



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SPREY PİROLİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK TiO_2
İNCE FİLMİNİN ÜRETİMİ VE METAL/ TiO_2 /Sİ MİS YAPILARDA
UYGULANMASI

Mehmet Murat AKKUŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Haziran 2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Murat AKKUŞ tarafından hazırlanan “SPREY PİROLİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK TiO_2 İNCE FİLMİNİN ÜRETİMİ VE METAL/ TiO_2 /Si MIS YAPILARDA UYGULANMASI” adlı tez çalışması 15/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof.Dr. Sezai ASUBAY

Danışman

Prof.Dr. Ömer GÜLLÜ

Üye

Dr.Öğr.Üyesi Murat SUNKUR

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

LEE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet Murat AKKUŞ

Tarih: 15/06/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SPREY PİROLİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK TiO_2 İNCE FİLMİNİN ÜRETİMİ VE METAL/ TiO_2 /Sİ MIS YAPILARDA UYGULANMASI

Mehmet Murat AKKUŞ

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

2023. 61 Sayfa

Jüri

Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

Başkan: Prof.Dr. Sezai ASUBAY

Üye: Dr.Öğr.Üyesi Murat SUNKUR

Günümüzde titanyum dioksit (TiO_2), yapısal olarak beyaz toz halinde bulunan nano tanecikli yapısı ve ekonomik olması olağan üstü fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle en fazla araştırma yapılan metal oksit maddelerinden birisidir. Bu çalışmalarda titanyum dioksitin çok farklı kullanım alanlarına sahip olduğu görülmektedir. Gaz algılama, su arıtma, elektrokromik cihazlar, fotovoltaiik hücre vb. gibi çok çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır. Bu malzemeler, sol-jel, fiziksel buhar büyütme, kimyasal buhar büyütme ve elektrodepozisyon dahil olmak üzere farklı yöntemlerle sentezlenebilir.

Bu tez çalışmasında sprej piroliz yöntemi kullanılmıştır. TiO_2 ince tabakalar cam altlıklar ve inorganik yarıiletken Si (silisyum) altlık üzerine kaplanmıştır. Bu yöntem, düşük maliyetli ve kontrolü kolay bir yöntemdir. Altlıklar kimyasal temizleme işlemi yapıldıktan sonra sprej piroliz tekniği ile 25 cm yükseklikten yatay ekseninde 3 saniye hareketle cam altlık kaplanmıştır. Kaplama işlemi 80 °C’de sabit sıcaklıkta tutularak yapılmıştır. Si kristali üzerine ince katmanlı tabaka oluşturulduktan sonra, üst tarafına Al metali fiziksel buharlaştırma yöntemi (PVD) ile buharlaştırıldı. Bu çalışma sonucunda TiO_2 ince tabakaların yoğun ve düzgün olduğu saptanmıştır. Cam altlık üzerine oluşturulan TiO_2 ince katmanlı tabakanın morfolojik yapısı ve optik özellikleri araştırıldı. Metal/ TiO_2 /Si diyot arayüzeyleri ve elektriksel özellikleri, karanlık ortamda akım-voltaj (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri ile araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Akım-voltaj, MIS diyot, Sprej piroliz, TiO_2

ABSTRACT

MS THESIS

PRODUCTION OF TiO₂ THIN FILM USING SPRAY PYROLYSE METHOD AND ITS APPLICATION IN METAL/TiO₂/SI MIS STRUCTURES

Mehmet Murat AKKUŞ

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN DEPARTMENT OF PHYSICS**

Advisor: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

2023. 61 Pages

Jury

Advisor: Prof.Dr. Ömer GÜLLÜ

Chairman: Prof. Dr. Sezai ASUBAY

Member Asst.Prof.Dr. Murat SUNKUR

Today, titanium dioxide (TiO₂) is one of the most researched metal oxide materials due to its nanoparticle structure, which is structurally in the form of white powder, and its economic and extraordinary physical and chemical properties. In these studies, it is seen that titanium dioxide has very different usage areas. Gas detection, water treatment, electrochromic devices, photovoltaic cell, etc. It has a wide variety of application areas such as These materials can be synthesized by different methods, including sol-gel, physical vapor growth, chemical vapor growth and electrodeposition.

In this thesis, spray pyrolysis method was used. TiO₂ thin films were coated on glass substrates and inorganic semiconductor Si (silicon) substrate. This method is low cost and easy to control. After the bases were chemically cleaned, the glass substrate was covered with the spray pyrolysis technique from a height of 25 cm in a horizontal axis for 3 seconds. The coating process was carried out at a constant temperature of 80 °C. After forming a thin layer on the Si crystal, Al metal was evaporated on the upper side by physical evaporation method (PVD). As a result of this study, it was determined that the TiO₂ thin films were dense and smooth. The morphological structure and optical properties of the TiO₂ thin-layer film formed on the glass substrate were investigated. Metal/TiO₂/Si diode interfaces and their electrical properties were investigated by current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurements in dark environment.

Keywords: Current-voltage, MIS diode, Spray prolysis, TiO₂

ÖNSÖZ

Değerli Okuyucu,

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsünde Yüksek lisans Tezi olarak sunulmuştur. Bu tez, derin bir araştırma ve büyük bir özveri ile ortaya konulan bir çalışmanın ürünüdür. Size sunulan bu önsöz, benim akademik yolculuğumun ve bu önemli araştırmanın başlangıcını temsil etmektedir. Bu tez, “Sprey piroliz tekniği kullanılarak TiO_2 ince tabakanın üretimi ve Metal/ TiO_2 /Si MIS yapılarında uygulanması” üzerinde derinlemesine bir inceleme sunmak amacıyla hazırlandı. Bu çalışma sürecinde, önemli miktarda kaynak incelenmiş, veriler toplanmış ve analiz edilmiştir. Amacım, bu çalışmayla ilgili alanımda yeni bilgiler ve anlayışlar sunmak, mevcut literatüre katkıda bulunmak ve okuyuculara değerli bir kaynak sunmaktır. Bu çalışmanın tamamlanmasında emeği geçen herkese teşekkür etmek isterim. İlk olarak, tez danışman hocam, Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ, bana yol gösterdiği, rehberlik ettiği ve desteğini esirgemediği için minnettarım. Ayrıca, bu çalışmanın tamamlanmasında yardımcı olan diğer akademisyenlere, öğretim üyelerine ve araştırmacılara teşekkür etmek istiyorum. Ayrıca, bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde ince tabaka ölçümlerinin (XRD, UV-Vis., SEM) verilerini sağlayan, Dicle Üniversitesinde görev yapan Dr. Canan AYTUĞ AVA’ya teşekkür etmek istiyorum. Ayrıca XRD ölçümlerinin analizinde yardımlarını esirgemeyen Doç.Dr. Mustafa OKUMUŞ’a ve tezimin deneysel ve yazım aşamasındaki yardımlarından dolayı Emine ERDEM’e teşekkürlerimi sunarım. Onların katkıları olmadan bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanması mümkün olmazdı. Son olarak, aileme ve sevdiklerime bu süreç boyunca sağladıkları destek için teşekkür etmek istiyorum. Onların sürekli teşvikleri ve inançları sayesinde bu çalışmaya odaklanabildim ve en iyisini ortaya koymak için çaba sarfettim. Bu tez, bilgi ve anlayış sunmanın yanı sıra gelecekteki araştırmacıları da ilham vermek ve motive etmek amacıyla hazırlanmıştır. Umarım, bu çalışma sizin için faydalı olur ve ilgi alanınızda yeni ufuklar açar. Keyifli okumalar dilerim.

Mehmet Murat AKKUŞ
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER	x
ÇİZELGELER	1
1. GİRİŞ	2
1.1 Literatür Araştırması.....	2
2. KURAMSAL TEMELLER.....	11
2.1 Yarıiletkenler.....	11
2.2 Titanyum dioksit.....	13
2.3 Metal Yarıiletken Kontaklar.....	16
3. KARAKTERİZASYON	21
3.1 XRD (X-ışını kırınımı)	21
3.2 Taramalı elektron mikroskobu	22
3.3 UV-VIS spektroskopisi.....	23
4. DENEYSEL İŞLEMLER.....	25
4.1 Sprey Piroliz	25
4.2 Kimyasal Temizleme ve Numune Oluşturma	25
4.3 İmalattı Yapılan Al/TiO ₂ /p-Si Schottky Diyotunun Hazırlanması	29
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE SONUÇLAR	31
5.1 TiO ₂ İnce Tabakanın X-Işınları (XRD) Ölçümleri.....	31
5.2 TiO ₂ İnce Tabakanın SEM Analizi.....	32
5.3 TiO ₂ İnce Tabakanın Optik Ölçümleri (UV-Vis).....	34
5.4 Üretilen Al/TiO ₂ /p-Si Schottky Diyotunun Elektriksel Karakterizasyonu	36
5.5 Üretilen diyotun akım -voltaj karakteristikleri.....	36
5.6 Üretilen diyotun kapasite-voltaj karakteristikleri.....	40
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	43
6.1 Sonuçlar ve Tartışma	43
6.2 Öneriler	46
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Diyotun Etkin Alanı
A*	: Richardson Sabiti
C	: Sığa
d	: Uzay yükü bölgesinin genişliği
e	: Elektrik Yükü
E₀	: Vakum Seviyesi
E_f	: Fermi seviyesi
E_g	: Yarıiletkenin Yasak Aralığı
E_c	: İletkenlik Bandının Tabanı
E_v	: Valans Bant
eV	: Elektron Volt
h	: Planc Sabiti
I₀	: Ters Besleme Akımı
K	: Bolizmann Sabiti
m	: Kütle
M	: Molarite
M_A	: Molekül Kütlesi
n	: Mol
q	: Elektron Yükü
R_s	: Seri Direnç
T	: Mutlak sıcaklık
V	: Uygulanan Potansiyel
V_{bi}	: İç Yapı Potansiyeli
V_f	: İleri Besleme Gerilimi
W	: Deplasyon Bölgesi
X	: Yarıiletken Elektron İlgisi Yarıiletkenin elektron ilgisi
λ	: X-Işınlarında Dalga Boyu
Ω	: Direnç Birimi
Φ_{sb}, Φ_b	: Schottky Engel Yüksekliği
Φ_m	: Metal İş Fonksiyonu
Φ_n	: n-tipi Yarıiletken İş Fonksiyonu
Φ_p	: p-tipi yarıiletken İş Fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletken iş Fonksiyonu
γ	: Norde Yönteminde Bir Sabit
δ	: Arayüzey Kalınlığı
ε_s	: Yarıiletkenin dielektrik Sabiti
ε₀	: Boşluğun dielektrik Sabiti
1D	: Bir Boyutlu
2D	: İki boyutlu

Kısaltmalar

AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
C-F	: Sığa-Frekans
C-V	: Sığa-Voltaj
EDS	: Dispersif Spektropi
G-F	: Kondüktans-Frekans
G-V	: Kondüktans-Gerilim
HRTM	: Yüksek Çözünürlüklü geçirimli Elektron Mikroskobu
I-V	: Akım-Gerilim
MIS	: Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Kontak
MS	: Metal-Yarıiletken Kontak
PL	: Fotoluminesans
PVA	: Polivinil Alkol
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SCLC	: Uzay Yüğü Sınırlı Akım
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işın Difraksiyonu
PEC	: Fotoelektrokimyasal
AVS	: Düşüşle Mutlak Vakum Enerjisi Ölçeğı
IPCE	: Foto-Akım Dönüşüm Verimliliğı
SE	: Spektroskopik Elipsometri
F-B	: Forouhi-Bloomer

ŞEKİLLER

ŞEKİL 2. 1. KATI YALITKANLAR, YARIİLETKENLER VE İLETKENLER İÇİN BANT YAPISI	11
ŞEKİL 2. 2. VERİLEN SICAKLIKLARDA ELEKTRON ENERJİLERİNİN FERMİ-DİRAC DAĞILIM FONKSİYONU	11
ŞEKİL 2. 3. KAFES PARAMETRELERİ $A=3.782 \text{ Å}$ VE $C=9.502 \text{ Å}$ OLAN TiO_2 'NİN ANATAZ KRİSTAL YAPISININ GÖSTERİMİ	14
ŞEKİL 2. 4. TiO_2 'NİN BANT DİYAGRAMI	15
ŞEKİL 2.5. BİR ANATAZ TiO_2 SÜPER HÜCREİNDEKİ OKSİJEN BOŞLUKLARININ GÖSTERİMİ	16
ŞEKİL 2. 6. TERMAL DENGEDEN (A) BİR SCHOTTKY VE (B) N-TİPİ BİR YARIİLETKEN İLE OMİK KONTAK VE BUNLARIN (C-D) KARŞILIK GELEN ELEKTRON ENERJİ BANDI DİYAGRAMLARININ GÖSTERİMİ	17
ŞEKİL 2. 7. İDEALLİK FAKTÖRÜNÜN $N=1$ OLDUĞU İDEAL DİYOT I-V ÖZELLİKLERİ GÖSTERİMİ	19
ŞEKİL 2. 8. N-TİPİ YARIİLETKENLER ÜZERİNDE DOĞRULTUCU BİR METAL KONTAĞI İÇİN (A) İLERİ VE (B) TERS POLARİZASYON MEKANİZMASININ GÖSTERİMİ	20
ŞEKİL 3. 1. D8 DISCOVER XRD ÖLÇÜM SİSTEMİ	21
ŞEKİL 3. 2. BİR EDS DEDEKTÖRÜNE OPERASYONEL GENEL BAKIŞ	23
ŞEKİL 3. 3. 269 NM DE SOĞURMA GÖSTEREN BİR NUMUNEYE AİT UV-VİS SPEKTRUMU	24
ŞEKİL 4. 1. ULTRASONİK TEMİZLEME ARACI	26
ŞEKİL 4. 2. KULLANILAN TİTANYUM DİOKSİT TOZU	26
ŞEKİL 4. 3. TiO_2 ÇÖZELTİSİ	27
ŞEKİL 4. 4. SPREY PİROLİZ DÜZENEGİ	28
ŞEKİL 4. 5. SPREY PİROLİZ DÜZENEGİN ŞEMATİK ÇİZİMİ	28
ŞEKİL 4. 6. CAM ÜZERİNE OLUŞTURULAN TiO_2 İNCE TABAKA	29
ŞEKİL 4. 7. AL BUHARLAŞTIRMA VE KAPLAMA KULLANILAN NVTH-350 MODEL PVD CİHAZI	30
ŞEKİL 5. 1. CAM ALTLIKLAR ÜZERİNDE SPREY PİROLİZ İLE OLUŞTURULAN TiO_2 İNCE TABAKANIN XRD DESENİ	31
ŞEKİL 5. 2. KULLANILAN TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOPU	33
ŞEKİL 5. 3. OLUŞTURULAN TiO_2 SEM GÖRÜNTÜSÜ	33
ŞEKİL 5. 4. OLUŞTURULAN TiO_2 İNCE TABAKANIN SOĞURMA-DALGA BOYU GRAFİĞİ	33
ŞEKİL 5. 5. OLUŞTURULAN TiO_2 TABAKAYA AİT $(\text{AHY})^2 - \text{HY}$ DEĞİŞİM GRAFİĞİ	34
ŞEKİL 5. 6. OLUŞTURULAN TiO_2 TABAKANIN OPTİK GEÇİRGENLİK SPEKTRUMU GRAFİĞİ	34
ŞEKİL 5. 7. ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLERİN ALINDIĞI SİSTEM	365
ŞEKİL 5. 8. REFERANS AL/P-Sİ VE OLUŞTURULAN AL/ TiO_2 /P-Sİ DİYOTUNUN ODA SICAKLIĞINDA AKIM-VOLTAJ GRAFİĞİ	36
ŞEKİL 5. 9. OLUŞTURULAN AL/ TiO_2 /P-Sİ VE AL/P-Sİ REFERANS DİYOTLARIN GÖRE $F(V)$ -V EĞRİLERİ	37
ŞEKİL 5. 10. OLUŞTURULAN AL/ TiO_2 /P-Sİ VE AL/P-Sİ REFERANS DİYOTLARININ $DV/D(LNI)$ -I EĞRİLERİ	38
ŞEKİL 5. 11. OLUŞTURULAN AL/ TiO_2 /P-Sİ VE AL/P-Sİ REFERANS DİYOTLARININ $DV/D(LNI)$ -I EĞRİLERİ	38
ŞEKİL 5. 12. OLUŞTURULAN AL/ TiO_2 /P-Sİ SCHOTTKY DİYOTUNUN, 10KHZ-800HZ FREKANS ARALIĞINDAKİ TERS BESLEM ALTINDAKİ $1/C^2$ -V GRAFİKLERİ	41

ÇİZELGELER

ÇİZELGE 2. 1 BAZI METALLER İÇİN METAL İŞ FONKSİYONLARI PAREMETRELERİ..... 18

ÇİZELGE 5. 1. ELDE EDİLEN İNCE TABAKANIN BAZI MİKROYAPISAL PAREMETRELER.

.....**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

ÇİZELGE 5. 2. OLUŞTURULAN AL/P-Sİ VE AL/TİO₂/P-Sİ DİYOTLARININ AKIM-VOLTAJ, CHEUNG VE NORDE FONKSİYONLARINDAN HESAPLANAN DİYOT DEĞERLERİ (DİYOT ALANI A=0,00785 CM² OLARAK ALINMIŞTIR).**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

ÇİZELGE 5. 3. OLUŞTURULAN AL/TİO₂/P-Sİ NUMUNESİNDEN ALINAN ÖLÇÜMLERİN KAPASİTE-VOLTAJ GRAFİKLERİNDEN ELDE EDİLEN DİYOT PARAMETRELERİ.

.....**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**



1. GİRİŞ

Nanobilim ve nanoteknoloji, biyomedikal, kimya, hesaplama, mühendislik ve fizik gibi bilimsel alanlarda yeni roller bulmaya devam eden en son araştırma alanlarıdır. Mevcut teknolojileri minyatürleştirmek ve yeni bir teknoloji yaratmak için bu teknoloji, nano ölçekli malzemelerin veya nanomalzemelerin benzersiz fiziksel ve elektriksel özelliklerini manipüle etmeyi amaçlamaktadır. Nanomalzemelerin boyutları yaklaşık 1 ila 100 nm arasında değişir ve boyutlarına göre kategorize edilebilirler. Tek boyutlu (1D) karbon nanotüplerin (NT'ler) geliştirilmesinden bu yana (Iijima, 1991), nanoyapılı malzemeler, yüksek spesifik yüzey alanları ve yüzey-hacim oranları nedeniyle araştırma ilgisi katlanarak bir artış yaşamıştır. Bu oran, nanomalzemenin boyutu küçüldükçe önemli ölçüde artmaktadır. Nano ölçekte, hesaba katılması gereken birçok doğuştan gelen malzeme özelliği ortaya çıkarken, yığın malzemelerde bu özellikler ihmal edilebilir düzeydedir. Bu özellikler arasında mekanik ve termal özellikler, elektriksel ve manyetik özellikler ile yüzey aktivitesi ve reaktivite yer almaktadır.

Titanyum dioksit (TiO_2) gibi oksit yarıiletkenler, ince nanoyapılı tabakalar olarak umut verici elektriksel özellikler göstermiştir. Yarıiletken cihazlar, uygulamaya özel görevleri yerine getirmek için metal-yarıiletken (MS) arayüzleri gibi bir dizi hetero yapılardan yararlanılmıştır. Bu arayüzün yeniden üretimi, yarıiletken özelliklerinin ve belirli metallerle temas halindeyken sergilenen benzersiz davranışların kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektirmiştir.

