

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fe KATKILI TiO₂ İNCE FİLMLEİN ÜRETİMİ VE
OPTİK ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih KARA

FİZİK ANABİLİMDALİ
FİZİK PROGRAMI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Burhan COŞKUN

Eş Danışman: Doç. Dr. Mustafa KURBAN

OCAK 2020

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fe KATKILI TiO₂ İNCE FİLMLEİN ÜRETİMİ VE
OPTİK ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih KARA

FİZİK ANABİLİMDALİ
FİZİK PROGRAMI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Burhan COŞKUN

Eş Danışman: Doç. Dr. Mustafa KURBAN

OCAK 2020

Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 1168201101 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **FATİH KARA** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Fe KATKILI TiO₂ İNCE FİLMLEİN ÜRETİMİ ve OPTİK ÖZELLİKLERİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Eş Danışman: **Doç. Dr. Mustafa KARBAN**
Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

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

Dr. Öğr. Üyesi Sedat ŞENGÜL
Trakya Üniversitesi

Teslim Tarihi: 26.12.2019

Savunma Tarihi: 10.01.2020



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarım sürecinde gösterdiği maddi, manevi destekleri ve sabrından dolayı çok değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Burhan COŞKUN' a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerimin hazırlanması ve deneysel ölçümler aşamasında yardımlarını esirgemeyen Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölüm Öğretim Üyesi sayın Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU, sayın Doç. Dr. Mustafa KURBAN ve sayın Öğr. Gör. Dr. Ayşegül DERE hocalarıma teşekkür ederim.

Eğitim öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında fikir ve öneri alışverişinde bulunduğum kıymetli hocam Arş. Gör. Ulvi KANBUR ve arkadaşlarım Öğretim Görevlisi Kenan ÜNAL'a, Selin DUGAN'a, Ali ŞAHİN'e ve Turan KONUK'a şükranlarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALARI	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER	5
2.1 Yarıiletkenler.....	5
2.2 Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması	6
2.2.1 Katkısız Yarıiletkenler	6
2.2.2 Katkılı Yarıiletkenler	6
2.2.2.1 n-tipi Yarıiletkenler	7
2.2.2.2 p-tipi Yarıiletkenler.....	7
2.3 Yarı İletkenlerin Optiksel Özellikleri.....	8
2.3.1 Temel Soğurma	8
2.3.2 İzinli Doğrudan Geçişler	8
2.3.3 Yasaklanmış Doğrudan Geçişler.....	10
2.3.4 Bantlar Arasında Dolaylı Geçişler	10
2.3.5 Bantlar Arası Direkt Geçişler.....	11
2.4 Bant Yapısı.....	11
2.5 Fermi Dirac Dağılım Fonksiyonu	13
2.6 Fotodiyotlar	15
2.6.1 Metal-Yarı İletken Fotodiyotlar	16
2.6.2 P-i-n Eklem Fotodiyotlar.....	17
2.6.3 Schottky Fotodiyot	17
2.6.4 Heteroeklem Fotodiyot	17
2.6.5 Fotodiyotların Akım -Voltaj Karakteristiği	18
2.6.6 Fotodiyotların Kapasite- Voltaj Karakteristiği	18
2.6.7 Fotovoltaik Parametreler	19
2.6.8 Kuantum Verimi ve Fotoduyarlılık.....	19
2.6.9 Seri Direnç	20
2.6.10 Şönt Direnç	20
2.6.11 TiO ₂ İnce Filmler	20
2.7 TiO ₂ Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	22
2.8 Sol-jel Yöntemi	25
2.8.1 Sol-jel Yönteminde Kullanılan Bileşenler	26
2.8.2 Sol-jel Oluşumu	26
2.8.3 Sol-jel Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	27

2.8.4 Sol-jel Yöntemi ile Film Kaplama Yöntemleri	28
2.8.4.1 Daldırma ile kaplama yöntemi	28
3. MATERYAL VE METOT.....	31
3.1 Deneysel İşlemler	31
3.2 Katkısız TiO ₂ ve Fe Katkılı TiO ₂ Filmlerin Yüzeysel Özellik Analizi	32
3.3 Katkısız TiO ₂ ve Fe Katkılı TiO ₂ İnce Filmlerin Optiksel Özellik Analizi ..	33
3.4 Katkısız TiO ₂ ve Fe Katkılı TiO ₂ Filmlerin Elektriksel Özellik Analizi	34
4. ÖLÇÜM SONUÇLARI	35
4.1 Katkısız TiO ₂ ve Fe Katkılı TiO ₂ Filmlerin Yüzeysel Ölçüm Sonuçları	35
4.2 Katkısız TiO ₂ ve Fe Katkılı TiO ₂ Filmlerin Optiksel Ölçüm Sonuçları	37
4.3 Katkısız TiO ₂ ve Fe Katkılı TiO ₂ Filmlerin Elektriksel Ölçüm Sonuçları ...	41
4.3.1 Katkısız TiO ₂ ve Fe Katkılı TiO ₂ Foto Akım- Voltaj (I-V) Karakteristikleri.....	41
4.3.2. Katkısız TiO ₂ ve Fe Katkılı TiO ₂ Foto Akım- Voltaj (C-V) Karakteristikleri.....	44
4.3.3 Katkısız TiO ₂ ve Fe Katkılı TiO ₂ Foto Akım- Zaman (I-t) Karakteristikleri.....	46
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ	57

KISALTMALAR

MSM	: Metal-Yarıiletken- Metal
UV-VIS	: Ultraviyole ve görünür ışık absorpsiyon spektroskopi
I-V	: Akım-Voltaj karakteristiği
C-V	: Kapasitans-Voltaj karakteristiği
I-t	: Akım- Zaman karakteristiği
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
I	: Akım
Φ	: Akı yoğunluğu
μ	: Mobilite
E_c	: İletim bandı minimum enerji seviyesi
E_v	: Valans bandı maksimum enerji seviyesi
E_F	: Fermi enerjisi
E_g	: Yasak enerji aralığı
p	: Boşluk konsantrasyonu
n	: Elektron konsantrasyonu
V_d	: Engel tabaka gerilim düşmesi
N_d	: Verici atomların konsantrasyonu
N_a	: Alıcı atomların konsantrasyonu
T	: Mutlak sıcaklık
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	: Dielektrik sabiti
q	: Yük
d	: Donör konsantrasyonu



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

- Çizelge 4.1:** Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince filmlerin yansımaya spektrum değerleri 38
Çizelge 4.2: Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince filmlerin E_g değerleri 41
Çizelge 4.3: Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ diyotların I_{açma} / I_{kapama} oranları 50





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : n tipi yarı iletken için enerji bant diyagramı	7
Şekil 2.2 : p- tipi yarı iletken için enerji bant diyagramı	8
Şekil 2.3 : Tüm momentum korunumlu geçişlerin izinli olduğu iki direkt enerji vadisi	9
Şekil 2.4: Katkısız yarıiletkenlerde değişik sıcaklıklardaki enerji bant diyagramı ...	12
Şekil 2.5: Fermi- Dirac dağılımfonksiyonu	14
Şekil 2.6: Farklı frekans ve dalga boylarına göre ışınmaları optik bant üzerindeki dağılımı	15
Şekil 2.7: Fotonlarla uyarak (a) bantlar arası geçiş (b) safsızlık seviyesi ile iletim bandı arasındaki fotouyarma	16
Şekil 2.8: Aydınlatılan bir metal-yarıiletken eklem şematik diyagramı.....	16
Şekil 2.9: Sıfır beslemede Schottky fotodiyotta oluşan fotoakım	17
Şekil 2.10: TiO ₂ ' nin kullanım alanları.....	22
Şekil 2.11: TiO ₂ ' in Rutil ve Anataz enerji diyagramı.....	24
Şekil 2.12: Sırasıyla TiO ₂ 'nin Rutil ve Anataz yapısı	24
Şekil 2.13: Sol-jel tekniği ile ince filmi kaplama yöntemi şematik gösterimi	25
Şekil 2.14: Hidroliz reaksiyonunun şematik gösterimi.....	26
Şekil 2.15: Bir bileşeni hidrolize uğramış şeklinin şematik gösterimi	27
Şekil 2.16: Daldırma ile film kaplama işleminin şematik gösterimi	28
Şekil 3.1: Numunelerin hazırlandığı deney düzeneği.....	31
Şekil 3.2: Katkısız TiO ₂ ve Fe katkılı TiO ₂ ince filmlerin yüzey ölçümleri için kullanılan atomik kuvvet mikroskobu.....	32
Şekil 3.3: Katkısız TiO ₂ ve Fe katkılı TiO ₂ ince filmlerin U-V ölçümleri için kullanılan UV-VIS spektrofotometre cihazı	33
Şekil 3.5: Katkısız TiO ₂ ve Fe/TiO ₂ /p-Si diyotlarının I-V, C-V ve I-t ölçümleri için kullanılan deney düzeneği.....	34
Şekil 4.1: TiO ₂ 'in AFM görüntüleri	36
Şekil 4.2: Katkısız ve Fe katkılı TiO ₂ ince film numunelerinin yansıma spektrumları.....	37
Şekil 4.3: Katkısız ve Fe katkılı TiO ₂ ince film numunelerinin soğurma spektrumları.....	38
Şekil 4.4: Katkısız ve Fe katkılı TiO ₂ ince film numunelerinin geçirgenlik spektrumları.....	39
Şekil 4.5: Katkısız ve Fe katkılı TiO ₂ numunelerinin (ahv) ² -hv grafikleri.....	40
Şekil 4.6: Katkısız TiO ₂ diyotların I-V eğrileri	42
Şekil 4.7: %1 Fe katkılı katkılı TiO ₂ diyotların I-V eğrileri.....	42
Şekil 4.8: %5 katkılı Fe katkılı TiO ₂ diyotların I-V eğrileri.....	43
Şekil 4.9: %10 Fe katkılı TiO ₂ diyotların I-V eğrileri	43
Şekil 4.10: Katkısız TiO ₂ diyotların C-V eğrileri	44
Şekil 4.11: %1 Fe katkılı TiO ₂ diyotların C-V eğrileri.....	45

Şekil 4.12: %5 Fe katkılı TiO ₂ diyotların C-V eğrileri.....	45
Şekil 4.13: %10 Fe katkılı TiO ₂ diyotların C-V eğrileri.....	46
Şekil 4.14: Katkısız TiO ₂ diyotların I-t eğrileri	47
Şekil 4.15: %1 Fe katkılı TiO ₂ diyotların I-t eğrileri.....	48
Şekil 4.16: %5 Fe katkılı TiO ₂ diyotların I-t eğrileri.....	48
Şekil 4.17: %10 Fe katkılı TiO ₂ diyotların I-t eğrileri.....	49



Fe KATKILI TiO₂ İNCE FİLMLEİN ÜRETİMİ VE OPTİK ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Bu çalışmada katkısız TiO₂ ve farklı oranlarda Fe katkılı (%1, %5, %10) TiO₂ ince filmler Sol-jel tekniğiyle Silisyum (Si) alttaşlar üzerine oda sıcaklığında büyütüldü. Elde edilen TiO₂ ince filmlerin yüzeysel, elektriksel ve optiksel özellikleri araştırıldı. Numunelerin yüzeysel özelliği Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile incelendi. AFM yardımıyla ölçülen numunelerin yapısal özelliklerinin granüler yapıda olduğu ve alttaşın üzerinde homojen bir şekilde depolandığı görüldü. Büyütülen ince film numunelerinin elektriksel özelliklerinin incelenmesi amacıyla Akım- Voltaj (I-V), Kapasitans- Voltaj (C-V) ve Akım-Zaman (I-t) ölçümleri farklı ışık şiddetleri altındaki aydınlatmalarda yapıldı ve numunelerin doğrultucu özellik gösterdiği belirlendi. Güneş ışığı altında fotodiyotların fotoakımının, artan ışık şiddeti ile arttığı ve ışık yok iken ilk değerine geri döndüğü tespit edildi. İnce filmlerin optik özellikleri UV-vis spektrofotometrisi kullanılarak ölçülüp, bant aralığı enerjileri hesaplandı.

Anahtar Kelimeler: Fe katkılı TiO₂, Fotodiyotlar, Sol-jel metodu, Elektriksel Özellikler



FABRICATION and OPTICAL PROPERTIES of Fe DOPED TiO₂ THIN FILMS

SUMMARY

In this work, undoped TiO₂ and Fe doped (1%, 5%, 10%) TiO₂ thin films were grown on Si wafer using the sol-gel technique at room temperature. Electrical, optical and surface properties of the TiO₂ thin films were investigated. Atomic force microscopy (AFM) was used in the investigation of the surface properties. AFM results indicate that samples were homogeneously formed in the granular structure. To assess the electrical properties of the thin films current - voltage (I-V), capacitance – voltage (C-V), and current – time (I-t) measurements were performed in various illumination intensities. Results indicate that samples show rectifying behaviour. The photocurrent of the photodiodes increases with increasing illumination intensities. When the illumination was turned off, the measured photocurrent was dropped to zero. Optical properties of the thin films were measured using UV-vis photo spectrometry and bandgap energies were calculated.

Key Words: Fe doped TiO₂, Photodiodes, Sol-gel method, Electrical properties



1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemelerin kullanışlı olması günümüz teknolojik cihazlarının yapısında önemli bir yere sahip olmasında en temel faktörlerden biridir. Gelişen ve sürekli artan bilgi birikimi ile yeni türde malzemelere gereksinim duyulmuş ve bu gereksinim duyulan malzemeler zamanla üretilmiştir. Yarıiletken malzemelerin kolay ve düşük maliyetle elde edilmesi optoelektronik, elektronik vs. uygulama alanlarında yer alan teknolojik araç ve gereçlerin gelişmesine ortam hazırlamıştır.

Yarıiletken malzemeler Germanyum (Ge) ve Silisyum (Si) gibi yarıiletken elementlerin II-VI ve III-V grubu ile çeşitli şekillerde eşleştirilmeleri sonucu elde edilir. İkili ve üçlü grupların oluşturduğu yarıiletken alaşım malzemeler giderek artmaktadır. Yarıiletkenler ince filmlerin üretiminde de önemli bir yere sahiptir. İnce film genellikle oluşturulacak malzeme atomlarının bir alt taban üzerinde biriktirilmesiyle elde edilip 1nm ile 1µm arasında kalınlığa sahip malzemelerdir. İnce film vakum ortamında kaplamada kullanılacak olan atomların ya da moleküllerin kaplama yapılacak yüzeye birer birer dizilmesi ile oluşturulmaktadır [1].

Günümüzde ince film teknolojisi transistör, entegre devre, ışık yayan diyotlar, geniş ve yüksek çözünürlüklü ekranlar, lazerler, güneş pilleri ve gece görüş sistemleri gibi optik cihazların üretilmesini sağlar, yapısal dayanıklılıkları nedeniyle dekoratif kaplamada da kullanılmaktadırlar. Ayrıca katman sayıları artırılarak elektronik devre elemanları olacak şekilde de üretilmektedirler. İnce filmler elde edilme yöntemlerine göre üç grupta toplanabilir bunlar; araştırma laboratuvarında ve endüstriyel çalışmalarda buhar fazdan yapılan kaplamalar, sıvı fazdan yapılan kaplamalar ile erimiş veya yarı erimiş fazla yapılan kaplamalar şeklindedir [2].

Sıvı halden büyütme tekniklerinin sol-jel, kimyasal banyo ve elektrokimyasal gibi türleri vardır. Sol-jel yöntemi pek çok avantajı nedeniyle sıvı halde yaygın olarak tercih edilen çok kullanışlı bir yöntemdir. Genellikle sol (katı) sürecinde sistem sıvı halden gel hale (jel) geçiş yapar. Bu metot yardımı ile çok çeşitli malzeme

üretilebilir. Bu metotla kaplanarak elde edilen tüm filmlerin kalınlığı aynı düzeyde olup elde edilen kaplama malzeme tamamen saftır.

Yüksek optiksel geçirgenlikleri, düşük öz dirençleri ve geniş bant aralığına sahip olma özellikleri çok kullanışlı olmalarını sağladığından yarıiletken metal oksit ince filmlerin üretim yöntemleri ve özellikleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [3].

Çinko (Zn), İndiyum (In), Kalay (Sn), Titanyum (Ti) ve Kadmiyum (Cd) yarı iletken metal oksitlerin katyon değerlerindeki değişkenlik ve ayarlanabilirlik sayesinde kimyasal, elektriksel, optik ve manyetik özellikleri istenilen biçimde yeni malzemeler elde edilebilir [4].

Yarıiletkenler; enerji, elektronik, katalizör ve sensörler [1,2] gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Hacim yapılarına oranla benzersiz şekil özellikleri kullanılma sebepleridir [3]. Daha genel bir ifade ile yarıiletken maddeler çok çeşitli pratik uygulamalar için faydalı olan birçok özelliğe sahiptir. Son yıllarda araştırmacılar tarafından yoğun bir şekilde araştırılmıştır. TiO_2 ince filmler ilim insanları tarafından araştırılmıştır. Çünkü düşük bütçeyle üretim ve yüksek kırıcılık indisi, kimyasal stabilite gibi mükemmel fotofiziksel özelliklere sahiptir. Bu açıdan TiO_2 , ayarlanabilir elektriksel iletkenliği ve fotokatalitik özelliklerinden dolayı gaz sensörleri gibi birçok uygulamaya da entegre edilmiştir [4,5]. Nano düzeyde iki boyutlu bir malzeme olan TiO_2 sol-jel [6-10] ve reaktif püskürtme yöntemleri [11] gibi farklı deneysel yöntemlerle de hazırlanmıştır. Son zamanlarda, fotovoltaiik cihazlarda kullanım için etkili ve düşük maliyetli bir teknik [12] ile TiO_2 nano parçacıkların üretildiği literatürdede görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar bir atomun malzemeler üzerine katkılanması ile katkılanmamış haline nispeten istenilen fiziksel ve optik özelliklerin kazandırıldığını göstermektedir [13-15]. Bir atoma nano seviyede katkılama yapılması ile malzemeye kazandırılmak istenen yapısal, elektriksel ve optik özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalarda kullanılan elementleri X ile tanımlarsak [16-19] (X= Se, Cu, N, Fe, Vs.) katkılama yapılmış TiO_2 malzemesi üzerine birçok çalışma yapıldığı sonucuna ulaşmaktayız.

Bu çalışmada katkısız ve % 1, % 5 ve % 10 Fe katkılı TiO_2 ince filmleri üretmek için sol-jel karışımlar hazırlandı. Hazırlanan ince filmler, spin kaplama tekniği kullanılarak p-tipi Si yüzey üzerinde kaplandı. TiO_2 ince filmlerin yüzeylerinin karakteristik analizi, Atomik Kuvvet Mikroskopisi (AFM) kullanılarak

gerçekleştirildi. İnce filmlerin elektriksel özellikleri spektrofotometrik (UV-VİS) yöntem ile araştırıldı. Elektriksel ve fotovoltaik özellikler FYTRONIX solar simülasyon aracılığı ile incelenmiştir.





2. TEORİK BİLGİLER

2.1 Yarıiletkenler

Katı maddeler elektrik akımını iletme durumlarına göre metaller, yarı iletkenler ve yalıtkanlar şeklinde üç gruba ayrılmaktadırlar. Metallerin özdirençleri 10^{-6} - 10^{-10} ohmxm aralığında, yarıiletkenler, 10^{-4} - 10^{10} ohmxm aralığında ve yalıtkanlar 10^{10} ohmxm değerine eşit ya da daha büyük özdirenç değerine sahiptirler [20,21].

Yarı iletkenlerin enerji bant yapıları ile yalıtkanların enerji bant yapıları arasındaki fark yarı iletkenlerin elektronlar ile tamamen dolu valans bandı ve boş olan iletkenlik bandı arasında kalan yasak enerji aralığı, yalıtkanlara oranla daha küçüktür [22].

Yarı iletkenlerin elektrik iletkenliği sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişir, sıcaklık arttıkça artar. Fakat mutlak sıcaklıkta elektrik iletkenliği özelliğinden dolayı yalıtkan gibi davranır [22,23].

Katı maddenin yarıiletken olarak adlandırılabilmesi için sadece elektriksel öz direncinin 10^{-4} - 10^{10} ohmxm aralığında olması yeterli değildir. Ek olarak yarı iletkenlerin yasak enerji aralıkları da dikkate alınmalıdır. Yarı iletkenlerin yasak enerji aralıkları termal uyarılma ile ergime noktalarının altındaki sıcaklık değerlerinde de elektriksel iletkenlik sergilerler. En önemli koşul yarı iletkenlerin yasak enerji aralıklarının $E_g = 2eV$ olması gerekir [24].

Element halinde yarıiletken olan Germanyum (Ge) ve Silisyum (Si) en yaygın kullanılan ve bilinen yarıiletkenler olup IV. grup elementleridir. Bileşik halindeki yarıiletkenler de InAs, GaAs, GaP, InSb vs. şeklindeki III-V. grup bileşikleridir. Bağ yapıları genellikle kovalenttir ve kübik yapıdadırlar [25, 26]. CdZnS, ZnO, CdS, ZnS, CdSe II- VI grubu bileşikleridir. İyonik bağ veya kovalent bağ ile bağlanırlar kübik veya hekzagonal şekilde kristal yapı oluştururlar [27].

