça fazladır. ZnO'nun günümüze kadar güneş hücreleri, gaz sensörleri, dolgu malzemesi olarak tekstil endüstrisi, seramik ve cam endüstrisi, lastik endüstrisi, antiseptik ve kurutucu özelliği sayesinde ilaç endüstrisi gibi farklı uygulamada kullanılmaktadır. ZnO üretimi için farklı yöntemler seçilmiştir. Seçilen bu yöntemler hidrotermal, kimyasal buhar biriktirme, sol-jel, termal ayrışma, elektrokimyasal çöktürme, kimyasal çöktürmedir. Bu yöntemlerden maliyeti düşük olan ve pratik olan yöntem kimyasal çöktürme yöntemidir [23].

ZnO nanoyapıları geniş band aralığına sahiptir ve yarı iletkenliği yüksektir. Mekanik, termal ve kimyasal kararlılık açısından performansı yüksek malzemelerdir. Elektronik sektörü ve kimya sektöründe kullanımını mevcut olmaktadır [24].

2.5.3. Sol-Jel Yöntemi

Sol-jel yöntemi seramik ve cam malzemeler üretmek için oldukça faydalı bir yöntemdir. Genel olarak sol-jel sürecinde sistem sıvı fazdan (sol) katı faza (jel) geçiş yapmaktadır. Bu yöntemle birçok seramik ve cam malzeme üretmek mümkün olmaktadır. Bu malzemeler oldukça saf ve küresel biçimli tozlar, ince film kaplamalar, seramik fiberler, mikro gözenekli inorganik zarlar, monolitik seramik ve camlar ya da aşırı gözenekli aerojel malzemeler olarak tanımlanabilir [25].

“Sol” için başlangıç malzemeleri olarak inorganik metal tuzları ya da metal inorganik bileşenler kullanılabilir. Tipik bir sol-jel sürecinde ana malzeme çözücü içinde çözünüp bir seri hidroliz ve polimerizasyon tepkimeleri ile koloidal bir yapı olan sol’a dönüşmektedir. Koloidal yapılar heterojen ile homojen yapılar arasında tanımlanabilir. İnce filmler bir alt tabaka üzerine sol’ ün döndürme, püskürtme, daldırma kaplama yöntemleri ile kaplanmasıyla üretilmektedir. “Sol” bu alt tabaka üzerine kaplandığında ıslak jel (xerojel) şekline dönüşür. Daha sonra sıcaklık uygulanması ve kurutma süreçleri ile yoğun jel haline geçerek ince film oluşur [25].

Sol-jel yönteminin birçok avantajı bulunmaktadır. Bu yöntemde kullanılan alet ve malzemeler çok basit alet ve malzemelerdir. Bu yöntemle kaplanarak oluşturulmuş filmlerin kalınlığı yüzeyin her yerinde aynıdır ve saf bir kaplama elde edilmektedir. Enerji tasarrufu sağlamaktadır, hazırlanan ortamla etkileşimde bulunmaz ve her türlü geometrik şekle sahip malzemeler üzerine bu yöntemle kaplama yapılabilir [26].

Metal olmayan inorganik maddelerin oluşmasında yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Malzemelerin oluşturulmasında ayrıca kimyasal yöntemler de kullanılmıştır. Bu kimyasal yöntemlerden birisi, başlangıç malzemesi olarak bir solüsyon içerir ve bu solüsyonu kullanarak bir jel elde edilebilir. Bu yöntem “Sol-jel Yöntemi” adı verilmiştir. Sol-jel yöntemi dışında da birçok ince film kaplama yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler gaz fazdan (kimyasal buhar depolama tekniği, fiziksel buhar depolama tekniği), sıvı fazdan (sol-jel, elektrokimyasal yolla kaplama ve kimyasal yolla kaplama) ve ergimiş veya yarı ergimiş fazdan kaplama teknikleri olarak tanımlanabilir [17].

Sol-jel yönteminde kimyasal kompozisyon kolay bir şekilde kontrol edilebilir ve düşük sıcaklıkta üretimi nedeniyle kaplama üretiminde yaygın olarak kullanılabilir. Sol-jel vakum-dışı kimyasal bir metottur. Atomik boyutta karışım sağladığı için homojenlik artmaktadır. Sol-jel yönteminde küçük tane boyutu için vakum ortamına ve yüksek sıcaklıklara gerek yoktur. Sol-jel yöntemi çok yönlü bir yöntemdir. Bu yöntemde sıvı (solüsyon) faz, katı (jel) fazına dönüşmektedir. Solüsyonun hazırlanmasında başlangıç kimyasalları olarak inorganik metal tuzları veya organik metal bileşikleri kullanılmaktadır. Sol-jel işleminde, başlangıç kimyasalı hidroliz ve polimerizasyona tabi tutulur ve bu sayede kolloidal süspansiyon veya solüsyon elde edilir. Sol'e uygulanan ileri işlemler farklı şekillerde seramik malzemelerin üretimini mümkün kılmaktadır. Örneğin; ince filmlerin üretiminde olduğu gibi daldırma veya spin yöntemi ile altlık üzerinde ince film oluşturulmaktadır. Daha sonra uygulanan kurutma ve ısıl işlem ile nihai kaplama elde edilmiş olur. Yüksek sıcaklıklara gerek olmaması özellikle kullanılan metal altlıklarda mekanik bozunmaya ya da faz dönüşümüne sebep olmaması bakımından sol-jel yönteminin önemli bir avantajı olarak belirtilebilir. Bu avantajından dolayı çeşitli şekil ve büyüklükteki yüzeylere kolaylıkla uygulanabilmektedir [17] [27].

Sol-jel reaksiyonları için başlatıcı madde olarak bir metal alkoksit (Si, Ti, Al, Zn, vb.) veya metal tuzu kullanılabilir. Bu başlatıcı madde uygun bir organik çözügen ve/veya su içerisinde çözülür ve bunun sonucunda hidroliz reaksiyonları gerçekleştirilmiş olur. Hidroliz reaksiyonları asit ya da alkali katalizli olarak gerçekleştirilebilir. Hidroliz sırasında alkoksi grupları (-OR), hidroksi (-OH) veya (-O-) ile yer değiştirme görülür. Hidroliz ürünleri çözelti içinde düşük-orta derecede çapraz bağlanan metal parçacıkları olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan çözeltiler saydamdır, elverişlidir, 50 nm' den daha küçük parçacık çapına sahiptir. % 4-20 katı içeriğine (solid content) sahip nano büyüklükte homojen yapılardır. Normal olarak bu şekilde hazırlanan nanosoller hidrolize uğramış başlatıcı maddelerin alkollerini içermektedir. Alkol içeren nanosollerde yüksek depolama stabilitesine (uzun jelleşme süresi), herhangi bir tekstil materyaline iyi yapışma (adherence) özelliğine, düşük sıcaklıklarda hızlı kuruma süreleri sahip olma avantajları görülmektedir [28] [29]

Sol-jel yöntemi mikrodevre üretiminde fotoresistleri kaplamada, manyetik disk kaplamalarında, düz ekran display kaplamalarında, kompakt disklerde, televizyon tüpü fosforu kaplamasında, kimyasal veya termal koruyucu katmanlarda, optik amaçlı filtre

kaplamalarında, sol-jel cam elde etmede, ince seramik tozları elde etmede kullanılmaktadır. Sol-jel yönteminin maliyeti düşüktür, kimyasal kompozisyon kontrol edilebilir, uygulanması diğer yöntemlere göre daha kolaydır [30].

Sol-jel yöntemi seramik ve metal oksit tozlarının elde edilmesinde yıllardır kullanılmasının yanında kaplama, fiber üretimi gibi uygulamalar için de kullanımı mevcuttur. Sol-jel yöntemi genel olarak başlangıç malzemesinin hidroliz ve yoğunlaşma kademelerinden oluşan bir süreç olarak tanımlanabilir. Genellikle sol oluşturmak için bu yöntemde metal alkoksitler kullanılmaktadır. Metal alkoksit bileşikleri su ile hidroliz edilmektedir ve bu türlerin kondensasyonu sonucunda metal alkoksit nanoparçacıklar oluşmaktadır. Elde edilen çökelti yıkanıp kurutulduktan sonra yüksek sıcaklıklarda kalsine edilerek kristal yapıdaki metal alkoksitlere dönüştürülmektedir [16].

Sol-jel yöntemi tanımlanacak olursa çözelti formundan yola çıkılarak seramik, cam ve kompozit malzemeler üretme tekniği olarak tanımlanabilir. Sol-jel yönteminde ilk olarak tuz ve kimyasal çözücüler yardımıyla bir çözelti elde edilmektedir. Çözelti elde edildikten sonra bu çözelti eskitme ve buharlaştırma gibi birtakım işlemlerden geçirilir ve bunun sonunda bir jel elde edilir. Elde edilen jel kaplamaya hazır haldedir ve tek ya da çok bileşenli oksit filmlerin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında, sol-jel yönteminin avantajları oldukça fazladır. Sol-jel yönteminin avantajları aşağıda listelenmiştir [18];

- Bu yöntem kullanılarak birçok katmana sahip kaplamalar üretilebilir.
- Filmler düşük sıcaklıklarda üretildiğinden dolayı enerjiden önemli bir tasarruf söz konusu olmaktadır.
- Bu yöntem kullanılarak kristalizasyon ortadan kaldırılmış olur.
- Bu yöntem geniş yüzeylere kolayca uygulanabilir.
- Bu yöntem hem pürüzlü hem de pürüzsüz yüzeylerin homojen olarak kaplanmasını sağlamaktadır.
- Bu yöntem kullanılarak nano kristal yapılara ulaşmak mümkün olmaktadır.

Sol-jel yönteminin dezavantajları aşağıda verilmiştir;

- Bu yöntem kullanıldığında filmlerin elde edilme süreci uzun olmaktadır.
- Bu yöntemle çözelti hazırlandığında sağlığa zararlı kimyasallar kullanılmaktadır ve bu kimyasalların maliyeti yüksek olmaktadır.

- Bu yöntem kullanıldığında filmler üzerinde küçük çaplı gözenekler ve çökelti oluşmaktadır [31].

Uygulama bakımından sol-jel tekniğinde kullanılan yöntemler aşağıda sunulmuştur;

- Döndürme kaplama yöntemi (Spin coating)
- Daldırma kaplama yöntemi (Dip coating)
- Akış kaplama yöntemi (Flow coating)
- Püskürtme kaplama yöntemi (Spray coating)
- Lamine kaplama yöntemi (Laminar coating)
- Merdaneli kaplama yöntemi (Roll coating)
- Baskı kaplama yöntemi (Printing)

2.5.4. ZnO Filmlerinin Elde Edilmesi

ZnO, IV-VI grubu bileşiklerinden olup geniş band aralığına sahip (3.37eV), direk geçişli olan bir yarıiletken [26]. ZnO, yüksek elektriksel iletkenlikleri ve geçirgenliklerinden dolayı pek çok teknolojik alanda kullanılmaktadır. Bu alanlarının başında güneş pili aygıtları ve optoelektronikte kullanılan elektrotlar, ışık emici diyotlar, lazer diyotlar, gaz sensörleri gelmektedir [32], [33], [34], [35], [36].

ZnO ince filmleri oda sıcaklığında geniş band aralıklı (~3,3 eV), yüksek eksiton bağlanma enerjisine sahip n-tipi bir yarıiletken [11]. ZnO ince filmler, düşük maliyetli üretime sahip olmaları, yüksek kimyasal dayanıklılığa sahip malzemeler olmaları ve birçok cihaz üretiminde kullanılma potansiyellerinin mevcut olması sebebiyle ümit vaat eden malzemelerdir [11].

Son yıllarda teknolojik ve bilimsel araştırmalardaki meydana gelen gelişmeler birçok alanda olduğu gibi ince film üretiminde de çeşitli değişimlere sebep olmuştur. İnce filmler üzerinde gerçekleştirilen araştırmalarda 1950'li yıllardan günümüze kadar farklı yöntemler kullanılmıştır. İnce film elde etmede ilk yöntem olarak elektroliz yöntemi kullanılmıştır. Yarıiletken filmler elde edilmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler sırasıyla kimyasal buharlaştırma yöntemi (chemical vapour deposition; CVD), püskürtme yöntemi (spray-pyrolysis), vakumlu buharlaştırma yöntemi (vacuum evaporation; VE) ve dönele kaplama yöntemi (sputtering; sıçratma) dir. İnce filmler, kalınlıkları 1 nm ile 1 µm arasında değişen

kaplamalardır. İnce filmler atomların ya da moleküllerin kaplanacakları yüzeye tek tek dizilmeleriyle hazırlanır. Bu yöntemler arasında bulunan Sol-jel tekniği, ekonomik ve güvenilir olması, tekrarlanabilmesi, oda sıcaklığında vakum gerektirmemesi gibi özelliklerinden dolayı ön plana çıkmaktadır [8] [37] [38] [39] [40].

ZnO n-tipi bir yarıiletken olarak tanımlanabilir. Katkılama yapılarak yüksek dirençli ya da iletken bir ZnO ince film oluşturmak mümkün olabilmektedir. Böylelikle yüksek elektrik iletkenliğine sahip ZnO filmler üretilebilir. ZnO sahip olduğu geniş band aralığına bağlı olarak görünür bölgede (400-700 nm) şeffaf bir özelliğe sahiptir. Böylelikle, dokunmatik ekranlarda şeffaf iletken oksit (TCO) olarak kullanımı mevcuttur. Son yıllarda ZnO filmler, gaz sensörleri, UV detektörler, alan etkili transistörler (FET), nem sensörleri ve güneş pilleri gibi birçok cihaz yapımında kullanılmaktadır [5].

ZnO filmler, güneş pilleri flat panel göstergeleri, akıllı camlar ve ışık dedektörlerini içeren çeşitli uygulamalarda 20 yıldan fazla bir süredir kullanılmaktadır. Amorf silikon güneş pillerinin üretimiyle bağlantılı olarak, son zamanlarda katkılanan yüksek iletken ZnO filmler geliştirilmiştir. ZnO filmlerdeki bu gelişmenin esas nedenini, metal elementleri ile katkılanan, iletken ZnO film kaplı amorf silikon güneş pilleri oluşturmaktadır [10].

Solar radyasyonu geçirebilecek özelliğe sahip ve geniş bir band aralığına (3,3 eV) sahip olan bu yarı iletken filmler görünür bölgede oldukça geçirgendir. Uygun bir metalle katkıldığında ise elektrikçe iletkenidir [15].

ZnO filmlerin elektrik iletkenlik özelliği, katkılanarak artırılabilir. Katkılanan geçirgen ZnO filmler iyi elektriksel iletkenliğe sahiptir. Bu filmler, güneş pilleri ve flat panel göstergelerinde kullanılabilir ve ideal bir pencere malzemesi özelliğine sahiptirler. ZnO filmlerin kimyasal kararlılığı yüksektir. ZnO filmler kullanım olarak güneş pilleri ve flat panel göstergelerdeki geçirgen elektrotlarda kullanılmaktadır. Geçirgen iletken bu filmler, ince film güneş pillerinde elektrot olarak vazgeçilmez bir öneme sahiptir [17].

Yarıiletken ince filmlerin elektrik, optik, yapısal ve yüzey özellikleri kullanılacağı cihaz performansını büyük oranda etkiler. İnce filmlerin bu özellikleri üretim parametrelerine bağlı olarak değişir. Filmlerin üretilmesinde sol-jel, kimyasal buhar

biriktirme, kimyasal püskürtme, kimyasal banyo gibi birçok farklı fiziksel ve kimyasal yöntem kullanılmaktadır [36].

