



**Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si SCHOTTKY YAPILARIN IŞIĞA BAĞLI
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Oray ÜSTÜN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FOTONİK BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Oray ÜSTÜN

04/06/2024

Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si SCHOTTKY YAPILARIN IŞIĞA BAĞLI ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Oray ÜSTÜN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2024

ÖZET

Bu tez çalışmasının ana amacı metal-yarıiletken (MS) yapıdaki Au/n-Si ve metal-polimer-yarıiletken (MPS) yapıdaki Au/(ZnO:CeO₂:PVP)/n-Si Schottky bariyer diyotlarını (SBDs) aynı koşullar altında aynı n-Si alttaş üzerinde üreterek, (ZnO:CeO₂:PVP) organik arayüzey katmanının MS yapıli SBD'nin elektriksel ve optik performansını artırıp arttırmadığını incelemektir. Bu amaçla CeO₂ ve ZnO nanoyapıları ultrasonik destekli yöntem (UAM) kullanılarak sentezlendi ve ardından X-ışını kırınımı (XRD), ultraviyole görünür (UV-Vis) spektroskopisi ve Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi kullanılarak analiz edildi. XRD analizinden elde edilen veriler ile Debye-Scherrer yöntemi kullanılarak CeO₂ ve ZnO nanoyapıları için ortalama mikron altı parçacık boyutları belirlendi. XRD analizinden elde edilen veriler ile kristalit boyutlarını tahmin etmek ve kristal kafesler içindeki mikro gerinimlerin değerlerini tespit etmek için Williamson-Hall (WH) yöntemi kullanılmıştır. CeO₂ ve ZnO nanoyapıları için optik bant aralığı değerleri Tauc grafiği yöntemi kullanılarak hesaplandı. Daha sonra, üretilen SBD'lerin elektriksel özellikleri, $\pm 5V$ 'luk geniş bir voltaj aralığında, oda sıcaklığında hem karanlıkta hem de 100 mW/cm² ışık şiddeti altında gerçekleştirilen I-V ve C-V ölçümleriyle incelendi. Üretilen bu schottky bariyer diyotlarının iletim mekanizmaları (CM), I-V karakteristikleri aracılığıyla hem termiyonik emisyon (TE) hem de Cheung yöntemleri kullanılarak araştırıldı. Arayüzey durumlarının (Nss) enerjiye bağıli (Ec-Ess) dağılım profili, Card ve Rhoderick yöntemi kullanılarak elde edildi. Tüm bu deneysel bulgular, MPS tipi SBD'nin MS tipi SBD'ye kıyasla üstün performans sergilediğini, daha düşük ideallik faktörü (n), kaçak akım (I_o), arayüzey durumları (Nss) ve daha yüksek doğrultma oranı (RR), bariyer yüksekliği (Φ_{Bo}) ve ışığa duyarlılık (S) değerleri göstermektedir. Sonuç olarak, daha yüksek ışığa duyarlılık değeri, MPS tipi Au/(ZnO:CeO₂:PVP)/n-Si schottky diyotun, güneş pili ve fotodetektör uygulamalarında kullanım için geleneksel MS tipi schottky diyotun etkili bir şekilde yerini alabileceğini göstermektedir.

Bilim Kodu : 20217
Anahtar Kelimeler : Schottky bariyer diyotlar, metal-polimer-yarı iletken (MPS) Schottky yapı, Polivinilpirolidon (PVP) polimer, Nanoyapılar
Sayfa Adedi : 79
Danışman : Prof. Dr. Yashar AZİZİAN KALANDARAGH

INVESTIGATION OF LIGHT DEPENDENT ELECTRICAL PROPERTIES OF Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si SCHOTTKY STRUCTURES

(M. Sc. Thesis)

Oray ÜSTÜN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2024

ABSTRACT

The primary objective of this current thesis is to fabricate metal-semiconductor (MS) type Au/n-Si and metal-polymer-semiconductor (MPS) type Au/(ZnO:CeO₂:PVP)/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) on the same n-Si wafer under identical conditions to assess whether the (ZnO:CeO₂:PVP) organic interlayer enhances the performance of the MS SBD. For this purpose, CeO₂ and ZnO nanostructures were synthesized using ultrasonic-assisted method (UAM) and subsequently analyzed utilizing X-ray diffraction (XRD), ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy and Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy. The average submicron crystallite sizes were determined for CeO₂ and ZnO nanostructures employing the Debye-Scherrer method. The Williamson-Hall (WH) method was employed in XRD analysis to estimate crystallite sizes and assess micro-strains within crystal lattices. The optical bandgap for CeO₂ and ZnO nanostructures was computed using the Tauc plot method. Subsequently, the electrical properties of the fabricated SBDs were investigated through I-V and C-V measurements conducted over a wide voltage range of $\pm 5V$, both in darkness and under 100 mW/cm² illumination intensity at room temperature. The conduction mechanisms (CMs) of these schottky barrier diodes were explored through I-V characteristics, employing both thermionic emission (TE) and Cheung's methods. The energy-dependent profile of surface states (N_{ss}) was derived using the Card-Rhoderick method. All these experimental findings suggest that the MPS type SBD exhibited superior performance compared to the MS type SBD, showing lower values of ideality factor (n), leakage current (I_o), surface states (N_{ss}), and higher values of rectification rate (RR), barrier height (Φ_{Bo}) and photosensitivity (S). In conclusion, the higher photosensitivity value suggests that the MPS type Au/(ZnO:CeO₂:PVP)/n-Si schottky diode can effectively replace conventional MS type schottky diode for use in solar cell and photodetector applications.

Science Code : 20217
Key Words : Schottky barrier diodes , metal-polymer-semiconductor (MPS) Schottky structure, Polyvinylpyrrolidone (PVP) polymer, nanostructures
Page Number : 79
Supervisor : Prof. Dr. Yashar AZİZİAN KALANDARAGH

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilimsel katkı ve yardımlarıyla beni yönlendirerek çalışmalarım için desteğini ve emeğini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Yashar AZİZİAN KALANDARIAGH hocama sonsuz teşekkür eder saygılarımı sunarım. Çalışmalarım boyunca deneyim ve tecrübelerini paylaşan, ilgi, hoşgörü ve yardımları için değerli hocalarım Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL ve Arş. Gör. Murat ULUSOY'a teşekkürlerimi sunarım. Benden çoğu zaman kilometrelerce uzakta olsa bile hayatımın en zor dönemlerinde hep yanımda olan ve özellikle kariyer gelişimimdeki dönüm noktalarında büyük pay sahibi en büyük dayanağım, rehberim, destekçim ve metanetim olan sevgili ağabeyim Onur ÜSTÜN'e sonsuz minnettar olduğumu bildirmek isterim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER	7
2.1. Schottky Diyot ve PN Diyot Yapıları	7
2.2. Metal-Yarıiletken Schottky Kontak Yapısı.....	8
2.3. Schottky Bariyer Diyotlarda Akım-İletim Mekanizması	12
2.3.1. Termiyonik emisyon ve difüzyon	13
2.3.2. Tünelleme	15
2.3.3. Tükenme Bölgesinde Yük Taşıyıcı Birleşimi (recombination) veya Üretimi (generation)	17
2.4. Schottky Diyotlarda Elektriksel Parametrelerin Belirlenmesi	18
2.5. Optoelektronik Özellikler.....	21
2.6. Organik Yarıiletkenler	24
2.7. Metal- Organik Schottky Kontak Yapısı.....	25
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	31
3.1. ZnO Nanoyapıların Sentezi.....	31
3.2. CeO ₂ Nanoyapının Sentezi.....	33
3.3. Omik Kontakın Oluşturulması	34
3.4. (CeO ₂ :ZnO:PVP) Arayüzey Katmanının Oluşturulması	34

Sayfa

3.5. Doğrultucu (Schottky) Konağın Oluşturulması	35
4. KARAKTERİZASYON	37
4.1. XRD Analizi.....	37
4.2. UV-Visible Spektroskopisi	41
4.3. Fourier Transform IR (FTIR) Spektrometresi.....	45
5. DENEYSEL BULGULAR	49
5.1. Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO ₂ :ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky Yapıların I-V Analizleri	50
5.2. Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO ₂ :ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky Yapıların C-V Analizleri	63
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. CeO ₂ nanoyapının yapısal parametreleri.....	38
Çizelge 4.2. ZnO nanoyapının yapısal parametreleri.....	38
Çizelge 4.3. ZnO nanoyapılarda gözlenen kızılötesi titreşimler.....	45
Çizelge 4.4 CeO ₂ nanoyapılarda gözlenen kızılötesi titreşimler	46
Çizelge 5.1. Karanlıkta MS ve MPS Schottky diyotları için oda sıcaklığında elde edilen bazı temel diyot parametreleri.....	53
Çizelge 5.2. MS ve MPS Schottky diyotları için 100 mW.cm ⁻² ışık şiddeti altında ve oda sıcaklığında elde edilen bazı temel diyot parametreleri.	53
Çizelge 5.3. Cheung fonksiyonlarından elde edilen bu temel diyot parametreleri.....	56
Çizelge 5.4. MS ve MPS Schottky diyotları için karanlıkta ki ters beslem C ⁻² -V grafiklerinden elde edilen bazı temel Schottky diyot parametreleri.	67
Çizelge 5.5. MS ve MPS Schottky diyotları için 100 mW/cm ⁻² ışık şiddeti altındaki ters beslem C ⁻² -V grafiklerinden elde edilen bazı temel Schottky diyot parametreleri	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Schottky diyot devre sembolü	7
Şekil 2.2. Schottky diyot ve PN diyot I-V karakteristikleri	7
Şekil 2.3. Bir metal ve n-tipi yarıiletkenin kontak öncesi enerji bant diyagramı	9
Şekil 2.4. Termal dengede metal ve n-tipi yarıiletken kontak sonrası enerji bant diyagramı	10
Şekil 2.5. Metal/n-tipi yarıiletken için düz beslemde enerji bant diyagramı	10
Şekil 2.6. Metal/n-tipi yarıiletken için ters beslemde enerji bant diyagramı	11
Şekil 2.7. Bir metal ile yarıiletkenin (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası enerji bant diyagramı (omik kontak).....	12
Şekil 2.8. Düz beslemde metal-yarıiletken kontak diyagramı ve (a),(b),(c),(d) akım iletim mekanizmaları şematik gösterimi	13
Şekil 2.9. Işığa duyarlı bir Schottky diyot için akım gerilim karakteristiği.....	23
Şekil 2.10. Organik elektronik malzemeler	24
Şekil 2.11. Metal-organik yarıiletken kontak arayüzeyinde enerji bant diyagramı	28
Şekil 3.1. ZnO sentezi proses akış şeması	32
Şekil 3.2. CeO ₂ sentezi proses akış şeması	34
Şekil 3.3. Au/(CeO ₂ :ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky yapısına ait şematik gösterim....	35
Şekil 4.1. CeO ₂ nanoyapının XRD analizi	39
Şekil 4.2. ZnO nanoyapının XRD analizi	39
Şekil 4.3. Sentezlenen CeO ₂ nanoyapının W-H grafiği	40
Şekil 4.4. Sentezlenen ZnO nanoyapının W-H grafiği	41
Şekil 4.5. Sentezlenen CeO ₂ nanoyapının (a) soğurma spektrumu (b) Enerji bant aralığı	44
Şekil 4.6. Sentezlenen ZnO nanoyapının (a) soğurma spektrumu (b) Enerji bant aralığı	44
Şekil 4.7. Sentezlenen ZnO nanoyapının FTIR spektrumu	46
Şekil 4.8. Sentezlenen CeO ₂ nanoyapılarının FTIR spektrumu.....	47

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Hazırlanan Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO ₂ :ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky yapıların karanlık ve 100mW.cm ⁻² ışık altındaki ölçümleri için kullanılan I-V ve C-V düzenek şeması.	50
Şekil 5.2. MS ve MPS Schottky diyotların karanlıkta elde edilen yarı logaritmik I-V eğrileri.....	51
Şekil 5.3. MS ve MPS Schottky diyotların 100mW.cm ⁻² ışık şiddeti altında elde edilen yarı logaritmik I-V eğrileri.....	51
Şekil 5.4. MS Schottky yapının karanlık ve ışık altında elde edilen lnRi-Vi grafikleri.	54
Şekil 5.5. MPS Schottky yapının karanlık ve ışık altında elde edilen lnRi-Vi grafikleri.....	54
Şekil 5.6. MS Schottky yapının (a) karanlık ve (b) ışık altındaki dV/dln(I)-I ve H(I)-I grafikleri.....	55
Şekil 5.7. MPS Schottky yapının (a) karanlık ve (b) ışık altındaki dV/dln(I)-I ve H(I)-I grafikleri	56
Şekil 5.8. MS ve MPS yapıların karanlıkta elde edilen ln(IF)-ln(VF) eğrileri.....	57
Şekil 5.9. MS ve MPS yapıların 100 mW.cm ⁻² ışık altında elde edilen ln(IF)-ln(VF) eğrileri.....	57
Şekil 5.10. MS ve MPS yapılar için karanlık I _F -V _F verilerinden hesaplanan N _{ss} -(E _c -E _{ss}) eğrileri.	59
Şekil 5.11. MS ve MPS yapılar için 100mW.cm ⁻² ışık altında ki I _F -V _F verilerinden hesaplanan N _{ss} -(E _c -E _{ss}) eğrileri	60
Şekil 5.12. MS ve MPS yapıların 100 mW.cm ⁻² ışık altındaki S-V eğrileri.....	62
Şekil 5.13. MS ve MPS yapıların 100 mW/cm ² ışık altındaki R-V eğrileri.	62
Şekil 5.14. MS ve MPS Schottky yapıların 500 kHz de karanlıkta ölçülen C-V eğrileri.....	63
Şekil 5.15. MS ve MPS Schottky yapıların 500 kHz de 100 mW.cm ⁻² ışık şiddeti altında ölçülen C-V eğrileri	64
Şekil 5.16. MS ve MPS Schottky yapıların 500 kHz de karanlıkta ölçülen C ⁻² - V eğrileri.....	65
Şekil 5.17. MS ve MPS Schottky yapıların 500 kHz de 100 mW.cm ⁻² ışık altında C ⁻² -V eğrileri.	65

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

ϵ_s	Yarıiletkenin elektriksel geçirgenliği
ϵ_0	Boş uzayın elektriksel geçirgenliği
χ_s	Elektron yakınlığı
$\text{\AA}$	Angström
A^*	Richardson sabiti
$\text{Ce (NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Seryum Nitrat Hekzahidrat
CeO_2	Seryum dioksit
C-V	Kapasitans-Gerilim
DIW	Deiyonize Su
E	Elektrik alan
e	Mikro gerinim
E_c	Yarıiletkenin iletkenlik bantı
E_F	Fermi enerjisi
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_v	Yarıiletkenin valans bantı
F	Sığa birimi-Farad
H_z	Frekans birimi-Hertz
I_0	Ters beslem doyum akımı
I_F	Düz Beslem Akımı
I_R	Ters Beslem Akımı
I-V	Akım-Gerilim
J	Toplam Akım Yoğunluğu
J _{ms}	Metalden yarıiletkene olan Akım Akışı
J _{sm}	Yarıiletkenden Metale olan Akım Akışı
m^*	Serbest elektronun etkin kütlesi
n	İdealite faktörü

Simgeler	Açıklamalar
NaOH	Sodyum Hidroksit
N_c	İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
N_D	Katkı atomlarının (verici) yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durumları
R	Fototepki
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Kısa devre direnci
R-V	Foto tepki- Voltaj
S	Sensitivite
S-V	Sensitivite-Voltaj
V₀	Kesme potansiyeli
V_a	Uygulanan voltaj
V_{bi}	Yerleşik potansiyel
V_D	Difüzyon potansiyeli
V_F	Düz Beslem Voltajı
V_{oc}	Açık Devre Voltajı
V_R	Ters Beslem Voltajı
W₀	Tükenme Bölgesi Genişliği
Zn(CH₃CO₂)₂ . 2H₂O	Çinko asetat dihidrat
ZnO	Çinko oksit
v_x	Bariyeri aşmak için gereken minimum hız
Φ_{B(C-V)}	Bariyer yüksekliği (C-V' den ölçülen)
Φ_{B(I-V)}	Bariyer yüksekliği (I-V' den ölçülen)
Φ_{B0}	Sıfır beslem bariyer yüksekliği
Φ_{Betkin}	Etkin Bariyer Yüksekliği
Φ_m	Metalin Fermi Seviyesi
Φ_s	Yarıiletken Fermi Seviyesi

Kısaltmalar	Açıklamalar
AC	Alternatif akım
CMs	İletim mekanizmaları

Kısaltmalar	Açıklamalar
C-V	Kapasitans- Voltaj
DC	Doğru akım
FE	Alan Emisyonu
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
FWHM	Maksimum Şiddet Yarı Genişliği
HOMO	En Yüksek Dolu Moleküler Orbital
I-V	Akım-Voltaj
LUMO	En Düşük Boş Moleküler Orbital
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (Metal-Insulator-Semiconductor)
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken (Metal-Oxide-Semiconductor)
MPS	Metal-Polimer-Yarıiletken (Metal-Polymer-Semiconductor)
MS	Metal-Yarıiletken (Metal-Semiconductor)
PVA	Polivinil alkol
PVP	Polivinilpirolidon
RR	Doğrultma Oranı
R-V	Foto tepki- Voltaj
SBD	Schottky Bariyer Diyot
SCLC	Uzay Yük Yoluyla Akım
S-V	Sensitivite-Voltaj
TCLC	Tuzak Yük Yoluyla Akım
TE	Termiyonik emisyon
TFE	Termiyonik Alan Emisyonu
UAM	Ultrasonik Destekli Yöntem
UHV	Ultra Yüksek Vakum
UV-VİS	Ultraviyole-Görünür Işık Spektroskopi
WH	Williamson-Hall
XRD	X-Işınları Kırınımı

1. GİRİŞ

Schottky bariyeri, W. Schottky tarafından 1938 yılında tanımlanmıştır. Buna göre bir metal ve yarıiletken kontak edildiğinde doğrultma davranışı bu iki malzemenin temas yüzeyinde oluşan bariyer katmanına bağlıdır. Schottky bariyer diyotları, bu prensip kullanılarak oluşturulan metal-yarı iletken cihazlardır. Bilim insanlarının başlangıçta metal-yarıiletken diyotları geliştirmesinden bu yana bir asırdan fazla zaman geçti. F. Braun, 1874'te bakır (Cu), demir (Fe) ve kurşun sülfür (PbS) kristalleri üzerindeki metalik kontakların doğrultucu özelliklerinin ilk açıklamasını yayınladı. Bir yarıiletken yüzeyle temas halinde keskinleştirilmiş bir metalik tel kullanan nokta kontak diyotlar, kablolu telgrafın ilk günlerinde radyo dalgalarını algılamak için dedektör olarak kullanıldı. Daha sonra nokta kontaklı diyotlar özellikleri açısından son derece kararsız oldukları ortaya çıkmış ve yerini, bir yarıiletken yüzey üzerine ince bir metalik kaplamanın biriktirilmesiyle oluşturulan metal-yarıiletken diyotlar almıştır. Bu tür cihazlar üzerindeki araştırmalar, önemli ölçüde daha iyi özellikler gösteren metal-yarı iletken kontakların davranışına ilişkin günümüz mevcut anlayışımızın gelişmesine yol açmıştır. Metal-yarıiletken kontak davranışını keşfetmeye yönelik ilk önemli gelişme, Schottky'nin metal-yarıiletken arayüzeyinde potansiyel bir bariyeri tanımlamasıyla olmuştur. Schottky ve Mott daha sonra bariyer oluşumunun fiziğini açıklamaya devam etti ve bariyerin yüksekliğini ve geometrisini tahmin etmek için modeller önerdi [1].

Geleneksel Schottky kontak yapılar inorganik metal ve yarıiletken teması ile sağlanır. Son yıllarda, geleneksel inorganik silikon bazlı elektronik sistemler, karmaşık mikrofabrikasyon prosesi ve yüksek ticari maliyet gibi dezavantajlardan kaçınamaması nedeniyle inorganik/organik hibrit malzeme yapıları cihazlara duyulan ilgi artmıştır. Polimerler, benzersiz özellikleri, kolay işlenebilirlikleri ve ticari bulunabilirlikleri nedeniyle bu soruna mükemmel bir çözüm olarak değerlendirilebilecek bir organik malzeme sınıfıdır. Örneğin, polimerler tipik olarak kimyasal veya elektrokimyasal polimerizasyon yoluyla çözeltiler halinde hazırlanırlar, atom seviyesinde düzenlilik gerektirmeden alttaş üzerine doğrudan dönele kaplama ile kaplanabilir veya inkjet baskı yöntemi ile basılabilirler. Böylece pahalı ekipmanlardan ve karmaşık, zaman alıcı imalat sürecinden kaçınılmış olunur [2, 3].

Polimerik malzemelerin mükemmel özellikleri, bunların Schottky kontak yapıları cihaz sınıflarında kullanılmasını ve dahil edilmesini sağlamıştır. Kolay sentezlenebilir olması ve kontrol edilebilir özellikleri nedeniyle, Schottky kontak cihazlarında polimerler, geleneksel inorganik yarıiletken malzemelere alternatif olarak kullanılmıştır. Schottky diyotta polimerik malzemelerin kullanılmasının, yüksek performanslı cihazlara bir alternatif sağlayan iyi doğrultma özelliklerine yol açtığı kanıtlanmıştır. Polimer tabakasının safsızlığı ve kalınlığı, cihazın kalitesini ve hassasiyetini iyileştirmek ve yüzey kusurlarını, arayüzey durumlarının yoğunluğunu azaltmak için değiştirilebilen baskın faktörlerdir. Son yıllarda yapılan çalışmalara göre bariyer oluşumu, akım iletim mekanizmaları ve aygıt performansı metal-yarıiletken arayüzeyine çeşitli yöntemlerle uygun bir arayüzey polimeri veya yüksek dielektrik ara katman kullanılarak düzenlenebilir [4].

Metal-yarıiletken (MS) arasına bir arayüzey yalıtıcı tabaka yerleştirilmesi, Schottky yapının bariyer yüksekliğini ve doğrultma oranını artırır ve böylece elektronik ve optoelektronik performansın yükselmesini sağlar. SBD (Schottky bariyer diyot) üretiminde ara yüzey tabakası oluşurken, yarıiletkenin enerji bandı yapısını değiştiren ve cihaz performansını etkileyen yapısal kusurlar ve safsızlıklar oluşabilir. Bu nedenle, son zamanlarda metal ve yarıiletken kontakları izole etmek, aralarındaki yük geçişlerini düzenlemek ve kaçak akımı azaltmak için çeşitli organik (polimer) tabakalar kullanılmaktadır. Bu polimerlerden herhangi biri metal/yarı iletken arayüzüne yerleştirilirse MS (Metal-yarıiletken) tipi SBD (Schottky bariyer diyot), MPS (Metal-polimer-yarıiletken) tipi SBD'ye dönüşür. Polimer ara katmana sahip metal-polimer-yarıiletken (MPS) cihazlar üzerine yapılan son çalışmalar anahtarlama işleminin daha kısa sürede gerçekleştirmesi, çalışması için düşük ileri ön gerilim gerektirmesi gibi bazı avantajlar nedeniyle dikkat çekmektedir [4].

Schottky diyodlar yüksek frekanslarda çalışabilmesi, hızlı tepki süresi, elektronik cihazlarda voltaj kaybını azaltması gibi özellikleri sayesinde radyo frekans karıştırıcı devrelerinde, güç doğrultma devrelerinde, güneş hücrelerinde, gaz sensörü ve fotodedektörler olarak geniş uygulama alanı kazanmıştır [1-5].

Polimerler bir metal veya metal oksit bileşiklerle katkılanarak Schottky diyotlarda arayüzey tabaka olarak kullanılabilir. Polimer bazlı Schottky diyodun elektriksel özellikleri çoğu zaman katkılama işleminden etkilenmektedir. Katkılama yarıiletken polimerin fermi

enerji seviyesine tesir eder ve Schottky kontağın doğrultma davranışını etkiler. Sonuç olarak, birçok avantajının yanı sıra polimerik malzemelerin kolay hazırlanması ve işlenmesine dayanan, polimer bazlı Schottky kontak cihazları, geleneksel inorganik cihazlarla karşılaştırıldığında gelişmiş performans ve özellikler göstermiştir [5].

Schottky bariyer diyotların elektriksel özellikleri genellikle arayüzey özelliklerine göre belirlendiğinden, Schottky bariyer diyotlarda kullanılan polimerlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi bilimsel ve endüstriyel uygulamalar için çok önemlidir. Çeşitli polimer türleri arasında polivinil alkol (PVA), yaklaşık 200°C'ye ulaşan en yüksek termal stabiliteye sahip polimerlerden biridir ve yüksek dielektrik sabitine sahiptir. Ek olarak, PVA'nın yarı kristalliği ve hidrojen bağlama kapasitesi, onu katı hal elektroliti gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanım için uygun bir seçenek haline getirir. Öte yandan polivinilpirolidon (PVP), amorf doğası, suda çözünürlüğü yüksek, toksik olmayan, çok çeşitli kristallik, yüksek dielektrik dayanım, iyi yük depolama kapasitesi gibi özelliklere sahiptir ve bu özellikler onu fotonik ve optik dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanım için ideal kılar. Bunun yanı sıra PVP polimerleri, kolay hazırlama, düşük maliyet, termal ve kimyasal stabilite, mekanik dayanıklılık gibi avantajları nedeniyle MPS (metal-polimer-yarıiletken) Schottky yapılarının ara katmanı için uygun adaylar olarak araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Aslında, hem polivinil alkol (PVA) hem de polivinilpirolidon (PVP), alkol veya suda kolayca çözünebilen nadir polimerlerdir. PVP ile PVA karşılaştırıldığında, PVP optik ve elektriksel özellikler gerektiren uygulamalarda çok önemli faktörler olan daha yüksek iletkenliğe ve üstün optik şeffaflığa sahiptir. Ayrıca PVP, sulu çözeltilerde daha iyi koruma, viskozite, emicilik ve çözünürlük sağlamaktadır [64].

Polimerler genellikle düşük dielektrik veya iletkenlik özelliğe sahiptir, ancak iletkenlik veya dielektrik özellikleri uygun oranda metal veya metal oksit katkılanarak ayarlanabilir. Metal-yarıiletken arayüzünde bir ara katman kullanmak, arayüz difüzyonunu ve metal-yarıiletken arayüzü arasındaki etkileşimi önleyebilir ve birçok istenmeyen arayüzey durumlarını (Nss) elimine edebilir [6].

Metal oksit nanoyapıları elektronik, optoelektronik, biyosensörler, piezoelektrik ve kataliz gibi çeşitli alanlardaki mükemmel uygulamalarından dolayı en uygun nanomalzemeler olarak kabul edilmektedir. Metal oksitler, daha yüksek ışık toplama verimliliğine ve

fotoakım yoğunluğuna yol açan yüksek miktarda organik polimer adsorpsiyonu elde etmek için gerekli olan yüksek yüzey-hacim (surface-to-volume ratio) oranına sahiptir [7].

Atom numarası 58 olan seryum, en yaygın nadir metaldir ve lantanit grubunun bir üyesidir. Seryum dioksit (CeO_2), geniş enerji bant aralığı enerjisine (3.19eV) sahip bir yarı iletkenidir. Lantanit serisine ait olan seryum nanopartikülleri, onları son derece etkili redoks reaktifleri yapan bir takım özel niteliklere sahiptir. Bu özellikler, oksijen boşluklarını yaratma veya ortadan kaldırma ve ayrıca seryumun değerlik durumunu değiştirme kapasitesidir. Seryum, kısmen doldurulmuş iki elektron alt kabuğuna (4f ve 5d) sahiptir. Dahası, seryum dioksitler, yüzeylerinin yüksek bir hidrojen emme kapasitesine sahip olması nedeniyle diğer nadir toprak oksitlerinden öne çıkar ve bu da H_2 , O_2 veya H_2O ile reaksiyonları diğer nadir toprak oksitlerine göre daha kolay hale getirir ve bu da yenilenme kapasitelerini artırabilir [8].

Seryum dioksit (CeO_2), görünür ve yakın IR bölgesinde yüksek geçirgenlik veya şeffaflık(transparan) , UV bölgesinde yüksek verimli absorpsiyon (soğurma) özelliğine sahiptir ve elektro-optik performansları nedeniyle büyük ilgi görmüştür [9]. Seryum dioksit (CeO_2) iyonik ve elektronik iletkenlik sergiler. Bu ikili iletkenlik, CeO_2 'in kristal kafesindeki kusurların varlığından kaynaklanır. Oksijen boşlukları ve küçük polaronlar seryum dioksit kafesinin kusurlarıdır. Oksijen kusurlarının konsantrasyonunun artırılması, oksit anyonlarının difüzyon hızını artırır ve bunun sonucunda kafesteki iyonik iletkenliği artırır [6].

