



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SPİN KAPLAMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Al/NİGROSİN/n-Si
FOTODİYOTLARININ KARAKTERİZASYONU**

Ayşe ASLANCI

**Haziran-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SPİN KAPLAMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN
Al/NİGROSİN/n-Si FOTODİYOTLARININ KARAKTERİZASYONU**

Ayşe ASLANCI

**Danışman
Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ**

Diğer Jüri Yeleri

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

Prof. Dr. Sezai ASUBAY

Prof. Dr. Osman PAKMA

**Haziran-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ayşe ASLANCI tarafından hazırlanan “SPİN KAPLAMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Al/NİGROSİN/n-Si FOTODİYOTLARININ KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması 17/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Sezai ASUBAY

.....

Danışman

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

.....

Üye

Prof. Dr. Osman PAKMA

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Ayşe ASLANCI
17/06/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SPİN KAPLAMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Al/NİGROSİN/n-Si FOTODİYOTLARININ KARAKTERİZASYONU

Ayşe ASLANCI

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

2025, 78 Sayfa

Bu çalışmada, spin kaplama yöntemiyle elde edilen Al/Nigrosin/n-Si Schottky diyotlarının yapısal, optik, elektriksel ve fotodiyot özellikleri üzerine yapılan araştırmaların sonuçları sunulmaktadır. Çalışmanın amacı, organik malzeme olan Nigrosin'in, Schottky diyot yapılarında kullanılarak optoelektronik özelliklerdeki değişimleri incelemektir. İlk olarak, Nigrosin'in n-Si yüzeyine etkisi, I-V (akım-gerilim) karakteristikleri üzerinden incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Nigrosin'in Schottky diyot yapılarının elektriksel özelliklerinde önemli değişiklikler oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle, Schottky diyotlarının idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi parametrelerdeki değişiklikler, Nigrosin'in optoelektronik performansını iyileştirdiğini ve diyotun performansını artırdığını ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, Cheung ve Norde yöntemleri kullanılarak diyot parametrelerinin hesaplanması yapılmıştır. Her iki yöntem de diyotun elektriksel özelliklerini değerlendirme konusunda tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, XRD analizleri kullanılarak Nigrosin'in yapısal özellikleri incelenmiş ve bu malzemenin Schottky diyot yapısındaki etkileşimi doğrulanmıştır. Fotovoltaik parametreler de kapsamlı bir şekilde ele alınmış ve Nigrosin tabakasının fotoresponsivite, verimlilik (efficiency), foto hassasiyet (photosensitivity) gibi parametreler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Nigrosin'in Schottky diyotlar üzerindeki olumlu etkilerinin, organik malzemelerin optoelektronik sistemlerdeki potansiyel kullanımını daha da ileriye taşıyabileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, özellikle Nigrosin gibi organik malzemelerin Schottky diyotlar ve fotovoltaik cihazlar üzerindeki etkilerini daha derinlemesine anlamaya yönelik yeni bir bakış açısı sunmakta ve bu tür organik-elektronik yapıların gelecekteki uygulamaları için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Organik yarıiletken, Schottky diyot, fotodiyot, Al/Nigrosin/n-Si diyot, Elektriksel ve Optik Özellikler

ABSTRACT

MASTER THESIS

CHARACTERIZATION OF Al/NIGROSIN/n-Si PHOTODIODES FABRICATED BY SPIN COATING TECHNIQUE

Ayşe ASLANCI

Batman University Graduate Education Institute

Physics Department of Science

Advisor: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

2025, 78 Pages

This study presents the results of investigations on the structural, optical, electrical and photodiode properties of Al/Nigrosin/n-Si Schottky diodes obtained by spin coating method. The aim of the study is to investigate the changes in optoelectronic properties of Nigrosin, an organic material, by using it in Schottky diode structures. Firstly, the effect of Nigrosin on the n-Si surface was analyzed through I-V (current-voltage) characteristics. The results obtained show that Nigrosin induces significant changes in the electrical properties of Schottky diode structures. In particular, changes in parameters such as ideality factor and barrier height of Schottky diodes revealed that Nigrosin improves the optoelectronic performance and enhances the performance of the diode.

In this study, the diode parameters were calculated using Cheung and Norde methods. Both methods provided consistent results in evaluating the electrical properties of the diode. Furthermore, the structural properties of Nigrosin were investigated using XRD analysis and the interaction of this material in the Schottky diode structure was confirmed. Photovoltaic parameters have also been extensively studied and the effect of Nigrosin doping on parameters such as photoresponsivity, efficiency and photosensitivity has been evaluated. The results show that the positive effects of Nigrosin on Schottky diodes can further advance the potential use of organic materials in optoelectronic systems.

In particular, this study provides a new perspective towards a deeper understanding of the effects of organic materials such as Nigrosin on Schottky diodes and photovoltaic devices and lays a solid foundation for future applications of such organic-electronic structures.

Keywords: Organic Semiconductor, Schottky Diode, Photodiode, Al/Nigrosin/n-Si Diode, Electrical and Optical Properties.

ÖN SÖZ

Bu tez, yüksek lisans eğitimim süresince üzerinde çalıştığım organik yarıiletkenler ve fotodiyotlar üzerine gerçekleştirdiğim araştırmaların bir ürünüdür. Çalışmasının her aşamasında bilgi ve deneyimiyle yol gösteren, akademik gelişimime önemli katkılarda bulunan çok değerli danışmanım Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin desteği ve rehberliği, çalışmanın sağlıklı bir şekilde ilerlemesini sağlamıştır. Ayrıca, veri analizleri ve değerlendirme süreçlerinde katkı sunan Fizik Anabilim Dalı doktora öğrencisi Emine Erdem'e de samimi desteğinden dolayı teşekkür ederim. Her iki hocalarımın bilgi birikimi, sabrı ve rehberliği, bu tezin en önemli dayanakları olmuştur. Ayrıca, sevgili eşim Sait ve kızlarım Asmin ve Lavin'e, sonsuz destekleri ve anlayışları için teşekkür etmek istiyorum. Ailemin desteği, bu süreçteki en büyük gücüm olmuştur. Tezimi okuyan ve katkı sağlayan herkese teşekkür eder, bu çalışma ile elde ettiğim sonuçların bilimsel alanda faydalı olmasını temenni ederim.

Ayşe ASLANCI
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. KURAMSAL TEMELLER	12
3.1. Organik Yarıiletkenler	12
3.1.1. Sp^2 hibritleşmesi ve birleşmesi	12
3.1.2. Yük aktarım modelleri	16
3.1.2.1. Gauss Dağılım Modeli (GDM)	16
3.1.2.2. Genişletilmiş Gauss Düzensizlik Modeli (EGDM)	18
3.1.3. Tuzaklanmış Akımların Fiziği	20
3.1.4. Yük Taşıyıcı Enjeksiyonu	25
3.1.4.1. Omik yük enjeksiyon kontakları	28
3.2. Metal / Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar	30
3.2.1. Termal elektron emisyon yapısı	31
3.2.2. Tünelleme yapısı	33
3.2.3. Schottky kontağının uzay yükü kapasitesi	34
3.3. XRD Analizi	35
3.4. Fotodiyot Teorisi	37
4. DENEYSEL İŞLEMLER	39
4.1. Deneysel Malzemelerin Özelliklerinin İncelenmesi	39
4.1.1. Nigrosin organik boyası	39
4.1.2. Alüminyum özellikleri	40
4.2. Kaplama Teknikleri ve Kullanılan Cihazlar	40
4.2.1. Spin (Döngüsel) kaplama yöntemi	40
4.3. Termal Buharlaştırma Sistemi	42
4.4. Kristallerin Temizlenmesi	43
4.5. Al/Nigrosin/n-Si Schottky Diyotunun Hazırlanması ve Ölçümler	44
5. BULGULAR VE SONUÇLAR	45
5.1. Nigrosin Bileşiğinin Toz Haldeki XRD Ölçümlerinin Analizi	45
5.2. Nigrosin'in Optik Ölçümleri (UV-Vis)	45

5.3. Al/Nigrosin/n-Si Diyotunun Akım-Gerilim (I-V) Özelliklerinin Değerlendirilmesi.....	47
5.3.1. I-V yöntemi ile diyot parametrelerinin hesaplanması.....	47
5.3.2. Cheung fonksiyonu	51
5.3.3. Norde Fonksiyonu.....	55
5.3.4. Arayüzey durum yoğunluklarının hesaplanması	58
5.4. Al/Nigrosin/n-Si Diyotunun Fotodiyot Karakteristikleri.....	60
5.5. Al/Nigrosin/n-Si Diyotunun Kapasitans- Gerilim (C-V) Karakteristikleri	63
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
6.1 Sonuçlar	67
6.2 Öneriler	70
KAYNAKLAR	72



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1 Literatürdeki bazı metal/organik/inorganik diyotlara ait parametreler.....	52
Tablo 2 Dönel kaplama yöntemiyle üretilen Al/n-Si ve Al/Nigrosin/n-Si diyotlara ait I-V ölçümlerinden Cheung ve Norde yöntemleri kullanarak elde edilen elektronik parametreler	58
Tablo 3 Al/Nigrosin/n-Si fotodiyotunun ışık şiddetine bağlı fotovoltajik parametreleri	61
Tablo 4 Farklı frekanslarla ölçülen C^2 -V eğrilerinden hesaplanan diyot parametreleri.	65

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 3.1** a) sp^2 hibritleşme yöntemi b) Temel durum ve uyarılmış durum elektron dizilimi ve karbon atomunda sp^2 hibrit orbitallerin oluşumu. 13
- Şekil 3.2** Eten Molekülünde Enerji Seviyelerinin Oluşumu. (a) σ ve π Bağlarının Oluşumu. (b) π Elektron Bulutunun Delokalizasyonu. (c) Bağlayıcı ve Antibaglayıcı Moleküler Orbitallere Karşılık Gelen Enerji Seviyeleri (Brütting, 2005) 13
- Şekil 3.3** Organik yarıiletkenlerde bant aralığının kontrolü. Derecesi olarak konjugasyon etilenden poliasetilene doğru arttıkça, HOMO enerji değeri artar (sığlaşır) ve LUMO enerji değeri azalır (derinleşir). Yani sonunda konjugasyon arttıkça bant aralığı azalır. 15
- Şekil 3.4** Gaz fazındaki moleküllerin durum yoğunluğu, moleküler kristal katılar ve amorf durum. IE_g iyonlaşma enerjisi ve EA_g gaz fazında elektron enerjisidir, IE_c ve EA_c kristal haldeki miktarları temsil eder. Çünkü polarizasyon enerjilerine P_h (pozitif polaron veya delik) ve P_e (negatif polaron veya elektron) yüklü durumlar kristalde stabilize edilir. E_g enerji bant aralığıdır. 15
- Şekil 3.5** Gauss düzensizlik modeli. Sol: Gauss dağılımını gösterir LUMO ve HOMO enerji seviyeleri. Delikler sırasıyla ve elektron için DOS merkezi $E_{0,e}$ ve $E_{0,h}$. $E_{eq,e}$ ve $E_{eq,h}$ elektron ve delikler için denge enerji seviyeleridir. Sırasıyla E_a , e ve E_a , h elektron ve delikler için taşıma enerji seviyeleridir. Bu seviyelerin DOS merkezine göre enerji değerleri de şöyledir. Sağ tarafta: LUMO ve HOMO' da ki yük taşıma bölgelerinin dağılımı ve yük taşıyıcılarının bir bölgeden diğerine atlama hareketi 16
- Şekil 3.6** Organik yarıiletkenlerde elektron tuzakları. Sol: Gauss dağılımlı LUMO ve Gauss dağılımlı tuzakları göstermektedir. E_0 ve E_{tc} sırasıyla LUMO ve tuzakların merkezidir. E_a bir taşıma enerji seviyesidir ve E_F Fermi enerjisi seviyesini gösterir. Sağ: LUMO ve üstel olarak dağıtılmış tuzakları gösterir 21
- Şekil 3.7** Organik yarıiletkenlerde delik tuzakları. Sol: Gauss dağılımını gösterir. 24
- HOMO ve Gauss dağılımlı tuzaklar. Sırasıyla tuzaklar E_0 ve Etc HOMO'nun merkezidir. E_a bir taşıma enerji seviyesidir ve E_f Fermi enerjisi seviyesidir. Sağdaki: HOMO ve üstel olarak dağılımlı tuzakları gösterir 24
- Şekil 3.8** Metal/organik yarıiletken ara yüzeyindeki enerji bandı diyagramı. (a) Uygulanan alan nedeniyle bant eğimi düz çizgi (kırmızı) ile gösterilmiştir. Görüntü potansiyeli (yeşil eğri), ara yüzeydeki bariyer yüksekliği düşmesi nedeniyle, ara yüzey yakınındaki net bant bükülmesini mavi eğriyle gösterir. Ara yüzde $\Delta\Phi$ ile maksimum bariyer düşürülmüştür. (b) Termiyonik emisyon (çok ısınan maddelerde meydana gelen elektron salınımı)yoluyla yük enjeksiyonu. Düşük mobilite de organik yarıiletkenler, taşıyıcılar ara yüzeyde birikir ve metal kontağa geri akabilir. (c) Yüksek alanlarda, Fowler-Nordheim üzerinden yük enjeksiyonu üçgen bir bariyerde tünelleme gösterilmiştir (Sze et al., 2021) 27
- Şekil 3.9** Sol: Organik yarıiletkenlerde p-tipi katkılama, konağın HOMO'sundan daha düşük bir LUMO'ya sahip organik bir katkı maddesi, konaktan bir elektron kabul edebilir. Bu sistemde bir boşluk oluşturarak p tipi katkılamaya neden olur. Sağ: Organik yarıiletkenlerde n-tipi katkılama, HOMO'su konağın LUMO'sundan daha düşük olan bir organik katkı maddesi konağa bir elektron bağışlayabilir. Bu, konakta fazladan bir elektron yaratır ve n-tipi katkılama ile sonuçlanır 28
- Şekil 3.10** Sol: Metal/katkısız organik yarıiletken kontağı, bir delik enjeksiyonu için yüksek bariyer. Sağ: Metal/p- katkılı organik yarıiletken kontak, Organik katmanın katkılanması tarafından, güçlü bir bant bükülmesi yaratır, bu da önemli ölçüde enjeksiyon bariyerinin azaltır..... 29

Şekil 3.11 Schottky diyot bant diyagramının şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.12 Schottky doğrultma işleminin şematik gösterimi	31
Şekil 3.13 Bragg yasası için atomik ölçekte katı malzeme görünümü	37
Şekil 3.14 Yarıiletken malzeme fotonlarla uyarılması sonucunda (a) bantlarda meydana gelen geçiş (b) safsızlık seviyesiyle iletim bandı arasında oluşan fotouyarım olayları..	37
Şekil 4.1 Nigrosinin kimyasal formülü.....	41
Şekil 4.2 Spin kaplama cihazı.....	42
Şekil 4.3 Termal Buharlaştırma Sistemi.....	44
Şekil 4.4 Al kaplamasında kullanılan PVD cihazı	44
Şekil 5.1 Nigrosin bileşiğinin toz haldeki XRD grafiği	46
Şekil 5.2 Sıvı haldeki nigrosin çözeltisinin absorpsiyon-dalgaboyu grafiği	47
Şekil 5.3 Sıvı haldeki nigrosin çözeltisinin $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ grafiği.....	48
Şekil 5.4 Al/n-Si ve Al/Nigrosin/n-Si diyotlarının akım-gerilim karakteristikleri grafiği	50
Şekil 5.5 Al/n-Si ve Al/Nigrosin/n-Si diyotun eklem direnci gerilim grafiği	52
Şekil 5.6 Al/n-Si kontrol diyot yapısına ait Cheung fonksiyonu eğrileri	54
Şekil 5.7 Al/Nigrosin/p-Si/Al MIS yapısına ait Cheung fonksiyonu eğrileri.....	55
Şekil 5.8 Al/ Nigrosin /n-Si diyota ait $F(V)$ - V değişimi	58
Şekil 5.9 Al/ Nigrosin /n-Si yapı için N_{ss} nin E_c - E_{ss} ye karşı değişimi	60
Şekil 5.10 Al/Nigrosin/n-Si diyotunun karanlık ve ışık altındaki I - V eğrileri.....	61
Şekil 5.11 Al/Nigrosin/n-Si diyotuna ait C - V grafiği.....	64
Şekil 5.12 Al/Nigrosin/n-Si diyotuna ait $1/C^2$ - V grafiği	64
Şekil 5.13 Al/Nigrosin/n-Si Si diyotun Kondüktans-Gerilim (G - V) grafikleri.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Diyotun etkin alanı
A*	: Richardson sabiti
C	: Kapasite
d	: Uzay yükü bölgesinin genişliği
IE_g	: İyonlaşma enerjisi
EA_g	: Gaz fazında elektron enerjisi
P_h	: Pozitif polaron
P_e	: Negatif polaron
E_{a,e}	: Elektron için taşıma enerji seviyesi
E_{a,h}	: Delikler için taşıma enerji seviyesi
ν₀	: Fonon titreşim frekansı
γ	: Ters lokalizasyon yarıçapı
a	: Ortalama kafes uzaklığı
r_{ij}	: i ve j bölgeleri arasındaki göreceli mesafe
Σ	: Konumsal düzensizlik derecesi
ρ	: Yük taşıyıcı konsantrasyonu
μ₀	: Hareketlilik ön faktörü
σ	: Gauss düzensizliğinin genişliği
E	: İletkenlik bandının tabanı
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
Ev	: Elektron volt
E	: Elektron yükü
Q	: Temel yük
ε_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ε_i	: Ara yüzeyin dielektrik sabiti
ε₀	: Boşluğun dielektrik sabiti
E	: Elektrik alan
Φ_B	: Schottky engel yüksekliği
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_b	: Engel yüksekliği
Φ_{eff}	: Etkin engel yüksekliği
Φ_i	: Görüntü potansiyeli
Φ_{bp}	: Etkin bariyer yüksekliği
I₀	: Ters beslem akımı
J	: Akım yoğunluğu
J_{TCLC}	: Tuzak sınırlı akım yoğunluğu
L	: Organik tabakanın yoğunluğu
K	: Boltzmann sabiti
N	: İdealite faktörü
h	: Planck sabiti
N_t	: Tuzak bölgelerinin yoğunluğu
T_t	: Tuzak dağılımının karakteristik sıcaklığı
N_{t(eff)}	: Tuzak akımlarının etkin yoğunluğu
N_{t(gauss)}	: E enerjisindeki tuzakların yoğunluğu
N_c	: Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki durum yoğunluğu
N_{ss}	: Ara yüzey durum yoğunluğu

J_{TH}	: Termal emisyon akımı
J_{TN}	: Tünelleme akımı
J_{TOTAL}	: Schottky arayüzündeki akım
$F(0)$	: Temas noktasındaki elektrik alan
m^*	: Yük taşıyıcıların etkin kütlesi
m_e^*	: Elektronun etkin kütlesi
ϕ_m	: metalin iş fonksiyonu
ϕ_σ	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ	: Elektron ilgisi
$Z(E)$	: Elektron durum yoğunluğu
$f(E)$	: Elektronun dağılım fonksiyonu
$\Phi(x)$	: Potansiyel dağılım
N_D	: Donor konsantrasyonu
N_a	: Alıcı taşıyıcı konsantrasyonu
N_{ss}	: Arayüzey hal yoğunluğu
R_s	: Seri direnç
T	: Mutlak sıcaklık
C	: Elektrostatik kapasitans
W, W_d	:Tüketim tabakasının kalınlığı
V_x	: elektronun x yönündeki hızı
V_{dif}, V_d	: Difüzyon potansiyeli
R	: Cihazın pesponsivitesi
V	: Uygulanan potansiyel
γ	: Norde yönteminde bir sabit
δ	: Arayüzey tabakanın kalınlığı
I_{ph}	: Işık akımı
PS	: Işık yoğunluğu
P_s	: Fotodiyotunun ışık duyarlılığı
I_D	: Karanlık akım
D	: Dedektör verimliliği
D^*	: Kararma süresi
I_{sc}	: Kısa devre akımı
S	: Fotoalgılama duyarlılığı
η	: Verimlilik
V_{oc}	: Açık devre voltajı
P	: Fotovoltaik güç
C^{-2}	: Diyot kapasitesi
$I-V$	: Akım- Gerilim
R_J-V	: Eklem direnci- Gerilim
$C-V$	:Kapasitans – Gerilim
$G-V$	: Kondüktans – Gerilim
XRD	: X-ışını difraksiyonu
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
$PEALD$	: Plazma Destekli Atom Katman Biriktirme
PPV	: Polimer Fotovoltaik
$OLED$	: Organik ışık yayan diyot

1. GİRİŞ

Yarıiletken teknolojisinin tarihsel gelişimi, 19. yüzyılda Karl Ferdinand Braun'un 1874 yılında metal-sülfür temasında doğrultucu etkisini gözlemlemesiyle başlamış, ardından 20. yüzyılda Bell Laboratuvarları'nda John Bardeen, Walter Brattain ve William Shockley'in 1947 yılında ilk noktadan-noktaya temaslı transistörü geliştirmesiyle modern elektronik çağına geçilmiştir. 1950'li yıllarda germanyum tabanlı transistörlerin kullanımıyla başlayan uygulamalar, silisyumun termal kararlılığı ve doğal oksitlenebilirliği gibi avantajları nedeniyle 1960'lardan itibaren silisyum tabanlı sistemlere yönelmiştir. Jack Kilby ve Robert Noyce tarafından 1958 yılında entegre devrenin icadı, mikroelettronik devrimin başlangıcı olmuş ve 1971'de Intel tarafından ilk mikroişlemcinin (4004) üretilmesiyle dijital bilgi çağının temelleri atılmıştır. Bu gelişmeler, yarıiletken malzemelerin bilgisayar teknolojileri, haberleşme sistemleri, sensörler, güneş pilleri ve optoelektronik cihazlar gibi birçok alanda vazgeçilmez hâle gelmesini sağlamıştır (Sze et al., 2021); (Riordan & Hodgeson, 1997).

Bu gelişmelerle birlikte, yarıiletken teknolojisini uzun yıllar boyunca temel olarak inorganik malzemeler üzerine kurulmuştur. Silisyum (Si) ve germanyum (Ge) gibi elementer yarıiletkenler ile galyum arsenür (GaAs) ve indiyum fosfit (InP) gibi III-V grubu bileşik yarıiletkenler, yüksek taşıyıcı hareketliliği, iyi termal kararlılıkları ve mikroelettronik üretim teknolojileriyle mükemmel uyumlulukları sayesinde elektronik endüstrisinin gelişiminde kritik rol oynamıştır (Sze et al., 2021). Bu inorganik yarıiletkenler, özellikle entegre devre (IC) üretimi, güneş pilleri, sensörler ve haberleşme teknolojileri gibi alanlarda vazgeçilmez hâle gelmiştir. Örneğin, silisyumun bant aralığı 1,12 eV olup, oda sıcaklığında uygun iletkenlik düzeyi ve termal kararlılığı sayesinde hem dijital hem analog devrelerde yaygın biçimde kullanılmaktadır. GaAs ise 1,42 eV doğrudan bant aralığına sahip olduğundan yüksek frekanslı ve optoelektronik uygulamalarda tercih edilmektedir (Kasap, 2006). Bu özellikler, inorganik yarıiletkenleri uzun yıllar boyunca modern elektroniğin yapıtaşı hâline getirmiştir. Ancak günümüzde elektronik ve optoelektronik cihazlardan beklenen performans kriterleri; düşük maliyet, esneklik, hafiflik ve geniş yüzey kaplaması gibi faktörler göz önüne alındığında, yalnızca klasik inorganik sistemlerle tam olarak karşılanamamaktadır. Bu nedenle, organik

yarıiletken malzemelere ve bu malzemelerin inorganik sistemlerle hibrit entegrasyonuna yönelik ilgi son yıllarda belirgin bir şekilde artmıştır (Facchetti, 2011). Organik yarıiletkenler, çözelti işlenebilirlikleri, kimyasal olarak kolay modifiye edilebilmeleri ve geniş bant aralığı ayarlanabilirliği gibi avantajları sayesinde düşük maliyetli ve esnek elektronik uygulamalar için güçlü alternatifler sunmaktadır. Ayrıca elektronik bant yapıları ve fonksiyonel grupları hassas bir şekilde tasarlanarak istenilen elektriksel ve optik özellikler kazandırılabilir (Brabec et al., 2003). Organik yarıiletkenlerin bu özellikleri, özellikle esnek ve giyilebilir elektronik cihazlar, organik ışık yayan diyotlar (OLED) ve organik fotovoltaiik hücreler gibi uygulamalarda büyük avantajlar sağlamaktadır (Lee et al., 2022). Bu tür organik yarıiletkenler, özellikle metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapılarla birlikte kullanıldığında dikkat çekici performans iyileştirmeleri sunabilmektedir. Geleneksel metal-yarıiletken (MS) Schottky diyotlara göre MIS yapılar, araya yerleştirilen ince yalıtkan ya da organik ara tabaka sayesinde Schottky bariyer yüksekliğini (SBY) kontrol edebilmekte, sızıntı akımlarını azaltabilmekte ve arayüzey durum yoğunluğunu önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Organik katmanlar, özellikle düşük bant aralığı ve π - π etkileşimleri sayesinde arayüzey durumlarını pasifize ederek taşıyıcı enjeksiyonunu düzenleme potansiyeline sahiptir (Cicoira & Santato, 2013).

Bu tez çalışmasında, azin türevi bir organik boya olan Nigrosin (Cl 50415, Solvent Black 5), Al/Nigrosin/n-Si tipi MIS yapı üretiminde arayüz modifikasyon malzemesi olarak kullanılmıştır. Nigrosin; nitrobenzen, anilin ve hidroklorik asit karışımının bakır veya demir varlığında ısıtılmasıyla elde edilen bir boya karışımıdır (Berneth, 2002). Suda çözünür formu olan nigrosin WS ise sülfasyonla elde edilir (Yeşil, 1990). Konjuge π -elektron sistemine sahip yapısı, yüzeye bağlanabilir fonksiyonel grupları ve görünür bölgede güçlü ışık absorpsiyonu gibi özellikleri sayesinde Nigrosin, organik elektronik uygulamalar için oldukça uygundur. Nigrosin çözeltisi, n-tipi silisyum yüzeye spin kaplama (spin coating) yöntemiyle uygulanmıştır. Spin kaplama yöntemi, çözelti bazlı organik malzemelerin yüzeylere homojen biçimde uygulanmasına imkân tanıyan, düşük maliyetli ve tekrarlanabilirliği yüksek bir üretim yöntemidir. Aynı zamanda film kalınlığının hassas kontrolüne olanak vermesi, bu yöntemi akademik ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilen bir hale getirmektedir. Ara katman kaplandıktan sonra üst metal kontak olarak alüminyum tabakası termal buharlaştırma yöntemiyle oluşturulmuş ve böylece Al/Nigrosin/n-Si yapısı tamamlanmıştır. Üretilen MIS diyotların elektriksel ve fotoelektriksel karakterizasyonu, akım-gerilim (I-V) ve kapasite-gerilim (C-V)

ölçümleriyle gerçekleştirilmiştir. I–V analizleri; idealite faktörü, ters doyma akımı, Schottky bariyer yüksekliği, seri direnç ve özellikle arayüz durum yoğunluğu (Nss) gibi önemli parametrelerin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca, cihazların farklı ışık şiddetleri altındaki performansları da incelenerek fotodiyot davranışı değerlendirilmiştir. C–V ölçümleri ile ise engel yüksekliği, katkı yoğunluğu ve yerleşik potansiyel (built-in voltage) gibi MIS yapılar için kritik parametreler hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, spin kaplama yöntemiyle üretilmiş Al/Nigrosin/n-Si yapısal diyotunun elektriksel ve optoelektriksel karakterizasyonunu gerçekleştirmektir. Bu kapsamda, Nigrosin'in Schottky bariyer yüksekliğini nasıl etkilediği, arayüz durumlarını nasıl değiştirdiği ve cihazın ışığa duyarlılığını ne ölçüde artırdığı sistematik olarak incelenmiştir. Ayrıca, geleneksel Al/n-Si yapılarla karşılaştırmalı olarak organik ara katman kullanımının cihaz performansına katkısı değerlendirilmiştir. Bu bağlamda yapılan çalışma, hem organik-inorganik hibrit yapılar alanında yeni bir yaklaşım sunmakta hem de arayüz mühendisliği, Schottky bariyer modifikasyonu ve fotodiyot performansı gibi konulara katkı sağlamaktadır. Ayrıca Nigrosin gibi literatürde sınırlı incelenmiş ve ticari olarak kolay temin edilebilen bir boyanın kullanılması, bu araştırmaya özgünlük kazandırmaktadır. Spin kaplama yöntemiyle basit ve ölçeklenebilir üretimin mümkün olması ise, bu yapının gelecekteki esnek, düşük maliyetli ve sürdürülebilir elektronik sistemlerde kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yarıiletken teknolojisi 20. yüzyılın başlarında kullanımı ve araştırılması başlasa da geliştirilmesi 1950’li yıllarda başlamıştır. Alternatif materyallerin araştırılmasıyla organik yarıiletkenlerin araştırılması 1980’li yıllarda hız kazanmıştır. Elektronikte kullanılan en önemli yapılardan olan diyot çeşitlerinden birisi de Schottky diyottur. Yarıiletken ve metal arasında meydana gelen doğrultucu bir kontak olup bu doğrultucu etki ilk defa 1874 yılında Braun tarafından keşfedilmiştir (Kampen vd., 2004). Yarıiletken bileşenlerinden olan Schottky diyotlar, katıhal elektroniğinde kullanımı eskiye dayanmaktadır ve en basit yapıdır. Metal ve yarıiletkenin bir araya getirilmesiyle oluşan bu düzende taşıyıcıların geçemediği bir birleşim alanı meydana gelir. Bu birleşim alanında, yasak geçiş bölgesi oluşur. Bu yasak geçiş bölgesinde uygulanan gerilimin artırıp veya azaltılmasıyla elektron ve hol akışını belirli yönde geçişi denetlenebilir (Azoroff & Brophy, 1963); (Ülküer, 2014). Düşük ileri voltajlarda çalışabilmesi ve yüksek hızda anahtarlama özelliğiyle, Schottky yapıların elektronik teknolojisinde önemli bir konuma gelmesini sağlamıştır. Yüksek frekanslarda çalışarak iletkenlik ve yalıtkanlık durumları arasında süratle geçiş yapabilmesi gibi kayda değer avantajlarından dolayı metal ile yarıiletkenin birleştirilmesiyle oluşturulan Schottky kontakların üretimi ve kullanımı yarıiletken endüstrisinde oldukça hız kazanmıştır (Tan, 2018).

