



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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ORGANOMETALİK KOMPLEKS (OMC) İNCE FİLM ARA TABAKALI
OMC/P-Sİ HETEROEKLEM DİYOTUNUN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Tevfik DOĞMUŞ

**Haziran-2024
BATMAN**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ORGANOMETALİK KOMPLEKS (OMC) İNCE FİLM ARA TABAKALI
OMC/P-Sİ HETEROEKLEM DİYOTUNUN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Tevfik DOĞMUŞ

Danışman

Doç. Dr. Cihat ÖZAYDIN

**Haziran-2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Tevfik DOĞMUŞ tarafından hazırlanan “Organometalik kompleks (OMC) ince film ara tabakalı OMC/P-Sİ heteroeklem diyotunun üretimi ve karakterizasyonu” adlı tez çalışması 27/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Şilan BATURAY

.....

Danışman

Doç. Dr. Cihat ÖZAYDIN

.....

Üye

Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Tevfik DOĞMUŞ

Tarih:05.07.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ORGANOMETALİK KOMPLEKS (OMC) İNCE FİLM ARA TABAKALI OMC/P-Sİ HETEROEKLEM DİYOTUNUN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Tevfik DOĞMUŞ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cihat ÖZAYDIN

2024, 60 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Şilan BATURAY

Doç. Dr. Şerif RUZGAR

Doç. Dr. Cihat ÖZAYDIN

Bu çalışmada, Al/p-Si diyotu ve OMC organometalik ince film ara tabakalı Al/OMC/p-Si diyotunun elektriksel karakteristikleri çıkarılarak ara tabakanın diyotun elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla akım-gerilim ve kapasite-gerilim ölçümleri yanı sıra, diyotların fotovoltmik özellikleri de 100 mW/cm² ışık gücü altında incelenmiştir. Al/p-Si ve Al/OMC/p-Si diyotunun için idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_B) doyma akımı (I_0) hesaplandı. Diyotların karanlıkta ± 2 voltteki doğrultma oranları hesaplandı. Diyotların ışığa duyarlılıkları belirlendi. Sonuçlar, OMC ara tabakasının varlığının diyotların elektriksel parametrelerini değiştirdiğini ve ışık altında foto hassasiyetlerini artırdığını göstermektedir. Bu bulgular, diyotların optoelektriksel performanslarının iyileştirilmesi için OMC ara tabakasının önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektriksel karakterizasyon, Heteroeklem, İdealite faktörü, OMC, Organometalik kompleks

ABSTRACT

MS THESIS

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF OMC/P-SI HETEROJUNCTION DIODE WITH AN ORGANOMETALLIC COMPLEX (OMC) INTERLAYER

Tevfik DOĞMUŞ

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

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Cihat ÖZAYDIN

2024, 60 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Şilan BATURAY
Assoc. Prof. Dr. Şerif RUZGAR
Assoc. Prof. Dr. Cihat ÖZAYDIN**

In this study, the electrical characteristics of Al/p-Si diode and the Al/OMC/p-Si diode with an organometallic thin film (OMC) interlayer were examined, focusing on the effect of the interlayer on the diode's electrical properties. For this purpose, current-voltage and capacitance-voltage measurements were conducted, as well as the examination of the photovoltaic properties of the diodes under 100 mW/cm² light intensity. The ideality factor (n), barrier height (Φ_B), and saturation current (I_0) of both Al/p-Si and Al/OMC/p-Si diodes were calculated. The rectification ratios of the diodes in the dark at ± 2 volts were computed. The light sensitivity of the diodes was determined. The results demonstrate that the presence of the OMC interlayer modifies the electrical parameters of the diodes and enhances their photosensitivity under light exposure. These findings indicate that the OMC interlayer plays a significant role in improving the optoelectronic performance of the diodes.

Keywords: Electrical characterization, Heterojunction, Ideality factor, OMC, Organometallic complex

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her kademesinde tecrübesinden faydalandığım değerli danışman hocam Doç. Dr. Cihat ÖZAYDIN'a teşekkürlerimi sunarım. Bu tezde kullanılan organometalik kompleksin sentezinde emeği geçen Doç. Dr. Ercan ÇINAR ve Doç. Dr. Reşit ÇAKMAK'a teşekkür ederim. Ayrıca bu süreçte ihmal ettiğim kızlarımı kocaman öpüyorum.

Tevfik DOĞMUŞ
BATMAN-2024



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1.GİRİŞ	1
2.TEORİK BİLGİLER.....	7
2.1.Yarıiletken	7
2.1.1. Katkısız yarıiletken	9
2.1.2. Katkılı yarıiletken	10
2.2. Schottky Diyot	12
2.2.2. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar	13
2.2.3. Metal p-tipi yarıiletken omik kontaklar	14
2.3. Elektriksel Parametrelerin Bulunması.....	16
2.3.1. Termiyonik emisyon (TE) teorisi	16
2.3.2. İdealite Faktörü	17
2.3.3.Engel Yüksekliği	18
2.3.4. Seri Direnç Hesabı	18
(2.14).....	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Çalışmada kullanılan malzemeler	22
3.1.1. Silisyum	22
3.1.2.Alüminyum	22
3.2. Organik Kompleks bileşiğin Özellikleri	22
3.2.1.Organik Ligand	22
3.2.2.Metal kompleks.....	23
3.3. İnorganik Yarıiletken (p-Si) Kristalinin Temizlenmesi.....	23
3.3.1. p-Si numune temizlik aşamaları:	24
3.4. Döndürme Metodu (Spin Coating) ile Kaplama İşlemi	24
3.5. Diyotun Akım- Gerilim (I-V) Özellikleri	26
3.5.1. Engel yüksekliği	27
3.5.2. Seri direnç	27
3.6. Üretilen Diyotun Kapasite-Gerilim Karakteristikleri	29
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	30
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	41
5.1. Sonuçlar	41

5.2. Öneriler	42
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	48



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. İletken madde atomları	7
Şekil 2. Yalıtkan madde atomları	8
Şekil 3. Yarıiletken maddeler	8
Şekil 4. İletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin $T=0$ K de enerji band aralıkları ...	9
Şekil 5. n-Tipi yarıiletken maddenin oluşması	10
Şekil 6. p-Tipi yarıiletken maddenin oluşması	11
Şekil 7. Schottky diyot örnekleri	13
Şekil 8. Metal p- tipi yarıiletken omik kontakın enerji-bant diagramı. a) Kontakdan önce b) Kontakdan sonra ve termal dengede c) $V \neq 0$ olması durumunda	15
Şekil 9. Cu metal kompleksinin sentez aşamasının diyagramı.	23
Şekil 10. (a) Ultrasonik Temizleyici, (b) Termal Buharlaştırma Sistemi	24
Şekil 11. Kaplama işlem basamakları	26
Şekil 12. p-Si/Al MS diyotunun karanlık (Siyah) ve ışık altında (Kırmızı) $\ln I-V$ grafiği.	30
Şekil 13. p-Si/OMC/Al MIS diyotunun karanlık (Siyah) ve ışık altında (Kırmızı) $\ln I-V$ grafiği	31
Şekil 14. p-si/Al diyotunun Cheung fonksiyonu grafiği	33
Şekil 15. p-si/OMCAl diyotunun Cheung fonksiyonu grafiği	34
Şekil 16. p-si/Al diyotunun Norde fonksiyonu grafiği	36
Şekil 17. P-Si/OMC/Al diyotunun Norde fonksiyonu grafiği.	36
Şekil 18. p-si/Al diyotunun C-V grafiği	38
Şekil 19. P-Si/OMC/Al diyotunun C-V Grafiği	38
Şekil 20. p-Si/Al diyotunun 500 kHz deki kapasite-gerilim grafiği ve $C^{-2}-V$ grafiği	39
Şekil 21. p-Si/OMC/Al diyotunun 500 kHz deki kapasite-gerilim grafiği ve $C^{-2}-V$ grafiği	39

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. İletken, yarıiletken ve yalıtkanların öz direnç değeri aralığı	9
---	---

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Diyot kontak alanı
A^*	: Richardson sabiti
Al	: Alüminyum
As	: Arsenik
Au	: Altın
C	: Kapasitans
C_m	: Ölçülen kapasitans
Cu	: Bakır
d	: Uzay yükünün bölge genişliği
e	: Elektron yükü
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_c	: İletkenlik bandının tabanı
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_0	: Vakum seviyesi
E_v	: Valans bandı
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
Φ_B	: Engel yüksekliği
Ga	: Galyum
Ge	: Germanyum
G_m	: Ölçülen iletkenlik
I_0	: Ters besleme akımı
I_d	: Karanlık akımı
I_p	: Fotoakımı
K	: Boltzmann sabiti
M_A	: Molekül kütlesi
Mn	: Manganez
n	: Mol
N_c	: Yarıiletkenin iletim bandındaki durum yoğunluğu
N_d	: Alıcı konsantrasyonu

Ni	: Nikel
q	: Elektrik yükü
R	: Fototepki
RR	: Doğrultma oranı
Rs	: Seri direnç
S	: Foto duyarlılık
Si	: Silisyüm
T	: Kelvin derecesi cinsinden sıcaklık
V_0	: Doğru beslem değerindeki minimum akıma karşılık gelen voltaj ölçüsü
V_F	: İleri besleme gerilimi
V_R	: Geri besleme gerilimi
W	: Açısal frekans
X	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
Ω	: Direnç birimi
γ	: Norde yönteminde bir sabit
δ	: Arayüzey kalınlığı

Kısaltmalar

AFM	:Atomik kuvvet mikroskobu
AI	:Yapay zeka
AKB	: Atomik kütle birimi
AR	: Artırılmış Gerçeklik
C-F	: Kapasite frekans
C-V	:Kapasite gerilim
CuO	: Bakır Oksit
DMSO	: Dimetilsülfat
DMY	: Organik kimyada kullanılan bir bileşik
G-F	: Kondüktans frekans
G-V	: Kondüktans gerilim
I-V	: Akım-gerilim
J-V	: Akın yoğunluğu
MIS	: Metal yalıtkan-yarıiletken kontak
ML	: Makine öğrenmesi

MOS	: Metal oksit yarıiletkenler
MS	: Metal yarıiletken kontak
N ₂	: Azot gazı
OLED	: Organik Işık Yayan Diyotlar
OMC	: Organometalik kompleks
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
SBD	: Schottky bariyer diyotlarının
TE	: Termiyonik Emisyon
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu



1.GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MS) kontağı, çoğu katı hal yarıiletken cihazın performansında önemli bir bileşendir. Adından da anlaşılacağı gibi MS bağlantısı, bir metal ve bir yarıiletken malzemenin yakın temas halinde olmasıdır. Temel olarak yarıiletken cihazlarda yaygın olarak kullanılan doğrultucu Schottky kontakları ve doğrultucu olmayan omik kontaklar şeklinde iki tip MS kontağı vardır. Schottky diyotlar, elektronik dünyasında önemli bir rol oynayan bileşenlerdir. Tarihsel olarak, metal ve yarıiletken malzemelerin birleşiminden oluşan bu diyotlar, Alman fizikçi Walter H. Schottky tarafından 1874 yılında tanıtılmış ve zamanla geliştirilmiştir (Schottky, 1874). Schottky diyotları, çok yüksek hızlı devrelerde kullanılır ve çok düşük zaman gecikmeleri nedeniyle hızlı tepki verirler. Ayrıca, Schottky diyotlarının yüksek gerilim direnci nedeniyle, yüksek gerilimli devrelerde de kullanılabilirler. Schottky diyotlarda idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç, cihazın performansını belirleyen ve çalışmasını etkileyen önemli parametrelerdir. Schottky diyotların bu temel parametreleri, tasarım ve uygulama süreçlerinde önemli bir rol oynar ve elektronik devrelerin performansını etkiler. İnce film ara tabakalı Schottky diyotlar, bu geleneksel diyotların evriminde önemli bir adımdır. Özellikle, Amerikalı fizikçi Walter H. Brattain ve Meksikalı fizikçi Luis Alvarez'ın 1950'lerde ince metal filmlerle kaplı yarıiletken yüzeylerin elektronik özelliklerini keşfetmeleri, ince film ara tabakalı Schottky diyotların temellerini atmıştır (Brattain ve Alvarez, 1950).

Organik bileşiklerin esneklik, düşük maliyet, çeşitli amaçlar için sentezlenme imkanı ve çevre dostu olma potansiyeli gibi özellikleri onları elektronik teknolojisinde kullanılmasının önünü açmıştır. Organik ince film ara tabakalı Schottky diyotlar ise bu evrimin bir sonraki adımını temsil eder. Bu alandaki erken çalışmalardan biri, Nobel ödüllü Amerikalı kimyager ve malzeme bilimcisi Dr. Alan J. Heeger'ın liderliğinde gerçekleşti. Heeger ve ekibi, organik yarıiletkenlerin elektronik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmalarla organik ince film ara tabakalı Schottky diyotların potansiyelini ortaya koymuştur (Heeger, 2000; Heeger ve ark., 1999).

Son yıllarda organometalik komplekslerin elektronik teknolojisinde kullanımı giderek öne çıkmaktadır. Organometalik kompleksler, metal atomlarının konjuge organik yapılarla koordinasyonu ile oluşur. Bu yapılar, yüksek elektriksel iletkenlik sağlayabilir ve aynı zamanda kararlılık gösterebilirler. Bazı organometalik kompleksler, farklı metal iyonları ve ligandlar kullanılarak farklı renklerde ışık emisyonu gösterebilirler. Bu

özellik, organik ışık yayan diyotlar (OLED'ler) gibi uygulamalarda çok renkli ekranların geliştirilmesine olanak sağlar. Organometalik kompleksler ayrıca güneş pilleri için fotoaktif malzemeler olarak kullanılabilir. Bazı organometalik kompleksler, güneş ışığını daha verimli bir şekilde emebilir ve bu enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilirler. Bu da güneş pillerinin verimliliğini artırabilir. Organometalik kompleksler, metal merkezinin farklı ligandlarla koordinasyonu ile birçok farklı yapıya sahip olabilirler. Bu, istenilen elektronik veya optoelektronik özellikleri elde etmek için moleküler yapıların özelleştirilmesine olanak tanır. Bu gelişmeler, gelecekte esnek elektronik cihazlar, güneş enerjisi toplama sistemleri ve biyoelektronik gibi alanlarda daha etkili uygulamaların geliştirilmesine olanak sağlayabilir. Bu çalışmada amaç, yeni sentezlenmiş olan 1,5-dimethyl-4-((1-(3-nitrophenyl)ethylidene) amino)-2-phenyl-1,2-dihydro-3H-pyrazol-3-one Schiff baz ligandının Cu(II) organometalik kompleksinin (OMC) p-Si/Al MS yapısında kullanılabileceğini bir p-Si/OMC/Al heteroeklem oluşturarak göstermek ve bu heteroeklemi elektriksel olarak karakterize etmektir. Bu amaçla organometalik kompleks p-Si/Al MS yapısında ara tabaka olarak kullanılarak yeni bir p-Si/OMC/Al heteroeklem diyotu oluşturuldu. Aynı şartlarda ara tabakasız p-Si/Al diyotu da karşılaştırma için oluşturuldu. Diyotlarda akım-gerilim ve kapasite-gerilim ölçümleri, diyotların karakteristik özelliklerini anlamak için önemlidir. Oluşturulan bu p-Si/OMC/Al heteroeklem ve p-Si/Al diyotunun akım-gerilim ve kapasite-gerilim ölçümleriyle karakterizasyonu yapıldı. Ayrıca oluşturulan diyotların solar simülatör altında ışığa karşı davranışları incelenerek temel bazı fotovoltaiik parametreleri elde edildi

1.1.Kaynak Özetleri

Yarıiletken teknolojilerindeki ilerlemeler günümüz ve gelecekteki teknolojik gelişmeleri doğrudan desteklemektedir. Yapay zeka (AI), Makine öğrenmesi (ML), Artırılmış Gerçeklik (AR) gibi yazılımların yakın gelecekte uygulamalarının artacağı göz önüne alındığında bu uygulamaları destekleyecek yarıiletken teknolojilerindeki geliştirme çabalarının paralel bir şekilde artmaması düşünülemez. Yarıiletken teknolojilerini geliştirme alanında çalışan bilim insanların mevcut sınırlılıkları aşmaya yönelik çalışmaları yakın gelecekte bazı uygulamalar için zorunluluktur.

- Yarıiletkenlerin keşfi ve gelişimi, 1800'lerin sonlarından itibaren başlamıştır.
- Metalik ve yarıiletken özellik sergileyen malzemelerin tanımlanması, yarıiletkenlerin temelini oluşturmuştur.

- Germanyum ve silisyum gibi yarıiletken malzemelerin keşfi, 1940'lar sırasında gerçekleşmiştir.
- Transistörün icadı (1947), yarıiletken teknolojisinin elektronik endüstrisindeki önemini artırmıştır.
- Entegre devrelerin gelişimi, yarıiletkenlerin daha karmaşık ve güçlü elektronik cihazlarda kullanılmasını sağlamıştır.
- Modern yarıiletken endüstrisinin oluşumu, 1970'lerden itibaren hız kazanmış ve günümüzde birçok temel teknolojinin altyapısını oluşturmuştur.