Yarıiletkenlerin elektriksel karakterizasyonu geçici veya sürekli olacak şekilde geniş bir aralıkta ayarlanabilir. Yarıiletken maddeler de katkılama yolu ile önceki malzemenin özelliklerine göre elektriksel karakterizasyon ayarlanabilir [28] .

doplanan malzemenin cinsine göre yarıiletken malzemenin katkılanmış kısmı daha çok elektron veya hol içerebilir [28, 29]. n- tipi yarıiletkenler elektronlar, p- tipi yarıiletken de holler elektriksel ilettime daha fazla katkı sağlar [20, 22, 27, 30] .

2.2 Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması

19.yy sonlarından 20.yy başlarına kadar olan bilimsel çalışmalar neticesinde bulunan yarı iletkenler elektronik alanındaki gelişimi hızlandırmıştır. 1880'li yıllarda Curie kardeşlerin kristaller ile ilgili yaptıkları çalışmalardan basınç altındaki kristaller üzerinde bir gerilim meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. 1900'lü yıllarda selenyum iletken ile birleştiği yerden tek yönlü akımın geçtiği sonucuna ulaşılmıştır. Sürekli artan bilgi birikimi ve gelişen teknoloji ile beraber gelişen bu icatlardan; 1930 yılında Germanyum diyot, 1948 yılında ise ilk transistör yapılmıştır.

Yarıiletkenler dörde ayrılır bunlar; katkısız (saf) yarıiletkenler, katkılı (saf olamayan) yarıiletkenler, organik yarıiletkenler ve inorganik yarıiletkenlerdir.

2.2.1 Katkısız Yarıiletkenler

Saf yarıiletken malzemeler mutlak sıcaklıkta elektrik akımını iletmediklerinden yalıtıcıdır. İletim bandı boş valans bandı tamamen doludur. Termal uyarılma ile valans bandındaki elektronlar iletim bandına geçerek yük taşıyıcılığı yaparlar. İletim bandındaki ve valans bandındaki hol miktarları eşittir. Saf yarıiletkenlerin başka bir özelliği de akımın farklı iki cins taşıyıcılar tarafından iletilmesidir. Taşıyıcılardan biri iletkenlik bandındaki elektronlardır. İletkenlik bandındaki her elektron için valans bandından bir elektron eksikliği olur. Valans bandındaki eksilen elektronun yeri boş olduğundan, deşik, oyuk veya hol olarak adlandırılır bu boşluk, iletimi sağlayan diğer cins bu holdür.

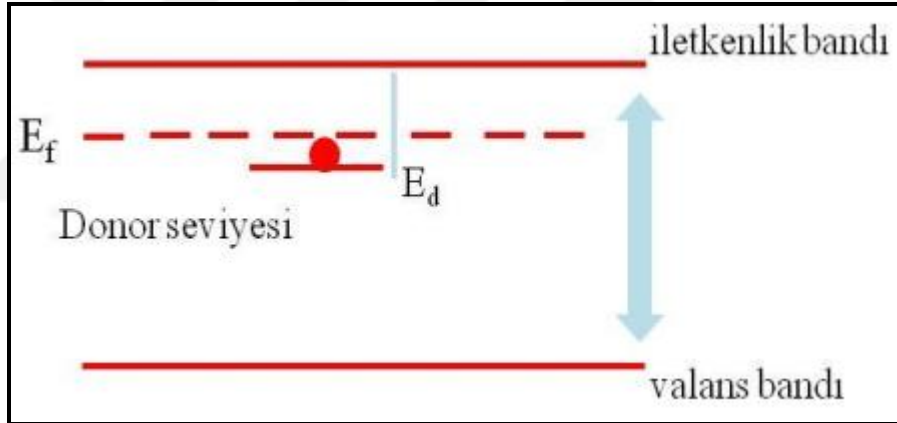
2.2.2 Katkılı Yarıiletkenler

Elektriksel iletkenlik kazanan yarıiletkenlere denir. Yarıiletkenlerin elektriksel karakterizasyonu safsızlık atomlarının yoğunluğuna ve doplanan atomlara bağlıdır.

Katkılı (saf olmayan) yarı iletkenler hollerin ve elektronların miktarına bakılarak sınıflandırılır.

2.2.2.1 n-tipi yarıiletkenler

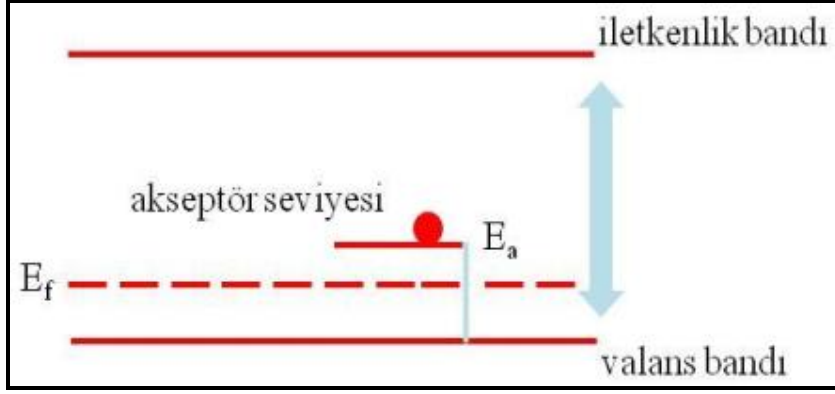
Periyodik tablonun IVA grubundaki elementlere (Ge, Si) V A grubundaki elementler den biri (As, Bi, N, P, SB) doplandığında komşu atomlarla kovalent bağ olduğu esnada açıkta kalan ve bağa katılamayan bir elektron zayıf bir şekilde atoma bağlı kalır. Bu atomlar yasak enerji aralığında iletkenlik bandının altında bir enerji düzeyi oluştururlar. (Şekil2.1) Bu oluşan enerji düzeyindeki elektronlar çok küçük bir düzeydeki enerji ile uyarıldıklarında iletkenlik bandına geçerler. Yani iletim bandında serbest elektronlar meydana gelirken valans bandında serbest holler oluşmaz. Bu nedenle iletim bandındaki elektron miktarı valans bandındaki boşluk miktarından daha çoktur. Bu tür yarıiletkenlerde iletimi çoğunlukla elektronlar, daha az miktarda da holler gerçekleştirmektedir.



Şekil 2.1: n tipi yarı iletken için enerji bant diyagramı [31].

2.2.2.2 p-tipi Yarıiletkenler

IV- A grubu elementlerinden Silisyum (Si) veya Germanyum (Ge) elementine III- A grubu elementlerinden (Ga, B, In, Al) herhangi biri katılınırsa komşu atomlarla gerçekleşen kovalent bağ oluşumu esnasında Germanyum (Ge) veya Silisyum (Si) elementinin bir atomu bağ yapamayacak ve elektronlar boşluk olarak kabul edilecektir bu boşluklar valans bandının hemen üstünde bir enerji düzeyi meydana getirirler (Şekil 2.2) .



Şekil 2.2: p- tipi yarı iletken için enerji bant diyagramı [31].

Valans bandında bulunan uyarılmış elektronlar bu enerji düzeyindeki boşluklara yerleşebilirler. Bu sayede valans bandında serbest boşluklar meydana gelirken iletim bandında serbest elektron oluşmaz. Valans bandındaki hol miktarı iletim bandındaki elektron miktarından çok olur. Bu tür yarı iletkenlere ise p tipi yarıiletkenler denir. Bu tür yarıiletkenlerde ise çoğunlukla iletim görevini holler az miktarda da olsa elektronlar yapmaktadır.

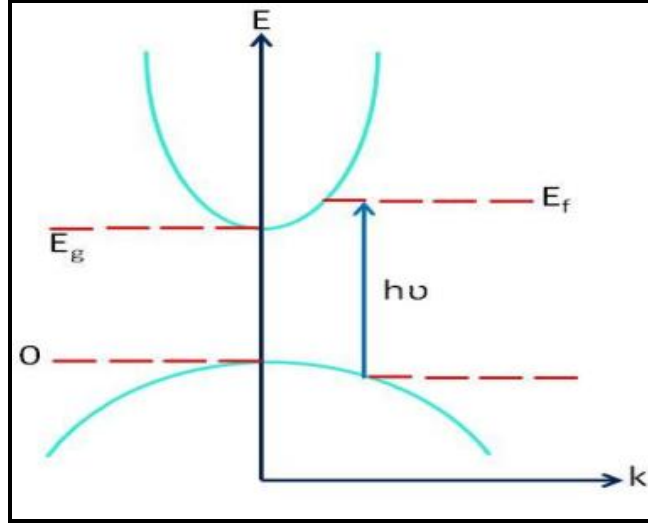
2.3 Yarı İletkenlerin Optiksel Özellikleri

2.3.1 Temel Soğurma

Temel soğurma bantlar arası geçişi göstermektedir. Bu ifade bir elektronun valans bandından iletkenlik bandına uyarılmasıdır. Soğurma esnasında hızlı bir artış şeklinde gerçekleşen temel soğurma, bir yarı iletken ait yasak enerji aralığının tespitinde kullanılır. Fotonun momentumu h/λ (h Planck sabiti, λ ışığın dalga boyu) kristalin momentumu h/a (a örgü sabiti) ile kıyaslandığında oldukça küçüktür. Bu yüzden foton soğurma olayında elektronun momentumu korunmalıdır [32].

2.3.2 İzinli Doğrudan Geçişler

Şekildeki gibi direk geçişli enerji vadileri arasında tüm momentum korunumlu geçişlerin izinli ve P_i geçiş olasılığının foton enerjisinden bağımsız olduğunu varsayalım (Şekil 2.3)



Şekil 2.3: Tüm momentum korunumlu geçişlerin izinli olduğu iki direkt enerji vadisi.

Aşağıdaki ifadedeki gibi E_i 'deki her bir başlangıç durumu E_f 'deki bir son durumla ilgilidir.

$$E_f = h\nu - E_i \quad (2.1)$$

Ancak parabolümsü bantlarda, ilk ve son durumlardaki enerji farkı

$$E_f - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{8\pi^2 m_g^*} \quad (2.2)$$

Ve
$$E_i = \frac{\hbar^2 k^2}{8\pi^2 m_k^*} \quad (2.3)$$

Böylece bant aralığı ile foton enerjisi arasındaki ilişki,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{8\pi^2} \left(\frac{1}{m_g^*} + \frac{1}{m_k^*} \right) \quad \text{olur.} \quad (2.4)$$

2.3.3 Yasaklanmış Doğrudan Geçişler

Bazı malzemelerde kuantum geçiş kuralları $k=0$ ' da direkt geçişlere izin vermezken $k \neq 0$ olamayan durumlarda izin verir, geçiş ihtimali k^2 ile artar. Şekil 2.16 (b'deki modelde, geçiş ihtimalinin $(h\nu - E_g)$ ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Direkt geçişlerde ilgili durumların yoğunluğu $(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}$ ile doğru orantılıdır. Dolayısı ile soğurma sabiti şu şekilde ifade edilebilir;

$$\alpha(h\nu) = A^*(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

Burada A^* aşağıdaki ifade ile verilir.

$$A^* = \frac{q^2 \left(2 \frac{m_h^* + m_e^*}{m_h^* + m_e^*} \right)}{nh^2 m_e^* h\nu} \quad (2.6)$$

eşitliği ile tanımlanır.

2.3.4 Bantlar Arasında Dolaylı Geçişler

Geçiş meydana gelirse iki nicelikte değişim gerçekleşir hem enerjide hem de momentumda. Momentum bir fononun etkileşmesi yoluyla korunur. Fonon, örgülerin yapmış olduğu titreşimin bir kuantumudur. Fononlar geniş bir spektrum aralığına sahip olmalarına rağmen yalnızca ihtiyaç duyulan momentum değişmesi kullanılabilir. Bunlar genel olarak enine ve boyuna akustik fononlardır. Bu fononların hepsi ayrı ayrı kendine özgü bir E_i enerjisine sahiptir. Bu sayede E_i 'den E_f ye geçişleri tamamlamak amacıyla bir fonon soğrulur veya yayımlanır.

Bu iki süreç belirtilen sıraya göre aşağıdaki gibidir.

$$h\nu_p = E_f - E_i - E_p \text{ ve} \quad (2.7)$$

$$h\nu_e = E_f - E_i + E_p \quad (2.8)$$

2.3.5 Bantlar Arası Direkt Geçişler

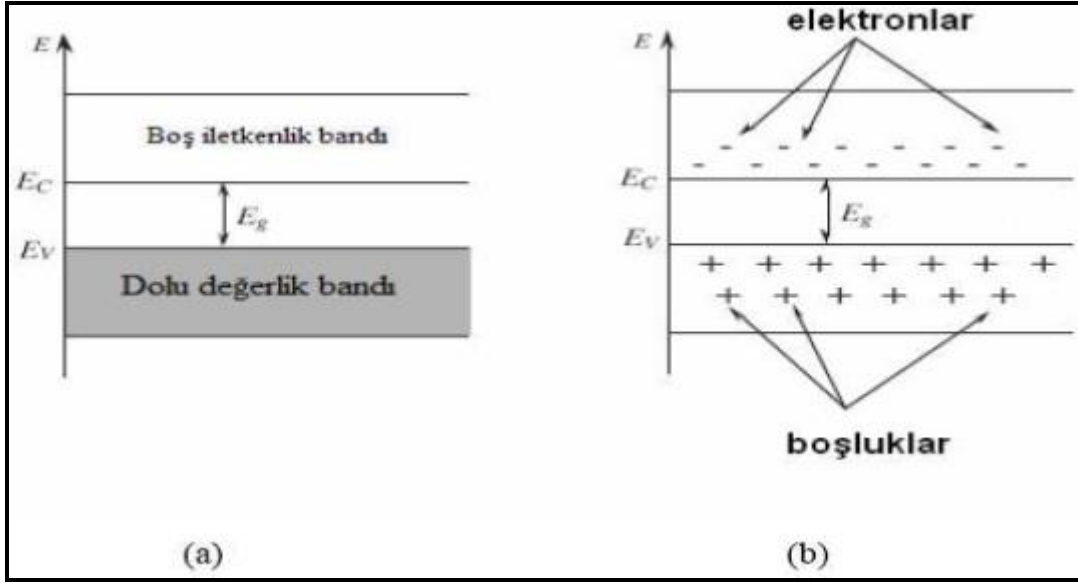
Direkt bantlar ve dolaylı bantlar arasındaki geçişler birbirine benzerdir. Momentum, fonon soğurulması ya da yayılması safsızlıklar veya taşıyıcılar tarafından sağılması ikinci dereceden bir sūreç tarafından korunur. Burada değerlik bandındaki doldurulmuş rastgele bir ilk durum iletim bandının tüm boş durumları ile ilgilidir.

2.4 Bant Yapısı

Metaller için oluşturulan serbest elektron modeli birçok özelliği açıklamada başarılıdır. Ancak metallerle yarıiletkenler ve yalıtkanlar arasındaki farklılıkları, metallerde iletimi sağlayan elektronlarla atomların valans elektronları arasındaki ilişkiyi hall katsayısının pozitif değerleri alabilmesi durumunu açıklayamaması serbest elektron modelinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Bu olumsuz durumların giderilmesi için daha detaylı bir modele gereksinim duyulmuş ve bant teorisi ile açıklanmaya çalışılmıştır [33].

Elektronlara ait dalga fonksiyonlarının güçlü etkileşimleri ile dış yörüngelerdeki enerji bantlarının genişliği iç yörüngelerdeki enerji bantlarının genişliğine göre daha fazladır. İç yörüngelerde bulunan elektronlar komşu atomlardan daha az miktarda etkilendiklerinden bu elektronların çekirdeğe bağlanma enerjileri daha büyüktür. Yarılma meydana geldikten sonra dıştaki bantların üst üste binme ihtimali vardır. Dış bantların kuantum durumları genel olarak ya tamamen ya da kısmen doludur. Bantlar arası elektron geçişleri, Pauli Dışarlama İlkesi'ne göre başlar ve istatistiksel denge kurulana kadar devam eder. Bu sayede alt kısımdaki bantlar üst kısımdaki bantta bulunan elektronlarla doldurulur.

Katıda oluşan enerji bantları arasındaki enerji seviyelerinde elektron yer almaz. Bu durumda elektronların hem olacağı hemde olamayacağı enerji bölgeleri vardır. Elektronların olmadığı bantlara yasak enerji bantları denir. Şekil2.4 de katkısız bir yarıiletkenin mutlak sıcaklıktaki ve oda sıcaklığındaki bant yapısı gösterilmektedir. Burada elektronlarla tamamen dolu olan banda değerlik bandı, değerlik bandının üzerinde bulunan ve yasak enerji aralığı ile ayrılmış banda da iletkenlik bandı denir.



Şekil 2.4: Katkısız yarıiletkenlerde değişik sıcaklıklardaki enerji bant diyagramı.

a) $T=0$ K b) $T>0$ K

Yarıiletken malzemelerde mutlak sıcaklıkta yarıiletken malzemenin elektronlarının tamamı değerlik bandında olduğundan elektrik iletkenliği yoktur. Bu sıcaklık değerinde yarı iletken malzeme mükemmel bir yalıtkan davranışı sergiler sıcaklık $T=0$ K'den başlayarak artırılırsa elektronlar ısı enerjisi ile yasak enerji aralığını aşarlar ve iletkenlik bandına geçerler. Bu sayede iletkenlik bandındaki elektronlar ve değerlik bandındaki holler, bir elektrik alan uygulandığında elektriksel iletkenliği katkı sağlar bu olay yarıiletkenlerde iletkenliğin sıcaklıkla doğru orantılı olduğunu gösterir. Holler tek başlarına hareket etmezler ancak komşu elektronlar bu holleri doldurmak suretiyle yeni hol oluştururlar [23,26, 29,34].

Katı kristallerin bant yapıları, kristallerin yapısındaki serbest elektronların veya bir serbest holün davranışı hakkında bilgi(ler) vermektedir. Böylece katının bant yapısının bilinmesi sayesinde, o katının elektriksel ve optik karakterizasyonu hakkında daha çok bilgi edinilebilir [35].

Genellikle yarıiletken malzemeler içinden büyük yasak enerji aralığına sahip olanlar tercih edilir. Bu tür yarıiletkenlerde sıcaklık etkisi ile iletkenlik bandına geçen elektronların sayısı az olduğundan, yarı iletken malzemenin karakteristiklerinde de büyük değişiklikler görülmez. Bundan dolayı Silisyum (Si) kristaller, kolay hazırlanabilirlik ve düşük maliyet özelliğine sahip olan Germanyum (Ge) kristallerine tercih edilirler [36].

2.5 Fermi Dirac Dağılım Fonksiyonu

Elektronların enerji düzeylerinin hangi durumlarda boş veya dolu olduğu Fermi-Dirac istatistiği ile tanımlanır. Bu dağılım elektronların sıcaklık ve fermi enerjisi veya fermi düzeyi ile karakterize edilir [22]. Mutlak sıcaklıkta fermi enerjisi elektronların işgal ettiği en üst enerji seviyesi olarak tanımlanır [26-30]. Daha yüksek sıcaklıklarda fermi enerjisi bir durumun işgal edilme ihtimalinin 0,5eV'ye düştüğü enerji şeklinde de tanımlanır [29]. Yarıiletkenlerde serbest taşıyıcıların miktarını tespit etmek amacıyla basit istatistiksel sonuçlar kullanılır.

Katı içinde sistem T sıcaklığında iken elektronun E enerji seviyesini işgal etme ihtimali Fermi Dirac dağılım fonksiyonu f(E), 2.9 ile ifade edilir.

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_f}{kT}} + 1} \quad (2.9)$$

Burada fermi enerji düzeyi, k boltzman sabitini ve T mutlak sıcaklığı ifade eder. f(E) fonksiyonun E enerjisine göre değişimi şekil2.5'de gösterilmiştir. Bu fonksiyonun E enerjisine göre değişimi sıcaklıkla şu şekilde ilişkilidir [37,38] ;

a) T=0 K'de E<E_f için, f(E) fonksiyonu $f(E) = \frac{1}{\frac{E-E_f}{kT} + 1}$ (2.10) buradan

f(E)=1 bulunur.