1.1 Literatür Araştırması

Bu çalışmada yalıtımı veya katmanları sol-jel metodu ile hazırlanan $\text{Al}/\text{TiO}_2/\text{p-Si}$ metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapılar da arayüzeylerin elektriksel parametreler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Öncelikle cam üzerine farklı sıcaklıklarda hazırlanan TiO_2 ince tabakalarının optik, yapısal ve elektriksel özellikleri incelenerek hazırlanma koşulları hakkında bilgi edinilmiştir. Bu koşulları incelemek için FT-IR spektrumları, UV-VIS spektrumları, XRD analizleri ve SEM görüntüleri ve akım-gerilim (I-V) ölçümleri kullanılmıştır. Aynı koşullarda hazırlanan TiO_2 ince tabakaları p-tipi silisyum

kristal üzerine kaplanmış ve bu yapılardan Al/TiO₂/p-Si (MIS) yapıları elde edilmiştir. Elde edilen Al/TiO₂/p-Si MIS yapılarının I-V ve kapasitans-gerilim (C-V) ölçümleri daha sonra bir oda sıcaklığı ve yapılarının ana elektriksel özellikleri belirlenmiştir. Elektriksel özellikler kullanılarak, diyot yapılarının ara yüzeylerinin enerji dağılım profili belirlenmiştir. Son olarak, seçilen Al/TiO₂/p-Si (MIS) yapısı için sıcaklığa bağlı I-V ölçümleri yapılmıştır ve bu yapının akım iletim mekanizması hakkında bilgi edinilmiştir (Pakma ve ark., 2008).

Orta kızılötesi (MIR, 2 – 6 µm dalga boyu) şeffaf metal oksitler, düzlemsel entegre MIR fotonik cihazları ve algılama uygulamaları için çekici malzemelerdir. Bu raporda, entegre MIR fotonığı için yeni bir malzeme adayı olarak reaktif püskürtme ile çökeltilmiş ZrO₂-TiO₂ (ZTO) ince tabakaları incelenmiştir. Malzeme yapısı ve optik özellikler sistematik olarak Ti konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. İnce tabakanın kırılma indisi Ti konsantrasyonu ile monoton bir şekilde artarken tabakanın kristallığı azalmıştır. Tamamen amorf ZTO tabakaları, çeşitli alt tabakalar üzerinde %40 Ti katkısıyla elde edilmiştir. MgO substratları üzerindeki MIR mikro disk rezonatörleri, 5.2 µm dalga boyunda ~11.000 yüklü kalite faktörüne sahip Zr_{0.6}Ti_{0.4}O₂ şerit yüklü dalga kılavuzları kullanılarak gösterilmiştir (Duan ve ark., 2013).

TiO₂ heteroeklemleri, Fe dopinginin bir fonksiyonu olarak sol-jel spin kaplama tekniği ile imal edilmiştir. Fe katkısının TiO₂ ince tabakaların optik, yapısal, morfolojik özellikleri ve fotodiyot uygulamalarının elektro-optik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. XRD sonuçları tepe noktaları göstermemiştir. Tüm tabakaların amorf olduğu anlamına gelir. İnce tabakaların değerleri artan Fe konsantrasyonu ile azalmıştır. Diyotların karanlık ve aydınlık koşullarda yapılan ölçümleri sonucunda tüm diyotlar foto karakteristik davranış göstermiştir. Diyotların bariyer yükseklik değerleri 0,68 eV ile 0,70 eV arasında değişmektedir. En düşük idealite faktörü %2 Fe: TiO₂/p-Si diyottan elde edilmiş ve 4,75 olarak bulunmuştur. $1,53 \times 10^4$ ile en yüksek fotosensitivite %6 Fe: TiO₂'den elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, fabrikasyon diyotların performanslarının Fe katkısıyla yönetilebileceğini göstermiştir (Ruzgar ve Pehlivanoglu, 2020).

Rüzgar, 2020, bu çalışmada, TiO₂/p-Si ve Gd:TiO₂/p-Si heteroeklemleri sol-jel yöntemi ile üretilmiştir. TiO₂ ve Gd:TiO₂ ince tabakaların optik özelliklerini değerlendirmek için UV-Vis spektroskopisi yapılmıştır. TiO₂ ince tabakanın optik bant

aralığı, geçirgenliği, sönme katsayısı ve optik dielektrik sabitlerinin Gd içeriği ile arttığı gözlenmiştir. Heterojonksiyon diyotlarının elektriksel özellikleri, karanlık koşullar altında geleneksel I-V ölçümleriyle analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Gd katkılama ile $\text{TiO}_2/\text{p-Si}$ diyotun idealite faktörü 8,97'den 3,87'ye düşmüş ve düzeltme oranı $1,59 \times 10^3$ 'ten $1,45 \times 10^6$ 'ya yükselmiştir. Diyotların seri direnci hem Norde hem de Cheung yöntemi ile hesaplanmıştır. $\text{TiO}_2/\text{p-Si}$ diyodunun yüksek seri direnç değeri ve yüksek karanlık akımı, Gd katkısıyla başarıyla aşılmıştır. Ayrıca Gd: $\text{TiO}_2/\text{p-Si}$ fotodiyotun fotovoltaiik özellikleri çeşitli aydınlatma yoğunlukları altında incelenmiştir. Gd: $\text{TiO}_2/\text{p-Si}$ diyodunun ışığa tepkisi nedeniyle bir fotosensör olarak kullanılabileceği gösterilmiştir (Rüzgar, 2020).

İnce tabaka Schottky diyotları, geniş alanlı esnek elektroniklerdeki temel unsurlardan biridir. Bu tür cihazlarda, oldukça homojen bir yarıiletken tabaka, cihazın performansı için hayati önem taşımaktadır. Burada, Schottky diyotları için uyumlu bir oksit yarıiletken tabakası oluşturmak için yeni bir çözüm tabanlı anodizasyon yöntemi önerilmiştir. Anodize edilmiş TiO_2 tabakasının kalınlığı 12 ile 22,5 nm arasında değişmiştir. Optimize edilmiş Pt/ TiO_2 /Ti Schottky diyot, 1,19 eV'lik büyük bir bariyer yüksekliği, ± 2 V'ta $3,5 \times 10^6$ gibi yüksek bir açma/kapama oranı ve 1,5' lik bir idealite faktörü göstermiştir. Ortalama maksimum kırılma elektrik alanı 5,5 MV/cm olup, geleneksel çözelti ile işlenmiş TiO_2 'nin tipik değerlerinden daha yüksek olduğu göstermiştir. 15 nm kalınlığında TiO_2 katmanına sahip diyot ayrıca 0,7 MHz'e kadar iyi doğrultma özellikleri göstermiştir (Zhang ve ark., 2019).

İdealite faktörü gibi literatürden daha iyi elektriksel özelliklere sahip bir TiO_2/Si heteroeklem fotodiyodu üretmek için termiyonik vakum arkı olarak bilinen farklı bir teknik önerilmiştir. Heteroeklem, farklı ışık yoğunluklarına karşı oldukça hassastır ve bir fotodiyot olarak kararlı fotoakım özelliklerine sahiptir. Üretilen TiO_2/Si heteroyapı yüzeylerinin yapısal ve morfolojik özellikleri sırasıyla AFM ve XRD ile incelenmiştir. XRD analizine göre TiO_2 ince tabakanın Anataz ve Brookite fazları ile polikristal yapıda olduğu gözlenmiştir. Ayrıca tabaka yüzeyinin homojen olduğu ve düşük bir pürüzlülük değeri 3 nm olarak ölçülmüştür. İnce tabaka kalınlığı ve bant aralığı değerleri (E_g) optik yöntemlere göre belirlenmiştir. İletkenlik tipi, yük taşıyıcı yoğunluğu ve hareketlilik gibi TiO_2 ince flm'nin elektriksel parametreleri de Hall Etkisi ölçümü ile belirlenmiştir. Ag/ TiO_2 /Si/Ag heteroeklem cihazı özellikleri akım-gerilim (I-V) ölçümü yapılarak belirlenmiştir. İdeallik faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) parametreleri

sırasıyla 1,7 ve 0,65 eV olarak belirlenmiştir. Foto-tepki performansı, farklı ışık yoğunlukları için geçici fotoakım (IT) ölçümleri yoluyla ölçülmüştür (Kaplan ve ark., 2021).

Dijital elektronik cihazların devam eden iyileştirilmiş performansı, daha yüksek entegrasyon kapasitesi, daha hızlı çalışma ve düşük güç tüketimi için ucuza üretilmesi gereken yeni bellek teknolojilerini gerektirmiştir. Dirençli rasgele erişimli bellek, geçici olmayan bellek teknolojisi olarak ön sıralarda yer almak için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu tür bir hücrede saklanan direnç durumları uzun süre kalabilir ve çok küçük bir elektrik darbesi ile tahribatsız bir şekilde okunmuştur. İnce bir TiO_2 katmanını içeren tipik olarak iki terminal bellek hücresi incelenmiştir. Polikristal TiO_2 ince tabakalar, hem fiziksel hem de elektriksel olarak karakterize edilen atomik katman biriktirme ve magnetron reaktif püskürtme işlemleriyle biriktirilmiştir. Dirençli anahtarlama hücreleri, bir metal/ TiO_2 /metal yapısında üretilmiştir. Akım uyumluluğu tarafından kontrol edilen çok düzeyli dirençli çift kutuplu anahtarlama, bellek kapasitesini geliştirmek için çok bitli bellek hücreleri olarak adlandırılan potansiyel olarak kullanılacak olan bu hücrelerde gözlemlenen ortak özelliktir. Farklı Pt, Cu, Ag üst elektrotları ile dirençli anahtarlama davranışları incelenmiştir. Anahtarlama davranışları, minimum akım uyumu, programlanan direnç durumlarının dayanıklılığı ve anahtarlama sırasındaki morfoloji değişikliği gibi üst metale bağlı olarak farklılık göstermiştir. Farklı direnç durumlarının sıcaklık bağımlılığı araştırılmıştır. Aktivasyon enerjisinin azaltılması ve bunların olası iletim mekanizmaları, temel akım iletim modelleri temelinde tartışılmıştır. Direnç durumunun indirgeme dirençleri ile yarıiletken den metalik özelliğe geçtiği bulunmuştur. Cu/ TiO_2 /Pt ve Ag/ TiO_2 /Pt üzerindeki metalik durumlarının hesaplanan sıcaklık katsayıları, bir Cu ve Ag filament oluşumunu ima eden, bildirilen literatür verilerine çok yakın olduğu görülmüştür. İletken atomik kuvvet mikrospektroskopisi yardımıyla, ilk TiO_2 ince tabakalarının ve üst Cu elektrodu çıkarıldıktan sonra ON durumundaki TiO_2 'nin yerel iletkenliği araştırılmıştır. Her iki durumdan elde edilen sonuçlar, gözlemlenen anahtarlama davranışlarına katkıda bulunan uygun elektrik voltajları altında nanometre ölçeğinde yerel filaman oluşumunu doğrulamıştır. Uçuş süresi ikincil iyon kütle spektroskopisi analizi, Cu'nun TiO_2 katmanına interdifüzyonunu göstermiştir. Bu nedenle, Cu elektrotlu TiO_2 'deki dirençli anahtarlama, uygulanan voltaja göre Cu filamanını oluşturan ve çözen elektrokimyasal metalizasyon sürecini içermiştir (Yang, 2011).

Nanoyapılı TiO_2 ince tabakalar, indiyum katkılı kalay oksit (ITO) substratlar üzerinde darbeli lazer biriktirme (PLD) ile hazırlanmıştır. X-ışını fotoelektron spektroskopisinden (XPS) elde edilen sonuçlar, Ti 2p çekirdek seviyesi tepe noktalarının, tampon gaz basıncında azalma ile daha düşük bağlanma enerjisine doğru kaydığını göstermiştir. Bu, oksijen boşluklarının yetersiz oksijen koşulları altında oluşturulduğunu göstermektedir. Anatazin rutil oranına da sistem basıncına bağlı olduğu bulunmuştur. 750 mTorr biriktirme basıncı altında, toplu anatazdan rutil faza dönüşüm sıcaklığından çok daha yüksek olan 1073 K substrat sıcaklığında bile yalnızca anataz fazı gözlenmiştir. Biriken TiO_2 ince tabakaları, fotoelektrokimyasal (PEC) çalışmalar için fotoanotlar olarak üretilmiştir. TiO_2 fotoanotları üzerindeki PEC ölçümleri, düz bant potansiyelinin (V_{fb}), 873K'da biriktirme basıncında 750'den 250 mTorr'a düşüşle mutlak vakum enerjisi ölçeğinde (AVS) 0,088 eV arttığını göstermiştir. %2,5 ila %6'lık en yüksek gelen foton-akım dönüşüm verimliliği [$\text{IPCE}(\lambda)$], 873K substrat sıcaklığında hazırlanan ince tabakalardan elde edilmiştir. XPS ve PEC çalışmalarından elde edilen sonuçları birleştirerek, biriktirme basıncının, TiO_2 'nin elektronik yapısını değiştiren oksijen boşluklarının konsantrasyonunu etkilediği sonucuna varılmıştır. Foto elektrokimyasal katalitik performansa atıfta bulunarak, sonuçların, düz bant potansiyelinin (V_{fb}) enerjisini spesifik olarak hizalamak için tampon gaz basıncını ve sıcaklığını kontrol ederek TiO_2 ince tabakalarının Fermi enerji seviyesini ve yapısını ayarlamının mümkün olduğunu gösterilmiştir (Lin ve ark., 2008).

Titanyum dioksit (TiO_2) 20 nm'nin altında farklı kalınlıklara sahip ultra ince tabakalar, 300 °C'de silikon substratlar üzerinde atomik katman biriktirme (ALD) ile büyütülmüştür. Ektroskopik elipsometri (SE) ölçümleri, Forouhi-Bloomer (F-B) dispersiyon ilişkisi ile 200 ila 1000 nm spektrum aralığındaki ultra ince tabakaların optik özellikleri üzerinde kalınlığın etkisini araştırmak için çalıştırılmıştır. İncelenen TiO_2 ultra ince tabakanın kırılma indeksi ve sönme katsayısının arttığı, TiO_2 ultra ince tabakanın bant aralığının ise tabaka kalınlığının artmasıyla monoton bir şekilde azaldığı bulunmuştur. Ayrıca TiO_2 ultra ince tabakanın optik özelliklerinin sıcaklığa bağlılığını incelemek amacıyla numuneler, N_2 atmosferinde 400 ila 900 °C sıcaklıkta tavlansmıştır. Biriktirilmiş ve tavlansmış tabakaların kristal yapısı SE tarafından çıkarıldı ve X-ışını kırınımı (XRD) ile desteklenmiştir. Anataze TiO_2 tabakanın tavlama sıcaklığı 800 °C'ye ulaştığında rutile faza dönüşmeye başladığı ortaya çıkmıştır (Shi ve ark., 2017).

İnce TiO_2 tabakaların elektriksel özelliklerinden son zamanlarda çeşitli metal oksit elektron cihazlarının (tek kutuplu/çift kutuplu yarıiletken cihazlar ve/veya memristörler) etkinleştirilmesine yönelik olarak geniş ölçüde yararlanılmıştır. Bu tür çabalarda, aktif malzeme olarak TiO_2 'nin rolüne ilişkin araştırmalar ana odak noktası olmuştur, ancak elektrot malzemeleri de aynı derecede önemlidir. Yapılan çalışmada, Metal- TiO_2 -Metal yapıların arayüz özellikleri üzerine sistematik bir elektriksel karakterizasyon sunulmuştur. Bu çalışma, bir Metal- TiO_2 -Metal ayarında hem üst hem de alt elektrot olarak kullanılan tipik temas malzemeleri kullanılmıştır. Bu Metal- TiO_2 temaslarının etkisinin araştırılmasına ve ayrıca bir elektrodun üst/alt elektrot bağlantısı olarak adlandırılan karşı arayüze etkisinin bütünsel olarak incelenmesine olanak tanımıştır. Bu incelemede, 300-350 K sıcaklık aralığında çeşitli katı hal prototiplerinden akım-gerilim (I-V) özelliklerinin kaydedilmesini ve uygun modelleme yoluyla analiz edilmesini içermektedir. Metal- TiO_2 -Metal yapılarda her bir malzemenin üst/alt elektrotlar olarak daha fazla ışık tutmak için net alan ve sıcaklığa bağlı imza grafikleri de elde edilmiştir. Sonuçlar Metal- TiO_2 cihazlarında uygun elektrot malzemelerinin seçilmesi için faydalı bir veri tabanı sağlayarak metal oksit elektronik uygulamalarında yeni bilgiler sunmuştur (Michalas, 2017).

Wadullah ve ark. (2021) yaptıkları çalışmalarında, çeşitli alttaşlar üzerinde optimum koşullarda püskürterek biriktirme yöntemiyle hazırlanan nano kaplamalı ince tabakaların sentezini ve karakterizasyonunu gerçekleştirdiler. TiO_2 , SiO_2 , ZnO ve CuO 'nun nano kaplama ince tabakalarını farklı alt tabakalar (paslanmaz çelik 316L, ticari olarak saf Ti, Si-Wafer (100) ve cam alt tabakalar) üzerine biriktirmek için magnetron püskürtme biriktirme tekniği kullanılmıştır. Yüzey morfolojisi, kristal yapısı ve boyutu ve biriken tabaka elementleri sırasıyla SEM, XRF ve XRD karakterizasyon teknikleri kullanılarak incelenmiştir. SEM fotoğraflarından elde edilen bulgulara göre, mikro yapı tekdüzedir ve yüzeyde kusur veya mikro çatlak yoktur. Biriken ince tabakalar, X-ışını kırınım modellerine göre bir nanoyapıya ve 60-90 nm'lik bir nanoparçacık tanecik boyutuna sahiptir. Ayrıca tüm ince tabakalar, standart faz tepe noktalarına uyan farklı yönlerde hizalanmış bir kristal yapıya sahiptir. Her bir tabaka birikiminin ögeleri, üretilen XRF piklerinin belirli hedefleridir (Wadullah ve ark., 2021).

Lin ve ark., (2019), çalışmalarında %10 O_2 kısmi basıncı ile DC reaktif magnetron püskürtme yöntemiyle şeffaf bir p-tipi TiO_2 ince tabaka rapor etmişler. TiO_2

ince tabakanın p-tipi iletimi de Seebeck etkisi ile doğrulamışlar. TiO_2 ince tabaka incelendiğinde en düşük öz direnci ($1.458 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$) N_2 atmosferi altındaki ortamda 500°C tavlama sıcaklığında meydana gelmiştir. %10 O_2 kısmi basıncı ile kaplanmış TiO_2 ince tabakaların p-tipi iletim mekanizmasının kusurlu reaksiyon mekanizmasından, yani $\text{Ti}_2^{+}-\text{Ti}_4^{+}$ ikame reaksiyonundan kaynaklanğı belirtmiştir. P- $\text{TiO}_2/\text{n-ITO}$ 'nun şeffaf bir p-n bağlantısı, fotolitografi ve kaldırma işlemleriyle üretilmiştir. P- $\text{TiO}_2/\text{n-ITO}$ bağlantısının I-V eğrisi, p- TiO_2/nITO p-n bağlantısının, ileri yönlü gerilim altında yaklaşık 3,19 V'luk bir açma gerilimi ile iyi bir diyot özelliği sergilediğini göstermiştir. Bu, bant aralığına karşılık gelir. Ayrıca %10 O_2 kısmi basıncı ile hazırlanan incelenen mevcut TiO_2 ince tabakanın p-tipi iletim olduğunu da kanıtlamıştır. (Lin ve ark., 2019).

n- TiO_2 nanotabaka/p- CuMnO_2 ince tabakanın dayalı heteroeklem, bir UV fotodetektörünün üretimi için verimli bir iki aşamalı sentez işlemi kullanılarak elde edilmiştir. İlk adım, termal oksidasyon (Ti-TiO_2) ile titan folyo üzerinde büyütülen TiO_2 nanotabakasının elde edilmesinden oluşturulmuştur. İkinci adım, Doctor Blade yöntemi kullanılarak Ti-TiO_2 yüzeyi üzerine CuMnO_2 ince tabaka kaplamasından oluşturulmuştur. Sentezlenen heteroyapıların yapısal ve morfolojik özelliklerinin araştırılması için X-ışını kırınımı, UV-VIS analizi, SEM ve AFM morfolojileri gibi teknikler kullanılmıştır. N- TiO_2 /p- CuMnO_2 bağlantısını kanıtlamak için Mott-Schottky analizi yapılmıştır. N- TiO_2 nanotabaka/p- CuMnO_2 ince tabaka heteroyapısının I-V ölçümleri, karanlık durum, UV ve görünür aydınlatma koşulları altında diyot özelliklerini doğrulamıştır. Farklı enerji bant yapılarına sahip iki tür yarıiletken dayanan elde edilen heteroeklem, yüksek performanslı UV fotodetektörleri için çok önemli olan yüklerin ayırma sonuçlarını iyileştirmiştir (Nicolaescu, 2021).

