

**T.C.  
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**ZnO:TiO<sub>2</sub> NANOKOMPOZİT MALZEME ESASLI FOTOSENSÖRLERİN  
ÜRETİLMESİ VE FOTOİLETKENLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SERKAN UYAR**

**ARALIK - 2020**

**T.C.  
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**ZnO:TiO<sub>2</sub> NANOKOMPOZİT MALZEME ESASLI FOTOSENSÖRLERİN  
ÜRETİLMESİ VE FOTOİLETKENLİK ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SERKAN UYAR**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Burhan COŞKUN**

**Aralık – 2020**

## ETİK BEYAN

Kırkırelili Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Serkan UYAR

...../...../.....

## ÖZET

### ZnO:TiO<sub>2</sub> NANOKOMPOZİT MALZEME ESASLI FOTOSENSÖRLERİN ÜRETİLMESİ VE FOTOİLETKENLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Serkan UYAR

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Doç. Dr. Burhan COŞKUN

Aralık 2020, 71 sayfa

Bu çalışmada 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> çözeltileri Sol-jel yöntemi ile üretildi. Üretilen TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> çözeltileri Silisyum alttaş üzerine damlatıldı ve spin kaplama yöntemi ile Silisyum alttaş üzerine kaplandı. Elde edilen ince filmlerin optik özellikleri UV-vis spektroskopisi ile karakterize edildi ve elde edilen sonuçlardan TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> filmleri için yasak enerji aralıkları hesaplandı. TiO<sub>2</sub> ve 1:5 oranında ZnO:TiO<sub>2</sub> ile 1:2 oranında ZnO:TiO<sub>2</sub> filmler için yasak enerji aralıkları sırasıyla 3.32eV, 3.19 eV ve 3.16 eV olarak bulundu. Yapılan hesaplamalarda farklı oranlardaki ZnO:TiO<sub>2</sub> filmlerin yasak enerji aralıklarının düştüğü belirlendi. Diyotların fotovoltajik karakteristikleri incelendiğinde diyotların ışığa duyarlı olduğu görüldü. Foto duyarlılık analizleri sonucunda diyotların bariyer yükseklikleri hesaplandı. TiO<sub>2</sub> ve 1:5 oranında ZnO:TiO<sub>2</sub> ve 1:2 oranında ZnO:TiO<sub>2</sub> foto diyotlar için bariyer yükseklikleri 0.478, 0.470 ve 0.493 olarak hesaplanırken idealite faktörleri ise 6.04, 5.92 ve 6.58 olarak hesaplandı. C – V ve G – V karakterizasyonları yapılarak diyotların elektriksel davranışları incelendi. İncelemeler sonucunda diyotların elektriksel davranışlarının diyotlara uygulanan sinyal frekansına göre değişiklik gösterdiği anlaşıldı. Yapılan hesaplamalar frekansa bağlı davranışın diyotlar içerisinde bulunan ara durumlar sebebiyle oluştuğu sonucunu ortaya çıkardı. Yapılan hesaplamalarda sinyal frekansındaki artışın ara durum yoğunluklarını düşürdüğü görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** ZnO karışımı, TiO<sub>2</sub> ince filmler, TiO<sub>2</sub> Fotodedektörler, Fotodiyotlar, I -V

## ABSTRACT

### **PRODUCTION OF ZnO:TiO<sub>2</sub> NANOCOMPOSITE BASED PHOTODIODES and THE ASSESSMENT OF THEIR PHOTOCONDUCTIVE PROPERTIES**

Serkan UYAR

Masters Thesis

Kırklareli University

Institute of Science

Thesis Advisor: Asst. Prof. Burhan COŞKUN

December 2020, 71 Pages

In this work, ZnO:TiO<sub>2</sub> solutions in 1:5 and 1:2 molar ratios were produced using sol-gel technique. TiO<sub>2</sub> and ZnO:TiO<sub>2</sub> solutions were dropped on silicon wafers and spin coating was performed. Optical properties of thin films were characterized using UV-vis spectroscopy. Using optical data forbidden energy band gaps of TiO<sub>2</sub> and ZnO:TiO<sub>2</sub> thin films were calculated. Bandgap energies were found to be 3.32eV, 3.19 eV and 3.16 eV for TiO<sub>2</sub>, ZnO:TiO<sub>2</sub> thin films in 1:5 and 1:2 molar concentrations, respectively. It was concluded that doping TiO<sub>2</sub> ZnO decrease the bandgap energies of thin films. Photovoltaic properties of diodes illustrate that diodes are photo responsive. Barrier height of diodes were calculated which were found to be 0.478, 0.470 and 0.493 for TiO<sub>2</sub>, ZnO:TiO<sub>2</sub> in 1:5 and 1:2 molar concentrations, respectively. Ideality factor of diodes were calculated as 6.04, 5.92 and 6.58. To illustrate electrical properties, C-V and G-V characteristics were investigated. It was seen that electrical properties change depending on the applied signal frequency. Such a case was attributed to interface states. Calculations revealed that the density of interface states decreases with increasing signal frequency.

**Key Words:** ZnO composites, TiO<sub>2</sub> thin films, TiO<sub>2</sub> photodetectors, Photodiodes, I -V

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarımda bana her türlü desteği veren danışman hocam sayın Doç. Dr. Burhan COŞKUN' a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen sayın Doç. Dr. Mümin Mehmet KOÇ ve Dr. Mustafa İLHAN hocalarıma çok teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her döneminde desteğini arkamda hissettiğim sevgili babam Osman UYAR ve rahmetli annem Mukaddes UYAR'a zamanından çaldığım oğlum Tuğrul UYAR'a sevgili eőim ve aynı zamanda lisansüstü eğitimdeki sınıf arkadaşım Havva UYAR'a her zaman bilgilerini bizimle paylaşan Sema Yaprak AYDIN ve Alper ÖZDERE'ye sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELERİN LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİLLERİN LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>7</b>
2.1. İnce Filmler .....	7
2.2. Sol-jel Yöntemi .....	9
2.3. Sol-jel İnce Film Üretiminde Kullanılan Bileşenler .....	10
2.4. Sol-jel Oluşumu .....	11
2.4.1. Hidroliz reaksiyonları .....	11
2.4.2. Yoğunlaşma reaksiyonları.....	12
2.4.3. Jelleşme .....	12
2.4.4. Yaşlanma .....	13
2.4.5. Kurutma .....	14
2.4.6. Sinterleme .....	14
2.5. Sol-jel Yöntemi ile İnce Film Kaplama Teknikleri .....	14
2.5.1. Püskürtme tekniği ile kaplama .....	15
2.5.2. Daldırma tekniği ile kaplama .....	16
2.5.3. Döndürme tekniği ile kaplama .....	17
2.6. Sol-jel Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	20
2.7. TiO <sub>2</sub> 'in Yapısal Özellikleri .....	21
2.8. TiO <sub>2</sub> 'in Kullanım Alanları .....	23
2.9. ZnO'in Genel Özellikleri .....	24
2.10. Yarı İletkenlerin Optiksel Özellikleri.....	26
2.11. Yarı İletkenlerin Elektriksel Özellikleri .....	28
2.12. Fotodiyotlar.....	29

2.13. Fotodiyotların Akım - Voltaj Karakteristiği .....	30
2.14. Fotodiyotların Kapasitans - Voltaj Karakteristiği .....	32
<b>3. MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM.....</b>	<b>33</b>
3.1. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> Çözeltilerinin Hazırlanması .....	33
3.2. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> TiO <sub>2</sub> Numunelerinin Hazırlanması.....	33
3.3. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> Filmlerinin Hazırlanması .....	34
3.4. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> Diyotlarının Hazırlanması.....	34
3.5. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> Filmlerinin Optiksel Özellik Analizi .....	35
3.6. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> Diyotların Elektriksel Özellik Analizi .....	35
3.7. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> Foto Diyotların Üretilmesi ve Karakterizasyonu .....	36
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>39</b>
4.1. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> İnce Filmlerinin Optiksel Ölçüm Sonuçları.....	39
4.2. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> İnce Filmlerinin Fotovoltaik Özellikleri.....	41
4.2.1. Al/ZnO:TiO <sub>2</sub> /p-Si/Al diyotların fotoakım-voltaj (I-V) karakteristikleri .....	41
4.2.2. Al/ZnO:TiO <sub>2</sub> /p-Si/Al diyotların fotoakım-zaman (I-t) karakteristikleri.....	44
4.2.3. Al/ZnO:TiO <sub>2</sub> /p-Si/Al diyotların kapasitans-voltaj (C-V) karakteristikleri .....	45
4.2.4. Al/ZnO:TiO <sub>2</sub> /p-Si/Al diyotların kapasitans-zaman (C-t) karakteristikleri .....	54
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>59</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>63</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>71</b>



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2.1. TiO <sub>2</sub> 'nin yapı parametreleri .....	22
Çizelge 2.2. Rutil ve anataz TiO <sub>2</sub> kristallerinde atomlar arası mesafe-bağ uzunlukları .....	22
Çizelge 2.3. TiO <sub>2</sub> 'in rutil ve anataz yapıları için entropi, entalpi ve E <sub>g</sub> değerleri .....	23
Çizelge 4.1. Diyotlara ait idealite faktörü( $\phi_b$ ), bariyer yüksekliği n, doygunluk akımı çizelgesi.....	55



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2.1. İnce film üretim teknikleri .....	8
Şekil 2.2. Sol-jel yönteminde kullanılan bazı katalizörler .....	11
Şekil 2.3. Jelleşme mekanizmaları.....	13
Şekil 2.4. Sol-jel tekniği ile elde edilen malzeme türleri .....	15
Şekil 2.5. Püskürtme tekniğinde püskürtülen çözelti damlacıklarının aerodinamiği .....	16
Şekil 2.6. Daldırma tekniğinin basamakları .....	17
Şekil 2.7. Döndürme tekniğinin basamakları .....	18
Şekil 2.8. Titanyum (a) rutil, (b) anataz ve (c) brukit kristal yapısı .....	22
Şekil 2.9. ZnO'nun kristal yapısı .....	24
Şekil 2.10. Yarı iletkenin temel soğurma spektrumu.....	28
Şekil 2.11. Fotodiyotun sembolü (a), yapısı (b) ve karakteristik eğrisi.....	30
Şekil 2.12. Fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-voltaj karakteristiği.....	31
Şekil 3.1. Numunelerin hazırlandığı deney düzeneği.....	33
Şekil 3.2. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> ince filmlerin U-V ölçümleri için kullanılan UV-VIS spektrofotometre cihazı.....	35
Şekil 3.3. TiO <sub>2</sub> ve ZnO:TiO <sub>2</sub> /p-Si diyotlarının I-V, C-V ve I-t ölçümleri için kullanılan deney düzeneği.....	36
Şekil 4.1. TiO <sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO <sub>2</sub> ince filmlerin soğurma (absorbance) spektrumu.....	39
Şekil 4.2. TiO <sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO <sub>2</sub> ince filmlerin yansıtma (reflectance) spektrumu.....	40
Şekil 4.3. TiO <sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO <sub>2</sub> ince filmlerin geçirgenlik (transmittance) spektrumu .....	40
Şekil 4.4. TiO <sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO <sub>2</sub> ince filmlerin soğurma – hv spektrumu .....	41
Şekil 4.5. TiO <sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO <sub>2</sub> fotodiyotların I – V karakteristikleri	42
Şekil 4.6. TiO <sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO <sub>2</sub> fotodiyotların I – t karakteristikleri .	44
Şekil 4.7. TiO <sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO <sub>2</sub> fotodiyotların C – V karakteristikleri.....	46
Şekil 4.8. TiO <sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO <sub>2</sub> fotodiyotların G–V karakteristikleri	48
Şekil 4.9. TiO <sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO <sub>2</sub> fotodiyotların C <sub>adj</sub> – V karakteristikleri.....	50

Şekil 4.10. $\text{TiO}_2$ ve 1:5 ve 1:2 oranlarda $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$ fotodiyotların $G_{\text{adj}} - V$ karakteristikleri .....	51
Şekil 4.11. $\text{TiO}_2$ ve 1:5 ve 1:2 oranlarda $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$ fotodiyotların frekansa bağlı arayüz durum yoğunluğu karakteristikleri .....	53
Şekil 4.12. $\text{TiO}_2$ ve 1:5 ve 1:2 oranlarda $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$ fotodiyotların $C - t$ karakteristikleri.....	56



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>nm</b>	Nanometre
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Mikrometre
<b><math>h(0)</math></b>	Gerilme titreşimi
<b>t</b>	Zaman
<b><math>\omega</math></b>	Açısal hız
<b><math>\eta</math></b>	Çözeltinin viskozitesi
<b><math>\rho</math></b>	Çözeltinin yoğunluğu
<b><math>\rho_A</math></b>	Birim hacimdeki uçucu maddenin kütlesi
<b><math>\rho^0_A</math></b>	Birim hacimdeki uçucu maddenin başlangıç değeri
<b>e</b>	Buharlaştırma oranı
<b>k</b>	Kütle transfer katsayını
<b>eV</b>	Elektrovolt
<b>Eg</b>	Yasak enerji aralığı
<b><math>\text{Å}</math></b>	Angstrom
<b>d</b>	Yoğunluk
<b><math>S^o</math></b>	Entropi
<b><math>\Delta H_f^o</math></b>	Entalpi
<b><math>\Delta G_f^o</math></b>	Gibbs Serbest Enerjisi
<b><math>I_0</math></b>	Işığın Şiddeti
<b><math>\lambda</math></b>	Dalga Boyu
<b>h</b>	Planck sabiti
<b>c</b>	Işık hızı
<b>v</b>	Frekans
<b><math>\mu_e</math></b>	Elektron mobilitesi
<b><math>\mu_h</math></b>	Hol mobilitesi
<b><math>v_e</math></b>	Elektronların hızı

$\nu_h$	Hollerin hızı
$\vec{E}$	Elektrik alan
$\epsilon_0$	Boşluğun dielektrik geçirgenliği
$\epsilon_s$	Dielektrik sabiti
$q$	Yük
$V_{bi}$	Difüzyon voltajı

### **Kısaltmalar**

### **Açıklamalar**

<b>AC</b>	Alternatif Akım
<b>DC</b>	Doğrusal Akım
<b>FBB</b>	Fiziksel Buhar Biriktirme
<b>KBB</b>	Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>RF</b>	Radyo frekans
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silisyum dioksit
<b>Ti<sub>2</sub>O</b>	Titanyum dioksit
<b>ZnO</b>	Çinko Oksit

## 1. GİRİŞ

Nanomalzemeler eşsiz özellikler barındıran, 1-100 nm arasında değişen, çok küçük boyutlara sahip ve günümüzde birçok alanda kullanılan malzemelerdir. Başka bir deyişle nanoteknoloji metrenin milyarda bir boyutlarda olan malzemelerin üretimi ve özellikleri ile ilgilenir.

Nanoteknoloji kullandığımız maddelerin molekül yapısını değiştirerek yeni maddeler oluşturulmasına yarar. Nanoteknoloji ile üretilen bu yeni malzemeler insanlık yararına olabilecek yüzlerce ürün geliştirilmesine neden olur. Sürekli gelişen bu alan insanlığın gelişimde önemli roller alacaktır. Bunlara kir tutmayan kumaşlar, yüksek kapasiteli hafıza kartları, ince film kaplamaları örnek olarak verilebilir [1].

Nanomalzemelerin üretiminde birçok metot kullanılmaktadır. Bunlardan en önemlilerinden biri de yarı iletkenlerin ince film ile kaplama yöntemlerinden olan Sol-jel yöntemidir.

Özellikle son zamanlarda ince film üzerine çalışmalar büyük bir hız kazanmıştır. Bunun en önemli nedeni, hacimli malzemelerde bulunmayan özelliklerin ince film kaplama yöntemi ile ortaya çıkmasıdır. İnce filmler çeşitli teknikler kullanarak kalınlıkları 1  $\mu\text{m}$ 'nin altında olan, kaplanacak malzemenin atomlarının ve moleküllerinin bir taban üzerine bir tabaka oluşturacak şekilde kaplanmasıdır [2]. Nanomalzemelerin ince filmle kaplanması sonucunda, kaplanan malzemenin elektriksel, mekaniksel gibi birçok özelliğinde büyük artışlar gözlenmiştir [3].

İnce film teknolojisi günümüzde elektronik araçlar ve bilgisayar sistemleri başta olmak üzere elektriksel özelliklerindeki üstünlükleri nedeniyle iletim kaplamalarında, manyetik özellikleri bakımından hafıza kartlarında, kimyasal özellikleri bakımından korozyona ve oksidasyona karşı korumada, elektrik ve optiksel özellikleri bakımından fotosensör yapımında ve buna benzer birçok uygulamada yoğun olarak kullanılmaktadır [4,5]. İlk olarak ince film üretimi korozyona karşı cam ve seramikleri korumak için dekorasyon amaçlı kullanılmıştır. İnce film çalışmaları ilk olarak 1838 yılında elektroliz yöntemi ile elde edilmiştir. Bundan sonraki yıllarda sırasıyla Bunsen 'kimyasal reaksiyon, Faraday

'asal gazlarla buharlaştırma', Nahrwold ve Kundt 'joule ısıtma' tekniği ile ince film üretmeyi başarmışlardır [6].

İnce filmler birçok teknolojik uygulamadan sıklıkla kullanılmaktadır yine aynı şekilde birçok uygulamanın çalışma prensipleri ince filmlerin elektriksel ve optoelektronik davranışları üzerine kuruludur. Işık yayan diyotlar (light emitting diodes – LED), ekran teknolojileri, sensörler, işlemciler, dedektörler vb. gibi uygulamaların temelinde ince filmler yatmaktadır. İnce film temelli, uygulamaların bir kısmı günlük hayatımızda gözlemlediğimiz uygulamalar olmasının yanı sıra bir kısmı medikal teknolojiler ve askeri teknolojiler de ince film teknolojilerinden sıklıkla faydalanmaktadır [7–9]. Kullanım alanlarına bakılarak literatürde birçok ince film çeşidi rapor edilmiştir. Rapor edilen ince filmler yapılarına göre genelde organik ve metalik ince filmler olacak şekilde iki temel alana ayrılabilir. Organik filmler hidrokarbon temelli bileşiklerden oluşmaktadır [10–12]. Hidrokarbon temellerden oluşması filmlere bazı avantajlar sağlayabilir. Örneğin organik filmlerin maliyeti metalik filmlere göre daha azdır ve esnektirler. Dolayısıyla hareketli ve esnek yüzeylere uygulanabilirler. Bazı tip polimer filmler aşınmaya ve neme karşı dayanıklıdır. Ancak organik temelli filmlerin geneli dış etkilere karşı hassastır. Özellikle aşınma, nem, sıcaklık gibi etkilerden çok çabuk etkilenirler.

Metalik filmler ise nem, aşırı sıcak, korozyon gibi dış etkilere karşı organik temelli filmlere nazaran daha etkilidir. Birçok malzeme bilimi uygulamasında metalik ince filmler sürtünme, korozyon gibi dış etkilerden malzemeyi korunmak için kullanılmaktadır. Dolayısıyla metalik ince filmler, stres, çizilme, baskı, nem, kimyasal etkiler gibi harici etkilere karşı daha dirençlidirler [13–15]. Daha üst düzey kaplama teknikleri ile kaplanabildikleri için yüzeyden kolay sökülemezler. Dolayısıyla, mekanik, optik, manyetik elektriksel ve optoelektronik performanslarını kolayca yitirmezler [16–21].

İnce filmlerin özelliklerini kullanılan alıtış ve üretim tekniği gibi birçok etken belirler. Günümüzde kullanılan pek çok üretim tekniği vardır. Bunlar buhar fazda büyütme, sıvı fazda büyütme ve katı fazda büyütme olmak üzere üç grupta toplanır. Sıvı fazda büyütme tekniklerinden olan Sol-jel büyütme yöntemi birçok avantajından dolayı en çok tercih edilen yöntemlerden biridir.

Sol-jel yöntemi 1846 yılında Ebelmen tarafından bulunmuştur. İlk yıllarda fizikçiler tarafından gerekli ilgiyi göremese de özellikle SiO<sub>2</sub> ile film hazırlanabileceği 1939 yılında

Geffcken tarafından ortaya çıkarılınca daha sonraki yıllar Sol-jel yöntemi yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır [22]. Sol-jel süreci camların veya seramik malzemelerin kaplanmasında sıkça kullanılan bir metottur. Bu sürecin temelinde sıvı fazda olan bir kolloidal çözeltinin bir malzeme üzerinde katı faza (jel) geçmesini sağlamaktır [23].

Sol-jel sürecinde kullanılan malzemeler oldukça basittir. Ayrıca bu yöntemle kaplamalarda film kalınlığı malzeme yüzeyine eşit bir şekilde dağılarak homojen bir dağılım sağlanmış olur. Sol-jel yönteminin en büyük avantajı düşük sıcaklıklarda az enerji ile hazırlanıyor olabilmesi, hazırlanan ortamdan etkilenmemesi ve filmin mikro yapısının kolayca kontrol ediliyor olmasıdır. Bu yöntem sayesinde düşük kırılma indisine sahip ve çok katlı kaplamalar yapmaya izin verir. Farklı geometrik şekillere sahip cisimler rahatlıkla kaplanabilir.

Bu yöntemin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da vardır. En önemli dezavantajları malzeme maliyetinin yüksek olması, kaplama sürecinde malzeme kaybının fazla olması ve kullanılan kimyasal maddelerin insan sağlığına zararlı olması sayılabilir [24].

Literatürde değişik uygulamalar için değişik elemental kompozisyonlardan oluşmuş metalik ince filmler rapor edilmiştir. Demir, Demiroksit, Nikel, Kobalt ve bu malzemelerin alaşımlarından oluşan malzemeler manyetik özellikleri ile ön plana çıkmaktadır [17,18,25–27]. Dolayısıyla bu elementlerden oluşan ince filmler hafıza elemanları, kayıt cihazları, bilgisayar işlemcileri gibi manyetik temelli cihazlarda kullanılmaktadır. Tungsten, Platin, Tantal, Bakır gibi filmler serbest yörüngelerinde yüksek yoğunlukta elektron barındırdıklarından dolayı katalitik reaksiyonlarda katalizör olarak kullanılmaktadırlar [28,29]. Bakır oksit, Gümüş oksit ve Selenyum temelli materyallerin ise antimikrobiyal ve antibakteriyel özelliğe sahip oldukları literatürde birçok çalışmada gösterilmiştir [30,31]. Dolayısıyla bu materyallerden hazırlanan filmler antibakteriyel ve antimikrobiyal uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. CdO, ZnO ve TiO<sub>2</sub> temelli filmlerin ise güneş pili, fotodedektör ve fotodiyot uygulamaları için uygun oldukları literatürde rapor edilmektedir [15,32–34]. Özellikle ZnO ve TiO<sub>2</sub> temelli ince filmlerin iyi derecede geçirgenlik (transmittance) sağladığı buna rağmen soğurma (absorbance) ve yansıtma (reflectance) özelliklerinin çok düşük olduğu bilinmektedir. Ayrıca ZnO ve TiO<sub>2</sub> ince filmlerin iyi derecede elektriksel özellik gösterdiği yine literatürde rapor edilmiştir. Bu özellikler ZnO ve TiO<sub>2</sub> temelli filmleri fotodiyot, fotodedektör, güneş pili, solar takip cihaz uygulamaları ve optoelektronik uygulamalar için uygun birer aday olmasına yol açmaktadır.



Katkılama malzemelerin sahip olduğu, fiziksel, kimyasal, elektrik manyetik davranışları gibi davranışların değiştirilmesine ya da bu karakteristik davranışların istenilen sınırlar içerisinde tutulmasına yardımcı olmaktadır [8,34–36]. Örnek vermek gerekirse manyetik olmayan bir materyale manyetik bir materyal katkılıandığında manyetik olmayan materyal manyetik özellik kazanabilmektedir. Diğer bir taraftan, yalıtkan bir maddeye iletken bir madde katkılıandığında yalıtkan maddeye iletken özellik kazandırılabilir [8, 36–38]. Anlaşılacağı gibi katkılama yapılarak malzemelerin fiziksel özelliklerinin değiştirilmesi mümkündür. Bu sebeple optoelektronik uygulamalarda istenilen optik, elektrik, elektronik özelliklerin elde edilebilmesi, istenilen kapasitans, fototepki (fotoresponse), fotoakım, yasak enerji aralıkları ve bariyer yüksekliği gibi değerlere ulaşabilmek için katkılama yöntemlerinden yararlanıldığı bilinmektedir.

TiO<sub>2</sub> ince filmleri son yıllarda optiksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle birçok uygulamada kullanılır hale gelmiştir. Yüksek yasak enerji aralığına ve yüksek kırılma indisine sahip olması diğer malzemelerden bir adım öne geçmesini sağlamıştır [39]. TiO<sub>2</sub> ince filmleri üç farklı kristal yapıda bulunabilir. Bunlar rutil, brokit ve anataz yapılarıdır [40].

TiO<sub>2</sub> optik özelliklerinden dolayı devre elemanlarında, yüksek yansıtmalı kaplamalarda güneş pillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [41-43].

TiO<sub>2</sub> ince filmleri hazırlanırken çok çeşitli kaplama yöntemleri kullanılır. Bunlardan RF saçırma, kimyasal buhar biriktirme, DC magnetron ve Sol-jel en çok kullanılan yöntemlerdir [44].