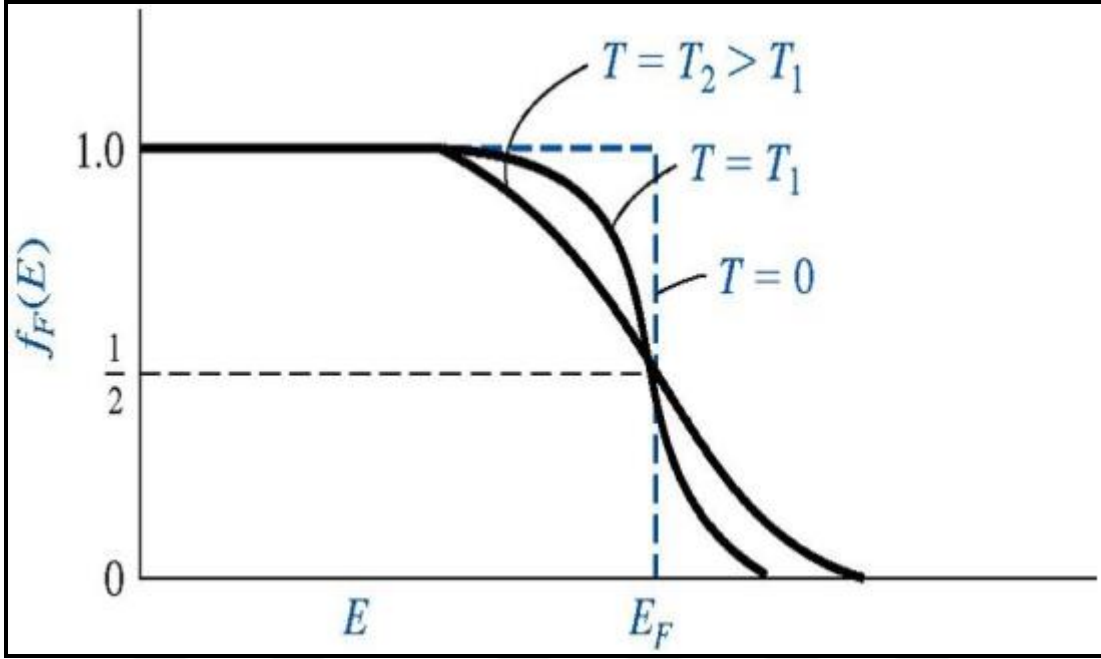
b) E>E_f için, f(E) fonksiyonu $\frac{1}{e^{\frac{E-E_f}{kT}} + 1}$ (2.11)

bulunur.

Yani T=0 K'de fermi enerjisinin altındaki tüm durumlar doluyken, fermi enerjisinden büyük enerjili tüm durumlar boştur [33,35].

1) T > 0 K'de ve E=E_f ise f (E) fonksiyonu olur. Buradan f (E) = $\frac{1}{2}$ bulunur.

Bu fermi enerji düzeyinin işgal edilme ihtimalinin $\frac{1}{2}$ ' ye eşit olduğunu gösterir [34-35].



Şekil 2.5: Fermi- Dirac dağılım fonksiyonu.

$T > 0$ K ve $E \gg kT$ olursa $f(E)$ fonksiyonu

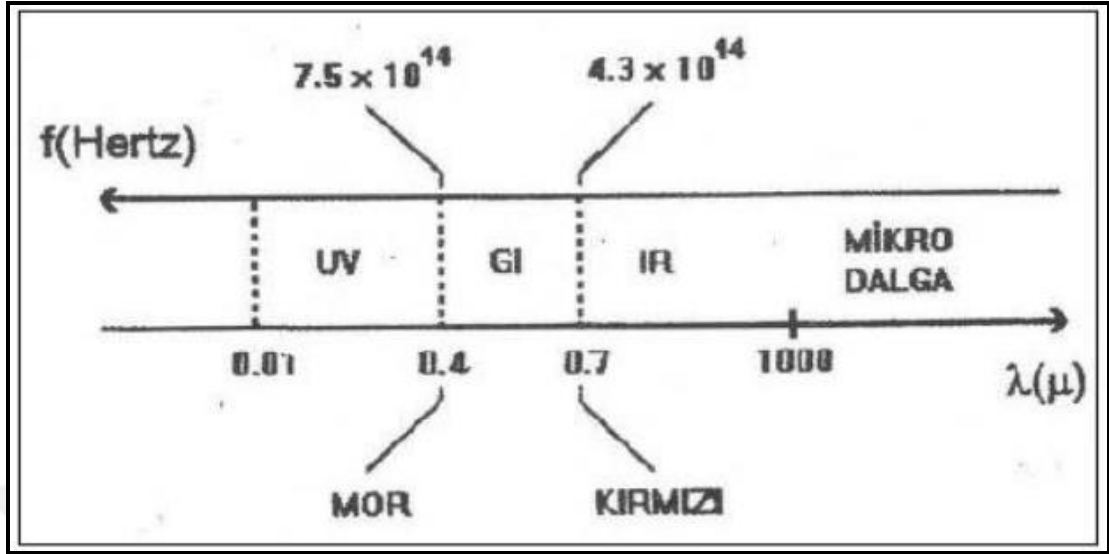
$$f(E) = e^{-\frac{E-E_f}{kT}} \quad (2.12)$$

Fonksiyonuna dönüşür. Bu klasik Maxwell – Boltzman dağılım fonksiyonudur. Yarıiletkenlerde iletim bandında bulunan elektronlar ve valans bandında bulunan boşluklar için bu dağılım fonksiyonu kullanılır. Bu sonuçlar göstermektedir ki yarıiletkenlerde enerjisi E_f civarında olan veya E_f den daha büyük elektron ya da holler iletkenliği artırır. Şekile göre sıcaklık artışı yüksek enerjili durumların işgal edilmesini artırmaktadır. Bunun sebebi sıcaklık artışı sistemin tüm enerjisini artırır [37,38].

2.6 Fotodiyotlar

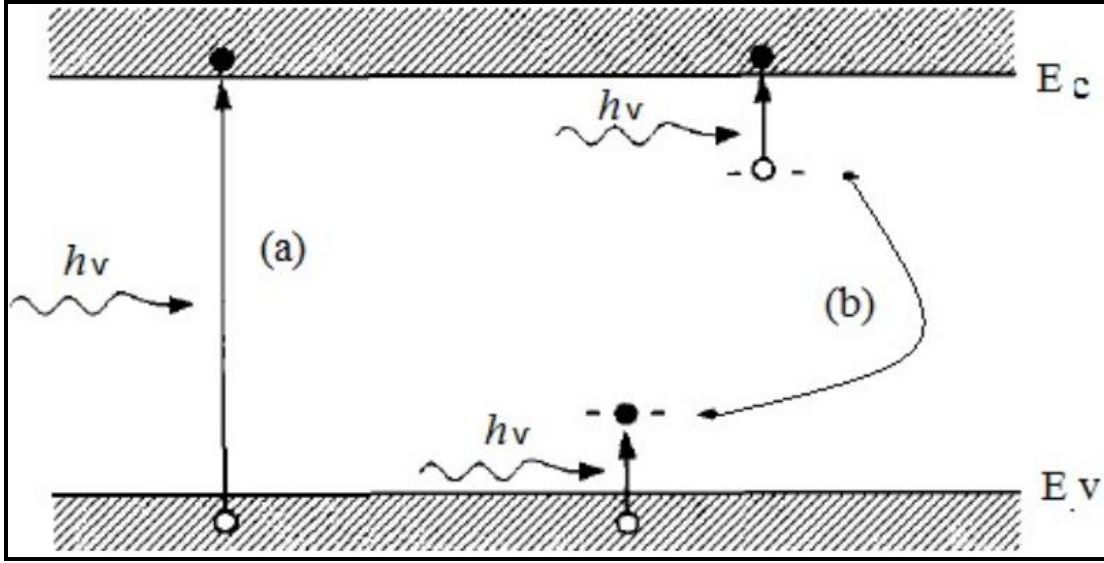
Görünür ışığı, ultraviyole ışımayı veya ışımayı algılayıp elektriksel sinyale dönüştüren dönüştürücülerdir. Işıma giriş birimleri lüks (görünür ışık için) Watt/m^2 veya **Watt** olabilir. Elektriksel çıkış birimleri olarak volt veya amper kullanılır [39].

Farklı frekans ve dalga boylarına göre ışımaların optik bant üzerindeki dağılımı şekil 2.6'daki gibidir.



Şekil 2.6: Farklı frekans ve dalga boylarına göre ışımaları optik bant üzerindeki dağılımı.

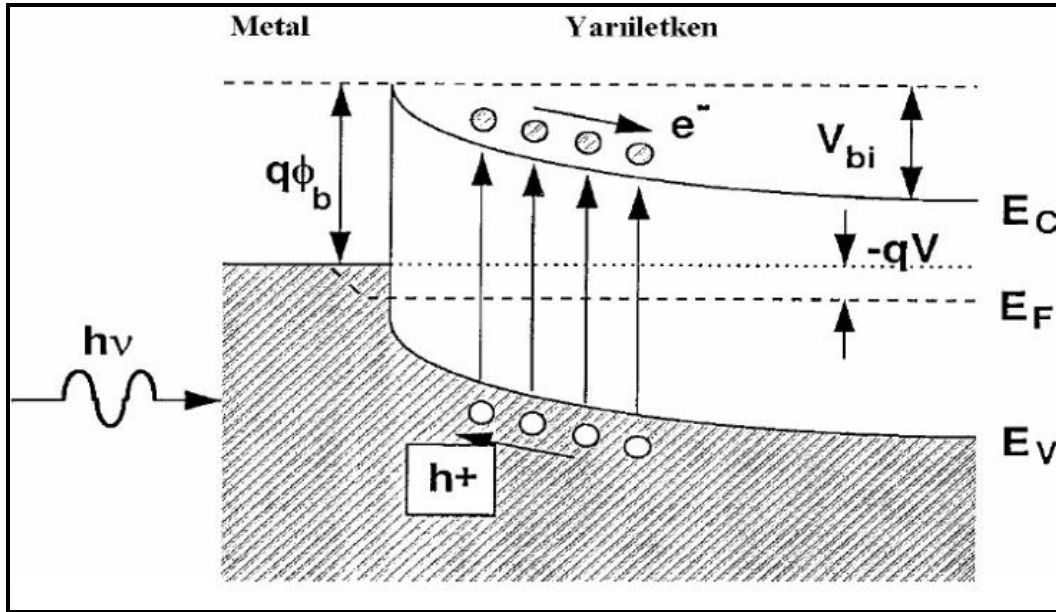
Fotoiletkenlik malzemenin elektromanyetik ışımaları soğurup elektriksel iletkenliğin değişim göstermesidir. Bir yarıiletken malzemenin fotoiletken olarak adlandırılabilmesi için yapısında serbest elektronlar ve holler bulunması gerekir. Işık yarı iletken malzeme tarafından soğurulduğunda holler ve serbest elektronlar rastgele dağılır ve elektriksel iletkenlik artar. Yarı iletken malzemelerin ince film veya kalın olacak biçimde kontaklar ile karşılıklı yapıştırılması ile oluşur. Şekil3.1'de üzerine ışık düşen fotoiletkenin yapısındaki yüklerin bantlar arasında nasıl geçiş yaptığını veya yasak enerji aralığının üstüne çıkarak iletkenliğin nasıl arttığını göstermektedir [40].



Şekil 2.7: Fotonlarla uyararak (a) bantlar arası geçiş (b) safsızlık seviyesi ile iletim bandı arasındaki fotouyarma.

2.6.1 Metal-Yarı İletken Fotodiyotlar

Fotodiyot, tükenim bölgesinde serbest yük taşıyıcılarına ve yüksek bir elektrik alana sahiptir. Tükenim bölgesinde meydana gelen foto taşıyıcılar, yüksek elektrik alandan dolayı maddenin uç kısmına toplanır. Metal-yarı iletken eklemine klasik enerji-bant yapısı Şekil 2.8'deki gibidir.



Şekil 2.8: Aydınlatılan bir metal-yarıiletken eklemine şematik diyagramı [37,38,39].

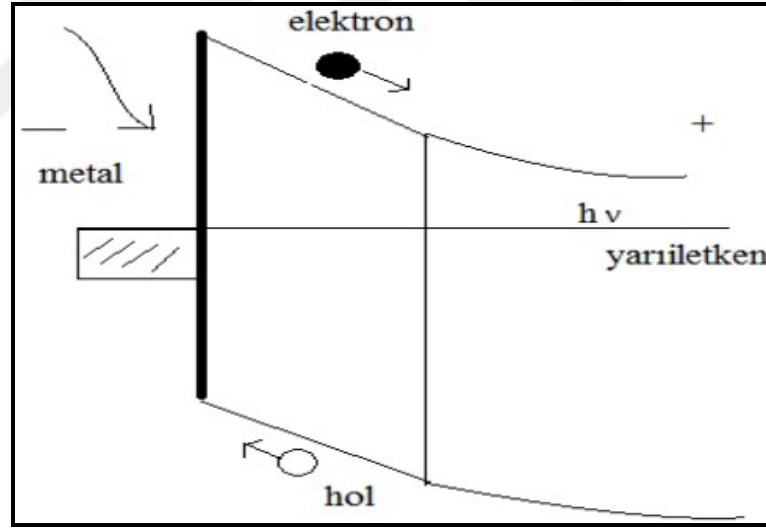
2.6.2 P-i-n Eklem Fotodiyotlar

P-i-n fotodiyotlar p-n eklem diyotların özel bir şeklidir. Fotodedektörler de kullanımı yaygındır. P-i-n yapıların tükenim kalınlığı, frekans cevabı ve kuantum verimliliği şeklindeki özelliklerden dolayı fotodiyotlarda çoğunlukla tercih sebebidir. Malzeme ışığı sorduğunda elektron ve hol çiftleri oluşur. Fotodiyotlar p-n eklem diyotların p ve n bölgeleri arasındaki arındırılmış bölge içine asal bir yarı iletken eklendiğinde p-i-n fotodiyot adını alır [43].

Fotodiyot ve güneş pillerinde verimi artırma amaçlı p-i-n eklemeler kullanılabilir.

2.6.3 Schottky Fotodiyot

Bu foto diyot türünde yarı iletken malzemenin üst yüzeyinde iki veya daha çok kontak oluşturmak mümkündür. Dışarıdan potansiyel fark uygulandığında elektrotlar arasında geçiş sağlanabilir. Şekil (2.9) Optik güç kaybını minimize etmek koşuluyla yüksek hıza ulaşılabilir [44].



Şekil 2.9: Sıfır beslemede Schottky fotodiyotta oluşan fotoakım [41].

2.6.4 Heteroeklem Fotodiyot

Bir foto diyot farklı yasak enerji aralıklarına sahip farklı iki yarıiletkenin birleştirilmesi ile heteroeklem haline getirilebilir. Eklem yapıların önemli avantajlarından biri eklem mesafesine bağlı olmayan kuantum verimidir. Çünkü meydana gelen geniş bant aralığı optik gücün iletimi için kullanılabilir [40]. Karanlık akımı da küçüktür diğer önemli bir özelliği de budur [40,41].

Eklemler bir malzemedeki diğerine geçiş uzunluklarına göre kademeli ve ani şeklinde iki çeşittir. Ani heteroeklemde geçiş birkaç atomik uzaklıkta gerçekleşir ($\leq \mu\text{m}$) kademeli heteroeklemde birkaç difüzyon uzunluğunun üzerinde gerçekleşir. Heteroeklemler de iki tarafındaki elektriksel iletkenliğe göre ikiye ayrılır. İki yarıiletken aynı tip iletkenliğe sahipse izotip, farklı tip iletkenliğe sahipse anizotip heteroeklem şeklinde adlandırılır. Heteroeklemler yasak enerji bant aralıklarının büyüklüklerine göre p-n ya da n-p şeklinde adlandırılır. Yasak enerji bant aralığı daha küçüğün tipi önce daha büyük olan malzemenin tipi sonra söylenir. Yasak enerji aralığı küçük olan n tipi büyük olan p tipi ise bu heteroeklem n -p heteroeklem yasak enerji aralığı p tipi malzemede n tipine nispeten daha küçük ise p-n heteroeklem denir [45].

2.6.5 Fotodiyotların Akım -Voltaj Karakteristiği

Fotodiyotların üç tane ana karakteristiği vardır bunların birincisi; akım (I)- voltaj (V) karakteristiği, kuantum verimi karakteristiğidir ve bant genişliği (çalışma hızı) karakteristiği şeklindedir. Fotodiyotun verimliliği bu üç ana özelliğe göre değerlendirilir. Düşük karanlık akımı ve yüksek bozulma voltajı diyot eklem özelliğinin iki belirtisidir. Düşük karanlık akımı, daha fazla hassasiyet demektir ve fotodiyota ışık uygulamadan ters polar (la)ma altında diyottan geçen akımdır [41, 42, 49].

Foto diyotun aktif alanı üzerine düşen ışık şiddeti artırıldığında bu bölgede yer alan eğriler tamamen negatif akım yönünde aşağı yönde değişir. $V=0$ ekseninde bu eğrilerin akım eksenini kestiği yer kısa devre akımını (I_{sc}) verir.

2.6.6 Fotodiyotların Kapasite- Voltaj Karakteristiği

Foto diyotlarda voltaj (V) ile kapasitans (C) arasındaki ilişki aşağıda yer alan bağıntı ile bulunur.

$$\frac{1}{C^2} = \left[\frac{2}{\epsilon_0 \epsilon_s q N d A^2} \right] \left[V_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right] \quad (2.13)$$

V_{bi} difüzyon voltajıdır [31].

2.6.7 Fotovoltaik Parametreler

Güneş pillerinin veya fotodiyotların yük özelliklerinin tespiti çeşitli parametrelerin analizi yardımı ile yapılır. Bu parametreler, spektral kuantum verimi (η), açık-devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), doldurma faktörü (FF), maksimum güç noktasındaki voltaj (V_m), maksimum güç noktasındaki akım (I_m), maksimum çıkış gücü (P_m), seri direnç (R_s) ve şönt direnç (R_{sh})'tir[41, 42, 46, 47].

2.6.8 Kuantum Verimi ve Fotoduyarlılık

Kuantum verimi aygıtın terminallerinden birinden elektron toplama hızının, aygıtın foton soğurma hızına oranına denir [43].

$$\eta = \frac{r_e}{r_p} = \frac{n_e}{n_p} = \frac{I_p/e}{P_0/h\nu} = 1 - e^{-\alpha d} \quad (2.12)$$

r_p , gelen fotonların hızı (birim zamanda soğrulan fotonlar), r_e terminalerde elektron toplama hızı (birim zamanda toplanan elektronlar), n_e Δt sürede toplanan elektron sayısı, n_p ise aynı Δt sürede detektöre ulaşan foton sayısıdır.

Büyük soğurma katsayılı yarıiletken kullanıldığında ideal kuantum verimine daha küçük soğurma tabakası kalınlıklarında ulaşılır. Daha uzun dalga boyları kullanılırsa kullanılan dalga boylarında soğurma katsayısı küçük olacağından dedektör p ve n bölgeleri arasına kalın bir katkısız yarıiletken malzemenin büyütülmesi ile daha geniş asal bölgeye sahip olacak şekilde tasarlanabilir [43].

Dedektör yanıtı (R) ise; dedektör üzerine düşen optik güç başına üretilen akımdır;

$$R = \frac{I_p}{P_0}$$

$$I_p; \text{Çıkış fotoakımı} \quad (2.13)$$

P_0 ; Optik güç

Dedektör yanıtı ve kuantum verimi birbiriyle bağlantılıdır ve aralarındaki ilişki şu şekildedir [40].

$$R = \frac{I_p}{P_0} = \frac{\epsilon_n}{h\nu} = \frac{\epsilon n \lambda}{hc} = \frac{\epsilon}{h\nu} (1 - e^{-\alpha d}) \quad (2.14)$$

2.6.9 Seri Direnç

Fotovoltaik durumda bulunan fotodiyota ait doğrusallığı tanımlamada kullanılır, şu şekilde ifade edilir;

$$R_s = \frac{(\omega_0 - \omega_d)\rho}{A_j} + R_c \quad (2.15)$$

ω_0 ; alt kalınlığını

ω_d ; Tüketim bölgesi genişliğini

A_j ; Eklem yayıldığı alan

ρ ; Altlığın öz direncini

R_c ; kontak direnci ifade eder [26, 27, 34].

2.6.10 Şönt Direnç

Şönt direnci (R_{sh}) besleme voltajı uygulanmayan fotodiyot da meydana gelen gürültü akımını adlandırmada kullanılır. Bu direnç deneysel olarak fotodiyot +10mV veya -10 mV uygulanıp, fotodiyotun etkin direnci hesaplanarak bulunur. Fotodiyotun şönt direnci ne kadar yüksekse oluşan fotodiyotun idealliği de o kadar yüksektir.