Tüm geçiş metal oksitleri arasında titanyum dioksit (TiO_2), hem amorf hem de kristal formlardaki geniş uygulama yelpazesinden dolayı en yoğun araştırılan malzemelerden biri olmuştur. Oda sıcaklığında iyon-plazma destekli e-ışın biriktirme yoluyla amorf TiO_2 ince tabakalar üretilmiş ve kristalleşmenin başlangıcını incelemek için numunelere ısıtma işlemi uygulanmıştır. Burada, hem $250-1000^\circ\text{C}$ aralığındaki tavlama sıcaklığının hem de 5 ile 200 nm arasında değişen TiO_2 kalınlığının bir fonksiyonu olarak kristalleşmenin en erken aşamasını ve gelişimini detaylandırmıştır. Büyütülmüş ve ısıtma işlemi görmüş örneklerin yapısal ve morfolojik özelliklerini Atomik Kuvvet Mikroskobu, Taramalı Elektron Mikroskobu, X-ışını Difraktometrisi ve Raman

spektroskopisi ile araştırılmıştır. Tabaka kalınlığı azaldıkça artan bir kristalleşme başlangıç sıcaklığının yanı sıra tabaka kalınlığına bağlı olarak kristalleşme evriminde dikkate değer farklılıklar gözlenmiştir. Son olarak, her ikisi de nihai olarak kristallik derecesini etkileyen TiO_2 kalınlığının ve tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak araştırdılar (Durante ve ark., 2021).

Oh ve Kınce, (2018), çalışmalarında TiO_2 'nin bir yalıtkan olarak özelliklerini araştırmak için çeşitli tavlama sıcaklıklarında TiO_2 tabakalar hazırlamıştır. Schottky bariyerli TiO_2 tabakaların kontağın özelliklerine göre akımları araştırılmıştır. Potansiyel bariyer Schottky bariyerine bağlıdır ve TiO_2 ince tabakanın potansiyel bariyeri arttıkça akım azalmıştır. 110 °C'de tavllanmış TiO_2 tabakanın akımı düşmüş ve salon hareketliliğinin artmasıyla taşıyıcı yoğunluğu azalmış ve öz direnci artmıştır. Schottky kontağı yarıiletken cihaz olmak için önemli bir faktördür, potansiyel bariyer Hall hareketliliği ile orantılıdır ve Hall hareketliliği potansiyel bariyer arttıkça artmış ve daha yalıtkan özellik kazanmıştır. İnce tabakaların en düşük taşıyıcı konsantrasyonuna rağmen yüksek hareketliliğe sahip olmasının nedeni, ince tabakalarda ki iletim mekanizmasının elektronların banttan banda tünelleme olgusundan kaynaklanmasıdır (Oh, 2018).

Cam plakalar üzerine immobilize edilmiş fotokatalitik TiO_2 ince tabakalar hazırlamak için daldırma kaplama yöntemiyle sol-jel tekniği kullanılmıştır. Başlangıç substratı olarak titanyum butoksit kullanılmıştır. Çözücü etanoldü ve katkı substratı asetil aseton kullanıldı. TiO_2 'nin asetil asetona molar oranları, incelenen parametreler olarak değiştirilmiştir. Asetil asetonun TiO_2 ince tabaka özellikleri olan adezyon ve korozif özellik, ince tabakanın yüzey morfolojisi, TiO_2 moleküler yapısı ve fotoaktivite üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Asetil asetonun TiO_2 ince tabaka özellikleri üzerinde önemli bir rol oynadığı bulunmuştur. TiO_2 ince tabakanın aderans özelliğini önemli ölçüde arttırmış ve pürüzsüz yüzeyini sağlamıştır. Asetil aseton TiO_2 tabakanın kristal yapısına daha az etki etmiş ve TiO_2 'nin nanopartikül boyutunu arttırmış, bu da tabakanın fotokatalitik aktivitesinin azalmasına neden olmuştur (Kajitvichyanukul ve ark., 2005).

Sevgili (2021), yaptığı çalışmada Al/ TiO_2 /p-Si schottky diyot (SD) termal buharlaştırma metodu kullanılarak üretilmiştir. Cihazın elektriksel iletkenlik özellikleri farklı aydınlatma şiddetlerinde (lüx) ve geniş bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak ölçümler 320 K ile 100 K arasında 20 K adımla

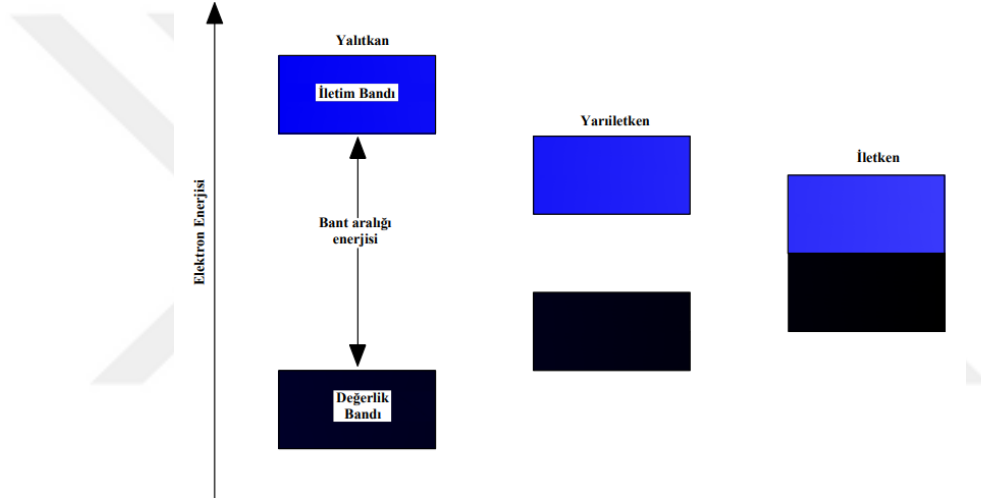
gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık artması ile birlikte cihazın idealite faktör parametresi 4,878'den 2,305'e düşmekte ve bariyer yüksekliği 0,287 eV'den 0,714 eV'a çıkmaktadır. Bu çalışmanın sonucunda elde edilen diyot parametreleri literatürde farklı metotlarla sahip olunan benzer yapılarla karşılaştırılmıştır. Yerel oksit tabakası, safsızlıklar, tükenme tabakasının kalınlığı gibi sebeplerden kaynaklı arayüz durumu parametreleri 10^{14} eV mertebesinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Aydınlik şiddetine bağlı olarak yapılan ölçümlerde, idealite faktörünün değeri, artan aydınlık şiddeti ile 2,238'den 2,868'e yükselirken, engel yüksekliği değeri 0,645 eV'den 0,574 eV'a düşmektedir. Ayrıca yapının fotoakım-zaman grafiği çizilerek ışığa tepkisi incelenmiştir. Cihazın ışığa tepki süresi 0,26 s'den az bulunmuştur (Sevgili, 2021).

Bu tez, çalışmasında nanoyapılar üzerindeki metal-yarıiletken arayüzeyler, yeni nesil nanoelektronik için çok önemli yapı taşlarını temsil eder. Son yirmi yılda, kimyasal olarak sentezlenmiş titanyum dioksit nanotüpler (NT), yüksek spesifik yüzey alanları, ayarlanabilir geometrileri ve uygun elektriksel özellikleri nedeniyle önemli miktarda ilgi kazanmıştır. Bu çalışma TiO_2 'ler spreylendirilme yöntemi kullanılarak bir Schottky bariyeri geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu son derece düzenli TiO_2 dizileri, spreylendirilme yöntemi kullanılarak cam ve Si alttaşlar üzerinde numuneler sentezlenmiştir. Bu numuneler daha sonra uyumlu bir Schottky bariyeri oluşturmak için fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği kullanılarak alüminyum (Al) ile kaplanmıştır. Bu çalışma, Si/ TiO_2 diyotların, nanoyapı özelliklerini, üretim tekniklerini, elektriksel özellikleri hakkında bilgi sunmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Yarıiletkenler

İyi yalıtkanlar 10^{-22} Ω -cm kadar büyük özdirenç değerlerine sahipken tipik bir iletken ortalama 10^{-6} Ω -cm civarındadır. $T=0K$ 'de yarıiletkenler mükemmel yalıtkanlardır, ancak sıcaklık arttıkça özdirenç azalır ve iletme neden olur (Ashcroft ve ark., 1976). Alternatif olarak, bu katılar Şekil 2.1'de gösterildiği gibi iletim ve valans bantları arasındaki enerji boşluğu veya bant aralığı ile karakterize edilebilir.



Şekil 2. 1. Katı yalıtkanlar, yarıiletkenler ve iletkenler için bant yapısı (Chen, 2005).

Her iki bandın enerji eğrilerini " k uzayında" görüntüleyerek yarıiletkenin doğrudan veya dolaylı bir bant aralığına sahip olup olmadığını değerlendirmek önemlidir. Hem valans hem de iletim bandı sırasıyla aynı dalga vektörü k üzerinde yer alan maksimum ve minimum enerjilere sahipse, yarıiletken doğrudan bir bant aralığına sahiptir. Bununla birlikte, yanlış hizalanmış dalga vektörlerine sahiplerse, yarıiletken dolaylı bir bant aralığına sahiptir (Chen, 2005). İletim, elektronlar bant aralığı boyunca termal olarak uyarıldığında bir yarıiletken de meydana gelir, bu mekanizma boş bir seviye veya valans bandında bir elektron boşluğu ile sonuçlanır. Elektrik iletkenliği bir fonksiyon olarak hızla artar ve süstitüsyonel veya interstisyel safsızlıklar eklenerek daha da geliştirilebilir (Neamen ve ark., 2012). Bu dopantlar,

sırasıyla iletim bandına ek elektronlar veya valans bandına ek delikler sağlayarak donör veya alıcı konsantrasyonuna katkıda bulunur. Safsızlık konsantrasyonundaki değişiklik, bir elektronu iletim bandına veya deliği valans bandından taşımak için gereken enerji miktarını azaltır. Bir sistem termal dengede ise, Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu, E enerjisinde dolu veya boş olan mevcut kuantum durumlarının sayısını belirlemek için kullanılabilir. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu Denklem (2.1) ile tanımlanır.

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right) + 1} \quad (2.1)$$

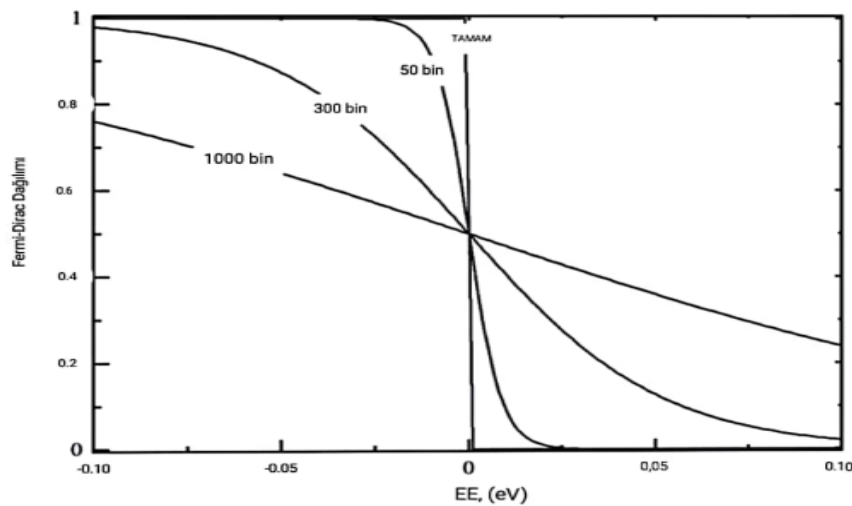
Burada;

E_F : Fermi seviyesi

k_B : Boltzmann sabiti

T: Mutlak sıcaklıktır

Şekil 2.2 fermi seviyesine göre elektron enerjisinin bir fonksiyonu olarak çeşitli sıcaklıklarda bu dağılımı göstermektedir. Yarıiletkenlerde, iletim bandındaki elektron sayısı ve valans bandındaki delik sayısı aşağıdaki gibidir.



Şekil 2. 2. Verilen sıcaklıklarda elektron enerjilerinin Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu (Fujishima,1972).

Herhangi bir sıcaklıkta T Fermi-Dirac istatistikleri kullanılarak belirlenebilir ve Denklem (2.2) ve Denklem (2.3) ile tanımlanır.

$$\eta_c(T) = \int_{E_c}^{\infty} dE D_c(E) f(E) \quad (2.2)$$

$$p_v(T) = \int_{-\infty}^{E_v} dE D_v(E) (1 - f(E)) \quad (2.3)$$

Burada $D(E)$, birim hacim başına enerjileri $(E, E+dE)$ arasında olan durumların sayısı veya durumların yoğunluğudur. Uygulanan bir elektrik alanı altında, elektronlar ve delikler, sırasıyla iletim ve değerlik bantları yönünde net bir ivme üretecek şekilde zıt yönlerde bir kuvvete maruz kalırlar. Yarıiletken bir malzemedeki bu sürüklenme akımı yoğunluğu Denklem (2.4) ile tanımlanır.

$$I = \sigma E_a \quad (2.4)$$

Burada;

σ : İletkenlik (özdirencin tersi)

E_a : Uygulanan voltajdır.

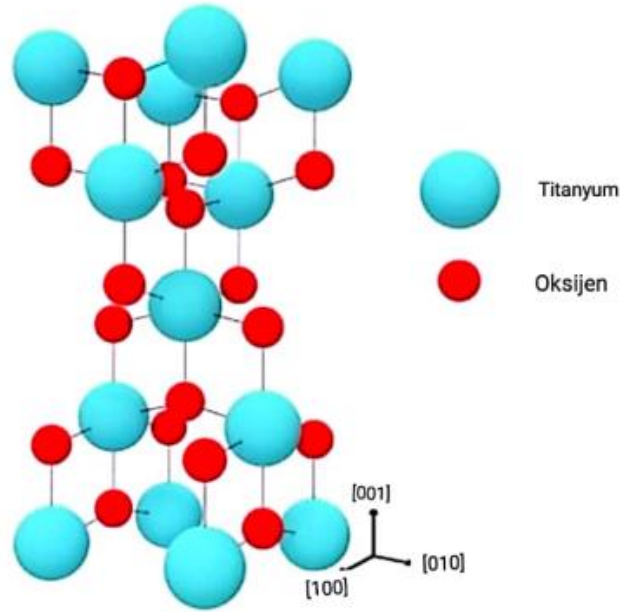
Elektronların hareketlilik değerleri, μ_n ve deliklerin μ_p , genel iletkenliğe katkıda bulunur Denklem (2.5) ile tanımlanır.

$$\sigma = q \cdot (\mu_n n + \mu_p p) \quad (2.5)$$

2.2 Titanyum dioksit

Fotoelektrokimyasal su ayrıştırma yoluyla hidrojen üretiminin keşfinden bu yana (Fujishima,1972). TiO_2 tabakaları, benzersiz yarıiletken özellikleri nedeniyle en çok çalışılan geçiş metal oksitlerinden biri olmuştur.

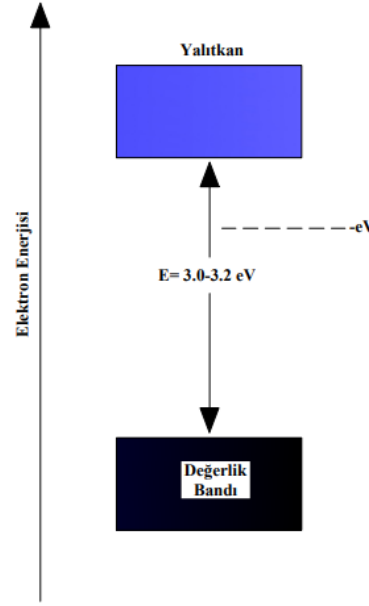
Şekil 2.3'te gösterilen TiO_2 anatazın genellikle daha yüksek elektronik iletkenliğe sahip olduğu kabul edilen üç farklı polimorfta kristalleşir.



Şekil 2. 3. Kafes parametreleri $a=3.782 \text{ Å}$ ve $c=9.502 \text{ Å}$ olan TiO_2 'nin anataz kristal yapısının gösterimi (Fujishima,1972).

Rutil ve brookit fazlarına kıyasla nanoyapılardaki verimlilikleri (Luttrell ve ark., 2015). Rutil ve anataz TiO_2 rutil için $a=b= 4.594 \text{ Å}$ ve $c= 2.96 \text{ Å}$ ve anataz için $a=b= 3.782 \text{ Å}$ ve $c= 9.502 \text{ Å}$ kafes sabitlerine sahip tetragonal yapılara sahiptir. Bu kristal fazların,

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi rutilin 3,0 eV doğrudan bant aralığı enerjisine ve anatazın 3,2 eV dolaylı geniş bant aralığına sahip olduğu düşünülmektedir. Anataz, 550 °C' üzerindeki sıcaklıklarda tavlandığında geri dönüşümsüz olarak rutile dönüşür. TiO_2 'nin n-tipi bir yarıiletken malzeme olduğuna dikkat etmek önemlidir, bu nedenle fermi enerjisinin konumu iletim bandının altında yer alır.

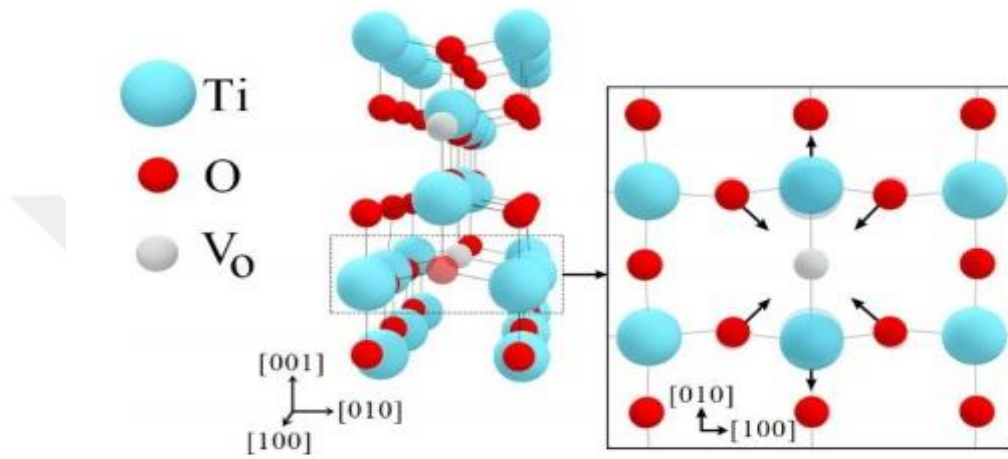


Şekil 2. 4. TiO₂'nin bant diyagramı (Zhang ve ark., 2013).