Çinko oksit (ZnO), geniş bant aralığı (~3,3 eV), yüksek eksiton bağlanma enerjisi (~60 meV), yüksek elektronik mobilitesi ve çevre dostu olması nedeniyle elektronik ve fotovoltaiik cihazlar için önemli bir metal oksittir [7]. Optik özellikler kristal yapıda mevcut olan dışsal (extrinsic) ve içsel (intrinsic) kusurlara bağlıdır. Mevcut kusurların niteliğini ve miktarını ayarlayarak elektriksel özellikleri değiştirmek mümkündür. Bu kusurlar büyüme veya tavlama sırasında ortaya çıkabilir. Ana atom olmadığında, içsel kusurlar (boşluk gibi) ortaya çıkarken, yabancı atomların veya safsızlıkların varlığı dışsal kusurlara neden olur. Buna ek olarak, oksijen boşluğu ve çinko boşluğu ZnO yarı iletkenlerinde en yaygın iki kusurdur. Akım iletim özellikleri içsel kusurların konsantrasyonundan yoğun bir şekilde etkilenmektedir. Ayrıca, oksijen boşlukları ve çinko arayerleri, katkısız çinko oksidin n-tipi elektriksel davranışından sorumludur [10]. ZnO , bir başka metal oksit olan SnO_2 (kalay

oksit) ile karşılaştırıldığında daha büyük bir kırılma indisine sahiptir. Kırılma indisi $n > 1$ olduğundan, kırılma açısı her zaman gelen açıdan daha küçüktür ve kırılan ışık normale daha yakındır, bu da güneş pili için kullanıldığında gelen ışığın çoğunlukla güneş piline yönlendirileceği anlamına gelir [11].

Bu nedenle, yapılan bu araştırmalar ve literatür taramalarından elde edilen bilgilerden yola çıkarak bu tez çalışmasında ($\text{ZnO}:\text{CeO}_2:\text{PVP}$), Au ve n-Si arasında arayüzey ince bir tabaka olarak seçilmiştir. Çünkü CeO_2 ve ZnO metal oksitleri görünür ve yakın IR bölgesinde yüksek geçirgenliğe, UV bölgesinde yüksek verimli absorpsiyona sahiptirler ve ayrıca iyi bir iyonik ve elektronik iletkenlik sergilemektedirler. PVP organik polimerinin sahip olduğu üstün optik şeffaflık ve elektriksel iletkenlik, termal stabilite ve mekanik dayanım gibi özellikleri sebebiyle diyot ve fotodiyot, güneş pilleri olmak üzere çeşitli optoelektronik uygulamalarda kullanım için idealdir. Ayrıca CeO_2 ve ZnO yüksek dielektrik sabitine sahip yalıtım malzemeleridir. Bunların PVP polimerine katkılanması, metal ve yarı iletken arasındaki yalıtım katmanının dielektrik özelliklerini artırabilir. Bu da, kaçak akımları azaltabilir ve schottky diyotun genel performansını olumlu yönde etkileyebilir. Hem CeO_2 hem de ZnO, çalışma sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kalabilecek elektronik cihazlarda önemli olan iyi bir termal stabilite sergiler. Bu stabilite, katkılı polimerin özelliklerinin değişen çalışma koşulları altında tutarlı kalmasını sağlar. CeO_2 ve ZnO, ışığa maruz kaldığında elektrik iletkenliğinin değişimine yol açan fotoiletkenlik sergileyebilir. Bu özellik, schottky yapılarındaki fotodedektör uygulamaları için çok önemlidir.

Bu tez çalışması kapsamında aynı alttaş üzerine büyütülen organik yapıdaki MPS tipi $\text{Au}/(\text{CeO}_2:\text{ZnO}:\text{PVP})/\text{n-Si}$ ve geleneksel inorganik yapıdaki MS tipi $\text{Au}/\text{n-Si}$ schottky diyotların elektriksel ve optik özellikleri hem karanlıkta hem de 100 mW/cm^2 ışık altında incelenmiştir ve altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde schottky bariyer diyotları veya diğer adıyla schottky diyotları hakkında genel bilgi verilmiş, kullanım alanlarına değinilmiş ve ayrıca tez kapsamında üretilen MPS tipi schottky diyotta kullanılan metal oksit katkılı polimer arayüzey tabakadaki malzemeler hakkında teorik bilgiler verilmiş, kullanım nedenleri gerekçeleri ile açıklanmıştır. İkinci bölümde schottky diyotların çalışma prensipleri, elektriksel ve optik performans parametreleri ile ilgili teorik bilgiler anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ultrasonik destekli yöntem ile sentezlenen CeO_2 ve ZnO metal oksit nanoyapılarının deneysel olarak üretimi, MS ve MPS tipi schottky diyotların

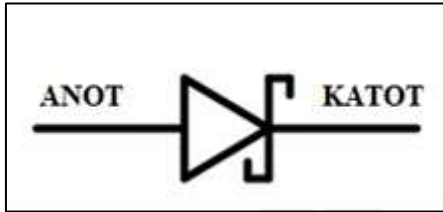
fabrikasyon proses süreçleri detaylı olarak anlatılmıştır. Dördüncü bölümde sentezlenen CeO_2 ve ZnO metal oksit nanoyapıları için X-ışını kırınımı (XRD), ultraviyole görünür (UV-Vis) spektroskopisi ve Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi kullanılarak gerçekleştirilen yapısal karakterizasyon ölçümlerinin verileri paylaşılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Beşinci bölümde üretilen MS ve MPS schottky diyotların elektriksel ve optoelektronik özellikleri hem karanlıkta hem de 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında ve oda sıcaklığında akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-gerilim (C-V) ölçüm yöntemleri ile incelenmiştir. Ölçüm düzeneği hakkında bilgi verilmiş ve ölçümler sonucu I-V ve C-V grafiklerinden elde edilen veriler ile hem MS ve MPS schottky diyotları için elektriksel ve optoelektronik parametreler hesaplanmış ve bulunan sonuçlar kıyaslanmıştır.

Son bölüm olan altıncı bölümde ise tüm deneysel sonuçlar literatür karşılaştırması ve gerekçeleri ile yorumlanarak gerekli öneriler sunulmuştur.

2. TEORİK BİLGİLER

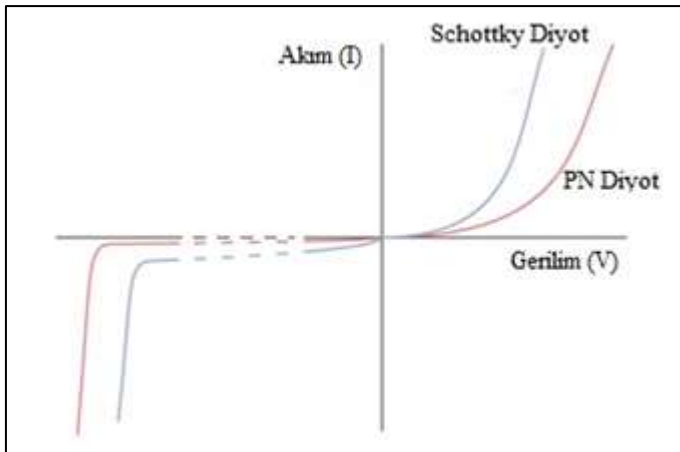
2.1. Schottky Diyot ve PN Diyot Yapıları

PN kontak diyotlar bir p-tipi bir yarıiletken ile n-tipi yarı iletkenin kontak edilmesi ile oluşturulur. Ancak Schottky diyot yapımında p-tipi yarıiletken yerine aliminyum, platinyum ve altın gibi metaller kullanılır. Schottky diyot, PN yapılı diyotlar ile karşılaştırıldığında düşük ileri voltaj ve hızlı anahtarlama işlemine sahiptir. Şekil 2.1 de Schottky diyotun devre sembolü gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Schottky diyot devre sembolü

Schottky diyotları ve PN kontak diyotlarının her ikisi de şekil 2'de gösterildiği gibi karşılaştırılabilir I-V (akım-gerilim) özelliklerine sahiptir. Schottky diyotunda akım bağımlı değişkendir ve voltaj bağımsız değişkendir. Schottky diyotu, 0,2 ila 0,3 volt arasında değişen düşük bir ileri voltaj değerine sahiptir.



Şekil 2.2. Schottky diyot ve PN diyot I-V karakteristikleri

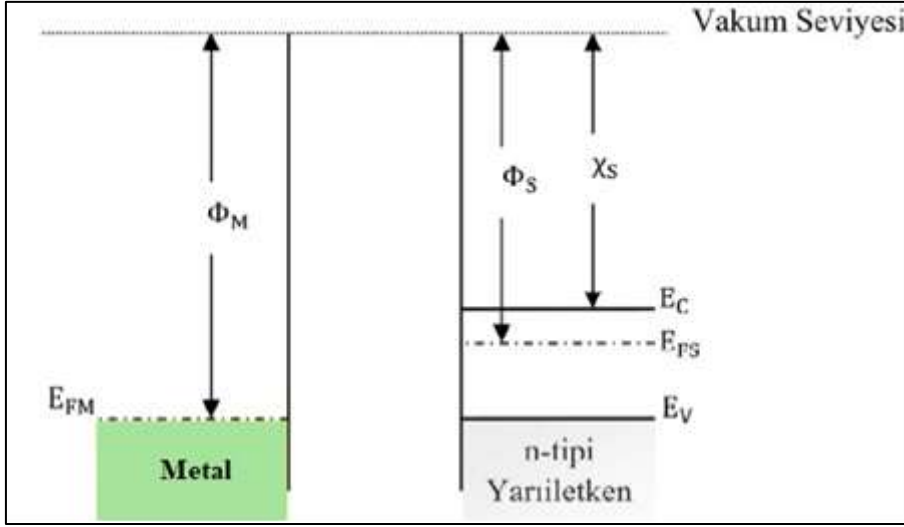
Kullanılan metal elektrota bağı olarak, bir silikon Schottky diyotunun ileri beslem akım değeri, standart bir PN kontak diyotundan önemli ölçüde farklı olabilir. Schottky diyotun düşük ileri voltaj değerinde çalışabilmesi ohm yasası ($P=V \cdot I$) nedeniyle daha düşük voltaj kaybına sahip olduğu anlamına gelmektedir. Bu özelliği sayesinde PN kontak diyodların neden olduğu aşırı ısınma etkisini önemli derecede azaltmaktadır.

Bir Schottky bariyer diyot (SBD) veya Schottky diyot, katot elektrot olarak N-tipi yarı iletken ile anot elektrot metal arasında oluşturulur. Schottky diyotlarda potansiyel bariyer, metal-yarıiletken (MS) kontak temas yüzeyinde oluşur ve böylece doğrultma davranışı sergiler. Malzemeler içerisinde iki tip taşıyıcı yük mevcuttur. Bunlar elektronlar ve holler yani boşluklardır. N-tipi yarı iletken de yük yoğunluğu daha fazla olduğundan elektronlar yarı iletken metal doğru difüz eder. Metal de ise taşıyıcı yük yoğunluğu az olduğundan metalden yarıiletken herhangi bir yük geçişi söz konusu değildir. Elektronlar yarıiletken metal difüz etmeye devam ettikçe yarı iletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu azalır. Böylece metal-yarıiletken kontak temas yüzeyinde nötralite kaybı olur. Sonuç olarak yarıiletken metal doğru bir elektrik alan ve potansiyel bariyeri oluşumu meydana gelir. Oluşan bu elektrik alanın etkisiyle metaldeki elektronlar yarıiletken doğru sürüklenme (drift) hareketi yapacak ve difüzyon hareketi ile oluşan elektrik alanı azalacaktır.

Düz beslemde, anot metali güç kaynağının pozitif kutbuna ve katot n-tipi yarıiletken ise negatif kutbuna bağlanır. Bu durumda Schottky bariyer katmanı daralır ve iç direnci azalır. Ters beslemde ise Schottky bariyer katmanı genişler ve iç direnci artar [1].

2.2. Metal-Yarıiletken Schottky Kontak Yapısı

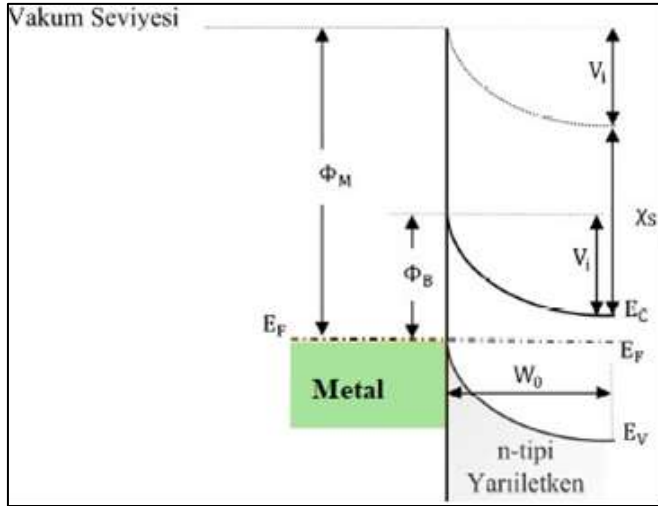
Doğrultucu bir metal-yarıiletken kontağı, metal-yarıiletken kontağının arayüzündeki potansiyel engeli fark eden ϕ_B . Schottky'den sonra Schottky Bariyeri olarak tanımlandı. Daha sonra, Schottky ve Mott bariyer oluşumunu açıklamak için modeller önerdi.



Şekil 2.3. Bir metal ve n-tipi yarıiletkenin kontak öncesi enerji bant diyagramı

Schottky ve Mott modeline göre iş fonksiyonlarındaki farklılık metal ve yarıiletken arayüzeyinde bariyere neden olur. Bu modeli açıklamak için öncelikle n-tipi yarı iletken ile birbirinden ayrılmış metalin enerji bant diyagramlarını düşünelim (Şekil 2.3). Şekilde E_F fermi seviyesini, Φ_m ise metalden bir elektronu serbest bırakmak için gereken minimum enerji olan metalin iş fonksiyonudur. Metalin Fermi seviyesinin, n-tipi yarı iletkenin Fermi seviyesinden ($\Phi_m > \Phi_s$) daha düşük olduğu varsayılır; bu, yarı iletkenindeki elektronların metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olduğu anlamına gelir.

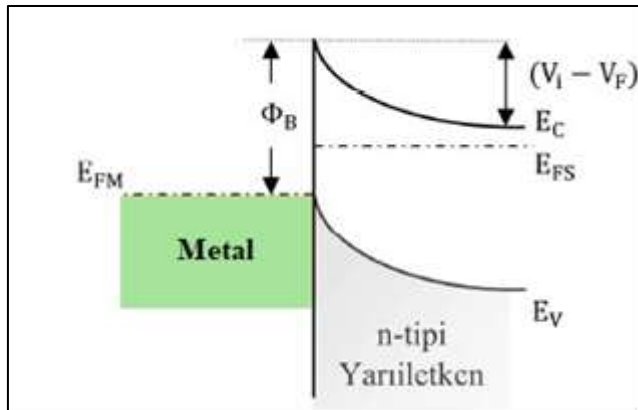
Metal ve yarıiletken arasında kontak kurulduğunda, yarıiletkenin iletim bandındaki elektronlar, iki tarafın Fermi seviyesi çakışana veya eşitlenene kadar metalin içine doğru hareket eder. Bu, yarı iletken arayüzünde bir tükenme bölgesi oluşturur. Yarıiletken sınır bölgesinin elektron konsantrasyonundaki düşüşler, Şekil 2.4'de gösterildiği gibi iletim bandı sınırında bükülmeye neden olur.



Şekil 2.4. Termal dengede metal ve n-tipi yarıiletken kontak sonrası enerji bant diagramı

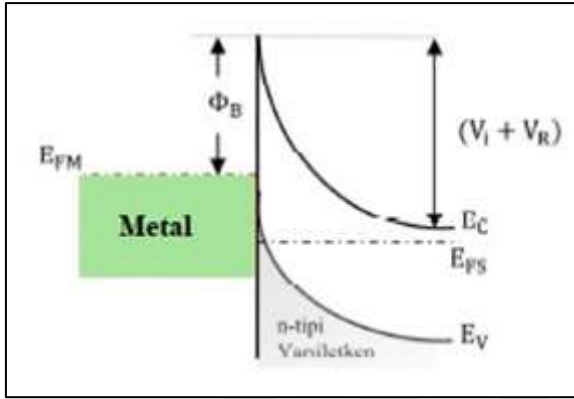
Termal dengede; her iki yönde de (yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene) aktarılan elektronların miktarı aynıdır ve dolayısıyla net akım yoktur. Tükenim bölgesinde az sayıda hareketli taşıyıcı bulunduğu için direnci, metal ve nötr yarıiletkene göre çok yüksektir. Böylece uygulanan gerilim bu bölgede ortaya çıkar.

Düz beslemde yani uygulanan ileri voltaj veya ileri ön gerilim, tükenme bölgesi genişliğini (W_0) ve bu bölgedeki voltajı V_i 'den $V_i - V_F$ 'ye düşürür. Bu nedenle, yarı iletken taraflardaki elektronlar daha düşük bir bariyerle karşılaşılır. Ancak, metal taraflarda bariyer değişmez. Sonuç olarak, yarıiletkenden metale akış artar, ancak metalden yarı iletken olan akış değişmez. Sonuç olarak, metalden yarıiletkene net bir akım akışı vardır ve bu akım V_F arttıkça artar.



Şekil 2.5. Metal/n-tipi yarıiletken için düz beslemde enerji bant diagramı

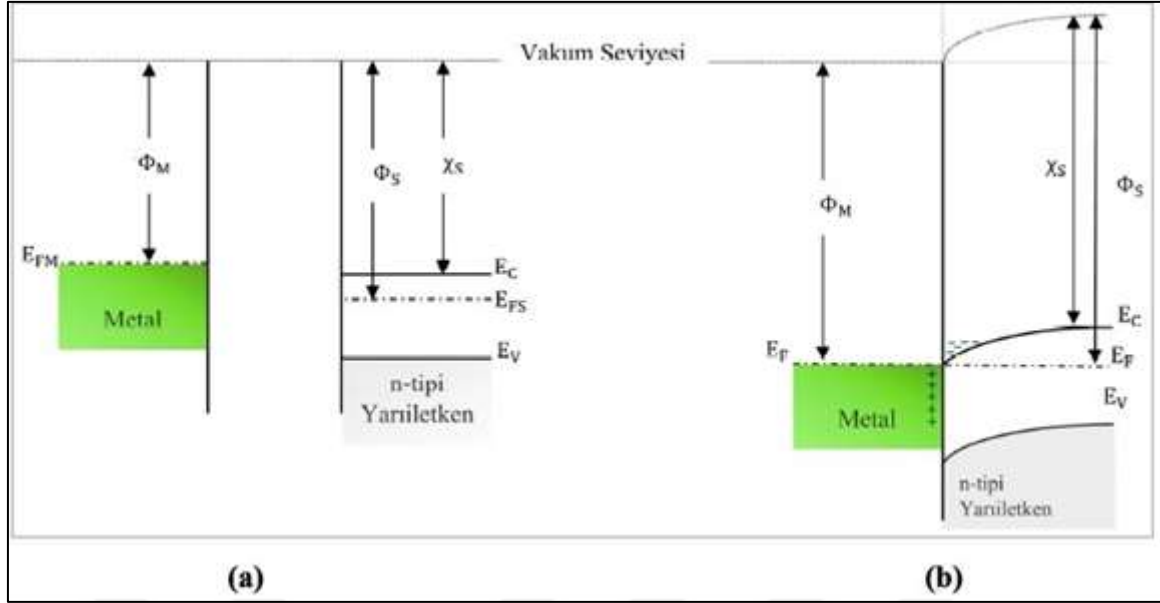
Ters beslemde yani uygulanan ters voltaj, tükenme bölgesinin (W_0) genişliğini arttırır ve bu bölgedeki voltaj V_i 'den $V_i + V_r$ 'ye yükselir. Böylece yarı iletken taraftaki elektronlar artan bir bariyerle buluşur. Bununla birlikte, metal taraftaki bariyer yine aynıdır. Bu nedenle metalden yarıiletken net bir akım akışı meydana gelir ve V_r 'yi artırarak artar. Düz beslemde ileri akım ile karşılaştırıldığında bu daha küçük bir akımdır.



Şekil 2.6. Metal/n-tipi yarıiletken için ters beslemde enerji bant diyagramı

Yarıiletkenin fermi seviyesi metalin fermi seviyesinden ($\Phi_s > \Phi_m$) düşük olduğunda n-tipi yarıiletkenler için omik bir temas oluşur. Bu tür bir kontakda, yük taşıyıcılarının akışında herhangi bir kısıtlama yoktur. Metal ve yarıiletken arasında kontak kurulduktan sonra, metal üzerindeki elektronlar yarıiletkenin iletim bandına akar. Bu elektronlar, yüzey yükü olarak sınır bölgesinin yakınında birikir ve metal sınırında pozitif yükleri geride bırakırlar. Bu pozitif yükler aynı zamanda yüzey yükleridir ve metal-yarıiletken arayüzünden yaklaşık $0,5 \text{ \AA}$ mesafede ince bir seviye oluşturur.

Termal dengede, yarıiletkende hiçbir tükenme bölgesinin oluşmadığı ve her iki tarafta da elektron akışına engel olmadığı açıktır. Ayrıca, net elektron akışı yoktur ve bu nedenle net akım akışı yoktur. Arayüzeyin yakınındaki artan elektronlar nedeniyle, uygulanan tüm voltaj, pratik olarak, tüm bölge boyunca görünür. Bu nedenle akım, tüm yapı direnci ile belirlenir ve uygulanan gerilimin yönünden (düz veya ters beslem) bağımsızdır.

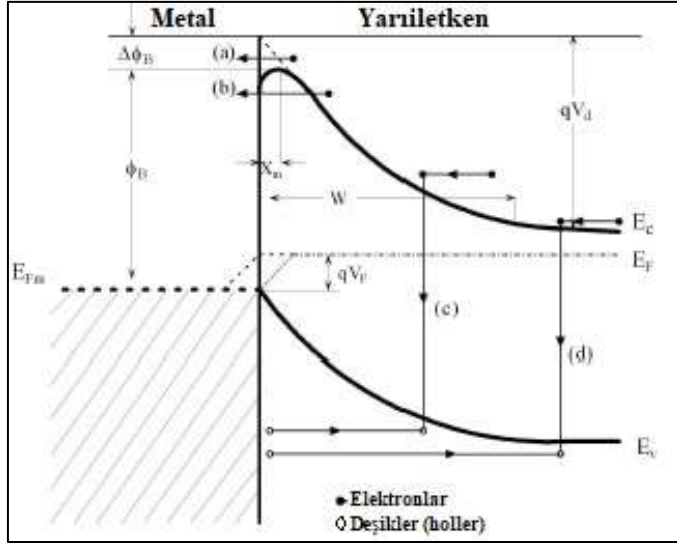


Şekil 2.7. Bir metal ile yarıiletkenin (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası enerji bant diyagramı (omik kontak)

2.3. Schottky Bariyer Diyotlarda Akım-İletim Mekanizması

Schottky bariyerlerinde akım oluşması hareketli taşıyıcı yüklerden (elektron ve deşikler) kaynaklanmaktadır. Hareketli yük taşınımı veya iletimi için dört farklı mekanizma mevcuttur [12].

- Termiyonik emisyon-difüzyon
- Tünelleme
- Tükenme bölgesinde yük taşıyıcı birleşimi (recombination) veya üretimi (generation)
- Nötral bölgede yük taşıyıcı birleşimi



Şekil 2.8. Düz beslemede metal-yarıiletken kontak diyagramı ve (a),(b),(c),(d) akım iletim mekanizmaları şematik gösterimi

2.3.1. Termiyonik emisyon ve difüzyon

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi, yarıiletkenden metale bariyer üzerinden yayılan elektronlar, yüksek alan tükenme bölgesinden geçmelidir. Bariyer üzerindeki emisyon ve tükenme bölgesindeki sürüklenme (drift) ve difüzyon olmak üzere iki işlem diyot akımını sınırlar. Bu işlemler etkili bir şekilde seri halindedir ve daha yüksek direnç oluşturan akımı belirler. Sürüklenme (Drift) ve difüzyon teorisi Wagner [13], Schottky ve Spanked [14] tarafından ele alındı ve Bethe [15] tarafından termiyonik emisyon teorisi önerildi. Termiyonik emisyon teorisine göre elektronlar yeterli enerjiye sahip olursa potansiyel bariyerini aşabilirler ve böylece yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçebilirler. Bu mekanizma Schottky bariyer yüksekliğini elde etmek için sıkça kullanılır ve oluşma ihtimali en yüksek olan akım iletim mekanizmasıdır. Termiyonik emisyon mekanizmasının Maxwell- Boltzmann yaklaşımına uyabilmesi için potansiyel engeli kT/q enerjisinden daha büyük olmalıdır (diğer bir deyişle yük taşıyıcıların aldığı ortalama serbest yolun, tükenim bölgesinden daha küçük olmalı). Yük taşıyıcılarının iletimi, bariyer potansiyelinin şeklinden ziyade yüksekliğine bağlıdır.

Bu mekanizmalar arasındaki fark, difüzyon teorisinde elektronların örgü ile termal dengede olması ve böylece yarı-fermi seviyelerinin arayüzeydeki metal Fermi seviyesiyle çakışmasıdır (Şekil 2.8'te noktalı eğri ile gösterildiği gibi), ancak termiyonik emisyon

teorisinde, metallere giren elektronlar metal elektronlarından daha yüksek enerjiye sahiptir ve yarı-fermi seviyeleri tükenme bölgesi boyunca neredeyse yataydır (Şekil 2.8'te kesikli eğri ile gösterildiği gibi).

Termiyonik emisyon teori, tükenme bölgesindeki sürüklenme (drift) ve difüzyonun ihmal edilebilir olduğunu, bariyer yüksekliğinin kT 'den çok daha büyük olduğunu ve görüntü(hayali) kuvvetinin etkisinin ihmal edilebilir olduğunu varsayar.

Akım yoğunluğu J_{sm} şu şekilde verilir:

$$J_{sm} = qn \left(\frac{kT}{2\pi m^*} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{-m^* v_x^2}{2kT} \right) \quad (2.1)$$

burada n elektron konsantrasyonudur, m^* serbest elektronun etkin kütlesidir, v_x bariyeri aşmak için gereken minimum hızdır ve aşağıdaki ilişkiyle verilir:

$$\frac{1}{2} m^* v_x^2 = q(V_{bi} - V_a) \quad (2.2)$$

burada V_{bi} yerleşik potansiyeldir ve V_a uygulanan voltajdır. Yarı iletkenin elektron konsantrasyonu şu şekilde verilir:

$$n = n_0 \exp \left(-qT \frac{V_{bi} - V_a}{kT} \right) \quad (2.3)$$

$$n_0 = N_c \exp \left(-\frac{Ec - E_F}{kT} \right) \quad (2.4)$$

burada n_0 yarı iletkenin nötr bölgesindeki elektron konsantrasyonudur. (2.4) denklemini (2.3) denkleminde yerine yazarsak elektron konsantrasyonu şu şekilde bulunur:

$$n = N_c \exp \left(-\frac{\phi_B - qV_a}{kT} \right) \quad (2.5)$$

O halde J_{sm} şu şekilde ifade edilir.

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) \quad (2.6)$$

Burada $A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$ Richardson sabitidir.

Uygulanan voltaj V_a sıfır olduğunda, termal denge altında hiçbir net akım olamaz. Sonuç olarak, denklem (2.6) ile verilen akım, metalden yarı iletkeneye olan J_{ms} akım akışı ile dengelenir ve şuna eşit olmalıdır:

$$J_{ms} = -A^* T^2 \exp\left(\frac{-\phi_B}{kT}\right) \quad (2.7)$$

Toplam akım yoğunluğu J_{sm} ve J_{ms} 'nin toplamı ile verilir.

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.8)$$

Burada J_s doyma akımıdır. J net akımı ise pozitifdir.

2.3.2. Tünelleme

Tünelleme, katkılama oranı ve sıcaklığına göre alan emisyonu veya termiyonik alan emisyonu olarak ortaya çıkabilir. Katkılama konsantrasyonu yüksek olduğunda, tükenme bölgesi çok inceler ve fermi seviyesi iletim bandının tabanının üzerinde olabilir. Elektronlar düşük sıcaklıkta fermi seviyesine yakındır ve düz beslemde bu elektronlar yarıiletkenin fermi seviyesinden metale akabilir; bu, alan emisyonu (FE) olarak bilinir.

Daha yüksek sıcaklıkta, bazı elektronlar daha ince ve daha düşük bir bariyer gördükleri fermi seviyesinin üzerine çıkabilir ve bariyerin tepesine ulaşmadan önce metale tünelleyebilirler. Bu işlem termiyonik alan emisyonu (TFE) olarak bilinir. TFE sadece ara

katkılı yarıiletkenlerde gözlenir ve E_m gibi bir enerji seviyesinde maksimum olur. E_m , tükenme bölgesinin kenarındaki iletim bandının altından ölçülür ve aşağıdaki gibi denklem (2.9)'a eşittir.

$$E_m = \frac{qV_{bi}}{[\cosh(E_{00}/kT)]^2} \quad (2.9)$$

burada V_{bi} , toplam bant bükülmesine karşılık gelen voltajdır ve E_{00} , bir akım iletim mekanizması olarak tünelleme ve termiyonik emisyon difüzyonunun göreceli önemini belirleyen karakteristik enerjidir ve denklem (2.10)'da gösterildiği gibi ifade edilir.

$$E_{00} = \frac{h}{4\pi} \left(\frac{N_d}{m_e^* \epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

Burada m_e^* elektronların etkin kütlesidir, ϵ_s yarıiletkenin geçirgenliği ve N_d ise m^{-3} cinsinden dörnor konsantrasyonudur.

