



**TiO₂ TABANLI HETEROEKLEM YAPININ TEMEL
KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN
SICAKLIĞA BAĞLI *I*-*V* (AKIM-VOLTAJ) ve *C*-*V*
(KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN
EDİLMESİ**

Murat KOCA

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**TiO₂ TABANLI HETEROEKLEM YAPININ TEMEL KARAKTERİSTİK
PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI *I-V* (AKIM-VOLTAJ) ve *C-V*
(KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN EDİLMESİ**

(Determination of Basic Characteristic Parameters of TiO₂ Based Heterojunction Structure
From Temperature Dependent *I-V* (Current – Voltage) and *C-V* (Capacitance –Voltage)
Measurements

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat KOCA

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Erzurum
Ağustos, 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**TiO₂ TABANLI HETEROEKLEM YAPININ TEMEL KARAKTERİSTİK
PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI I-V (AKIM-VOLTAJ) ve C-V
(KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN EDİLMESİ**

Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN danışmanlığında, Murat KOCA tarafından hazırlanan bu çalışma, 29/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Ana Bilim Dalı Fizik Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.**

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Abdulkerim KARABULUT <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Duygu EKİNCİ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun / ... /
tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü
Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**Graduate School of Natural and
Applied Sciences**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ****ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU**

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN danışmanlığında sunulan “**TiO₂ TABANLI HETEROEKLEM YAPININ TEMEL KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI I-V (AKIM-VOLTAJ) ve C-V (KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN EDİLMESİ**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	6	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Metot	23	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	4	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Murat KOCA	Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN
29.8.2025	29.8.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, laboratuvar çalışmaları süresince ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde gerekli bilgi, destek ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN'a, ve Sayın Prof. Dr. Duygu EKİNCİ'ye çok teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım boyunca desteği ve yardımı ile bana yön gösteren Sayın Doç.Dr. Zakir ÇALDIRAN'a ve Sayın Züleyha KUDAŞ'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan babam Mehmet KOCA'ya ve kardeşim Onur Can KOCA'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım esnasında fedakârlık gösteren sevgili eşim Kevser KOCA'ya, kızım Gökçe KOCA'ya ve oğlum Yavuz KOCA'ya teşekkür ederim.

Ayrıca deney çalışmalarım sürecinde gerekli materyalleri ve laboratuvar imkânlarını sunan Atatürk Üniversitesi Fizik Bölümü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Murat KOCA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TiO₂ TABANLI HETEROEKLEM YAPININ TEMEL KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI *I-V* (AKIM-VOLTAJ) ve *C-V* (KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN EDİLMESİ

Murat KOCA

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Amaç: Bu tez çalışmasında, TiO₂ tabanlı heteroeklem yapının temel karakteristik parametrelerinin sıcaklığa bağlı *I-V* (akım-voltaj) ve *C-V* (kapasite-voltaj) ölçümlerinden tayin edilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: p-tipi silikon örnekleri, öncelikle aseton ve metanol kullanılarak temizlendi, ardından yaygın olarak kullanılan RCA temizleme prosedürü uygulanarak yüzeydeki organik kirlere arındırıldı. Temizlik işlemlerinin ardından, Al kullanılarak 200 nm kalınlığında vakum ortamında termal buharlaştırma yöntemiyle omik kontak gerçekleştirildi. p-Si/Al yapısına, N₂ atmosferinde 10 dakika süreyle 580°C’de ısıtma işlemi uygulandı. Sonraki aşamada, TiO₂ tabakası katodik elektrokaplama ile p-Si alt tabakalar üzerine büyütüldü. Biriktirilen metal oksit filminin yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonundan sonra TiO₂ yüzeyine Au buharlaştırılarak Au/TiO₂/p-Si/Al yapısında 15 aygıt üretildi. Oda sıcaklığında yapılan *I-V* ölçümleri sonrasında optimum davranış gösteren bir aygıtın, geniş sıcaklık aralığında *I-V* ve *C-V* ölçümlerinin analizi yapıldı. Ayrıca, başka bir aygıt ışıığa maruz bırakılmış ve n-TiO₂/p-Si heteroekleminin ışık tepkisini araştırmak için *I-V* ölçümleri analiz edildi. Aygıtın ters beslem akım değerinin ışıığa maruz kalmasıyla, önemli ölçüde artan bir fotodiyot özelliği sergilediği belirlendi. Aygıtın sıcaklığa bağlı *I-V* ve *C-V* ölçümlerinde eşlik eden enerji bariyerinin, voltaja da bağlı olduğunu gösterdi. Sıcaklıkla ilişkili *I-V* ölçümlerinin değerlendirilmesi için termiyonik emisyon ve Norde yöntemi kullanıldı.

Bulgular: Denge koşullarına göre, bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla artış gösterdiği (80 K’de 0,24 eV ve 300 K’de 0,76 eV) ve idealite faktörünün azaldığı (80 K’de 4,94; 300 K’de 3,17) gözlemlendi. Bu davranış, n-TiO₂/p-Si’nin homojen olmayan bariyer yüksekliğine atfedildi.

Anahtar Kelimeler: Titanyumdioksit, Heteroeklem, Akım-Voltaj, Kapasite-Voltaj

Ağustos 2025, 82 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

DETERMINATION OF BASIC CHARACTERISTIC PARAMETERS OF TiO₂ BASED HETEROJUNCTION STRUCTURE FROM TEMPERATURE DEPENDENT *I-V* (CURRENT-VOLTAGE) AND *C-V* (CAPACITY-VOLTAGE) MEASUREMENT

Murat KOCA

Supervisor: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Purpose: In this thesis, it is aimed to determine the basic characteristic parameters of TiO₂ based heterojunction structure from temperature-dependent *I-V* (current-voltage) and *C-V* (capacity-voltage) measurements.

Method: p-type silicon samples were first cleaned using acetone and methanol. Then the commonly used RCA cleaning procedure was applied to remove organic contaminants from the surface. After cleaning, a 200 nm-thick ohmic contact was formed using the thermal evaporation method in a vacuum environment with Al. The p-Si/Al structure was then heat treated at 580 °C for 10 minutes in an N₂ atmosphere. Next, a TiO₂ layer was grown on the p-Si substrates by cathodic electroplating. After the structural, morphological and optical characterization of the deposited metal oxide film, 15 devices with Au/TiO₂/p-Si/Al structure were produced by evaporating Au onto the TiO₂ surface. Following *I-V* measurements conducted at room temperature, the device exhibiting optimal behavior was analyzed for *I-V* and *C-V* measurements across a wide temperature range. Additionally, another device was exposed to light and *I-V* measurements were analyzed to investigate the light response of n-TiO₂/p-Si heterojunction. It was found that the device exhibited a photodiode property where the reverse bias current value increased significantly upon light exposure. The temperature dependent *I-V* and *C-V* measurements of the device indicated that the accompanying energy barrier was both voltage dependent. Thermionic emission and Norde method were used to evaluate the temperature dependent *I-V* measurements.

Findings: It was observed that the barrier height increased with temperature (0.24 eV at 80 K and 0.76 eV at 300 K) and the ideality factor decreased (4.94 at 80 K; 3.17 at 300 K) according to equilibrium conditions. This behavior was attributed to the inhomogeneous barrier height of n-TiO₂/p-Si.

Keywords: Titanium dioxide, Heterojunction, Current-Voltage, Capacity-Voltage

August 2025, 82 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Yarıiletkenlerin Genel Özellikleri.....	3
Elektron Geçişleri ve İletkenlik Mekanizması	3
Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri ve Kristal Yapısı	4
Elektronik Uygulamalarda Yarıiletkenlerin Önemi	4
Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması	4
<i>Katkısız yarıiletkenler</i>	5
<i>Katkılı yarıiletkenler</i>	7
Yarıiletkenlerde Bant Geçişleri.....	9
Yarıiletkenlerin Bant Yapısı ve İletkenlik Özellikleri	10
Band Aralığı Türleri.....	10
<i>Doğrudan band aralığı</i>	10
<i>Dolaylı band aralığı</i>	11
Özdirenç ve İletkenlik Özellikleri.....	12
Fotovoltaik Etki ve Eksitonlar	12
Kristal Yapı ve Element Türleri.....	12
Yarıiletkenlerin İletkenlik Tipleri ve Kullanım Alanları	12
Yarıiletkenlerin iletkenlik tipleri.....	13
p-n Eklemler.....	13
Yarıiletkenlerin Bazı Kullanım Alanları	13
<i>Transistörler</i>	14

<i>Diyotlar</i>	14
<i>Güneş pilleri</i>	14
<i>LED'ler</i>	14
<i>Lazerler</i>	14
<i>Sensörler ve Dedektörler</i>	14
<i>Metal-Yarıiletken Kontaklar</i>	15
<i>Omik kontak</i>	15
<i>Schottky kontak</i>	16
<i>Aygıt Üretimi</i>	16
<i>Kimyasal buhar biriktirme (CVD)</i>	17
<i>Fiziksel buhar biriktirme (PVD)</i>	17
<i>Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD)</i>	17
<i>Elektrokimyasal kaplama yöntemi (Elektrodepozisyon)</i>	18
<i>Sol-jel yöntemi</i>	18
<i>Döndürerek kaplama (Spin coating)</i>	19
<i>Daldırarak kaplama (Dip coating)</i>	19
<i>Mikroöçekli kaplama (Microscale coating)</i>	20
<i>Floresan kaplama</i>	20
<i>Mekanik kaplama (Mechanical coating)</i>	20
<i>Yüzey daldırma (Surface dip coating)</i>	21
<i>Altan daldırma kaplama (Bottom-up coating)</i>	21
<i>Alüminyum oksit kaplama (Alumina coating)</i>	21
<i>Epitaksiyel büyüme</i>	22
<i>Lazer ablasyon yöntemi</i>	22
<i>Baskı Yöntemleri</i>	22
<i>Aerosol jeti (Aerosol jet printing)</i>	23
<i>Tavlama (Annealing)</i>	23
<i>Yüzey Modifikasyonu (Surface Modification)</i>	23
<i>TiO₂'nin Genel Özellikleri</i>	24
<i>Brokit TiO₂ bileşiğinin özellikleri</i>	25
<i>Rutil TiO₂ bileşiğinin özellikleri</i>	26
<i>Anataz TiO₂ bileşiğinin özellikleri</i>	27
<i>TiO₂'nin Uygulama Alanları</i>	28
<i>Katalizör olarak</i>	28
<i>Optik ve elektronik alanlarda</i>	28

<i>Biyomedikal uygulamalar</i>	28
<i>Diğer uygulama alanları</i>	29
TiO ₂ Üretim Yöntemleri	31
Anodizasyon ile TiO ₂ üretimi	31
MATERYAL VE YÖNTEM	33
Giriş	33
p-Si Kristalinin Temizlenmesi ve Numunenin Hazırlanması	33
Elektrokimyasal Kaplama İşlemi	34
Elektrot Yüzeylerinin Modifikasyonu	35
Deney ve Ölçüm Sistemi	36
ARAŞTIRMA BULGULARI	38
TiO ₂ Filminin Optik, Morfolojik ve Yapısal Ölçümleri	38
Au/n-TiO ₂ /p-Si heteroeklemin Elektriksel Ölçümleri	42
TARTIŞMA ve SONUÇ	58
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	67

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Titanyum Üretim Yöntemleri ve Yüzey Özellikleri.....	31
Tablo 2. n-TiO ₂ /p-Si'nin Sıcaklığa Bağlı Deneysel Aygıt Parametreleri	55



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bir yarıiletkenin içsel iletkenlik için bant şeması.....	6
Şekil 2. Silisyum kristalinde galyum safsızlık (kirlilik) atomu.....	7
Şekil 3. Silisyum kristalinde arsenik safsızlık (kirlilik) atomu	8
Şekil 4. Metaller, yarıiletkenler ve yalıtkanlar için basit enerji-band diyagramı	10
Şekil 5. Doğrudan band aralığı.....	11
Şekil 6. Dolaylı band aralığı.....	11
Şekil 7. Omik kontak I - V grafiği	16
Şekil 8. Brokit TiO_2 'in birim hücresi	26
Şekil 9. Rutil TiO_2 'in birim hücresi	26
Şekil 10. Anataz TiO_2 'in birim hücresi	27
Şekil 11. Saf titanyum yüzey oksit filmi	30
Şekil 12. Anodizasyon ünitesi	32
Şekil 13. Üç elektrotlu anodizasyon ünitesi	34
Şekil 14. $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si/Al}$ heteroeklemlerin kesit görüntüsü	35
Şekil 15. $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ yapısının enerji-band diyagramı	36
Şekil 16. Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj ölçüm sistemi	36
Şekil 17. Sıcaklığa bağlı ölçümler için kullanılan kriyostat düzeneği	37
Şekil 18. TiO_2 XPS spektrumu ölçümleri.....	39
Şekil 19. TiO_2 filminin STM görüntüsü.....	40
Şekil 20. TiO_2 'nin XRD ölçümleri	41
Şekil 21. $\text{n-TiO}_2/\text{p-Si}$ 'nin UV-vis soğurma spektrumu grafiği	42
Şekil 22. TiO_2 'nin Tauc grafiği	42
Şekil 23. Aynı koşullarda hazırlanan 15 tane $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ heteroeklemin oda sıcaklığında ve karanlıktaki I - V grafikleri.....	44
Şekil 24. 15 $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ heteroyapısının deneysel bariyer yüksekliği ile ideallik faktörü arasındaki ilişki grafiği.....	46
Şekil 25. $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ heteroeklem'in karanlık ve aydınlık koşullardaki I - V eğrileri	48
Şekil 26. ± 1 V gerilim altında, sıcaklık fonksiyonu olarak gerçekleştirilen $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ heteroeklem aygıtının I - V ölçümleri	48
Şekil 27. Sıcaklığa karşı idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerlerindeki değişim.	49
Şekil 28. $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ heteroekleminin Richardson ve modifiye Richardson grafikleri	51

Şekil 29. Au/n-TiO ₂ /p-Si heteroekleminin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak F(V)-V eğrileri .	53
Şekil 30. TE, Norde ve C-V yöntemlerinden elde edilen Au/n-TiO ₂ /p-Si heteroekleminin Φ_b-T grafikleri.....	54
Şekil 31. Au/n-TiO ₂ /p-Si heteroekleminin C-V-T grafikleri.	56
Şekil 32. 500 kHz frekansta n-TiO ₂ /p-Si heteroeklemlerinin $1/C^2-V-T$ grafikleri.....	57



KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

Φ_b	: Schottky engel yüksekliği
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
$\overline{\Phi}_b$	: Ortalama engel yüksekliği
Φ_b^c	: Kapasite-Voltaj ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği
Φ_b^j	: Düz beslem gerilimine bağlı olarak I - V ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
A	: Diyodun etkin alanı
A^*	: Richardson sabiti
a.c.	: Alternatif akım
C	: Kapasite
C - V	: Kapasite-Voltaj
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
h	: Planck sabiti
I	: Akım
I_0	: Satürasyon akımı
I - V	: Akım-Gerilim
J	: Akım yoğunluğu
k	: Boltzman sabiti
LED	: Işık yayan diyet
n	: İdealite faktörü
N_a	: Akseptör konsantrasyonu
N_d	: Donor konsantrasyonu
q	: Elektronun yükü
R_s	: Seri direnç
T	: Mutlak sıcaklık

TE	: Termoiyonik Emisyon
TFE	: Termoiyonik Alan Emisyonu
UV	: Ultraviyole ışık
ν	: Fotonun elektromanyetik frekansı
V	: Voltaj
V_d	: Potansiyel fark
Vis	: Görünür ışık
β	: Engel yüksekliğinin sıcaklık ile değişim katsayısı



GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızlı gelişimi, birçok alanda çeşitli yenilikleri ve değişiklikleri beraberinde getirmiştir. Bu teknolojik devrimde, yarıiletken aygıtların önemi büyük bir artış göstermiştir. Yarıiletken aygıtlar, hem günlük hayatımızı hem de endüstriyel süreçleri etkileyen ve dönüştüren birçok uygulama ile karşımıza çıkmıştır. Yarıiletken malzemeler, modern teknolojinin temel yapı taşlarından biri olarak, elektronik ve optoelektronik uygulamalarda vazgeçilmez bir öneme sahip olmuştur. Bu malzemelerin elektriksel özelliklerinin çevresel etkenlerle kolayca değiştirilebilmesi, onları yenilikçi cihazların tasarımında kritik bir bileşen hâline getirmiştir. Bilgi çağının hızla gelişmesiyle, daha karmaşık ve yüksek verimlilikle çalışan elektronik sistemlere olan talep artmıştır. Bu durum, yeni nesil yarıiletken malzemelerin geliştirilmesini zaruri hâle getirmiştir (Hoşcan vd., 2010). Ayrıca, yarıiletkenlerin erişilebilirlik ve maliyet etkinliği gibi avantajları, bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak benimsenmesini sağlayarak teknolojik ilerlemeyi hızlandırmıştır.

Hameş ve Eren San (2004), kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanarak cam substratlar üzerinde ince CdO ve CuO₂ filmleri sentezlemiştir. Bu filmlerin optik geçirgenlik özellikleri, oda sıcaklığında ve 400–900 nm dalga boyu aralığında detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan analizler, CdO filmleri için %60–70, CuO₂ filmleri için ise %3–8 oranında bir geçirgenlik göstermiştir. Optik geçirgenlik spektrumlarından hesaplanan band aralığı enerjileri sırasıyla 2.3 eV ve 2.1 eV olarak belirlenmiştir. X-ışını kırınım analizleri, bu filmlerin polikristal yapıda olduğunu ve CdO ile CuO₂ fazlarını içerdiğini doğrulamıştır.

Türhan (2000), tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, VO₂ katkılı TiO₂ filmlerinin optik özellikleri ve bu özelliklerin kaplama yöntemlerine ve parametrelerine bağlı değişimi araştırılmıştır. Bu kapsamda, TiO₂ membranları üzerine farklı molar oranlarda VO₂ eklenerek çeşitli kalınlıklarda filmler üretilmiştir. Filmler, dip kaplama ve spin kaplama yöntemleriyle farklı türdeki substratlar üzerine biriktirilmiştir. 200–1100 nm dalga boyu aralığında yapılan spektrofotometre ölçümleri, filmlerin geçirgenlik değerlerini ortaya koymuştur. Bu verilere dayanarak kırılma indisi hesaplanmış ve bu parametrenin kaplama yöntemi, substrat türü, film kalınlığı ve VO₂ konsantrasyonu gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı, TiO₂ bazlı heteroeklem yapıların temel karakteristik parametrelerinin sıcaklığa bağlı olarak $I-V$ (akım-voltaj) ve $C-V$ (kapasite-voltaj) ölçümleriyle

incelenmesini kapsamıştır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, heteroeklem yapıların sıcaklığa bağlı elektriksel özellikleri detaylı olarak analiz edilmiştir.

Özellikle, sıcaklık artışıyla difüzyon potansiyelindeki değişim, taşıyıcı yoğunluğu, Fermi seviyesi ve toplam kapasitans gibi kritik parametreler $C-V$ ölçümlerinden elde edilmiştir. Bu veriler, heteroeklem yapının işlevselliğini anlamak ve geliştirmek için önemli bilgiler sunmuştur.



KURAMSAL TEMELLER

Yarıiletkenlerin Genel Özellikleri

Bir maddenin elektriksel iletkenlik özelliği, enerji band teorisi çerçevesinde valans ve iletkenlik bantları arasındaki enerji boşluğu (band aralığı) ile doğrudan ilişkilidir. Metallerde, bu bantlar birbirine örtüştüğünden elektronlar serbestçe hareket edebilir ve yüksek bir iletkenlik sağlar. Buna karşılık, yalıtkanlarda band aralığı oldukça geniştir ve elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçiş yapması için genellikle yeterli enerji sağlanamaz. Bu nedenle yalıtkanlar zayıf iletkenlik gösterir. Yarıiletkenler ise metaller ve yalıtkanlar arasında bir konuma sahiptir; valans ve iletkenlik bantları arasındaki enerji boşluğu yalıtkanlara göre daha dardır. Bu özellik yarıiletkenlerin iletkenliklerinin sıcaklık, ışık veya katkılama gibi dış etkenlerle değişebilmesine olanak tanır.

Kittel and McEuen (2018), yarıiletkenlerin genellikle yaklaşık 1 eV civarında bir band aralığına sahip olduğunu, buna karşın yalıtkanlarda bu değerin 6 eV'nin üzerinde olabileceğini ifade etmiştir. Streetman and Banerjee (2000) ise yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki yasak enerji bandı genişliğinin yalıtkanlardan yaklaşık 2 eV daha düşük olduğunu vurgulamıştır. Bu farklılıklar, yarıiletkenlerin elektronik aygıtlarda yaygın bir şekilde kullanılmasındaki temel nedenlerden biridir.

Elektron Geçişleri ve İletkenlik Mekanizması

Yarıiletkenlerde, valans bandından iletkenlik bandına elektron geçişi meydana geldiğinde, valans bandında elektron boşlukları (deşikler) oluşur. Bu durum, yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerinin temelini oluşturur. Dış uyaranlar (ısı, ışık, elektrik alan), valans bandındaki elektronlara enerji sağlayarak iletkenlik bandına geçişlerini teşvik eder. Bu geçişler sonucu hem elektronlar hem dedeşikler, elektrik akımının taşınmasında etkin rol oynar. Metallerde elektrik akımı yalnızca serbest elektronların hareketiyle taşınırken, yarıiletkenlerde çift kutuplu taşıyıcı mekanizması devreye girer. Bu özellik, yarıiletkenlerin elektronik aygıtlarda çok yönlü kullanımını mümkün kılar. Örneğin, silisyumda (Si) valans ve iletkenlik bantları arasındaki enerji boşluğu yaklaşık 1 eV'dir ve bu değer, malzemenin elektriksel özelliklerini doğrudan etkiler (Voon and Willatzen., 2009).

Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri ve Kristal Yapısı

1. **Özdirenç ve İletkenlik Aralığı:** Yarıiletkenlerin özdirenci, $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ile $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ arasında değişir ve bu değer iletkenlerin ($10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 'ye kadar) direncinden daha büyük, ancak yalıtkanların (10^{14} - $10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$) direncinden daha küçüktür.
2. **Mutlak Sıfırda Yalıtkan Davranışı:** Mutlak sıfır sıcaklıkta, yarıiletkenler yalıtkan özellik gösterir.
3. **Sıcaklık ile İletkenlik Artışı:** Yarıiletkenlerin iletkenlikleri sıcaklık arttıkça artar ve özdirençleri düşer.
4. **Ayarlanabilir İletkenlik:** Yarıiletkenlerin iletkenliği artırılabilir, azaltılabilir veya kontrol edilebilir.
5. **Son Yörüngedeki Elektron Sayısı:** VIA grubu elementleri (örneğin, Ge, Si, α -Sn) yarıiletken özellik taşır. Ayrıca, II-VI (CdS, ZnS), III-V (GaAs, InSb, GaP) ve IV-VI (PbTe) gruplarının bileşikler de yarıiletken olarak sınıflandırılır.
6. **Kristal Yapı:** Saf yarıiletkenlerin çoğu elmas kristal yapısında bulunur. Ancak bileşik yarıiletkenler farklı kristal yapılara sahip olabilirler.

Elektronik Uygulamalarda Yarıiletkenlerin Önemi

Yarıiletkenler, metalik karakterin yalıtkanlık ile metaller arasında bir geçiş oluşturduğu özel bir sınıfa aittir. Bu konumlanış, hem elektrik akımını kısmen iletebilme hem de belirli koşullarda iletkenlik özelliğini önemli ölçüde değiştirebilme yeteneği kazandırmıştır. Özellikle silisyum (Si) ve germanyum (Ge) gibi elementler, yarıiletken teknolojisinin temel taşlarını oluşturur ve modern elektronik aygıtların üretiminde vazgeçilmez malzemeler arasında yer alır (Sze and Ng, 2006).

Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması

19.yüzyılın sonları ile 20. yüzyılın başları arasında kristaller üzerinde yapılan deneyler, yarıiletkenlerin temel özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir dönüm noktası olmuştur. Curie kardeşlerin 1880 yılında basınç altındaki kristallerde gerilim oluşumu üzerine yaptığı çalışmalar, piezoelektrik etki olarak bilinen bu olayın ilk adımlarını atmıştır (Curie and Curie, 1880). 20. yüzyıla gelindiğinde ise selenyum gibi yarıiletkenlerin tek yönlü akım geçirme özelliği (Braun, 1874), doğrultucu aygıtların temelini oluşturmuştur. Bu buluşlar, yarıiletkenlerin elektronik devrelerde kullanılma potansiyelini ortaya koymuştur. 1930'larda germanyum aygıtların ve 1948'de ilk transistörün (Bardeen *et al.* 1948) icadıyla yarıiletken teknolojileri çağ atlamıştır. Yarıiletkenler, saf (katkısız) ve katkılı (alaşım) olmak üzere iki

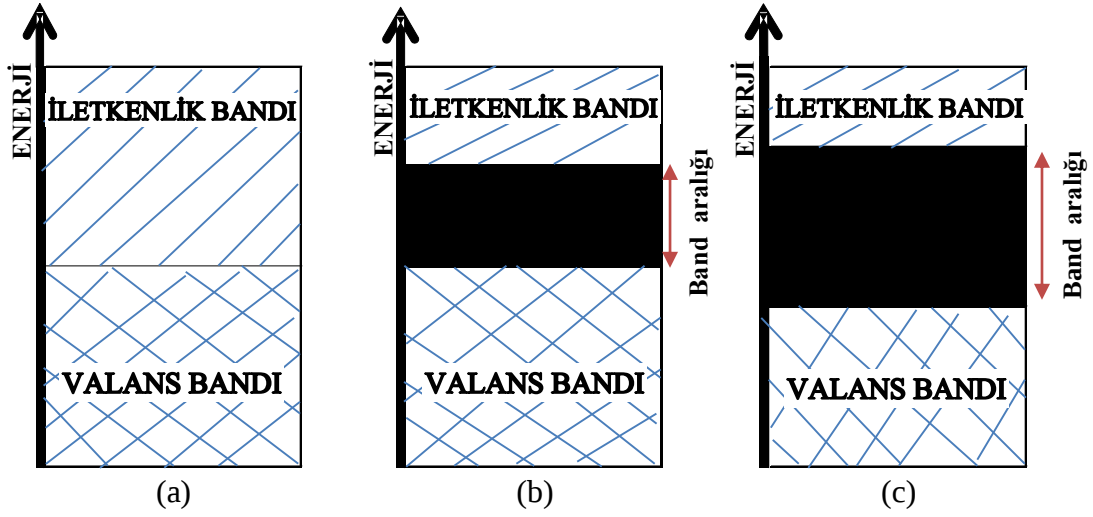
temel sınıfa ayrılmasının yanı sıra, organik ve inorganik bileşiklerden elde edilen yarıiletkenlerde sınıflandırılabilir.

Katkısız yarıiletkenler

Mutlak sıfır sıcaklığında (0 K), bir katının elektron enerji seviyeleri, kuantum mekaniği prensiplerine uygun olarak belirli ve kesikli enerji bantları halinde gruplandırılmaktadır. Bu durumda, valans ve iletkenlik bantları arasında bir enerji boşluğu (band aralığı) bulunmaktadır. Pauli dışlama ilkesi gereği, her enerji seviyesinde en fazla iki elektron bulunabilmektedir. Mutlak sıfırda, elektronlar mümkün olan en düşük enerji seviyelerini almakta ve valans bandı tamamen dolmaktadır. İletkenlik bandı ise tamamen boş kalmaktadır. Bu durum, maddenin yalıtkan özellik gösterdiğini ifade etmektedir.

Yüksek sıcaklıkta yarıiletkenlerin çalışma prensipleri, sıcaklık arttıkça valans bandındaki elektronların yasak enerji bandını aşarak iletkenlik bandına geçmesi ile açıklanmaktadır. Bu süreç, yarıiletken malzemelerde iletkenliğin artmasına neden olmaktadır. Özellikle saf yarıiletkenlerde (Örneğin, Silisyum, Germanyum, Selenyum), sıcaklık ile birlikte hem elektron hem de hol taşıyıcıları oluşmakta ve bunlar elektriksel iletkenliğe katkı sağlamaktadır. Sıcaklık (T) yükseldiğinde, iletkenlik bandındaki elektronların ve valans bandındaki hollerin konsantrasyonu doğrusal olarak artmaktadır. Bu durum, yarıiletkenlerin sıcaklığa bağlı olarak daha iletken hale gelmesinin temelini oluşturmaktadır (Gimenez and Galembeck, 2023; Neamen, 2012).