Organik kökenli malzemeler, metalik iletkenlikten yarıiletken özelliklere ve yalıtkan davranışa kadar uzanan geniş fiziksel karakteristikleri sayesinde dikkat çeken bir malzeme grubudur. Bu çeşitlilik, hem temel bilimsel araştırmalarda hem de uygulamaya dönük teknolojik çalışmalarda organik malzemelere olan ilgiyi artırmakta ve onları yenilikçi elektronik ve optoelektronik aygıtların geliştirilmesinde önemli adaylar hâline getirmektedir (Henrich & Cox, 1994). Son zamanlarda elektronik alanında yarıiletkenin iletken ve ışık yayan özelliklerini geliştirmek için organik malzemelerin kullanımına dair artan bir çalışma söz konusudur. Organik malzemelerin; işlem kabiliyeti, maliyet etkinliği, yüksek hasar eşiği, büyük doğrusal olmama ve yüksek optik kaliteye sahip büyük kristallerin istenilen şekillerde büyütülebilmesi ve üretilebilmesi kolaylığı gibi birkaç ayırt edici özelliği vardır (Güllü vd., 2010). Organik yarıiletkenler yüksek

kimyasal kararlılık, düşük maliyet, kolay uygulama ve bariyer yüksekliğinin artmasını sağlamaktadır (Tatara, 2019). Organik yarıiletkenlerin, farklı kaplama yöntemleri sayesinde tek aşamada yüksek sayıda üretim gerçekleştirilebilmesi, düşük maliyetli, katlanabilir yapısı, mekanik zorlanmalara karşı gösterdikleri yüksek dayanıklılık olması ve doğrusal olmayan davranış sergilemesi tercih edilmesinde başlıca sebeplerindendir. Bu önemli özelliklere sahip olmasıyla organik yarıiletkenler, Schottky diyotların dışında organik alan etkili transistörler (OFET), organik ışık yayan diyotlar (OLED), güneş enerjisi dönüştürücüler gibi elektronik ve optoelektronik alanların uygulamalarında oldukça kullanılmaktadır (Tan, 2018); (Yahia et al., 2011); (Çiçek vd., 2016).

Kaplanacak yüzeyin türüne, istenen kalınlığa ve film kalitesine bağlı olarak çeşitli ince filmleri kaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında spin kaplama yöntemi en fazla tercih edilen ve en ekonomik kaplama yöntemlerinden biridir (Doğan ve Ökten, 2023).

Spin kaplama yöntemi, düz yüzeyler üzerine ince film formunda kaplama gerçekleştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan basit ve ekonomik bir tekniktir. Uygulama sırasında herhangi bir vakum veya yüksek sıcaklık gereksinimi olmaksızın çalışabilmesi, yöntemin avantajları arasındadır. Küçük miktarda kaplama solüsyonu, yüzeyin merkezine damlatılarak belirli bir dönme hızı ve süre dahilinde yüzeyin merkezkaç etkisiyle homojen biçimde yayılması sağlanır. Bu işlem, genellikle "spinner" olarak adlandırılan özel cihazlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Kaplanan tabakanın kalınlığı; kullanılan çözeltinin viskozitesi, buharlaşma hızı, konsantrasyonu ve yüzey gerilimi gibi fiziksel özelliklere olduğu kadar, işlem parametreleri olan dönme hızı, süresi ve hızlanma profilinden de önemli ölçüde etkilenmektedir (Bağcı, 2021). Bu konuda yapılan çalışmalar bir kısmı aşağıdaki gibidir.

Organik boya malzemesi olarak, Nigrosin (Cl 50415, Solvent black 5), bir nitrobenzen, anilin ve hiroklorik asit karışımının bakır veya demir varlığında ısıtılmasıyla yapılan siyah sentetik boyaların bir karışımıdır (Berneth, 2002). İntulin ile ilgili olarak, fenazin bazlı bileşiklerin bir karışımıdır. Başlıca endüstriyel kullanımları, cilalar ve vernikler için renklendirici olarak ve keçeli kalem mürekkepleridir. Nigrosinin sülfasyonu, suda çözünür bir anyonik boya olan nigrosin WS (Cl 50420, Asit siyahı 2) verir (Yeşil, 1990).

Güllü, (2018); π bağları yönünden zengin organik molekülün (Nigrosin (NIG)) cam altlık üzerine damlatma yöntemiyle Al/Nigrosin/p-Si Metal/Organik aratabaka/Yarıiletken yapıları elde ettiler. Elde ettikleri Schottky diyotun optik özelliklerini UV-

Vis yöntemiyle belirlendi. Yasak enerji değerleri; 1,42 eV (Q bandı) ve 2,94 eV (B bandı) olarak hesapladı. Referans Al/p-Si ve Al/Nigrosin/p-Si Metal-organik-yarıiletken çok katmanlı (MIS) yapılarının akım-gerilim ölçümlerini kullanarak bu diyotlar için idealite faktörlerini sırasıyla 1,722 ve 2,369 olarak elde etmiştir. Diyotların oluşturduğu bariyer yükseklikleri, ileri yönde besleme bölgesindeki akımın logaritması ile gerilim değişimlerinden 0,671 ve 0,797 eV olarak hesaplandığında sonunda tüm yapıların doğrultucu özelliğe sahip olduklarını gözlemlemiştir.

Ülküer, (2014); tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Al/PDI/ITO yapısına sahip bir Schottky diyot üretilmiş ve bu yapının elektriksel özellikleri incelenmiştir. I-V karakteristik eğrileri termiyonik emisyon kuramı çerçevesinde analiz edilerek, idealite faktörü (n) ve potansiyel engel yüksekliği (Φ_b) gibi temel değişkenler hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, diyotun doğrultucu özelliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, başlangıçta klasik $\ln(I)-V$ grafiği üzerinden yapılan değerlendirmelere ek olarak, daha hassas bir analiz yöntemi olan Cheung-Cheung yaklaşımı uygulanmış ve bu yöntemle idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri yeniden belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, klasik yöntemle elde edilen verilerle karşılaştırıldığında birbirleriyle uyumlu bulunmuştur.

Turmuş, (2014); termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak Au/n-Si/Pyrene($C_{16}H_{10}$)/Au schottky diyotunu elde etmiştir. Bu diyotta Cheung fonksiyonuyla elde edilen parametreler idealite faktörü 1,33, engel yüksekliği 0,86 eV ve seri direnç 334Ω olarak hesaplamıştır. Norde fonksiyonu yöntemiyle elde edilen parametreler ise seri direnç 180Ω , engel yüksekliği 0,75 eV şeklinde hesaplamıştır. Ayrıca diyotun engel yüksekliği ters besleme C^2-V eğrisinden de hesapladığında 0,772 eV olarak bulmuştur.

Kırsoy, A. ve diğerleri (2015); bu çalışmada, yeni bir yapı olarak Au/P₃HT/n-GaAs Schottky diyotu üretilmişlerdir. Diyotun elektriksel özellikleri, akım-gerilim yöntemi kullanılarak oda sıcaklığında incelediklerinde idealite faktörü ve potansiyel engel yüksekliği değerleri sırasıyla 2.45 eV ve 0.85 eV olarak bulmuşlardır. Diyotun idealite faktörü, seri direnç ve potansiyel engel yüksekliği değerleri, diyotun ideal olmayan davranışı nedeniyle Cheung ve Norde fonksiyonları kullanılarak da belirlemişlerdir.

Metal/Organik/İnorganik schottky yapılarının sıcaklık değişimi altındaki elektriksel özelliklerini incelemek için organik ara yüzey içeren GaAs yarıiletkenli Schottky diyot hazırlamıştır. Bu diyotun akım-gerilim eğrisinden idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç gibi diyota ait bazı parametreler hesapladığında, diyotun iyi bir

doğrultucu özelliği taşıdığı ve ideal diyot davranışına yakın olduğu tespit etmiştir (Şimşir, 2012).

Elektron ışını uygulanmış PTCDA arayüzey tabakalı Au/PTCDA/n-Si diyotların elektriksel davranışlarını incelemiştir. Burada referans olarak ışınlanmamış PTCDA arayüzey tabakalı Au/PTCDA/n-Si diyotunu ele almıştır. Işınlanmamış PTCDA katkılı diyotun, akım-gerilim sonuçlarını kullanarak idealite faktörü 1,23, Schottky engel yüksekliği 0.60 eV elde etmiştir. Bu da doğrultucu özelliğe sahip olduğunu göstermiştir (Aydemir, 2019).

Organik ara yüzey tabakasının, elektriksel özellikler üzerindeki etkisini incelemek için referans olarak Au/n-Si ve Au/PVA:Zn/n-Si Schottky bariyer diyotlarını ürettirler. Deneysel sonuçları analiz ettiklerinde, PVA:Zn ara yüzey katmanının diyotun performansını arttırdığını ortaya koymuşlardır (Aydemir vd., 2013).

Gözen, (2017); tarafından gerçekleştirilen araştırmada, 1,4-m-diamin molekülünün etanol çözeltisi hazırlanarak n-tipi silisyum yüzeyi üzerine uygulanmış ve çözücünün buharlaşmasıyla Al/1,4-m-diamin/n-Si yapılı Schottky diyot elde edilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan akım-gerilim ölçümleri sonucunda diyotun idealite faktörü 1,13 ve potansiyel engel yüksekliği 0,82 eV olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Norde yöntemiyle yapılan analizlerde, seri direnç değeri $7,21 \times 10^4 \Omega$ olarak bulunmuş ve bariyer yüksekliği 0,83 eV olarak elde edilmiştir. Cheung modeli kullanılarak da temel elektriksel parametreler detaylı şekilde belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, $E_g = 3,95$ eV olarak hesaplanmış; güneş simülasyonu altında alınan I-V ölçümleri aracılığıyla yapının fotovoltaiik karakteristiği ortaya konmuş ve fotodiyot davranışı gösterdiği anlaşılmıştır.

Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au yapısında organik-metal polimer Schottky diyotları üretmişlerdir. Polimer arayüzey olarak %20 PCDTBT ve %80 PCBM karışımı kullanılmıştır. Diyotların elektriksel karakterizasyonu, 240 K ile 350 K arasındaki sıcaklıklarda akım-voltaj (I-V) ölçümleri ile yapılmış ve idealite faktörlerinin 1,80 ile 2,26 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, diyotların sıcaklıkla değişen elektriksel özelliklerini ve Schottky bariyerinin performansını anlamak için önemlidir (Gökşen vd., 2019).

Kaygusuz, (2019); Al/Coronene/n-Si organik Schottky diyotlarını üretmiş ve diyotların elektriksel özelliklerini incelemek amacıyla I-V (Akım-Gerilim) ölçümleri gerçekleştirmiştir. Bu ölçümler, bilgisayar kontrollü cihazlar kullanılarak yapılmış ve elde edilen verilere dayanarak diyot parametreleri hesaplanmıştır. Yapılan Norde

analizinden, seri direnç değerlerinin 6 adet diyottan birkaçı hariç, genellikle 6,9 Ω ile 8,2 Ω arasında değiştiği bulunmuştur. Bu sonuçlar, diyotların elektriksel davranışları ve performansları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Güllü vd., (2008), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Al/Orange G (OG)/n-Si/AuSb yapılı bir Schottky diyot üretilmiş ve OG organik yarıiletken bileşiği ara tabaka olarak kullanılmıştır. Çalışmada, OG'nin düşük maliyeti, çevresel kararlılığı ve nem duyarlılığı gibi avantajları nedeniyle tercih edildiği belirtilmiştir. I-V, C-V ve C-f ölçümleri sonucunda, diyotun engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi elektriksel parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, OG tabakasının yapıda tuzak seviyeleri oluşturarak taşıyıcı geçişini etkilediğini ve akım iletim mekanizmasının SCLC (space-charge-limited current) davranışıyla uyumlu olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca OG'nin Al ile ohmik temas oluşturduğu ve engel yüksekliğini modifiye ederek cihaz performansını doğrudan etkilediği belirlenmiştir.

Aydoğan vd., (2005) çalışmalarında, Sn/Polipirrol (PPy)/n-Si yapısının akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-gerilim (C-V) karakteristikleri 77–300 K sıcaklık aralığında ve 10 kHz–1 MHz frekanslarında incelenmiştir. C-V ölçümlerinde artan sıcaklık ve azalan frekansla kapasitansın arttığı gözlenmiş, bu durum arayüzey durumlarının etkisine bağlanmıştır. I-V ve C-V yöntemleriyle oluşturulan Schottky bariyer yükseklikleri (SBH) kıyaslandığında, C-V ile elde edilen değerlerin daha yüksek olduğu ve bu farkın arayüzey tabakası, arayüzey durumları ve bariyer homojensizliğinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Ayrıca, sıcaklığa bağlı olarak Si'nin yasak enerji aralığı ve Fermi seviyesi değişimiyle SBH değerleri arasında bir korelasyon saptanmıştır.

Akkılıç vd., (2006) tarafından yapılan çalışmada, Ag/chitin/n-Si yapısında bir Schottky diyot üretilmiş ve bu yapının elektriksel özellikleri incelenmiştir. Organik yarıiletken olarak kullanılan chitin, n-tipi Si üzerine kaplanarak Ag üst elektrot ile birlikte Schottky yapısı oluşturulmuştur. Oda sıcaklığında ve karanlık ortamda yapılan I-V ölçümleri sonucunda idealite faktörü 1.553, Schottky bariyer yüksekliği 0.959 eV olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, arayüz durum yoğunluğu değerleri $5.97 \times 10^{12} - 1.71 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ arasında bulunmuştur. Termoiyonik emisyon kuramı çerçevesinde yapılan analizler, yapının doğrultucu özellik gösterdiğini ve organik tabakanın diyot karakteristikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, organik bileşiklerin yarıiletken yüzeyler üzerindeki etkilerini ve organik-inorganik hibrit Schottky diyotların temel elektronik parametrelerinin belirlenmesini örneklemesi açısından literatüre önemli katkı sunmaktadır.

Ata vd., (2025) tarafından yapılan çalışmada, Au/(MWCNT:PVA-B(OH)₃)/n-Si yapılı fotodiyot spin kaplama yöntemiyle üretilmiş ve yapının karanlık ve aydınlatma koşullarında I-V karakteristikleri detaylı olarak incelenmiştir. Termoionik emisyon modeli, Cheung fonksiyonları ve Norde yöntemi kullanılarak kalite faktörü, ters doyma akımı, bariyer yüksekliği, seri ve şönt dirençler ile doğrultma oranı hesaplanmıştır. Cihazın arayüz durum yoğunluğunun enerjiye bağlı dağılımı, hem karanlıkta hem de 100 mW/cm² ışık şiddetinde elde edilmiştir. Fotoyanıt davranışına bakıldığında, ışık şiddeti arttıkça foton akımı (I_{ph}), fotosensitivite (S), fotoyanıt (R) ve spesifik algılama (D*) değerleri de artmıştır. Elde edilen sonuçlar, diyotun hem ışık hem de elektrik alanına karşı yüksek duyarlılık gösterdiğini ve fotoalgılayıcı olarak kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca ters akım iletim mekanizması Poole-Frenkel ve Schottky etkileri ile açıklanmış, bu etkilerin ışık koşullarına göre değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.

Duman vd., (2024) tarafından yapılan çalışmada, klasik boron-dipirrometil (BODIPY) birimi (C1), halojenli türevi (C2) ve disytril türevi (C3) sentetik olarak üretilmiştir. BODIPY ince filmleri n-Si alt tabakalarına spin kaplama yöntemiyle kaplanarak fotodiyot/ fotovoltaiik özellikler incelenmiştir. Au/BODIPY (C1, C2, C3)/n-Si/Ag diyotları üretilmiş ve termiyonik emisyon teorisi (TET) ile modifiye edilmiş Norde fonksiyonları kullanılarak doğrultma oranı, kalite faktörü, seri direnç, bariyer yüksekliği gibi parametreler hesaplanmıştır. Au/C1/n-Si/Ag, Au/C2/n-Si/Ag ve Au/C3/n-Si/Ag diyotlarının ışık altında performansları sırasıyla %38, %47 ve %56 doluluk faktörü (FF) ve %1.51, %2.03 ve %3.68 verimlilik ile değerlendirilmiştir. Özellikle Au/C3/n-Si/Ag diyonu hem karanlıkta hem de ışık koşullarında diğerlerinden daha yüksek performans göstererek fotodiyot ve fotovoltaiik uygulamalarda kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Güler, (2024), tez çalışmasında Antrasen-imin türü bir bileşik olan Metil (E)-3-((antrasen-9yl metilen)amino)benzoat bileşiği bu tez boyunca AA-AMB olarak kısaltılmıştır. AA-AMB organik arayüzey malzemesi sentezlenmiş ve karakterize etmiştir. Yarıiletken alt tabaka olarak fosfor (P) katkılı n-Si yarıiletken kristali üzerinde spin kaplama metoduyla AA-AMB organik tabakası biriktirilerek Au/AAAMB/n-Si/In (MOmS) tipi Schottky diyonu üretmiştir. MIS/MOS yapılar için geçerli olan Nicollian ve Goetzberger metoduna göre seri direnç (R_s) değerleri frekansa bağlı ölçümler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 20 kHz'de seri direncin değeri -5 V'da 441 Ω iken 1 MHz'de bu değer 47,3 Ω olarak belirlemiştir. 1 MHz için -5V gerilim düzeyinde seri direnç 47,3 Ω iken +5V gerilim düzeyinde 57,5 Ω 'dır. Ayrıca 20 kHz'de pik değeri 3820 Ω iken 1 MHz'de 68,6 Ω 'a azalma olduğunu belirterek, R_s değerleri frekans arttıkça azaldığını

gözlemlemiştir. Bu tez çalışması, yeni bir tip olarak geliştirilen Au/AA-AMB/n-Si/In Schottky tipi diyotun MIS/MOS tipi davranış sergileyerek enerji depolama kapasitesine sahip bir cihaz olarak kullanılabileceğini belirtmiştir.

Demirezen vd., (2012), spin kaplama yöntemiyle ürettikleri Au/Bi katkılı PVA/n-Si Schottky diyotların elektriksel özelliklerini oda sıcaklığında $I-V$, $C-V$ ve $G/\omega-V$ ölçümleri ile incelemişlerdir. Çalışmada, seri direnç (R_s) ve arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) diyot karakteristiklerine etkisi değerlendirilmiş; yüksek idealite faktörünün, metal/yarıiletken arayüzündeki arayüzey durumları ve polimer ara tabakasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, R_s ve N_{ss} gibi parametrelerin frekansa bağlı değişimi incelenmiş ve bu etkilerin göz ardı edilmesinin cihaz analizlerinde ciddi hatalara neden olabileceği vurgulanmıştır.

Akkılıç vd., (2010) tarafından yapılan çalışmada, Cu(II) kompleks/n-Si/AuSb yapısına sahip bir Schottky diyot üretilmiş ve bu yapının akım-gerilim ($I-V$) karakteristikleri incelenmiştir. Cu(II) kompleks ince filmi n-tipi Si yüzeyine kaplanarak oluşturulan yapı, belirgin bir doğrultucu davranış sergilemiş ve Schottky diyot olarak değerlendirilmiştir. Diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliği, farklı yöntemlerle (tradisyonel $I-V$ eğrisi, $\ln I/[1-\exp(qV/kT)]$ yöntemi, Norde yöntemi, Hernandez ve Chattopadhyay yaklaşımları) hesaplanmış ve sonuçların birbiriyle tutarlı olduğu görülmüştür. İdealite faktörünün birden büyük çıkması, yapıdaki ince arayüzey tabakasına ve yüksek seri dirençle bağlanmıştır. Ayrıca, arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) enerjiye bağlı dağılımı da hesaplanmış ve bunun da diyot davranışı üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma, organik-inorganik heteroeklem yapılarının elektronik özelliklerinin anlaşılması ve Schottky diyot performansının artırılması açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Çaldıran vd., (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Fast Green FCF ($C_{37}H_{34}N_2Na_2O_{10}S_3Na_2$) organik malzemesi kullanılarak Ni/Fast Green FCF/n-Si/Al yapısında bir Schottky diyot üretilmiş ve bu yapının elektriksel ve fotovoltaiik özellikleri araştırılmıştır. n-tipi Si taban üzerine, spin kaplama yöntemiyle (800 rpm, 60 s) Fast Green FCF ince filmi kaplanmış ve ön yüzeyine DC magnetron saçırma ile Ni kontağı uygulanmıştır. Elektriksel özelliklerin belirlenmesi amacıyla oda sıcaklığında akım-gerilim ($I-V$) ve kapasitans-gerilim ($C-V$) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Termoyonik emisyon kuramı, Cheung ve Norde yöntemleri kullanılarak diyotun idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi temel veriler hesaplanmıştır. $C-V$ ölçümlerinden ise difüzyon potansiyeli, engel yüksekliği, Fermi seviyesi ve verici yoğunluğu gibi

parametreler elde edilmiştir. I-V eğrileri, düşük voltajlarda ohmik davranış, orta voltajlarda boşluk yükü sınırlı akım (SCLC) ve yüksek voltajlarda tuzak dolu SCLC davranışı göstererek diyotun üç farklı bölgesini ortaya koymuştur. Ayrıca cihazın aydınlatma altındaki I-V ölçümleriyle güneş pili özellikleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Fast Green FCF ara tabakasının Ni/n-Si Schottky temaslarının engel yüksekliğini artırabileceğini ve bu malzemenin gelecekte güneş pili uygulamaları için potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Yıldırım vd., (2023); propolis biyomalzemesini n-Si yüzeyine spin kaplama yöntemiyle uygulayarak propolis/n-Si heteroeklem yapısında UV-görünür bölgede çalışan, kendi kendine enerjilenebilen bir fotovoltaiik dedektör üretmişlerdir. Üretilen yapı, ± 2 V'de 23.815'lik yüksek doğrultma oranı ile diyot karakteristiği göstermiştir. 365 nm UV ışığında 0,113 A/W ve 150 mW/cm² yoğunluktaki görünür ışık altında 0,018 A/W maksimum yanıt verirken, dedektivite değerleri sırasıyla $4,04 \times 10^9$ ve $4,17 \times 10^8$ Jones olarak elde edilmiştir. SEM, EDX, XRD ve ICP-MS analizleri ile yüzey morfolojisi ve yapısal özellikler detaylı olarak incelenmiştir. Cihazın gösterdiği başarılı fotodetektör özelliklerinin, propolis ile n-Si arasındaki yerleşik elektrik alan kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçlar, propolisin düşük maliyetli ve kararlı yapısıyla gelecekteki optoelektronik uygulamalar için uygun bir biyomalzeme olduğunu ortaya koymaktadır.

Yukarıda sunulan çalışmalar, organik-inorganik hibrit yapıları Schottky diyotların üretiminde kullanılan malzemelerin ve üretim tekniklerinin, cihazların elektriksel ve optoelektronik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle organik ara yüzey tabakalarının kullanımı, engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi temel parametreleri optimize ederek cihaz performansını önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Bu bağlamda, Al/Nigrosin/n-Si yapıları fotodiyotun araştırılması, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, hem yapı hem de karakterizasyon yöntemleri açısından önemli bilimsel katkılar sunması beklenmektedir.

3. KURAMSAL TEMELLER

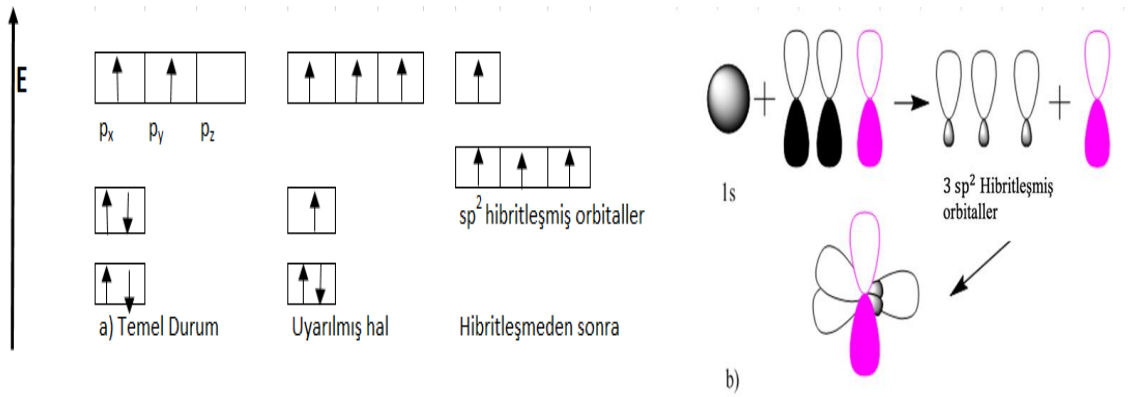
3.1. Organik Yarıiletkenler

Karbon bazlı bağlı bileşikler organik yarıiletkenleri oluşturur, bunlar basit yapılı moleküller ve polimer yapılar olmak üzere iki gruba ayrılır. Organik yarıiletkenler, inorganik yarıiletkenlerden önemli ölçüde farklıdır. İnorganik maddelerdeki kovalent bağa göre zayıf etkileşimi olan Van der Waals kuvvetleri tarafından bağlanırlar. Bu durum, bitişik moleküller veya polimer zincirleri arasında elektron dalga fonksiyonlarının lokalizasyonunun bozulmasına yol açar, öyle ki organik yarıiletkenlerin elektronik yapısı tek bir molekülün veya bir polimer zincirinin elektronik yapısını korur. Buna karşılık inorganik yarıiletkenlerin atomları arasındaki kovalent bağ, tüm kafes üzerinde elektron dalga fonksiyonlarının yerleşmesine yol açar. Böylece, organik yarıiletkenlerle karşılaştırıldığında, organik yarıiletkenlerde elektronlar kolayca hareket edebilir ve daha iyi iletkenlik ile sonuçlanabilir.

3.1.1. Sp^2 hibritleşmesi ve birleşmesi

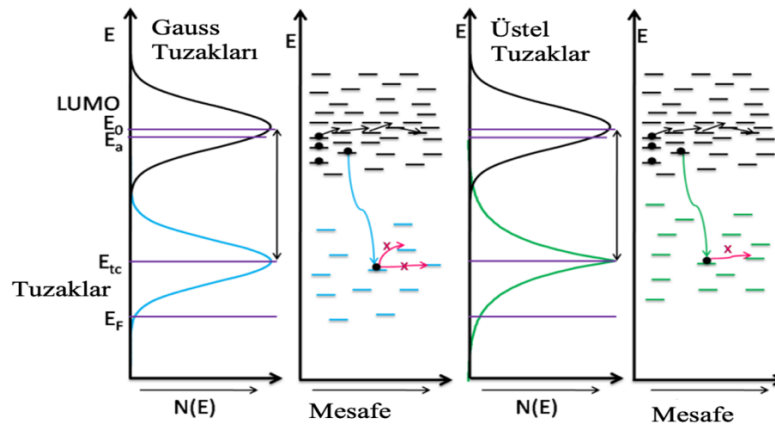
Hem moleküler hem de polimerik organik yarıiletkenler esas olarak karbon ve hidrojenden oluşur. Ayrıca, düşük ağırlıklı olan bazı atomlar olan azot, oksijen ve sülfür genellikle içinde bulunur. Yarıiletken özellikleri karbondan kaynaklanmaktadır.

Atomlar, alternatif tek ve çift bağlarla birbirine bağlanır, bu süreç konjugasyon olarak bilinir. Karbon atomunun altı elektronu vardır ve temel hal elektron dizilimi, $1s^2$, $2s^2$, $2p_x^1$, $2p_y^1$, $2p_z^0$. $2s$ ve $2p$ orbitalleri enerjisel olarak birbirine çok yakın olduğu için, $2s$ orbitalinden bir elektron, boş $2p_z$ orbitaline kolayca geçebilir. Karbon atomunun uyarılmış bir elektron dizilimi şu şekilde olur, C^* : $1s^2$, $2s^2$, $2p_x^1$, $2p_y^1$, $2p_z^1$ şekil 3.1'de gösterildiği gibi;



Şekil 3.1 a) sp^2 hibritleşme yöntemi b) Temel durum ve uyarılmış durum elektron dizilimi ve karbon atomunda sp^2 hibrit orbitallerin oluşumu.

sp^2 hibritleşme süreci, uyarılmış karbon atomunun 2s, p_x ve p_y orbitallerinin birbirleriyle karışması sonucu gerçekleşir ve bu işlem üç eşit enerjili sp^2 hibrit orbitali üretir. Bu üç sp^2 hibrit orbitali, karbon atomu etrafında üçgen şeklinde bir düzende organize olur ve birbirlerine 120° açı yapacak şekilde yerleşirler. Kalan hibritleşmemiş p_z orbitali, hibrit orbitallerin üçgen düzlemine dik bir konumda bulunur, bu da Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. Bir örnek olarak, basit etilen (C_2H_4) molekülünün yapısını gösterebiliriz.