2.6.11 TiO₂ İnce Filmler

İnce film kalınlığı birkaç mikrondan daha az olacak şekilde, bir alt taban üzerinde atomların biriktirilmesi ile üretilen atomik moleküller ve iyonik türlerin yoğunlaşmayan tarafından elde edilen küçük boyutlu maddelerdir. İnce ve kalın film arasında farklılıklar vardır. Kalın film üç boyutlu bir malzemeyi inceltme veya büyük

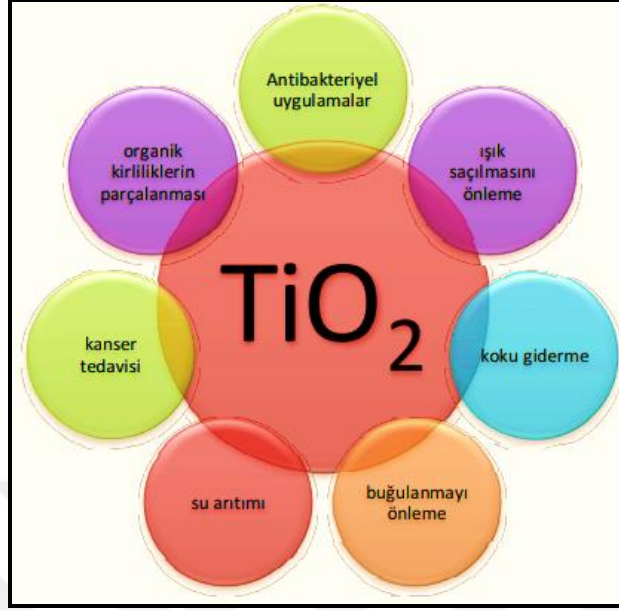
kümelerin, atomik moleküler, iyonik türlerin birleştirilmesi ile oluşan düşük yapılı bir maddedir. Tarihsel gelişim ve kullanım alanı çok geniş olan ince filmler elektronik aygıtların, optik kaplamaların, sert kaplamaların ve dekoratif malzeme imalatında elli yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Kullanılan miktar, yüzey ya da ince film tabakası üzerinde olduğundan ince film malzeme ve aygıtların zehirli maddelerinin azaltılması amacıyla da kullanılabilir. İnce filmin işlenmesi üretim kısmında enerji tasarrufu ve günlük yaşamda çevre dostu olma gibi avantajlar sunmaktadır. İnce filmler termal buharlaştırma veya foton ışınlama ile bir zemin üstünde biriktirilir [50].

Titanyum'u 1791'de İngiltere'de amatör jeolog ve papaz olan William Gregor keşfetmiştir. Manacan bölgesi civarında akarsu içinde siyah kumların miktatsızlandığını fark etti, böylece ilmenit içinde yeni bir element olabileceğini düşündü. Eş zamanlı olarak Franz Joseph Muller tam olarak adlandıramadığı benzer nitelikteki bir maddeyi türetti. Her iki durum ve olaylardan bağımsız olarak 4 yıl sonra Martin Heinrich Klaproth 1795'de Macaristan'da bir Rutil'de oksiti yeniden buldu Klaproth bulduğu oksidin yeni bir element barındırdığını fark etti ve elemente Titanyum adını verdi. Gregor'un önceki buluşunu öğrendiğinde bir miktar Manaccanite örneği alıp bu numune içinde Titanyum bulunduğunu doğruladı. Yeryüzünde kütlece çokluk sıralamasında onuncu element olan Titan (%0,58), Klor, Karbon, Kükürt gibi çok yaygın kullanılan ve tanınan elementlerin başında gelir. Yeryüzünde çok dağınık halde bulunduğundan işlenecek cevher çok azdır. Başlıca cevherleri Rutil (TiO_2), ilmenit ($FeTiO_3$) ve Fe cevherleridir. Saf Titan var olan Titan'ın Klor ile Titanyum tetra klorür ($TiCl_4$)'e dönüştürülmesi ve uçucu olan bu maddenin saf Magnezyum ile indirgenmesi ile üretilir.

Düşük Karbon yüzdeli ve Hidrojen kırılması olmayan saf haldeki Titan, Fe'den çok daha sağlamdır. Ayrıca erime noktası da daha yüksek olup yüzeyinde oluşan beyaz Oksit ve Nitrür katmanları sayesinde de korozyona karşı dayanıklıdır. Bu özellikleri nedeniyle uzay aracı, uçak ve füze imalatında benzersiz bir malzemedir [51, 52].

TiO_2 günümüzde bazı kanser çeşitlerinin tedavi edilmesinde çevre düzenleme faaliyetlerinde, su arıtma ve organik kirliliklerin parçalanmasında, camlarda oluşan buğlanmayı engellemede ve ışık saçılmasını önleme amaçlı olacak şekilde çok geniş

bir kullanım alanına sahiptir. Şekil2.10'da TiO_2 'nin günümüzdeki kullanım alanları gösterilmektedir.



Şekil 2.10: TiO_2 'nin kullanım alanları.

2.7 TiO_2 Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Gümüşe çalan beyaz renge sahip Titanyum elementi çok sert ve parlaktır erime noktası $1660^{\circ}C$ ve özgül ağırlığı 4.5 gr/cm^3 'tür, metal haldeyken kuvarı çizebilecek sertliktedir. Cevher yoğunlaşmasının seyrek olması ve cevherden Titanyum elde etmek çok zor olduğu için Titanyum çok değerli bir metaldir [53]. Düşük fiyat ve hazır malzeme olma gibi özellikleri TiO_2 birçok sanayi uygulamasında boya, kâğıt, plastik, kozmetik vs. cazip kılmaktadır. TiO_2 ince filmler termal oksidasyon, sıçratma kimyasal buhar biriktirme gibi çeşitli yöntemlerle hazırlanmaktadır. Oksijen ve suyu ayırtmak amacıyla fotokatalitik olarak TiO_2 kullanımı 1970'li yılların başlarına Fujisihima ve Honda'nın raporlarına uzanmaktadır [54].

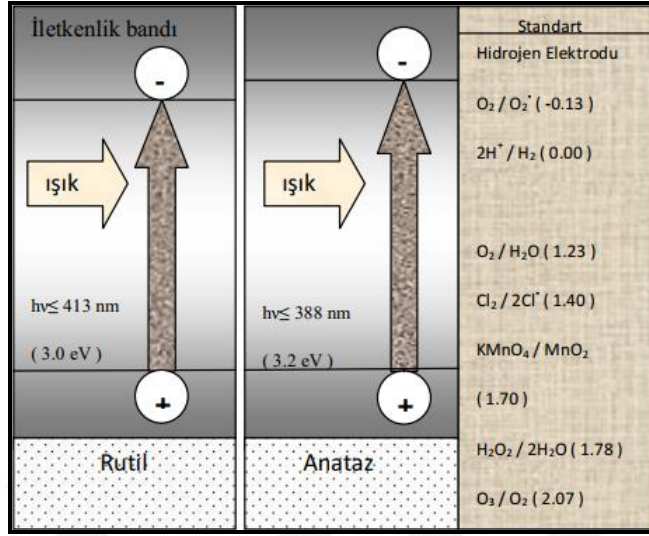
Literatürün gösterdiği gibi TiO_2 'nin fotokatalitik aktivite özelliği Fujisihima ve Honda'nın önderliğinde ortaya konulmuş ve dünya'yı olumsuz etkileyen önemli bir sorun olan çevre kirliliğine çözüm teşkil etmesi nedeniyle bu konu üzerindeki çalışmalar artmıştır. 1977'de Frank ve Band toz halindeki TiO_2 ile sudaki siyanürü parçalamak suretiyle çevresel arındırma ve arıtma alanındaki ilk çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışma sonrasında organik ve inorganik su kirliliğinin arıtılması ile

ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. TiO_2 su arıtma işlemini gerçekleştirdikten sonra su içinde kalan TiO_2 tozlarının temizlenmesi sorunu ile TiO_2 'nin farklı bir formda üretilmesi gerektiği düşünülmüştür. TiO_2 'nin ince film halinde oluşturulmasına yönelik ilk çalışmalar 1987'de Matthews ve 1995'te Heller tarafından yapılmıştır [55].

TiO_2 kristalleri tabiatta Amorf, Brookit, Anataz ve Rutil şeklinde 4 formda bulunur. Brookit formu çok az olup fotokatalizör olarak çok nadir kullanılabilir. Amorf TiO_2 çok nadir de olsa XRD piki verir. Ayrıca fotokatalizör olarak herhangi bir etkinliğe sahip değildir. Ve Anataz halleri genel olarak fotokatalizör gibi kullanılmakta fakat Anataz haldeki TiO_2 'nin en fazla fotokatalitik etki gösterdiği bilinmektedir [56]. Anataz ve Rutil yapı TiO_6 oktahedra zincirlerinin düzeni ile tanımlanır. Her iki yapıdaki Ti^{+4} iyonunun 6 tane O^{-2} iyonundan oluşan oktahedran tarafından çevrelenir. Bir tane Oksijen atomu üç tane Titanyum atomu ile bağ yapmıştır. Dolayısıyla üç tane oktahedraya aittir [57].

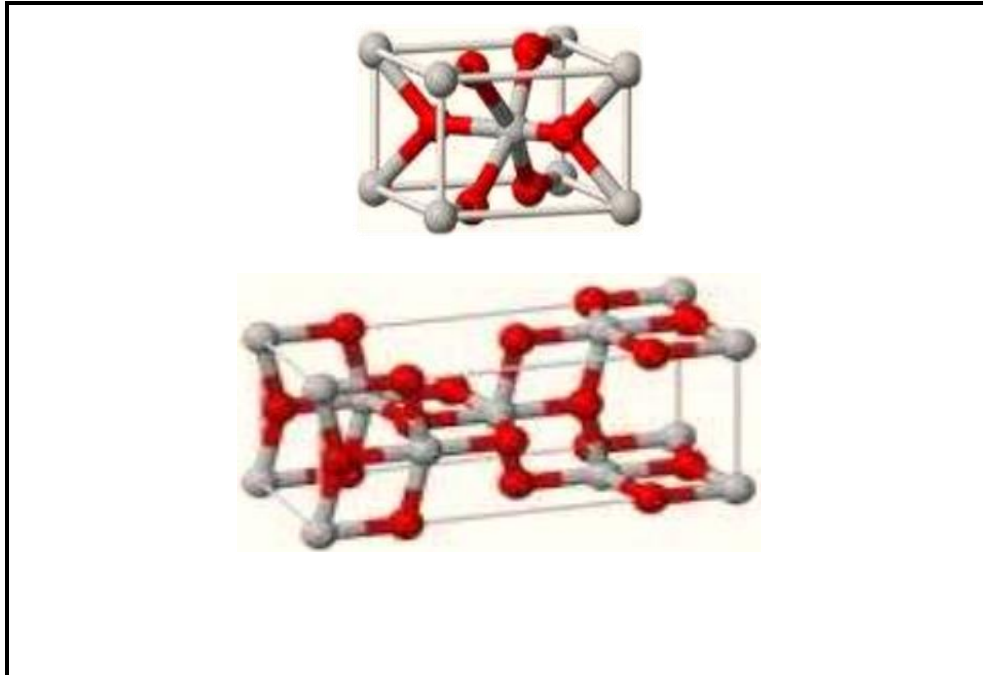
Anataz formunun Rutil'den daha fazla fotoaktif olmasının nedenlerinden bir tanesi de bant enerji yapılarının farklı olmasıdır. Anataz'ın yasak bant aralığı enerjisi 3.2eV'dir ve bu 338 nm ve daha küçük dalga boylarına sahip ışınları soğurması demektir. Rutilin yasak bant aralığı enerjisi 3.0eV olup 413nm ve daha küçük dalga boylarındaki ışınları soğurması demektir. TiO_2 yarıiletkenin yasak bant aralığı enerjisine eşit veya yasak bant aralığı enerjisinden daha fazla enerji ile uyarılırsa değerlik bandında bulunan bir elektron iletim bandına geçer. Değerlik bandında pozitif yüklü bir hole oluşur. Değerlik bandında oluşan bu haller fotokatalistin yüzeyindeki su ile tepkimeye girerek çok hafif reaktif olan Hidroksil radikalini (OH) oluşturur. Hem holler hem de hidroksil radikalleri çok güçlü oksidantlar olup pek çok organik malzemenin oksitlenmesinde kullanılırlar. Rutil ve Anataz'ın değerlik bant enerjileri, şekil2.11'deki enerji diyagramında görüldüğü üzere çok düşük bir seviyededir. Bu durum, Anataz'ın ve Rutil'in değerlik bantlarındaki hollerin (ve hidroksil radikallerin) yüksek oksitleme gücüne sahip olduğunu göstermektedir. Rutil'in valans bant enerjisi, suyu elektrolitik olarak Hidrojen'e indirgemek için gerekli potansiyeli yakın değerdedir, fakat Anataz'ın valans bantı enerjisi, enerji diyagramında daha yüksektir. Bu Anataz'ın daha yüksek redükleme gücüne sahip olduğunu gösterir. Bu yüzden Anataz, çok önemli tepkimelerden olan molekül

haldeki Oksijen'in (O_2) süper oksite (O_2^-) elektrolitik redüksiyonu nu gerçekleştirebilir [55].



Şekil 2.11: TiO_2 ' in Rutil ve Anataz enerji diyagramı.

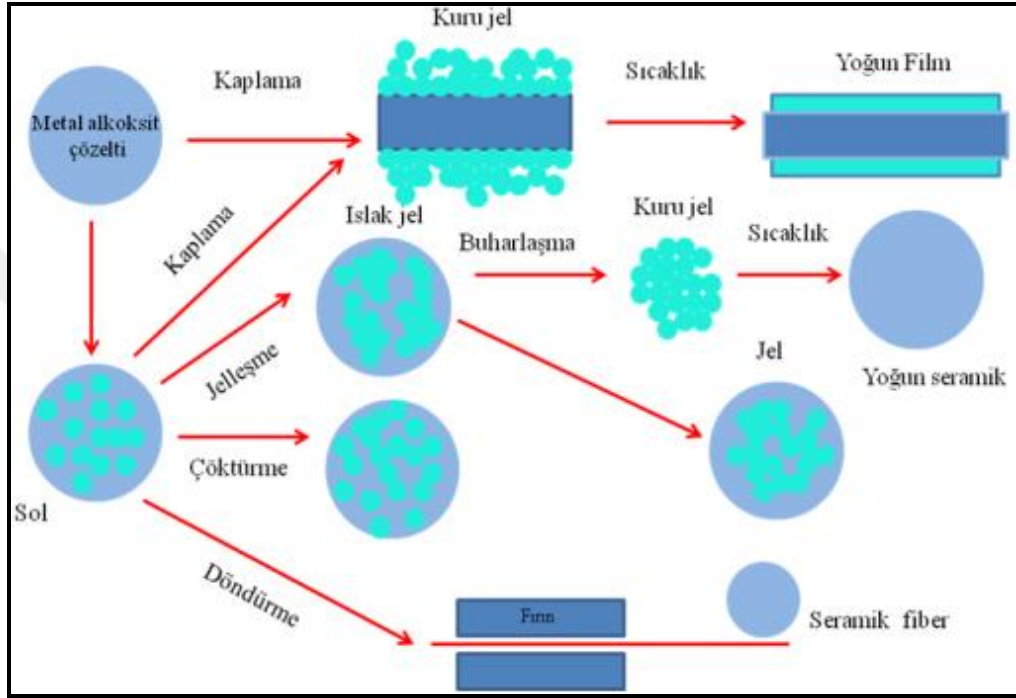
Rutil TiO_2 yüksek sıcaklıkta Anataz, TiO_2 'ten daha kararlı yapıdadır. Bu nedenle volkanik kayalarda yaygın olarak bulunur. Bu yüzden TiO_2 bu formu pigment, boya ve kozmetik gibi sanayi sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. TiO_2 düşük sıcaklıklarda kararlılık eğilimi göstermektedir. Ve yüksek sıcaklıklarda Rutil formuna dönüşür. Şekil 2.11'de TiO_2 Rutil ve Anataz yapısı gösterilmiştir [56].



Şekil 2.12: Sırasıyla TiO_2 'nin Rutil ve Anataz yapısı.

2.8 Sol-jel Yöntemi

Sol-jel yöntemi 1846 yılında rastlantısal bir şekilde icat edilmiştir. Ebelmen'in hazırladığı bu karışım o zamanlarda fizikçiler tarafından yeteri kadar ilgi görmemiştir. Geffcken 1939'da SiO₂ filmin sol-jel yöntemi ile hazırlanmasının mümkün olduğunu öne sürmüş ve başarılı olmuştur. 1950'den sonra ise sol-jel yöntemi yaygın olarak kullanılmıştır [58].



Şekil 2.13: Sol-jel tekniği ile ince filmi kaplama yöntemi şematik gösterimi.

Sol katı haldeki malzemenin sıvı süspansiyondaki adıdır. Katı maddeler sıvı içerisinde dağınık halde bulunurlarsa bu sisteme sol adı verilir. Moleküller arası Van Der Waals ile elektriksel kuvvetlerin etkisiyle yer çekimine göre daha fazla olduğundan solü oluşturan maddeler dibine çökmez. Çökmeyen bu maddeler çözeltide genişleyerek büyük bir yapıya dönüşürse bu maddeye jel denir. Katı maddenin sürekliliği jele elastikiyet katar [59]. Sol-jel yöntemi ile; aşınmaya dayanıklı kaplamalar, fiber optikler (renk verici, yansıtmayan seçici yansıtıcı elektrokromik veya fotokromik, seçici soğurucular), optik amaçlı kaplamalar (lensler vb.) elektronik ve manyetik malzemeler (V₂O₅, WO₃ gibi) üretilmektedir.

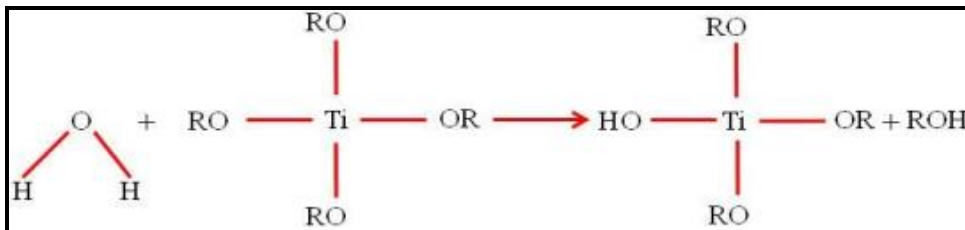
2.8.1 Sol-jel Yönteminde Kullanılan Bileşenler

Metal oksitler sol yapmak için ilk kullanılan maddelerdir. Genel olarak $M(OR)_n$ formülü ile gösterirler. M; metal malzemeyi, R; CH_3 (Metil), C_2H_5 (Etil) gibi alkil grubunu, n; metalin değerine bağlı değişken değeri ifade eder. Yapılarındaki yüksek elektronegatif OR grubuna bağlı olarak metal oksitlerin tepkimeye katılımları yüksektir. Fiziksel özelliklerdeki farklılıklar için OR'de bulunan alkil grupları değiştirilebilir. Metoksil (OCH_3), Etoksil (OC_2H_5) filmlerin yapısındaki fazla Karbon (C) buradan kaynaklanır. Katalizör, hiçbir tepkimeye katılmayan fakat tepkime hızını artıran malzemelerdir asit karakterli ve baz karakterli olmak üzere iki tür katalizör vardır. Asit karakterli katalizörler de kendi içinde organik ve inorganik şeklinde ikiye ayrılır. Glasiyel asetik asit inorganiktir, Nitrik asit, Hidroklorik asit, Hidroflorik asit birer organik asittir. Baz katalizör grubunda da Amonyumhidroksil yer alır.

Sol-jel yöntemindeki malzemelerden olan alkoller alkil (R) veya başka bir moleküle OH grubu eklenmesi ile elde edilen moleküllerdir. Sol-jel yönteminde başlangıç materyali seçilen metal oksitleri çözmede kullanılır ve çözücü alkoksitin özelliğine göre seçim yapılır. Yaygın şekilde, Metil alkol (CH_3OH , diğer bir adı metanol), Etil alkol (C_2H_5OH , diğer bir adı etanol), Propil alkol (C_3H_7OH , diğer bir adı Propanol) ve Bütil alkol (C_4H_9OH , diğer bir adı Bütanol) kullanılır.

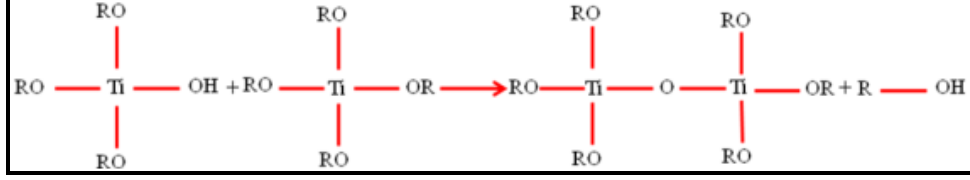
2.8.2 Sol-jel Oluşumu

Metal oksitler; su ile hemen reaksiyona girerler. Bir hidroksil (OH) iyonunun metal atomuna bağlanması nedeniyle bu reaksiyona hidroliz reaksiyonu denir. Genel olarak hidroliz reaksiyonu su ilavesi boyunca (OR) alkoksit grup ile (OH) hidroksil grubun yer değiştirdiği tepkimedir. Burada R alkil grubunu ifade eder. Hidroliz tepkimesi genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir,



Şekil 2.14: Hidroliz reaksiyonunun şematik gösterimi.

ROH alkol grubu bileşimini ifade eder. H₂O ve katalizör durumuna göre OR grupları OH oluncaya kadar tepkime sürer. İkinci tepkime türü ise yoğunlaştırma tepkimesidir. İlk tepkimede hidrolize uğramış olan iki malzeme, oksijen köprüsü ile bağlanır. Bileşenlerden biri hidroliz olmuş ise tepkime aşağıdaki gibidir şekil 2.15.