Katkısız yarıiletkenler, genellikle belirli bir sıcaklık aralığında iletkenlik özelliklerini değiştirmektedir ve bu malzemeler, özellikle elektronik bileşenlerde sıcaklığa duyarlı aygıtlarda kullanılmaktadır. Örneğin, Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge), düşük sıcaklıklarda iyi birer yalıtkan olmalarına rağmen, yüksek sıcaklıklarda iletkenlikleri hızla artmaktadır (Neamen, 2012).



Şekil 1. Bir yarıiletken için içsel iletkenlik için bant şeması.

Şekil 1, enerji bant yapılarının malzeme türlerine göre farklılıklarını ve bu farklılıkların elektrik iletkenlik özelliklerini nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. (a) İletken malzemeler, (b) yarıiletken malzemeler ve (c) yalıtkan malzemeler yer almaktadır. Aşağıda, bu yapıların hangi malzeme türlerine ait olduğunu açıklayan detaylar yer almaktadır:

1. İletken Malzemeler (Örneğin, Metaller):

- İletkenlerde, valans bandı ve iletkenlik bandı arasında önemli bir enerji farkı yoktur. Bu durum, elektronların serbestçe hareket edebilmesine ve dolayısıyla elektrik akımını kolayca iletebilmesine olanak tanır. Bakır, altın ve gümüş gibi metaller bu kategoriye girer (Sze and Ng, 2006; Kittel and McEuen, 2018). Metaller, düşük dirençleri sayesinde elektrik akımını etkin bir şekilde iletebilir.

2. Yarıiletken Malzemeler (Örneğin, Silisyum (Si), Germanyum (Ge):

- Yarıiletkenler, valans bandı ile iletkenlik bandı arasında orta büyüklükte bir yasak enerji aralığı (band aralığı) barındırır. Bu yasak bant, sıcaklık artışı veya dış enerji ile aşılabılır. Silisyum ve germanyum, modern elektronik aygıtların temel bileşenleridir ve düşük sıcaklıklarda yalıtkan gibi davranabilirken, sıcaklık arttıkça iletkenlik kazanmaktadır (Streetman and Banerjee, 2000; Neamen, 2012). Bu özellik, yarıiletkenlerin transistörlerde ve entegre devrelerde kullanılmasını sağlar.

3. Yalıtkan Malzemeler (Örneğin, Cam, Seramik):

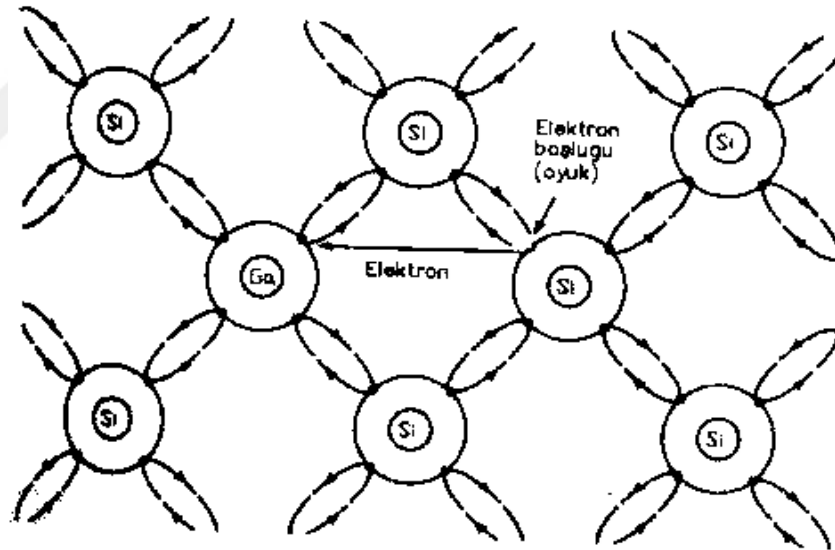
- Yalıtkan malzemeler, valans bandı ile iletkenlik bandı arasında geniş bir yasak enerji aralığı (band aralığı) bulunur. Bu band aralığının geniş olması elektronların iletkenlik bandına geçmesini zorlaştırır, bu nedenle yalıtkan malzemeler elektrik akımını iletmez. Cam, seramik ve kauçuk gibi materyaller bu gruptadır (Kittel and

McEuen 2018; Zhang *et al.* 2020). Yalıtkanların temel özelliği, elektriksel iletkenliğin olmamasıdır.

Bu yapıların analizi, mühendislik ve fizik alanlarında malzeme seçiminde kritik öneme sahiptir. Her bir malzeme türü, belirli uygulama alanları için uygunluk göstermektedir, bu da enerji bant yapılarının önemli bir rol oynadığını vurgular.

Katkılı yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri, belirli oranlarda yabancı atomların (katkılar) kristal yapısına dâhil edilmesiyle önemli ölçüde değiştirilebilir. Periyodik cetvelde IV. grupta yer alan silisyum (Si) veya germanyum (Ge) gibi yarıiletkenlere, III. veya V. grup elementleri katkılanarak n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler elde edilir. Üç değerlikli bir III. grup elementi (B, Al, Ga veya In) silisyum veya germanyum kristal kafesine yerleştiğinde, kovalent bağların tamamlanması için asıl kristal atomlarından elektron alarak bir elektron eksikliği oluşur. Bu elektron eksikliği, pozitif yüklü bir boşluk (hol) olarak adlandırılır ve p-tipi yarıiletkenlerin temel taşıyıcılarıdır (Streetman and Banerjee, 2000).



Şekil 2. Silisyum kristalinde galyum safsızlık (kirlilik) atomu (Dikici, 1993).

Şekil 2’de görüldüğü üzere Ga atomu, dört değerlik elektronuyla Si atomlarıyla kovalent bağ kurmuştur. Ancak bağlardan biri eksik elektronla tamamlanmıştır; bu durum, bir elektron boşluğu (hol) oluşturarak pozitif yük taşıyıcılarının iletimini sağlar.

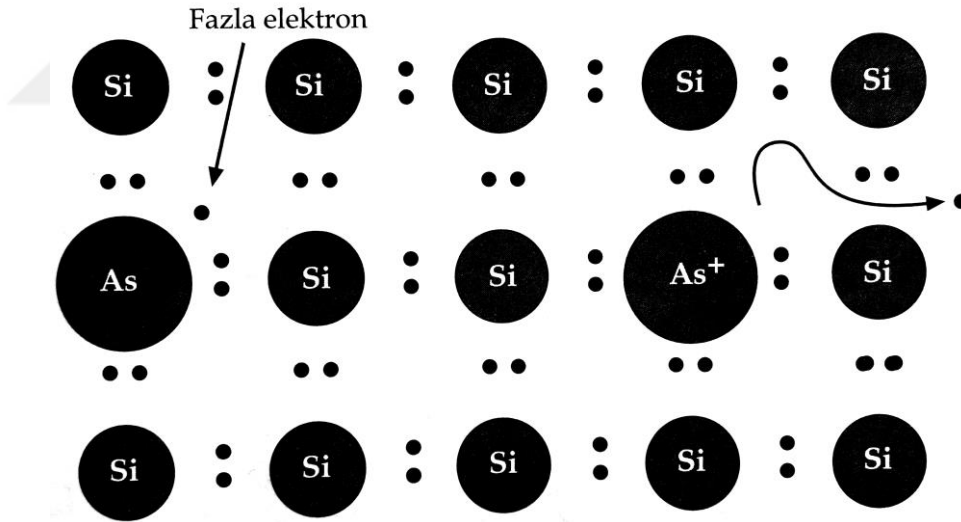
Yarıiletken kristallerde, donör atom olarak adlandırılan katkı maddeleri, kristal kafesine entegre edilerek ana atom türüne bir elektron verirler. Bu elektron transferi, yarıiletken materyalin elektriksel iletkenlik özelliğini belirgin bir şekilde modifiye eder. Beşinci grup elementleri (antimon, fosfor, arsenik gibi) sıklıkla dördüncü grup yarıiletkenlerine (germanyum veya silisyum) katkılanır. Sonuç olarak, yarıiletken yapısında kovalent bağlarda bir elektron

fazlalığı meydana gelir. Bu fazla elektron, serbest taşıyıcı olarak hareket ederek yarıiletkenin iletkenliğini yükseltir (Dikici, 1993).

Donör atom katkılanması, yarıiletken materyallerin elektronik özelliklerini belirgin şekilde modifiye eden bir işlemdir. Bu katkılama sonucunda yarıiletken, temel olarak elektron taşıyıcılarına dayalı bir iletkenlik karakteri kazanır. Diğer bir deyişle, yarıiletkenin iletkenlik tipi, elektron tipi (n-tipi) olarak sınıflandırılır.

Donör atomların kristal kafese dahil edilmesi, yarıiletkenin iletkenlik seviyesinde belirgin bir artışa neden olur. Katkılama yoğunluğundaki artış, doğrudan iletkenlik değerindeki yükselme ile ilişkilidir. Bu durum, donör atomların yarıiletkenin enerji band yapısında oluşturduğu ek enerji seviyeleri sayesinde mümkün olmaktadır.

Donör atom katkılanmasının bir diğer önemli etkisi ise yarıiletkenin enerji band aralığının daralmasıdır. Band aralığı, bir yarıiletkenin iletkenlik ve değerlik bantları arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır. Bu aralığın daralması, yarıiletkenin daha düşük enerjili uyarılarla iletken hale gelmesini sağlar. Sonuç olarak, donör katkılı yarıiletkenler, daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olurlar.



Şekil 3. Silisyum kristalinde arsenik safsızlık (kirlilik) atomu (Aydoğan, 2014).

Şekil 3, yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik özelliklerini anlamak için önemli bir kaynak sunar. Arsenik, periyodik cetvelin V. grubunda yer aldığından, üç değerlikli bir atom olarak silisyum kafesine yerleştiğinde, kovalent bağların tamamlanması için bir serbest elektron bırakır ve kristalde fazla bir elektronun oluşmasına sebep olur. Şekil 3'te bu serbest elektron, "fazla elektron" olarak işaretlenmiş ve sağa doğru hareket ettiğini göstermektedir (Aydoğan, 2014). Böylece, arsenik katkısı sayesinde n-tipi yarıiletkenler oluşturulmuş olur ve bu yapı,

elektrik akışını artırarak iletkenlik özelliklerini geliştirir. Serbest kalan bu elektron yarıiletken kristallerinde katkı maddelerinin etkisini açıklamaktadır.

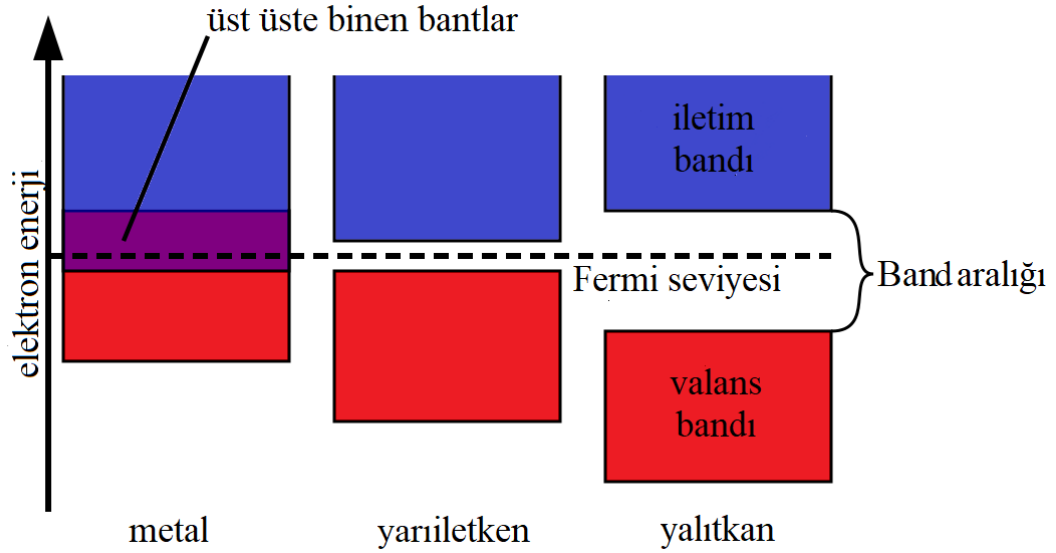
Silisyum için donör atomlarının örnekleri arasında antimon (Sb), fosfor (P), arsenik (As), selenyum (Se) ve tellür (Te) bulunmaktadır. Bu elementler, silisyumun iletkenliğini artırmak amacıyla yarıiletken malzemeye katkılanır (Sze and Ng, 2006).

Donör atomların katkılanması yarıiletkenlerin birçok uygulamasında önemli rol oynar. Donör atomlar ve katkılanma etkisi, yarıiletken fiziğinin temel kavramlarından biridir ve elektronik aygıtların geliştirilmesinde önemli rol oynar. Bu uygulamalardan bazıları transistörler, aygıtlar, güneş pilleri, LED'ler ve lazerlerdir (Neamen, 2012).

Yarıiletkenlerde Bant Geçişleri

Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlik spektrumunda iletken ve yalıtkan maddeler arasında konumlanan, atomik yapılarının sunduğu özgün elektronik özellikler sergileyen bir malzeme sınıfıdır. Bu maddelerdeki elektronlar, enerji durumlarına göre ayrıışan, valans ve iletkenlik bantları adı verilen kuantum mekaniksel enerji seviyelerinde yer alırlar. Valans bandı, elektronların atomlara bağlı olduğu en düşük enerjili durumları temsil eder. İletkenlik bandı ise elektronların serbestçe hareket edebildiği, dolayısıyla elektrik akımını taşıyabileceği daha yüksek enerji seviyeleridir. Bu iki bant arasındaki enerji farkı band aralığı veya yasak aralık olarak adlandırılır ve E_g ile gösterilir. Band aralığının genişliği, yarıiletkenlerin temel özelliklerini belirler.(Sze *et al.* 2021)

Katı hâl fiziğinde bir malzemenin elektriksel iletkenliği, enerji bant yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Metallerde, valans bandı ile iletkenlik bandı örtüştüğünden, elektronlar serbestçe hareket edebilir ve yüksek iletkenlik sağlanır. Yalıtkanlarda ise bu iki bant arasında geniş bir enerji boşluğu (band aralığı) olduğundan, elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçmesi zordur, bu da düşük iletkenliğe neden olur. Yarıiletkenler bant yapısı açısından yalıtkanlara göre daha dar band aralığına sahiptir. Bu durum, yarıiletkenlerde termal enerji, ışık veya katkı maddeleri gibi dış etkenlerle elektronların iletkenlik bandına geçmesi ile iletkenliğinin kolayca değişebilmesine olanak tanır. Fermi seviyesi (E_f) 0 K sıcaklığında elektronun maksimum enerjisini tanımlar ve yasak enerji aralığında yer alır. Yasak enerji aralığında yer almasına rağmen %50 ihtimaliyetle elektronlarla dolu enerji seviyesi olarak da tanımlanır. Metallerde Fermi seviyesi, enerji bandının içinde kalırken yarıiletkenlerde ve yalıtkanlarda yasak enerji aralığında yer alır (Aydoğan, 2014). Bu üç tür malzeme için enerji-band diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Metaller, yarıiletkenler ve yalıtkanlar için basit enerji-band diyagramı (Abd Ali *et al.* 2017).

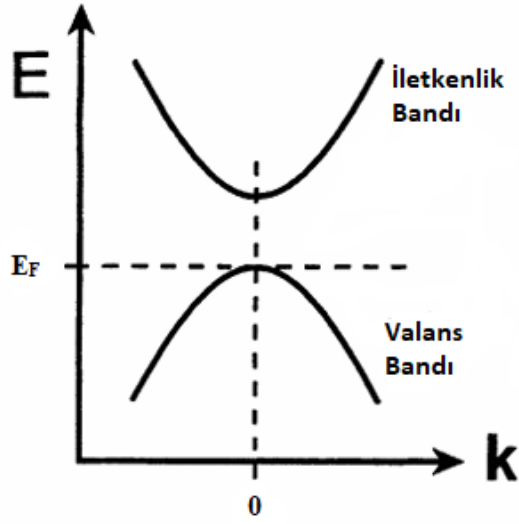
Yarıiletkenlerin Bant Yapısı ve İletkenlik Özellikleri

Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği, harici enerji kaynaklarına (Örneğin ısı veya ışık) maruz kaldıklarında artar. Bu enerji, valans bandındaki elektronların koparak iletkenlik bandına geçiş yapmasını sağlar. Elektronların geçişiyle birlikte, valans bandında elektron boşlukları (deşikler) oluşur ve bu çift kutuplu taşıyıcılar, elektrik akımını taşır.

Band Aralığı Türleri

Doğrudan band aralığı

Doğrudan band aralıklı malzemeler bir yarıiletkenin elektronik ve optik davranışlarını açıklar. Şekil 5’te gösterildiği gibi valans bandındaki maksimum enerji ve iletkenlik bandındaki minimum enerji aynı dalga vektöründe ($k = 0$) yer alır. Elektronlar, fonon etkileşimine gerek duymadan doğrudan uyarılabilir. Bu özellik, yüksek verimli optik geçişlere olanak tanır. (Örnek GaAs, InP)

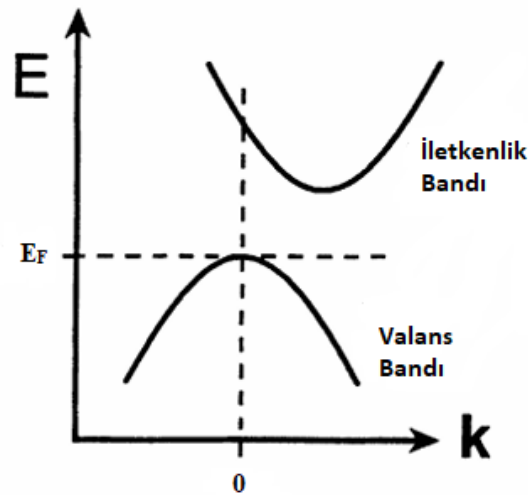


Şekil 5. Doğrudan band aralığı.

Bu tür bir yarıiletkende bir elektron momentum değişimine ihtiyaç duymadan enerji kazanabilir ve iletkenlik bandından valans bandına atlayabilir. Bu atlamadaki enerji kaybı $h\nu=E_g$ enerjisine sahip bir foton formunda yayınlanabilir. Bu özellik, optoelektronik aygıtlarda (Örneğin LED ve lazer diyotlarda) verimli ışık emisyonunu mümkün kılmaktadır.

Dolaylı band aralığı

Valans bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumu farklı (k) dalga vektörlerinde yer alır. Elektronların uyarılması için ek bir momentum transferine ihtiyaç duyulur ve bu süreç fonon etkileşimini gerektirir. Bu nedenle iletkenlik bandından valans bandına direkt geçiş ihtimaliyetini oldukça azaltır (Örneğin Si, Ge).



Şekil 6. Dolaylı band aralığı.

Şekil 6’da görüldüğü üzere enerji, en yüksek valans bandındaki maksimum ve en düşük iletkenlik bandındaki minimum arasında dolaylı bir şekilde değişir.

Özdirenç ve İletkenlik Özellikleri

Yarıiletkenlerin özdirenci, iletkenler ve yalıtkanlar arasında yer alır ($10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}$ ile $10^9\Omega\cdot\text{cm}$ aralığında). Sıcaklık arttıkça yarıiletkenlerin iletkenliği artar, özdirenci ise azalır. Yarıiletkenlerin iletkenliği katkılama (doping) ile artırılabilir, azaltılabilir ya da ayarlanabilir.

Fotovoltaik Etki ve Eksitonlar

Yarıiletkenlerin bant geçişleri, fotovoltaik etki gibi birçok önemli fiziksel olayın temelini oluşturur. Fotovoltaik etki, ışığın enerjisinin yarıiletken bir malzeme tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanır. Bu dönüşüm, malzemenin band aralığı ile doğrudan ilişkilidir.

Bir başka önemli kavram ise eksitondur. Eksiton, valans bandından koparak iletkenlik bandına geçen bir elektron ile onun geride bıraktığı hol (elektron boşluğu) arasındaki Coulomb etkileşimi sonucu oluşur. Eksitonlar, yarıiletkenlerin optik ve elektriksel özelliklerini etkileyen önemli kuantum mekaniksel yapılardır.

Kristal Yapı ve Element Türleri

Yarıiletkenlerin çoğu elmas kristal yapısına sahiptir. Örneğin, IVA grubu elementlerinden Si ve Ge yaygın olarak kullanılan saf (katkısız) yarıiletkenlerdir. Bunun yanı sıra bileşik yarıiletkenler de geniş bir uygulama alanına sahiptir:

- III-V Grubu Bileşikler: GaAs, GaP, InSb
- II-VI Grubu Bileşikler: CdS, ZnS
- IV-VI Grubu Bileşikler: PbTe

Yarıiletkenlerin enerji bant yapıları, bu malzemelerin elektriksel özelliklerini ve kullanım alanlarını belirlemede kritik bir rol oynar. Özellikle optoelektronik ve fotovoltaik aygıtlarda bu özellikler geniş çapta değerlendirilmektedir.

Yarıiletkenlerin İletkenlik Tipleri ve Kullanım Alanları

Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlik açısından metaller ve yalıtkanlar arasında bir konumda bulunur ve bu özellikleri sayesinde geniş bir kullanım yelpazesi sunar. Yarıiletkenlerin iletkenlik tipi, içerdikleri katkı maddelerine ve bu katkıların atomik yapıya etkilerine göre belirlenir.

Yarıiletkenlerin iletkenlik tipleri

n-tipi yarıiletkenler

n-tipi yarıiletkenler, donör (verici) atomlarla katkılanmış yarıiletkenlerdir. Bu atomlar, yarıiletken kristal yapısında serbest elektron yoğunluğunu artırır. Sonuç olarak, negatif yük taşıyıcılar (elektronlar) çoğunluktadır. Bu tip yarıiletkenler, özellikle elektronik devrelerde yüksek hızlı elektrik iletimi sağlamak amacıyla kullanılır.

p-tipi yarıiletkenler

p-tipi yarıiletkenler, akseptör (alıcı) atomlarla katkılanmış yarıiletkenlerdir. Bu atomlar, yarıiletken yapısında elektron eksiklikleri (deşikler) oluşturarak pozitif yük taşıyıcıların (hollerin) çoğunlukta olmasını sağlar. P-tipi yarıiletkenler, genellikle n-tipi yarıiletkenlerle birlikte kullanılarak p-n eklemleri oluşturur ve bu yapıların elektriksel özellikleri, çok sayıda elektronik cihazın temelini oluşturur.

p-n Eklemler

Yarıiletken fiziğinde, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin birleşmesiyle p-n eklemleri oluşur. Bu eklemler, yarıiletken malzemelerin farklı bölgelerinde çoğunluk taşıyıcıların bir araya gelmesiyle karakterize edilir. Diyotlar, transistörler ve güneş pilleri gibi aygıtların temel çalışma prensibini oluştururlar. Bu yapılar, doğru akımın kontrol edilmesi, gerilim düzenlenmesi ve enerji dönüşümü gibi kritik işlevlere olanak tanırırlar.

Yarıiletkenlerin Bazı Kullanım Alanları

Yarıiletkenlerin elektriksel, optik ve termal özellikleri, onları modern teknolojinin temel yapı taşlarından biri haline getirmiştir. Bilgisayarlar, cep telefonları, güneş panelleri ve LED'ler olmak üzere çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle silisyum tabanlı yarıiletkenler, mikroçip ve entegre devre üretiminde kritik bir role sahiptir (Sze and Ng, 2006). Ayrıca yarıiletken teknolojisi, fotovoltaiik hücrelerde enerji dönüşüm verimliliğini artırmak amacıyla güneş enerjisi sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Green, 2006). Güç elektroniğinde ise, yarıiletken tabanlı transistörler (örneğin MOSFET ve IGBT) yüksek verimlilik ve hızlı anahtarlama özellikleri sayesinde elektrikli araçlar, motor kontrolü ve endüstriyel otomasyon gibi alanlarda tercih edilmektedir (Blaabjerg *et al.*, 2004). Yarıiletkenlerin başlıca kullanım alanları şunlardır:

Transistörler

Günümüz teknolojisinde, bilgisayarlardan cep telefonlarına kadar birçok cihazda milyarlarca transistör bulunmaktadır. Transistörler, elektronik devrelerin temel bileşenleridir. Yarıiletken malzemelerden yapılan bu cihazlar, sinyalleri yükseltme, anahtarlama ve işleme gibi kritik işlevleri yerine getirirler. Mikroişlemcilerin ve diğer entegre devrelerin geliştirilmesi, yarıiletken teknolojisindeki ilerlemelerle mümkün olmuştur.

Diyotlar

Diyotlar, elektrik akımını yalnızca tek bir yönde geçiren pasif elektronik bileşenlerdir. Doğrultucu devrelerde, gerilim regülatörlerinde ve sinyal ayırıcı devrelerde yaygın olarak yarıiletken diyotlar kullanılır. Işığa duyarlı diyotlar (fotodiyotlar), ışık algılama ve optik iletişim gibi uygulamalarda kritik bir rol oynar.

Güneş pilleri

Güneş pilleri, yarıiletken malzemeler kullanılarak fotovoltaiik etki ile güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürler. Silisyum gibi yarıiletken malzemelerin kullanımı, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmış ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Enerji üretimi için sürdürülebilir ve çevre dostu bir çözüm sunar.

LED'ler

Işık yayan diyotlar (LED'ler), elektrik enerjisini doğrudan görülebilir ışığa dönüştüren yarıiletken aygıtlardır. LED'ler yüksek enerji verimliliği, uzun ömür ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlarıyla aydınlatma, ekran teknolojileri ve iletişim uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, LED'ler farklı renklerde ışık üretebilme yetenekleriyle estetik tasarımlarda da tercih edilir.

Lazerler

Yarıiletken lazerler, yüksek derecede koherent ve monokromatik ışık üretir. Bu aygıtlar optik iletişimden tıbbi cihazlara, endüstriyel kesim ve kaynak işlemlerinden bilimsel araştırmalara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır. Yarıiletken lazerlerin kompakt yapısı ve enerji verimliliği, modern teknolojilerdeki önemlerini artırmaktadır.

Sensörler ve Dedektörler

Sıcaklık, basınç, ışık ve manyetik alan gibi çevresel değişiklikleri algılayan sensörlerin üretiminde yarıiletken teknolojisinden yararlanılır. Örneğin, fotodedektörler ve termistörler, tıbbi cihazlardan otomotiv sektörüne kadar birçok alanda hayati rol oynar. Yarıiletken

sensörler, hassasiyetleri ve hızlı yanıt süreleri sayesinde endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda tercih edilmektedir.

Yarıiletkenlerin iletkenlik tipleri ve kullanım alanları, modern teknolojinin temel taşlarını oluşturur. Bu malzemelerin benzersiz özellikleri, enerji dönüşümünden iletişime, tıbbi cihazlardan endüstriyel uygulamalara kadar geniş bir yelpazede yenilikçi çözümler sunmaktadır. Gelişen yarıiletken teknolojisi, gelecekte daha verimli ve sürdürülebilir elektronik sistemlerin önünü açmaya devam edecektir.