TiO₂ nanotüpler gibi nanoyapılar, yüksek spesifik yüzey alanları, ayarlanabilir geometrileri ve uygun elektriksel özellikleri nedeniyle önemli miktarda bilimsel ilgi kazanmıştır. Genellikle piller, (Zhang ve ark., 2004), elektrokataliz (Wang Ve ark., 2008), filtrasyon sistemleri (Tennakone ve ark., 1998), gaz sensörleri (Ji ve ark., 2005), hidrojen üretimi ve depolaması (Lee ve ark., 2013), fotovoltak hücreler (Fujishima ve ark., 2006), ve son zamanlarda memristörler gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2013). TiO₂-NT'leri hazırlamak için sol jel ve şablon destekli yöntemler gibi birçok teknik olmasına rağmen, elektrokimyasal anodizasyon gözenek çapı, gözenekler arası mesafesi, duvar kalınlığının yanı sıra düzenlilik ve kusur oranları vardır (Sulka ve ark., 2010). Örneğin son çalışmalar, bir etilen glikol elektrolitindeki NH₄F ve su konsantrasyonlarının etkilerini analiz etmiş ve düşük kusur oranına sahip kendi kendine organize olmuş, altıgen olarak düzenlenmiş NT'lerin büyümesi için optimum koşulları rapor etmiştir (Raja ve ark., 2007). Stokiyometrik olmayan TiO₂'nin, elektronik iletkenlikte daha fazla iyileştirme sağlar ve oksijen iyonlarının kısmen uzaklaştırılmasıyla elde edilebilir (Xiong ve ark., 2012). Bu oksijen boşluklarının (V_o), Ti³⁺ iyonlarının ve oksijen iyonlarından geride kalan elektronların oluşumu yoluyla TiO₂'nin fotokatalitik aktivitesini arttırdığı göstermiştir. V_o nedeniyle donör durumları için enerji seviyesi, iletim bandının 0,75 ile 1,18 eV arasında bulunmakta ve daha da dar bir optik boşluk genişliğine sahiptir (Pan ve ark., 2013). V_o dağılımı şu anda bilinmemektedir ve

yüzeyaltı seviyelerde kararlı olduğu bulunmuştur. Yüzey V_o , su ayrışması ve oksijen adsorpsiyonu gibi sulu uygulamalara doğrudan yardımcı olmuştur (Jackman, ve ark., 2015).

Şekil 2.5, bir anataz TiO_2 süper hücresindeki (uzay grubu: $I4_1/amd$) V_o bölgelerinin olası konfigürasyonunu göstermektedir.



Şekil 2. 5. Bir anataz TiO_2 süper hücresindeki oksijen boşluklarının gösterimi (Das ve ark., 2019).

Hesaplamalı DFT modelleri, diğerleri komşu O atomlarının radyal olarak V_o 'ya doğru hareket ettiğini ve Ti atomlarının dışa doğru gevşediğini göstermiştir (Das ve ark., 2019).

2.3 Metal Yarıiletken Kontaklar

Metal-Yarıiletken (MS) kontakları, elektronik cihazların imalatında önemli bir unsurdur. Temel olarak doğrultucu ve omik olmak üzere iki tür MS kontağı vardır. Ferdinand Braun 1874 Almanya'sında ince bir tel üzerinde kurşun sülfür kullanarak doğrultma davranışını belgelemiş ilk kişidir (Braun, F.,1874). Tek yönlü akım davranışı, yüzyılı aşkın bir süredir bir dizi yapı ve yarıiletken malzeme için araştırılmıştır.

Doğrultucu MS kontaklarında veya Schottky bağlantılarında, yarıiletken malzemeye göre metal iş fonksiyonu (Φ_m) dikkate alınır. Bir metal bir yarıiletken ile temas

ettiğinde, Fermi enerji seviyeleri hizalanır, bu da yarıiletken enerji bantlarının yukarı veya aşağı bükülmesine neden olarak Schottky ve Mott tarafından Denklem (2.6) ile ifade edilen bir bariyer oluşturur (Schottky, 1938).

$$\Phi_{sb} = \Phi_m - \chi \quad (2.6)$$

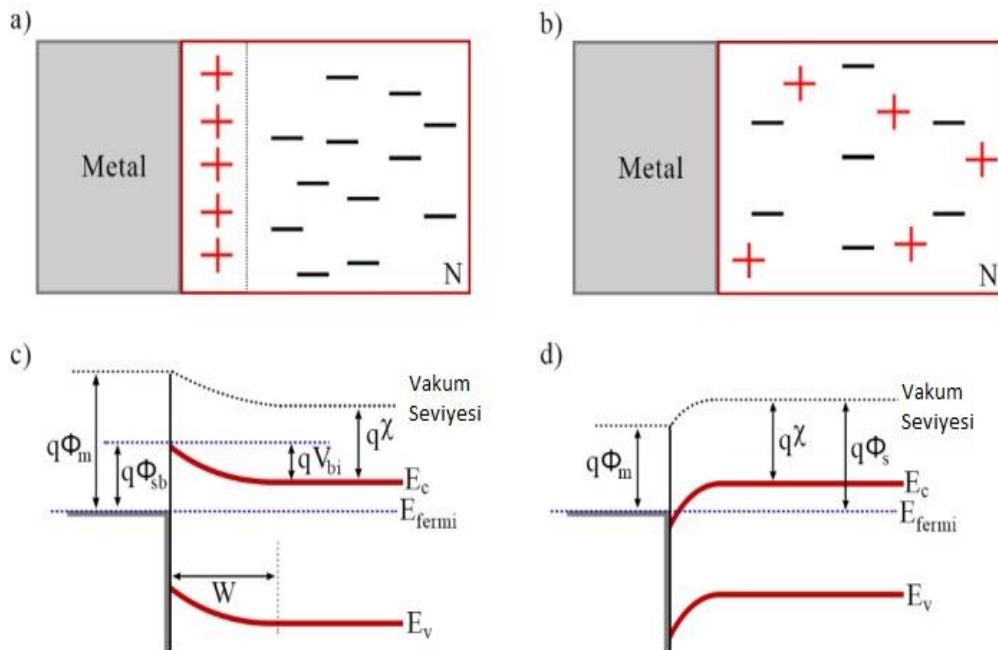
Burada;

Φ_{sb} : bariyer yüksekliği

χ : elektron ilgisidir.

n-tipi bir yarıiletken de, Şekil 2.6a ve Şekil 2.6c'de gösterildiği gibi bir bariyer yüksekliği (Φ_{sb}) oluşturmak için Φ_m 'nin χ 'den büyük bir enerjiye sahip olması gerekecektir.

Temas, Φ_m 'den küçük olduğunda n-tipi bir yarıiletken de omik bir davranış sergiler, (Şekil 2.6b ve Şekil 2.6d). Omik kontaklar, her iki malzemenin yüzey yüklerinde potansiyel fark olmaması nedeniyle bariyer oluşturmaz.



Şekil 2. 6. Termal dengede (a) bir Schottky ve (b) n-tipi bir yarıiletken ile omik kontak ve bunların (c-d) karşılık gelen elektron enerji bandı diyagramlarının gösterimi (Mott, 1938).

Bu MS mekanizması elektronların her iki yönde de akmasına izin verir. Yaygın metal kontaklar için iş fonksiyonu değerleri elektron volt (eV) cinsinden Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2. 1 Bazı metaller için metal iş fonksiyonları parametreleri.

METAL	ϕ_m (eV)
Al	4,28
Au	5,1
Pt	5,65
Ti	4,33

MS arayüzündeki net akım difüzyon akısı, sıcak metallerin ve yarıiletken malzemelerin yüzeyinden çıkan elektronların olasılık dağılımı kullanılarak karakterize edildiği görülmüştür. Bu termiyonik emisyon mekanizması, yarıiletken bir yüzeyden geçen akımın Denklem (2.7) verilen metale doğru sürekli olduğu, arayüzey boyunca akım yoğunluğunu belirlemek için uygulandığı görülmektedir (Mott, 1938).

$$I = I_s = I_m \quad (2.7)$$

$$I = I_m = I_s \quad (2.8)$$

Schottky ve arkadaşlarının çalışmaları, termiyonik emisyon teorisini takip eden idealize edilmiş bir akım-voltaj (I-V) ilişkisine yol açmıştır ve Denklem (2.9) ile tanımlanır.

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nk_B T} \right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

Burada;

n: idealite faktörüdür.

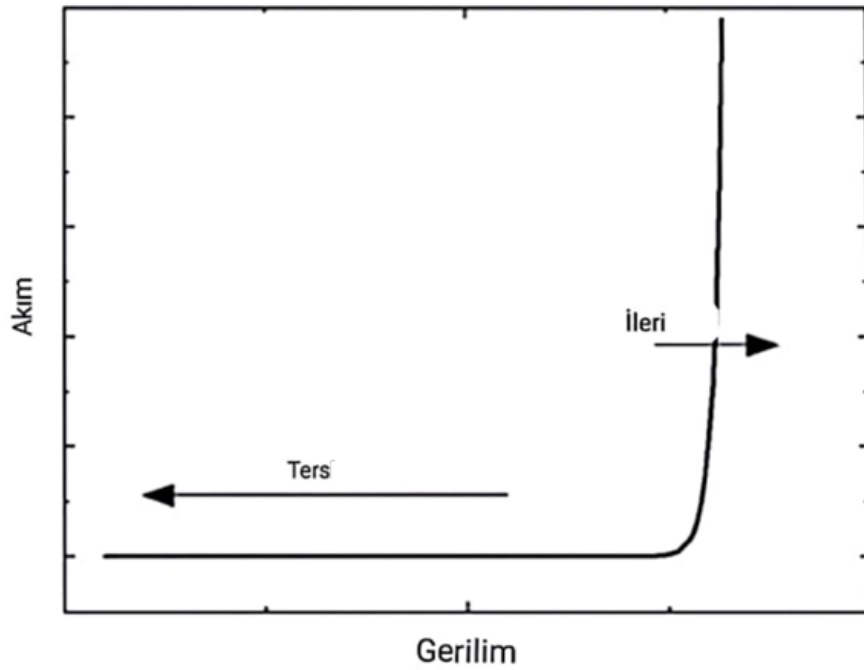
I_0 : ters doygunluk akımıdır.

$$I_0 = \frac{4q\pi m^* k_B^2}{h^3} \cdot AT^2 \cdot \exp\left(\frac{-\phi_{sb}}{k_B T}\right) \quad (2.10)$$

Ve iki boyutlu (2D) olarak,

$$I_{0,2D} = \frac{q\sqrt{8\pi m^* k_B^3}}{h^2} \cdot \sqrt{T^3} \cdot \exp\left(\frac{-\phi_{sb}}{k_B T}\right) \quad (2.11)$$

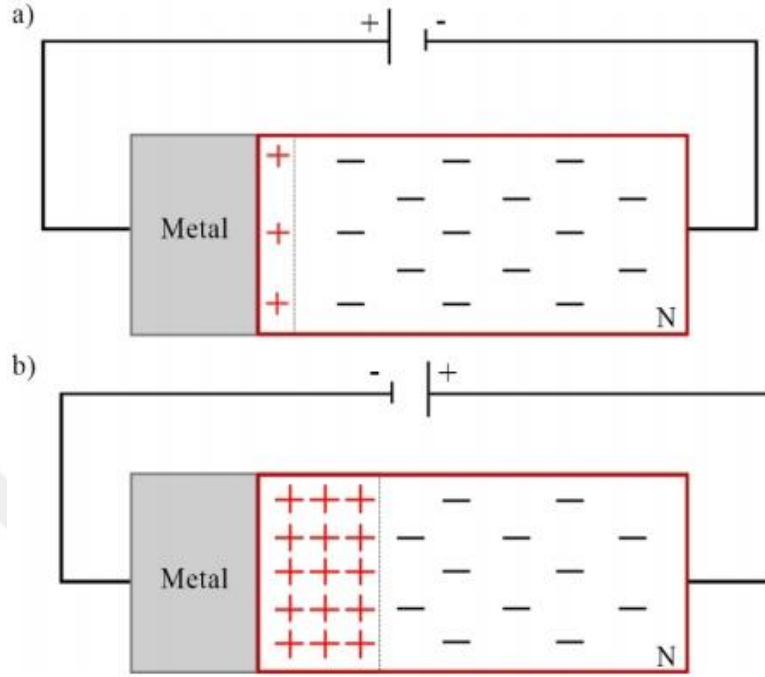
verilir. İlk terim Richardson sabiti olarak bilinir ve $[A/cm^2 K^2]$ birimiyle A^* olarak gösterilir. Şekil 2.7'de gösterilen bir Schottky diyotun I-V karakteristiği, $n = 1$ olduğu ideal durumu göstermektedir.



Şekil 2. 7. İdeallik faktörünün $n=1$ olduğu ideal diyot I-V özellikleri gösterimi (Mott, 1938).

Metal ve yarıiletken arasında bir boşluk yükü bölgesinin veya tükenme bölgesinin oluştuğu Şekil 2.8'de akım yoğunluğu mekanizmasının bir örneği verilmiştir. Diyot ileri yönde önbesleme olduğunda, tükenmiş bölge elektronların bariyer üzerinden metale atlamasına izin verecek kadar küçüktür. Alternatif olarak, ters ön besleme koşulları sırasında,

azınlık yüklerinin birikmesi yarıiletkeni doldurarak tükenme bölgesini genişletir ve elektronların metalden yarıiletken e akmasını önler.



Şekil 2. 8. n-tipi yarıiletkenler üzerinde doğrultucu bir metal kontağı için (a) ileri ve (b) ters polarizasyon mekanizmasının gösterimi (Mott, 1938).

3. Karakterizasyon

3.1 XRD (X-ışını kırınımı)

Bir X-ışını kırınımı (XRD), gelen dalgalara göre yansıyan dalgaların açılarını yakalayıp yığın malzemelerin yapısını analiz etmek için kullanılan bir tekniktir. Bu kristal kafes noktalarının atomlar arası mesafeleri arasına nüfuz etmek için x-ışınlarının dalga boyunu (λ) kullanan tahribatsız ve dolaylı bir karakterizasyon tekniğidir (Zhang ve ark., 2009). Gelen x-ışınları bir kristal kafes noktasıyla çarpıştığında, her bir kristal düzlemindeki fotonlar yüzeyden uzağa yansıtılır. Bu yansıyan dalgalar yapıcı ya da yıkıcı bir şekilde birbiriyle etkileşime girer. Bu etkileşimde çeşitli olay açılarında sırasıyla gürültü yada keskin tepe noktaları oluşturur. Bu tepe konumları daha sonra her bir düzlem arasındaki atomlar arası boşluğu (a) belirlemek için Bragg yasasına uygulanabilir ve Denklem (3.1) ile tanımlanır.

$$2a \cdot \sin \theta = n\lambda \quad 3.1$$

Burada n yansıma sırasını gösterir. Bu teknik kristal yapı, boyut ve bileşim gibi malzeme bilgilerini toplamamızı sağlar. Şekil 3.1’de D8 Discover XRD cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. D8 Discover XRD ölçüm sistemi.

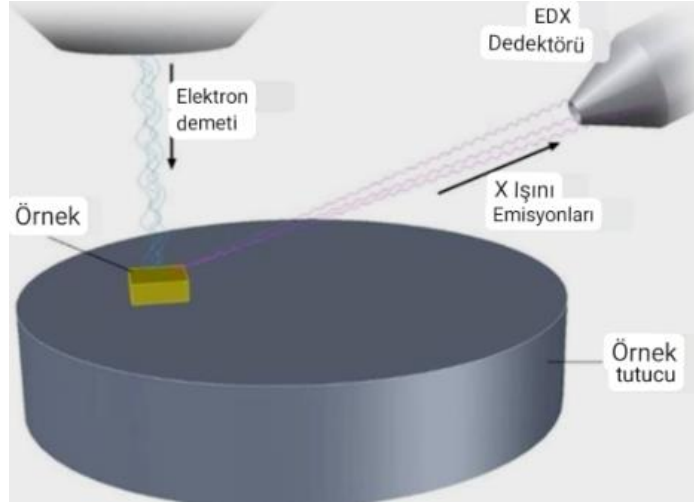
3.2 Taramalı elektron mikroskobu

TiO₂ nanoyapılarının yüzey ve kesit alanlarını incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDX) kullanılır. SEM sistemleri, topografik bir görüntü oluşturan malzemeden ikincil ve geri saçılan elektronları fırlatmak için bir elektron ışını kullanır. İkincil elektronlar, düşük yoğunluklu yapıların yerinin belirlenmesi gibi yüzey yapısıyla ilgili bilgiler sağlarken, geri saçılan görüntüler malzeme yoğunluğu gibi yüzey altı özelliklerle ilgili bilgiler sağlar. Ortalama çap, gözenekler, dairesellik oranı gibi parametreler Denklem (3.2) ile tanımlanır.

$$\text{Dairesellik oranı} = \frac{4\pi \cdot \text{Area}}{\text{Area Perimeter}^2} \quad (3.2)$$

Görüntüler üzerinde imageJ yazılımı kullanılarak Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanmıştır. Bu bize altıgen bir desenin gözenek açıklıklarının periyodikliğini ve gözenekli yapının düzeni hakkında bilgi sağlamıştır. Düzensiz gözenek dağılımlarında FFT dairesel olarak görünecektir.

Görüntülemeye ek olarak, gelen elektron ışını, malzemenin kimyasal bileşimine ilişkin bilgi taşıyan karakteristik X-ışını fotonları üretir. Bu fotonların taşıdığı enerji, malzemedeki boşlukları dolduran dış kabuk elektronları ile ilgilidir. Elektron ışını tarafından oluşturulan iç kabuk. Bant teorisinden hatırladığımız gibi, elektronlar valans bandından iletim bandına geçmek için enerjiye ihtiyaç duyarlar. Elektronlar ters yönde hareket ettiğinde, enerji kaybedilir veya fotonlar yoluyla yayılır. Şekil 3.2 de görüldüğü gibi, SEM sistemleri bu foton enerjilerini yakalamak ve bir enerji spektrumunda karakterize etmek için EDS dedektörleriyle kolayca donatılabilir.



Şekil 3. 2. Bir EDS dedektörüne operasyonel genel bakış.

3.3 UV-VIS spektroskopisi

İnce katı film tabakalar basitçe ince film tabakalar olarak adlandırılır. İnce film tabakalar, ince sıvı tabakaları ve ince katı tabakaları içerir. Biriktirme İnce tabakaların öncülüğünü 1850 yılında elektrodpozisyon tekniğini kullanan M. Fvaday yapmıştır (Wagendristel ve ark., 1994). Vakum teknolojisinin yardımıyla, ince tabakaların gelişimi 1950 yılında modern çağa girmiştir (Greene, 2003).

İnce tabakaların biriktirilmesi vakum koşullarında iyi kontrol edilebildiğinden, ince tabakalar optik yansıma önleyici kaplama (Jeong ve ark., 2004), kimyasal korozyona dayanıklı kaplama (Matthes ve ark., 1991), elektrik ince tabaka güneş pilleri (Ito ve ark., 2008), mekanik aşınmaya dayanıklı kaplama (Lekka ve ark., 2005) gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Işık, ince bir tabaka üzerine yansıdığı anda, fiziksel yansıma olayı meydana gelir (Piegarı ve ark.,2013).