Bu çalışmada, ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotlar incelenmiştir. İncelenecek filmleri oluşturmak adına TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> çözeltileri elde edilmiştir. Elde edilen çözeltiler Si alttaşlar üzerine damlatılmış ve döndürme tekniği ile kaplama yöntemi ile alttaşlar üzerine kaplanmıştır. Elde edilen TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> filmlere Al kontaktlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Al kontaktlamanın ardından Al/p-Si/ZnO:TiO<sub>2</sub>/Al yapıdaki fotodiyotlar elde edilmiştir. Üretilen fotodiyotların optik, fotoakım, fotokapasitans, ve fotovoltajik değerleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda fotodiyotların dışarıdan uygulanan değişik şiddetteki ışığa tepki verebildiği görülmüştür. Fotokarakterizasyon sonucunda elde edilen datalar vasıtası ile bariyer yüksekliği ve diyot idealite faktörü hesaplanmıştır. UV-vis spektroskopisi kullanılarak optik özellikleri incelenmiştir. Diyotların yüksek derecede geçirgenlik, düşük derecede yansıtma ve soğurma gösterdiği

görülmüştür. Elde edilen optik veriler kullanılarak bant aralığı enerjileri hesaplanabilmiştir. C – V ve G – V ölçümleri yapılarak diyotların elektriksel özellikleri karakterize edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen veriler diyotların elektriksel özelliklerinin dışarıdan uygulanan AC sinyal frekansına karşı etkili olduğunu göstermiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda frekansa bağlı elektriksel özelliklerin ara yüz durumlarına bağlı olduğunu göstermiştir.





## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. İnce Filmler

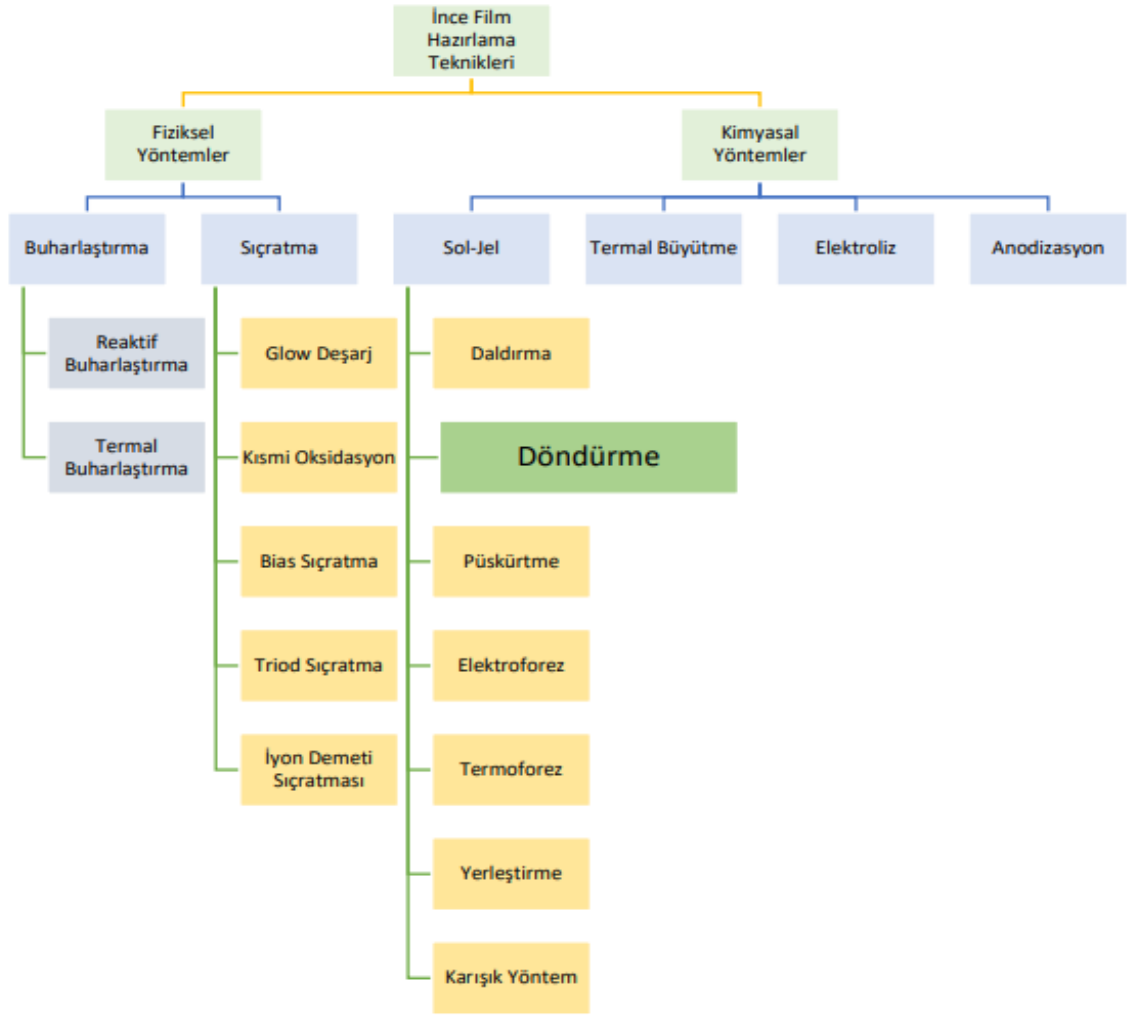
Günümüzde teknolojik uygulamalardaki hızlı değişimler, malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirerek malzemeye yeni özellikler kazandırılması çalışmalarının hız kazanmasına neden olmuştur. Malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirmek bir çok avantajları beraberinde getirmiştir. Birden çok malzemede olan özelliklerin tek bir malzemede toplanması, hem daha kolay hem de daha az maliyetli olmaktadır. Malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek ve değiştirmek için kullanılan en önemli kaplama yöntemi, ince film kaplama metodudur. İnce film kaplamalar sayesinde, malzemede istenilen özelliklerin elde edilmesi, malzemenin tümünün modifiye edilmesi yerine sadece yüzey özelliklerinin geliştirilmesi daha uygulanabilir hale gelmiştir. Bu geliştirmenin sağladığı yüksek verim birçok avantaj sağlamıştır. Bu çalışmalar, yarı iletken endüstrisi için çok önemlidir. İnce filmler, dekoratif, optik, manyetik, elektriksel, ısıl, kimyasal ve korozyon ile oksidasyondan korunma amaçlı kaplamalarda kullanılmaktadır.

Kaplama tekniği ve yöntemlerindeki farklılıklar sayesinde ince film malzemeler, hacimli malzemelere göre daha üstün özelliklere sahip olmaktadır. İnce film malzemelerinin hacimli malzemelere göre avantajları:

- İnce filmler hacimli malzemelerden daha saf malzemeler olması,
- Normal şartlar altında elde edilemeyecek kadar küçük geometrik şekillerde üç boyutta oluşturulabilmesi,
- Ardışık işlemlere imkân vermesi sayesinde, katmanlı ve değişik özelliklerde film elde edilebilmesi,
- Kalınlık, kristal yönelimi ve çok katmanlı yapılardan kaynaklanan kuantum boyut etkileri ve bu etkilerin kontrol edilebilmesi,
- Atomik büyütme sayesinde filme sahip malzeme özelliklerinin hakkında bilgi edinebilmemiz ve bu malzeme özelliklerini kontrol edebilmesi,
- Malzemelerin kaplanması ile daha az kaliteli malzeme kullanılması nedeniyle tasarruf sağlanması,
- Kolay kullanılabilmesi ve ekonomik bir teknoloji olması [45].

İnce filmler, hacimli malzemelerin yüzeyine kaplandığında bu malzemelerin tek başlarına sağlayamadıkları birçok özellik nedeniyle optik, elektronik, manyetik, kimyasal ve mekanik alanları ilgilendiren endüstrilerde ileri teknoloji malzemeleri olarak kullanılmaktadırlar. Aynı zamanda çok katmanlı üretildiklerinde hacim özelliklerinden tamamen farklı bir şekilde, yeni malzemeler gibi davranabildiklerinden dolayı elektronik devre elemanları olarak da kullanılabilirler. İnce film teknolojisinin en büyük uygulama alanı yarıiletken endüstrisidir. Transistörler, cep telefonu, uydu sistemleri, bilgisayar teknolojisi, lazerler, koruyucu tabakalar, girişim filtreleri, bu teknoloji ile yapılmaktadır [45].

İnce filmler, Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) (Physical Vapor Deposition (PVD)) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB) (Chemical Vapor Deposition (CVD)) yöntemleri ile hazırlanabilir. İnce film üretim teknik ve yöntemleri Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. İnce film üretim teknikleri

KBB yönteminde kaplama malzemesi olarak gaz halindeki bileşikler kullanılırken, FBB yönteminde ise kaplama malzemelerinden en az biri, katı bir kaynaktan buharlaştırılır veya atomize edilir [46]. Metot seçerken fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tez çalışmasında kimyasal yöntemler içinde yer alan Sol-jel yöntemi kullanılmıştır.

## 2.2. Sol-jel Yöntemi

Sol-jel yöntemi kısaca sıvı fazda bulunan bir çözeltinin katı faza yani jel durumuna geçiş yapması olarak tanımlanabilir. Bu yöntem Ebelmen tarafından 1846 yılında keşfedilmiştir. 1939'da Geffcken tarafından bu yöntem sayesinde SiO<sub>2</sub> gibi oksit filmlerin hazırlanabileceği keşfedilmiş olup; bu Sol-jel yöntemi için büyük bir gelişme olmuştur. Sol-jel yöntemi 1950'lerden sonra yoğun olarak kullanılmıştır [22].

1970'li yıllarda Sol-jel yöntemi ile monolitik inorganik jellerin cama dönüştürülmesi ve bunun düşük sıcaklıklarda meydana gelmesi bu yöntemin yeniden ilgi odağı haline gelmesine neden olmuştur [47].

Kollodial; katı bir maddenin bir sıvı içerisinde dağılmış homojene yakın olan süspansiyonlardır. Süspansiyon içindeki bu katı parçacıklar ne kadar küçükse çözelti içinde asılı kalarak çökelti oluşturulma ihtimalleri azalır [47]. Bir süre sonra bu küçük tanecikler genişleyerek maksimum boyuta ulaşırsa sol, jel halini alır. Bu da çözeltinin elastik bir özellik kazanmasını sağlar [48].

Sol-jel yöntemi ile oluşturulan filmlerin kalınlığı yüzey üzerine homojen şekilde dağılır ve saf bir kaplama oluşturur. Bu yöntemle hazırlanan ince filmler ortamla etkileşime girmez. Değişik şekillere sahip malzemelerin yüzeyleri kaplanabilir. Bu yöntemin en önemli avantajları ise hem düşük ısılarda homojen ve saf kaplamalar elde edilmesi hem de makro yapısının kontrol edilebilmesidir. Her türlü geometrik şekle sahip cisimlerin kaplanabiliyor olması kullanım alanının genişlemesine, çok katlı kaplama yapılabilmesine ve kırılma indisi düşük filmler yapmayı mümkün kılmıştır. Bunların yanı sıra bu yöntemde malzemelerin maliyetli olması, süreç sırasında malzeme kaybının fazla olması dezavantajları arasında sayılabilir [24].

### 2.3. Sol-jel İnce Film Üretiminde Kullanılan Bileşenler

Bir sıvıda çözülmüş kimyasal ürünlerin sentezi ile inorganik sol ve jeller üretilir. İnorganik sol veya jellerin içerisinde metal (M) katyonu bulunan ürünler Sol-jel yönteminde ön başlatıcı olarak kullanılır. Bu süreçte solun jele dönüşme basamakları son derece karmaşık reaksiyonlardan oluşur. Bu reaksiyonlar sayesinde sol içindeki kollodial parçacıkların homojen dağılımı ve kollodial parçacıkların bir araya gelerek daha büyük parçacıklar oluşturulmasının kontrol edilmesini de sağlar [48].

Sol-jel sürecinde kullanılan bileşenler; ön başlatıcılar, çözücüler ve katalizörler olarak sınıflandırılabilir.

**1-Ön Başlatıcılar:** Çözünebilme özelliği olan ön başlatıcılar bu yöntemde kullanılabilir. Ön Başlatıcıları Metal tuzları ve Alkoksitler olarak ikiye ayırabiliriz [48,49].

a) Metal Tuzları: Metal Tuzları, formülü  $M_mX_n$  şeklinde olan tuzlardır. Bu formüldeki m ve n stokiyometrik sabitler olup; M metal X ise anyonik gruptur. Bunlara örnek olarak  $AlCl_3$  verilebilir.

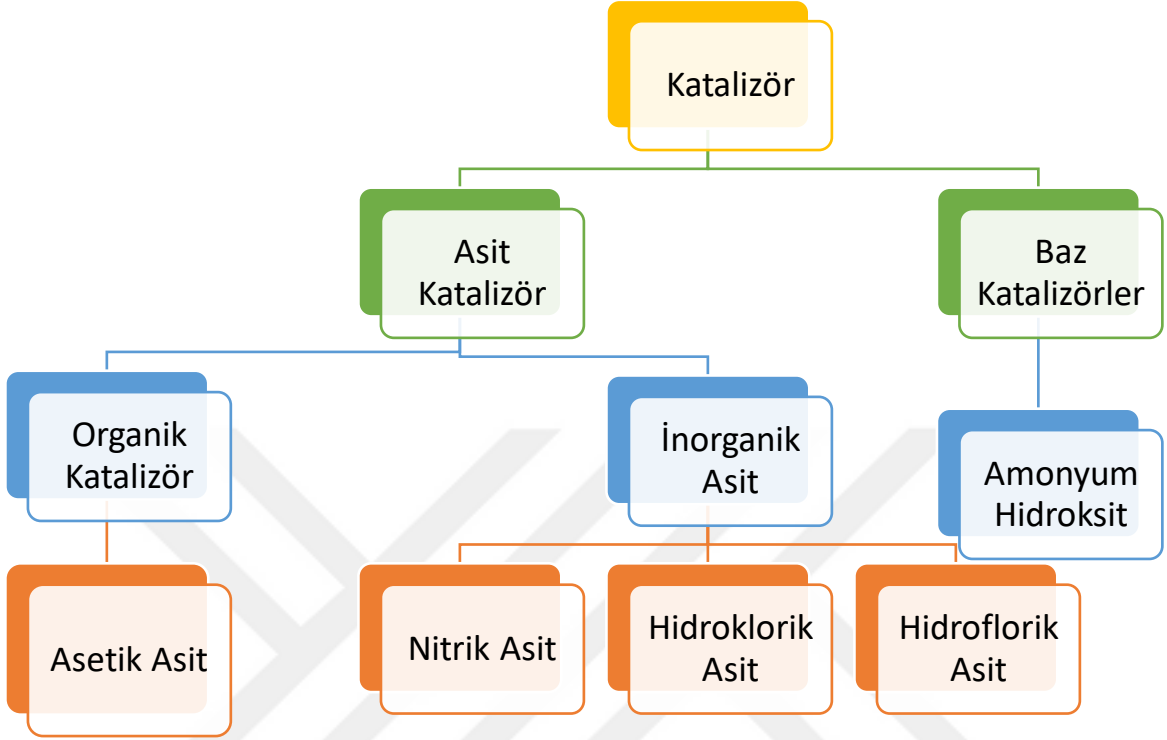
b) Metal Alkoksitler: Alkoksitlerin genel formülü  $M(OR)_n$  olarak ifade edilir. Buna Alüminyum etoksit [ $Al(OC_2H_5)_3$ ] örnek verilebilir. Bunlar reaksiyonlara aktif olarak katılabilirler. Bunun nedeni içerdikleri OR grubunun yüksek elektronegatiflik özelliğidir. Işık, nem ve ısı reaktif özellik gösterirler [50-52].

**2-Çözücüler:** Ön başlatıcı olarak kullanılan malzemenin kimyasal özellikleri birbirinden farklı olması nedeniyle farklı türde çözücü seçmek gerekir. Çözücü ön başlatıcının özelliğine göre bir organik çözücü veya su olabilir. Metal tuzlarını çözmek için su, metal alkoksitleri çözmek için alkol kullanılır. Metal oksitlerle reaksiyona girdikleri için Sol-jel yönteminde başlangıç malzemesi olarak  $CH_3OH$  (Metanol) ,  $C_2H_5OH$  (Etanol) ,  $C_3H_7OH$  (Propanol) ve  $C_4H_9OH$  (Butanol) gibi alkoller kullanılır.

Sol-jel yönteminde suyun öneminden dolayı alkollerden farklı olarak değerlendirilmelidir. Sıcaklık, katalist gibi parametrelere oranla moleküler yapıyı oluşturan ve kimyasal reaksiyonlara doğrudan dâhil olabilen bir bileşendir [48].

Reaksiyona ne kadar az su verilirse reaksiyon o kadar yavaşlar yani reaksiyon hızı kontrol edilebilir. Bu nedenle su Sol-jel yönteminde büyük önem taşır. Sol-jel sürecinde su miktarı su ve alkoksit oranı olarak ifade edilir [48,53].

**3-Katalizörler:** Katalizörler reaksiyon hızını artıran ancak kendisi reaksiyona dâhil olmayan malzemelerdir. Sol-jel yönteminde asit ve baz olmak üzere iki çeşit katalizör kullanılır. Kullanılan katalizörler Şekil 2.2’de gösterilmiştir [47,49].



Şekil 2.2. Sol-jel yönteminde kullanılan bazı katalizörler

## 2.4. Sol-jel Oluşumu

Sol-jel oluşumu ilk olarak çözelti oluşturmayla başlayan bir dizi işlem sonucunda oluşur. Çözelti hazırlama aşamasında bazı ön başlatıcılarla onlara uygun çözücüler homojen bir çözelti oluşturur çözelti hazırlandıktan sonra belli aşamalardan geçirilir [54].

### 2.4.1. Hidroliz reaksiyonları

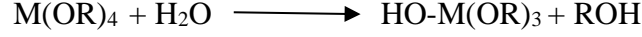
Sol-jel yönteminde en başta saf halde olan başlangıç maddelerinden homojen bir çözelti hazırlanması gerekir. Daha sonra alkositlere su eklenip karıştırılması ile hidroliz gerçekleşmiş olur. Hazırlanan homojen çözeltinin pH değeri 7’den farklı ise reaksiyon hızlı ilerler. Bu nedenle çözeltilere baz yada asit eklenirse süreç hızlanır [55].

Hidrolizin hazırlanmasının ardından solün pH değeri 7’ye doğru yaklaştırılır. Bu aşama ile mekanik olarak kararlı olmayan ıslak jel elde edilir. Bu jelin kurutulmasıyla xerogels

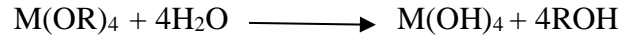


oluşur. Bu xerogels suda ve diğer birçok çözücüde çözünmeyen şeffaf bir özellik kazanmasına neden olur.

Hidroliz reaksiyonu;



şeklindedir. Bu tepkimelerde reaksiyonda bulunan katalizör ve su miktarına göre OR gruplarının OH haline gelene kadar devam eder [54]. Eğer reaksiyonda yeteri miktarda su ve alkol varsa hidroliz reaksiyonu aşağıdaki gibi olur.



#### 2.4.2. Yoğunlaşma reaksiyonları

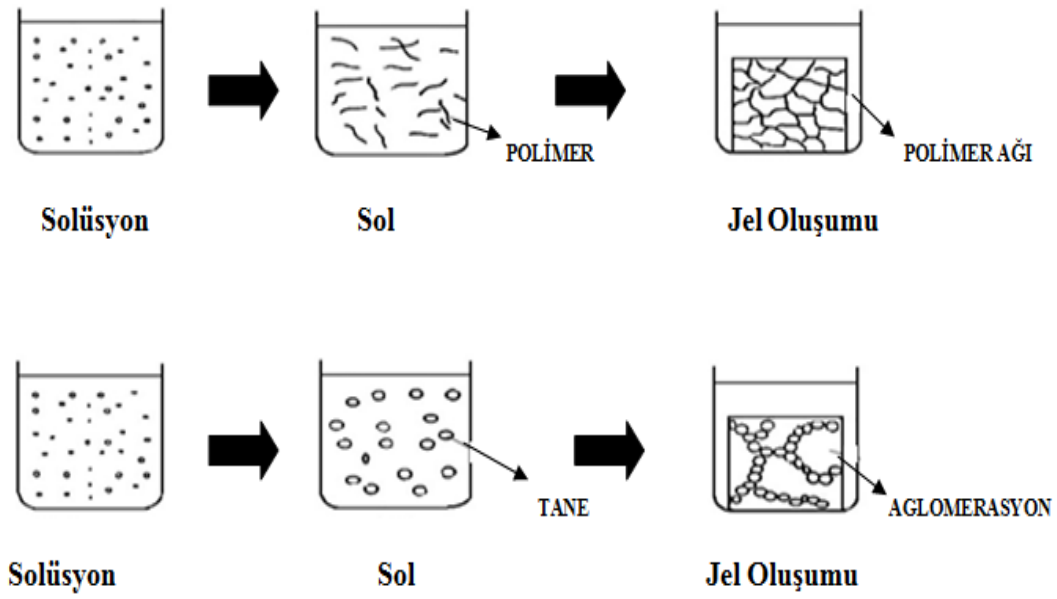
Bu reaksiyonda hidroliz olan malzeme oksijenle bağlanır.



Hidroliz olan ürünler tekrar birleşerek yoğunlaşma reaksiyonu meydana gelir. Bu tepkimeden büyük silikon bazlı moleküller oluşur. Buna polimerizasyon denir. Bu süreçte çözelti sol'e dönüşür. Yoğunlaşma devam ederek bağlanmalar artar ve polimer oluşur. Tüm çözeltinin polimer yapı oluşuna kadar devam eder ve katı bir polimer ağ oluşturur. Buna jel denir [54].

#### 2.4.3. Jelleşme

Jelleşme çözelti akışkanlığının aniden elastik bir yapı haline dönüşmesine denir. Yoğunlaşma ve hidroliz reaksiyonları sayesinde jelleşme gerçekleşir. Jeller arasındaki bağların yapısına göre kuvvetli jeller ve zayıf jeller olarak sınıflandırılır [56]. Jeller mikron boyutta birbirlerine bağlıdır ve bunlara viskoelastik maddeler denir [54]. Sol içindeki kolloidal parçacıklar ve metal türleri yoğunlaşarak makro partikülleri oluşturmak için geniş demetler şeklinde bağlanırlar. Bu bağlanma solun jele geçişini gösterir. Sol-jel yönteminde jelleşme olayı Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Hidroliz ve yoğunlaşma olayları sayesinde jelleşme oluşur. Solden jel haline iki farklı yolla gerçekleşebilir. Birbirinden ayrı olan parçacıklar genişleyerek beraber büyür ya da polimerik moleküller üç boyutlu çapraz bağlı yapı oluştururlar [23].



Şekil 2.3. Jelleşme mekanizmaları

#### 2.4.4. Yaşlanma

Jelleşme sürecinden sonra yaşlanma süreci gelir. Bu aşamada jel içindeki kimyasalların uzun süre reaksiyona girerek kararlı yapıya geçmesi için gereken süreye denir [56].

Yaşlandırma süreci polimerleşme, sineriz, kabalaşma ve faz değişimi aşamalarından oluşur. Kondezasyon reaksiyonu ile ağ yapının bağlanabilirliğinin artması polimerleşme olarak tanımlanır. Yaşlandırma aşamasında kristalizasyon oluşumu da sağlanır. Bu aşamada yapı ayrışıp çökmesiyle tekrar yapılır ve karalı bir hale gelir. Bu sayede kristal yapılu ürünler oluşur. Örneğin  $TiCl_4$  önbaşlatıcısının hidroliz reaksiyonu sayesinde  $TiO_2$  kristalleri oluşur [47].

Yaşlandırma süresine bağlı olarak yapıdan uzaklaşan maddeler ortaya çıkan ürünün özelliklerini değiştirir. Örnek olarak fotokatalitik özelliği olan  $TiO_2$  sentezinin yaşlandırma süresi arttığında hidroksil iyonlarının anataz kafesinde azalmış bu nedenle kalsinasyon sonucunda olan oksijen boşluk konsatrasyonu da azalmıştır. Yeterli süre yaşlandırma işlemi uygulanmadığında numune de oksijen boşluklarının oluşmasıyla fotokatalitik özelliği olumsuz etkileyen  $Ti^{3+}$  yapıları oluşmuştur [47].

#### **2.4.5. Kurutma**

Kurutma süreci bazı basamaklardan oluşur. İlk basamak olarak buharlaşan sıvı miktarı ile gövde aynı miktarda büzülür ve yüzey oldukça katılaşır. İkinci aşama olarak gövdenin yüzeyinde bulunan sıvı, hava gözeneklerinde içe doğru çekilir. Sıvı gövde yüzeyinden buharlaşır. Böylece sıvı ceplere hapsolür [47].

Jelin kurutma işlemi en önemli basamaklardandır. Basınç sayesinde kurutma kapileri kontrol edilir. Basınç nedeniyle kapiler büzülür. Ancak kurutma sırasında ki ani basınç değişimleri ve yüksek gerilim büzülme, çatlamalara neden olabilir [55,58].

Elde ettiğimiz jelin içinde ki bazı kalıntılar (organik kalıntılar ve hidroksil) bulunur. Eğer inorganik bir sistem istiyorsak içindeki bu kalıntıları yok etmemiz gerekir. Sistemdeki gözenekleri yok ederken gözenek içindeki uçucu maddeler nedeniyle jel şişerek yapısının bozulmasına neden olabilir [59].

#### **2.4.6. Sinterleme**

Bu aşama ara yüzey enerjisi ile meydana gelen yoğunlaşma olayıdır. Malzeme gözenekliliğın yok olacağı ve katı-buhar ara yüzey alanı azalacak şekilde viskoz akış veya difüzyonla hareket eder. Bu nedenle itici güç çok düşük sıcaklıkta bile sinterleme yapılmasına imkân sağlar [47].