Alan emisyonu (FE) $E_{00} \gg kT$ durumunda baskın mekanizmadır. Çoğunlukla sadece düşük sıcaklıklarda görülen durumdur. Daha yüksek sıcaklıklarda $E_{00} \sim kT$ durumudur ve termiyonik alan emisyonunun (TFE) diyot akımına katkısı baskın hale gelir. Sıcaklık kademeli olarak artmaya devam ederse, tüm elektronların bariyerin tepesine ve $E_{00} \ll kT$ 'ye ulaşabilecekleri bir sınıra ulaşılır. Bu termiyonik emisyon difüzyon için geçerlidir. Tünelleme mekanizması için I-V ilişkisi şu şekilde verilmektedir:

$$I_t = I_{t0} \exp\left(\frac{qVa}{E_0}\right) \quad (2.11)$$

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.12)$$

Denklem (2.11)'deki I_{t0} , bariyer yüksekliğinin, yarıiletken parametrelerinin ve sıcaklığın karmaşık bir fonksiyonudur. Alan emisyonu (FE) için $\ln(I)$ -V grafiğinin eğimi sıcaklıkla değişmez ve termiyonik alan emisyonu (TFE) rejimi için $q=nkT$ 'ye eşittir.

Ters beslem için, kontaktaki elektrik alanındaki artış, bir elektronun metalden yarıiletken tünelleme olasılığını arttırır. Bu nedenle, ters beslem altında tünelleme, daha düşük katkılama konsantrasyonunda baskın akım iletim mekanizması olarak da gözlemlenebilir.

2.3.3. Tükenme Bölgesinde Yük Taşıyıcı Birleşimi (recombination) veya Üretimi (generation)

Bu akım, ters beslem için bir üretim akımı ve düz beslem için rekombinasyon akımıdır. Bu akım termiyonik emisyon akımına eklenir ve bazı durumlarda $n > 1$ değerinden sorumlu olabilir. Sadece büyük bariyer yüksekliği, düşük sıcaklık ve düşük taşıyıcı ömrüne sahip hafif katkılı yarıiletken için baskın hale gelir. Sıfır beslemde net akım akışı yoktur çünkü elektron-deşik çifti üretim hızı, Schottky bariyerinin tükenme bölgesindeki elektron-deşik rekombinasyon hızı ile dengelenir. N-tipi yarı iletken üzerindeki bir Schottky bariyer kontağına ters beslem uygulandığında, elektron-deşik çiftleri tükenme bölgesindeki termal denge değerlerini aşar. Bariyerin elektrik alanı bu çiftleri süpürür ve bu da ters akıma neden olur. Ancak uygulanan gerilim ileri yönlü olduğunda, yarıiletkendeki tükenme bölgesine elektronlar enjekte edilir ve metalden deşikler enjekte edilir. Bu fazla elektron-deşik çiftleri tükenme bölgesinde yeniden birleşerek ileri yönlü pozitif bir rekombinasyon akımına neden olur.

Tükenme bölgesinde taşıyıcı üretim-rekombinasyon akımı şu şekilde verilir [16]:

$$J_{rg} = \frac{qn_i W}{2\tau_0} \left[\exp\left(\frac{qVa}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (2.13)$$

τ_0 , tükenme bölgesindeki azınlık taşıyıcı yük ömrüdür, W , tükenme bölgesinin yani tabaksının genişliğidir ve n_i , içsel elektron konsantrasyonudur. Bu denklem, bu akımın yalnızca düşük ileri voltaj değerlerinde önemli hale geldiğini göstermektedir.

Schottky bariyer diyotun tükenme bölgesindeki elektrik alanı ve potansiyel dağılımı, bariyer yüksekliğine, uygulanan voltaja ve safsızlık konsantrasyonlarına bağlıdır. Geleneksel inorganik MS diyotlarda tükenme bölgesi (W) katot arayüzünde oluşur ve bu tüketim tabakasının kalınlığı aşağıda (2.14) denklemi ile gösterilir.

$$W_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_{bi}-V)}{qN_d}} \quad (2.14)$$

Burada ε_0 vakumun geçirgenliğidir, ε_r yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir, V_{bi} kontağın yerleşik potansiyelidir, V harici uygulanan voltajdır, q temel birim yüküdür ve N_d katkı atomlarının (dopantların) yoğunluğudur. Bu formül organik yarıiletken için uygulanırsa N_d , serbest yüklerin yoğunluğu 'n' ye eşit olur. V_{bi} ise anot ve katot iş fonksiyonlarının arasındaki farka eşit olur[17][18].

2.4. Schottky Diyotlarda Elektriksel Parametrelerin Belirlenmesi

Schottky diyotların elektriksel parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan en yaygın yöntem $\ln(I)$ - V eğrisinin lineer bölgesinin eğiminden faydalananarak idealite faktörü (n) ve bariyer yüksekliği (Φ_b), seri direnç (R_s), doyma akımı (I_0) gibi elektriksel parametrelerin elde edilmesidir.

Termiyonik emisyon teorisine göre bir Schottky engelinden akan akım ile kontağa uygulanan gerilim arasındaki ilişki seri direnç (R_s) etkisi de göz önüne alındığında aşağıdaki (2.15) eşitliği ile verilir:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.15)$$

Burada n idealite faktörüdür ve ideal bir diyotta değeri 1' dir. $V > 3kT/q$ için eşitlikte parantez içindeki 1 değeri ihmal edilebilir. İfadede k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı ve I_0 doyma akımı değeridir. Burada I_0 ,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{b0}}{kT}\right) \quad (2.16)$$

Şeklinde verilir. q elektronik yük ($1,6 \times 10^{-19}$ C), V uygulanan voltaj, A diyot alanı, Φ_{b0} sıfır beslem engel yüksekliği ve A^* etkin Richardson sabitidir. n-Si için $A^* = 112 \text{ A cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ dir.

Diyotların idealite faktörlerini hesaplamak için eşitlik (2.17) kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilebilir.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.17)$$

Bu ifadede $dV/d(\ln I)$ teriminin değeri, $\ln(I)$ -V grafiğinin düz beslem tarafındaki lineer kısmın eğiminden elde edilir. Eşitlik (2.16) yeniden düzenlenirse, sıfır beslem engel yüksekliği için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$q\phi_{b0} = kT \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (2.18)$$

Termiyonik emiyon mekanizmasından yola çıkarak buraya kadar elde ettiğimiz parametreler yöntem olarak klasik ya da geleneksel yöntem olarak adlandırılır. Bu yöntem ile $\ln(I)$ -V grafiğine lineer bir fit uygulanır ve eşitlik (2.16), (2.17) ve (2.18) yardımıyla n , Φ_{b0} ve I_0 diyot parametreleri elde edilir. R_s , $\ln(I)$ -V grafiğinden ohm yasası kullanılarak elde edilir. Schottky yapının elektriksel parametreleri akım-gerilim (I-V) verileri kullanmanın yanı sıra kapasitans-gerilim (C-V) verileri kullanılarak da elde edilebilir

Ayrıca geleneksel yöntemden başka Cheung fonksiyonu, Norde metodu gibi yöntemlerde bulunmaktadır. Termiyonik emisyon doğru öngerilimlemedeki (düz beslemdeki) I-V eğrisinin lineer kısmını, Norde doğru öngerilimlemedeki I-V eğrisinin tamamındaki verileri ve Cheung fonksiyonu ise I-V eğrisinin bükülmeye başladığı yerdeki lineer olmayan kısmı kullanır [19].

Temel akım eşitliği (2.15) göz önünde bulundurularak elde edilen (2.19), (2.20) ve (2.21) eşitlikleri literatürde Cheung fonksiyonları olarak adlandırılır [20]. Bu eşitlikler yardımıyla R_s 'nin yanı sıra, n ve Φ_b değerleri elde edilebilir.

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.19)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (2.20)$$

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (2.21)$$

$dV/d\ln(I)$ 'nın I 'ya göre grafiği çizildiğinde lineer bir bölge elde edilir. Bu lineer bölgenin eğiminden R_s seri direnci, düşey eksenini kestiği noktadan da n idealite faktörü değerleri bulunabilir [21].

Schottky diyotun oda sıcaklığında ve belirtilen frekans aralığındaki C - V eğrilerinden elde edilen $C^{-2} - V$ ters beslem karakteristikleri çeşitli elektriksel parametrelerin bulunmasına yardım eder. Ters beslem bölgesi boyunca $C^{-2} - V$ karakteristikleri lineerdir. Her bir frekans değeri için bu lineer bölgeye doğrusal fit uygulanmasıyla kesme potansiyeli $V_0(V)$, difüzyon potansiyeli $V_d(V)$, taşıyıcı (verici) atomların sayısı N_D (cm^{-3}), frekansa bağlı engel yüksekliği $\Phi_b(\text{eV})$, fermi enerji seviyesi E_f (eV), tüketim bölgesinin genişliği W_D parametreleri aşağıda sırasıyla verilen uygun eşitlikler yardımıyla elde edilir.

$$N_C = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (2.22)$$

$$N_D = \frac{2}{q\epsilon_s A^2} \left[-\frac{1}{d(C^{-2})/dV} \right] = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 \tan(\theta)} \quad (2.23)$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (2.24)$$

$$W_D = \left(\frac{2\epsilon_s V_D}{qN_D} \right)^{1/2} \quad (2.25)$$

Burada $V_D = V_0 + kT/q$ difüzyon potansiyelidir. V_0 ise ters beslemdeki lineer C^{-2} - V grafiğinde $C^{-2} = 0$ iken doğrunun yatay eksenini kestiği (voltaj eksenini) nokta olan kesme potansiyelidir. V_0 kesme potansiyeli yardımıyla V_D difüzyon potansiyeli elde edilebilir.

$$\phi_{B(C-V)} = V_D + E_F \quad (2.26)$$

Burada $(m_e^* / m_0) = 0,55$, N_c iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğur ve n katkılı silisyum için değeri $n\text{-Si} = 2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. ϵ_s yarıiletkenin elektriksel geçirgenliğidir ($n\text{-Si}$ için $\epsilon_s = 11,7 \epsilon_0$). ϵ_0 boş uzayın elektriksel geçirgenliğidir ve değeri $8,85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$ 'dir. İstenilen parametreler de belirtilen uygun sabitler yerine yazılarak her bir frekans değeri için sırasıyla (2.22) - (2.26) eşitlikleri yardımıyla bulunur.

2.5. Optoelektronik Özellikler

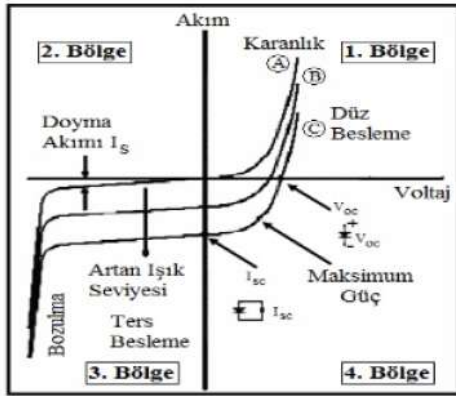
Optoelektronik, ışığın elektronik malzemelerle kuantum mekaniksel etkileşimine dayanan bir bilim dalıdır. Optoelektronik, bilgi teknolojisi ve telekomünikasyondan yenilenebilir enerji ve sağlık hizmetlerine kadar çeşitli uygulamaları olan multidisipliner bir alandır. Işığın çeşitli amaçlar için manipüle ve kontrol edilmesini sağlayarak modern teknolojide önemli bir rol oynamaktadır. Buna fotovoltaikler, fotoiletken cihazlar dahildir ancak bunlarla sınırlı değildir. Fotovoltaik cihazlar, gelen ışığı herhangi bir elektriksel öngerilim olmadan (yani güneş pilleri) elektriğe dönüştürür. Bunu, belirli malzemelerin (genellikle yarı iletkenler) ışık fotonlarını soğurduğu, elektron-deşik çiftleri oluşturduğu ve bir elektrik akımı akışı yarattığı fotovoltaik etki yoluyla yaparlar. Güneş pilleri, fotovoltaik cihazların önde gelen bir uygulamasıdır. Öte yandan fotoiletken cihazlar, gelen ışığı elektron ve deşik (e-h) çiftlerine dönüştürerek cihazın elektriksel iletkenliğini artırır; ancak normalde harici elektriksel öngerilim altında çalışırlar. Fotoiletken cihazlara örnek olarak fotodiyotlar verilebilir. Fotodiyotlar gibi fotoiletken cihazlar, gelen ışığa tepki olarak elektriksel iletkenliklerini değiştirecek şekilde tasarlanmıştır. Işık bir fotodiyota çarptığında elektron-deşik çiftleri üretir ve bu da cihazın elektriksel iletkenliğinde bir artışa yol açar. Bu özellik, fotodiyotları ışık algılama, optik iletişim ve hatta barkod tarayıcılar gibi uygulamalarda kullanışlı hale getirir.

Schottky diyet, fotovoltaik modda (sıfır öngerilimde veya kendinden beslemeli, kendi kendine çalışan) ve fotoiletken modda (ters öngerilim altında) çalışabilen bir cihazdır. Bu cihazlar yarıiletkenin bant aralığı enerjisinden daha yüksek ($hc/\lambda \geq E_g$) fotonlara maruz kaldığında, bu fotonlar fotovoltaik etki kullanılarak doğrudan elektriğe (dc) dönüştürülebilmektedir. Fotovoltaik etki iki adımda gerçekleşir; Birincisi, difüzyon

süreçleri nedeniyle kontakta bir iç elektrik alanı oluşur ve ikinci olarak, ışık altında kontakta elektron-deşik çiftleri oluşur. Bu yük taşıyıcıları, cihazın kontak noktasındaki iç elektrik alanı nedeniyle ayrılır. Bu ayrılma, açık devre voltajı (V_{oc}) denen bir voltaj farkı yaratır. Açık devre voltajı (V_{oc}), bir fotodiyot veya güneş pilinin kendisine bağlı harici bir elektriksel öngerilim olmadığında üretebileceği maksimum voltajdır. Başka bir deyişle, üzerinden hiçbir akım geçmediğinde cihaz üzerindeki voltajdır. Pratik uygulamalarda, açık devre voltajı önemli bir parametredir çünkü fotodiyot veya güneş pilinden kullanılabilecek maksimum potansiyel farkı temsil eder. Bu cihazların ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme verimliliğini belirlemede önemli bir faktördür. Kısa devre akımı (I_{sc}) ise cihaz üzerine uygulanan gerilim sıfır iken ölçülen akım değeridir. Şekil 2.9' da eğrilerin $V=0$ iken akım eksenini kestiği noktalar kısa devre akımı I_{sc} 'yi, $I=0$ iken voltaj eksenini kestiği noktalar ise açık devre voltajı V_{oc} ' yi verir.

Fotoiletken bir diyot ışığa maruz bırakıldığında, diyotun tükenme bölgesinde elektron-deşik çiftleri üretilir. Daha sonra bu çiftler uygulanan elektrik alanı altında ayrılır. Öte yandan bu ayırma ters beslemde daha etkilidir. Işık altında foton ile üretilmiş yük taşıyıcılarının sayısı artar. Özellikle ters beslem bölgesinde bu taşıyıcılar karanlık akıma (herhangi ışık etkisi olmadan elde edilen akım) ek bir akım oluştururlar. Ters beslem akımına fotoakım (I_{ph}) adı verilir ve ışık etkisi ile artan foto-üretilen (photogenerated) yük taşıyıcıların miktarı ile belirlenir. Ayrıca, yük taşıyıcı sayısındaki artış, foto-iletkenlikte bir artışa yol açar. Ek olarak, duyarlılık(sensitive), fotodiyotlar gibi ışığa duyarlı cihazların performansının değerlendirilmesi için kullanılır [22].

Başka bir deyişle, ters beslemde akımdaki artış, ışık altında üretilen elektron-deşik çiftlerinin etkisiyle ortaya çıkar ve fotoakım olarak adlandırılır. Bir diyot aydınlatıldığında, akım taşıyıcıları (elektronlar ve deşikler), taşıyıcı konsantrasyonunun denge durumundan daha düşük olduğu tükenme bölgesinde üretilir. Aydınlatma tarafından üretilen akım karanlık akıma katkıda bulunur. Böylece, fotoakım olarak bilinen akım, karanlık akımdan daha büyüktür. Fotoakım aydınlatma yoğunluğu ile orantılıdır. Elektronlar, yarıiletkenin yasak bant aralığı kadar bir enerjiyi fotonlar tarafından yeterince soğurduğundan, değerlik bandındaki (E_v) birçok elektron iletim bandına (E_c) atlayabilir. Ters beslem akımı, artan ışık seviyesiyle artıyor ise bu durum diyotların ışığa duyarlı hassasiyet veya fotodiyot davranışı sergilediğini belirtir.



Şekil 2.9. Işığa duyarlı bir Schottky diyot için akım gerilim karakteristiği

Işık altında bir Schottky diyodun fotovoltaiik özellikleri şekil 2.9’da 4.bölge ile karakterize edilir. Fotoiletken mod özellikleri ise 3. bölge ile karakterize edilir ve fotovoltaiik mod güneş pili için kullanılabilirken, fotoiletken mod dedektör için kullanılabilir [23].

Işığa duyarlı bir Schottky kontak yapıli diyot için fotoduyarlılık, fototepki veya fotocevap (Photoresponsivity) R ve hassasiyet (Sensitivity) S , aşağıdaki gibi denklem (2.27) ve (2.28) ile ifade edilebilir. Burada I_{ph} , ışık altındaki fotoakımdır. I_d karanlık akım ve P_{in} gelen ışığın optik gücüdür. Fototepki birimi A/W ’dır. Fotoakımın gelen ışığın optik gücüne oranıdır.

$$R = \frac{I_{ph} - I_d}{P_{in}} \quad (A/W) \quad (2.27)$$

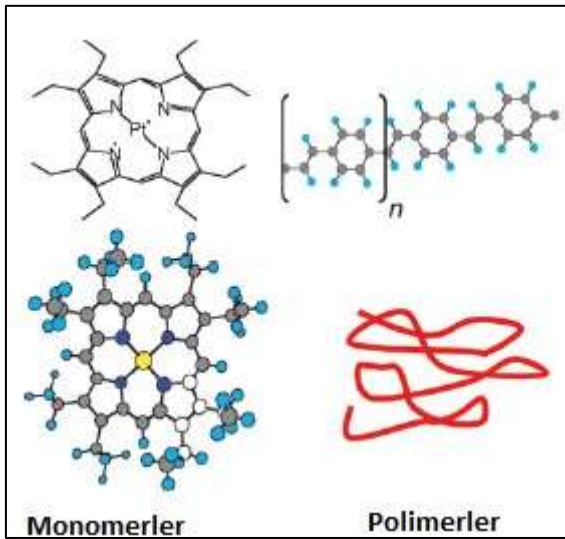
$$S = \frac{I_{ph} - I_d}{I_d} \quad (2.28)$$

Dharma ve arkadaşları [24], Gr / Si Schottky kontak yapısını farklı aydınlatma gücü altında araştırmışlar ve yapının olağanüstü Schottky diyot özellikleri sergilediğini göstermişlerdir. Grafen ve silikon kombinasyonuna dayanan hibrit Gr/Si Schottky kontak diyotunun, herhangi bir voltaj uygulanmadan 532 nm ışığa duyarlı, kendi kendine çalışan, fotovoltaiik modda iyi performans sergilediğini göstermişlerdir.

Tan ve arkadaşları [25], ürettikleri Au/ZnO/n-GaAs MIS tipi Schottky yapısının oda sıcaklığında farklı ışık yoğunlukları altında akım-voltaj özelliklerini incelemişlerdir. Ters ve doğru beslem akımlarındaki davranışlar incelendiğinde üretilen diyotun fotodiyot özelliği sergilediğini belirtmişlerdir.

2.6. Organik Yarıiletkenler

Organik elektronik malzemeler, şekil 1.1'de gösterildiği gibi küçük moleküller veya polimerlerdir. Küçük moleküller, iyi tanımlanmış bir yapıya ve molekül ağırlığına sahiptir. Polimerler, uzun bir zincir içinde herhangi bir sayıda tekrarlanan monomer birime sahip olarak sınıflandırılan moleküllerdir [5]. Küçük moleküller ve polimerler, elektronik ve optik performansta birçok benzerliğe sahiptir, ancak bu malzemeleri kullanarak cihazlar üretmek için kullanılan biriktirme yöntemlerinde farklılık gösterirler. Birçok küçük molekülü organik yarıiletken zayıf çözünürlüğe sahiptir ve çökeltme için termal süblimasyon gerektirirken, polimerler çözelti işlemi için uygundur. Termal süblimasyonla yapılan ince filmlerde, moleküllerin altaşa yapışması nedeniyle düzensiz olabilir. Buna karşılık, çözelti işleme, çok düzgün filmlere ve hatta polimer zincirlerinin hizalanmasına yol açarak filmdeki düzensizliği azaltabilir [5][26].



Şekil 2.10. Organik elektronik malzemeler

Polimerik malzemeler, yumuşak malzemelerdir ve organik yarı iletken özelliklerinden dolayı organik elektronik için önemli bir bileşen olarak ortaya çıkmaktadır. Katı hal malzemelerinden farklı olarak polimerler, kontrol edilebilir özellikleriyle kolay bir yöntemle sentezlenir ve modüle edilir. Modifikasyon katkılama işlemi ile gerçekleştirilir. Böylece polimerik malzemenin elektrik ve dielektrik özellikleri değiştirilebilir. Polimerler örgüsünde yük taşıyıcılarının (elektron ve deşikler) zincir boyunca hareketini ve taşınmasını sağlayan uygun lokasyonlara sahiptir. Çünkü polimerler yapılarında sırayla değişen tek ve çift bağlardan oluşan zincir yapısına sahiptirler yani konjugedirler. Bu nedenle, polimerler son zamanlarda gelişmiş performans, esneklik ve kolay işleme özelliklerini göstermesi sebebiyle Schottky kontak yapıların oluşturulmasında kullanılmaktadır. Polimerler ışığı absorbe etme özelliğine sahiptirler ve güneş pilleri yapımında kullanılmaktadırlar. Ayrıca polimer bazlı Schottky kontak yapılar, fotodetektörler, gaz sensörleri gibi çeşitli prototip uygulamalara büyük ilgi çekmiştir.

Polimerler arasında PVP (Polivinilpirolidon), düşük sıcaklık üretimi, hafif moleküler ağırlığı, daha iyi dayanıklılığı olan ucuz bir malzeme olduğu ve spin kaplama, sol-jel gibi yöntemlerle kolayca kaplanabilmesi gibi avantajlara sahip olduğu için geleneksel arayüzey yalıtım katmanlarına göre tercih edilmektedir.

2.7. Metal- Organik Schottky Kontak Yapısı

1987 yılında Ching W. Tang ve Steven van Slyke, ilk organik yarıiletken bazlı diyotu ürettirler [27, 28]. Bu aygıt elektronik alanında organik veya moleküler elektronik olarak bilinen yeni bir çağın başlangıcıydı. Organik yarıiletkenlerin gelişimi organik elektroniğin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Organik elektronik, iletkenlik gibi arzu edilen elektronik özellikleri gösteren küçük moleküllerin veya polimerlerin tasarımı, sentezi, karakterizasyonu ve uygulanmasıyla ilgili bir fizik ve malzeme bilimi alanı olarak tanımlanır. İnorganik elektronik sınıfına giren cihazlara kıyasla çok daha avantajları olduğundan bu alanda yapılan araştırmalar ve çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmekte ve ilgi görmektedir. Teknolojik açıdan bakıldığında, organik bileşikler, cam gibi düşük maliyetli yüzeylerde kolayca işlenebildikleri için ucuz elektroniklere giden yol gibi görünmektedir. Ayrıca, bazı organik malzemelerin proses edilmesi için ultra yüksek vakum (UHV) gerektirmez. Böylece üretim maliyeti düşürülmüş olur. Bunun yanı sıra, organik malzemelerin moleküler düzeyde modifiye edilmesi (katkılama, sıcaklık gibi) hem

elektronik hem de optik özelliklerinin değiştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu, ortaya çıkan teknolojik taleple belirli uygulamalara uyacak ve her türlü gereksinimi karşılayacak şekilde cihaz tasarlamayı mümkün kılar. Organik yarıiletkenler hem temel araştırma hem de elektronik cihaz endüstrisi için devrim niteliğinde bir alan olarak ortaya çıkmıştır. Uygulamalı araştırmalarla ilgili olarak, organik yarıiletkenler geniş alanlı ekranlar, aydınlatma, daha verimli güneş pillerini mümkün kılmıştır.

Organik yarıiletkenler iki ana kategoriye ayrılır, polimerler veya küçük moleküller. Kimyasal açıdan bu iki malzeme türü arasında büyük farklılıklar vardır ve bu onların teknolojik yönlerine de yansır. Polimerik makromoleküller, temel birimlerin, monomerlerin tekrarlanmasından oluşur ve tipik olarak organik çözücülerde çözünür. Böylece sıvı halde işlenebilirler ve bir alttaş üzerinde dönel kaplama yöntemi ile kaplanabilirler. İkinci kategoriye ait malzemeler, küçük moleküllerden oluştukları için genellikle moleküler malzemeler olarak adlandırılır. Küçük moleküller çözünür olsalar bile, çoğunlukla termal olarak buharlaştırılmaları gerekir.

Genel anlamda organik yarıiletkenler zayıf van der waals kuvvetleri ile birbirine bağlanan molekül yapılarından oluşur. Bu kuvvetler sonucunda yük taşıyıcılarının enerji durumlarını lokalize olur. Böylece yük taşıyıcıları bir enerji durumundan diğerine atlayabilir. Bu nedenle, organik yarıiletkenlerin yük taşıma mekanizması, elektron taşınması durumunda, bir molekülün bir anyon radikalinden nötr olana, ancak en düşük boş moleküler orbitale (LUMO) kadar devam eden sıralı bir taşıyıcı transferi ile anlaşılır. Bu moleküler yörünge, inorganik yarıiletkenlerdeki iletim bandının benzeridir. Deşik(hole) taşınması durumunda, süreç, elektronların nötr bir molekülden katyon radikaline, değerlik bandının organik karşılığı olan en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) yoluyla sıralı bir transferi olarak gerçekleşir [29]. Moleküler düzensizlik, sıcaklık veya basınç, diğer faktörlerin yanı sıra, yük taşıyıcılarının bir enerji seviyesinden diğerine atlama işleminin gerçekleşme hızını etkiler. İnorganik yarı iletkenlerde olduğu gibi, organik yarı iletkenler HOMO ve LUMO seviyeleri arasında bir enerji boşluğuna sahiptir. Bu enerji, organik yarıiletkenin optik özelliklerinin yanı sıra elektronik doğasını da tanımlar. Yük taşıyıcısının türüne bağlı olarak, organik yarıiletkenler n-tipi (elektron taşıma), p-tipi (deşik taşıma) veya iki kutuplu (elektron vedeşik taşıma) olarak sınıflandırılır. Bu genellikle moleküler yörüngelerin enerjisi tarafından belirlenir, dolayısıyla inorganik yarıiletkenlerin aksine, organik yarıiletkenlerin kendilerine özgü bu özellikleri elde etmek için katkılanmasına gerek

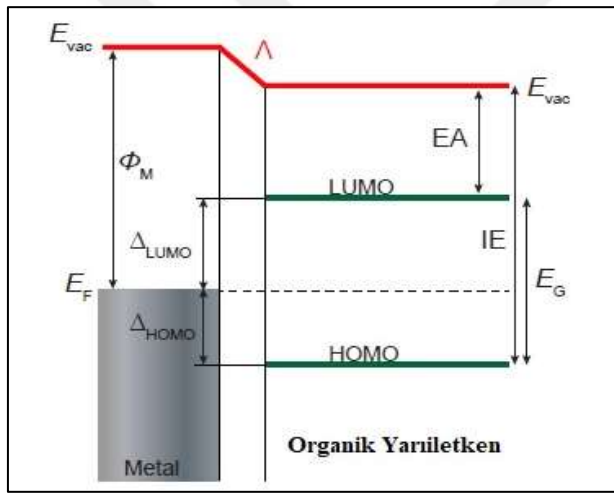
yoktur. Bununla birlikte, metal-organik yarıiletken kontak edilmesi durumunda, metal elektrotların moleküler yörüngelere göre birikmesi ve iş fonksiyonu, organik yarıiletkene yük enjeksiyonunu önemli ölçüde etkileyebilir [30].

Metal-organik yarıiletken arayüzeyinde yük taşınım mekanizması son yirmi yılda yoğun bir araştırmaya konu olmuştur. Bir metal ve bir organik yarı iletken temas ettiğinde, arayüzey boyunca yük aktarımı, enerji seviyelerinin bükülmesi yani bant bükülmesi, fermi enerji seviyelerinin yeniden hizalanması, arayüzey kimyasal reaksiyonları nedeniyle arayüzeyde bir dipol tabakası oluşturulabilir. Bu dipoller, metal-organik yarıiletken arayüzeyindeki enerji seviyesi hizalamasını yeniden düzenleyerek, metalin fermi enerjisi ile yük taşınımına ayrılan moleküler seviyeler arasındaki enerji farkını azaltır veya artırır. Bu enerji bariyerleri, metallerden moleküler yarı iletkene yük enjeksiyonunu sınırlar ve bu da cihazların performansı üzerinde bir etkiye sahiptir. Bu nedenle metal-organik yarıiletken arayüzeyinde yük taşınım mekanizmasına ilişkin doğru bir bilgi aygıt optimizasyonu için gereklidir [30].