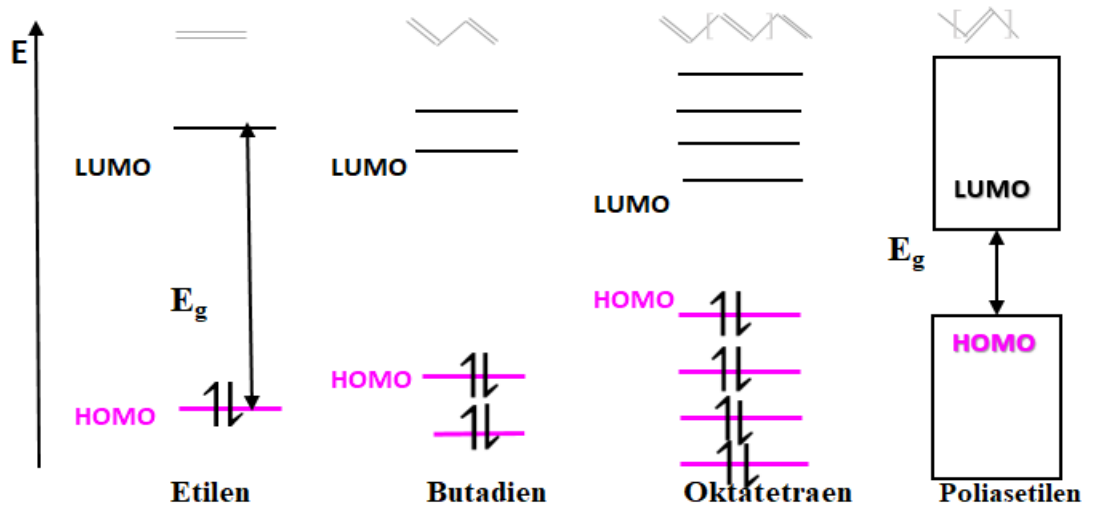


Şekil 3.2 Eten Molekülünde Enerji Seviyelerinin Oluşumu. (a) σ ve π Bağlarının Oluşumu. (b) π Elektron Bulutunun Delokalizasyonu. (c) Bağlayıcı ve Antibaglayıcı Moleküler Orbitallere Karşılık Gelen Enerji Seviyeleri (Brütting, 2005)

Her karbon atomundan üç sp^2 hibrit orbitali etkileşime girerek beş σ bağı oluşturur. Karbon atomları arasındaki bir C-C bağı (iki sp^2 hibrit orbitalinin etkileşimiyle;

biri her karbon atomu), karbon ve hidrojen atomları arasındaki dört C-H bağı (bir karbon atomunun sp^2 hibrit orbitalinin hidrojenin s orbitali ile etkileşimi kurar). Her iki karbon atomunun hibritlenmemiş p_z orbitalleri, yanlara doğru örtüşerek π -bağı adı verilen başka bir C-C bağı oluşur. Moleküller düzlemde sp^2 hibrit orbitallerinin güçlü bir etkileşimi ve üst üste binmesi nedeniyle σ bağları çok güçlüdür ve molekülün omurgasını oluşturur. Diğer yandan, aralarındaki çok daha düşük bir örtüşme nedeniyle p_z orbitalleri oldukça zayıf π bağları oluşturur.

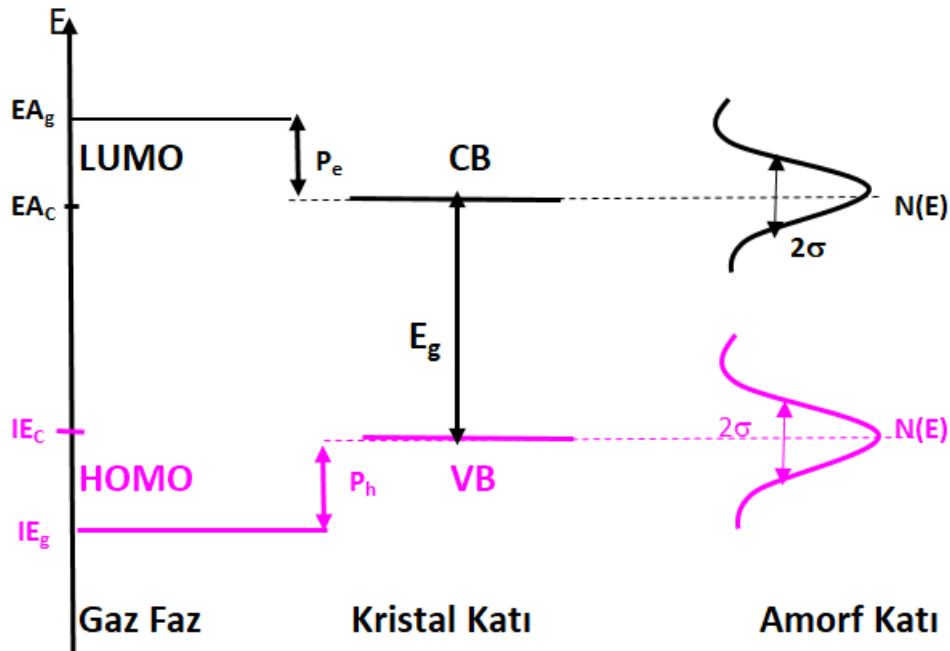
Molekül orbital kuramına göre, hem σ -bağları hem de π -bağları moleküler orbitalleri bağ oluşturabilir veya bağ karşıtı molekül orbitali olabilir. Bağlanma orbitalleri molekülü stabilize edecek ve katılan tek orbitallerden daha düşük enerjiye sahip olurken, bağ karşıtı orbitaller molekülü dengesizleştirecek ve katılan tek orbitallerden daha yüksek bir enerjiye sahip olacaktır. Şekil 3.2, eten içindeki moleküler orbitallerin enerji seviyelerini göstermektedir, Pauli'nin dışlama ilkesini kullanarak elektronların artan enerjiyle orbitallere yerleştirildiği yer. Temel durumda, eten içindeki tüm bağlanma orbitalleri doldurulur ve tüm bağ karşıtı orbitaller boştur. π -orbitalleri σ -orbitallerinden daha yüksek enerjiye sahip olduklarından, bunlar en yüksek dolu moleküler orbitaldir (HOMO). Mümkün olan en düşük elektronik uyarım, zayıf bağlanma nedeniyle π -orbitaller, bağ oluşturan π -orbitalinden bağ karşıtı π^* -orbitaline kadardır. Böylece π^* -orbitali, en düşük dolu olmayan moleküler orbitali (LUMO) temsil eder. İnorganik yarıiletkenlerde HOMO kabaca değerlik bandıyla ve LUMO iletim bandıyla karşılaştırılabilir. İnorganik yarıiletkenlerde HOMO ve LUMO arasındaki enerji farkı bant aralığına (E_g ile gösterilir) karşılık gelir.



Şekil 3.3 Organik yarıiletkenlerde bant aralığının kontrolü. Derecesi olarak konjugasyon etilenden poliasetilene doğru arttıkça, HOMO enerji değeri artar (sığlaşır) ve LUMO enerji değeri azalır (derinleşir). Yani sonunda konjugasyon arttıkça bant aralığı azalır

Organik yarıiletkenlerin (küçük moleküller veya polimerler) bant aralığı şekil 3.3'deki gibi olabilir. Konjugasyon derecesi değiştirilerek kolayca ayarlanabilir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, hareket ettikçe etilenden poliasetilene mevcut π ve π^* miktarı orbitalleri artar ve ayrıca konjugasyon derecesi de artar. Buna bağlı olarak, bu durum HOMO değeri enerji cinsinden değerinin artışına (sığlaşır), LUMO değeri enerji cinsinden azalmasına (derinleşir) yol açar. Sonuç olarak, bant aralığı etilenden poliasetilene doğru azalır. Bu şekilde, bant aralığı 1,5 ila 3 eV arasında kolayca kontrol edilebilir ve bu yarıiletkenlerden tüm görünür bölgede ışık emisyonuna izin verir.

Katı filmlerde, her molekül veya polimer zinciri biraz farklı bir yönelime veya ortama sahiptir. Bu durum polarizasyon enerjilerinde bölgesel değişimlere yol açar (Brütting, 2005); (Köhler & Bäessler, 2015); (Braun et al., 2009).



Şekil 3.4 Gaz fazındaki moleküllerin durum yoğunluğu, moleküler kristal katılar ve amorf durum. IE_g iyonlaşma enerjisi ve EA_g gaz fazında elektron enerjisidir, IE_c ve EA_c kristal haldeki miktarları temsil eder. Çünkü polarizasyon enerjilerine P_h (pozitif polaron veya delik) ve P_e (negatif polaron veya elektron) yüklü durumlar kristalde stabilize edilir. E_g enerji bant aralığıdır.

Sonuç olarak, organik yarıiletkenlerdeki yerleştirilmiş durumların enerji dağılımı Gauss dağılımı ile tanımlanır. Şekil 3.4'te kristal ve amorf moleküler yarıiletkenlerdeki durum yoğunluğunu göstermektedir.

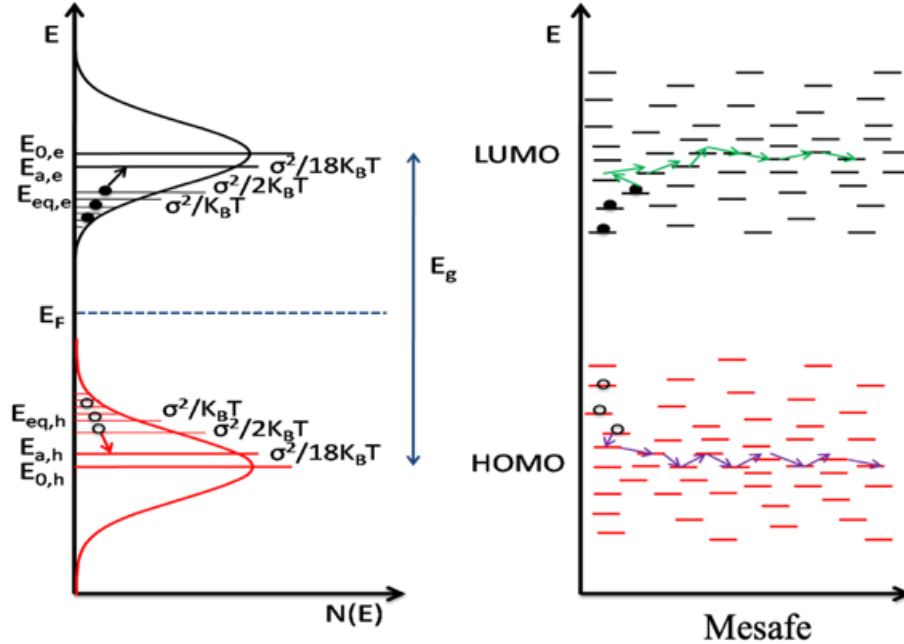
3.1.2. Yük aktarım modelleri

3.1.2.1. Gauss Dağılım Modeli (GDM)

Organik yarıiletkenlerdeki yük taşıma mekanizmalarının bilinmesi aşağıdakilere yardımcı olabilir, düzensizlik ve yük taşınımı gibi mikroskobik parametreleri, yük taşıyıcı hareketliliği gibi fiziksel olarak belirlenebilir niceliklerle ilişkilendirir (Kuik et al., 2014); (Coropceanu et al., 2007). Bir yük taşıma modeli Bässler ve arkadaşları tarafından Gauss Dağılım Modeli (GDM) olarak bilinen bir model önerilmiştir (Bässler, 1993). Atlama bölgelerinin lokalize olduğunu ve komşu bölgelerin enerjilerinin aşağıdaki gibi ilişkisiz olduğunu birbirinden bağımsız olduğunu varsayar. Yük taşıma bölgeleri rastgele enerji olarak dağıtılır ve enerjik dağılım;

$$g(\epsilon) = \frac{N}{(\sigma\sqrt{2\pi})} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

Gauss dağılımı ile verilir.



Şekil 3.5 Gauss düzensizlik modeli. Sol: Gauss dağılımını gösterir LUMO ve HOMO enerji seviyeleri. Delikler sırasıyla ve elektron için DOS merkezi $E_{0,e}$ ve $E_{0,h}$. $E_{eq,e}$ ve $E_{eq,h}$ elektron ve delikler için denge enerji seviyeleridir. Sırasıyla $E_{a,e}$ ve $E_{a,h}$ elektron ve delikler için taşıma enerji seviyeleridir. Bu seviyelerin DOS merkezine göre enerji değerleri de şöyledir. Sağ tarafta: LUMO ve HOMO' da ki yük taşıma bölgelerinin dağılımı ve yük taşıyıcılarının bir bölgeden diğerine atlama hareketi

Yükler bir bölgeden diğerine atladığında (hareket ettiğinde), aradaki enerji farkı iki bölge bir fononun soğurulması veya yayılması ile telafi edilir. Bu fononda destekli atlama (veya tünelleme) işlemi, aşağıdaki konumlarda bulunan bir yük taşıyıcısı için olasılık i sahasının boş j sahasına taşınması Miller ve Abrahams atlama oranları v_{ij} tarafından verilir.

$\epsilon_j \geq \epsilon_i$ için

$$v_{ij} = v_0 \exp \left[-2\gamma a \frac{r_{ij}}{a} \right] \times \exp \left[-\left(\frac{\epsilon_j - \epsilon_i}{k_B T} \right) \right] \quad (3.2)$$

$\epsilon_j < \epsilon_i$ için

$$v_{ij} = v_0 \exp \left[-2\gamma a \frac{r_{ij}}{a} \right] \times 1 \quad (3.3)$$

Burada, v_0 ön faktörü fonon titreşim frekansıdır, aşağıdaki girişimleri temsil eder. Kaçış (ya da atlama) oranı, γ ise ters lokalizasyon yarıçapıdır ve elektronik bitişik bölgeler arasındaki bağlantı, a ortalama kafes uzaklığıdır (varsayılan kübik hücre), r_{ij} i ve j bölgeleri arasındaki göreceli mesafeyi ve bölgelerinin enerjisini temsil eder (Miller & Abrahams, 1960).

Yük taşıyıcılarının μ hareketliliği, Gauss dağılımlı taşıma bölgeleri arasında bir bölgeden diğerine ne kadar hızlı atladıklarına bağlıdır. Bu da yük taşıyıcılarının atlama bölgeleri arasındaki enerji farkı ve uzamsal mesafe dönüşümüne bağlıdır.

Şekil 3.5 Gauss dağılım modelinin şematik bir gösterimini göstermektedir. Elektron ve delikler için seviyeleri sırasıyla e ve h son ekiyle gösterilir. Bässler ve arkadaşları Monte Carlo (MC) simülasyon metodunu kullanarak GDM'yi geliştirdi ve termal denge altında bulundu, materyalde bulunan yükler denge enerji seviyesine $E_{eq,e}$ kadar gevşer, $E_{0,e}$ DOS merkezinin $\sigma^2/k_B T$ altında yer almaktadır. $E_{eq,e}$ 'de, çok az sayıda taşıma bölgesi mevcut, böylece yüklerin, sözde taşıma enerji seviyesine ($E_{a,e}$) uyarılması gerekir.

Harici bir elektrik alanı uygulandığında, bölge enerjileri elektrostatik enerji terimi tarafından değiştirilir. Sonuç olarak, bölgeler arasındaki enerji bant aralığı, uygulanan elektrik alanı altında azalır. Dolayısıyla, elektronlar söz konusu olduğunda, yukarı doğru sıçrama olasılığı daha yüksek enerjili bölgeler için artarken, daha düşük enerjili bölgelere doğru aşağı yönlü sıçramalar değişmeden kalır (Baranovskii, 2014); (Arkhipov et al., 2005); (Tessler et al., 2009). μ faktörü uygulanan elektrik alanından etkilenir. Kısacası, ulaşım sahalarının Enerji düzensizlik nedeniyle, sıcaklık (T) ve

uygulanan elektrik alana (E) bağlıdır. MC simülasyonlarından elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

GDM'yi oluşturan deneysel ilişkiler, fiziksel olarak ölçülebilen hareketlilik miktarı μ ile mikroskobik düzensizlik parametresi σ 'yı doğrudan birbirine bağlar.

$\Sigma \geq 1.5$ için;

$$\mu_{\text{GDM}} = \mu_{\infty} \exp \left[- \left(\frac{2\sigma}{3k_B T} \right)^2 \right] \times \exp \left[C \left(\left(\frac{\sigma}{k_B T} \right)^2 - \Sigma^2 \right) \sqrt{E} \right] \quad (3.4)$$

$\Sigma < 1.5$ için;

$$\mu_{\text{GDM}} = \mu_{\infty} \exp \left[- \left(\frac{2\sigma}{3k_B T} \right)^2 \right] \times \exp \left[C \left(\left(\frac{\sigma}{k_B T} \right)^2 - 2.25 \right) \sqrt{E} \right] \quad (3.5)$$

Burada, $\mu_{\infty} T \rightarrow \infty$ limitinde bir hareketlilik ön faktörüdür; $C = 3 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1/2} \text{ V}^{-1/2}$ ise bir yer aralığına bağlı sabittir ve Σ , sıçrama noktalarının konumsal düzensizlik derecesini temsil eder.

μ 'nün hesaplanması için GDM modeli sıcaklığı (T) ve μ 'nün elektrik alan (E) bağımlılığını dikkate alır. Ancak, μ 'nün aynı zamanda aşağıdakilere de yük taşıyıcı yoğunluğuna (elektronlar için n veya delikler için p) bağlı olduğu anlaşılmıştır. Tanase ve diğerleri OC1C10-PPV'nin transistör yapılandırmasında ölçülen hareketliliğinin büyüklük sıraları yaklaşık 3 diyot yapısından ölçülenden daha yüksek olduğu gözlemlendi (Tanase et al., 2003). Böyle büyük bir farklılık yük taşıyıcı konsantrasyonu üzerinde μ mobilitesinin güçlü bağımlılığının hareketlilikteki artışı ile açıklandı elektronlar için n (veya delikler için p). Bir alan etkili transistörde, yük konsantrasyonu bir diyotta bulunandan önemli ölçüde daha fazladır. Bu, bir alan etkili transistör kanalındaki geçit kaynaklı yük taşıyıcılarının sonucudur. Daha yüksek yük taşıyıcı yoğunluğu ve bunun yoğunluğa bağımlılığı, transistörde daha büyük bir hareketlilikle sonuçlanır.

3.1.2.2. Genişletilmiş Gauss Düzensizlik Modeli (EGDM)

Hareketliliğin yük taşıyıcı yoğunluğuna (p) bağımlılığını dikkate alarak Pasveer ve arkadaşları, orijinal Gauss düzensizlik modelinden farklı olarak yeni bir yük taşıma modeli geliştirmişlerdir. Bu model genellikle genişletilmiş Gauss düzensizlik modeli (EGDM) olarak adlandırılır. EGDM'de oda sıcaklığında p bağımlılığının baskın olduğu

bulunmuştur. Bu model hareketliliği, düşük sıcaklık ve yüksek uygulanan elektrik alanlarında ise E bağımlılığı önemli bir rol oynamaktadır (Pasveer et al., 2005). EGDM'nin sonuçları hareketlilik μ için parametrelendirilmiş denklemler aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

$$\mu(T, p, E) = \mu_p(T, p) \times f(T, E) \quad (3.6)$$

Yukarıdaki ifadede taşıyıcı konsantrasyonunu (p) ve sıcaklık (T) bağımlılığı tanımlar.

$$\mu_p(T, p) = \mu_0 C_1 \exp \left[-C^2 \left(\frac{\sigma}{k_B T} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\sigma}{k_B T} \right)^2 - \left(\frac{\sigma}{k_B T} \right) \right) (2pa^3)^\delta \right] \quad (3.7)$$

Burada δ şu şekilde verilir;

$$\delta = 2 \frac{\ln \left(\left(\frac{\sigma}{k_B T} \right)^2 - \left(\frac{\sigma}{k_B T} \right) \right) - \ln(\ln 4)}{\left(\frac{\sigma}{k_B T} \right)^2} \quad (3.8)$$

Denklem 3.6'daki ikinci terim elektrik alan (E) bağımlılığını tanımlar, bu da;

$$f(T, E) = \exp \left[0.44 \left(\left(\frac{\sigma}{k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} - 2.2 \right) \times \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{E_{ea}}{\sigma} \right)^2} - 1 \right] \quad (3.9)$$

Sıfır taşıyıcı konsantrasyonu ve sıfır alan sınırında ($p \rightarrow 0$ ve $E \rightarrow 0$) Denklem 3.6, hareketliliğin basitleştirilmiş bir sıcaklık bağımlılığını verir.

$$\mu_0 = \frac{a^2 v_0 e}{\sigma} \quad ise$$

$$\mu_0(T) = \mu_0 C_1 \exp \left(-C_2 \left(\frac{\sigma}{k_B T} \right)^2 \right) \quad (3.10)$$

Yukarıdaki denklemlerde μ_0 bir hareketlilik ön faktörü, v_0 MA modelinden frekans atlama girişimi, e elektronik yük, σ Gauss düzensizliğinin genişliğidir. $C_1 = 1,8 \times 10^{-9}$ ve $C_2=0,42$ sabitlerdir. K_B Boltzmann sabiti, T sıcaklık ve a örgü sabitidir.

EGDM, çözelti ile işlenmiş polimer bazlı organik yarıiletkenlerin yük taşıma özelliklerini araştırmak için yaygın olarak kullanılmış ve deneysel sonuçlarla mükemmel uyum elde edilmiştir (Katsouras et al., 2013); (Van Mensfoort et al., 2008); (Tanase et al., 2003); (Blakesley et al., 2010); (Wetzelaer et al., 2012). Bununla birlikte, çok fazla şey bilinmemektedir. EGDM'nin organik küçük moleküllere uygulanabilirliği hakkında, bu çalışmada termal olarak buharlaştırılmış ve çözelti ile işlenmiş küçük organik ürünler için EGDM'yi araştırmışlardır.

3.1.3. Tuzaklanmış Akımların Fiziği

EGDM modeli, taşıyıcı tuzağının olmadığı malzemelerdeki yük taşınımını tanımlamak için uygundur. Ancak, çoğu organik yarıiletkenler, elektronlar ya da delikler gibi taşıyıcılardan biri için tuzaklanma davranışı gösterir. Bu bölümde ele alınacak olan tuzak sınırlı yük taşımacılığını anlamak için aşağıdakiler hakkında ek bilgi gerektirir.

Mark ve Helfrich tarafından organik yarıiletkenlerde tuzak sınırlı akımların erken bir açıklaması türetilmiştir (Mark & Helfrich, 1962). İletim bandı kenarının altında, katlanarak artan tuzaklama alanlarını dikkate aldılar, şu şekilde verilir.

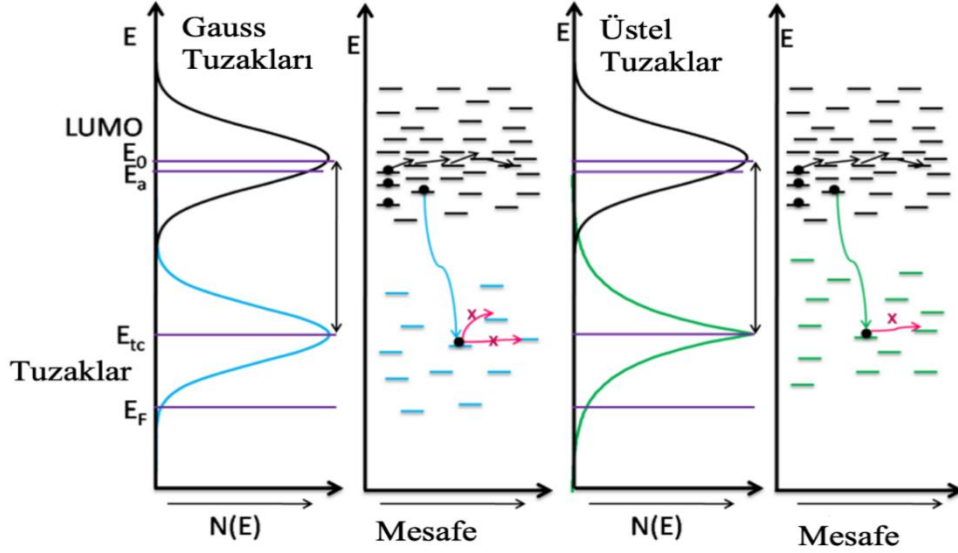
$$N_t(E) = \left(\frac{N_t}{k_B T_t} \right) \exp \left[\frac{E - E_c}{k_B T_t} \right] \quad (3.11)$$

Burada, $N_t(E)$, E enerjisindeki tuzakların (tuzak bölgelerinin) yoğunluğu, N_t tuzakların toplam sayısıdır ve E_c iletim bandı kenarının enerjisidir. T_t tuzak dağılımının karakteristik enerjisini tanımlayan karakteristik bir sıcaklıktır ($E_t = k_B T_t$).

Tuzaklanan yük taşıyıcıları akıma katkıda bulunmaz. Sonuç olarak böyle bir cihazdaki sürüklenme akımı, tüm tuzaklar dolana kadar tuzaksız bir yalıtkandaki akımdan çok daha düşük kalacaktır. Bu rejimdeki akım tuzak yükü olarak adlandırılır sınırlı akım veya tuzak sınırlı akım (TCLC veya TLC). Mark ve Helfrich, tarafından verilen tuzak sınırlı akım-voltaj karakteristikleri için ifade;

$$J_{TCLC} = N_c e \mu \left(\frac{\varepsilon}{e N_t} \right)^r \left[\left(\frac{2r+1}{r+1} \right)^{r+1} \left(\frac{r}{(r+1)} \right)^r \right] \frac{V^{r+1}}{L^{2r+1}} \quad (3.12)$$

Şeklinde. Burada N_C , iletim bandında $10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ arasında değerlere sahip durumların toplam yoğunluğudur. e temel yük ve μ yük taşıyıcı hareketliliğidir. $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_R$ yarıiletkenlerin dielektrik sabitidir ve L organik tabakanın kalınlığı. $r = T_t / T$ tuzak dağılımına bağlı bir sabit ve $\log(J)$ vs. $\log(V)$ ve tuzak kalınlık bağımlılığı ile sınırlandırılmış akımların denklem 3.13'den doğrudan belirlenebilir.



Şekil 3.6 Organik yarıiletkenlerde elektron tuzakları. Sol: Gauss dağılımlı LUMO ve Gauss dağılımlı tuzakları göstermektedir. E_0 ve E_{tc} sırasıyla LUMO ve tuzakların merkezidir. E_a bir taşıma enerji seviyesidir ve E_F Fermi enerjisi seviyesini gösterir. Sağ: LUMO ve üstel olarak dağıtılmış tuzakları gösterir

Oda sıcaklığında PPV bazlı organik polimerlerde tuzak sınırlı akımlar denklem 3.12 ile tanımlanabilir. Bununla birlikte, deneysel olarak gözlemlenen daha güçlü sıcaklık bağımlılığı öngörmektedir (Mandoc et al., 2007). Bunun nedeni organik yarıiletkenlerin genellikle LUMO'daki (veya HOMO'daki) durumların keskin dağılımının aksine Gauss dağılımına sahiptir. Karşı olarak inorganik yarıiletkenlerin kesin iletim bandı kenarı, Şekil 3.6'da gösterildiği gibidir. Yük taşınımı bu Gauss dağılımlı durumlarda atlama yoluyla gerçekleşir. Bu atlama bölgelerinin enerjik dağılımı, Gauss DOS'un merkezinin (E_0) altındaki bir E_a enerjisinde bulunan etkili bir iletim bandı kenarı ile sonuçlanır. Sonuç olarak tuzak derinliği artık LUMO durum dağılımının merkezine göre ölçülmemektedir. Ancak bir E_a terimi ile azaltılır. Bu nedenle, denklem 3.12'nin şu şekilde değiştirilmesi gerekir;

$$J_{TCLC} = N_C e \mu_e \left(\frac{\varepsilon}{e N_t \exp \left[\frac{E_{tc} - E_a}{k_B T_t} \right]} \right)^r \left[\left(\frac{2r+1}{r+1} \right)^{r+1} \left(\frac{r}{r+1} \right)^r \right] \frac{V^{r+1}}{L^{2r+1}} \quad (3.13)$$

Burada E_{tc} , LUMO Gauss dağılımının merkezi E_0 'a göre (altta) tuzak derinliğidir. $E_a = \sigma^2/2k_B T$ etkin iletim bandı kenarının enerjisi olarak kullanılır ve enerjik düzensizliğe ve sıcaklığa bağlıdır. E_a , LUMO E_0 merkezinin altında yer alır, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi bir iletim bandı kenarı olarak kabul edilebilir.

Tuzak durumlarının etkin yoğunluğu $N_{t(eff)}$ şekilde tanımlanabilir.

$$N_{t(eff)} = N_t \exp \left[\frac{(E_{tc} - E_a)}{k_B T_t} \right] \quad (3.14)$$

Bu da E_{tc} tuzak derinliğine bağlıdır. E_a sıcaklığa bağlı olduğundan, aynı zamanda etkin tuzak yoğunluğu sıcaklığa bağlı hale gelir. Denklem 3.14'te, toplam yakalama alanlarının yoğunluğu N_t sabit bir değere sahiptir, ancak bunu belirlemek için E_{tc} tuzak derinliğini öğrenmesi gerekir ve bunun tersi de geçerlidir. PPV tabanlı organik yarıiletkenler (deneysel olarak gözlemlenen) için, bu ek sıcaklık bağımlılığı teriminin dahil edilmesiyle, değiştirilmiş Mark-Helfrich denklem 3.13'te artık başarılı bir şekilde daha zayıf sıcaklık bağımlılığını açıklar.