Şekil 2.15: Bir bileşeni hidrolize uğramış şeklinin şematik gösterimi.

Bu durumda tepkimede oluşan ürünler hidrolize uğrar ve hidroksil reaksiyonu kısmen yoğunlaşma reaksiyonu ile beraber bağlanır. Yoğunlaşma reaksiyonlarında su ve alkol gibi moleküllerde serbest kalabilir. Bu tür reaksiyonlarda daha büyük yapıli moleküller de oluşturulabilir. Yoğunlaşma tepkimelerinin sürekliliği ile oluşan prosese polimerizasyon denir ve 3 boyuta sahip, zincir yapıda polimerler oluşturulabilir. En az iki bağ içeren binlerce monomerler en büyük molekül olan polimerleri oluştururlar [60,61].

2.8.3 Sol-jel Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Organik ve inorganik ince filmlerin üretilmesi sol-jel yönteminin teknoloji açısından en önemli uygulama alanıdır. Sol-jel yöntemi haricinde alternatif kaplama yöntemleri de bulunmaktadır. Ancak sol-jel yöntemi diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır. Kaplama yapılan filmin mikro yapısının (Boşluk hacmi, boşluklu yapının boyutu, yüzey alanı) rahatlıkla kontrolünün sağlanması, katkısız ve homojen filmlerin düşük sıcaklıklar ile elde edilmesi, gerekli cihazların oldukça basit ve düşük maliyetli oluşu, vakumlu ortama ihtiyaç duyulmaksızın atmosfer ortamında uygulanabilirliği, hava kirliliğine neden olmaması ayrıca enerjiden tasarrufu ve geometrik şekil sınırlaması olmaksızın tüm geometrik şekilli malzemelerde uygulanabilirliği gibi ifade edilebilir. Sol-jel yöntemi de her yöntemin olduğu gibi avantajlarının yanında dezavantajları da vardır. Örneğin; kimyasal malzemelerin maliyeti fazladır, kaplama işlemi çok katmanlı yapılarda uzun zaman alır, filmlerin yapısında çökelti olarak Karbon'un kalması ve işlem esnasında fazla malzeme kaybı diyebiliriz sol-jel yönteminin dezavantajları için.

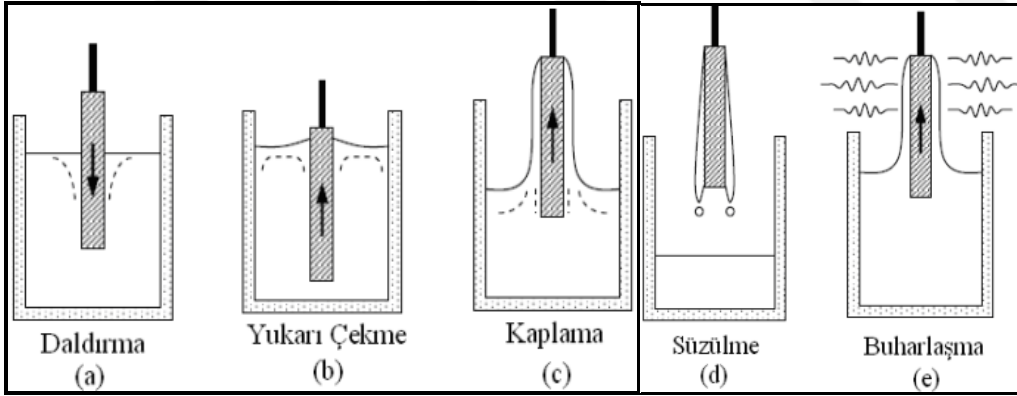
2.8.4 Sol-jel Yöntemi ile Film Kaplama Yöntemleri

İnce film kaplamalarında sol-jel yöntemi kullanılırken üç farklı kaplama yöntemi yaygın olarak kullanılır bu yöntemler şu şekildedir:

- * Daldırma ile kaplama (dip coating)
- * Döndürme ile kaplama (spin coating)
- * Püskürtme ile kaplama (spray pyrolysis)

2.8.4.1 Daldırma ile kaplama yöntemi

Bu yöntem genellikle saydam tabakaların eldesinde kullanılır. Daldırma ile kaplama yöntemi, oluşturulan çözeltiliye kullanılan altlık malzemesinin belirli bir hızla batırılıp aynı hızla geri çekilmesi şeklindedir temel olarak. Bu yöntem beş adımda gerçekleşir. Bu adımlar şekil 2.16'daki gibidir. Bu işlemler; daldırma (1), çıkarma (2), kaplama (3), süzülme (4), ve buharlaşma (5) şeklindedir. Bu işlem basamakları sonunda kaplama oluşur. Oluşan kaplamanın kalınlığı çözeltiliye oluşturan malzemelere, altlık malzemenin çekildiği hıza ve viskoziteye (Sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç) bağlıdır.



Şekil 2.16: Daldırma ile film kaplama işleminin şematik gösterimi.

Alkol benzeri uçucu özelliğe sahip çözücülerin kullanıldığı kaplamalarda süzme işlemi gerekmediğinden süzülme safhasına gerek yoktur. Hareketli olan taşıyıcı, çözeltiliye daldırıldığında kaplanan bölgeden dışarıya çıkarken sıvının bir kısmını dışarıya sürükler ve bölge üstünde çözelti içeren bir sınır katman oluşur. Kaplama ve süzülme safhasında sözü edilen sınır katman, iç katman ve dış katman olmak üzere iki çeşittir. İç katman taşıyıcı ile beraber yukarı doğru hareket halindeyken, dış

katman tersi yönde hareket eder ve çözeltiye geri döner. Kaplama ile oluşan filmin yeni kalınlığı yukarı ve aşağı yönde hareket eden katmanları ayıran ana akıntının (Streamline Çizginin) büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Film kalınlığını ve ana akıntının durumunu film kaplama alanındaki kuvvetler belirler bu kuvvetler şu şekildedir;

- * Viskoziteden dolayı hareketli olan taşıyıcının uyguladığı yukarı yönlü çekme kuvveti
- * Kütle çekim kuvveti (Yerçekimi kuvveti)
- * Sıvının konkav eğrisinde yüzey gerilimi bileşke kuvveti
- * Kaplama alanına ulaşan sıvının sınır katmanının eylemsizlik momenti.

Sıvı viskozitesi η taşıyıcı hızı v kaplanan film kalınlığı h sürüklenme ($\propto \frac{v}{h}$) ile yer çekimi kuvvetini (ρgh) dengeleyen kalınlık olarak tanımlanır.

$$h = C_1 \left(\frac{\eta v}{\rho g} \right)^{1/2}$$

C_1 ; Orantı sabiti.

Taşıyıcı hızı ve sıvının viskozitesi yeterli düzeyde çok değilse, sol-jel yönteminde sık karşılaşılan durum, denge viskoz sürüklemenin sıvı - buhar yüzeyindeki gerilim (γ_{LV}) oranı ile tespit edilir. Burada kalınlığı ifade etmekte Landau-Levich bağıntısı kullanılır [62].

$$h = \frac{0.94 (\eta v)^{2/3}}{(\gamma_{LV})^{1/3} (\rho g)^{1/2}} \quad (2.16)$$

film kalınlığı hesaplamada kullanılan bu denklemler her zaman uygulanabilir değildir deneyler ile bunun doğruluğu belirlenmiştir [63].

Film kalınlığını etkileyen faktörler; pH etkisi, viskozitedeki değişkenlik, her sıvının newton sıvısı olmayışı ve içlerinde en etkili olanı buharlaşma etkisinin kullanılan bağıntılarda yer olmamasıdır. Daldırma yöntemi ile kaplanan filmlerde buharlaşma miktarı, filmin yüzeyindeki gaz miktarının yüzeyin dışına yayılma miktarı ile

orantılıdır. Daldırma süresince taşıyıcı hareketi buharlaşma miktarından ne kadar etkili olursa olsun pratikte ihmal edilmesi mümkündür.

Bu metot sayesinde yüksek oranda homojenize olmuş kaplama kalınlıkları sağlanabilir. Ayrıca istenilen kalınlık rahatlıkla elde edilebilir. İşlemler tekrarlanarak cam taban üzerine çok sayıda kaplama yapmak mümkündür. Bu şekilde çok sayıda metal oksit katman üst üste olacak şekilde kaplama yapılabilir. Bu işlem Optik yansıtma ve optik geçirgenlik şeklindeki bazı özelliklerin aktarılmasına olanak tanır. Yöntemin avantajlarından biri de 12 m² ebatındaki bir cam plakanın bile kaplanabilir olmasıdır. Ebatlar arttıkça kaplamanın maliyeti düşmektedir. Bu yöntem tüp, boru ve çubukların kaplanmasında da kullanılır. Daldırma yöntemi ile elyaf kaplama da gerçekleştirilebilmektedir [64].

Yöntemin en temel dezavantajı ise sıvının kaplanan yüzeyden akış hızını etkileyen küp şeklindeki ya da prizma şeklindeki yüzeyler için uygun olmamasıdır. Yatırım maliyetinin ucuz olmaması da diğer bir olumsuz özelliğidir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Deneysel İşlemler

Fe katkılu TiO_2 çözeltiler sol-jel yöntemi ile elde edildi ve p -tipi Silisyum (Si) yüzeyler (substratlar) üzerine spin kaplama yöntemi kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirildi. TiO_2 , sol-jel karışımın hazırlanmasında dört farklı derişim değerinde çözeltiler kullanılmıştır. Bunlar; 0,5 M Titanyum izopropoksit asetat çözeltileri 10 ml etanol (EtOH) çözeltileri içinde çözündürüldü. Üç farklı TiO_2 çözeltilerine mol oranları % 1, % 5 ve % 10 olan Demir (III) Nitrat ($Fe(NO_3)_3$) ilavesi yapıldı ve karışımlar 500 rpm de manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Katılar çözeltiler içinde tamamen çözünerek homojen hale geldiğinde çözeltileri dengeleyici olarak 0,5ml HCl ilave edildi. Son çözeltiler oda sıcaklığında 1 saat karıştırıldı. P tipi Silikon gofretleri kalan kirlere temizlemek için kimyasal bir temizleme Protokolü uygulandı Silisyum yüzeyler (substratlar) önce alkol de 5 dakika sonikleştirildi ve daha sonra suya aktarıldı beş dakika daha sono-kristalizasyon işlemi uygulandı.



Şekil 3.1: Numunelerin hazırlandığı deney düzeneği.

Sono-kristalizasyon işleminden sonra Si alttaşlar, Azot gazı ile kurutuldu. Katkısız TiO_2 , % 1 Fe katkılu TiO_2 , % 5 Fe katkılu TiO_2 , % 10 Fe katkılu TiO_2 karışımları

farklı alttaşlar üzerine kaplandı. Karışımlar iki sefer 3500 rpm de 30 saniye süre boyunca döndürülerek kaplandı. Karışım üzerinde kalan etanolün buharlaştırılması amacı ile ince filmler 5 dakika boyunca 120°C de kurutuldu ve numuneler 60 dakika boyunca 450°C de tavlandı. Alüminyum kontakları, 4.5×10^{-5} torluk basınçta PVD-HANDY /25-TE (Vaksis şirketi) vakumlu termal buharlaştırma kullanılarak hazırlandı; burada Al/ TiO₂/ AlFe /TiO₂/p-Si/ Al fotodiyotlar üretildi.

3.2 Katkısız TiO₂ ve Fe Katkılı TiO₂ Filmlerin Yüzeysel Özellik Analizi

Bu çalışmada sol-jel yöntemi ile üretilen katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince film numunelerinin yüzey özelliklerini araştırmak amacıyla, yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri "PARK SYSTEM marka XE-100E model Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)" ile analiz edilmiştir.



Şekil 3.2: Katkısız TiO₂ ve Fe katkılı TiO₂ ince filmlerin yüzey ölçümleri için kullanılan atomik kuvvet mikroskobu.

3.3 Katkısız TiO₂ ve Fe Katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Optiksel Özellik Analizi

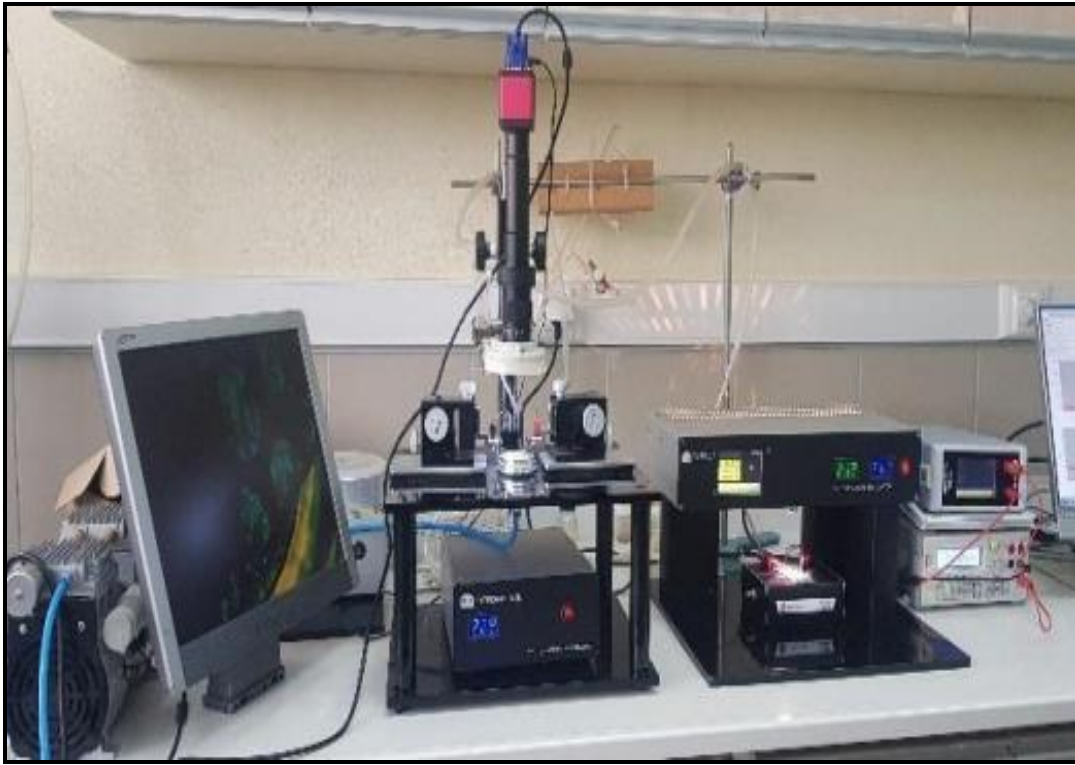
Bu çalışmada sol-jel yöntemi ile katkısız TiO₂ ve % 1, %5 ve % 10 Fe katkılı TiO₂ ince filmler hazırlanmıştır. Hazırlanan ince film numunelerinin UV ölçümleri UV3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR Spektrometre cihazı ile yapılmıştır. UV ölçümleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak ince filmlerin yasak enerji aralığı (E_g) grafikleri çizilmiştir.



Şekil 3.3: Katkısız TiO₂ ve Fe katkılı TiO₂ ince filmlerin U-V ölçümleri için kullanılan UV-VIS spektrofotometre cihazı.

3.4 Katkısız TiO₂ ve Fe Katkılı TiO₂ Filmlerin Elektriksel Özellik Analizi

Bu çalışmada sol-jel yöntemi ile üretilen katkısız TiO₂ ve Fe/TiO₂/p-Si diyotlarının Akım-Voltaj (I-V), Kapasitans-Voltaj (C-V) ve Akım-Zaman (I-t) karakterizasyonları oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. I-V ve I-t ölçümleri karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetlerinde (20mW/cm², 40 mW/cm², 60 mW/cm², 80 mW/cm², 100 mW/cm²) herbir numue için ayrı ayrı analiz edilmiştir. C-V ölçümleri her bir numune için 10 kHz-1 MHz aralığında analiz edildi. Bu ölçümler Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoteknoloji Laboratuvarındaki FYTRONIX FY-7000 elektronik cihaz karakterizasyon sistemi ile incelenmiştir.

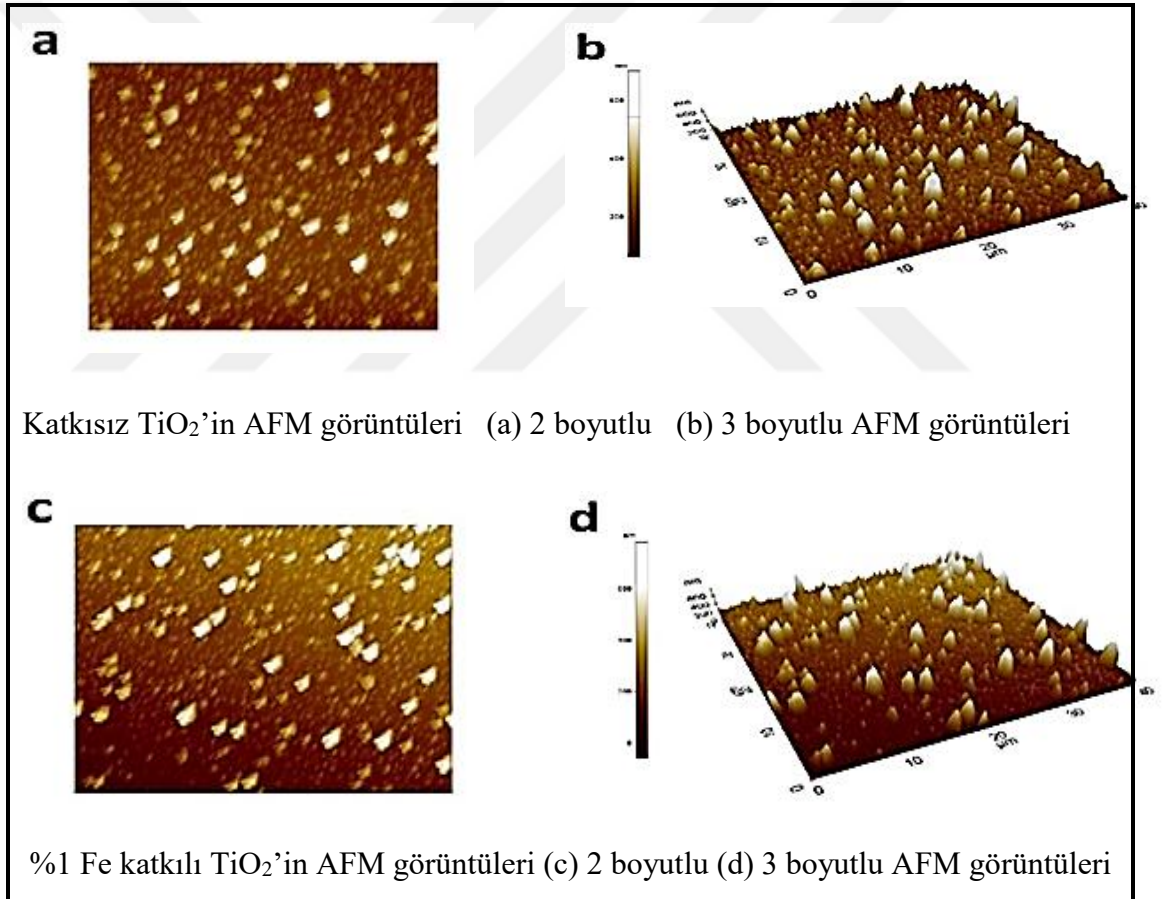


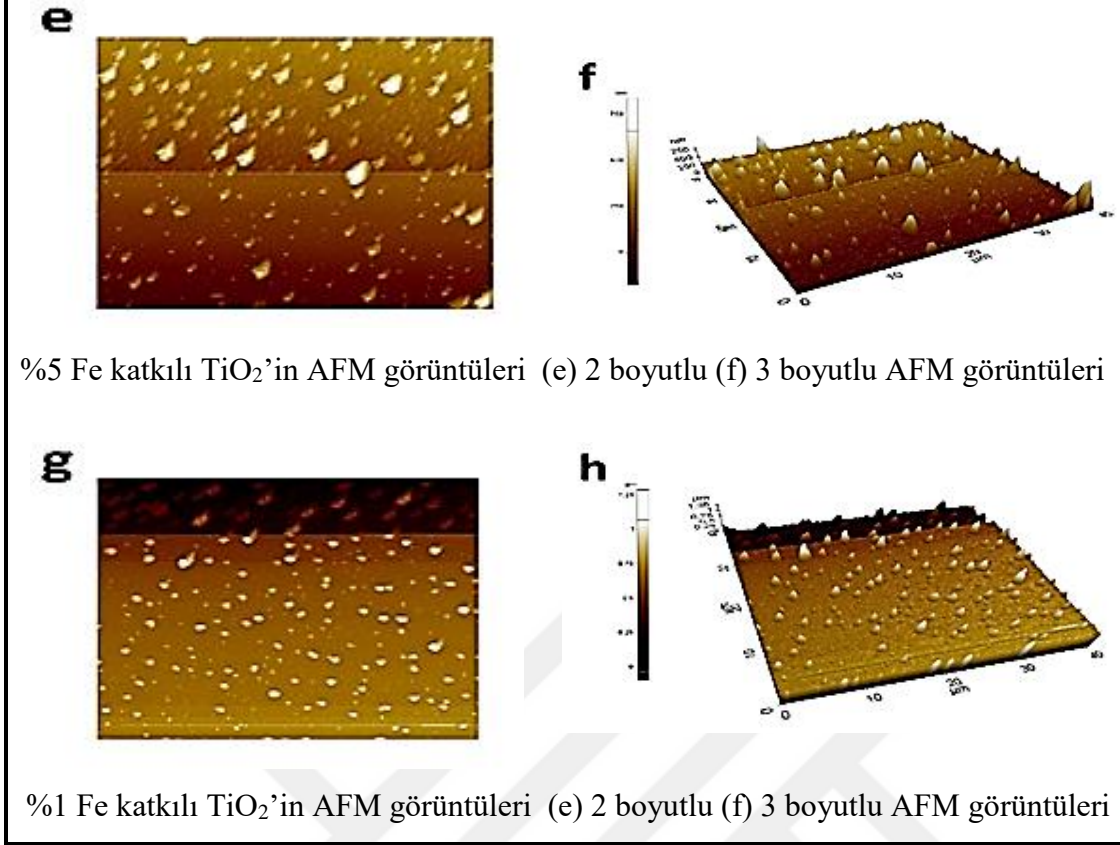
Şekil 3.5: Katkısız TiO₂ ve Fe/TiO₂/p-Si diyotlarının I-V, C-V ve I-t ölçümleri için kullanılan deney düzeneği

4. ÖLÇÜM SONUÇLARI

4.1 Katkısız TiO₂ ve Fe Katkılı TiO₂ Filmlerin Yüzeysel Ölçüm Sonuçları

İnce filmlerden alınan 40 µm x 40 µm boyutlarındaki AFM görüntüleri temassız modda elde edildi. Şekil 4.1’de AFM ile ölçülen numunelerin yüzeysel özelliklerinin yüzey topoğrafyası gösterilmektedir.