Aşağıda bazı bilim insanlarının yarıiletkenler ile ilgili çalışmaları verilmiştir:

Ziel (1968), Metal-yarıiletken yapılarının özelliklerini sıcaklıkla ilişkili olarak ölçtü ve bu yapıları sıcaklık ölçümünde kullandı. Card ve Rhoderick (1971), Arayüzey oksit tabakalı Si-Al kontaklarda arayüzey durum yoğunluğunu belirledi ve bu yoğunluğun doğru uyartım I-V karakteristiklerinin idealite faktörü üzerindeki etkilerini inceledi. Braun (1974), metal-yarıiletken yapılar üzerine ilk araştırmayı gerçekleştirdi. Ashok ve ark. (1979), yarıiletken ve metali ayıran ince bir arayüzey yalıtkan tabakaya (MIS) sahip Schottky engelli güneş pillerinde, açık devre voltajı ve verimlilikte gözlenen artış, MIS Schottky diyotlarına olan ilgiyi artırmıştır. Sze (1981), p-n eklemlerinin yapımı için çeşitli yöntemler geliştirdi ve metal-yarıiletken kontaklarının bu eklemlerde akım iletimi için omik kontaklar olarak kullanılmasının önünü açtı. Wilson (1983), Metal-yarıiletken diyotlar için kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirdi ve doğrultma teorisinde ters kutuplamayı izah etti. Cheung ve Cheung (1986), Schottky diyotlarının I-V karakteristiklerinden idealite faktörü ve diyodun seri direncini hesaplamak için bugün yaygın olarak bilinen Cheungs fonksiyonlarını kullandılar. Wu ve Yang (1989), n-tipi yarıiletkenden yapılan Schottky diyotların, yüzey yükü ve arayüzeyde düşen gerilimi dikkate alarak, arayüzey teorisini geliştirdi. Pozitif uzay yükündeki artışının potansiyel bariyeri düşürdüğünü ve arayüzey tabakasında düşen gerilimin doğru beslem I-V karakteristiklerinin, idealite faktörünü arttırdığını buldular. Chattopodhyay ve Raychaudhuri (1993), seri direncin etkisini gözönünde bulundurarak Schottky diyotların doğru beslem C-V karakteristiklerinin frekansa bağlılığını inceledi. C-V karakteristiklerinde gözlenen kapasite piki seri direnç etkisine atfedildi. Ayrıca, yüksek frekanslarda seri direncin daha etkin olduğu teorik olarak bu çalışmalarında belirtildi. Türüt ve ark. (1996), ideal olmayan diyotlar için C-V karakteristiğinin değişimini yüklerin alış-verişinin hangi faktörlere bağlı olduğunu izah ettiler. El-Nahass ve ark. (2005), organik ve inorganik heteroelekmleri araştırdı. NiPc filmleri buharlaştırma

tekniki ile p-Si alt katmanları üzerine biriktirdiler. Kontakların elektriksel fonksiyonlarını I-V ve C-V ölçümleriyle belirlediler. Bu kontaklar p-p⁺ diyot benzeri davranış göstererek ve NiPc/Si arayüzünde 0,48 eV'lik bir engel potansiyeline işaret etti. Fotovoltaik dönüşüm özellikleri, elektron transferinin gerçekleştiğini gösterdi. Farag ve ark. (2012), çalışmasında, Au/PYR(G)/p-Si/Al heterojonksiyonunun elektriksel özellikleri incelenmiştir. I-V ölçümleriyle heterojonksiyonun parametreleri belirlenmiş ve cihazın ışık altında performansı fotovoltaik sensör uygulaması için uygun olduğu tespit etmiştir. Ghamdi ve ark. (2015), çalışmasında, termal buharlaştırma tekniği kullanılarak üretilen Au/Antrasen/p-Si/Al heteroekleminin elektriksel özellikleri incelenmiştir. Heteroeklem cihazın seri direnci, şönt direnci, idealite faktörü ve bariyer yüksekliği belirlenmiş ve heteroeklemin fotovoltaik performansı ölçtüler. Sonuç olarak elde edilen güç dönüşüm verimliliğinin karşılaştırılabilir düzeyde olduğu gösterdiler.

Gencer ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada, yeni bir organik Pt-APTH kompleksi kullanılarak Pt-APTH/p-Si heteroeklem doğrultucu kontaklar ürettir. Bu kontaklar iyi performans göstermiş ve doğrultucu özelliklere sahip olduğu belirlendi. Bu yeni Pt-APTH kompleksinin, organik bir yarıiletken olarak elektrikli cihazların üretiminde uygulanabilir olduğunu vurguladılar. Orak ve ark. (2014), Al/Azure A/p-tipi Si heteroekleminin elektriksel karakterizasyonu ve fotovoltaik özellikleri incediler. Bu heteroeklem diyot, ideal olmayan bir davranış göstermiş ve ışık altında yüksek bir fotoakım sergilemiştir. Al/Azure A/p-tipi Si heteroekleminin fotodiyot olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Afify ve ark. (2015), çalışmasında, Hibrit Ag/TiOPc/p-Si/Al heteroeklem cihazı üretilmiştir. Yapılan çalışmalar, farklı sıcaklıklarda J-V özelliklerinin güçlü bir sıcaklık bağımlılığı gösterdiğini ve düşük voltajlarda termiyonik emisyon mekanizmasının hâkim olduğunu belirtmiştir. İdealite faktörü ile sıfır öngerilim bariyer yüksekliği arasındaki sıcaklık bağımlılığı açıkça ortaya konmuştur. Yüksek ileri gerilimlerde, alan yükü sınırlı akımın hâkim mekanizması olduğu tespit edilmiştir.

Atlan ve ark. (2015), yeni bir naringenin bazlı ligand sentezledi. Bu ligandın oligomerizasyonu NaOCl kullanılarak gerçekleştirildi ve Cu(II), Ni(II) ve Zn(II) geçiş metal tuzları ile kompleksleşme kabiliyeti araştırıldı. Elde edilen veriler oligomerik yapıları doğruladı. Yeni bir sınıf havada stabil metal komplekslerini gösterdiler ve bu komplekslerle üretilen heteroeklemlerin elektriksel ve fotovoltaik özelliklerini araştırdılar. Bu ligandların optik ve elektriksel özelliklerini daha fazla araştırmak için çalışmalar devam etmektedir. Gencer ve ark. (2016), çalışmasında ise sol-jel spin kaplama tekniğini kullanılarak organik-inorganik heteroyapılar ürettir. Dimetil sarı

(DMY) ara katmanının kalınlığının artmasıyla duyarlılığın azaldığı ancak belirli bir kalınlıkta optimum foto-tepki özelliği gösterdiğini bildirdiler. Bu araştırma, optik sensör ve fotodiyot gibi optoelektronik uygulamalara uygun yapıların geliştirilebileceğini öne sürmüştür. Karabulut ve ark. (2019), yeni bir hibrit malzemesi sentezlediler ve Al/Ru(II) kompleksleri/p-Si/Al heteroekleminin foto tepkisi ve elektriksel özelliklerini incelediler. Cihazın iletken davranış sergilediği ve yüksek duyarlılık gösterdiği belirlendi. C-V analizi, frekans ve gerilime bağımlı olduğunu ortaya koydu. Sonuç olarak, hazırlanan foto aygıt organik malzeme bazlı fotodetektör teknolojisi için uygun bir adaydır. Ferhati ve ark. (2019), Si bazlı Schottky bariyer diyotlarının (SBDs) elektriksel performansını ve termal stabilitesini artırmak için farklı TCO (Transparent Conductive Oxide) ara ince katmanlarının (ZnO ve ITO) rolünü deneysel olarak araştırdı. RF magnetron püskürtme tekniğiyle üretilen tasarımların yüksek performanslı ve termal olarak stabil SiO₂ elde etme yolunu açtığını doğruladı. Elektriksel karakterizasyon sonuçları, ZnO arayüz katmanına sahip tasarımın gelişmiş direnç davranışı sergilediğini ve ideallik faktörünü azalttığını gösterdi. Ayrıca, yeni FoM parametrelerinin önerildiği ve önerilen hetero yapıların geleneksel Au/p-Si yapısına kıyasla üstün FoM parametreleri sunduğu belirlendi. Imer ve ark. (2019), Al/Ru(II) kompleksi/p-Si fotodiyodu üretti. Yeni Ru(II) kompleksleri içeren cihazın oda sıcaklığında karanlıkta iyi düzeltme performansı gösterdiği görüldü. I-V, C-V ve geçici ölçümlerle cihazın ışığa duyarlılığı incelendi ve Ru(II) kompleksi tabanlı cihazın iyi bir foto anahtarlama davranışı sergilediği doğrulandı. Bu fotodiyotun organik bazlı optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceği belirtildi. Nawar ve ark. (2020), MIS Schottky diyotunun performansını araştırmış ve NTCDa ara katmanı kullanılarak üretilen diyotun yapısal özelliklerini incelemişlerdir. İleri yönde öngerilimde SCLC iletimi mekanizmasının etkin olduğunu belirlemişler ve cihazın bir sıcaklık sensörü olarak kullanılabilirliğini doğrulamışlardır. Ayrıca, cihazın belirli voltaj aralıklarında belirli sıcaklık katsayılarına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Moloi ve Bodunrin (2022), tarafından yapılan çalışmada, Si bazlı Schottky diyotun karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Arayüzey durumları incelenerek, farklı yüklerin ve yoğunlukların etkisi değerlendirilmiştir. Arayüzey durumlarının enerjisi, yoğunluğu ve yükü voltajla değişim göstermiştir. Yüksek ve düşük frekanslarda kapasitans değişiklikleri arayüz durumlarının varlığını doğrulamıştır. Sonuçlar, cihazların arayüz durumlarını değerlendirmek için belirli voltaj aralıklarında incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

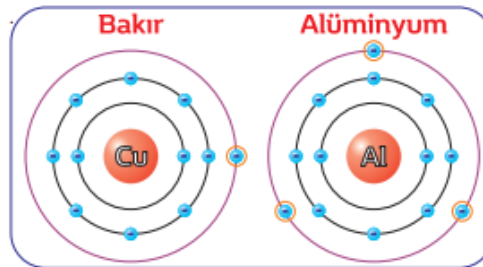
Kocyigit ve ark. (2023), nikotinamid/nikotinik asit, Cu ve Mn metal merkezli kompleksler kullanarak metal yarıiletken heteroeklemler üretti. Cihazların elektriksel özellikleri ve fotodiyot/fotodedektör performansı, I-t ve I-V ölçümleriyle değerlendirildi. Elde edilen sonuçlar, cihazların iyi bir fotodiyot ve fotodedektör performansı sergilediğini ortaya koydu.



2.TEORİK BİLGİLER

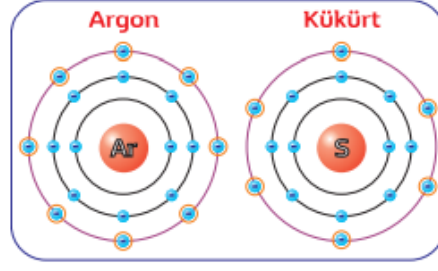
2.1.Yarıiletken

Çağımızın en önemli keşiflerinden biri olan yarıiletkenler günlük yaşamımızın her kademesinde kullanılan modern teknolojinin temelini oluşturan çok önemli malzemelerdir. Yarıiletkenler, elektronik ve optoelektronik cihazlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle mikroçipler, transistörler, diyotlar, lazerler, güneş pilleri ve sensörler gibi birçok modern teknolojinin temelinde yarıiletken malzemeler yatar. Yarıiletkenleri iyi anlayabilmek için, iletken, yalıtkan ve yarıiletkenleri birlikte düşünmek gerekir. Bir atomun son yörüngesindeki elektronlara valans elektronları ve bu elektronların bulunduğu yere valans bandı denir. İletim bandında bulunan elektronlara ise serbest elektron denir. Elektrik akımının iletimi, valans bandında olan serbest elektronların düzenli hareketiyle meydana gelir. Elektrik akımını ileten maddelere iletken denir. İletken maddeyi oluşturan atomların son yörüngesinde genellikle 4'ten az (1, 2 veya 3) elektron bulunur (şekil.1). Serbest elektron sayısı arttıkça iletkenlik artar. Altın, gümüş, bakır, alüminyum vb. metaller en iyi iletkenlerdir.



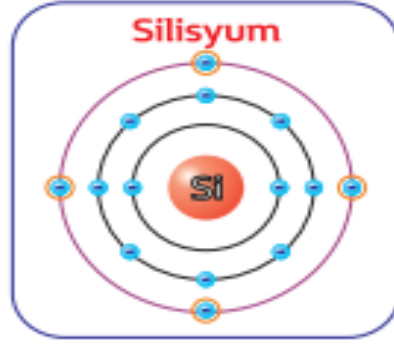
Şekil 1. İletken madde atomları

Elektrik akımını iletmeyen ya da çok zayıf ileten maddelere yalıtkan denir. Yalıtkan maddeyi oluşturan atomların son yörüngesinde genellikle 4'ten fazla (5, 6,7 veya 8) elektron bulunur (şekil.2). Valans elektron sayısı arttıkça yalıtkanlık artar. Plastik, kauçuk, cam, tahta, porselen, seramik, mika, bakalit vb. saf olmayan maddeler iyi yalıtkanlara örnektir.



Şekil 2. Yalıtkan madde atomları

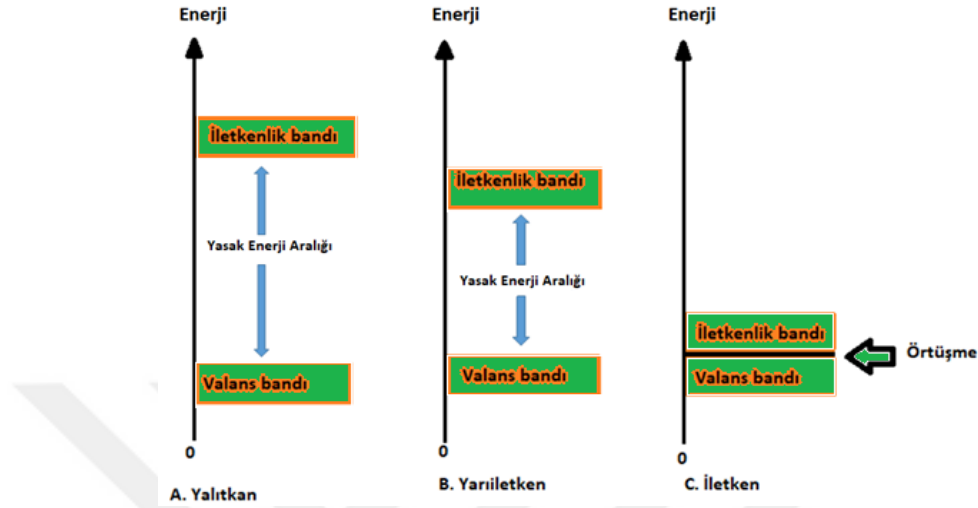
Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlik bakımından iletkenler ve yalıtkanlar arasında yer alan maddelerdir. Bu malzemeler, kendi saf halleriyle düşük sıcaklıklarda iyi bir iletken olmamalarına rağmen, belirli koşullar altında (örneğin, sıcaklık artışı, ışık maruziyeti veya safsızlık eklenmesi) elektriksel iletkenlikleri önemli ölçüde artabilir. Yarıiletken maddeyi oluşturan atomların son yörüngesinde genellikle 4 elektron bulunur. Germanyum “Ge”, silisyum “Si” ve selenyum doğal yarıiletkenlere örnektir (şekil.3).



Şekil 3. Yarıiletken maddeler

Yalıtkanlar, valans bandı elektronlarla tam dolmuş ve bunun üzerinde iletim bandı boş olarak yerleşmiş olan katılardır. Valans ile iletim bantları arasında geniş bir yasak enerji aralığı vardır ($E_g > 4$ eV). Yalıtkanlarda valans bandı dolu olduğundan elektron hareketi kısıtlıdır, dış elektrik alanında akım oluşamaz, elektriksel iletim oda sıcaklığında gerçekleşmez. İletkenler, çoğunlukla metallerin oluşturduğu bu sınıfta iki tür band yapısı vardır. Elektronlarla tam dolmuş bandın üstünde kısmen elektronlarla dolu iletim bandı gelmekte veya tam dolmuş valans band üstteki boş iletim bandı ile üst üste gelmektedir. Bu malzemelerde yasak enerji aralığı yoktur ya da çok dar olduğu için elektronlar serbestçe hareket edebilir ve yüksek iletkenlik gösterirler. Yarıiletkenler, band yapısı olarak yalıtkanlara benzerler fakat valans bandı iletim bandı arasındaki yasak enerji aralığı yalıtkanlara göre daha dar olan malzemelerdir ($E_g = 0.1-3$ eV). Ayrıca yarıiletkenlerde katkılarla ve dış etkilere (sıcaklık, basınç, ışık, radyasyon ve yüklü

parçacıklarla bombardıman...vb.) iletim bandındaki taşıyıcıların yaratılması mümkündür (Cafer, 2000). Yarıiletkenler katkılı ve katkısız yarıiletkenler diye ayrılırlar. Alan Heeger ve arkadaşlarının 1991’de Nobel ödülü almalarını sağlayan çalışmalarından sonra yarıiletkenler için organik ve inorganik yarıiletken sınıflaması da doğmuştur



Şekil 4. İletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin T=0 K de enerji band aralıkları

Tablo 1. İletken, yarıiletken ve yalıtkanların öz direnç değeri aralığı

Materyaller	İletkenler (Au, Fe, Cu...)	Yarıiletkenler (Si, Ge, CdS..)	Yalıtkanlar (SiO ₂ , Al ₂ O ₃ ...)
Öz direnç Değeri (Ω.cm)	$10^{-8} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^9$	$10^9 - 10^{22}$

2.1.1. Katkısız yarıiletken

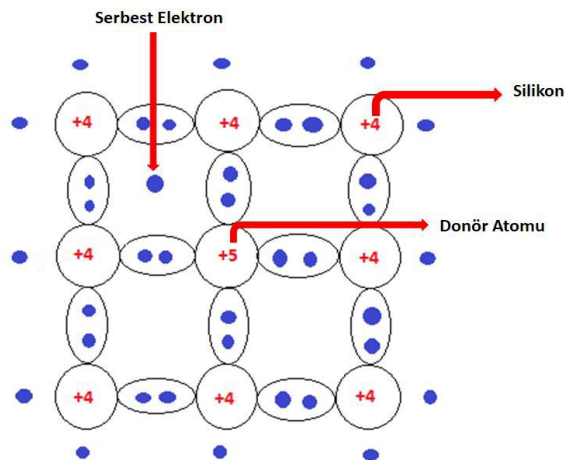
Katkısız yarıiletken, saf ve kontrol edilmiş bir kristal yapıya sahip olan yarıiletken malzemelerdir. Genellikle silisyum veya germanyum gibi elementlerden oluşurlar. Katkısız yarıiletkenler, saf bir kristal yapıya sahip oldukları için, neredeyse hiçbir katkı madde içermezler. Bu tür yarıiletkenler, elektriksel iletkenlikleri ve özellikleri açısından önemlidir çünkü elektrik akımını iletme yetenekleri, katkı maddeleri tarafından etkilenmeden saf yapılarına dayanır. Katkısız yarıiletkenler, elektronik endüstrisinde ve çeşitli elektronik cihazların yapımında temel malzemeler olarak kullanılır. Bunlar, transistörler, diyotlar, entegre devreler ve fotovoltaik hücreler gibi birçok cihazın yapımında temel malzeme olarak kullanılır.