Polimerler, kolayca kontrol edilen elektriksel iletkenliklerinden dolayı Schottky diyotlarında iletken veya yarı iletken olarak kullanılabilir. Polimerler kendisinden daha düşük iş fonksiyonuna sahip metal ile kontak edildiğinde Schottky doğrultucu kontak oluşur. Aksi halde yüksek iş fonksiyonuna sahip metal ile düşük iş fonksiyonuna sahip p-tipi polimer yarıiletken kontak edilirse omik kontak oluşur. n-tipi polimer yarıiletken için bu durum tam tersidir. Eğer metalin iş fonksiyonu, n-tipi polimer yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyükse Schottky doğrultucu kontak oluşur. Aksi halde düşük iş fonksiyonuna sahip metal ile yüksek iş fonksiyonuna sahip n-tipi polimer yarıiletken kontak edilirse omik kontak oluşur [31, 32].

Metal / organik yarıiletken arayüzey incelemesi yapılırken göz önünde bulundurulması gereken birkaç parametre vardır. Bunların başlıcaları, tipik bir metal / organik yarıiletken kontak edilmesi durumunda arayüzey elektronik yapısının gösterildiği Şekil 1.1'de belirtilmiştir. E_F , malzemelerin Fermi seviyesine karşılık gelir. HOMO ve LUMO, sırasıyla en yüksek dolu moleküler orbital (deşik taşıma seviyesi) ve en düşük boş moleküler orbital (elektron taşıma seviyesi). Her malzemenin vakum seviyesi Evac olarak belirtilir. Metalik elektrotun (ϕ_m) iş fonksiyonu, vakum ve fermi seviyesi arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır. Organik yarıiletken durumunda, iyonlaşma enerjisi (IE) ve elektron yakınlığı

(EA), sırasıyla vakum seviyesi ile HOMO ve LUMO arasındaki enerji farkıdır. Λ arayüzey dipolüdür. E_G organik yarıiletkenin enerji bant aralığıdır. Δ_{HOMO} , metalik kontağın E_F 'si ile organik yarıiletkenin HOMO seviyesi arasındaki arayüzey enerji bariyerini temsil ederken Δ_{LUMO} , E_F ve LUMO arasındaki enerji bariyeridir. Bu iki parametre, HOMO ve LUMO arasındaki enerji boşluğu veya enerji farkı elektriksel ve optik performansı anlamak için gereklidir. Metal-organik arayüzeylerde, metallerin ve organiklerin dalga fonksiyonları birbirleriyle etkileşime girerek arayüzde yeni bir dalga fonksiyonuna yol açar. Bu örtüşme nedeniyle, arayüzde yükün yeniden düzenlenmesi gerçekleşir ve böylece bir arayüzey dipolü Λ oluşur. Bu nedenle moleküler enerji seviyeleri metalin Fermi seviyesine göre kaydırılır [30].



Şekil 2.11. Metal-organik yarıiletken kontak arayüzeyinde enerji bant diyagramı

Bu tür arayüzeylerin karmaşıklığını açıklamaya çalışmak için çeşitli yaklaşımlar ve modeller ortaya çıkmıştır:

- Schottky-Mott model: Bu modelde etkileşimli olmayan metal–yarı iletken arayüzler varsayılmaktadır. Metal elektrotun E_F 'sine göre moleküler seviyelerin enerjisi, herhangi bir arayüz dipolü dikkate alınmadan ($\Lambda = 0$) vakum seviyesine göre hizalanır. Bu nedenle, elektron enjeksiyon bariyeri metal elektrot iş fonksiyonu ϕ_M ile LUMO enerjisi seviyesinin arasındaki farka eşittir, deşik enjeksiyon bariyeri ise ϕ_M ve HOMO enerjisi arasındaki farktır [33].
- Yüzey metal elektronik yapısının yeniden düzenlenmesi: "pillow etkisi": Bir molekülün elektronik yoğunluğu ile yüzey metal elektronları arasındaki Coulomb itmesi, metalin

iş fonksiyonunu azaltır. Bu etki genellikle altın gibi büyük iş fonksiyonlu soy metaller için daha büyüktür.

- Arayüzey kusurları ve kimyasal bağların neden olduğu enerji durumları: Bir organik yarıiletken ile bir metal arasındaki kimyasal bağlar ve / veya kusurlar, yarı iletkenin orijinal enerji boşluğu ile örtüşen dolu veya boş elektronik durumlar yaratabilir. Bu etki tipik olarak bir metal, organik yarıiletken üzerine buharlaştırıldığında veya organik malzeme reaktif bir metal üzerinde buharlaştırıldığında meydana gelir.
- Arayüzey durum yoğunluğu: Bir metal-organik yarıiletken arayüzeyinde, metal elektron dalga fonksiyonu yarıiletkenin içine doğru ilerler ve penetrasyon derinliği yarıiletkenin enerji aralığına üstel olarak bağlıdır. Metal durumları ve yarıiletken durumları arasındaki örtüşme, arayüzey moleküllerinin moleküler seviyelerini genişletir ve yarıiletkenin boşluğunda, indüklenmiş arayüzey durumları yoğunluğu olarak bilinen, arayüzey durumlarının yoğunluğunu indükler. Bu teori, zayıf etkileşimli moleküler arayüzeyleri açıklamak için kullanılır [34].



3. DENEYSEL YÖNTEM

Metal nanopartiküllerin veya nanoyapıların polimer malzemelere katkılanmasıyla elde edilen polimer-metal nanokompozitler; güneş pillerinde ve fotoelektrik etkilerin incelendiği fotodiyotlarda, elektronik anahtarlamanın uygulandığı transistörlerde ve birçok elektronik cihazda optik, elektronik, mekanik ve yapısal özellikleri nedeniyle gelecek vaat eden ileri teknolojik malzemeler olarak araştırmacıların dikkatini çekmiştir.

Polimer-metal nanokompozitleri oluşturmak ve stabilize etmek için kullanılan birçok metal nanopartikül vardır [35, 36]. Birçok elektronik ve optoelektronik cihaz teknolojisi uygulamasında, metal-polimer nanokompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, ZnO (çinko oksit) ve CeO₂ (seryum dioksit) metal-oksit nanopartikülleri, metal-oksit malzemelerin yüksek fotoduyarlılığı nedeniyle PVP (Polivinilpirolidon) polimerine katkılanmıştır.

3.1. ZnO Nanoyapıların Sentezi

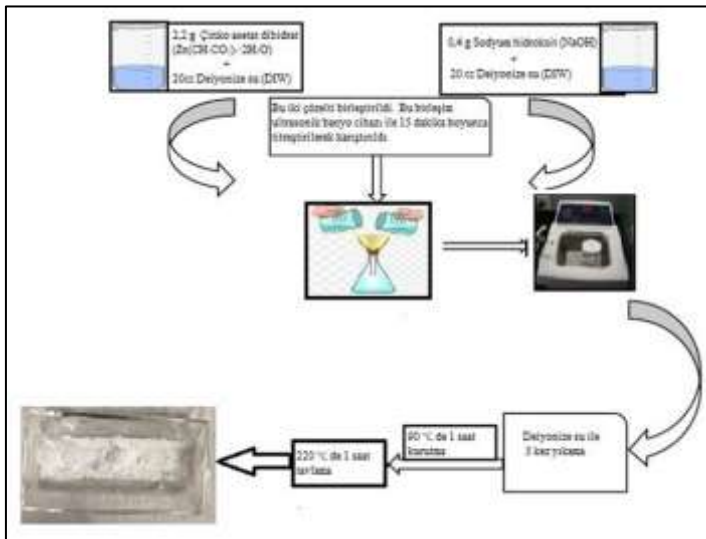
Çinko oksit (ZnO), n tipi yarıiletken geçiş metalidir oda sıcaklığında geniş optik bant aralığına (~3,3 eV) sahiptir. Genel olarak Zn atomu, ZnO nano yapısında +2 oksidasyon durumu sergiler ve hekzagonal (P6₃mc space group), kübik (Fm3m space group) veya tetragonal (P4₂/mm space group) kristal simetrilerinde bulunabilir. ZnO nanopartikülleri ve bunların nano kompozitleri, termal ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmektedir [37].

ZnO nano parçacıkları, benzersiz elektriksel, optik, fotoiletken özellikleri ve yüksek eksiton bağlanma enerjisi (60meV) nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Düşük maliyeti ve iyi elektriksel, optik, toksik olmayan davranış gibi diğer özellikleri nedeniyle, güneş pilleri, gaz sensörleri, spintronik, ultraviyole lazerler gibi farklı alanlarda birçok uygulamaya sahiptir [38, 39].

Arayüzey katmanı, özel uygulamaya ve cihaz için gereken özelliklere göre seçilir. Çinko oksit (ZnO) nanoyapıları, elektronik, optik, algılama ve biyotıp dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerdeki benzersiz özellikleri ve kullanımları nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmüştür. ZnO nanoyapılarının benzersiz özelliklerinden birkaçı: (i) katalitik aktivite ve

sensör uygulamaları için mükemmel yüksek yüzey alanı / hacim oranı, (ii) nanoelektromekanik sistemlerde ve diğer mekanik uygulamalarda kullanılmalarını sağlayan büyük mekanik dayanım, (iii) pillerin ve süper kapasitörlerin kullanılmasını sağlayan yüksek enerji depolaması (iv) kısa dalga boylu optoelektronik uygulamaların iyi çalışmalarını sağlayan geniş bir bant aralığı (3,37 eV) [40].

ZnO nanoyapıların sentezi için çinko asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Saflık $\geq 99\%$), sodyum hidroksit (NaOH, Saflık $\geq 99\%$), deiyonize su (DIW) kullanılmıştır. Çinko asetat dihidrat ve sodyum hidroksitten 0,5 M çözelti hazırlandı. Bu amaçla 2,2 g çinko asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve 0,4 g NaOH, 20 cc yüksek saflıkta deiyonize su içerisinde ayrı ayrı erlenmeyer şişelerinde çözüldü. Daha sonra bu iki çözelti birleştirildi. Bu birleşim ultrasonik banyo cihazı ile 15 dakika boyunca titreştirilerek karıştırıldı. Oluşan bu yeni karışım 10 dakika dinlenmeye yani çökelmeye bırakıldı. Ardından yıkama işlemine başlandı. Bunun için karışımın belirgin çöken miktarının yüzeyinde ve üzerindeki fazla sıvı miktarı pipetle çekilip sonra karışıma 20 cc deiyonize su ekleyip ardından 30 saniye ultrasonik titreştiricide karıştırıldı ve sonrasında 15 dakika çökmesi için oda sıcaklığında bekletildi. Bu yıkama işlemi 5 kez yapıldı. Yıkama işlemi bittikten sonra vakumlu fırın içerisinde 90°C 'de 1 saat kurutma işlemi yapıldı ve $\text{Zn}(\text{OH})_2$ tozu elde edildi. Kurutma işlemi bittikten sonra son aşamada tavlama işlemi için $\text{Zn}(\text{OH})_2$, 220°C 'de 1 saat fırında bekletildi. Sonuçta oluşan beyaz renkte ZnO nanopartikülleri ve genel proses akış şeması şekil 3.1'deki gibidir.



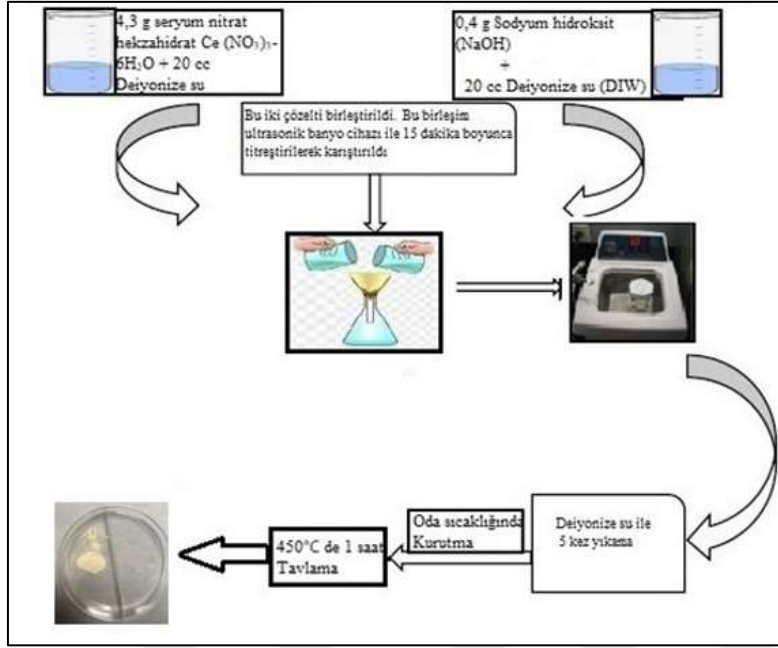
Şekil 3.1. ZnO sentezi proses akış şeması

3.2. CeO₂ Nanoyapının Sentezi

Nadir toprak oksitleri, 4f yörüngesinde dolu olmayan elektronik yapısı nedeniyle olağanüstü elektronik, manyetik ve lüminesans özelliklerine sahiptir. Seryum dioksit (CeO₂) nadir toprak elementi oksitlerinden biridir ve kimyasal kararlılığı, yüksek oksijen depolama kapasitesi ve ışık altındaki stabilitesi nedeniyle n-tipi bir yarıiletkendir. Güneş pilleri, oksijen sensörleri, katı oksit yakıt hücreleri, katalitik malzemeler, ultraviyole (UV) filtrasyonu ve ilaç dağıtımı gibi çeşitli ileri teknolojilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Oksijen boşlukları ve küçük polaronlar seryum dioksit kafesin kusurlarıdır.

Oksijen kusurlarının konsantrasyonunun artırılması, oksit anyonların difüzyon hızını artırır ve sonuç olarak kafesteki iyonik iletkenliği artırır. Bu faktörler, CeO₂'nin yakındaki moleküllerle etkileşim enerjilerini ve yüzey aktivitelerini belirler. Bu nedenle, yüksek yüzey aktivitesi ve yüksek elektronik iletkenlik, bir katalizör, yakıt hücresi ve elektronik bileşen olarak uygulama potansiyelini yaratmıştır [6].

CeO₂ nanoyapıların sentezi için seryum nitrat heksahidrat (Ce (NO₃)₃· 6H₂O, Saflık %99) ve sodyum hidroksit (NaOH, Saflık %99), deiyonize su (DIW) kullanılmıştır. Seryum nitrat heksahidrat ve sodyum hidroksitten 0,5 M çözelti hazırlandı. Bu amaçla 4,3 g seryum nitrat heksahidrat ve 0,4 g NaOH, 20 cc yüksek saflıkta deiyonize su içerisinde ayrı ayrı erlenmeyer şişelerinde çözüldü. Daha sonra bu iki çözelti birleştirildi. Bu birleşim ultrasonik banyo cihazı ile 15 dk boyunca titreştirilerek karıştırıldı. Oluşan bu yeni karışım 10 dakika dinlenmeye yani çökelmeye bırakıldı. Ardından yıkama işlemine başlandı. Bunun için karışımın belirgin çöken miktarının yüzeyinde ve üzerindeki fazla sıvı miktarı pipetle çekilip sonra karışıma 20 cc deiyonize su ekleyip ardından 30 saniye ultrasonik titreştiricide karıştırıldı ve sonrasında 15 dakika çökmesi için oda sıcaklığında bekletildi. Bu yıkama işlemi 5 kez yapıldı. Yıkama işlemi bittikten sonra oda sıcaklığında bekletilerek kurutma işlemi yapıldı. Kurutma işlemi ardından elde edilen Ce(OH)₂ tozu, son aşamada fırın içerisine konup 450°C' de 1 saat tavlama işlemi yapıldı. Sonuçta oluşan sarı renkte CeO₂ nanopartikülleri ve genel proses akış şeması şekil 3.2'deki gibidir.



Şekil 3.2. CeO₂ sentezi proses akış şeması

3.3. Omik Kontağın Oluşturulması

MS ve MPS schottky diyotları öz direnci 1-10 $\Omega \cdot \text{cm}$, (100) yönelimli, 300 μm kalınlıklı ve 5.08 cm çaplı n- tipi Si alttaş üzerinde üretildi. n-Si alttaş yüzeyindeki kontaminasyonları ve oksitleri ortadan kaldırmak için ultrasonik banyoda çeşitli kimyasal solüsyonlarla temizlendi. İlk olarak, alttaş ultrasonik bir banyoda (1:1:5) oranında hazırlanan H₂SO₄:H₂O₂:H₂O solüsyonunda 60 saniye boyunca yıkanmış, N₂ (nitrojen) gazı ile kurutulmadan önce deiyonize su ile uzun süre yıkanmıştır. Daha sonra, alttaşın arka yüzeyi omik kontak elde etmek için, termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak 150 nm kalınlığında 10⁻⁶ Torr'da yüksek saflıkta Au (% 99.995) ile iyice kaplandı. Ardından alttaş nitrojen ortamında 550 °C sıcaklıkta beş dakika tavlandı.

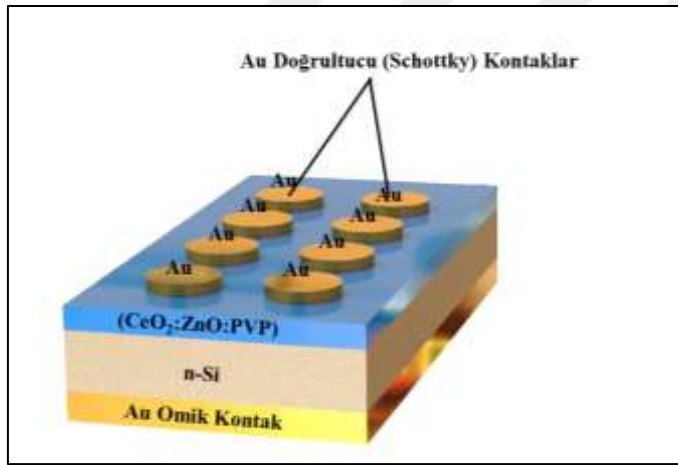
3.4. (CeO₂:ZnO:PVP) Arayüzey Katmanının Oluşturulması

(CeO₂:ZnO:PVP) arayüzey katmanının oluşturulması için sentezlemiş olduğum CeO₂, ZnO nanoyapıları ve polivinilpirolidon (PVP) kullanıldı. %5 (ağırlık/hacim) oranında PVP solüsyonu elde etmek için solvent olarak deiyonize suda çözdürüldü. Ardından 0,005 g CeO₂ ve 0,05 g ZnO yani toplamda 0,1 g CeO₂:ZnO birleşimi PVP çözeltisine eklendi.

Elde edilen ($\text{CeO}_2\text{:ZnO:PVP}$) karışımı ultrasonik banyoda 10 dakika titreştirilerek karıştırıldı. Ardından bu karışım, omik kontağı yapılmış olan n-Si yarıiletkenin ön yüzüne bir damla pipet yardımıyla damlatıldı ve dönel kaplama yöntemi ile 1000 rpm, 20 saniye'de kaplandı.

3.5. Doğrultucu (Schottky) Kontak Oluşturulması

Doğrultucu kontak yapmak için, hazırlanan arayüzey ($\text{CeO}_2\text{:ZnO:PVP}$)/n-Si tabakalı yarıiletken, ince film termal buharlaştırma sistemine alınarak burada arayüzey kaplı yüzeyi üzerine 1 mm çapında (Şekil 3.3) ve 200 nm kalınlığında yine yüksek saflıkta ($\sim 99,999\%$) Au dairesel kontakların veya diğer adıyla doğrultucu kontakların aynı ince film termal buharlaştırma sisteminde 5×10^{-6} Torr'da kaplaması gerçekleştirildi. Böylece Au/n-Si (MS) ve Au/($\text{CeO}_2\text{:ZnO:PVP}$)/n-Si (MPS) Schottky diyot yapıların fabrikasyonu tamamlanmış oldu.



Şekil 3.3. Au/($\text{CeO}_2\text{:ZnO:PVP}$)/n-Si (MPS) Schottky yapısına ait şematik gösterim



4. KARAKTERİZASYON

4.1. XRD Analizi

X ışını kırınımı (XRD) malzemelerin kimyasal bileşimi ve kristal yapısı hakkında çok yönlü bilgiler sunarak karakterize edilmelerini sağlar ve tahribatsız bir yöntemdir. . Kırınım desenindeki pik şiddetleri ve yerleşimlerine bakılarak malzemenin kimliği tayin edilir.

CeO₂ ve ZnO nano-parçacık için X-ışını Kırınımı (XRD) sonucu Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 'de verilmiştir. Burada XRD ölçümleri 20 ile 100 arasında değişen 2 θ açısında taranmıştır. Şekillerden de görüldüğü gibi, XRD tepe noktalarını gösteren model, CeO₂ ve ZnO nano-parçacıkların verileri referans kodu 96-434-3162 (CeO₂) ve 96-901-1663 (ZnO) ile iyi bir şekilde eşleşmektedir ve gözlemlenen pikler ile bu piklere karşılık gelen kristal düzlemleri literatürde yer alan sonuçlarla örtüşmektedir. Şekil 4.2' de CeO₂ nanoyapının XRD grafiğine bakıldığında 2 θ =28.6°, 33.2°, 47.5°, 56.3°, 59.2°, 69.5°, 76.6°, 79.2°, 88.4° ve 95.3° konumlarında gözlenen pikler (111) , (200), (220), (311), (222), (400) , (331), (420), (422) ve (511) kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir [6, 41, 42, 43, 63]. Bu sonuçlar CeO₂ kübik (Fm3m space group) yapıda ve örgü parametrelerinin a=b=c=5.409 Å değerinde olduğunu göstermektedir. X ışını kırınım deseninin gösterdiği gibi, tüm tepe pik noktaları seryum dioksit ile ilgilidir ve bu modelde diğer safsızlıklarla ilgili ek tepe noktaları yoktur. Ayrıca, piklerin genişlemesi kuantum sınırlama etkisinden kaynaklanmaktadır ve numunenin nanopartiküllerden oluştuğunu göstermektedir.

Şekil 4.3'de ZnO nanoyapının XRD kırınım deseni incelendiğinde (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004), (202) ve (023) kristal düzlemlerine karşılık gelen piklerden numunenin hekzagonal (P63mc space group) yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır ve piklerin genişlemesi parçacık boyutlarının çok küçük olduğunu göstermektedir[44, 45, 46, 64].

Sentezlenen CeO₂ ve ZnO nanoyapıların ortalama parçacık boyutunu hesap etmek için denklem (4.1) ile gösterilen Debye-Scherrer eşitliği kullanıldı.

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (4.1)$$

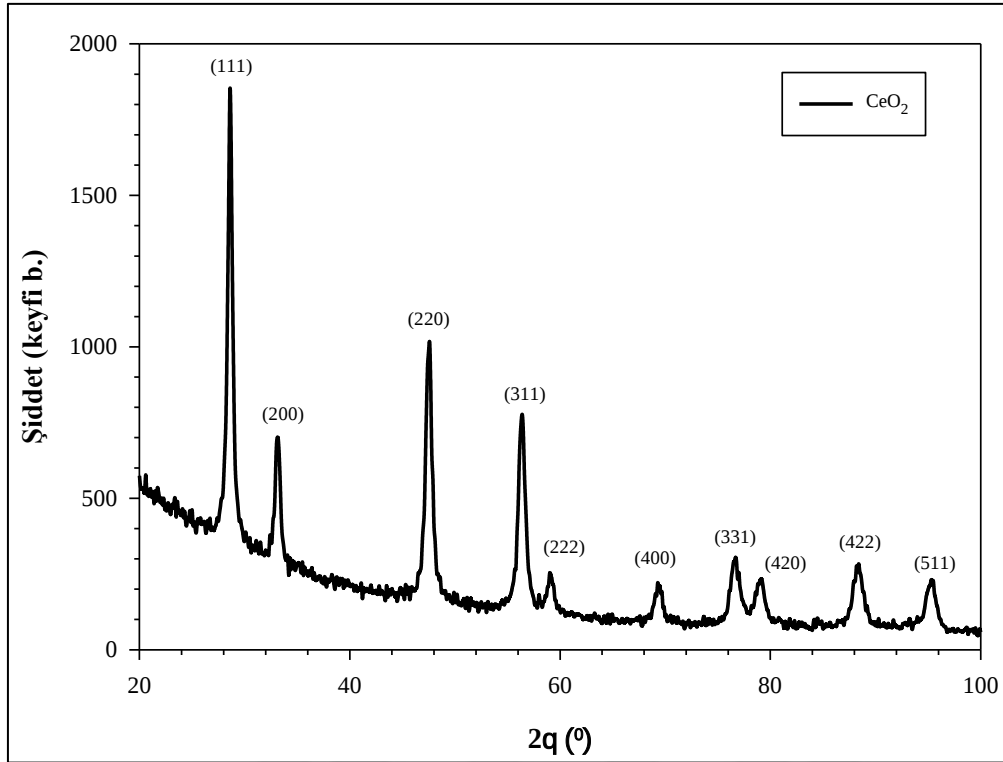
Bu eşitlikte D ortalama parçacık boyutu, k bir sabit ve değeri 0,9 'dur. β ilgili pikin maksimum şiddetinin yarı genişliği (FWHM) ve λ kullanılan X-ışınının dalgaboyudur . X-ışını kırınımı ölçümleri, CuK1 α (1.540 Å) kaynaklı APD 2000 PRO XRD cihazı kullanılarak elde edildi. Sentezlenen nanoyapıların ortalama parçacık boyutunu hesaplamak için kırınım desenlerindeki tespit edilen kristal düzlemlere karşılık gelen tüm piklerin maksimum şiddetinin yarı genişliği hesaba katılmış ve kullanılmıştır. Çizelge 4.1 ve 4.2'de görüldüğü gibi ilgili pikin maksimum şiddetinin yarı genişliği arttıkça parçacık boyutu azalmaktadır. Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak ortalama parçacık boyutu CeO₂ nanoyapı için 11 nm ve ZnO nanoyapı için 34 nm olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.1. CeO₂ nanoyapının yapısal parametreleri

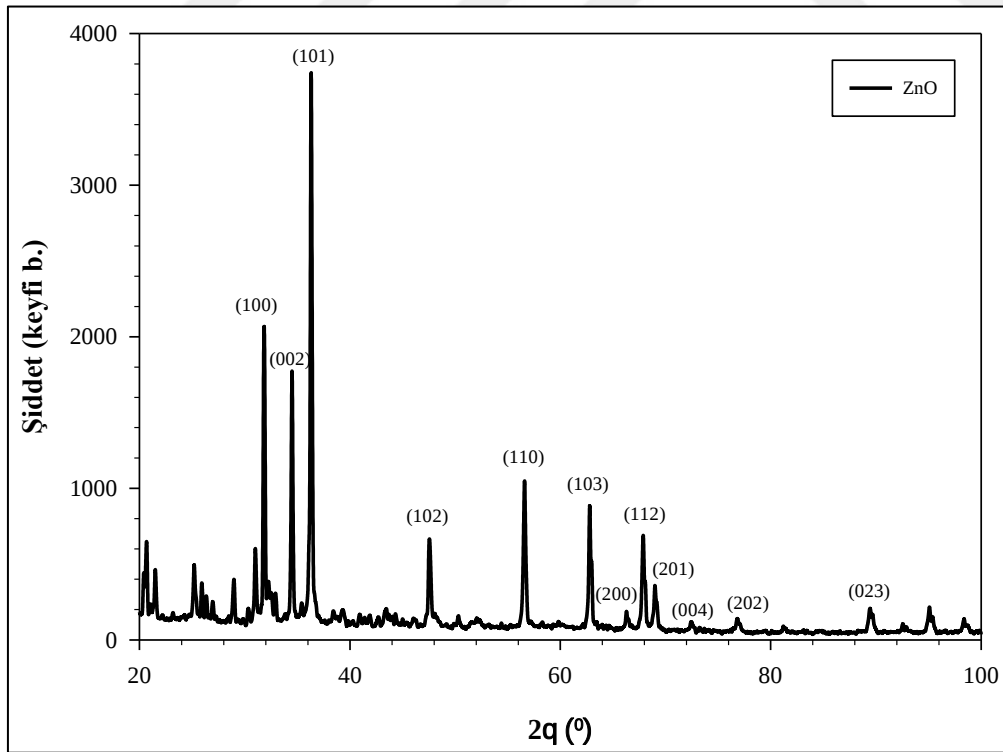
2 θ (°)	FWHM (nm) (Maksimum şiddet yarı genişliği)	D (nm) (Parçacık boyutu)
28,624	0,522	15,718
33,143	0,572	14,490
47,517	0,680	12,757
56,363	0,759	11,872
59,094	0,884	10,327
69,390	0,826	11,698
76,677	0,972	10,421
79,022	1,351	7,623
88,358	1,230	9,008
95,258	1,178	10,010

Çizelge 4.2. ZnO nanoyapının yapısal parametreleri

2 θ (°)	FWHM (nm) (Maksimum şiddet yarı genişliği)	D (nm) (Parçacık boyutu)
31,850	0,163	50,683
34,491	0,170	49,017
36,316	0,186	44,832
47,565	0,219	39,578
56,587	0,237	38,097
62,829	0,280	33,230
66,343	0,343	27,666
67,901	0,343	27,890
69,033	0,398	24,235
72,484	0,323	30,468
76,880	0,445	22,816
89,485	0,460	24,33