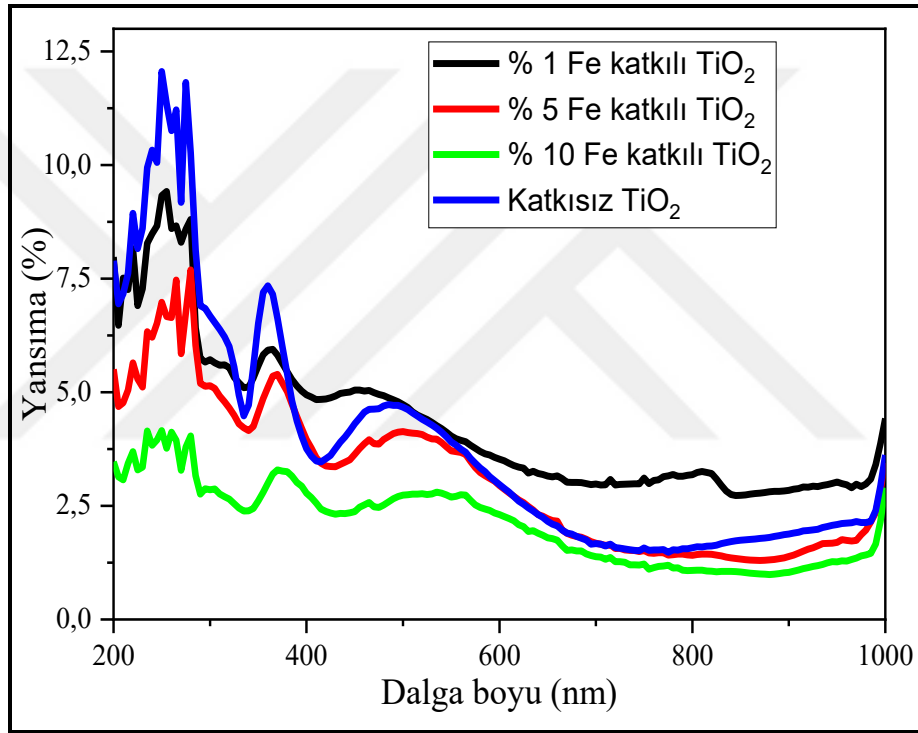


Şekil 4.1: TiO₂'in AFM görüntüleri.

İnce filmlerin AFM görüntüleri incelendiğinde, ilk araştırmalar ince filmlerin parçacık benzeri taneciklerin ince film yüzeyini kapladığı tanecikli bir yapıda olduğunu ortaya koymuştur. Bireysel büyük kümelerin ince yüzeyine homojen bir şekilde yayıldıkları görüldü, Fe katkılanmış TiO₂ ince filmler için yükseklik dağılımı ortalama parçacık yüksekliğini 150nm olarak göstermektedir burada maksimum yükseklik 558nm dir. % 1 Fe katkılı TiO₂ ince filmler için yükseklik ortalaması; yükseklik dağılım ölçümünden yaklaşık olarak 200nm olarak ölçülmüştür. %5 Fe katkılı TiO₂ ince filmler için, ortalama yükseklik, maksimum küme yüksekliğinin 568nm olarak ölçüldüğü yükseklik dağılım analizinden 220 nm olarak elde edildi. %10 Fe katkılı TiO₂ ince filmler için, ortalama yükseklik, yükseklik dağılım ölçümünden yaklaşık olarak 600nm elde edildi, maksimum küme yüksekliği yaklaşık 977 nm olarak ölçülmüştür. Artan ortalama yükseklik artan Fe katkılama oranıyla elde edildi.

4.2 Katkısız TiO₂ ve Fe Katkılı TiO₂ Filmlerin Optiksel Ölçüm Sonuçları

Katkısız TiO₂ ve Fe Katkılı TiO₂ filmlerinin yansıtma, soğurma ve geçirgenlik gibi optik özellikleri 200 nm-1000 nm tarama bölgesinde ve oda sıcaklığında incelendi. Şekil 4.2' de TiO₂ ince filmlerin yansıtma spektrumları gösterilmektedir. Katkısız TiO₂ ince filmlerinin yansıtması, artan Fe katkısı oranı ile ters orantılı olarak azalmaktadır. 300 nm' den sonra dalgalanmalar, dalga boyundaki artışa bağlı olarak azalmaktadır. Ayrıca yansıtma eğrileri yaklaşık 250 nm'de maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Katkılanan Fe miktarının içeriğindeki artış ile ortalama tanecik yüksekliğinde önemli ölçüde artış Çizelge 1'de gözlenmektedir.



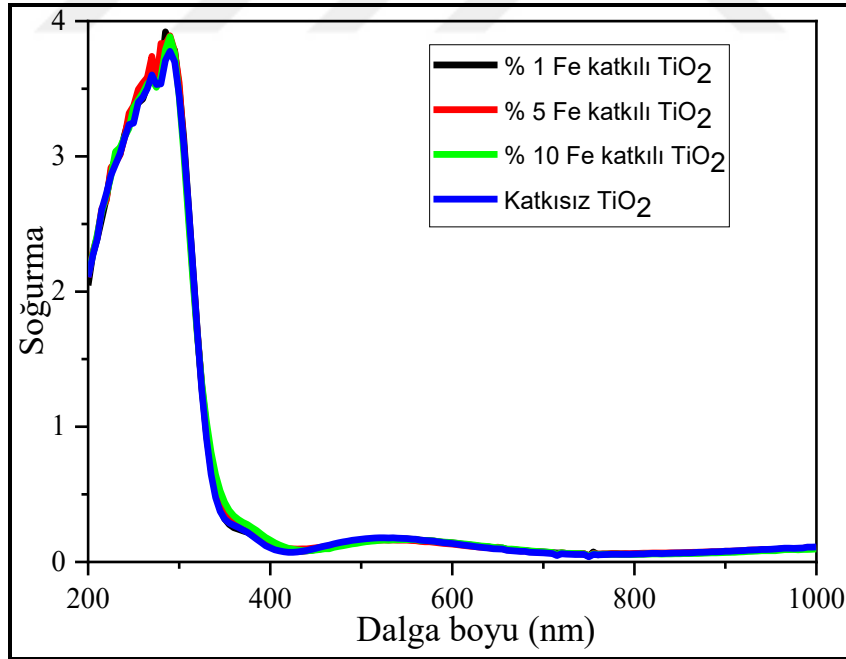
Şekil 4.2: Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince film numunelerinin yansıtma spektrumları.

Çizelge 4.1: Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince filmlerin yansıma spektrum değerleri.

Numune Adı	Katkısız TiO ₂	%1 Fe katkılı TiO ₂	%5 Fe katkılı TiO ₂	%10 Fe katkılı TiO ₂
Ortalama Tanecik Yüksekliği (nm)	150	200	220	600
Maksimum Yükseklik (nm)	558	609	558	977

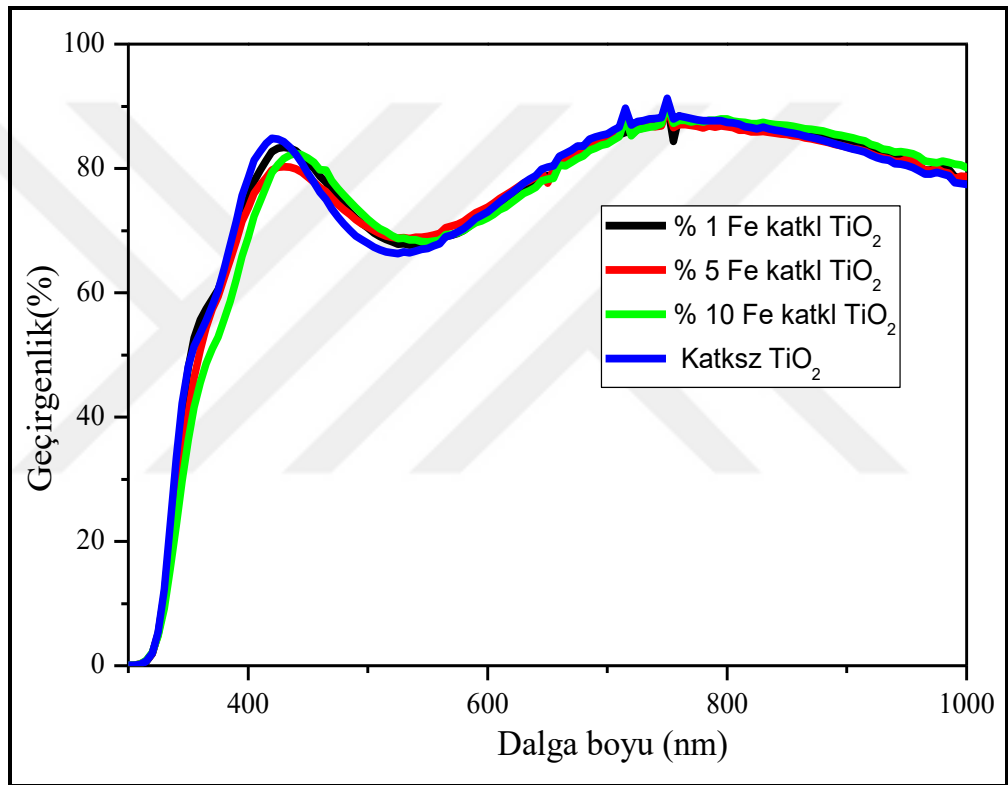
Soğurma eğrisi, katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince filmleri için 300 nm' ye kadar maksimum seviyeye ulaşır keskin bir şekilde 400 nm' ye kadar hızlı bir düşüş göstermektedir. Görünür bölgede ise zayıf bir artış meydana gelmiştir. Sonuçlar, %1 Fe katkılı TiO₂ ince film numunesinin diğerlerinden daha yüksek soğurma değerine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Fe katkısı soğurma değerlerinde bir artışa neden olmaktadır. Fe atomunun Burstein-Moss (B-M) kaymasından dolayı, soğurma eğrileri daha düşük bir dalga boyu tarafına (daha yüksek enerji) kaymaktadır.

İnce filmlerin optik geçirgenlik spektrumları şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3: Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince film numunelerinin soğurma spektrumları.

Soğurmanın minimumunu ifade eden yaklaşık 300 nm'ye kadar soğurma değerlerinde artış eğilimi olduğu gözlemlendi. 300 nm'den sonra keskin bir düşüş ve ardından görünür bölgede zayıf bir artış meydana gelmiştir. Sonuçlar, %1 Fe katkılı TiO₂ ince film numunesinin diğerlerinden daha yüksek soğurma değerine sahip olduğunu göstermektedir. Fe katkı maddesinin içeriğindeki bir artışla soğurma değerlerinde bir artışa neden olur. Bant kenarı Fe katkısının, Burnstein Moss etkisini bağıllığı nedeniyle katkılanan bir Fe atomu ile daha düşük bir dalga boyu tarafına (daha yüksek enerji) kaymaktadır. İnce filmlerin optik geçirgenlik spektrumları şekil 4.4'te gösterilmektedir.



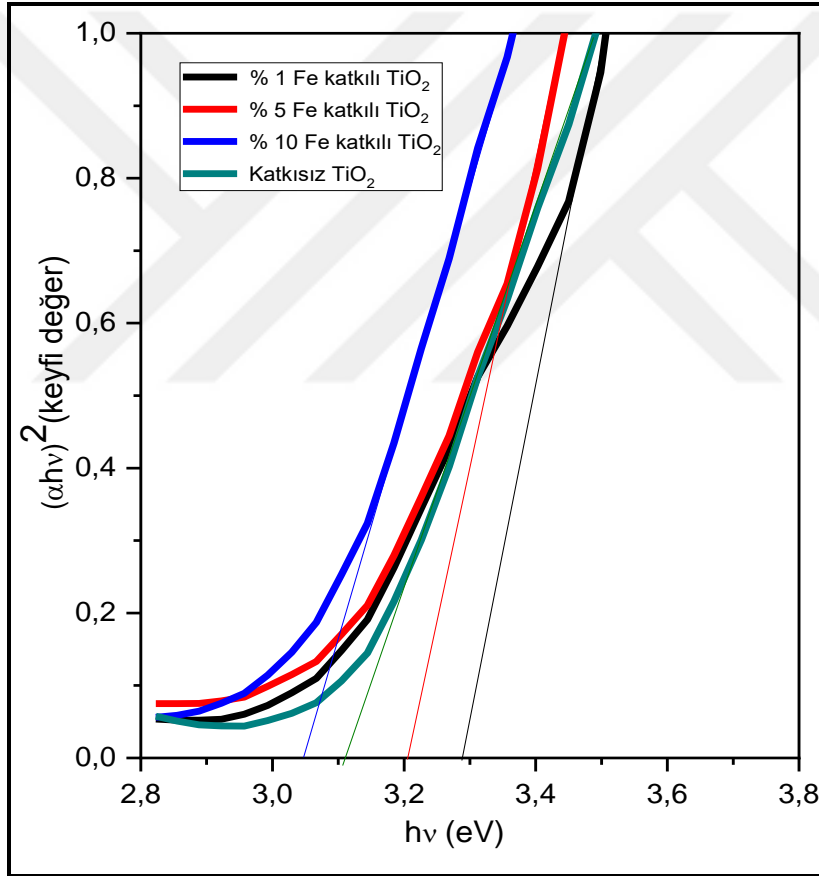
Şekil 4.4: Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince film numunelerinin geçirgenlik spektrumları.

Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince filmleri soğurma bandında 300 ile 500 nm arasında görünür bölgede % 80'den fazla bir iletim değerini sahiptir. Bununla beraber optik geçirgenlik değerleri 400 ile 600 nm arasında %70'in altına düşmüştür [45]. Katkısız ve Fe TiO₂ ince filmleri 400 nm' den daha yüksek dalga boylarında olduklarından geçirgenlik göstermeleri mümkün değildir. Bununla birlikte, bu tür malzemelerin bant aralığı özellikle organik yarı iletkenlerin bant yapıları ve optik özellikleri

hakkında bilgi sahibi olmak için son derece önemlidir. Bu çalışmada, optik bant aralığı, aşağıdaki formülde belirtilen Tauc modeli kullanılarak hesaplandı [46].

$$\alpha(h\nu) = A(E - E_{og})^m \quad (2.16)$$

Bu formülde, α , $h\nu$ (E) ve A sırasıyla soğurma katsayısı, foton enerjisi ve bir sabittir, m ise optik geçişlerin türünü belirler. Geçiş türünü belirlemek için m önemlidir, çünkü bant aralığı doğrudan veya dolaylı olabilir. Bant aralığı morfolojisini incelemek için $(\alpha h\nu)^2$ eğrilerini enerji (E) cinsinden çizilip hesaplandı (bkz. Şekil3.7).



Şekil 4.5: Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ numunelerinin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafikleri.

Çizelge 4.2: Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince filmlerin E_g değerleri

Numune Adı	E _g (eV)
Katkısız TiO ₂	3.17
%1 Fe katkılı TiO ₂	3.28
%5 Fe katkılı TiO ₂	3.08
%10 Fe katkılı TiO ₂	3.17

$$\text{Doğrusal eğimi } (ah\nu)^2 = 0 \text{ 'a} \quad (2.17)$$

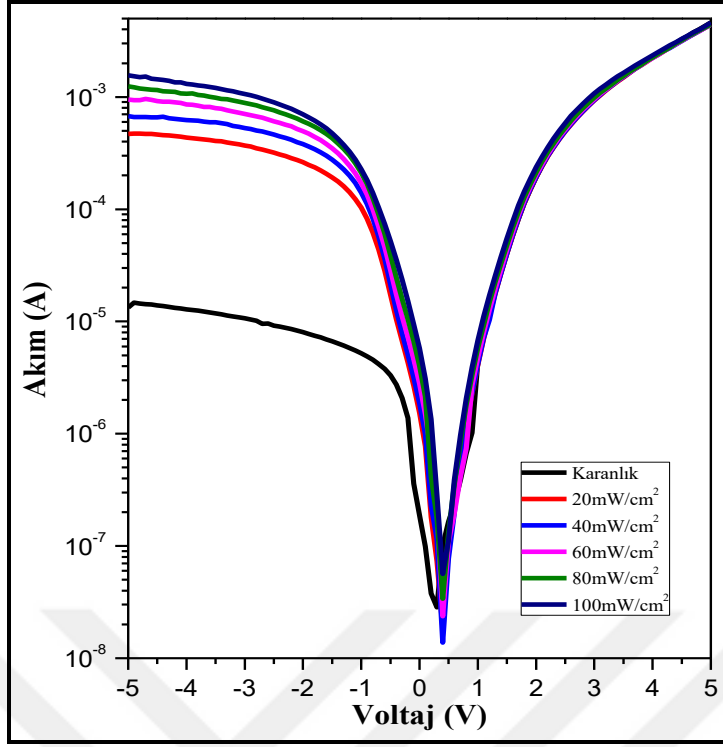
ekstrapolasyona tabi tutarak E_{og} enerjileri katkısız ve %1, %5 ve %10 Fe katkılı TiO₂ ince filmler için 3.17 eV, 3.28 eV, 3.08 eV ve 3.17 eV olarak ölçüldü. Sırasıyla elde edilen sonuçlardan %10 Fe katkılı TiO₂ ince filmdeki yük aktarma hareketliliği, diğerlerine oranla daha küçüktür. Bu daha az uyarma enerjisine gerek olduğu anlamına gelir. Enerji açığı değerleri söz konusu olduğunda TiO₂ ince filmler görünür bölgeye yakındır.

4.3 Katkısız TiO₂ ve Fe Katkılı TiO₂ Filmlerin Elektriksel Ölçüm Sonuçları

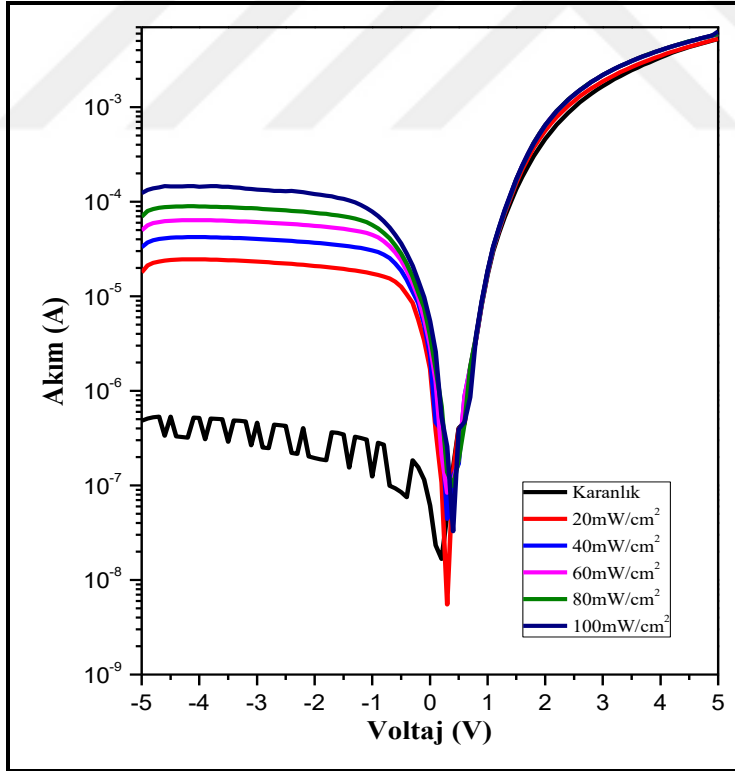
4.3.1 Katkısız TiO₂ ve Fe Katkılı TiO₂ Foto Akım- Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Bu çalışmada hazırlanan Fe/TiO₂/p-Si diyotların elektriksel karakterizasyonu için, akım-voltaj (I-V) ölçümleri çeşitli aydınlanma şiddetleri altında incelendi.