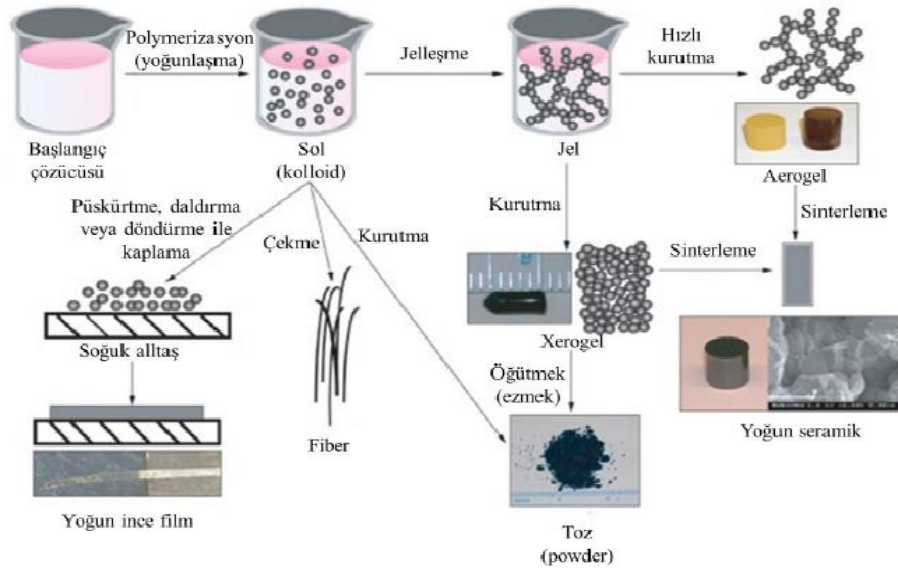
Ürünün yapısı üzerinde sinterleme sıcaklığı, ortamı ve hızı son derece etkilidir. Porkodi ve Arokiamary'nin yaptığı çalışmalarda Sol-jel yöntemiyle 300 °C, 400 °C, 500 °C de titanya kristallerini kalsine etmişlerdir.

Son zamanlarda mikrodalga kalsinasyonu ile yapılan çalışmalarda önem kazanmaya başlamıştır. Bunun temel nedeni klasik yöntemlerde sadece yüzey ısıtılabilirken bu yöntemde materyal hem dıştan hem de içten aynı anda ısıtılırken fotokatalitik aktivite özelliğinin de geliştirilebiliyor olmasıdır [60].

### **2.5. Sol-jel Yöntemi ile İnce Film Kaplama Teknikleri**

İnce film kaplama yöntemlerinden en çok kullanılan yöntemlerden biri de Sol-jel'dir. Bu yöntemle metal, seramik, cam, plastik gibi alt taş malzemeler kolayca kaplanabilir. Bu sayede kaplanan yüzey eski haline göre daha iyi ve yeni özellikler kazanır [54].

Sol-jel yönteminde Sol-jelleşmeden önce alt taş yüzeyi kaplanır.



**Şekil 2.4.** Sol-jel kaplama tekniği ile elde edilen malzeme türleri [61]

Sol-jel yöntemi ile kaplama metotları çok çeşitlidir.

Bunlardan bazıları;

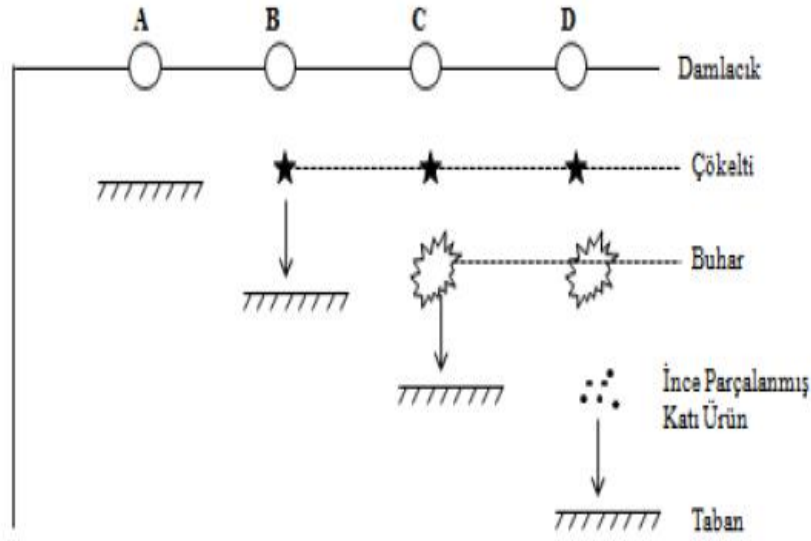
- Rulo Kaplama Tekniği
- Akış Tekniği
- Yazdırma Tekniği
- Püskürtme Tekniği
- Daldırma Tekniği
- Döndürme tekniği

olarak sıralanabilir. Bu tekniklerden en çok kullanılan teknikler, Püskürtme tekniği, Daldırma tekniği ve Döndürme tekniğidir. Bu çalışmada döndürme tekniği kullanılmıştır.

### 2.5.1. Püskürtme tekniği ile kaplama

Bu teknikte çözeltinin, azot gazı ya da hava ile atomize edilip taban üzerine püskürtülmesi ile yapılır. Püskürtme sonucu oluşan damlacıklar altlık yüzeyinin kaplanmasını sağlar. Altlık yüzeyindeki çözücü buharlaştırılır ve kurutulur [54].

Bu işlemde altlık yüzeyi sıvı damlacıklarla değil ince parçalanmış katı küçük taneciklerle kaplanır [62].



**Şekil 2.5.** Püskürtme tekniğinde püskürtülen çözelti damlacıklarının aerodinamiği

Püskürtme tekniği ekonomik ve uygulanabilirliği kolay olan bir tekniktir. Kullanılan düzenekler ucuz ve basit yapıda olması, karmaşık şekilli cisimlerin kaplanabilmesi, vakum ortamına ihtiyaç duyulmaması diğer tekniklere göre avantaj sağlamıştır [54].

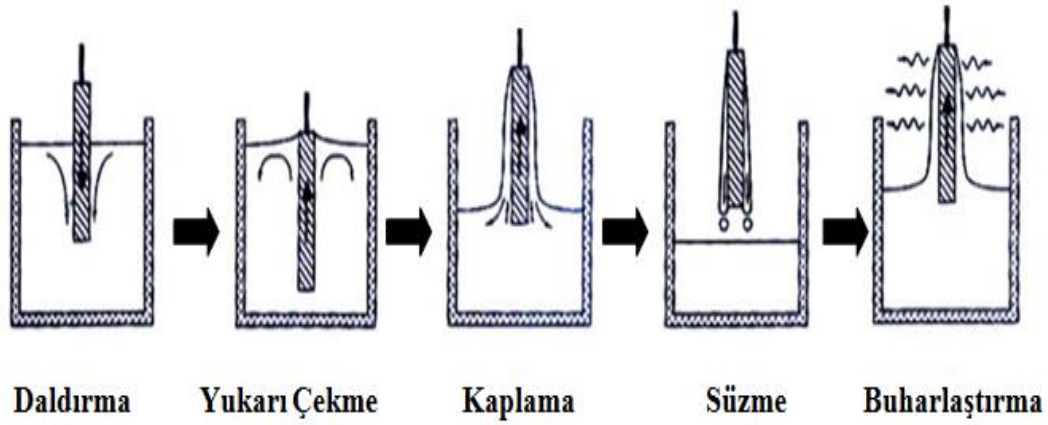
Püskürtülen damlacıkların büyüklüğü, altlık sıcaklığı, altlık uzaklığı, su oranı film kalitesine önemli etkiler yapar.

### 2.5.2. Daldırma tekniği ile kaplama

Bu teknik saydam tabakalar oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu tekniğin temeli Sol-jel için hazırlanan çözeltinin içine kaplanacak olan altlığın belli bir hızla daldırılıp kontrollü bir hızla tekrar çıkarılmasına ve bu işlemin tekrarlanması esasına dayanır. Bu teknik beş basamaktan oluşur;

- a)Daldırma
- b)Yukarı Çekme
- c)Kaplama
- d)Süzme
- e)Buharlaştırma

Bu aşamalar Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



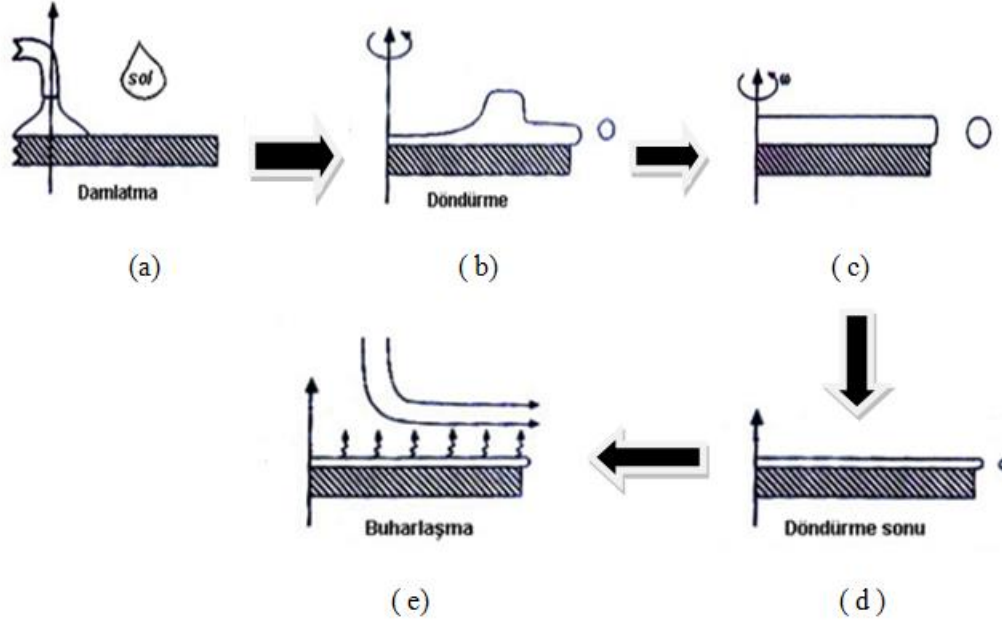
**Şekil 2.6.** Daldırma tekniğinin basamakları

Bu teknikte altlık çözelti içine belirli bir hızla daldırılır. Çözelti içinde kısa bir süre bekletildikten sonra belirli bir hızla yukarı çekilir. Bu sayede altlık malzeme kaplanmış olur. Yukarı çekildikten sonra çözeltinin altlıktan süzülmesi için bir süre beklenir. Süzülme aşamasından sonra altlık üzerinde kalan sol içindeki fazla sıvı buharlaştırılır ve geriye altlık yüzeyinde kuru jel kalır. Fırınlama işleminden sonra ince film oluşturulmuş olur [23].

Bu teknikte filmin kalınlığına etkisi olan altı kuvvet vardır. Bu kuvvetler taşıyıcının çekildiği yönde oluşan viskozite kuvveti, altlığın yüzeyinde bulunan solün yüzey gerilimi, sınır tabakasındaki yüzey etkileşimi, yüzey gerilimi değişimi, birleşme ve ayrılma basıncı ve hava basıncıdır [63].

### 2.5.3. Döndürme tekniği ile kaplama

Bu teknikte; hazırlanan solün altlık üzerine damlatılması ve sol damlatılan altlığın yüksek hızla döndürülmesi ile solün merkezkaç kuvveti sayesinde altlık yüzeyine yayılması esasına dayanır. Burada kullanılan altaşın sadece bir yüzeyi kaplanabilmektedir. Altlığın yüksek hızla döndürülmesi ile altlık yüzeyindeki solün fazlası yüzeyden ayrılır. Kalan sol belli safhalardan geçerek altlık yüzeyinde ince film oluşturur [54]. Oluşan ince film kalınlığı ve kalitesi altlığın dönme hızı, yüzey gerilimi, kurutma hızı, çözeltinin viskozitesi gibi etkenlerden önemli ölçüde etkilenir [62]. Döndürme ile kaplama tekniği aşamaları Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.7.** Döndürme tekniğinin basamakları

İlk aşama olarak hazırlanan sol altlık üzerine damlatılır. Daha sonra sistem yüksek hızla döndürülür. Dönme sırasında oluşan merkezkaç kuvveti sayesinde sol bütün yüzeye yayılır. İstenilen film kalitesine ulaşmak için sabit dönme hızına en kısa sürede ulaşılması önemlidir. Aksi takdirde sol altlık yüzeyinde düzensiz olarak yayılacak bu da istenilen film kalitesini etkileyecektir.

Altlık yüzeyine damlatılan solün fazla kısmı dönme etkisi ile oluşan merkezkaç kuvveti ile yüzeyi terk eder. Bu aşamadan sonra altlık yüzeyine eşit olarak dağılmış olan kısmı buharlaştırma aşaması ile kurutulur [64].

Döndürme aşamasında solün yüzeyi terk etmesi sonucu film kalınlığı azalır. Bunun temel sebebi film inceldikçe akışkanlık direncinin artmasıdır. Ayrıca sol içindeki uçucu olmayan kısımların sol konsantrasyonunu artırması ile akışkanlık direncinin artmasıdır [64].

Bu tekniğin avantajlarından biri de solün altlık yüzeyine eşit ve homojen bir şekilde dağılmasıdır. Sol viskozitesi değişmezse film kalınlığı da değişmez. Film kalınlığının eşit ve homojen olmasında iki ana kuvvetten bahsedebiliriz. Bunlar dönme sonucunda oluşan merkezkaç kuvveti ve buna ters yönde olan sürtünme kuvvetidir.

Kaplama sonucunda meydana gelen film kalınlığı;

$$h(t) = \frac{h(0)}{\sqrt{1 + \frac{4\rho\omega^2 h_0^2 t}{3\eta}}} \quad (2.1)$$

$h(0)$  : İlk kalınlık

t: Zaman

$\omega$  : Açısal hız.

$\eta$  :Çözeltinin viskozitesi

$\rho$  :Çözeltinin yoğunluğudur.

Film kalınlığına altlık yüzeyinden buharlaşan sol miktarı da etkilidir ve bu sabit bir döngü oluşturur. Bu döngü, kütle transfer katsayısının sabit olmasına sebep olur.

Altılık üzerindeki film kalınlığı en son halini buharlaştırma aşamasından sonra alır. Buharlaştırma safhası yüzeyde bulunan fazla solün yüzeyi terk etmesi ile başlar. Meyerhofer döndürmenin sonlandırılması işlemi ile buharlaştırma işlemini ayrı ayrı incelemiştir.

Kaplama sonucunda oluşan kalınlık ile geçen zaman bağıntıları aşağıda verilmiştir.

$$h(\text{son}) = \left(1 - \frac{\rho_A^0}{\rho_A}\right) \left(\frac{3\eta e}{2\rho_A^0 \omega^2}\right)^{1/3} \quad (2.2)$$

$$t_{\text{son}} = t_{\text{durma}} + h_{\text{durma}} \frac{\rho_A^0}{e\rho_A} \quad (2.3)$$

Bu formüllerdeki  $\rho_A$  ; birim hacimdeki uçucu maddenin kütlesi,  $\rho_A^0$ ; birim hacimdeki uçucu maddenin başlangıç değeri, e; buharlaşma oranı ve k; kütle transfer katsayısını belirtir [65].

Bu teknikte solün yüzeye dağıtılmasında dinamik ve statik olmak üzere iki yöntem kullanılır.

Statik dağıtımda, sol altlığın merkez ya da merkeze yakın bir bölgesine damlatılır. Damlatılan sol miktarı solün viskozitesine ve altlığın ebatlarına bağlıdır. Eğer sol viskozitesi yüksekse ya da altlık ebatları büyükse damlatılan sol miktarı artırılmalıdır [62].



Dinamik dağıtımda ise, altlık düşük hızlardayken sol damlatılır. Bu da film oluşurken boşluk oluşmamasını sağlar [54].

Döndürme ile kaplama tekniğinin avantajları;

- Tekniğin kolay ve hızlı uygulanabilmesi
- Altlığın geniş olsa bile harcanan sol miktarının az olması
- Altlıkları çok katmalı olarak kaplamaya imkân sağlaması

Döndürme ile kaplama tekniğinin dezavantajları;

- Altlık malzemenin geniş olması halinde yüzeyin homojen kaplamanın zor olması
- Solün hızlı buharlaşması durumunda homojen kaplamanın zor olması
- Temiz tutmanın zor olması
- Sadece yuvarlak şekilli altlıkların kaplanabilmesi
- Altlığın sadece bir yüzeyinin kaplanabilmesi
- İstenilen film kalınlığı elde etmeyi zorlaştırabilir.

## **2.6. Sol-jel Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları**

Sol-jel yöntemi kullanımı her geçen gün artan bir yöntemdir. Bu yöntemin birçok avantajının yanında dezavantajları da vardır [48,66].

**Avantajları;**

- Gözenek yapılı materyaller elde edilebilir.
- Kaplanmak istenilen yüzey çok katmanlı olarak kaplanabilir.
- Çeşitli geometrik şekilli alttaşlar kaplanabilir.
- Kaplama sırasında yüksek sıcaklıklara ve vakuma ihtiyaç duyulmaz.
- Kaplama sonucunda ince film alttaş yüzeyine eşit ve homojen bir şekilde dağılır.
- İşlem sırasında kullanılan düzenekler basit ve ekonomiktir.
- Kullanılan önbaşlatıcıların genellikle uçucu olması nedeniyle yüksek saflıkta materyal elde edilebilmesine imkân sağlar.

- Yaşlandırma ve kurutma basamakları kontrol edilerek gözenek yapısı ve mekanik özellikler kontrol edilebilir.
- Süreç düşük sıcaklığı, çoğunlukla oksit materyallerin kristalizasyon sıcaklığının altındadır ve bu ürünün nadir amorf malzeme üretimine izin verir.

### **Dezavantajları;**

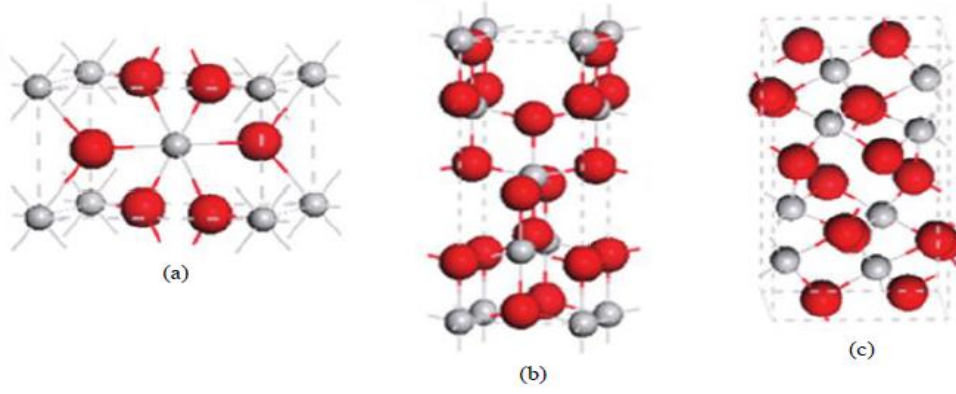
- Kaplama işlemi uygulanırken malzeme kaybı çok olur.
- Hazırlanan solün kullanım ömrü kısa olur.
- Sol için kullanılan malzemeler zehirli olabilir.
- Ön başlatıcı malzemeler temin etmek zor ve pahalıdır.
- Yaşlandırma ve kurutma basamakları sonucunda çatlaklar meydana gelebileceğinden bu süreç çok dikkatli kontrol edilmek zorundadır.
- Sol hazırlama aşamaları zaman alıcıdır.

### **2.7. TiO<sub>2</sub>'in Yapısal Özellikleri**

Titanyum (Ti) elementi, periyodik tabloda 22 atom numarasına sahip, yoğunluğu 4,51 g/cm<sup>3</sup> olan ve 1668 °C erime sıcaklığına 3260 °C kaynama sıcaklığına sahip hafif bir elementtir. Oksijen (O) elementi ise periyodik tabloda 8 atom numarasına sahip, yoğunluğu 1,105 g/cm<sup>3</sup> olan, erime sıcaklığı -218,8 °C , kaynama sıcaklığı -182,96 °C olan, moleküler yapıya sahip renksiz bir gazdır [67].

Ti elementi ile O elementi çok kolay bir şekilde tepkimeye girebilirler. Tepkime sonucunda TiO<sub>2</sub> bileşiği oluşur. TiO<sub>2</sub> bileşiği erime sıcaklığı 1843 °C, kaynama sıcaklığı 2972 °C olan, 4,23 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta, yüksek geçirgenliğe sahip geçiş metal oksit bir bileşiktir [68].

TiO<sub>2</sub>, üç farklı kristal yapıya sahiptir. Bunlar, Anataz, Rutil, ve Brukit kristal yapılarıdır. Anataz ve Rutil yapılar tetragonal Kristal yapısı varken Brukit ortorombik kristal yapıya sahiptir. Titanyum Rutil, Anataz ve Brukit Kristal yapıları Şekil 2.8'de, yapı parametreleri ise Çizelge 2.1'de verilmiştir [69].



Şekil 2.8. Titanyum (a) rutil, (b) anataz ve (c) brukit kristal yapısı

Çizelge 2.1.  $\text{TiO}_2$ 'nin yapı parametreleri [69]

	<b>Rutil</b>	<b>Anataz</b>	<b>Brokit</b>
<b>Kristal Yapı</b>	<b>Tetragonal</b>	<b>Tetragonal</b>	<b>Ortorombik</b>
<b>Örgüt Sabiti</b>	<b><math>a = 4.584 \text{ \AA}</math></b>	<b><math>a = 3.782 \text{ \AA}</math></b>	<b><math>a = 9.166 \text{ \AA}</math></b>
	<b><math>b = 4.584 \text{ \AA}</math></b>	<b><math>b = 3.782 \text{ \AA}</math></b>	<b><math>b = 5.436 \text{ \AA}</math></b>
	<b><math>c = 2.953 \text{ \AA}</math></b>	<b><math>c = 9.502 \text{ \AA}</math></b>	<b><math>b = 5.135 \text{ \AA}</math></b>
<b>Molekül Birim Hücre</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>8</b>
<b>Hacim Molekül</b>	<b><math>31.2160 \text{ \AA}^3</math></b>	<b><math>34.061 \text{ \AA}^3</math></b>	<b><math>32.172 \text{ \AA}^3</math></b>
<b>Yoğunluk</b>	<b><math>4.13 \text{ g/cm}^3</math></b>	<b><math>3.79 \text{ g/cm}^3</math></b>	<b><math>3.99 \text{ g/cm}^3</math></b>

Anataz yapısında Ti-Ti atomları arasındaki mesafe rutil yapısına göre daha büyüktür. Ti-O bağ uzunluğu rutil yapıda daha küçüktür [70].

Çizelge 2.2. Rutil ve anataz  $\text{TiO}_2$  kristallerinde atomlar arası mesafe-bağ uzunlukları [69]

ATOMLAR	RUTİL	ANATAZ
Ti - Ti	$3,57 \text{ \AA} - 2,96 \text{ \AA}$	$3,79 \text{ \AA} - 3,04 \text{ \AA}$
Ti - O	$1,949 \text{ \AA} - 1,980 \text{ \AA}$	$1,934 \text{ \AA} - 1,980 \text{ \AA}$

$\text{TiO}_2$  kristallerinin atomlar arası bağ uzunluklarındaki farklılıklar elektronik bant yapısında ve kütle yoğunluğunda değişikliklere neden olur.  $\text{TiO}_2$ 'in rutil ve anataz yapıları için entropi, entalpi ve  $E_g$  değerleri Çizelge 2.3'de verilmiştir.

**Çizelge 2.3.** TiO<sub>2</sub>'in rutil ve anataz yapıları için entropi, entalpi ve Eg değerleri

( 25 °C )	Anataz	Rutil
$\Delta H_f^o$ (kcal/mol)	225.8	224.6
$\Delta G_f^o$ (kcal/mol)	212.6	211.4
$S^o$ (cal/deg.mol)	12.03	11.93
$d(g/cm^3)$	3.894	4.250
$E_g(eV)$	3.3	3.1

TiO<sub>2</sub> ışığa karşı duyarlı olan bir yarı iletkenidir. Rutil yapıda valans bandı ile iletkenlik enerji-bant aralığı 3,1 eV iken anataz yapıda 3,3 eV'dur. Soğurma bandında anataz 385 nm'den rutilde ise 415 nm'den küçüktür. Işık enerjisinin soğurulması sayesinde valans bandında bulunan elektron uyarılır ve iletkenlik bandına geçer.

## 2.8. TiO<sub>2</sub>'in Kullanım Alanları

Titanyum dioksit bir geçiş metal oksittir. 1900'lü yılların başında beyaz boya elde etmek için zehirli olan kurşun oksitler kullanılmaktayken bunun yerine zehirli olmayan Titanyum dioksit kullanılmaya başlanmıştır. Bu da özellikle boya sanayisinde önemini artırmıştır [71].