Şekil 4.1. CeO₂ nanoyapının XRD analizi

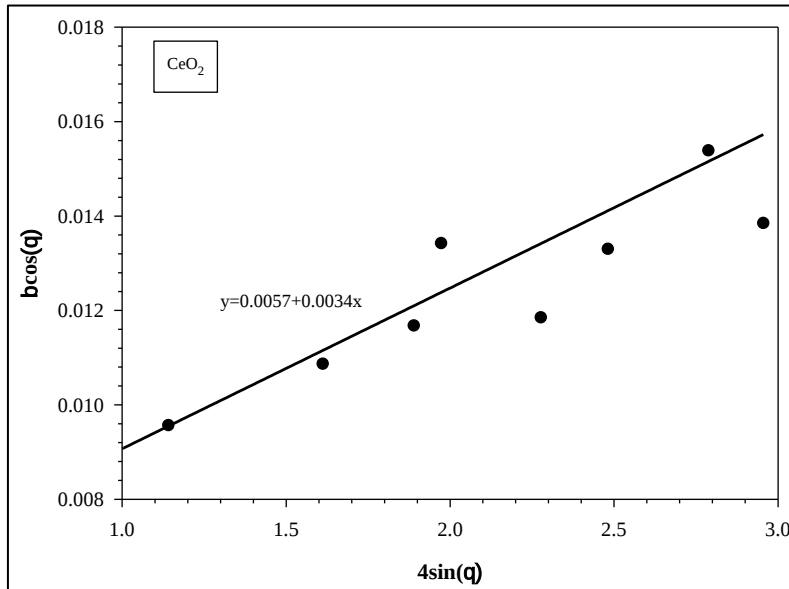


Şekil 4.2. ZnO nanoyapının XRD analizi

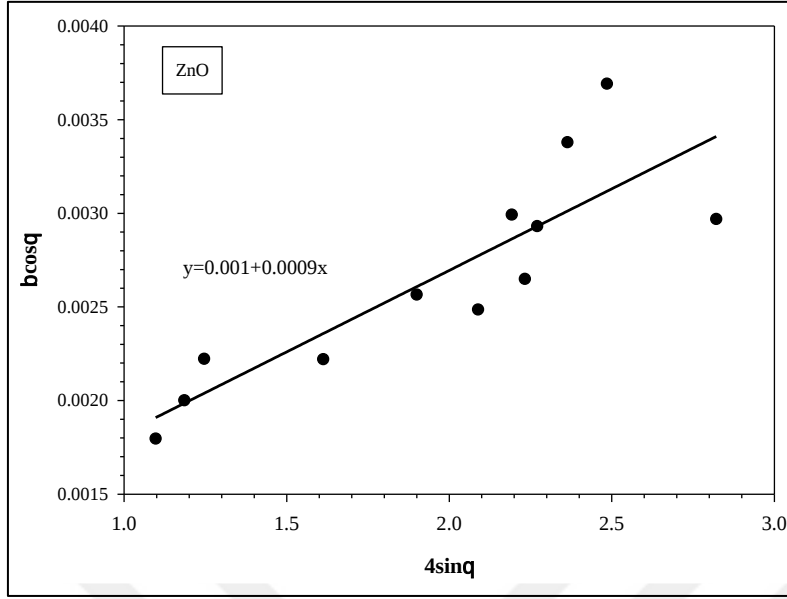
Williamson-Hall (WH) yöntemi, XRD analizinde kristalit boyutlarını tahmin etmek ve kristal kafeslerdeki mikro gerilmeleri değerlerini öngörmek için kullanılan bir tekniktir. Kafes yer değiştirmesi, safsızlıklar ve dislokasyonlar gibi kafes kusurları mevcut olduğunda, bunlar kristal kafeste strese neden olur ve XRD modelindeki Bragg tepelerinin genişlemesine ve kaymasına neden olur. WH yöntemi özellikle kusurlu kristaller veya kafes kusurları içeren malzemelerle uğraşırken kullanışlıdır. Williamson-Hall yönteminin arkasındaki temel fikir, kristalit boyutu, kafes gerilimi ve kristal kafesteki diğer kusurlar gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilecek X-ışını kırınım tepe noktalarının genişlemesini analiz etmektir. Williamson-Hall denklemi şu şekilde verilir [85]:

$$\beta \cos \theta = \frac{k\lambda}{D} + 4\varepsilon \sin \theta \quad (4.2)$$

Williamson-Hall grafiği bu denklemin grafiksel bir temsidir; burada $\beta \cos(\theta)$, $4\sin(\theta)$ 'ye karşı çizilir. Verilerin doğrusal regresyonu, eğimin (ε) ve y ekseninin kesişiminin ($k\lambda/D$) belirlenmesine olanak tanır ve sırasıyla kristal kafesteki kristalit boyutu (D) ve mikro gerinim (ε) hakkında bilgi sağlar. Şekil 4.4'de CeO_2 ve ZnO nanoyapıları için W-H grafikleri gösterilmektedir. Buna göre CeO_2 nanoyapısı için kristalit boyutunun 24 nm'den küçük olduğu ve mikro-gerinim değerinin $3,4 \times 10^{-3}$ olduğu tahmin edilmektedir. Öte yandan ZnO nanoyapısı 138 nm'den daha küçük bir kristalit boyutuna ve $0,9 \times 10^{-3}$ mikro-gerinim değerine sahip olduğu öngörülmüştür.



Şekil 4.3. Sentezlenen CeO_2 nanoyapının W-H grafiği



Şekil 4.4. Sentezlenen ZnO nanoyapının W-H grafiği

4.2. UV-Visible Spektroskopisi

Ultraviyole-görünür spektroskopi (UV-Vis), numunenin morötesi ve görünür spektral bölgedeki optik soğurma, geçirgenlik veya yansıma spektrumlarının belirlenmesine imkan verir. Işık numuneden geçtikten sonra numunenin geçirgenliği ya da soğurganlığı belirlenebilir. Böylece numunenin, enerji bant aralığı soğurma (absorbans) veya geçirgenlik spektrumlarının ölçüm ve analizinden belirlenebilmektedir [47, 48]. UV-Vis spektrometre cihazı ile elde edilen geçirgenlik (T) spektrum verileri ile absorbans (A) yani soğurganlık bulunabilir. Lambert-Beer yasasına göre absorbans (A) denklem 4.3 ile ifade edilir.

$$A = -\log T\% = -\log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (4.3)$$

Burada I örneğin yada numunenin içinden geçen ışık şiddeti, I_0 ise örneğe gelen ışığın şiddetidir. $I_0 = 100$ yani gelen ışığın şiddeti %100 olarak kabul edilirse, absorbans (A) ile geçen ışığın şiddeti (T) arasındaki ilişki denklem 4.4 ile ifade edilebilir.

$$A = 2 - \log I \quad (4.4)$$

Soğurma spektrumundan elde edilen verilerle ‘ α ’ absorpsiyon (soğurma) katsayısı denklem 4.5 ile hesaplanır.

$$\alpha = 2.302 \frac{A}{t} \text{ (cm}^{-1}\text{)} \quad (4.5)$$

Burada t , UV-Vis spektrometre cihazında numuneyi içine yerleştirdiğimiz tüpün kalınlığıdır ve değeri genelde 1cm olarak alınır. Absorpsiyon (soğurma) katsayısı elde edildikten sonra Tauc eşitliği kullanılarak yarıiletken malzemenin yasak enerji bant aralığı ya da enerji aralığı (E_g) bulunabilir. Tauc eşitliğine göre direkt bant aralığına sahip yarıiletken malzemelerde absorpsiyon katsayısı (α) ve enerji aralığı (E_g) arasında;

$$\alpha h\nu = K(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (4.6)$$

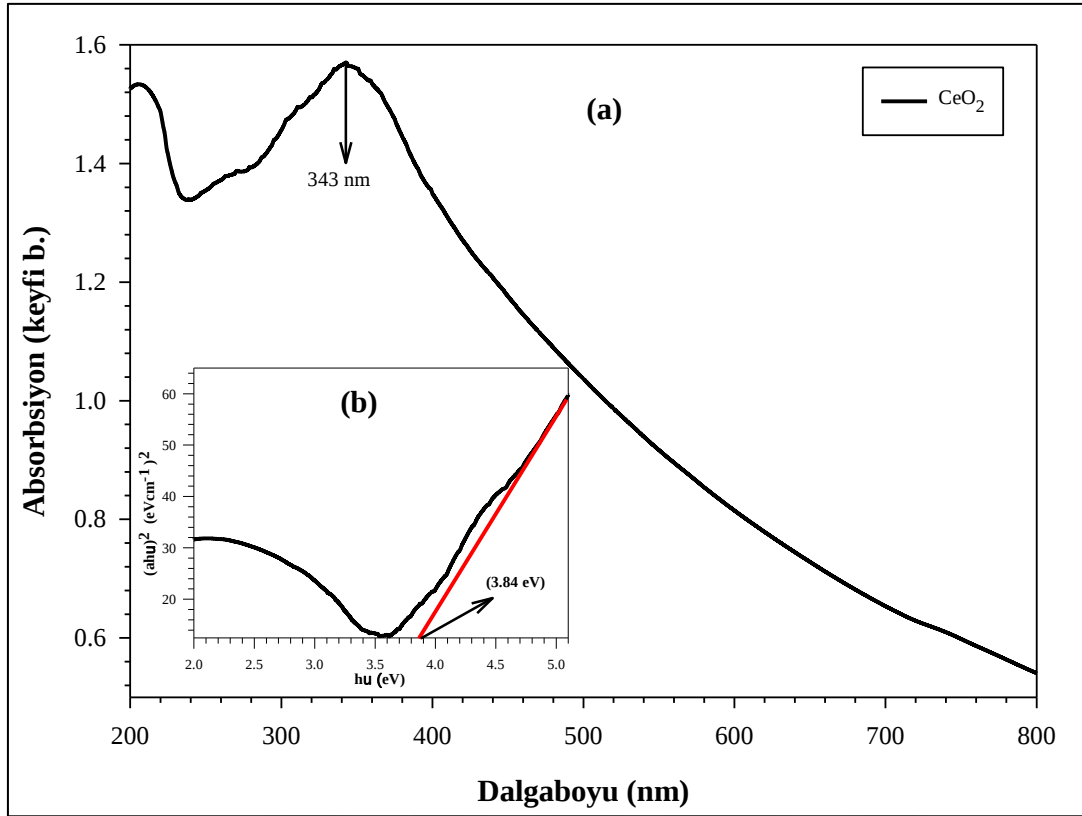
ilişkisi vardır. Eşitlikteki K bir sabit, $h\nu$ gelen ışığın enerjisidir. Malzemenin enerji bant aralığı, $(\alpha h\nu)^2$ ’nin $h\nu$ ’ye göre değişiminin lineer bölgesinin, lineer eğriye fit edilmesiyle bulunabilir. Böylece, $(\alpha h\nu)^2=0$ olduğunda $h\nu$ eksenini kesen nokta yasak enerji bant aralığına (E_g) karşılık gelir.

CeO₂ nanoyapının optik özellikleri, 200 ila 1100 nm dalga boyu aralığında UV-Vis spektroskopisi kullanılarak incelendi. Seryum dioksit nanoyapılarının absorpsiyon spektrumu ve enerji bant aralığı grafikleri Şekil 4.4’de gösterilmektedir. Şekil 4.4 (a) ’ da görüldüğü gibi CeO₂ nanoyapının absorpsiyon spektrumu 343 nm’de soğurma piki tepe değerine sahiptir. UV bölgesindeki CeO₂ nanoparçacıklarının bu soğurma pik değeri, O (2p) ve Ce (4f) orbitalleri arasındaki yük geçişinden kaynaklanmaktadır. UV-Vis spektroskopisindeki absorpsiyon pik değeri, yarıiletkenin yapısına ve gelen ışığın dalga boyuna bağlıdır. Gelen foton yarıiletken malzeme tarafından absorbe edildiğinde, elektron valans bandından iletim bandına uyarılır. İki bant arasındaki fark, Tauc eşitliği aracılığıyla hesaplanabilen enerji bant aralığına eşittir. Literatür araştırması yapıldığında genel olarak CeO₂ nanoyapılarının absorpsiyon pik değeri 290 ila 360 nm arasında olduğu belirlenmiştir ve kuantum sınırlama (quantum confinement) etkisine göre absorpsiyon pik konumu nanopartiküllerin parçacık boyutuna bağlıdır [6][49]. CeO₂ nanoyapının enerji bant aralığı (E_g), Şekil 4.4 (b)’ de Tauc eşitlikleri ile elde edilen $(\alpha h\nu)^2$ ’nin $h\nu$ ’ye göre değişim grafiği ile bulundu. E_g

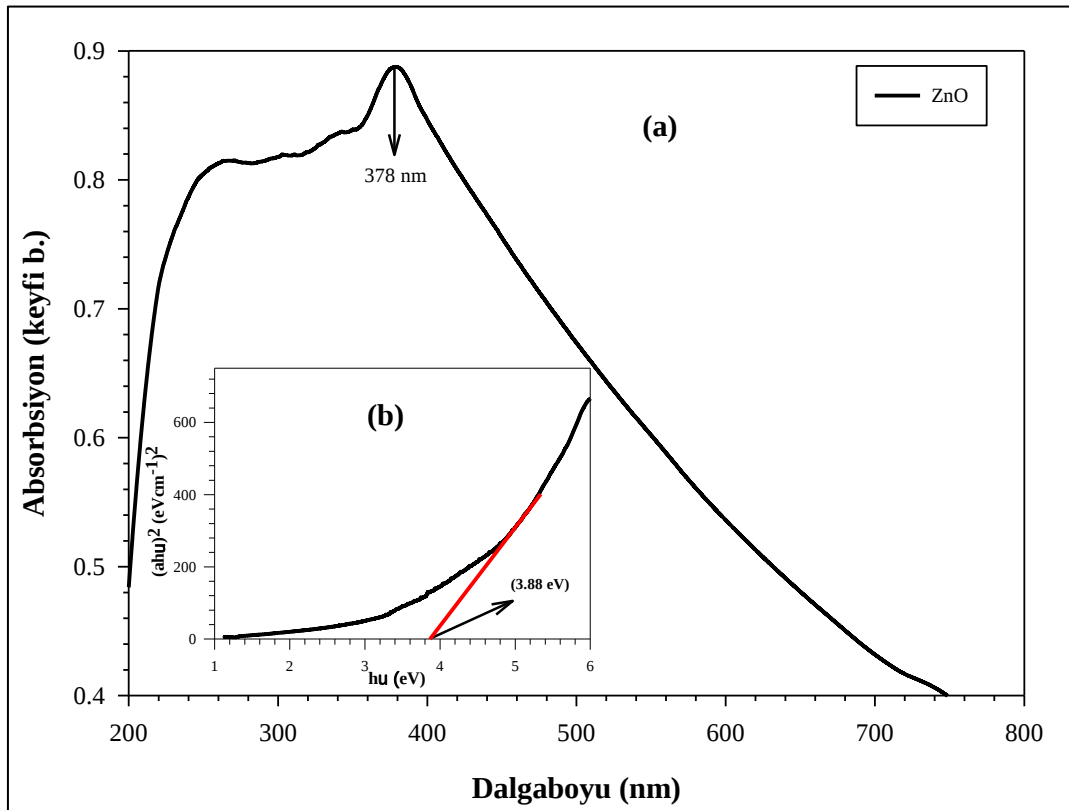
değeri, soğurma spektrumunun lineer bölgesine yapılan fit'in foton enerji eksenini kestiği noktanın belirlenmesi ile hesap edildi ve değeri 3,84 eV olarak elde edildi. Genel olarak hacimli (bulk) yapıda CeO_2 3,19 eV enerji bant aralığına ve 389 nm absorpsiyon pik değerine sahiptir ancak sentezlenen CeO_2 nanoyapının enerji bant aralığı değeri buna göre büyük çıkmaktadır (3,84 eV) ve absorpsiyon pik değeri (343 nm) daha düşük dalga boyu tarafına maviye doğru kaymıştır. Çünkü malzemenin parçacık boyutu azaldıkça enerji bant aralığı değeri artmaktadır ve ayrıca bu durum oluşan yüksek oksijen boşlukları ve Ce^{+3} iyonları konsantrasyonu ile ilişkilidir[50, 51].

ZnO nanoyapının optik özellikleri, 200 ila 1100 nm dalga boyu aralığında UV-Vis spektroskopisi kullanılarak incelendi. ZnO nanoyapılarının absorpsiyon spektrumu ve enerji bant aralığı grafikleri Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Şekil 4.5 (a) ' da görüldüğü gibi CeO_2 nanoyapının absorpsiyon spektrumu 378 nm'de soğurma piki tepe değerine sahiptir. ZnO enerji bant aralığı (E_g) değeri Şekil 4.5 (b)' de gösterildiği gibi Tauc eşitliği kullanılarak oluşturulan absorpsiyon spektrumunun doğrusal bölgesine yapılan doğrusal fit'in foton enerji eksenini kestiği noktanın belirlenmesi ile hesap edildi ve 3,88 eV olarak bulundu. Literatür araştırması yapıldığında farklı parçacık boyutlarına sahip ZnO nanoapıların farklı absorpsiyon pik değerlerine sahip olduğu görülmüştür ve parçacık boyutu küçüldükçe absorpsiyon piklerinin konumunda kayma gözlemlenmiştir. Ayrıca ZnO nanoyapı için literatür verilerinde elde edilen 3,53 eV ve 3,7 eV enerji bant aralığı [52, 53] değerlerine kıyasla bulduğum 3,88 eV değeri büyüktür. Parçacık boyutundaki azalma ile ZnO nanoparçacıklarının enerji bant aralığındaki artış, kuantum sınırlama etkisine bağlı olabilir.

Hem ZnO hem de CeO_2 için elde edilen verilerden yola çıkarak her ikisinin de görünür ve IR (kızılötesi) bölgede oldukça iyi bir geçirgen özellik ve UV bölgede ise yüksek bir absorpsiyon (soğurma) özellikleri olduğu söylenebilir.



Şekil 4.5. Sentezlenen CeO_2 nanoyapının (a) soğurma spektrumu (b) Enerji bant aralığı



Şekil 4.6. Sentezlenen ZnO nanoyapının (a) soğurma spektrumu (b) Enerji bant aralığı

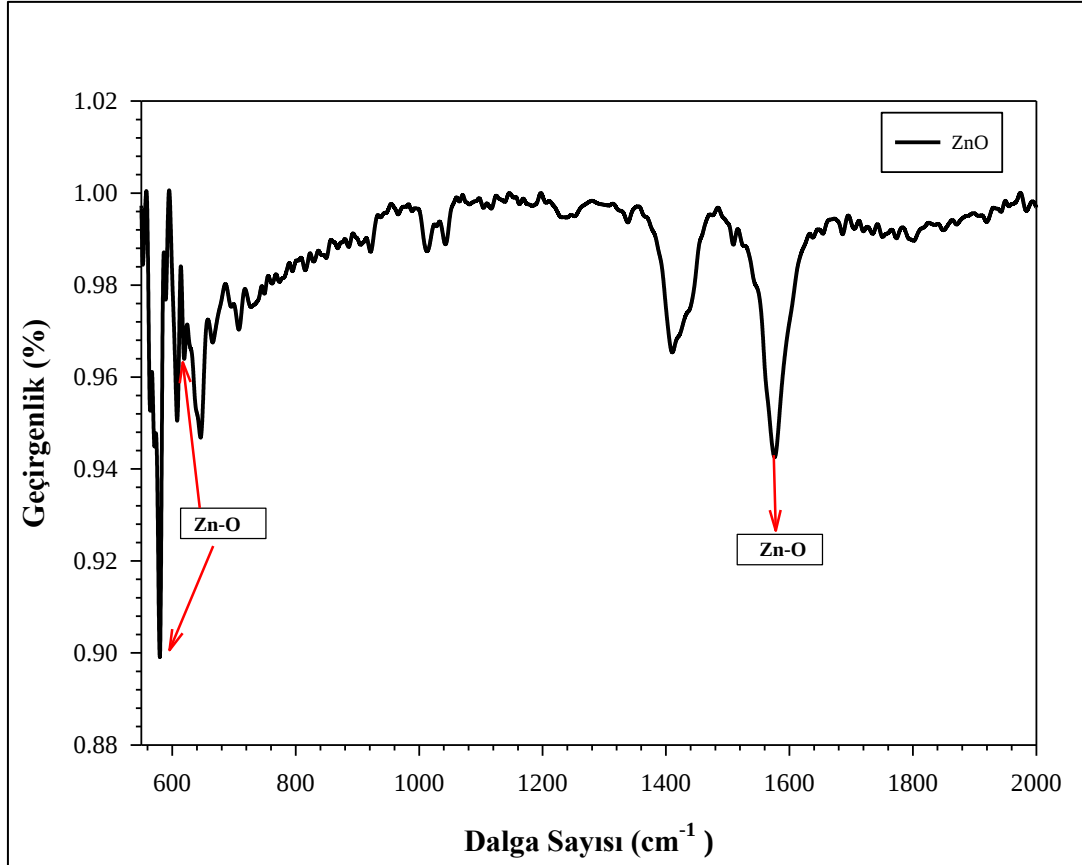
4.3. Fourier Transform IR (FTIR) Spektrometresi

Sentezlemiş olduğum CeO₂ ve ZnO nanoyapılar üzerine ayrı ayrı gönderilen kızılötesi ışınlamalar malzemelerin içerisindeki her bağın enerjisine göre belirli dalga boylarındaki ışığı absorbe etmesi ya da geçirmesi ile malzemeleri karakterize eder. Farklı dalga sayılarında pik vererek yapılar içerisindeki atomların birbirleriyle olan durumunun ve titreşim modlarının (gerilme, bükülme) karakterize edilmesine olanak sağlar. [54].

ZnO nanoyapıya ait elde edilen FTIR spektrumu Şekil 4.6'da gösterilmiştir. ZnO için literatür taraması yapılarak incelenen makalelerde farklı dalga sayılarındaki pik değerlerinde gözlenen titreşim modları Çizelge 4.1'deki gibidir. Bu çizelgedeki verilerden yola çıkarak kendi elde ettiğim verileri kıyasladığımda, Şekil 4.6'daki FTIR spektrumundaki 580 cm⁻¹, 619 cm⁻¹, 1577 cm⁻¹ dalga sayılarındaki piklerin Zn-O bağına ait gerilme(stretching) titreşim modu olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. ZnO nanoyapılarda gözlenen kızılötesi titreşimler

Titreşim Modu (v)	Bağ Yapısı	Piklerin Değeri (cm ⁻¹)	Referans
Gerilme (Stretching)	Zn - O	576	[55]
		621	[56]
		1634	[56]
		533	[57]
		1561	[57]

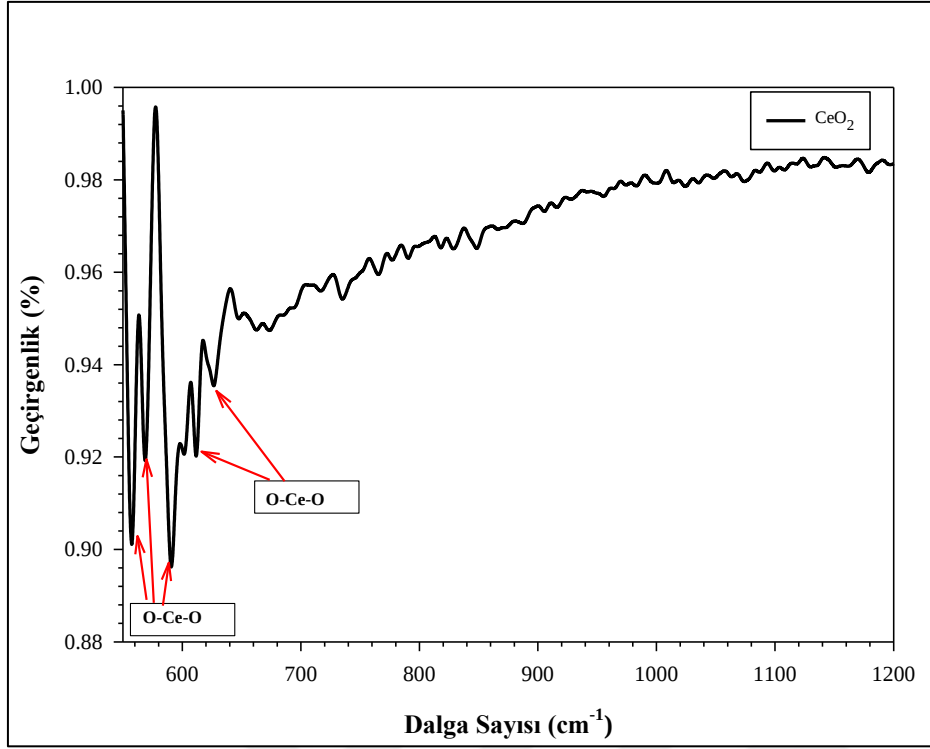


Şekil 4.7. Sentezlenen ZnO nanoyapının FTIR spektrumu

CeO₂ nanoyapıya ait elde edilen FTIR spektrumu Şekil 4.7’de gösterilmiştir. CeO₂ için literatür taraması yapılarak incelenen makalelerde farklı dalga sayılarındaki pik değerlerinde gözlenen titreşim modları Çizelge 4.2’deki gibidir. Bu çizelgedeki verilerden yola çıkarak kendi elde ettiğimiz verileri kıyasladığımızda, Şekil 4.7’deki FTIR spektrumundaki 557 cm⁻¹, 568 cm⁻¹, 590 cm⁻¹, 611 cm⁻¹, 626 cm⁻¹ dalga sayılarındaki piklerin O-Ce-O bağına ait gerilme(stretching) titreşim modu olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.4 CeO₂ nanoyapılarda gözlenen kızılötesi titreşimler

Titreşim Modu (v)	Bağ Yapısı	Piklerin Değeri (cm ⁻¹)	Referans
Gerilme (Stretching)	O - Ce - O	622	[58]
		549	[59]
		692	[59]
		595	[60]
		700	[60]
		433-1120	[61]
		560	[62]



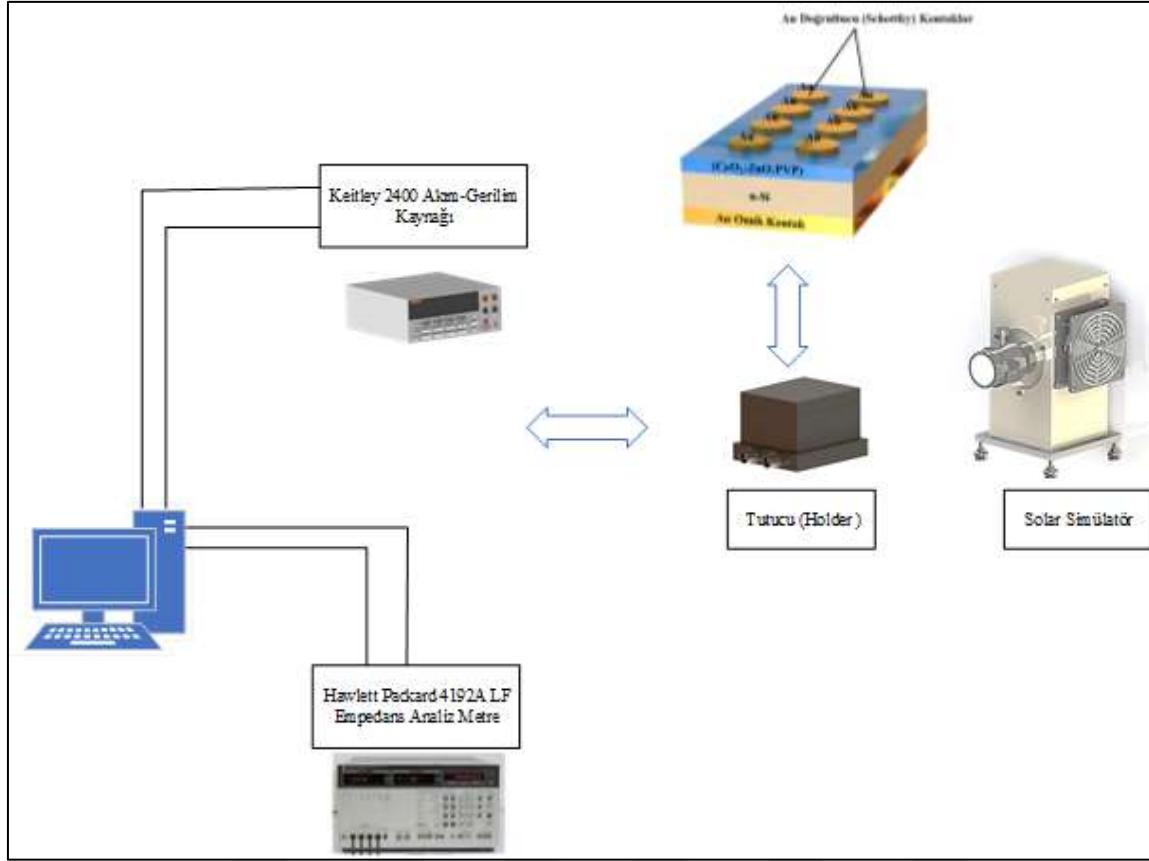
Şekil 4.8. Sentezlenen CeO₂ nanoyapıların FTIR spektrumu



5. DENEYSEL BULGULAR

Fabrikasyonu tamamlanan Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky yapıların elektriksel parametrelerini belirleyebilmek için Akım-Gerilim (I-V) ve Kapasitans-Gerilim (C-V) ölçümleri oda sıcaklığında , karanlıkta ve ışık altında gerçekleştirilmiştir. I-V ölçümleri için Keitley 2400 (source meter unit) güç kaynağı kullanılmıştır ve ölçümler düz ve ters beslemde -5V ile 5V arasında, 0.025 mV adımlarla alınmıştır. Ayrıca bu cihaz IEEE-488 arayüz veri yolu kablosuyla dijital verileri ac/dc çevirici kart yardımıyla bilgisayara aktarabilmektedir. C-V ölçümlerinde ise $\pm 0,15$ hassasiyetle ölçüm yapabilen Hawlett Packard 4192A LF Empedans Analiz metre (5 Hz – 13 MHz) kullanıldı. Ölçümler Hawlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 ac/dc çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek 500 kHz frekansında ve 0.05 V adımlar ile alınmıştır. Fabrikasyondan kaynaklanan ara yüzey durumlarının yeterli yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) etkisinin kaybolmasından dolayı ölçüm 500 kHz frekansında yapılmıştır. Çünkü yükler ve arayüzey durumları düşük frekanslarda ac sinyalinin kolayca takip edebilmekte ve bu yüzden de kapasitans ve kondüktans değerlerinde düzensiz değişikliklere neden olabilmektedir. Işık kaynağı olarak Newport marka (Model:67011) solar simülatör kullanılmıştır. Solar simülatör 240 nm - 2500 nm spektral aralığında ışınlam yapmakta ve sahip olduğu programlanabilir güç kaynağı (Model: 69931) ile 10 Watt – 250 Watt ışık şiddeti aralığında çalışabilmektedir. Hazırlanan Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotların karanlık ve ışık altındaki I-V ve C-V ölçüm düzeneği şekil 5.1’de verilmiştir.