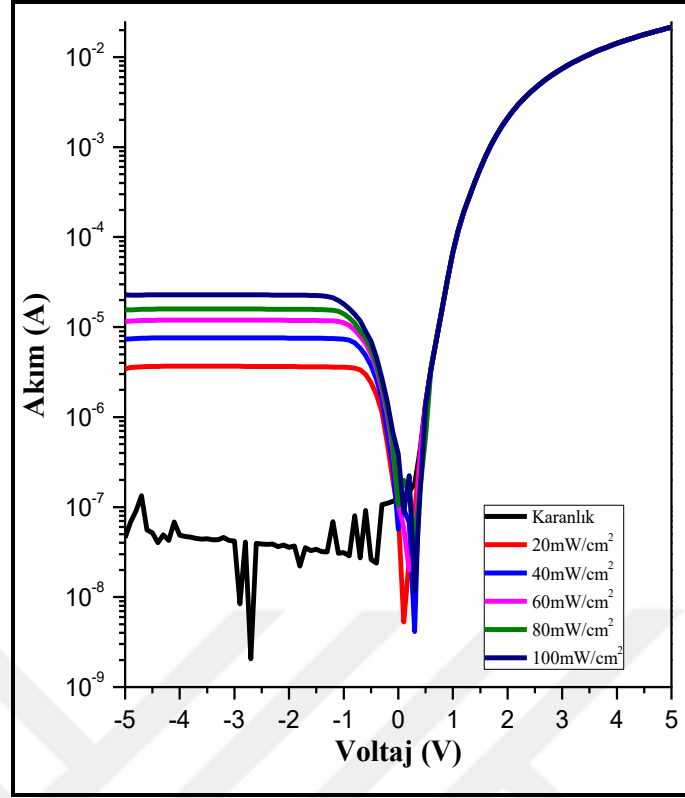
Si altlığı üzerine yapılan fotodiyotlara -5 ile +5 V arasında gerilim uygulanarak ölçümler yapıldı. Şekil 4.6-4.9 arasında Fe/TiO₂/p-Si diyotunun I-V eğrileri verilmiştir. Görüldüğü gibi, fotodiyotların aydınlatma altında ters akımı, karanlıkta bulunan akımın ters akımından daha yüksektir. Ayrıca, ters akım artan aydınlatma yoğunluğu ile artar. Bu sonuçlar, hazırlanan fotodiyotun bir foto iletken davranış sergilediğini gösterir [46].



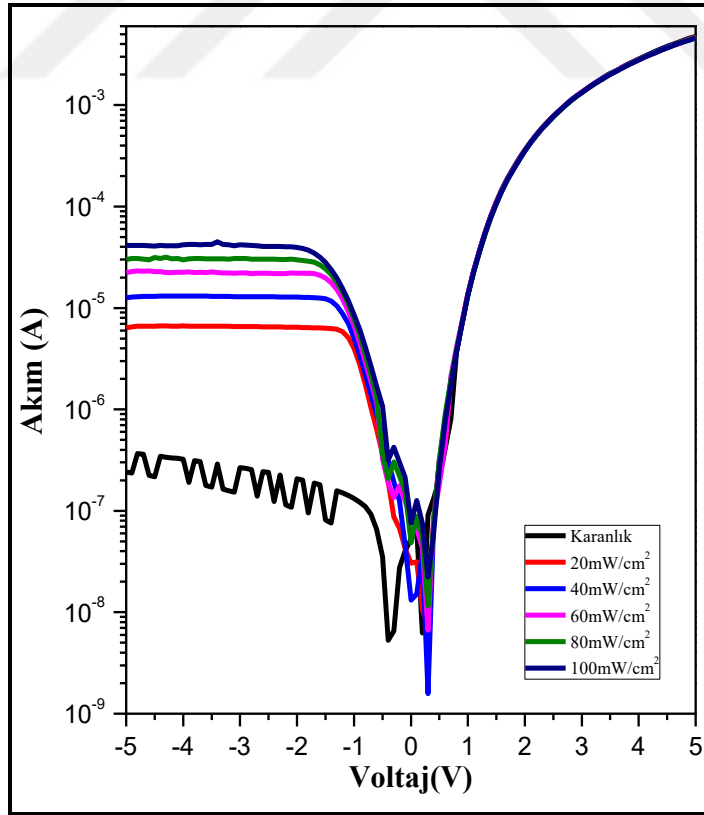
Şekil 4.6: Katkısız TiO₂ diyotların I-V eğrileri.



Şekil 4.7: %1 Fe katkılı katkılı TiO₂ diyotların I-V eğrileri.



Şekil 4.8: % 5 katkılı Fe katkılı TiO₂ diyotların I-V eğrileri.

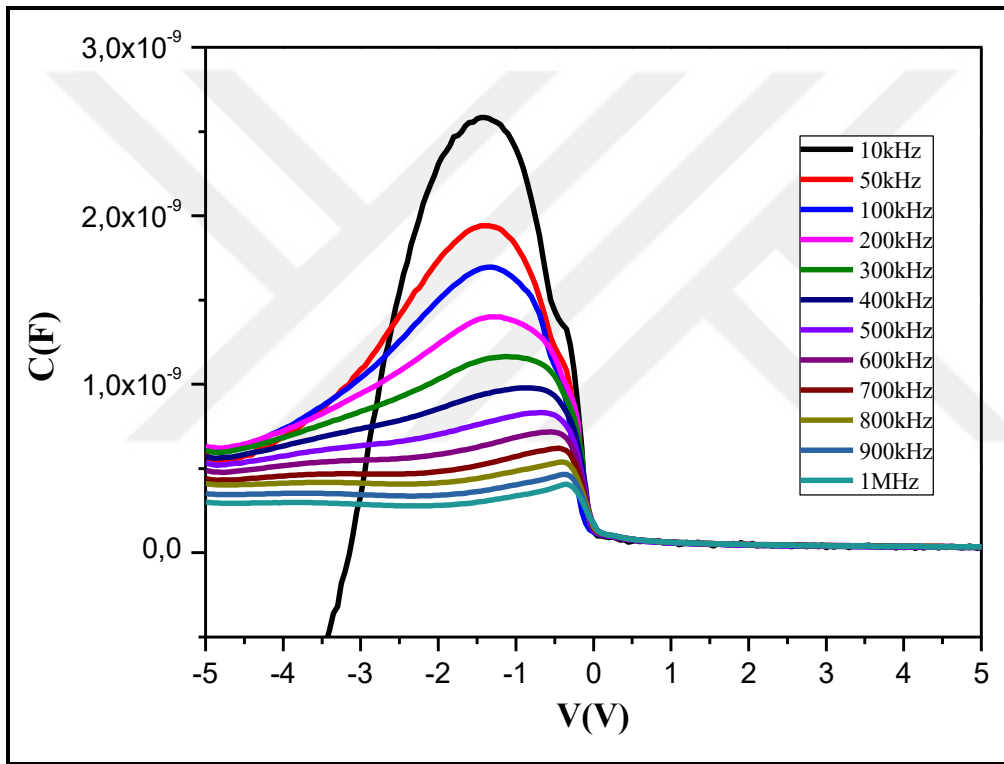


Şekil 4.9: % 10 Fe katkılı TiO₂ diyotların I-V eğrileri.

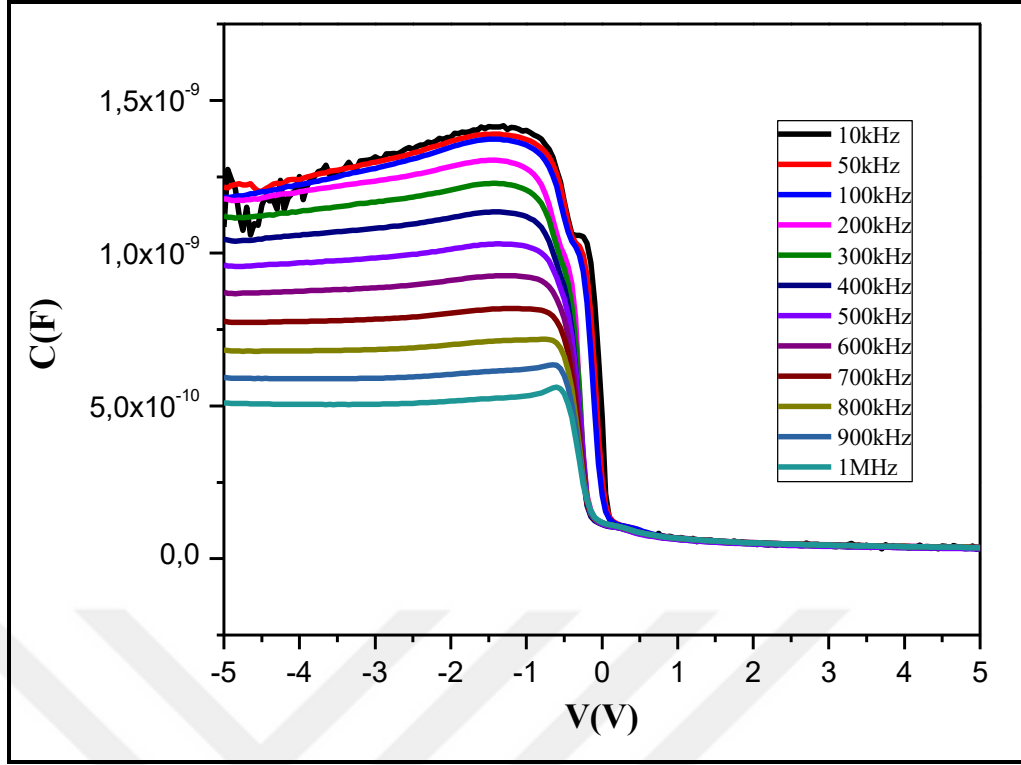
4.3.2 Katkısız TiO₂ ve Fe Katkılı TiO₂ Foto Akım- Voltaj (C-V) Karakteristikleri

Bu çalışmada hazırlanan katkısız ve Fe katkılı TiO₂ ince filmlerin elektriksel karakterizasyonu için, kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri çeşitli aydınlanma şiddetleri altında incelendi. Silisyum altlığı üzerine yapılan fotodiyotlara -5V ile +5V arasında gerilim uygulanarak ölçümler yapılmıştır.

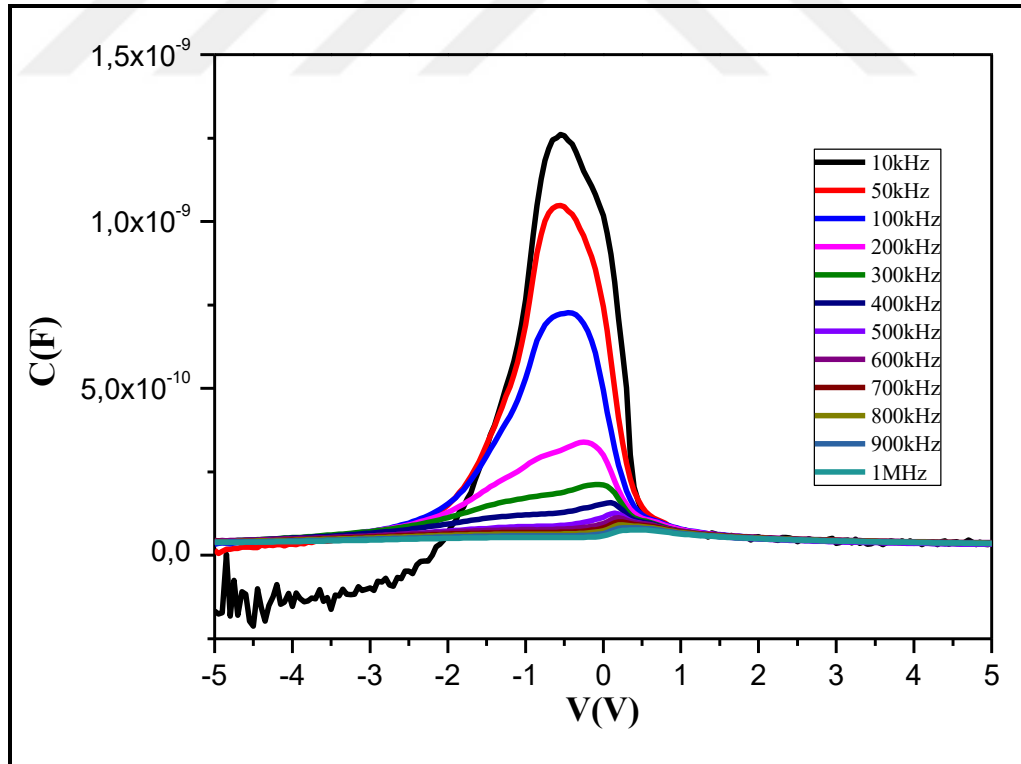
Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ diyotların kapasitansının (C-V) frekans ve voltaj bağımlılığı da 10 kHz ve 1 MHz aralığında ölçülmüş ve (C-V) grafikleri şekil 4.10 ile 4.13 arasında verilmiştir.



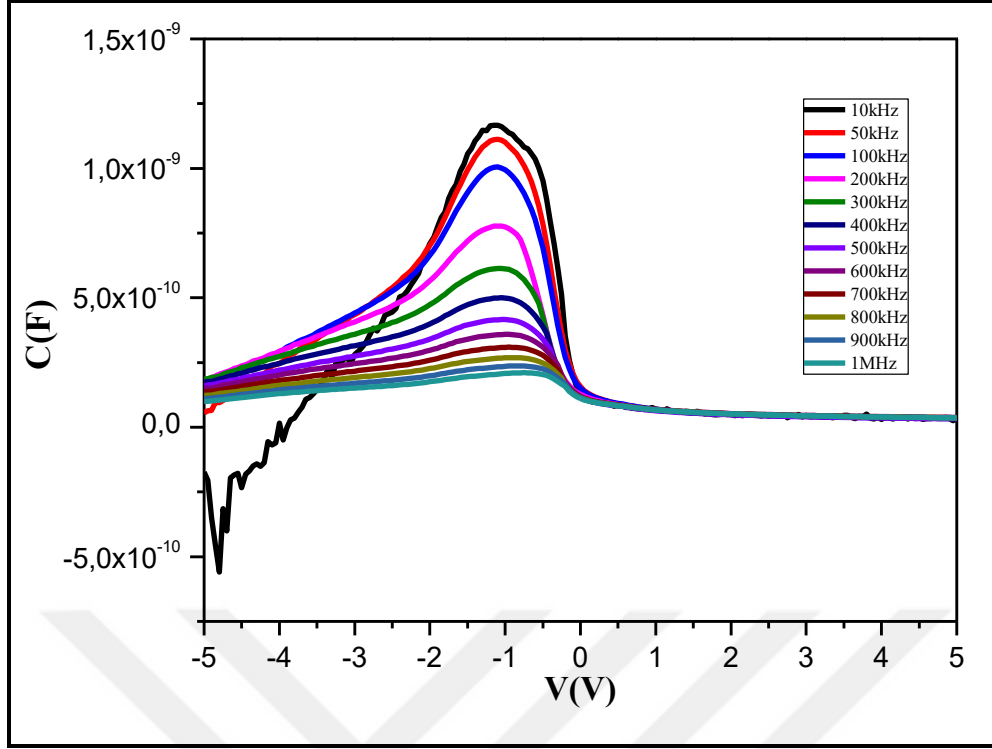
Şekil 4.10: Katkısız TiO₂ diyotların C-V eğrileri.



Şekil 4.11: %1 Fe katkılı TiO₂ diyotların C-V eğrileri.



Şekil 4.12: %5 Fe katkılı TiO₂ diyotların C-V eğrileri.



Şekil 4.13: %10 Fe katkılı TiO₂ diyotların C-V eğrileri.

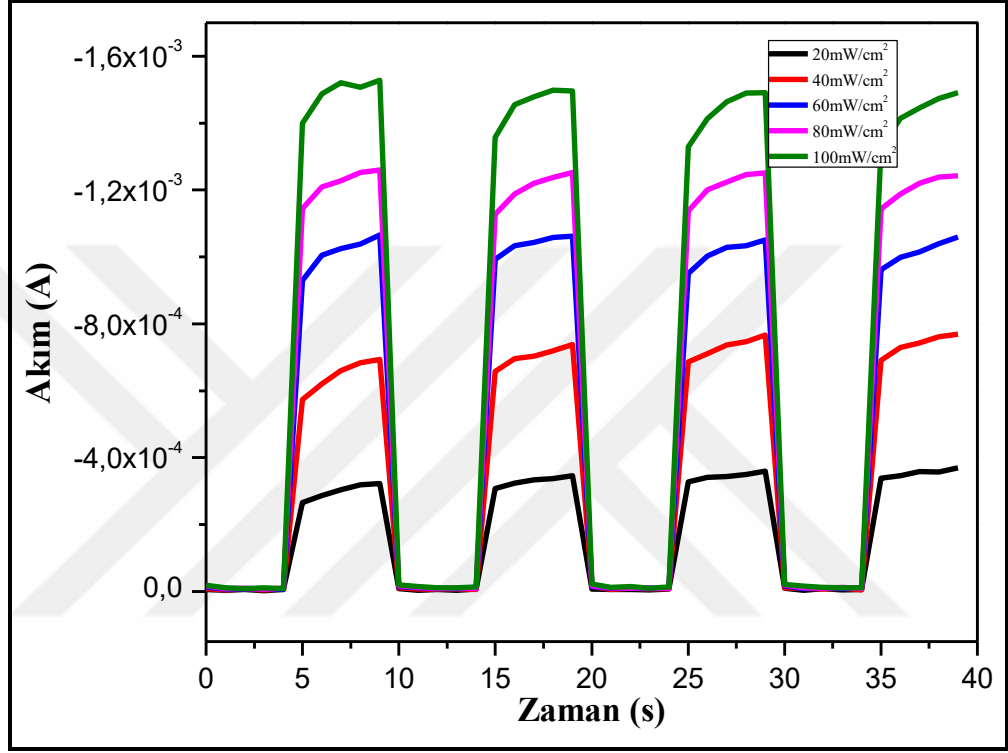
Ters bölgede, kapasitöre uygulanan voltajın frekansı arttıkça, C azalmaktadır. Buna bağlı olarak, farklı frekans değerlerinde, özellikle 10, 50, ve 100 kHz, güçlü bir ayrılma gözlenmektedir.

Frekans azalırken, kapasitans (C) voltaj (V) eğrileri arasındaki ayırım daha yüksek olanlarda daha fazla görünür. Frekandaki artış ile eğriler arasındaki ayrılma azaldı ve farklı frekanslar için kapasitansdaki değişim, ince filmlerin düşük frekanslarda özellikle Fe katkı maddesinin içeriğindeki bir artışa duyarlı olduğunu göstermektedir. Genel olarak ince filmler için elde edilen kapasitans voltaj özellikleri tipik fotodiyot davranışını göstermektedir. Ayrıca %5 Fe katkılı TiO₂ kapasitans (C) voltaj (V) özellikleri diğerlerinden önemli ölçüde farklıdır. Çünkü -1 volta kadar biraz artar ardından 0 volta kadar keskin bir biçimde azalır.