Titanyum dioksit günümüzde dört milyon tona yakın üretilmekte olup, bunların yaklaşık % 50'si boya endüstrisinde, % 20'si plastik sektöründe, % 17'si kâğıt üretiminde kullanılmaktadır. % 3'lük kısmı ise herhangi bir toksik etkisi olmadığı için kozmetik, deri, ilaç sanayisi, gıda gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır [71]. TiO<sub>2</sub> üstün elektrik, optik, fotokatalitik özelliklere sahiptir. Bu nedenle anti bakteriyel boyalarda, buğulanmayan camlarda kullanılır. Titanyum dioksit UV ışınları aldığında uyarılır ve fotokatalitik özellik gösterir. Bu da organik bileşenleri parçalayabilme özelliği kazanmasına neden olur. TiO<sub>2</sub> özellikle fotokatalizör özelliğinden dolayı çevre sorunlarının çözümünde büyük faydalar sağlayacağı düşünülmektedir. Bunun nedeni 1969 yılında Honda-Fujishima tarafından yapılan çalışmalarda Titanyum dioksit elektrotların suyu bileşenlerine ayırabileceği, 1977 yılında ise suyun içindeki siyanüründe TiO<sub>2</sub> sayesinde ayrıştırılabileceği keşfedilmiştir [58]. TiO<sub>2</sub>'in fotoaktivitesi esnasında yüzeyinde korozyon oluşur. Bu özelliği nedeniyle kendi kendini temizleyebilen yapılarda (otomotiv, inşaat, cam sanayi) kullanılır [73]. TiO<sub>2</sub>'in günümüzde popüler hale gelen özelliklerinden biri de süper hidrofilik özelliktir. Bu özellik sayesinde buğulanmayan ve

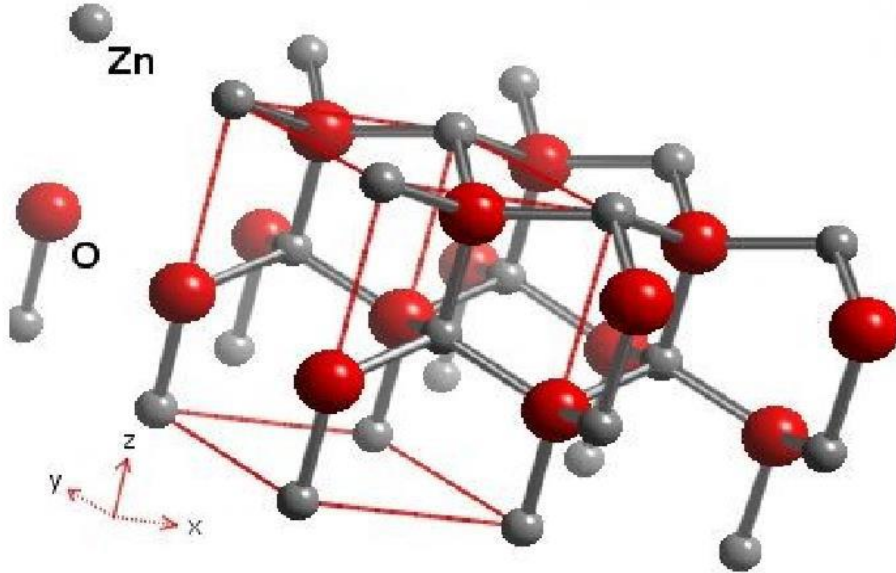
kendini temizleyebilen camlar elde etmek mümkündür. Bu da mağaza vitrinlerinin temiz kalması, her zaman temizlenmesi mümkün olmayan yüksek katlı bina camları, aynalar, araçların ön ve arka camlarının temiz kalması ile görüş mesafesinin uygun kalması gibi birçok alanda yer alır [74].

TiO<sub>2</sub> elektrik iletkenliği nedeniyle gaz sensörü olarak, zehirleyici özelliği olmaması nedeniyle biyomalzeme olarak, termodinamik devre elemanı olarak, havanın ve suyun arıtılmasında, yüksek kırılma indisine sahip olduğu için lenslerde, güneş pillerinde, yansıtma özelliğinden dolayı yüksek yansıtımlı kaplama olarak kullanılır [75].

## 2.9. ZnO'nun Genel Özellikleri

Metaloksit yarı iletkenler son zamanlarda elektriksel ve optiksel özellikleri sebebiyle ilgi çekici hale gelmiştir. Çinko elementi periyodik tabloda 30 atom numarasına sahip, oda sıcaklığında katı halde bulunan, yoğunluğu 7.14 g/cm<sup>3</sup> 'dür. Ergime sıcaklığı 419,53 °C , kaynama sıcaklığı ise 907 °C'dir. Oksijen elementi ise periyodik tabloda 8 atom numarasına sahip, yoğunluğu 1,105 g/cm<sup>3</sup> olan, erime sıcaklığı -218,8 °C , kaynama sıcaklığı -182,96 °C olan ve moleküler yapıya sahip renksiz bir gazdır [76].

Tabiatta 'mineral zinkit' olarak karşımıza çıkar. ZnO bileşik olarak Şekil 2.9'da gösterildiği gibi hegzagonal bir yapıda kristalleşir [62].



Şekil 2.9. ZnO'nun kristal yapısı

ZnO bileşiği  $5,606 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahiptir. Ergime sıcaklığı  $1975 \text{ }^\circ\text{C}$  , kaynama sıcaklığı  $2360 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir.  $300 \text{ }^\circ\text{K}$ ' deki örgü parametreleri  $a=3,24982 \text{ \AA}$  ,  $c= 5,20661 \text{ \AA}$ 'dur. Hegzagonal yapıdaki ZnO bileşiğinin bütün Zn atomu ilk kabukta 4 tane O atomu, ikinci kabukta 12 Zn atomu ile çevrilmiştir. II – IV grubundaki bileşik haldeki yarı iletkenler kübik, zincblende veya hegzagonal wurtzite yapısında bulunur [76].

ZnO yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olup; oda koşullarında  $3,3 \text{ eV}$ 'luk direkt band geçişli yasak enerji aralığı bulunmaktadır. Elektronik ve optik araçlar için  $60 \text{ meV}$ 'luk geniş band aralığına sahip olması kullanılabilirlik açasından kolaylıklar sağlamıştır [76].

Genişband aralığına sahip ZnO gibi metaryaller sayesinde yüksek güçlerde ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilen, düşük gürültüye sahip, yüksek kırılma voltajı olan aygıtlar üretilebilir. Yarı iletkenlerin elektron geçiş performansları düşük yada yüksek elektrik alanlardaki farklılıklara bağlıdır [76].

ZnO'in elektron enerji dağılımları düşük elektrik alanda çok az değişimler gösterir. Bunun nedeni uygulanan elektrik alandan çok az enerji almalarıdır. Bu sayede elektron mobiliteleri sabit kalır. Elektron mobilitesi değişmediğinden saçılma oranının da değişimi sabit kalır. Yüksek elektrik alan uygulandığında ise yüksek elektrik alan nedeniyle elektron dağılım fonksiyonu daha uzak bir değere sapar. Elektron örgü sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa sahip olur. Bu elektronlar kararlı durumda sahip oldukları sürüklenme hızından daha büyük bir hıza sahip olurlar. Bu sayede yüksek frekansa sahip araçlar yapılabilir [76].

ZnO büyük elektromekanik çiftlenim katsayısına sahip olması ve ferroelektrik bir bileşik olmaması nedeniyle yüzey akustik dalga cihazları gibi aygıtlar için transduser olarak kullanılan iyi bir piezoelektrik malzemedir. Ayrıca çinkonun doğada bol bulunması maliyetin düşük olması açasından son derece önemlidir. Çinko oksitin görünür ışık bölgesinde saydam özellikte olması da başka bir avantajdır [76].

ZnO görünür ışık bölgesinde  $10^{-3} - 10^{+2} \Omega \text{ cm}$  elektriksel dirence ve % 80 - % 90 optik geçirgenliğe sahiptir. Stokiyometri sapması nedeniyle ZnO n-tipi yapıya sahiptir. ZnO eğer katkılanmamışsa kararsız elektriksel özellikler taşır. ZnO metaryellerini p-tipi malzeme yapmak istiyorsak; n-tipi ZnO metaryelleri ile katkılamamız gerekir. P-tipi ZnO elektiksel aygıtlar için oldukça uygundur. ZnO optoelektrik aygıtlar yapımında p-tipi ZnO ince filmler kullanılması bu aygıtların gelişiminde önemli rol oynar. ZnO amfoterik bir bileşik olması nedeniyle inorganik ve organik asitlerle tepkimeye girer. Amonyak

çözüldüğünde çözünen ZnO çinko asetatı oluşturur. Çinko oksit 300 °C sıcaklıkta beyaz renkten sarı renge döner [76].

## 2.10. Yarı İletkenlerin Optiksel Özellikleri

Yarı iletkenlerin bant yapılarını, malzemenin elektron ve boşlukları ile ilgili bilgi edinmek istiyorsak optiksel özelliklerini inceleyebiliriz.

Yarı iletken üzerine değişik frekanslarda ışın demetleri gönderirsek; yansıma, soğurma, kırılma ve geçirgenlik gibi optiksel olaylar, elektronlar ile fotonlar arasındaki etkileşimleri inceleyebiliriz [77,78].

Eğer fotonların enerjileri düşük ise herhangi bir soğurulmaya uğramaz. Saydamsa ışığı geçirir, yüzeyi düzgünse yansır [77]. Belirli bir kalınlıktaki yarı iletken üzerine  $I_0$  şiddetindeki bir foton gönderildiğinde üç şekilde davranır. Fotonun bir miktarı yansır, bir miktarı soğurulur, bir miktarı ile malzemedeki geçer. Bu nedenle yansıyan ( $I_R$ ), soğurulan ( $I_A$ ) ve geçen ( $I_T$ ) ışık şiddetlerinin toplamı başta gönderilen  $I_0$  ışık şiddetine eşittir.

$$I_0 = (I_R) + (I_A) + (I_T) \quad (2.4)$$

Bu ifade de R yansıma katsayısını, A soğurmayı, T geçirgenliği belirtir. Bu üç ifadenin toplamı 1 olur [79,80].

$$R + A + T = 1 \quad (2.5)$$

Bir yarı iletken üzerine gönderilen ışın demetleri yarı iletkende bulunan elektriksel yüklerle etkileşime girer. Etkileşim sonucunda ışın demeti enerji kaybeder. Kaybedilen bu enerji atom tarafından kullanılır. Bu olaya soğurulma denir. Işın demetinden soğurulan enerji sayesinde temel yük taşıyıcıları bir üst enerji seviyesine uyarılır [81,82].

Yarı iletkenlerin soğurma ölçümleri geniş bir dalga boyu aralığında yapılırsa, geçen ışınların bağıl şiddetleri ile dalga boyları arasında bir bağıntı oluşur. Bu bağıntı bize soğurma spektrumunu verir. Malzemelerin kendi özelliklerinden dolayı soğuracağı dalga boyları farklıdır. Bu özellik sayesinde yarı iletkenin bant yapısı incelenerek yasak enerji aralığı hesaplanabilir. Buna optik metot denir. Optik soğurma spektrumu sayesinde dielektrik sabiti, kırılma indisi, geçirgenlik gibi optik verilere de ulaşılabilir [79,81]. Yarı iletken gelen ışık farklı etkilerin oluşmasına neden olabilir. Yük taşıyıcının bantlar arası geçişlerini incelersek optiksel bant aralığını bulabiliriz. Yarı iletken üzerine yasak enerji aralığına eşit ya da büyük enerjili bir foton gönderilirse malzemedeki bir elektron bu enerjiyi soğurur ve valans bandında bulunan bu elektron iletim bandına geçer. Buna temel

soğurma olayı adı verilir. Valans bandından iletim bandına geçen elektronun yerinde bir hol oluşur. Yarı iletken üzerine ne kadar çok foton gönderilirse o kadar çok elektron valans bandından iletim bandına geçer. Bu sayede malzemenin iletkenliği artar. Bu işleme fotoiletkenlik olarak adlandırılır [78,81]. Bu olay soğurma spektrumunda ani bir artışa sebep olur. Bu ani artış gösteren bölgeye temel soğurma bölgesi denir. Bu temel soğurma bölgesi de yarı iletkenin yasak enerji aralığını bulmak için kullanılır [81].

Uzun dalga boyunda olan fotonların enerjileri düşüktür. Bu nedenle malzeme üzerine gönderilen uzun dalga boylu fotonların enerjileri yasak enerji aralığında küçük olduğu için soğurulma diğerlerinden çok daha küçüktür ( $h\nu < E_g$ ). Eğer yarı iletken üzerine kısa dalga boylu yani yüksek enerjili foton gönderilirse soğurma özelliği artar ve malzeme opak bir madde gibi davranır. Saydamlıktan opaklığa geçtiği bu bölge temel soğurulma bölgesidir [79].

Yarı iletken üzerine gönderilen fotonun enerjisi yasak enerji aralığından büyük olması gerektiğinden yola çıkarak gönderilmesi gereken fotonun dalga boyu hesaplanabilir.

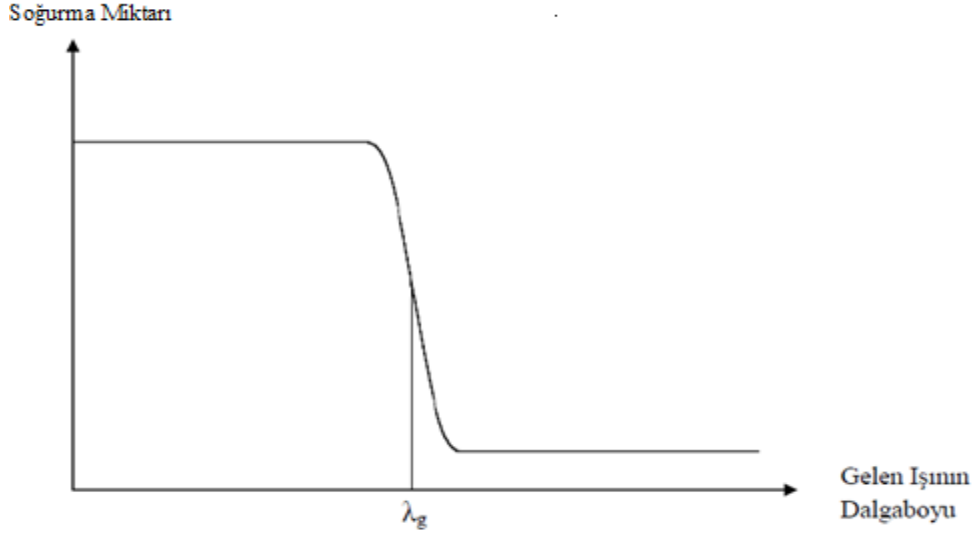
$$h\nu \geq E_g \quad (2.6)$$

$$\nu \geq \frac{E_g}{h} \quad (2.7)$$

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \quad (2.8)$$

Bu denklemlerde  $h$ ; Planck sabitini  $c$ ; ışık hızını gösterir. Bu denklemler sayesinde temel soğurulma olayının olabilmesi için gönderilen fotonun frekansının ve enerjisinin olması gereken minimum değerleri, dalga boyunun maksimum değerini gösterir. Frekans, dalga boyu ve enerjinin olması gereken sınır değerlerine soğurma sınırı adı verilir. Yarı iletkenin temel soğurma spektrumu Şekil 2.10'da verilmiştir.





**Şekil 2.10.** Yarı iletkenin temel soğurma spektrumu

Şekil 2.10'da gösterilen grafik soğurma-dalga boyu grafiğidir. Bu grafiğe göre yarı iletkene gönderilen foton  $\lambda_g$  dalga boyundan büyük ise soğurma yapamamış yani fotonu geçirmiştir. Fakat  $\lambda_g$  dalga boyundan daha küçük dalga boylarında gönderilirse fotonların enerjileri malzeme tarafından soğurulur. Soğurulma maksimum değere ulaştıktan sonra  $\lambda_g$  değeri küçültülse bile valans bandından iletim bandına geçen elektron sayısı değişmez. Bu nedenle grafikte de görüleceği gibi soğurma, maksimum değerden sonra sabit kalır [81,83].

İncelediğimiz yarı iletkenin soğurma spektrumunu çizebilmek için bütün dalga boylarında ölçüm yapmak gerekir. Bu nedenle kullanacağımız ışığın dalga boyunu dikkatli seçmeliyiz. Bunu ayarlamamanın en iyi yolu soğurma filtreleri kullanmaktır. Işığın malzeme üzerine gönderilmesi için tek demet ya da çift demet yöntemleri kullanılabilir. Tek demet yönteminde ışık malzeme üzerinden geçirilir ve detektöre gönderilir. Çift demet yönteminde ise iki paralel ışık malzeme odasına gönderilir. Birinci demet malzemeden yansıdıktan sonra detektöre gider. İkinci demet odada yansır ve detektöre gider. İkinci demet referans olarak kullanılır. UV-görünür spektrofotometrelerinde dedektör olarak fotomultiplikatör (ışık çoğaltıcı) tüpler ya da fotodiyotlar (ışık sensörleri) kullanılır [84].

## 2.11. Yarı İletkenlerin Elektriksel Özellikleri

Malzemenin elektriksel iletkenliği o malzemeyi oluşturan bağlarla açıklanabilir. Eğer malzeme metalik bağlarla bağlıysa elektronlar daha kolay hareket edebilirler. Yani metalik bağlı malzemelerin elektriksel iletkenlikleri yüksektir. Yalıtkan olan

malzemelerde bulunan valans elektronları çiftler halinde atom ya da iyonlara sıkı bir şekilde bağlıdır. Elmas ve Silisyum her ikisi de kovalent bağlı ve benzer kristal yapılarına sahip olmalarına rağmen yüksek sıcaklıkta elmas yalıtkan, Silisyum iyi bir iletkenidir. Bunun nedeni farklı band yapılarına sahip olmalarıdır [78].

Yarı iletkenlerde iletkenlik incelenirken, holler ve iletim elektronları beraber değerlendirilmelidir. Holler pozitif yüklü gibi davranır. Hollerin ve elektronların yük miktarları eşittir. Bu sebeple hollerin varlığı malzeme iletkenliğini etkiler [78].

Yarı iletkenlere elektrik alan uygulanırsa elektronlar elektrik alanına ters yönde, holler ise aynı yöne yönelirler. Elektronların ve hollerin yarı iletken içindeki hızları elektrik alan arttıkça artar. Bunların oranı sabittir. Bu sabite Mobilite ( $\mu$ ) denir. Yarı iletkenlerdeki elektron ve hollerin elektrik alan etkisindeki mobiliteleri;

$$\mu_e = \frac{v_e}{\vec{E}} \quad (2.9)$$

$$\mu_h = \frac{v_h}{\vec{E}} \quad (2.10)$$

şeklinde olur. Yarı iletkenin toplam mobilitesi ( $\mu$ ), elektron mobilitesi ( $\mu_e$ ) ve hollerin mobilitelerinin ( $\mu_h$ ) toplamına eşittir.

$$\mu = \mu_e + \mu_h = \frac{v_e}{\vec{E}} + \frac{v_h}{\vec{E}} \quad (2.11)$$

Bu bağıntılarda;

$\mu_e$ ; elektron mobilitesi

$\mu_h$ ; hol mobilitesi

$v_e$ ; elektronların hızı

$v_h$ ; hollerin hızı

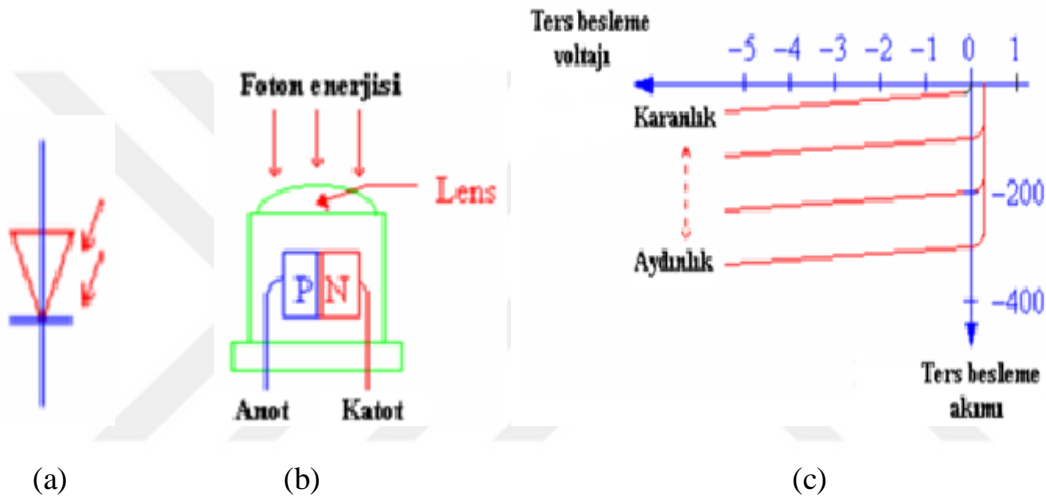
$\vec{E}$  ; elektrik alanı ifade eder [78].

## 2.12. Fotodiyotlar

Besleme voltajı ve ters besleme uyguladıktan sonra üzerine ışık düşürüldüğünde iletken hale gelerek katot ucundan anot ucuna doğru akım geçiren devre elemanlarına fotodiyotlar denir. Anot ve katot olmak üzere iki kutbu vardır [85].

Eğer doğru besleme yapılırsa normal diyot gibi çalışır. Fotodiyota ulaşan fotonlar mercekten geçer ve p ve n tipi malzemelerin birleştiği bölge üzerine odaklanması sağlanır. Bu sayede fotonların enerjilerinin soğurulması sayesinde valans bandında bulunan elektronlar iletim bandına geçer ve fotodiyottan akım geçmesi sağlanır [86].

Fotodiyot üzerine gönderilen fotonun ışık şiddeti ne kadar fazla olursa o kadar fazla akım geçmesi sağlanır. Gönderilen fotonun ışık şiddetini arttırsak p-n yüzey birleşimindeki direncin azalmasına ve fotodiyottan geçen akım şiddetinin artmasına neden oluruz. Fotodiyot üzerine gönderilen ışık şiddeti ile p-n yüzey birleşimdeki direnç ters orantılıdır [85,86].



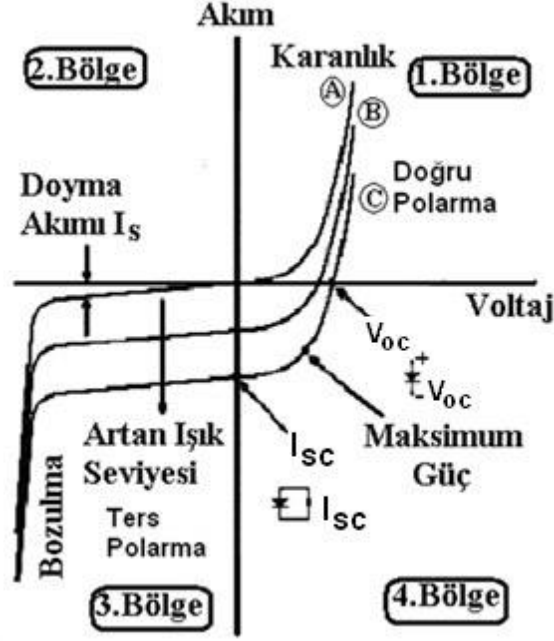
**Şekil 2.11.** Fotodiyotun sembolü(a), yapısı (b)ve karakteristik eğrisi (c) [85]

Fotodiyotlar ışığa karşı yüksek duyarlı olduğu için detektörlerde, elektronik alarmlarda, ışık ölçüm cihazlarında, transistörlerde, iletişim araçlarında, elektronik aletlerin uzaktan kumanda alıcılarında olmak üzere birçok alanda kullanılır [87,88].

### 2.13. Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği

Fotodiyotların eklemlerindeki akım taşıma mekanizmalarının çeşidi ile akım-voltaj karakteristikleri oluşur. Bu mekanizmalar p-n eklemleri ve metal-yarıiletken eklemleri (Schottky, MSM fotodiyotları) sayesinde farklı mekanizmalar oluşmasını sağlar [89].

Normal bir diyot ile fotodiyotun akım-voltaj karakteristiği birbirine çok benzerdir. Şekil 2.12'de fotodiyotların karanlık ve aydınlatılmış akım-voltaj karakteristiği gösterilmiştir. Eğer fotodiyotun duyarlı olan yüzeyine ışık düşmezse fotodiyot üzerindeki akım termal yoldan azımlık taşıyıcıları ile oluşan akımdır. Buna da karanlık akım adı verilir [90].



**Şekil 2.12.** Fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-voltaj karakteristiği [90]

Şekil 2.12'deki akım-voltaj karakteristikleri; karanlık durumda A eğrisi, aydınlık durumlar ise B ve C eğrileri ile gösterilmiştir. Akım-voltaj değeri birinci bölgede pozitifdir. Bu bölgede fotodiyot normal diyot gibi çalıştığı için fotodiyot uygulamalarına uygun değildir. İkinci bölge fotodiyota herhangi bir cevap vermez. Üçüncü bölgede küçük bir  $I_s$  akımı oluşur [89]. Bu bölgede ışık şiddeti arttıkça negatif akım yönünde aşağı doğru değişir.  $V=0$  ekseninde eğrilerin akım eksenini kestiği yerde kısa devre akımı  $I_{sc}$  değeri oluşur. Ters polarlama, çok yüksek voltajlarında akım hızlı bir şekilde artar. Bu bölgeye ters bozulma bölgesi denir ve ışığı algılamak için uygun olan bölgedir. Dördüncü bölge ise fotovoltaj bölgedir [91].