Tuzak sınırlı akımlara sahip malzemeler için, belirlenmesi gereken önemli büyüklüklerden biri etki ya da tuzakların şiddeti, tuzaklanan n_t sayısı ile serbest yük taşıyıcıları n sayısının oranıdır.

$$r = \frac{T_t}{T} \quad \text{için}; \quad \frac{n}{N_0} = \left(\frac{n_t}{N_{t(eff)}} \right)^r \quad (3.15)$$

Burada N_0 , atlama veya yük taşıma bölgelerinin toplam yoğunluğu ve N_t , tuzaklama alanlarının toplam yoğunluğudur. $r = T_t/T$ değeri, tuzak dağılımına bağlı olan bir sabittir. Denklem 3.13'e göre $J \propto (V^{r+1}/L^{2r+1})$ Akım yoğunluğu, voltaj ve katman kalınlığı ile güç yasasına bağlıdır. Dolayısıyla, $\log(J)$ ile $\log(V)$ 'yi farklı değerler için çizerek kalınlıklarında r değerini doğrudan belirleyebiliriz. $r=1$ için $J \propto V^2$, bu 2'lik bir eğim (Mott-Gurney yasası ile aynı) verecektir, bu da tuzaksız taşımaya karşılık gelir. $r>1$ için, $J \propto V^m$, $m>2$ olduğunda bu, 2'den daha yüksek bir eğim verecektir ve sınırlı taşıma

tuzağına denk gelecektir. r bilindiğinde, denklem (3.15) kullanılarak tuzaklanmış ve serbest yük taşıyıcıları kolayca belirlenebilir.

Genel olarak yakalama alanlarının yoğunluğu, yük taşıma alanlarının yoğunluğundan birkaç büyüklük derecesi daha düşüktür. Verimli taşıma için, yük taşıma bölgeleri enerji ve mesafe açısından yakın konumlandırılmalıdır. LUMO'da zıplayan veya hareket eden bir elektron için, tuzak bölgelerine gitmek enerjik olarak elverişlidir çünkü daha düşük bir enerjidedirler. Bir yük bir tuzak bölgesine ulaştığında, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi, enerjik ve uzamsal olarak birbirinden uzak oldukları için komşu tuzak bölgelerine hareket edemez. Dolayısıyla, tuzağa düşürülen yükler mevcut yüke katkıda bulunmaz. Sonuç olarak, tuzaklı malzemelerdeki akımlar genellikle tuzaksız malzemelerden birkaç kat daha düşüktür (Blom et al., 1996).

Önceki denklemlerde tuzakların üstel enerji dağılımına sahip olduğu varsayılmıştı. Bu durum organik yarıiletkenler için geçerli değildir. Tuzak bölgeleri de tıpkı HOMO ve LUMO gibi GAUSS enerji dağılımına sahip olabilir (Nicolai et al., 2011); (Kuik et al., 2011). Böyle bir durumda yakalama alanlarının dağılımı şu şekilde verilir;

$$N_{t(gauss)}(E) = \left(\frac{N_t}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \right) \exp \left[-\frac{[E - (E_a - E_{tc})]^2}{2\sigma_t^2} \right] \quad (3.16)$$

$N_{t(gauss)}(E)$ E enerjisindeki tuzakların (yakalama bölgeleri) yoğunluğu, N_t toplam tuzak yoğunluk, σ_t tuzak dağılımının genişliği, Gauss dağılımlı LUMO'nun E_0 merkezine göre (altında) tuzak derinliği, $E_a - E_{tc}$ etkin tuzak derinliği, bu da düzensiz yarıiletkenlerde sıcaklığa bağlı hale gelir.

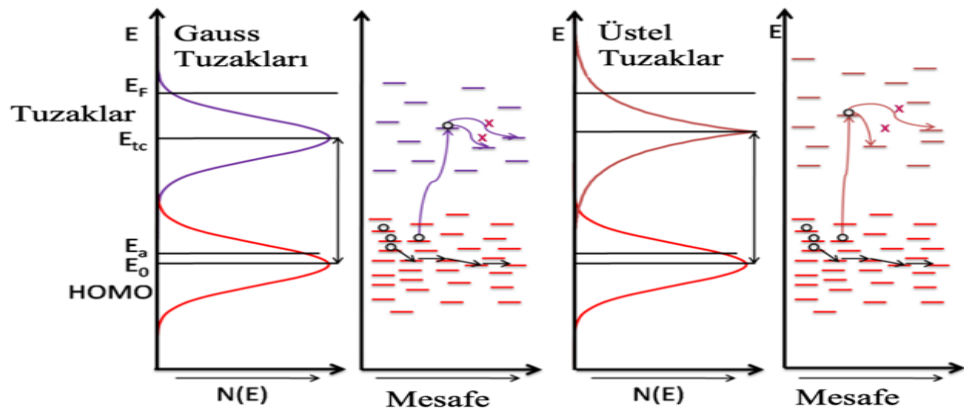
Mark-Helfrich denklemi, Gauss dağılımlı tuzaklar için tuzak sınırlı akım analitik olarak kolayca tanımlanamazken analitik denklemler ile değiştirilerek bir yaklaşım elde edilebilir. Denklem 3.13' de ki tuzak üssü r , aşağıdaki gibi r' ile değiştirilir;

$$r' = \sqrt{1 + 2\pi \left(\frac{\sigma_t}{4k_B T} \right)^2} \quad (3.17)$$

Ve etkin tuzak yoğunluğu şu şekilde değiştirilir;

$$N'_{t(eff)} = \frac{N_t}{2} \exp \left[\frac{E_t}{r' k_B T} \right] \quad (3.18)$$

Şekil 3.6, Gauss ve üstel tuzak durumlarını ve yük taşıyıcılarının tuzaklanma sürecini göstermektedir. Nicolai ve arkadaşları, PPV tabanlı organik yarıiletkenlerdeki elektron tuzakları için sayısal bir Gauss tuzak modelini araştırmışlardır. Tuzakların Gauss tipi tuzak modeli ve üstel tuzak modeli tarafından eşit derecede iyi tanımlanmış olabileceğini buldular (Nicolai et al., 2011). Konjuge polimerlerde elektron taşınımı için Gauss tuzak modeli geniş bir organik yarıiletken polimerler yelpazesine uygulanmıştır. Bu da 3,6 eV civarında ortak bir tuzak derinliğinin tanımlanmasıyla sonuçlandı (Nicolai et al., 2012).

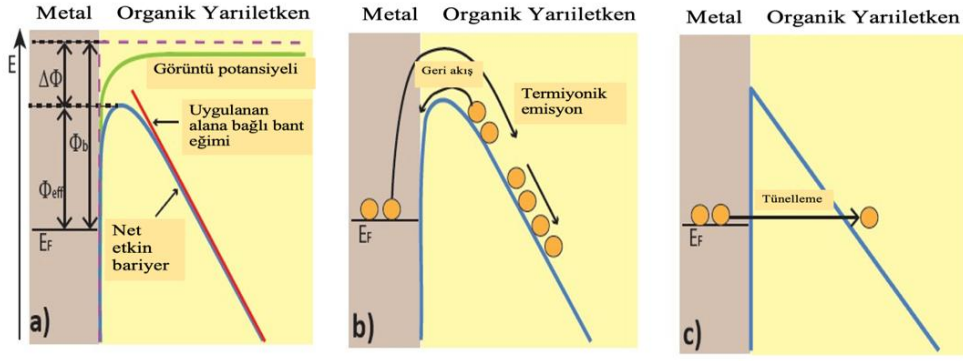


Şekil 3.7 Organik yarıiletkenlerde delik tuzakları. Sol: Gauss dağılımını gösterir. HOMO ve Gauss dağılımlı tuzaklar. Sırasıyla tuzaklar E_0 ve E_{tc} HOMO'nun merkezidir. E_a bir taşıma enerji seviyesidir ve E_F Fermi enerji seviyesidir. Sağdaki: HOMO ve üstel olarak dağılmış tuzakları gösterir

Bu tezde, çok sayıda organik küçük moleküldeki elektron ve delik tuzaklarını araştırıyoruz. Organik polimerlere benzer şekilde, termal olarak biriktirilmiş küçük moleküller de 3,6 eV elektron taşınımı için ortak bir tuzak derinliği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, bir delik taşınımı için ortak tuzak derinliği yaklaşık 6,0 eV olarak bulunmuştur. Organik yarıiletkenlerde tuzaksız yük taşınımı için yaklaşık 2,4 eV tur. Bu da küçük bir enerji penceresidir. Şekil 3.7, HOMO, Gauss ve üstel dağılımlı tuzakları göstermektedir. Elektronların aksine, delikler için enerjide daha yükseğe enerji seviyelerine çıkmak kolaydır, bu nedenle delik tuzakları HOMO seviyesinin üzerinde bulunur. Daha önce açıklanan elektron tuzağına benzer şekilde, bir tuzak bölgesine hareket eden delikler, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi komşu tuzak bölgelerine veya HOMO'ya hareket edemez.

3.1.4. Yük Taşıyıcı Enjeksiyonu

Organik yarıiletkenler düşük seviyede serbest yük taşıyıcılarına sahip olduğundan, OLED'ler, OPV'ler veya OTFT'ler gibi organik optoelektronik cihazlarda bunların kontaklardan enjekte edilmesi gerekir. Bu yük enjeksiyonu süreci, optoelektronik cihazların performansında kritik bir rol oynamaktadır. Metal ve organik yarıiletkenler birbirleriyle temas ettirildiğinde, metalden organik yarıiletkene yük enjeksiyonunu önlemek için ara yüzeylerinde bir bariyer oluşturulur. Şekil 3.8(a)'da enerji bandı diyagramı metal/organik yarıiletken arayüzü gösterilmektedir. Φ_b orijinal yük enjeksiyon bariyerini ifade eder ve metalin Fermi enerjisi E_F ile organik yarıiletkenin LUMO'su arasındaki enerji farkı nedeniyle oluşur. Bir elektron enjekte edildiğinde metalin organik yarıiletkene girmesi, metal yüzey üzerindeki yük görüntü adı verilen eşit bir pozitif yüke neden olur. Metalden x uzaklığında bulunan q yüklü bir elektron için yüzeyinde, görüntü potansiyeli $\Phi_i = -q/(16\pi\epsilon x)$ ile verilir. Harici bir alan F cihaza uygulandığında, Uygulanan alan ve görüntü potansiyelinin birleşik etkisi nedeniyle arayüzdeki bariyer $\Delta\Phi = \sqrt{(qF)/4\pi\epsilon}$ şu kadar azalır. Bu olay Görüntü-Kuvvet bariyerinin düşürülmesi olarak bilinir (Sze et al., 1998).



Şekil 3.8 Metal/organik yarıiletken ara yüzeyindeki enerji bandı diyagramı. (a) Uygulanan alan nedeniyle bant eğimi düz çizgi (kırmızı) ile gösterilmiştir. Görüntü potansiyeli (yeşil eğri), ara yüzeydeki bariyer yüksekliği düşmesi nedeniyle, ara yüzey yakınındaki net bant bükülmesini mavi eğriyle gösterir. Ara yüzde $\Delta\Phi$ ile maksimum bariyer düşürülmüştür. (b) Termiyonik emisyon (çok ısınan maddelerde meydana gelen elektron salınımı) yoluyla yük enjeksiyonu. Düşük mobilite de organik yarıiletkenler, taşıyıcılar ara yüzeyde birikir ve metal kontağa geri akabilir. (c) Yüksek alanlarda, Fowler-Nordheim üzerinden yük enjeksiyonu üçgen bir bariyerde tünelleme gösterilmiştir (Sze et al., 2021)

Metal/yarıiletken ara yüzeyinde yük enjeksiyonu termiyonik emisyon veya tünelleme yoluyla gerçekleşebilir. Termiyonik enjeksiyon işlemi, metaldeki elektronların yeterli termal enerjiyi elde etmeleri halinde enjeksiyonun üzerinden atlayabilecekleri mekanizmasına dayanır. Bariyerini aşar ve Şekil 3.8(b)'de gösterildiği gibi yarıiletkenin içine doğru hareket eder (Simmons, 1965). Enjekte edilen akım Richardson-Schottky denklemi ile tanımlanır;

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{eff}}{kT}\right) \quad (3.19)$$

Burada $A^* = (4\pi q m^* k^2) / (h^3)$ Richardson sabitidir (Bu da elektronun yük taşıyıcılarının kütlesi m^* bağlıdır), T sıcaklık, q temel yük ve Φ_{eff} tarafından verilen etkin bariyer yüksekliğidir.

$$\Phi_{eff} = \Phi_b - \Delta\Phi = \Phi - \sqrt{\frac{qF(0)}{4\pi\epsilon}} \quad (3.20)$$

Burada, $F(0)$ temas noktasındaki elektrik alanıdır, ϵ organik yarıiletken maddenin dielektrik sabitidir, Φ_b ara yüzdeki orijinal enjeksiyon bariyeridir, $\Delta\Phi$ görüntü potansiyeli ve uygulanan alan nedeniyle bariyer yüksekliğindeki azalmadır. Yukarıdaki denklemde görüldüğü gibi yük taşıyıcılarının termiyonik emisyon için etkin bariyer yüksekliği kritik bir rol oynar.

Yukarıdaki açıklama inorganik yarıiletkenlerde yüksek yük hareketliliği için uygundur. Organik yarıiletkenlerde, taşıyıcı hareketliliği inorganik yarıiletkenlere göre birkaç kat daha düşüktür, bu nedenle enjekte edilen çok sayıda taşıyıcı ara yüzeyde birikecektir ve Şekil 3.8(b)'de gösterildiği gibi metal kontağa geri akabilir (Arkhipov et al., 1998); (Scott et al., 1999). Bu durumda, difüzyon etkileri önemlidir ve termiyonik emisyon denkleminin şu şekilde değiştirilmesi gerekir.

$$J = qN_c\mu F(0)\exp\left(-\frac{q\Phi_{eff}}{kT}\right) \quad (3.21)$$

Burada N_c LUMO'daki etkin durum yoğunluğudur ve yarıiletkende μ_0 yük taşıyıcı hareketliliğidir. Düşük sıcaklıklarda, yük taşıyıcıları termiyonik emisyon tarafından tanımlanan enjeksiyon bariyeri aşmak için yeterli termal enerjiye sahip olmayacaktır. Böyle bir durumda, eğer uygulanan gerilim çok yüksek ise (veya yarıiletken tabaka çok ince ise) yük taşıyıcıları tünelden enjeksiyon bariyeri geçebilir (Appenzeller et al., 2004); (Chiu, 2014). Bu süreç Fowler-Nordheim tünellemesi olarak bilinir, enjekte edilen akım esas olarak uygulanan elektrik alanına bağlıdır ve şu şekilde verilir;

$$J = \left(\frac{q^3}{8\pi h\Phi_b}\right) F^2 \exp\left(-\frac{K}{F}\right) \quad (3.22)$$

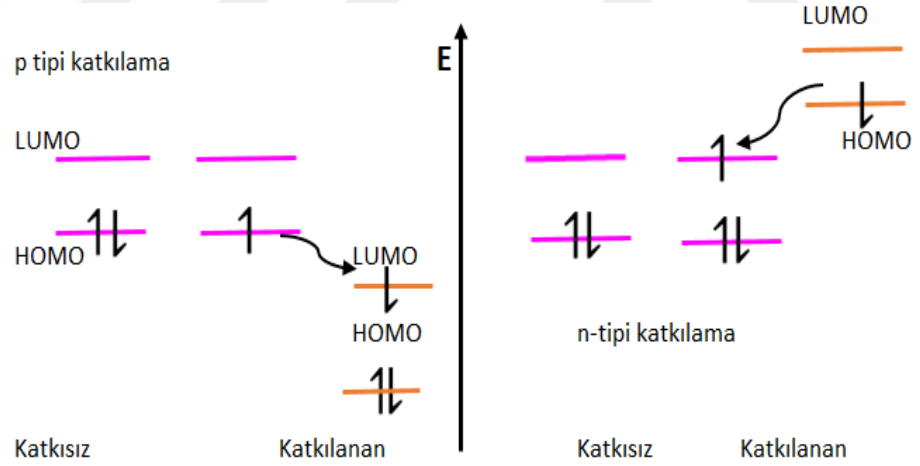
Burada K , bariyerin şekline bağlı olan bir parametredir. Üçgen için bariyeri, K şu şekilde verilir;

$$K = \left(\frac{8\pi\sqrt{2m^*} (q\Phi_b)^{\frac{3}{2}}}{3qh} \right) \quad (3.23)$$

Burada, m^* yük taşıyıcılarının etkin kütlesidir. Şekil 3.8(c)'de üçgen bir bariyer boyunca yük taşıyıcısı tünellemesini göstermektedir. Ayrıca bu durumda, enjeksiyon bariyeri Φ_b kritik bir rol oynar.

3.1.4.1. Omik yük enjeksiyon kontakları

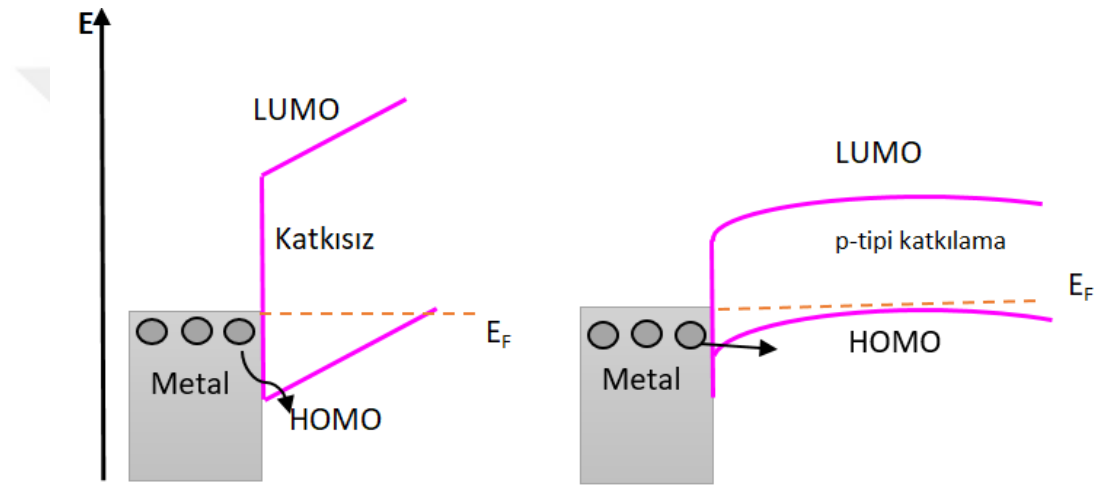
Metal/organik yarıiletken kontakların omik olduğu söylenir, eğer metal organik yarıiletkenin taşıyabileceğinden daha fazla yük kabul edebiliyorsa, temasın omik olduğu söylenir. Analitik olarak, eğer yük tek taşıyıcılı bir cihazdaki akım uzay-yük sınırlı ise, o zaman ohmik kontaklıdır. Organik yarıiletken tabanlı cihazlar için, kontaklar omik değilse, akım değeri cihazda büyüklük sırasına göre önemli ölçüde daha düşük olabilir. Bu nedenle, ohmik kontaklar organik yarıiletken tabanlı optoelektronik cihazlarda önemli bir yer tutmaktadır.



Şekil 3.9 Sol: Organik yarıiletkenlerde p-tipi katkılama, konağın HOMO'sundan daha düşük bir LUMO'ya sahip organik bir katkı maddesi, konaktan bir elektron kabul edebilir. Bu sistemde bir boşluk oluşturarak p tipi katkılamaya neden olur. Sağ: Organik yarıiletkenlerde n-tipi katkılama, HOMO'su konağın LUMO'sundan daha düşük olan bir organik katkı maddesi konağa bir elektron bağışlayabilir. Bu, konakta fazladan bir elektron yaratır ve n-tipi katkılama ile sonuçlanır

Şu anda, organik yarıiletkenlerin elektriksel katkılanması esas olarak omik kontaklar elde etmek için kullanılmaktadır. Bu süreçte, p katkılı bir organik yarıiletken

katman hol enjeksiyonu için metal kontaklar (veya elektron enjeksiyonu için n katkılı bir katman) üzerinde biriktirilir. Katkılama, HOMO'dan bir elektron yakalayan ve geride bir delik bırakan bir elektron alıcısı eklenerek elde edilir ve p-tipi katkılama ile sonuçlanır. N-tipi katkılama için, Şekil 3.9'da gösterildiği gibi, LUMO'ya bir elektron vermek için yüksek bir HOMO'ya sahip elektron donörü kullanılır. Bu Fermi seviyesinin HOMO'ya (veya LUMO'ya) doğru kaymasıyla sonuçlanır. Enerji seviyelerindeki bu tür bir kayma, metal katkılı katmanın arayüzünde güçlü bir bant bükülmesi yaratarak bir tükenme bölgesi oluşturur ve Şekil 3.10'da gösterildiği gibi bariyerler yük enjeksiyonunun etkili bir şekilde düşürülmesine neden olur (Lüssem et al., 2009).



Şekil 3.10 Sol: Metal/katkısız organik yarıiletken kontağı, bir delik enjeksiyonu için yüksek bariyer. Sağ: Metal/p-katkılı organik yarıiletken kontak, Organik katmanın katkılanması tarafından, güçlü bir bant bükülmesi yaratır, bu da önemli ölçüde enjeksiyon bariyerinin azaltır

Enjeksiyon bariyerlerini düşürmenin yanı sıra, katkılama aynı zamanda iletkenliği de artırır. Organik yarıiletkenler, daha kalın enjeksiyon katmanları kullanma esnekliği sağlar, bu da düşük çalışma voltajlarını korurken cihaz verimini artırır (Pfeiffer et al., 2003). Ancak, doping sadece katkılama maddesinin (veya kabul edicinin) LUMO'su, katkılama maddesinin (veya kabul edicinin) LUMO'sundan daha derin olduğunda etkili olabilir. p-tipi katkılama için ana malzemenin HOMO'su veya katkı maddesinin (veya donörün) HOMO'su n-tipi katkılama için ana malzemenin LUMO'sundan daha düşüktür. Şu anda, -5,5 eV'den daha düşük bir HOMO ile ana bilgisayarda p-tipi katkılama elde etmek zordur. Örneğin -6,0 eV HOMO'ya sahip organik yarıiletkenlere yük enjekte etmek için -6,0 eV'den daha düşük LUMO'ya sahip çok güçlü bir katkı maddesine ihtiyaç vardır. . Bir taraftan, LUMO değeri -6.0 eV'den daha düşük

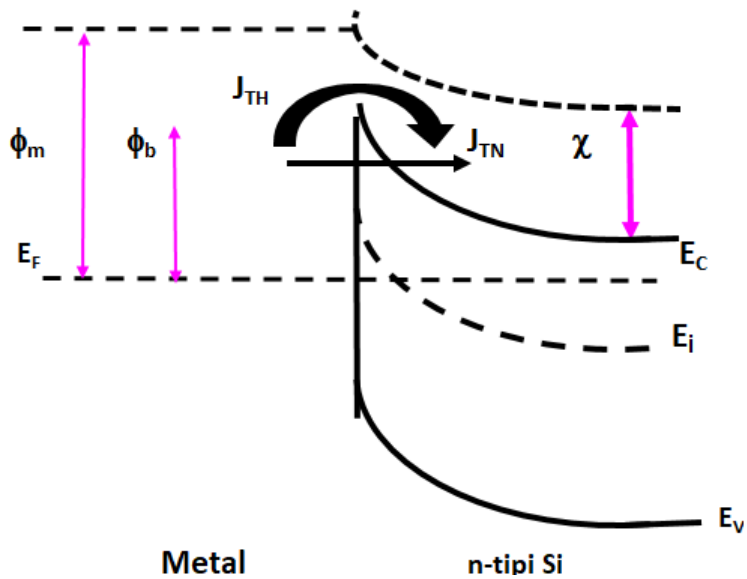
malzemeler oluşturmak son derece zordur. Bu yüzden, p-katkılama, derin HOMO'ya sahip malzemelere yük enjeksiyonu için uygun değildir. Buna ek olarak, tek bir katkı maddesi tüm ana malzemeler için kullanılamaz.

3.2. Metal / Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Metal ve silikon temas durumunda, schottky olarak adlandırılan potansiyel bariyer yüksekliği metalden oluşturulur ve pn bağlantısının özellikleri aynı olan silikon arayüzü kullanılır. Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonu sırasıyla Φ_m ve Φ_s ve elektron ilgisi χ . Aralarındaki ilişki $\Phi_m > \Phi_s > \chi$ olduğunda Φ_m , Φ_s ve χ , $\Phi_m > \Phi_s > \chi$ olarak tanımlanır, schottky bariyer yüksekliği;

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi \quad (3.24)$$

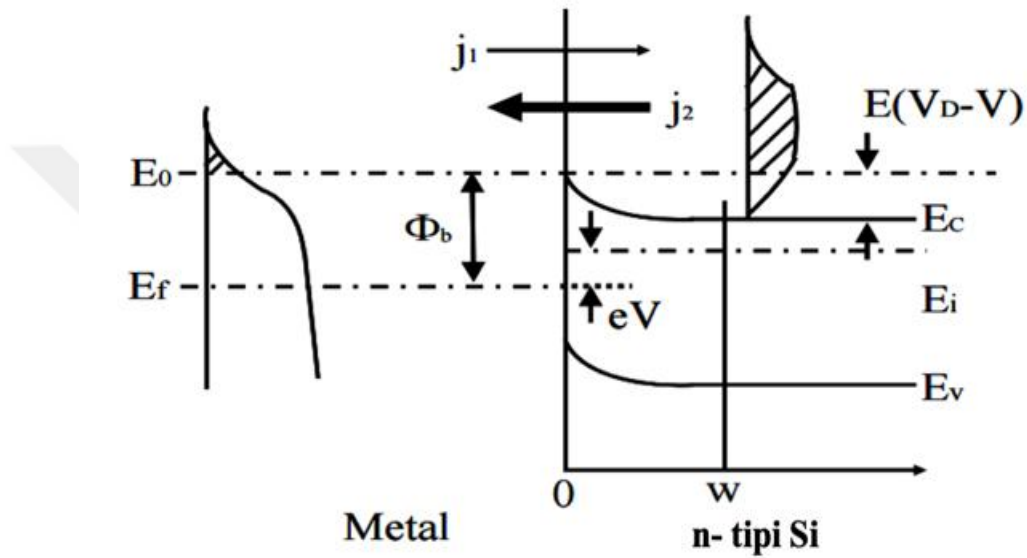
Değişim denklem 3.24'de ortaya çıkar. Aslında schottky bariyeri yüksekliği ölçülür ve bu yükseklik metal iş fonksiyonu Φ_m 'ye bağlı değildir. Genelleme yapıldığında, iş fonksiyonuna olan bağımlılık normale göre küçüktür. Bunun sebebi ara yüzey tuzağı ve ara yüzey tabakasının bulunmasıdır. Fermi seviyesi mıhlanması arasındaki ilişki için birçok model önerilmektedir. Bu durumda, tek ideal durum göz önünde bulundurulur. Taşıma yapısı termal elektron emisyonundan geçerek potansiyeli ve tünelleme yapısı Şekil 3.11'de gösterildiği gibi schottky potansiyelinden geçer.



Şekil 3.11 Schottky diyot bant diyagramının şematik gösterimi

3.2.1. Termal elektron emisyon yapısı

Termal emisyon yapısından bahsedilmektedir. İlk olarak, elektron akımı j_2 , Şekil 3.12' de gösterildiği gibi yarıiletken ile metaller arasındaki geçiş dikkate alınır. Elektron, uzayda elektron yük katmanının mesafesinde çarpışma yapmaz. Elektron akımı, bu katmandan metale geçer. Şekil 3.12' de verildiği üzere elektron emisyonu yapan metal, E_0 'dan daha yüksek elektron enerjisine sahiptir.



Şekil 3.12 Schottky doğrultma işleminin şematik gösterimi

$$\begin{aligned}
 j_2 &= - \int v_x dn = - \int_{j_x > 0} V_x Z(E) f(E) dE \\
 &= - \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty v_x \cdot 2 \frac{1}{8\pi^3} \cdot f(E) dk_x dk_y dk_z \\
 &= - \frac{1}{4\pi^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty v_x \left\{ \exp\left(-\frac{E-E_f}{kT}\right) \right\} dk_x dk_y dk_z
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Burada, $Z(E)$ elektronun durum yoğunluğu, $f(E)$ elektronun dağılım fonksiyonu, x yönündeki elektronun hız bileşeni v_x ve m_e^* yarıiletken içindeki elektronun etkin kütlesidir. v_x ' i yerine yazarsak;

$$v_x = \frac{\hbar k_x}{m_\rho^*} \quad (3.26)$$

$$E = E_0 + \frac{\hbar}{2m_e^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \quad (3.27)$$

Denklem 3.25'e eşitlendiğinde;

$$\begin{aligned} j_2 &= -\frac{1}{4\pi^3} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\hbar k_x}{m_e^*} \exp\left\{\frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)}{2m_e^* kT}\right\} \left\{\exp\left(-\frac{E_0 - E_f}{kT}\right)\right\} dk_x dk_y dk_z \\ &= -\frac{4\pi m_e^* k^2 T^2}{h^3} \exp\left(-\frac{E_0 - E_f}{kT}\right) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Yarıiletken tarafı tanımlanır.

$$E_0 - E_f = \Phi_m - \chi - qV \quad (3.29)$$

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi \quad (3.30)$$

Yarıiletkenden metale geçen akım şöyledir;

$$j_2 = -\frac{4\pi m_e^* k^2 T^2}{h^3} \exp\left(-\frac{\Phi_B - qV}{kT}\right) \quad (3.31)$$

Ve metalden yarıiletkene olan akım $qV_m - \chi\Phi$ yerine $\chi\Phi - V_m$ ile değiştirilmiştir.

$$j_1 = -\frac{4\pi k^2 T^2}{h^3} \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) \quad (3.32)$$

Net akım;

$$j_2 - j_1 = -\frac{4\pi m_e^* k^2 T^2}{h^3} \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) \exp\left\{\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right\} \quad (3.33)$$

Ve akım yoğunluğu ise;

$$j_{TH} = -\frac{4\pi q m_e^* k^2 T^2}{h^3} \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) \exp\left\{\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right\} \quad (3.34)$$

Termal emisyon yapısı ile ilgili akım;

$$j_{TH} = j_0 \exp \left\{ \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right\} \quad (3.35)$$

$$j_0 = A^* T^2 \exp \left(- \frac{q\Phi}{kT} \right) \quad (3.36)$$

$$A^* = \frac{4\pi q m_e^* k^2}{h^3} \quad (3.37)$$

Denklem 3.37’de ki, A^* , Richardson sabiti; k , Boltzmann sabiti; h , Planck sabiti ve T , mutlak sıcaklıktır. İdealite faktörü olarak adlandırılan n , ideal schottky kontağında $n=1$ ’dir. Aslında $n>1$ olur, bunun nedeni difüzyon akımındaki taşıma akımı, görüntü kuvvetindeki Schottky bariyer yüksekliğinin ön gerilim bağımlılığı, azınlık taşıyıcının enjeksiyonu ve ara yüzey tuzağındaki Schottky bariyerinin bağımlılığıdır. Φ_B şu şekilde yazılır;

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A^* T^2}{J_0} \right) \quad (3.38)$$

Φ_B , Schottky diyotunun I-V ölçümünden bulunabilir. Schottky bariyer yüksekliğini bulmak için diğer bir yöntem, tükenme kapasitesi ile gerilim akımı arasındaki ilişkidir.