2.1.2. Katkılı yarıiletken

Katkılı yarıiletkenler, saflığının değiştirilmiş olduğu yarıiletken malzemelerdir. Bu malzemeler, istenilen elektriksel özellikleri elde etmek için belirli katkı maddeleri ile kombine edilir. Genellikle katkı maddeleri olarak, silisyum veya germanyum kristallerine çok küçük miktarlarda başka elementler eklenir. Bu eklenen elementler, yarıiletkenin iletkenlik, öz direnç ve diğer elektriksel özelliklerini değiştirebilir. Katkılı yarıiletkenler, elektronik cihazlarda kullanılan temel bileşenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Örneğin, bir transistörün veya diyotun elektriksel özellikleri, katkılı yarıiletkenlerin kullanılmasıyla belirlenir. Katkılı yarıiletkenler, entegre devreler, mikroçipler, güneş pilleri, lazerler ve birçok diğer elektronik cihazın yapımında önemli bir rol oynar.

2.1.2.1. n-tipi yarıiletken

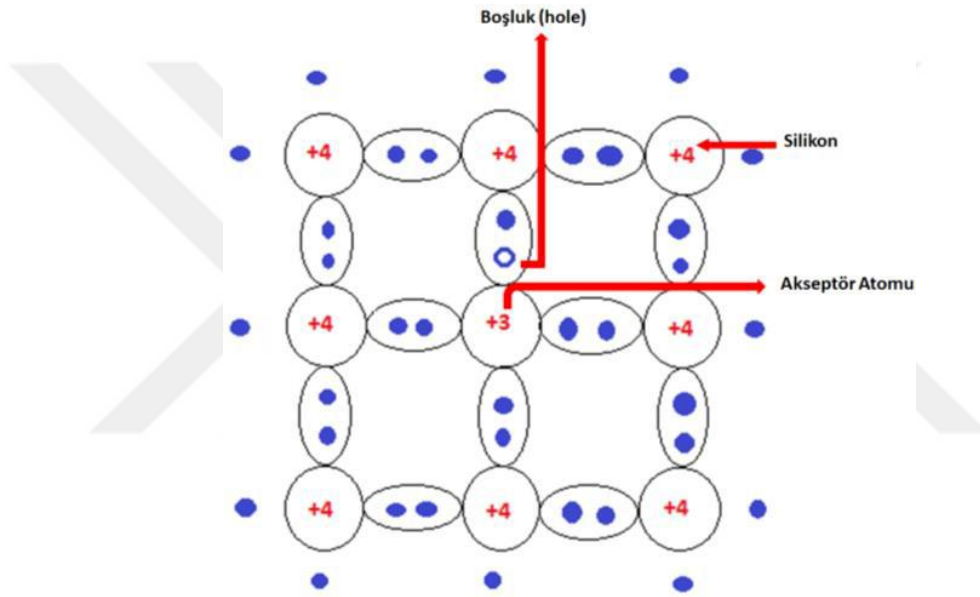
Bu yarıiletkenler, genellikle fosfor, arsenik veya antimon gibi elementlerin bir çeşitliliği ile donatılmış silisyum gibi materyallerdir. Son yörüngesinde 4 elektron bulunan silisyum ile son yörüngesinde 5 elektron bulunan arsenik (As), ile oluşturduğu bağ sonucu Şekil.5'deki gibi n-tipi yarıiletken meydana gelir. Bu elementlerin eklenmesi, yarıiletken kristal yapısında fazla elektronlar ekleyerek veya ekstra elektronlar sağlayarak yarıiletkenin iletkenliğini artırır. Bu ekstra elektronlar, yarıiletkenin elektrik akımını taşımalarını sağlar. n-tipi yarıiletkenler, elektronların çoğunluk taşıyıcıları olduğu için, negatif bir elektrik yüküne sahiptirler.



Şekil 5. n-Tipi yarıiletken maddenin oluşması

2.1.2.2. p-tipi yarıiletken

Bu yarıiletkenler genellikle bor veya galyum gibi üçlü grubun elementleri ile katkılanmış haline denir. Örneğin son yörüngesinde 4 elektron bulunan silisyum ile son yörüngesinde 3 elektron bulunan galyum (Ga), ile oluşturduğu bağ sonucu şekil.6'deki gibi p-tipi yarıiletken meydana gelir. Bu elementlerin eklenmesi, yarıiletken kristal yapısında elektron eksikliğine neden olarak, materyalin pozitif bir yük kazanmasına neden olur. Bu eksiklikler, yarıiletkenin elektrik akımını taşımasını sağlar ve elektron boşlukları olarak adlandırılırlar. Bu delik (boşluk), elektron eksikliği nedeniyle pozitif bir yüke sahiptir.



Şekil 6. p-Tipi yarıiletken maddenin oluşması

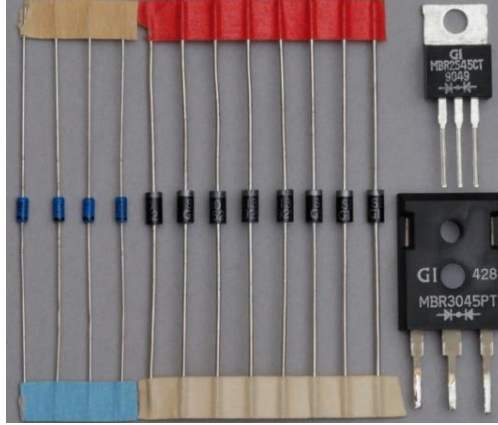
2.1.2.3. Organik yarıiletkenler

Organik yarıiletkenler, Karbon (C), hidrojen (H), oksijen moleküllerini yanı sıra genellikle azot (N) ve kükürt (S) gibi diğer elementlerle birleşen organik moleküllerden oluşur. Yarıiletken karakteri genellikle organik moleküldeki halkalı yapılarla ve pi bağlarıyla kendini gösterir. Bu moleküller, çoğunlukla amorf (düzenli olmayan) bir yapıya sahip olmakla birlikte kristal yapıda da olabilirler. Elektron taşıma yetenekleri, organik yarıiletkenlerin moleküler yapılarına bağlıdır. Genellikle, konjuge (düzgünleştirilmiş) yapılar veya aromatik halkalar içeren organik moleküller, elektronların taşınmasını kolaylaştırır. Elektronlar, moleküller arasında delokalize (yerinden oynamış) olabilirler, bu da elektronların daha uzun mesafeler boyunca

taşımasına izin verir. Organik yarıiletkenler, genellikle düşük iletkenlik seviyelerine sahiptir, yani geleneksel metaller kadar iyi iletken değildir. Bununla birlikte, belirli uygulamalarda yeterli olan iletkenlik seviyelerine sahiptirler. Örneğin, organik yarıiletkenler, transistörlerde anahtarlama işlevi görebilirler; OLED'lerde (Organik Işık Yayan Diyotlar) ışık üretebilirler ve organik güneş pillerinde enerji dönüşümü sağlayabilirler. Organik yarıiletkenlerin bir avantajı, onların işlenebilirliğidir. Çözelti işleme yöntemleri kullanılarak, organik yarıiletkenler geniş alanlarda ve düşük maliyetle üretilirler. Bu, büyük ölçekte elektronik cihazların üretimini ve ticarileştirilmesini kolaylaştırır. Ancak organik yarıiletkenlerin bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, genellikle daha düşük performans ve daha kısa ömür gibi elektronik cihazların kararlılığına ilişkin endişeler bulunmaktadır. Ayrıca, yarıiletkenin istenmeyen kimyasal ve fiziksel değişikliklere karşı dayanıklılığı sınırlı olabilir. Bu nedenle, organik yarıiletkenlerin ticari uygulamalarda daha geniş ölçekte kullanılabilmesi için araştırma ve geliştirme süreci devam etmektedir.

2.2. Schottky Diyot

Schottky diyot, yarıiletken teknolojisinde önemli bir elektronik bileşendir. Bu diyot tipi, bir metal ile bir yarıiletkenin birleşiminden oluşur. Tipik olarak, metal katot ve yarıiletken anot olarak kullanılır. Normal bir pn diyotun aksine, Schottky diyotunun anodu yarıiletken malzeme ile doldurulmaz, bunun yerine metal bir tabaka kullanılır. Schottky diyotlar, tipik pn diyotlara kıyasla daha düşük bir gerilim düşüşüne sahiptir. Bu, daha hızlı anahtarlama ve daha az güç kaybı sağlar. Schottky diyotlar, pn diyotlara göre daha hızlı anahtarlama tepkisi gösterirler. Bu, yüksek frekanslı uygulamalarda ve yüksek hızlı devrelerde avantaj sağlar. Schottky diyotların ters yöndeki akım geçirgenliği, pn diyotlara göre daha düşüktür. Bu nedenle, ters yöndeki akım geçirgenliği pn diyotlardan daha azdır. Schottky diyotlar, güç kaynakları, güç düzeltme devreleri, radyo frekansı (RF) uygulamaları, güneş panelleri ve yüksek hızlı elektronik devreler gibi birçok alanda kullanılır. Hızlı anahtarlama ve düşük gerilim kaybı gibi özellikleri, birçok uygulamada tercih edilmesini sağlar.



Şekil 7. Schottky diyot örnekleri

2.2.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Schottky diyotların yapısını anlamak için öncelikle metal ve yarıiletkenin iletkenlik özelliklerini bilmek önemlidir. Yarıiletken kristal yapısıyla kontak yapılacak malzeme, yarıiletken yapının minimum dirençle temas ettiği malzemedir. Kontak yapılacak malzemelerin yüzeyleri temiz ve pürüzsüz olmalıdır, böylece iyi bir kontak yapısı elde edilir. Metal ve yarıiletken malzemeler bir araya geldiğinde, her iki malzemedeki fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar bir yük akışı oluşur. Metal-yarıiletken kontak yapıları, doğrultucu (Schottky) kontaklar ve omik kontaklar olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Kontakın doğrultucu veya omik olmasını belirleyen şey metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarıdır. İş fonksiyonu, genel bir ifadeyle, bir metalden bir elektronun koparılması için metale verilmesi gereken enerjidir.

Φ_m (metal iş fonksiyonu) ve Φ_s (yarıiletken iş fonksiyonu) olmak üzere;

Metal- p tipi yarıiletken kontak yapılarında;

$\Phi_m > \Phi_s$ ise omik kontak

$\Phi_m < \Phi_s$ ise doğrultucu kontak

Metal-n tipi yarıiletken kontak

$\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu kontak

$\Phi_m < \Phi_s$ ise omik kontak oluşur (Karataş, 2003).

2.2.2. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar

Metal ve yarıiletkenin temas ettiği noktada, yarıiletken tarafındaki enerji seviyeleri metal tarafındakilere göre $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükselir. Bu yükselme, yarıiletken

tarafındaki holler için bir potansiyel engel oluşturur ve bu engel yüksekliği şu şekilde ifade edilir.

$$eVd = \phi_s - \phi_m \quad (2.1)$$

Burada, ϕ_m metalin iş fonksiyonu, ϕ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu ve Vd eklemi oluşturan potansiyel veya kontak potansiyel farkını temsil eder. Yarıiletken içindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır.

Metal tarafında, holler için görülen engel yüksekliği ise şu şekildedir:

$$e\phi_b = E_s - \phi_m \quad (2.2)$$

Termal uyarım nedeniyle, yarıiletken ve metal tarafındaki bazı holler, potansiyel engelini atlayacak kadar enerji kazanır ve metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale geçiş yapabilir. Termal denge koşullarında, yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene doğru olan akımlar daima eşittir. Termal dengeyi bozmak için yarıiletkene pozitif bir voltaj uygulandığında, metalden yarıiletkene olan hol akımı değişmez, ancak yarıiletken tarafından metale doğru olan hol akımında $\exp(eV/kT)$ katsayısıyla bir değişim olur ve yarıiletken içindeki tüm enerji seviyeleri eV kadar azalır. Yarıiletkenin metale geçen holler için potansiyel engel yüksekliği eV kadar azalır. Sonuç olarak, yarıiletkenden metale geçen hollerden dolayı oluşan akım pozitif olarak alınırsa, metal-yarıiletken kontağı için akım şu şekildedir

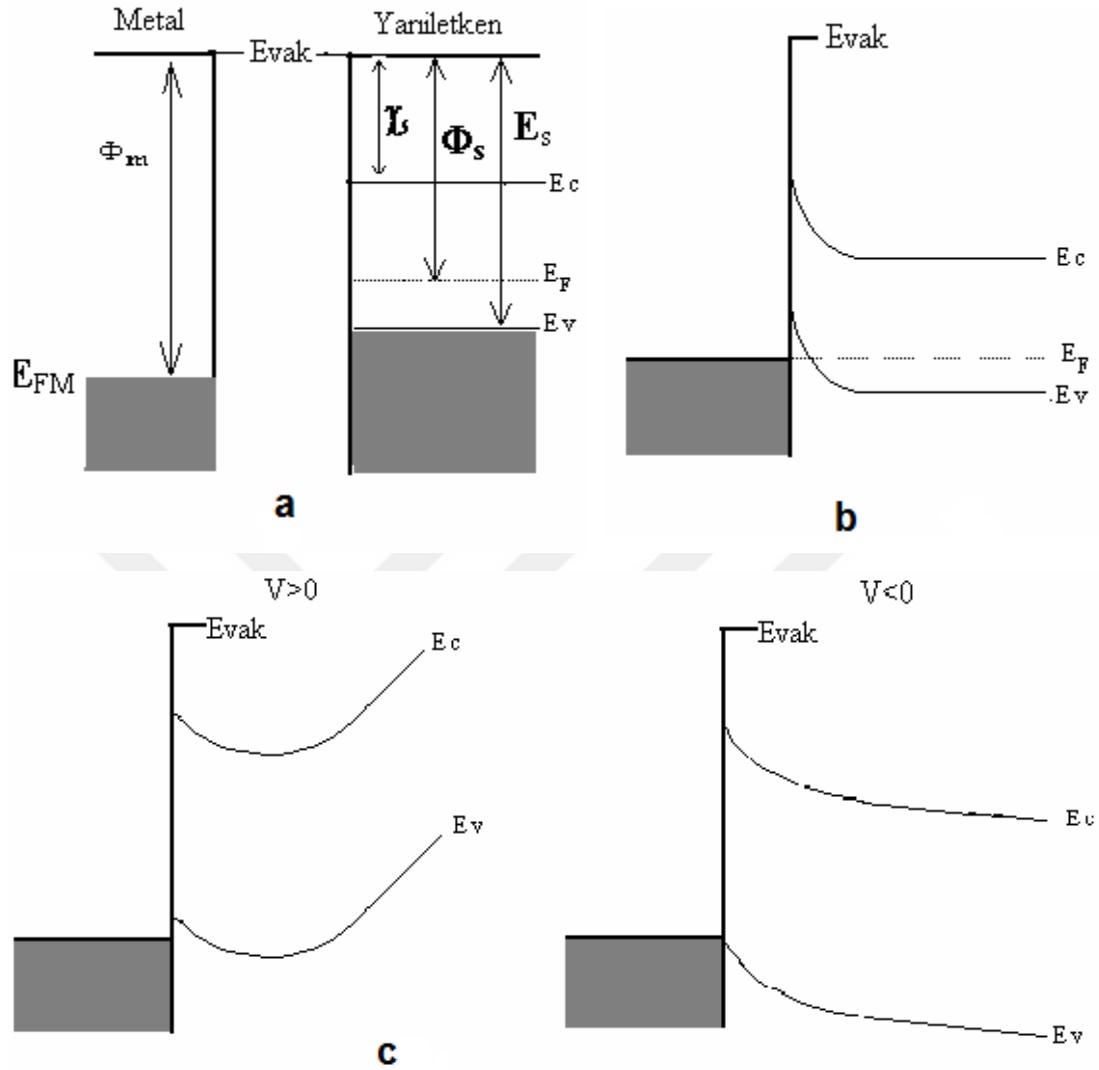
$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \quad (2.3)$$

olur ve bu kontak doğrultucu bir kontaklıdır.

2.2.3. Metal p-tipi yarıiletken omik kontaklar

Metal ve p-tipi yarıiletken kontağında, metalin iş fonksiyonu (ϕ_m) yarıiletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_s) büyük olduğunda ($\phi_m > \phi_s$), omik bir kontak oluşur. Bu durumda, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\phi_m - \phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontak oluştuktan sonra, metal ve yarıiletken arasında bir yük alışverişi gerçekleşir. Metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar, yarıiletken tarafındaki elektronlar metal tarafına doğru hareket eder ve geride pozitif yüzey yükü (boşluklardan dolayı) bırakırken, metal tarafında negatif yüzey yükü oluşturur. Bu durumda elektronların metale geçişi gerçekleşir. Ohm kanununa uygun olan ve her iki yönde de akım geçişine izin veren kontaklara omik kontak denir. Bu tür kontakların direnci mümkün olduğunca düşük olup, birkaç miliohm değerinde olabilir.