Metal-Yarıiletken Kontaklar

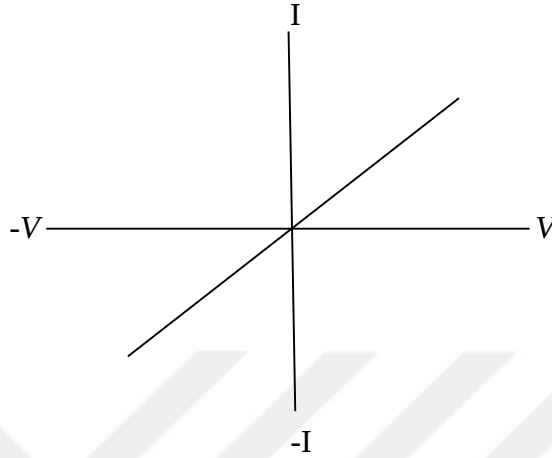
Metal-yarıiletken heterojen birleşimleri, farklı iletkenlik özelliklerine sahip iki maddenin arayüzeyinde oluşan ve elektron transferi ile karakterize edilen yapısal düzensizliklerdir. Bu heterojen yapılar, arayüzeyde yük taşıyıcı yoğunluğunun ve enerji seviyelerinin yeniden dağılımına yol açarak, klasik iletkenlik teorisinden sapan özgün elektriksel özellikler sergilerler. Özellikle Fermi seviyelerinin (E_f) eşitlenmesi amacıyla gerçekleşen yük transferi, arayüzeyde bir potansiyel bariyerin oluşmasına neden olur. Bu potansiyel bariyerin yüksekliği ve genişliği, kullanılan metal ve yarıiletkenin türüne, kristal yapılarına ve arayüzey durumlarına bağlı olarak değişir. Bu farklılıklar, metal-yarıiletken kontaklarının, doğrultucu (Schottky) ve omik olmak üzere iki temel kategoride sınıflandırılmasına olanak sağlar (Türüt, 2020). Kontak türü; kullanılan metalin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin doping seviyesi ve temas yüzeyinin fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişir (Taur and Ning, 2013). Bu yapıların doğru şekilde tasarlanması, özellikle diyotlar, transistörler ve güneş hücreleri gibi aygıtlarda verimlilik açısından büyük önem taşır (Rhoderick and Williams, 1988).

Omik kontak

Omik kontaklar, düşük dirençleri ile transistörler ve diğer anahtarlama elemanlarında hızlı anahtarlama sağlarlar. Omik kontaklar, metal ve yarıiletken arasındaki direnci minimum seviyede tutarak hızlı anahtarlama uygulamalarına olanak sağlar. Omik kontak, ideal bir metal-yarıiletken arayüzü olarak kabul edilmekte olup, yük taşıyıcılarının (elektron ve hol) metal ile yarıiletken arasında enerji bariyerine takılmadan serbestçe hareket etmesini sağlar. Bu tür kontaklar genellikle metal ile n-tipi yarıiletken veya metal-alaşımlanmış n-tipi yarıiletken arasında oluşur ve elektriksel devrelerde düşük dirençli bir bağlantı sağlamak amacıyla tercih edilir (Bard *et al.* 2022).

Omik kontak, bir metal ile yarıiletken arasındaki temasta akımın her iki yönde serbestçe geçmesine olanak sağlayan doğrultucu olmayan bir kontak türüdür. Bu tür kontaklar, cihazın içindeki

farklı bölgeler arasında minimum dirençle elektrik iletimi sağlamak için kullanılır. Kontakın akım-gerilim karakteristikleri Ohm yasasına ($V = I.R$) uyar. Schottky bariyeri oluşmasını engellemek ve taşıyıcıların serbestçe geçmesini sağlamak için kontak direnci mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır (Aydoğan, 2014). Şekil 7’de omik kontakın I - V grafiği verilmiştir. Simetrik ve lineerdir.



Şekil 7. Omik kontak I - V grafiği.

Schottky kontak

Schottky kontaktarı, doğrultucu devrelerde bir yönde akım geçişine izin verip diğer yönde engelleyerek kullanılır ve aynı zamanda varaktörlerde kapasitansın voltaja bağlı olarak değişimini sağlar (Korucu vd., 2013). Ayrıca, Schottky kontaktarı mikrodalga sinyallerini karıştırmak ve dedekte etmek için mikrodalga karıştırıcı ve dedektörlerde kullanılabilir. Schottky kontaktarı metal ve yarıiletken arasında bir engel oluşturarak doğrultucu ve varaktör gibi aygıtlarda yer alır (Özdemir vd., 2003). Metal ile yarıiletken arasında yük taşıyıcılarının geçişini engelleyen bir potansiyel bariyeri olduğu heterojen bir yapıdır. Bu bariyer, yarıiletken tarafında yük taşıyıcıların tükendiği bir bölge (tükenim bölgesi) oluşturur. Schottky bariyerleri, uygulanan gerilimin polaritesine göre farklı elektriksel özellikler sergilerler. Ters yönde uygulanan gerilimde bariyer artar ve akım akışı neredeyse tamamen engellenirken, ileri yönde uygulanan gerilimde bariyer azalır ve akım akışı kolaylaşır. Bu aygıt benzeri davranış, Schottky bariyerlerinin doğrultucu olarak kullanılmasını sağlar (Tung *et al.* 1992).

Aygıt Üretimi

Film kaplama işlemi için silisyum (Si) tabanının hazırlanması, yarıiletken üretimi ve mikroelektronik alanında kritik bir adımdır. İlk olarak, silisyum tabanı, yüzeydeki toz ve kirlerden arındırmak için mekanik temizleme ve ardından HCl, H₂O₂ ve NH₄OH karışımı gibi kimyasal temizleme yöntemleriyle yüzeydeki organik kalıntıları ve oksitleri giderilerek

temizlenir (Sze and Ng, 2006; Neamen, 2012). Sonrasında, yüzeydeki silisyum oksidi tabakasını kaldırmak için hidrojen florür (HF) çözeltisi kullanılır (Streetman and Banerjee, 2000). Yüzeyin pürüzsüzlüğünü artırmak amacıyla mekanik veya kimyasal planya işlemleri yapılabilir; gerekirse aşındırma işlemi uygulanarak yüzeydeki mikroskobik çukurlar ve yükseklik farkları giderilir (Wolf and Tauber, 2000). Kaplama öncesinde, yüzeyin özelliklerini geliştirmek için modifikasyonlar yapılabilir. Yüzeyin temizliği ve düzgünlüğü test edilerek, kalıntıların varlığı hakkında bilgi edinilir. Son aşamada, hazırlanan silisyum tabanının üzerine film kaplama işlemi, Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) veya Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Kaplama yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

Kimyasal buhar biriktirme (CVD)

Yarıiletken ve diğer ince film uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir kaplama tekniğidir. Bu yöntemde, gaz fazındaki reaktanlar bir yüzeye kimyasal reaksiyon yoluyla adsorbe edilir ve ince bir film oluşturulur. CVD süreci genellikle yüksek sıcaklık ve düşük basınç altında gerçekleştirilir; bu da filmin homojen ve yüksek saflıkta olmasını sağlar. Reaktör içinde, gaz reaktanları yüzeye çarparak yüzeyde kimyasal reaksiyonlara neden olur ve bu süreçle gazların parçalanması sonucu oluşturulan katı malzeme, yüzeyde birikir. CVD yüksek verimlilik, iyi kontrol edilebilirlik ve karmaşık geometrilere kaplama yapabilme yeteneği gibi avantajları nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilir. Ayrıca, CVD ile üretilen filmler, yarıiletken aygıtlar, kaplama malzemeleri ve optoelektronik bileşenlerde kritik bir öneme sahiptir (Sze and Ng, 2006; Neamen, 2012).

Fiziksel buhar biriktirme (PVD)

İnce film kaplamada yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. PVD sürecinde, bir malzeme katı halden buhar fazına geçirilir ve daha sonra buharlaştırılan malzeme, vakum ortamında hedef yüzeyde biriktirilir. Bu yöntem, özellikle metalik kaplamalar, optik ince filmler ve yarıiletken aygıtların üretiminde kullanılır. PVD'nin avantajları arasında yüksek saflık, iyi yapışma ve homojen kaplama elde etme özellikleri yer alır. Ayrıca, PVD yöntemi çevresel olarak daha temiz ve kontrollü süreçler sunar. Bu, özellikle mikroelektronik, optik ve koruyucu kaplama uygulamalarında tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir (Mattox, 2010).

Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD)

Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD), ince film kaplama yöntemlerinden biridir ve gaz fazındaki reaktanların plazma ortamında parçalanarak yüzeyde malzeme biriktirilmesi prensibine dayanır. Bu süreç, düşük sıcaklıklarda çalışabilme yeteneği sayesinde, sıcaklığa duyarlı alt tabakalar üzerinde ince ve homojen filmler elde etmeyi mümkün kılar.

PECVD ile elde edilen filmler, genellikle dielektrik ve organik kaplamalar için kullanılır ve yüksek saflık ile iyi mekanik özellikler sunar. Plazma oluşturma süreci, film kalitesini artırır ve moleküler düzeyde kontrol sağlar; bu da yarıiletken ve optoelektronik uygulamalarında büyük avantajlar sağlar. Bu yöntem, mikroelektronik, fotovoltaiik sistemler ve diğer yüksek teknoloji uygulamaları için yaygın olarak tercih edilmektedir (Hamedani *et al.* 2016).

Elektrokimyasal kaplama yöntemi (Elektrodepozisyon)

Elektrokimyasal kaplama yöntemi, bir elektrolit çözeltisi içinde elektrik akımı kullanarak yüzey üzerine malzeme biriktirme işlemi olarak tanımlanabilir. Bu yöntemde, kaplanacak yüzey bir elektrot olarak kullanılır ve elektrolit çözeltisi içindeki metal iyonları, uygulanan elektrik akımı sayesinde yüzeye doğru çekilir. Metal iyonları, yüzeyde çökelerek istenen kalınlıkta ince bir film oluşturur. Elektrodepozisyon, düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi yüksek kontrol sağlayabilmesi ve karmaşık yüzey şekillerine kaplama yapabilmesi gibi avantajlara sahiptir. Bu teknik, özellikle yarıiletken ve mikroelektronik alanında, metal kaplama uygulamalarında ve elektrokatalizör üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Schlesinger and Paunovic, 2010).

Sol-jel yöntemi

Geniş bir kullanım alanına sahip olan ıslak kimyasal bir malzeme üretim tekniğidir ve seramikler, kaplamalar, katalizörler, optik malzemeler, yakıt hücreleri ve biyomalzemeler gibi birçok alanda uygulanmaktadır. Bu yöntem, metal alkoksitler veya metal tuzları gibi başlangıç malzemelerinin bir solvent ile karıştırılmasıyla başlar. Ardından su ve bir katalizör eklenerek, hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonları başlatılır ve kolloidal bir süspansiyon olan sol oluşur. Süreç ilerledikçe bu sol, ağ benzeri bir yapı oluşturan jele dönüşür. Jel, kurutulup kalsine edilerek nihai katı malzeme elde edilir. Sol-Jel yöntemi, düşük işlem sıcaklıklarında yüksek saflıkta ve homojen nanomalzemeler üretme yeteneği sunarken, malzeme bilimi ve mühendisliği alanında yeni uygulama alanlarının keşfine olanak tanıyan çok yönlü bir tekniktir (Toygun vd., 2013).

Literatürde TiO_2 içinde bu tekniğin kullanıldığı çok sayıda çalışma örneği vardır. Örneğin Tıgılı (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sol-jel yöntemi kullanılarak saf TiO_2 ve ZrO_2-TiO_2 karışımlarından ince filmler sentezlenmiş ve karakterize edilmiştir. Farklı hacimsel konsantrasyonlarda ve katman sayılarında hazırlanan filmler üzerinde, üretim yöntemlerinin filmlerin özelliklerine etkisi incelenmiştir. Döndürerek kaplama ve daldırarak kaplama yöntemleri ile elde edilen, benzer kalınlıklara sahip ZrO_2-TiO_2 filmlerinin sabitlerinin, ZrO_2 konsantrasyonundaki artışla azaldığı belirlenmiştir. Bu bulgular, film sabitlerinin kaplama

tekniki, film kalınlığı ve bileşimden etkilendiğini göstermektedir. Çalışma, hedeflenen uygulamalarda istenen özelliklere sahip filmlerin üretimi için bu parametrelerin optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

Döndürerek kaplama (Spin coating)

Döndürerek kaplama yöntemi, ince filmler üretiminde yaygın olarak kullanılan basit ve kullanımı kolay bir tekniktir. Bu yöntemde, bir çözelti damlası temizlenmiş düz bir altlığın merkezine yerleştirilir ve altlık yüksek hızda döndürülerek santrifüj kuvvetiyle çözelti altlığın yüzeyine eşit şekilde yayılır, fazla çözelti kenarlardan dışarı atılır ve ince bir film elde edilir. Elektronik, optik ve biyomedikal gibi birçok farklı alanda kullanılan bu yöntem, homojen ve ince filmler üretebilmesi, çeşitli malzemelere uygulanabilirliği, maliyet açısından uygun olması ve tekrarlanabilirliği gibi avantajlar sunar. Ancak, küçük alanlarla sınırlı olması, kalın film üretimine uygun olmaması, bazı malzemeler için çözünürlük sorunları yaratabilmesi ve dönme hızı ile süresi gibi parametrelerin hassas kontrol gerektirmesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu yöntemin çalışma prensibi, öncelikle kaplanacak malzemenin homojen bir çözelti haline getirilmesi, altlığın temizlenmesi ve ardından çözeltiyi altlığın merkezine damlatarak altlığı yüksek hızda döndürüp fazla çözeltinin dışarı atılması ve kurutma işlemiyle sonlanır. Yöntemde kullanılan başlıca parametreler arasında dönme hızı, süresi, çözelti viskozitesi ve çözelti konsantrasyonu bulunur; dönme hızı arttıkça film incelirken, uzun dönme süresi, yüksek viskozite ve yüksek konsantrasyon daha kalın film oluşumuna yol açar (Çalığülü vd., 2021).

Daldırarak kaplama (Dip coating)

Daldırarak kaplama (dip coating) yöntemi, bir yüzeyin sıvı bir kaplama çözeltisine daldırılması ve daha sonra yavaşça çıkarılması ile ince bir film oluşturma işlemini içerir. Bu yöntem, kaplama malzemesinin yüzey üzerine homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için kullanılır. İlk olarak, yüzey hazırlığı yapılır ve istenilen yüzey özelliklerine ulaşması sağlanır. Daha sonra, yüzey kaplama çözeltisine daldırılır ve dışarı çekilirken, çözelti yüzeyden akarken istenen kalınlıkta kaplama oluşur. Yüzeydeki kaplama kalınlığı, daldırma süresi, hız ve kaplama çözeltisinin viskozitesi gibi faktörlerle kontrol edilebilir. Daldırarak kaplama, geniş yüzey alanlarına kaplama yapma yeteneği ve düşük maliyetli olma avantajları ile çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Bu yöntem, özellikle optik, elektronik ve kaplama malzemeleri gibi alanlarda yaygındır (Brinker, 2013).

Mikroöçekli kaplama (Microscale coating)

Mikroöçekli Kaplama (microscale coating), nano ve mikro düzeyde ince film kaplama işlemlerini içeren bir yöntemdir. Bu teknik, genellikle mikro yapılar ve bileşenler üzerinde hassas kaplamalar yapmak için kullanılır. Mikroöçekli kaplama, çeşitli malzemelerin (metal, dielektrik veya polimer gibi) bir yüzeye uygulanması amacıyla özel ekipmanlar ve teknikler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu süreç, kalınlık kontrolü, yüzey düzgünlüğü ve malzeme homojenliği gibi parametreleri optimize etmek için çok önemlidir. Özellikle mikroelektronik ve biyomedikal uygulamalarda, ince film kaplamalarının özellikleri, aygıtların performansını ve güvenilirliğini doğrudan etkiler (Lei *et al.* 2018).

Floresan kaplama

Floresan kaplama, yüzeylerin belirli özelliklerini iyileştirmek veya optik uygulamalar için özel bir işlev kazandırmak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu işlemde, floresan özelliklere sahip malzemeler yüzeylere ince bir film halinde kaplanır. Floresan kaplamalar, genellikle polimer bazlı bileşenler veya inorganik floresan maddeler içeren çözeltiler kullanılarak uygulanır. Bu kaplamalar, UV ışık altında parlama veya belirli dalga boylarında ışık emme özellikleri sergileyerek, çeşitli optik aygıtlarda, sensörlerde ve güvenlik uygulamalarında önemli bir rol oynar. Uygulama sırasında, yüzeyin temizliği ve düzgünlüğü, kaplama kalitesini etkileyen kritik faktörlerdir. Ayrıca, kaplama işlemi sonrasında tavlama veya diğer modifikasyon teknikleri ile kaplamanın özellikleri daha da iyileştirilebilir (Alig *et al.* 2018).

Mekanik kaplama (Mechanical coating)

Mekanik kaplama (mechanical coating) teknolojisi, özellikle aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklık direnci gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Örneğin, epoksi kaplamalara nano çinko oksit (ZnO) partikülleri eklenerek kaplamanın mekanik ve antikorozyif özellikleri artırılabilir. Bu tür kaplamalar, çelik yüzeyler için önemli bir koruma sağlar ve sert ortamlarda performanslarını artırır (Askerden vd., 2023). Ek olarak, krom karbür ve vanadyum karbür içeren kaplamalar termo-reaktif difüzyon yöntemiyle uygulanarak, özellikle yüksek aşınma ve korozyon direnci gereken endüstriyel alanlarda üstün performans sergiler. Bu kaplamalar, sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirerek, kullanılan malzemelerin ömrünü uzatır (Castillejo *et al.* 2019).

Yüzey daldırma (Surface dip coating)

Yüzey daldırma (surface dip coating) yöntemi, ince filmlerin kaplanmasında etkili bir teknik olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemde, kaplanacak yüzey bir kaplama çözeltisine daldırılır ve ardından dışarı çekilir. Daldırma işlemi sırasında, yüzeyin çözeltideki malzemelerle etkileşimi sonucunda, kaplama tabakasının kalınlığı ve homojenliği belirlenir. Kaplama kalınlığı; daldırma süresi, yüzeyin çekilme hızı ve çözeltinin viskozitesi gibi faktörlere bağlıdır. Yüzey daldırma yöntemi, geniş yüzeylerin kaplanmasında ve düşük maliyetli kaplama işlemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Brinker, 2013).

Alttan daldırma kaplama (Bottom-up coating)

Alttan daldırma kaplama (bottom-up coating) yöntemi, nanomateriyallerin veya ince film kaplamalarının oluşturulmasında kullanılan yenilikçi bir tekniktir. Bu yöntemde, substratın bir sıvı solüsyona daldırılmasıyla başlar ve ardından bu sıvı içinde bulunan nanopartiküllerin, yüzeye çökmesi ve daha sonra birbirleriyle birleşmesiyle ince bir film meydana gelir. Alttan daldırma kaplama, düşük sıcaklıkta işlem görme, geniş yüzey alanına kaplama yapabilme ve homojen kaplama sağlama avantajları sunar. Ayrıca bu teknik, nanoyapı oluşturma kapasitesi nedeniyle biyomedikal uygulamalardan elektronik aygıtlara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Alttan daldırma kaplama, nanomateriyallerin ve ince filmlerin verimli ve etkili bir şekilde üretilmesi için önemli bir yöntemdir (Biswas *et al.* 2011).

Alüminyum oksit kaplama (Alumina coating)

Alüminyum oksit kaplama (alumina coating) uygulamaları, alüminyum alaşımlarının aşınma ve korozyon direncini artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, anodizasyon ve plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) gibi çeşitli yöntemlerle elde edilmektedir. Anodizasyon, alüminyum yüzeyinde koruyucu bir alüminyum oksit tabakası oluştururken, PEO işlemi daha kalın ve sert kaplamalar üreterek yüzeyin mekanik ve kimyasal dayanıklılığını artırmaktadır. PEO kaplamaları, 3 katmanlı bir yapı oluşturarak (poröz üst katman, yoğun ara katman ve iç geçiş katmanı) mükemmel korozyon ve aşınma direnci sunar (Araujo *et al.* 2024; Keronite, 2024). Bunun yanı sıra, bu kaplamalar çevre dostu bir yöntemle üretildiği için, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde tercih edilmektedir (Famiyeh and Huang, 2019; Keronite, 2024). Sonuç olarak, alüminyum oksit kaplamalar, alüminyum alaşımlarının performansını artırarak daha geniş uygulama alanları elde etmesini sağlamaktadır.

Epitaksiyel büyüme

Epitaksiyel büyüme bir kristal taban üzerine belirli bir kristal yapıya sahip ince film tabakalarının büyütülmesi işlemidir. İki ana türü bulunmaktadır. Homoepitaksi, büyütülen filmin substratla aynı kimyasal yapıya sahip olduğu durumu (örneğin, epitaksiyel silisyum) ifade etmekte; heteroepitaksi ise büyüyen filmin kimyasal bileşiminin substrattan farklı olduğu durumu (örneğin, silisyum-germanyum) içermektedir. Epitaksiyel büyüme, genellikle kimyasal buhar biriktirme (CVD) veya moleküler demet epitaksisi (MBE) yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler yüksek saflıkta ve kontrollü kalınlıkta filmler elde etmeye olanak sağlamaktadır. Düşük sıcaklıkta kimyasal buhar biriktirme (RPCVD) yöntemi, silikon-germanyum-karbon (SiGeC) filmlerinin büyütülmesinde sıklıkla kullanılmakta ve bu süreçte hidrojen klorür (HCl) gazı ile seçici büyüme sağlanmaktadır. Epitaksiyel filmler, yarıiletken aygıtların performansını artırmak amacıyla optimize edilmektedir; örneğin, SiGeC HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) teknolojisinde bu tür filmler kullanılarak transistörlerin akım kazancı artırılmakta ve daha düşük gürültülü seviyeleri sağlanmaktadır (Kangallı, 2018).

Lazer ablasyon yöntemi

Lazer ablasyon yöntemi, bir yüzeye odaklanmış lazer ışığı kullanarak katı bir malzemenin buharlaştırılması ve ardından buharın yüzeye çökmesiyle ince film oluşturma sürecidir. Bu yöntem, yüksek enerji yoğunluğu ile belirli bir bölgeyi hedef alarak malzeme çıkarımı sağlar ve bu esnada ortaya çıkan buhar, yüzeye adsorbe olarak ince bir film tabakası oluşturur. Lazer ablasyon, özellikle yüksek kaliteli ve saflıkta film üretimi sağladığı için yarıiletken, optik ve nanoteknoloji uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, çok çeşitli malzemelerin kaplanmasına olanak tanır ve kaplama sürecinde sıcaklık kontrolü sağlayarak termal hasarı minimize eder. Bu nedenle, lazer ablasyon yöntemi, zorlu kaplama gereksinimlerini karşılamak için ideal bir yöntemdir (Phipps, 2007).

Baskı Yöntemleri

Baskı yöntemleri, mürekkep veya polimer çözeltilerinin bir yüzeye transfer edilmesiyle ince film oluşturan tekniklerdir. Bu yöntemler, belirli alanlara seçici malzeme uygulayarak farklı özellikler ve kalınlıklar elde etmeyi sağlar. Serigrafi, ekran üzerinden mürekkep transferi ile dielektrik ve iletken filmlerin kaplanmasında yaygın olarak kullanılırken; ofset baskı, mürekkebin bir silindire uygulanmasıyla geniş yüzey alanlarına kaplama yapar. Bu yöntemler, hızlı üretim süreçleri ve maliyet etkinliği sunarak elektronik devre kartları, organik fotovoltaikler ve esnek elektronik gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Dolayısıyla, modern elektronik ve nanoteknoloji uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır (Liu *et al.* 2023).

Aerosol jeti (Aerosol jet printing)

Aerosol jeti yöntemi, ince film kaplama uygulamalarında kullanılan yenilikçi bir baskı tekniğidir. Bu yöntemde, sıvı bir malzeme, aerosollere edilerek bir substrata yönlendirilir. Öncelikle, kaplama çözeltisi özel bir nebülizatör aracılığıyla aerosol haline getirilir. Daha sonra, bu aerosol, kontrol edilen bir akışla hedef yüzeye püskürtülür. Aerosol jeti, kaplama kalınlığının ve homojenliğinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanırken, karmaşık desenlerin ve yapısal özelliklerin oluşturulmasına imkân sağlar. Bu yöntem, organik elektronik, biyomedikal uygulamalar ve seramik kaplamalar gibi geniş bir yelpazede kullanılmakta olup, düşük maliyet ve yüksek verimlilik sunmasıyla dikkat çekmektedir (Wilkinson *et al.* 2019).

Tavlama (Annealing)

Tavlama (annealing), kaplanmış filmin kristal yapısını iyileştirmek amacıyla uygulanan bir ısıtma işlemidir ve bu işlem, çözücülerini buharlaştırmak ve filmi oluşturan bileşiklerini titreştirmek için ısıtma enerjisi kullanır. Bu titreşim, moleküllerin en kararlı konumlara yerleşmesini sağlayarak kristal yapının düzenlenmesini sağlar. Tavlamanın iki önemli parametresi vardır: tavlama sıcaklığı ve tavlama süresi. Tavlama sıcaklığı, kullanılan fırının sıcaklığını ifade eder ve filmin türüne göre seçilir; örneğin, organik bileşikler 400°C ve üzerindeki sıcaklıklarda bozulabileceğinden daha düşük sıcaklıklar tercih edilir. Tavlama süresi ise, filmin fırında ne kadar süre kalacağını belirler ve filmin kalınlığına ve istenen kristal yapıya bağlıdır. Tavlama işleminin faydaları arasında geliştirilmiş kristal yapı, artırılmış mekanik dayanıklılık, geliştirilmiş bariyer özellikleri ve alt tabakaya daha iyi tutunma bulunur. Bu işlem, yarıiletkenler, güneş pilleri ve optik kaplamalar gibi çeşitli kaplanmış film uygulamalarında yaygın olarak kullanılır (Wolf and Tauber, 2000; Sze and Ng, 2006).

Yüzey Modifikasyonu (Surface Modification)

Yüzey modifikasyonu, malzemelerin korozyon direnci, aşınma dayanımı, biyouyumluluk ve termal performans gibi yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan bir dizi işlem ve teknolojiyi kapsar. Bu teknolojiler, biyomedikal implantlardan havacılık ve mühendislik uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılır. Özellikle biyomedikal alanda, titanyum alaşımlarının yüzey modifikasyonu ile implantların biyouyumluluğu ve mekanik dayanıklılığı artırılabilir (Sharath Kumar *et al.* 2024; Zhou, Guo *et al.* 2023). Havacılık sektöründe ise, termal bariyer kaplamaları (TBC) gibi yöntemler, malzemelerin aşırı sıcaklık ve korozyona karşı dayanımını yükseltmek için tercih edilir (Lashmi *et al.* 2020). Nanoteknoloji ve hibrit kaplamalar ise, yüzey modifikasyonunda en son gelişmeler arasında yer almakta, özellikle korozyon ve aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirmektedir (Figueira, 2020).

TiO₂'nin Genel Özellikleri

Yerkabuğunda bol miktarda bulunan titanyum (Ti), yüksek dayanıklılığı ve hafifliği gibi üstün özelliklere sahip, geçiş metallerinden biridir. Titanyumun en önemli bileşiklerinden biri olan titanyum dioksit (TiO₂), fotokatalitik özelliği sayesinde günümüzde pek çok alanda kullanılmaktadır. TiO₂, ışık enerjisini absorbe ederek kimyasal reaksiyonları tetikleme yeteneği sayesinde güneş pilleri, su arıtma ve hava temizleme sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek kırılma indisine sahip olması nedeniyle beyaz pigment olarak da yaygın bir şekilde tercih edilen TiO₂, boya, plastik, kağıt ve kozmetik gibi birçok endüstride beyazlatıcı ve dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. TiO₂'nin bu geniş kullanım alanları, onu günümüzde stratejik öneme sahip bir malzeme haline getirmiştir (Richter, 2008).

TiO₂, tekstil endüstrisinde antimikrobiyal kaplama, leke direnci ve kendi kendini temizleme gibi özellikler kazandıran bir nanomalzeme olarak önemli bir yere sahiptir (Kar *et al.* 2009). Bu sayede, hijyenik tekstil ürünleri ve uzun ömürlü kumaşların geliştirilmesine katkı sağlar. Diğer yandan, TiO₂'nin yüksek yüzey alanı ve fotokatalitik özellikleri, gaz sensörlerinde kullanılmasına olanak tanır. Böylece, çeşitli gazların hassas ve güvenilir bir şekilde tespiti, endüstriyel güvenlik ve çevresel izleme sistemlerinde kritik bir rol oynar (Yılmaz *et al.* 2023). Yarıiletken bir malzeme olan TiO₂, karakteristik bir davranış sergiler. TiO₂'nin optik özellikleri, esas olarak bant yapısı ve yasak enerji aralığı (E_g) ile belirlenir. Malzemenin yasak enerji aralığı, absorbe edilebilen fotonların enerji aralığını tanımlar. TiO₂'nin geniş band aralığı, ultraviyole bölgesindeki fotonları etkin bir şekilde absorbe etme kapasitesini açıklar. Bu sayede, absorbe edilen enerji, malzeme içerisinde çeşitli fiziksel süreçleri tetikler. TiO₂'nin bu temel optik özelliği, onu birçok teknolojik uygulamada vazgeçilmez kılar. Bu geniş uygulama yelpazesi, TiO₂'nin benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bir sonucu olarak, farklı sektörlerde yaygın olarak tercih edilmesini sağlamaktadır.