ZnO, çeşitli bilimsel alanlarda kullanılan çok fonksiyonlu bir materyaldir. ZnO bileşiğiyle hazırlanan filmler yüksek elektriksel iletkenliğe, yüksek geçirgenliğe sahiptir ve görünür bölgedeki yansımalarından dolayı, metal oksit yarı iletkenleri arasında en çok tercih edilen materyallerdir. Düşük dirençli ZnO filmler, geçirgen iletken oksitler çinko oksit, indiyum kalay oksit, kadmiyum oksit son birkaç yıldır çok fazla ilgilenilen materyaller içerisinde yer almıştır. Bu materyaller geçirgen ve iletken özelliklerinin her ikisine sahip olduğu için endüstriyel ve bilimsel araştırmalarda çok geniş uygulamalara sahiptir. ZnO yarı iletken materyale büyük ilgi duyulmaya başlanmış olması son zamanlarda yayınlanan makalelerden anlaşılmaktadır. ZnO'ya olan ilgi 300 K' de 3,3 eV değerinde olan direk geniş enerji band aralığı sayesinde optoelektronik uygulamalardaki geniş alanından kaynaklanır. ZnO'yu diğer yarı iletkenlerden ayıran farklı özellikleri vardır. Bazı deneyler ZnO'nun uzay araştırmaları için uygun olduğunu ispatlamıştır. ZnO'nun yüksek enerji ışınımı çok dayanıklıdır. ZnO tüm asit ve alkalilerde kolaylıkla aşındırılabilir ve küçük boyutlu aygıtların üretimi için bir fırsat sağlar. Uygulama alanları çok çeşitlilik göstermektedir. Gaz sensörleri, fotodedektörler, güneş pilleri, ışık yayılım cihazları (LEDs) ve laser sistemleri bunlar arasında sayılabilirler. ZnO ince filmleri, 3,3 eV gibi geniş band aralığına ve oda sıcaklığında 60 MeV eksiton yüksek bağlanma enerjisine sahip n-tipi yarı iletken bir malzemedir. Kristallenme şekli hekzagonal Wurtz yapısındadır ($c = 5,205$ ve $a = 3,249$). ZnO ince filmlerinin hem elektrik hem de optik özellikleri bulunmaktadır. Yüksek eksiton bağlanma enerjisi elektronik cihazların düşük eşik voltajında çalışmalarına neden olmaktadır. Bu nedenle ZnO ince filmleri tercih sebebi olmaktadır. Çeşitli elektronik yapılarda elektron yayınlayıcı, UV yayınlayıcı cihazlar ve alan tesirli transistörler olarak kullanılabilirler. ZnO nano yapılarının, taşıyıcı malzemeye dik doğrultudaki c-ekseni boyunca büyümeleri, piezoelektrik özelliği göstermelerinin nedenidir. Geçirgen ZnO ince filmleri Al, Ga, vb. elementleri ile katkıldıklarında iyi elektrik iletkenliği gösterirler. Katkılı ZnO ince filmler geçirgen iletken elektrot olarak bazı önemli cihazlarda indiyum kalay oksit (ITO) yerine kullanılırlar. İletken ZnO ince filmleri iyi bir kızılötesi yansıtıcıdır ve enerji verimliliğinin pencerelerden sağlanması gibi uygulama alanları mevcuttur. Isıyı yalıtan pencerelerde, yüksek düzeyde kızılötesi ışınlarını yansıtmaları ve düşük

düzeyde ısı yayılımı yapmaları beklenmektedir. Hidrojen plazması içerisinde indiyum kalay oksit (ITO) malzemesinden daha kararlı bir yapı göstermeleri nedeniyle hidrojenik amorf silikon güneş pilleri üretiminde kullanılabilirler. ZnO ince filmleri, yarı iletken gaz sensörleri uygulamaları için oldukça ümit vericidir. ZnO ince filmler ışınlandıklarında elektriksel ve optik özelliklerinde gözlenmeye değer değişimler oluşmaktadır. Bütün filmlerin elektrik dirençleri radyasyon dozuyla artmaktadır. Filmlerin tavlama ortamı da elektriksel ve optik özellikleri etkilemektedir. Tavlanma, ortam koşulları, katkı oranı artışından daha fazla etkilemektedir. ZnO ince filmlerinin katkılanması elektriksel özelliklerini oldukça değiştirmektedir. Optik geçirgenlik davranışı soğurma kenarının maviye kaydığını göstermektedir. Elektrik direncinin artması, oksijen atomları yerine elektronların tuzaklanmasıyla sonuçlanır. ZnO'nun kristal yapısı içerisinde çinko (Zn) ve oksijen (O) atomları vardır. ZnO, hexagonal wurtzite kristal yapıda olup yarıiletkenlik özelliği gösterir. ZnO 'in kafes boşlukları içine yabancı atomlar girdiğinde kristal yapısı içinde değişimler görülür. Katkılanan maddeler ile uyum sağlayan ZnO'ya istenen ve gerekli miktarlarda katkılanma yapılmasıyla elektriksel özellikleri artırılmaktadır. Örneğin ZnO ile metalin uyum sağladığı, kristal yapısının değiştiği ve iletkenliğinin arttığı yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür. ZnO'nun kullanım alanları: akustik dalga cihazları, kimyasal sensörler, iletkenlik elektrotları, güneş pilleri ve fotoelektrik cihazlar, ısı aynaları, düz panelli diyotlar ve mikro cihazlardır. Bunun yanısıra ZnO televizyon tüpleri, floresan lambaları için fosfor üretiminde yarıiletken olarak kullanılır. Geniş yasak enerji aralıklı ZnO, II-VI grubu bileşik yarıiletkenlerindedir ve diğer geniş yasak enerji aralıklı yarıiletkenlere göre sahip olduğu üstün özellikleri nedeniyle son yıllarda ilgi alanı haline gelmiştir. ZnO, sahip olduğu elektrik optik ve akustik özellikleri nedeniyle, güneş pilleri, sıvı kristal ekranları, piezoelektrik transduserler, kablosuz haberleşmede kullanılan yüzey akustik dalga devreleri (SAW), ısı aynaları, varistörler, kimyasal gaz sensörleri, lüminesans malzemeler ve şeffaf (trasparant) iletken filmlerde kullanılır. ZnO'nun ucuz ve bol miktarda bulunması, büyük boyutlarda üretilebilmesi, ultraviyole bölgede soğurma ve emisyon vermesi, hidrojen plazmasında yüksek kararlılığa sahip olması, düşük sıcaklıklarda büyütülebilmesi ve toksik olmaması diğer üstün özellikleridir [41].

2.5.5. ZnO Filmlerinin Optik Özellikleri

ZnO, görünür bölgede optik geçirgenliği yüksek olup geniş band aralığına sahip yarıiletken bir malzeme olarak tanımlanabilir. ZnO, ince filmlerin kullanım alanları geniş olup gaz sensörleri, güneş pilleri, optoelektronik cihazlar, şeffaf iletkenler ve optik dalga kılavuzları gibi birçok uygulamada kullanımı tercih edilir [18].

Sürekli gelişmekte olan optoelektronik teknolojisi alternatif saydam iletken oksit (SiO) malzemelere gereksinim duymaktadır. Optik geçirgenliklerinin yüksek olmasından ve iletken olmalarından dolayı saydam iletken oksit malzemelerin birçok farklı uygulama alanı bulunmaktadır. ZnO ince filmler de, saydam iletken oksit malzemelerin en önemlilerinden biri olup optoelektronik teknolojisinde sıklıkla kullanılmaktadır [20].

Optik özelliklerden bahsedilecek olursa ışığın malzeme ile etkileşimi akla gelmektedir. Bir malzeme üzerine ışık gönderilirse elektronlar ile fotonlar etkileşime girer ve bunun sonucunda malzemenin optik özellikleri belirlenmiş olur. Işık elektromanyetik bir dalga olarak tanımlanabilmektedir. Elektromanyetik dalgalar birbirlerine dik elektrik ve manyetik alan bileşenlerinden oluşmaktadır. Elektromanyetik dalgaların foton adı verilen küçük parçacıklar tarafından yayılan enerjileri mevcuttur. Elektromanyetik dalgalar malzemede bulunan elektronlar, elektriksel kutuplar ve iyonlarla etkileşime girerler ve optik özellikler de bu şekilde ortaya çıkmaktadır. Bir malzemenin optik özellik parametreleri renklilik, saydamlık, opaklık, parlaklık, yansımaya, kırılma, soğurma, geçirgenlik ve lüminesans olarak sıralanabilir. Enerji uygulamalarında ve optoelektronik cihazlarda kullanılacak olan yarıiletken malzemeler istenilen optik özelliklere sahip olmalıdır [3].

Yarıiletkenler, gösterdikleri kırılma, yansımaya, soğurma, geçirgenlik ve benzeri optik özellikler bakımından elektron ve fotonların etkileşimine bağlıdır [42].

Bir yarıiletken üzerine bir foton gönderilirse atomların elektronları ile fotonlar etkileşime girer. Yarıiletken üzerine gelen bir fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit ya da büyükse valans bandındaki bir elektron bu fotonu soğurarak iletim bandına geçmektedir. Bu olaya temel soğurma adı verilmektedir [13].

Optoelektronik cihazlarda yüksek performans elde etmek için ZnO'nun optiksel özelliklerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Farklı yöntemler kullanılarak (optiksel absorpsiyon, elipsometri ve fotolüminesans gibi) ZnO'nun optik

özellikleri deneysel olarak belirlenebilmektedir. Katkısız ZnO n-tipi iletkenlik sergilemektedir. Katkısız ZnO'nun yasak enerji aralığı 3,3 eV civarındadır (katkılı durumda bu enerji aralığı değiştirilebilmektedir). 3,3 eV enerji Aralığı 377 nm dalga boyuna karşılık gelmektedir ve bu elektromanyetik spektrumda mor renk ışık anlamına gelmektedir [21].

Oda sıcaklığında optiksel olarak UV bölgesinde foton salınımı meydana gelmektedir. ZnO, saydam iletken oksit bir malzemedir ve görünür bölgede yüksek saydamlık sergilemektedir. Bu özelliğinden dolayı güneş hücrelerinde kullanımı tercih edilmektedir. ZnO direkt band aralıklı bir yarıiletken olarak tanımlanmıştır. Bu özelliği ile LED ve lazer gibi optoelektronik cihazlarda tercihi yüksek olan yüksek band aralıklı bir yarıiletkendir [29].

ZnO filmlerinin bazı opto-elektronik uygulamalarda kullanılabilmesi ve daha işlevsel olabilmesi için daha geniş band aralığına sahip olması istenir [7].

2.5.6. ZnO Filmlerinin Elektriksel Özellikleri

Elektriksel özellikleri açısından ZnO tanımlanacak olursa II-VI grup n-tipi yarıiletken bileşiklerden biri olup, oda sıcaklığında yaklaşık 3,5 eV yasak enerji aralığına sahip olduğu belirtilebilir. ZnO'nun elektriksel iletkenliği yüksektir. Görünür bölgede yaklaşık % 80-% 90 optik geçirgenliğe, Elektriksel direnç olarak ise 10^{-3} - 10^{+2} Ω cm değerleri arasında bir elektriksel dirence sahiptir [43].

Saydam iletken oksit malzemelerin, sahip oldukları yüksek optik geçirgenlik ve iletkenlikten dolayı birçok farklı alanda uygulaması gerçekleştirilmektedir. Saydam iletken oksit ince filmler; düz ekran göstergelerinde, diz üstü bilgisayarların ekranlarında, gaz sensörlerinde, güneş pillerinde, fırın pencerelerinde ve kışın soğuğa yazın sığağa karşı koruyan pencerelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektriksel iletkenliğin yüksek olması ve optik geçirgenlik birçok uygulamada büyük önem taşımakla beraber, çevresel etkenlere karşı dayanıklılık, düşük maliyet ve elektronik devre elemanı olarak uygunluğu da saydam iletken oksit malzemenin kullanışlı olmasını belirleyen önemli etkenler arasında gösterilebilir [44].

Elektriksel iletkenlik malzemelerde oluşan bağlar ile birebir ilişkilidir. Metalik bağlarda serbest elektronlar kolayca hareket edebilmektedir. Bu malzemelerin

elektriksel iletkenlikleri yüksek olmaktadır. Diğer başlarda ise valans elektronları belli atomlara, iyonlara veya kovalent başda olduğu gibi atom çiftlerine sıkıca başlı halde olur. Sonuç olarak malzeme yalıtkan özellik gösterir. Aynı tip başlara sahip birçok malzeme farklı elektriksel özellik de gösterebilir. Örneğin; Si ve elmas her ikisi de benzer kristal yapıdadır. Kovalent başlara sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda Si iyi bir iletkenidir, elmas ise çok iyi bir yalıtandır [37].

Katı cisimler elektriksel özdirençlerine göre metaller, yarıiletkenler (10^{-4} - 10^{10} Ωcm) ve yalıtkanlar ($\geq 10^{10}$ Ωcm) olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Katılarda özdirenç kriterine bakıldığında açık olmadığı görölmektedir. Yarıiletkenlerin özdirenci, bazı sıcaklık aralığında metallere benzer veya bazı sıcaklıklarda da yalıtkanlara benzer davranış göstermektedir [5].

2.3 Ag'nin özellikleri

Gümüş elementi (Ag), ışığı yansıtma bakımından güçlü, yumuşak, kırılma gücü az bir metaldir. Elektriksel iletim anında küp ve altıgen prizma şeklinde kristallenir. Koordinasyon sayısı altı olduğu durumda, yaklaşık atom çapı 1,444 Å değerini alır. Atmosferde oksitlenmeye karşı büyük bir dayanıklılık gösterir. Bakırdan daha geç, altından ise daha erken oksitlenir. Elektrot potansiyeli 0,7978 V dur. Asitlere karşı mukavemetlidir. Fakat derişik nitrik asit ve sülfürik asit türevlerinde kolayca eritilir. Ayrıca kükürt ve birçok kükürt bileşikleriyle hemen birleşerek renk değişikliğine uğrar. Periyodik cetvelde ağır metal grubu içinde yer alır [9].

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Deneysel İşlemler

İnce film ve diyetleri üretmek için sol-jel yöntemiyle çözeltiler hazırlanarak spin kaplama tekniği ile mikroskop camı ve p-Si altlık üzerine kaplanmıştır.

0,5 M Çinko Asetat 10 ml izopropil alkolde çözülmüş % 0,5 ve % 2 atomik oranlarında Ag eklenip 500 rpm'e ayarlanan manyetik karıştırıcının üzerinde çözünene kadar karıştırılmıştır. Stabilizatör olarak aminoethanol eklenerek çözelti 1 saat oda sıcaklığında karıştırılmıştır.



Şekil 3.1: Numunelerin hazırlandığı deney düzeneği

İlk olarak p-Si tabakası üzerindeki organik ve diğer ağır metal kirliliklerini temizlemek ve kristal yüzeydeki çıkıntıları ortadan kaldırmak için p-Si tabakaya kimyasal temizleme işlemleri yapılmıştır. P-Si tabakalar 5 dk alkol içerisinde ve 5 dk saf suda olmak üzere ultrasonik banyo işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra azot gazı yardımıyla kurutma uygulanmış ve hazırlanan Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO çözeltilerle p-Si tabakalar 30sn 3000 devir/dk de döndürerek kaplama yöntemiyle işleme alınmışlardır. Tabakalar üzerinde kalan etanol'ün buharlaşması için 150 °C 5 dk ısıtılmıştır. Son olarak fırında 450 °C 1 saat tavlama işlemi uygulanmıştır.

3.1.1. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO Filmlerin Optik Özellik Analizi

Katkısız ZnO, % 0,5 Ag katkılı ZnO ile % 2 Ag katkılı ZnO ince filmler Sol Jel yöntemi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan ince film numunelerinin UV ölçümleri UV3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR Spectrophotometer cihazı ile yapılmıştır. UV ölçümleri sonucunda bulunan veriler kullanılarak ince filmlerin soğrulma, geçirgenlik, yansıma ve yasak enerji aralığı (E_g) grafikleri çizilmiştir.



Şekil 3.2: Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO diyotlarının U-V ölçümleri için kullanılan UV-VIS spektrofotometre cihazı

3.1.2. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO Filmlerin Yüzey Özellik Analizi

Sol-jel yöntemi ile biriktirilen Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince film numunelerinin n-tipi Si alttaş üzerine yüzey özelliklerini araştırmak amacıyla, yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri "PARK SYSTEM marka XE-100E model Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile oluşturulmuştur.



Şekil 3.3: Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO diyotlarının yüzey ölçümleri için kullanılan AFM cihazı

3.1.3. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO Filmlerin Elektriksel Özellik Analizi

Hazırlanan Katkısız ZnO, % 0,5 Ag katkılı ZnO ile % 2 Ag katkılı ZnO ince filmlerin Akım-Voltaj (I-V), Kapasitans- Voltaj (C-V), G/ω -V ve Akım-Zaman (I-t) karakterizasyonları oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada veri elde edilmesi sırasında I-V, C-V, G/ω -V ve I-t değerleri değişik frekans değerlerinde her bir numune için ayrı ayrı ölçülmüştür. Bu ölçümler Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoteknoloji Laboratuvarındaki KEITHLEY 4200 SCS deney düzeneğinde yapılmıştır.

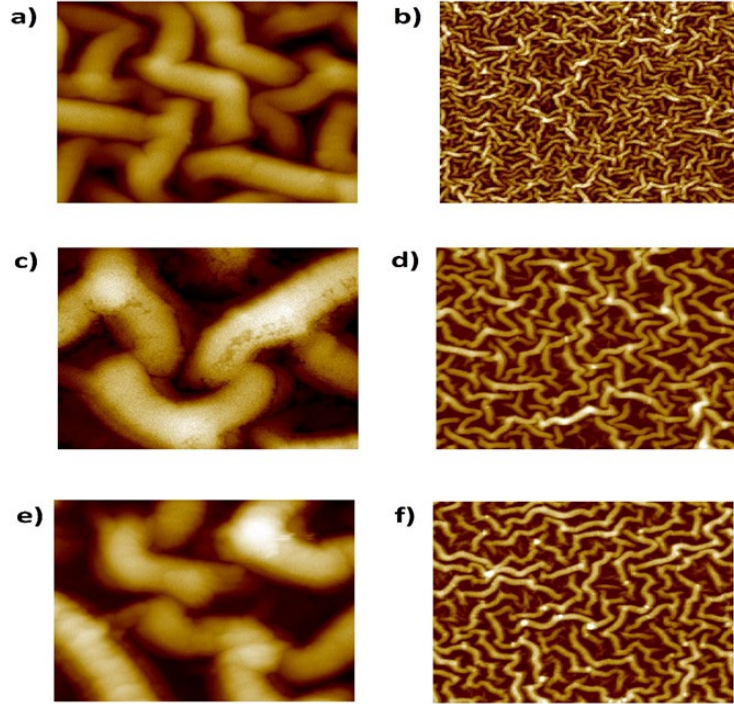


Şekil 3.4: Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO diyotlarının I-V, C-V ve I-t ölçümleri için kullanılan deney düzeneği

4. ÖLÇÜM SONUÇLARI

4.1. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO İnce Film Numunelerinin Yüzey Analiz Sonuçları

Sol-jel yöntemi ile p-tipi Si alttaş üzerine biriktirilen katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin yüzey morfolojisi "PARK SYSTEM marka XE-100E model Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)" ile incelenmiştir. Numune yüzeylerinden görüntü almak için temassız modda çalışılmış ve buna uygun AFM ucu kullanılmıştır. Hazırlanan ince film numunelerin 5x5 μm ve 40x40 μm boyutlarında görüntüleri alınmıştır. AFM yardımıyla ölçülen numunelerin yapısal özelliklerine ait yüzey topografyasını gösteren resimler Şekil 4.1 (a, b, c, d, e, f)'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Katkısız ZnO ince filmin AFM görüntüsü (a) 5x5 μm , (b) 40x40 μm , % 0,5 Ag katkılı ZnO ince filmin AFM görüntüsü (c) 5x5 μm (d) 40x40 μm , % 2 Ag katkılı ZnO ince filmin AFM görüntüsü (e) 5x5 μm , (f) 40x40 μm