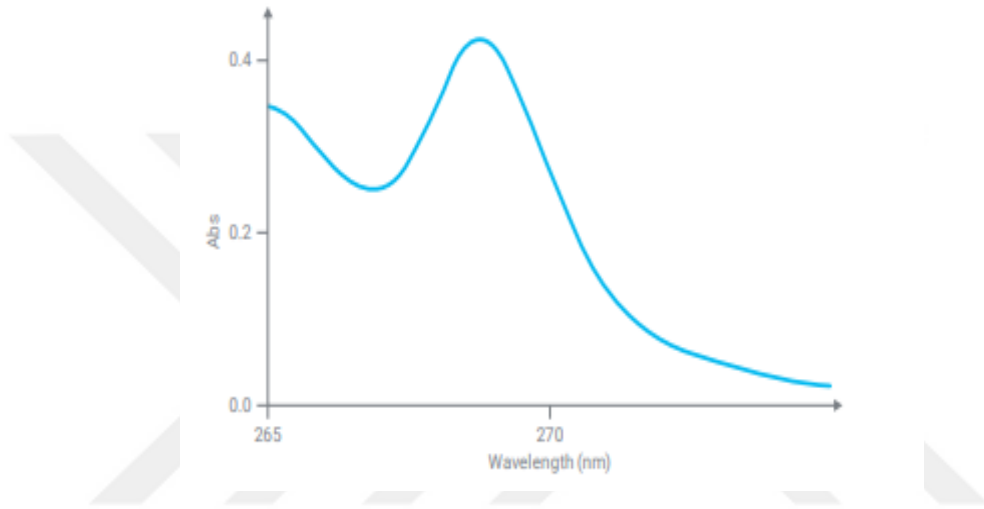
Yansımanın büyüklüğü, yansıyan optik gücün gelen optik güce oranı ile ifade edilmiştir. Işık ince tabakada ki atomlarla etkileşim içindedir. Işık ve atomlar arasındaki etkileşim nedeniyle, ince tabakalarda meydana gelen optik süreçler karmaşıktır.

Işık ve ince tabakalar arasındaki etkileşim incelendiğinde Işık ince bir tabaka içinde yayılırken geri çekilme, emilim ve lüminesans süreçler meydana gelir. Kırılma, tabaka ve çevresindeki ortam arasındaki farklı kırılma indislerinden kaynaklıdır. Soğurma atomların geçiş frekansları arasındaki rezonans etkisinden kaynaklıdır. Şekil 3.3’de, 269 nm de soğurma gösteren bir numuneye ait UV-vis spektrumu gösterilmiştir.

Işığın yoğunluğu bu durumlarda azalmıştır. Işık ince tabaka içinde yayılır ve zayıflama süreci Beer'in yasasına göre Denklem (3.3) ifade edilmiştir (Lothian, 1852).

$$I = I_0 \cdot e^{(-\alpha z)} \quad (3.3)$$

Burada I , bir sapma (z) boyunca yayılan ışığın yoğunluğu, I_0 ise ışığın başlangıç yoğunluğudur, ve α ise soğurma katsayısıdır.



Şekil 3. 3. 269 nm de soğurma gösteren bir numuneye ait UV-vis spektrumu (Lothian, 1852).

4. DENEYSEL İŞLEMLER

4.1 Sprey Piroliz

Sprey piroliz, bileşenlerin kimyasal bir bileşik oluşturmak üzere reaksiyona girdiği ısıtılmış bir yüzeye bir çözelti püskürtülerek ince bir film tabakanın oluşturulduğu bir ince tabaka kaplama yöntemidir (Mooney ve Radding, 1982). Reaksiyon tipine göre kimyasal sprej biriktirme işlemi üç gruba ayrılabilir (Vigue ve Sptiz, 1976). Birinci grupta, çözücü buharlaştıkça ve bileşenler kuru halde daha fazla reaksiyona girebileceğinden çözeltinin damlacıkları ısıtılmış yüzeyde bulunur. İkinci grup, damlalar ısıtılmış yüzeye ulaşmadan önce çözücünün buharlaştığı ve kuru katının ayrışma yoluyla yüzeye çarptığı bir işlemi temsil eder. Üçüncü grupta, damlacıklar alt tabakaya yaklaştıkça çözücünün buharlaştığı ve bunun sonucunda çözelti bileşenlerinin heterojen reaksiyonunun meydana geldiği süreçler vardır. Tüm bu işlemlerde kontrol edilecek en önemli parametreler alt tabaka sıcaklığı, taşıyıcı gaz akış hızı, nozül den alt tabakaya olan mesafe ve çözelti içeriği ve konsantrasyonudur. Bu değişkenler arasında, substrat sıcaklığı, sprej piroliz işleminden ince tabaka üretmede en önemli faktör olarak kabul edilmiştir; Bunun nedeni, damlacıkların kuruması, ayrışması, kristalleşmesi ve tane büyümesinin büyük ölçüde bu parametreye bağlı olmasıdır (Exarhos, 2007).

. Püskürtme piroliz tekniğinin görünen basitliğine rağmen, biriktirme parametrelerinin sıkı bir korelasyonu, teorik bir modelleme püskürtme piroliz birikimi gerektirmiştir (Filipovic ve ark., 2013).

4.2 Kimyasal Temizleme ve Numune Oluşturma

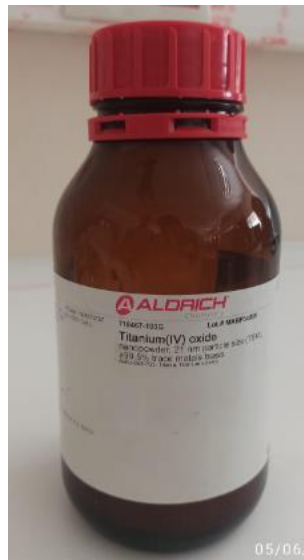
Çalışmamıza öncelikle camların ve silisyum kristallerin fiziksel ve kimyasal temizliği ile başlandı. Genişliği 10, uzunluğu 20 cm olan cam alttaşlar, %10'luk hidroflorik asit (HF) ile temizleme işlemine tabi tutularak kimyasal ve fiziksel kirlerden arındırıldı. Bu işlem Şekil 4.1'deki ultrasonik banyoda gerçekleştirildi. Bu işlem den sonra camlar saf su ile yeteri kadar durulandı ve kurutuldu.



Şekil 4. 1. Ultrasonik temizleme aracı.

Al/TiO₂/p-Si Schottky diyotun hazırlanması için 400mm kalınlığında, 1-10 ohm-cm özdirençli, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ katkı konsantrasyonlu p-tipi silisyum alttaş kullanıldı. Bu kristalin parlak yüzeyi %10'luk HF ile pamuk yardımıyla temizlendi. Bu temizleme işlemi oldukça titiz yapılmaya çalışıldı. HF ile temizlenen kristal 5 dakika deiyonize suda durulanıp ardından hassas bir şekilde kurutularak kaplamaya hazır hale getirildi.

Kaplama işlemi için, titanyum dioksit çözeltisi hazırlanırken, çözelti 0.1 molar olacak şekilde hesaplamalar yapıldı. ($M_A = m/n$) Şekil 4.2'de verilen titanyum dioksit tozu hassas terazide 0.39 gram gelecek şekilde tartıldı.



Şekil 4. 2. Kullanılan titanyum dioksit tozu.

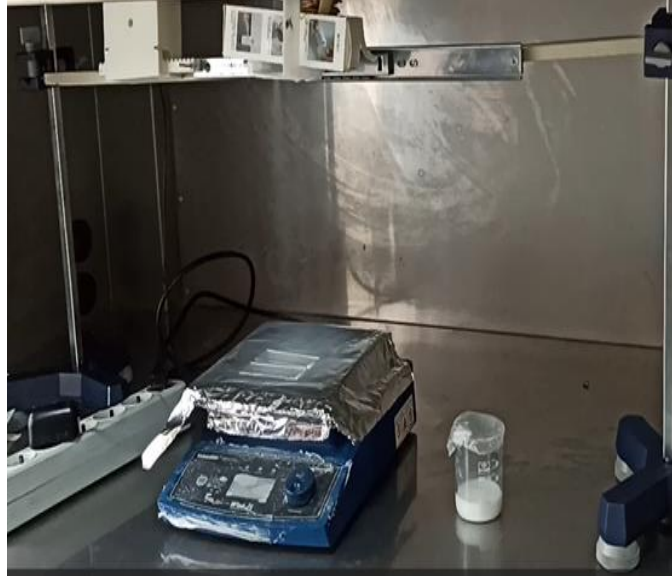
0.39 gram titanyum dioksit (TiO_2) tozu, 50ml metanolde 80°C sıcaklıkta, metanol uçucu olduğu için, ağızı kapalı bir şekilde karıştırıldı ve Şekil 4.3'teki çözelti elde edildi.



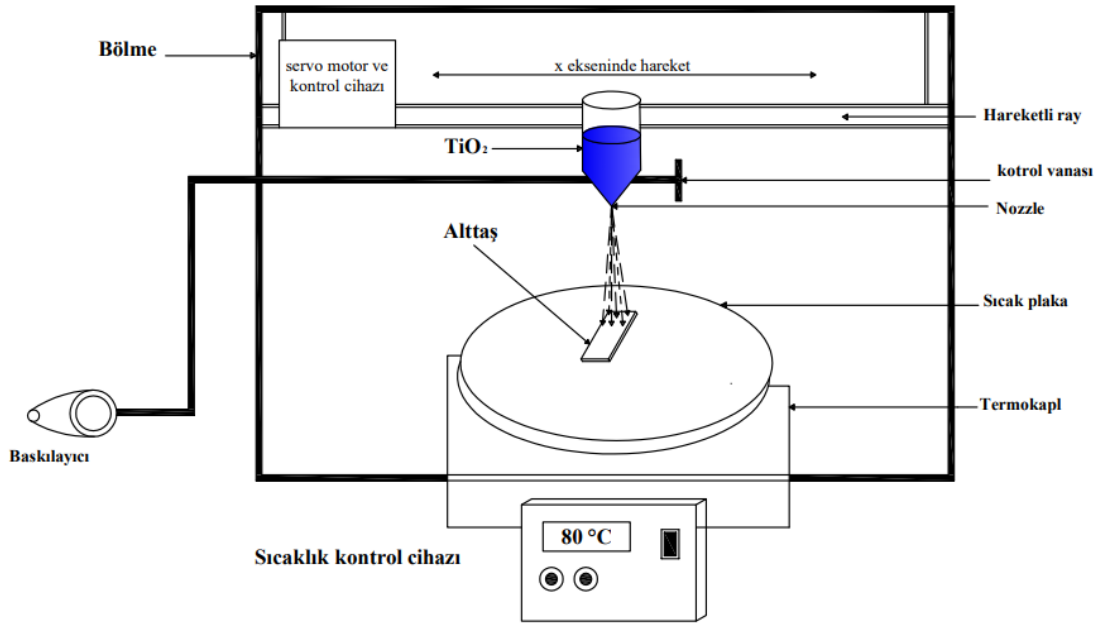
Şekil 4. 3. TiO_2 çözeltisi.

Titanyum dioksit çözeltinin homojen bir şekilde elde edilmesi için, karıştırma boyunca, sıcaklık kontrol cihazı 80°C derecede sabitlendi. Sıcaklık kontrol cihazı üzerindeki çözeltimiz manyetik karıştırıcı yardımıyla minimum hızla 60 dakika boyunca karıştırıldı.

Çözelti hazırlandıktan sonra spreyliz yöntemi ile kaplama işlemine geçildi, kaplama için kullanılan cihaz Şekil 4.4'te ve cihazın şematik çizimi Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4. 4. Sprey piroliz düzeneği.



Şekil 4. 5. Sprey piroliz düzeneğin şematik çizimi.

Kaplama adımları;

- Alttaşlar temizlendi
- Çözelti belirtilen aşamalarda hazırlandı
- Hazırlanan çözelti püskürtme kabın haznesine alındı
- Kurutulmuş alttaşlar 80°C sıcaklığında sabitlenmiş ısıtıcının üstüne yerleştirildi

- e) Düzeneğin yüksekliği 25 cm olarak ayarlandı
- f) Püskürtme işlemi için bütün şartlar sağlandıktan sonra zamanlayıcı 3 dakika 30 saniyeye ayarlandı ve start verildi.
- g) Püskürtme işlemi çeker ocakta yapıldı.

25 cm yükseklikte yatay yönlerde hareket yaparak, nozzle ucundan serbest püskürtme yapıldı, 3 dakika 30 saniye kesintisiz bir şekilde yapılan püskürtme sonucu bir kaplama alanı, Şekil 4.6'daki gibi elde edildi. Homojen bir ince tabaka elde etmek için işlem çeker ocakta ve 80°C sıcaklıkta gerçekleştirildi.



Şekil 4. 6. Cam üzerine oluşturulan TiO₂ ince tabaka.

4.3 İmalattı Yapılan Al/TiO₂/p-Si Schottky Diyotunun Hazırlanması

Püskürtme ile biriktirme yöntemi, metalleri yarıiletken bir malzeme üzerine büyüterek bir Schottky diyot üretme yeteneği sunar. Diyotun hazırlanma aşamasında, özellikleri önceki bölümde belirtilen p-Si kristali ilk olarak klasik temizlik işleminden geçirildi. Sonrasında PVD sistemi içerisinde p-Si kristalinin mat yüzeyi oldukça saf olan Al metali ile kaplanıp omik kontak oluşturuldu. Omik kontak oluşturulduktan sonra fırında azot gazı ortamında 570 °C de 3 dk tavlandı. Bu işlemten sonra p-Si/Al alttaşın parlak yüzeyi, spreyliz cihazı yardımıyla hazırlanan çözelti ile süre 30 saniye olacak şekilde ayarlanarak TiO₂ ile kaplandı. İnce tabaka oluşturma aşamaları bir önceki bölümde belirtilen aşamalarla aynı olup sadece püskürtme süresi belirtildiği gibi değiştirildi.

Son adıma gelindiğinde TiO₂ yüzeyinde ince bir Al tabaka oluşturmak için fiziksel buharlaştırma tekniğiyle, yaklaşık % 99,99 oranında saf olan Al metali, vakum sistemi

ile elde edilen yaklaşık $4.08 \cdot 10^{-5}$ torr (mbar) seviyesindeki basınç ve üzerinden ~ 50 A akım geçirilen tungsten flaman ile buharlaştırıldı. Nihayetinde Al/TiO₂/p-Si/Al MIS diyot yapısı oluşturuldu. Al kaplamasında kullanılan PVD cihazı Şekil 4.7’de görülmektedir.

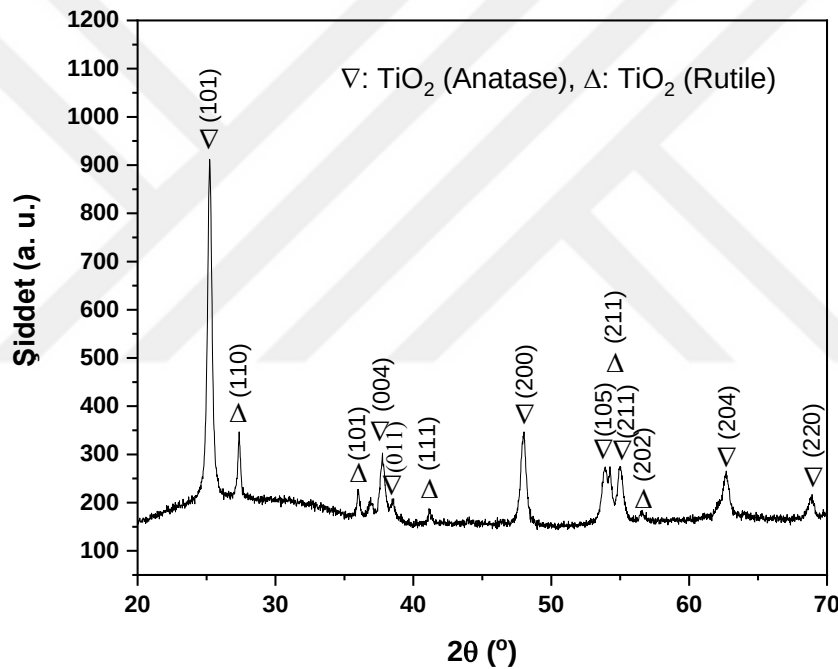


Şekil 4. 7. Al buharlaştırma ve kaplama kullanılan NVTH-350 model PVD cihazı.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE SONUÇLAR

5.1 TiO₂ İnce Tabakanın X-Işınları (XRD) Ölçümleri

XRD D8 Discover difraktometresi ile spray piroliz yöntemi kullanılarak cam altlık üzerinde elde edildi. Şekil 5.1’de TiO₂’nin X-ışınları kırınım deseni yer almaktadır. XRD analizlerinde TiO₂ anataz için ICDD no: 99–100-9412 ve rutil faz için ICDD no: 99–100-4510 numaralı kartlar kullanılmıştır. Üretilen ince tabakada ki kristal boyutu (D), kafes gerilimi (ε) ve dislokasyon yoğunluğu (δ) olarak ifade edilir.



Şekil 5. 1. Cam altlıklar üzerinde spray piroliz ile oluşturulan TiO₂ ince tabakanın XRD deseni.

XRD sonuçları aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır. Sırasıyla kristalit boyutunu ve kafes gerilmesini hesaplamak için bu formüller kullanılır. Aşağıda verilen formüller ile yapılan hesaplamada ince tabakanın XRD analizinde kullanıldı ve hesaplanan veriler aşağıdaki Çizelge 5.1’de verilmiştir.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (5.2)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (5.3)$$

Çizelge 5. 1. Elde edilen ince tabakanın bazı mikroyapısal parametreler.

İnce tabaka	D (nm)	ε (%)	δ ($10^{14}/m^2$)
TiO ₂	22.46	0.70	19.83

Sprey piroliz tekniği ile oluşturulan TiO₂ ince tabakanın kırınım deseni ele alındığında, Şekil 5.1’de gösterilen piklerde TiO₂ (Anatase) ve TiO₂ (Rutile) formlarında kristal yapıların belirdiği net bir şekilde görülmektedir.

TiO₂’nin anatase (101) yönelimi, 25.33° derecede en güçlü kırınım zirvesini vermektedir. 53.96° ve 55.06° derece ise rutile yapısı görülmektedir. Bu, TiO₂ nanopartiküllerinde bulunan ana kristal fazın anatase olduğunu ve sentezlenen numunede minimum miktarda bazı rutile fazların mevcut olduğunu göstermektedir. Elde edilen ince tabaka TiO₂ için, Anatase/Rutile oranı: 83/17 olarak belirlenmiştir. XRD’de görülen geniş tepeler, parçacıkların nanometre boyutunda olduğunu göstermektedir. Bu desenin literatürde (Güllü, 2023; Ahmad ve ark., 2021) uyum göstermektedir.