TiO₂, güneş ışığına karşı yüksek absorpsiyon ve yansıma kapasitesi, onu güneş kremleri ve kozmetik ürünlerde etkili bir UV filtresi haline getirmektedir (Parrino and Palmisano, 2020). Fotokatalitik özellikleri sayesinde, TiO₂, dış cephe kaplamaları, otomotiv boya ve hava temizleme sistemlerinde organik kirleticilerin fotokatalitik ayrışmasında etkin bir rol oynamaktadır (Nakata and Fujishima, 2012). Yarıiletken yapısı ve yüksek elektron taşıma kabiliyeti, TiO₂'yi fotovoltaiik hücrelerde önemli bir bileşen yapmaktadır (Wang *et al.* 2009). Boya ve kaplama endüstrisinde ise, TiO₂'nin yüksek opaklık ve beyazlık özellikleri, duvar boya ve plastik ve kağıt kaplamalarda yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Nasiri-Tabrizi *et al.* 2015). Gıda endüstrisinde renklendirici olarak, özellikle şeker, sakız ve dondurma gibi ürünlerde, TiO₂'ye sıklıkla rastlanmaktadır (Karuppasamy and Subrahmanyam, 2007).

İlaç endüstrisinde ise, TiO_2 tabletlerin fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır (Wang *et al.* 2016). Son olarak, TiO_2 'nin fotokatalitik özelliği, su arıtımında bakteriyel kirleticilerin inaktivasyonunda önemli bir potansiyele sahiptir (Feng *et al.* 2005).

TiO_2 3,0-5,0 eV arasında geniş bir enerji band aralığına ve geniş spektral aralıkta yüksek dielektrik sabitine sahip bir yarıiletkenidir. Malzemenin yaklaşık 2,3 olan yüksek kırılma indisi ve 1850 °C'yi aşan erime noktası, onu optoelektronik aygıtlarda kullanılmak üzere ideal bir aday haline getirmektedir. (Veiga *et al.* 2012). TiO_2 'nin hidrofobik özelliği, yani su ile zayıf etkileşimi, kendi kendini temizleyen yüzeylerin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmasının temel nedenidir (Karuppasamy and Subrahmanyam, 2007).

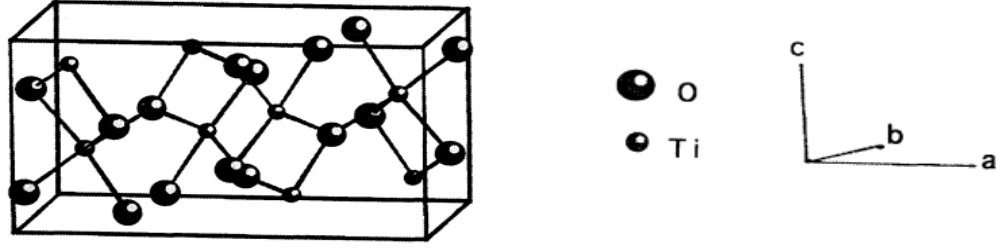
TiO_2 güçlü oksidasyon potansiyeli, yüksek kimyasal kararlılık ve düşük toksisite profili sayesinde geniş bir uygulama alanına sahip bir yarıiletkenidir. Ancak, TiO_2 nanopartikülleri substrata zayıf adhezyon, yüksek konsantrasyonlarda aglomerasyon eğilimi ve inhomojen morfoloji gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle, özellikle hava ve su arıtımı, gaz sensörleri, fotovoltaiik hücreler, dielektrik malzemeler ve dalga kılavuzları gibi alanlarda potansiyel uygulamaları bulunan TiO_2 ince filmler, son yıllarda yoğun bir araştırma konusu olmuştur.

TiO_2 anataz, rutil ve brokit olmak üzere üç temel kristal yapıya sahiptir. Bu yapılar arasında, endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan anataz ve rutil fazları özel ilgi görmektedir. Rutil, termodinamik olarak daha stabil bir yapıya sahipken, anataz metastabildir ve fotokatalitik aktivite bakımından daha yüksek performans gösterir. TiO_2 'nin fotokatalitik özellikleri, yüksek fotoiletkenliği, etkili elektron-hol çifti üretimi ve yük taşıyıcılarının etkin ayrılması gibi faktörlere dayanmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, bu özellikler açısından anataz fazının diğer fazlara göre daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır (Hu and Yuan, 2005).

Brokit TiO_2 bileşiğinin özellikleri

TiO_2 'nin brokit fazı, fotokataliz ve güneş enerjisi uygulamaları için potansiyel gösteren; ancak kararlılığı ve sentez zorlukları nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmayan bir kristal yapıdır. Bu fazın, diğer fazlara göre daha düşük aktivasyon enerjisine sahip olması, faz dönüşüm mekanizmalarını daha karmaşık hale getirmektedir. Brokit fazındaki TiO_2 , yüksek sıcaklıklarda termodinamik olarak daha kararlı olan rutil fazına dönüşme eğiliminde olduğundan, genellikle düşük sıcaklık sentez yöntemleriyle elde edilir. Brokit TiO_2 , ortorombik kristal sisteminde kristalleşen bir bileşiktir. Birim hücresi, 24 titanyum (Ti) ve 8 oksijen (O) atomundan oluşmaktadır. Bu yapı, bileşiğe 3,99 g/cm³ yoğunluğunu veren karakteristik bir

kafes oluşturur. Kafes parametreleri $a = 9.184 \text{ \AA}$, $b = 5.447 \text{ \AA}$ ve $c = 5.145 \text{ \AA}$ olarak belirtilmiştir (Mo and Ching, 1995).

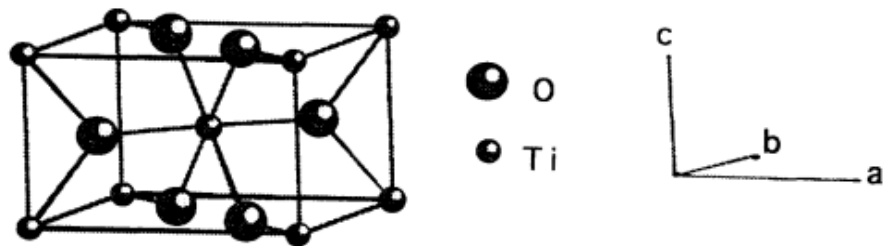


Şekil 8. Brokit TiO_2 'nin birim hücresi (Mo and Ching, 1995).

Brokit fazındaki TiO_2 'nin enerji band aralığının geniş olması dolayısıyla, doğrudan veya dolaylı geçişlerin baskın olup olmadığı değişkenlik göstermektedir. Brokit fazı 3,1-3,4 eV arasında değişen dolaylı band aralığına sahiptir (Reyes-Coronado *et al.* 2008). Arner ve Tepehan (2011) tarafından yapılan çalışmada ise, TiO_2 nanofilmi yaklaşık 3,4-3,51 eV aralığında doğrudan band aralığına sahip olduğu belirlenerek 450°C 'de tavlama işlemi sonucunda kristalit boyutlarının 4,1-11,9 nm arasında değiştiği raporlanmıştır. Bu bulgular, nanokristallerinin büyüme kinetiği ve termal kararlılığı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Bu özellikler, sentez süreci sırasında uygulanan sıcaklıktan etkilenmektedir. Brokit fazı, tüm TiO_2 polimorfları arasında en düşük aktivasyon enerjisine sahip olmasına rağmen, sentezi diğer fazlara göre daha zordur. Kırılma indisi 2,2-2,4 aralığındadır. Yüksek sıcaklıklarda rutil fazının termodinamik olarak daha kararlı olması nedeniyle, brokit fazının düşük sıcaklıklarda elde edilmesi için çeşitli sentez stratejileri geliştirilmiştir (Xia *et al.* 1999).

Rutil TiO_2 bileşiğinin özellikleri

TiO_2 'nin üç polimorf fazı arasında, rutil fazı en yüksek kimyasal ve termal kararlılığı sergilemektedir. Bu üstün özelliği, uzun süreli kararlılık gerektiren sistemlerde rutil fazının ideal bir aday olmasını sağlamaktadır. Tetragonal kristal sistemi içerisinde yer alan rutil TiO_2 , birim hücresinde altı atom ve iki molekül içeren katı bir yapıya sahiptir. Rutil TiO_2 'nin kafes parametreleri $a = 4,5936 \text{ \AA}$ ve $c = 2,9587 \text{ \AA}$ olarak belirlenmiş olup, bu yapıya sahip kristalinin yoğunluğu $4,13 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır (Mo and Ching, 1995).



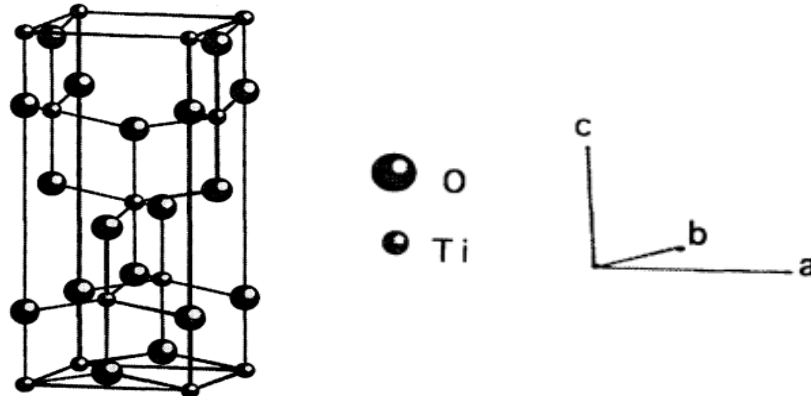
Şekil 9. Rutil TiO_2 'nin birim hücresi (Mo and Ching, 1995).

Rutil TiO_2 doğrudan band aralığına sahip bir yarıiletken malzemedir. Düşük sıcaklıklarda ($T = 1,6K$) üzerindeki optik tepkinin anizotropik olduğu belirlenmiştir. (Reyes-Coronado *et al.* 2008). TiO_2 'nin rutil fazı, 600-700 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda termodinamik olarak kararlı hale gelerek anataz ve brokit gibi diğer polimorfik fazlardan dönüşüm gösterir. Rutil fazı, diğer fazlara kıyasla en yüksek atomik yoğunluğa ve en sıkı paketlenmiş kristal yapısına sahip olması nedeniyle en yüksek sertliğe (Mohs sertliği 6,5–7,0) ulaşır. Rutil fazı 3,0-3,2 eV gibi geniş bir band aralığına ve yaklaşık 2,7-2,9 aralığında yüksek bir kırılma indisine sahiptir (Fujishima *et al.* 1999).

Anataz TiO_2 bileşiğinin özellikleri

TiO_2 'nin anataz fazı, güneş pilleri gibi teknolojik uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bir yapıdır. Anataz fazı 3,2-3,25 eV dolaylı band aralığına sahiptir. Bu malzemenin kırılma indisi 2,43-2,76 arasında değişmektedir. Kristal boyutları, uygulanan ısıtma işlem sıcaklığına doğrudan bağlı olarak değişkenlik gösterir (Tongwanichniyom and Witit-Anun, 2014).

Arıer ve Tepehan (2011) tarafından yürütülen çalışmada, 400-800 °C sıcaklık aralığında ısıtma işlem gören TiO_2 nanopartiküllerinin kristal boyutlarının 6,2 ile 21,1 nm arasında değiştiği belirtilmiştir. Ancak, El-Maghraby *et al.* (2008) belirttiği gibi, 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda anataz fazının termodinamik olarak daha kararlı olan rutil faza dönüşümü gözlemlenir. Bu nedenle, anataz fazının korunabilmesi için ısıtma işlem sıcaklığının 400-600 °C aralığında tutulması uygun olacaktır (Machado and Santana, 2005). TiO_2 kristallerinin heteroeklem yapısının, fotojenik yük taşıyıcı üretimi ve etkin yük ayrımı mekanizmaları sayesinde üstün fotokatalitik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Bu özellikler, özellikle anataz fazında belirgin bir şekilde gözlemlenmekte olup, Hu and Yuan (2005) tarafından da vurgulanmıştır. Tetragonal kristal yapısıyla öne çıkan anataz TiO_2 , birim hücresinde 12 atom ve 4 molekül barındıran bir yapıya sahiptir. Kafes parametreleri $a = 3,784 \text{ Å}$ ve $c = 9,515 \text{ Å}$ olarak belirlenen bu faz, $3,79 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir (Mo and Ching, 1995).



Şekil 10. Anataz TiO_2 'nin birim hücresi (Mo and Ching, 1995).

TiO₂'nin Uygulama Alanları

Katalizör olarak

TiO₂, boya endüstrisinde yaygın olarak beyaz pigment olarak kullanılan, yüksek kimyasal kararlılığa sahip bir inorganik bileşiktir. TiO₂'nin, özellikle fotokatalitik özellikleri nedeniyle, son yıllarda kataliz alanında önemli bir yer edinmiştir. Fotokataliz, bir yarıiletken malzemenin ışık enerjisini soğurarak elektron-hol çiftleri oluşturması ve bu çiftlerin yüzeyde adsorplanmış moleküllerle etkileşime girerek oksidasyon-redüksiyon reaksiyonlarını başlatması prensibine dayanır. TiO₂'nin geniş band aralığı ve yüksek fotokatalitik etkinliği, onu hava ve su temizleme, kendi kendini temizleyen yüzeyler, hidrojen üretimi ve organik kirleticilerin mineralizasyonu gibi birçok çevresel ve enerji uygulamasında potansiyel bir aday haline getirmiştir.

Optik ve elektronik alanlarda

TiO₂, geniş band aralıklı yarıiletken yapısı ve yüksek kırılma indisi sayesinde çok çeşitli optik uygulamalarda kritik bir role sahiptir. En yaygın kullanım alanı, boyalar, plastikler ve kağıt gibi ürünlerde opaklık ve beyazlık sağlayan bir beyaz pigment olarak görev yapmasıdır. TiO₂'nin güçlü UV absorpsiyon özelliği, güneş kremleri, pencere ve otomobil camlarında etkili bir UV filtresi olarak kullanılmasını sağlar. Ayrıca, düşük kayıplı optik kaplama malzemeleri olarak mercek ve prizmalarda şeffaflık ve ışığın verimli iletkenliği için tercih edilir. Nanoteknolojide, TiO₂'nin fotonik kristaller üretiminde kullanılmasıyla ışığın belirli frekanslarda manipülasyonu mümkün hale gelmiştir. Bu sayede, lazer teknolojileri gibi alanlarda yeni nesil optik aygıtların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Biyomedikal uygulamalar

TiO₂, biyomedikal mühendisliğinde sıklıkla tercih edilen biyo-uyumlu bir nanomalzemedir. Kimyasal kararlılığı, düşük toksisitesi ve antibakteriyel aktivitesi gibi özellikleriyle öne çıkan TiO₂, biyomedikal uygulamalarda gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. TiO₂'nin biyomedikal alandaki potansiyeli oldukça geniştir. Özellikle doku mühendisliği, ilaç taşıma ve kanser tedavisi gibi alanlarda gelecek vadeden bir materyaldir. Ancak, TiO₂ nanopartiküllerinin uzun dönemli biyolojik etkileri ve çevresel etkileri hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

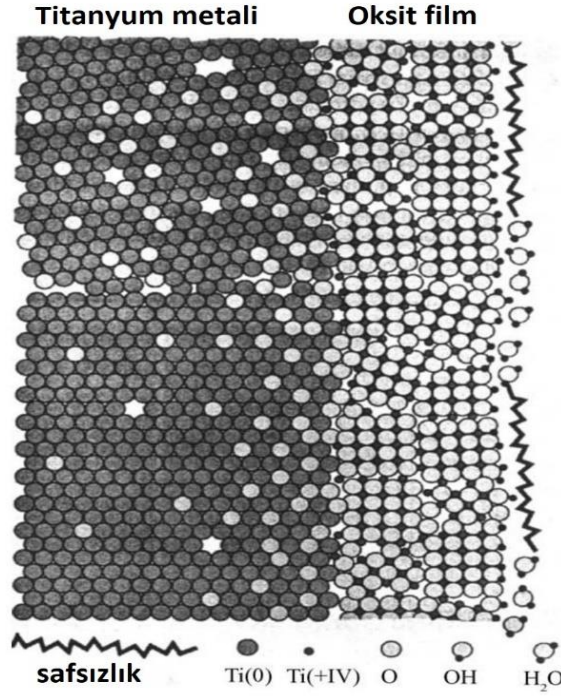
Diğer uygulama alanları

Titanyum dioksit en yüksek kırılma indisine sahip olan malzemelerden biri olarak bilinir. Bu nedenle TiO_2 , boyalarda, mürekkeplerde, plastiklerde, kağıtlarda, boya kalemlerinde, seramiklerde, elektronik bileşenlerde, gıda ürünlerinde (şeker kaplaması, şekerlemeli meyve, yağsız süt ve unun renklendirilmesi gibi.), kozmetiklerde (güneş bronzlaştırıcı losyonlar dahil) ve diş macunlarında renklendirici olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fotokatalizör olarak ise, organik bileşenleri ayrıştırma kabiliyeti nedeniyle; yansıma önleyici, antibakteriyel, antiviral, mantar öldürücü ve çevre iyileştirme uygulamalarında tercih edilmektedir.

Kullanımı giderek yaygınlaşan bir başka TiO_2 uygulama alanı ise kendi kendini temizleyen camlardır. Japonya'da geliştirilen bu teknoloji, birçok ülkede pencere üreticileri tarafından sunulmaktadır. Camın temizlenmesi ihtiyacını önemli ölçüde azaltmak için cam levha üzerine ince bir TiO_2 tabakası uygulanır. Bu TiO_2 'nin kirde bulunan organik maddeleri (güneşten gelen UV ışınları kullanarak) parçalama özelliği sayesinde gerçekleştirir. Ayrıca TiO_2 'nin hidrofilik yüzeyi, suyun toplanmış damlacıklar oluşturmasını engelleyerek eşit bir şekilde yayılmasını sağlar ve böylece yüzeyin temizliğini kolaylaştırır. (Guan, 2005). Fotokatalizör etkisi, fotogenere deliklerinin yüksek oksidasyon gücü ve geniş bir pH aralığında sulu elektrolitlerde foto-korozyona karşı olağanüstü stabilitesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, TiO_2 güneş fotoelektrokimyası için en kapsamlı şekilde incelenen malzemelerden biri haline getirmiştir.

Titanyum dioksitin fotoelektrik ve kimyasal özellikleri, güncel araştırmaların önemli bir odağını oluşturmaktadır. Bu materyalin sahip olduğu nitelikler sayesinde bilim insanları, yeni nesil teknolojilerin geliştirilmesi adına çaba göstermektedir.

Titanyumun yapısı, bileşimi ve özellikleri, kapsamlı bilimsel incelemelere konu olmuştur. Bu metalin üstün kimyasal inertlik, elektriksel iletkenlik, korozyon direnci, pasifleşme yeteneği, fotokatalitik aktivite ve gaz algılama gibi özelliklerinin kökeninde, yüzeyinde doğal olarak oluşan oksit tabakası yatmaktadır. Şekil 11'de görüldüğü gibi, saf titanyumun yüzeyinde bu oksit tabakasının varlığı mikroskopik düzeyde gözlemlenebilir.



Şekil 11. Saf titanyum yüzey oksit filmi (Liu *et al.* 2004).

Elde edilen bulgular, amorf veya nanokristalin yapıdaki oksit filmlerin genellikle 3-7 nm kalınlığında olduğunu ve çoğunlukla termodinamik olarak kararlı titanyum dioksit (TiO_2) fazından oluştuğunu ortaya koymaktadır. TiO_2/Ti arayüzünde oksijen (O) ve titanyum (Ti) atomlarının stokiometrisi 2:1 oranında değişkenlik göstermektedir. Ayrıca, hidroksit iyonları ve kimyasal olarak adsorbe olmuş su molekülleri, titanyum katyonlarıyla belirgin etkileşimler sergilemektedir. Bu durum, söz konusu filmlerin su molekülleri ile zayıf hidrojen bağları oluşturabilme özelliğine sahip olduğunu ve dolayısıyla yüzeylerin kendi kendini temizleme mekanizmalarında potansiyel bir rol oynayabileceğini göstermektedir (Liu *et al.* 2004).

Oksijen boşlukları ve Ti^{3+} nedeniyle TiO_2 genellikle n-tipi özellik gösterir. Ancak uygun katkılama yöntemleriyle (N, Cu, Li gibi) p-tipi TiO_2 elde etmek mümkündür. p-tipi TiO_2 üretimi; band aralığının kontrolü, görünür bölgede soğurma sağlanması ve p-n heteroeklemler oluşturulması açısından önemlidir. Asahi *et al.* (2001) tarafından yapılan çalışmada, anataz fazındaki TiO_2 'ye nitrojen katkılayarak görünür ışıktaki fotokatalitik aktivite gözlemlenmiş ve katkılama sonucu TiO_2 'nin band aralığı daraltılması ile optik performansın artırılabileceği belirtilmiştir.

Bu çalışmalar, TiO_2 'nin fotokatalitik özelliklerini optimize etmek için katkı maddeleri kullanmanın önemini göstermektedir. Özellikle p-tipi TiO_2 'nin elde edilmesi, güneş ışığı altında etkin fotokatalitik aktivite sağlayan materyallerin geliştirilmesinde önemli bir adımdır.

TiO₂ Üretim Yöntemleri

TiO₂ yapıları, düşük elastik modül, yüksek yorulma dayanımı, şekil verme kolaylığı, işlenebilirlik ve üstün korozyon direnci gibi istenen özelliklere sahip olduklarından, Tablo 1’de gösterildiği üzere farklı üretim yöntemleri ile elde edilmektedir.

Tablo 1. Titanyum Üretim Yöntemleri ve Yüzey Özellikleri (Zhang *et al.* 2020).

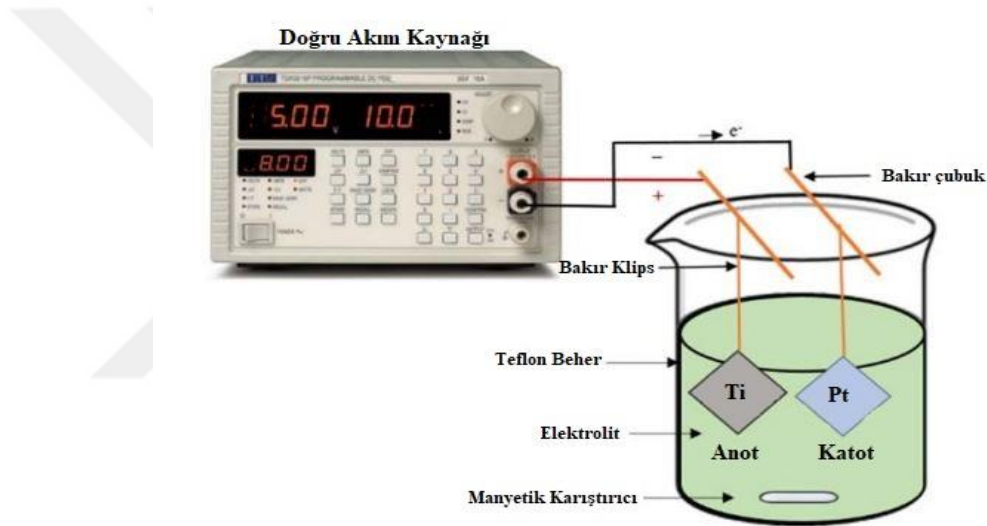
Üretim Yöntemleri	Yüzey Özellikleri	Amaç
1) Mekanik metotlar		
a) Talaşlı imalat	Yüzey pürüzlülüğü	Adhezyonu iyileştirmek
2) Kimyasal metotlar		
a) Kimyasal İşlemeler	Yoğun iç oksit ve gözenekli dış oksit tabaka	Bu yöntem, biyoyumluluğu ve biyoaktiviteyi artırmak amacıyla titanyum yüzeyinde oksit tabakalarının oluşturulmasını sağlar.
b) Sol-jel	İnce film	Fotoaktivite, sensör
c) Anodizasyon	Elektrolit anyonları sayesinde adsorpsiyon gerçekleştirme	Spesifik yüzey yapıları, Sensör özellikleri geliştirme, korozyona dayanım sağlama
d) CVD	TiN, TiC, TiCN yapılar	Aşınma dayanımı
e) Biokimyasal metotlar	Fotokimya ile biyoyum sağlama	Spesifik biyoyumluluğu artırmak
3) Fiziksel metotlar		
a) Termal sprey	Yaklaşık 30-200 µm kaplama	Aşınma ve korozyon dayanımı
b) PVD	µm kaplama kalınlığı elde etmek	Yüzeyi modifiye etmek

Anodizasyon ile TiO₂ üretimi

TiO₂ bazlı heteroeklem yapının temel karakteristik parametrelerinin sıcaklığa bağlı *I-V* ve *C-V* ölçümlerinden tayin edilmesi için çalışmamızda da kullandığımız anodik oksit kaplama, elektrokimyasal bir yöntemle metal yüzeylerde koruyucu ve dekoratif bir oksit tabakası oluşturma işlemidir. Bu çalışmada, atmosferik koşullara maruz kalan titanyum metalinin yüzeyindeki doğal oksit filminin, eloksal işlemi ile modifiye edilmesi hedeflenmiştir. Elokсал sürecinde uygulanan manyetik akı yoğunluğu, elektrolit sıcaklığı, elektrot sıcaklığı, elektrolitin pH değeri ve kimyasal bileşimi gibi işlem parametrelerinin, oluşan anodik oksit filminin kalınlığı, gözeneklilik ve yüzey morfolojisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, Sulka (2020) tarafından da vurgulandığı gibi, eloksal parametrelerinin titanyumun korozyon direnci ve biyo-uyumluluğu gibi özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir.

Anodizasyon sürecinde, doğru akım kaynağının pozitif kutbuna bağlanan elektrot (anot) üzerinden oksidasyon reaksiyonu gerçekleşir. Titanyumun anodik oksidasyonu sırasında, genellikle titanyum levha, folyo veya çubuk anot olarak kullanılır. Katot malzemesi olarak ise paslanmaz çelik veya platin gibi inert metaller tercih edilir. Elektrik akımının etkisiyle, elektrolit içindeki elektronlar, anot yüzeyine doğru hareket eder ve bu noktada oksidasyon reaksiyonunu tetikler.

Yüzeyden ayrılan metal atomları, elektrolit içerisindeki oksijen iyonlarıyla etkileşime girerek oksit tabakasıyla birleşme reaksiyonuna girer. Elektronlar, harici bir güç kaynağından katoda doğru hareket eder ve uygun pH değerindeki elektrolit içerisinde hidrojen iyonlarıyla birleşerek hidrojen gazı üretimi gerçekleştirir. Basit bir eloksal sistemi, bir anot, bir katot ve bunları birbirine bağlayan bir güç kaynağından oluşur (Yurddaskal vd., 2018) (Şekil 12).



Şekil 12. Anodizasyon ünitesi (İzmir vd., 2019).

Titanyum altlıklar üzerinde TiO_2 sentezi için elektrokimyasal anodizasyon yöntemi, kolay uygulanabilirliği, çok yönlülüğü ve düşük maliyeti nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Li *et al.* 2012). Bu yöntemin en önemli avantajı, altlık ile mükemmel uyum gösteren ve oldukça yapışkan bir oksit tabakasının etkin bir şekilde oluşturulmasıdır (Lin *et al.* 2004). Elde edilen titanyum dioksit nanoyapılarının morfolojik özellikleri (tüp uzunluğu, çapı, pürüzlülük ve kalınlık gibi) anodizasyon parametrelerine doğrudan bağlıdır. Bu parametreler arasında elektrolit türü, bileşimi, pH değeri, uygulanan potansiyel, elektrolit sıcaklığı ve süre gibi faktörler sayılabilir (Sulka *et al.* 2010; Haring *et al.* 2012).