Üç numuneye ait AFM görüntüleri incelendiğinde, her üç numunenin de nanofiber yapıda olduğu anlaşılmıştır. AFM görüntülerinden nanofiberlerin alttaşın üzerinde homojen bir şekilde depolandığı ve nanofiberlerin kıvrımlı yapıda olduğu görülmektedir. Bununla beraber nanofiberlerin birbirleri ile bağlantılı olduğu

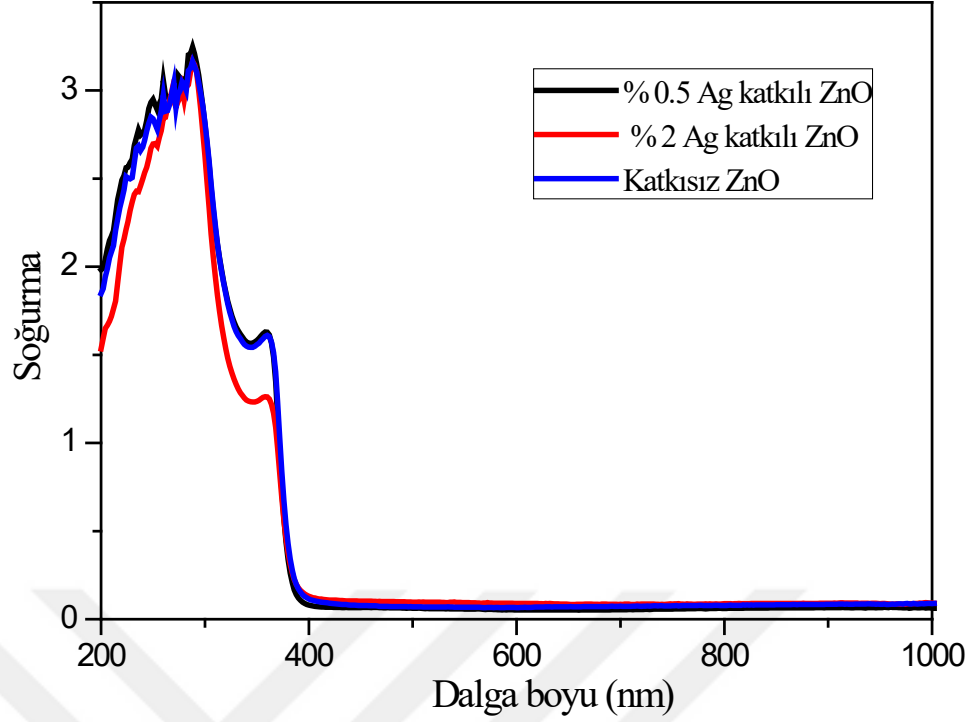
anlaşılmıştır. Katkısız ZnO ince film numunesinde nanofiberlerin uzunluklarının 5 µm ile 8,5 µm arasında, çapının ise 450 nm ile 800 nm arasında değiştiği görülmektedir. % 0,5 Ag katkılı ZnO numunedeki nanofiberlerin çapının 600 nm ile 950 nm arasında olduğu ve boylarının 4 µm ile 8,5 µm arasında değiştiği gözlenmiştir. % 2 Ag katkılı ZnO numunesinin nanofiberlerin çapının 800 nm ile 1,3 µm arasında değiştiği, boylarının ise 12 µm ile 18 µm arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Numuneler genel olarak değerlendirildiğinde nanofiberlerin alttaşlar üzerinde dikey değil yanal olarak geliştiği görülmüştür. Artan Ag katkı oranı ile nanofiberlerin çaplarının arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 1: Yüzeysel Ölçüm Sonuçları

| Numune Adı | Nanofiberlerin Uzunlukları | Nanofiberlerin Çapları |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Katkısız ZnO | 5 µm ile 8,5 µm | 450 nm ile 800 nm arasında |
| % 0,5 Ag katkılı ZnO | 4 µm ile 8,5 µm arasında | 600 nm ile 950 nm arasında |
| % 2 Ag katkılı ZnO | 12 µm ile 18 µm arasında | 800 nm ile 1300 nm arasında |

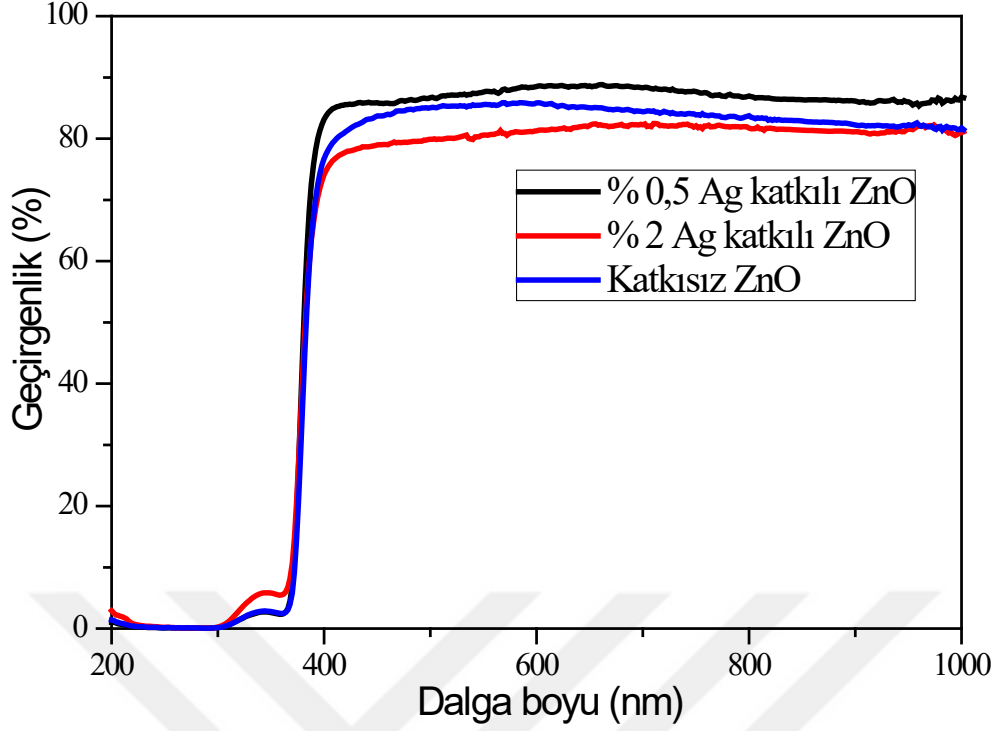
4.2. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO İnce Film Numunelerinin Optik Analiz Sonuçları

Sol-jel yöntemi ile büyütülen katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince film numunelerinin optik özellikleri "UV3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR 3600 Spektrofotometre" cihazı kullanılarak incelendi. Hazırlanan ince filmlerin Absorbans (soğurma), Geçirgenlik ve Yansıma spektrumları oda sıcaklığında 200-1000 nm dalga boyu aralığında alındı. Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin absorbans-dalga boyu grafiği Şekil 4.2'de sunulmuştur.



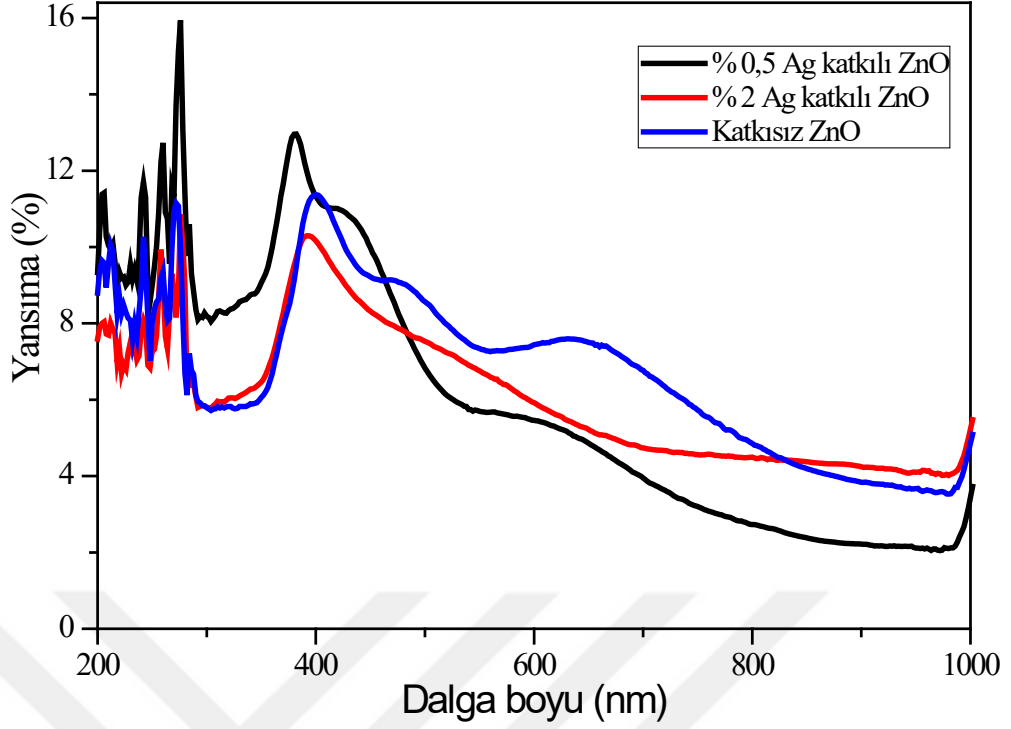
Şekil 4.2: Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin Absorbans-Dalga boyu grafiği

Şekil 4.2’de katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin Absorbans-Dalga boyu grafiği verilmiştir. Her üç numune için Absorbans spektrumunda 288 nm dalga boyuna kadar görülen artış, 400 nm dalga boyuna sonra ise denge değerine ulaşmaktadır. Üç numune de görünür bölgede geçirgen özelliği göstermekte, 400 nm dalga boyundan küçük dalga boylarında ise soğurma özelliği göstermektedir. Absorbansın, % 0,5 Ag katkılı ZnO numunesi için yüksek olduğu belirlenmiştir. Her üç numune için soğurma sınırı, 288 nm’de ve 358 nm’de iki farklı geçişe sahiptir. 402 nm dalga boyundan başlayarak 288 nm dalga boyuna doğru keskin bir artış göstermiştir. 288 nm’den sonra eğrilerde bir azalma gözlenir. Soğurulma sınırı bütün filmlerde 400 nm’nin altındadır.



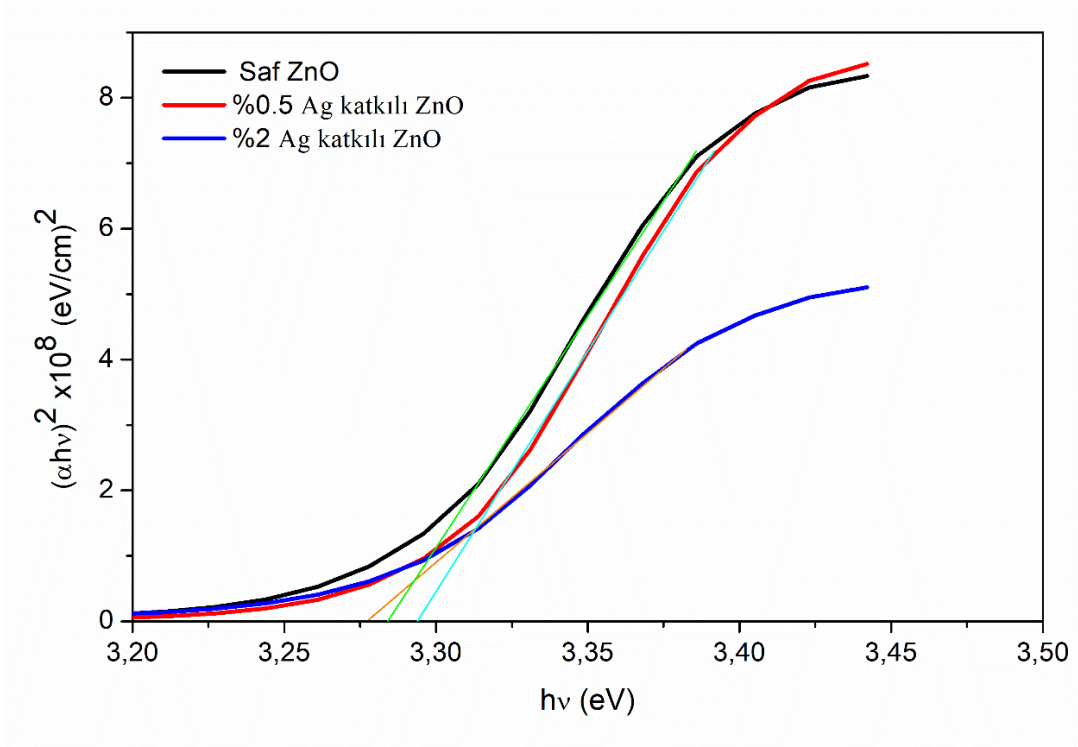
Şekil 4.3: Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin Geçirgenlik-Dalga boyu grafiği

Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO filmlerinin Geçirgenlik spektrumları, Şekil 4.3'de gösterilmektedir. Geçirgenliğin, bütün filmlerde UV bölgede düşük, görünür bölgede ise %78-%88 Aralığında yüksek olduğu görülmüştür. UV bölgedeki düşük geçirgenlik, bu bölgedeki elektromanyetik dalgaların enerjisinin band aralığından yüksek olması nedeniyle değerlik-iletkenlik bandları arasındaki elektron transferi sebebiyle dalgaların enerjisinin soğurulmasıyla meydana gelmiştir. 400-1000 nm aralığında geçirgenliğin, katkısız ZnO numunesi için % 85, % 0,5 Ag katkılı ZnO numunesi için % 88, % 2 Ag katkılı ZnO numunesi için % 82 olduğu ve % 0,5 Ag katkılı ZnO numunesinin geçirgenliği en yüksek olduğu görülmüştür. Böylece üç numunenin geçirgenlik değerlerinin yüksek olduğu ve saydam malzemeler olarak davranış sergilediği söylenebilir. Geçirgenlik değerlerini dalga boyuna göre incelediğimizde üç numunenin de 400 nm'den daha küçük dalga boylarında keskin bir azalma görülmektedir. Numunelerin optik geçirgenliklerinin yüksek olması alttaş üzerine ince filmlerin homojen yani pürüzsüz bir şekilde büyütülmesine, büyütülen ince filmlerin yoğunluğunun ve yüzeylerinde gerçekleşen kayıp saçılmanın düşük olmasına bağlıdır.



Şekil 4.4: Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin Yansıtma -Dalga boyu grafiği

Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO filmlerinin Yansıtma spektrumları, Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Yansıtma spektrumlarına bakıldığında, 200-1000 nm dalga boyu aralığında yansıtma oranlarında değişiklikler gözlenmektedir. Yansıtma sınırı nano yapıya bağlı olarak daha yüksek dalgaboylarına kaydığı sonucuna varılmaktadır. Yansıtma spektrumlarında 880-1000 nm aralığında, yansıtma oranları giderek azalmaktadır. ~ 400 nm'de geniş bir tepe bölgesi görünmektedir. Bu, optik band boşluğunda meydana gelen yüzey ve optik geçişlerden dolayı artan yansıtma ile ilgilidir.



Şekil 4.5: $(\alpha hv)^2$ 'nin foton enerjisine ($h\nu$) göre değişim grafiği

Çizelge 2: Katkısız ve Ag Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yasak Enerji Değerleri

| Numune Adı | Eg (eV) |
|----------------------|---------|
| Katkısız ZnO | 3,289 |
| % 0,5 Ag katkılı ZnO | 3,294 |
| % 2 Ag katkılı ZnO | 3,278 |

Katkısız ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin yasak enerji aralıklarının belirlenmesinde optik absorpsiyon yöntemi kullanılmıştır. Bunun için soğurma spektrumlarından faydalanarak;

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (4.1)$$

ifadesinden her bir film için lineer soğurma katsayıları hesaplanıp, $(\alpha hv)^2=0$ 'da kestiği noktaların enerji değerleri filmlerin yasak enerji aralıkları olarak belirlenmiştir. Burada T, Geçirgenlik ve d ise film kalınlığıdır.

Yasak enerji aralığının hesaplanmasında;

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (4.2)$$

Formülü kullanılmıştır [45].

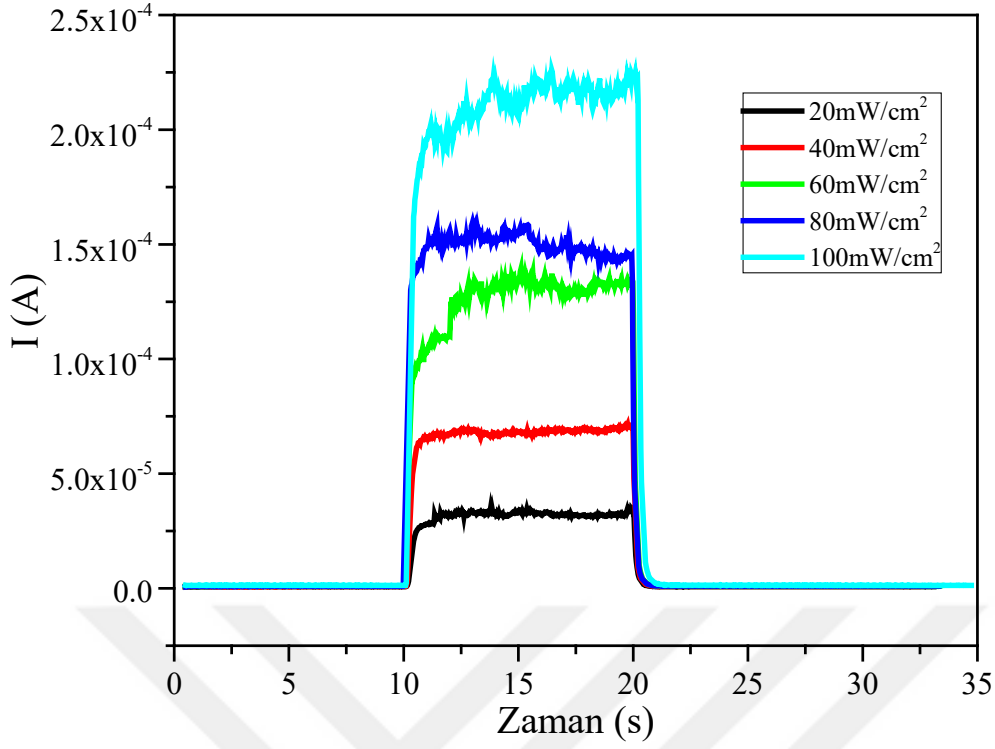
Şekil 4.5’de filmlerin $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafikleri verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi üç numunenin de E_g değerleri neredeyse aynıdır. Katkılamanın, E_g değerine etkisi çok az olmuştur. Bu grafiklerden ince filmlerin yasak enerji aralıkları sırasıyla 3,289 eV, 3,294 eV ve 3,278 eV olduğu tespit edilmiş ve Tablo1’de gösterilmiştir. Ayrıca tüm filmlerin yaklaşık olarak 3,2 eV yasak enerji aralığına sahip olması çalışmamızın literatür ile uyumlu olduğunu göstermiştir [46] [47].