Aynı n-Si alt taşlar üzerine aynı şartlarda hazırlanan Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky yapıların karanlık ve 100mW.cm⁻² ışık şiddeti altında I-V ve C-V ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerden yararlanılarak elde edilen I-V ve C⁻²-V grafiklerinden gerekli hesaplar yapılarak elektriksel parametreler bulunmuştur. MS ve MPS Schottky yapılar için ışığa duyarlılık (sensitivity) (S) ve foto tepki (responsibility) (R) opto-elektronik parametreleri aynı şekilde karanlıkta ve 100 mW.cm⁻² ışık şiddeti altında gerekli hesaplar yapılarak bulunmuş ve karşılaştırma yapılmıştır.

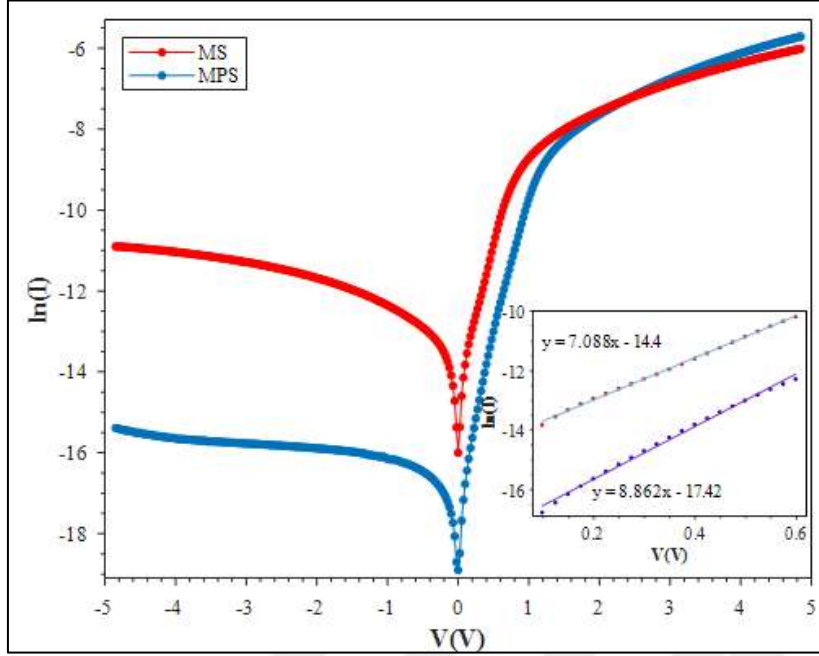


Şekil 5.1. Hazırlanan Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky yapıların karanlık ve 100mW.cm⁻² ışık altındaki ölçümleri için kullanılan I-V ve C-V düzenek şeması.

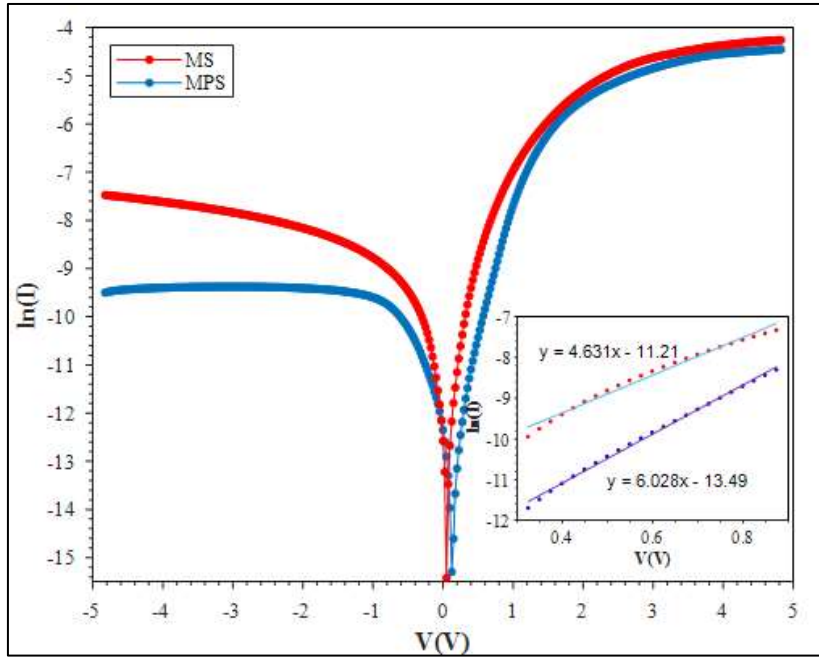
5.1. Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky Yapıların I-V Analizleri

Hazırlanan Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky yapıların düz (forward) ve ters (reverse) ön-gerilim akım-voltaj (I-V) ölçümleri hem karanlık hem de 100mW.cm⁻² ışık şiddeti altında oda sıcaklığında geniş bir voltaj aralığında ($\pm 5V$) gerçekleştirildi. Karanlık ve ışık altındaki yarı logaritmik I-V ölçümleri sırasıyla Şekil 5.2 ve 5.3 de verildi. Hem Şekil 5.2 hem de 5.3 den de görüldüğü gibi hazırlanan Schottky yapıları iyi bir doğrultma özelliğine sahiptir. Akım değerleri pozitif voltaj bölgesinde orta gerilim değerlerinde net bir lineer bölgeye sahip iken yüksek voltajlarda seri direnç değerinden dolayı lineerlikten sapma göstermektedir. Hazırlanan MS ve MPS tipi Schottky yapılarda, (CeO₂:ZnO:PVP) polimer arayüzey tabakanın MS yapının performansını ne derecede etkilediğini belirlemek için öncelikle onların Ln(I)-V ölçümleri karanlıkta ve 100mW.cm⁻² ışık şiddeti altında karşılaştırıldı. Bilindiği gibi, MS ve MIS veya MPS tipi

Schottky yapıların temel elektriksel parametreleri standart termiyonik emisyon (TE) teorisine göre hesaplanır ve bu teoriden sapmalar araştırılır [65-69].



Şekil 5.2. MS ve MPS Schottky diyotların karanlıkta elde edilen yarı logaritmik I-V eğrileri



Şekil 5.3. MS ve MPS Schottky diyotların 100mW.cm⁻² ışık şiddeti altında elde edilen yarı logaritmik I-V eğrileri

MS ve MIS veya MPS tipi Schottky yapılarda düz ön gerilim/beslem için akım-voltaj ilişkisi TE teorisine göre ($V \geq 3kT/q$, $n > 1$, $R_s > 0$) aşağıdaki şekilde verilir [70-75]:

$$I(V_F) = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{b0}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5.1)$$

Burada; köşeli parantez önündeki tüm ifade ters beslem doyum akımıdır (I_o), A diyotun doğrultucu kontak alanı, A^* Richardson sabiti ($=112 \text{ A}/(\text{cm.K}^2 \text{ n-Si için})$), Φ_{b0} sıfır beslem engel yüksekliği, IR_s diyotun seri direnci üzerine düşen voltaj, T Kelvin (K) cinsinden sıcaklıktır, n idealite faktörü olup ideal durumdan sapıp saptadığının göstergesidir. Hem şekil 5.2, hem de 5.3 den de görüldüğü gibi $\ln(I)$ -V grafiği geniş bir akım/voltaj aralığında lineerdir ve dolayısıyla R_s etkisi ihmal edilecek kadar küçük ve üstelik köşeli parantez içindeki -1 değeri de üstel ifade yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu için denklem 5.1 aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir.

$$\ln(I_F) = \ln(I_o) + \left(\frac{q}{nkT}\right) V_F \quad (5.2)$$

Denklem 5.2 eşitliğine göre; $\ln(I_F)$ - V_F grafiğinin eğiminden her diyot için ($\tan\theta = d\ln(I_F)/dV_F = \frac{q}{nkT}$) idealite faktörü değerleri, sıfır voltajda akım eksenini kestiği değerden doyum akımı değerleri elde edildi. Elde edilen I_o değerleri ve diyotun doğrultucu kontak alanı (A) değerleri kullanılarak sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği denklem (5.1) den faydalanılarak aşağıdaki denklemden hesaplandı.

$$q\Phi_{b0} = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \quad (5.3)$$

Denklem (5.3) de; q elektronik yüküdür ($=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$). Böylece, karanlık ve 100 mW.cm^{-2} ışık şiddeti altında elde edilen I_o , n ve Φ_{b0} değerleri sırasıyla Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 de verildi. Yine her iki tip Schottky diyotun doğrultma oranları da ($RR = I_F/I_R$, $\pm 5V$ için) bu çizelgelerde verildi. Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 den görüldüğü gibi MPS tipi Schottky diyot için elde edilen I_o ve n değerleri MS yapıya göre daha küçük ancak engel yüksekliği ile doğrultma oranları daha yüksektir. Bu sonuçlar bize hazırlanan ($\text{CeO}_2\text{:ZnO:PVP}$) polimer

ara yüzey tabakanın, klasik MS Schottky diyotun performansını oldukça arttırdığını göstermektedir. Buna rağmen elde edilen idealite faktörü değerleri hem karanlık hem ışık altında ideal durumdan ($n=1$) oldukça sapma göstermektedir. İdealite faktörünün 1 den büyük çıkması, doğal veya yapay ara yüzey tabakanın varlığına, metal-yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliğinin homojensizliğine, yarıiletken ile ara yüzey tabaka arasına yerleşen ara yüzey durumlarının yoğunluğuna ve üretilme-birleşme akım mekanizmasına atfedildi [75-77]. Diğer taraftan, MPS Schottky diyotu için ters beslem bölgesinde kaçak akım değerleri MS Schottky diyotu ile kıyaslandığında oldukça hem doyuma ulaşmış olmuş hem de küçüktür. Kaçak akımın azalması da aynı şekilde ($\text{CeO}_2\text{:ZnO:PVP}$) polimer ara yüzey tabakanın varlığına atfedildi.

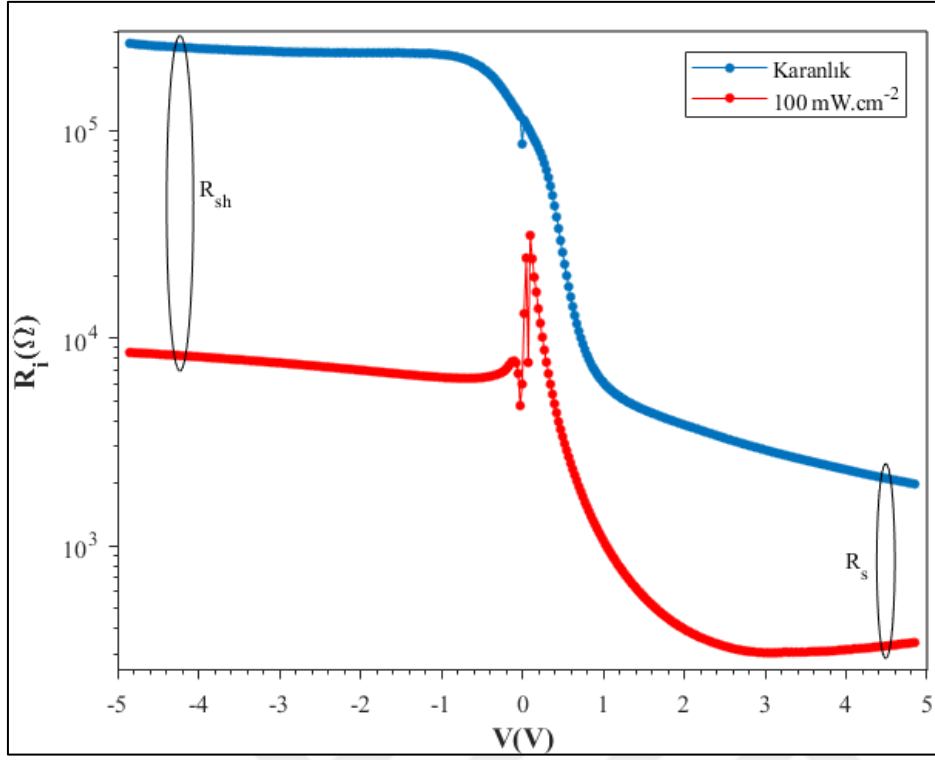
Diyotların performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri de onların seri direncidir. Bu yüzden MS ve MPS tip Schottky diyot yapısı için resistans değerlerinin (R_i) voltaja bağlı değişimleri basit Ohm yasasından ($R_i=V_i/I_i$) elde edilerek yarı-logaritmik R_i - V_i grafikleri sırasıyla Şekil 5.4 ve 5.5 de verildi. Bu şekillerden de açıkça görüldüğü gibi R_i değerleri hem yeterince yüksek düz beslem değerlerinde hem de yeterince küçük ters beslem değerlerinde neredeyse voltajdan bağımsızdır. Bu değerler sırasıyla diyotların gerçek seri (R_s) ve kısa devre (R_{sh}) dirençleri olup yine Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Karanlıkta MS ve MPS Schottky diyotları için oda sıcaklığında elde edilen bazı temel diyot parametreleri

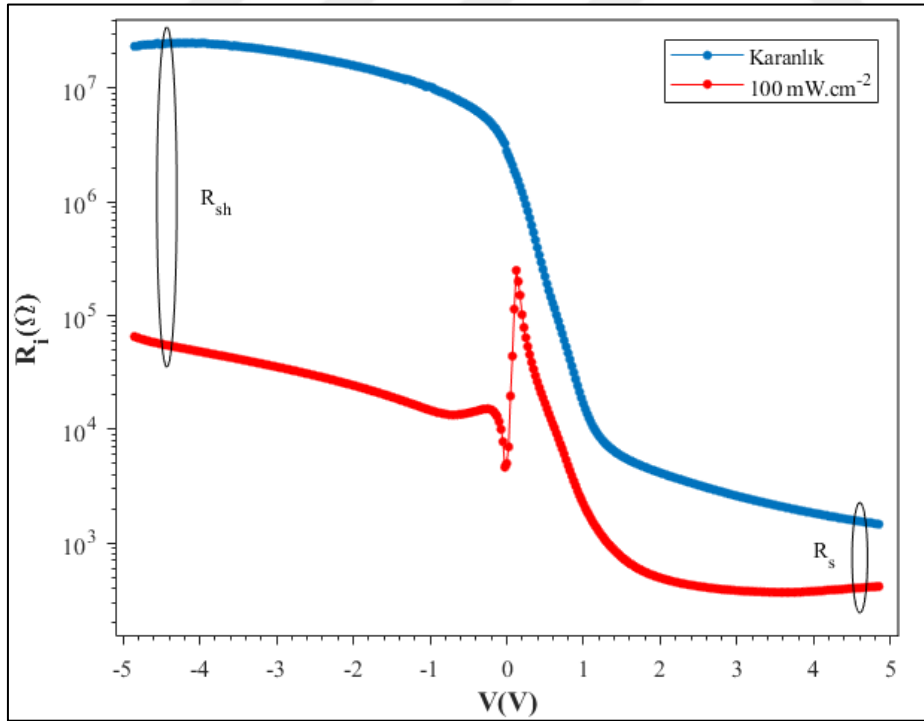
Termiyonik Emisyon		
Karanlıkta (Dark) I-V Ölçüm	MS (Au/n-Si)	MPS (Au/($\text{CeO}_2\text{:ZnO:PVP}$)/n-Si)
I_o (μA)	0,596	0,0272
n	5,45	4,36
Φ_B (eV)	0,64	0,72
R_s ($k\Omega$)	1,97	1,45
R_{sh} (M Ω)	0,27	18,50
RR (Doğrultma Oranı)	$2,74 \times 10^5$	$1,85 \times 10^7$

Çizelge 5.2. MS ve MPS Schottky diyotları için 100 mW.cm^{-2} ışık şiddeti altında ve oda sıcaklığında elde edilen bazı temel diyot parametreleri.

Termiyonik Emisyon		
Işık Altında (Illumination) I-V Ölçüm	MS (Au/n-Si)	MPS(Au/($\text{CeO}_2\text{:ZnO:PVP}$)/n-Si)
I_o (μA)	5,54	0,714
n	5,88	5,18
Φ_B (eV)	0,59	0,64
R_s ($k\Omega$)	0,35	0,43
R_{sh} (k Ω)	8,60	0,35
RR (Doğrultma Oranı)	8579	76065



Şekil 5.4. MS Schottky yapının karanlık ve ışık altında elde edilen $\ln R_i$ - V_i grafikleri.



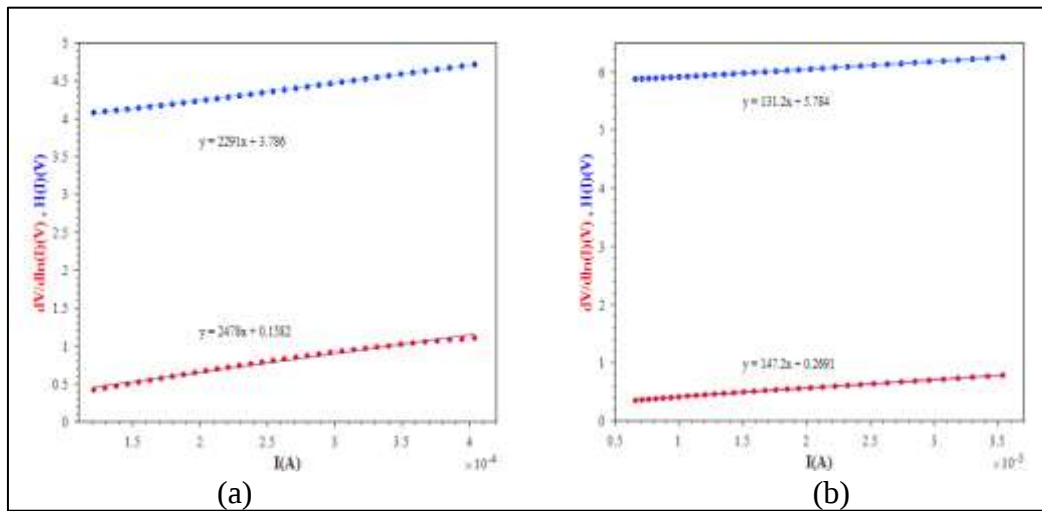
Şekil 5.5. MPS Schottky yapının karanlık ve ışık altında elde edilen $\ln R_i$ - V_i grafikleri.

Temel diyot parametreleri olarak bilinen n , Φ_b ve R_s değerleri, aynı zamanda Cheung fonksiyonları olarak bilinen ve $\ln(I_F)$ -V grafiğinde lineerlikten sapmanın başladığı ileri pozitif voltaj bölgelerinde geçerli olan aşağıdaki ifadelerden de hesaplandı. Burada amaç, bu parametrelerin farklı voltaj bölgelerinde farklılıklar gösterip göstermediği veya başka bir ifadeyle voltaja bağlı olup olmadıklarını göstermektir [78].

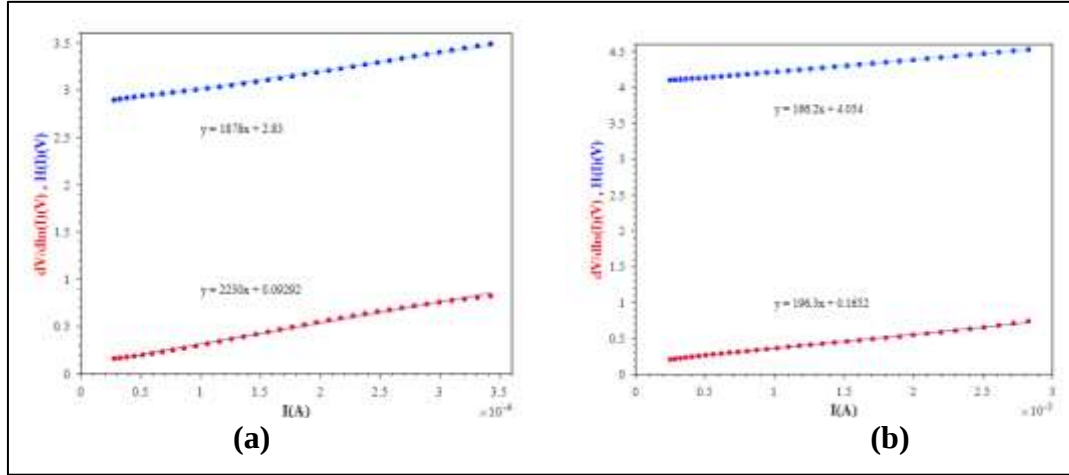
$$\frac{dV}{d \ln I} = IR_s + \left(\frac{nkT}{q} \right) \quad (5.4)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) = IR_s + n\Phi_B \quad (5.5)$$

Denklem 5.4 ve 5.5 den faydalanarak, hem $dV/d \ln(I)$ - V hem de $H(I)$ - V grafikleri, MS ve MPS tipi Schottky diyotları için elde edildi. MS ve MPS Schotky diyotlara ait bu grafikler karanlık ve ışık altında olmak üzere Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 de verildi. Her iki şekildende görüldüğü gibi bu grafikler hem karanlık hem de ışık şiddeti altında olukça net bir liner davranış göstermektedir. Dolayısıyla, denklem 5.4'e göre eğim, direk R_s değerine eşit iken, kesişme noktasın da ($=nkT/q$) n değeri her iki tip Schottky diyot için elde edildi. Elde edilen bu n değerleri yine her iki diyot için Denklem 5.5 de kullanılarak $H(I)$ -V grafi elde edildi. Bu grafiğinde eğimi ikinci kez bize R_s değerini verdi ve kesiştiği noktadan ($=n\Phi_b$) ise Φ_b değeri elde edildi. Bu değerlerde Çizelge 5.3 de verildi. TE teorisi ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen bu temel diyot parametreleri arasındaki bazı farklılıklar, onların voltaja bağlı da değiştiğinin açık bir göstergesidir.



Şekil 5.6. MS Schottky yapının (a) karanlık ve (b) ışık altındaki $dV/d \ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri.

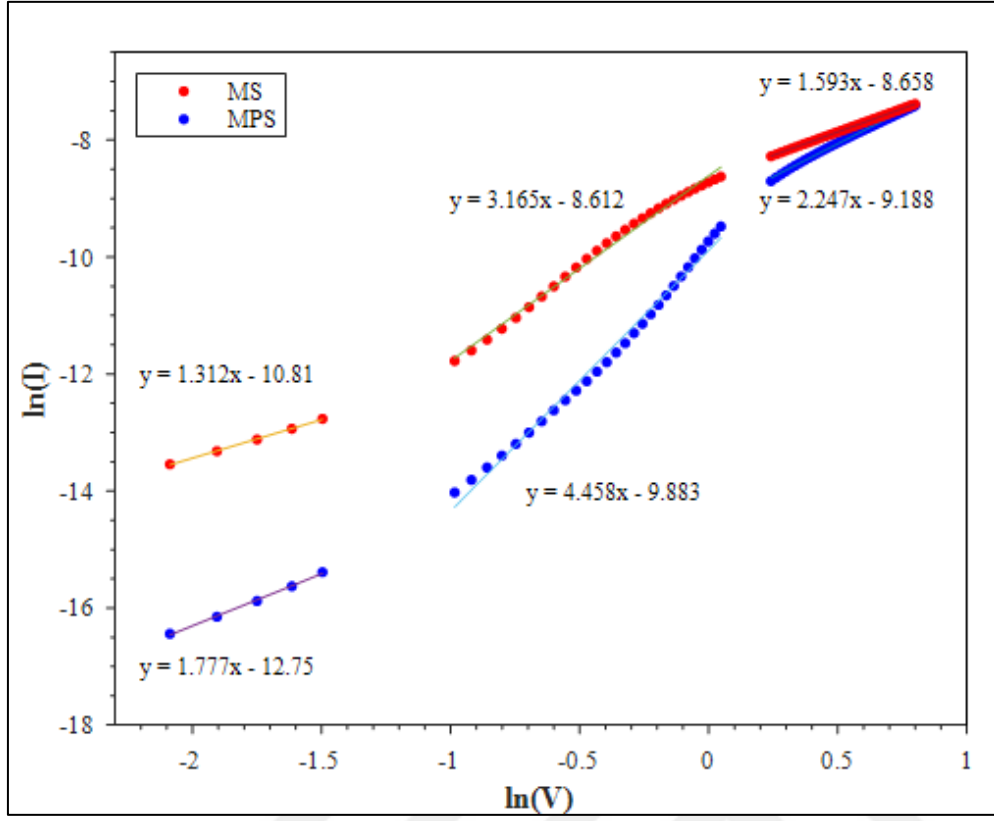


Şekil 5.7. MPS Schottky yapının (a) karanlık ve (b) ışık altındaki $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri

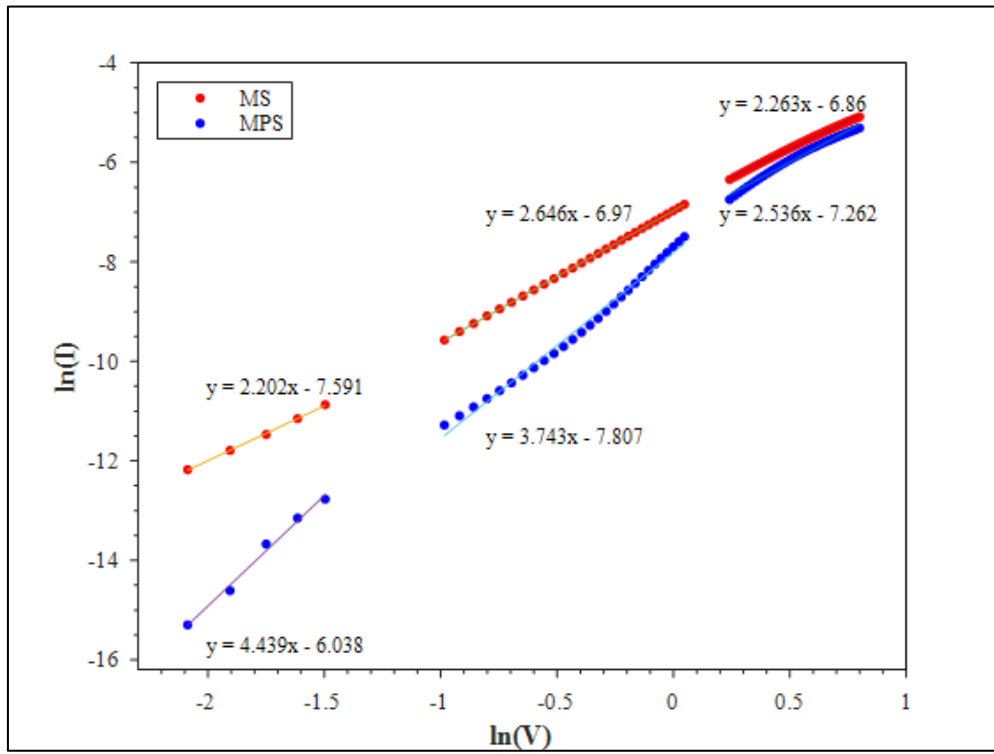
Çizelge 5.3. Cheung fonksiyonlarından elde edilen bu temel diyot parametreleri

Temel elektriksel parametreler	MS (Karanlık)	MS (100mW.cm ⁻²)	MPS Karanlık	MPS (100 mW.cm ⁻²)
n	6,328	10,764	3,716	6,608
Φ_B (eV)	0,598	0,537	0,763	0,615
R_s (k Ω) ($dV/d\ln I$)	2.478	0.147	2.230	0.196
R_s (k Ω) ($H(I)$)	2.291	0.131	1.878	0.166

Muhtemel akım iletim mekanizmalarını belirlemek amacıyla, düz beslem $\ln(I_F)$ - $\ln(V_F)$ grafikleri karanlık ve ışık altında elde edilerek sırasıyla şekil 5.8 ve 5.9 da verildi.



Şekil 5.8. MS ve MPS yapıların karanlıkta elde edilen $\ln(I)$ - $\ln(V)$ eğrileri.