Akım-voltaj karakteristiği, band genişliği (çalışma hızı) ve kuantum verimi karakteristiği fotodiyotların üç ana karakteristiğini oluşturur. Bu üç karakteristik fotodiyotun performansını gösterir. Diyotların eklem niteliklerini, yüksek bozulma voltajı ve düşük karanlık akımları gösterir. Düşük karanlık akımı, fotodiyota ışık gelmediği andaki polarlama sırasında diyottan geçen akımdır ve bu da diyotun hassasiyetini gösterir [74]. Buradaki ters polarlama voltajının değeri bozulma voltajını gösterir. Bu da ters polarlama voltajı sınırını belirtir. Bu sınırdan sonra kazanç ve çarpma mekanizmaları diyotun çalışmasını gerçekleştirmeye başlar [92].

Fotodiyotlar yeterince ışık aldığıında çalışmaya başlar ve bir akım kaynağıdır. Fotodiyota gelen ışık zayıf bir akım oluşmasına neden olur. Fotodiyota bir voltaj uygulandığında yük direnci nedeniyle fotoakım oluşur. Bu yük dış devre direncinin toplamını oluşturur. Fotoakımın etkinliğinin büyük çoğunluğu dış devre, küçük bir kısmı ise iç direnç üzerinde oluşur. Bu sayede fotodiyot bir akım kaynağı ya da voltaj kaynağı olarak kullanılabilir. Bir schottky fotodiyotun doğru akımını incelersek seri direnç, engel yüksekliği, idealite faktörü gibi parametrelere ulaşabiliriz [92].

#### 2.14. Fotodiyotların Kapasitans-Voltaj Karakteristiği

Schottky diyotların kapasitans-voltaj (C-V) karakteristiği en önemli özelliklerindedir. Schottky diyotların C-V karakteristiği buldukları cihazların elektriksel özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır ve ara yüzey durumlarına karşı son derece duyarlıdır. Düşük frekanslarda kapasitenin artması AC sinyalinin yük taşıyıcılar tarafından takip edilmesine bağlıdır. C-V ölçümleri çok yüksek frekanslarda yapılırsa ara yüzeyde bulunan yükler AC sinyallerini takip edemez. P tipi bir yarıiletkeni oluşturan kontağın kapasitesi denklem 2.12 ile bulunur.

$$\frac{1}{C^2} = \left[ \frac{2}{\epsilon_0 \epsilon_s q N d A^2} \right] \left[ V_{bi} - \frac{V - kT}{q} \right] \quad (2.12)$$

$\epsilon_0$ ; Boşluğun dielektrik geçirgenliği

$\epsilon_s$ ; Dielektrik sabiti

q; yük

d; donör konsantrasyonu

$V_{bi}$ ; difüzyon voltajıdır [93].

### 3. MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM

#### 3.1. TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> Çözeltilerinin Hazırlanması

ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodetektörlerin üretimden kullanılan çözeltiler Sol-jel yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Çözeltiler hazırlanırken 0.5M Titanyum (IV) izopropoksit (Ti[OCH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>4</sub>) 10 ml 2 metoksietanol ile bir beher içerisinde çözülmüştür. Başka bir beherde ise 0.5M Çinko asetat dihidrat ((CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>Zn) 10 ml 2 metoksietanol içerisinde çözülmüştür. Her bir beher 10 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Daha sonra başka bir beher içerisinde 0.5ml ZnO çözeltisi 2.5 ml TiO<sub>2</sub> çözeltisi içerisine eklenerek 1:5 oranında ZnO:TiO<sub>2</sub> çözeltisi elde edilmiştir. Aynı şekilde başka bir beherde 1 mL ZnO çözeltisi 2 mL TiO<sub>2</sub> eklenerek 1:2 oranında ZnO:TiO<sub>2</sub> çözeltileri elde edilmiştir.



Şekil 3.1. Deney numunelerin hazırlandığı düzenek [93]

#### 3.2. TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> Numunelerinin Hazırlanması

ZnO:TiO<sub>2</sub> numunelerinin hazırlanmasında Sol-jel metodu kullanıldı. Titanium (IV) isopropoxide Ti[OCH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>4</sub> ve Zinc acetate dihydrate (CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>Zn malzemeleri kullanılarak çözeltiler hazırlandı. Temizlenmiş 2 beher içerisine ayrı ayrı 10ml 2-methoxyethanol konulup üzerine 0.5 M Titanium (IV) isopropoxide ve 0.5M Zinc acetate eklenip manyetik karıştırıcının üzerinde belli bir süre karıştırıldı. Daha sonra iki beher daha alınıp sırasıyla 2.5ml TiO<sub>2</sub>-0.5ml ZnO, 2ml TiO<sub>2</sub> - 1ml ZnO oranlarında çözeltiler alınıp yeteri miktarda karıştırıldı. Böylelikle TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> jelleri ince film için hazır hale getirilmiştir.

### 3.3. TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> Filmlerinin Hazırlanması

TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> Sol-jel metodu ile oluşturulan jellerin mikroskop camı üzerine filmi yapılmadan önce kimyasal temizleme işlemleri yapıldı. 1.5-2 cm ebatlarında kesilen camlar spin coating üzerinde 3000 rpm 30 s 6 kat film yapıldı. Her kat aralığında sıcak plakanın üzerinde 100°C’de bekletilip soğuması içinde oda sıcaklığında 2 dk dinlendirildi. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra üç filmde 450 °C 1 saat ısıl işleme tabi tutuldu. Filmler ölçüm almaya hazır hale getirildi.

### 3.4. TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> Diyotlarının Hazırlanması

Öncelikle p-Si tabakası üzerindeki organik ve diğer ağır metal kirliliklerini temizlemek ve kristal yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için p-Si tabakaya kimyasal temizleme işlemleri yapıldı.

Kimyasal temizleme işlemleri;

- ✓ Temizleme işlemi için ilk olarak kullanılacak beherlerin de-iyonize su ile ön temizliği yapıldı.
- ✓ Bütün kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içerisinde RCA yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Ultrasonik banyo tankı için saf su kullanıldı.
- ✓ p-Si aseton (30 ml) içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandıktan sonra, 30 ml de-iyonize suda ultrasonik banyoda tekrar 5 dakika yıkandı.
- ✓ p-Si etil alkol (30 ml) içerisinde ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandıktan sonra, 30 ml de-iyonize suda ultrasonik banyoda tekrar 5 dakika yıkandı.
- ✓ p-Si HF:H<sub>2</sub>O (1:10ml) çözücüsü içerisinde 30 saniye daldırılıp bekletildikten sonra, 30 ml de-iyonize suda ultrasonik banyoda yeniden 5 dakika yıkandı. Bu işlemler tamamlandıktan sonra p-Si numuneleri azot gazı ile kurutuldu.

Kimyasal temizleme işleminden sonra, p-Si üzerine omik kontak oluşturmak için Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü Nano Teknoloji 2 Laboratuvarındaki Nano Vak buharlaştırma sistemi ile Al p-Si yüzeyine ince film şeklinde buharlaştırılarak kaplandı. Buharlaştırma 2-4 A/s hızında yapılarak p-Si’nin mat yüzeyine 100 nm kalınlığında omik kontak ince film şeklinde oluşturuldu. Bu işlemden sonra Al/p-Si yapısı 570 °C sıcaklıkta 5 dakika azot gazı ortamında ısıl işleme tabi tutuldu. Daha sonra Al/p-Si yaklaşık 1-1.5cm ebatlarında olacak şekilde kesilen parçalar kullanılmak üzere de-iyonize su ile ultrasonik banyoda 3 dakika tekrar yıkandı ve azot gazı ile kurutuldu. Al/p-Si’lar üzerine her bir numunenin dispers edilen jeli belirli oranda (yaklaşık 2-3 damla) damlatılarak 100 °C

sıcaklıkta sıcak plaka üzerinde kurutuldu. Daha sonra numuneler 450°C’de 1 saat tavlandı.

### 3.5. TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> Filmlerin Optiksel Özellik Analizi

Bu çalışmamızda TiO<sub>2</sub>, 1:2 ve 1:5 ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmler Sol-jel yöntemi ile hazırlanmıştır. UV3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR Spectrophometer cihazı ile ince film numunelerinin UV ölçümleri yapılmıştır. Bu cihazdan elde edilen UV ölçümleri sonuçlarına göre ince filmlerin yasak enerji aralığı (E<sub>g</sub>) hesaplanmıştır.

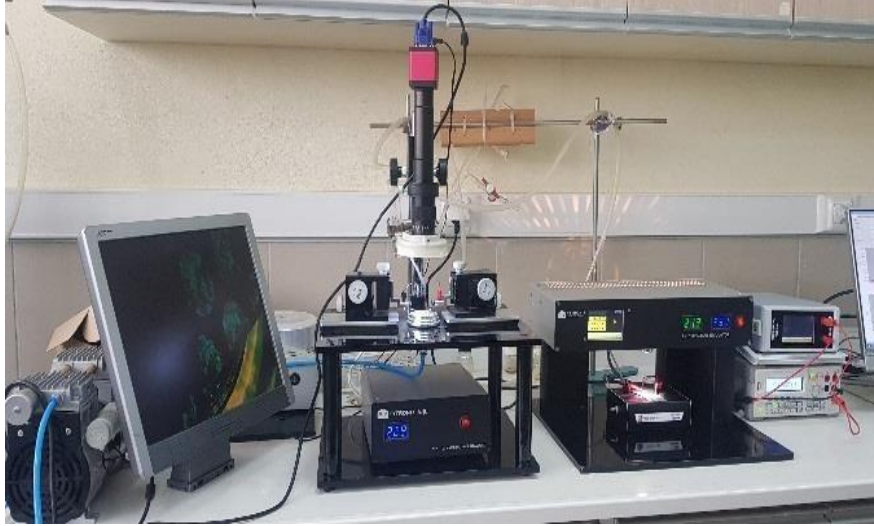


Şekil 3.2. TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmlerin U-V ölçümleri için kullanılan UV-VIS spektrofotometre cihazı [93]

### 3.6. TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> Diyotların Elektriksel Özellik Analizi

Bu çalışmada Sol-jel yöntemi kullanılarak üretilmiş olan TiO<sub>2</sub> ve ZnO/TiO<sub>2</sub>/p-Si diyotlarının oda sıcaklığında, Akım-Voltaj (I-V), Kapasitans- Voltaj (C-V) ve Akım-Zaman (I-t) karakterizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bütün numunelerin I-V ve I-t ölçümleri karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetlerinde (20 mW/cm<sup>2</sup>, 40 mW/cm<sup>2</sup>, 60 mW/cm<sup>2</sup>, 80 mW/cm<sup>2</sup>, 100 mW/cm<sup>2</sup>) ayrı ayrı analiz edilmiştir. Her bir numune için C-V ölçümleri 10 kHz-1 MHz aralığında analiz edildi. Yapılan tüm ölçümler Fırat Üniversitesi Nanoteknoloji Laboratuvarındaki FYTRONIX FY-7000 elektronik cihaz karakterizasyon sistemi ile yapılmıştır.





**Şekil 3.3.**  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{p-Si}$  diyotlarının I-V, C-V ve I-t ölçümleri için kullanılan deney düzeneği [93]

### 3.7. $\text{TiO}_2$ ve $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$ Fotodiyotlarının Üretilmesi ve Karakterizasyonu

$\text{TiO}_2$  ve  $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$  fotodiyotları üretmeden önce kaplama yapılacak Silisyum altaşlar temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Silisyum üzerinde bulunan gözle görünen ya da görünmeyen kir ve kalıntıları temizlemek için öncelikle silikon altaşlar saf su ile yıkanmıştır. P tipi Silisyum altaşlar daha sonra aseton içerisinde atılarak sonik titreştiriciye koyulmuş ve sonik titreştirici içerisinde 5 dk titreştirilmiştir. Sonik titreştiriciden çıkarılan Silisyum altaşlar saf su ile tekrar yıkanmıştır. Yıkanan altaşlar bu sefer de etilalkol içerisinde atılarak tekrar sonik titreştiriciye yerleştirilmiş ve burada 5 dk. sonik titreştiricide bekletilmiştir. Son olarak 1:10 HF:H<sub>2</sub>O çözeltisi içerisinde tekrar sonik titreştiriciye 5 dk maruz bırakılmıştır. Silisyum altaşlar daha sonra azot gazı ile kurutulmuştur ve 2 cm x 2 cm ölçülerde kesilmiştir. Kesilen parçalar spin kaplama cihazına yerleştirilmiş ve yerleştirilen altaşlar üzerine hazırlanan çözeltilerden birer damla damlatılmıştır. Damlatmanın ardından spin kaplama cihazı 3000 devir/dk ile 30 saniye boyunca çalıştırılarak çözeltilerin altaşların üzerinin kaplaması sağlanmıştır. Bu işlem her bir diyot için altı defa tekrar edilmiş yani her bir altaş üzerine 6 katman halinde çözelti ince film şeklinde kaplanmıştır. Her katmanın kaplanmasının ardından altaşlar 2'şer dakika 100 °C sıcak plaka (hot plate) üzerinde bekletilmiştir. 6. Tabakanın kaplanmasının ardından ince film kaplı altaşlar 450 °C de 1 saat boyunca tavlansmıştır. Böylece ince film katmanlarının birbiri ile ve Silisyum altaş ile kaynaşması hedeflenmiştir.  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$  kaplanan Silisyum altaşlara Al kontaklama işlemi gerçekleştirilmiştir. Al kontaklama işleminde Nano Vak termal Evaporatör kullanılmıştır.

Filmlerin üzerine ve maskeler yerleştirilerek NanoVak termal evaporator cihazına yerleştirilen  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$  ince film kaplı Silisyum altaşların her iki tarafına 100 nm olacak şekilde Al kontaklaması yapılmıştır ve sonuç olarak  $\text{Al}/\text{p-Si}/\text{TiO}_2/\text{Al}$  ve  $\text{Al}/\text{p-Si}/\text{ZnO}:\text{TiO}_2/\text{Al}$  yapılarıdaki fotodiyotlar üretilmiştir. Üretilen fotodiyotlar  $570^\circ\text{C}$  de 1 saat boyunca tavlannmıştır. Böylece filmlerin birbiri ile bütünleşmesi sağlanmıştır.

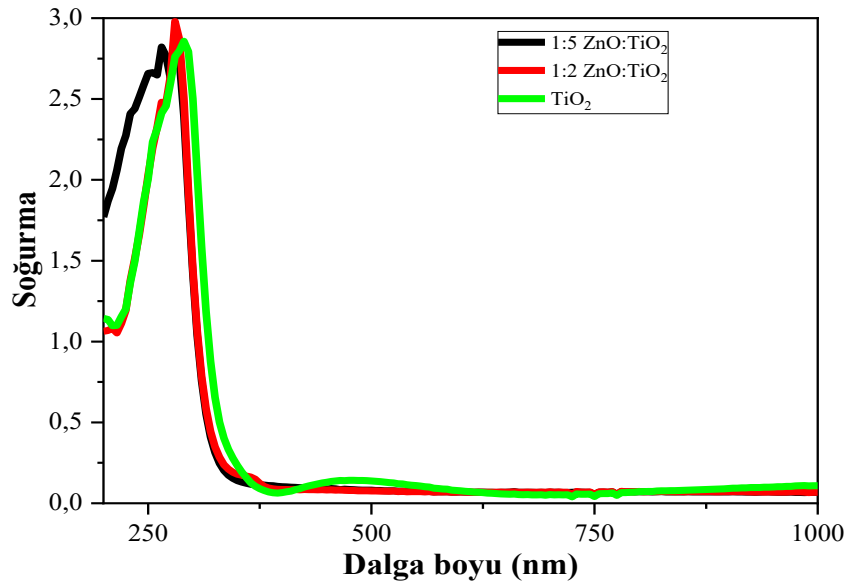




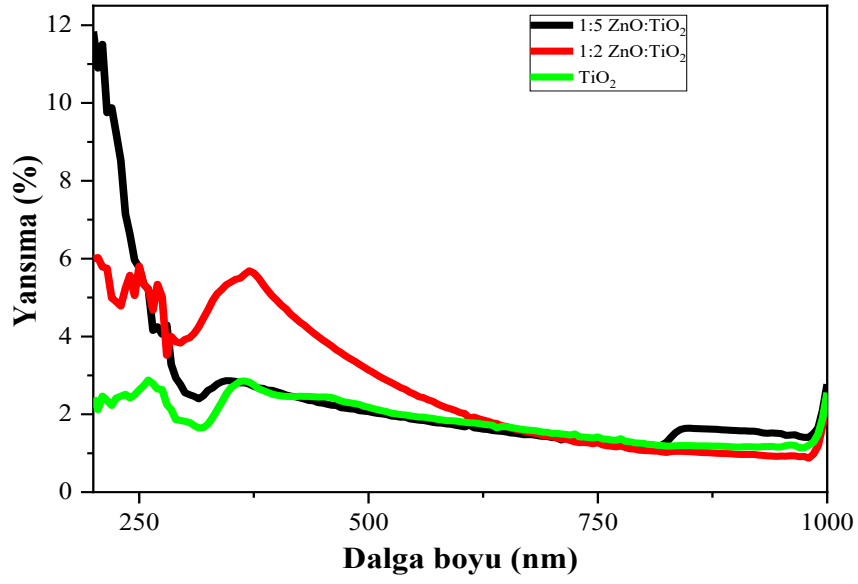
## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Optiksel Ölçüm Sonuçları

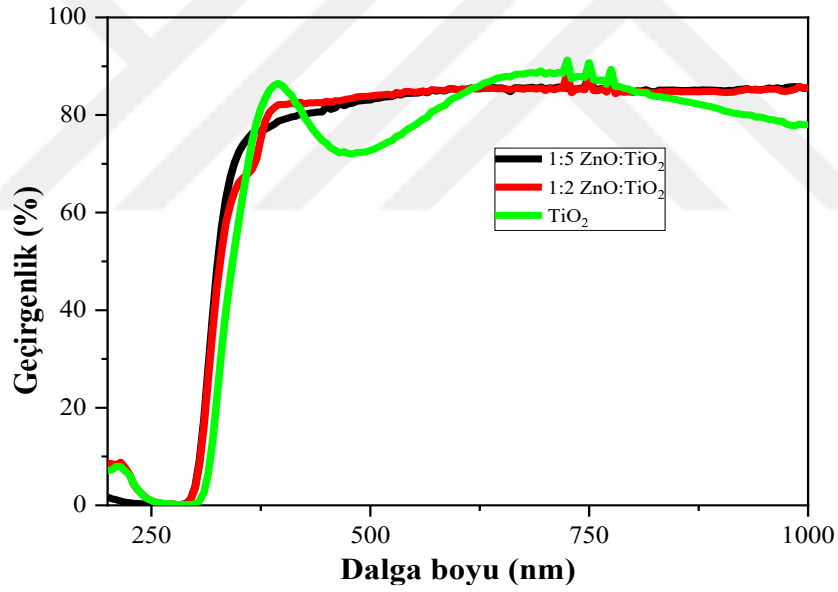
Bu ölçümlerde kullanılan çözeltiler Sol-jel yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve döndürme kaplama tekniği ile ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmler p-tipi Silisyum (p-Si) altlıklar üzerine kaplanmıştır. Elde edilen TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmlerin optiksel analizleri 200 nm-1000 nm dalga boyu aralığında UV3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR Spectrophometer cihazı ile analiz edilmiştir. Numunelerin optik bant aralık değerleri yansıtma spektrumları kullanılarak hesaplanmıştır. TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmlerin soğurma, yansıtma ve geçirgenlik spektrumları sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Filmlerin optik davranışları incelendiğinde hem TiO<sub>2</sub> hem de ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmlerin oldukça gelişmiş optik özellikler sergilediği görülmektedir. Şekil 4.1'deki soğurma spektrumları incelendiğinde özellikle görünür bölgede ince filmlerin soğurmasının %3'ten düşük olduğu görülmektedir. Şekil 4.2'deki Yansıtma spektrumları incelendiğinde ise görünür bölgede yansıtma değerlerinin % 6 ile % 1 arasında olduğu, Şekil 4.3'te gösterilen geçirgenlik değerleri incelendiğinde ise ince filmlerin geçirgenliklerinin görünür bölgede değişkenlik gösterdiği, uygulanan dalga boyunun kızılötesi dalga boyuna yaklaşması ile % 88 seviyelerine kadar çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.1. TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmlerin soğurma (absorbance) spektrumu

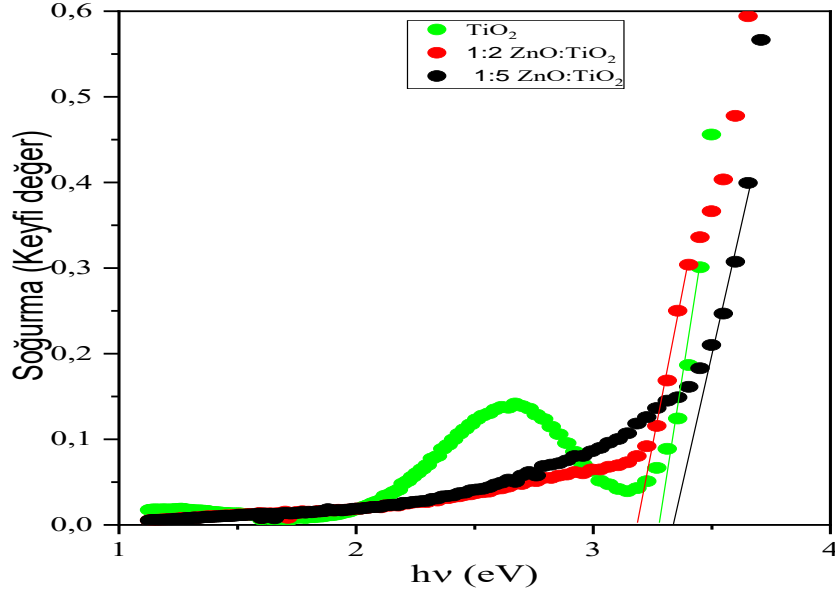


Şekil 4.2. TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmlerin yansıtma (reflectance) spektrumu



Şekil 4.3. TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmlerin geçirgenlik (transmittance) spektrumu

Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te bulunan optik karakteristikler kullanılarak soğurma – hv grafiği elde edilmiş ve elde edilen grafik Şekil 4.4'te paylaşılmıştır.



**Şekil 4.4.** TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmlerin soğurma – hv spektrumu  
Şekil 4.4'teki grafik kullanılarak ince filmlere ait bant aralığı enerjileri hesaplanmıştır. Hesaplamalar esnasında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^n \quad (4.1)$$

formülde  $\alpha = F(R)/d$ , d ince film kalınlığı, A sabit, E<sub>g</sub> bant aralığı enerjisi, n ise optik geçişlerin belirlenmesinde kullanılan sabittir. Direk geçişlerde n=1, 2, 3... indirekt geçişlerde ise n=1/2, 3/2, 5/2...

( $\alpha hv$ )<sup>2</sup> – hv grafiği kullanılarak hesaplanan bant enerjileri TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> ince filmleri için sırasıyla 3.32eV, 3.19 eV ve 3.16 eV olarak hesaplanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda ZnO:TiO<sub>2</sub> bant enerjisini düşürdüğü görülmüştür. Bulunan sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür [94].

## 4.2. TiO<sub>2</sub> ve ZnO:TiO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Fotovoltaik Özellikleri

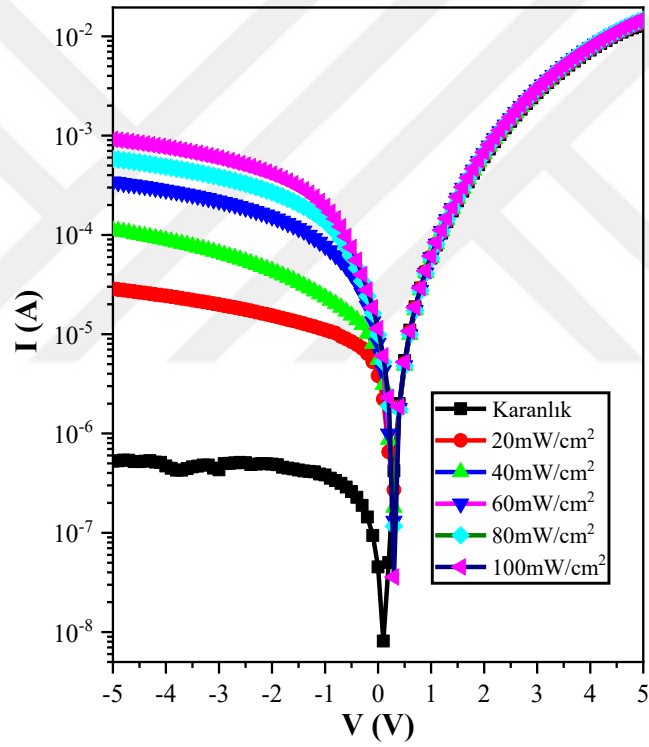
### 4.2.1 Al/ZnO:TiO<sub>2</sub>/p-Si/Al Diyotların Foto Akım- Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Bu çalışmada, akım-voltaj (I-V) ölçümleri çeşitli aydınlanma şiddetleri altında, Al/ZnO:TiO<sub>2</sub>/p-Si/Al diyotlarının elektriksel karakterizasyonları incelenmiştir. Silisyum altlığı üzerine yapılan fotodiyotlara -5 V ile +5 V arasında gerilim uygulanarak ölçümler yapılmıştır.