MATERYAL VE YÖNTEM

Giriş

Bu bölüm, referans Au/n-TiO₂/p-Si heteroeklemlerin üretim süreçlerini detaylandırmaktadır. Diyotların imalatında kullanılan malzemeler, numunelerin temizlenmesi, hazırlanması ve uygulanan yöntemlerin yanı sıra, *I-V* ve *C-V* karakteristik parametrelerinin ölçümü için kullanılan cihazlar ve prosedürler hakkında bilgi verilmektedir. Bu bilgiler, çalışmanın deneysel kısmının doğru bir şekilde anlaşılması ve tekrarlanabilirliğinin sağlanması açısından önem arz etmektedir.

p-Si Kristalinin Temizlenmesi ve Numunenin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan p-Si kristali, (100) doğrultusuna sahip, 400 µm kalınlığında ve 1-10 Ω cm öz direnç değerine sahiptir. Kristallerin yüzeyi satın alındığında düzgün ve pürüzsüzdü, ancak istenen diyot kalitesine ulaşmak için yüzeyin tüm kirliliklerden arındırılması gereklidir. Bu nedenle, aşağıda belirtilen sıralı kimyasal temizleme işlemleri uygulanmıştır.

Aseton: Numuneler ultrasonik banyoda 10 dakika yıkandı.

Metanol: Ultrasonik banyoda 10 dakika daha yıkandı.

Deiyonize Su: Kristaller iyice durulandı.

RCA1 Temizliği: (H₂O:H₂O₂:NH₃; 6:1:1) çözeltisi 60°C'de 10 dakika kaynatıldı.

Seyreltik HF: (H₂O:HF; 10:1) çözeltisinde 30 saniye yıkandı.

RCA2 Temizliği: (H₂O:H₂O₂:HCl; 6:1:1) çözeltisinde 60°C'de 10 dakika kaynatıldı.

Deiyonize Su: Tekrar iyice durulandı.

HF Temizliği: Tekrar seyreltik HF çözeltisinde 30 saniye yıkandı.

Deiyonize Su: 20 dakika boyunca akan su altında bekletildi.

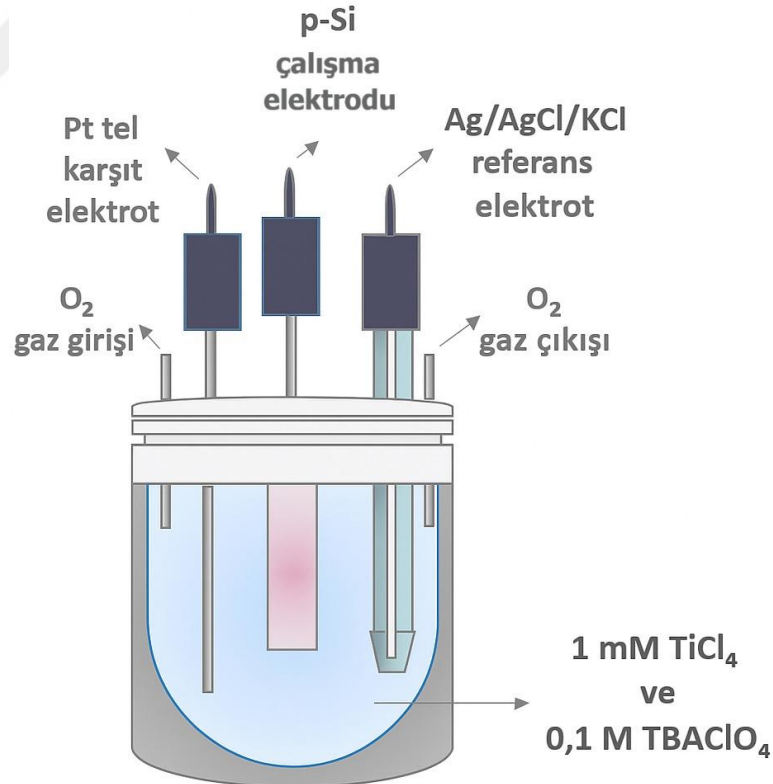
Kurutma: Temas edilmeden dikkatlice kurutuldu.

Diyot parametrelerinin hassasiyeti, malzeme yüzeylerinin ve ortam koşullarının temizliğine doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, vakum cihazı ve diğer ekipmanlar önceden temizlenmiştir. Buharlaştırılacak Al ve Au metalleri, ultrasonik banyoda seyreltik HF ile temizlenmiştir. Kullanılan quartz pota, aseton ve metanol ile ultrasonik olarak yıkandıktan sonra deiyonize su ile durulanmıştır. Isıtıcı yüzeyler ise %10'luk HCl çözeltisi ile temizlenmiştir.

Buharlaştırma işlemi öncesinde metalin oksitlenmesini önlemek amacıyla vakum ortamında eritme işlemi gerçekleştirilmiştir. Omik kontak oluşturmak için, p-Si kristalinin mat yüzeyi uygun bir yükseklikte vakum sistemine yerleştirilmiştir. Buharlaştırılan metalin, kristal yüzeyine atomik düzeyde homojen kaplanması sağlanmıştır. Vakum sistemi basıncı 10^{-5} Torr değerine ulaşınca, yüksek akım verilerek Al metali buharlaştırılmıştır. Daha sonra numuneler, N_2 atmosferinde $580^{\circ}C$ 'de 3 dakika tavlama işlemi tamamlanmıştır. Tavlama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler fırından alınarak soğutulmuştur. Bu adımların sonunda p-Si/Al omik kontak işlemi başarıyla tamamlanmıştır.

Elektrokimyasal Kaplama İşlemi

Tüm elektrokimyasal ölçümler, Bioanalytical Systems BAS-100B elektrokimyasal analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç elektrotlu bir hücre düzeni oluşturulmuştur. Şekil 13'deki çalışma elektrodu olarak omik kontaklı p-Si kristalleri, karşıt elektrot olarak platin tel (Pt), referans elektrot olarak ise Ag/AgCl/KCl (doymuş) elektrotlar kullanılmıştır. Ölçüm sırasında çözeltiden oksijen gazı geçişi sağlanmıştır.

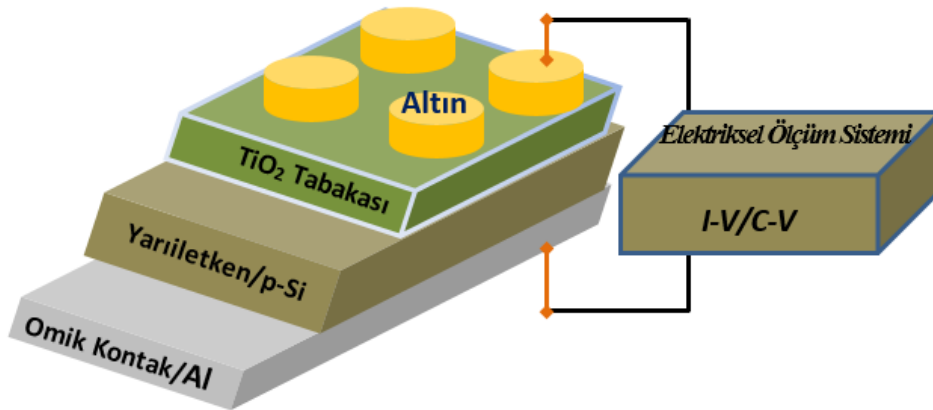


Şekil 13. Üç elektrotlu anodizasyon ünitesi.

Elektrot Yüzeylerinin Modifikasyonu

p-Si/Al altlıkların modifikasyonu için elektrotlar sırasıyla asetonitril ve saf su ile yıkandıktan sonra azot gaz akışında kurutularak, p-Si/Al elektrotlar üzerine TiO₂ film (n-TiO₂/p-Si) oluşumu gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, 1 mM TiCl₄ ve 0,1 M TBAClO₄ içeren oksijenle doyurulmuş asetonitril çözeltisine p-Si/Al daldırılmış ve negatif potansiyelde (+0,6 V -1,8 V) tarama gerçekleştirilerek n-TiO₂/p-Si elektrotlar hazırlanmıştır.

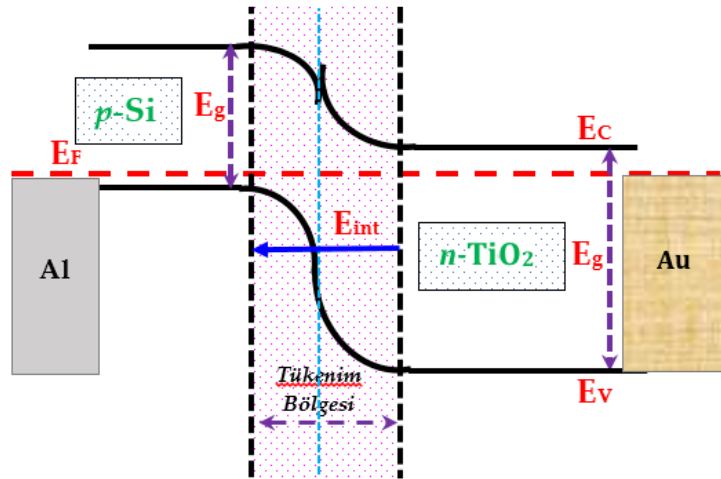
Elektrokimyasal kaplama işlemi, temizlenmiş yüzey üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte TiO₂ film başarıyla büyütülerek TiO₂/p-Si/Al yapısı elde edilmiştir. Daha sonra, TiO₂ oluşturulmuş yüzey üzerine $7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ nokta kontak olarak altın (Au) metal buharlaştırılarak Şekil 14'te görüldüğü gibi heteroeklem kontaklar üretilmiştir. Elde edilen yapıların *I-V* karakteristik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve oda sıcaklığında optimum davranış gösteren iki adet aygıt seçilmiştir. Seçilen aygıtlardan birinin sıcaklığa bağlı *I-V* ve *C-V* ölçümleri yapılmış, diğerinin ise fotodiyot özelliklerini incelemek için ışık altında *I-V* ölçümü alınmıştır.



Şekil 14. Au/n-TiO₂/p-Si/Al heteroeklemlerin kesit görüntüsü.

Şekil 15'te, Au/n-TiO₂ p-Si sistemine ait termal denge durumu gösterilen enerji-band diyagramı yer almaktadır. Si ve TiO₂ arasındaki termal denge sağlandıktan sonra, boşalma bölgelerinde oluşan dahili elektrik alanı (E_{int}), serbest elektrik yükleri üzerinde zıt yönlerde bir itici güç yaratır. Bu durum, taşıyıcıların hareketini etkileyerek sistemin elektriksel özelliklerini şekillendirir. Serbest yüklerin üretilmesi için, aygıtın sıcaklığının artırılması veya dışarıdan bir voltaj uygulanması gerekmektedir. İleri yönde polarize edilen elektrik alanı, heteroeklemdeki dahili elektrik alanı (E_{int}) ile zıt polariteye sahiptir. Akımın oluşabilmesi için dış elektrik alanının, iç elektrik alanını aşması gerekir. Düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların termal enerjisi de düşük olduğundan, ölçülen bariyer yüksekliği de azalmaktadır. Si ve TiO₂ arasındaki bariyerin oluşturduğu inhomojen yapıda, düşük sıcaklıklarda idealite faktörünün büyük, bariyer yüksekliğinin küçük olması beklenir (Sullivan *et al.* 1991; Kim *et al.* 2015). Ayrıca, düşük

voltajlarda dış elektrik alanının zayıf olması nedeniyle, akımın geçişi düşük bariyer üzerinden termiyonik alan emisyonu (TFE) yoluyla gerçekleşir. Ancak, yüksek sıcaklıklar ve yüksek voltajlarda (yüksek dış elektrik alanı) taşıyıcılar, daha büyük bariyer yüksekliklerinden termiyonik emisyon (TE) ile akıma katkı sağlar. Sabit sıcaklık ve yüksek elektrik alanlarında, tükenim bölgesinin daralması ve Au/n-TiO₂/p-Si heteroekleminin seri direncinin, uygulanan voltajla birlikte Si ve TiO₂'nin tükenim bölgesi dışındaki nötr alanlara kayması gözlemlenir.



Şekil 15. Au/n-TiO₂/p-Si yapısının enerji-band diyagramı.

Deney ve Ölçüm Sistemi

Öncelikle Au/n-TiO₂/p-Si heteroeklemlerin laboratuvar sıcaklığında *I-V* ölçümleri alınmıştır. Sonraki aşamada Au/n-TiO₂/p-Si diyotlarının sıcaklığa bağlı *I-V* ve *C-V* karakteristiklerini değerlendirmek için Şekil 16'da gösterilen deney düzeneği kullanılmıştır.

I-V Ölçümleri: KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

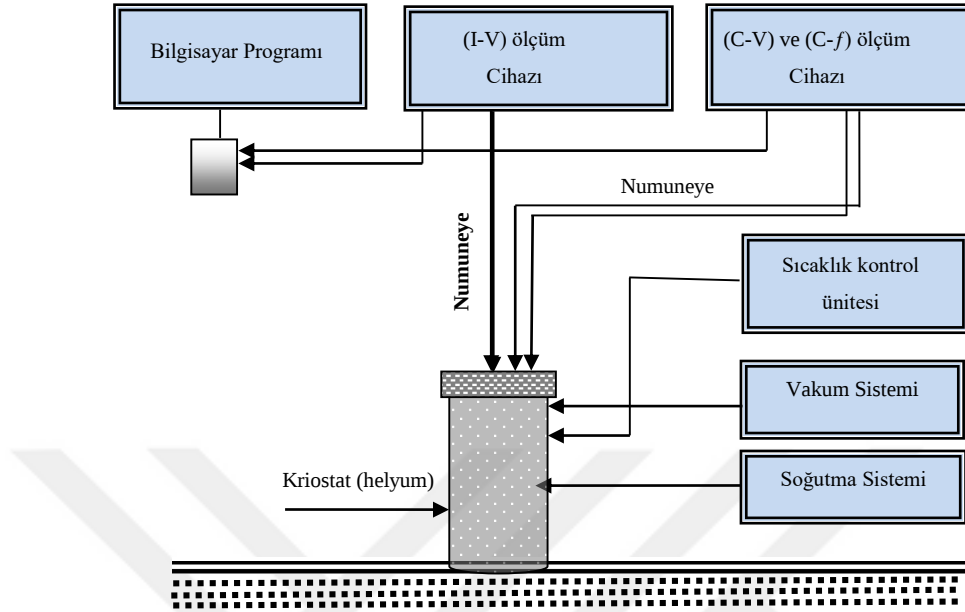
C-V Ölçümleri: HEWLETT PACKARD 4192A LF Impedance Analyzer cihazı kullanılarak, 50 Hz - 13 MHz frekans aralığında yapılmıştır.



Keithley 487 Picoammeter/Voltage Source & Hewlett Packard 4192A LF Impedance Analyzer

Şekil 16. Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj ölçüm sistemi.

Sıcaklık ölçümleri, LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi ile $\pm 0,1$ K hassasiyetle 300 K'dan başlayarak 80 K'ya kadar 20 K adımlarla gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kriyostat düzenek Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Sıcaklığa bağlı ölçümler için kullanılan kriyostat düzenek.

ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, TiO₂ ince film tabakası ve bu tabaka kullanılarak elde edilen TiO₂ tabanlı heteroeklemler oda sıcaklığında ve farklı sıcaklıklarda incelenmiştir. İnce film ve heteroeklem yapılarının optik, morfolojik, yapısal ve elektriksel özellikleri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu amaçla, X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), tarayıcı tünelleme mikroskopisi (STM), absorpsiyon spektroskopisi ve bazı elektriksel ölçüm yöntemleri kullanılmıştır.

XPS analizleri, TiO₂ filminin kimyasal bağlanma durumlarının ve yüzey kompozisyonunun belirlenmesinde kullanılmıştır. Ölçümler, sürekli analizör enerjisi modunda çalışan SPECS X-ışını fotoelektron spektrometresi ile gerçekleştirilmiştir. Monokromatize edilmiş Al K α kaynağı ($h\nu = 1486.6$ eV) 600 W güçte bir kaynak olarak kullanılmış, analiz odasında çalışma basıncı 1.33×10^{-10} kPa'nın altında tutulmuştur. Bağlanma enerjilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi için 284.6 eV'deki C1s piki referans alınarak kalibrasyon yapılmıştır.

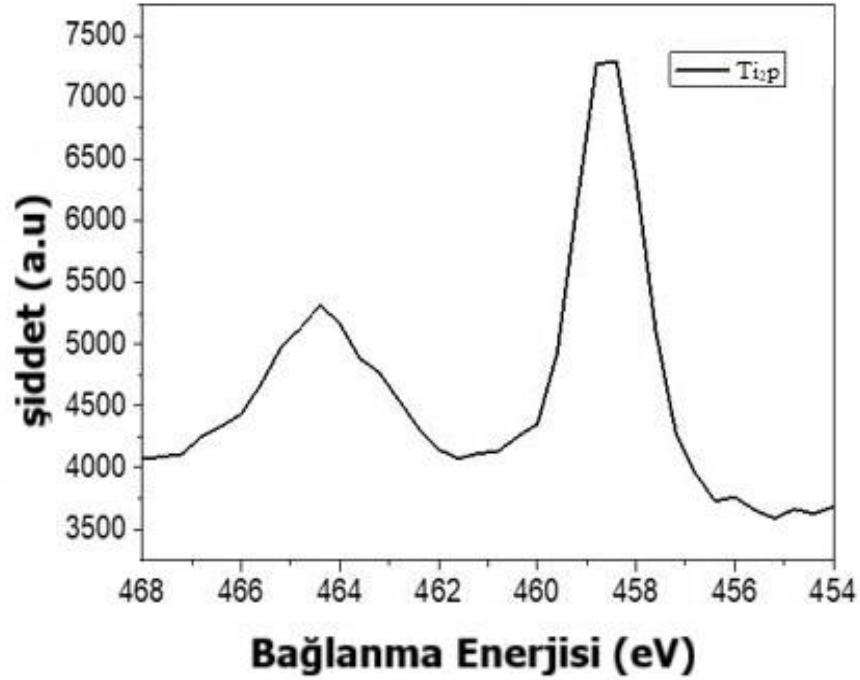
Film yüzeyinin morfolojik özellikleri, tarayıcı tünelleme mikroskopisi (STM) kullanılarak incelenmiştir. Bu analizler, PicoScan Moleküler Görüntüleme cihazı ile ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. STM çalışmaları, filmin yüzey düzgünlüğü, pürüzlülük oranı ve nanoyapısal detayların belirlenmesi açısından önemli veriler sağlamıştır.

TiO₂ ince filmin optik özellikleri, Shimadzu UV-vis-NIR 3101 PC spektrofotometresi ile 200-800 nm dalga boyu aralığında yapılan absorpsiyon ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Ölçümler, filmin ışık absorpsiyon kapasitesi ve optik band aralığını ortaya koymak için gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler oda sıcaklığında yapılmış ve elde edilen veriler optik karakterizasyon sonuçlarının güvenilirliğini artırmıştır.

TiO₂ Filminin Optik, Morfolojik ve Yapısal Ölçümleri

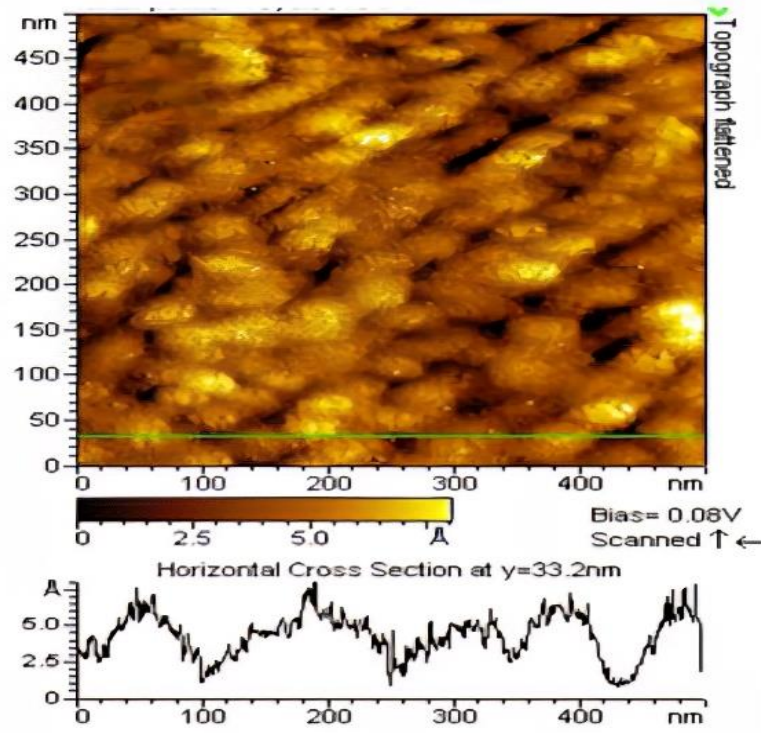
Şekil 18, n-TiO₂/p-Si sistemine ait Ti_{2p} bölgesinin dar tarama XPS spektrumlarını göstermektedir. Bu spektrumlar, Ti elementlerinin kimyasal durumlarını ve bağlanma özelliklerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Ti_{2p} bölgesinde, Ti_{2p_{3/2}} ve Ti_{2p_{1/2}} spin-yörünge çiftlerine karşılık gelen yaklaşık 458.6 eV ve 464.4 eV bağlanma enerjilerinde iki geniş ve asimetrik pik gözlemlenmiştir. Bu pikler, TiO₂ yapısında bulunan titanyum atomlarının oksijenle oluşturduğu bağlanma durumlarını yansıtmaktadır. Ti_{2p_{3/2}} piki, özellikle Ti⁴⁺ iyonlarına işaret ederken, Ti_{2p_{1/2}} piki de spin-yörünge etkileşimleri nedeniyle ayrılan bir

bileşeni temsil etmektedir. Piklerin geniş ve asimetric yapısı, yüzeydeki oksitlenme derecesi ve olası yüzey kusurlarıyla ilişkilendirilebilir. Bu analiz, n-TiO₂/p-Si heteroeklem sisteminin yüzey kimyası hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.



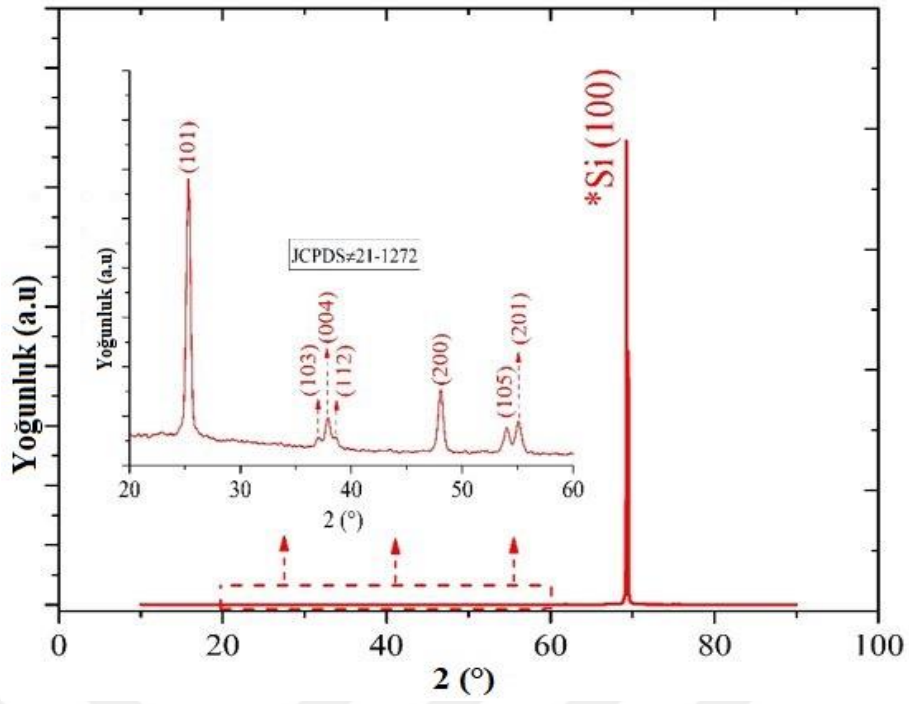
Şekil 18. TiO₂ XPS spektrumu ölçümleri.

TiO₂'nin morfolojik özellikleri, Tarayıcı Tünelleme Mikroskobu (STM) yöntemi ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 19'da n-TiO₂ filminin STM görüntüsü verilmiştir. STM analizi, altlık yüzeyinin tamamen TiO₂ üst filmi ile kaplandığını göstermiştir. Elde edilen görüntüler, yüzeydeki TiO₂ filminin, yaklaşık 100-150 nm boyutlarında granüllerin bir araya gelmesiyle oluştuğunu ve bu granüllerin kısmi düzenlilik sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu yapı, TiO₂ filminin büyüme mekanizması ve kristal yapısının yanı sıra yüzey enerjileri arasındaki dengeye bağlı olarak şekillenmiştir. Granüllerin boyutları ve düzenliliği, yüzey pürüzlülüğünü ve dolayısıyla heteroeklem sisteminin elektriksel ve optik özelliklerini etkileyebilir. Bu sonuçlar, TiO₂ filminin yüzey homojenliği ve yapısal kararlılığı hakkında değerli bilgiler sunmaktadır ve bu tür sistemlerin fotovoltaiik uygulamalar veya diğer yarıiletken aygıtlar için potansiyelini değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir.



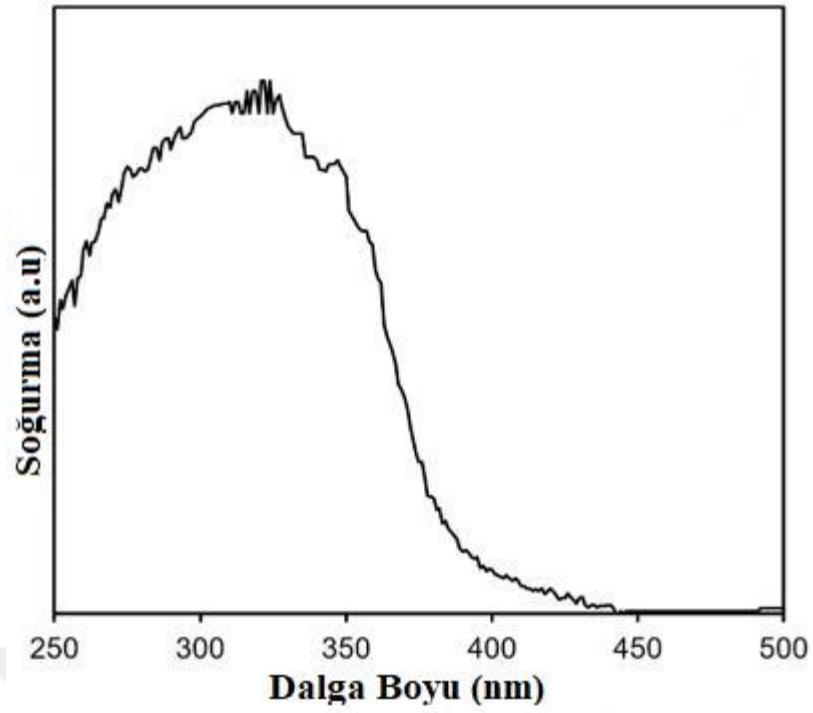
Şekil 19. TiO_2 filminin STM görüntüsü.