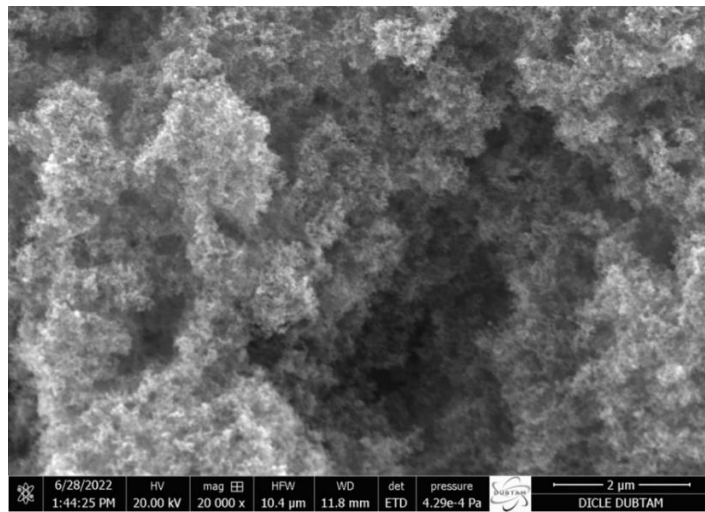
5.2 TiO₂ İnce Tabakanın SEM Analizi

Sprey piyoliz yardımıyla ile üretilen TiO₂ ince tabakanın, Quanta FEG 250 cihazı (Şekil 5.2) kullanılarak SEM görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 2. Kullanılan Taramalı Elektron Mikroskobu.

TiO₂ tabakanın SEM görüntüsü Şekil 5.3'te verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde TiO₂'nin morfolojik yapısı, küresel ve hafif aglomerasyonlu çubukları andıran nanoyapılardan oluştuğu, topografik bir oluşum görülmektedir. Bu topografik yapı SEM cihazı ölçümünde geri saçılmış elektronların verdiği görüntülerdir. Görüntülerden yapının homojene yakın bir dağılım gösterdiği söylenebilir. Bu desenin literatürde (Ahmad ve ark., 2021; Güllü, 2023) uyum göstermektedir.



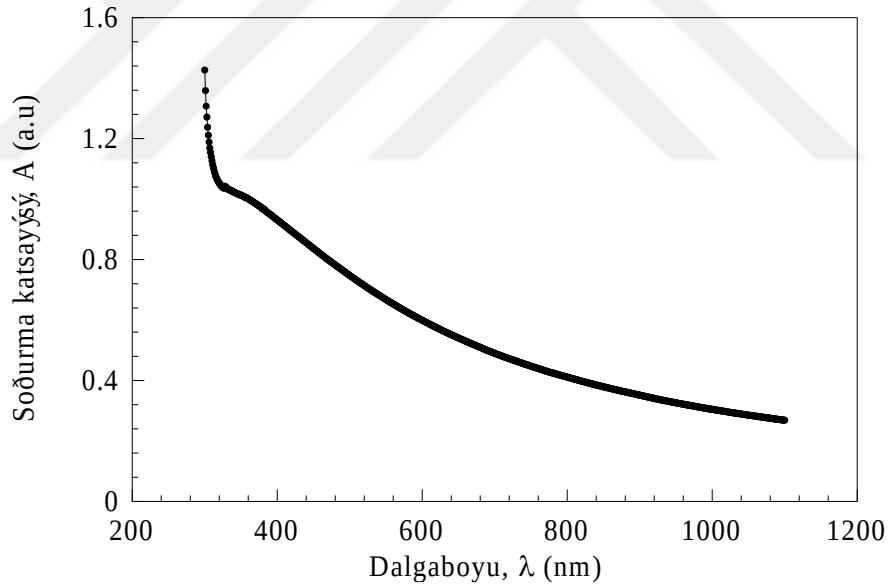
Şekil 5. 3. Oluşturulan TiO₂ SEM görüntüsü..

5.3 TiO₂ İnce Tabakanın Optik Ölçümleri (UV-Vis)

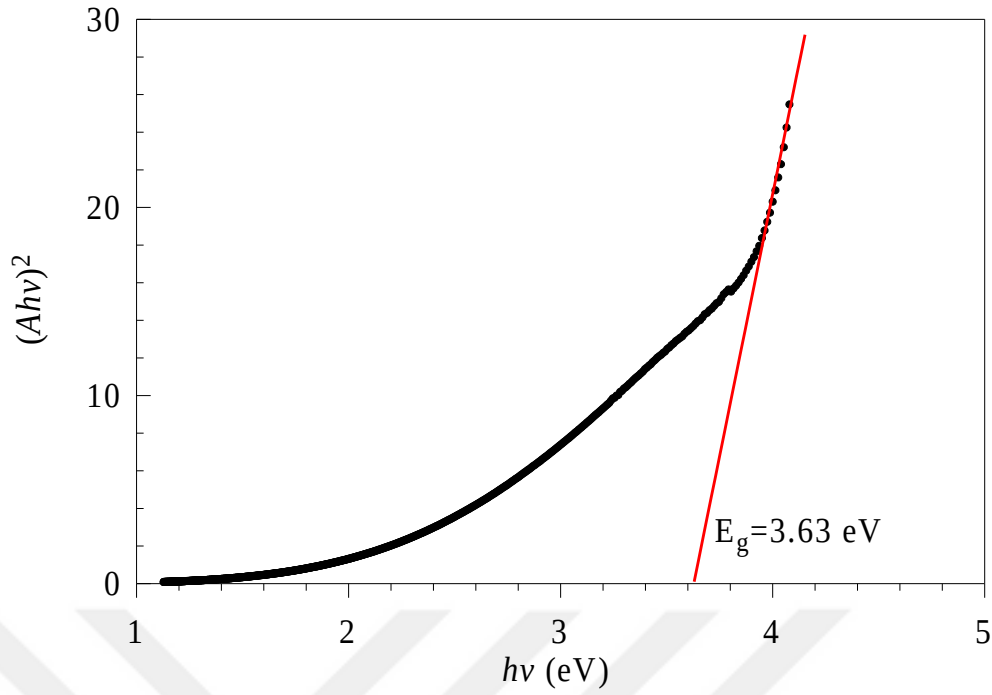
TiO₂'in absorpsiyon spekturumu, UV-Vis spektrofotometri Shimadzu 3600 UV-Vis ile belirlendi. Tauc grafiği kullanılarak, sentezlenen TiO₂'in bant aralığı enerjisi, denklem (5.4) ile 3,63 eV olarak hesaplandı ve bu bant aralığı doğrudan bir bant aralığıdır. Bu değer literatürde katkısız TiO₂ için verilen değerler ile (Ahmad ve ark., 2021) uyumludur. Şekil 5.4 UV-Vis spektrofotometrisini ve Şekil 5.5 Tauc grafiğini göstermektedir.

$$Ah_v = E_d(h_v - E_g)^{1/2} \quad (5.4)$$

burada A optik absorpsiyon katsayısı, h_v foton enerjisi, E_g doğrudan bant aralığı ve E_d sabit bir değerdir.

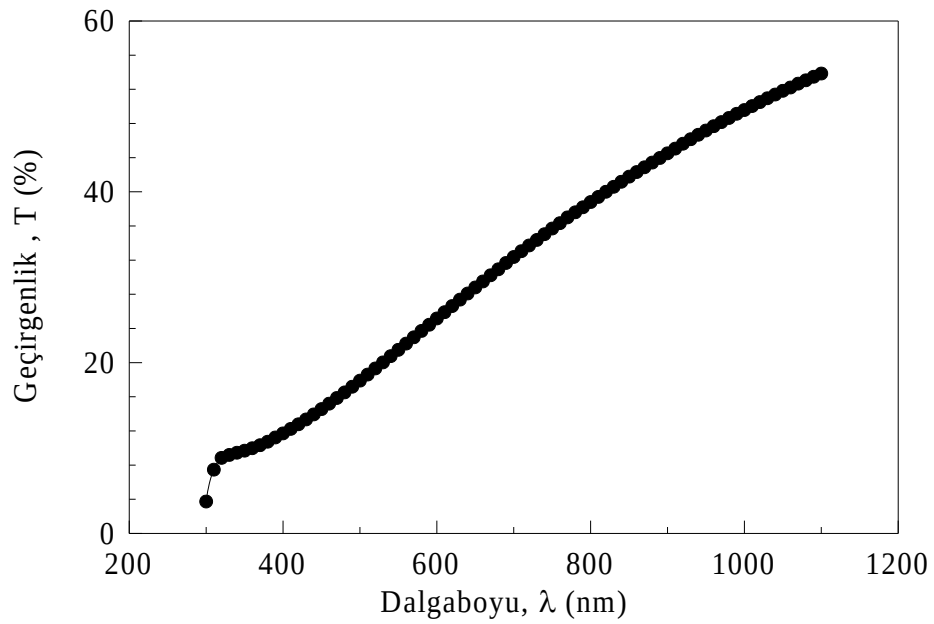


Şekil 5. 4. Oluşturulan TiO₂ ince tabakanın soğurma-dalga boyu grafiği.



Şekil 5. 5. Oluşturulan TiO₂ tabakaya ait $(Ahv)^2$ - $h\nu$ değişim grafiği.

Optik geçirgenlik, 300-1100 nm dalga boyları arasında yapılan ölçüm grafiği Şekil 5.6'da görülmektedir. Optik geçirgenliğin, dalga boyu ile orantılı olarak, dalga boyu arttıkça optik geçirgenliğin de arttığı görülmektedir.



Şekil 5. 6. Oluşturulan TiO₂ tabakanın optik geçirgenlik spektrumu grafiği.

5.4 Üretilen Al/TiO₂/p-Si Schottky Diyotunun Elektriksel Karakterizasyonu

Schottky diyotların elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde engel yüksekliği, seri direnç, doyma akımı, idealite faktörü gibi parametrelerin hesaplanması yukarıda verilmiştir. Bu verilere göre aşağıda, üretilen diyotun I-V grafikleri verilmiştir.

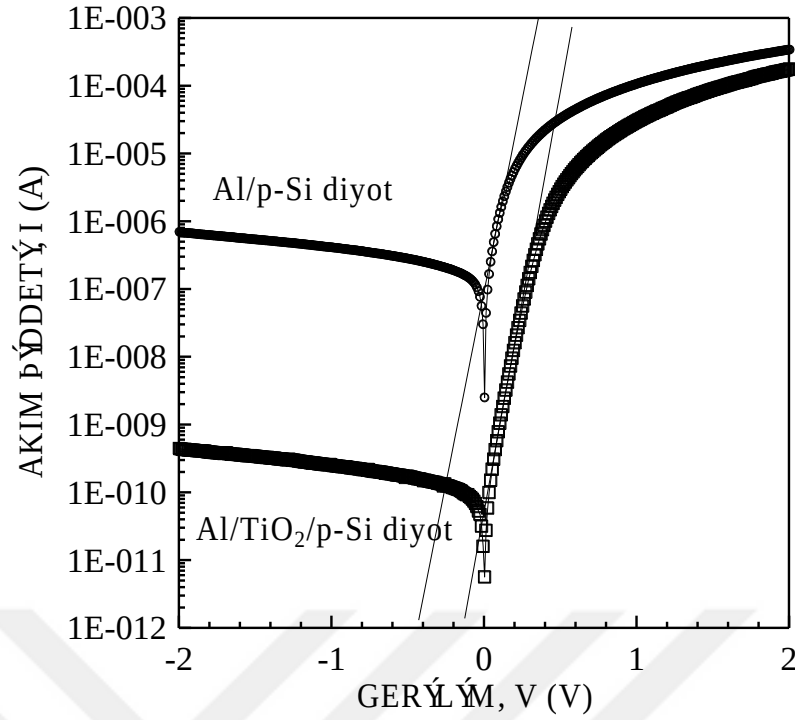
5.5 Üretilen diyotun akım -voltaj karakteristikleri

Yarıiletken cihazlarının karakterizasyonu, güncel araştırmalarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, Al/TiO₂/p-Si MIS diyotunun akım-voltaj ölçümleri yapılmış ve Al/p-Si referans diyot ile karşılaştırılmıştır. Akım-voltaj hesaplamaları, Şekil 5.7'de gösterilen KEITHLEY 4200-SCS cihazı kullanılarak yapılan Al/ TiO₂/p-Si/Al MIS diyotuyla ilgili veriler elde edilmiştir.



Şekil 5. 7. Elektriksel ölçümlerin alındığı sistem.

Şekil 5.8'de, oda sıcaklığında ve karanlık ortamda (-2V) - (+2V) aralığında, 0,01V adımlarla ölçülen referans Al/p-Si ve üretilen Al/TiO₂/p-Si diyotunun I-V yapısal özellikleri verilmiştir.



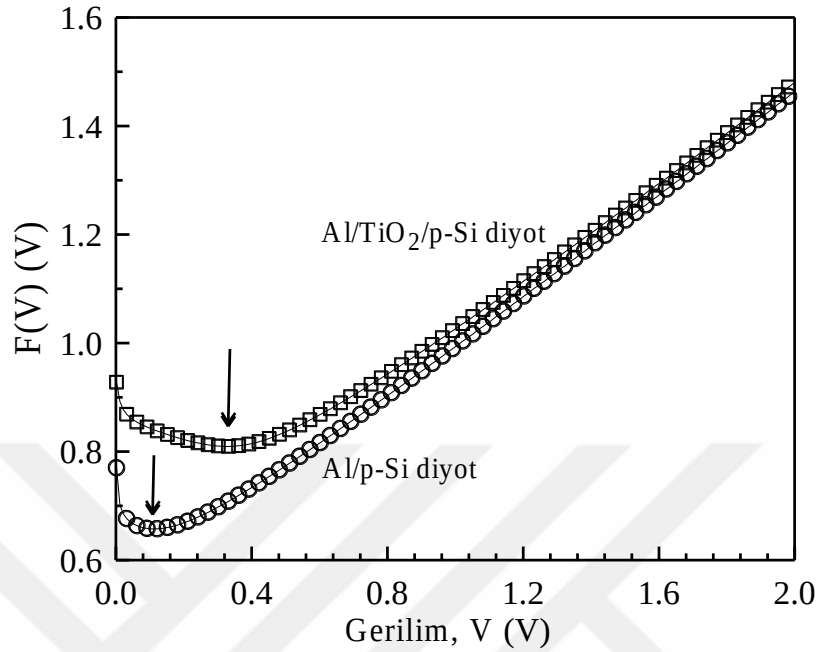
Şekil 5. 8. Referans Al/p-Si ve oluşturulan Al/ TiO₂/p-Si diyotunun oda sıcaklığında Akım-Voltaj grafiği.

Verilen I-V grafiklerinin incelenmesi sonucunda, üretilen diyotun referans diyota göre yaklaşık 1000 kat azalma olduğu görülmektedir. Oluşan bu değer farkı, p-Si ile metal tabaka arasında oluşan TiO₂ ince film tabakasının ve arayüzeydeki doğal oksit tabakasının bir direnç oluşturmaya atfedilebilir.

Referans alınan Al/p-Si diyotunun engel yüksekliği (Φ_B) hesaplanmış ve engel yüksekliği $\Phi_B = 0,676$ eV olarak bulunmuştur. İdealite faktörü (n) ise $n=1,483$ olarak hesaplanmıştır. Üretilen Al/TiO₂/p-Si MIS diyotun ölçülen engel yüksekliği $\Phi_B = 0,869$ eV olarak ve idealite faktörü de $n=1,353$ olarak elde edilip bu değerler Çizelge 5.2’de verilmiştir. İdealite faktörünün 1’den büyük olması üretim sırasında meydana gelen TiO₂ yüzey/arayüzey durumları, doğal oksit tabakası ve seri direnç (R_s) gibi faktörlerinden kaynaklanır. Oluşturulan Al/TiO₂/p-Si diyotun engel yüksekliği yaklaşık 0.20 eV kadar referans Al/p-Si diyottan daha yüksek çıkmaktadır. Bu durum TiO₂ arayüzey oksit tabakasının varlığına ve uzay yükü alanındaki yük dağılımına bağlı olduğu söylenebilir.

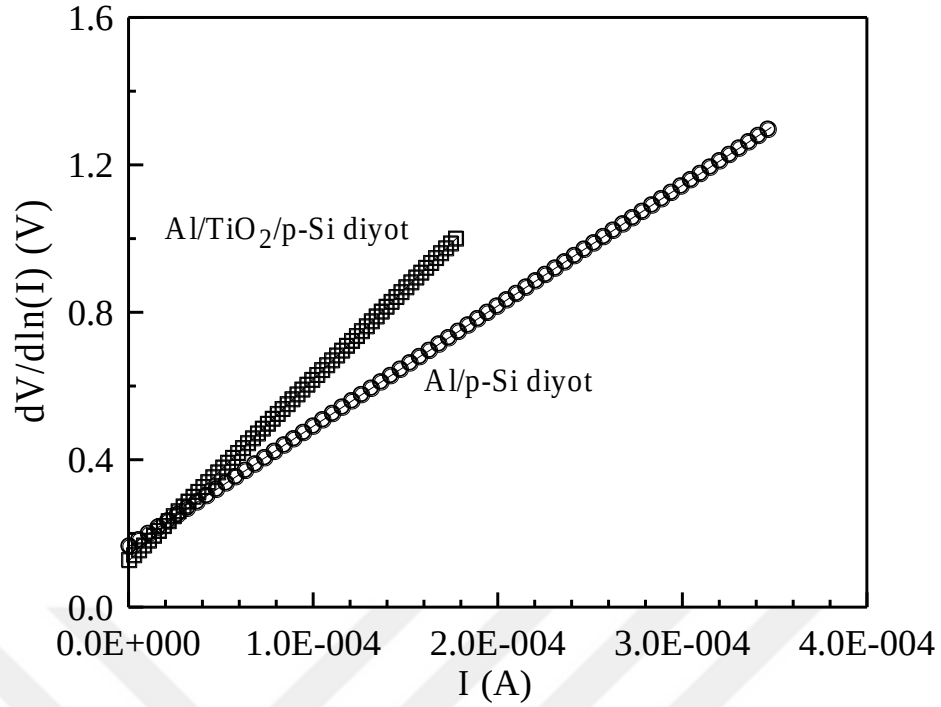
Şekil 5.9’da verilen F(V)-V grafikleri Norde fonksiyonlarından üretilmiş olup Norde fonksiyonlarına göre, referans Al/p-Si diyotun engel yüksekliği Φ_B 0,693 eV ve seri direnci de $R_s=6,655$ k Ω olarak ölçülmüştür. Sprey piroliz yöntemi ile oluşturulan

Al/TiO₂/p-Si diyotun engel yüksekliği Φ_B 0,945 eV ve seri direnci de $R_s=6,655 \text{ k}\Omega$ olarak ölçülmüştür. Bu değerler aşağıda Çizelge 5.2’de mevcuttur.



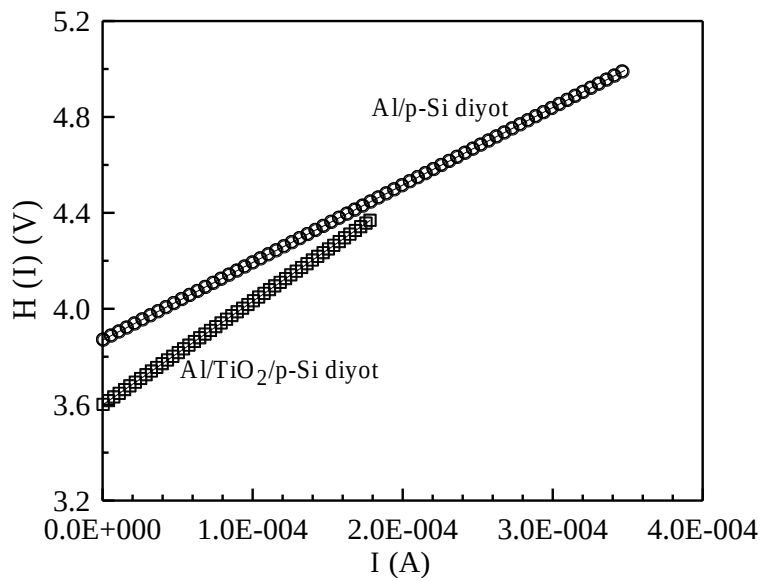
Şekil 5. 9. Oluşturulan Al/TiO₂ /p-Si ve Al/p-Si referans diyotların göre F(V)-V eğrileri.