3.2.2. Tünelleme yapısı

Sonraki adımda, tünelleme yapısı dikkate alınmaktadır. Tünelleme, aşağıdaki denklemi verir (Schroder, 2015);

$$J_{TN} = \frac{q^2 F^2}{8\pi h \Phi_B} \exp \left[- \frac{8\pi}{3hqF} \sqrt{2m_e^* (q\Phi_B)^3} \right] \quad (3.39)$$

Burada, F yarıiletken yüzeyin dikey yönündeki elektrik alanıdır. Görüntü yükünün görüntüsü Φ_B schottky bariyerine eklenir;

$$\Phi_B = \Phi_{B0} - \sqrt{\frac{qF}{4\pi\epsilon}} \quad (3.40)$$

Φ , elektrik alanı uygulanmadığı durumdaki Schottky bariyer yüksekliğidir ve ϵ_s , silikonun permitivitesidir. Elektrik alanında Schottky bariyer yüksekliğinin düşmesi olayı, Schottky etkisi olarak adlandırılır. Schottky arayüzündeki akım denklem 3.41’de gösterildiği gibi, termal emisyon akımı ve tünelleme akımının toplamıyla ifade edilir.

$$J_{total} = J_{TH} + J_{TN} \quad (3.41)$$

3.2.3. Schottky kontağının uzay yükü kapasitesi

Schottky kontağının uzay yükü kapasitesi, potansiyel dağılımını $\Phi(x)$ olarak gösterilir; bu da elektriksel kapasiteye sahip bir kondansatör ve pn diyodu gibi düşünülebilir. Eğer $\Phi(x)$, Poisson denklemiyle tanımlanıyorsa;

$$\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2} = -\frac{qN_D}{\epsilon_0\epsilon_s} \quad (3.42)$$

Bu denklemin integrali alındığında;

$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = -\frac{qN_D}{\epsilon_0\epsilon_s}x + C_1 \quad (3.43)$$

$$\Phi(x) = -\frac{qN_D}{\epsilon_0\epsilon_s}x^2 + C_1x + C_2 \quad (3.44)$$

X eksenini, Şekil 3.12'yi ifade eder ve x sıfıra eşit olduğu zaman başlangıç koşulu olarak $\Phi(x) = \Phi_0 = 0$ olur.

$$C_2 = 0 \quad (3.45)$$

$x = w$ ve $d\Phi/dx = 0$ ise;

$$C_1 = -\frac{qN_D}{\epsilon_0\epsilon_s}w \quad (3.46)$$

Potansiyel;

$$\Phi(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_0\epsilon_s} \left(wx - \frac{x^2}{2} \right) \quad (3.47)$$

$X=w$, ve $\Phi(w) = V_D - V$

$$w = \left\{ \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_S(V_0 - V)}{qN_D} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.48)$$

Elektrostatik kapasitans ise;

$$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_S}{w} = \left\{ \frac{q\varepsilon_0\varepsilon_S N_D}{2(V_D - V)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.49)$$

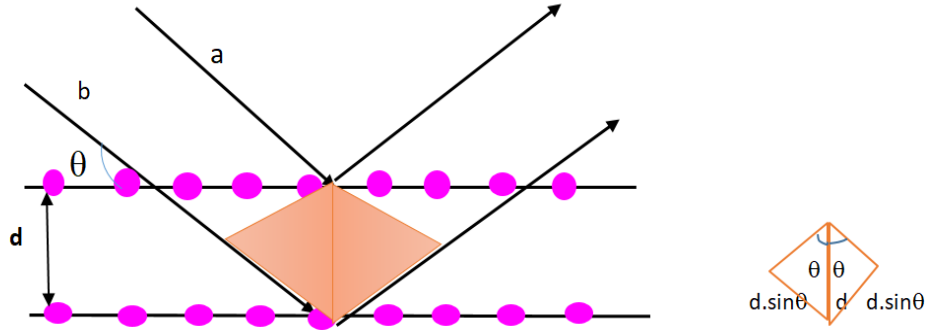
$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{q\varepsilon_0\varepsilon_S N_D} (V_D - V) \quad (3.50)$$

şeklindedir.

3.3. XRD Analizi

X-ışınları, 1895 yılında Alma fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından keşfedildi. Yüksek voltaj altında çalışan katot ışını tüpü üzerinde deneyler yaparken, tüpün dışında yer alan floresan ekranın parlamasıyla fark etti. Daha önce hiçbir ışık türüne benzememesi nedeniyle ‘bilinmeyen ışınlar’ anlamına gelen X-ışınları adını verdi. Kısa süre içinde maddelerin iç yapısı hakkında bilgi verebileceği anlaşıldı. İlerleyen zamanda, ‘kristallerdeki X-ışınlarının kırınımını keşfettiği için’ 1914 yılında William Henry Bragg ve oğlu William Lawrence Bragg’ e Nobel Fizik Ödülü verilmiştir. Böylece kırınımın keşfi ile kristal yapıları malzemelerin analizinin detaylandırılması sağlanmıştır.

X-ışınlarının özelliklerinden yararlanılarak zamanla çeşitli analiz yöntemleri geliştirilmiş, bu yöntemlerden biri de malzemelerin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan X-ışını difraksiyon tekniği olmuştur. XRD cihazının temel prensibi X-ışınları (Bragg yasası) kırınımıdır. Bragg yasası, X-ışınlarının kristal düzelmelerinden yansıyarak girişim desenleri oluşturarak, kristalin atomik yapısı hakkında bilgi verir. X-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemi, kristal yapıya sahip malzemelerin iç düzenlerini analiz etmek için kullanılan etkili bir karakterizasyon tekniğidir. Geniş bir uygulama alanına sahip olan bu yöntem, fizik, malzeme bilimi, kimya ve yer bilimleri gibi çeşitli disiplinlerde yapısal bilgi elde etmede temel bir araçtır (Aydoğan, 2014).



Şekil 3.13 Bragg yasası için atomik ölçekte katı malzeme görünümü

İki boyutlu kristal örgü üzerinde X-ışınlarının θ açısıyla gelerek düzlemsel kristal aralıklarından yansımaları sonucu kırınım oluşumu Şekil 3.13’ de gösterilmiştir. Yansıyan ışınlar, fazda girişim oluşturabilmek için $2d \sin\theta$ mesafe farkının dalga boyunun tam katı ($n\lambda$) olması gerekir.

$$2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda \quad (3.51)$$

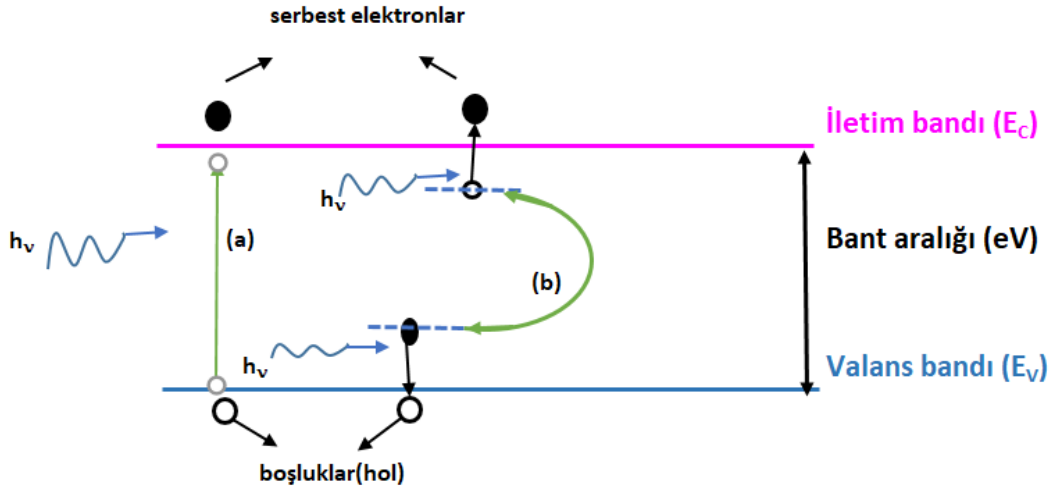
Burada; n kırınımın seviyesi, θ gelme (yansıma) açısı, d kristal düzlemleri arasındaki uzaklığı ve λ uygulanan X ışının dalga boyunu göstermektedir (Callister & Rethwisch, 2011).

Bu düzenek, bir X-ışını kaynağı, numune tutucu ve dedektörden oluşur. Kaynaktan çıkan X-ışınları numuneye çarptığında, numunenin kristal yapısına bağlı olarak belirli açılarda kırınıma uğrar. Kırılan ışınlar dedektör tarafından algılanarak, ilgili açılarda elde edilen kırınım yoğunluğu kaydedilir. Bu yoğunluk verileri sayesinde, numunenin kristal yapısı, faz bilgisi ve diğer fiziksel özellikleri belirlenebilir. Kırınım açısı genellikle 2θ olarak ifade edilir ve ölçüm sırasında kaynak, numune ya da dedektör döndürülerek tarama gerçekleştirilir (Aydoğan, 2014).

X-Işınları özellikle yarıiletken malzemelerin karakterizasyonunda önemli bir yere sahiptir. Organik ve inorganik filmlerin kristal yapısını anlamak ve katkı maddelerin etkisini anlayabilmek açısından önemlidir. Malzemenin amorf yapıda mı yoksa kristal yapıda mı olduğunu kırınım desenindeki pikler aracılığıyla anlayabiliriz. XRD analizinde, amorf yapılı malzemenin keskin, net pikleri değil; geniş ve düşük şiddetli tepe gözlemlenir. Kristal yapılı bir malzeme ise, dar görünümlü kırınım deseni meydana getirir.

3.4. Fotodiyot Teorisi

Fotoiletkenlik, malzemenin üzerine düşen morötesi ışık, gamma ışınları veya görünür ışık gibi elektromanyetik ışınları soğurmasıyla elektriksel iletkenlikte artış sağlanması olayıdır. Bu olayın yarıiletkenlerde gerçekleşebilmesi için yapısında serbest elektronlar ve deliklerin bulunması gerekir. Elektromanyetik ışınlar yarıiletken tarafından soğurulduğunda delikler ve serbest elektronların dağılımı değişerek elektrik iletkenliğini artırır. Yarıiletken üzerine gelen ışık enerjisi, bağlı elektronların serbest kalmasına yol açar; bu elektronlar valans bandından iletim bandına geçerek ya da yasak bandı aşarak malzemenin elektriksel iletkenliğini artırır. Elektron hareketliliğinin artmasına bağlı olarak iletkenlikte meydana gelen değişimi şekil 3.14' de gösterilmiştir. Şemada, ' $h\nu$ ' ifadesi foton enerjisini göstermektedir (Rhoderick & E. H., 1982).



Şekil 3.14 Yarıiletken malzeme fotonlarla uyarılması sonucunda (a) bantlarda meydana gelen geçiş (b) safsızlık seviyesiyle iletim bandı arasında oluşan fotouyarım olayları

Fotodiyotlar, genel olarak bu modele uygun bir çalışma mekanizmasına sahiptir. Ters gerilim altında çalışarak, yüzeylerine düşen ışık sayesinde iletken hale gelirler. Yüzeyinde yer alan metal temaslar, anot ve katot uçları olarak tanımlanır. Fotodiyotlar, ileri yönde kutuplandıklarında klasik yarıiletken diyot özellikleri gösterir. Işık fotonları, genellikle bir mercek yardımıyla doğrudan p-n birleşim bölgesine yönlendirilir. Bu bölgeye ulaşan fotonlar, valans bandında bulunan elektronlara enerji aktararak onları iletim bandına taşır. Bu taşıma sonucunda oluşan serbest taşıyıcılar, devrede bir akımın oluşmasına neden olur. Fotodiyot aracılığıyla ölçülen bu akım, yüzeye uygulanan ışık

yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Işık şiddeti arttıkça, p-n birleşim bölgesindeki direnç azalır ve bu da daha fazla akım geçişine olanak tanır. Buna karşılık, ışık şiddetinin düşmesi durumunda birleşim bölgesindeki direnç artar ve devreden geçen akım miktarında azalma gözlenir.

Fotodiyotlar, belirli parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterebilir; bunlar arasında tepki süresi ve duyarlı olduğu dalga boyu aralığı yer alır. Genel olarak, bu yarıiletken cihazlar ışık yayan bir malzeme ile kaplanarak, ışık aldığında elektriksel akım üretmeleriyle tanımlanır. Sahip oldukları bu özellikler sayesinde, sensörlerden dedektörlere kadar birçok farklı alanda kullanılmaktadırlar.

Fotodiyotu belirleyen temel parametreler, responsivite yani sinyale cevap verme duyarlılığı, karanlık akımı ve bant genişliğidir. Fotodiyotun sinyale cevap verme duyarlılığı, oluşan foto-akımın gelen optik güce bölümü ile ifade edilir. Bir fotodiyotun maksimum foto-akımı;

$$I_{PH\ max} = \frac{q}{h\nu} P \quad (3.52)$$

Burada P fotodiyotun optiksel gücünü göstermektedir (Özden, 2005).

Fotoduyarlılık, optik gücü oluşturan fotoakım ile doğrudan etkilenir ve bir fotodiyodun ışığa ne kadar tepki verdiğini gösteren önemli bir parametredir. Belirli dalga boylarında fotodiyot yüzeyine düşen ışığın gücünün fotoakıma oranı ile hesaplanır. Başka bir ifadeyle, ışık enerjisinin elektrik akımına dönüşme verimliliğini belirleyen bir faktördür. Bu değer, yalnızca ışığın dalga boyundan etkilenmez; aynı zamanda çevresel sıcaklık koşulları ve uygulanan ters besleme voltajı gibi etkenlerle de değişiklik gösterebilir. Fotodiyotlar için duyarlılık;

$$R = \frac{I_{PH}}{P} = \frac{\eta e}{h\nu} \quad (3.53)$$

Şeklinde (Gündüz, 2007). Denklem 3.53'teki η , spektral kuantum verimi, λ ise fotodiyoda gelen ışığın dalgaboyudur. Fotoduyarlılığın birimi akımın güce oranı olduğu için A/W'dir.

4. DENEYSEL İŞLEMLER

4.1. Deneysel Malzemelerin Özelliklerinin İncelenmesi

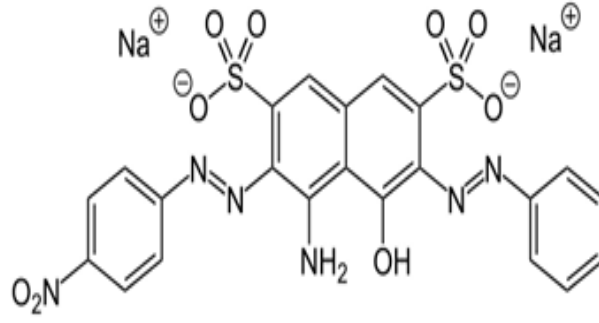
4.1.1. Nigrosin organik boyası

Bu çalışmada kullanılan Nigrosin, genellikle sentetik organik boya maddesi olarak bilinir ve çoğunlukla tekstil, biyoloji ve mikroskopi alanlarında kullanılır. Ayrıca bazı fotodiyot uygulamalarda da kullanılır. Nigrosin, özellikle bazı güneş panelleri aracılığıyla güneşten elektrik elde etme uygulamalarında, elektrokimyasal hücrelerde veya yüzey işleme tekniklerinde kullanılabilir. Fotodiyotlar için kullanılan malzemelerin çoğu, ışık altında elektriksel iletkenlik gösterir ve bunun yanında malzemenin ışık emme özellikleri de kritik bir faktördür. Nigrosin gibi organik boyalar, ışığı emme kapasitesine ve ardından elektron transferine katkı sağlayarak, fotodiyotların verimliliğini artırabilir. Özellikle, spin kaplama yöntemi gibi ince film teknikleriyle bu tür maddeler, yüzeyde homojen bir kaplama oluşturarak elektronik cihazların performansını iyileştirebilir.

Nigrosin'in Kimyasal Reaktivite ve iyonik özellikleri; asit ve baz ortamlarında çözünür. Çoğunlukla asidik ortamda daha reaktif hale gelir. Bu özellik organik elektroniklerde malzemin davranışını etkileyebileceğinden fotodiyotlarda kullanılmadan önce hangi pH ortamında stabil olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Nigrosin'in fiziksel özellikleri; siyah renkli olup, özellikle biyolojik boyama ve mikroskopi alanlarında yaygın kullanılır. Erime noktası yaklaşık 300 °C civarında olduğu için yüksek sıcaklıkta bile kararlı kalabileceğini gösterir. Genellikle su ve bazı çözücülerde çözünür.

Nigrosin' in moleküler formülü $C_{18}H_{18}N_4O_3S_2$ 'dir. Nigrosin, genellikle sulfonatlı azo boyalar sınıfına ait bir bileşik olup ışık emme özelliklerini ve renk özelliklerini belirleyen önemli kimyasal bileşenlerdir.



Şekil 4.1 Nigrosinin kimyasal formülü

4.1.2. Alüminyum özellikleri

Alüminyum (Al) özellikleri, yüksek iletkenlik, hafiflik ve maliyet açısından avantajlı olduğu için fotodiyotlar gibi optoelektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılır. Alüminyum yüksek elektrik iletkenlik ve düşük direnç özelliğine sahip olduğu için fotodiyotlarda elektron akışını hızlandırmak ve yük taşıyıcıların verimli hareketini sağlamak oldukça önemlidir. Ayrıca spin kaplama yöntemiyle alüminyumun yüzey kaplaması, fotodiyotların optik özelliklerini ve verimliliğini arttırmada önemli bir rol oynar. Alüminyumun oksitlenmeye karşı dayanıklı olması fotodiyotun uzun ömürlü olmasına da katkı sağlar.

4.2. Kaplama Teknikleri ve Kullanılan Cihazlar

4.2.1. Spin (Döngüsel) kaplama yöntemi

Yüzey ince film kaplama sistemleri elektronik sensörlerden yarıiletken bileşenlere, optik cihazlardan astronomik gözlem ekipmanlarına kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. İnce film kalitesi, kalınlığı ve kaplanacak yüzeyin türüne bağlı olarak çeşitli kaplama teknikleri geliştirilmiştir. Maliyeti düşük olmasıyla dikkat çeken spin kaplama en yaygın olarak kullanılan yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemle, yüzey yaklaşık olarak 2000-3000 devir/dakika hızla döndürülürken, uçucu organik çözücü ve kaplanacak kimyasal bileşik çözeltisi yüzeyin merkezine damlatılarak kaplama işlemi gerçekleştirilir. Dönen yüzeyde çözücünün buharlaşması ve merkezkaç kuvvetinin etkisiyle yüzeyde ince bir film tabakası oluşur. Bu yöntem vakum veya buharlaştırma

sistemleri ihtiyaç olmadan uygulanabilir ve motor dönme hızı ayarlanarak istenilen kalınlıklarda ince filmler oluşturulabilir (Doğan ve Ökten, 2023).

Döngüsel kaplama pürüzsüz yüzeylerde ince film tabaka kaplamak için kullanılan bir kaplama yöntemidir. Kaplama yapılacak ortamda vakum, ısı gibi özellikler beklenmediğinden bu yöntem oldukça ucuz ve kolaydır. Spin kaplama işleminde düşük miktarda malzeme, kaplanacak yüzeyin merkezine uygulanarak belirlenen hız değerleriyle belirtilen süre boyunca döndürülerek uygulanır. Bu yöntem için kullanılan cihazlara spin kaplayıcı veya sadece spinner denir. Bu kaplama yönteminde uygulanan kaplama malzemesi öncelikle uçucu özellikte seçilir. Bu özelliği sayesinde malzeme, işlem sırasında eş zamanlı olarak buharlaşır. Elde edilecek filmin kalınlığı; çözeltinin ve çözücünün viskozitesi, kuruma hızı, konsantrasyonu ve yüzey gerilimi gibi fiziksel özelliklere bağlı olmasının yanı sıra maksimum dönme hızı, ince film oluşma süresi ve hızın artış kademeleri gibi parametrelere de bağlıdır (Tyona, 2013); (Bozkurt, 2017).

Genellikle spin kaplama yöntemi, uzun dönme süresi boyunca yüksek dönme hızları ile ince filmlerin oluşmasını sağlar. Spin kaplama yönteminde 3 temel aşama yapılmaktadır. Bu aşamalar; damlatma, döndürme ve buharlaştırmadır. İlk olarak damlatma aşamasında, çözelti cam altlık üzerine damlatılır sonrasında ikinci aşama olan döndürme işlemi yapılarak çözeltinin cam altlıkta yayılması ve fazla olan çözeltinin uzaklaşması sağlanır. Döndürme aşaması bittikten sonra fazla olan çözücünün uzaklaşması için durdurulan cam altlık son aşama olan buharlaşma yapılarak kaplama işlemi tamamlanmış olacak. Spin kaplama için kullanılan WS- 560MZ-23NPP/UD2 marka cihaz şekil 4.2’de verilmiştir.



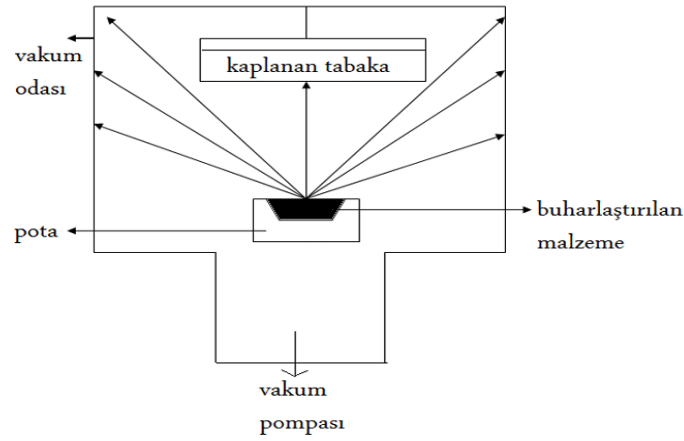
Şekil 4.2 Spin kaplama cihazı

4.3. Termal Buharlaştırma Sistemi

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi, vakum ortamında gerçekleştirilen ve ince film kaplama işlemi için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. PVD, buharlaştırma, sıçratma (sputtering) ve iyon kaplama gibi çeşitli alt yöntemlere ayrılmaktadır. Bu yöntemler arasında, ekonomik avantajları ve uygulama kolaylığı nedeniyle buharlaştırma yöntemi öne çıkmaktadır. Buharlaştırma işleminde, katı halde bulunan hedef malzeme (külçe, granül, tel veya toz formunda) yüksek sıcaklıklarda buharlaştırılarak alt tabaka üzerinde birikmesi sağlanır. Bu süreçte kullanılan yüksek saflıktaki kaynak malzemeler, kaplanan filmin saflığını artırır, dolayısıyla optik, elektriksel ve yapısal özellikler bakımından yüksek kaliteli ince filmler elde edilmesini mümkün kılar (Mattox & D.M., 1998).

Organik arayüzlü diyotların üretiminde sıkça tercih edilen yöntemlerden biri termal buharlaştırma, yüksek vakum altında organik malzemelerin ısıtılarak buharlaştırılması ve kontrollü bir şekilde yarıiletken yüzeye biriktirilmesi esasına dayanır. Termal buharlaştırma yöntemi, ince film kalınlığı ve biriktirme oranı üzerinde hassas kontrol sağlayarak homojen katmanların elde edilmesine imkân tanır. Bu yöntemle elde edilen organik yarıiletken filmler, diyotların elektriksel ve optoelektronik performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle fotodiyotlar, Schottky diyotlar ve organik ışık yayan diyot (OLED) gibi yapılarda buharlaştırma ile elde edilen düzgün filmler, cihazın idealite faktörü, engel yüksekliği ve taşıyıcı mobilitesi gibi parametrelerde iyileşmeler sağlamaktadır.

Termal buharlaştırma, buharlaştırılan malzemenin çok az ya da hiç gaz molekülüyle çarpışmadan doğrudan altlık yüzeyine ulaşır. Buharlaştıran malzeme genellikle doğrusal bir yörüngede hareket eder ve vakum ortamı, sistemdeki gaz kaynaklı kirlenmeleri minimum seviyeye indirerek temiz bir biriktirme süreci sağlar. Genel olarak, bu işlem 10^{-5} ile 10^{-9} Torr aralığındaki düşük basınçlarda gerçekleştirilir (Mattox & D.M., 1998). Termal buharlaştırma yöntemi şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Termal Buharlaştırma Sistemi



Şekil 4.4 Al kaplamasında kullanılan PVD cihazı

4.4. Kristallerin Temizlenmesi

Malzemenin hem kimyasal hem de fiziksel olarak düzgün çalışabilmesi için silisyum yüzeyinin temizlenmesi önemlidir. Al/Nigrosin /n-Si schottky diyotlarını elde etmek için (100) kristal yönelimine sahip, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ katkı konsantrasyonlu, 400 μm kalınlığında 1-10 $\Omega\cdot\text{cm}$ öz dirençli n-tipi Si alttaş kullanıldı. n-tipi silikon (n-Si) substratın temizliği, standart RCA (Radio Corporation of America) yöntemiyle gerçekleştirildi. İlk aşamada, organik kirleticileri uzaklaştırmak için kristal, 75°C'de hazırlanan RCA-1 çözeltisine ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:5$ hacimsel oran) 10 dakika boyunca daldırıldı ve ardından deiyonize suyla (DI) yıkandı. İkinci aşamada, metalik kirleri gidermek için RCA-2 çözeltisi ($\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:6$ hacimsel oran) kullanıldı. Krsital 75 °C'de 10

dakika RCA-2 içinde bekletildikten sonra tekrar DI suyla yıkandı ve azot gazı altında kurutuldu. Standart RCA yöntemiyle iyonik kirleticilerden ve yabancı maddelerden arındırılan n-Si kristalinin mat yüzeyine termal buharlaştırma yöntemiyle Al kaplanarak omik kontak oluşturulmuştur. Bu yapı, (N) azot ortamında 500 °C’de 3 dk. ısıtma işlemine maruz bırakılarak stabilize edilmiştir.

4.5. Al/Nigrosin/n-Si Schottky Diyotunun Hazırlanması ve Ölçümler

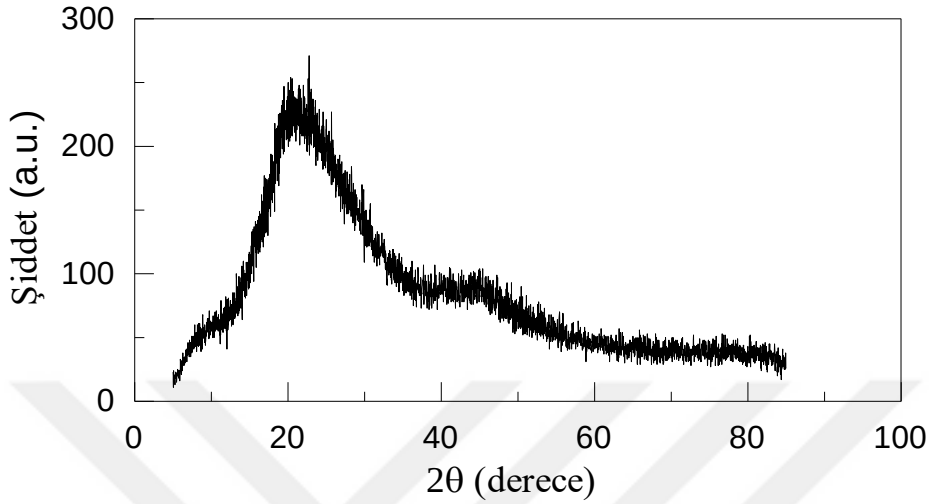
Nigrosin organik malzemesini altlığın temizlik aşamaları tamamlandıktan sonra ince filmi n-Si kristali üzerine spin kaplama yöntemiyle kaplandı. 10 ml etanol içine 0,02 g NIG eklenerek NIG çözeltisi elde edildi. Bu süreçte, belirlenen % 0,2 lik konsantrasyondaki Nigrosin çözeltisi önceden temizlenmiş Si kristal yüzeyine damlatılmış ve 1500 rpm hızında 1 dakika döndürülerek Si üzerinde ince bir film oluşturulmuştur. Film kalınlığı, çözeltinin viskozitesi, dönüş hızı ve dönüş süresi gibi parametrelerle kontrol edilmiştir. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra, yüzeyde istenen film kalitesini sağlamak amacıyla numuneler oda sıcaklığında bir gün boyunca kurutulmuştur. Son adımda bu yapının üst temas elektrotunu oluşturmak amacıyla, yaklaşık 2×10^{-5} torr basınç altında Al buharlaştırılarak 1 mm çapında noktasal elektrotlar oluşturulmuş ve Al/Nigrosin/n-Si/Al MIS diyotları üretilmiştir.

Kontrol amaçlı olarak, aynı vakum koşullarında Al/n-Si Schottky diyotları da üretilmiştir. Bu kontrol diyotları, Nigrosin kaplamalı yapılar ile karşılaştırılarak, organik ara katmanın Schottky diyotların performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. Al/Nigrosin/n-Si/Al yapıları diyotun akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-gerilim (C-V) karakteristikleri, KEITHLEY 4200 SCS yarıiletken karakterizasyon sistemi kullanılarak $\pm 2V$ arasındaki, 0.02V’luk adımlarla gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, yapının doğrultma davranışı, engel yüksekliği, idealite faktörü ve diğer elektriksel parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Işık altındaki ölçümler için AM1.5 Solar Simülatör kullanılmıştır.