Şekil 20'de p-Si altlık üzerinde büyütülen TiO_2 filminin mikroyapısını X-Işını Kırınımı (XRD) ölçümleri aracılığıyla detaylandırmaktadır. Elde edilen XRD deseninde yedi belirgin pik gözlemlenmiş olup, bunlar sırasıyla (101), (103), (004), (112), (200), (105) ve (201) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu pikler, TiO_2 filminin anataz fazında olduğunu güçlü bir şekilde doğrulamaktadır. XRD analizi sonuçları, TiO_2 filminin polikristal bir yapıya ve tetragonal kristal sistemine sahip olduğunu göstermiştir. Elde edilen bu difraktogramlar, elektrokimyasal kaplama yöntemiyle büyütülen TiO_2 filminin kristal yapısının, JCPDS Kartında (JCPDS Kart No: 21-1272) belirtilen standartlarla uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, kaplama yönteminin yüzeyde homojen ve düzenli bir kristal yapı oluşturulmasında etkili olduğunu ve TiO_2 'nin kristal özelliklerini optimize edebildiğini göstermektedir. TiO_2 filminin anataz fazında olması, fotokatalitik ve elektronik uygulamalardaki performans potansiyelini de artırmaktadır.

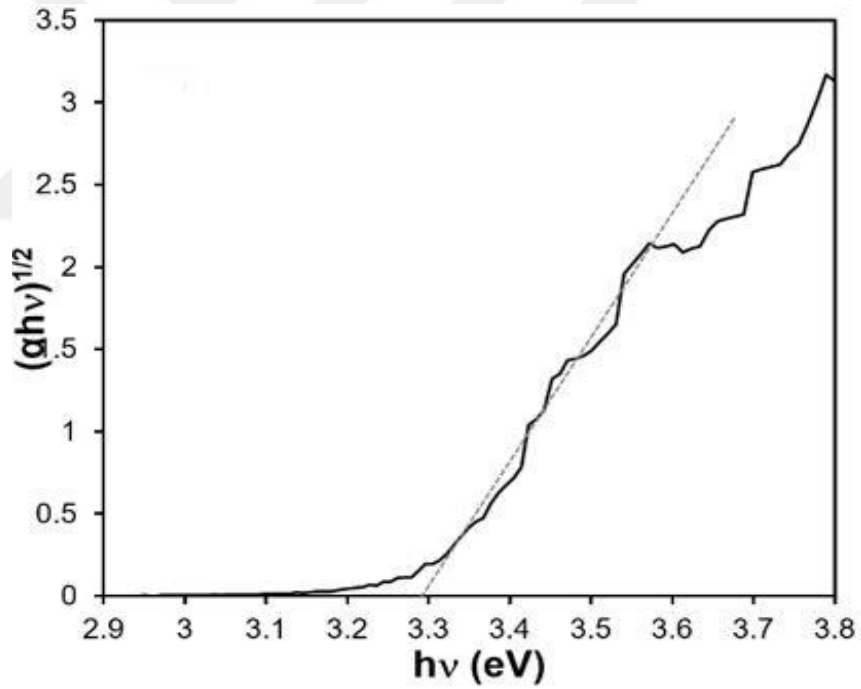


Şekil 20. TiO₂'nin XRD ölçümleri.

TiO₂'nin soğurma spektrumunu belirlemek amacıyla UV-vis soğurma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 21, TiO₂ filminin UV-vis soğurma spektrumunu detaylandırmaktadır. Bu spektrum, filmin 250 nm ile 450 nm dalga boyu aralığında belirgin bir soğurma tepe noktası sergilediğini göstermektedir. Soğurma spektrumundaki bu davranış, TiO₂ filminin band aralığına bağlı olarak yüksek enerjili UV bölgesindeki fotonları etkin bir şekilde soğurduğunu ve bu malzemenin optik özelliklerinin UV uygulamaları için uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 22 TiO₂'nin optik band aralığını hesaplamada kullanılan Tauc grafiğini göstermektedir. Soğurma grafiğinden, Tauc yöntemi kullanılarak TiO₂'nin band aralığı enerjisi yaklaşık 3.3 eV olarak hesaplanmıştır. Bu değer, anataz fazındaki TiO₂'nin band aralığına (~3.2 eV) oldukça yakın olup, elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğunu göstermektedir. Band aralığı değeri, TiO₂ filminin kristal yapısı, film kalınlığı ve üretim koşullarından etkilenebilmektedir. Bu uyum, elektrokimyasal kaplama yöntemiyle üretilen TiO₂ filmlerinin yüksek kaliteye ve belirgin optik özelliklere sahip olduğunu teyit etmektedir. Spektral veriler, aynı zamanda TiO₂'nin ışık absorpsiyon kabiliyeti ve band aralığı enerjisi hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Bu sonuçlar, TiO₂'nin fotokatalitik, sensör ve diğer optoelektronik uygulamalar için kullanım potansiyelini destekler niteliktedir.



Şekil 21. n-TiO₂/p-Si'nin UV-vis soğurma spektrumu grafiği.



Şekil 22. TiO₂'nin Tauc grafiği.

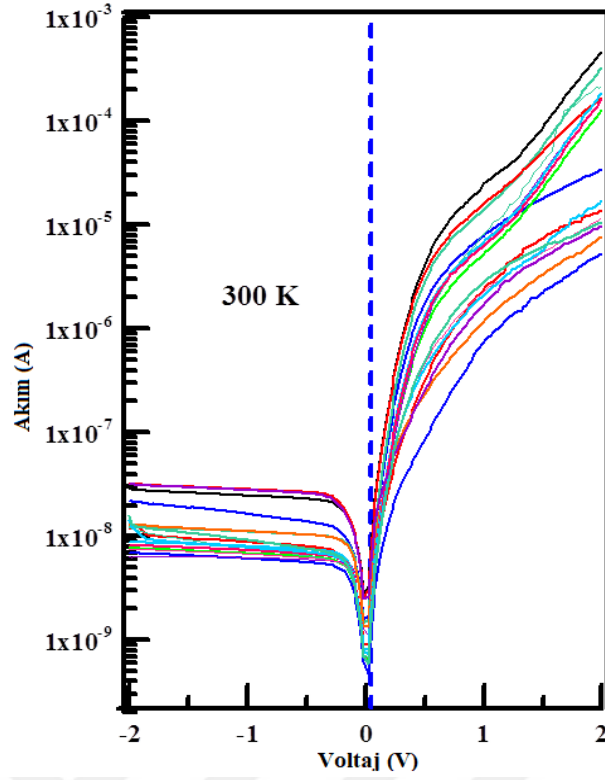
Au/n-TiO₂/p-Si heteroeklemin Elektriksel Ölçümleri

TiO₂, morfolojik ve kimyasal karakterizasyonunun ardından Au/n-TiO₂/p-Si heteroeklemlerin elektriksel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Au/n-TiO₂/p-Si heteroeklemlerin elektriksel özellikleri, *I*-*V* (akım-voltaj) ve *C*-*V* (kapasite-voltaj) ölçümleriyle incelenmiştir. *I*-*V* ölçümleri, KEITHLEY 487 Picoampermetre/Voltaj Kaynağı kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçümler, heteroeklemin doğrultucu davranışını ve elektriksel iletkenliğini değerlendirmek için

gerçekleştirilmiştir. C - V ölçümleri ise, farklı sıcaklıklarda heteroeklem yapısının C - V ilişkisini incelemek ve yapının sıcaklıkla değişen elektriksel parametrelerini ortaya koymak amacıyla yapılmıştır. Özellikle TiO_2 tabanlı heteroeklem yapıların sıcaklığa bağlı olarak I - V ve C - V özelliklerindeki değişim incelenmiş ve bu parametrelerin heteroeklem performansına etkisi detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar, üretilen yapının genel performansını etkileyen faktörlerin anlaşılmasında önemli bir katkı sağlamıştır.

Doğrultucu aygıtların I - V ölçümleri, aygıtın elektriksel performansını ve özelliklerini anlamada kritik bir rol oynamaktadır. Bu ölçümler, özellikle idealite faktörünü, ters beslem sızıntı akımını ve bariyer yüksekliğini belirlemek için değerli veriler sunar. İdealite faktörü, aygıtın ideal davranışından ne kadar sapma gösterdiğini, ters beslem sızıntı akımı ise aygıtın ters yöndeki elektriksel geçirgenliğini yansıtır. Bariyer yüksekliği ise aygıtın elektriksel iletkenliğini etkileyen temel bir parametredir. Bu parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi, aygıtın verimli çalışıp çalışmayacağını ve tasarımında yapılacak iyileştirmeleri anlamak açısından büyük önem taşır. Bunun yanı sıra, aygıtın ışık altında yapılan I - V ölçümleri, malzemelerin optik uygulamalarda kullanılıp kullanılmayacağını değerlendirmek için kritik bilgiler sunar. Özellikle güneş pilleri, fotodetektörler gibi optoelektronik aygıtlarda, ışık altında gösterdikleri performans, malzemenin etkinliğini ve potansiyel uygulamalarını belirler. Işığa duyarlılık, fotonların malzeme içindeki etkileşimini ve yük taşıyıcılarının hareketini yansıtarak, malzemenin optik özelliklerini ve uygulama alanlarını ortaya koyar. Bu nedenle, ışık altındaki ölçümler, malzemenin gelecekteki uygulamalarda ne denli etkili olacağını kestirmede kritik bir rol oynar.

Şekil 23, aynı deneysel koşullar altında üretilmiş 15 farklı $\text{Au/TiO}_2/\text{p-Si/Al}$ heteroeklem yapısının I - V eğrilerini göstermektedir. Şekil 24'te ise, tüm aygıtların idealite faktörü-bariyer yüksekliği değişimi grafiği verilmiştir. -2 V ile 1 V arasındaki ölçümlerinde düşük seviyede sızıntı akımı ile birlikte iyi doğrultma özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir. Ancak, bazı aygıtların I - V grafiklerinde kısmi farklılıklar olduğu dikkati çekmektedir. Bu değişimler, Au ve Si arasındaki TiO_2 ara tabakasının kalınlık ve yapısal özelliklerinin çeşitli bölgelerde farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır. Bu tür yapısal inhomojeniteler, elektriksel özelliklerde değişikliklere yol açarak aygıtların idealite faktörü ve bariyer yüksekliği gibi parametrelerini etkilemektedir.



Şekil 23. Aynı koşullarda hazırlanan 15 tane Au/n-TiO₂/p-Si heteroeklemin oda sıcaklığında ve karanlıktaki I - V grafikleri.

Bu grafiklerin detaylı analizi için termiyonik emisyon (TE) teorisi kullanılmaktadır (Rhoderick and Williams, 1988). Termiyonik emisyon teorisine göre akım-voltaj ilişkisini veren denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir:

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

Bu denklemde (I_0) terimi ters doyma akımını ifade eder ve $\log(I)$ - V grafiğinin doğrusal bölgesinin akım eksenini kestiği noktadan elde edilir. Ters doyum akımı, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (2)$$

Burada, (q) elektronik yükü, (V) uygulama voltajı, (A) etkin aygıt alanı, (A^*) Richardson sabiti, (Φ_b) deneysel bariyer yüksekliği ve (k) ise Boltzmann sabitidir. İdealite faktörü (n), doğrultucu aygıtın ideal davranıştan ne kadar sapma gösterdiğini belirler. İdeal bir doğrultucu için ($n=1$) olması beklenirken, bu değerin birden büyük olması, aygıttaki elektriksel bozulmaların ve malzeme kusurlarının varlığını göstermektedir (Zhou, Song, *et al.*, 2023).

İdealite faktörü termiyonik emisyon teorisi yardımıyla aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3)$$

Deneysel olarak belirlenen n değerleri, 15 farklı heteroeklem için 2.49 ile 4.23 arasında değişmektedir. İdealiteden sapmanın başlıca sebepleri arasında; TiO_2 ve Si arayüzünde oluşan SiO_2 ara katmanı, görüntü yük kuvveti etkisi, bariyer yüksekliğinin uygulama voltajına bağımlılığı, seri direnç etkileri, ara yüzey kusurları ve malzeme homojenliği gibi faktörler bulunmaktadır (Bilgili vd., 2021). Literatürde, TiO_2 'nin (Card and Rhoderick, 1971) veya Si yüzeyindeki doğal SiO_2 tabakasının (Tataroğlu ve Altındal, 2006) varlığının, n değerlerini artırabileceği rapor edilmiştir. Özellikle SiO_2 'nin varlığı, ara yüzeyin elektriksel özelliklerini değiştirerek heteroeklemin seri direncini artırmakta ve idealite faktörünün yükselmesine neden olmaktadır (Grilli *et al.* 2018).

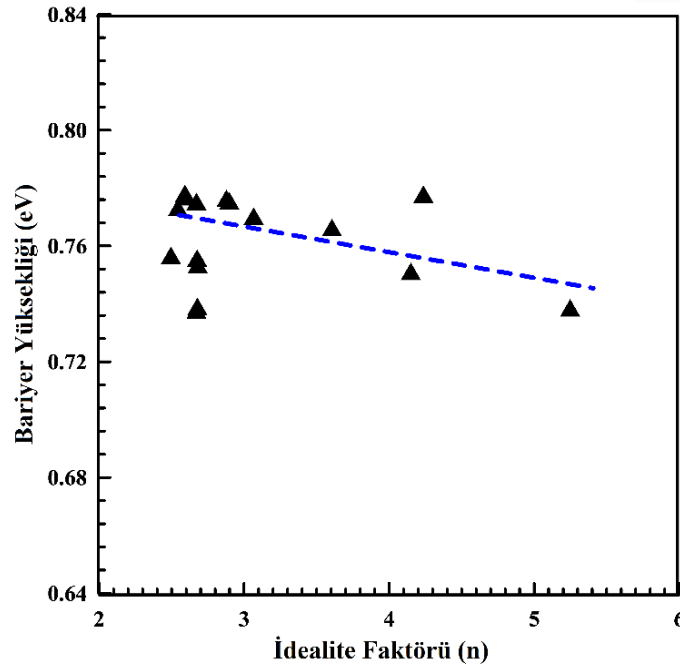
Termiyonik emisyon teorisine göre deneysel bariyer yüksekliği (Φ_b), aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4)$$

Bu analiz, heteroeklem yapısının idealite faktörü ve bariyer yüksekliği açısından nasıl değiştiğini anlamamıza yardımcı olmakta ve malzeme mühendisliği açısından iyileştirme yapılması gereken noktaları ortaya koymaktadır. Gelecekte yapılacak ince filmin yapısal optimizasyonları, ara yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ve seri direnç etkilerinin azaltılması, heteroeklemin doğrultucu özelliklerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayabilir.

Üretilen 15 farklı Au/ TiO_2 /p-Si/Al heteroyapısının deneysel bariyer yüksekliği (Φ_b) değerleri 0,73 eV ile 0,78 eV arasında değişmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda, ortalama idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerleri sırasıyla 3,08 ve 0,76 eV olarak hesaplanmıştır. Şekil 24'te, bu iki parametrenin dağılımı ve değişimi gösterilmektedir. Elde edilen veriler, bazı aygıtlar için (n) ve (Φ_b) değerlerinin benzer olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, bariyer yüksekliğinin yanal yönde inhomojen bir dağılım gösterdiğini ve Si altlığı üzerinde TiO_2 ince filminin ya da olası SiO_2 ara tabakasının homojen olmayan bir yapıya sahip olduğunu işaret etmektedir (Akkılıç vd., 2003; Leroy *et al.* 2005; Aydoğan vd., 2009). Başka bir deyişle, aygıtlar benzer üretim koşulları altında üretilmiş olmasına rağmen, bariyer yüksekliği değerleri Gauss dağılımına uygun bir şekilde değişim göstermektedir. Ortalama bariyer yüksekliği, bu

dağılımın ($n=1$) değerine ekstrapolasyonu kullanılarak belirlenmiş ve Au/n-TiO₂p-Si heteroyapıları için 0,769 eV olarak hesaplanmıştır (Ünal vd., 2022). Bu sonuçlar (n) ve (Φ_b) değişkenleri arasında orta düzeyde doğrusal bir ilişkinin mevcut olduğunu göstermektedir. Bariyer yüksekliklerindeki inhomojenliklerin, ince film malzemesinin yapısal özelliklerinden ve üretim süreçlerindeki mikro ölçekteki varyasyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle ara yüzeyde meydana gelen kusurlar, oksitlenme süreçleri ve TiO₂ tabakasının morfolojik değişimleri, bariyer yüksekliği ve idealite faktöründeki değişimlerin temel sebepleri olarak değerlendirilebilir. Bu bağlamda, daha homojen bir bariyer yapısına ulaşmak için üretim sürecindeki parametrelerin optimize edilmesi ve TiO₂'nin daha kontrollü bir şekilde büyütülmesi, heteroyapının doğrultucu özelliklerini iyileştirmek açısından önemli bir adım olacaktır.



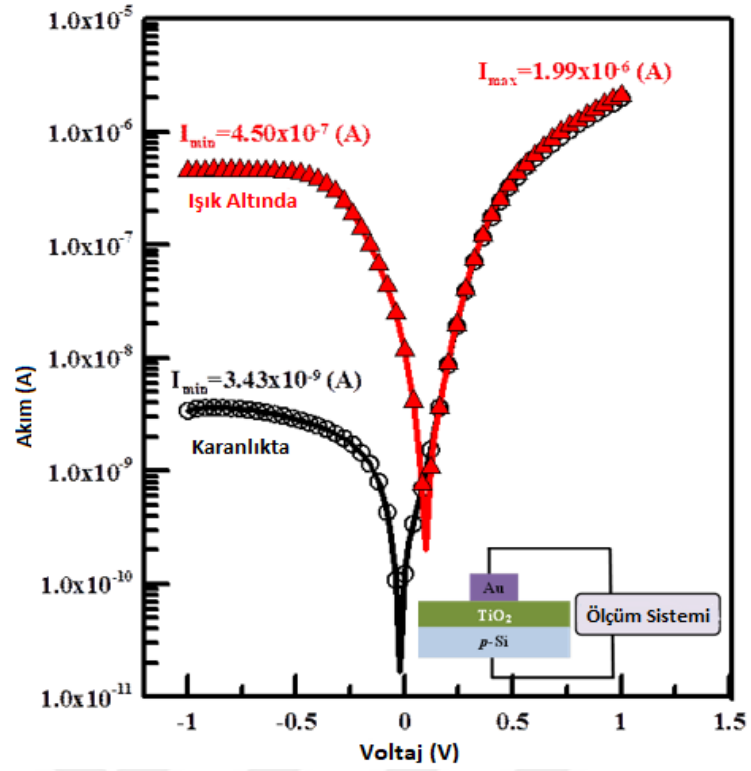
Şekil 24. 15 Au/n-TiO₂/p-Si heteroyapısının deneysel bariyer yüksekliği ile ideallik faktörü arasındaki ilişki grafiği.

Aynı deneysel koşullar altında üretilen 15 farklı Au/TiO₂/p-Si/Al heteroeklem yapısı arasından, düşük idealite faktörü ve yüksek engel yüksekliği gibi istenilen elektriksel özelliklere sahip iki aygıt seçilmiştir. Seçilen bu aygıtların, performansının daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla; birincisi aydınlatma koşulları etkisinde, ikincisi farklı sıcaklık değerleri altında elektriksel karakteristikleri incelenmiştir. Böylece heteroeklem yapısının ışık ve sıcaklık duyarlılığına ilişkin davranışları ortaya konulmuştur. Şekil 25, seçilen birinci aygıtın hem karanlık hem de ışık altında elde edilen I - V karakteristiklerini göstermektedir. Aygıtın elektriksel yanıtını incelemek amacıyla yapılan I - V ölçümleri, Sciencetech solar simulator SF300 (AM1.5G) ve Keithley 2400 kaynak ölçer cihazı

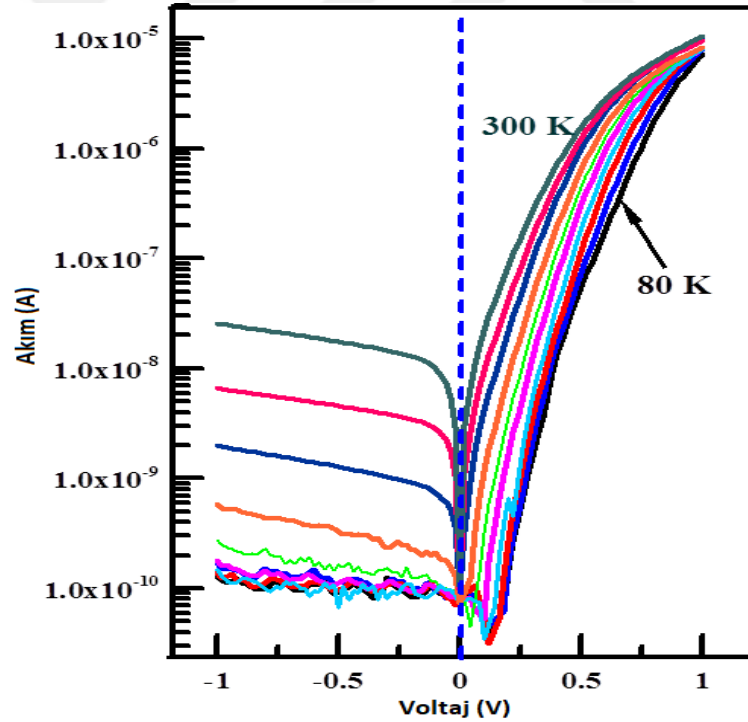
kullanılarak 100 mW/cm^2 ışık gücü altında gerçekleştirilmiştir. Yapının etkin alanı $7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ (0.785 cm^2)dir. Gelen ışınların bu alan üzerinde oluşturduğu fotoelektrik etkiler detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Elde edilen veriler, heteroyapının ışığa karşı yüksek hassasiyet gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Ters beslem (-1 V) altında, karanlık ortamda ölçülen akım $3.43 \times 10^{-9} \text{ A}$, ışık altında ise $4.50 \times 10^{-7} \text{ A}$ olarak ölçülmüştür. Işık altında ters akımın yaklaşık iki mertebe artış göstermesi, aygıtın fotoduyarlılığının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, heteroyapının ışık uyarımı altında etkin bir fotoakım üretebildiğini ve malzemenin optoelektronik uygulamalar için uygun bir aday olduğunu göstermektedir. Bu tür heteroyapılarda, hem Si hem de TiO_2 , belirli dalga boylarındaki fotonlar tarafından uyarılabilmekte ve elektron-hol çiftleri oluşturarak fotoiletkenliği artırmaktadır. Özellikle, TiO_2 'nin geniş band aralığı ve yüksek optik emilim kapasitesi, foton enerjisi yeterli olduğunda yük taşıyıcılarının etkin bir şekilde üretilmesini ve ayrılmasını sağlamaktadır (Humayun *et al.* 2018). Ancak, düz beslem altında ölçülen akımların karanlık ve aydınlık koşullarda neredeyse aynı olması, yapının geleneksel fotovoltaiik uygulamalardan ziyade fotodiyot ve fotosensör tabanlı uygulamalar için daha uygun olabileceğini göstermektedir. Yeterli enerjili fotonlar ters beslem altındaki $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ heteroyapısı üzerine düştüğünde, elektron-hol çiftleri üretilerek fotoakım oluşumu sağlanmaktadır. Ters beslem akımı, uygulanan voltajdan bağımsızdır. Bu değişimlere göre TiO_2 tabakasındaki elektron yoğunluğu, hol yoğunluğuna kıyasla daha yüksektir; benzer şekilde, Si tabakasında ise hol yoğunluğu, elektron yoğunluğundan daha fazladır. Ancak, azınlık taşıyıcılarının artış oranı, çoğunluk taşıyıcılarının artış oranına kıyasla çok daha yüksek olduğundan, aygıttaki çoğunluk taşıyıcılarının konsantrasyonundaki değişimler ihmal edilebilir düzeydedir (Mallik, 2013).

Elde edilen bu sonuçlar, $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ heteroyapısının fotodiyot ve optoelektronik aygıtlar için güçlü bir aday olduğunu göstermektedir. Özellikle, yapının yüksek ışık duyarlılığı ve düşük karanlık akımı, yüksek hassasiyet gerektiren optik algılama sistemlerinde kullanım potansiyelini artırmaktadır. Ancak, fotovoltaiik uygulamalardaki verimliliğin artırılabilmesi için, TiO_2 tabakasının band aralığı, yüzey kusurları, yük taşıyıcı geçiş mekanizmaları ve heteroarayüz stabilitesi gibi parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, TiO_2 'nin morötesi (UV) ışık soğurmasının artırılması, spektral tepki aralığının genişletilmesi açısından önemli bir geliştirme stratejisi olarak değerlendirilebilir. Bu veriler, $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ heteroyapıları, özellikle optoelektronik dedektörler, fotodiyotlar ve fotosensörler için önemli avantajlar sunabileceğini göstermiş ve yapının ileri düzeyde incelenmesi ile güneş hücrelerinde de kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 25. Au/n-TiO₂/p-Si heteroeklem'in karanlık ve aydınlık koşullardaki I-V eğrileri.

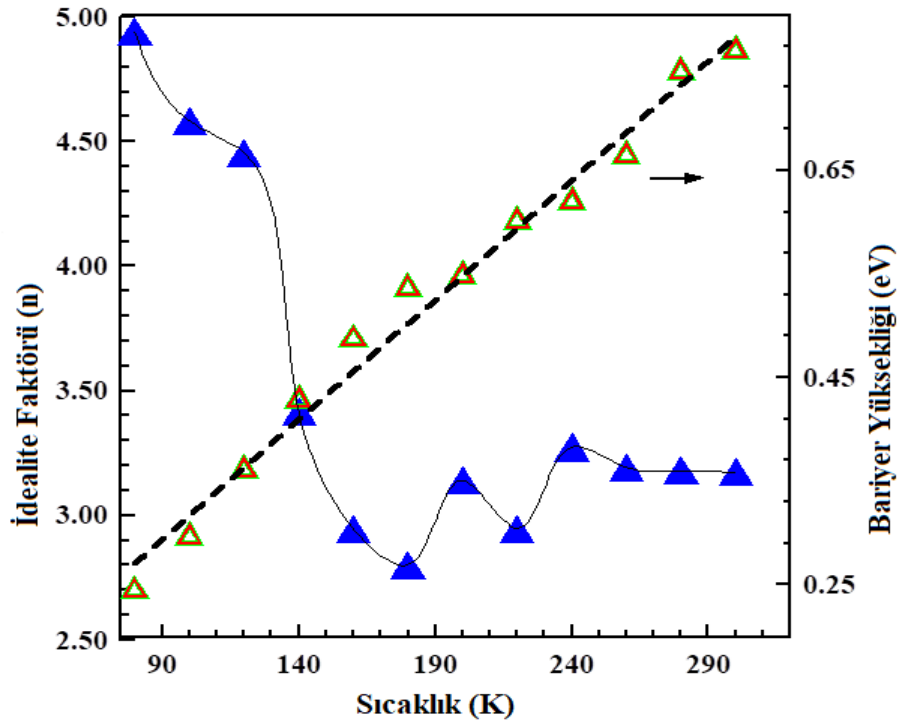


Şekil 26. ± 1 V gerilim altında, sıcaklık fonksiyonu olarak gerçekleştirilen Au/n-TiO₂/p-Si heteroeklem aygıtının I-V ölçümleri.

Termiyonik emisyonu dayalı akım taşıma mekanizmasına sahip aygıtlarda, yük taşıyıcılarının hareketi büyük ölçüde metal-yarıiletken arayüzünde oluşan enerji bariyeri tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle, bir heteroyapının sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu, hem temel fiziksel mekanizmaların anlaşılması hem de potansiyel

uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle, Schottky diyetoların sıcaklık bağımlı bariyer yüksekliği ve idealite faktörü değişimi, aygıtın performansını belirleyen kritik parametreler arasındadır. Bu çalışmada seçilen ikinci aygıtın 80 K ile 300 K arasında değişen sıcaklıklarda I - V ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 26, ± 1 V aralığında sıcaklığa bağlı alınan I - V eğrilerini göstermektedir ve bu eğriler, sıcaklığın elektriksel iletkenlik üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle düşük sıcaklıklarda aygıtın iletkenliği sınırlı kalırken, sıcaklık arttıkça taşıyıcı hareketliliği ve akım değerleri önemli ölçüde yükselmektedir.