Diyotların engel yüksekliği, seri direnç durumları ve idealite faktörü gibi değerler Norde fonksiyonlarıyla beraber Cheung yöntemi ile de hesaplanır. Cheung ikinci bir yöntem olarak kullanılır. Bu yöntem, S.K. Cheung ve N.W. Cheung tarafından 1986 yılında geliştirilmiştir. Aşağıdaki Şekil 5.10’da referans diyot Al/p-Si ve oluşturulan diyot Al/TiO₂/p-Si’nin $dV/d(\ln I)$ -I grafiği verilmektedir. Referans diyot Al/p-Si’nin seri direnç değeri $R_s=3,269 \text{ k}\Omega$ olarak, grafiklerdeki iner doğruların eğiminden hesaplanmıştır. Cheung yöntemine göre, lineer doğrunun düşey eksenini kestiği nokta ele alınarak idealite faktörü $n=6,458$ olarak elde edilmiştir. Yine aynı şekilde, üretilen Al/TiO₂/p-Si MIS diyotun seri direnci $R_s=4,929 \text{ k}\Omega$ ve idealite faktörü $n=4,994$ olacak şekilde hesap edilmiştir. Bu değerler aşağıda Çizelge 5.2’de mevcuttur.



Şekil 5. 10. Oluşturulan Al/TiO₂ /p-Si ve Al/p-Si referans diyotlarının $dV/d(\ln I)$ -I eğrileri

Şekil 5.11’de verilen $H(I)$ -(I) grafikleri de yine Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilmiştir. Burda da referans diyot Al/p-Si’nin seri direnç değeri $R_s=3,232$ k Ω olarak, engel yüksekliği $\Phi_B =0,600$ eV olarak bulunmuştur. Üretilen Al/TiO₂/p-Si MIS diyotun seri direnci ise $R_s=4,929$ k Ω ve engel yüksekliği $\Phi_B =0,722$ eV olarak hesaplanmıştır. Bu değerler aşağıda Çizelge 5.2’de yer almaktadır.



Şekil 5. 11. Oluşturulan Al/TiO₂ /p-Si ve Al/p-Si referans diyotlarının $dV/d(\ln I)$ -I eğrileri.

Çizelge 5. 2. Oluşturulan Al/p-Si ve Al/TiO₂/p-Si diyotlarının Akım-Voltaj, Cheung ve Norde fonksiyonlarından hesaplanan diyot değerleri (Diyot alanı A=0,00785 cm² olarak alınmıştır).

Numune Adı	Cheung Fonksiyonu				I-V Grafiği			Norde Fonksiyonu	
	dV/d(lnI)-I		H(I)-I Grafiği		n	Φ _B (eV)	I ₀ (A)	F(V ₀)-V ₀ Grafiği	
	R _s (kΩ)	n	R _s (kΩ)	Φ _B (eV)				R _s (kΩ)	Φ _B (eV)
Al/p-Si	3,269	6,458	3,232	0,600	1,483	0,676	1.04x10 ⁻⁷	6,655	0,693
Al/TiO ₂ /p-Si	4,929	4,994	4,316	0,722	1,353	0,869	5.89x10 ⁻¹¹	62,142	0,945

5.6 Üretilen diyotun kapasite-voltaj karakteristikleri

Yük taşıyıcıların metal-yarıiletken arayüzündeki dağılımı, metal yarıiletken doğrultucu kontaklarda yüksek dirençli bir tükenim bölgesi oluşturmaktadır. Bu bölge uygulanan gerilime bağlı olarak değişir. MIS yapılarında bu ara bölgelerdeki engel yüksekliği ve kapasite değeri aşağıda verilen Poisson denklemlerinden faydalanılarak hesaplanabilir. Uygulanan ters gerilimin bir fonkdiyonu olarak diyot diyotun kapasitans Denklem (5.5) ile tanımlanır.

$$C^{-2} = \frac{2(V_0 - \frac{kt}{q} + V_R)}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_a} \quad (5.5)$$

eşitliği ile hesaplanır (Ziel 1968). Denklem (5.5)'den yararlanılarak C⁻² değeri,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d - V)}{q\epsilon_s\epsilon_0 N_a A^2} \quad (5.6)$$

olarak Denklem (5.6) yeniden düzenlenebilir. Bu ifadede doğrunun eğiminden N_a değeri Denklem (5.7) kullanılarak hesaplanır.

$$N_a = \frac{2}{A^2 q\epsilon_s\epsilon_0} \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (5.7)$$

Aynı grafiğin uzantısından V_d değeri hesaplanır. V_d değerinden yararlanılarak diyotun engel yüksekliği parametresi Denklem (5.8) kullanılarak hesaplanır.

$$\Phi_{sb} (C - V) = \frac{V_d}{n} + E_f \quad (5.8)$$

Aynı zamanda fermi enerji seviyesi Denklem (5.9) kullanılarak hesaplanır.

$$E_f = kT \ln \left(\frac{N_c}{N_a} \right) \quad (5.9)$$

eşitliği ile elde edilir.

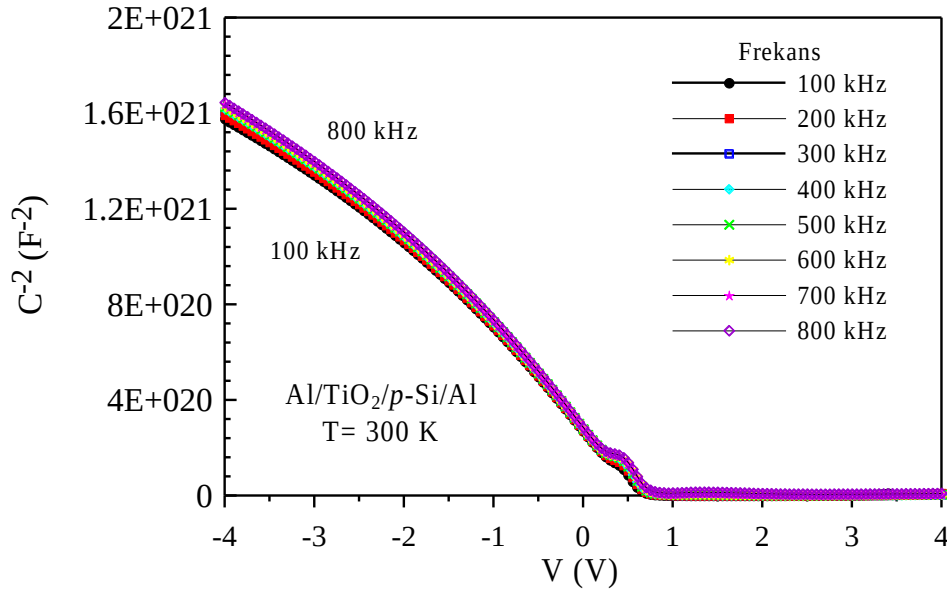
C^{-2} -V grafiğinin eğimi ile elde edilen N_a değerinin yerine E_f değeri yazılarak E_f değeri elde edilebilir. Bununla birlikte C^{-2} -V grafiğinin farklı frekanslarda ölçülen ve V eksenini kestiği noktanın bulunması ile V_d değeri ölçülür. Eğimden hesaplanan akseptör yoğunluğu kullanılarak valans bandı ile Fermi seviyesi arasındaki fark hesaplanıp engel yüksekliği bulunabilir. Engel yüksekliği (5.9) eşitliği ile hesaplanabilir.

Ayrıca E_m $x=0$ 'daki maksimum elektrik alandır ve Denklem (5.10) ile bulunabilir.

$$E_m = - \frac{qN_D}{\epsilon_s} W \quad (5.10)$$

Yukardaki eşitliklerde, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti olup Si için 11,68'dir. ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti ($\epsilon_0=8,85 \times 10^{-12}$ F/cm), A doğrultucu kontağın alanı, N_a katkı atomların konsantrasyonu, V_d difüzyon potansiyelini ifade eder.

Şekil 5.12'de Üretilen Al/TiO₂/p-Si diyotun, 100 kHz ile 800 kHz frekans aralığında, ters beslem gerilimine (V_R) bağlı olan tükenme bölgesi kapasitans hesaplanması Denklem (5.5) eşitliğinde verilmiştir. Al/TiO₂/p-Si MIS yapının C-V parametreleri, oda sıcaklığında (-4V)-(+4V) gerilim aralığında 0,01V adımlarla ve ardışık olarak; 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz, 500 kHz, 600 kHz, 700 kHz, 800 kHz frekans değerleri için alınmıştır.verilmektedir. Şekil 5.12'de Verilen grafikten frekans ve kapasitenin ters orantılı olarak, kapasite artarken frekansın azaldığı görülmektedir. Frekans ve kapasite arasındaki bu ilişki arayüzey tuzaklarının uygulanan sinyali takip edememesi ve dolayısı ile C değerinin düşmesi ile açıklanabilir. Burada C^{-2} -V çizimleri 0 ile -4V arasındaki bölgede oldukça lineer bir davranış göstermektedir.



Şekil 5. 12. Oluşturulan Al/TiO₂/p-Si Schottky diyotunun, 10kHz-800Hz frekans aralığındaki ters besleme altındaki $1/C^2$ -V grafikleri.

Üretilen Al/TiO₂/p-Si MIS yapının C^2 -V grafiğinin eğimi yardımıyla hesaplanan N_a (taşıyıcı yoğunluğu değeri), Φ_{sb} (engel yüksekliği değeri), V_D (difüzyon potansiyel değeri), V_0 (kesim voltaj değeri), E_m (max elektrik alan değeri) ve E_f (Fermi enerji seviyesi değeri) ele alınıp hesaplanmıştır ve bu değerler Çizelge 5.3'te mevcuttur.

Çizelge 5. 3. Oluşturulan Al/TiO₂/p-Si numunesinden alınan ölçümlerin Kapasite-Voltaj grafiklerinden elde edilen diyot parametreleri.

Frekans (kHz)	C-V					
	V_0 (V)	V_D (V)	Φ_{sb} (eV)	N_a ($\times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)	E_m ($\times 10^4 \text{ V/m}$)	W ($\times 10^{-4} \text{ m}$)
100	0.7511	0.7769	1.009	4.870	1.073	1.448
200	0.754	0.779	1.012	4.828	1.070	1.457
300	0.753	0.779	1.011	4.791	1.065	1.462
400	0.751	0.777	1.01	4.755	1.060	1.466
500	0.753	0.779	1.012	4.731	1.059	1.471
600	0.760	0.786	1.019	4.731	1.064	1.478
700	0.759	0.785	1.018	4.705	1.060	1.481
800	0.762	0.788	1.021	4.694	1.061	1.486

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar ve Tartışma

İki kısımdan oluşan çalışmamızın birinci kısmında spreylendirme yöntemi ile cam alttaşı üzerine üretilen TiO_2 ince tabakanın optik, yapısal ve morfolojik özellikleri ele alındı.

X-ışını analizlerinde, XRD D8 Discover difraktometresi ile spreylendirme yöntemi ile cam alttaşı üzerine oluşturulan TiO_2 ince film tabakanın X-ışınları kırınım deseni, TiO_2 anataz için ICDD no: 99-100-9412 ve rutil faz için ICDD no: 99-100-4510 numaralı kartlar kullanılarak elde edilmiştir. TiO_2 'nin anatase (101) yönelimi, 25.33° derecede en güçlü kırınım zirvesini vermektedir. 53.96° ve 55.06° derece ise rutile yapısı görülmektedir. Bu, TiO_2 nanopartiküllerinde bulunan ana kristal fazın anatase olduğunu ve sentezlenen numunede minimum miktarda bazı rutile fazların mevcut olduğunu göstermektedir. Elde edilen ince tabaka TiO_2 için, Anatase/Rutile oranı: 83/17 olarak belirlenmiştir. XRD'de görülen geniş tepeler, parçacıkların nanometre boyutunda olduğunu göstermektedir. Bu desenin literatürde (Güllü, 2023; Ahmad ve ark., 2021) uyum içinde olduğu görülmüştür.

Spreylendirme yöntemi yardımıyla üretilen TiO_2 ince tabakanın SEM görüntüleri Şekil 5.3'te verilen Quanta FEG 250 SEM cihazı yardımı ile alınmıştır. TiO_2 tabakanın SEM görüntüleri incelendiğinde TiO_2 'nin morfolojik yapısı, küresel ve hafif aglomerasyonlu çubukları andıran nanoyapılardan oluştuğu, topografik bir oluşum görülmektedir. Bu topografik yapı SEM cihazı ölçümünde geri saçılmış elektronların verdiği görüntülerdir. Görüntülerden yapının homojene yakın bir dağılım gösterdiği söylenebilir. Bu desenin literatürde (Ahmad ve ark., 2021; Güllü, 2023) uyum sergilediği görülmüştür.

TiO_2 ince tabakanın optik soğurma spekturumu, Shimadzu 3600 UV-Vis spektrofotometre kullanılarak 300 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığında ölçülüp, TiO_2 ince tabaka için yapılan bu ölçümün literatürde yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Tauc grafiği kullanılarak, sentezlenen TiO_2 'in bant aralığı enerjisi, 3,63 eV olarak hesaplanmıştır ve bu bant aralığı doğrudan bir bant aralığıdır. Bu değer literatürde katkısız TiO_2 için verilen değerler literatürde (Ahmad ve ark., 2021) uyumlu olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada ikinci kısmı olan diyot yapım aşamasında Al/ TiO_2 /p-Si yapısı üretilip bu MIS yapının elektriksel karakteristikleri analiz edildi. Diyotun akım-voltaj

(I-V) ve kapasite voltaj (C-V) ölçümleri karanlık ortamda ve oda sıcaklığında diyot üzerinde belirlenen bir noktadan KEITHLEY 4200-SCS cihazı ile yapıldı. Ölçüm değerlerinin grafikleri aynı cihaz ile ölçüldükten sonra diyotun karakteristikleri hesaplandı. Ölçümlerde Cheung ve Norde fonksiyonlarından yararlanıldı.

Şekil 5.8'de, oda sıcaklığında ve karanlık ortamda (-2V) - (+2V) aralığında, 0,01V adımlarla ölçülen referans Al/p-Si ve üretilen Al/TiO₂/p-Si diyotunun I-V yapısal özellikleri verilmiştir. Verilen I-V grafiklerinin incelenmesi sonucunda, üretilen diyotun referans diyota göre yaklaşık 1000 kat azalma olduğu görülmektedir. Oluşan bu değer farkı, p-Si ile metal tabaka arasında oluşan TiO₂ ince tabakanın ve arayüzeydeki doğal oksit tabakasının bir direnç oluşturmaya atfedilebilir.

Referans alınan Al/p-Si diyotunun engel yüksekliği hesaplanmış ve engel yüksekliği $\phi_B = 0,676$ eV olarak bulunmuştur. İdealite faktörü (n) ise $n=1,483$ olarak hesaplanmıştır. Üretilen Al/TiO₂/p-Si MIS diyotun ölçülen engel yüksekliği $\phi_B = 0,869$ eV olarak ve idealite faktörü de $n=1,353$ olarak elde edilip bu değerler Çizelge 5.2'de verilmiştir. İdealite faktörünün 1'den büyük olması üretim sırasında meydana gelen TiO₂ yüzey/arayüzey durumları, doğal oksit tabakası ve seri direnç (R_s) gibi faktörlerinden kaynaklanır. Oluşturulan Al/TiO₂/p-Si diyotun engel yüksekliği yaklaşık $\phi_B = 0.20$ eV kadar referans Al/p-Si diyottan daha yüksek çıkmaktadır. Bu durum TiO₂ arayüzey oksit tabakasının varlığına ve uzay yükü alanındaki yük dağılımına bağlı olduğu söylenebilir.

Şekil 5.9'da verilen F(V)-V grafikleri Norde fonksiyonlarından üretilmiş olup Norde fonksiyonlarına göre, referans Al/p-Si diyotun engel yüksekliği $\phi_B = 0.693$ eV ve seri direnci de $R_s = 6,655$ k Ω olarak ölçülmüştür. Sprey piroliz yöntemi ile oluşturulan Al/TiO₂/p-Si diyotun engel yüksekliği ve seri direnci de $R_s = 6,655$ k Ω olarak ölçülmüştür. Bu değerler Çizelge 5.2'de mevcuttur.

Diyotların engel yüksekliği, seri direnç durumları ve idealite faktörü gibi değerler Norde fonksiyonlarıyla beraber Cheung yöntemi ile de hesaplanır. Şekil 5.10'da referans diyot Al/p-Si ve oluşturulan diyot Al/TiO₂/p-Si'nin $dV/d(\ln I)$ -I grafiği verilmektedir. Referans diyot Al/p-Si'nin seri direnç değeri $R_s = 3,269$ k Ω olarak, grafiklerdeki iner doğruların eğiminden hesaplanmıştır. Cheung yöntemine göre, lineer doğrunun düşey eksenini kestiği nokta ele alınarak idealite faktörü $n=6,458$ olarak elde edilmiştir. Yine aynı şekilde, üretilen Al/TiO₂/p-Si MIS diyotun seri direnci $R_s = 4,929$ k Ω ve idealite faktörü $n=4,994$ olacak şekilde hesap edilmiştir. Bu değerler Çizelge 5.2'de mevcuttur.

Şekil 5.11’de verilen $H(I)-(I)$ grafikleri de yine Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilmiştir. Burada da referans diyot Al/p-Si’nin seri direnç değeri $R_s=3,232 \text{ k}\Omega$ olarak, engel yüksekliği $\phi_B= 0,600 \text{ eV}$ olarak bulunmuştur. Üretilen Al/TiO₂/p-Si MIS diyotun seri direnci ise $R_s=4,929 \text{ k}\Omega$ ve engel yüksekliği $\phi_B= 0,722 \text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 5.2’de yer almaktadır.

Şekil 5.12’de üretilen Al/TiO₂/p-Si diyotun, 100 kHz ile 800 kHz frekans aralığında, ters beslem gerilimine (V_R) bağlı olan tükenme bölgesi kapasitans hesaplanması Denklem (5.5) eşitliğinde verilmiştir. Al/TiO₂/p-Si MIS yapının C-V parametreleri, oda sıcaklığında (-4V)-(+4V) gerilim aralığında 0,01V adımlarla ve ardışık olarak; 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz, 500 kHz, 600 kHz, 700 kHz, 800 kHz frekans değerleri için alınmış olup Şekil 5.12’de verilmektedir. Verilen grafikten frekans ve kapasitenin ters orantılı olarak, kapasite artarken frekansı azaldığı görülmektedir. Frekans ve kapasite arasındaki bu ilişki arayüzey tuzaklarının uygulanan sinyali takip edememesi ve dolayısı ile C değerinin düşmesi ile açıklanabilir. Burada C^{-2} -V çizimleri 0 ile -4V arasındaki bölgede oldukça lineer bir davranış göstermektedir.

Üretilen Al/TiO₂/p-Si MIS yapının C^{-2} -V grafiğinin eğimi yardımıyla hesaplanan N_a (taşıyıcı yoğunluğu değeri), Φ_{sb} (engel yüksekliği değeri), V_D (difüzyon potansiyel değeri), V_0 (kesim voltaj değeri), E_m (max elektrik alan değeri) ve E_f (Fermi enerji seviyesi değeri) ele alınıp hesaplanmıştır ve bu değerler Çizelge 5.3e verilmiştir.