Nigrosin maddesinin optik soğurma (A) spektrumu, Batman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, laboratuvarında mevcut bulunan bilgisayar kontrollü Shimadzu UV-1900 UV-Vis spektrofotometresi ile yapılmış olup, cihaz 190-1100 nm arasındaki dalga boylarında veri toplama kapasitesine sahiptir. Soğurma analizleri sonucunda, numunelerin soğurma gösterdiği dalga boyları üzerinden yasak enerji aralıkları (E_g) hesaplanmıştır.

5. BULGULAR VE SONUÇLAR

5.1. Nigrosin Bileşiğinin Toz Haldeki XRD Ölçümlerinin Analizi



Şekil 5.1 Nigrosin bileşiğinin toz haldeki XRD grafiği

XRD, materyallerin amorf yapısını incelemek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Şekil 5.1’de 20 ile 30 derece arasında tek bir pik noktası görülmektedir. Nigrosin bileşiğinin toz haldeki XRD ölçümleri, amorf bir yapıda olduğunu göstermiştir. 2θ açısı yaklaşık 22° civarında geniş bir tepe gözlemlenmiştir. Bu durum, Nigrosin moleküllerinin düzensiz bir şekilde dağıldığını ve kristal bir yapı oluşturmadığını işaret etmektedir. Bu çalışmada elde edilen XRD sonuçları, Yıldırım et al. (2023) çalışmasıyla uyumlu olup, her iki yapıda da organik katmanın amorf karakterde olduğu ve yarıiletken yüzeye düzgün bir şekilde kaplandığı görülmüştür. Bu durum, organik-inorganik heteroyapılarda amorf yapıli organik filmlerin etkili bir ara tabaka olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

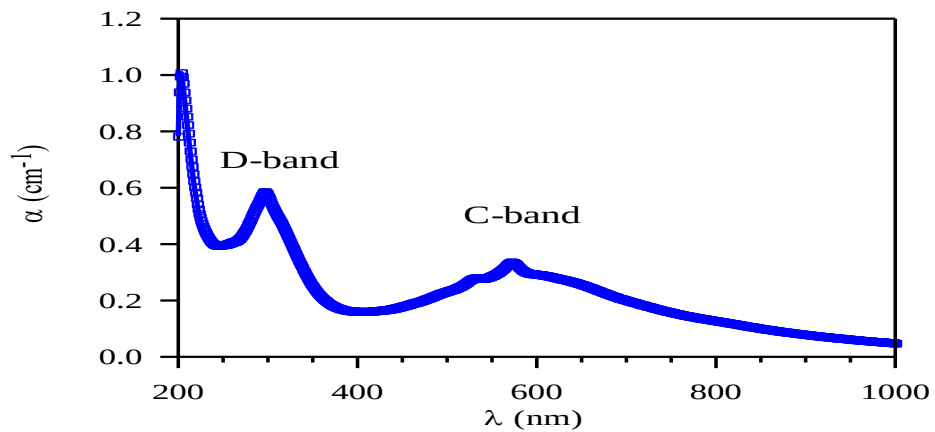
Demiroğlu, D. (2019), Organik yarıiletken olan, amorf yapıda CuPc ince filmlerin XRD spektrumları 5°-30° aralığında geniş bir tepe gözlemlediğini belirtmiştir.

5.2. Nigrosin’in Optik Ölçümleri (UV-Vis)

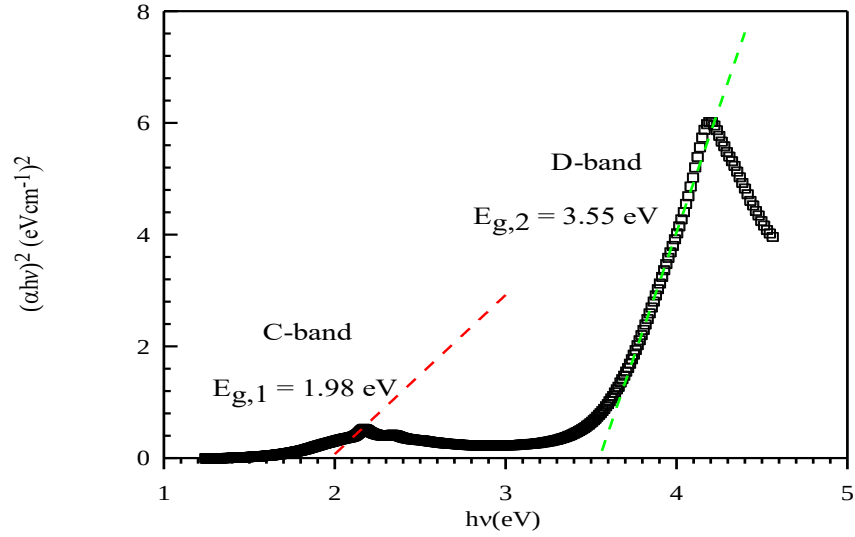
Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’te sıvı haldeki nigrosin çözletinin optik özellikleri incelenmiştir. Absorpsiyon-dalga boyu grafiğinde (Şekil 5.2), yaklaşık 297 nm civarında yüksek enerjili D-bandı ve 572 nm civarında daha düşük enerjili C-bandı gözlemlenmiştir. Bu bantlar, nigrosin molekülünün $\pi-\pi^*$ ve $n-\pi^*$ geçişlerine işaret

etmektedir. Şekil 5.3'teki Tauc grafiğinde ise, optik yasak enerji değerleri $E_{g1} = 1.98$ eV (C-band) ve $E_{g2} = 3.55$ eV (D-band) olarak belirlenmiştir. Bu iki farklı band gap değeri, nigrosinin hem geniş spektrumda ışık absorpsiyonu yapabildiğini hem de yüksek enerji bandıyla yalıtkan özellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bu optik veriler, Al/Nigrosin/n-Si diyotlarda gözlemlenen elektriksel özellik değişimlerini (artmış şönt direnci, azalmış kaçak akım) desteklemekte ve nigrosinin yarı iletken ara yüzey özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bu değerler literatürde Güllü, (2018); elde ettiği Al/Nigrosin/p-Si diyotunun UV-Vis yöntemiyle bulunan yasak enerji değerleri 1,42 eV (Q bandı) ve 2,94 (B bandı) değerleriyle uyum içindedir. Sıvı fazdaki değerlerle kıyaslandığında, katı halde bant aralıklarının daha düşük olduğu ve spektral kaymaların meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, moleküller arası $\pi-\pi^*$ etkileşimlerin artışı ile açıklanmakta ve batokromik kayma (kırmızıya kayma) olarak tanımlanmaktadır.

Benzer şekilde, konjuge polimerlerin optik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda da sıvıdan katı faza geçişte UV-Vis absorpsiyon ve floresans spektrumlarında kırmızıya kayma gözlemlendiği bildirilmiştir. İnce film halinde, polimer zincirlerinin birbirine daha yakın konumlanması sonucu $\pi-\pi$ etkileşimlerinin ve konjugasyon uzunluğunun artması, enerji seviyeleri arasındaki farkın azalmasına neden olmaktadır. Bu durum daha uzun dalga boylarında absorpsiyon ve emisyonla sonuçlanmaktadır (Manjunatha et al., 2009). Nigrosin'in sıvı ve katı fazlarda gösterdiği optik davranışlar, bu maddenin Al/Nigrosin/n-Si yapılarında fotodiyot performansını doğrudan etkileyen optoelektronik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle optik bant aralığındaki bu varyasyonlar, cihaz performansı açısından dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir.



Şekil 5.2 Sıvı haldeki nigrosin çözeltisinin absorpsiyon-dalgaboyu grafiği



Şekil 5.3 Sıvı haldeki nigrosin çözeltisinin $(\alpha hv)^2-hv$ grafiği

5.3. Al/Nigrosin/n-Si Diyotunun Akım-Gerilim (I-V) Özelliklerinin Değerlendirilmesi

5.3.1. I-V yöntemi ile diyot parametrelerinin hesaplanması

Al/Nigrosin/n-Si schottky diyotunun elektriksel özelliklerini anlamak ve performansını iyileştirmek için engel yüksekliği ile ilgili hesaplamalar ve analizler yapılarak diyotun işlevsellik ve verimlilik açısından doğru şekilde değerlendirilmesi sağlanmaktadır.

Diyotun idealite faktörünün belirlenmesi, elde edilen I-V deneysel verileri termoiyonik emisyon modeli ile değerlendirilerek incelenmektedir (Rhoderick & Williams, 1988);

$$I = I_0 \exp \left(\left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (5.1)$$

İdealite faktörü (n) için 5.1'deki denklemin her iki tarafın ln ini alıp V ye göre diferansiyeli alındığında;

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (5.2)$$

İdealite faktörü (n), bir diyodun ideal davranıştan sapmalarını gösteren boyutsuz bir parametre olup, ideal bir diyodun bu değeri yaklaşık olarak 1 olmalıdır. Diyodun doğru besleme bölgesindeki lineer kısmına uygulanan doğrusal fitleme işlemi ile elde edilen doğrunun eğimi ve y-eksenini kestiği noktadaki doyma akımı kullanılarak, termiyonik emisyon teorisi çerçevesinde idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmaktadır (Yıldırım & Durumlu, 2017).

$\ln(I)$ -V grafiğinin doğrusal kısmına uygulanan doğrusal uyarlamanın gerilim değeri sıfır ($V=0$) olduğunda, doğrusal doğrunun düşey eksenini kestiği nokta, diyotun doyma akımı (I_0) olarak kabul edilir. Bu noktada, I_0 değeri, diyotun ters yöndeki akım davranışını gösteren parametre olup, termiyonik emisyon teorisine dayalı olarak hesaplanan kritik bir değeri temsil etmektedir.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \quad (5.3)$$

Şeklinde dir. Buradan engel yüksekliği Φ_B ;

$$\Phi_B = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (5.4)$$

şeklinde bulunur. Denklem 5.4’de, A yüzey alanı; A* Richardson sabitidir (n-Si için $A^*=112 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$).

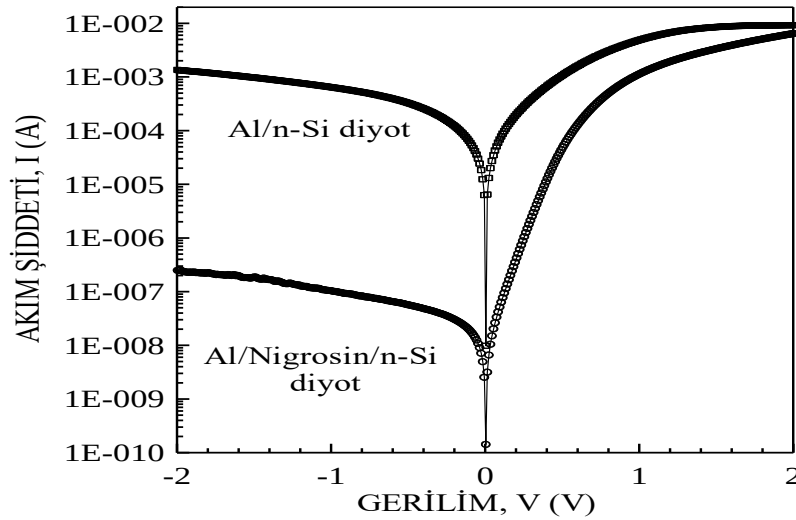
Schottky diyotlarında seri direnç, diyotun performansını belirleyen bir etkidir. Seri direnç, dikkate alınmadığında gerilim-akım davranışını bozarak, daha fazla güç kaybı ve ısınma gibi olumsuz durumlar oluşturmaktadır. Bu nedenle, Schottky diyotlarını tasarlarken seri direnç dikkate alınmaktadır. R_s ; diyotun seri direnci olmak üzere 5.1 denkleminde;

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (5.5)$$

şeklinde yazılır.

Akım- Gerilim hesaplamaları, “KEITHLEY 4200 SCS” cihazı ile ± 2 V gerilim aralığında, 0,01 V adımlarla alınmıştır. Elde edilen veriler, Al/Nigrosin/n-Si diyotunun doğrultucu özellik gösterdiğini ve ileri yönde exponansiyel akım artışı, ters yönde ise düşük sızıntı akımı sergilediğini ortaya koymuştur. Bu durum, yapının Schottky diyot davranışı sergilediğini ve organik ara tabaka olarak kullanılan Nigrosin’in elektronik özellikleri iyileştirdiğini göstermektedir.

Al/n-Si yapısında elde edilen $n = 3,83$ ve $\Phi_B = 0,564$ eV iken, Al/Nigrosin/n-Si diyotunda $n = 2,03$ ve $\Phi_B = 0,770$ eV olarak hesaplanmıştır. Nigrosin tabakasının engel yüksekliğini artırması, taşıyıcıların potansiyel bariyeri geçmesini zorlaştırarak cihazın elektronik performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Aynı zamanda idealite faktöründeki azalma, yapının daha ideal bir Schottky davranışı gösterdiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, idealite faktörünün 1’den yüksek çıkması, ara yüzeydeki yapısal bozukluklar, ara yüzey dipolleri ya da üretim sürecine bağlı kusurlardan kaynaklanabilmektedir. Ölçülen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri, Gökşen vd. (2019) tarafından Ag/n-Si/PCDTBT:PC61BM/Au yapısı için ve Aydoğan vd. (2005) tarafından Sn/PPy/n-Si yapısı için rapor edilen değerlere yakın bir uyum göstermektedir. Bu durum literatürde de belirtilmiş ve benzer çalışmalarla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (Güllü vd., 2010).



Şekil 5.4 Al/n-Si ve Al/Nigrosin/n-Si diyotlarının akım-gerilim karakteristikleri grafiği

Al/n-Si diyotun akım gerilim karakteristiğini incelediğimizde standart bir Schottky diyot davranışını gösterir. Negatif gerilim altında diyot neredeyse iletken değilken, pozitif gerilimde hızla artan bir akım sergiler. Bu diyotun yönlü iletim özelliğini

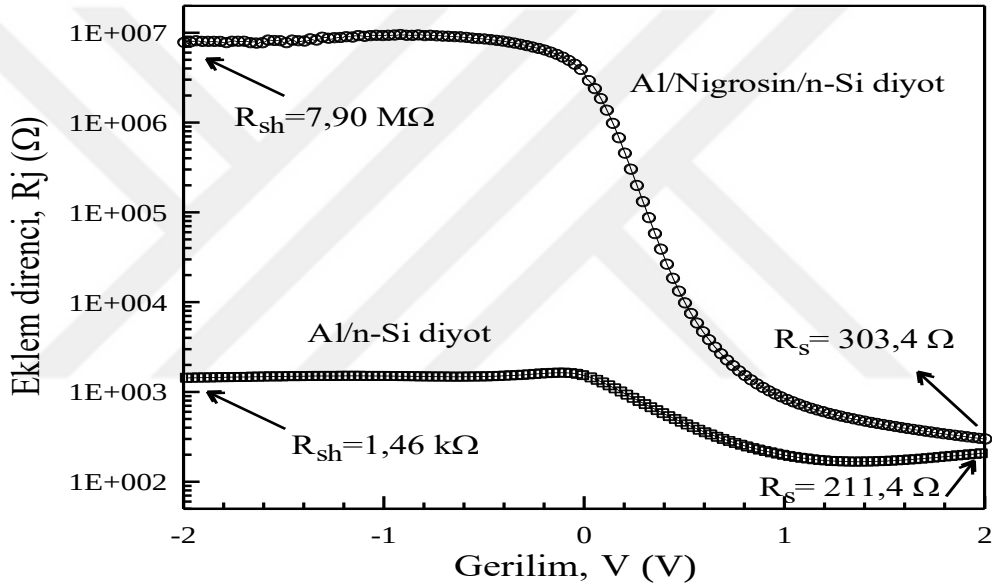
gösterir. İdealite faktörü (n) ve bariyer yüksekliği (Φ_B) bir diyotun özelliğini anlayabilmemiz için en önemli parametrelerdir.

Tablo 5.1 Literatürdeki bazı metal/organik/inorganik diyotlara ait parametreler

Diyot Yapısı	I-V		H(I)-I		dV/d(lnI)-I		F(V)-V	
	N	Φ_B (eV)	Φ_B (eV)	R_s	n	R_s	Φ_B (eV)	R_s
Al/Nigrosin/p-Si (Güllü 2018)	2,369	0,797	0,78	164,4k Ω		294,5k Ω	0,811	689,2k Ω
Au/PTCDA/n-Si (Aydemir 2019)	1,23	0,60	-	-	-	-	-	-
Al/1,4-m-diamin/n-si (Gözen 2017)	1,13	0,82	0,82	2,4k Ω	1,14	0,4k Ω	0,83	72k Ω
Ag/n-Si/PCDTBT:PC ₆₁ BM /Au (Gökşen vd. 2019)	1,87	0,226	-	-	-	-	-	-
Ag/chitin/n-Si (Akkılıç vd. 2006)	1,553	0,959	-	-	-	-	-	-
Al/Coronene/n-Si (Kaygusuz 2019)	5,41	0,6654	0,1706 47	11,29 Ω	1,69	11,29k Ω	0,2811	44,4281 Ω
Au/PVA:Zn/n-Si (Aydemir vd. 2013)	1,41	0,837		104,97 Ω	-	76,29 Ω	0,87	94,67 Ω
Ni/Fast Green FCF/n-Si/Al (Çaldıran vd. 2016)	1,11	0,69	0,51	0,75k Ω	2,47	0,76k Ω	0,79	0,41k Ω
Sn/PPy/n-Si (Aydoğan vd. 2005)	2,95	0,71	0,696	192,637 Ω	2,79	200,351 Ω	-	-
Al/OG/n-Si/AuSb (Güllü vd. 2008)	4,35	0,86	0,84	306,8k Ω	4,19	398,8k Ω	1,02	154,3k Ω
Au/n-Si/Pyrene(C ₁₆ H ₁₀)/Au (Turmuş 2014)	1,12	0,716	0,86	301 Ω	1,33	334 Ω	0,75	180 Ω
Ag/Anilin mavisi/n-Si/Al (Erçarıkcı 2014)	3,433	0,574	-	-	3,461	151,854	0,769	-
Al/Nigrosin/n-Si (Bu çalışma)	2,03	0,770	174,27	0,748	188,54	2,815	0,841	817,06 Ω

Al/Nigrosin/n-Si diyotunun I-V analizi, Tablo 5.1'deki diğer organik diyot yapılarıyla kıyaslandığında yüksek bir idealite faktörü sergilediğini göstermektedir. Bu durum, arayüzey tuzaklarının belirgin olduğunu ve taşıyıcı taşınma mekanizmasının heterojen bir etkileşim içerdiğini göstermektedir. Aynı zamanda, diyotun seri direnç değeri oldukça yüksek olup, bu da metal-organik arayüzündeki kontak dirençlerinin artmasına neden olabilir. Buna karşılık, Al/1,4-m-diamin/n-Si ve Au/n-Si/Pyrene(C₁₆H₁₀)/Au diyotları, daha düşük idealite faktörü ve seri direnç değerleriyle, taşıyıcı taşınma mekanizmasını daha verimli bir şekilde desteklemekte ve daha ideal elektriksel performans sergilemektedir.

Al/Nigrosin/n-Si ve Al/n-Si diyotlarının eklem direnci Şekil 5.5'te verilmiştir. Grafikte Al/Nigrosin/n-Si ve Al/n-Si diyotlarının eklem direnci-gerilim ilişkisi gösterilmiştir. Al/Nigrosin/n-Si diyotunun şönt direnci ($7,90 \text{ M}\Omega$), Al/n-Si diyotuna ($1,46 \text{ k}\Omega$) göre çok daha yüksektir, bu da ters akım kaçaklarının Nigrosin ile azaldığını gösterir. Ancak, Al/Nigrosin/n-Si diyotunun seri direnci ($303,4 \Omega$), Al/n-Si diyotunkinden ($211,4 \Omega$) daha yüksektir; bu da ileri yönde akım artışının daha yavaş olduğunu ve eğrinin daha dik yükseldiğini gösterir. Sonuç olarak Nigrosin, diyotun hem ters hem de ileri yöndeki iletim özelliklerini değiştirerek daha düşük iletkenlik ve daha belirgin doğrultucu davranış sağlamıştır.



Şekil 5.5 Al/n-Si ve Al/Nigrosin/n-Si diyotun eklem direnci gerilim grafiği

5.3.2. Cheung fonksiyonu

Metal yarıiletken diyotların diyotun doyma akımı (I_0), engel yüksekliği (Φ_b), seri direnç (R_s) gibi parametreleri hesaplamak için kullanılan Cheung fonksiyonu etkili bir yöntemdir. Bu yöntem diyotların işlevini daha doğru şekilde modellemeye ve elektriksel özelliklerini uygun hale getirmeye yardımcı olur. Cheung yöntemine göre, Termionik emisyon teorisi ile bulunan akım yoğunluğu yük bölgesi alanı ile çarpılarak elde edilen diyotun toplam akımı;

$$I_{s \rightarrow m} = \left(A^* T^2 \exp \left(-\frac{e\Phi_{bn}}{kT} \right) \right) \left(\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right) \quad (5.6)$$

$$I = A \cdot J = AA^* T^2 \exp \left(-\frac{e\Phi_{bn}}{kT} \right) \left(\exp \left(\frac{eV}{kT} - 1 \right) \right) \quad (5.7)$$

olarak hesaplanır. Denklemden, $eV \gg 3kT$ olduğu için denklemden 1 terimi ihmal edilebilir. Ancak, sistemdeki uygulanan potansiyelin tamamı arındırılmış bölgede düşmediğinden, ideal diyot modelinden sapmalar meydana gelir. Bu sapmaları hesaba katabilmek için, birimi olmayan ve idealite faktörü olarak adlandırılan n sabiti kullanılır. Bu durumda, akım denklemi şu şekilde ifade edilir;

$$I_n = AA^* n T^2 \exp \left(-\frac{e\Phi_{bn}}{kT} \right) \left(\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) \right) \quad (5.8)$$

Seri direnç (R_s) etkisiyle, diyota uygulanan V gerilimi bir miktar azalmaya uğrayarak IR_s kadar düşer. Bu nedenle diyot üzerindeki gerçek gerilim $V - IR_s$ şeklinde tanımlanır ve bu durum, akım denklemine doğrudan yansır.

$$I_n = A \cdot J = AA^* n T^2 \exp \left(-\frac{e\Phi}{kT} \right) \left(\exp \left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right) \right) \quad (5.9)$$

Bu denklemin doğal logaritması alındığı zaman;

$$V = \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I_n}{AA^* T^2} \right) + n\Phi_{bn} + I \cdot R_s \quad (5.10)$$

Eşitliği oluşur. Bu eşitliğin $\ln I$ 'ya göre türevi alınır;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + I \cdot R_s \quad (5.11)$$

İfadesi elde edilir. Bu eşitlikten, $dV/d(\ln I)$ - I eğrisi çizildiğinde bir doğru elde edileceği sonucuna varılır. Bu lineer çizginin eğimi, seri direnç R_s ' yi ve düşey koordinatta kesiştiği nokta ise idealite faktörü n 'yi verir (Cheung, 1986).

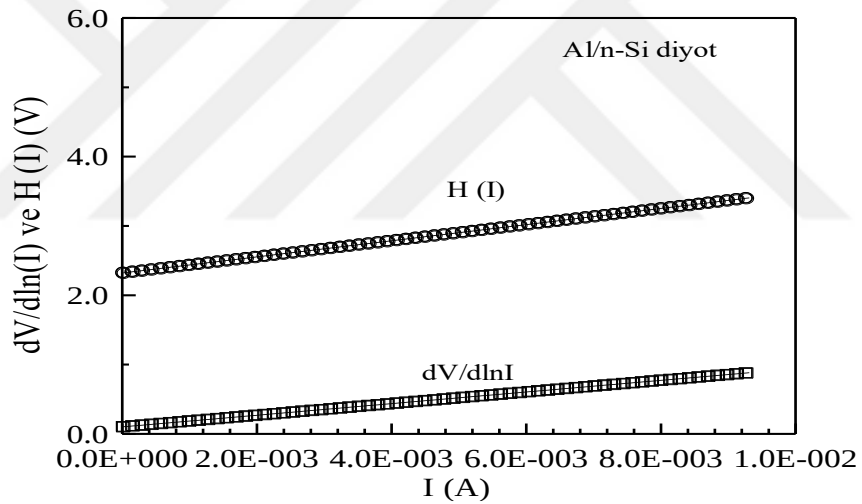
(5.9) eşitliği kullanılarak schottky diyotun engel yüksekliği (Φ_B) ;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{A A^* T^2} \right) \quad (5.12)$$

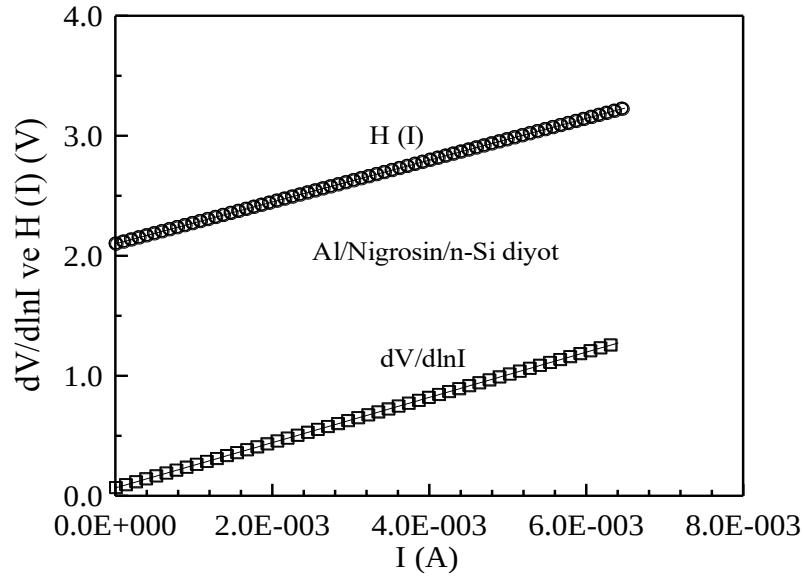
Bu şekilde ifade edilen denklem $H(I)$ fonksiyonu tanımlanabilir. Bu durumda, bariyer yüksekliği hesaplamak için (5.10) ve (5.11) eşitlikleri kullanılabilir.

$$H(I) = n\Phi_{bn} + I.R_s \quad (5.13)$$

İfadesi elde edilir. (5.13) eşitliğinin $H(I)$ - I eğrisi çizildiğinde, yine bir lineer çizgi elde edilecektir. Bu doğrusal grafiğinin eğimi R_s değerine karşılık gelir, $H(I)$ eksenine olan kesişimi ise Φ_{bn} değerini verir.



Şekil 5.6 Al/n-Si kontrol diyot yapısına ait Cheung fonksiyonu eğrileri



Şekil 5.7 Al/Nigrosin/n-Si/Al MIS yapısına ait Cheung fonksiyonu eğrileri

Şekil 5.7 ve 5.8’de Al/n-Si ve Al/Nigrosin/n-Si diyotlarının $dV/d\ln I$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri gösterilmektedir. Bu diyotlar için Cheung ve Cheung Yöntemi kullanılarak diyotun karakteristiklerinin daha ayrıntılı analizi yapılabiliriz. Özellikle $H(I)$ eğrisinin çizilmesi ve $dV/d(\ln I)$ eğrisinin oluşturulması, diyotun serisi direnç (R_s) ve idealite faktörü (n) değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntemle elde edilen lineer eğrinin eğimi, serisi direnç (R_s) yi verirken, bu eğrinin $H(I)$ eksenini kestiği nokta, potansiyel engel (Φ_B) değerini verir. Bu analiz yöntemi, diyotun elektriksel performansını daha doğru şekilde belirlemeyi sağlar ve özellikle Al/n-Si diyotu ile Al/Nigrosin/n-Si diyot arasındaki farkların anlaşılmasında faydalıdır. Nigrosin katkısının etkisiyle diyotun elektriksel özellikleri değişmiş ve daha yüksek direnç gözlemlenmiştir.

Cheung yöntemiyle yapılan analizlere göre, Al/n-Si diyot için $dv/d(\ln I)$ -I grafiğinden elde edilen $n=4,263$, $R_s=83,90 \Omega$; $H(I)$ -I grafiğinden ise $\Phi_B=0,547$ eV ve $R_s=16,41 \Omega$ olarak hesaplanmıştır. Aynı analiz Al/Nigrosin/n-Si diyot için yapıldığında, $dv/d(\ln I)$ -I grafiğinden $n=2,815$, $R_s=188,54\Omega$; $H(I)$ -I grafiğinden ise $\Phi_B=0,748$ eV ve $R_s=174,27 \Omega$ olarak elde edilmiştir. Cheung yöntemiyle bulunan parametreler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Cheung fonksiyonları yöntemiyle elde edilen parametreler, Al/Nigrosin/n-Si diyotunun idealite faktörünün ve seri direnç değerinin nispeten yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, metal-organik arayüz etkileşimlerinin taşıyıcı taşınma mekanizmasına etkisini yansıtmakta olup, Tablo 1’deki daha düşük idealite faktörüne ve seri direnç değerine sahip Al/1,4-m-diamin/n-Si ve Au/PTCDA/n-Si diyotları ile

karşılaştırıldığında, arayüzey tuzak yoğunluğunun belirgin bir şekilde arttığını göstermektedir.