Fakat Ag katkılı ZnO ince filmlerin, katkısız ZnO ince film ile yaklaşık aynı band aralığı enerjisi (E_g) değerini vermesi yapılan katkılamanın yasak band aralığı enerjisinde önemli bir değişiklik yapmadığını göstermiştir.

4.3. Katkısız ZnO ve Ag Katkılı ZnO İnce Filmlerin Elektriksel Ölçüm Sonuçları

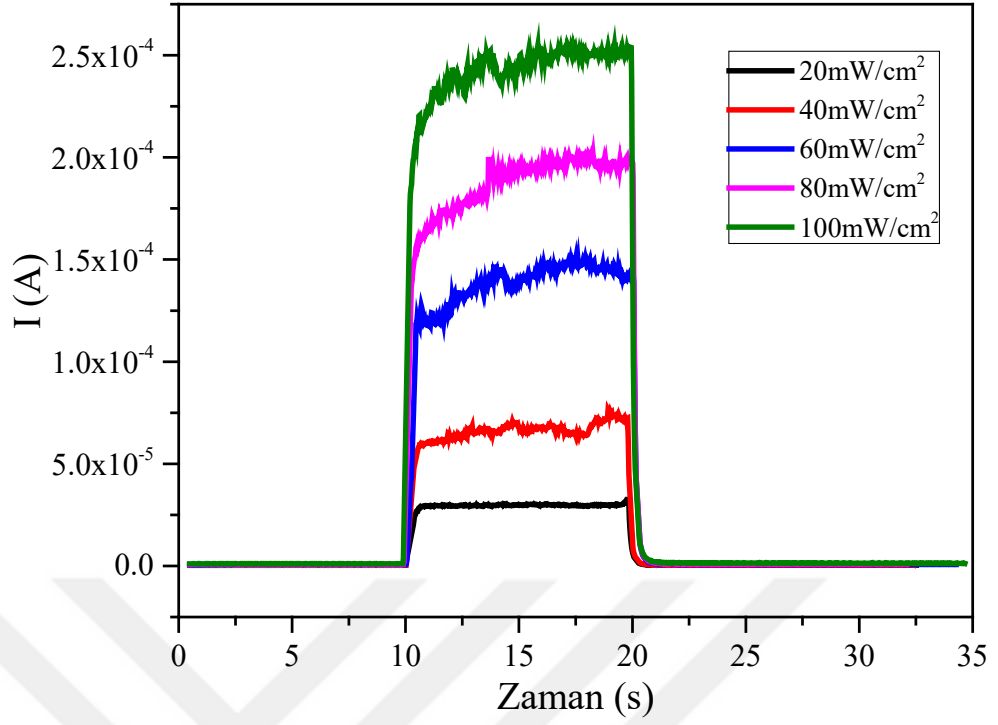
4.3.1 Al/Ag: ZnO/p-Si/Al Diyotların Foto Akım-Zaman (I-t) Karakteristikleri

Al/Ag: ZnO/p-Si/Al diyotlarının Foto Akım - Zaman (I-t) grafikleri Şekil 4.6 ile Şekil 4.8 arasında verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, Güneş ışığı altında diyot fotoakımı artan ışık şiddeti ile artmakta ve ışık yok iken ilk değerine geri dönmektedir. Al/Ag: ZnO/p-Si/Al diyotların I-t grafiklerine göre, 5’er saniye aralıklarla açma-kapama yapılan diyotların, fotoakımı aydınlatma altında artar ve sabit bir değere ulaşır. Işık ilk kapatıldığı andan itibaren ise azalır ve akım ilk değerine ulaşır. Elde edilen sonuçlar diyotların fotoakım mekanizması, ara yüzey bölgesinde oluşan foto taşıyıcılarından kaynaklandığını göstermektedir [48] [49].



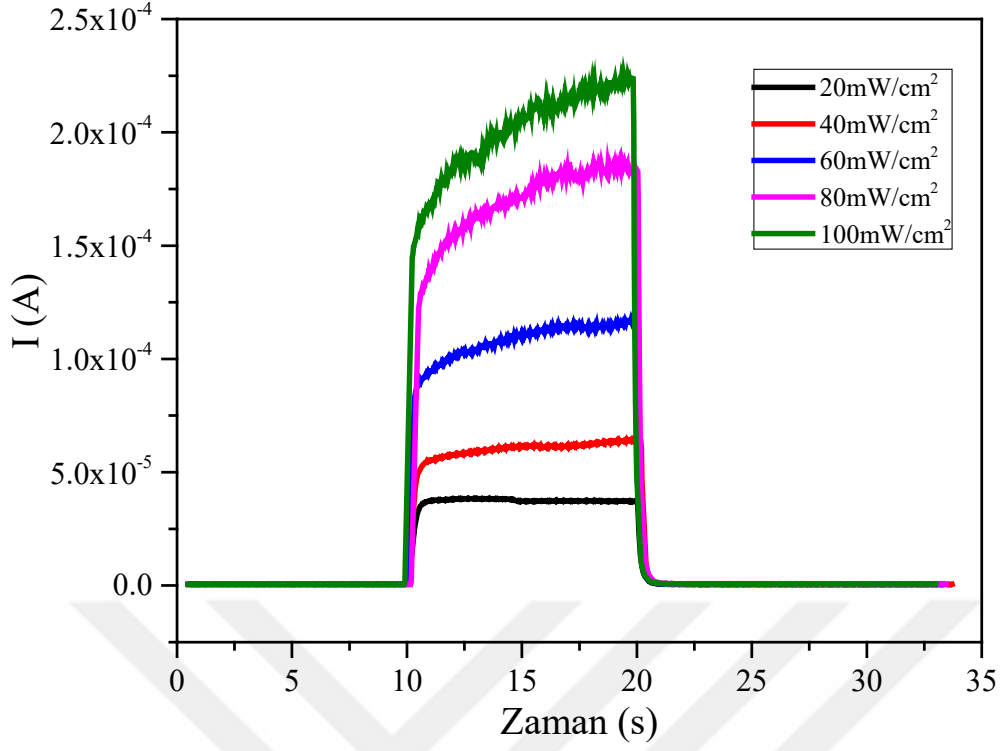
Şekil 4.6: Katkısız Al/Ag: ZnO/p-Si/Al diyotlarının Foto Akım- Zaman (I-t) karakteristikleri

Şekil 4.6’de diyotun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki $I_{açma} / I_{kapama}$ oranı 449 olarak bulunurken 80 mW/cm²’de 331, 60 mW/cm²’de 246, 30 mW/cm²’de 160, 10 mW/cm²’de ise 70 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.7: % 0,5 Ag katkılı Al/Ag: ZnO/p-Si/Al diyotlarının Akım - Zaman (I-t) karakteristikleri

Şekil 4.7’de diyotun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki $I_{açma} / I_{kapama}$ oranı 250 olarak bulunurken 80 mW/cm²’de 317, 60 mW/cm²’de 254, 30 mW/cm²’de 199, 10 mW/cm²’de ise 97 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.8: % 2 Ag katkılı Al/Ag: ZnO/p-Si/Al diyotlarının Akım - Zaman (I-t) karakteristikleri

Şekil 4.8’de diyotun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki $I_{açma} / I_{kapama}$ oranı 190 olarak bulunurken 80 mW/cm²’de 170, 60 mW/cm²’de 150, 30 mW/cm²’de 91, 10 mW/cm²’de ise 48 olarak bulunmuştur.

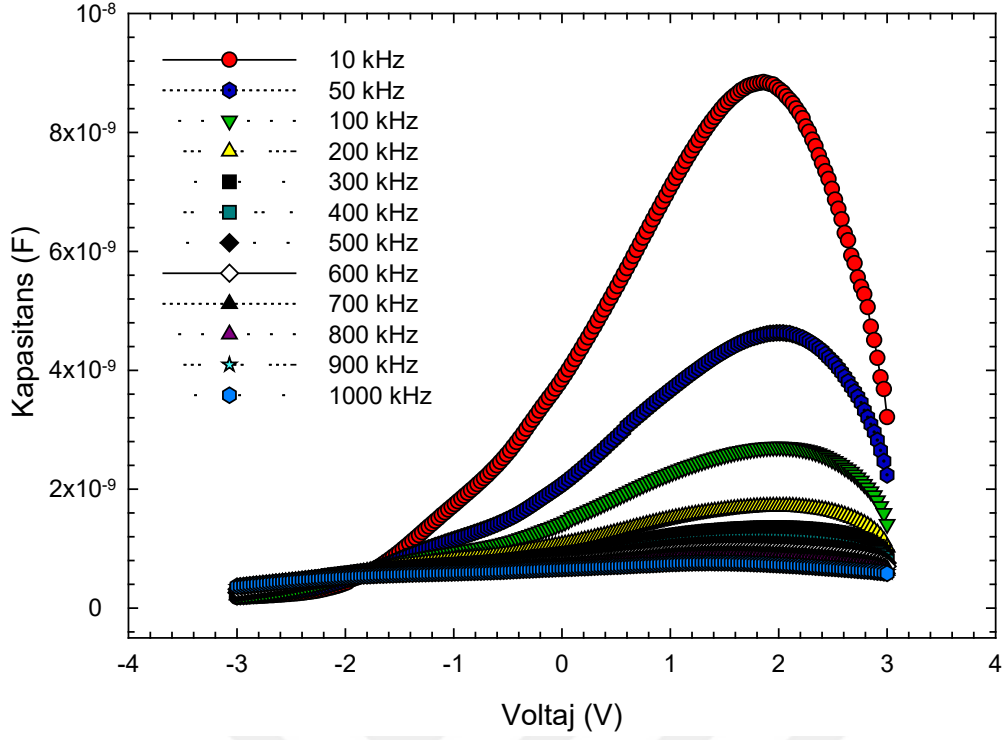
Çizelge 3: Al/Ag: ZnO/p-Si/Al Diyotların FotoAkım-Zaman(I-t) Karakteristikleri

| Diyot Adı | Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²) | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|----|
| | 100 | 80 | 60 | 30 | 10 |
| Katkısız Al/Ag: ZnO/p-Si/Al | I _{açma} / I _{kapama} oranı | | | | |
| | 449 | 331 | 246 | 160 | 70 |
| | Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²) | | | | |
| % 0,5 Ag katkılı Al/Ag: ZnO/p- Si/Al | 100 | 80 | 60 | 30 | 10 |
| | I _{açma} / I _{kapama} oranı | | | | |
| | 250 | 317 | 254 | 199 | 97 |
| | Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²) | | | | |
| % 2 Ag katkılı Al/Ag: ZnO/p- Si/Al | 100 | 80 | 60 | 30 | 10 |
| | I _{açma} / I _{kapama} oranı | | | | |
| | 190 | 170 | 150 | 91 | 48 |
| | Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²) | | | | |

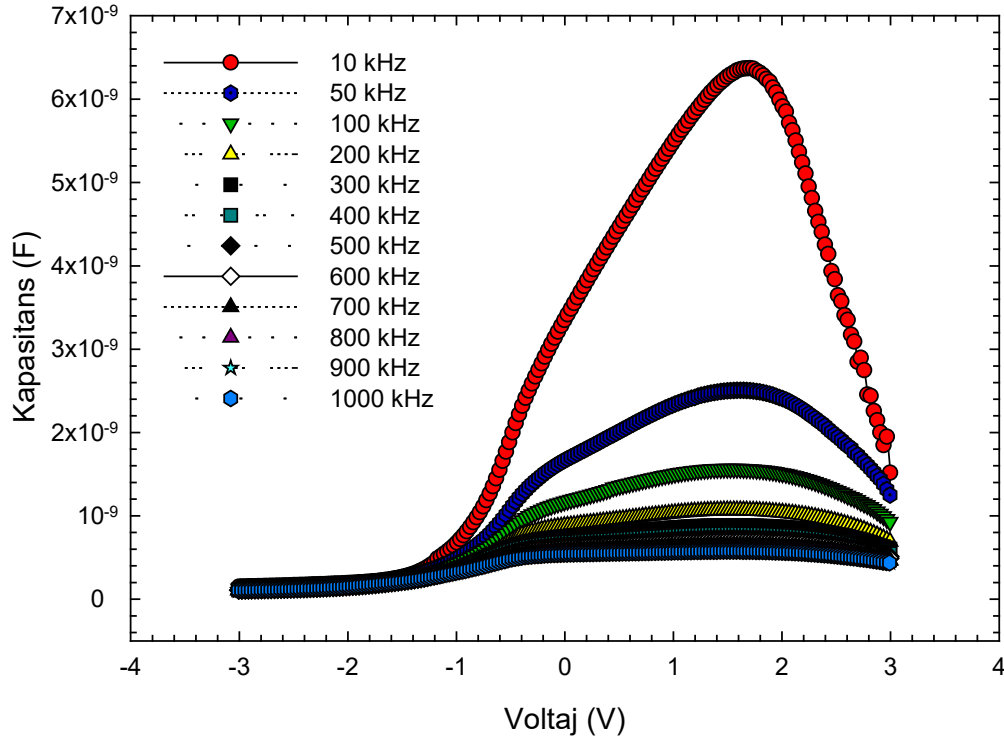
4.3.2. Al/Ag: ZnO/p-Si/Al Diyotların C-V ve G/ω-V karakterizasyonları

Katkılanmamış ZnO, % 0,5Ag katkılı ZnO, % 2 Ag katkılı ZnO C-V ve G/ω-V karakterizasyon işlemleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

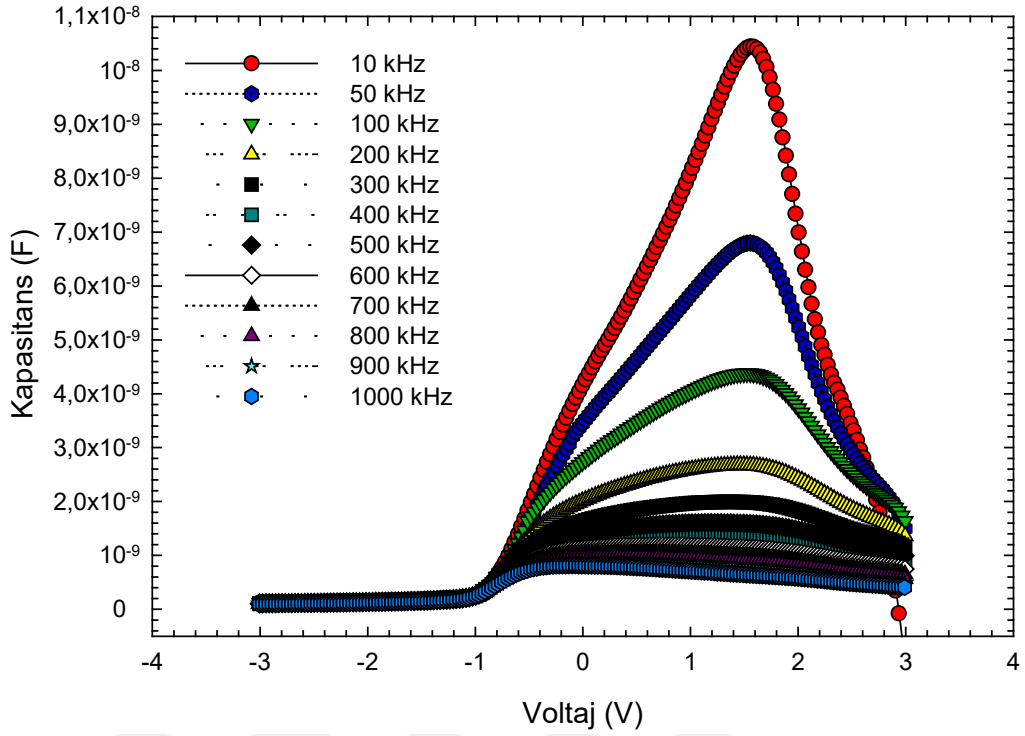
Diyotlardan değişik frekanslarda elde edilen kapasitans – voltaj bilgileri ile C-V grafikleri çizildi. Katkılanmamış ZnO, % 0,5Ag katkılı ZnO, % 2 Ag katkılı ZnO diyotlara ait grafikler Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 da verilmiştir.