Yarıiletken tarafındaki azalan elektron konsantrasyonu nedeniyle, denge durumunda yarıiletkenin Fermi seviyesi ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar alçalır



Şekil 8. Metal p- tipi yarıiletken omik kontakın enerji-bant diagramı. a) Kontakтан önce b) Kontakтан sonra ve termal dengede c) $V \neq 0$ olması durumunda

Boşluk konsantrasyonunun artmasıyla, yarıiletken yüzeyi daha fazla p-tipi hale gelir. Bu durumda, elektronlar metal tarafından yarıiletken içindeki boş durumlara kolayca geçebilirler. Bu yük hareketi, boşlukların yarıiletken tarafından metale akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen boşluklar, yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı hemen nötralle olurlar. Ters yönde bir voltaj uygulandığında ($V < 0$), metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan boşluklar da kolayca yarıiletken tarafına geçebilirler. Bu nedenle, hem metalden yarıiletkene hem de yarıiletkeniden metale doğru kolayca akım geçişi olduğundan, bu tür kontaklar omik kontaklar olarak bilinir.

2.3. Elektriksel Parametrelerin Bulunması

Metal-yarıiletken (MS) kontakların akım iletim mekanizmalarının belirlenmesi önemlidir. Çünkü bu kontağın elektriksel özelliklerini ve davranışını anlamamıza yardımcı olur. Akım iletim mekanizmaları çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilir ve genellikle şunlar etkili olabilir:

Sıcaklık: Kontakta akım iletim mekanizması sıcaklığa bağlı olarak değişebilir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda termal etkilerin rolü artabilir.

Arayüzey durumları: Metal ve yarıiletken arasındaki arayüzeydeki durumlar (örneğin, bağlanma durumu veya kusurlar) akım iletimini etkileyebilir.

Seri direnç: Kontakta oluşan seri direnç, akım iletim mekanizmasını belirlemede önemli olabilir.

Uygulanan gerilim: Kontak üzerinde uygulanan gerilim, akım iletim mekanizmasını etkileyebilir.

Kontak bölgesinde oluşan elektrik alan: Elektrik alanlar, yarıiletken içindeki taşıyıcıların hareketini etkileyebilir ve dolayısıyla akım iletim mekanizmasını belirleyebilir. Bu yapılar için geçerli olabilecek akım iletim mekanizmaları arasında şunlar bulunur:

Termiyonik emisyon: Elektronlar, yüksek sıcaklıklarda metal-yarıiletken arayüzeyinden serbest bırakılabilir.

Alan emisyonu: Uygulanan elektrik alan, yarıiletken içindeki taşıyıcıların hareketini hızlandırabilir ve böylece akım oluşturabilir.

Bozulma geçişi: Yüksek elektrik alanları, yarıiletken içinde bozulma geçişleri oluşturabilir, bu da akım oluşturabilir.

Diğer taşıyıcı türleri: Schottky kontağında, elektronların yanı sıra, bazen boşluklar da akım iletimine katkıda bulunabilir.

Hangi kuramın geçerli olduğunu belirlemek genellikle deneysel ve teorik çalışmaları içerir ve belirli bir kontak yapısının özelliklerine ve koşullarına bağlı olabilir.

2.3.1. Termiyonik emisyon (TE) teorisi

Termiyonik emisyon, yüzeydeki taşıyıcıların termal enerji nedeniyle serbest bırakılması olayıdır. Metal-yarıiletken kontaklarda, bu teori, taşıyıcıların termal enerjisiyle potansiyel engeli aşarak yarıiletken ile metal arasında veya metalden

yarıiletken geçişini açıklar. Bu olay, akım iletimine büyük katkı sağlar. Schottky diyotlarda, akım çoğunluk taşıyıcıları (elektronlar veya boşluklar) tarafından sağlanır. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise boşluklar tarafından taşınır.

Bethe'nin MS kontaklarda akımın çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletilildiğini kabul ederek kurduğu TE'nin varsayımları aşağıdaki şekildedir (Sze, 1981; Rhoderick ve Williams, 1988; Güllü, 2008). Potansiyel engelinin yüksekliği, kT/q enerjisinden çok büyüktür. Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmamaktadır. Yani taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin kalınlığından daha fazladır. Görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmekte, engelin biçimi önemsiz olup akım engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır (Taşcıoğlu, 2012). Metal-yarıiletken kontaklardaki akım mekanizmaları ilk olarak Bethe tarafından ve daha ayrıntılı olarak da Crowell ve Sze tarafından ortaya koymuştur (Rhoderick ve Williams, 1988). Aşağıdaki gibi bu akım yazılabilir.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

Bu ifadedeki, q elektron yükü, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık, V uygulanan gerilim ve n idealite faktörüdür. Yukarıdaki denklemde yer alan I_0 ters beslem doyma akımı olup;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.5)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadede bulunan A diyotun alanı, Schottky engel yüksekliği (n) ve A^* Richardson sabitir ve;

$$A^* = \frac{4\pi q A^* n k^2}{h^3} \quad (2.6)$$

2.3.2. İdealite Faktörü

İdealite faktörü, bir yarıiletken diyotunun gerçek davranışı ile ideal diyot davranışı arasındaki farkı ifade eden bir kavramdır. Bir yarıiletken diyotunun ideal olmayan davranışını tanımlayan bir parametredir.

Diyotun ideal özelliklerinin bulunması için $n=1$ olarak verilir. İdealite faktörü bulunurken $V \gg 3kT$ ileri sapmada, bu denklemdeki 1 terimi ihmal edilebilir. Bu durumda aşağıdaki 2.7 denklemi elde edilir (Sze, 2007).

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1 \right], \quad I = I_0 \exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) \quad (2.7)$$

Yukarıda yazdığımız 2.7 denkleminin her iki tarafının $\ln$ 'ni alındıktan sonra V 'ye göre türev alınarak aşağıdaki denklem 2.8 ile idealite faktörü denklemi elde edilir.

$$n = \frac{e}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (2.8)$$

2.3.3. Engel Yüksekliği

Yarıiletken diyotlar, bir pn bağlantısı oluşturulduğunda veya bir metal ile yarıiletken arasında bir Schottky kontağı kurulduğunda, içlerinde bir potansiyel engel meydana gelir. Bu potansiyel engel, diyotun ileri doğrultuda iletimini ve ters doğrultuda engellemesini sağlar. Engel yüksekliği, bu potansiyel engelin yüksekliğini ölçer ve diyotun elektriksel özelliklerini belirler. Diyottan geçen akım aşağıdaki 2.9 denklemiyle bulunabilir (Sze, 2007).

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_D}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

I_0 doyma akımı 2.10 denkleminde verildiği gibi hesaplanır

$$I_0 = AA^* T^2 \exp \left(- \frac{q\phi_B}{kT} \right) \quad (2.10)$$

Denklem 2.11'den yararlanarak diyotların engel yüksekliği her iki tarafın "ln"ni alınırsa ve düzenlenirse aşağıdaki 2.11 denklemiyle hesaplanabilir.

$$\phi_B = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{AA^* T^2}{I_0} \right) \quad (2.11)$$

Denklem 2.11'de A diyot kontak alanı, A^* Richardson sabiti, T Kelvin derecesi cinsinden sıcaklık, k Boltzmann sabitidir.

2.3.4. Seri Direnç Hesabı

Seri direnç, diyotlarda elektriksel iletkenlik sağlayan yarıiletken malzeme ve metal kontağın tükenim bölgesi dışında kalan kısımlarının akıma karşı gösterdiği dirençtir. Bu direnç, diyotun gerçek dünya uygulamalarında ideal olmayan davranışının bir sonucudur. Seri direnç, diyotun iletkenlik özelliklerini etkiler ve elektriksel performansını değiştirir.

Seri direnç, genellikle diyotun I-V grafiğinden ve ölçüm değerlerinden yararlanılarak hesaplanır. Seri direnç hesaplama yöntemleri şunlardır.

2.3.4.1. Norde Yöntemi

Metal yarıiletkenlerin seri dirençleri Norde yöntemi ile hesaplanabilir. Norde fonksiyonunu kullanarak $n = 1$ durumu için seri direnci ve engel yüksekliğini tanımlar. Norde yönteminde seri direnç ve engel yüksekliği parametreleri hesaplanırken sıcaklık sabit ise bir I-V eğrisine ihtiyaç duyulur. Sıcaklık sabit olmadığı durumlarda en az iki akım-gerilim karakteristiği kullanılarak aşağıdaki fonksiyonla hesaplanabileceğini göstermiştir (Norde, 1979).

$$F(V) = \frac{V}{2} - (\beta - 1) \ln \left(\frac{1}{AA^*T^2} \right) \quad (2.12)$$

Diyotların I-V karakteristiklerinden Φ_B değerlerinin hesaplanması için denklem 2.13'teki yaklaşım Rhedorick tarafından geliştirilmiştir

$$I = I_S e^{\frac{\beta V}{n}} \quad (2.13)$$

Seri direnç eğer çok büyükse ve bir doğrusal bölgesi yoksa $F(V)$ eğrisi aşağıdaki 2.14 denklemlle ifade edilir.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{1}{\beta} \right) \ln \left(\frac{1}{AA^*T^2} \right) \quad (2.14)$$

Böylece engel yüksekliği ve seri direnç değerleri denklem 2.15'teki gibi hesaplanabilir:

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta'} \quad R_S = (\beta I_0)^{-1} \quad (2.15)$$

Akım-Gerilim karakteristikleri aşağıdaki verilen denklem 2.16'deki gibi hesaplanabilir:

$$I = I_S (e^{(V-IR)} - 1) + I_r \left(\frac{e^{\beta(V-IR)}}{2} \right) \quad (2.16)$$

Denklem 2.15 ve 2.16' deki denklemlerde I_0 doğru besleme değerindeki minimum akım, V_0 doğru besleme minimum voltajı, I_r asal taşıyıcı konsantrasyonu ifade eder.

$F(V) = \Phi_B - \Delta\Phi$ eşit olduğunu kabul edersek $F(V)$ ifadesi denklem 2,17'deki gibi yazılabilir.

$$F(V) = \phi_B - \Delta\phi + I_R - \frac{V}{2}(1 - 2\alpha) \quad (2.17)$$

Daha sonra yukarıdaki ifade denklem 2.18'deki gibi ifade edilebilir.

$$\phi_B - \phi\Delta\phi = F(V) + (1 - 2\alpha) \left(\frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \right) \quad (2.18)$$

Norde yöntemiyle seri direnç ve engel yüksekliği (ϕ_B) değerlerinin yaklaşık olarak bir tahminle bulunur. Diyotun elektriksel grafiğinin bir bölümü fit edilerek elektriksel özellikler bulunur. Bu duruma göre Norde fonksiyonu aşağıdaki gibi olur:

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} I_R - \frac{V}{2} \ln \left(\frac{V}{AA^* T^2} \right) \quad (2.19)$$

Denklem 2.19'de iki tarafın ln'i alınır, aşağıdaki 2.20 denklemi elde edilir.

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V + \phi_B + \frac{IR}{n} \quad (2.20)$$

Denklem 2.20'de seri direnç sıfır olursa $F(V)$ - V grafiğinin, eğimi $(n - \gamma) / n\gamma$ olur. Seri direnç sıfır değilse akım ifadesi denklem 2.21'deki gibi yazılır.

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{V}{RAA^* T^2} \right) \quad (2.21)$$

Denklem 2.21'de V 'ye göre türevi alınır, aşağıdaki 2.22 ve 2.23 denklemleri elde edilir.

$$\phi_B = F(V_0, \gamma) - \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V_0 - \frac{(\gamma - n)}{(\beta n)} \quad (2.22)$$

$$R_S = \frac{(\gamma - n)}{(\beta I_0)} \quad (2.23)$$

2.3.4.2. Cheung Yöntemi

Diyotların parametrelerini doğru besleme yaparak ve çizdikleri I - V karakteristiğini kullanarak, diyottan geçen toplam akım değerini hesaplamıştır (Cheung ve Cheung, 1986).

$$I = A_j = AA^* T^2 \exp \left[-\frac{eV_D}{kT} \right] \exp \left[\frac{(eV) - 1}{KT} \right] \quad (2.24)$$

Denklem 2.24'te $eV \gg kT$ olduğu için, 1 değeri göz ardı edilebilir. İdeal bir durumdan sapmalar olacağı ve sabit bir idealite faktörü düşünülerek aşağıdaki 2.25'deki ifade yazılabilir

$$I = A_j = AA^* T^2 \exp \left[-\frac{eV_D}{kT} \right] \exp \left[\frac{(eV)}{KT} - 1 \right] \quad (2.25)$$

Uygulanan gerilim V değeri ile IR_s değerinin çarpımı olarak ifade edilebilir. Böylece V yerine IR_s ifadesi yazıldığında aşağıdaki 2.26'deki denklem elde edilmektedir:

$$I = A_j = AA^*T^2 \exp \left[-\frac{eV_D}{kT} \right] \exp \left[\frac{e(V-IR_s)}{nKT} - 1 \right] \quad (2.26)$$

$$V = \left(\frac{nKT}{e} \right) \ln \left(\frac{1}{AA^*T^2} \right) + n\Phi_B + IR_s \quad (2.27)$$

Denklem 2.27'deki $\ln I$ 'ya göre türevi alınarak aşağıdaki 2.28'deki denklem elde edilir:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nKT}{e} + IR_s \quad (2.28)$$

Φ_B , potansiyel engel yüksekliği ise, aşağıdaki şekilde formül ize edilebilir

$$H(I) = V - \left(\frac{nKT}{e} \right) \ln \left(\frac{1}{AA^*T^2} \right) \quad (2.29)$$

Denklem 2.29'daki ifadeye göre, denklem 2.30'deki ifade yazılabilir.

$$H(I) = N\beta B + IR_s \quad (2.30)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışmada kullanılan malzemeler

3.1.1. Silisyum

Kimyasal sembolü Si olan bir elementtir. 4A grubunda 3. periyotta bulunur. Atom numarası 14'tür ve atom ağırlığı yaklaşık olarak 28.085 g/mol'dür.. Silisyum, genellikle doğada silikat minerallerinde bulunur ve dünyanın kabuğunun en yaygın elementlerinden biridir. Silisyum, yarıiletkenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Özellikle, mikroelektronik endüstrisinde entegre devrelerin ve diğer yarıiletken cihazların üretiminde temel bir malzeme olarak kullanılır. Silisyum, saf haliyle veya diğer elementlerle alaşımlar oluşturularak çeşitli elektronik bileşenlerin üretiminde kullanılır. Ayrıca, silisyum güneş pillerinin ana bileşenlerinden biridir. Güneş pilleri, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan cihazlardır ve silisyum güneş pillerinin yaygın kullanımı, güneş enerjisi endüstrisinin büyümesine katkıda bulunmuştur. Silisyumun diğer kullanım alanları arasında cam endüstrisi (silikon dioksit olarak), seramikler, alaşımlar, polimerler ve kimyasal ürünlerin üretimi yer alır.

3.1.2. Alüminyum

Alüminyum, periyodik tabloda III A grubunda 13 atom numarası ile bulunan metalik bir elementtir. Al, elementin sembolü olarak da kullanılır. Alüminyumun atomik kütle birimi (AKB) yaklaşık olarak 26.98 g/mol'dür. Alüminyumun yoğunluğu ise yaklaşık olarak 2.70 g/cm³'tür. Alüminyum, dünyanın en yaygın metalik elementlerinden biridir ve doğada geniş bir şekilde bulunur. Birincil cevher olarak boksit minerallerinden elde edilir.

3.2. Organik Kompleks bileşiğin Özellikleri

3.2.1. Organik Ligand

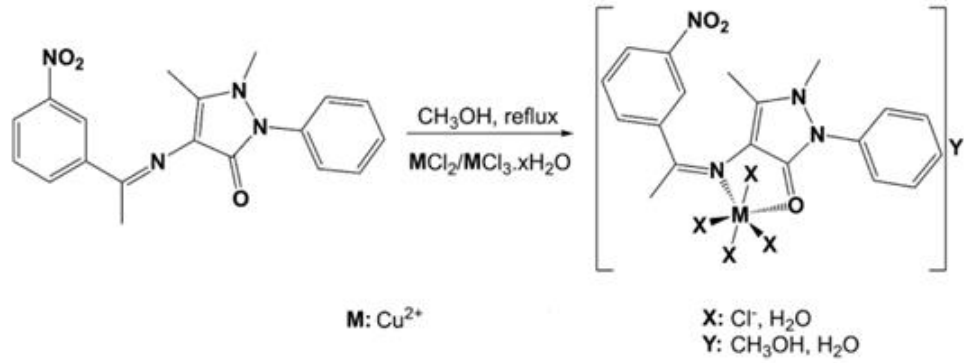
Ligand metal kompleksinin organik kısmını temsil eder. Genellikle kompleks yapısı içinde kısaca L sembolü ile gösterilir. Bu çalışmada kullanılan metal kompleks

ligandı “1,5-dimethyl-4-((1-(3-nitrophenyl) ethylidene) amino)-2-phenyl-1,2-dihydro-3H-pyrazol-3-one” dır ve kapalı formülü $C_{19}H_{18}N_4O_3$ dir. Katı olarak bulunur, rengi koyu sarıdır. Erime noktası 181-182 $^{\circ}C$ ’dir.