5.3.3. Norde Fonksiyonu

Al/Nigrosin/n-Si schottky diyotunun karakteristik özelliğini daha iyi anlayabilmek için Norde fonksiyonu yöntemi etkili bir araçtır. Diyotun performansını değerlendirmek, özellikle voltaj-akım ilişkisini ve ideallik faktörünü daha iyi analiz edebiliriz. Norde tarafından, $n=1$ durumunda seri direnci ve bariyer yüksekliği tanımlayan bir $F(V)$ fonksiyonu geliştirmiştir. Norde fonksiyonu bariyer yüksekliği ve seri direncin sadece belirli sıcaklıkta yani sıcaklığın aynı olduğu durumlara uygulanır. Belirlenen bu sıcaklıkta I-V eğrisine ihtiyaç vardır (Norde, 1979).

Norde fonksiyonu;

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1}{A A^* T^2} \right) \quad (5.14)$$

şeklindedir. γ sabit boyutsuz bir değerdir.

Diyot yapıları için seri direnç R_s ile ifade edilir ve denklem 5.5'deki akım denklemi $V_d > kT/q$ kabul edilip gerekli işlemler yapıldığında;

$$F(V) = \Phi_b + I R_s - \frac{1}{\gamma} V \dots \quad (5.15)$$

Denklem 5.15' te belirtildiği gibi yazılabilir. Seri direnç sıfır $R_s=0$ olduğunda ideal durum için, $F(V)$ eğimi 1/2 olan düz bir çizgiyi verir. Böylece $F(V)$ ekseniiyle kesiştiği nokta bariyer yüksekliğini (Φ_b) verir. Bu durumda bir direnç için;

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{V}{R A A^* T^2} \right) \quad (5.16)$$

Şeklinde ifade edilir.

$$\frac{dF}{dV} = R_s \left(\frac{dI}{dV} \right) - \frac{1}{2} \quad (5.17)$$

Yüksek potansiyeller için $\frac{dF}{dV} = \frac{1}{2}$ ye doğrusal bir çizgiye yaklaşacaktır. Akım denklemi olan denklem 5.5'in diferansiyeli alındığında;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left(1 + R_s \left(\frac{dI}{dV_d} \right) \right)^{-1} \quad (5.18)$$

İşlemler devam ettirildiğinde;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} (I_s \exp(\beta V_d)) = \beta I \quad (5.19)$$

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\beta R_s}{1 + \beta R_s I} - \frac{1}{2} \quad (5.20)$$

$F(V)$ fonksiyonunun en küçük değeri alındığında yani $\frac{dF}{dV} = 0$ denklemde yazıldığında I_0 akımını elde ederiz;

$$I_0 = \frac{1}{\beta R_s} = \frac{kT}{eR_s} \quad (5.21)$$

Böylece;

$$V_0 = I_0 R_s + V_d(I_0) = \frac{1}{\beta} + \ln \left(\frac{I_0}{A A^* T^2} \right) \quad (5.22)$$

Denklemini elde ederiz. $F(V)$ en küçük değeri olan;

$$F(V_0) = \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta} \left(\frac{I_0}{A A^* T^2} \right) \quad (5.23)$$

Bu denklemden, I_0 , V_0 ve $F(V_0)$ ' ın ölçülen değerler kullanılarak, Seri direnç değeri;

$$R_s = \frac{kT}{e I_0} \quad (5.24)$$

ve

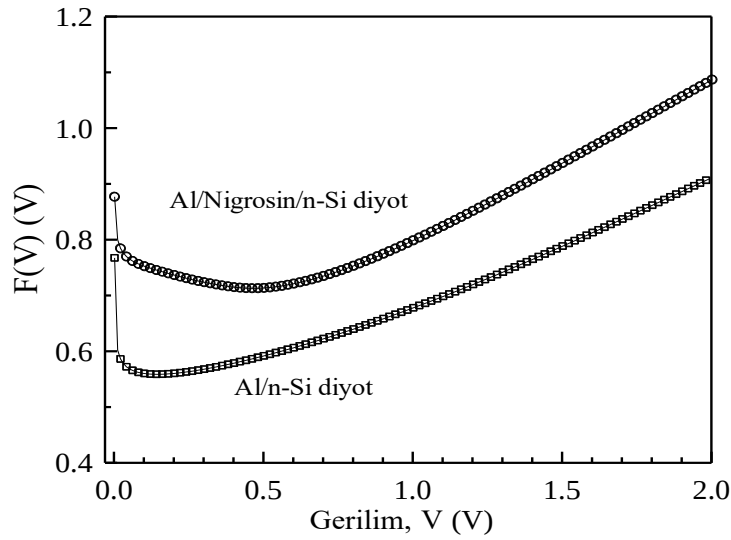
$$\Phi = F(V_d) + \frac{V_0}{2} - \frac{kT}{e} \quad (5.25)$$

Şeklinde potansiyel engel ifadesine ulaşılmaktadır. Bu metod seri direncin ideal ve küçük değerler için güncelliğini korumaktadır.

Norde yöntemiyle yapılan değerlendirmede, Al/n-Si diyot için $R_s = 35,04 \, \Omega$ ve $\Phi_B = 0,659 \, \text{eV}$, Al/Nigrosin/n-Si diyot için ise $R_s = 817,06 \, \Omega$ ve $\Phi_B = 0,841 \, \text{eV}$ olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen engel yüksekliği değerleri, Gözen (2017) tarafından Al/1,4-m-diamin/n-Si yapısı için ve Aydemir vd. (2013) tarafından Au/PVA:Zn/n-Si yapısı için bildirilen değerlerle tutarlılık göstermektedir.

Norde fonksiyonları yöntemiyle hesaplanan parametreler, Al/Nigrosin/n-Si diyotunun bariyer yüksekliğinin diğer yöntemlerle elde edilen değerlere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, diyotun seri direnç değeri oldukça yüksek olup, arayüzey etkileşimlerinin kontak direnci üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, Tablo 1'deki Al/OG/n-Si/AuSb diyotu daha yüksek bir bariyer yüksekliği sunarken, Au/n-Si/Pyrene(C₁₆H₁₀)/Au ve Al/PDI/ITO gibi diyotlar daha düşük seri dirençleriyle, yük taşınmasını daha etkili bir şekilde desteklemektedir.

Cheung ve norde yöntemiyle elde edilen sonuçlar arasında farklar bulunmakta olup, bu durumun kullanılan analiz yöntemlerinin farklı gerilim bölgelerinde çalışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.8 Al/ Nigrosin /n-Si diyota ait F(V)-V değişimi

Al/n-Si diyot için şekil 5.8 incelendiğinde potansiyel engel, gerilim ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Al/Nigrosin/n-Si diyotunda ise, aynı gerilim aralığında daha yüksek F(V) değerleri gözlemlendiğinden Nigrosin'in diyotun elektriksel özelliklerini değiştirdiğini, özellikle potansiyel engel değerini artırdığını gösterir. Bu durum,

Nigrosin'in n-Si diyot yapısına eklenmesiyle, diyotun elektriksel engel yapısının değişmesine neden olmuştur.

Tablo 5.2 Dönel kaplama yöntemiyle üretilen Al/n-Si ve Al/Nigrosin/n-Si diyotlara ait I-V ölçümlerinden, Cheung ve Norde yöntemleri kullanılarak elde edilen elektronik parametreler

Diyotlar	Cheung				I-V		Norde	
	dV/d(lnI)-I		H(I)-I				F(V)-V	
	R _s (Ω)	n	R _s (Ω)	Φ _B (eV)	n	Φ _B (eV)	R _s (Ω)	Φ _B (eV)
Al/n-Si	83,90	4,263	116,41	0,547	3,83	0,564	35,04	0,569
Al/Nigrosin/n-Si	188,54	2,815	174,27	0,748	2,03	0,770	817,06	0,841

Tablo 5.2’de elde edilen diyot parametre sonuçlarına göre, Al/Nigrosin/n-Si yapısında idealite faktörünün düşmesi ve engel yüksekliğinin artması Nigrosin filminin diyotun taşıyıcı geçiş özelliklerini olumlu yönde etkilediğini gösterir. Böylece arayüzey kalitesinin iyileştiğini göstermektedir. Ayrıca seri direnç değerlerindeki artış, organik tabakanın elektriksel iletkenliğinin sınırlı olmasından kaynaklanabilir. Bu durum, yapının daha yüksek engel yüksekliği göstermesiyle birlikte, nigrosin tabakasının Schottky bariyer oluşumuna katkı sağladığını desteklemektedir.

5.3.4. Arayüzey durum yoğunluklarının hesaplanması

Arayüzey durum yoğunluğu yarıiletken malzemenin elektriksel ve optik özelliklerini belirleyici niteliktedir. Bu nedenle diyotlar için arayüzey durum yoğunluğunu hesaplanması gerekmektedir.

Metal-yarıiletken bağlantılarına, uygulanan potansiyel değeri ile idealite faktörü (n) aşağıda verilen denklem 5.26 ile hesaplanır (Card et al., 1971).

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i \left(\frac{\epsilon_s}{W_d} + qN_{ss} \right)} \quad (5.26)$$

Denklem 5.26’da ki arayüzey durum yoğunluğu yalnız bırakıldığında;

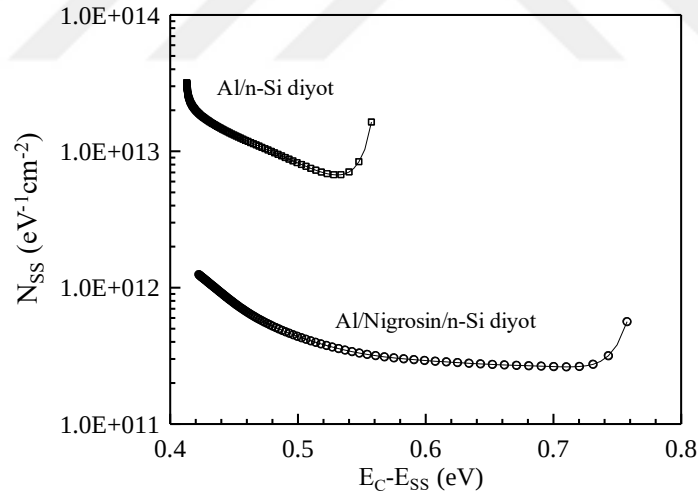
$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\varepsilon_i}{\delta(n(V) - 1)} - \frac{\varepsilon_s}{W_d} \right] \quad (5.27)$$

Denklem 5.27’de W deplasyon bölgesinin genişliği, δ arayüzey tabakasının kalınlığı, N_{ss} ara yüzey durum yoğunluğu, ε_i arayüzeyin dielektrik sabiti, ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir.

N-tipi yarıiletkenler için, arayüzey durum yoğunluğu hesaplama işlemi, aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir;

$$E_C - E_{ss} = q(\Phi_{bp} - V) \quad (5.28)$$

Buradaki E_{ss} , yarıiletken yüzeyinde valans bandının en yüksek enerji düzeyini temsil ederken; E_C , iletkenlik bandının en düşük enerji seviyesini göstermektedir. Uygulanan gerilime bağlı olarak değişkenlik gösteren etkin bariyer yüksekliği ise, Φ_{bp} sembolü ile ifade edilir (Durmuş, 2019).

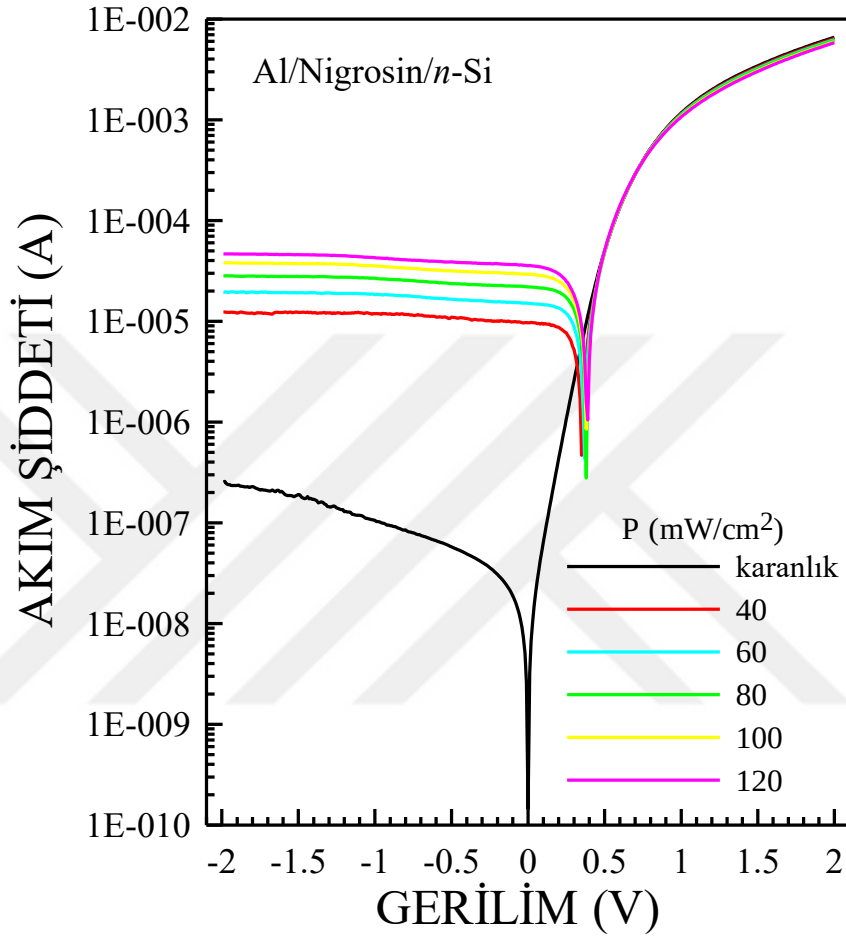


Şekil 5.9 Al/ Nigrosin /n-Si yapı için N_{ss} nin $E_C - E_{ss}$ ye karşı değişimi

N_{ss} yüzey durum yoğunluğu, $E_C - E_{ss}$ enerji farkını karşılaştıran bir grafikdir. Görüldüğü gibi, Al/Nigrosin/n-Si diyotundaki yüzey durum yoğunluğu, Al/n-Si diyotuna bakıldığında daha yüksektir. Bu durumda nigrosinin yarıiletken yüzeyine eklenmesinin, diyotun özelliklerini değiştirdiğini ve dolayısıyla elektriksel özellikleri etkileyebileceğini gösterir. Ayrıca, nigrosinin katkısı, taşıyıcı geçişlerinin hızını artırarak diyotların

performansını iyileştirebilir. Bu tür değişiklikler, özellikle yüzeyle ilgili etkileşimlerde önemli rol oynamaktadır.

5.4. Al/Nigrosin/n-Si Diyotunun Fotodiyot Karakteristikler



Şekil 5.10 Al/Nigrosin/n-Si diyotunun karanlık ve ışık altındaki I - V eğrileri

Bu grafik Al/Nigrosin/n-Si diyotunun karanlık ve ışık altındaki akım-gerilim davranışlarını göstermektedir. Al/Nigrosin/n-Si diyotu, karanlıkta tipik bir schottky diyot gibi davranırken ışık altında bakıldığında yüksek akım değerleri gösterdiğinden fotodiyot olarak kullanılabileceği veya ışık emici özelliklere sahip olduğunu gösterir.

$$R = \frac{I_{ph}}{P_s} \quad (5.26)$$

$$P_s(\%) = (I_{ph} - I_D)/I_D \times 100 \quad (5.27)$$

$$D^* = R\sqrt{S/2qI_D} \quad (5.28)$$

$$EQE(\%) = \frac{Rh c}{q \lambda} \quad (5.29)$$

$$NEP = \frac{\sqrt{S}}{D^*} \quad (5.30)$$

Denklemleri kullanılarak tablo 5.3’de ki veriler hesaplandı. Buradaki R diyotun pesponsivitesi, I_{ph} ışık akımı, P ışık yoğunluğu, P_s fotodiyotun ışığa duyarlılığı, I_D karanlık akım, D^* detektör verimliliğini, NEP gürültü eşdeğer gücü ve EQE ise verimliliği göstermektedir. D^* kararına süresi ile ilişkilidir ve detektörlerin fotonları algılama yeteneğini gösterir. Fotodiyotun algılama kapasitesini, düşük ışık seviyelerinde ne kadar hassas olduğunu belirten parametredir (Yıldırım ve Durumlu, 2017);(Yıldırım vd., 2023).

Tablo 5.3 Al/Nigrosin/n-Si fotodiyotunun ışık şiddetine bağlı fotovoltaiik parametreleri

P (mW/cm ²)	R (mA/W)	EQE (%)	P_s	D^* (Jones)	NEP (W/Hz ^{1/2})	Isc (μA)	Voc (V)
40	38,4	6,81	4,76E+03	1,19E+10	7,42E-12	9,67	0,35
60	40,9	7,25	7,62E+03	1,27E+10	6,95E-12	15,04	0,37
80	44,6	7,90	1,11E+04	1,39E+10	6,38E-12	21,96	0,38
100	48,3	8,57	1,50E+04	1,50E+10	5,89E-12	29,33	0,38
120	49,3	8,72	1,83E+04	1,53E+10	5,78E-12	35,65	0,39

Al/Nigrosin/n-Si fotodiyotunun ışık şiddetine bağlı fotoelektrik performansı incelendiğinde, ışık yoğunluğu arttıkça kısa devre akımının (I_{sc})=9,67 μA’den 35,65 μA’ye, fotoalgılama duyarlılığının (P_s)=4,76×10³’ten 1,83×10⁴’e yükseldiği görülmektedir. Fototepki(R)=38,4 mA/W’ten 49,3 mA/W’e, gürültü eşdeğer gücünün (NEP) 4,42×10⁻¹², den 5,78×10⁻¹²,ye, verimlilik (EQE) ise %6,81’den %8,72’ye artış göstermiştir. Açık devre voltajı (V_{oc})=0,35V’ten 0,39V’a hafif bir yükselme sergilemiştir.

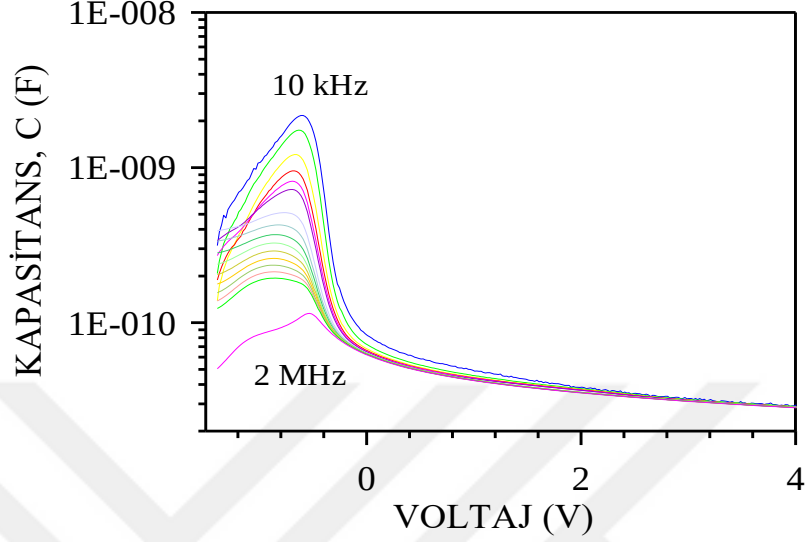
Yıldırım vd., (2023) yaptıkları çalışma incelendiğinde, 100 mW/cm² ışık şiddetinde her iki fotovoltaiik yapının bazı parametrelerinde benzer ve uyumlu sonuçlar gözlemlenmektedir. Her iki yapının açık devre gerilimi (V_{oc}) değerleri birbirine oldukça yakındır: Propolis/n-Si yapıda 320 mV olarak ölçmüşlerdir. Çalışmamızdaki Al/Nigrosin/n-Si yapı ise 380 mV olarak ölçülmüştür; bu da her iki yapının benzer voltaj

retme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, her iki yapının gürültü eşdeğer gücü (NEP) değerleri de benzer düzeydedir: Propolis için $4.00 \times 10^{-12} \text{ W/Hz}^{1/2}$, Nigrosin için ise $5.89 \times 10^{-12} \text{ W/Hz}^{1/2}$ olup aynı büyüklük mertebesindedir. Bu durum, iki yapının düşük gürültü performansı açısından birbiriyle uyumlu olduğunu gösterir. Bu benzerlikler, farklı malzemeler kullanılmasına rağmen bazı elektriksel ve optoelektronik özelliklerin rtőtėn ve yapılar arasında kısmi bir uyum sağlandığını ortaya koymaktadır.

Bu bulgularda genel olarak incelendiğinde, ışık yoğunluğu arttıkça tüm fotovoltatik parametrelerde bir iyileőme görülmektedir. Fotovoltatik güç (P) değerinin artışıyla birlikte verimlilik oranı da artmaktadır. Bu durum cihazın daha verimli çalıőtıėını gösterir. Işık duyarlılığı (S) ise ışık yoğunluğuyla doğru orantılı olarak artış gösteriyor. Bu, cihazın ışığa daha duyarlı hale geldiğini ve ışık şiddetinin artışıyla daha fazla enerji ürettiğini gösterir. Kısa devre akımındaki (I_{sc}) ve fototepkideki (R) artıőlar, yapının etkin foton absorpsiyonu ve taşıyıcı üretim kapasitesinin yüksek olduğunu göstermektedir. Açık devre voltajındaki (V_{oc}) hafif artış ise, yapının ışık altında daha kararlı bir potansiyel farkı oluőturabildiėini işaret etmektedir. Özellikle artan fototepki ve verimlilik (η) değerleri, Al/Nigrosin/n-Si yapısının düşük ışık őiddetlerinde dahi yüksek algılama performansı sergileyebileceğini ve optoelektronik aygıt uygulamaları için uygun bir aday olduğunu desteklemektedir.

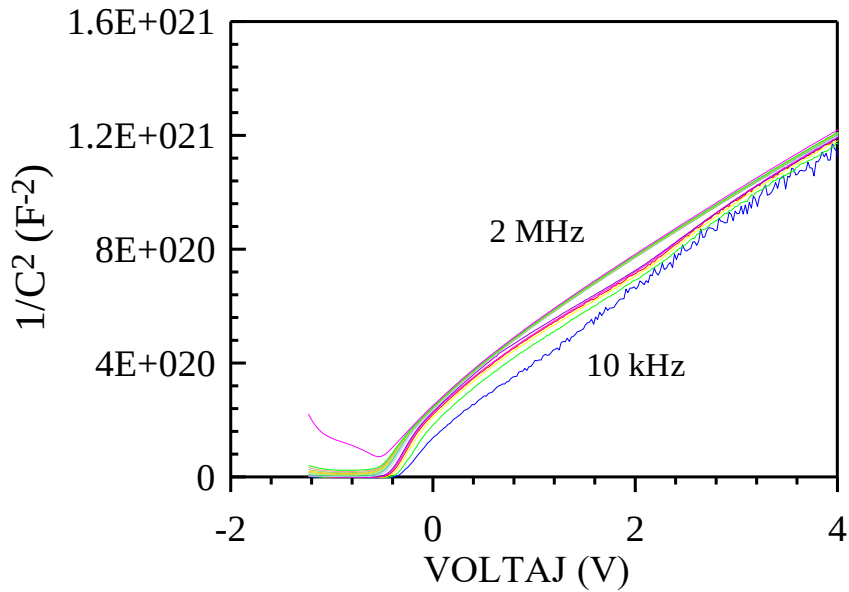
5.5. Al/Nigrosin/n-Si Diyotunun Kapasitans- Gerilim (C-V)

Karakteristikleri



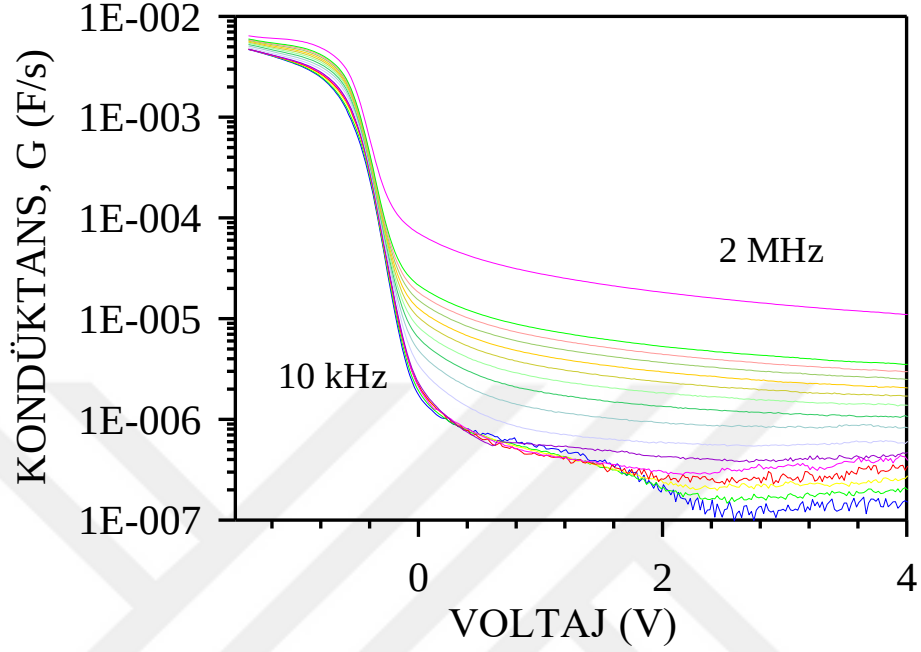
Şekil 5.11 Al/Nigrosin/n-Si diyotuna ait C-V grafiği

Kapasitansın, diyot üzerinde uygulanan gerilime bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmiştir. Özellikle düşük gerilimde, kapasitans değerleri yüksek olup, gerilim arttıkça düşmektedir. Kapasitansın frekansla birlikte nasıl değiştiği gözlemlenmektedir. 2 MHz'deki kapasitans değerlerinin, 10 kHz'deki değerlere göre daha düşük olduğu gözlemleniyor. Bu, yüksek frekansta taşıyıcıların daha hızlı hareket ettiği için daha az kapasitans olduğunu gösterir.



Şekil 5.12 Al/Nigrosin/n-Si diyotuna ait $1/C^2$ -V grafiği

Al/Nigrosin/n-Si diyotun $1/C^2$ -V grafiği yüzey durumları ile ilgili bilgi verir. $1/C^2$ 'nin gerilim ile lineer bir ilişki göstermesi, diyotun yüzey durumu yoğunluğu ve kapasitans ile ilgili daha fazla bilgi edinmemize yardımcı olur.



Şekil 5.13 Al/Nigrosin/n-Si Si diyotun Kondüktans-Gerilim (G-V) grafikleri

Diyotun iletkenlik ve elektriksel davranışlarını incelemek için G-V grafiğinden yararlanabiliriz.

Tablo 3'teki verileri elde etmek için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır;

$$C = A \left(\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d}{2} \right)^{1/2} \left(V_d - \frac{kT}{e} \right)^{1/2} \quad (5.29)$$

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (5.30)$$

$$N_d = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (5.31)$$

$$E_f = kT \ln \left(\frac{N_d}{N_c} \right) \quad (5.32)$$

$$V_D = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (5.33)$$

Burada C diyot kapasitesi, C^{-2} diyot kapasitesi, N_d donör konsantrasyonu, E_f fermi enerji seviyesini belirtmektedir.

Her bir frekans değeri için elde edilen bu doğruların eğilim çizgileri çizilmiş ve bu eğilim çizgilerin doğru denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen doğruların voltaj

ekseniyle kesişim noktasındaki değerleri yani kesişim voltajı (V_0) değerleri kullanılarak difüzyon potansiyeli (V_d) hesaplanmıştır. Ayrıca her bir doğrunun eğimi kullanılarak donör taşıyıcı yoğunluğu (N_d) değerleri incelenen her bir frekans için hesaplanmıştır.

Tablo 5.4 Farklı frekanslarda ölçülen C⁻²-V eğrilerinden hesaplanan diyot parametreleri

C-V				
Frekans (kHz)	$N_d (\times 10^{14} \text{ cm}^{-3})$	$E_f (\text{eV})$	$V_d (\text{V})$	$\Phi_B (\text{eV})$
10	7,488	0,272	0,595	0,566
20	7,918	0,271	0,901	0,715
40	8,037	0,271	1,02	0,773
60	8,057	0,271	1,064	0,795
80	8,061	0,271	1,086	0,806
100	8,199	0,27	1,154	0,838
200	8,184	0,271	1,236	0,879
300	8,184	0,271	1,242	0,882
400	8,177	0,27	1,246	0,884
500	8,169	0,27	1,248	0,885
600	8,166	0,27	1,252	0,887
700	8,165	0,27	1,255	0,889
800	8,165	0,27	1,258	0,89
900	8,163	0,27	1,261	0,891
1000	8,16	0,27	1,264	0,893
2000	8,125	0,27	1,272	0,897

Bu tablo, C-V ölçümlerinin farklı frekanslarla nasıl analiz edildiğini ve her frekans için elde edilen elektriksel parametrelerin nasıl değiştiğini göstermektedir.

Tablo 4’te, C-V grafikleri kullanılarak elde edilen parametrelerin frekansa bağılı değişimi gösterilmiştir. Verici taşıyıcı konsantrasyonu (N_d), 10 kHz’de $7,488 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ iken frekans arttıkça yükselmekte ve 200 kHz’den sonra sabitlenerek yaklaşık $8,16 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ seviyesinde kalmaktadır. Aynı şekilde difüzyon potansiyeli (V_d) değeri de frekansla birlikte artmakta; 10 kHz’de 0,595 V iken 2000 kHz’de 1,272 V değerine ulaşmaktadır. Engel yüksekliği (Φ_B) ise frekansa bağılı olarak belirgin bir artış göstermekte, 0,566 eV’dan başlayarak 0,897 eV’a kadar yükselmektedir. Bu durum, artan frekansla birlikte yapıdaki arayüz özelliklerinin daha iyi analiz edilebildiğini ve daha gerçekçi engel yüksekliği değerlerine ulaşıldığını göstermektedir. Ayrıca, enerji seviyesi (E_r) değerleri ise frekans boyunca yaklaşık sabit kalmış ve 0,270–0,272 eV arasında değişmiştir. Genel olarak, parametrelerdeki bu eğilimler yapıdaki arayüz durumlarının frekansa bağılı olarak daha iyi ortaya çıkarıldığını ve yüksek frekanslarda daha kararlı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, öncelikle toz haldeki nigrosin organik bileşiğinin yapısal ve sıvı haldeki nigrosin çözeltisinin optik özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Nigrosin tozunun XRD ölçümleri, materyalin amorf yapıda olduğunu göstermiştir. 2 θ açısında yaklaşık 22° civarında gözlemlenen geniş pik, Nigrosin moleküllerinin düzensiz dağıldığını ve kristal yapı oluşturmadığını işaret etmektedir. Benzer şekilde, Demiroğlu (2019) amorf yapıya sahip CuPc filmlerinin XRD spektrumlarında geniş bir tepe gözlemlemiştir. Bu sonuçlar, nigrosin organik bileşiğinin amorf özellikler taşıdığını doğrulamaktadır.