Şekil 4.9: Katkılanmamış ZnO ince filme ait Kapacitans- Voltaj grafiği



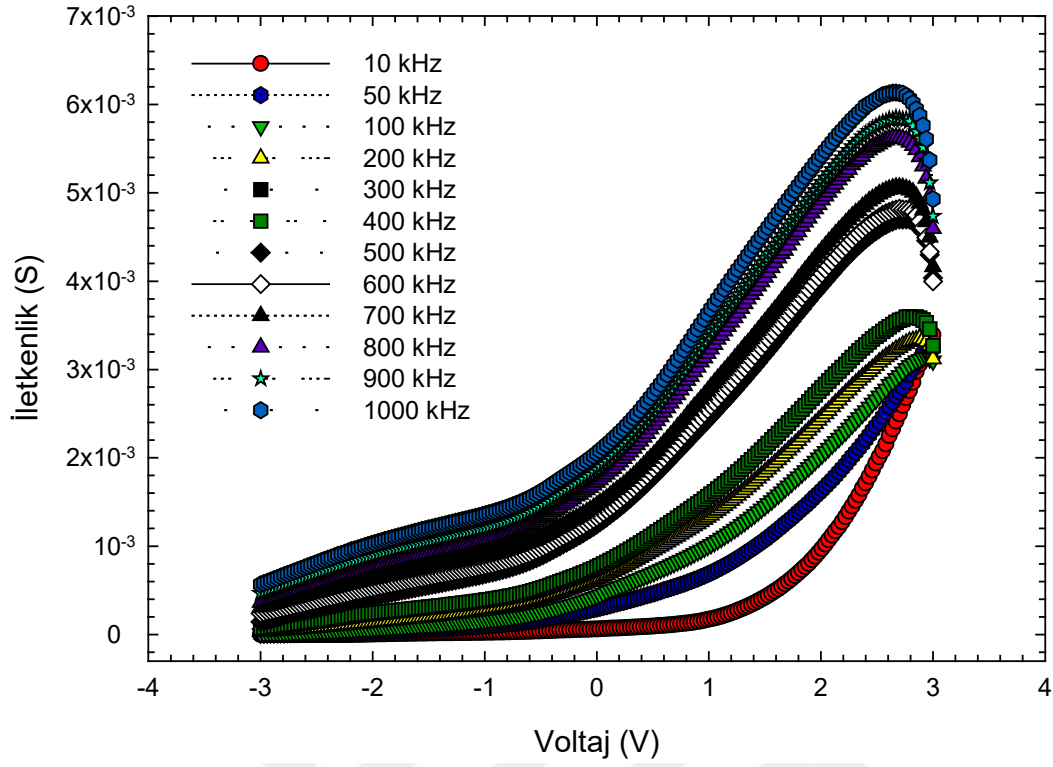
Şekil 4.10: % 0,5 Ag katkılı ZnO ince filme ait Kapacitans- Voltaj grafiği



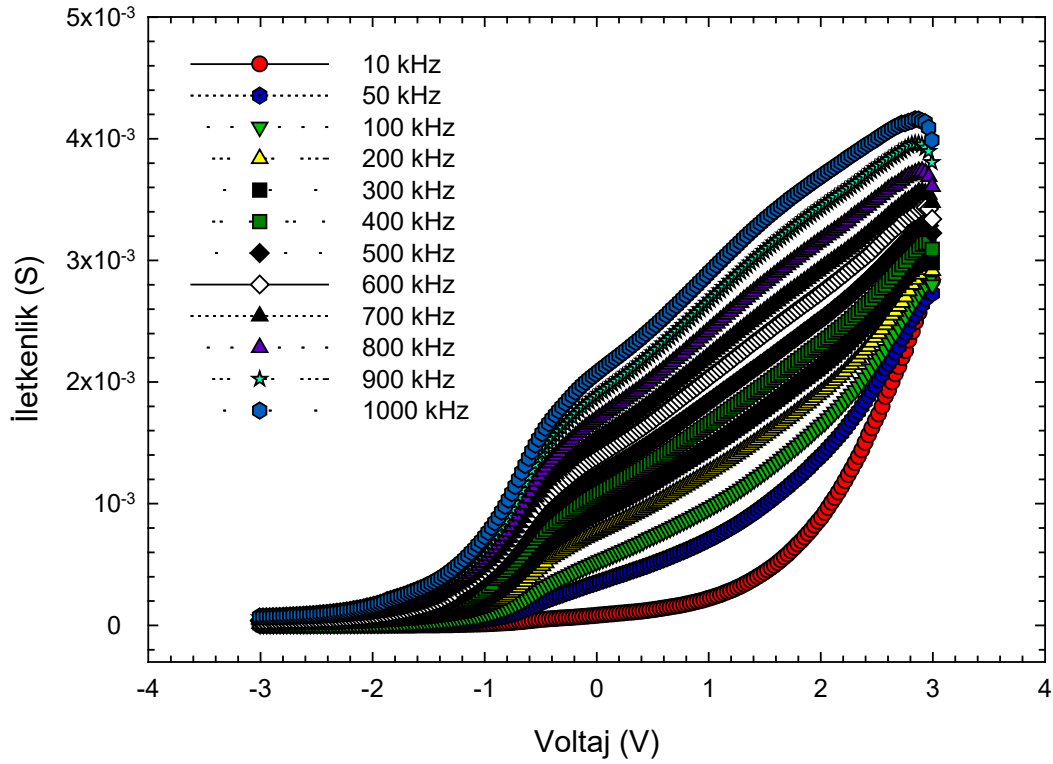
Şekil 4.11: % 2 Ag katkılı ZnO ince filme ait Kapasitans- Voltaj grafiği

C-V Grafikleri incelendiğinde diyotların artan frekans değerine karşın azalan kapasitans özelliği gösterdiği görülmektedir. Diyotların düşük frekanslarda daha yüksek kapasitans özelliği gösterdiği anlaşılmaktadır. Frekans değerleri arttırıldığında kapasitans değerleri düşerken yüksek frekans değerlerinde sahip oldukları kapasitans değerleri arasındaki farkın azaldığı anlaşılmıştır. Böylece diyotların düşük frekans değerlerinde daha yüksek kapasitans özellik göstereceği görülmüştür.

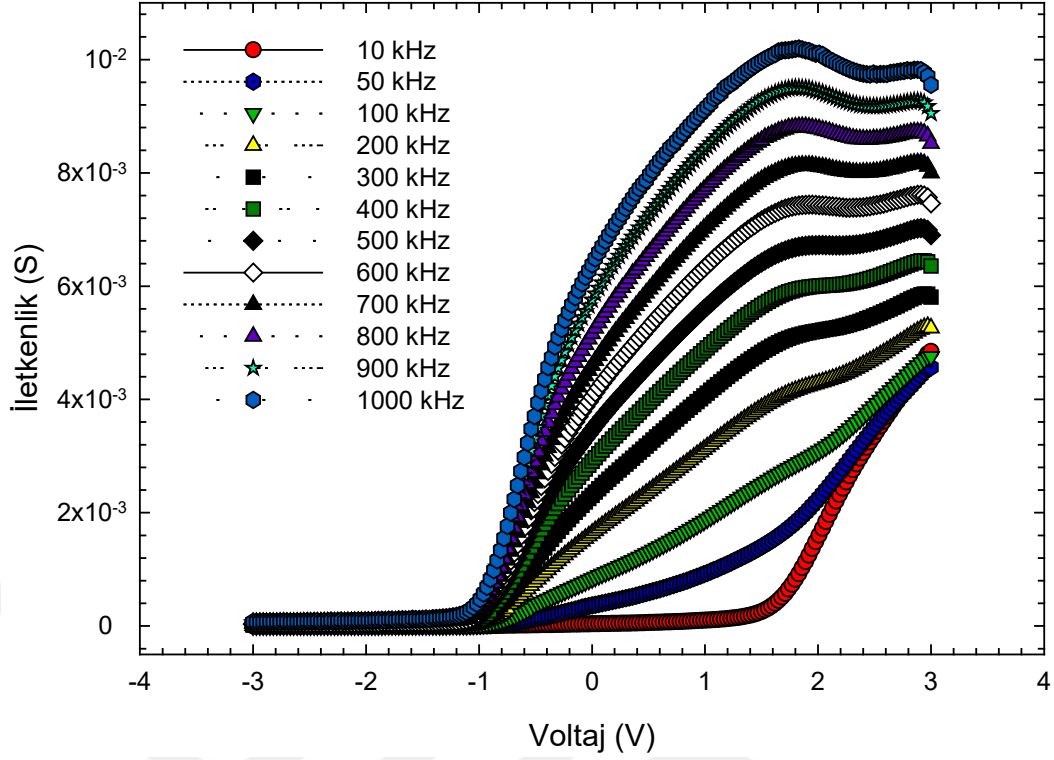
Diyotlardan değişik frekans aralıklarında elde edilen iletkenlik – voltaj bilgileri ile G/ω -V grafikleri çizildi. Katkılanmamış ZnO , % 0,5Ag katkılı ZnO , % 2 Ag katkılı ZnO diyotlara ait grafikler Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 de verilmiştir.



Şekil 4.12: Katkılanmamış ZnO ince filme ait İletkenlik – Voltaj grafiği



Şekil 4.13: % 0,5 Ag katkılanmış ZnO ince filme ait İletkenlik- Voltaj grafiği



Şekil 4.14: % 2 Ag katkılanmış ZnO ince filme ait İletkenlik- Voltaj grafiği

Katkılı ve katkısız ZnO diyotlara ait grafikler incelendiğinde artan frekans değerinin ölçülen iletkenliği arttırdığı gözlemlenmektedir. Frekans değeri ile ölçülen iletkenlik arasında doğru bir orantı olduğu görülmektedir. Ayrıca Ag katkılanmasının diyotların elektriksel özelliklerini iyileştirdiği görülmektedir. Ag katkılanma miktarı arttıkça elektriksel iletkenlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 değerlendirildiğinde % 0,5 Ag katkılı diyotun katkısız diyota göre, % 2 Ag katkılı diyotun % 0,5 Ag katkılı diyota göre daha iyi iletkenlik özellik gösterdiği anlaşılmıştır.

Diyotların kapasitans ve iletkenlik değerlikleri ölçülerek, karmaşık geçirgenlik (complex permittivity) hesaplanabilir.

Karmaşık geçirgenlik hesaplanırken;

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (4.3)$$

Formülü kullanılmaktadır. Formülde ε' ve ε'' ε^* in reel ve imajiner kısımlarıdır; i ise -1 in imajiner köküdür. Şekilde formül admitans (Y^*) kullanılarak yeniden tanımlanırsa,

$$\varepsilon^* = \frac{Y^*}{i\omega C_i} = \frac{C_m}{C_i} - i \frac{G_m}{\omega C_i} \quad (4.4)$$

Şeklinde yazılabilir; burada burada C_m ve G_m sırası ile ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir ve $\omega = 2\pi$ defa frekans değeridir.

ε' ve ε'' nin frekans ve ileri denetleme voltajı ile bağlantısı C_m ve G_m değerlerini kullanarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_i} = \frac{C d_i}{\varepsilon_o A} \quad (4.5)$$

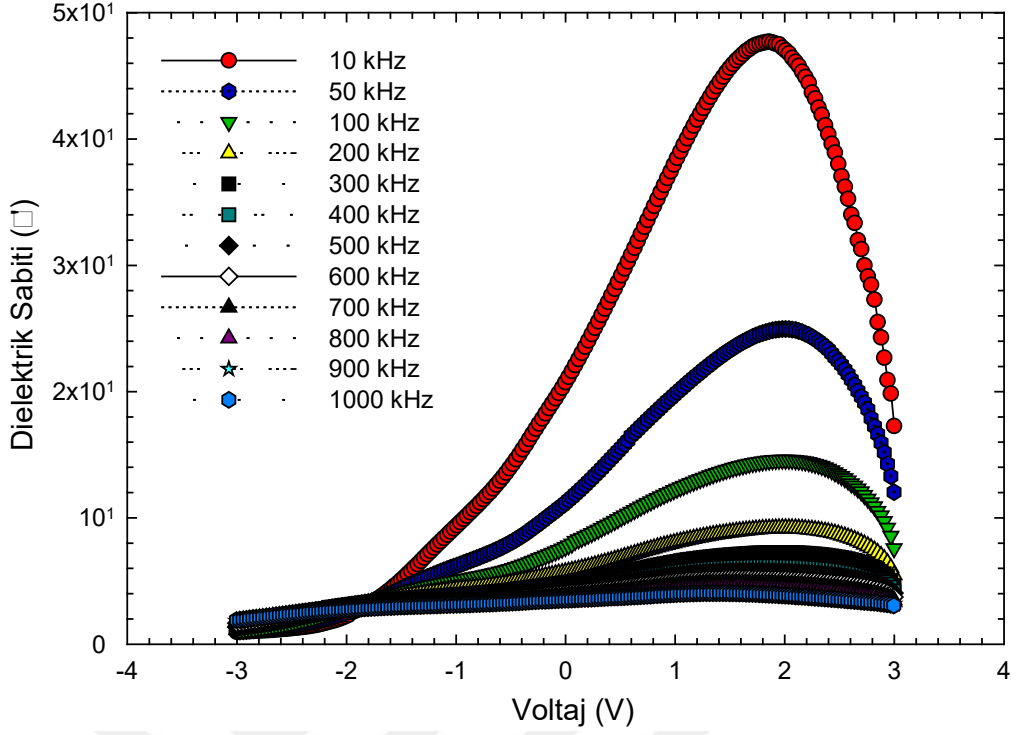
$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_i} = \frac{G d_i}{\varepsilon_o \omega A} \quad (4.6)$$

Burada C_i yalıtkan arayüzey katmanının (ZnO) kapasitans değeri, A düzeltici kontak (Au) alanı, d_i yalıtkan katman kalınlığı ve $\varepsilon_0 (=8.85 \times 10^{-14}) \text{ Fcm}^{-1}$) ise boşluğun elektriksel geçirgenliğidir. Birikme bölgesinde yapının en çok kapasitansı kullanılan yalıtkan maddenin kapasitansı $C_{ac}=C_i=\varepsilon' \varepsilon_0 A/d_i$) ile bağlantılıdır. Kayıp tanjant olarak

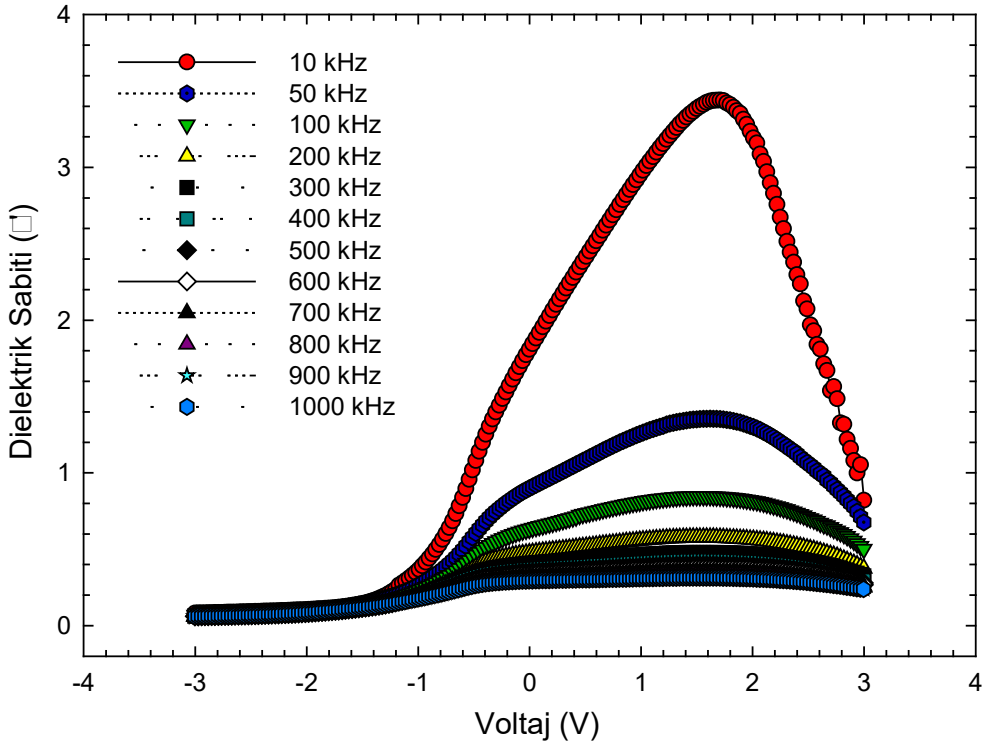
$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (4.7)$$

Formülü ile kesaplanabilir.