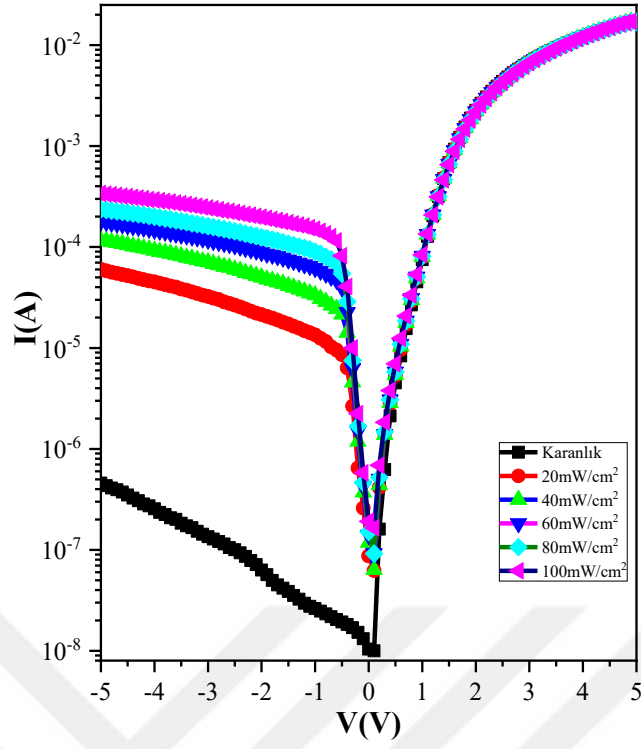
Termiyonik emisyon teorisi ile diyotların I-V karakteristikleri incelenmiştir. Malzemelerde birçok elektriksel özelliğin incelemesinde diyotların I-V karakteristikleri

önemli yer tutmaktadır. Diyotların elektriksel parametrelerini hesaplamak için I-V karakteristikleri  $\ln I$ -V şeklinde çizilip hesaplanmıştır.

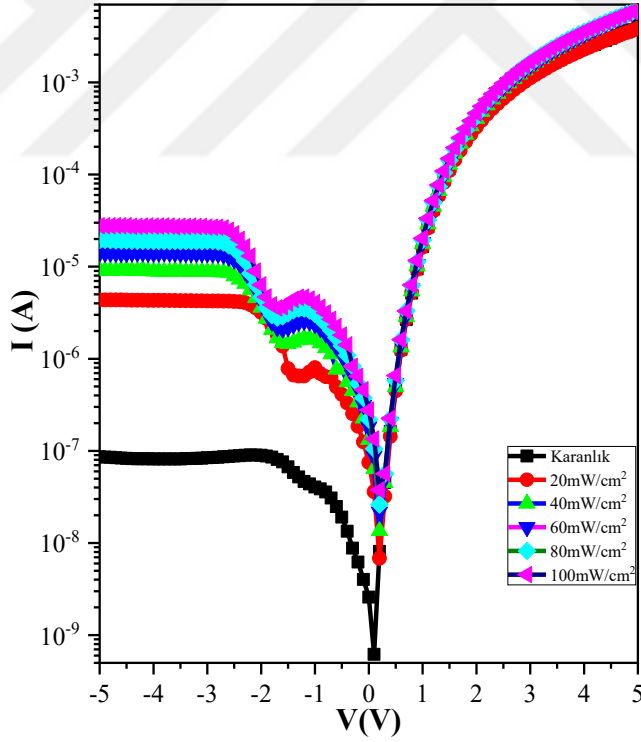
TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarındaki ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların karakteristikleri Şekil 4.5'te sergilenmiştir. I-V karakteristikler incelendiğinde hem negatif denetleme hem de pozitif denetleme bölgesinde pozitif akım oluştuğu gözlenmiştir bu durum ince filmlerin diyot özelliği gösterdiğini kanıtlamaktadır. I-V ölçümleri hem karanlık ortamda yapılmış hem de ölçümler sırasında fotodiyotlara 20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddetinde ışık uygulanmıştır. Harici ışığın uygulanması sırasında ölçülen fotoakımda artış olduğu görülmektedir. Bu durum diyotların fotodiyot karakteristiği sergilediğini göstermektedir.



(a)



(b)



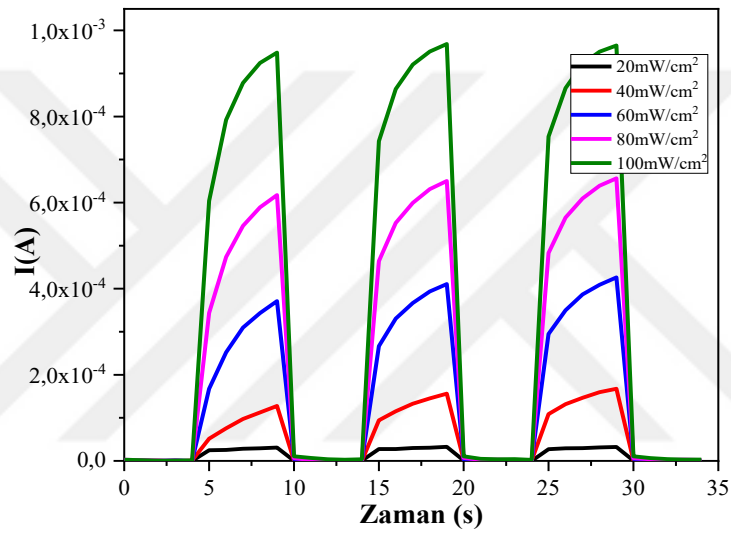
(c)

Şekil 4.5.  $\text{TiO}_2$  (a) ve 1:5 (b) ve 1:2 (c) oranlarda  $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$  fotodiyotların I – V karakteristikleri

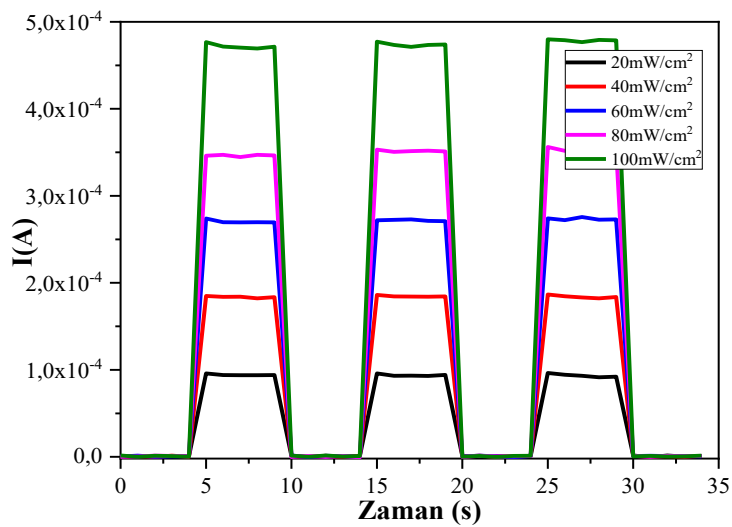


#### 4.2.2 Al/ZnO:TiO<sub>2</sub>/p-Si/Al Diyotların Foto Akım- Zaman (I-t) Karakteristikleri

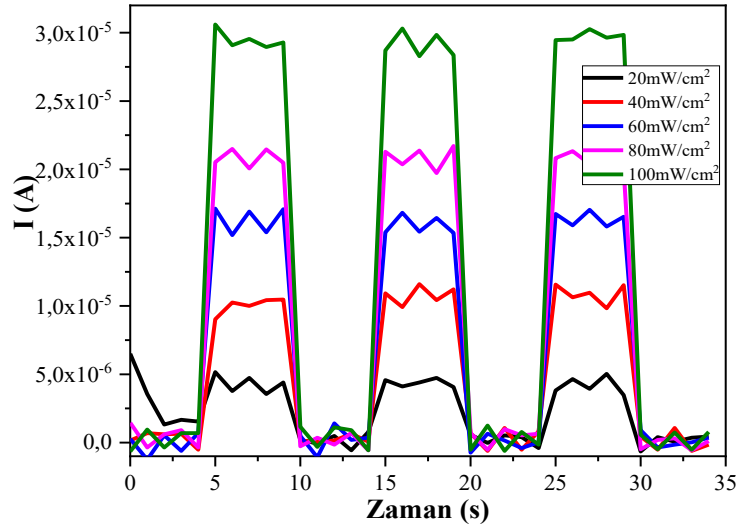
TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların I – t karakteristik grafikleri Şekil 4.6’da sergilenmektedir. Şekilde fotodiyotlar 5 saniyelik ışığa maruz bırakılırken 5 saniyenin ardından diyotlara uygulanan ışıklar 5 saniye boyunca durdurulmuştur. Her bir diyot için fotodiyotlara 20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddetinde ışık uygulaması yapılmıştır. Grafiklerden anlaşılacağı üzere ışık altında diyotlardan ölçülen akım artarken ışık söndürüldüğünde diyotlarda ölçülen akımın hızlı bir şekilde düştüğü görülmüştür. Ayrıca artan ışık şiddetinin ölçülen fotoakımda artışa neden olduğu anlaşılmıştır. Bu davranış fotodiyotların ışığa karşı duyarlı olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)

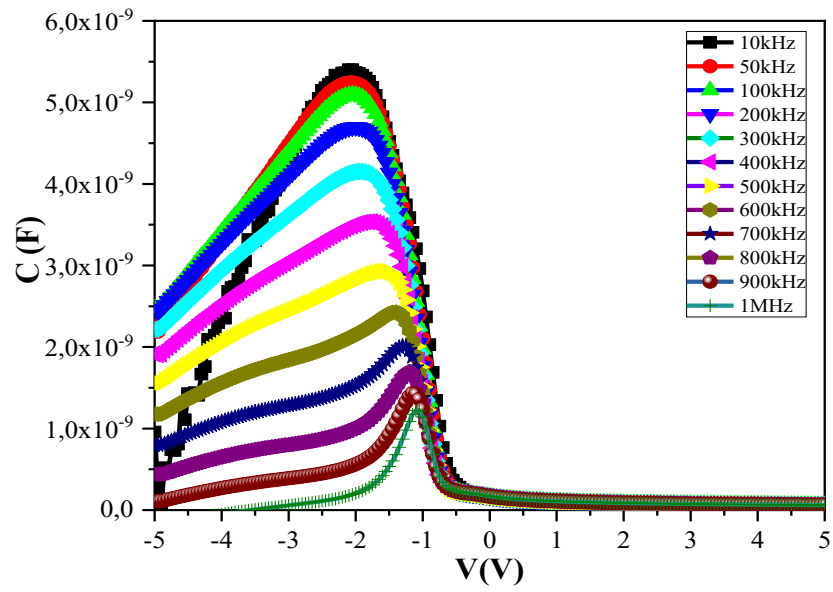


(c)

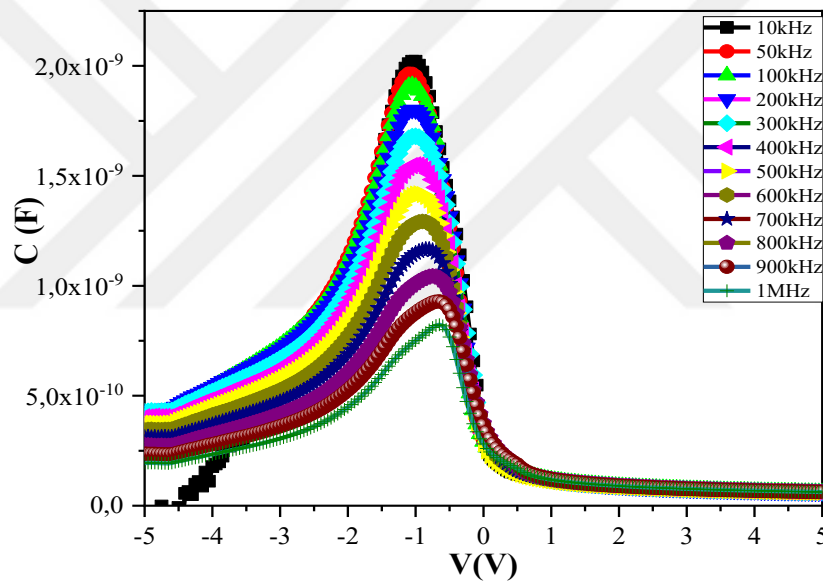
Şekil 4.6. TiO<sub>2</sub> (a) ve 1:5 (b) ve 1:2 (c) oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların I – t karakteristikleri

#### 4.2.3 Al/ZnO:TiO<sub>2</sub>/p-Si/Al Diyotların Kapasitans- Voltaj (C-V) Karakteristikleri

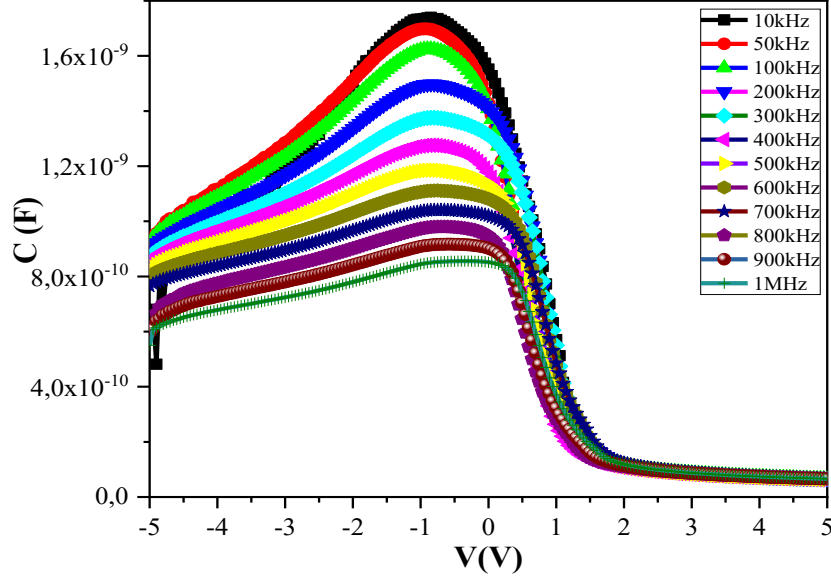
TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotlar için kapasitans - voltaj (C – V) değerleri -5 V ile 5 V arasında 10 kHz ile 1 MHz arasında değişen farklı AC sinyal frekansları altında incelenmiştir. İncelemede elde edilen grafikler Şekil 4.7’de sergilenmektedir. Şekilde TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotlarına ait grafiklerde bariz pikler görünmektedir. Pikler farklı AC sinyal frekanslarının belirli bölgelerde kapasitans değerinin arttığını göstermektedir. Piklerin pozisyonu TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotları için sırasıyla yaklaşık -2V, -1V ve -0.8V olarak ölçülmüştür. Elde edilen değerler ışığında farklı oranlardaki ZnO karışımının piklerin pozisyonunu negatif voltaj bölgesinden pozitif voltaj bölgesine çektiği gözlemlenmiştir. Arttırılmış AC sinyal frekansı ölçülen kapasitans değerini düşürmektedir. Değişik AC sinyal frekansına bağlı pik eldesi diyotların kapasitans değerinin AC sinyal frekansına bağlı olduğunu göstermektedir. Arttırılmış frekansa bağlı olarak kapasitansın azalması AC sinyal frekansının diyotların içerisindeki serbest yükleri hareket ettirmeye yardımcı olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır.



(a)



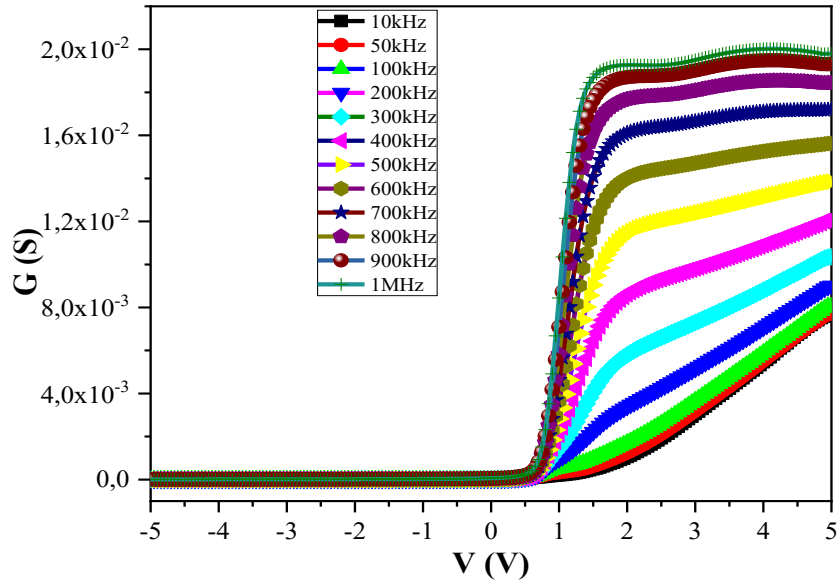
(b)



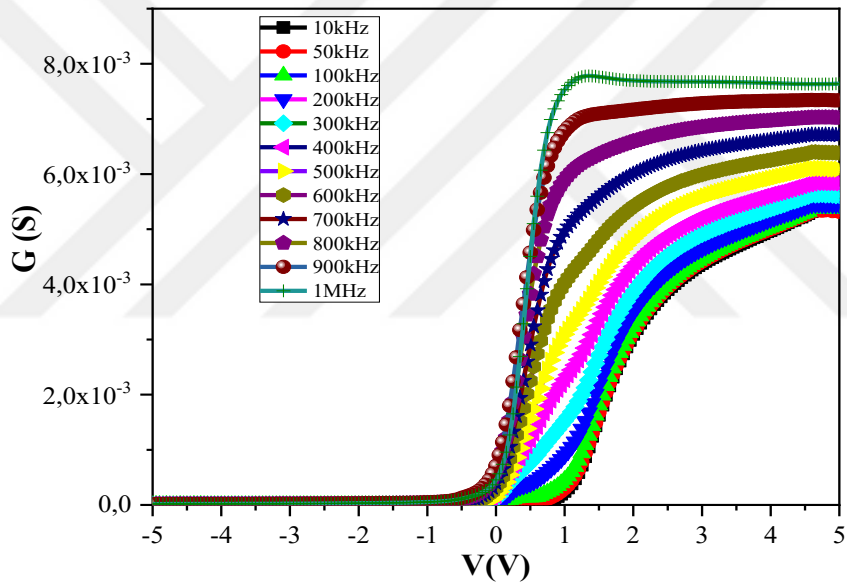
-c-

**Şekil 4.7.** TiO<sub>2</sub> (a) ve 1:5 (b) ve 1:2 (c) oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların C – V karakteristikleri

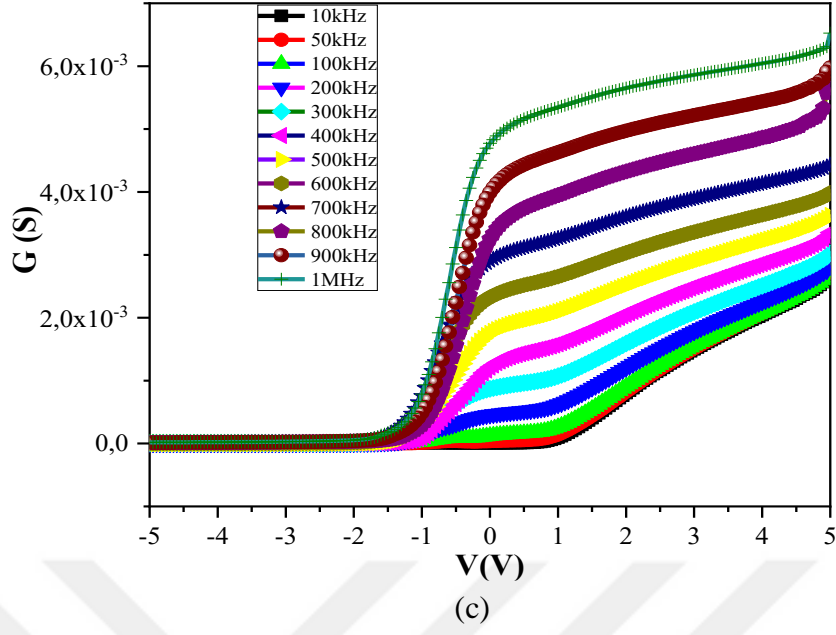
TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> foto diyotlar için iletkenlik - voltaj (G – V) değerleri -5 V ile 5 V arasında 10 kHz ile 1 MHz arasında değişen farklı AC sinyal frekansları altında incelenmiştir. İncelemede elde edilen grafikler Şekil 4.8’de sergilenmektedir. İncelenen grafiklerde artan AC sinyal frekansı ile iletkenliğin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum diyotlara uygulanan AC sinyal frekansının diyotların elektriksel özelliklerini değiştirdiğini göstermektedir. Sinyal frekansına bağlı bir etkinin gözlemlenmesi C-V ve G-V grafiklerinin birbirine paralel davranış sergilediğini göstermektedir. TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotlar için maksimum iletkenlik  $2 \times 10^{-2}$  S,  $8 \times 10^{-3}$  S ve  $6 \times 10^{-3}$  S olarak ölçülmüştür. Ölçülen maksimum iletkenlik değerlerine bakıldığında farklı oranlardaki ZnO karışımının iletkenlik değerlerinin azalmaya yol açtığı anlaşılmıştır.



(a)



(b)



**Şekil 4.8.** TiO<sub>2</sub> (a) ve 1:5 (b) ve 1:2 (c) oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların G – V karakteristikleri

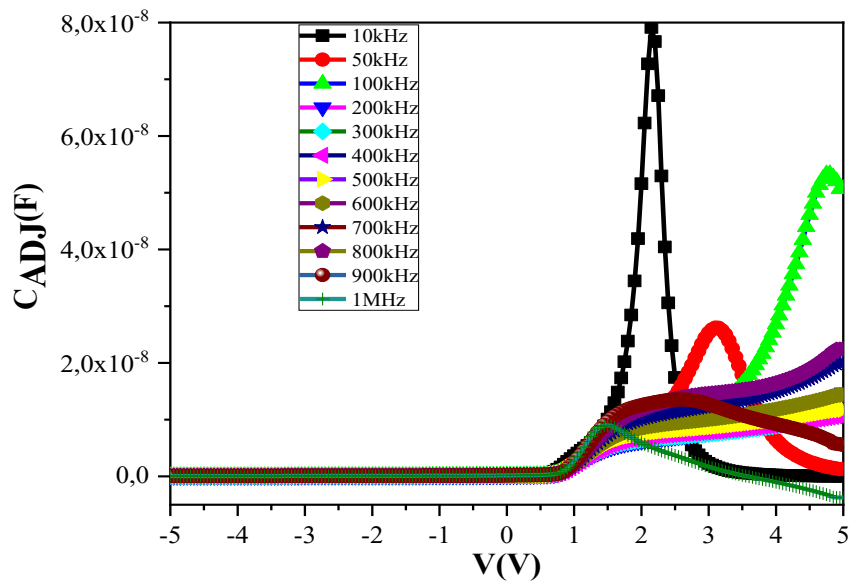
C-V ve G-V grafikleri frekansa bağlı davranış sergilediğinden dolayı düzeltilmiş kapasitans- voltaj ( $C_{adj} - V$ ) ve düzeltilmiş iletkenlik – voltaj ( $G_{adj} - V$ ) değerleri hesaplanmıştır. TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların düzeltilmiş kapasitans- voltaj ( $C_{adj} - V$ ) ve düzeltilmiş iletkenlik – voltaj ( $G_{adj} - V$ ) değerleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$C_{adj} = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.2)$$

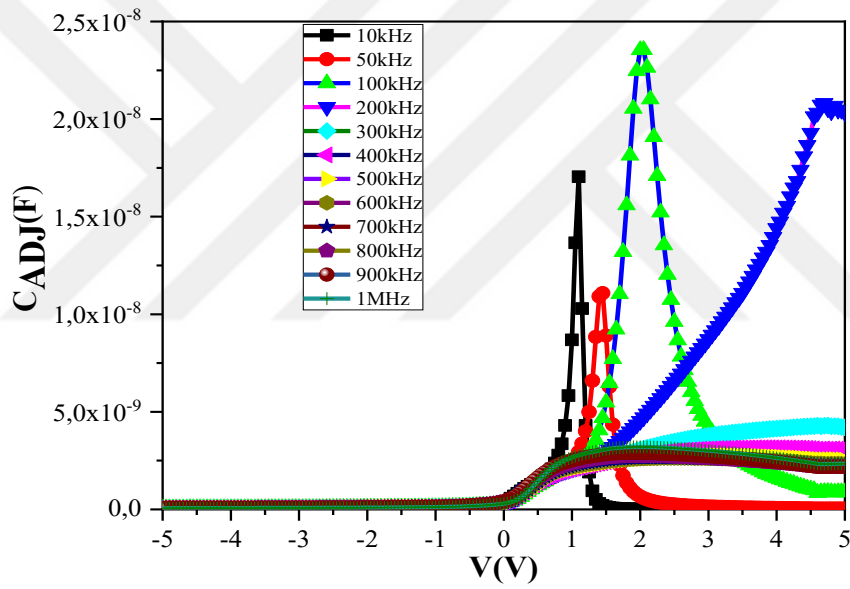
ve

$$G_{adj} = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.3)$$

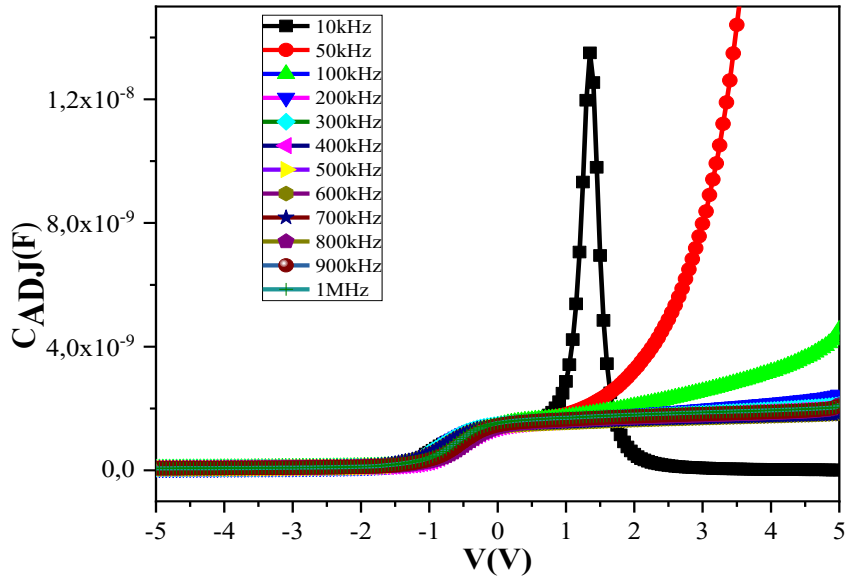
burada “ $C_m$ ” ve “ $G_m$ ” değerleri ölçülen kapasitans ve ölçülen iletkenlik değerlerini temsil eder, “ $\omega$ ” açısal frekans ve “ $a$ ” ise değişken parametredir [95].