4.3.3 Katkısız TiO₂ ve Fe Katkılı TiO₂ Foto Akım- Zaman (I-t) Karakteristikleri

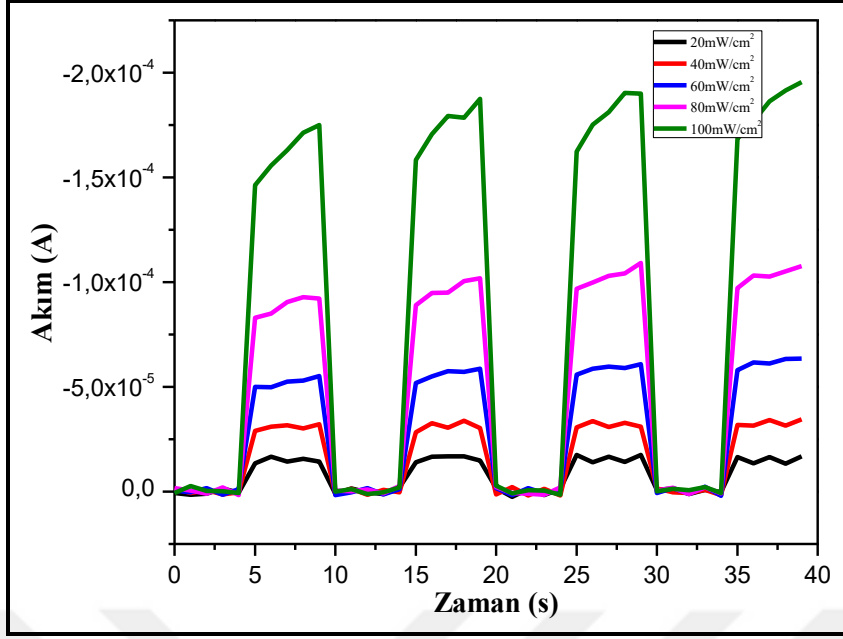
Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ diyotlarının I-t grafikleri Şekil 4.14 ile Şekil 4.17 arasında verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, güneş ışığı altında diyot fotoakımı artan ışık şiddeti ile artmakta ve ışık yok iken ilk değerine geri dönmektedir. Katkısız ve Fe

katkılı TiO₂ diyotlarının diyotların I-t grafiklerine göre, 5'er saniye aralıklarla açma-kapama yapılan diyotların, fotoakımı aydınlatma altında artar ve sabit bir değere ulaşır. Işık ilk kapatıldığı andan itibaren ise azalır ve akım ilk değerine ulaşır. Elde edilen sonuçlar diyotların fotoakım mekanizması, ara yüzey bölgesinde oluşan foto taşıyıcılarından kaynaklandığını göstermektedir [95].



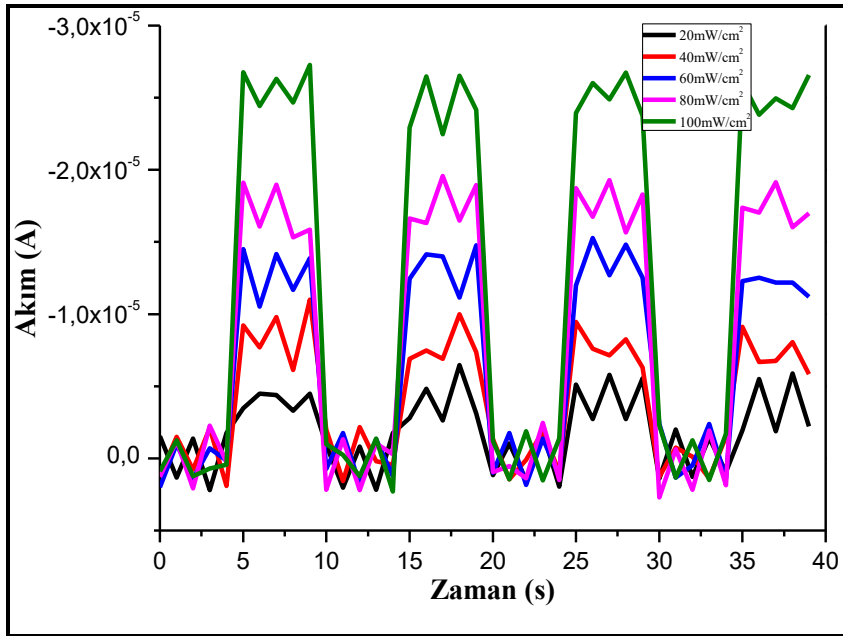
Şekil 4.14: Katkısız TiO₂ diyotların I-t eğrileri.

Şekil 4.14'de diyotun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki I_{açma} / I_{kapama} oranı 4.05 olarak bulunurken 80 mW/cm²'de 3.61, 60 mW/cm²'de 1.17, 40 mW/cm²'de 1.37, 20 mW/cm²'de ise 1.17 olarak bulunmuştur.



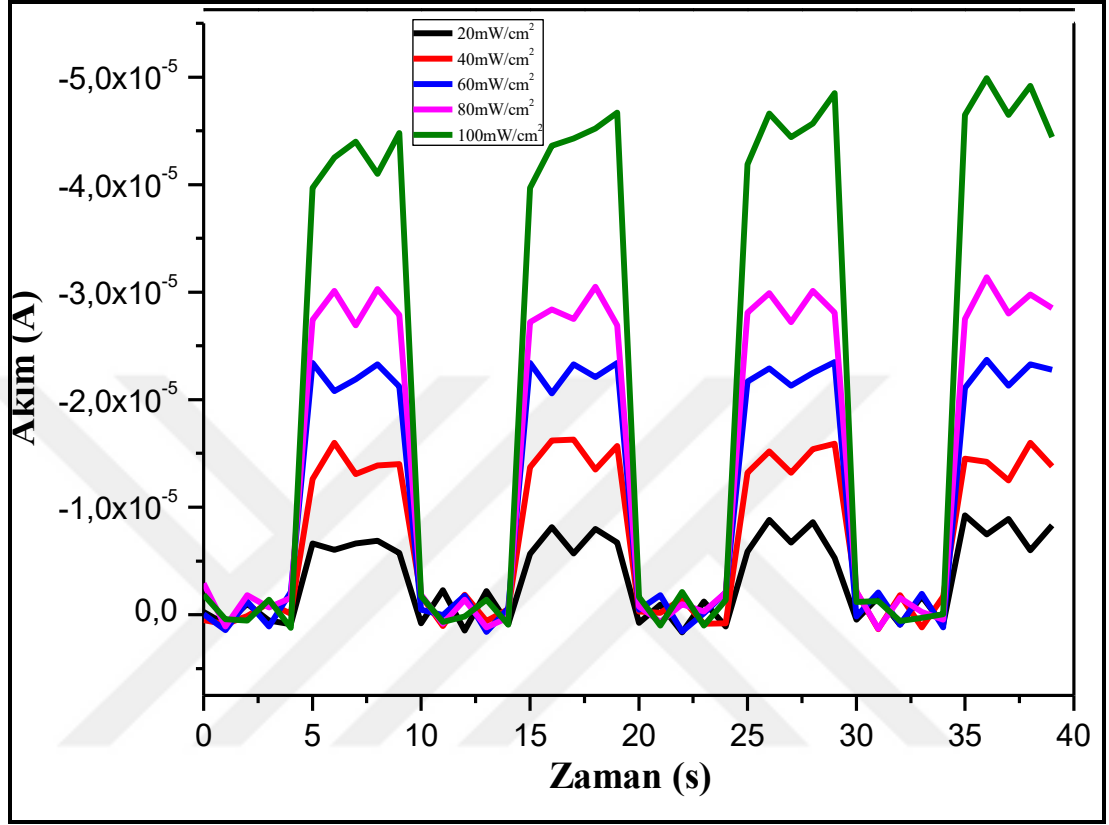
Şekil 4.15: %1 Fe katkılı TiO₂ diyotların I-t eğrileri.

Şekil 4.15'te diyotun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altındaki $I_{açma} / I_{kapama}$ oranı 1.05 olarak bulunurken 80 mW/cm²'de 1.28, 60 mW/cm²'de 1.26, 40 mW/cm²'de 1.29, 20 mW/cm²'de ise 1.37 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.16: %5 Fe katkılı TiO₂ diyotların I-t eğrileri.

Şekil 4.16'da diyotun 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altındaki $I_{\text{açma}} / I_{\text{kapama}}$ oranı 2.25 olarak bulunurken 80 mW/cm^2 'de 1.70, 60 mW/cm^2 'de 1.18, 40 mW/cm^2 'de 2.23, 20 mW/cm^2 'de ise 1.38 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.17: %10 Fe katkıli TiO_2 diyotların I-t eğrileri.

Şekil 4.17'de diyotun 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altındaki $I_{\text{açma}} / I_{\text{kapama}}$ oranı 1.12 olarak bulunurken 80 mW/cm^2 'de 1.15, 60 mW/cm^2 'de 1.06, 40 mW/cm^2 'de 1.15, 20 mW/cm^2 'de ise 1.16 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.3: Katkısız ve Fe katkılı TiO₂ diyotların I_{açma} /I_{kapama} oranları

	KATKISIZ TiO₂	%1 Fe KATKILI TiO₂	%5 Fe KATKILI TiO₂	%10 Fe KATKILI TiO₂
AYDINLATMA ŞİDDETİ	I _{açma} /I _{kapama}	I _{açma} /I _{kapama}	I _{açma} /I _{kapama}	I _{açma} /I _{kapama}
100 mW/cm ²	4.05	1.05	2.25	1.12
80 mW/cm ²	3.61	1.28	1.70	1.15
60 mW/cm ²	1.17	1.26	1.18	1.06
40 mW/cm ²	1.37	1.29	2.23	1.15
20 mW/cm ²	1.17	1.37	1.38	1.16

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Katkısız TiO₂ ve % 1, % 5 ve % 10 Fe katkılı TiO₂ ince filmler, sol-jel metodu ile elde edilen çözeltiler kullanılarak mikroskop camı ve p-tipi Si altlıklar üzerine döndürme kaplama tekniği ile büyütülmüştür. Elde edilen numunelerin yapısal, elektriksel ve optiksel özellikleri üzerine Fe katkısının etkisi araştırılmıştır.

Fotodiyotların yüzey özellikleri AFM ile karakterize edildi. Taneciklerin ince film yüzeyini homojen bir şekilde kapladığı görüldü.

p-Si altlık üzerine kaplanan diyotların elektriksel özelliklerinin incelenmesi amacıyla Akım-Voltaj (I-V), Kapasitans- Voltaj (C-V) ve Akım-Zaman (I-t) karakterizasyonları oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Ultraviyole görünür spektrumları kullanılarak diyotların yasak bant aralığı incelendi ve Fe katkısının TiO₂ ince filmlerinin yasak bant aralıkları azalttığı görüldü. I-V karakteristikleri diyotların doğrultucu karakteristikleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Fotodiyotların I-t karakteristikleri diyotların artan aydınlatma yoğunlukları için artırılmış fotoakımın elde edildiği iyi fotovoltik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Belirli voltaj aralığında 10V ile -1V arasında belirli frekans değerlerinde özellikle Fe katkılı TiO₂ diyotlarda belirgin pikler gözlemlendi.

Numunelerin I-t grafiklerinden farklı aydınlatmalarda oluşan akımın, ani artış gösterip sonra sabit bir değere ulaştığı gözlemlendi. Diyotların akımı karanlıkta ve farklı aydınlatmalarda ölçülerek $I_{açma}/I_{kapama}$ oranları belirlendi. En büyük $I_{açma}/I_{kapama}$ oranı katkısız TiO₂ diyotunda 4.05 olarak ölçüldü.



KAYNAKLAR

- [1] **Coşkun B.** (2013). *Sıçratma Tekniği İle Büyütülen Zirkonyum Dioksit İnce Filmlerin Mikro Yapılarının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [2] **Holmberg K., and Matthews A.** (1994). *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*, Tribology Series; 56, Elsevier Science and Technology Books, Oxford, UK.
- [3] **Krishnakumar, V. Ramamurthi, K., Kumaravel, R., Santhakumar, K.** (2009). Preparation of Cadmium Stannate Films by Spray Pyrolysis Technique. *Current Applied Physics*, 9, Sf.467-471.
- [4] **Wang, Z.L. and Kang, Z.C.** (1998). Functional and Smart Materials-Structural Evolution and Structure Analysis. *Plenum Press*, New York.
- [5] **D. Chakravorthy, A.K. Giri, in: C.N.R. Rao (Ed.).** *Chemistry of Advanced Materials*, Blackwell, Oxford, 1993, Sf.217.
- [6] **U. Schuberf, S. Tewinkel, R. Lamber.** (1996) *Chem. Mater.* 8 Sf 2047.
- [7] **K. Karthik, S. Kesava Pandian, N. Victor Jaya.** (2010) *Appl. Surf. Sci.* 256 6829e6833.
- [8] **A.K. Hassan, N.B. Chaure, A.K. Ray, A.V. Nabok, S. Habesch, J.** (2003) *Phys. D: Appl. Phys.* 36 1120.
- [9] **J. Yu, X. Zhao, J. Du, W. Chen, J.** (2000) *Sol Gel Sci. Tech.* 17 163.
- [10] **B. Liu, X. Zhao, Q. Zhao, C. Li, X. He, Mater.** (2005) *Chem. Phys.* 90 207.
- [11] **Ü, A. Arier, F.Z. Tepehan.** (2011) *Surface & Coatings Technology* 206 37 Ö.
- [12] **J. Medina-Valtierra, M.S. Cardenas, C.F. Reyes, S. Calixto, J. Mex.** (2006) *Chem. Soc.* 50 8.
- [13] **M. Stamate, G.I. Rusu, I. Vascan.** *SPIE*, vol. 3405-0277-786X/98/951e954.
- [14] **M. Ramazani, M. Farahmandjou, and T.P. Firoozabadi.** (2015). *Phys. Chem. Res.* 3, 293.
- [15] **İ. Muz and M. Kurban.** (2019). *Opto-Electronics Review*, 27, 113-118.
- [16] **İ. Muz and M. Kurban.** (2019). *J Alloy, Compd.*, 802, 25-35.
- [17] **M. Kurban.** (2018). *Optik*, 172, 295-301.
- [18] **Xiuwen Cheng, Xiujuan Yu, Zipeng Xing, Lisha Yang, Arab. J. Chem.** (2016). 9, S1706-S1711.
- [19] **Marami, M.B., Farahmandjou, M. Khoshnevisan** (2018). *B. Journal of Elec Materi* 47.

- [20] **Asar, T., Sarıkavak, B., Öztürk, M. K., Mammadov, T., Özçelik, S.** (2009). “Effects of annealing on the structural properties of GaAs-based quantum well solar cells”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 11 (11): 1627–1631.
- [21] **Yakuphanoglu, F.** (2009). *Organik Yarıiletkenler Fiziği*, ders notları, Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Elazığ.
- [22] **Bilgen, Y.** (2008). *Sol-gel yöntemi ile üretilen nano kristal ZnO:Ga ince filmlerinin optik ve mikro yapısal özelliklerinin incelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- [23] **Eren, O.** (2006). *Alüminyum katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri*, (Yüksek Lisans Tezi), Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [24] **Omar, M.A.** (1975), *Elementary Solid State Physics*, Addison-Wesley Publishing Company Inc, Menlo Park, California.
- [25] **Besler, B.** (2007). *Elektrokimyasal büyüme ile üretilen ZnO'nun katodik potansiyel değişimine bağlı olarak kristalografik ve optik özelliklerinin incelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Atatürk Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [26] **Borazan, H.** (2007). *Yarıiletkenlerde kinetik olayların deneysel araştırma yöntemleri*, (Yüksek Lisans Tezi), Yüzüncü Yıl Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- [27] **Aksoy, S.** (2006). *Kalay katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri*, (Yüksek Lisans Tezi), Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [28] **Demirci, B.** (2006). *İndiyum katkılı ZnO ince filmlerinin bazı fiziksel özellikleri*, (Yüksek Lisans Tezi), Anadolu Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [29] **Sarı, H.** (2008). *Yarıiletken Fiziği: Elektronik ve optik özellikler*, ders notları, Ankara Üniv. Fizik Mühendisliği, Ankara.
- [30] **Cafer, T.** (2000). *Katıhal Elektronik*. Yıldızteknik Üniversitesi Basım-Yayım Merkezi, (Sf. 234), İstanbul.
- [31] **Yoğurtçu, Y. H.** (2005). *Katıların Fiziği*. Aktif Yayınevi. (Sf.134-139).
- [32] **Pankove, J.** (1971). *Optical processes in semiconductors*, Dover Publications, Inc.
- [33] **Güngör, M.** (2005). *SiO₂-TiO₂ İnce Filmlerin Sol-jel Yöntemiyle Üretilmesi ve Mikro Yapısal Karakterizasyonu*. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- [34] **Guseinov, I.I. ve Mamedov, B.A. B.** (2009). Unified Treatment for Accurete and Fast Evulation of the Fermi-Dirac Function. *Chin. Phys.B.*, 19 (5), 1-6.
- [35] **Sze, S. M.** (1981), *Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- [36] **Oral, M.** (1979), *Güneş Pilleri*, Ege Üniversitesi Yayınları, İzmir.
- [37] **Dikici, M.** (1993). *Katıhal Fiziğine Giriş*, Samsun.

- [38] **Tobias Winchen, Stijn Buitink.** (2018) “ Energy spectrum of fast second order Fermi accelerators as sources of ultra-high-energy cosmic rays”. *Astroparticle Physics* Cilt **102**, Sf. 25-31.
- [39] **Özek F.** (1995), “*Optoelektronik*”, No: 29, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye işletmesi Yayınları.
- [40] **Sze, S.M.** (1981). *Physics of Semiconductor Devices* 2nd ed., Willey, New York.
- [41] **Gündüz, B.** (2007). *Organik yarıiletken fotodiyotların hazırlanması ve optoelektronik özelliklerinin araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [42] **Çavaş, M.** (2011). *Nano yapılu metal oksit yarıiletkenler kullanılarak fotodiyotların üretilmesi*, (Doktora Tezi), Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [43] **Erol, A. Balkan, N.** (2015). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*, 2.Baskı, Seçkin Yayıncılık.
- [44] <http://ee.sc.edu/personal/faculty/photodiodes.pdf>, alındığı tarih: 20.11.2020
- [45] **Özyurt Kuş, F.** (2010). *Bakır oksit/çinko oksit heteroeklem yapıların elektriksel ve Optiksel özelliklerinin incelenmesi*, (Doktora Tezi), Ankara Üniversitesi, Ankara.
- [46] **Dere, A.** (2014). *Grafen esaslı fotodetektörlerin üretilmesi ve elektriksel özelliklerinin karakterizasyonu*, (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [47] **Durak, M.** (2002). *Silikon Foto diyotların Optik Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- [48] **H. Aydın, C. Aydın, A.A. Al-Ghamdi, W.A. Farooq, F. Yakuphanoglu.** (2016) *Optik*, 127, 1879-1883.
- [49] **K. Cheng, J. Liu, R. Jin, J. Liu, X. Liu, Z. Lu, Y. Liu, X. Liu, Z.** (2017) *Du, Appl. Surf. Sci.*, 409, 124-131.
- [50] **Wasa, K., Kitabatake, M., Hideaki, A.** (2003). *Thin Film Materials Technology*. William Andrew, 531p, United States.
- [51] <http://alanassad.com/sabbath/Elements/Inorganic/TiO2Titanium%20Dioxide.pdf> f. alındığı tarih: 20.11.2020.
- [52] **Gökgöz, E.E.** (2009). *Renklendirilmiş Organik TiO₂ İle Kaplanmış Camların Yapısal, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [53] **Efendiler, H.** (2006). *TiO₂ İnce Filmler İle Kaplanmış Yüzeylerin Staphylococcus aureus' a Karşı Fotokatalitik Bakterisidal Etkilerinin İncelenmesi*, (Doktora Tezi), İzmir.
- [54] **Gratzel, M. Kalyanasundaram, K.** (1998), *Applications of Functionalized Transition Metal Complexes In Photonic and Optoelectronic Devices*. Coordination.
- [55] **Şam, E. D. Ürgen, M. Tepehan, F. Z.** (2007) *Chemistry Reviews*, TiO₂ Fotokatalistleri 77, 347-414... *İTÜ Dergisi*, Cilt:6, Sayı:5-6, 81-92, İstanbul.

- [56] **Sayılkan, F.** (2007). *Nano-TiO₂ Fotokatalizör Sentezi ve Fotokatalitik Aktivitesinin Belirlenmesi.* (Doktora Tezi), İnönü Üniversitesi, Malatya.
- [57] **Bardakçı, S.** (2007). *Sol-Jel Yöntemi ile Hazırlanan TiO₂ İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi.* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi ,Sakarya.
- [58] **Klein, Lisa C.** (1988). *Sol-Gel Technology for Thin Films, Fibers, Preforms, Electronics, and Specialty Shapes.* Noyes Publications.
- [59] **Sönmezoğlu, S.** (2010). *Nano tanecikli TiO₂ İnce Filmlerinin Yapısal, Morfolojik ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi.* (Doktora Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi , Tokat.
- [60] **Pehlivan, E.,** (2000). *Al₂O₃ katkılı ZrO₂ İnce Filmlerinin Optik Özellikleri.* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [61] **Brinker, C. F., Scherer, G. W.,** (1990). *Sol-Gel Science,* Boston, Academic Press. 34, 231 245.
- [62] **Bornside, D. E., Macosko, C. W., Scriven, L. E., J.** (1997). *Imagining Tech.* 122-129.
- [63] **Kaya, Ö.** 2002. *Characterization of TiO₂ Thin Films Prepared by Sol-Gel Processing.* Orta Doğu Teknik Üniversitesi. (Yüksek Lisans Tezi), Ankara.
- [64] **Çizmeciöglü, H.** (2004). *Yarıiletken İnce Filmlerin Sol-jel Yöntemi ile Üretilmesi Özellikleri.*(Yüksek Lisans tezi), Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Fatih KARA

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 02.01.1991

E-posta : fatihkara826@gmail.com



ÖĞRENİM DURUMU

- Lisans: 2015, Karabük Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik
- Yüksek Lisans: 2020 Kırklareli Üniversitesi, Fizik Anabilimdalı , Fizik

Ocak 2020

Fatih KARA