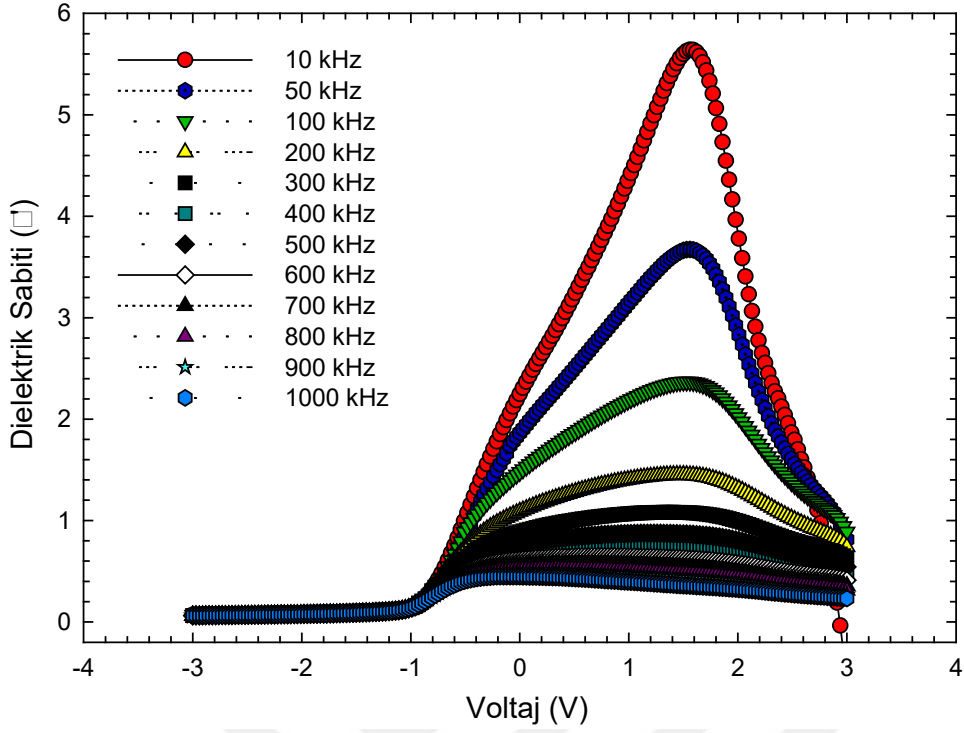
Katkısız ZnO , % 0,5 Ag katkılı ZnO ve % 2 Ag katkılı ZnO diyotlarının voltaja bağlı ε' , ε'' dielektrik değerleri ve $\tan\delta$ grafikleri aşağıdaki şekillerde listelenmiştir. Şekil 4.15 ve 4.16 arasında listelenen grafiklerden görülebileceği üzere ε' , ε'' ve $\tan\delta$ değerlerinin hem frekansla hem de ileri denetleme voltajı ile değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.15: Katkısız ZnO diyotunun Dielektrik Sabiti (ϵ') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik

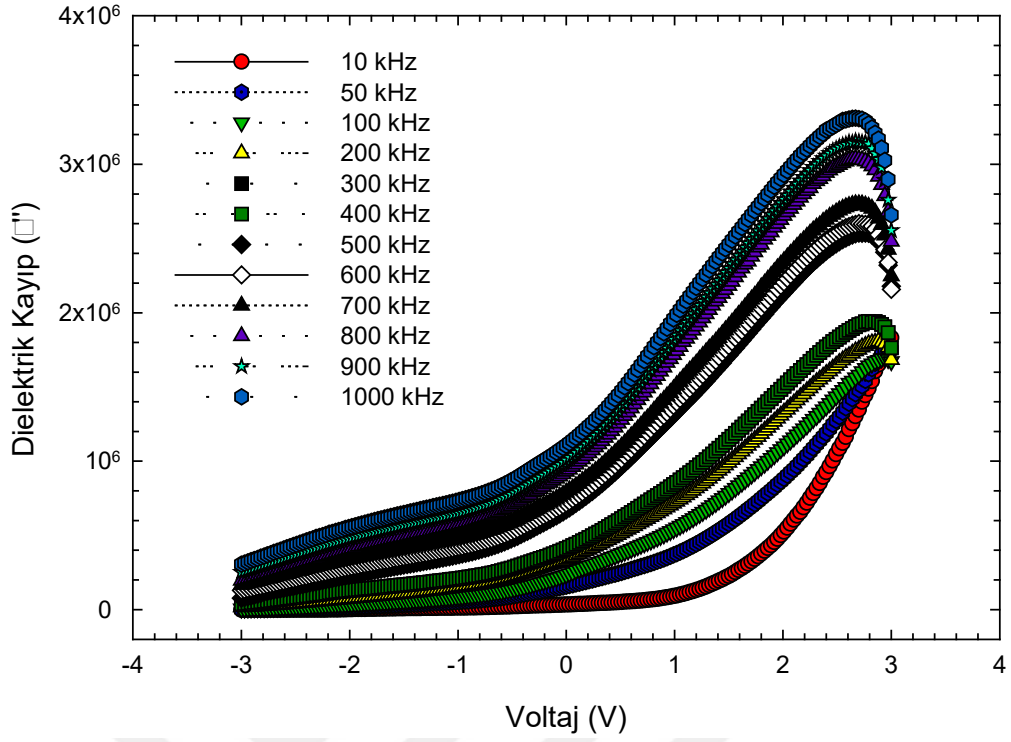


Şekil 4.16: % 0,5 Ag katkılı ZnO diyotunun Dielektrik Sabiti (ϵ') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik

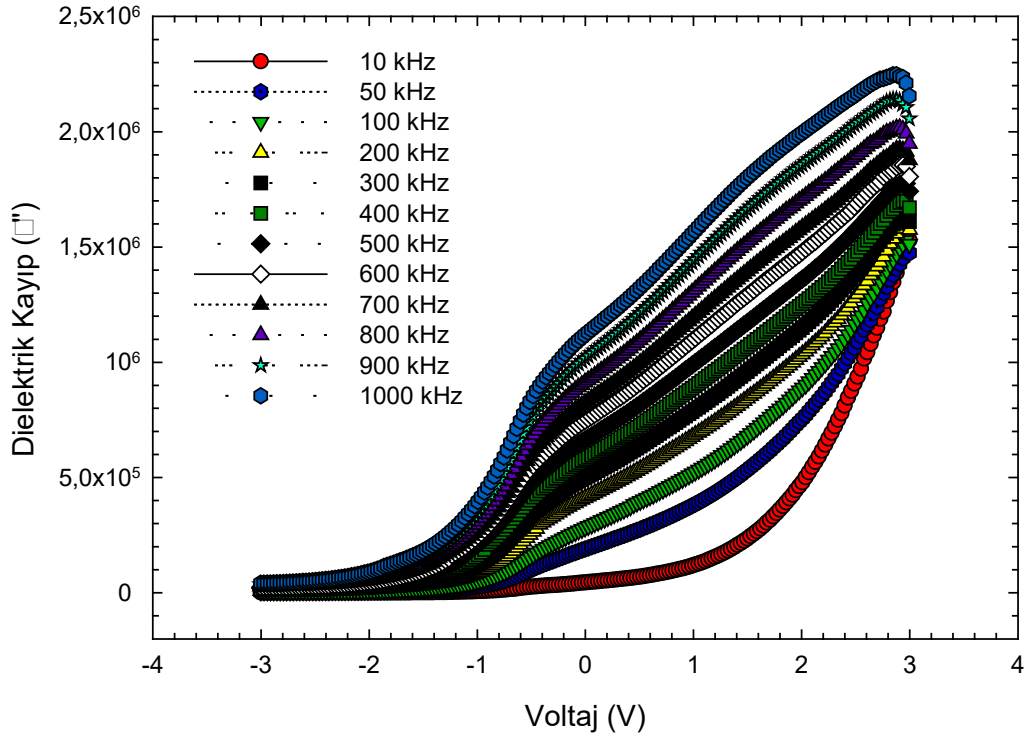


Şekil 4.17: % 2 Ag katkılı ZnO diyotunun Dielektrik Sabiti (ϵ') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik

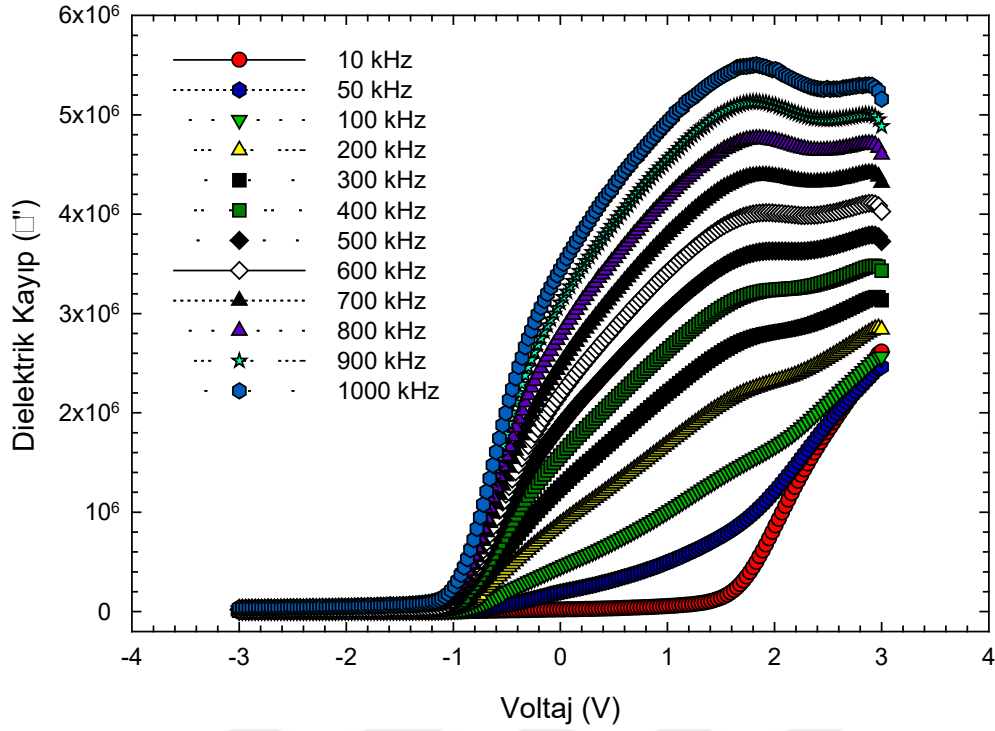
Grafikler incelendiğinde ϵ' değerinin frekans arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir; frekans değerleri ile dielektrik sabitinin uyumlu olduğu görülmektedir. Ag katkılamasının da katkısız ZnO diyotların dielektrik sabitini azalttığı grafiklerden anlaşılmaktadır. % 0,5 ve % 2 Ag katkılaması yapılması ile dielektrik sabitinde yaklaşık on kata kadar azalma gözlemlenmektedir.



Şekil 4.18: Katkısız ZnO diyotunun Dielektrik Kayıp (ϵ'') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik

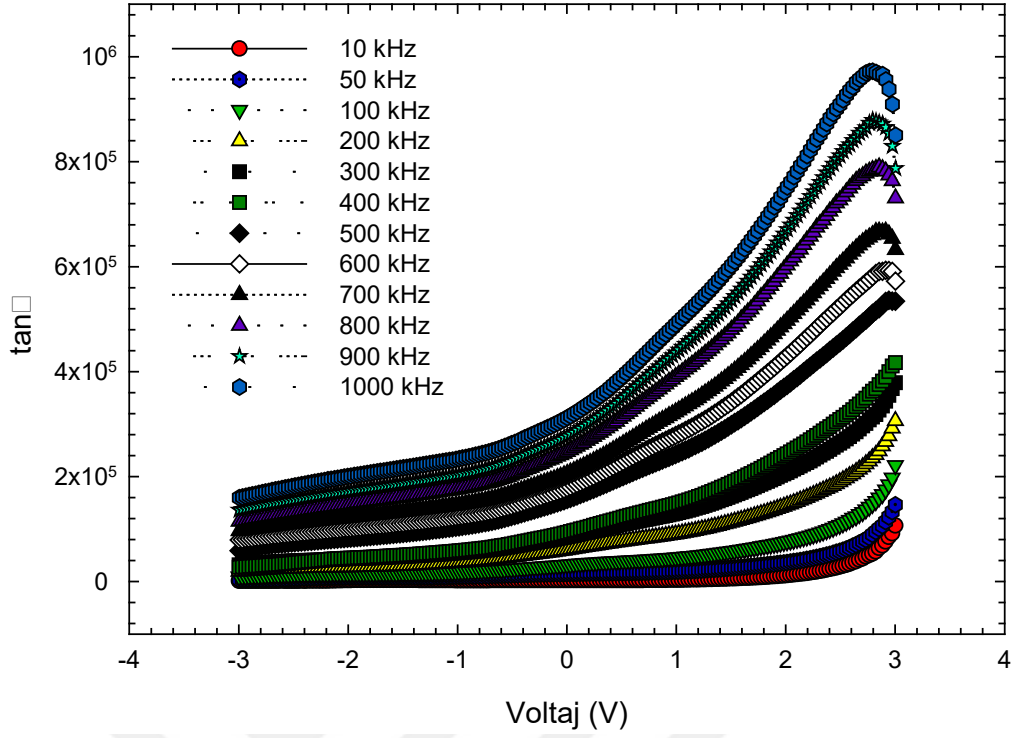


Şekil 4.19: % 0,5 Ag katkılı ZnO diyotunun Dielektrik Kayıp (ϵ'') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik

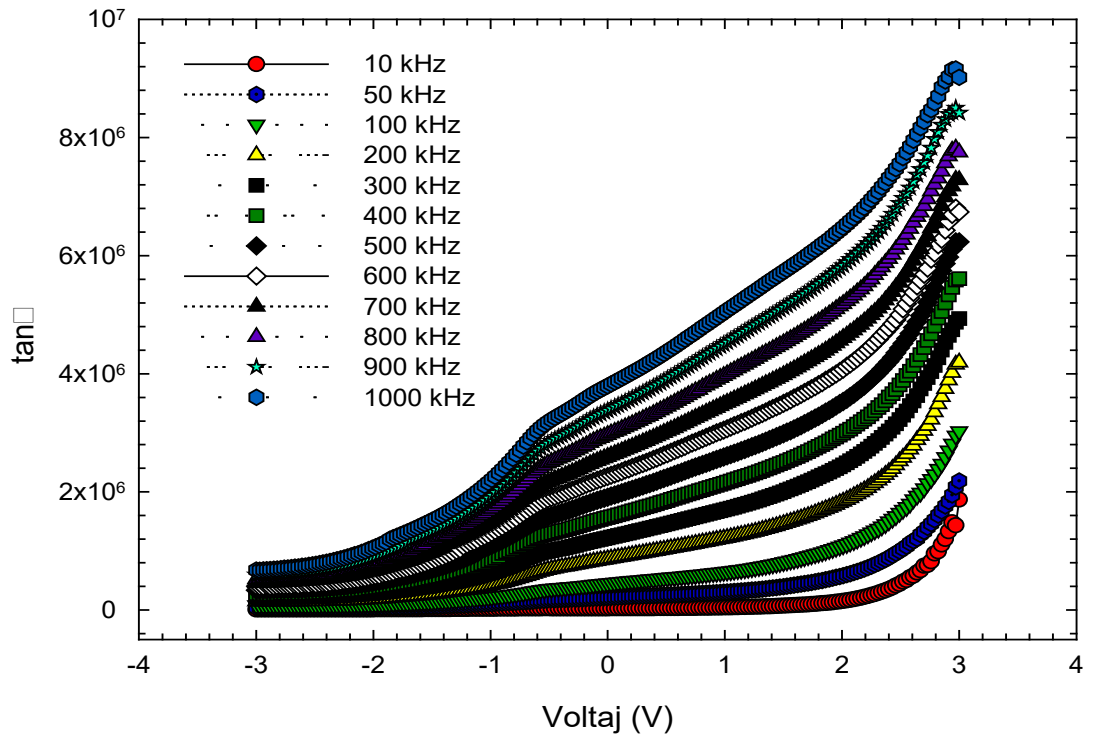


Şekil 4.20: % 2 Ag katkılı ZnO diyotunun Dielektrik Kayıp (ϵ'') değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik

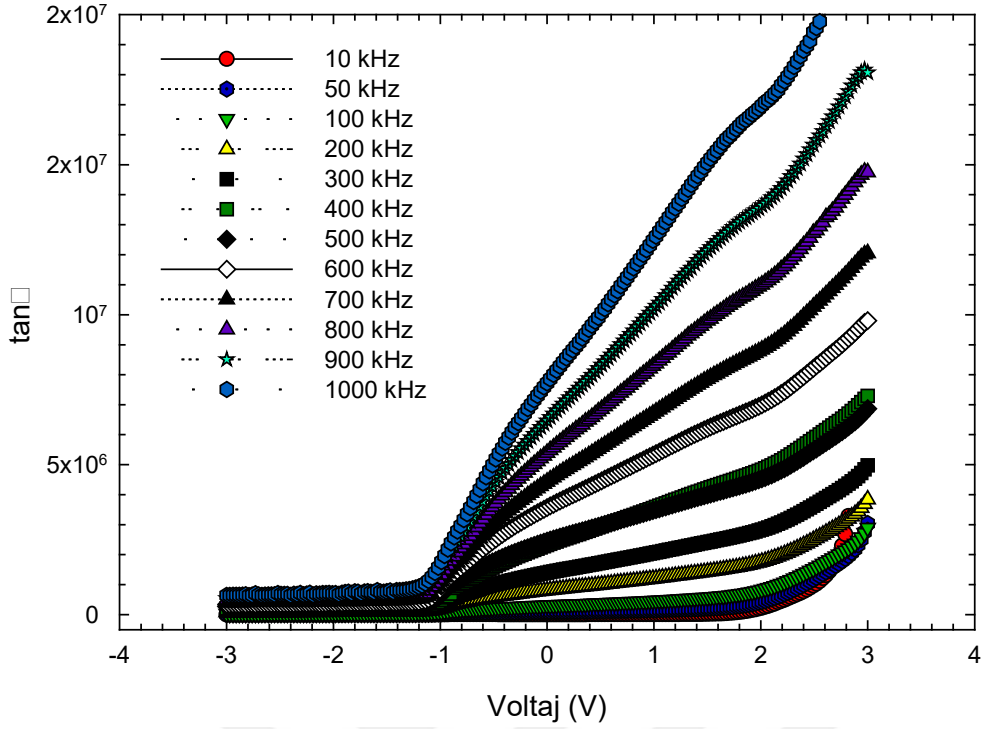
ϵ'' Voltaja karşı değişimini gösteren grafikler incelendiğinde dielektrik kayıp değerinin artan frekans değeri ile arttığı görülmektedir. Grafiklerden Ag katkılmasının artan dielektrik kayıp değeri üzerinde kesin bir etkisi olduğuna dair kesin bir bağlantı gözlemlenememiştir.



Şekil 4.21: Katkısız ZnO diyotunun $\tan \delta$ değerinin değişik frekanslarda voltaja bağlılığını gösteren grafik



Şekil 4.22: % 0,5 Ag katkılı ZnO diyotunun $\tan \delta$ değerinin değişik frekanslarda voltaja bağlılığını gösteren grafik



Şekil 4.23: % 2 Ag katkılı ZnO diyotunun $\tan\delta$ değerinin değişik frekanslarda voltaja bağımlılığını gösteren grafik

Dielektrik $\tan\delta$ grafikleri incelendiğinde bu değer artan frekans değeri ile artış gösterdiği anlaşılmıştır. ZnO diyotlara Ag katkılama yapıldığında dielektrik tanjant değerinin artış gösterdiği görülmektedir; Ag katkılama miktarının artması ile dielektrik tanjantın artışı arasında paralellik gözlemlenmektedir.