3.2.2.Metal kompleks

Bu çalışmada organik ara tabaka olarak kullanılan metal kompleksi $[Cu(L)Cl_2] [H_2O]_8$ Shif bazlı kompleksi olup kapalı formülü $C_{19}H_{18}Cl_2N_4O_{11}Cu$ şeklindedir. Atomun ağırlığı 629g/mol civarı olup rengi kahvedir. Dimetilsülfat da (DMSO) çözülür. 10 tane pi bağı ve halka yapısı sayesinde yarıiletkenlik gösterir (Çakmak ve ark.2023).

Metal kompleksinin sentez aşaması ve kimyasal yapısı şekil.9’da gösterilmiştir.



Şekil 9. Cu metal kompleksinin sentez aşamasının diyagramı.

3.3. İnorganik Yarıiletken (p-Si) Kristalinin Temizlenmesi

Bu çalışmada kullanılan p-Si kristalindeki fiziksel ve kimyasal kirliliklerin giderilmesi ve mevcut oksit tabakasının en aza indirilmesi amacıyla bazı kimyasal temizlik prosedürleri uygulanmıştır. Şekil10.a’daki gösterilen aseton, izopropanol, deiyonize su ve ultrasonik temizleyici ile numune kimyasal olarak temizlenmiştir.



Şekil 10. (a) Ultrasonik Temizleyici (b) Termal Buharlaştırma Sistemi

3.3.1. p-Si numune temizlik aşamaları:

- Ultrasonik karıştırıcı içerisinde aseton ile on dakika yıkanmıştır.
- Deiyonize su ile beş dakika durulanmıştır.
- Ultrasonik karıştırıcı içerisinde İzopropional alkol ile on dakika yıkanmıştır.
- Deiyonize su ile beş dakika durulanmıştır.
- 30 sn HF(1:10) de bekletilmiştir
- Deiyonize su ile on dakika durulanmıştır
- Son olarak azot gazı (N_2) ile kurutulmuştur

3.4. Döndürme Metodu (Spin Coating) ile Kaplama İşlemi

Döndürme metodu, ince film kaplama işlemlerinde sıkça kullanılan bir yöntemdir ve genellikle bir alt katmanın yüzeyini kaplamak için tercih edilir. Bu yöntem, çeşitli uygulamalarda kullanılan kaplama malzemelerinin homojen ve kontrol edilebilir bir şekilde alt katmana uygulanmasını sağlar.

Alt Katmanın Hazırlanması: İlk adım, kaplanacak olan alt katmanın hazırlanmasıdır. Bu, genellikle malzemenin temizlenmesi, düzgün bir yüzey elde etmek için düzeltilmesi

ve gerektiğinde yüzey özelliklerinin iyileştirilmesini içerir. Malzeme, genellikle cam, silisyum veya polimerik malzemelerden oluşur.

Kaplama Malzemesinin Hazırlanması: Kaplama işlemi için kullanılacak malzeme uygun bir formda hazırlanır. Bu malzeme genellikle bir çözelti (jel) formunda bulunur. Kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak, kaplama malzemesi uygun bir çözücü içinde çözülebilir veya uygun bir buharlaştırma tekniğiyle hazırlanabilir.

Döndürme Ekipmanının Hazırlanması: Döndürme işlemi için uygun bir ekipman seçilir ve hazırlanır. Spin kaplama cihazı, alt katmanın homojen bir şekilde döndürülmesini sağlar ve kaplama malzemesinin yüzeye eşit bir şekilde dağılmasını sağlar. Döndürme hızı ve zamanı, kaplama kalınlığı ve homojenliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

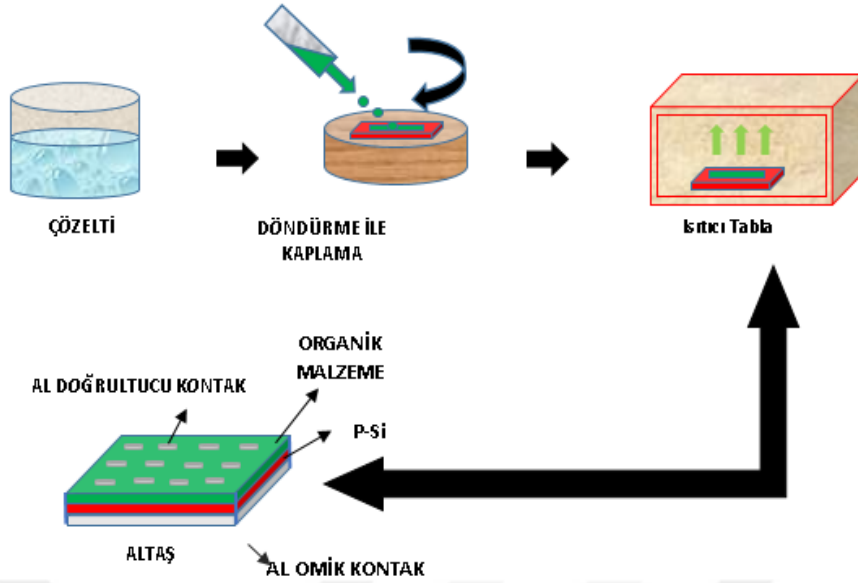
Kaplama İşlemi: Alt katman, döndürme cihazına yerleştirilir ve kaplama malzemesi alt katmanın yüzeyine uygulanır. Döndürme işlemi sırasında, kaplama malzemesi yüzeye yayılır ve istenen kaplama kalınlığına ulaşılır. Döndürme işlemi genellikle bir vakum altında veya kontrol edilen atmosferik koşullarda gerçekleştirilir.

Kurutma ve İşleme: Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra, kaplama malzemesinin kurutulması veya istenilen kimyasal reaksiyonların gerçekleştirilmesi gerekebilir. Bu adımlar, kaplama malzemesinin alt katmana sağlam bir şekilde bağlanmasını sağlar ve istenilen fiziksel ve kimyasal özelliklerin elde edilmesini sağlar.

Karakterizasyon ve Analiz: Son olarak, kaplanmış yüzeyin özellikleri karakterize edilir ve analiz edilir. Bu adımlar, kaplama kalınlığı, yüzey morfolojisi, kimyasal bileşim ve diğer özelliklerin değerlendirilmesini içerir. Bu analizler, kaplama işleminin başarısını değerlendirmek ve gerekli iyileştirmeleri belirlemek için önemlidir.

Döndürme metodu, ince film kaplama işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve birçok endüstriyel ve araştırma uygulamasında kullanılmaktadır. Bu yöntem, homojen ve kontrol edilebilir kaplama kalınlıkları elde etmek için etkili bir yöntemdir

Şekil 11’de ürettiğimiz diyotların üretim aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 11. Kaplama işlem basamakları

- p-tipi Silisyum spin coater üzerine yerleştirildi.
- Hazırlanan çözeltiden 2-3 damla (yaklaşık olarak) p-tipi Silisyuma üzerine damlatıldı.
- Spin coater cihazında süre 30 sn, hız 1000 rpm'e olarak ayarlandı. Böylece p-tipi silisyum altaş üzerine çözeltinin ince bir tabaka şeklinde ve homojen dağılması sağlandı.
- Her bir kaplamadan sonra filmler 100 °C sıcaklığındaki ısıtıcı tabla üzerinde 1-2 dakika kadar bekletilerek filmin katılaşması sağlandı.

3.5. Diyotun Akım- Gerilim (I-V) Özellikleri

Akım-gerilim (I-V) özellikleri, elektronik devrelerin temel bileşenlerinden biri olan diyotların davranışlarını anlamak için önemli bir göstergedir. Diyotlar, doğrusal olmayan bir elektrik bileşeni olarak tanımlanır ve akım ile gerilim arasındaki ilişki lineer değildir. İleri ve ters yönde farklı davranışlar sergileyen diyotlar, elektrik akımını bir yönde iletebilir veya engelleyebilirler. İleri yönde çalıştıklarında, diyotlar düşük direnç gösterir ve gerilim arttıkça akım da artar. Ters yönde çalıştıklarında ise, genellikle çok az akım geçirirler. Ancak, ters yönde bir kritik gerilime (zener gerilimi) ulaştıklarında, diyotun ters akımı hızla artar ve belirli bir gerilimde sabit bir gerilim düzeyi sağlar. Bu noktada diyot, zener diyot

olarak adlandırılır. Diyotların I-V özellikleri, elektronik devrelerin tasarımı ve analizi için temel bir bilgi kaynağıdır. I-V grafikleri kullanılarak diyotların seri direnç, idealite faktörü ve bariyer yüksekliği gibi değişkenleri hesaplanmaktadır. I-V grafiklerinin doğrusal kısmından engel yüksekliği hesaplanırken doğrusallığın bozulduğu kısım yardımıyla da seri direnç hesaplanmaktadır. Bir diyotun doğru beslem akımı uygulanan potansiyele bağlı olarak Termiyonik Emisyon Teorisi ile bulunur (Hameed, 2021).

3.5.1. Engel yüksekliği

Yarıiletken diyotlar, bir pn bağlantısı oluşturulduğunda veya bir metal ile yarıiletken arasında bir Schottky kontağı kurulduğunda, içlerinde bir potansiyel engel meydana gelir. Bölüm 2.3.3 de değinildiği gibi bir diyotun engel yüksekliği,

$$\phi_B = \frac{KT}{e} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (3.1)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

3.5.2. Seri direnç

Diyotlarda elektriksel iletkenlik sağlayan yarıiletken malzeme ve metal kontağın tüketim bölgesi içinde olmayan kısımlarının akıma karşı gösterdiği zorluktur. Seri direnç, genellikle diyotun I-V ölçümünden elde edilen grafikten yararlanılarak hesaplanır. Diyotların Seri direnç değerini bulmak için birçok yöntem vardır. Bunlardan en çok kullanılan Cheungs's metodu ve Norde metodudur.

3.5.2.1. Cheung Metodu

Schottky diyotların I-V karakteristiğindeki çeşitli parametreleri hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu fonksiyonlar, diyotun gerçek davranışını daha iyi modellemeye ve diyot parametrelerini belirlemeye yardımcı olur.

Cheung fonksiyonları, Schottky diyotun I-V karakteristiğindeki bükülme ve diğer etkileri tanımlar. Bu fonksiyonlar, diyotun seri direnci değerini hesaplanmasında kullanılır. Denklem 3.2 de verildiği gibi yazılır.

$$H(I) = n\phi_{bn} + IR_S \quad (3.2)$$

3.5.2.2. Norde Metodu

Diyot seri direncin değerini bulmada kullanılan başka bir yol da Norde metodudur. Bu metotta seri direnç ve bariyer yüksekliğini bulmak için kullanılan fonksiyonlar Norde fonksiyonları olarak bilinir ve denklem 3.4 ve 3.5 te verildiği gibi yazılır

$$\phi_b = F(V_0) + \left(\frac{V_0}{\gamma} - \frac{KT}{e} \right) \quad (3.4)$$

$$R_S = \frac{KT(\gamma-n)}{eI_0} \quad (3.5)$$

3.5.3. idealite faktörü

İdealite faktörü, bir diyodun gerçek davranışı ile ideal davranışı arasındaki farkı belirtir. Diyotlar ideal olarak ters yönde tamamen yalıtkan olmalıdır, ancak pratikte çok küçük bir ters akım meydana gelir. Bu akıma doyma akımı veya sızıntı akımı denir. Bu faktör, diyotun gerçek performansını modellemek ve anlamak için önemlidir. İdeal bir diyotun idealite faktörünün 1 olması beklenir. İdealite faktörü 1'den ne kadar saparsa, diyot o kadar ideal olmaktan uzaklaşır. İdealite faktörü birimsizdir ve "n" harfiyle temsil edilir. (Yılmaz, 2018).

$$n = \frac{e}{KT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (3.6)$$

3.6. Üretilen Diyotun Kapasite-Gerilim Karakteristikleri

Diyotların kapasite-gerilim karakteristikleri, elektronik devrelerin yüksek frekans performansını belirleyen kritik bir faktördür. Bu karakteristikler, bir diyotun ters yöndeki kapasitansının gerilime bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir ve diyotun yarıiletken yapısı, imalat süreci ve fiziksel özelliklerinden etkilenir. Genellikle, ters yöndeki kapasitansın ters yöndeki gerilim arttıkça azaldığı gözlemlenir, çünkü diyotun ters yöndeki gerilime maruz kalmasıyla depolama bölgelerindeki taşıyıcı birikimi artar. Bu karakteristikler, yüksek frekanslı devrelerin analizinde ve tasarımında kritik öneme sahiptir. Özellikle (radyo frekans)RF ve mikrodalga devrelerinde doğru diyot seçimi ve anlayışı, devre performansının optimize edilmesinde hayati bir rol oynar.

Grafik analizleri kullanılarak elektriksel karakterizasyon yapılmaktadır. Ters besleme gerilimi ile ölçülen kapasite üzerinden doğrultucu kontak bariyer yüksekliği ve taşıyıcı yoğunluğu hesaplanabilmektedir (Özaydın, 2012). C-V ölçümlerinden yararlanarak denklem 3.7,3.8,3.9 ve 3,10,3.11,3.12 şeklinde ifade edilen parametreleri bulunur.

$$C = A \left(\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(V_d - \frac{KT}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Diyot kapasitesi}) \quad (3.7)$$

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (\text{Diyot kapasitesi}) \quad (3.8)$$

$$N_d = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (\text{Donor konsantrasyonu}) \quad (3.9)$$

$$E_f = kT \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \quad (\text{Fermi Enerji seviyesi}) \quad (3.10)$$

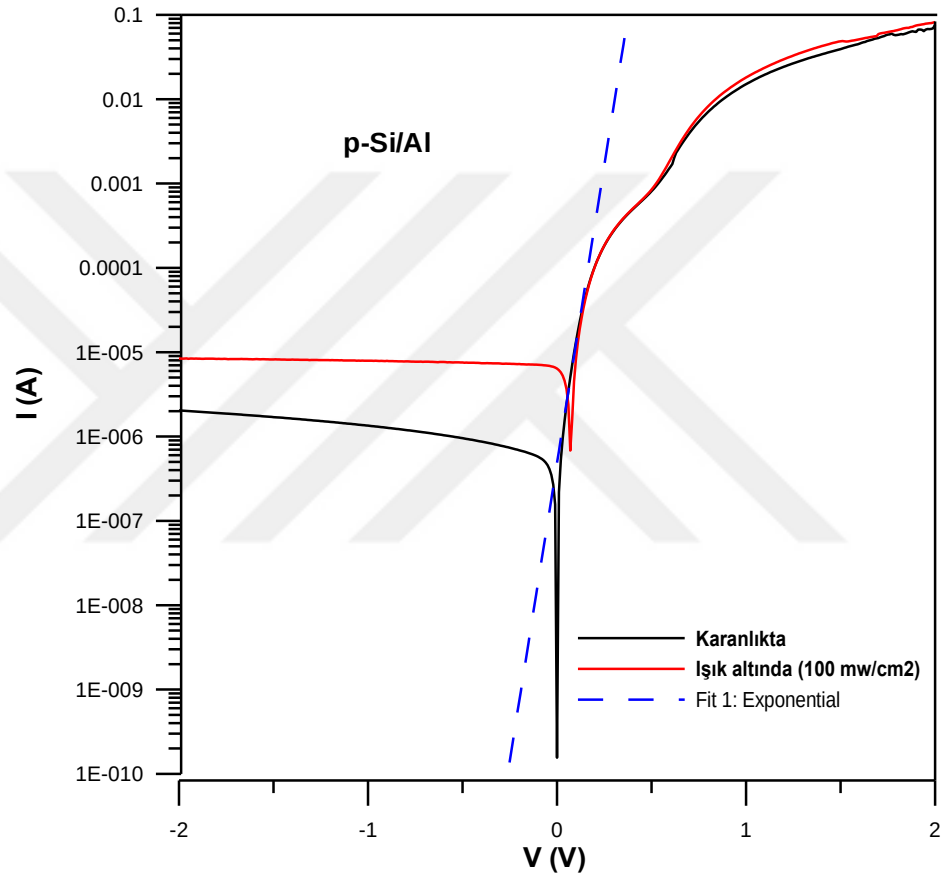
$$\Phi_{B(C-V)} = c_2 V_d + E_F \quad (\text{Engel Yüksekliği C-V'den}) \quad (3.11)$$

$$c_2 = \frac{1}{n} \quad (\text{idealite faktörünün çarpmaya göre tersi olan bir katsayı}) \quad (3.12)$$