(a)



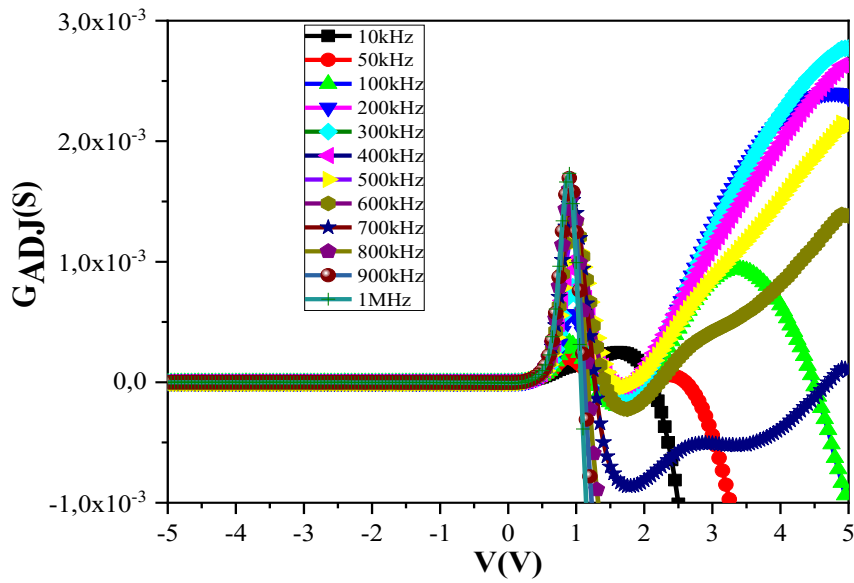
(b)



(c)

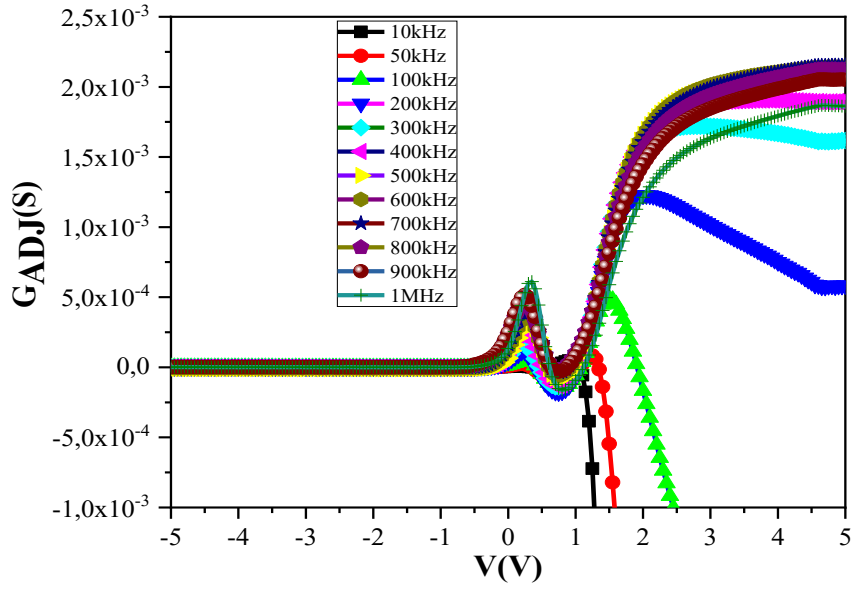
**Şekil 4.9.** TiO<sub>2</sub> (a) ve 1:5 (b) ve 1:2 (c) oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların C<sub>adj</sub> – V karakteristikleri

Hesaplanan düzeltilmiş kapasitans- voltaj (C<sub>adj</sub> – V) ve düzeltilmiş iletkenlik – voltaj (G<sub>adj</sub> – V) değerleri sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da sunulmuştur. Şekil 4.9’da bulunan C<sub>adj</sub> – V grafikleri incelendiğinde görülen piklerin pozitif denetleme bölgesinde olduğu gözükmemektedir. Ayrıca artan sinyal frekansının pik pozisyonlarında değişime yol açtığı gözükmemektedir. Ayrıca farklı oranlardaki ZnO karışımı miktarındaki artışında pik pozisyonlarında kaymaya yol açtığı görülmektedir.

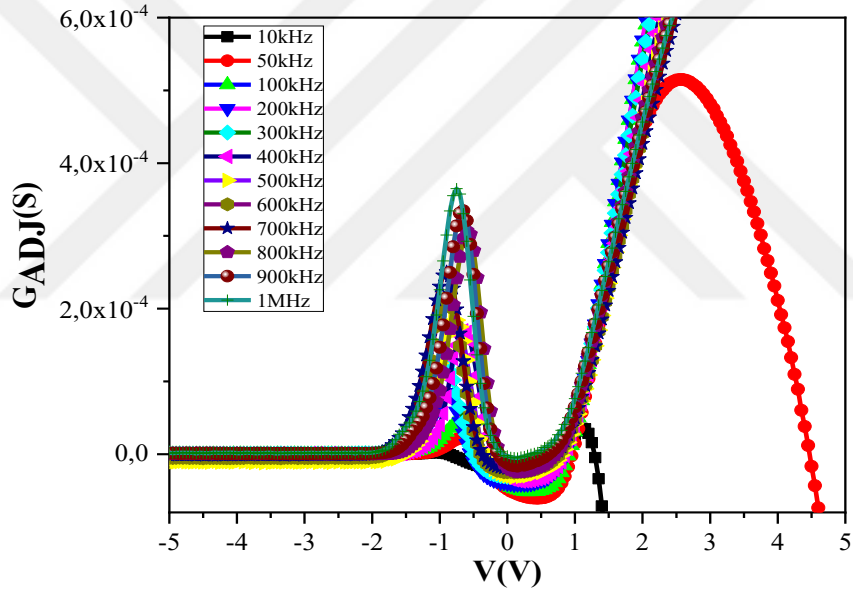


(a)





(b)



(c)

**Şekil 4.10.** TiO<sub>2</sub> (a) ve 1:5 (b) ve 1:2 (c) oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların  $G_{adj} - V$  karakteristikleri

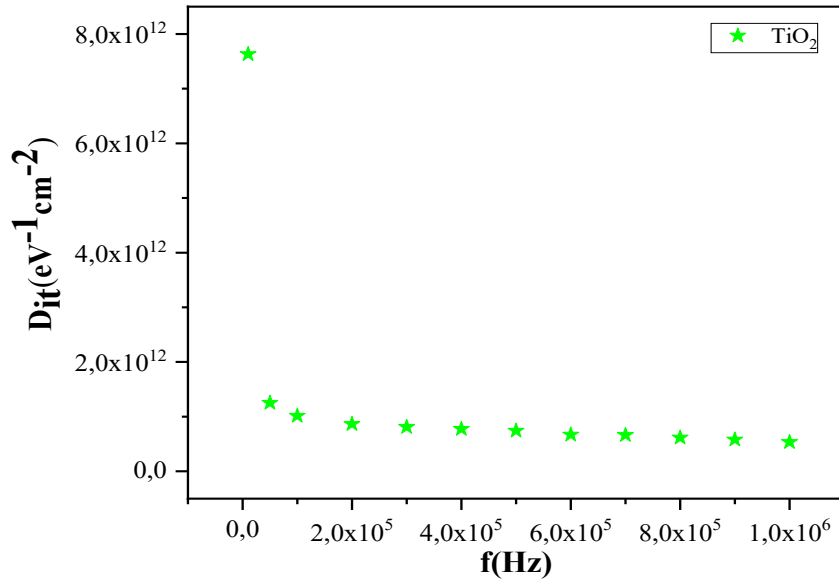
Şekil 4.10'da  $G_{adj} - V$  grafiği gösterilmektedir. Grafiklerde açık şekilde pikler gözükmemektedir. Görünen piklerin pozisyonlarının farklı oranlardaki ZnO karışımı miktarı ile değiştiği gözlenmiştir. Farklı oranlardaki ZnO karışımı pik pozisyonlarında negatif bölgeye doğru kayma olmasına neden olmaktadır. Gözlenen piklerin frekansa bağlı davranış sergilediği görülmektedir. AC sinyal frekansındaki artış ile ölçülen iletkenlik değerinin arttığı görülmüştür. Bu durum AC sinyal frekansının elektronların diyotun içerisinde hareket etmesine yardımcı olduğu savını güçlendirmektedir.  $G_{adj} - V$  karakteristiğinin frekansa bağlı davranış sergilemesi diyot içerisinde ara yüz durumlarının

olduğuna işaret etmektedir. Bu sebeple düzeltilmiş iletkenlik ve düzeltilmiş kapasitans grafikleri kullanılarak diyotların ara yüz durum yoğunlukları hesaplanmıştır. Ara yüz durum yoğunluklarının hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır:

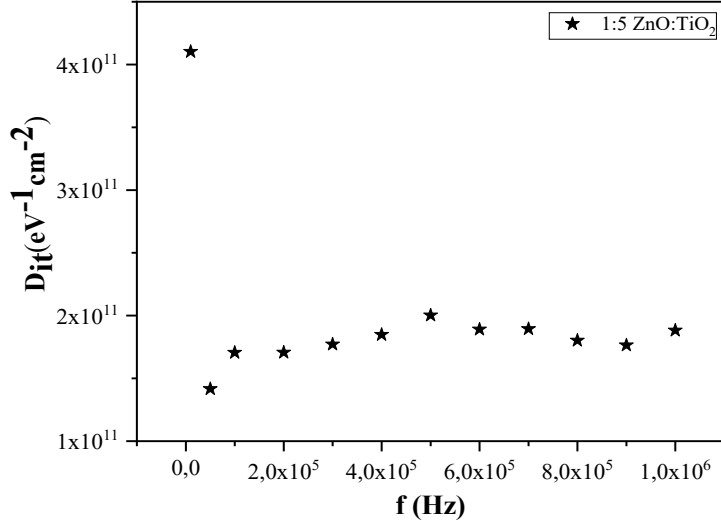
$$D_{it} = \left( \frac{2}{qA} \right) \left[ \frac{(G_{max}/w)}{[(G_{max}/wC_{ox})^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2]} \right] \quad (4.4)$$

Burada  $C_m$  ölçülen kapasitans  $A$  fotodiyot alanı,  $G_m$  ölçülen iletkenlik  $C_{ox}$  yalıtkan tabakanın kapasitans değeri,  $\omega$  ise açısal frekans ( $2\pi f$ ) tır [96].

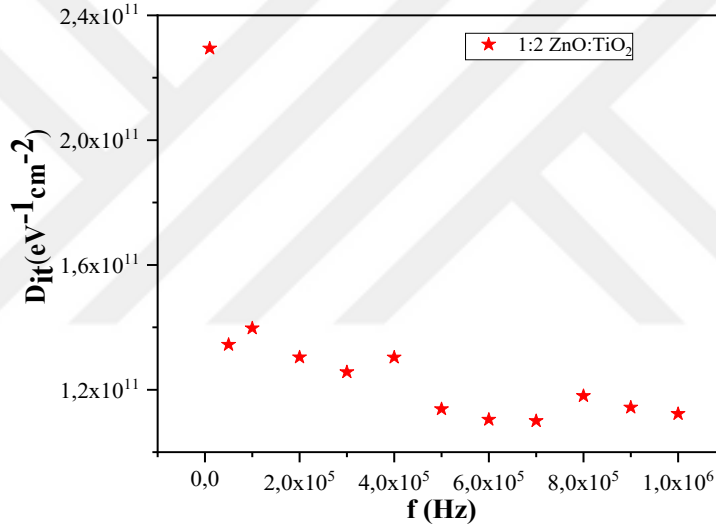
Diyotların frekansa bağlı davranışını gösteren  $D_{it} - f$  grafikleri Şekil 4.12’de sergilenmektedir. Şekil 4.12’deki grafikler diyotların hesaplanan durum yoğunluklarının frekansa bağlı olarak değişim gösterdiğini kanıtlamaktadır. Grafikler incelendiğinde artan AC sinyal frekansının ara yüz durum yoğunluklarını azalttığını göstermektedir. Ayrıca farklı oranlardaki ZnO karışımının da ara yüz durum yoğunluklarında değişmeye yol açtığı görülmüştür. En yüksek ara yüz durum yoğunluğu  $TiO_2$  fotodedyörler için ölçülmüştür.  $TiO_2$  ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO: $TiO_2$  fotodiyotlar için ölçülen maksimum durum yoğunlukları  $8 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ ,  $4 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  ve  $2.4 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Sonuçlardan anlaşılacağı üzere farklı oranlardaki ZnO karışımı ara yüz durum yoğunluğunu azaltmıştır.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.11.** TiO<sub>2</sub> (a) ve 1:5 (b) ve 1:2 (c) oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların frekansa bağlı ara yüz durum yoğunluğu karakteristikleri

#### 4.2.4 Al/ZnO:TiO<sub>2</sub>/p-Si/Al Diyotların Kapasitans- Zaman (C-t) Karakteristikleri

Şekil 4.12 TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların C – t karakteristik davranışlarını göstermektedir. Şekil 4.12’de gösterilen karakteristik davranış Şekil 4.6’da gösterilen karakteristik davranış ile paralellik göstermektedir. C-t karakterizasyonu yapılırken de I-t karakterizasyonuna benzer olacak şekilde aydınlatma 5’er saniyelik aralıklarla açılıp kapatılmıştır. Bu işlem 20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddetleri için yapılmıştır. Grafikler incelendiğinde aydınlatma uygulandığında kapasitans değerinin arttığı aydınlatma kapatıldığı anlarda ise ölçülen kapasitans

değerinin hızlı bir şekilde değiştiği görülmüştür. Artan ışık şiddeti ile ölçülen kapasitans değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum kapasitans değeri TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotlar için sırasıyla 5.2x10<sup>-9</sup> F, 2.3x10<sup>-9</sup> F ve 1.5x10<sup>-9</sup> F olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar ışığında farklı oranlardaki ZnO karışımı ölçülen kapasitans değerini azalttığı anlaşılmıştır.

Elde edilen grafikler vasıtası ile incelenen diyotların idealite faktörleri, foto hassasiyetleri (photosensitivity), doyumluk akımı ve bariyer yükseklikleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken Termiyonik salınım teorisinden (thermionic emission theory) yararlanılmıştır. Bariyer yüksekliği ( $\phi_b$ ) ve idealite faktörü (n) hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmıştır [97]:

$$I = I_o \left[ \exp \left( \frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (4.5)$$

burada “n” idealite faktörü “q” elektron yükü, k is Boltzman sabiti, “T” mutlak sıcaklık, “I<sub>o</sub>” geri denetim akımı , “V” uygulanan voltaj ve “R<sub>s</sub>” seri dirençtir. I<sub>o</sub> Aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_o = AA^*T^2 \exp \left( -\frac{q\phi_b}{kT} \right) \quad (4.6)$$

Formülde A diyotun yüzey alanı, “ $\phi_b$ ” is the bariyer yüksekliği, “A\*” ise Richardson sabitini ifade eder; bu sabit literatürde p-tip yarıiletken için 32 A/cm<sup>2</sup>K<sup>2</sup>, n tip yarı iletken için ise olarak bilinmektedir.

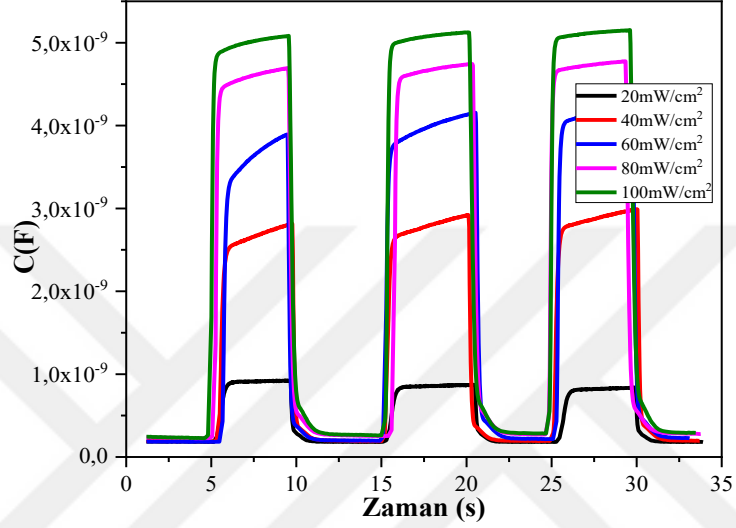
Hesaplamalardan elde edilen değerler Çizelge 4.1’de listelenmiştir.

**Çizelge 4.1:** Diyotlara ait idealite faktörü( $\phi_b$ ), bariyer yüksekliği n, doyumluk akımı tablosu

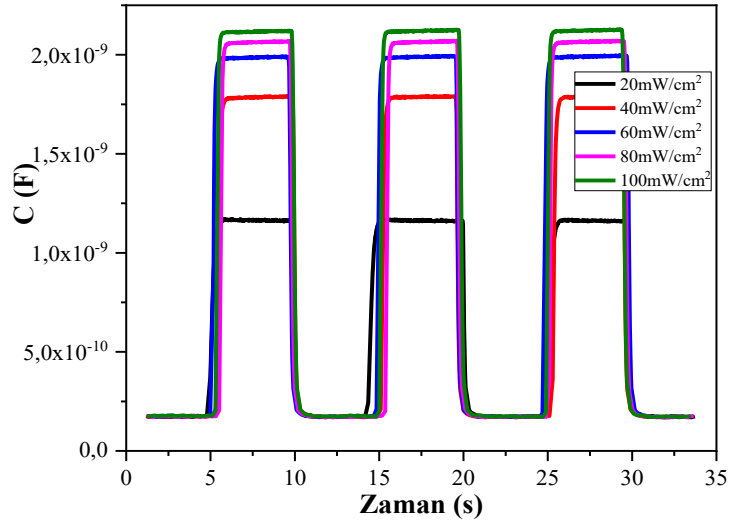
Fotodiyot	n	$\phi_b$ (eV)	I <sub>o</sub> (A)
TiO <sub>2</sub>	6.04	0.478	1.98x10 <sup>-4</sup>
1:5 ZnO:TiO <sub>2</sub>	5.92	0.470	2.67x10 <sup>-4</sup>
1:2 ZnO:TiO <sub>2</sub>	6.58	0.493	1.10x10 <sup>-4</sup>

TiO<sub>2</sub> ve 1:5 ve 1:2 oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların idealite faktörleri sırası ile 6.04, 5.92 ve 6.58 olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörünün ideal bir diyot için 1 olması gerektiği öngörülmüştür [8,36]. Ancak literatürde idealite faktörü 1’den büyük olan fotodiyotlara sıklıkla rastlanmaktadır [36,98]. Bu duruma bariyer yüksekliğindeki

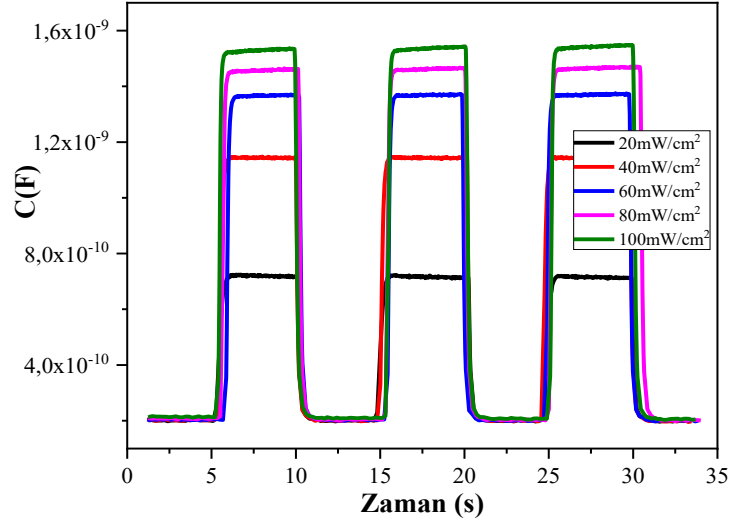
düzensizlikler, seri direnç, ara yüz durumlarının varlığı başta olmak üzere birçok etmen sebep olabilir [33]. Diyotların bariyer yükseklikleri de  $\text{TiO}_2$  ve 1:5 ve 1:2 oranlarda  $\text{ZnO}:\text{TiO}_2$  fotodiyotlar için sırasıyla 0.478 eV, 0.470 eV ve 0.493 eV olarak bulunmuştur. Elde edilen bariyer yükseklikleri ile literatürde benzer yapıdaki diyotların uyumlu olduğu anlaşılmıştır [19,36,98].



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.12. TiO<sub>2</sub> (a) ve 1:5 (b) ve 1:2 (c) oranlarda ZnO:TiO<sub>2</sub> fotodiyotların C – t karakteristikleri



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada  $TiO_2$  ve  $ZnO:TiO_2$  fotodiyotlar Sol-jel ve döndürme kaplama tekniklerinden yararlanarak üretildi. Döndürme kaplama tekniği ile  $ZnO:TiO_2$  ince filmler p-tipi Silisyum (p-Si) altlıklar üzerine kaplandı. Elde edilen  $TiO_2$  ve  $ZnO:TiO_2$  ince filmlerin optiksel analizleri 200 nm-1000 nm dalga boyu aralığında analiz edildi. Numunelerin optik bant aralık değerleri yansıtma spektrumları kullanılarak hesaplandı. Elde edilen ince filmlerin soğurma spektrumları incelendi. Görünür bölgede ince filmlerin soğurmasının % 3'ten düşük olduğu görüldü. Numunelerin yansıtma spektrumları incelendiğinde görünür bölgede yansıtma değerlerinin % 6 ile % 1 arasında olduğu görüldü. Geçirgenlik değerleri incelendiğinde ise ince filmlerin geçirgenliğin görünür bölgede değişkenlik gösterdiği, uygulanan dalga boyunun kızılötesi dalga boyuna yaklaşması ile % 88 seviyelerine kadar çıktığı görüldü.

Üretilen diyotların soğurma, yansıtma ve geçirgenlik grafiklerinin yorumlanması sonucu diyotların iyi derecede geçirgenlik sergilerken düşük yansıtma ve soğurma değeri gösterdiği gözlemlendi.

Elde edilen optik ölçümler neticesinde diyotların yasak enerji aralığı hesaplandı. Soğurma-hv grafiği kullanılarak hesaplanan yasak enerji aralığı  $TiO_2$ ,  $ZnO:TiO_2$  1:5 ve  $ZnO:TiO_2$  1:2 oranlarda ince filmleri için sırasıyla 3.32 eV, 3.19 eV ve 3.16 eV olarak hesaplandı. Farklı oranlardaki ZnO karışımı yasak enerji aralığını azalttığı görüldü. Bulunan sonuçların literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu belirlendi.

Al/ $ZnO:TiO_2$ /p-Si/Al diyotlarının elektriksel karakterizasyonları için Akım-voltaj (I-V) ölçümleri çeşitli aydınlanma şiddetleri altında incelendi. Silisyum altaş üzerine yapılan fotodiyotlara -5 ile +5 V arasında gerilim uygulanarak ölçümler alındı.

I-V karakteristikler incelendiğinde hem negatif denetleme hem de pozitif denetleme bölgesinde pozitif akım oluştuğu gözlemlendi. Bu da ince filmlerin diyot özelliği gösterdiğini kanıtladı. I-V ölçümleri hem karanlık ortamda hem de ölçümler sırasında fotodiyotlara 20, 40, 60, 80 ve 100  $mW/cm^2$  aydınlatma şiddetinde ışık uygulandı ve ölçülen fotoakımda artış olduğu görüldü. Bu durum diyotların fotodiyot karakteristiği sergilediğini gösterdi.



Fotovoltaik özelliklerinin incelenmesi neticesinde diyotların ışığa karşı tepki verebildiği anlaşıldı. Fotovoltaik incelemelerde artan ışık şiddetinin diyotlardan elde edilen fotoakım değerini arttırdığı gözlemlendi.

Fotodiyotların I – t karakteristikleri incelendi. Her bir diyot için fotodiyotlara uygulanan farklı şiddette ışık uygulaması yapıldı. Bu ışıklar 5'er saniyelik aralıklarla uygulandı. Sonuç olarak ışık altında diyotlardan ölçülen akım artarken ışık söndürüldüğünde diyotlarda ölçülen akımın hızlı bir şekilde düştüğü görüldü. Işık şiddeti artıkça ölçülen fotoakımında artışı tespit edildi. Bu da fotodiyotların ışığa karşı duyarlı olduğunu gösterdi.