Sonuç olarak: İki aşamada gerçekleştirilen bu çalışmanın ilk aşamasında, cam üzerinde spreylendirilme yöntemi kullanılarak oluşturulan TiO₂ ince tabakanın optik, yapısal ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. Spreylendirilme yöntemi yardımıyla cam alttaşı yüzeyine oluşturulan TiO₂ ince film tabakanın yapısal analizi, X-ışınları kırınım deseni analizi ile gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda, Anatase ve Rutile formlarında kristal fazlarının olduğu ve literatürdeki çalışmalarla (Güllü, 2023; Ahmad ve ark., 2021) uyumlu olduğu görülmüştür.

Spreylendirilme tekniği kullanılarak TiO₂’nin SEM görüntü analizi yapılmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde TiO₂’nin morfolojik yapısı, küresel ve hafif aglomerasyonlu çubukları andıran nanoyapılardan oluştuğu, topografik bir oluşum sergilediği görülmekte ve bu yapının literatürdeki çalışmalarla (Güllü, 2023; Ahmad ve ark., 2021) uyumlu olduğu gözlenmiştir.

TiO₂ ince tabakanın optik soğurma spektrumu, Shimadzu 3600 UV-Vis spektrofotometre kullanılarak 300 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığında ölçülüp, TiO₂

ince tabaka için yapılan bu ölçümün literatürde yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Tauc grafiği kullanılarak, sentezlenen TiO_2 'in bant aralığı enerjisi, 3,63 eV olarak hesaplanmıştır ve bu bant aralığı doğrudan bir bant aralığıdır. Bu değer literatürde katkısız TiO_2 için verilen değerler literatürde (Ahmad ve ark., 2021) uyumlu olduğu görülmüştür.

6.2 Öneriler

Yaptığımız çalışmada spreylendirme yöntemi kullanılarak katkısız TiO_2 ince film tabakalar elde edildi. İnce film Tabakalar öncelikle cam üzerine oluşturulup optik, yapısal ve morfolojik özellikleri incelendi. İkinci aşamada ise $\text{Al}/\text{TiO}_2/\text{p-Si}$ diyotu oluşturulup elektriksel özellikleri karanlık ortamda analiz edildi. Karanlık ortamda gerçekleştirilen diyot ölçümlerine ek olarak, aydınlık ortamda da diyotun değerleri ölçülüp kontakların parametrelerine ışığın etkisi incelenebilir.

Yapılan MIS kontaklarda katkısız TiO_2 kullanıldı, yapılacak kontaklarda TiO_2 'ye metal katkısı yapıp etkisi araştırılabilir.

Uygulanan gerilimin (-4V) ile (+4V) aralığında, ileri ve ters gerilim ortamında 0,01V adımlarla değiştirilmesiyle diyot ölçümleri gerçekleştirildi. Farklı gerilim aralıklarının ve adımlarının kullanılmasını sağlayarak diyotun bu değişkenlere olan tepkisi ve uygulanan gerilimin etkisi incelenebilir.

Yapılacak MIS kontaklarda altlığın sıcaklığı değiştirilip, sıcaklığın etkisi araştırılabilir.

Homojensizlik göz önüne alınarak diyot ölçümünde diyotun ayrı ayrı bütün kısımlarından ölçümler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Ashcroft, N. W. and Mermin, N. D., 1976, Solid State Physics; *Company, B. P., Ed.*; Holt, Rinehart and Winston.
- Asoh, H., Ishino, M. and Hashimoto, H., 2018, Alüminyumun AC -Bipolar Anodizasyonu: Frekansın Gözenekli Alümina Tabakaların Kalınlığı Üzerindeki Etkileri, *J. Electrochem. Soc.*, 165 (7), C295-C301.
- Beyer, G., Satta, A., Schuhmacher, J., Maex, K., Besling, W., Kilpela, O., Sprey, H., Tempel, G., 2002, Cu/Low-k Ara Bağlantıları için 10 Nm Altı Atomik Katman Biriktirme Bariyerlerinin Geliştirilmesi, *Mikroelektron Müh. Eng.*, 64 (1-4), 233-245.
- Braun, F., 1874, Ueber Die Stromleitung Durch Schwefelmetalle, *Ann. der Phys. und Chemie*, 153 (4), 556-563.
- Chen, G., 2005, Nanoscale Energy Transport and Conversion, *Oxford University Press*.
- Cheung, S. K. And Cheung, N. W., 1986, Schottky Diyot Parametrelerinin İleri Akım-Voltaj Karakteristiklerinden Çıkarılması, *Appl. Phys. Lett.*, 49 (2), 85-87.
- Das, D., Barman, A., Kumar, S., Sinha, A. K., Gupta, M., Singhal, R; Johari, P; Kanjilal, A., 2019, Dirençli Anahtarlama Belleklerinin Taşıma Özelliklerini Düzenlemek için Sin gly Yüklü Oksijen Boşluklarının ve Ligand Alanının Sinerjik Etkisi, *J. Phys. Chem. C.*, 123, 26812-26822.
- Duan, N., Lin, H., Li, L., Hu, J., Bi, L., Lu, H., Weng, X., Xie, J., & Deng, L., 2013, ZrO₂-TiO₂ thin films: A new material system for mid-infrared integrated photonics, *Optical materials express*, 3(9), 1537-15.
- Durante, O., Di Giorgio, C., Granata, V., Neilson, J., Fittipaldi, R., Vecchione, A., Carapella, G., Chiadini, F., DeSalvo, R., & Dinelli, F., 2021, Emergence and evolution of crystallization in TiO₂ thin films, *A structural and morphological study*, *Nanomaterials*, 11(6), 1409.
- Exarhos, G. J., 2007, X-D. Zhou. Discovery-based design of transparent conducting oxide films, *Thin Solid films.*, 515: 7025-7032.
- Filipovic, F., Selberherr, S., Mutinati, D. C., Brunet, E., Steinhauer, S., Kock, A., Teva, J., Kraft, J., Siegert, J., and Schrank. F., 2013, Modeling spray pyrolysis deposition, *In: Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol II. London, UK. ISBN: 978-988-19252-8-2.
- Fujishima, A. and Kenichi, H., 1972, Yarı İletken Elektrotta Suyun Elektrokimyasal Fotolizi, *Nature* 238 (5358), 38-40.
- Fujishima, A. and Zhang, X., 2006, Titanyum Dioksit Fotokatalizi: Mevcut Durum ve Gelecek Yaklaşımlar, *Comptes Rendus Chim*, 9 (5-6), 750-760.
- Greene, J. E., 2003, Transitioning from the art to the science of thin films: 1964 to, *J. Vac. Sci. Techno., A*, vol. 21, no. 5, pp. S71-S73.
- Guo, W., Xue, X., Wang, S., Lin, C., Wang, Z. L., 2012, Çift Taraflı TiO₂ Nanotüp Dizilerine Dayalı Boya Duyarlılaştırılmış Güneş Pili ve Li Pilden Oluşan Entegre Bir Güç Paketi, *Nano Lett.*, 12 (5), 2520-2523.
- Iijima, S., 1991, Grafitik Karbondan Helisel Mikrotübüller, *Nature* 354 (354), 56-58.
- Ito, S., Murakami, T. N., Comte, P., Liska, P., Grätzel, C., Nazeeruddin, M.K., and Grätzel, M., 2008, Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10%, *Thin Solid films*, vol. 516, no. 14, pp. 4613-4619.
- Jackman, M. J. and Thomas, A. G., 2015, Muryn, C. Stokiyometrik ve İndirgenmiş Anataz TiO₂ (101) Yüzeylerinin Fotoelektron Spektroskopisi Çalışması: Yüzey

- Altı Kusurlarının Ortama Yakın Basınçlarda Su Adsorpsiyonu Üzerindeki Etkisi, *J. Phys Chem. C.*, 2015, 119 (13682-13690).
- Jeong, S. H., Kim, J.K., Kim, B. S., Shim, S. H., and Lee, B.T., 2004, Characterization of SiO₂ and TiO₂ films prepared using RF magnetron sputtering and their application to antireflection coating, *Vacuum*, vol. 76, no. 4, pp. 507–515.
- Ji, X., Zuppero, A., Gidwani, J. M., Somorjai, G. A., 2005, Katalitik Nanodiyot: Nano Ölçekli Platin Titanyum Oksit Schottky Diyotlar Kullanılarak Gaz Fazında Katalitik Reaksiyonla Üretilen Elektron Akışı, *Nano Lett.*, 5 (4), 753-756.
- Kajitvichyanukul, P., Pongpom, S., Watcharenwong, A., & Ananpattarachai, J., 2005, Effect of acetyl acetone on property of TiO₂ thin film for photocatalytic reduction of chromium (VI) from aqueous solution, *J. Spec. Issue Nanotech*, 4, 87-93.
- Kang, T. S., Smith, A. P., Taylor, B. E., Durstock, M. F., 2009, Yüksek Düzeyde Düzenlenmiş TiO₂ Nanotüp Dizilerinin Üretimi ve Boya Duyarlı Güneş Pillerinde Kullanımı, *Nano Lett.*, 9 (2), 601-606.
- Kaplan, H. K., Olkun, A., Akay, S. K., & Pat, S., 2021, Si-based photodiode and material characterization of TiO₂ thin film, *Optical and Quantum Electronics*, 53(5), 248.
- Kowalski, D., Kim, D., Schmuki, P., 2013, TiO₂ Nanotüpler, Nanokanallar ve Mezosünger: Kendi Kendine Organize Oluşum ve Uygulamalar, *Nano Today* 8 (3), 235-264.
- Lee, W. J., Lim, D. H., Smyrl, W. H., 2013, TiO₂ Nanotüp Substratlar ve Püskürtülmüş Pt Katalizör Kullanan Minyatür H₂/O₂ Yakıt Hücreleri, *J. Power Sources* 240, 612- 617.
- Lekka, M., Kouloumbi, N., Gajo, M., and Bonora, P. L., 2005, Corrosion and wear resistant electrodeposited composite coatings, *Electrochim. Acta*, vol. 50, no. 23, pp. 4551–4556.
- Lin, C. H., Liao, C. H., Chen, W.-H., Chou, C. Y., & Liu, C. Y., 2019, Fabrication of p-type TiO₂ and transparent p- TiO₂/n-ITO pn junctions, *AIP Advances*, 9(4), 045229.
- Lin, H., Rumaiz, A. K., Schulz, M., Wang, D., Rock, R., Huang, C. P., & Shah, S. I., 2008, Photocatalytic activity of pulsed laser deposited TiO₂ thin films, *Materials Science and Engineering: B*, 151(2), 133-139.
- Loget, G., So, S., Hahn, R., Schmuki, P., 2014, Bipolar Anodizasyon, TiO₂ Nanotüp Gradyanlarının Kontrollü Dizilerinin İmalatını Sağlıyor, *J. Mater. Chem. A.*, 2 (42), 17740-17745.
- Lothian, G. F., 1852, Beer's law and its use in analysis, *Analyst*, vol. 88, no. 678, pp. 678–685.
- Luttrell, T., Halpegamage, S., Tao, J., Kramer, A., Sutter, E., Batzill, M., 2015, Anataz Neden Rutilden Daha İyi Bir Fotokatalist? - Epitaksiyel TiO₂ Tabakaları Üzerine Model Çalışmaları, *Sci. Rep.*, 4, 1-8.
- Matthes, B., Broszeit, E., Aromaa, J., Ronkainen, H., Hannula, S. F., Leyland, A. and Matthews, A., Corrosion performance of some titanium-based hard coatings, *Surf, Coatings Technol.*, vol. 49, no. 1–3, pp. 489–495, 1991.
- Michalas, L., Khiat, A., Stathopoulos, S., & Prodromakis, T., 2017, Metal- TiO₂ contacts: An electrical characterization study, *arXiv preprint arXiv:1712.04218*.
- Mooney, J. B., Radding, S. B., 1982, Spray pyrolysis processing, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 12: 81-101.
- Neamen, D. A., 2012, Semiconductor Physics and Devices, 4th ed., *The McGraw-Hill Companies*.

- Nicolaescu, M., Bandas, C., Orha, C., Şerban, V., Lazău, C., & Căprărescu, S., 2021, Fabrication of a UV photodetector based on n- TiO₂/p-CuMnO₂ heterostructures, *Coatings*, 11(11), 1380.
- Norde, H., 1979, Yüksek Serili Schottky Diyotlar için Değiştirilmiş İleri I -V Çizim Direnç, *J. Appl. Phys.*, 50 (7), 5052-5053.
- Pakma, O., Serin, N., & Serin, T., 2008, Al/ TiO₂/p-Si (MIS) Yapılarında Temel Elektriksel Parametrelerin Akım-Gerilim (IV) Karakteristiklerinden Hesaplanması, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, (Baskıda).
- Pan, X., Yang, M. Q., Fu, X., Zhang, N., Xu, Y. J., 2013, Oksijen Boşluklu Kusurlu TiO₂: Sentez, Özellikler ve Fotokatalitik Uygulamalar, *Nanoscale*: 5 (9), 3601-3614.
- Piegari, A., and Flory, F., 2013, Optical thin films and coatings: from materials to applications, *Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.*, Bibliography 138.
- Raja, K. S., Gandhi, T., Misra, M., 2007, Düzenli Titanya Nanotüplerin Sentezi için Elektrolit Olarak Etilen Glikolün Su İçeriğinin Etkisi, *Electrochem. commun.*, 9 (5), 1069-1076.
- Ren, L., Li, Y., Hou, J., Zhao, X., Pan, C., 2014, İç Gözenekli TiO₂ Nanokristallerinin Hazırlanması ve Geliştirilmiş Fotokatalitik Aktivitesi, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 6 (3), 1608-1615.
- Roy, P., Berger, S., Schmuki, P., 2011, Schmuki, P. TiO₂ Nanotüpler: Sentez ve Uygulama İncelemeleri, *Angew. Chemie* 50, 2904-2939.
- Ruzgar, S., & Pehlivanoglu, S. A., 2020, The effect of Fe dopant on structural, optical properties of TiO₂ thin films and electrical performance of TiO₂ based photodiode, *Superlattices and Microstructures*, 145, 106636.
- Ruzgar, S., 2020, Enhancement of the electrical performance of TiO₂/p-Si heterojunction diode by Gadolinium doping, *Applied Physics A*, 126(10), 770.
- Sawada, Y., Kobayashi, C., Seki, S., and Funakubo, H., 2002, Highly conducting indium-tin-oxide transparent films fabricated by spray CVD using ethanol solution of indium (III) chloride and tin (IV) chloride, *Thin Solid films.*, 409: 46-50.
- Schottky, W., 1938, Halbleiterteorie Der Sperrschicht, *Naturwissenschaften*, 26,843.
- See Thin Film Interference, *The Physics Hypertextbook* (online) <http://physics.info/thin-films/summary.shtml> for the information about the light speed in the thin films. [Ziyaret Tarihi: 15 Mayıs 2023].
- Sevgili, Ö., 2021, Termal Buharlaştırma Yöntemiyle Hazırlanan Al/ TiO₂/p-Si Schottky Diyotun Elektriksel Özelliklerinin Sıcaklık ve Aydınlanma Şiddetine Bağlı İncelenmesi, *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(1), 275-283.
- Shi, Y. J., Zhang, R. J., Zheng, H., Li, D. H., Wei, W., Chen, X., Sun, Y., Wei, Y.-F., Lu, H. L., & Dai, N., 2017, Optical constants and band gap evolution with phase transition in sub-20-nm-thick TiO₂ films prepared by ALD, *Nanoscale Research Letters*, 12(1), 1-9.
- Song, J., Zheng, M., Zhang, B., Li, Q.; Wang, F., Ma, L., Li, Y., Zhu, C., Ma, L., Shen, W., 2017, Yüksek Alanlı Anodizasyon Altında Si Substrat Üzerinde Yüksek Düzenli TiO₂ Nanotüp Dizilerinin Hızlı Büyümesi, *Nano-Mikro Lett*, 9 (2).
- Sulka, G. D., Kapusta-Kołodziej, J., Brzózka, A., Jaskuła, M., 2010, Elektrokimyasal Anodizasyon ile Nanogözenekli TiO₂ Üretimi, *Elektrokimya. Acta*, 55 (14), 4359-4367.
- Sun, L., Zhang, S., Sun, X. W., Wang, X., Cai, Y., 2010, Çift Taraflı Anodik Titanya Nanotüp Dizileri: Çift Taraflı Büyüme Süreci, *Langmuir* 26 (23), 18424- 18429.

- Tennakone, K. and Wijayantha, K. G. U., 1998, İmmobilize TiO₂ Fotokatalizör ve Katı Kurban Ajan ile Sulu Ortamdan Ağır Metal Ekstraksiyonu, *J. Photochem. Fotobiol. A Chem*, 113 (1), 89-92.
- Viguié, J. C. and Spitz, J., 1975, Chemical vapor deposition at low temperatures, *J. Electrochem. Soc.*, 122(4): 585-588.
- Wadullah, H. M., Ajeel, S. A., & Abbass, M. K., 2019, Synthesis and characterization of nanocoatings thin films by atomic layer deposition for medical applications, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(3), 032057.
- Wagendristel A. and Wang Y., 1994, An introduction to physics and technology of thin films, *River Edge, NJ: World Scientific, Singapore*.
- Wang, D. W., Fang, H. T., Li, F., Chen, Z. G., Zhong, Q. S., Lu, G. Q., Cheng, H. M., 2008, Hibrit Elektrokimyasal Enerji Depolama için İnterkalasyon Anot Malzemesi Olarak Hizalanmış Titanya Nanotüpler, *Adv. İşlevsel. Mater*, 18 (23), 3787-3793.
- Wang, Z., Chen, G., Xia, D., Zhang, L., 2008, Metanolün Oksidasyonuna Yönelik PtRu/C- TiO₂'nin Elektrokatalitik Özellikleri Üzerine Çalışmalar, *J. Alloys Compd*, 450 (1-2), 148-151.
- Xiong, L. Bin, Li, J. L., Yang, B., Yu, Y., 2012, Titanyum Dioksit Yüzeyinde Ti³⁺: Üretimi, Özellikleri ve Fotokatalitik Uygulaması, *J. Nanomater.*
- Yang, L., 2011, Resistive switching in TiO₂ thin films (C. 17), Forschungszentrum Jülich.
- Zhang, L., Chen, Z., Joshua Yang, J., Wysocki, B., McDonald, N., Chen, Y., 2013, TiO₂ - TiO_{2-x} Memristörün Kompakt Modellemesi, *Appl. Phys. Lett*, 102 (15).
- Zhang, Q., Chen, R., San, H., Liu, G., Wang, K., 2015, TiO₂ Nanotüp Dizileri Kullanarak Betavoltaik Mikro Piller, 2015, *Transducers - 2015 18th Int. Konf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems, TRANSDUCERS 2015*, 1909-1912.
- Zhang, S. Li, L. Kumar, A., 2009, Malzeme Karakterizasyon Teknikleri, Taylor & Francis Group.
- Zhang, X., Cai, W., Zhang, J., Brownless, J., Wilson, J., Zhang, Y., & Song, A., 2019, Solution-Processed TiO₂-Based Schottky Diodes With a Large Barrier Height, *IEEE Electron Device Letters*, 40(9), 1378-1381.
- Zhang, Z., Gong, Z.; Yang, Y., 2004, Lityum İyon Pillerde Çıplak ve TiO₂ Kaplamalı Katot Malzemelerinin Elektrokimyasal Performansı ve Yüzey Özellikleri, *J. Phys. Chem. B* 108, 17546-17552.
- Ziel, A., 1968, Solid-State Physical Electronics, *New Jersey: Prentice-Hall, In.*, 7, 136-144.