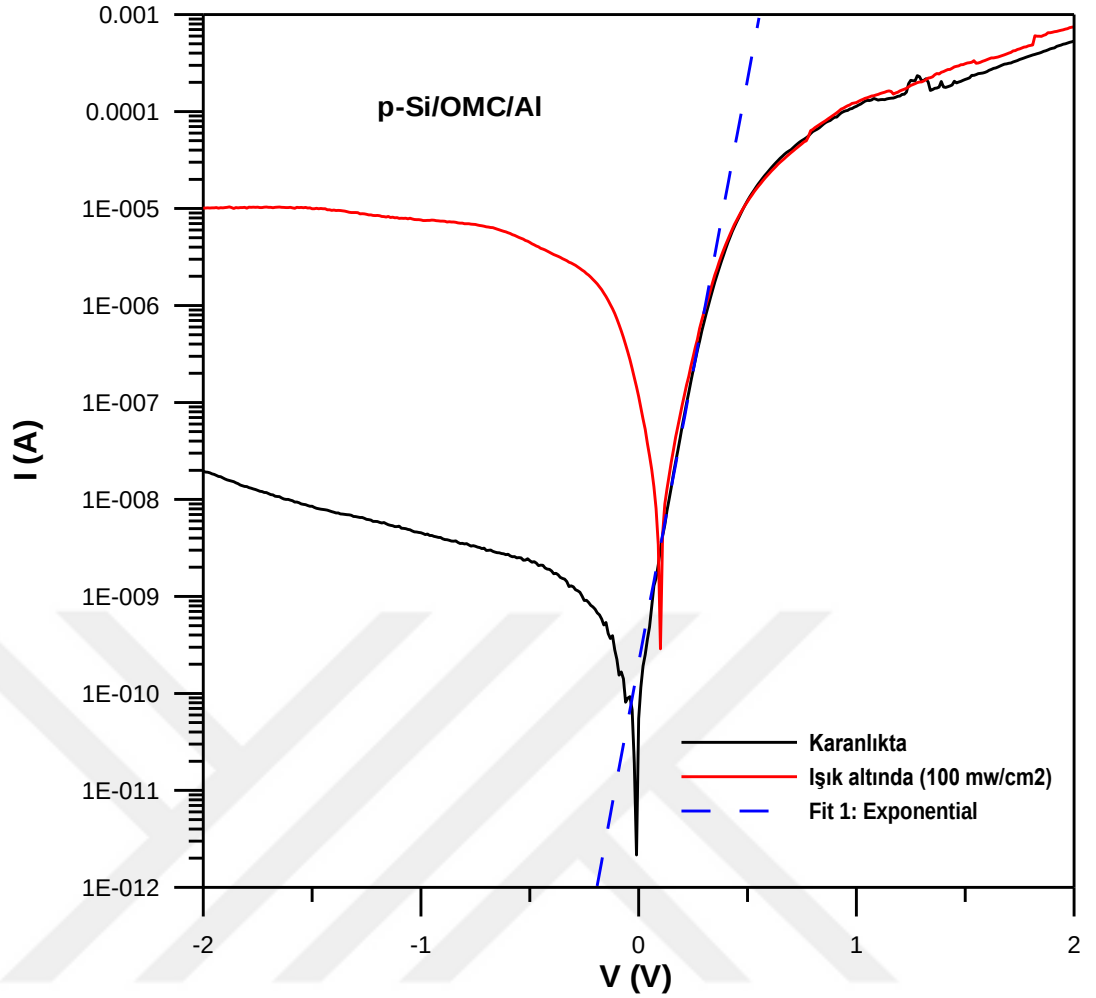
Diyotların C-V ölçümlerinden elde edilen değerler yarıiletken teknolojisinin mesafe alması için kıymetli parametreler içermektedir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Fabrikasyonu yapılan ara tabakasız p-Si/Al ve organik ara tabakalı p-Si/OMC/Al diyotlarının I-V ölçümleri oda sıcaklığında, karanlık ve ışık altında, -2V—+2V aralığında 0.02 V aralıklarla yarıiletken karakterizasyon cihazıyla gerçekleştirildi. Hem p-Si/Al hem de p-Si/OMC/Al diyotlarının ölçümlerden elde edilen karanlık ve ışık altındaki yarı logaritmik I-V ($\ln(I)$ -V) grafikleri şekil12 ve şekil13'te sırasıyla gösterilmiştir



Şekil 12. p-Si/Al MS diyotunun karanlık (Siyah) ve ışık altında (Kırmızı) $\ln I$ -V grafiği.

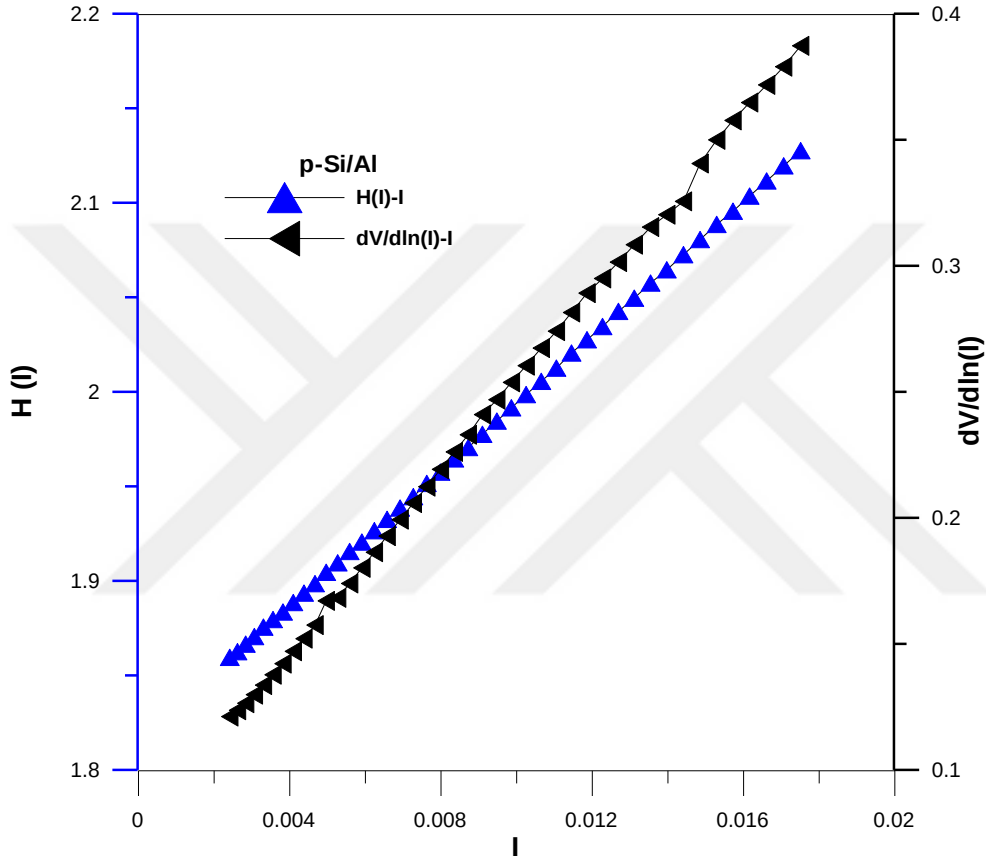


Şekil 13. p-Si/OMC/Al MIS diyotunun karanlık (Siyah) ve ışık altında (Kırmızı) lnI-V grafiği

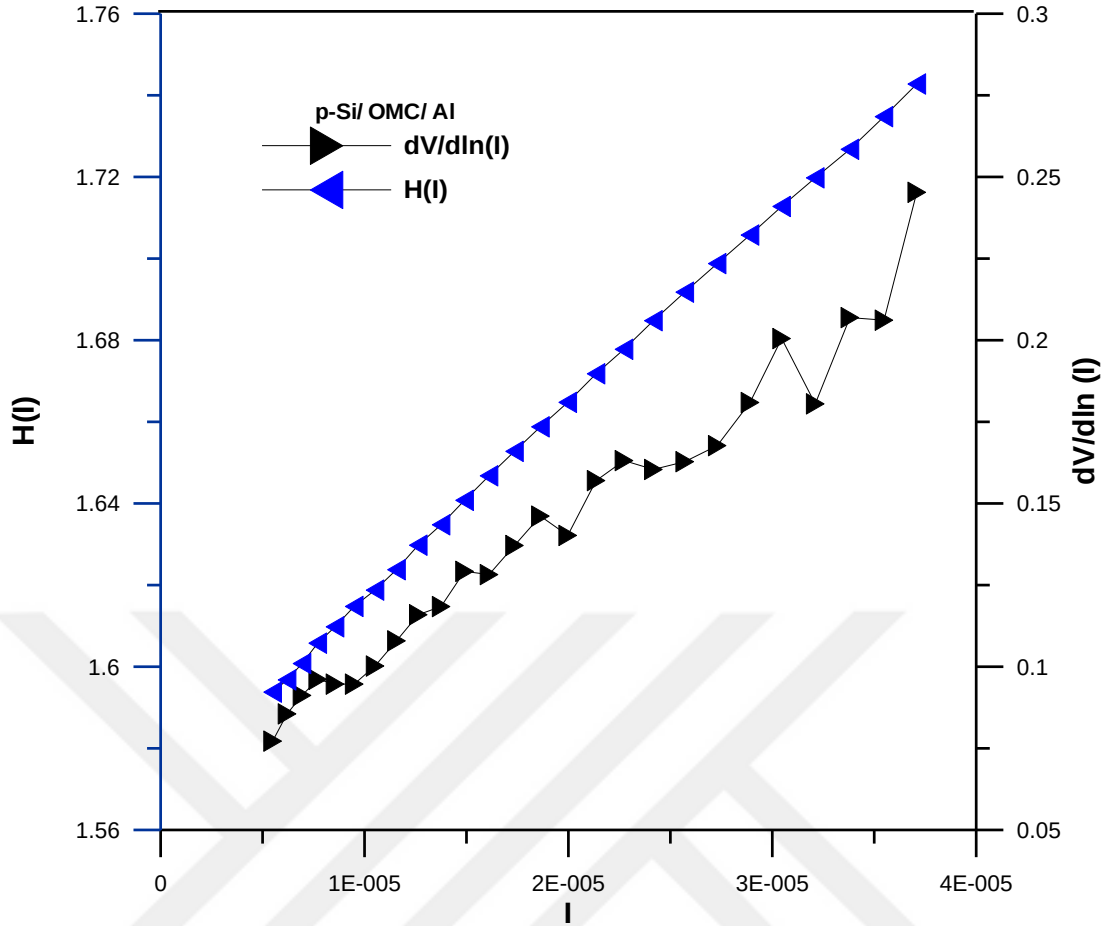
Denklem 3.1. ve 3.6. kullanılarak diyotların deneysel idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_B) ve sızıntı akımı (I_0) verileri hesaplandı. Ara tabakasız p-Si/Al diyotunun lnI-V grafiğinden idealite faktörü $n=1.19$, engel yüksekliği (Φ_B)=0.63 eV ve sızıntı akımı (I_0)= 4.83×10^{-7} A olarak bulunurken ara tabakalı p-Si/OMC/Al diyotunun idealite faktörü ise $n=1.39$, engel yüksekliği (Φ_B)=0.83 eV ve sızıntı akımı (I_0)= 2.05×10^{-10} A olarak bulundu. Engel yüksekliği değeri diğer bazı organik arayüz katmanlı Schottky diyotlarla karşılaştırılabilir bir bariyer yüksekliği değeri gösterir. Bir çalışmada Karataş ve ark. (2006), bir Al/Rh101/p-Si/Al kontağı ürettirler. Al/Rh101/p-Si/Al kontağının bariyer yüksekliği (0,817 eV), geleneksel Al/p-Si Schottky diyotunun bariyer yüksekliğinden önemli ölçüde daha büyüktü. P-si/Al diyotunun idealite faktörü literatürdeki bazı p-Si/Al diyot sonuçlarından büyük çıkmıştır. Örneğin, Şenarslan ve ark. (2016), ürettikleri Al/p-Si/Al diyotunun idealite faktörünü 1.02 olarak hesaplamışlardır. Ancak başka bazı çalışmalarda p-Si/Al diyotunun idealite faktörü idealden çok büyük de çıkmıştır. Örneğin, Avcı ve ark. (2021), fabrikasyonunu yaptıkları p-Si/Al diyotunun idealite faktörünü 2.56

olarak buldular. Bir başka çalışmada (Yeşildağ, 2021) Al/p-Si/Al diyotunun idealite faktörünü 1.55 olarak elde etti ve idealitenin büyük olma nedenini arayüzey durumlarına, TE teorisine uymayan yük taşıyıcılarına, arayüzey katmanındaki gerilim düşümü, seri direnç etkilerine atfetti (Monch, 1999; Long ve ark.2014). İdealite faktörünün düşük veya yüksek çıkması fabrikasyon sırasındaki istenmeyen doğal oksit tabakanın kalınlığına, arayüzey durumlarına, engel yüksekliği seri dirence ve homojensizliğine atfedilir (Karataş, 2010; Yüksel, 2009; Altındal ve ark., 2007; Çankaya ve Uçar, 2004). Literatürde organik ince filmler kullanılarak üretilmiş birçok diyot çalışması mevcuttur. Örneğin, Bilkan ve ark. (2015), organik ara tabakalı Al/C20H12/p-Si diyotu için idealite faktörünü $n=3.83$ olarak buldular. P-Si/OMC/Al diyotunun $n=1.39$ değeri Al/C20H12/p-Si diyotunkine göre ideale daha yakındır. Yine bir başka çalışmada Karadeniz ve ark. (2013), rubrene ara tabakalı Al/rubrene/p-Si diyotunun idalite faktörünü $n=1.52$ olarak hesapladılar ve idealden yüksek bu değeri arayüz katmanındaki potansiyel düşüşüne ve arayüzey durumları boyunca rekombinasyon akımına atfettiler. p-Si/OMC/Al diyotunun idealite faktörünün idealden ve p-Si/ Al diyotununkinden büyük çıkması organik ara tabakanın varlığına ve ara tabakanın doğal oksit tabaksını etkileyerek diyotun elektriksel parametrelerini değiştirmesine atfedilir (Yakuphanoglu ve ark.,2008). Başka bir çalışmada Özerden ve ark. (2014), Al/oc-ZnPc/p-Si/Al'in hesaplanan idealite faktörünü 1.44 olarak bulmuşlar. Çakar ve ark., (2004), Al/pironin-B/p-Si diyotu pironin-B organik ara katmanı ile üretmişler ve idealite faktörünü 2,10 olarak hesaplamışlardır. Yüksek idealite faktörünü arayüzey durumlarına ve seri dirence bağladılar. Bazı araştırmacılar sapmanın organik ara katman tarafından ikincil bir iletim mekanizması olmasından dolayı meydana geldiğini savundu (Huang ve ark.,2013). Al/Alq3/p-Si Bariyer yüksekliği ve idealite faktörü değerleri sırasıyla 0,78 eV ve 1,53 olarak buldular. (Yakuphanoglu ve ark., 2008). Bir çalışmalarında Al/p-Si/CoPc kontağının ideallik faktörü (1,33), bariyer yüksekliği (0,90 eV) ve seri direnci (314,5 k Ω) akım-gerilim özelliklerinden elde etti (Yakuphanoglu,2007). Başka bir çalışmasında p-Si/PCBM diyotunun idealite faktörü değeri 2,12 olarak bulunmuştur. Diyotun bu n değeri ideal bağlantı davranışından sapma anlamına geldiğini ifade ettiler (Şenarslan ve ark., 2016). Al/p-Si/Al Schottky diyot için bariyer yüksekliğini 0,697 eV'lik idealite faktörünü 1,02 olarak hesaplandı. Birden biraz daha büyük olan ideallik faktörleri arayüzdeki ikincil mekanizmalara atfedilir. İdealite faktörünün birden büyük çıkması; omik kontak direncinin büyüklüğü, arayüzey hallerinin yoğunluğu ve nötr noktasının seri direncin büyüklüğü gibi etkenlerle doğru orantılıdır (Chattopadhyay, 1992). Yeterince büyük gerilimlerde ileri ön gerilim akım-gerilim

grafiklerinin aşağı doğru içbükey eğriliğinin, yarıiletken ile dengede olan arayüz durumları dışında seri direncin etkisinden kaynaklandığı iyi bilinmektedir (Aydogan ve ark., 2008). Diyot parametrelerinin bulunmasının bir yolu Cheung (1986) tarafından ortaya konan Cheung fonksiyonlarıdır. Diyod'a verilen gerilimin artan değerlerinde I - V eğrisinde doğrusallıktan sapmaya neden olan R_s seri direncin varlığı gözlenecektir. Cheung fonksiyonları bu seri direncin bulunmasına imkan sağlamaktadır.