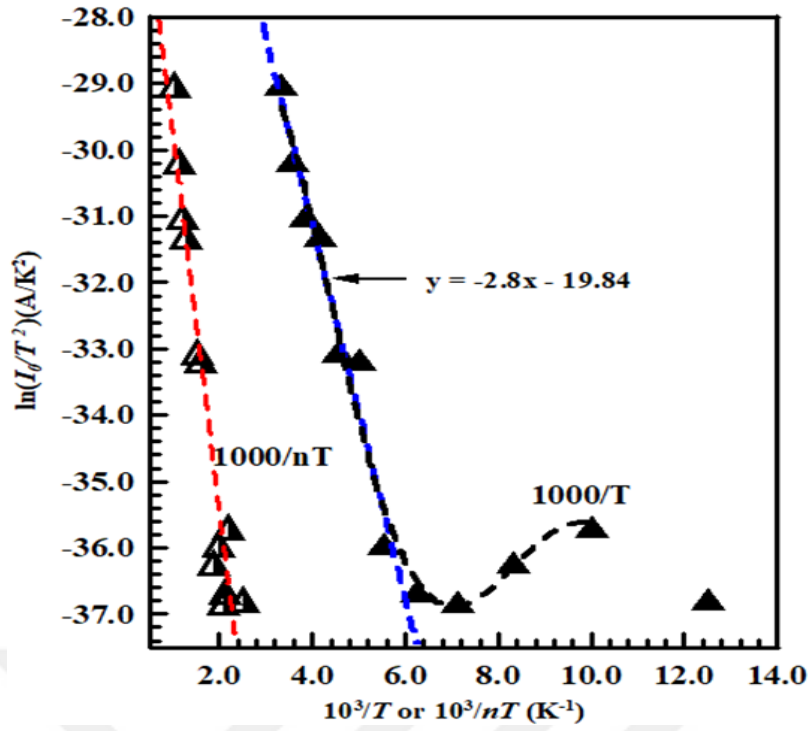
Şekil 27 ve Tablo 2’de her sıcaklık için belirlenen ideallik faktörü (n) ve bariyer yüksekliği (Φ_b) değerlerini göstermektedir. Elde edilen verilere göre, sıcaklık arttıkça n değerleri azalmakta, (Φ_b) değerleri ise artmaktadır. Bu eğilim, Schottky kontaklarda gözlenen sıcaklık bağımlı enerji bariyerinin heterojen yapıya sahip olduğunu ve arayüzdeki fiziksel etkilerin sıcaklıkla değiştiğini göstermektedir. Bu parametrelerin deneysel olarak belirlenen değerleri şu şekildedir: 80 K’de $n = 4,94$, $\Phi_b = 0,24\text{eV}$ ve 300 K’de $n = 3,17$, $\Phi_b = 0,76\text{eV}$. Bariyer yüksekliğinin sıcaklığa bağlı olarak artması, arayüzünün tam anlamıyla homojen olmadığını ve yük taşıyıcılarının farklı potansiyel bariyerleriyle karşılaştığını göstermektedir. Bu durum, literatürde Schottky temasında gözlemlenen bariyer yükseklik dağılımı ile uyumludur ve metal-yarıiletken veya TiO_2 -Si arayüzünün kusursuz olmadığını ortaya koymaktadır (Werner and Güttler, 1991; Aydoğan vd., 2005a).



Şekil 27. Sıcaklığa karşı idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerlerindeki değişim.

Bariyer yüksekliğinin ve idealite faktörünün sıcaklığa bağlı olarak değişmesi, metal-yarıiletken arayüzü ve TiO_2 ince film katmanının fiziksel ve elektronik yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu değişim, birkaç temel mekanizma ile açıklanabilir. Metal-yarıiletken arayüzü tamamen homojen bir potansiyele sahip değildir. Gerçek Schottky kontaklarında, metal ve yarıiletken arasındaki arayüz, lokal potansiyel dalgalanmalara (mikro ölçekli bariyer yükseklik değişimlerine) sahip olabilir. Bu dalgalanmalar, sıcaklık arttıkça taşıyıcıların daha yüksek enerji bariyerlerini aşabilmesine ve böylece ortalama bariyer yüksekliğinin artmasına neden olur. Düşük sıcaklıklarda, yük taşıyıcılarının termal enerjileri yetersiz hale geldiğinden, metal-yarıiletken arayüzündeki taşıma mekanizması termiyonik emisyon yerine tünelleme etkilerine kayabilir. Düşük bariyer tünelleme mekanizması, düşük sıcaklıklarda daha baskın hale geldiği için, n değeri yükselir ve (Φ_b) düşük kalır. Ancak, sıcaklık arttıkça termiyonik emisyon mekanizması daha etkin hale gelir ve bu durum n 'nin azalmasına, Φ_b 'nin ise artmasına neden olur. Metal-yarıiletken arayüzündeki yüzey durumu yoğunlukları, sıcaklığa bağlı olarak yeniden düzenlenebilir. Özellikle, TiO_2 ve Si arasında oluşan oksit katmanı (SiO_2 gibi), yük taşıyıcılarının arayüzde yeniden birleşmesine ve farklı bariyer yükseklikleri ile karşılaşmasına neden olabilir. Bu durum, özellikle düşük sıcaklıklarda yüksek n değerlerinin gözlemlenmesine yol açar. Seri direnç (R_s), sıcaklığa bağlı olarak değişen önemli bir parametredir. Düşük sıcaklıklarda, metal-yarıiletken temasındaki taşıyıcı saçılmaları daha fazla olduğu için aygıtın toplam seri direnci artabilir. Seri direnç, düşük sıcaklıklarda doğrultma özelliklerini ve bariyer yüksekliği hesaplamalarını etkileyebilir, bu da (n) ve (Φ_b) değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişmesine neden olur.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ heteroyapılarının sıcaklığa duyarlı elektriksel özellikler sergilediğini ve Schottky bariyerinin ideal bir homojenlik göstermediğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, farklı sıcaklık koşullarında çalıştırılacak optik dedektörler, fotosensörler ve güneş pilleri gibi aygıtlar için dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir. Düşük sıcaklıklarda, (n) faktörünün yükselmesi ve bariyer yüksekliğinin düşük kalması, metal-yarıiletken arayüzünde kusurların ve potansiyel dalgalanmaların etkin rol oynadığını göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda, taşıyıcıların daha yüksek enerjilere sahip olması, bariyerin etkin yüksekliğini artırarak, termiyonik emisyon mekanizmasını baskın hale getirmektedir. Bu sıcaklık bağımlılığı, aygıt tasarımında sıcaklık kompanzasyonu sağlayan mühendislik çözümlerinin geliştirilmesini gerektirebilir. Sonuç olarak, $\text{Au/n-TiO}_2/\text{p-Si}$ heteroyapılarının elektriksel performansının sıcaklığa bağlı olarak değiştiği, ideallik faktörünün özellikle düşük sıcaklıklarda yükseldiği ve bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 28. Au/n-TiO₂/p-Si heteroekleminin Richardson ve modifiye Richardson grafikleri.

Heteroyapılar veya Schottky tipi aygıtların sıcaklığa bağlı I - V karakteristiklerinden bariyer yüksekliği hakkında daha ayrıntılı bilgi elde etmek için çeşitli analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri, satürasyon akımı (I_0) ve sıcaklığın (T) bir fonksiyonu olarak incelenmesiyle elde edilen aktivasyon enerjisi grafiğidir. Termiyonik emisyon teorisine göre, $\ln(I_0/T^2)$ ile $1000/T$ 'nin grafiği, bariyer yüksekliği ve Richardson sabiti (A^*) hakkında doğrudan bilgi sağlayabilir.

Bu bağlamda, Şekil 28'de (I_0/T^2) ile $1000/T$ 'nin ve $1000/nT$ 'nin aktivasyon enerjisi grafikleri çizilmiştir. Bu analiz için termiyonik emisyon denkleminde türetilen aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır:

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\Phi_{b0}}{kT} \quad (5)$$

Elde edilen grafikler incelendiğinde, $\ln(I_0/T^2)$ ile $1000/T$ arasında ideal bir doğrusal ilişki gözlemlenmemektedir. Bunun yerine, $1000/nT$ ile $\ln(I_0/T^2)$ arasındaki grafik incelendiğinde belirgin bir doğrusal olmayan davranış ortaya çıkmaktadır. Bu durum, bariyer yüksekliğinin ve ideallik faktörünün sıcaklıkla değiştiğini ve metal-yarıiletken veya TiO₂-Si arayüzünde homojen olmayan bir potansiyel dağılımı bulunduğunu göstermektedir. (Aydoğan *et al.* 2005b).

Bu analizler sonucunda, aktivasyon enerjisi ve Richardson sabiti sırasıyla 0,49 eV ve $3,08 \times 10^{-7} \text{ A cm}^2 \text{ K}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Teorik olarak beklenen Richardson sabiti değeriyle

(yaklaşık $32 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$) elde edilen deneysel değer arasında önemli bir farklılık gözlemlenmektedir. Bu sapma, n-TiO₂ ve p-Si arayüzünde konumsal olarak homojen olmayan bariyer yüksekliklerinden ve arayüzde meydana gelen potansiyel dalgalanmalardan kaynaklanabilir.

Bariyer yüksekliğindeki bu tür dalgalanmalar, metal-yarıiletken temasında ideal olmayan davranışların temel nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle, arayüzdeki kusurlar, lokal yük tuzakları ve potansiyel engeller, yük taşıyıcılarının termiyonik emisyon mekanizmasına göre hareket etmesini engelleyerek, gözlenen doğrusal olmayan davranışa yol açmaktadır. Sonuç olarak, elde edilen sonuçlar, Au/n-TiO₂/p-Si heteroyapısının sıcaklığa bağlı olarak bariyer yüksekliklerinde belirgin değişiklikler gösterdiğini ve arayüzde potansiyel düzensizliklerin etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

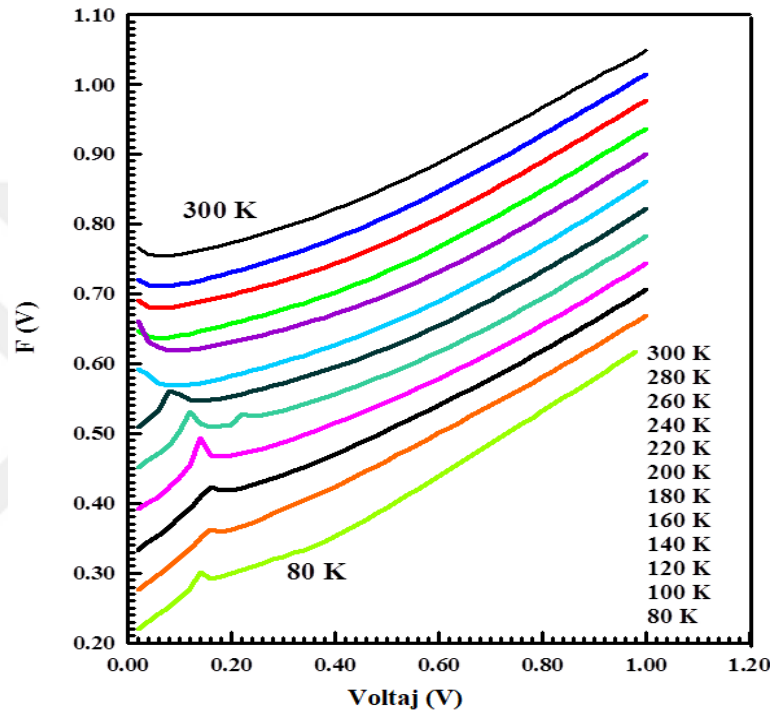
Norde (1979) fonksiyonları, özellikle Schottky diyotları gibi metal-yarıiletken arayüzlerine sahip aygıtların elektriksel parametrelerini analiz etmek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Bu fonksiyonlar, (*I-V*) karakteristiğinden elde edilen verilere dayanarak, aygıtın engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (*R_s*) gibi temel elektriksel parametrelerini hesaplamaya olanak tanır. Norde fonksiyonları, özellikle düşük akım seviyelerinde ve yüksek seri dirençli diyotlarda daha doğru sonuçlar sunmak için ideal yoldur. Aşağıda verilen Norde fonksiyonları yardımıyla temel aygıt parametreleri hesaplanır.

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\beta} - \frac{kT}{q} \quad (6)$$

$$F(V) = \frac{V}{\beta} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (7)$$

Formülde yer alan idealite faktörü (*n*), diyodun düz beslem *InI-V* eğrisinin eğiminden hesaplanır. Φ_b , bariyer yüksekliğini temsil eder ve taşıyıcıların yarıiletken arayüzünü geçme zorluğunu ifade eder. *F(V₀)*, sistemdeki potansiyel enerji dağılımını belirten bir fonksiyondur ve uygulanan voltajın etkisiyle değişen potansiyel yapıyı gözler önüne serer. *V₀*, dışarıdan uygulanan voltajı temsil eder. β , sıcaklık değişimlerine karşı sistemin duyarlılığını ifade eden bir katsayıdır. *k*, Boltzmann sabiti olup termal enerjinin bir ölçüsüdür ve yaklaşık olarak $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ değerindedir. *T*, sistemin sıcaklığını temsil eder ve genellikle Kelvin cinsinden ifade edilir. *q*, elektron yükünü ifade eder ve yaklaşık olarak $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ değerindedir. *A* diyodun etkin alanını (*A*=0.00785 cm²) ve *A** yarıiletkenin Richardson sabitini (p-tip Si için $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$) göstermektedir.

Au/n-TiO₂/p-Si heteroyapısının sıcaklık fonksiyonu olarak $F(V)$ ile V 'nin grafiği, bu çalışmada Şekil 29'de gösterilmiştir. Burada, diyotun engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Bu analizde, Norde fonksiyonu kullanılarak hesaplanan engel yüksekliği (Φ_b) değerleri, eşitlik (6) yardımıyla elde edilmiştir. Hesaplanan sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir. Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen aygıt parametreleri, sıcaklıkla paralel olarak TE yöntemlerinde gözlemlenen benzer değişimleri göstermektedir. Ancak, her iki yöntem arasındaki hesaplama farklılıkları, kullanılan hesaplama tekniklerinin I - V grafiği üzerindeki uygulama alanlarıyla ilişkilidir.

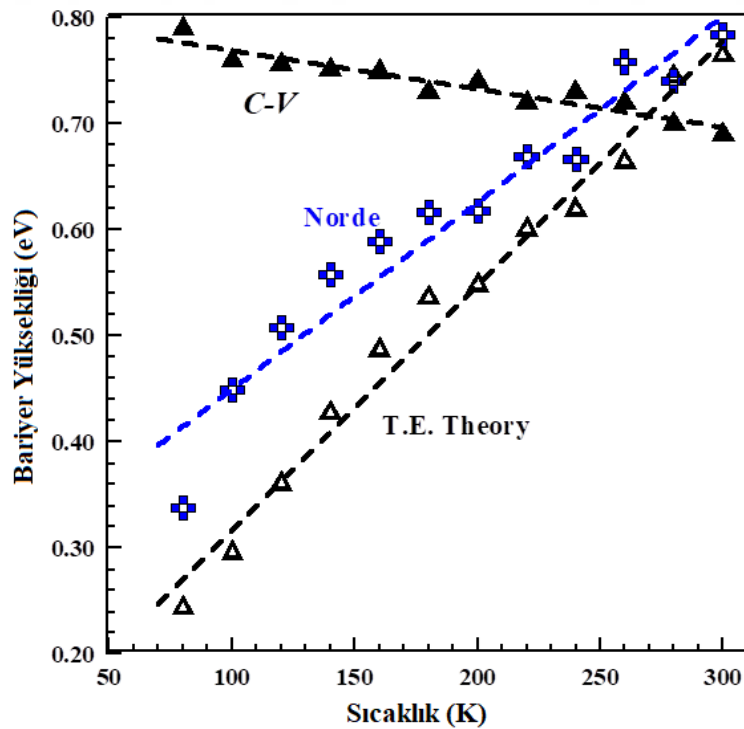


Şekil 29. Au/n-TiO₂/p-Si heteroekleminin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak $F(V)$ - V eğrileri.

Şekil 30'da, Au/TiO₂/p-Si/Al heteroeklem yapısının farklı yöntemler (TE, Norde ve C-V) kullanılarak elde edilen sıcaklığa bağlı engel yüksekliği (Φ_b) değerlerinin değişimi sunulmuştur. Hem termiyonik emisyon (TE) modeli hem de Norde fonksiyonu ile elde edilen veriler, sıcaklık artışıyla birlikte engel yüksekliğinde belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Şekil 30 ve Tablo 2 incelendiğinde, engel yüksekliğinin 80 K ile 300 K arasında 0,33 eV'den 0,78 eV'ye kadar arttığı görülmektedir. Bu eğilim, sıcaklık arttıkça taşıyıcıların enerjisinin yükseldiğini ve buna bağlı olarak, potansiyel bariyerlerin daha etkin bir şekilde aşılabildiğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, termiyonik emisyon mekanizmasının sıcaklığa duyarlı bir süreç olduğunu ve aygıtın elektriksel performansının sıcaklıkla birlikte önemli ölçüde değişebileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda, ana bariyer üzerinden gerçekleşen termiyonik emisyonun etkisi, artan akım yoğunluğu nedeniyle baskın hale gelirken; düşük sıcaklıklarda ise, potansiyel bariyerdeki mikroskobik düzensizliklerin oluşturduğu düşük

bariyerli bölgelerden geçen akım katkısı daha belirgin hâle gelmektedir. Bu durum, engel yüksekliğinin sıcaklıkla birlikte artış göstermesini açıklayan temel etkenlerden biridir. Düşük sıcaklıklarda taşıyıcılar, daha düşük enerjiye sahip bariyerleri aşarken; sıcaklık yükseldikçe bu bariyerler yerini daha yüksek potansiyel engellere bırakmaktadır.

$C-V$ ölçümleri, esas olarak empedans analizine dayanmakta olup, bu yöntemle ortalama engel yüksekliği hesaplanabilmektedir. $I-V$ ölçümleriyle karşılaştırıldığında, $C-V$ yönteminde imaj-kuvvet etkisi gözlenmediğinden, bu yöntemde elde edilen engel yüksekliği genellikle daha yüksek değerlere sahiptir. Ayrıca, $C-V$ ile belirlenen bariyer yüksekliğinin sıcaklığa bağımlılığı, $I-V$ yöntemine kıyasla daha zayıftır. Bu da, farklı karakterizasyon tekniklerinin engel yüksekliği üzerindeki etkilerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Norde fonksiyonu, heteroeklem diyotların elektriksel parametrelerini özellikle sıcaklık bağımlı koşullarda daha doğru ve hassas bir şekilde belirleyebilmek adına etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. TE ve Cheung yöntemlerine kıyasla daha kapsamlı bir analiz imkânı sunan bu yöntem, sıcaklıkla değişen parametrelerin yorumlanmasında avantaj sağlamaktadır. Engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla olan ilişkisi, heteroeklem tabanlı aygıtların farklı çevresel koşullarda nasıl performans gösterdiğini anlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tür analizler, aygıtların daha verimli hâle getirilmesi ve belirli sıcaklık aralıklarında optimize edilmesi adına kritik bilgiler sunmaktadır.

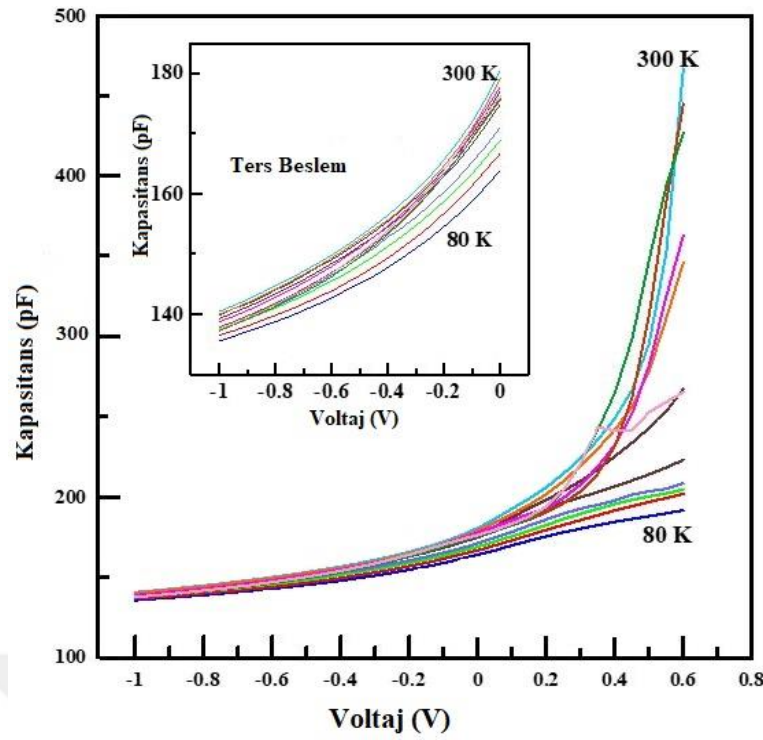


Şekil 30. TE, Norde ve $C-V$ yöntemlerinden elde edilen Au/n-TiO₂/p-Si heteroekleminin Φ_b-T grafikleri.

Tablo 2. n-TiO₂/p-Si'nin Sıcaklığa Bağlı Deneysel Aygıt Parametreleri.

Sıcaklık. (K)	$n_{(I-V)}$	$\Phi_{(I-V)}eV$	$\Phi_{(Norde)}eV$	$\Phi_{(C-V)}eV$
80	4.94	0.24	0.34	0.79
100	4.58	0.30	0.45	0.76
120	4.46	0.36	0.51	0.76
140	3.42	0.43	0.56	0.75
160	2.95	0.49	0.59	0.75
180	2.80	0.54	0.62	0.73
200	3.14	0.55	0.62	0.74
220	2.95	0.60	0.67	0.72
240	3.27	0.62	0.67	0.73
260	3.19	0.66	0.76	0.72
280	3.18	0.75	0.74	0.70
300	3.17	0.75	0.78	0.69

Şekil 31, Au/n-TiO₂/p-Si heteroyapılarının ters ve düz beslem kapasitans-voltaj-sıcaklık (C-V-T) grafiklerini -1V ile -0V arasındaki voltaj aralığında göstermektedir. Bu ölçümler, 500 kHz frekansta gerçekleştirilmiş olup, aygıtın kapasitans değerlerinin sıcaklık ve voltaj değişimleriyle nasıl etkilendiği açıkça gözlemlenmektedir. Kapasitans değeri, hem uygulanan ters voltaj hem de sıcaklık koşullarıyla belirgin bir şekilde değişim göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda, kapasitansın artışı, n-TiO₂ ile p-Si arasındaki ara yüzeyde meydana gelen tuzaklanma veya tuzaktan çıkma süreçleriyle ilişkilendirilebilir. Bu süreçler, yüzey durumlarının yoğunluğunun ve taşıyıcıların dinamiklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini yansıtarak, materyalin elektriksel özelliklerine önemli bir etki yapmaktadır (Aydoğan vd., 2008a). Ayrıca, yüksek ters voltaj (-1V) ve düşük sıcaklıklarda kapasitansın azalması, iyonizasyon süreçlerinin sonucunda arayüzey yüklerinin alternatif akım (a.c) sinyaline yanıt verme hızının düşük olmasına bağlanabilir. Düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların hareketliliği ve iyonizasyon reaksiyonlarının etkinliği azaldığı için, kapasitansın daha düşük değerler göstermesi beklenir. Bu durum, özellikle düşük sıcaklıklarda, aygıtın yanıt verme kapasitesinin ve elektriksel iletkenliğinin azaldığını gösteren önemli bir bulgudur (Aydoğan vd., 2008b).



Şekil 31. Au/n-TiO₂/p-Si heteroekleminin C-V-T grafikleri.

Şekil 32, 500 kHz frekansında Au/n-TiO₂/p-Si heteroekleminin $1/C^2$ -V-T eğrilerini göstermektedir. Bu eğriler, ters yönde voltaj uygulandığında (-1 V ile 0 V arasında) neredeyse doğrusal bir davranış sergilemektedir. Ancak bu doğrusal eğilimde gözlemlenen kısmi sapmalar, n-TiO₂ ile p-Si arasındaki arayüzde meydana gelen artık kapasitansla açıklanabilir (Rawat *et al.* 2016). Bu, heteroeklemdeki arayüzdeki yüzey durumlarının veya tuzakların kapasitans üzerinde etkili olduğunu gösterir.

Kapasitansın voltajla ilişkisini açıklayan denklem (8), yarıiletkenlerde ters yönde uygulanan gerilim ile kapasitansın karesi arasındaki ters orantılı ilişkiyi tanımlar. Bu denklemde, uygulanan ters voltaj, eklemdeki boşaltma bölgesini genişleterek kapasitansın düşmesine neden olur.

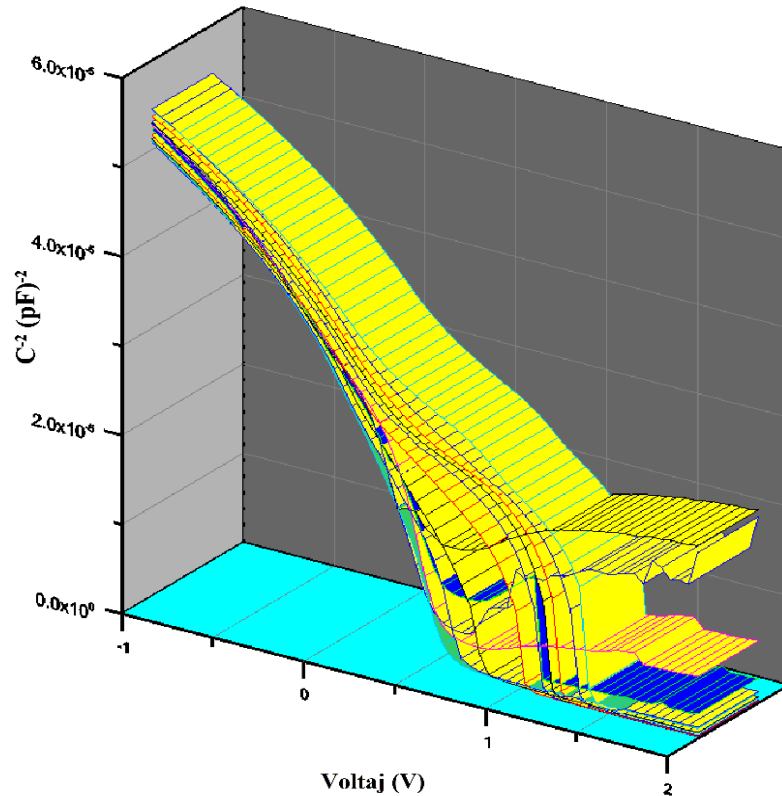
$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{q\epsilon_s A^2 N_d} \quad (8)$$

Burada C, heteroeklemdeki toplam kapasitansı ifade eder. V_d , eklemdeki doğal potansiyel farkını ve yarıiletkenin dahili potansiyel bariyerini temsil eder. V, ters beslem bölgesinde uygulanan gerilimdir. q , elektron yüküdür. ϵ_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti olup, kullanılan malzemenin yalıtkanlık özelliklerini tanımlar. A, aygıtın yüzey alanıdır. N_d , p-tipi yarıiletkenindeki akseptör iyonlarının yoğunluğudur.

Ters beslem $1/C^2-V$ eğrisinden, heteroyapıdaki bariyer yüksekliği şu şekilde hesaplanabilir.

$$\Phi_b(C-V) = V_d + V_n \quad (9)$$

Burada V_n , Fermi seviyesinin ve yarıiletkenin iletkenlik bandının arasındaki potansiyel farkını ifade eder. $C-V$ ölçümlerinden ($1/C^2-V$ grafiği) elde edilen sıcaklığa bağlı bariyer yüksekliği Şekil 32’de ve Tablo 2’de verilmiştir. Aygıtın bariyer yüksekliği, 0,69 eV ile 0,79 eV arasında değişmektedir. $\Phi_b(C-V)(T=0K)$ değeri $\Phi_b(C-V)-T$ grafiğinin doğrusal ekstrapolasyonu kullanılarak 0.805 eV olarak belirlenmiştir. Bariyer yüksekliğindeki değişim, sıcaklık değişimi ile uyumludur. Ancak, $I-V$ ve $C-V$ ölçümlerinden elde edilen bariyer yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişimi farklılık göstermektedir. Bu farklılık, Mampa ve arkadaşları (Sharma and Tripathi, 2012) tarafından, $I-V$ ölçümlerinde kullanılan düz beslem voltajı ile $C-V$ ölçümlerinde kullanılan ters yöndeki voltajın etkisiyle açıklanmıştır. $C-V$ ölçümleri, ortalama bariyer yüksekliğini ölçerken, etkin Schottky etkisinin $I-V$ ölçümlerinde etkin olması nedeniyle, bariyer yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi $C-V$ ’den daha yüksektir. Bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla azalmasının ve sıcaklık katsayısının negatif hale gelmesinin nedeni, genellikle Schottky aygıtın akım-voltaj karakteristiğini incelerken gözlemlenen bir olaydır. Bu, özellikle $\log(I) - V$ grafiğinde, sıcaklık arttıkça eğimin azalması ve bariyer yüksekliğinin düşmesiyle ilişkilidir (Zhu *et al.* 1999).