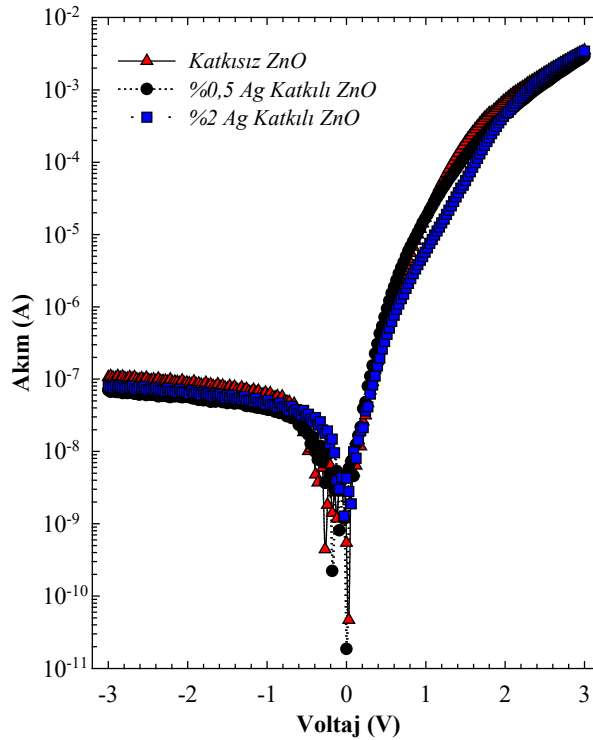
Tüm grafikler incelendiğinde ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinin frekans ile değiştiği anlaşılmaktadır. Literatürde ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinde frekansa bağlı değişim gözlemlenmesi ara yüzeylerde bulunan dipollerin değişen elektrik alan ve frekans değerleri ile kendilerini yönlendirmeleri ile açıklanmaktadır.

ϵ' -V grafiklerinde iki belirgin pik gözlemlenmektedir; bu pikler özellikle düşük sıcaklıklarda ve seri bağlı devrelerin oluşturduğu seri dirençlerin (R_s) yüzeyde bulunan yük yoğunluklarının oluşturduğu kitlelik bölgesini ve birikim bölgelerine kaşılık gelmektedir. Ancak yüksek frekansta yok olurlar. Çünkü, frekans yükseldiğinde polarizasyonun şiddeti azalır ve bir durumda bulunan yükler gelen yüksek frekanstaki alternatif akım sinyalini takip edemez. $\tan\delta$ -V grafiklerinde de düşük frekansta kitlelik bölgesine yakın bir bölgede özellikle negatif denetlemeye yakın bir yerde bir pik

göstermektedir. Bu pik'in şiddeti artan frekans ile birlikte azalmaktadır. Başka bir deyişle, yüksek frekanslarda arayüz polarizasyonları sabit bir değere ulaşır çünkü belli bir frekans değeri üzerinde elektron sıçramaları dış alanı takip edemez. Bu sebeple ϵ' ve ϵ'' düşük frekanslarda dört değişik çeşit polarizasyon işleminden etkilenirler (elektronik, iyonik, dipolar ve arayüz). Çok yüksek frekanslarda ($f \geq 10^{10}$ Hz) sadece elektronik ve iyonik kısımlar baskın olurken, diğer faktörler 1MHz altındaki düşük frekanslarda etkili olurlar. Ayrıca, ϵ' ve ϵ'' değerleri yüksek frekanslarda neredeyse voltaj değerinden bağımsız şekilde hareket ederler. Dielektrik sabitinin sıcaklık, tavlama, frekans, film büyütme ve hazırlama yöntemleri, kalınlık, homojenite, uygulanan voltaj ve frekansa göre farklılık gösterdiği bilinmektedir.

4.3.3. Al/Ag: ZnO/p-Si/Al Diyotların Foto Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Katkısız Al/Ag:ZnO/p-Si/Al ve % 0,5, % 2 Ag katkılı Al/Ag:ZnO/p-Si/Al diyotların elektriksel özellikleri oda sıcaklığında araştırıldı. Çizilen I-V (Akım-Voltaj) grafiği Şekil 4.24'de gösterilmiştir.



Şekil 4.24: Al/Ag:ZnO/p-Si/Al diyotların Akım- Voltaj (I-V) karakteristikleri

Diyotlar nicelik olarak termoiyonik emisyon teorisi (TE) kullanılarak aşağıdaki formül ile analiz edilmiştir [50] [51].

$$I = I_o \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \quad (4.8)$$

Burada I_o ters doyum akımı, IR_s seri direnç boyunca voltaj düşüşü, q elektronik yük, k Boltzmann sabiti, n idealite faktörü ve T ise Kelvin cinsinden mutlak sıcaklıktır.

I_o sıfır ileri denetleme voltajında $\ln I$ - V eğrisini kesen dik çizgiden türetilebilir [52]. Böylelikle I_o ;

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (4.9)$$

Şeklinde tanımlanır; burada A doğrultucu kontak alanı, A^* ZnO için etkin Richardson sabiti, Φ_B sıfır ileri denetlemede bariyer yüksekliğidir. ZnO için A^* değeri,

$$A^* = 120\alpha \left(\frac{m_e}{m_0}\right) (Acm^{-2}K^{-2}) \quad (4.10)$$

Şeklinde verilmiştir; burada m_e ZnO için etkin kütle, α sıralama empirik faktördür. Empirik faktör 1 olarak alınabilir [53]. Böylelikle etkin ZnO için etkin Richardson sabiti $32 Acm^{-2}K^{-2}$ olarak hesaplanır.

Φ_B aynı zamanda I_o in ekstrapolasyonundan elde edilebilir [54].

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \quad (4.11)$$

Ayrıca $\ln I$ - V grafiğinin lineer bölgedeki eğrisi idealite faktörünün (n) elde edilmesinde kullanılabilir [55] [56].

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) \quad (4.12)$$

Schottky bariyer yüksekliği, idealite faktörü, seri direnç ve paralel direnç gibi diyot performansını ölçen değerler yarıiletkenin yüzeyi, depolanan/ara yüzeyler, donör ve

akseptör atom sayısı yüzey / arayüzey durumları gibi niceliklerden kolaylıkla etkilenebilirler [57] [58].

Bu etkiler sebebi ile lnI-V grafiğinin lineer bölgesi (Şekil 4.25) lineerlikten uzaklaşabilir [59]. Ayrıca yarıiletken ve metal arasında bulunan arayüzey yüzey hazırlama, depozisyon veya üretim süreçlerinden etkilenecek idealite faktörünü arttırabilir [60] [61].

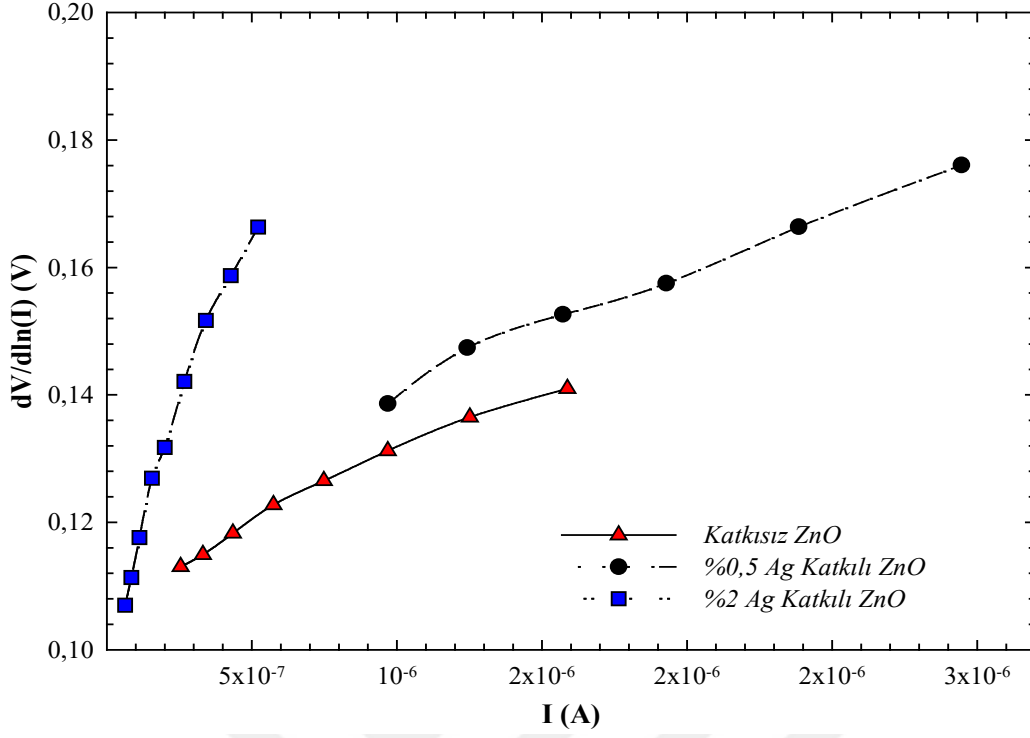
Yukarıdaki açıklamalar ve formüller kullanılarak Katkısız ZnO, % 0,5 Ag Katkılı ZnO ve % 2 Ag Katkılı ZnO diyotları için deneysel n ve Φ_B değerleri sırası ile 4.441, 4.279 ve 4.455; 0.748 eV, 0.764 eV ve 0.765 eV olarak hesaplanmıştır. Bu değerler ayrıca Çizelge 4’de de listelenmiştir.

n, Φ_B ve R_s değerleri ayrıca Cheung ve Cheung fonksiyonu kullanılarak belirlenmiştir. Bu fonksiyon [56] [62]:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \left(\frac{kT}{q} \right) + IR_s \quad (4.13)$$

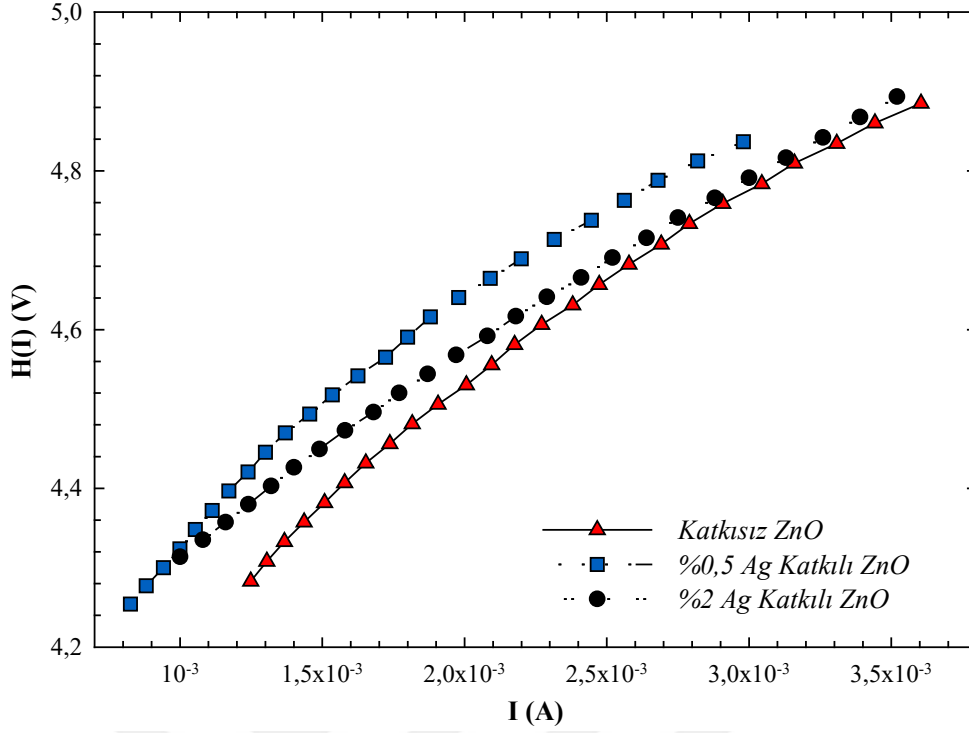
$$H(I) = V - n \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) = IR_s + n\Phi_B \quad (4.14)$$

Şeklinde de tanımlanmıştır. Seri direnç R_s ve idealite faktörü olan n değeri (4.10) deki $dV/d(\ln I)$ -I değerlerinde de elde edilmiştir. Bunlara ek olarak, seri direnç R_s ve şotki bariyer yüksekliği Φ_b (4.11) deki H(I)-I grafiğinden elde edilmiştir.



Şekil 4.25: Diyotlara ait $dV/d\ln(I)$ - I (A) grafiği

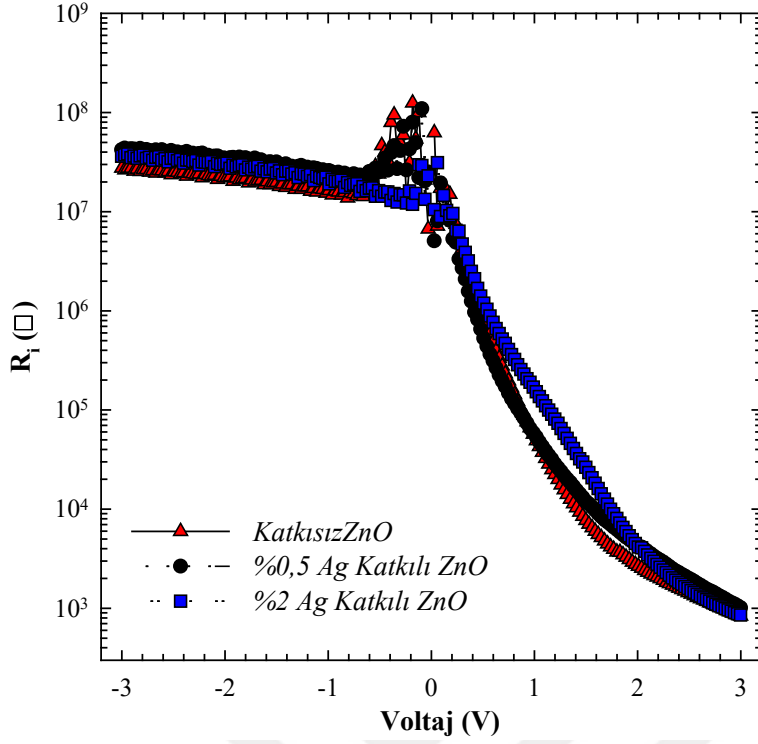
Böylece, Katkısız ZnO, % 0,5 Ag Katkılı ZnO ve % 2 Ag Katkılı ZnO diyotlarına ait n değerleri sırasıyla 4,206, 4,378 ve 4,134 olarak $dV/d(\ln I)$ - I grafiğinden elde edilmiştir ve Çizelge 4’de listelenmiştir.



Şekil 4.26: Diyotlara ait H(I)(V)-I(A) grafiği

H(I)-I grafiğinden elde edilen R_s ve Φ_b değerleri Çizelge 4’de listelenmiştir ve Katkısız ZnO, % 0,5 Ag Katkılı ZnO ve % 2 Ag Katkılı ZnO diyotları için sırasıyla 404,630 Ω , 479,280 Ω ve 301,450 Ω ; 0,850 eV, 0,899 eV ve 0,900 eV olarak bulunmuştur.

Tüm bunlara ek olarak Ohm kanunu ($R_i = dV_i / dI_i$) paralel direnç R_{sh} ve seri direnç R_s hesaplamasında kullanılmıştır. Yapı direnci R_i – uygulanan ileri denetleme voltajı V_i grafiği Şekil 4.27’de verilmiştir ve Ohm kanunundan elde edilen I-V verisi ile elde edilmiştir.



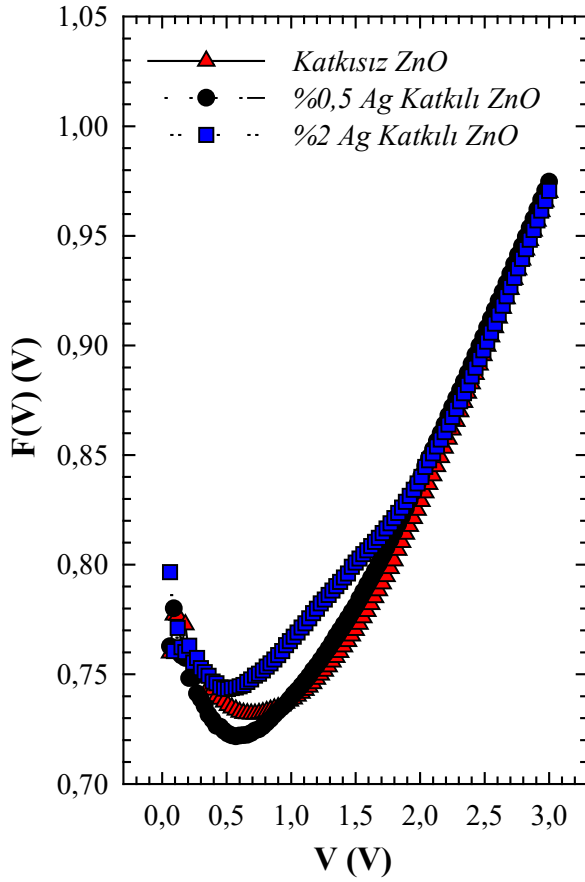
Şekil 4.27: Diyotlara ait R_i -V grafiği

R_i -V grafiğinde geri denetleme bölgesindeki maksimum değer ile ileri denetleme bölgesindeki minimum değer sırası ile paralel ve seri dirençlere karşılık gelmektedir [60].

Diyotların R_i -V grafiğinden görülebileceği gibi R_i maksimum noktasında yaklaşık -3V civarında minimum noktasına ise +3V civarında ulaşmaktadır. Böylece Çizelge 1 de Katkısız ZnO, % 0,5 Ag Katkılı ZnO ve % 2 Ag Katkılı ZnO diyotları için verilen R_s değeri sırasıyla 832.270 Ω , 1006.745 Ω ve 852.273 Ω olarak elde edilmiştir. Katkısız ZnO, % 0,5 Ag Katkılı ZnO ve % 2 Ag Katkılı ZnO diyotları için verilen R_{sh} değeri ise sırasıyla 27.572 M Ω , 41.929 M Ω ve 36.144 M Ω olarak elde edilmiştir. Sonuçlara göre R_{sh} değerinin beklenildiği gibi yüksek R_s değerinin ise beklenildiği gibi alçak olduğu görülmüştür. Ayrıca, R_s ve Φ_B değerleri $F(V)$ fonksiyonu ile tanımlanan modifiye edilmiş Norde metodu ile belirlenmiştir [63] [64].