Şekil 5.9. MS ve MPS yapıların 100 mW.cm^{-2} ışık altında elde edilen $\ln(I)$ - $\ln(V)$ eğrileri.

Şekil 5.8 ve 5.9 dan da görüldüğü gibi, $\ln(I_F)-\ln(V_F)$ grafiği her iki diyot için de eğimleri farklı üç lineer bölgeye sahiptir. Bu davranış düz beslem iletim mekanizmasının düşük, orta ve yüksek gerilim bölgelerinde üç farklı iletim mekanizmasına sahip olduğunu göstermektedir. Bu üç lineer bölgenin eğimi MS Schottky diyotu için sırasıyla 1.312, 3.165 ve 1.593; MPS Schottky diyotu için ise 1.777, 4.458 ve 2.242 elde edildi. Bu değerlere göre her iki Schottky diyotu için de düşük gerilim bölgesinde Ohmik, orta gerilim bölgesinde tuzak yük yoluyla akım (trap charge limited current) (TCLC) mekanizmaları baskındır. Yüksek gerilim bölgesinde ise MS için yaklaşık Ohmik ancak MPS için ise uzay yük yoluyla akım (space charge limited current) (SCLC) mekanizmaları etkindir. TCLC, ara yüzey tabaka ile yarıiletken ara yüzeyinde ve yasak enerji bandı içine yer alan tuzakların bir sonucudur ve dolayısıyla bu tuzaklar MS ve MIS tipi Schottky diyotlarda akım iletimini önemli ölçüde kontrol eder [76]. Eğer, $\ln(I_F) - \ln(V_F)$ grafiğin de eğim değerleri 2' den büyük ise akım tuzaklar yolu ile iletilir. Genelde yüksek pozitif voltaj değerlerinde, MS ve MIS yapılarında güçlü elektron enjeksiyonu yoluyla yükler/elektronlar tuzaklardan kaçarak SCLC (eğim 2 civarında ise) mekanizmasına katkı sağlar [77]. Temel elektriksel parametreler ve iletim mekanizmaları hazırlanan numunelere göre biraz farklılık gösterse de benzer davranışlar gözlenmiş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir [78-81].

Doğru öngerilimde karanlık ve ışık altındaki I_F-V_F verileri kullanılarak, hem MS ve MPS tipi Schottky diyotlarda metal/yarıiletken ara yüzeyinde oluşan ve enerjileri yarıiletkenin yasak enerji aralığında yer alan ara yüzey durumlarının (N_{ss}) enerjiye bağlı (E_c-E_{ss}) dağılımları, Card ve Rhoderick [69] tarafında geliştirilen aşağıdaki eşitliklerden, hem karanlık hem de 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında elde edilerek Şekil 5.10 ve 5.11' de verildi. Bu eşitlikler, hem n hem de Φ_B değerlerinin voltaja bağlı değiştiği varsayımından hareket edilerek elde edilmiştir.

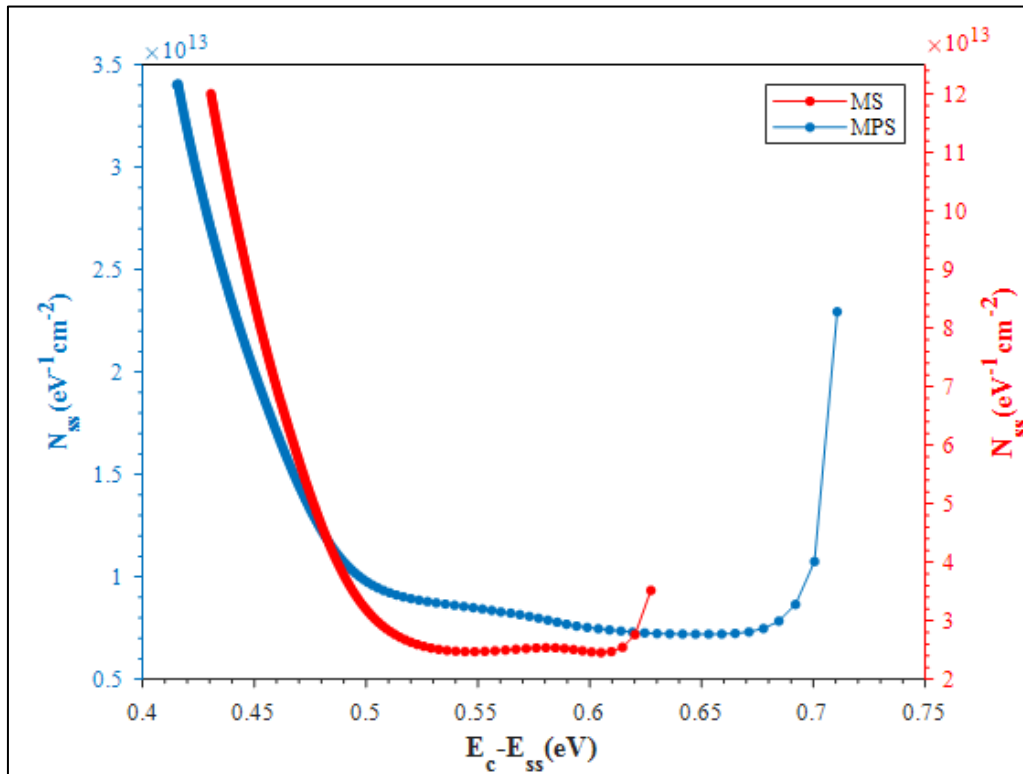
$$n(V) = (qV / kT) \ln(I / I_0) = 1 + \frac{d_i}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (5.6)$$

$$\Phi_e = \Phi_{Bo} + \left(1 - \frac{1}{n(V)} \right) V \quad (5.7)$$

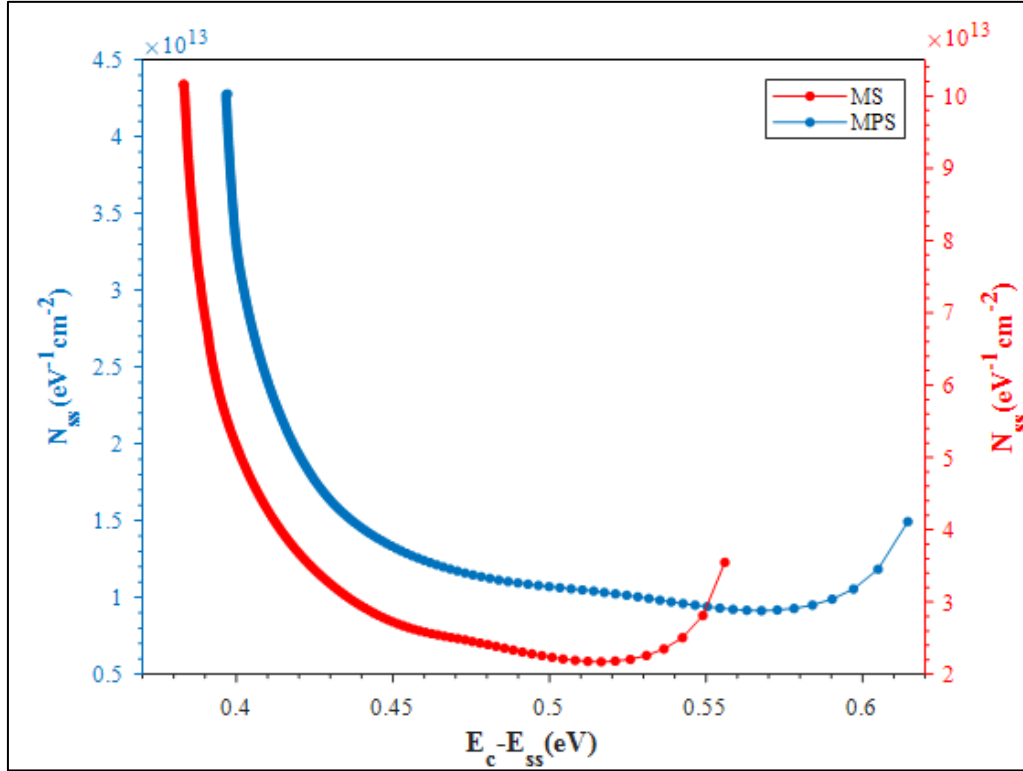
$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (5.8)$$

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\varepsilon_i}{d_i} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right] \quad (5.9)$$

Burada d_i ($=\delta$) ara yüzey tabakanın kalınlığı, W_D boşaltma/tüketim bölgesinin genişliği, ε_s ve ε_i sırasıyla yarıiletken ve ara yüzey tabakanın di-elektrik sabitleridir. Organik arayüzey tabakanın kalınlığı (d_i) 100 nm olarak öngörülmüştür.



Şekil 5.10. MS ve MPS yapılar için karanlık I_F - V_F verilerinden hesaplanan N_{ss} -(E_c - E_{ss}) eğrileri.



Şekil 5.11. MS ve MPS yapılar için 100mW.cm^{-2} ışık altında ki I_F-V_F verilerinden hesaplanan $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ eğrileri

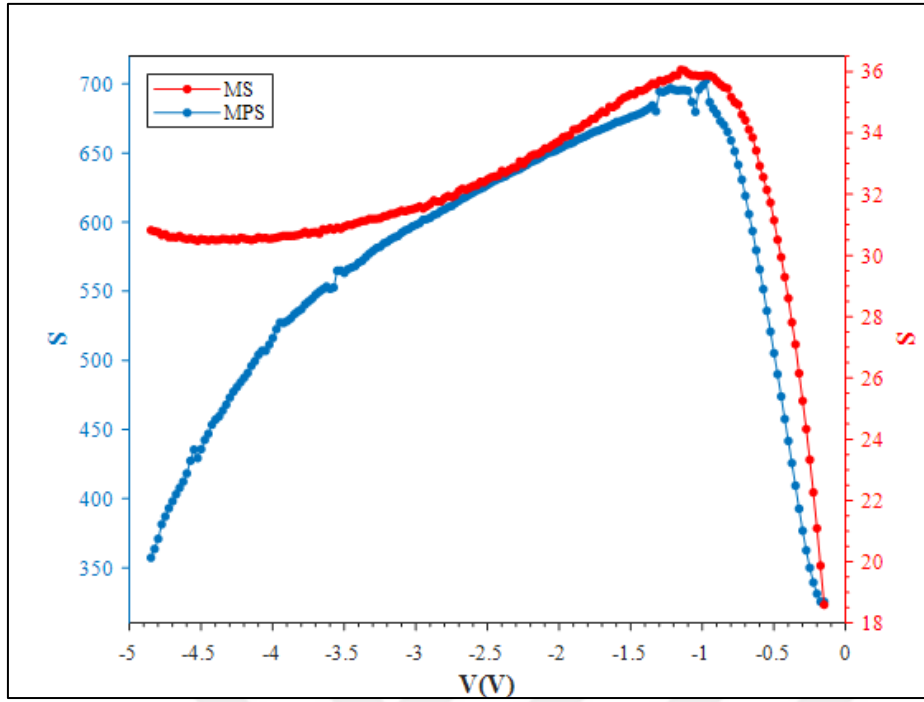
Şekil 5.10 ve 5.11’ de verilen grafiklerden de görüldüğü gibi, edilen N_{ss} değerlerinin ortalaması yaklaşık olarak 10^{13} mertebesinde olup bir MS veya MIS tipi Schottky yapılar için uygun değerlerdir. MPS tipi schottky diyot için ortalama N_{ss} değeri, MS tipi schottky diyot için gözlenen ortalama N_{ss} değerinin yaklaşık dörtte biri kadardır. Diğer taraftan bu değerler hem her iki diyot için hem de karanlık ve ışık altında, yaklaşık olarak yasak enerji bandının ortasından iletkenlik bandının (E_c) alt seviyesine doğru azalmaktadır. Bunların iletim bandına yakın bölgelerde artması, arayüzey tuzaklarının daha çok verici (donor) tipi sığ tuzaklar olduğunu göstermektedir. Bu arayüzey durumları genelde, kristaldeki bir örgü kusuru, kimyasal yüzey temizlenmesi veya fabrikasyon sırasında yarıiletken katılanan alıcı (acceptor) ve verici katkı atomlarından kaynaklanmaktadır [65,69,81-84]. Yine, bu grafiklerden de görüldüğü gibi arayüzey durumlarının enerjiye bağlı dağılım profilleri karanlık ve ışık altında her iki tip Schottky diyot için voltaja bağlı oldukça değişmektedir. Bu değişim, onların ışık ve elektrik alan altında yeniden düzenlenip yapılanmasına atfedilebilir [65,59, 84].

Hazırlanan MS (Au/n-Si) ve MPS (Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si) Schottky diyotların karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki ters beslem I_R-V_R verilerinden yararlanarak onların ışığa duyarlılığı (S: photosensitivity) ve fototepkileri (R: photoresponsibility) değerleri elde edilerek voltaja bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 5.12 ve 5.13 de verildi.

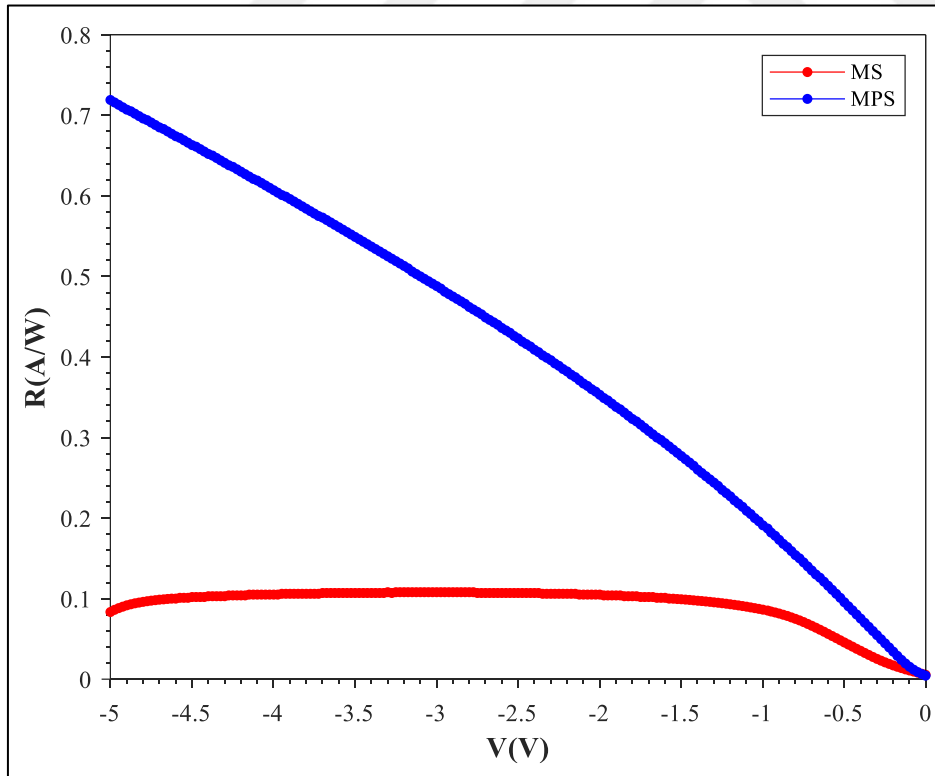
$$S = \frac{I_{ph} - I_d}{I_d} \quad (5.10)$$

$$R = \frac{I_{ph} - I_d}{P_{in} A} \quad (A/W) \quad (5.11)$$

Burada, I_{karanlık} ve I_{ph} sırasıyla karanlık ve ışık şiddeti altında ölçülen akım değerleri, P Schottky diyotlar üzerine gönderilen ışık şiddeti (100 mW/cm²) ve A ise onların doğrultucu kontak alanlarıdır. Her iki şekilden de görüldüğü gibi, hem S hem de R değerleri oldukça yüksektir. Şekil 5.12 den de açıkça görüldüğü gibi S değerleri MS (Au/n-Si) ve MPS (Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si) Schottky diyotları için -1V civarında sırasıyla 36 ve 700 olarak maksimum değerine ulaşmıştır. Ayrıca MPS tipi schottky diyot için elde edilen S ve R değerleri, MS tipi schottky diyot için elde edilen değerlerden sırasıyla yaklaşık olarak 19 ve 7,2 kat daha yüksektir. Bu değerler hazırlanan diyotların iyi fotodiyot özelliği gösterdiğinin bir ispatıdır. Bu yüzden, fotonik veya güneş pilleri yapında başarıyla kullanılabilir.



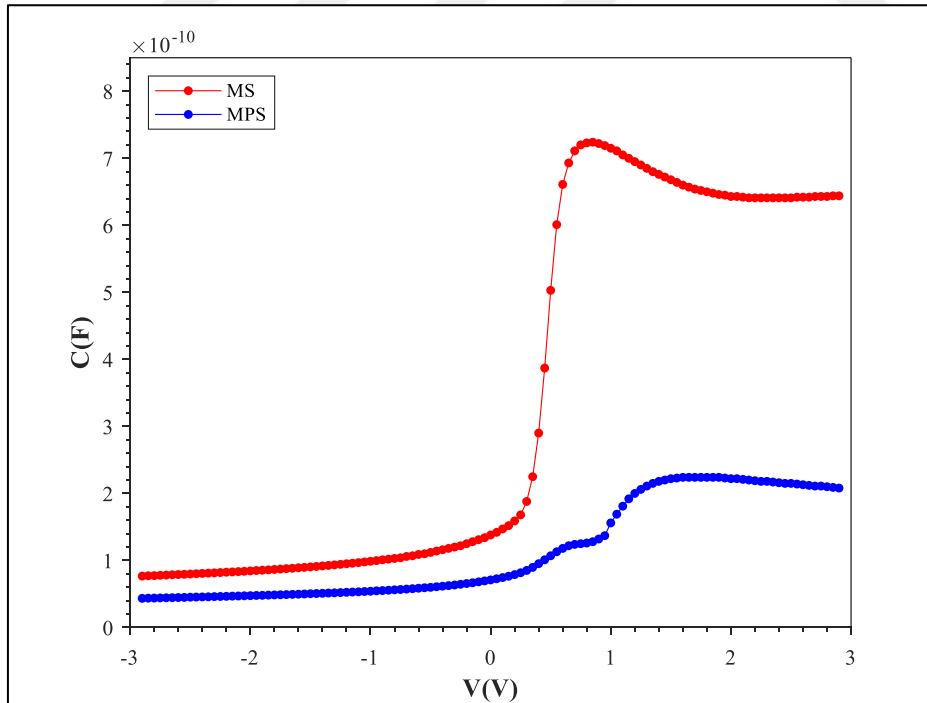
Şekil 5.12. MS ve MPS yapıların 100 mW.cm⁻² ışık altındaki S-V eğrileri.



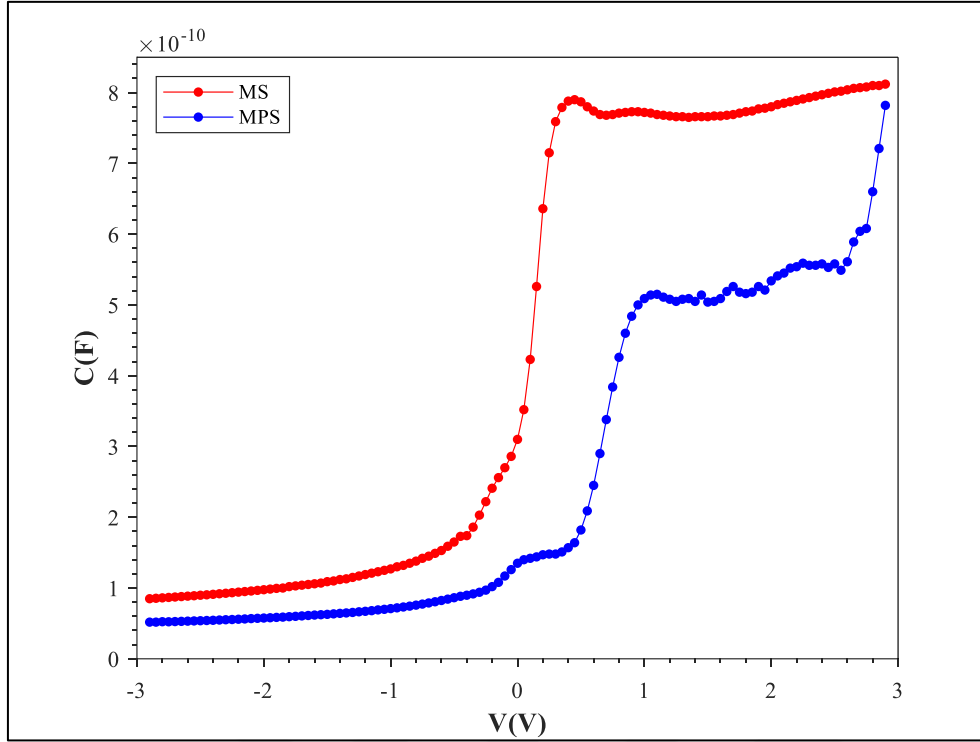
Şekil 5.13. MS ve MPS yapıların 100 mW/cm² ışık altındaki R-V eğrileri.

5.2. Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky Yapıların C-V Analizleri

Bilindiği gibi, düz beslem I-V ölçümlerinden elde edilen Schottky diyot parametreleri, ters beslem sığa-voltaj (C-V) ölçümlerinden alınandan farklıdır. Çünkü Schottky yapılarda ters beslem altında yarıiletken den metale geçerken gördüğü potansiyel engel yüksekliği, metalden yarıiletkene geçerken gördüğü engelden yaklaşık olarak büyüktür [65-67]. Bu nedenle hazırlanan Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky yapıların karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki C-V ölçümleri HP 4192 A LF empedans analizör yardımıyla 500 kHz de ve $\pm 3V$ aralığında 50 mV' luk adımlarla gerçekleştirildi ve sırasıyla Şekil 5.14 ve 5.15 de verildi. Hem Şekil 5.14 hem de 5.15 den de görüldüğü gibi, C-V eğrileri yığılım/accumulation ($\sim 1-3V$), tükenim/depletion ($\sim 0-1V$) ve terslenim/inversion (~ -3 ile $0V$) olmak üzere üç farklı bölgeye sahiptir. Bu davranış bir metal/oksit/yarı iletken (MOS) kapasitöre benzer bir davranıştır. Şekil 5.14 ile 5.15 kıyaslandığında, özellikle MPS tip Schottky diyotun sığa değerleri tüm voltaj boyunca önemli ölçüde artmıştır.



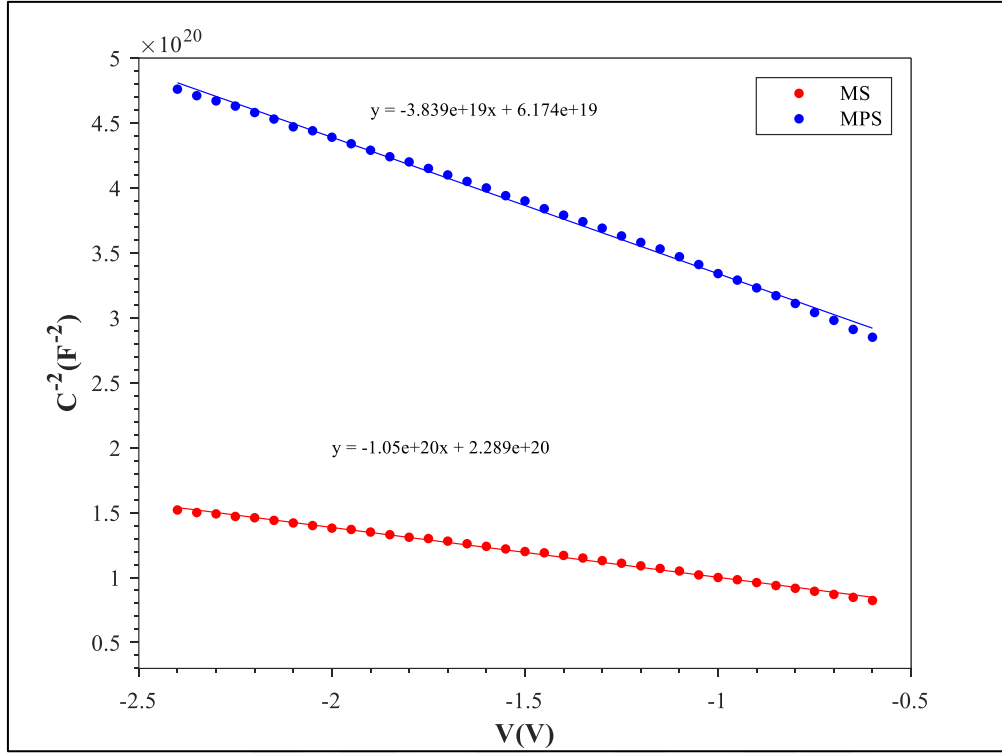
Şekil 5.14. MS ve MPS Schottky yapıların 500 kHz de karanlıkta ölçülen C-V eğrileri.



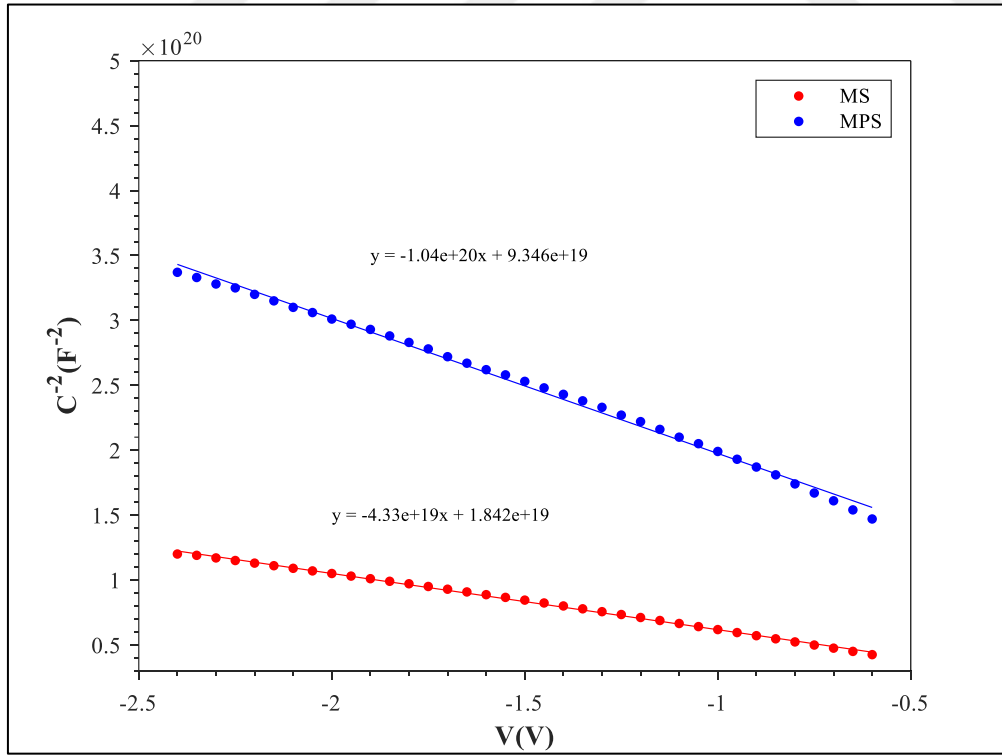
Şekil 5.15. MS ve MPS Schottky yapıların 500 kHz de 100 mW.cm^{-2} ışık şiddeti altında ölçülen C-V eğrileri

Sığa değerlerinin ışık şiddeti altında özellikle MPS yapın için önemli ölçüde artması onun bir foto kapasitör olarak da kullanılabileceğini göstermektedir. Bu artış, ara yüzey tabaka/yarıiletken arasında yer alan izinli enerji seviyelerinde/tuzaklarda ki elektrik yüklerin ışık etkisi altında uyarılması ve yeni tuzakların oluşumundan kaynaklanmaktadır [68-72]. Işık şiddeti altında oluşan bu ara yüzey durumlarına radyasyon etkisinde oluşan tuzaklar denir. Schottky diyot veya foto diyot üzerine, enerjileri yasak enerji aralığından büyük ($hc/\lambda \geq E_g$) fotonlar gönderildiğinde eklem bölgesinde çok sayıda elektron-deşik çifti oluşur. Bu elektron-deşik çiftleri, eklemde difüzyon sonucu oluşan doğal iç elektrik alan altında farklı yönlerde hareket ederek bir foto-akım oluşturlar.

Diğer bazı temel Schottky diyotları parametreleri olan verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_D), Fermi enerji (E_F), difüzyon potansiyeli ($V_D = V_0 + kT/q$), tükenim tabakası kalınlığı (W_D) ve potansiyel engel yüksekliği ($\Phi_B(C-V)$) değerleri Şekil 5.16 (karanlık) ve 5.17 (ışık altında) verilen ters beslem liner C^{-2} -V eğrilerinin kesim noktaları ve eğimlerinden aşağıda verilen denklemlerden faydalanarak hesaplandı ve sırasıyla Çizelge 5.4 ve 5.5 de verildi.



Şekil 5.16. MS ve MPS Schottky yapıların 500 kHz de karanlıkta ölçülen C^{-2} - V eğrileri.



Şekil 5.17. MS ve MPS Schottky yapıların 500 kHz de 100 mW.cm $^{-2}$ ışık altında C^{-2} - V eğrileri.