Fotodiyotların kapasitans - voltaj (C – V) değerleri -5V ile 5 V arasında 10kHz ile 1MHz arasında değişen farklı AC sinyal frekansları altında incelendi. Grafiklerde görülen pikler farklı AC sinyal frekanslarının belirli bölgelerde kapasitans değerini arttırdığı görüldü. Piklerin pozisyonu TiO<sub>2</sub>, ZnO:TiO<sub>2</sub> 1:5 ve ZnO:TiO<sub>2</sub> 1:2 fotodiyotları için sırasıyla yaklaşık -2V, -1V ve -0.8V olarak ölçüldü. Bu da farklı oranlardaki ZnO karışımı piklerin pozisyonunu negatif voltaj bölgesinden pozitif voltaj bölgesine çektiği göstermektedir.

Ayrıca artan ışık değeri ile diyotlarda bulunan fotokapasitans değerinin de arttığı görüldü. Dolayısıyla diyotların farklı şiddetten ışıklara, farklı tepki verdiği anlaşıldı. Fotovoltaik karakteristikleri, diyotların fotodedektör ve solar takip sistemlerinde kullanılabileceğini gösterdi. Termiyonik salınım teorisi kullanılarak diyotların idealite faktörleri ve bariyer yükseklikleri belirlendi. Belirlenen değerler literatürde rapor edilen değerler ile uyumlu olarak bulundu.

Diyotların elektriksel özellikleri C-V ve G-V analizleri ile değişen AC sinyal frekansları altında incelendi. Fotodiyotlar için iletkenlik - voltaj (G – V) değerleri -5 V ile 5 V arasında 10 kHz ile 1 M Hz arasında değişen farklı AC sinyal frekansları altında incelendi. İncelenen grafiklerde AC sinyal frekansının artması ile iletkenliğinde arttığı gözlemlendi. Bu durum diyotlara uygulanan AC sinyal frekansının diyotların elektriksel özelliklerini değiştirdiğini gösterdi. Sinyal frekansına bağlı bir etkinin gözlemlenmesi C-V ve G-V grafiklerinin birbirine paralel davranış sergilediğini gösterdi. Fotodiyotlar için maksimum iletkenlik  $2 \times 10^{-2}$  S,  $8 \times 10^{-3}$  S ve  $6 \times 10^{-3}$  S olarak ölçüldü. İncelemeler neticesinde diyotların elektriksel özelliklerinin AC sinyal frekansına bağlı olduğu görüldü.

Grafikler diyotların hesaplanan durum yoğunluklarının frekansa bağı olarak değiştiiğini gösterdi. Grafikler incelendiğinde artan AC sinyal frekansının ara yüz durum yoğunluklarını azalttığını gösterdi. Farklı oranlardaki ZnO karışımı ara yüz durum yoğunluklarında değişmeye yol açtı. En yüksek ara yüz durum yoğunluğu TiO<sub>2</sub> fotodetektörler için ölçülmüştür. TiO<sub>2</sub>, ZnO:TiO<sub>2</sub> 1:5 ve ZnO:TiO<sub>2</sub> 1:2 fotodiyotlar için ölçülen maksimum durum yoğunlukları  $8 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ,  $4 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  ve  $2.4 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  olarak hesaplandı. Sonuçlardan anlaşılacağı üzere farklı oranlardaki ZnO karışımı ara yüz durum yoğunluğunu azaldığı anlaşıldı.

Yapılan hesaplamalar sonucunda bu davranışın arayüz durum yoğunluğundan kaynaklandığı anlaşıldı. Ara yüz durum yoğunluğunun AC sinyal frekansına ve farklı oranlardaki ZnO karışımın miktarına bağılı olarak değiştiiği görüldü.

Bu çalışmanın devamı olarak, farklı oranlardaki ZnO:TiO<sub>2</sub> kompozitlerin dielektrik özellikleri incelenebilir. Buna ilave olarak TiO<sub>2</sub> ile farklı metaller katkılama yapılarak malzemenin elektriksel ve optiksel özellikleri araştırılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Uldrich, J. and Newberry, D.**, 2005, Nanoteknoloji, Alıcı T.(çeviri editörü), Ledo Yayınları, İstanbul.
- [2] **Bilgin, V.**, 2003, ZnO Filmlerinin Elektrik, Optik, Yapısal ve Yüzeysel Özellikleri Üzerine Kalay Katkısının Etkisi, *Doktora Tezi*, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- [3] **Pejova B.**, 2006, et al., Structural and Optical Properties of Chemically Deposited Thin Films of Quantum-Sized Bismuth (III) Sulfide, *Materials Chemistry and Physics*, 99, 39–49,
- [4] **Horzum, Ş.**, 2005. Kimyasal Olarak Kaplanmış CuO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Yapısal, Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
- [5] **Eckertova, L.**, 1986, Physics of Thin Films, s. 340, Plenum Press, New York and London,
- [6] **Zor, M.**, 1982, Spray-Pyrolysis ile Elde Edilen AgInS<sub>2</sub> Bileşiğinin Bazı Fiziksel Özellikleri, *Doçentlik Tezi*, Ankara.
- [7] **Y. Takaoka et al.**, “Self-assembling nanoprobes that display off/on <sup>19</sup>F nuclear magnetic resonance signals for protein detection and imaging,” *Nat. Chem.*, vol. 1, no. 7, pp. 557–561, 2009.
- [8] **N. Aslan et al.**, “Ti doped amorphous carbon (Al/Ti-a:C/p-Si/Al) photodiodes for optoelectronic applications,” *J. Mol. Struct.*, vol. 1155, pp. 813–818, 2018.
- [9] **F. J. González, B. Ilic, J. Aida, and G. D. Boreman**, “Antenna-coupled infrared detectors for imaging applications,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 11, no. 1, pp. 117–120, Jan. 2005.
- [10] **A. Dere, M. Soylu, and F. Yakuphanoglu**, “Solar light sensitive photodiode produced using a coumarin doped bismuth oxide composite,” *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 90, pp. 129–142, Feb. 2019.
- [11] **A. Mekki et al.**, “Graphene controlled organic photodetectors,” *Synth. Met.*, vol. 217, pp. 43–56, Jul. 2016.
- [12] **P. D. Rack and P. H. Holloway**, “The structure, device physics, and material properties of thin film electroluminescent displays,” *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 21, no. 4. Elsevier BV, pp. 171–219, 1998.
- [13] **D. Ponnusamy, A. K. Prasad, and S. Madanagurusamy**, “CdO-TiO<sub>2</sub> nanocomposite thin films for resistive hydrogen sensing,” *Microchim. Acta*, vol. 183, no. 1, pp. 311–317, Jan. 2016.
- [14] **K. C. Liddiard**, “Thin-film resistance bolometer IR detectors,” *Infrared Phys.*, vol. 24, no. 1, pp. 57–64, Jan. 1984.
- [15] **S. Özden and M. M. Koc**, “Spectroscopic and microscopic investigation of MBE-grown CdTe (211)B epitaxial thin films on GaAs (211)B substrates,” *Appl. Nanosci.*, vol. 8, no. 4, pp. 891–903, 2018.
- [16] **M. Mahdi et al.**, “Ab initio study of GdCo 5 magnetic and magneto-optical properties,” *Mater. Sci. Pol.*, vol. 37, no. 2, pp. 182–189, Jun. 2019.

- [17] **M. Erkovan, M. E. Aköz, U. Parlak, and O. Öztürk**, “The Study of Exchange Bias Effect in  $\text{Pt}_x\text{Co}_{1-x}/\text{CoO}$  Bilayers,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 30, no. 10, pp. 2909–2913, Oct. 2017.
- [18] **M. Yaqoob Khan, C. Bin Wu, M. Erkovan, and W. Kuch**, “Probing antiferromagnetism in  $\text{NiMn}/\text{Ni}/(\text{Co})/\text{Cu}_3\text{Au}(001)$  single-crystalline epitaxial thin films,” *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no. 2, p. 023913, Jan. 2013.
- [19] **M. M. K. Mustafa İlhan**, “Infrared Sensing Properties of Quaternary  $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$  Photodetectors,” *J. Mater. Electron. DEVICES*, vol. 1, no. 1, pp. 19–24, Apr. 2020. **M. İlhan, M. M. Koç, B. Coşkun, and F. Yakuphanoğlu**, “Optical, Electrical and Photoresponsive Properties of  $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$  Solar Detectors,” *J. Electron. Mater.*, vol. 49, no. 7, pp. 4457–4465, Jul. 2020.
- [20] **M. İlhan, M. M. Koç, B. Coşkun, A. Dere, and F. Yakuphanoğlu**, “Structural and optoelectronic characterization of  $\text{Cu}_2\text{CoSnS}_4$  quaternary functional photodetectors,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 212, p. 164724, Jun. 2020.
- [21] **M. İlhan, M. M. Koç, B. Coşkun, and F. Yakuphanoğlu**, “Optical, Electrical and Photoresponsive Properties of  $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$  Solar Detectors,” *J. Electron. Mater.*, vol. 49, no. 7, pp. 4457–4465, Jul. 2020.
- [22] **Öztürk H.Y.**, 2010, “Co-Katkılı  $\text{TiO}_2$  İnce Filmlerin Yapısal Ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [23] **Brinker, C.J. and Sherer, G.W.**, 1990, *Sol-Gel Science*, Academic Press, San Diego.
- [24] **Hasançebi, Ö.**, 2006, Electrical, Structural and Optical Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Sol-Gel Method, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara University, Ankara.
- [25] **A. Djabri, M. Mahdi, R. Boukhalfa, M. Erkovan, Y. Chumakov, and F. Chemam**, “Structural, Magnetic, and Magneto-Optical Properties of  $\text{Fe}/\text{Cu}$  Superlattices,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 30, no. 11, pp. 3207–3214, Nov. 2017.
- [26] **R. Karaçam, N. K. Yetim, and M. M. Koç**, “Structural and Magnetic Investigation of  $\text{Bi}_2\text{S}_3@/\text{Fe}_3\text{O}_4$  Nanocomposites for Medical Applications,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 33, no. 9, pp. 2715–2725, Sep. 2020.
- [27] **N. Kurnaz Yetim, N. Aslan, A. Sarıoğlu, N. Sarı, and M. M. Koç**, “Structural, electrochemical and optical properties of hydrothermally synthesized transition metal oxide ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CuO}$ ) nanoflowers,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 31, no. 15, pp. 12238–12248, Jun. 2020.
- [28] **S. J. Ippolito, S. Kandasamy, K. Kalantar-Zadeh, and W. Wlodarski**, “Hydrogen sensing characteristics of  $\text{WO}_3$  thin film conductometric sensors activated by Pt and Au catalysts,” in *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2005, vol. 108, no. 1-2 SPEC. ISS., pp. 154–158.
- [29] **R. Yang, J. Leisch, P. Strasser, and M. F. Toney**, “Structure of dealloyed  $\text{PtCu}_3$  thin films and catalytic activity for oxygen reduction,” *Chem. Mater.*, vol. 22, no. 16, pp. 4712–4720, Aug. 2010.
- [30] **G. Ren, D. Hu, E. W. C. Cheng, M. A. Vargas-Reus, P. Reip, and R. P. Allaker**, “Characterisation of copper oxide nanoparticles for antimicrobial

applications,” *Int. J. Antimicrob. Agents*, vol. 33, no. 6, pp. 587–590, Jun. 2009.

- [31] **T. H. D. Nguyen, B. Vardhanabhuti, M. Lin, and A. Mustapha**, “Antibacterial properties of selenium nanoparticles and their toxicity to Caco-2 cells,” *Food Control*, vol. 77, pp. 17–24, Jul. 2017.
- [32] **M. Soyulu, B. Coskun, A. G. Al-Sehemi, A. A. Al-Ghamdi, and F. Yakuphanoglu**, “The validity of Kohlrausch law for the photocurrent transient and the role of N<sub>2</sub>/Ar flow ratio in photoconductivity of sputtered CoZnO,” *J. Alloys Compd.*, vol. 712, pp. 152–163, 2017.
- [33] **F. Yakuphanoglu**, “Transparent metal oxide films based sensors for solar tracking applications,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 92, pp. 151–159, May 2016.
- [34] **S. Dugan, M. M. Koç, and B. Coşkun**, “Structural, electrical and optical characterization of Mn doped CdO photodiodes,” *J. Mol. Struct.*, vol. 1205, p. 127235, Oct. 2019.
- [35] **N. Kurnaz Yetim, N. Aslan, and M. M. Koç**, “Structural and catalytic properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> doped Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> novel magnetic nanocomposites: p-Nitrophenol case,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 5, p. 104258, Oct. 2020.
- [36] **M. Koç et al.**, “Electrical characterization of solar sensitive zinc oxide doped-amorphous carbon photodiode,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 178, pp. 316–326, 2019.
- [37] **A. Kösemen et al.**, “Fe doped TiO<sub>2</sub> thin film as electron selective layer for inverted solar cells,” *Sol. Energy*, vol. 132, pp. 511–517, Jul. 2016.
- [38] **N. Kurnaz Yetim, N. Aslan, and M. M. Koç**, “Structural and catalytic properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> doped Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> novel magnetic nanocomposites: P-Nitrophenol case,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 5, 2020.
- [39] **Karunagaran, B., Cchung, S.J., Suh, E.K., Mangalara, J.**, (2005). Dielectric and transport properties of magnetron sputtered titanium dioxide thin films. *Physica, B*, 369, 129-134.
- [40] **Leprince-Whang, Y., Yu-Zhang, K.**, (2001). Study of the growth morphology of TiO<sub>2</sub> thin films by AFM and TEM. *Surf. And Coat. Tech.*, 140, 155-160.
- [41] **Gondek, E., Karasinski, P.**, (2013). High reflectance materials for photovoltaics applications: analysis and modelling. *J. Mater.Sci., Mater. Electron.*, 24(8), 2934–2943.
- [42] **Gondek, E., Djaoued, Y., Robichaud, J., Karasinski, P., Kityk, I.V., Danel, A., Plucinski, K.J.**, (2012). Influence of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the photovoltaic efficiency of the ITO/PEDOT:PSS/fluorine copolymers/polythiophene:TiO<sub>2</sub>/Alarchitecture. *Mater. Electron*, 23, 2057–2064.
- [43] **Senthil, T.S., Muthukumarasamy, N., Thambidurai, M., Balasundaraprabhu, R., Agilan, S.**, (2011). Light conversion efficiency of flower like structure TiO<sub>2</sub> thin film solar cells. *J.Sol–Gel Sci. Technol*, 58, 296–301.

- [44] **Başar Yüncü, F. S.**, (2012). Sol-jel yöntemiyle katkısız ve boya katkılı TiO<sub>2</sub> ince filmlerin hazırlanması ve karakterizasyonu. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü *Yüksek Lisans Tezi*.
- [45] **Aksoy S.**, 2006, Kalay Katkılı ZnO İnce Filmlerin Bazı Fiziksel Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [46] **Panda D., and Tseng T. Y.**, 2013, Growth, dielectric properties, and memory device applications of ZrO<sub>2</sub> thin films, *Thin Solid Films 531*, 1-20.
- [47] **Brinker C.J., Scherer G.W.**, 1989 “Sol- gel science- the physics and chemistry of sol- gel processing”, Academic, New York.
- [48] **Pierre A.C.**, 1988. Introduction to Sol-Gel Processing, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London.
- [49] **Kloskowski A., Pilarczyk M., Chrzanowski W.**, 2010 et al., “Sol-Gel Technique— A Versatile Tool for Adsorbent Preparation”, *Analytical Chemistry*, 40, 172–186.
- [50] **Niederberger M., Pinna N.**, 2009, “Metal Oxide Nanoparticles in Organic Solvents”, Springer Dordrecht Heidelberg London, New York, 7-16.
- [51] **Livage J.**, 1997. “Sol-gel processes”, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 2,132-138.
- [52] **Livage J., Ganguli D.**, 2001 ,“Sol-gel electro chromic coatings and devices: A review” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 68, 365-381,
- [53] **Thitinun S.**, 2003 Thanabodeekij N., Jamieson A.M., et al., “Sol-gel processing of spiro-silicates”, *Journal of the European Ceramic Society*, 23, 417–427,
- [54] **Evcin A.** 2006, “Kaplama Teknikleri Ders Notları”, Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- [55] **Maruszewski K., Streck W., Jasiorski M.**, 2003, et al., “Technology and Applications of Sol-Gel Materials”, *Radiation Effects & Defects in Solids*, 158, 439–450.
- [56] **Toygun Ş. Ve ark.** 2013, “General Principles of Sol-Gel”, *Derleme Makalesi, Journal of Engineering and Natural Sciences Sigma* 31, 456-476.
- [57] **Toygun Ş., Köneçoğlu G., Kalpaklı Y., ve diğerleri**, 2012, “Yaşlandırma Zamanı Etkisinin İncelendiği TiO<sub>2</sub> Nanokristal Tozlarının Üretimi ve Fotokatalitik Uygulamaları”, II. Ulusal Nanoteknoloji Kongresi, İstanbul, 85-91.
- [58] **Dilsiz, N., Akovağlı G.**, 2002. “Study of sol–gel processing for fabrication of low density alumina microspheres”, *Materials Science and Engineering A*, 332, 91–96,
- [59] **Jones R.W.**, 1989, “Fundamental Principles of Sol-Gel Technology”, The Institute of Metals, London,
- [60] **Zabova H., Sobek J., Církva V., Šolcova O., Kment S., Hašek M.**, 2009. “Efficient preparation of nanocrystalline anatase TiO<sub>2</sub> and V/TiO<sub>2</sub> thin layers using microwave drying and/or microwave calcinations technique”, *Journal of Solid State Chemistry* 182, 3387–3392.

- [61] **Alain, C. P.**, 1998, Introduction to Sol-Gel Processing, *Massachusetts: Kluwer Academic Publishers*, Norwell, Boston.
- [62] **Babür G.**, 2013, “Sol-jel Yöntemiyle Elde Edilen Bor Katkılı ZnO İnce Filmlerin Yapısal, Optiksel ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi Komisyonu, Sonuç Raporu, Proje
- [63] **Brunette, D.M., Tengwall, B., Textor, M. and Thomsen, P.**, 2001. Titanium in medicine, Springer Verlag, Heidelberg.
- [64] **Öztürk S.**, 2011, “TiO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Üretilmesi Ve Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri
- [65] **Tıǧlı S.**, 2000, “ ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> ince filmlerinin oluşturulması ve karakterizasyonu. ”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [66] **Wright J.D., Sommerdijk N.A.J.M.**, 2001, “Sol-gel materials: chemistry and applications”, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- [67] **Lautenschlager, E. P., and Monaghan, P.**, 1993, Titanium and Titanium Alloys as Dental Materials. *International Dental Journal*, 43(3), 245-253.
- [68] **Mert, E. H.**, 2006, TiO<sub>2</sub>'nin Fotokatalitik Aktivitesinin Arttırılması Askorbik Asit ile Modifiye Edilen TiO<sub>2</sub>'nin Karakterizasyonu ve Hidrokinonun Fotokatalitik Degradasyon Reaksiyonunun Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6.
- [69] **Mo, S. D. and Ching, W.Y.**, 1995, Electronic and Optical Properties of Three Phases of Titanium dioxide; Rutile, Anatase, *Physical Review B*, 51, 23-32.
- [70] **Ahmad, Dr. A., Awan, G.H., Aziz, S.**, *Synthesis and applications of TiO<sub>2</sub> nanoparticles*. Pakistan Engineering Congress, Pakistan, 676.
- [71] **Natarajan, C., Fukunaga, N. and Nogami, G.**, 1998, Titanium dioxide Thin Film Deposited by Spray Pyrolysis of Aqueous Solution, *Thin Solid Films*, 322,6 - 8.
- [72] **Watanabe, T., Nakajima, A., Wang, R., Minabe, M., Koizumi, S., Fujishima, A. And Hashimoto, K.**, 1999, Photocatalytic Activity and Photoinduced Hydrophilicity of Titanium Dioxide Coated Glass, *Thin Solid Films*, 351(1-2), 260-263.
- [73] **Katsumata, K., Nakajima, A., Shiota, T., Yoshida, N., Watanabe, T., Kameshima, Y. and Okada, K.**, 2005, Photoinduced Surface Roughness Variation in Polycrystalline TiO<sub>2</sub> Thin Films, *J. Photochem Photobiology A*, 180(2), 75-79.
- [74] **Wang, R., Hashimoto, K., Fujishima, A., Chikuni, M., Kojima, E., Kitamura, A., Shimohigoshi, M. and Watanabe, T.**, 1997, Light-Induced Amphiphilic Surfaces, *Nature*, 388, 431-432.
- [75] **Bardakçı, S.**, 2007, Sol-jel yöntemi ile hazırlanan TiO<sub>2</sub> ince filmlerin optik özelliklerinin belirlenmesi (*Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya).



- [76] **Karakız, M.**, 2008. Farklı çözeltiler kullanılarak üretilen ZnO ince filmlerinin yapısal ve optik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [77] **Askeland, D.R.**, 2002, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Çeviri: “Erdogan M.”, Nobel Yayınları, Ankara.
- [78] **Turton, R.**, 2005, Katıların Fiziği, Çeviri: “Yoğurtcu Y.K.”, Aktif Yayınevi, İstanbul.
- [79] **Akyüz, İ.**, 2005, CdO Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri Üzerine Al Katkılama ve Tavlama İşlemlerinin Etkileri, *Doktora Tezi*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [80] **Callister, W.D.**, 2007, Materials science and engineering : an introduction, John Wiley & Sons, New York.
- [81] **Pankove, J.I.**, 1971, Optical processes in semiconductors, Solid State Physical Electronics Series, Prentice-Hall, New Jersey.
- [82] **Tang, Z.K., Wong, G.K.L., Yu, P., Kawasaki, M., Ohtomo, A., Koinuma, H., Segawa, Y.**, 1998, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 3270.
- [83] **Ilcan, S., Çağlar, Y., Çağlar, M.**, 2005, CdZnS ve ZnO Yarıiletken Filmlerinin Yasak Enerji Aralıkları, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 9.Cilt, 1.Sayı.
- [84] **Diffey, B. L.**, 2002 ,“Sources and measurement of ultraviolet radiation”, *Methods*, 28:4-13
- [85] **Bütün, S.**, 2006. The Growth fabrication and characterization of high performance Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N metal-semiconductor-metal photodiodes, *Yüksek Lisans Tezi*, Bilkent Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [86] **S.M., Sze, Kwok K. Ng.**, 2007. Physics of Semiconductor Device, Wiley Interscience, New Jersey.
- [87] **Boylestad, R., Nashelsky, L.**, 1994 Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi, Ankara.
- [88] **Gürdal, O.**, 2000. Algılayıcılar ve Dönüştürücüler, Ankara.
- [89] **Bıyıklı, N.**, 2004. High-Performance Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N-Based UV Photodetectors for Visible/Solar-Blind Applications, *Doktora Tezi*, Bilkent Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [90] **Gündüz, B.**, 2007. Organik yarıiletken foto diyotların hazırlanması ve opto Elektronik özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [91] **Johnson, Mark.**, 2003. Photodetection and Measurement. Blacklick, OH, USA: Mc Graw-Hill Professiona Publishing, p. 14, 15.
- [92] **Sze, S.M., Gibbons, G.**, 1966. Avalanche breakdown voltages of abrupt and linearly graded p-n junctions in Ge, Si, GaAs and GaP, *Appl. Phys. Lett.* **8**, 111.
- [93] **Dugan, S.**, 2019. “CdO/p-Si Heteroeklem Fotodedektörlerin Üretilmesi ve Elektriksel Karakterizasyonu” *Yüksek Lisans Tezi*, Kırklareli Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli

- [94] **Gaurav K. Upadhyay, Jeevitesh K. Rajput, Trilok K. Pathak, Vinod Kumar, L. P. Purohit**, Synthesis of ZnO:TiO<sub>2</sub> nanocomposites for photocatalyst application in visible light, 2019, *Vacuum*, 160: 154-163
- [95] **E. H. Nicollian and A. Goetzberger**, "The Si-SiO<sub>2</sub> Interface - Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 46, no. 6, pp. 1055–1133, Jul. 1967.
- [96] **F. Yakuphanoglu and W. Aslam Farooq**, "Photoresponse and electrical characterization of photodiode based nanofibers ZnO and Si," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 14, no. 3–4, pp. 207–211, Sep. 2011.
- [97] **N. Aslan, N. Başman, O. Uzun, M. Erkovan, and F. Yakuphanoglu**, "The effects of deposition potential on the optical, morphological and mechanical properties of DLC films produced by electrochemical deposition technique at low," *Mater. Sci.*, vol. 37, no. 2, pp. 166–172, 2019.
- [98] **M. M. Koc**, "Photoelectrical properties of solar sensitive CuO doped carbon photodiodes," *J. Mol. Struct.*, vol. 1208, p. 127872, May 2020.



## ÖZGEÇMİŞ

Tez yazarının özgeçmişi verilir. Adı ve soyadı, lisans, yüksek lisans ve doktora bilgileri bu bölümde verilmelidir

<b>Kişisel Bilgiler</b>	
Adı Soyadı	Serkan UYAR
Doğum Yeri	KULA
Doğum Tarihi	15/10/1981
Uyruğu	T.C.
Telefon	0507 776 08 55
E-Posta Adresi	s.uyar@hotmail.com
Web Adresi	



<b>Eğitim Bilgileri</b>	
<b>Lisans</b>	
Üniversite	Dokuz Eylül Üniversitesi
Fakülte	Buca Eğitim Fakültesi
Bölümü	İlköğretim Fen Bilgisi Öğretmenliği
Mezuniyet Yılı	2004

<b>Yüksek Lisans</b>	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	

<b>Doktora</b>	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Program Adı	

<b>Makale ve Bildiriler</b>	