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{q}{kT} \ln \left(\frac{I(V)}{AA * T^2} \right) \quad (4.15)$$

Burada γ diyotun idealite faktöründen büyük olan bir tam sayıdır. Φ_B ve R_s değerleri $F(V_{\min})$ ve V_{\min} Şekil 4.28’de $F(V)$ - V grafiğinde gösterilen minimum noktalarıdır [64].



Şekil 4.28: Diyotlara ait $F(V)$ - V grafiği

$$\Phi_B = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.16)$$

$$R_s = \frac{kT}{qI_{\min}}(\gamma - n) \quad (4.17)$$

Burada I_{\min} ileri denetlemede V_{\min} e karşılık gelen minimum değerdir. Çizelge 1’de Katkısız ZnO, % 0,5 Ag Katkılı ZnO ve % 2 Ag Katkılı ZnO diyotlarına ait Φ_b değerleri sırasıyla 0.828 eV, 0.676 eV ve 0.620 eV olarak listelenmiştir. Çizelge 1’de Katkısız ZnO, % 0,5 Ag Katkılı ZnO ve % 2 Ag Katkılı ZnO diyotlarına ait R_s değerleri sırasıyla 8530,577 Ω , 19424.017 Ω ve 61085.076 Ω olarak bulunmuş ve listelenmiştir.

Çizelge 4: Diyotların Foto Akım-Voltaj (I-V) Sonuçları

| Parametreler | Metod | Katkısız ZnO | % 0,5 Ag katkılı ZnO | % 2 Ag katkılı ZnO |
|------------------------|-----------|--------------|----------------------|--------------------|
| I_0 (μA) | ln(I)-V | 8.682 | 4.542 | 4.346 |
| n | ln(I)-V | 4.441 | 4.279 | 4.455 |
| | dV-dln(I) | 4.206 | 4.378 | 4.134 |
| Φ_b (eV) | ln(I)-V | 0.748 | 0.764 | 0.765 |
| | H(I) | 0.850 | 0.899 | 0.900 |
| | F(V) | 0.828 | 0.676 | 0.620 |
| R_s (Ω) | H(I) | 404.630 | 479.280 | 301.450 |
| | R_i | 832.270 | 1006.745 | 852.273 |
| | F(V) | 8530,577 | 19424.017 | 61085.076 |
| R_{sh} (M Ω) | R_i | 27.572 | 41.929 | 36.144 |

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Sol jel metodu ile elde edilen çözeltiler kullanılarak, döndürme kaplama tekniği ile Ag katkılı ZnO ince filmler p-tipi Silisyum (p-Si) altlıklar üzerine kaplanmıştır. Elde edilen ince filmlerin Optiksel (UV), elektriksel (I-V, C-V, I-t) ve yüzey morfoloji (AFM) özellikleri incelenmiştir.

Katkısız ZnO ve Ag katkılı ZnO ince filmlerin elektriksel özellikleri için akım-voltaj (I-V) ölçümleri farklı ışık şiddetleri altındaki aydınlatmalarda yapıldı. Numunelerin karanlıkta yapılan ölçümlerinde alınan veriler ile çizilen akım-voltaj karakteristik grafikleri, foto diyotların fotoiletken olduğunu göstermektedir. Numunelerin farklı frekanslara C-V grafikleri çizildi. Grafiklerde pozitif voltaj bölgesinde kapasitelerinin değişmediği fakat negatif voltaj bölgesinde kapasitelerin değiştiği görüldü. Bütün diyotların ters beslemede kapasitelerinin değiştiği, düz beslemede ise herhangi değişimin olmadığı C-V grafiklerinden görülmüştür. Bu durumun diyotta oluşan arayüzey durum yoğunluğundan ve seri dirençten ötürü oluştuğu literatürden bilinmektedir. Bu etkiyi azaltmak ve daha düzenli hale getirmek için diyotların Cj-V ve C-V grafikleri çizildi. Bu grafiklerden de diyotların arayüzey durum yoğunluğuna ve seri dirence sahip olduğu belirlendi.

Numunelerin (I-t) grafiklerinden farklı aydınlatmalarda oluşan akımın, ani artış gösterip sonra sabit bir değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Diyotların akımı karanlıkta ve farklı aydınlatmalarda ölçülerek $I_{açma}/I_{kapama}$ oranları belirlenmiştir. Numunelerin hepsinde de en büyük artış 100 mW/cm^2 'lik aydınlatmada olmuştur. En büyük $I_{açma}/I_{kapama}$ oranı $x=0.01$ diyotunda sırasıyla 237.19 ve 503.78 olarak ölçüldü.

Hazırlanan ince filmlerin UV ölçümleri yapılarak Geçirgenlik, Soğurma, Yansıma ve Yasak Enerji Aralığı grafikleri çizildi. Çalışmada kullanılan numunelerin optiksel özellikleri incelendiğinde, her üç numunenin de görünür bölgede geçirgen özelliği, 400 nm dalga boyundan küçük dalga boylarında ise soğurma özelliği gösterdiği, yansıma sınırının nano yapıya bağlı olarak daha yüksek dalga boylarına kaydığı belirlenmiştir. Her üç numunenin geçirgenliği, UV bölgede düşük, görünür bölgede ise % 78-88 Aralığında yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca tüm filmlerin yaklaşık olarak 3,2 eV yasak enerji aralığına sahip olması çalışmamızın literatür ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Fakat Ag katkılı ZnO ince filmlerin de katkısız ZnO ince film

ile yaklaşık aynı band aralığı enerjisi (E_g) değerini vermesi yapılan katkılamanın yasak band aralığı enerjisinde önemli bir değişiklik yapmadığını göstermiştir.

Her üç numunenin $5 \times 5 \mu\text{m}$ ve $40 \times 40 \mu\text{m}$ boyutlarında alınan AFM görüntüleri incelendiğinde, her üç numunenin de nanofiber yapıda olduğu, nanofiberlerin alüminyum üzerinde homojen bir şekilde depolandığı ve nanofiberlerin kıvrımlı yapıda olduğu üzerinde dikey değil yanal olarak geliştiği görülmüştür. Artan Ag katkı oranı ile nanofiberlerin çaplarının arttığı gözlemlenmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] C. Kittel, Katıhal Fiziğine Giriş, Güven Yayınları, 1996.
- [2] H. J. v. H. H.E., Katıhal Fiziği, Literatür Yayıncılık, 1999.
- [3] P. M. Dikici, Katıhal Fiziği, Seçkin Yayıncılık, 2013.
- [4] J. McKelvey, Solid state and semiconductor physics, Harper & Row Ltd, 1966.
- [5] S. G. D. S. a. R. F. D. Klimm, "320," Journal of Crystal Growth, vol. 93, no. 013, p. 300, 2008.
- [6] M. S. I. N. a. T. F. K. Maeda, "20," Semiconductor Science and Technology, pp. S49-S54, 2005.
- [7] H. D. J. G. W. S. F. L. Chena, "Violet–blue–green emission and shift in Mg-doped ZnO films with different ratios of oxygen to argon gas flow," Applied Surface Science, pp. Cilt 258, s. 9913-9917, 2012.
- [8] G. R. F. S. N. M. H. SaraKhosravi, "Optical and electrical properties of p-type Ag-doped ZnO nanostructures," Ceramics International, pp. 40, 6, , 7957-7963, 2014.
- [9] G. A. S. N. M. M. Ahmed S.R., " Effect of Ag doping on the properties of ZnO thin films for UV stimulated emission," Physica B: Condensed Matter, pp. 538, 131-137, 2018.
- [10] J. M. Y. C. J. S. M. Y. L. Z. L. Z. S. D. Xu L., "Characterization of Ag-doped ZnO thin film for its potential applications in optoelectronic devices," Optik, pp. 170, 484-91, 2018.
- [11] K. P. S. S. L. M. Rohith N.M., "Influence of Ag doping on the structural, optical, morphological and conductivity characteristics of ZnO nanorods," Optik, pp. 172, 940-952, 2018.
- [12] C. M. R. B. P.B. Macedo, " Phys. Chem. Glasses 13," Phys. Chem. Glasses 13, p. 171–179, 1972.
- [13] D. M., "21. Yüzyılın Teknolojisi Nanoteknoloji," Popüler Bilim Dergisi, no. 128, pp. 32-36, 2004.
- [14] D. Schroder, Semiconductor material and device characterization, A Wiley-Interscience publication, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990.

- [15] N. D., Yarıiletken Fiziğine Giriş, Aktif Yayınevi, 2007.
- [16] S. B.G., Solid state electronic devices, Prentice-Hall, Inc., 1980.
- [17] T. B. Özdemir, Nötronlara Maruz Kalan ZnO:Al İnce Filmlerde Optik Modelin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, 2013.
- [18] P. E. B. Şahin, ZnO'ya TiO₂ Katkısının Elektrik ve Optik Özelliklere Etkisi, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [19] E. Arıç, Nanoyapıda Çinko Oksit Partiküllerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, 2010.
- [20] S. N. M. P. D. Temel, "Sol-Gel Döndürerek Kaplama Tekniği ile Saydam İletken ZnO İnce Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu," Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, pp. 51-59, Mayıs 2017.
- [21] B. Y. A. Kayhan, "Ni-katkılı ZnO Nanokristal Filmlerin Elektriksel İletim Özelliklerinin Belirlenmesi," Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, 2011.
- [22] E. G. H. Özbay, "Çinko Oksit Nanopartikülleri Sentezi ve Karakterizasyonu," Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi, pp. Cilt 2, Sayı 4, 2014.
- [23] D. Thomas, "Journal Physics," Chemical Solid, pp. 15-86, 1960.
- [24] J. a. B. A. Wienke, " ZnO:in deposition by spray pyrolysis influence of the growth conditions on the electrical and optical properties," Thin Solid Films, pp. 516, 14, 4508-4512, 2008.
- [25] S. T. Hasançebi. Ö., Sol-gel yöntemiyle hazırlanan bakır oksit ince filmlerin elektriksel, yapısal ve optiksel özelliklerinin incelenmesi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [26] N. Akçay, "Sol-Jel Yöntemi ile Üretilen ZnO(Al)/p-Si Heteroekleminin Elektriksel Karakterizasyonu," Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, pp. 121-131, 2018.
- [27] W. J. R. D. C. a. K. E. O. Cooper, "Ionizing Radiation," Wiley-Interscience, 1998.
- [28] Ö. Özdemir, Investigation of structural and electrical properties of gamma rays exposed Al doped ZnO films manufactured via sol-gel technique, İstanbul: İTÜ, 2009.
- [29] M. S. M. K. M. Singla, "Optikal characterization of ZnO nanoparticles capped with various surfactants," in Journal of Luminescence, Elsevier, 2009, p. 129.

- [30] G. H. P. P. S. S. C. Valle, "Transparent and conductive ZnO:Al thin films prepared by sol-gel dip-coating," in *Journal of the European Ceramic Society* 24, 2004.
- [31] E. A. S. Y. S. P. M. A. Bacaksız, " Structural, optical and electrical properties of Al-doped ZnO microrods prepared by spray pyrolysis," *Thin Solid Films*, pp. 518, 15, 4076-4080, 2010.
- [32] T. L. D. Pauporte, "Electrochim.," *Acta*, pp. 45:20, 3345, 2000.
- [33] D. H. G. L. D. S. H. Gal, "79," *Thin Solid Films*, pp. 361-362, 2000.
- [34] P. Y. J. K. J. C. S. J. J. L. C. Y. Y. Nayak, "Applied Physics," p. 42, 2009.
- [35] D. L. D. J. B. Reynolds, "1999," *Solid State Commun*, pp. 99, 145, 1999.
- [36] S. B. S. Roy, "," *Bull Material Science*, pp. 25-513, 2002.
- [37] B. B. A. M. V. O. A. R. M. Ataev, "Cryst Growth," pp. 198-199, 1999.
- [38] P. K. A. K. D. Singh, "Mn-doped ZnO nanocrystalline thin film prepared by ultrasonic spray pyrolysis," *Journal of Alloys and Compounds*, pp. 471, 1-2, 11-15, 2009.
- [39] F. E. D. A. L. A. N. Y. M. Paraguay, "350," *Thin Solid Films*, pp. 350, 192, 1999.
- [40] K. O. S. Y. M. T. T. Yoshoni, "Structural and magnetic characterization of Mn-doped ZnO films grown by spray pyrolysis method," *Material Science and Engineering*, pp. 148, 1-3, 234-236, 2008.
- [41] İ. T. F. Sorar, *Katkılı ve Katkısız Çinko Oksit (ZnO) İnce Filmlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2009.
- [42] S. A. H. Uzkalan, *Kimyasal Püskürtme Tekniği ile Üretilen Katkısız ve Ga Katkılı ZnO Bileşiklerinin Yapısal, Optiksel ve Elektriksel Özellikleri, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2017.
- [43] O. V. H. T. S. D. Ş. A. A. Kaya, "Curr. Appl. Phys. 14," *Curr. Appl. Phys.* 14, p. 322–330, 2014.
- [44] A. T. L. Aritra D., "Optimization of Nb2O5/Ag/Nb2O5 multilayers as transparent composite electrode on flexible substrate with high figure of merit," *Journal of Applied Physics*, pp. 112, 103, 113, 2012.
- [45] B. C. A. G. A. S. A. A. A. G. F. Y. Murat S., "The validity of Kohlrusch law for the photocurrent transient and the role of N2/Ar flow ratio in photoconductivity of sputtered CoZnO," *Journal of Alloys and Compounds* , no. 712, pp. 152-163, 2017.

- [46] D. D. M. H. A. H. Chelouche A., "Influence of Ag doping on structural and optical properties of ZnO thin films synthesized by the sol-gel technique," *Appl. Phys. A*, no. 115, p. 613, 2014.
- [47] G. Z. L. Z. S. P. Linhua X., "Two different mechanisms on UV emission enhancement in Ag-doped ZnO thin films," *Journal of Luminescence*, no. 158, pp. 396-400, 2015.
- [48] W. A. A. A. G.-S. A. A.-G. F. S. Wageh, "A photodiode based on PbS nanocrystallites for FYTRONIX solar panel automatic tracking controller," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 527, pp. 44-51, 2017.
- [49] A. T. A. G. A.-S. A. A. A.-G. F. F. E.-T. W. F. F. Y. A. Dere, "A functional material based photodiode for solar tracking systems," *Physica B*, vol. 520, pp. 76-81, 2017.
- [50] R. W. E.H. Rhoderick, "Metal-Semiconductor Contacts," Clarendon Press, 1988.
- [51] B. K. S. Ö. T. Asar, "Effect of Platinum Doping on the Structural and Electrical Properties of SnO₂ Thin Films," *J. Exp. Nanosci*, no. 11, 2016.
- [52] S. Sze, "Physics of Semiconductor Devices," 1980.
- [53] P. D. S. S. L. Qin, "Photoresponse of indium oxide particulate-based thin films fabricated using milled nanorods grown by the self-catalytic vapor - liquid - solid process," *Semicond. Sci. Technol*, no. 27, 2012.
- [54] S. Ö. E. Ö. T. Asar, " Structural and electrical characterizations of In_xGa_{1-x}As/InP structures for infrared photodetector applications," *J. Appl. Phys.* , no. 115, 2014.
- [55] E. R. H.C. Card, "Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes," *J. Phys. D. Appl. Phys*, no. 4, pp. 1589-1601, 1971.
- [56] Y. Ö. K. K. T. A. S. Ç. E. B. M. Ö. T. M. S. Ö. B. Kınacı, ", Effect of alloy composition on structural, optical and morphological properties and electrical characteristics of Ga_xIn_{1-x}P/GaAs structure," *J. Mater. Sci. Mater. Electron*, no. 24, p. 1375-1381, 2013.
- [57] Ş. A. S. U. Ö. K. M. Ö. a. E. Ö. E. ARSLAN, "Thermal Annealing Effects on the Electrical and Structural Properties of Ni/Pt Schottky Contacts on the Quaternary AlInGaN Epilayer," *J. Electron. Mater.*, no. 48, p. 887-897, 2019.
- [58] S. B. Y. S. H. U. I. T. Ş. A. E. Ö. E. Arslan, "Electrical characterization of MS and MIS structures on AlGaIn/AlN/GaN heterostructures," *Microelectron. Reliab*, no. 51, p. 370-375, 2011.

- [59] T. A. S. Ç. Y. Ö. K. K. B. Kinaci, "Electrical characterization of Au/ZnO/TiO₂/n-Si and (Ni/Au)/ZnO/TiO₂/n-Si Schottky diodes by using current-voltage measurements," *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, no. 14, p. 959–963, 2012.
- [60] Ş. A. İ. P. E. B. İ. Taşcıoğlu, "The effect of metal work function on the barrier height of metal/CdS/SnO₂/In–Ga structures," *Curr. Appl. Phys.*, no. 13, p. 1306–1310, 2013.
- [61] V. B. G. K. M. D. S. Ö. T. Asar, "Platinum doping effect on In₂O₃ MSM IR photodetectors," *Superlattices Microstruct.*, no. 122, p. 650–660, 2018.
- [62] N. C. S.K. Cheung, "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics," *Appl. Phys. Lett.*, no. 49, p. 85–87, 1986.
- [63] H. Norde, "A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance," *J. Appl. Phys.*, no. 50, p. 5052–5053, 1979.
- [64] F. S. M. N. C.D. Lien, "An Improved Forward I-V Method for Nonideal Schottky Diodes with High Series Resistance," *IEEE Trans. Electron Devices*, no. 31, p. 1502–1503, 1984.



ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : TUĞRUL YAVUZ

Doğum Yeri ve Tarihi : MALKARA 15/11/1980

E-Posta : tugrul.yavuz@klu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

- **Lisans** : 2005, Hacettepe Üniversitesi, Eğitim Fakültesi,
Fen Bilgisi Öğretmenliği Bölümü