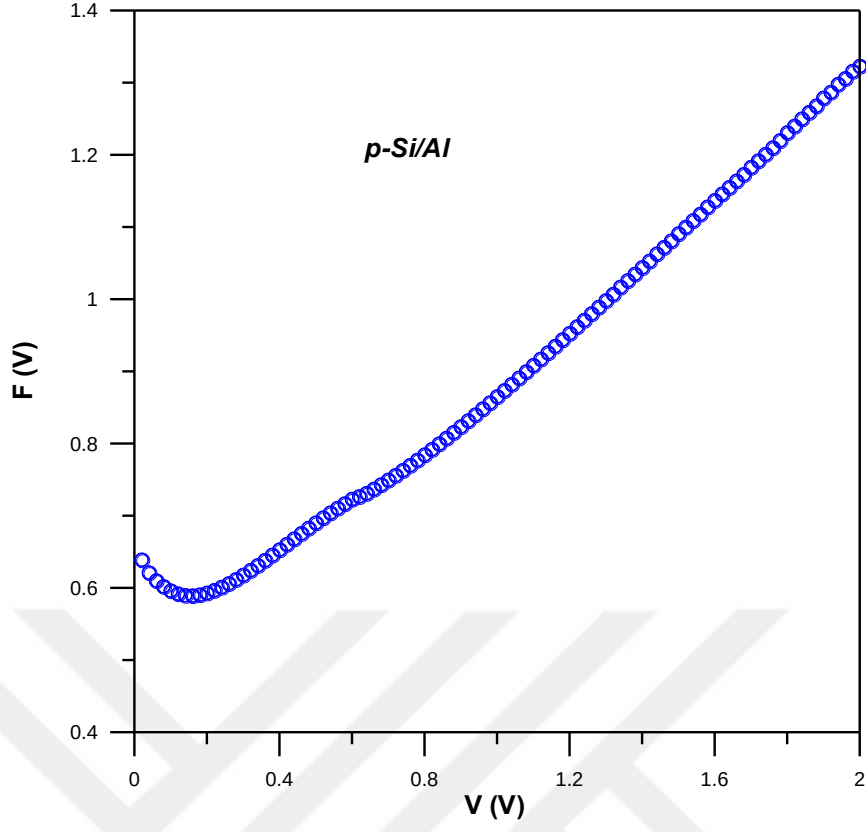
Şekil 14. p-si/Al diyotunun Cheung fonksiyonu grafiği



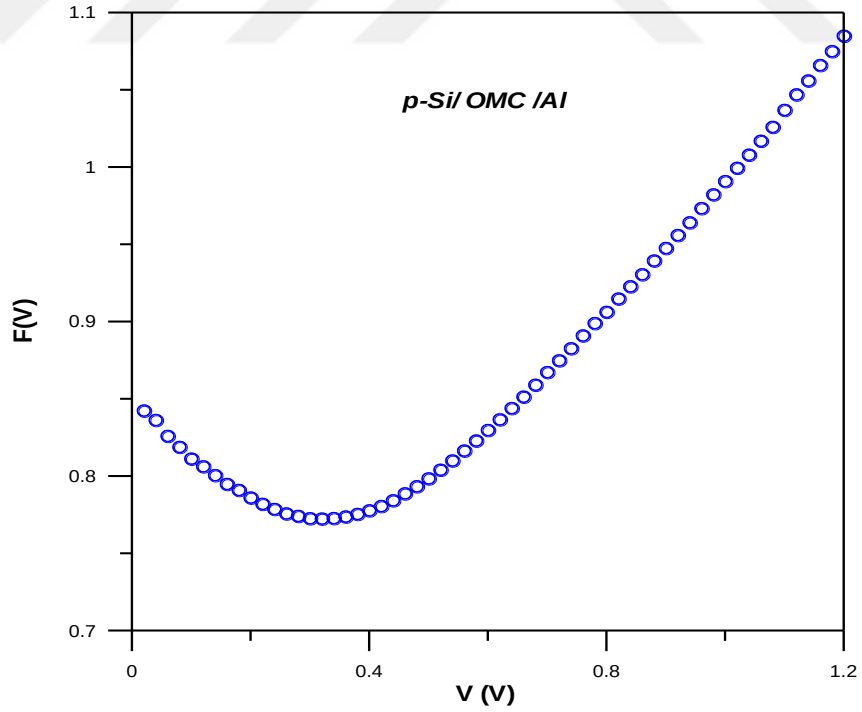
Şekil 15. p-Si/OMC/Al diyotunun Cheung fonksiyonu grafiği

Cheung fonksiyonları yardımıyla P-Si/Al referans diyodunun idealite faktörü(n), seri direç (R_s) ve bariyer yüksekliği (Φ_b) değerleri (3.2) denklemleri kullanılarak bulunmuştur. Bu fonksiyon kullanılarak bulunan değerler akım-gerilim eğrisinde doğru beslemde doğrusallıktan sapma gösteren bölüm alınarak elde edilmiştir. Diyotlar için $H(I)-I$ ve $dV/d\ln(I)-I$ grafikleri şekil.14 ve şekil.15'te gösterildiği gibi çizildi ve bu grafiklerin eğrilerinden doğrusal çizgiler elde edildi. $dV/d\ln(I)-I$ grafiğinde diyodun idealite faktörü(n)=2,97 ve seri direnç(R_s)=17,81 Ω elde edilmiştir. Buradan bulunan n idealite faktörü kullanılarak $H(I)-I$ grafiğinden seri direnç R_s =17,81 Ω ve engel yüksekliği değeri Φ_b =0,61 eV elde edilmiştir. Cheung fonksiyonları ile elde edilen seri dirençlerin birbirine yakın çıkması bu fonksiyonun tutarlılığını ifade etmektedir (Gündoğdu,2012). Şekil.15'teki P-Si/OMC/Al organik ara tabakalı diyodun $dV/d\ln(I)-I$ grafiğinden yararlanılarak R_s =4.85k Ω ve idealite faktörü n =2.01 olarak hesaplanmıştır. $H(I)-I$ grafiği kullanılarak R_s =4.76k Ω ve bariyer yüksekliği (Φ_B)=0.77 eV olarak bulunmuştur. İdealite faktörünün $I-V$ metodundan büyük çıkması idealite faktörünün uygulanan gerilime bağlılığına ve idealite faktörünün grafiğin farklı kesimlerinden elde edilmesine

atfedilebilir (Gündoğdu,2012). Ayrıca değişkenlerin elde edildiği noktada hem arayüzey durumlarının hem de seri direncin aktif rol oynaması, n idealite faktöründeki farklılığı neden olabilir (Özdemir ve ark., 2009). Diyot değerlerinin hesaplamada başvurulacak başka bir metot da Norde fonksiyonudur. Bu fonksiyon ile, klasik yöntemle elde edilen idealite faktörü değeri kullanılarak seri direnç R_s ve etkin bariyer yüksekliği Φ_b değerleri 3.4, ve 3.5 denklemleri kullanılarak elde edilmiştir. Şekil.16 ve şekil.17 sırasıyla p-Si/Al ve p-Si/OMC/Al diyotlarının Norde fonksiyonu kullanılarak elde edilen grafikleridir. Şekil.16'deki p-si/Al referans diyotun Norde fonksiyonu ile bulunan R_s değeri $R_s=4.58k\Omega$ ve bariyer yükseldiği $\Phi_B=0.64$ eV olarak bulundu. Şekil.17'de gösterilen P-Si/OMC/Al diyotuna ait fonksiyonun bariyer yüksekliği $\Phi_B=0.90$ eV ve seri direnç değeri $R_s=18.76k\Omega$ olarak hesaplandı. Diyotların Norde fonksiyonu kullanarak elde edilen parametrelerine bakıldığında hem seri direnç hem de bariyer yüksekliği değerlerinin Cheung metoduna göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu iki metodun farklı sonuçları metotların farklı doğasından kaynaklanmaktadır. Cheung metodu ileri Akım-gerilim karakteristiğinin eğri verdiği bölgeye uygulanırken, Norde metodu ileri akım-gerilim karakteristiğinin tüm bölgesine uygulanmaktadır. Seri direncin her iki metotta da görece yüksek çıkması organik ara tabakanın varlığına ve arayüzey durumlarına atfedilebilir. Schottky diyotların bariyer yüksekliği ve idealite faktörünü belirlemek, bu cihazların performansını ve uygunluğunu değerlendirirken kritiktir. Bu yöntem, özellikle nano ölçekli ve yüksek hızlı elektronik cihazların karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılır



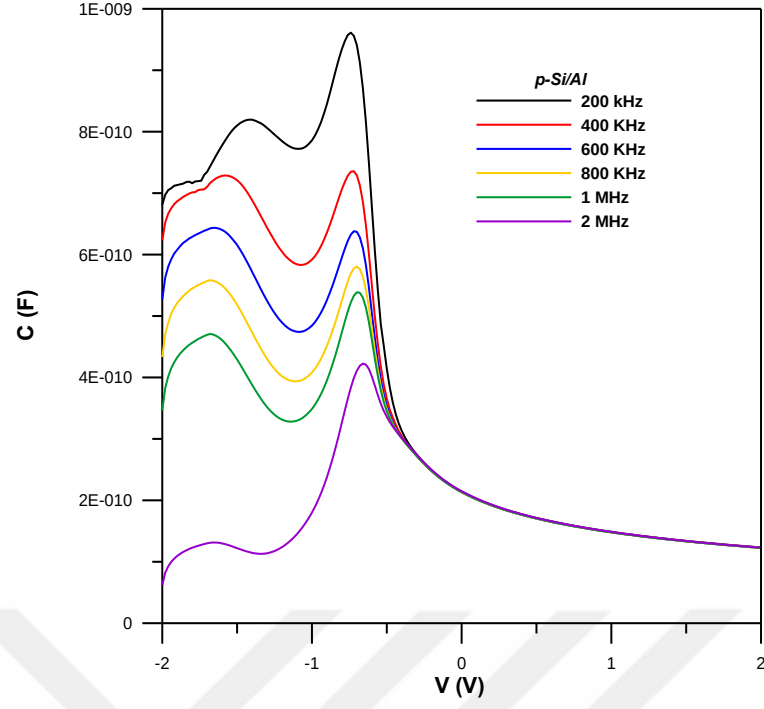
Şekil 16. p-si/Al diyotunun Norde fonksiyonu grafiği



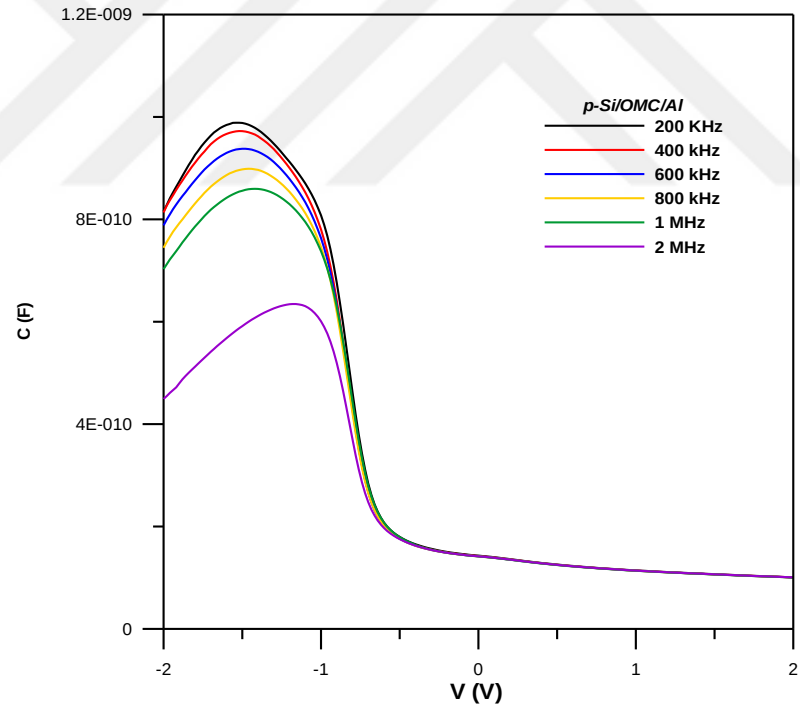
Şekil 17. P-Si/OMC/Al diyotunun Norde fonksiyonu grafiği.

MIS diyotları için C-V ölçümleri, sabit yük konsantrasyonu ve bariyer yüksekliği hakkında kıymetli bilgiler sağlayabilir. Uygulanan voltajla bir p-n diyot içindeki yükün

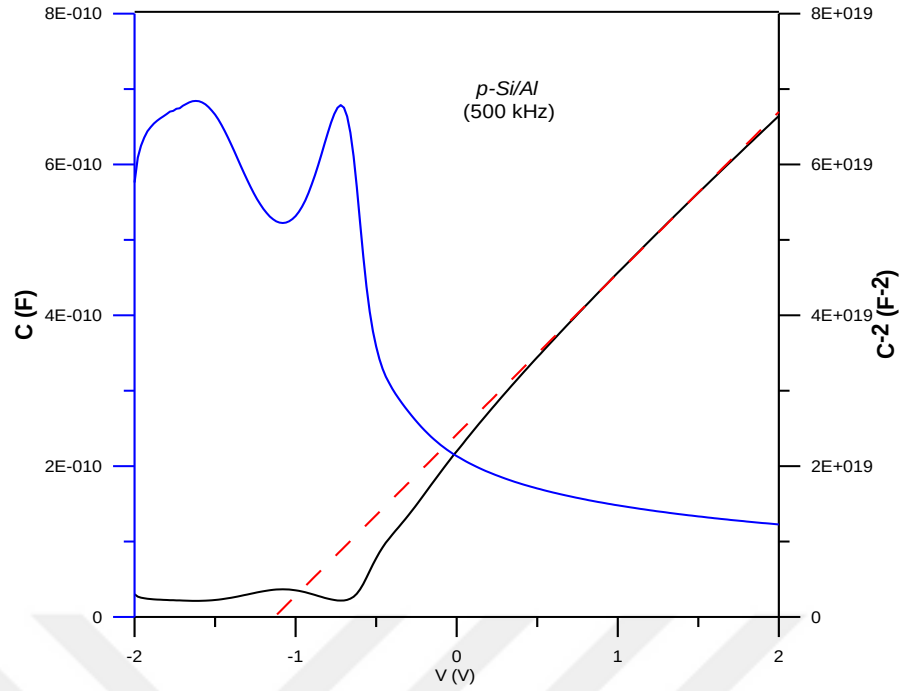
herhangi bir değişimi, bir p-n diyotun devre modeline eklenmesi gereken bir kapasitans verir. Ters taraflı diyotlarda bağlantı kapasitansı hâkim olurken, ileri taraflı diyotlarda difüzyon kapasitansı hakimdir (Chen ve Shih, 2006). C-V ölçümlerinde yük yoğunlukları, difüzyon potansiyeli ve engel yüksekliği gibi bazı önemli parametreler elde edilebilmektedir. Gerilim ve gerilim arasındaki standart Mott-Schottky ilişkisi kullanılarak C^{-2} –V karakteristiğinin doğrusal bölgesinden diyotların difüzyon potansiyeli (V_d), bariyer yüksekliği ve akseptör taşıyıcı konsantrasyonu (N_A) değerleri elde edilir. Aynı zamanda C-V karakteristiklerinin arayüzey durumlarına oldukça hassas oldukları bilinmektedir. şekil.18 ve şekil.19’da diyotların farklı frekanslardaki, oda sıcaklığında ve karanlıkta C-V karakteristiklerini göstermektedir. 200 KHz, 400 KHz, 600 KHz, 800 KHz 1 MHz, 2 MHz frekanslarda C-V ölçümleri alındı. Bu değerdeki ölçümlerinden yararlanılarak şekil.18 ve şekil.19’daki grafikler çizildi. Grafiklerde görüldüğü gibi artan frekansla diyot kapasitesinin azaldığı görülmektedir. Hem referans diyot p-si/Al hem organik ara tabakalı p-si/OMC/Al diyotun grafiklerine bakıldığında (şekil.18 ve şekil.19) Frekans artarken kapasite azalıyor. Bu hemen hemen bütün diyot çalışmalarında beklenen bir durumdur. Düşük frekanslarda arayüzey hallerinin alternatif akım sinyalinin takip edebilmesinden kapasiteye katkısı vardır dolayısıyla pik vermektedir (Heine, 1965). Yüksek frekanslarda ise, arayüzey halleri Alternatif Akım sinyalinin izleyememesinden dolayı etkisi azalmakta ve kapasite arınma bölgesi kapasitesine yakın değerlere düşmektedir (Chattopadhyay ve RayChaudhuri, 1993). C^{-2} –V karakteristiğinin doğrusal bölgesinden p-Si için



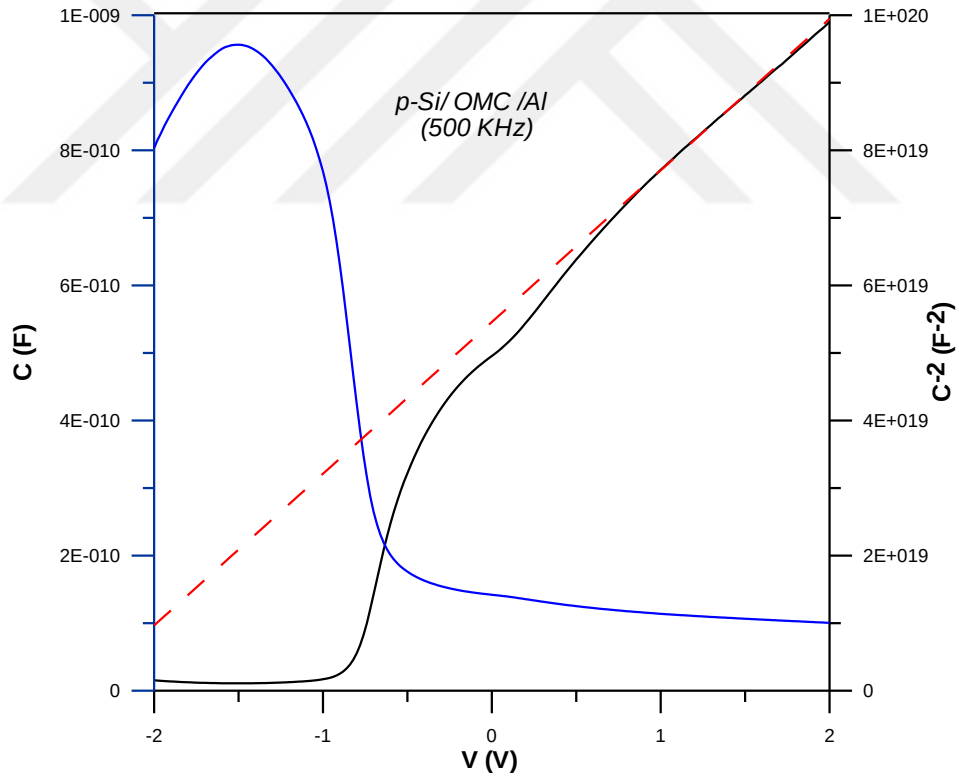
Şekil 18. p-si/Al diyotunun c-v grafiği



Şekil 19. p-Si/OMC/Al diyotunun C-V Grafiği



Şekil 20. p-Si/Al diyotunun 500 kHz deki kapasite-gerilim grafiği ve C^{-2} -V grafiği



Şekil 21. p-Si/OMC/Al diyotunun 500 kHz deki kapasite-gerilim grafiği ve C^{-2} -V grafiği

C^{-2} -V karakteristiğinin doğrusal bölgesinden p-Si/Al için difüzyon potansiyeli, akseptör taşıyıcı konsantrasyonu ve C-V'den elde edilen engel yüksekliği değerleri $V_d=1.13$ V, $N_A=7.13 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ve $\Phi_{B(c-v)}=1.25$ eV olarak elde edildi. Organometalik ince film ara tabakalı p-Si/OMC/Al diyotu için C^{-2} -V'den bulunan değişkenler $V_d= V_d=2.43$ V,