MS veya MIS tipi Schottky diyet yapılarında, diyetün tüketim-bölgesi sığası (C) değeri aşağıdaki gibi tanımlanır [65-67]:

$$C = \frac{|\partial Q_{SC}|}{\partial V} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s\epsilon_0 N_A}{2(V_d - V - \frac{kT}{q})}} \quad (5.12)$$

Dolayısıyla, bir MS veya MPS Schottky yapının ters beslem altında, C^{-2} ile V arasındaki ilişkisi aşağıdaki gibi verilir [66-68].

$$C^{-2} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_D} (V_o + V_R) \quad (5.13)$$

Burada; ϵ_s ve ϵ_0 sırasıyla yarıiletken ve uzayın dielektrik sabitleri, A Schottky kontağın alanı ve V_R diyet üzerine uygulanan ters beslem voltajı ve V_o ise C^{-2} - V grafinde, C^{-2} eksenini (y-ekseni) sıfır iken voltaj eksenini kestiği noktadır.

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_C}{N_D} \right] \quad (5.14)$$

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0 V_D}{qN_A}} \quad (5.15)$$

$$E_m = \left[\frac{2qN_A V_D}{\epsilon_s\epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (5.16)$$

Burada; N_D ve N_C sırasıyla verici katkı atomlarının yoğunluğu ve iletim bandındaki enerji durumlarının yoğunluğudur. Böylece, metal ayrı iletken arasında ve yarıiletkendeki metale doğru görünen potansiyel engel yüksekliği aşağıdaki denklemden hem karanlık hem de ışıık altındaki durum için rahatlıkla hesaplanabilir.

$$\Phi_B = V_o + \frac{kT}{q} + E_F \quad (5.17)$$

Çizelge 5.4. MS ve MPS Schottky diyotları için karanlık ki ters beslem C^{-2} -V grafiklerinden elde edilen bazı temel Schottky diyot parametreleri.

$C^{-2}(F^2)$ - V (V) 500kHz için		
Karanlıkta (Dark) C-V Ölçüm	MS (Au/n-Si)	MPS (Au/(CeO ₂ :ZnO:PVP)/n-Si)
V_o (V)	1,603	2,18
V_d (eV)	1,628	2,205
N_d (cm ⁻³)	5,05x10 ¹⁵	1,85x10 ¹⁵
E_F (eV)	0,216	0,241
$\Phi_{B(C-V)}$ (eV)	1,840	2,50
$\Phi_{B\text{ etkin}}$ (eV)	0,7	0,5
W_d (cm)	6,49x10 ⁻⁵	12,5x10 ⁻⁵

Çizelge 5.5. MS ve MPS Schottky diyotları için 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki ters beslem C^{-2} -V grafiklerinden elde edilen bazı temel Schottky diyot parametreleri

$C^{-2}(F^2)$ -V(V) 500k Hz için		
Işık Altında (100 mW/cm ²) C^{-2} -V Ölçüm	MS (Au/n-Si)	MPS (Au/(CeO ₂ :ZnO:PVP)/n-Si)
V_o (V)	0,427	0,896
V_d (eV)	0,452	0,921
N_d (cm ⁻³)	4,49x10 ¹⁵	1,87x10 ¹⁵
E_F (eV)	0,218	0,24
$\Phi_{B(C-V)}$ (eV)	0,671	1,16
$\Phi_{B\text{ etkin}}$ (eV)	0,355	0,362
W_d (cm)	3,62x10 ⁻⁵	8,03x10 ⁻⁵

Çizelge 5.4 ve 5.5 den de görüldüğü gibi hem karanlık hem de 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki ters beslem C^{-2} -V doğrularından elde edilen potansiyel engel yükseklikleri, doğru beslem $\ln(I)$ -V doğrularından elde edilenden daha büyüktür. Bu durum ölçümün doğasına ve onların uygulanan voltaja bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 5.4 ve 5.5 den de görüldüğü gibi, SiO₂ ve (CeO₂:ZnO:PVP) organik ara yüzey tabakaların varlığı ileri kesişme voltajlarına (V_o) yol açmıştır. Bunun diğer bir nedeni de, deneysel ara yüzey durumlarının teorik ($=1/q\mu\rho$) değerinden daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum bir c_2 katsayısı ile düzeltilebilir ($c_2 \cong N_{\text{deneysel}}/N_{\text{teorik}}$); burada μ elektronun hareketliliği ve ρ ise yarıiletkenin öz-direncidir. Böylece, görünen gerçek potansiyel engel yüksekliği ifadesi denklem 5.17'nin modifiye edilmesiyle elde edilir.

$$\Phi_B = c_2 V_o + \frac{kT}{q} + E_F \quad (5.18)$$

Denklem 5.18 yardımıyla görünen gerçek potansiyel engel yüksekliği (Φ_B etkin) , hem MS hem de MPS yapıları Schottky diyotlar için hesaplanmış olup Çizelge 5.4 ve 5.5 de verilmiştir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Au/n-Si ara-yüzeyinde bir (CeO₂:ZnO:PVP) organik/polimer ara yüzey tabakası oluşturarak, bu ara yüzey tabakanın Au/n-Si (MS) tipi klasik Schottky yapının performansı artırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky yapılar aynı n-Si alt taş üzerine aynı şartlarda oluşturuldu. Fabrikasyon işlemlerine başlamadan önce, Seryum dioksit (CeO₂) ve Çinko oksit (ZnO) metal oksit nanoyapılar ultrasonik destekli yöntemle sentezlendi. Arayüzey katmanının yapısal ve optik özelliklerini incelemek amacıyla XRD, UV-Vis, FTIR ölçümleri yapıldı.

Hazırlanan (CeO₂:ZnO:PVP) ara yüzey tabakanın yapısal analizler gerçekleştirildikten sonra, oluşturulan Au/n-Si (MS) ve Au/(CeO₂:ZnO:PVP)/n-Si (MPS) Schottky yapıların karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında hem akım-voltaj (I-V) hemde 500 kHz kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri oda sıcaklığında ve geniş bir voltaj aralığında gerçekleştirildi. Bu hazırlanan MS ve MPS Schottky yapıların ışığa duyarlılığı(S: sensitivity) ve fototepki(R:photoresponsibility) gibi temel opto-elektronik parametreleri aynı şekilde karanlıkta ve 100 mW.cm⁻² ışık şiddeti altında hesaplandı. Hem MS hem de MPS tipi Schottky yapıların iyi bir doğrultma özelliğine sahip olduğu görüldü ve akım değerlerinin pozitif voltaj bölgesinde orta gerilim değerlerinde net bir lineer bölgeye sahip iken yüksek voltajlarda seri direnç varlığından dolayı lineerlikten sapma olduğu gözlemlendi.

Hem karanlık hem de 100mW.cm⁻² ışık şiddeti altında ölçülen I-V değerlerinden; I₀, n ve Φ_{b0} , ($RR=I_F/I_R$, $\pm 5V$ için) değerleri elde edilerek gerekli tablolar oluşturuldu. Elde edilen bu sonuçlar, MS ve MPS yapılar için karşılaştırıldığında; MPS tipi Schottky diyot için elde edilen I₀ ve n değerleri MS yapıya göre daha küçük ve engel yüksekliği ile doğrultma oranlarının da daha yüksek olduğu belirlendi. Bu sonuçlar bize hazırlanan (CeO₂:ZnO:PVP) polimer ara yüzey tabakanın, klasik MS Schottky diyotun performansını oldukça arttırdığını göstermektedir. İdealite faktörünün hem karanlık hem de ışık altında 1' den büyük çıkması, ara yüzey tabakanın varlığına, metal ile yarıiletken arasında oluşan engelin homojensizliğine, yarıiletken ile ara yüzey tabaka arasına yerleşen ara yüzey durumlarının yoğunluğuna ve üretilme- birleşme akım mekanizmasına atfedildi. Temel diyot parametreleri olarak bilinen n, Φ_b ve R_s değerleri, TE teorisinin yansira Cheung fonksiyonlarından da $(dV/d\ln(I) - I$ ve $H(I) - I$) elde edilerek elde edilen sonuçlar

karşılaştırıldı. Burada amaç, bu temel elektriksel parametrelerin farklı voltaj bölgelerinde farklılıklar gösterip göstermediği veya başka bir ifadeyle voltaja bağlı olup olmadıklarını göstermektir.

Doğru öngerilimde I_F - V_F verileri kullanılarak, hem MS ve MPS yapılarında; metal/yarıiletken ara yüzeyinde oluşan ve enerjileri yarıiletkenin yasak enerji aralığına sahip ara yüzey durumlarının (N_{ss}) enerjiye bağlı (E_c - E_{ss}) dağılımları, Card ve Rhoderick tarafında geliştirilen eşitliklerden, karanlık ve de 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında elde edildi. Card ve Rhoderick denklemleri hem n hem de Φ_B değerlerinin voltaja bağlı değiştiği varsayımından hareket edilerek elde edilmiştir. MPS için elde edilen N_{ss} değerlerinin MS ye göre oldukça küçük olduğu tespit edildi ve bu durum da, ($\text{CeO}_2\text{:ZnO:PVP}$) polimer ara yüzey tabakanın, klasik MS Schottky diyotun performansını oldukça arttırdığını göstermektedir. Muhtemel akım iletim mekanizmalarını belirlemek amacıyla, düz beslem $\ln(I_F)$ - $\ln(V_F)$ grafikleri karanlık ve ışık altında elde edildi. Bunlardan, $\ln(I_F)$ - $\ln(V_F)$ grafiği 3 farklı lineer bölge gösterdi ve onların eğimlerinden akım iletiminin bu bölgelerde Ohmik, SCLC veya TCLC olduğu tespit edildi.

Hazırlanan MS ve MPS tip Schotky yapıların diğer bazı temel elektrik parametreleri olan N_D , E_F , $V_D=V_0+kT/q$, W_D ve $\Phi_B(C-V)$ değerleri de yine hem karanlık hem de ışık altında elde edilen ters beslem liner C^{-2} - V eğrilerinin kesim noktaları ve eğimlerinden hesaplandı. Fotoakım ve karanlık akım değerlerinden hesaplanan S ve R değerlerinin oldukça yüksek olduğu görüldü. Örneğin, S değerleri hem Au/n-Si hem de $\text{Au/}(\text{CeO}_2\text{:ZnO:PVP})/\text{n-Si}$ Schottky diyotları için -1V civarında maksimum hesaplandı. Bu değerler, hazırlanan diyotların iyi foto diyot özelliği gösterdiğine sahip olduğu ve dolayısı ile fotonik veya güneş pilleri uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu ve benzeri konularda bundan sonra çalışacaklara en önemli önerimiz, hem elektrik hem de optik özelliklerin daha geniş bir sıcaklık, aydınlatma şiddeti, frekans ve voltaj aralığında incelenerek, onların muhtemel iletim mekanizmaları, potansiyel engelin biçimi için daha güvenilir doğru sonuçlar elde etmektir. Çünkü tek veya dar bir sıcaklık, frekans, voltaj ve aydınlatma şiddeti altında elde edilen sonuçlar bize bu konularda yeterince doğru ve güvenilir sonuçlar sağlayamaz. Farklı oranlarda CeO_2 ve ZnO katkılı PVP ara yüzey tabakaların M/S ara yüzeyinde oluşturulması ve bu sayede maksimum performans şartlarının sağlanması da diğer önemli bir önerimizdir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Aly, R., Ramadan, O., Ashraf, R., Tarek, R., Khashan, M., Elmaghraby, A. and Hossam, P. (2023). *An Overview on Schottky Barrier Diodes*. Faculty Of Engineering-Alexandria University. Web: <https://www.researchgate.net/publication/366763152>, Son Erişim Tarihi: 26/03/2024.
2. Sönmezoğlu, S., Şenkul, S., Taş, R., Çankaya, G. and Can, M. (2010). Electrical and interface state density properties of polyaniline–poly-3-methyl thiophene blend/p-Si Schottky barrier diode. *Solid State Sciences*, 12(5), 706-711.
3. Burroughes, J. H., Bradley, D. D., Brown, A. R., Marks, R. N., Mackay, K., Friend, R. H. and Holmes, A. B. (1990). Light-emitting diodes based on conjugated polymers. *Nature*, 347(6293), 539-541.
4. Alptekin, S. and Altındal, Ş. (2020). Electrical characteristics of Au/PVP/n-Si structures using admittance measurements between 1 and 500 kHz. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 13337-13343.
5. Ying, S., Ma, Z., Zhou, Z., Tao, R., Yan, K., Xin, M. and Shi, Y. (2020). Device based on polymer Schottky junctions and their applications: A review. *IEEE Access*, 8, 189646-189660.
6. Ganj, T., Rozati, S. M., Azizian-Kalandaragh, Y., Pirgholi-Givi, G. and Altındal, Ş. (2023). The effect of (CeO₂: PVC) thin interfacial film on the electrical features in Au/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) by using current–voltage measurements. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(8), 752.
7. Ameen, S., Akhtar, M. S., Seo, H. K. and Shin, H. S. (2014). Metal oxide semiconductors and their nanocomposites application towards photovoltaic and photocatalytic. *Advanced Energy Materials*, 3, 105-166.
8. Kowsuki, K., Nirmala, R., Ra, Y. H. and Navamathavan, R. (2023). Recent advances in cerium oxide-based nanocomposites in synthesis, characterization, and energy storage applications: A comprehensive review. *Results in Chemistry*, 5, 100877.
9. Debnath, S., Islam, M. R. and Khan, M. S. R. (2007). Optical properties of CeO₂ thin films. *Bulletin of Materials Science*, 30, 315-319.
10. Kumar, S., Saralch, S., Jabeen, U. and Pathak, D. (2020). Metal oxides for energy applications. In *Colloidal Metal Oxide Nanoparticles*. New York: Elsevier, 471–504.
11. Chen, T. and Liu, Y. (2016). *Semiconductor Nanocrystals and Metal Nanoparticles: Physical Properties and Device Applications*. New York: CRC Press, 78-92.
12. Şükriye, Ç., Danışman, G. ve Faruk, A. (2018). *Arayüzeyleri farklı kalınlıklarda imal edilmiş Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs/In schottky diyotların dielektriksel özelliklerinin ve ac elektriksel iletkenliklerinin frekansa ve sıcaklığa bağlılıkları*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

13. Seltzer, M. S. and Jaffee, R. I. (Eds.). (1974). *Defects and transport in oxides*. New York: Plenum Press, 45-62.
14. Kesel, G., Hammerschmitt, J., Lange, E., Kesel, G., Hammerschmitt, J. and Lange, E. (1982). Schottky-Diode. *Signalverarbeitende Dioden*, 148-202.
15. Chang, C.Y. and Sze, S.M. (1969). Interface study of metal-semiconductor systems, *Science Bulletin Chao-Tung University*, 3(2), 26-32.
16. Sze, S. M. (2008). *Semiconductor devices: physics and technology*. New York: John Wiley & Sons, 45-63.
17. Sharma, B. L. (Edt.). (2013). *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications*. New York: Springer Science & Business Media, 75-83.
18. İnternet: Lilja, K. (2011). Performance, interfacial properties and applications of printed organic diodes. Web: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/115109>, Son Erişim Tarihi: 26/03/2024.
19. Sevgili, Ö. (2020). *Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky engel diyotların hazırlanması ve elektrik ile dielektrik özelliklerinin frekans ve voltaja bağlı incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 102-105.
20. Güçlü, Ç. Ş., Özdemir, A. F. and Aldemir, D. A. (2019). Mo/n-Si Schottky diyotların akım-voltaj ve kapasite-voltaj karakteristiklerinin analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 2142-2155.
21. Cheung, S. K. and Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87.
22. Tataroğlu, A., Altındal, Ş. and Azizian-Kalandaragh, Y. A. S. H. A. R. (2020). Electrical and photoresponse properties of CoSO 4-PVP interlayer based MPS diodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 11665-11672.
23. Lapa, H. E., Kökce, A., Aldemir, D. A. and Özdemir, A. F. (2021). The response of high barrier Schottky diodes to light illumination. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 4448-4456.
24. Periyagounder, D., Gnanasekar, P., Varadhan, P., He, J. H. and Kulandaivel, J. (2018). High performance, self-powered photodetectors based on a graphene/silicon Schottky junction diode. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(35), 9545-9551.
25. Tan, S. O., Uslu Tecimer, H., Çiçek, O., Tecimer, H., Orak, İ. and Altındal, Ş. (2016). Electrical characterizations of Au/ZnO/n-GaAs Schottky diodes under distinct illumination intensities. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 8340-8347.
26. Musterer, N. (2016). *Perylene diimide molecular glass: Investigations of charge transport*. Doctoral Dissertation, Queen's University, Canada, 63-73.

27. Atxabal Arrasate, A. (2018). *In-device spectroscopy at metal/organic semiconductor interfaces*. Doctoral Dissertation, Universidad del Pais Vasco, Spain, 105-112.
28. Tang, C. W. (1986). Two-layer organic photovoltaic cell. *Applied Physics Letters*, 48(2), 183-185.
29. Tang, C. W. and VanSlyke, S. A. (1987). Organic electroluminescent diodes. *Applied Physics Letters*, 51(12), 913-915.
30. Shirota, Y. and Kageyama, H. (2007). Charge carrier transporting molecular materials and their applications in devices. *Chemical Reviews*, 107(4), 953-1010.
31. Selçuk, A. B., Bilge Ocak, S., Aras, F. G. and Oz Orhan, E. (2014). Electrical characteristics of Al/poly (methyl methacrylate)/p-Si Schottky device. *Journal of Electronic Materials*, 43, 3263-3269.
32. Kaur, A. and Singh, R. (2001). Indium/polypyrrole (polypyrrole derivatives) Schottky junctions. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 38(12), 1329-1336.
33. Hwang, J., Wan, A. and Kahn, A. (2009). Energetics of metal–organic interfaces: New experiments and assessment of the field. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 64(1-2), 1-31.
34. Braun, S., Salaneck, W. R. and Fahlman, M. (2009). Energy-level alignment at organic/metal and organic/organic interfaces. *Advanced Materials*, 21(14-15), 1450-1472.
35. Siddiqui, H., Qureshi, M. S. and Haque, F. Z. (2020). Biosynthesis of flower-shaped CuO nanostructures and their photocatalytic and antibacterial activities. *Nano-Micro Letters*, 12, 1-11.
36. Konar, S., Kalita, H., Puvvada, N., Tantubay, S., Mahto, M. K., Biswas, S. and Pathak, A. (2016). Shape-dependent catalytic activity of CuO nanostructures. *Journal of Catalysis*, 336, 11-22.
37. Ahmad, T., Pandey, V., Husain, M. S. and Munjal, S. (2022). Structural and spectroscopic analysis of pure phase hexagonal wurtzite ZnO nanoparticles synthesized by sol-gel. *Materials Today: Proceedings*, 49, 1694-1697.
38. Sharma, A. and Kumar, P. S. (2012). Synthesis and characterization of CeO-ZnO nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*, 2(3), 82-85.
39. Turky, A. O., Barhoum, A., MohamedRashad, M. and Bechlany, M. (2017). Enhanced the structure and optical properties for ZnO/PVP nanofibers fabricated via electrospinning technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 17526-17532.
40. Taşçıoğlu, İ., Pirgholi-Givi, G., Yerişkin, S. A. and Azizian-Kalandaragh, Y. A. S. H. A. R. (2023). Examination on the current conduction mechanisms of Au/n-Si diodes with ZnO–PVP and ZnO/Ag₂WO₄–PVP interfacial layers. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 107(3), 536-547.

41. Liu, Y. H., Zuo, J. C., Ren, X. F. and Yong, L. (2014). Synthesis and character of cerium oxide (CeO₂) nanoparticles by the precipitation method. *Metalurgija*, 53(4), 463-465.
42. Heydari, H. and Gholivand, M. B. (2017). A novel high-performance supercapacitor based on high-quality CeO₂/nitrogen-doped reduced graphene oxide nanocomposite. *Applied Physics A*, 123, 1-10.
43. Artini, C., Costa, G. A., Pani, M., Lausi, A. and Plaisier, J. (2012). Structural characterization of the CeO₂/Gd₂O₃ mixed system by synchrotron X-ray diffraction. *Journal of Solid State Chemistry*, 190, 24-28.
44. Azizian-Kalanderagh, Y., Khodayari, A. and Behboudnia, M. (2009). Ultrasound-assisted synthesis of ZnO semiconductor nanostructures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 12(4-5), 142-145.
45. Naqvi, S. M. A., Soleimani, H., Yahya, N. and Irshad, K. (2014). *Structural and optical properties of chromium doped zinc oxide nanoparticles synthesized by sol-gel method*. AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, Malaysia, 530-537.
46. Chaudhari, A. A., Tupe, U. J., Patil, A. v, & Dighavkar, C. G. (2022). Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using green synthesis method. *Materials Science, Environmental Science, Chemistry*, 10(2), 62-65.
47. Tuğrul, Ö. (2018). *Azo boyar maddelerin yapısal ve bazı spektroskopik özelliklerinin ab-initio yöntemi ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 112-126.
48. Akın, N. (2015). *ZnO tabanlı UV dedektör geliştirilmesi ve prototip üretimi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 78-82.
49. Safat, S., Buazar, F., Albukhaty, S., & Matroodi, S. (2021). Enhanced sunlight photocatalytic activity and biosafety of marine-driven synthesized cerium oxide nanoparticles. *Scientific Reports*, 11(1), 14734.
50. Sabouri, Zahra, Sabouri, Mohammad, Amiri, Mohammad Sadegh, Khatami, Mehrdad, & Darroudi, Majid. (2020). Plant-based synthesis of cerium oxide nanoparticles using Rheum turkestanicum extract and evaluation of their cytotoxicity and photocatalytic properties. *Materials Technology*, 37, 122-145.
51. G, JayaKumar, Alphonse, A. Albert, & Raj, Dhayal. (2019). A comprehensive investigation on the properties of nanostructured cerium oxide. *Optical and Quantum Electronics*, 51, 68-72.
52. Singh, D. K., Pandey, D. K., Yadav, R. R. and Singh, D. (2013). A study of ZnO nanoparticles and ZnO-EG nanofluid. *Journal of Experimental Nanoscience*, 8(5), 731-741.
53. Kumar, H. and Rani, R. (2013). Structural and Optical Characterization of ZnO Nanoparticles Synthesized by Microemulsion Route. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, 19, 26-36.

54. Ünal, D. (2012). *Silisyum tabanlı nanokristallerin yapısal ve optiksel incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırşehir, 45-63.
55. Deepa, R., Muthuraj, D., Kumar, E., & Veeraputhiran, V. (2019). Microwave assisted synthesis of zinc oxide nanoparticles and its antimicrobial efficiency. *Journal of Nanoscience and Technology*, 640-641.
56. Abdullah, E. A., Anber, A. A., Edan, F. F. and Fraih, A. J. (2018). Synthesis of ZnO nanoparticles by using an atmospheric-pressure plasma Jet. *OALib*, 05(07), 1–7.
57. Yedurkar, S., Maurya, C. and Mahanwar, P. (2016). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using ixora coccinea leaf extract—a green approach. *Open Journal of Synthesis Theory and Applications*, 5(1), 1-14.
58. Saranya, J., Sreeja, B. S., Padmalaya, G., Radha, S., & Manikandan, T. (2020). Ultrasonic assisted cerium oxide/graphene oxide hybrid: preparation, anti-proliferative, apoptotic induction and G2/M cell cycle arrest in HeLa cell lines. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30, 2666-2676.
59. Ramasamy, V. and Vijayalakshmi, G. (2016). Synthesis, characterization and tuning of visible region absorption ability of cadmium doped ceria quantum dots. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 52-63.
60. Amarsingh Bhabu, K., Theerthagiri, J., Madhavan, J., Balu, T., Muralidharan, G., & Rajasekaran, T. R. (2016). Cubic fluorite phase of samarium doped cerium oxide (CeO₂ 0.96 Sm 0.04 for solid oxide fuel cell electrolyte. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 1566-1573.
61. Sandhya, K., Chitra Priya, N. S. and Rajendran, D. N. (2018). Synthesis and Characterization of ceria co-doped with Samarium(Sm) and Antimony: A potential candidate as a solid electrolyte for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 360(1), 112-126.
62. Abid, S. A., Taha, A. A., Ismail, R. A. and Mohsin, M. H. (2020). Antibacterial and cytotoxic activities of cerium oxide nanoparticles prepared by laser ablation in liquid. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 30479–30489.
63. Wang, A. Q. and Golden, T. D. (2016). Electrochemical formation of Cerium oxide/Layered Silicate nanocomposite films. *Journal of Nanotechnology*, 2016, 126-143.
64. Al-Sulami, A. I., Al-Nashri, A. A., Al-Mhyawi, S. and Hameed, T. A. (2024). Engineering the optical, and dielectric properties of (PVA: PVP)/BaSnO₃ polymer nanocomposites as promising films for optoelectronics and energy storage applications. *Polym Adv Technol*, 35(2), e6297.
65. Sze, S. and Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices*. New York: John Wiley & Sons, 46-63.

66. Aly, R., Ramadan, O., Ashraf, R., Tarek, R., Khashan, M., Elmaghraby, A. and Hossam, P. (2023). *An overview on schottky barrier diodes*. Web: <https://www.researchgate.net/publication/366763152>, Son Erişim Tarihi: 26/04/2023.
67. Rhoderick, E. H. and Williams, R. H. (1988). *Metal-semiconductor contacts*. London: Oxford University Press, 85-93.
68. Sharma, M. and Tripathi, S. (2013). Analysis of interface states and series resistance for Al/PVA: n-CdS nanocomposite metal–semiconductor and metal–insulator–semiconductor diode structures. *Applied Physics A*, 113, 491-499.
69. Card, H. and Rhoderick, E. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, 1589.
70. Tataroğlu, A., Altındal, Ş. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2020). Comparison of electrical properties of MS and MPS type diode in respect of (In₂O₃-PVP) interlayer. *Physica B: Condensed Matter*, 576, 411733.
71. Demirezen, S., Çetinkaya, H. G. and Kara, M. (2021). Synthesis, electrical and photo-sensing characteristics of the Al(PCBM/NiO:ZnO)/p-Si nanocomposite structures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 317, 112449.
72. Kaya, F. Ş., Duman, S., Orak, I. and Baris, Ö. (2021). Effect of illumination on the electrical characteristics of Au/n-GaP/Al and Au/Chlorophyll-a/n-GaP/Al structures. *Materials Science and Engineering B*, 265, 114980.
73. Elamen, H., Badali, Y., Güneşer, M. T. and Altındal, Ş. (2020). The possible current-conduction mechanism in the Au/(CoSO₄-PVP)/n-Si junctions. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 18640-18648.
74. Ulsan, A. B., Tataroğlu, A., Altındal, Ş. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). Photoresponse properties of Au/(CoFe₂O₄-PVP)/n-Si/Au (MPS) diode. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 32, 15732-15739.
75. Yeşildağ, A., Erdoğan, M., Sevgili, Ö. and Çaldıran, Z. (2021). Optical and Electrical Properties of Pyrene–Imine Organic Interface Layer Based on p-Si. *Journal of Electronic Materials*, 50, 6448-6458.
76. Jyothi, I., Janardhanam, V., Rajagopal Reddy, V. and Choi, C.-J. (2014). Modified electrical characteristics of Pt/n-type Ge Schottky diode with a pyronine-B interlayer. *Superlattices and Microstructures*, 75, 806–817.
77. Rajogopal Reddy, V., Manjunath, V., Jandarhanam, V., Kil, Y. H. and Choi, C. J. (2014). Electrical Properties and current transport mechanisms of the Au/n-GaN schottky structure with solution-processed High-k BaTiO₃ interlayer. *Journal of Electronic Materials*, 43, 98-102.
78. Cheung, S. and Cheung, N. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49, 85-87.

79. Yerişkin, S. A., Balbaşı, M. and Orak, İ. (2017). The effects of (graphene doped-PVA) interlayer on the determinative electrical parameters of the Au/n-Si (MS) structures at room temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 14040-14048.
80. Demirezen, S., Sönmez, Z., Aydemir, U. and Altındal, Ş. (2012). Effect of series resistance and interface states on the I–V, C–V and G/ω –V characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature. *Current Applied Physics*, 12(1), 266-272.
81. Reddy, V. R. (2014). Electrical properties of Au/polyvinylidene fluoride/n-InP Schottky diode with polymer interlayer. *Thin Solid Films*. 556, 300–306.
82. Song, Y. P., Van Meirhaeghe, R. L., Laflère, W. H. and Cardon, F. (1986). On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers. *Solid State Electronics*, 29(6), 633-638.
83. Çiçek, O., Tecimer, H. U., Tan, S. O., Tecimer, H., Altındal, Ş. and Uslu, I. (2016). Evaluation of electrical and photovoltaic behaviours as comparative of Au/n-GaAs (MS) diodes with and without pure and graphene (Gr)-doped polyvinyl alcohol (PVA) interfacial layer under dark and illuminated conditions. *Composites Part B: Engineering*, 98, 260-268.
84. Altındal, Ş., Sevgili, Ö. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). A comparison of electrical parameters of Au/n-Si and Au/(CoSO₄–PVP)/n-Si structures (SBDs) to determine the effect of (CoSO₄–PVP) organic interlayer at room temperature. *Journal of Materials Science : Materials in Electronics*, 30, 9273-9280.
85. Mote, V., Purushotham, Y. and Dole, B. (2012). Williamson-Hall analysis in estimation of lattice strain in nanometer-sized ZnO particles. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 6, 6.





Gazili olmak ayrıcalıktır