Şekil 32. 500 kHz frekansta n-TiO₂/p-Si heteroeklemlerinin $1/C^2-V-T$ grafikleri.

TARTIŞMA ve SONUÇ

Au/n-TiO₂/p-Si heteroyapısının yapılan çeşitli analizlerle elde edilen sonuçları, bu yapının başarılı bir şekilde tasarlandığını ve optoelektronik uygulamalarda kullanılabilirliğini göstermektedir. X-Işını Fotoelektron Spektrumları (XPS) analizi, TiO₂'nin bağlanma enerjilerinin 458,6 eV ve 464,4 eV olarak ölçüldüğünü, bu değerlerin Ti_{2p}_{3/2} ve Ti_{2p}_{1/2} spin-yörünge çiftlerine karşılık geldiğini belirterek, heteroyapının başarılı bir şekilde kaplandığını doğrulamaktadır. Taramalı Tünelleme Mikroskobu (STM) ile gerçekleştirilen yüzey morfolojisi incelemeleri, TiO₂ tabakasının düzgün ve düzenli granüller içerdiğini göstermiştir. Bu, kaplamanın homojen olduğunu ve yapısal bütünlüğünü koruduğunu ortaya koymaktadır. X-Işını Kırınımı (XRD) sonuçları, TiO₂'nin anataz fazında olduğunu ve belirgin zirveler ile bu durumu doğruladığını göstermiştir; aynı zamanda TiO₂ filmlerin polikristal ve tetragonal kristal yapısına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Soğurma spektrumları (UV-vis), TiO₂ tabakasının 250-450 nm arasında belirgin bir soğurma bölgesi gösterdiğini ve band aralığı enerjisinin yaklaşık 3,3 eV olduğunu ortaya koymuştur. Bu değer, TiO₂'nin optik özelliklerinin anataz fazındaki TiO₂ ile uyumlu olduğunu göstermektedir. *I-V* ölçümleri ışık altında, özellikle ters beslemde yüksek bir fotohassasiyet gösterdiğini ve güneş pilleri ile fotodetektörler gibi optik uygulamalarda potansiyel kullanımını desteklediğini ortaya koymuştur.

Verilen elektriksel ölçüm verileri ışığında, Au/n-TiO₂/p-Si heteroyapısının optoelektronik performansı üzerinde, bir değerlendirme yapılmıştır. 15 farklı heteroeklemde yapılan deneysel ölçümler, idealite faktörü (*n*) değerlerinin 2,49 ile 4,23 arasında değiştiğini ortaya koymuştur. Bu geniş değer aralığı, heteroyapının elektriksel özelliklerinin bir dizi parametreye bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Bu faktörler arasında TiO₂ ara katmanı, görüntü yük kuvveti etkisi, bariyer yüksekliğinin uygulama voltajına bağımlılığı, seri direnç etkileri, ara yüzey kusurları ve malzeme homojenliği gibi önemli etkenler bulunmaktadır. TiO₂ tabakasının varlığı, heteroyapının elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkileyerek idealite faktörünün artmasına neden olabileceği bildirilmiştir. Bu bağlamda TiO₂ heteroeklem aygıtların performansını doğrudan şekillendiren faktörler arasında yer almaktadır.

Elektriksel özelliklerinin yanı sıra, heteroyapının ışığa karşı gösterdiği yüksek fotoduyarlılık dikkat çekicidir. *I-V* ölçümleri sonucunda, ters beslem altında (*-I V*), karanlık ortamda ölçülen akımın 3.43×10^{-9} A olduğu, ışık altında ise 4.50×10^{-7} A'ya çıktığı

gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, ışık altında ters akımın yaklaşık iki büyüklük mertebesinde artış gösterdiğini ve dolayısıyla heteroyapının fotoduyarlılığının son derece yüksek olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle, TiO_2 'nin geniş band aralığı ve foton emilimi kapasitesinin yüksekliği, foton enerjisi yeterli olduğunda etkin bir şekilde yük taşıyıcıları üreterek fotoakım oluşturmaya olanak tanımaktadır. Bu durum, heteroyapının fotodiyotlar ve fotosensörler gibi optoelektronik aygıtlar için güçlü bir aday olmasını sağlamakta, aynı zamanda fotovoltaiik uygulamalar dışında da kullanımı için potansiyel sunmaktadır.

Düz beslem altındaki ölçümler, ışık ve karanlık ortamda neredeyse aynı akım değerlerinin gözlemlendiğini göstermektedir. Bu özellik, yapının foton algılama yeteneğini kuvvetlendirmekte ve optoelektronik aygıtların geliştirilmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Sıcaklığa bağlı I - V ölçümleri, 80-300 K sıcaklık aralığında yapılmış, sıcaklık arttıkça taşıyıcı hareketliliğinin arttığını ve bunun sonucunda akımın arttığını göstermektedir. Bu veriler, sıcaklık değişimlerinin heteroeklem aygıtlarının elektriksel parametrelerini nasıl etkilediğini anlamada önemli bir rol oynamaktadır. Sıcaklık arttıkça, idealite faktörünün (n) azaldığı ve bariyer yüksekliğinin (Φ_b) arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, heterojen metal-yarıiletken arayüzünün sıcaklıkla değişen özelliklerine işaret etmektedir ve bu özelliklerin, aygıtın elektriksel performansını sıcaklık koşullarına bağlı olarak değiştirdiği ortaya koymuştur. TiO_2 -Si arayüzündeki homojen olmayan yapı, taşıyıcıların farklı potansiyel bariyerleriyle karşılaşmalarına yol açarak, sıcaklıkla birlikte bariyer yüksekliğini etkileyen bir faktör haline gelmektedir.

Özellikle Norde fonksiyonu ile hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin, sıcaklık arttıkça 0,33 eV'den 0,78 eV'ye kadar yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu bulgu, termiyonik emisyonun sıcaklıkla uyumlu bir şekilde arttığını ve aygıtın performansının sıcaklık değişimlerine duyarlı olduğunu göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda, bariyer üzerindeki termiyonik emisyon etkisi, akım yoğunluğunun artmasına neden olmakta, ancak düşük sıcaklıklarda bu etki azalmakta ve taşıyıcılar daha küçük bariyerleri aşabilmektedir. Sonuç olarak, engel yüksekliğinin sıcaklıkla artması, yük taşıyıcılarının artan sıcaklıkla termal enerjilerinin artmasına atfedildi. Yani yüksek sıcaklıklara doğru gittikçe yük taşıyıcıları daha yüksek bariyerlerden geçmektedir. Norde fonksiyonu, ideale yakın heteroeklem diyetlerinin elektriksel parametrelerini daha hassas bir şekilde hesaplamak için etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Aygıtın kapasitans-voltaj-sıcaklık ($C-V-T$) özellikleri de kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. 500 kHz frekansta gerçekleştirilen ölçümler, kapasitans değerlerinin sıcaklık ve voltaj değişimleriyle nasıl etkilendiğini açıkça ortaya koymuştur. Yüksek sıcaklıklarda kapasitansın artışı, n-TiO₂ ile p-Si arasındaki ara yüzeyde meydana gelen tuzaklanma veya tuzaktan çıkma süreçleriyle ilişkilidir. Bu süreçler, yüzey durumlarının yoğunluğunun ve taşıyıcıların dinamiklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini yansıtarak, materyalin elektriksel özellikleri üzerinde belirgin bir etki oluşturmaktadır. Düşük sıcaklıklarda, kapasitansın azalması, iyonizasyon süreçlerinin etkinliğinin ve taşıyıcı mobilitelerinin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, düşük sıcaklıklarda aygıtın yanıt verme kapasitesinin azaldığını ve elektriksel iletkenliğinin düştüğünü göstermektedir.

Sonuç olarak, Au/n-TiO₂/p-Si heteroyapıları, yüksek fotoduyarlılık, sıcaklık değişimlerine duyarlılık ve ışık altında etkin fotoakım üretme kapasitesiyle dikkat çekmektedir. Bu özellikler, heteroyapıların fotodiyotlar, fotosensörler ve diğer optoelektronik aygıtlar için önemli bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu heteroyapıların elektriksel parametreleri üzerindeki sıcaklık etkileri, aygıtın performansının geliştirilmesi ve optimize edilmesi açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Elde edilen veriler, TiO₂ tabanlı heteroyapıların, özellikle ışık altında yüksek hassasiyetle çalışan optoelektronik aygıtlar için gelecekteki potansiyelini desteklemektedir.

KAYNAKLAR

- Abd Ali, A., Fadhil, D. H., Yousif, E., Hussain, Z., & Abdul-Wahab, S. (2017). A comprehensive study of conductive polymer matrix composites: a review. *Research Journal of Pharmaceutical Biological and Chemical Sciences*, 8(2), 2043-2049.
- Akkılıç, K., Türüt, A., Cankaya, G., & Kılıçoğlu, T. (2003). Correlation between barrier heights and ideality factors of Cd/n-Si and Cd/p-Si Schottky barrier diodes. *Solid State Communications*, 125(10), 551-556.
- Alig, T., Jensen, L., & Ristau, D. (2018, June). Fluorescence studies on optical coatings. In *Advances in Optical Thin Films VI* (Vol. 10691, pp. 254-259). SPIE.
- Araujo, J. V. D. S., Milagre, M., & Costa, I. (2024). A historical, statistical and electrochemical approach on the effect of microstructure in the anodizing of Al alloys: a review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 49(4), 521-581.
- Arier, Ü. Ö. A., & Tepehan, F. Z. (2011). Controlling the particle size of nanobrookite TiO₂ thin films. *Journal of alloys and compounds*, 509(32), 8262-8267.
- Asahi, R. Y. O. J. I., Morikawa, T. A. K. E. S. H. I., Ohwaki, T., Aoki, K., & Taga, Y. (2001). Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides. *science*, 293(5528), 269-271.
- Askerden, M. K., Akdemir, A., Karabörk, F., & Yazman, Ş. (2023). Nano çinko oksit partikül katılan epoksi kaplamaların mekanik ve antikorozyon özelliklerinin incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28(1), 11-24.
- Aydoğan, Ş. (2014). *Katılmal fizik*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Aydoğan, Ş., Çınar, K., Asıl, H., Coşkun, C., & Türüt, A. (2009). Electrical characterization of Au/n-ZnO Schottky contacts on n-Si. *Journal of Alloys and Compounds*, 476(1-2), 913-918.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., & Türüt, A. (2008a). Some electrical properties of polyaniline/p-Si/Al structure at 300 K and 77 K temperatures. *Microelectronic Engineering*, 85(2), 278-283.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., & Türüt, A. (2008b). Reverse bias capacitance-voltage characteristics of Al/polyaniline/p-Si/Al structure as a function of temperature. *Journal of non-crystalline solids*, 354(45-46), 4991-4995.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., & Türüt, A. (2005b). On the barrier inhomogeneities of polyaniline/p-Si/Al structure at low temperature. *Applied surface science*, 250(1-4), 43-49.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., Türüt, A., & Onganer, Y. (2005a). The effects of the temperature on current-voltage characteristics of Sn/polypyrrole/n-Si structures. *Synthetic metals*, 150(1), 15-20.
- Bard, A. J., Faulkner, L. R., & White, H. S. (2022). *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Bardeen, J., Brattain, W. H., & Shockley, W. (1948). The invention of the transistor. *Bell System Technical Journal*, 28(1), 1-58.

- Bilgili, A. K., Öztürk, M. K., Özçelik, S., & Özer, M. (2021). TiO₂ interface instead of SiO₂ in terms of dielectric coefficient. *Brazilian Journal of Physics*, 51, 527-531.
- Biswas, A., Bayer, I. S., Biris, A. S., Wang, T., Dervishi, E., & Faupel, F. (2012). Advances in top-down and bottom-up surface nanofabrication: Techniques, applications & future prospects. *Advances in colloid and interface science*, 170(1-2), 2-27.
- Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M., & Timbus, A. V. (2006). Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 53(5), 1398-1409.
- Braun, F. (1875). Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle. *Annalen der Physik und Chemie*, 153(12), 556-563.
- Brinker, C. J. (2013). Dip coating. In *Chemical solution deposition of functional oxide thin films* (pp. 233-261). Vienna: Springer Vienna.
- Card, H. C., & Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1589.
- Castillejo, F., Olaya, J. J., & Alfonso, J. E. (2019). Wear and corrosion resistance of chromium-vanadium carbide coatings produced via thermo-reactive deposition. *Coatings*, 9(4), 215.
- Curie, J., & Curie, P. (1880). Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémiedres à faces inclinées. *Bulletin de minéralogie*, 3(4), 90-93.
- Çalığülü, U., Orhan, A., Barlas, Z., & Darcan, N. (2021). Döndürerek Kaplama Yöntemi ile Hazırlanan Ca katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Optik ve Morfolojik Özellikleri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 315-327.
- Dikici, M. (1993). *Katıhal fiziğine giriş*. Samsun: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları.
- El-Maghraby, E. M., Nakamura, Y., & Rengakuji, S. (2008). Composite TiO₂-SnO₂ nanostructured films prepared by spin-coating with high photocatalytic performance. *Catalysis Communications*, 9(14), 2357-2360.
- Famiyeh, L., & Huang, X. (2019). Plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum alloys: microstructures, properties, and applications. *Mod. Concepts Mater. Sci*, 2(1), 000526.
- Feng, X., Zhai, J., & Jiang, L. (2005). The fabrication and switchable superhydrophobicity of TiO₂ nanorod films. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(32), 5115-5118.
- Figueira, R. B. (2020). Hybrid sol-gel coatings for corrosion mitigation: A critical review. *Polymers*, 12(3), 689.
- Fujishima, A., Hashimoto, K., & Watanabe, T. (1999). *TiO₂ photocatalysis: Fundamentals and applications*. Tokyo: BKC., 176 p, Japan
- Gimenez, S. P., & Galembeck, E. H. S. (2023). The Electrical Characteristics of the Semiconductor at High Temperatures. In *Differentiated Layout Styles for MOSFETs: Electrical Behavior in Harsh Environments* (pp. 27-39). Cham: Springer International Publishing.
- Green, M. A. (2006). *Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Grilli, M. L., Yılmaz, M., Aydoğan, S., & Cirak, B. B. (2018). Room temperature deposition of XRD-amorphous TiO₂ thin films: Investigation of device performance as a function of temperature. *Ceramics International*, 44(10), 11582-11590.

- Guan, K. (2005). Relationship between photocatalytic activity, hydrophilicity and self-cleaning effect of TiO₂/SiO₂ films. *Surface and Coatings Technology*, 191(2-3), 155-160.
- Hamedani, Y., Macha, P., Bunning, T. J., Naik, R. R., & Vasudev, M. C. (2016). Plasma-enhanced chemical vapor deposition: where we are and the outlook for the future. In *Chemical Vapor Deposition-Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices*. IntechOpen.
- Hameş, Y., & San, S. E. (2004). CdO/Cu₂O solar cells by chemical deposition. *Solar Energy*, 77(3), 291-294.
- Haring, A., Morris, A., & Hu, M. (2012). Controlling morphological parameters of anodized titania nanotubes for optimized solar energy applications. *Materials*, 5(10), 1890-1909.
- Hoşcan, Y., Ortal, Ö., & Hepkul, A. (2010). Yönetim Bilgi Sistemi (5th ed.). Eskişehir Anadolu Üniversitesi, 308s, Eskişehir.
- Hu, Y., & Yuan, C. (2005). Low-temperature preparation of photocatalytic TiO₂ thin films from anatase sols. *Journal of Crystal Growth*, 274(3-4), 563-568.
- Humayun, M., Raziq, F., Khan, A., & Luo, W. (2018). Modification strategies of TiO₂ for potential applications in photocatalysis: a critical review. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 11(2), 86-102.
- İzmir, M., Tufan, Y., & Ercan, B. (2019). Interaction of anodized Ti6Al7Nb with simulated body fluid.
- Kangallı, A. (2018). *Düşük sıcaklıkta kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemiyle epitaksiyel SiGe film büyüme ve film karakterizasyonu* MS Thesis, Hacettepe University. Hacettepe University.
- Kar, A., Smith, Y. R., & Subramanian, V. (2009). Improved photocatalytic degradation of textile dye using titanium dioxide nanotubes formed over titanium wires. *Environmental science & technology*, 43(9), 3260-3265.
- Karuppasamy, A., & Subrahmanyam, A. (2007). Studies on electrochromic smart windows based on titanium doped WO₃ thin films. *Thin Solid Films*, 516(2-4), 175-178.
- Keronite. (2024). *A comparison of aluminium alloy surface coating options*. Keronite Blog. <https://blog.keronite.com/a-comparison-of-aluminium-alloy-surface-coating-options> (20.06.2025).
- Kim, S. H., Jung, C. Y., Kim, H., Cho, Y., & Kim, D. W. (2015). Forward current transport mechanism of Cu Schottky barrier formed on n-type Ge Wafer. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 16(3), 151-155.
- Kittel, C., & McEuen, P. (2018). *Introduction to solid state physics*. John Wiley & Sons.
- Korucu, D., Turut, A., Turan, R., & Altındal, Ş., (2013). Origin of forward bias capacitance peak and intersection behavior of C and G/w of Ag/p-InP Schottky barrier diodes. *Materials science in semiconductor processing*, 16(2), 344-351.
- Lashmi, P. G., Ananthapadmanabhan, P. V., Unnikrishnan, G., & Aruna, S. T. (2020). Present status and future prospects of plasma sprayed multilayered thermal barrier coating systems. *Journal of the european ceramic society*, 40(8), 2731-2745.
- Lei, L., Kovacevich, D. A., Nitzsche, M. P., Ryu, J., Al-Marzoki, K., Rodriguez, G., ... & Singer, J. P. (2018). Obtaining thickness-limited electrospray deposition for 3D coating. *ACS applied materials & interfaces*, 10(13), 11175-11188.

- Leroy, W. P., Opsomer, K., Forment, S., & Van Meirhaeghe, R. L. (2005). The barrier height inhomogeneity in identically prepared Au/n-GaAs Schottky barrier diodes. *Solid-state electronics*, 49(6), 878-883.
- Li, H., Cao, L., Liu, W., Su, G., & Dong, B. (2012). Synthesis and investigation of TiO₂ nanotube arrays prepared by anodization and their photocatalytic activity. *Ceramics International*, 38(7), 5791-5797.
- Lin, S. W., Chang, S. C., Liu, R. S., Hu, S. F., & Jan, N. T. (2004). Fabrication and magnetic properties of nickel nanowires. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 282, 28-31.
- Liu, X., Chu, P. K., & Ding, C. (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 47(3-4), 49-121.
- Liu, Y., Zhu, H., Xing, L., Bu, Q., Ren, D., & Sun, B. (2023). Recent advances in inkjet-printing technologies for flexible/wearable electronics. *Nanoscale*, 15(13), 6025-6051.
- Machado, N. R. F., & Santana, V. S. (2005). Influence of thermal treatment on the structure and photocatalytic activity of TiO₂ P25. *Catalysis Today*, 107, 595-601.
- Mallik, A. K. (2013). Photodiode. *Himalayan Physics*, 4, 95-98.
- Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew Publishing.
- Mo, S. D., & Ching, W. Y. (1995). Electronic and optical properties of three phases of titanium dioxide: Rutile, anatase, and brookite. *Physical review B*, 51(19), 13023.
- Nakata, K., & Fujishima, A. (2012). TiO₂ photocatalysis: Design and applications. *Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13(3), 169-189.
- Nasiri-Tabrizi, B., Zalnezhad, E., Pingguan-Murphy, B., Basirun, W. J., Hamouda, A. M. S., & Baradaran, S. (2015). Structural and morphological study of mechanochemically synthesized crystalline nanoneedles of Zr-doped carbonated chlorapatite. *Materials Letters*, 149, 100-104.
- Neamen, D. A. (2012). *Semiconductor physics and devices Basic principles* (4th ed). New York: McGraw-Hill higher education.
- Norde, H. (1979). A modified forward IV plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of applied physics*, 50(7), 5052-5053.
- Özdemir, A. F., Türüt, A., & Kokce, A. (2003). The interface state energy distribution from capacitance–frequency characteristics of gold/n-type Gallium arsenide Schottky barrier diodes exposed to air. *Thin Solid Films*, 425(1-2), 210-215.
- Parrino, F., & Palmisano, L. (Eds.). (2020). *Titanium dioxide (TiO₂) and its applications*. Elsevier.
- Phipps, C. (Ed.). (2007). *Laser ablation and its applications* (Vol. 129). Springer.
- Rawat, G., Somvanshi, D., Kumar, Y., Kumar, H., Kumar, C., & Jit, S. (2016). Electrical and ultraviolet-A detection properties of E-beam evaporated n-TiO₂ capped p-Si nanowires heterojunction photodiodes. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 16(1), 49-57.
- Reyes-Coronado, D., Rodríguez-Gattorno, G., Espinosa-Pesqueira, M. E., Cab, C., De Coss, R. D., & Oskam, G. (2008). Phase-pure TiO₂ nanoparticles: anatase, brookite and rutile. *Nanotechnology*, 19(14), 145605.
- Rhoderick, E. H., & Williams, R. H. (1988). *Metal-semiconductor contacts*. Clarendon Press.

- Richter, C. P. (2008). Titania nanotubes for solar energy and catalysis. *Ph. D. Thesis*.
- Schlesinger, M., & Paunovic, M. (2010). *Modern electroplating* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Sharath Kumar, J., Kumar, R., & Verma, R. (2024). Surface modification aspects for improving biomedical properties in implants: a review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 37(2), 213-241.
- Sharma, M., & Tripathi, S. K. (2012). Study of barrier inhomogeneities in I–VT and CVT characteristics of Al/Al₂O₃/PVA: n-ZnSe metal–oxide–semiconductor diode. *Journal of Applied Physics*, 112(2).
- Streetman, B. G., & Banerjee, S. (2000). *Solid state electronic devices* (Vol. 4, pp. 202-203). New Jersey: Prentice hall.
- Sulka, G. D. (2020). Introduction to anodization of metals. In *Nanostructured Anodic Metal Oxides* (pp. 1-34). Elsevier.
- Sulka, G. D., Kapusta-Kołodziej, J., Brzózka, A., & Jaskuła, M. (2010). Fabrication of nanoporous TiO₂ by electrochemical anodization. *Electrochimica Acta*, 55(14), 4359-4367.
- Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M. R., & Graham, W. R. (1991). Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. *Journal of applied physics*, 70(12), 7403-7424.
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). LEDs and lasers. *Physics of semiconductor devices*, 3, 601-657.
- Sze, S. M., Li, Y., & Ng, K. K. (2021). *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons.
- Tataroğlu, A., & Altındal, Ş. (2006). Characterization of current–voltage (I–V) and capacitance–voltage–frequency (C–V–f) features of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectronic engineering*, 83(3), 582-588.
- Taur, Y., & Ning, T. H. (2021). *Fundamentals of modern VLSI devices*. Cambridge university press.
- Tıǧlı, S. (2000). ZrO₂-TiO₂ ince filmlerinin oluşturulması ve karakterizasyonu.
- Tongwanichniyom, S., & Witit-Anun, N. (2014). Structural and Optical Properties of Anatase-TiO₂ Sputtered nano-Thin Films. *Advanced Materials Research*, 979, 370-373.
- Toygun, Ş., Köneçoğlu, G., & Kalpaklı, Y. (2013). General principles of sol-gel. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 31(4), 456-476.
- Tung, R. T., Sullivan, J. P., & Schrey, F. (1992). On the inhomogeneity of Schottky barriers. *Materials Science and Engineering: B*, 14(3), 266-280.
- Türhan, İ. (2000). TiO₂ ve katkılı TiO₂ ince filmlerinin hazırlanması ve karakterizasyonu.
- Türüt, A. (2020). On current-voltage and capacitance-voltage characteristics of metal-semiconductor contacts. *Turkish Journal of Physics*, 44(4), 302-347.
- Ünal, F., Kurt, M. S., & Durdu, S. (2022). Investigation of the effect of light on the electrical parameters of Si/TiO₂ heterojunctions produced by anodic oxidation on p-type Si wafer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(19), 15834-15847.
- Veiga, C., Davim, J. P., & Loureiro, A. J. R. (2012). Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 32(2), 133-148.
- Voon, L. C. L. Y., & Willatzen, M. (2009). *The kp method: electronic properties of semiconductors*. Springer Science & Business Media.

- Wang, X., Feng, J. I., Bai, Y., Zhang, Q., & Yin, Y. (2016). Synthesis, properties, and applications of hollow micro-/nanostructures. *Chemical reviews*, 116(18), 10983-11060.
- Wang, Y., Li, W., & Lu, J. (2009). A new node voltage stability index based on local voltage phasors. *Electric Power Systems Research*, 79(1), 265-271.
- Werner, J. H., & Güttler, H. H. (1991). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of applied physics*, 69(3), 1522-1533.
- Wilkinson, N. J., Smith, M. A. A., Kay, R. W., & Harris, R. A. (2019). A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 4599-4619.
- Wolf, S., & Tauber, R. N. (2000). *Silicon Processing for the VLSI Era* (Vol. 1). Lattice Press.
- Xia, B., Huang, H., & Xie, Y. (1999). Heat treatment on TiO₂ nanoparticles prepared by vapor-phase hydrolysis. *Materials Science and Engineering: B*, 57(2), 150-154.
- Yilmaz, O., Dalmis, R., Dikici, T., & Ebeoglugil, M. F. (2023). Development of structural colored TiO₂ thin films by varied etching solutions. *Materials Research Express*, 10(5), 056401.
- Yurddaskal, M., Ozmen, U., Kir, M., & Baba, B. O. (2018). The effect of foam properties on vibration response of curved sandwich composite panels. *Composite Structures*, 183, 278-285.
- Zhang, L. C., Chen, L. Y., & Wang, L. (2020). Surface modification of titanium and titanium alloys: technologies, developments, and future interests. *Advanced Engineering Materials*, 22(5), 1901258.
- Zhou, J., Guo, Y., Wang, Y., Ji, Z., Zhang, Q., Zhuo, F., ... & Fu, Y. (2023). Flexible and wearable acoustic wave technologies. *Applied Physics Reviews*, 10(2).
- Zhou, Z., Song, J., Yu, Y., Xu, Q., & Zhou, X. (2023). Research on high-quality control technology for three-phase PWM rectifier. *Electronics*, 12(11), 2417.
- Zhu, S., Van Meirhaeghe, R. L., Detavernier, C., Ru, G. P., Li, B. Z., & Cardon, F. (1999). A BEEM study of the temperature dependence of the barrier height distribution in PtSi/n-Si Schottky diodes. *Solid state communications*, 112(11), 611-615.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Murat KOCA
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Lisesi (YDA) 2003-2007
Lisans:	Fizik Öğretmenliği 2008-2012 Fen Bilgisi Öğretmenliği 2014-2024
Yüksek lisans:	Fizik Anabilim Dalı (2012-
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
-Emniyet Mensubu	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
- Koca, M., Kudaş, Z., Ekinci, D., & Aydoğan, Ş. (2021). Performance improvement of n-TiO₂/p-Si heterojunction by forming of n-TiO₂/polyphenylene/p-Si anisotype sandwich heterojunction. <i>Materials Science in Semiconductor Processing</i>, 121, 105436. - Koca, M., Yilmaz, M., Ekinci, D., & Aydoğan, Ş. (2021). Light sensitive properties and temperature-dependent electrical performance of n-TiO₂/p-Si anisotype heterojunction electrochemically formed TiO₂ on p-Si. <i>Journal of Electronic Materials</i>, 50(9), 5184-5195.	