UV-Vis spektroskopisiyle yapılan optik analizlerde, nigrosin boyasının C bandında (572 nm) ve D bandında (297 nm) belirgin absorpsiyon pikleri gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu bantlar sırasıyla π - π^* ve n - π^* elektronik geçişleri ile ilişkilendirilmiştir. Nigrosin boyası, geniş bir optik band aralığına sahip olup, hem UV hem de görünür bölgelerde ışıkla etkileşime girebilmektedir. Özellikle, Nigrosin'in doğrudan optik bant aralığı ($E_{g1} = 1,98$ eV ve $E_{g2} = 3,55$ eV) belirlenmiştir, bu da materyalin fotovoltaiik sistemlerde ve ışık emici uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmanın ikinci adımında, Al/Nigrosin/n-Si yapısına sahip Schottky diyotun elektriksel karakterizasyonu I-V ölçümleri ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular, referans olarak kullanılan Al/n-Si yapısı ile karşılaştırılmıştır. I-V ölçümleri, "KEITHLEY 4200 SCS" cihazı ile ± 2 V gerilim aralığında, 0,02 V adımlarla alınmıştır. Elde edilen veriler, Al/Nigrosin/n-Si diyotunun doğrultucu özellik gösterdiğini ve ileri yönde exponansiyel akım artışı, ters yönde ise düşük sızıntı akımı sergilediğini ortaya koymuştur. Bu durum, yapının Schottky diyot davranışı sergilediğini ve organik ara tabaka olarak kullanılan Nigrosin'in elektronik özellikleri iyileştirdiğini göstermektedir. Al/n-Si yapısında elde edilen $n = 3,83$ ve $\Phi_B = 0,564$ eV iken, Al/Nigrosin/n-Si diyotunda $n = 2,03$ ve $\Phi_B = 0,770$ eV olarak hesaplanmıştır. Nigrosin katkısının engel yüksekliğini artırması, taşıyıcıların potansiyel bariyeri geçmesini zorlaştırarak cihazın elektronik

performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Aynı zamanda idealite faktöründeki azalma, yapının daha ideal bir Schottky davranışı gösterdiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, idealite faktörünün 1'den yüksek çıkması, ara yüzeydeki yapısal bozukluklar, ara yüzey dipolleri ya da üretim sürecine bağlı kusurlardan kaynaklanabilmektedir. Bu durum literatürde de belirtilmiş ve benzer çalışmalarla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (Güllü vd., 2010).

Cheung yöntemiyle yapılan analizlere göre, Al/n-Si diyet için $dv/d(\ln I)-I$ grafiğinden elde edilen $n=4,263$, $R_s=83,90\ \Omega$; $H(I)-I$ grafiğinden ise $\Phi_B=0,547\text{ eV}$ ve $R_s=16,41\ \Omega$ olarak hesaplanmıştır. Aynı analiz Al/Nigrosin/n-Si diyet için yapıldığında, $dv/d(\ln I)-I$ grafiğinden $n=2,815$, $R_s=188,54\ \Omega$; $H(I)-I$ grafiğinden ise $\Phi_B=0,748\text{ eV}$ ve $R_s=174,27\ \Omega$ olarak elde edilmiştir. Norde yöntemiyle yapılan değerlendirmede, Al/n-Si diyet için $R_s=35,04\ \Omega$ ve $\Phi_B=0,659\text{ eV}$, Al/Nigrosin/n-Si diyet için ise $R_s=817,06\ \Omega$ ve $\Phi_B=0,841\text{ eV}$ olarak belirlenmiştir. İki yöntemle elde edilen sonuçlar arasında farklar bulunmakta olup, bu durumun kullanılan analiz yöntemlerinin farklı gerilim bölgelerinde çalışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Nigrosin ara tabakasının, Al/Nigrosin/n-Si diyetunda arayüzey durum yoğunluğunu (N_{ss}) azaltarak taşıyıcı geçişini iyileştirdiği, dolayısıyla diyetun kararlılığını ve elektriksel performansını artırdığı anlaşılmıştır. Bu durum, Al/n-Si yapıya kıyasla daha düşük kaçak akım ve daha iyi doğrultucu özellikler sağlayan bir yapı ortaya koymuştur. Ters öngerilim altındaki düşük akım değerleri, Nigrosin katkısının ters yöndeki akım geçişini sınırlandırarak daha iyi bir diyet davranışı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, Tablo 3'de verilen veriler ışığında, Nigrosin katkılı yapının yüksek ışık duyarlılığı gösterdiği ve artan ışık yoğunluğuna karşı güçlü yanıt verdiği görülmüştür. Bu durum, Al/Nigrosin/n-Si yapısının yalnızca elektronik değil, aynı zamanda optoelektronik ve sensör uygulamaları açısından da önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Nigrosin organik ara tabakasının Al/n-Si Schottky yapısına entegrasyonu, cihazın idealite faktörünü düşürmüş, engel yüksekliğini artırmış ve ters yönde sızıntı akımını azaltarak daha uygun bir doğrultucu davranış kazandırmıştır. Yapılan Cheung ve Norde analizleri, diyetun seri direnç ve geçiş bariyeri gibi önemli elektriksel parametrelerinin belirlenmesini sağlamış ve bu yapıların performans optimizasyonu için dikkate alınması gereken temel faktörleri ortaya koymuştur. Nigrosin ara katmanı sadece elektriksel performansı değil, aynı zamanda optoelektronik davranışı da iyileştirmiştir. Tablo 3'de sunulan verilerden, Al/Nigrosin/n-Si yapının artan ışık yoğunluğuna karşılık olarak ters

yönde akan akımın belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, fotodiyot davranışının açık bir göstergesidir. Fotodiyotun ışık altında akım tepkisinin hızlı ve kararlı bir şekilde artması, yüksek fotoalgılama duyarlılığına işaret etmektedir. Özellikle karanlık ortamda düşük sızıntı akımı ve ışık altında yüksek ters akım değerleri, bu yapının fotodetektör ve optoelektronik sensör uygulamaları için uygun bir aday olduğunu göstermektedir. Nigrosin katkısı, yarıiletken ve metal arasında daha kontrollü bir arayüzey geçişi oluşturarak, ışığa duyarlılığı artırmış ve arayüzey tuzak yoğunluğunu azaltmıştır. Böylece diyotun kararlılığı, hız tepkisi ve genel fotoelektrik performansı önemli ölçüde artmıştır.

C–V analizleri ile de yapının kapasitans davranışı detaylı olarak incelenmiştir. Uygulanan gerilime bağlı olarak kapasitans değerlerinin düşük frekanslarda daha yüksek, yüksek frekanslarda ise daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek frekanslarda taşıyıcıların arayüzey tuzaklarına cevap verememesi nedeniyle kapasitansın azalmasına bağlanmıştır. $1/C^2$ –V grafiklerinin lineerliği, Schottky yapının düzgün bir arayüzeye sahip olduğunu ve yüzey durumlarının nispeten düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 4’te sunulan verilere göre, 10 kHz ile 2 MHz arasında artan frekansla birlikte, diyotun donör taşıyıcı yoğunluğu (N_d) değerinin yaklaşık sabit kaldığı, fakat difüzyon potansiyeli (V_d) ve engel yüksekliği (Φ_B) değerlerinin frekansla arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle, 10 kHz’de $\Phi_B = 0,566$ eV iken, 2 MHz’de bu değer 0,897 eV’ye ulaşmıştır. Bu artış, düşük frekanslarda yüzey durumlarının kapasitansa katkıda bulunduğunu, ancak frekans arttıkça bu etkilerin azaldığını ve daha gerçek engel yüksekliği değerlerine ulaşıldığını göstermektedir. Hesaplamalarda kullanılan $1/C^2$ –V eğrilerinin eğimleri ve voltaj eksenini kestikleri noktalar üzerinden, donör yoğunluğu (N_d), difüzyon potansiyeli (V_d) ve Fermi seviyesi (E_f) gibi parametreler belirlenmiştir. Kullanılan denklemlerle yapılan analizler, C–V karakterizasyonunun yapının içsel özelliklerini ortaya koymada etkili olduğunu kanıtlamıştır.

Ayrıca G–V karakteristikleri de yapının iletkenlik davranışını analiz etmede kullanılmış ve özellikle arayüzey geçiş bölgesinde elektriksel değişimlerin gözlemlenmesine olanak tanımıştır.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında yapılan kapsamlı yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyon çalışmaları, Nigrosin organik katmanının Al/n-Si Schottky diyot yapısına entegrasyonunun cihaz performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Nigrosin’in amorf yapısı ve geniş optik soğurma özellikleri, hem elektronik hem de

optoelektronik uygulamalar için uygun bir ara tabaka malzemesi olduğunu göstermiştir. Al/Nigrosin/n-Si diyotunun daha yüksek engel yüksekliği, daha düşük sızıntı akımı, daha ideal Schottky davranışı ve yüksek ışık duyarlılığı ile karakterize edilmesi; bu yapının fotodetektörler, ışık algılayıcılar ve diğer optoelektronik aygıtlar için güçlü bir aday olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, nigrosin gibi uygun organik malzemelerin, geleneksel yarıiletken cihazların performansını geliştirmek amacıyla başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermekte ve gelecekteki çalışmalar için değerli bir temel oluşturmaktadır.

6.2 Öneriler

Bu çalışmada Al/Nigrosin/n-Si yapılı Schottky diyotların elektriksel özellikleri detaylı olarak incelenmiş ve Nigrosin organik katmanının cihaz performansına katkıları ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular doğrultusunda, gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutabilecek bazı öneriler aşağıda sıralanmıştır:

1. Farklı organik boyaların karşılaştırmalı incelenmesi: Nigrosin dışında farklı moleküler yapıya sahip organik boyaların (örneğin Erythrosin B, Perylene, Alizarin, vb.) Al/n-Si yapısına ara tabaka olarak entegre edilmesiyle karşılaştırmalı çalışmalar yapılabilir. Bu sayede, organik katmanın yapısal özellikleri ile diyot performansı arasındaki ilişkiler daha detaylı anlaşılabilir.

2. Film kalınlığının ve kaplama parametrelerinin etkisi: Nigrosin katmanının spin kaplama parametreleri (dönme hızı, süre, çözeltinin konsantrasyonu) değiştirilerek farklı kalınlıklarda filmler elde edilebilir ve bu parametrelerin elektriksel karakteristikler üzerindeki etkisi sistematik olarak araştırılabilir.

3. Stabilite ve yaşlanma testleri: Diyotların uzun vadeli kararlılığı, nem ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere karşı dayanıklılığı değerlendirilerek, Nigrosin tabakasının cihaz ömrüne etkisi belirlenebilir.

4. Spektral yanıt ve zaman çözünürlüklü fotoyanıt çalışmaları: Fotodiyot yapısının farklı dalga boylarında verdiği yanıt detaylandırılarak spektral algılama kabiliyeti ortaya konabilir. Ayrıca ışığa karşı tepkime süresi incelenerek hızlı anahtarlama veya algılama uygulamaları için uygunluk değerlendirilebilir.

5. Alternatif yarıiletken alt tabakalarla uygulamalar: n-Si yerine farklı tipte yarıiletken alt tabakalar (örneğin p-Si, GaAs gibi) kullanılarak benzer yapıların

performansı araştırılabilir. Böylece Nigrosin'in farklı yarıiletkenlerle etkileşimi daha geniş kapsamda değerlendirilebilir.

6. Arayüzey karakterizasyonu için ileri tekniklerin kullanılması: Arayüzeydeki durum yoğunluğu ve tuzakların daha detaylı belirlenebilmesi amacıyla Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS), X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) veya Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) gibi ileri analiz tekniklerinden faydalanılabilir.

7. Çoklu katman yapılarının oluşturulması: Nigrosin tabakasının üzerine veya altına başka fonksiyonel organik/inorganik katmanlar eklenerek çok katmanlı heteroyapılar üretilebilir ve bu yapıların fotodetektör, güneş pili veya sensör olarak performansı test edilebilir. Bu öneriler doğrultusunda yapılacak ileri çalışmalar, Nigrosin ve benzeri organik bileşiklerin yarıiletken teknolojilerinde kullanım potansiyelini daha net ortaya koyacak ve yeni nesil optoelektronik aygıtların geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Akkılıç, K., Aydın, M. E., Uzun, I., & Kılıçoğlu, T. (2006). The calculation of electronic parameters of an Ag/chitin/n-Si Schottky barrier diode. *Synthetic metals*, 156(14-15), 958-962.
- Akkılıç, K., Ocak, Y. S., Kılıçoğlu, T., İlhan, S., & Temel, H. A. M. D. İ. (2010). Calculation of current-voltage characteristics of a Cu (II) complex/n-Si/AuSb Schottky diode. *Current Applied Physics*, 10(1), 337-341.
- Appenzeller, J., Radosavljević, M., Knoch, J., & Avouris, P. (2004). Tunneling versus thermionic emission in one-dimensional semiconductors. *Physical review letters*, 92(4), 048301.
- Arkhipov, V. I., Fishchuk, I. I., Kadashchuk, A., & Bäessler, H. (2005). Charge transport in disordered organic semiconductors. *Photophysics of Molecular Materials: From single molecules to single crystals*, 261-366.
- Arkhipov, V. I., Emelianova, E. V., Tak, Y. H., & Bäessler, H. (1998). Charge injection into light-emitting diodes: Theory and experiment. *Journal of Applied Physics*, 84(2), 848-856.
- Arsel, I., Turmuş, M., Pakma, O., Özaydin, C., & Güllü, Ö. (2017). Photoelectric and photocapacitance characteristics of Au/pyrene/N-Si MIS structures. *Journal of Non-Oxide Glasses Vol*, 9(2), 33-46.
- Ata, D., Altındal, Ş., & Balbaşı, M. (2025). On an investigation of optoelectrical features in Au/(MWCNT: PVA-B (OH) 3)/n-Si structure, using I-V data, in dark and illumination conditions. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36(9), 514.
- Aydemir, U. (2019). Elektron Demet ile Işınlanmış PTCDA Arayüzey Tabakalı Au/PTCDA/n-Si Diyotların Elektriksel Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 22(2), 393-398.
- Aydemir, U., Taşcıoğlu, İ., Altındal, Ş., & Uslu, İ. (2013). A detailed comparative study on the main electrical parameters of Au/n-Si and Au/PVA: Zn/n-Si Schottky barrier diodes. *Materials science in semiconductor processing*, 16(6), 1865-1872.
- Aydoğan, Ş. (2014). Katıhal Fiziği. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., & Türüt, Abdulmecit (2005). The effects of the temperature on the some parameters obtained from current-voltage and capacitance-voltage characteristics of polypyrrole/n-Si structure. *Polymer*, 46(2), 563-568.
- Azároff, L. V. ve Brophy, J. J. (1963). Malzemelerde elektronik işlemler.
- Bağcı, B. A. (2021). Yüzeyi nano boyutta kendiliğinden toplanan tekli tabaka (SAM) molekülü ile modifiye edilmiş organik arayüzeyli silisyum tabanlı schottky diyotların incelenmesi.

- Baranovskii, S. D. (2014). Theoretical description of charge transport in disordered organic semiconductors. *physica status solidi (b)*, 251(3), 487-525.
- Bässler, H. (1993). Charge transport in disordered organic photoconductors. A Monte Carlo simulation study. *Physica Status Solidi B (Basic Research)*; (Germany), 175(1).
- Bässler, H. (1998). Injection, transport and recombination of charge carriers in organic light-emitting diodes. *Polymers for Advanced Technologies*, 9(7), 402-418.
- Blakesley, J. C., Clubb, H. S., & Greenham, N. C. (2010). Temperature-dependent electron and hole transport in disordered semiconducting polymers: Analysis of energetic disorder. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 81(4), 045210.
- Blom, P. W., De Jong, M. J. M., & Vleggaar, J. J. M. (1996). Electron and hole transport in poly (p-phenylene vinylene) devices. *Applied Physics Letters*, 68(23), 3308-3310.
- Brabec, C. J., Dyakonov, V., Parisi, J., & Sariciftci, N. S. (Eds.). (2003). *Organic photovoltaics: concepts and realization* (Vol. 60). Springer Science & Business Media.
- Braun, S., Salaneck, W. R., & Fahlman, M. (2009). Energy-level alignment at organic/metal and organic/organic interfaces. *Advanced materials*, 21(14-15), 1450-1472.
- Brütting, W. (2005). Introduction to the physics of organic semiconductors. *Physics of organic semiconductors*, 1-14.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2011). Materials science and engineering, vol. 5 New York. NY: John Wiley & Sons. [Google Scholar].
- Card, H. C., & Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes II. Thermal equilibrium considerations. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1602.
- Chiu, F. C. (2014). A review on conduction mechanisms in dielectric films. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014(1), 578168.
- Cheung, S. K., & Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied physics letters*, 49(2), 85-87.
- Cicoira, F., & Santato, C. (Eds.). (2013). Organic electronics: emerging concepts and technologies.
- Coropceanu, V., Cornil, J., da Silva Filho, D. A., Olivier, Y., Silbey, R., & Brédas, J. L. (2007). Charge transport in organic semiconductors. *Chemical reviews*, 107(4), 926-952.

- Çaldıran, Z., Aydoğan, S., & İncekara, U. (2016). Schottky Diode Applications of the Fast Green FCF Organic Material and the Analyze of Solar Cell Characteristics. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 707, p. 012052).
- Çiçek, O., Tecimer, H. U., Tan, S. O., Tecimer, H., Altındal, Ş., & 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.)
- Demirezen, S., Sönmez, Z., Aydemir, U. M. U. T., & 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.
- Doğan, M., & Ökten, S. (2023). Titreşimli İnce Film Kaplama Sistemi Tasarımı ve Yüzey Kaplamasının Test Edilmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(Ek Sayı), 328-338.
- Demiroğlu, D. (2019). Organik yarıiletken tabanlı fotovoltaiik aygıtlar için şekilli ince film altlıkların kullanımı ve etkilerinin incelenmesi.
- Dong, L., Zhong, S., Yuan, B., Ji, Y., Liu, J., Liu, Y., ... & He, W. (2022). Electrolyte engineering for high-voltage lithium metal batteries. *Research*.
- Durmuş, M. (2019). Elektron demet ile ışınlanmış alq3 arayüzey tabakalı metal/yarıiletken diyotların hazırlanması ve ışınlamanın aygıt performansına etkilerinin incelenmesi.
- Duman, S., Gül, E. Y., Aydemir, M., Selvitopi, H., Özer, T. Ö., & Eçik, E. T. (2025). Enhanced photodiode performance: Au/boron-dipyrromethene/n-Si/Ag structure unveiling high photosensitivity and efficiency. *Optics & Laser Technology*, 181, 111648
- Erçarıkçı, E. (2014). Poli (metilen mavisi)/grafen nanokompozit ince filmlerinin sentezi ve elektrokatalitik uygulamaları. *Yüksek Lisans, Atatürk Üniversitesi, Erzurum*, 4-17.
- Facchetti, A. (2011). π -Conjugated polymers for organic electronics and photovoltaic cell applications. **Chemistry of Materials**, 23(3), 733-758. <https://doi.org/10.1021/cm102419z>
- Gökşen, K., Kurtay, M., Özmen, Ö. T., Şağban, M., & Köysal, O. (2019). PCDTBT: PCBM Tabanlı Organik Schottky Diyotlarının ve Heteroeklem Güneş Hücrelerinin Optoelektronik Karakterizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1644-1657.
- Gözen, M. (2017). *Organik (1, 4-m-diamin) arayüzeyli n-Si schottky diyodun elektriksel karakterizasyonu* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- GÜLER, B. (2024). Antrasen-imin arayüzey tabakalı Au n-Si Schottky diyotlarda frekansa bağlı kapasitans voltaj ve iletkenlik-voltaj karakteristiklerinden seri direnç ve yüzey durumlarının araştırılması (M.S.thesis).
- Güllü, Ö., Aydoğan, Ş., & Türüt, A. B. D. U. L. M. E. C. İ. T. (2008). Fabrication and electrical characteristics of Schottky diode based on organic material. *Microelectronic Engineering*, 85(7), 1647-1651.
- Güllü, Ö., Kilicoglu, T., & Türüt, A. B. D. U. L. M. E. C. İ. T. (2010). Electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71(3), 351-356.
- Güllü, Ö., Asubay, S., Aydoğan, Ş., & Türüt, ABDULMEC İ. T. (2010). Al/yeni fuksin/n-Si organik modifiyeli aygıtın elektriksel karakterizasyonu. *Fizik E: Düşük Boyutlu Sistemler ve Nanoyapılar* , 42 (5), 1411-1416.
- Güllü, Ö. (2018). Al/Nigrosin/p-Si yapıların fabrikasyonu ve temel diyot parametrelerinin hesaplanması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9(2), 689-700.
- Güllü, Ö., & Türüt, A. B. D. U. L. M. E. C. İ. T. (2010). Electrical analysis of organic dye-based MIS Schottky contacts. *Microelectronic Engineering*, 87(12), 2482-2487.
- Gündüz, B. (2007). *Organik yarıiletken fotodiyotların hazırlanması ve optoelektronik özelliklerinin araştırılması*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi).
- Henrich, V. and Cox, P., 1994, The Surface Science of Metal Oxides, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kampen, T., Schüller, A., Zahn, D., Biel, B., Ortega, J., Pérez, R. ve Flores, F., 2004, Schottky contacts on passivated GaAs (1 0 0) surfaces: barrier height and reactivity, *Applied surface science*, 234 (1-4), 341-348.
- Kasap, S. O. (2006). *Electronic materials and Devices*(pp. 336-339). McGraw-Hill New York.
- Katsouras, I., Najafi, A., Asadi, K., Kronemeijer, A. J., Oostra, A. J., Koster, L. J. A., ... & Blom, P. W. (2013). Charge transport in poly (p-phenylene vinylene) at low temperature and high electric field. *Organic Electronics*, 14(6), 1591-1596.
- Kaygusuz, C. *Al/Coronene/n-Si Schottky diyotlarının seri dirençlerinin hesaplanması* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kırkbınar, M., & Çalışkan, F. (2023). Biyolojik Yöntem ile GO Katkılı Al/(Biyo-ZnO)/pSi Schottky Diyotların Üretimi ve Elektriksel Karakterizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(3), 1623-1634

- Kırsoy, A., Ahmetoglu, M., Asimov, A., & Kucur, B. (2015). The electrical properties of Au/P3HT/n-GaAs Schottky barrier diode. *Acta Physica Polonica A*, 128(2B).
- Köhler, A., & Bässler, H. (2015). *Electronic processes in organic semiconductors: An introduction*. John Wiley & Sons.
- Kuik, M., Vandenbergh, J., Goris, L., Begemann, E. J., Lutsen, L., Vanderzande, D. J., ... & Blom, P. W. (2011). Optical detection of deep electron traps in poly (p-phenylene vinylene) light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 99(18).
- Kuik, M., Wetzelaer, G. J. A., Nicolai, H. T., Craciun, N. I., De Leeuw, D. M., & Blom, P. W. (2014). 25th anniversary article: charge transport and recombination in polymer light-emitting diodes. *Advanced Materials*, 26(4), 512-531.
- Lüssem, B., Riede, M., & Leo, K. (2013). Doping of organic semiconductors. *physica status solidi (a)*, 210(1), 9-43.
- Mandoc, M. M., De Boer, B., Paasch, G., & Blom, P. W. M. (2007). Trap-limited electron transport in disordered semiconducting polymers. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 75(19), 193202.
- Manjunatha, M. G., Adhikari, A. V., Hegde, P. K., Suchand Sandeep, C. S., & Philip, R. (2009). Optical characterization of a new donor–acceptor type conjugated polymer derived from 3, 4-diphenylthiophene. *Journal of materials science*, 44, 6069-6077).
- Mark, P., & Helfrich, W. (1962). Space-charge-limited currents in organic crystals. *Journal of Applied Physics*, 33(1), 205-215.
- Mattox, D.M., *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*, Noyes Publication, United States, 1998.
- Miller, A., & Abrahams, E. (1960). Impurity conduction at low concentrations. *Physical Review*, 120(3), 745.
- Nicolai, H. T., Kuik, M., Wetzelaer, G. A. H., De Boer, B., Campbell, C., Risko, C., ... & Blom, P. W. M. (2012). Unification of trap-limited electron transport in semiconducting polymers. *Nature materials*, 11(10), 882-887.
- Nicolai, H. T., Mandoc, M. M., & Blom, P. W. M. (2011). Electron traps in semiconducting polymers: Exponential versus Gaussian trap distribution. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 83(19), 195204.
- Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of applied physics*, 50(7), 5052-5053.
- Olthof, S., Tress, W., Meerheim, R., Lüssem, B., & Leo, K. (2009). Photoelectron spectroscopy study of systematically varied doping concentrations in an organic semiconductor layer using a molecular p-dopant. *Journal of Applied Physics*, 106(10).

- Pasveer, W. F., Cottaar, J., Tanase, C., Coehoorn, R., Bobbert, P. A., Blom, P. W. M., ... & Michels, M. A. J. (2005). Unified description of charge-carrier mobilities in disordered semiconducting polymers. *Physical review letters*, 94(20), 206601.
- Pfeiffer, M., Leo, K., Zhou, X., Huang, J. S., Hofmann, M., Werner, A., & Blochwitz-Nimoth, J. (2003). Doped organic semiconductors: Physics and application in light emitting diodes. *Organic Electronics*, 4(2-3), 89-103.
- Rhoderick, E. H. (1982). Metal-semiconductor contacts. *IEE Proceedings I (Solid-State and Electron Devices)*, 129(1), 1-14.
- Rhoderick, E. H., & Williams, R. H. (1988). *Metal-semiconductor contacts* (Vol. 129). Oxford: Clarendon press.
- Riordan, M., & Hoddeson, L. (1997). *Crystal fire: The birth of the information age*. W.W. Norton & Company.
- Schroder, D. K. (2015). *Semiconductor material and device characterization*. John Wiley & Sons.
- Scott, J. C., & Malliaras, G. G. (1999). Charge injection and recombination at the metal–organic interface. *Chemical physics letters*, 299(2), 115-119.
- Shen, M. (2017). Schottky nanodiodes based on zinc oxide thin films.
- Sze, S. M., Li, Y., & Ng, K. K. (2021). *Physics of semiconductor devices*. John wiley & sons.
- Simmons, J. G. (1965). Richardson-Schottky effect in solids. *Physical Review Letters*, 15(25), 967.
- Özden, Ş. (2005). *Silikon PIN fotodiyotların elektriksel karakterizasyonu* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Şimşir, N. (2012). Metal/organik/inorganik Schottky diyodların sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu.
- Tanase, C., Meijer, E. J., Blom, P. W. M., & De Leeuw, D. M. (2003). Unification of the Hole Transport in Polymeric Field-Effect Transistors and Light-Emitting Diodes. *Physical review letters*, 91(21), 216601.
- Tan, S. O. (2018). Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 977-989.
- Tatara, G. (2019). Effective gauge field theory of spintronics. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 106, 208-238.
- Tyona, M., 2013, A theoritical study on spin coating technique, *Advances in materials Research*, 2 (4), 195.

- Tessler, N., Preezant, Y., Rappaport, N., & Roichman, Y. (2009). Charge transport in disordered organic materials and its relevance to thin-film devices: a tutorial review. *Advanced Materials*, 21(27), 2741-2761.
- Turmuş, M. N tipi silisyum tabanlı altlık üzerine pyrene maddesinin kaplanarak elde edilen yapıların akım iletim mekanizmaları (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Tyona, M., 2013, A theoritical study on spin coating technique, *Advances in materials Research*, 2 (4), 195.
- Ülküer, F. (2014). Organik yarıiletken kullanılarak üretilen Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerinin belirlenmesi.
- Van Mensfoort, S. L., Vulto, S. I. E., Janssen, R. A., & Coehoorn, R. (2008). Hole transport in polyfluorene-based sandwich-type devices: Quantitative analysis of the role of energetic disorder. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 78(8), 085208.
- Wetzelaer, G. J. A., Kuik, M., Olivier, Y., Lemaire, V., Cornil, J., Fabiano, S., ... & Blom, P. W. (2012). Asymmetric electron and hole transport in a high-mobility n-type conjugated polymer. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 86(16), 165203.
- Yahia, I. S., Farag, A. A. M., Yakuphanoglu, F., & Farooq, W. A. (2011). Temperature dependence of electronic parameters of organic Schottky diode based on fluorescein sodium salt. *Synthetic Metals*, 161(9-10), 881-887.
- Yeşil FJ (1990). Sigma-Aldrich Boyalar, Lekeler ve İndikatörler El Kitabı. Milwaukee: Aldrich. sayfa 513–515. ISBN 0-941633-22-5.
- Yıldırım, N., & Durumlu, E. (2017). Ag/Azure A/n-Si Schottky Diyodun elektriksel ve fotovoltaiik özelliklerinin araştırılması. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 6(1), 1-6.
- Yıldırım, F., Orhan, Z., & Aydoğan, Ş. (2023). UV-Visible photovoltaic detector based on biomaterial-inorganic semiconductor in the propolis/n-Si heterojunction configuration. *Materials Research Bulletin*, 159, 112113.