$N_A=6.79 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ve $\Phi_{B(c-v)}= 2.04 \text{ eV}$ olarak bulundu. Genel olarak C–V ölçümünden elde edilen bariyer yüksekliği, I–V ölçümünden daha yüksektir (Gullu, ve ark.,2008; Ashery ve ark., 2008). P-Si/OMC/Al diyotunun C-V den elde edilen engel yüksekliği değeri p-Si/Al diyotunununkinden daha yüksektir. Bu organometalik ara tabakanın kondansatör yapısında dielektrik değerini artırarak kapasitenin artışına sebep olması olarak açıklanabilir.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, Al/p-Si ara tabakasız diyot ile OMC organometalik ince filminin spin kaplama yöntemi ile p-Si üzerine oluşturulmasıyla üretilen p-Si/OMC/Al ara tabakalı diyotunun elektriksel özelliklerini I-V- ve C-V teknikleri ile incelendi. Ayrıca diyotların fotovoltaiik özelliklerini incelemek için solar simülatör ile 100 mW/cm² ışık gücü altında akım-gerilim karakteristikleri incelendi. Burada p-Si/Al diyotu aynı ortam koşullarında ara tabakalı ve ara tabakasız karşılaştırması için üretildi. Karanlık ve oda sıcaklığı şartlarında p-Si/Al MS diyotunun deneysel I-V ölçümlerinden idealite faktörü $n=1.19$ ve engel yüksekliği $\Phi_B=0.63$ eV olarak hesaplandı. Aynı şartlar altında p-Si/OMC/Al diyotunun idealite faktörü $n=1.39$ ve engel yüksekliği 0.83 eV olarak hesaplandı. OMC ara tabakalı diyotun idealite ve engel yüksekliğinin geleneksel p-Si/Al diyotuna göre yüksek çıkması ara tabakanın varlığına, seri dirence ve arayüzeydeki durumlara atfedildi. P-Si/Al diyotunun doyma akımı $I_0=4.83 \times 10^{-7}$ A ve p-Si/OMC/Al diyotunun doyma akımı da $I_0=2.05 \times 10^{-10}$ A olarak belirlendi. Buna göre OMC ara tabakanın varlığı diyotun temel parametreleri üzerinde modifikasyona yol açmış ve bazı değerleri olumlu yönde değiştirmiştir. Diyotlardaki seri direnç etkisini incelemek için en çok kullanılan yöntemlerden olan Cheungs ve Norde metodu kullanılarak seri direnç, bariyer yüksekliği ve idealite faktörü değerleri hesaplandı. Sırasıyla p-Si/Al ve p-Si/OMC/Al diyotları için Cheungs metodundaki $dv/d\ln I-I$ fonksiyonu ve bu fonksiyondan çizilen grafikten idealite faktörü değerleri 2.97 ve 2.01 ve seri direnç değerleri 17.81 Ω ve 4.85 k Ω olarak hesaplandı. Buna göre $dv/d\ln I-I$ 'dan elde edilen seri direnç değerleri OMC ara tabaksının varlığının seri direnci önemli oranda artırdığını göstermektedir. Bu aynı zamanda OMC ara tabaksının varlığının kanıtıdır. $H(I)-I$ fonksiyonu ve grafiğinden engel yüksekliği ve seri direnç değerleri sırasıyla $\Phi_B=0.61-0.77$ eV ve $R_S=17.81\Omega-4.76$ k Ω olarak hesaplandı. Hem p-Si/Al hem de p-Si/OMC/Al diyotları için $dv/d\ln I-I$ ve $H(I)-I$ fonksiyonundan elde edilen seri dirençler arasında yakın bir uyum vardır. Aynı zamanda Cheungs fonksiyonlarından elde edilen engel yüksekliği değeriyle deneysel I-V'den elde edilen engel yüksekliği değerleri arasında da uyum vardır. Üretilen diyotların, Norde fonksiyonu kullanılarak seri dirençleri ve engel yükseklikleri $F(V)-V$ grafikleri yardımıyla bulundu. p-Si/Al diyotunu parametreleri $R_S=4.58$ k Ω ve $\Phi_B=0.64$ eV olarak bulundu. P-Si/OMC/Al diyotun ise $R_S=18.76$ k Ω ve $\Phi_B=0.90$ eV hesaplandı. Çıkan verilere bakılırsa hem bariyer

yüksekliği hem de seri direncin arttığı görülmektedir. Bunun sebebi de OMC ara tabakanın varlığına atfedilir. Diyotların ± 2 V gerilim altında doğrultma oranı karanlık ortamda p-Si/Al diyotunun sızıntı akımı doğrultma oranı 4.83×10^{-7} A olarak hesaplanmıştır. ± 2 V gerilim altında doğrultma oranı ışık şiddeti 100 mWatt/cm^2 ortamda ise sızıntı akımı 6.39×10^{-6} A olarak bulundu. p-Si/OMC/Al diyotu için ise sızıntı akımı karanlıkta 2.05×10^{-10} A, ışık altında 1.15×10^{-7} A olarak hesaplandı. Her iki diyot içinde ışık altında doğrultma oranlarının düştüğü görülmekte olup bu durum fotojenerasyon nedeniyle artan sızıntı akımından kaynaklanmaktadır. Karanlık ve ışık altındaki oranlarına bakıldığında OMC ara tabakalı diyotun ışığa daha çok tepki verdiği görülmektedir. OMC ara tabasının, uygun katkı ile diyotların optoelektrik özelliklerinin incelenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Çünkü diyotların ışığa duyarlılığı ve ışığa tepki özellikleri, fotodiyotların performansını belirleyen önemli parametrelerdir.

5.2. Öneriler

- OMC tabakasının malzeme kalınlığının diyot performansı üzerindeki etkilerini araştırarak en uygun kombinasyonu belirlemek.
- OMC tabakasının p-Si ile olan etkileşimini ve arayüzey durumlarının diyot performansına etkisini derinlemesine incelemek.
- OMC katmanının optik ve elektriksel özelliklerini geliştirerek diyotların fotovoltajik performansını artırmak.
- Diyotların farklı ışık koşullarında performansını inceleyerek spektral duyarlılığı optimize etmek.
- Diyotların uzun vadeli dayanıklılığını ve çevresel faktörlere karşı performansını araştırmak.
- OMC tabakasının AFM ve SEM görüntüsü incelenilmeli.
- OMC tabakasının optik özellikleri incelenilmeli.
- OMC tabakasının elektriksel özellikleri incelenilmeli.

KAYNAKLAR

- Afify, H. A., El-Nahass, M. M., Gadallah, A.-S., & Atta Khedr, M. (2015). Carrier transport mechanisms and photodetector characteristics of Ag/TiOPc/p-Si/Al hybrid heterojunction. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 39, 324–331.
- Al-Ghamdi, A. A., Nawar, A. M., El-Tantawy, F., Yaghmour, S. J., & Azam, A. (2015). Design and electrical characterization of Au/Anthracene/p-Si/Al organic/inorganic heterojunction. *Journal of Alloys and Compounds*, 622, 243–249.
- Altındal, Ş., Kanbur, H., Yıldız, D. E., & Parlak, M. (2007). Current conduction mechanism in Al/p-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer at low temperatures. *Applied Surface Science*, 253, 5056-5061.
- Ashery, A., Farag, A. A. M., & Salem, M. A. (2008). Title of the article. *Microelectronic Engineering*, 85(12), 2309-2313.
- Ashok, S., Borrego, J. M., & Gutman, R. J. (1979). Electrical characteristics of GaAs MIS Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 22(7), 621-631.
- Aydogan, S., Saglam, M., & Turut, A. (2008). Title of the article. *Microelectronic Engineering*, 85(1), 278.
- Bilkan, Ç., Zeyrek, S., San, S. E., & Altındal, Ş. (2015). A comparison of electrical characteristics in Al/p-Si(MS) and Al/C20H12/p-Si(MPS) type diodes using current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurements. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 32, 137-144.
- Brattain, W. H., & Alvarez, L. (1950). Surface States and Rectification at a Metal-Semiconductor Contact. *Physical Review*, 77(6), 796-796.
- Braun, K. F. (1874). On the conduction of electricity in metals. *Annalen der Physik und Chemie*, 153, 556-573.
- Cafer, T. (2000). *Kathal elektroniği*. Yıldız Teknik Üniversitesi Vakfı Yayınları.
- Card, H., & Rhoderick, E. (1971). The study of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(12), 1589-1596
- Chattopadhyay, P., & Raychaudhuri, B. (1993). Frequency dependence of forward capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes. *Solid-State Electronics*, 36(4), 605-610.

- Chen, C. H., & Shih, I. (2006). *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*, 17, 1047.
- Cheung, S. K., & Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from
- Çakar, M., Temirci, C., & Türüt, A. (2004). The Schottky barrier height of the rectifying Cu/pyronine-B/p-Si, Au/pyronine-B/p-Si, Sn/pyronine-B/p-Si and Al/pyronine-B/p-Si contacts. *Synthetic Metals*, 142, 177–180.
- forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87.
- Çankaya, G., & Uçar, N. (2004). Schottky barrier height dependence on the metal work function for p-type Si Schottky diodes. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 59a, 795-798.
- Çakmak, R., Ay, B., Çınar, E., Başaran, E., Akkoç, S., Boğa, M., & Taş, E. (2023). Synthesis, spectroscopic, thermal analysis and in vitro cytotoxicity, anticholinesterase and antioxidant activities of new Co(II), Ni(II), Cu(II), Zn(II), and Ru(III) complexes of pyrazolone-based Schiff base ligand. *Journal of Molecular Structure*, 1292, 136225
- El-Nahass, M. M., Abd-El-Rahman, K. F., Farag, A. A. M., & Darwish, A. A. A. (2005). Photovoltaic properties of NiPc/p-Si (organic/inorganic) heterojunctions. *Organic Electronics*, 6(2), 129–136.
- Farag, A. A. M., Soliman, H. S., & Atta, A. A. (2012). Analysis of dark and characteristics of Au/Pyronine G(Y)/p-Si/Al heterojunction. *Synthetic Metals*, 161, 2759–2764.
- Ferhati, H., Djeflal, F., Kacha, K., Bendjerad, A., & Benhaya, A. (2019). Influence of TCO intermediate thin-layers on the electrical and thermal properties of metal/TCO/p-Si Schottky structure fabricated via RF magnetron sputtering. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 106, 25–30.
- Gencer Imer, A., Dere, A., Al-Sehemi, A. G., Dayan, O., Serbetci, Z., Al-Ghamdi, A. A., & Yakuphanoglu, F. (2019). Photosensing properties of ruthenium(II) based photodiode. *Applied Physics A*, 125(204).
- Gencer Imer, A., Karaduman, O., & Yakuphanoglu, F. (2016). Controlling of the photosensing properties of Al/DMY/p-Si heterojunctions by the interface layer thickness. *Synthetic Metals*, 221, 114–119.
- Gencer Imer, A., Temirci, C., Gülcan, M., & Sönmez, M. (2014). Electrical characteristics of organic/inorganic Pt(II) complex/p-Si semiconductor contacts. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28, 31–36.
- Güllü, Ö., Cankaya, M., Baris, O., Biber, M., Ozdemir, H., Gulluce, M., & Turut, A.

- (2008). Title of the article. *Applied Surface Science*, 254(15), 5175-5180.
- Güllü, Ö. (2008). H₂ ön tavlama Au/n-GaAs diyotlarda elektriksel karakteristiklerin Schottky metal kalınlığı ve sıcaklığa bağlı değişiminin incelenmesi (Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum). (pp. 24-38).
- Gündoğdu, F., (2012). İletken polimer (PNpCIPhPy) arayüzey tabakasının Au/n-tipi InP schottky diyot parametreleri üzerine etkileri (Yüksek lisan tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Isparta).
- Hameed, S. D. (2021). H-sonlanmış yüzey ile cu/n-si schottky kontaklarının üretimi ve elektriksel karakterizasyonu. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi*, 21-23.
- Heeger, A. J., Kivelson, S. A., Schrieffer, J. R., & Su, W. P. (1999). Organic semiconductors and organic electronics. *Chemistry of Materials*, 11(11), 2753-2766
- Heeger, A. J. (2000). Semiconducting and metallic polymers: the fourth generation of polymeric materials. *Nobel Lecture, December 8, 2000*.
- Heine, V. (1965). Calculation of the optical absorption between surface states of silicon. Hoboken, New Jersey, sayfa 5-8
- Huang, W. C., Lin, T. C., Horng, C. T., & Chen, C. C. (2013). Engineering barrier heights of Al/p-Si Schottky contacts with a thin organic interlayer. *Microelectronic Engineering*, 107, 200–204.
- Karabulut, A., Dereb, A., Dayan, O., Al-Sehemid, A. G., Serbetci, Z., Al-Ghamdi, A. A., & Yakuphanoglu, F. (2019). Silicon based photodetector with Ru(II) complexes organic interlayer. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 91, 422–430
- Karadeniz, S., Barıç, B., Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu N., 2013, Analysis of electrical propertis of Al/p-Si Schottky contacts with and without rubrene layer, *Synthetic Metals*, 168, 16-22.
- Karataş, S. (2003). Sn/p-Si Schottky kontakların elektriksel karakteristiklerinin geniş bir sıcaklık aralığında incelenmesi (Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri-Enstitüsü, Ankara). (101 sayfa
- Karataş, S., Temirci, C., Çakar, M., & Türüt, A. (2006). Investigation of interface properties of Schottky diodes based on In/p-Si/Al structure. *Applied Surface Science*, 252(6), 2209-2214
- Karataş, Ş. (2010). Effect of series resistance on the electrical characteristics and

- interface state energy distributions of Sn/p-Si (MS) Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 87(10), 1935-1940.
- Kocyigit, A., Yıldız, D. E., Hussaini, A. A., Kose, D. A., & Yıldırım, M. (2023). Cu and Mn centered nicotinamide/nicotinic acid complexes for interlayer of Schottky photodiode. *Current Applied Physics*, 45, 53–63.
- Long, W., Li, Y., & Tung, R. T. (2014). Schottky barrier height systematics studied by partisan interlayer. *Thin Solid Films*, 557, 254-257.
- Moloi, S. J., & Bodunrin, J. O. (2023). Characterisation of interface states of Al/p-Si Schottky diode by current–voltage and capacitance–voltage–frequency measurements. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(1712).
- Mönch, W. (1999). Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 17(4), 1867-1876.
- Nawar, A. M., Abd-Elsalam, M., El-Mahalawy, A. M., & El-Nahass, M. M. (2020). Analyzed electrical performance and induced interface passivation of fabricated Al/NTCDA/p-Si MIS–Schottky heterojunction. *Applied Physics A*, 126(113).
- Norde, H. (1979). A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance. *J. Applied Physics*, 50, 5052-5053.
- Orak, İ., Toprak, M., & Turut, A. (2014). Illumination impact on the electrical characterizations of an Al/Azure A/p-Si heterojunction. *Physica Scripta*, 89(115810), 5pp.
- Özaydın, C. (2012). Makrosiklik Ligandları nGeçiş Metal Kompleksleri İle Oluşturulan Heteroeklemlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerin İncelenmesi (Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 72-81).
- Özdemir, A., Aldemir, D. A., Kökçe, A., & Altındal, Ş. (2009). Electrical properties of Al/conducting polymer (P2ClAn)/p-Si/Al contacts. *Synthetic Metals*, 159, 1427-1432.
- Schottky, W. (1874). "Über den Einfluß eines homogenen elektrischen Feldes auf optische und andere physikalische Eigenschaften des Metalls." *Annalen der Physik und Chemie*, 227(3), 204-242.
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, sayfa 5-8.

- Sze, S. M. (1981). *Physics of semiconductor devices* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons. (pp. 362-390).
- Şenarslan, E., Güzeldir, B., & Sağlam, M. (2016). Investigation of the Electrical Characteristics of Al/p-Si/Al Schottky Diode. *Journal of Physics: Conference Series*, 707, 012013.
- Taşçıoğlu, İ. (2012). Au/PVA/n-Si (MPS) Schottky engel diyodun elektriksel özelliklerinin sıcaklık ve radyasyona bağlı incelenmesi (Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Türüt, A., Bati, B., Kökçe, A., Sağlam, M., & Yalçın, N. (1996). The bias-dependence change of barrier height of Schottky diodes under forward bias by including the series resistance effect. *Physica Scripta*, 53(1), 123-126.
- Wilson, A. N. (1983). *Stress and stability in coal ribside and pillars* (Publication No. 831145). West Wirigina University.
- Wu, X., & Yang, E. S. (1989). Interface capacitance in metal-semiconductor junctions. *Journal of Applied Physics*, 65(8), 3560–3567
- Özerdem, E., Yıldız, M., Ocak, Y. S., Tombak, A., & Kılıçoğlu, T. (2014). An organic–inorganic rectifying contact based on a ZnPc derivative. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28, 72-76.
- Yeşildağ, A. (2021). Ruthenium (III)–pyridine complex: Synthesis, characterization, barrier diode and photodiode applications in Al/Ru-Py/p-Si/Al sandwich device structure. *Chemical Papers*, 75(11), 4949–4958
- Yakuphanoglu, F. (2007). Hibrit organik/inorganik yarıiletken fotodiyotun fotovoltaiik özellikleri. *Sentetik Metaller*, 157(1-2), 859–862.
- Yakuphanoglu, F., Kandaz, M., & Şenkal, B. F. (2008). Akım-gerilim ve kapasitans-gerilim özellikleri: Ftalosiyanın doğrultucu kontağına dayalı Al/p tipi silikon/organik yarıiletken. *İnce Katı Filmler*, 516(23), 8793–8796.
- Yüksel, Ö. F. (2009). Temperature dependence of current–voltage characteristics of Al/pSi (10 0) Schottky barrier diodes. *Physica B*, 404, 1993-1997
- Yılmaz, M. (2018). Facile electrochemical-assisted synthesis of TiO₂ nanotubes and their role in Schottky barrier diode applications. *Superlattices and Microstructures*, 113, 310-318.
- Ziel, A. V. (1968). *Solid state physical electronics* (2nd ed., pp. 380-381). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.