T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Au/POLİ (LİNOLEİK ASİT)-g-POLİ (METİL METAKRİLAT) (PLiMMA)/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

MUSTAFA YASAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. MUHARREM GÖKÇEN

DÜZCE-2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Au/POLİ (LİNOLEİK ASİT)-g-POLİ (METİL METAKRİLAT) (PLiMMA)/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Mustafa YASAN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Muharrem GÖKÇEN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Gazi Üniversitesi _____

Prof. Dr. Muharrem GÖKÇEN
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mert YILDIRIM
Düzce Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 16/04/2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

16 Nisan 2019

Mustafa YASAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Muharrem GÖKÇEN'e içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2014.05.02.216 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

16 Nisan 2019 **Mustafa YASAN**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ VII

ÇİZELGE LİSTESİ IX

KISALTMALAR X

SİMGELER XI

ÖZET XIII

ABSTRACT XIV

1. GİRİŞ 1

2. TEORİK BİLGİLER 4

2.1. YARIİLETKENLER 4

2.1.1. Katıların Enerji Bant Teorisi 4

2.1.2. Yarıiletkenlerin Bant Yapısı 5

2.1.3. Yarıiletken Tipleri ve Katkılama 6

2.2. METAL YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR 8

2.2.1. Metal/n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar 9

2.2.2. Metal/n-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar 12

2.2.3. Metal/p-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar 13

2.2.4. Metal/p-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar 14

2.3. METAL-POLİMER-YARIİLETKEN (MPS) KONTAKLAR 16

2.3.1. İdeal MPS/MIS Yapı 17

2.3.2. Gerçek MPS/MIS Yapı 18

2.4. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLARDA AKIM İLETİM MEKANİZMALARI 19

2.4.1. Termiyonik Emisyon (TE) Teorisi 20

3. MATERYAL VE YÖNTEM 23

3.1. KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ 23

3.1.1. PLiMMA Polimerinin Temel Özellikleri 23

3.1.2. Si kristalinin Temel Özellikleri.....23
3.2. Au/PLiMMA/n-Si YAPININ HAZIRLANMASI.....25
3.2.1. Kristal Temizleme.....25
3.2.2. Omik Kontağın Oluşturulması.....26
3.2.3. PLiMMA Tabakasının Oluşturulması.....27
3.2.4. Doğrultucu Kontağın Oluşturulması.....28
3.3. DENEYSEL ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ.....30
3.3.1. İnovenso Nanospinner Ne 100.....30
3.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....30
3.3.3. Keithley 2400 Akım-Gerilim Kaynağı.....30
3.3.4. Halojen lamba (Görünür ışık kaynağı).....30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....31
4.1. GÖRÜNÜR IŞIK ALTINDAKİ AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİ.....31
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....44
6. KAYNAKLAR.....46
ÖZGEÇMİŞ

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Katıların enerji-bant diyagramı.....5
Şekil 2.2. Banttan banda rekombinasyon:
(a) Direkt (doğrudan) bant aralığına sahip bir yarıiletkende,
(b) İndirekt (dolaylı) bant aralığına sahip bir yarıiletkende…….....…….6
Şekil 2.3. Si yarıiletkeninin B ile katkılanması ile p-tipi yarıiletkenin elde edilmesi.....7
Şekil 2.4. Si yarıiletkeninin P ile katkılanması ile n-tipi yarıiletkenin elde edilmesi.....7
Şekil 2.5. Yarıiletkenlerde enerji bant diyagramları;
(a) Saf yarı iletkenler için, (b) p-tipi yarı iletkenler için,
(c) n- tipi yarı iletkenler için……..……..8
Şekil 2.6. Metal/n-tipi doğrultucu kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Kontaktan önce, (b) Kontaktan sonra termal dengede.……..…10
Şekil 2.7. Metal/n-tipi doğrultucu kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Termal dengede, (b) Doğru beslem, (c) Ters beslem…….....11
Şekil 2.8. Metal/n-tipi omik kontak için enerji-bant diyagramı,
(a)Kontaktan önce, (b) Kontaktan sonra termal dengede……..…..….....12
Şekil 2.9. Metal/n-tipi omik kontak için enerji-bant diyagramı, (a) Termal dengede,
(b) V<0 olması durumu, (c) V>0 olması durumu…….....13
Şekil 2.10. Metal/p-tipi doğrultucu kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Kontaktan önce, (b) Kontaktan sonra termal dengede……..……...…...14
Şekil 2.11. Metal/p-tipi doğrultucu kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Termal dengede, (b) Doğru beslem, (c) Ters beslem…….....14
Şekil 2.12. Metal/p-tipi omik kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Kontaktan önce, (b) Kontaktan sonra termal dengede …….……..15
Şekil 2.13. Metal/p-tipi omik kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Termal dengede, (b) V<0 olması durumu,
(c) V>0 olması durumu……..…….....15
Şekil 2.14. Bir MPS yapının şematik gösterimi.....16
Şekil 2.15. Termal dengede ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı,
(a) p-tipi yarıiletken, (b) n-tipi yarıiletken.....17
Şekil 2.16. İdeal olmayan MIS yapıda arayüzey durumları ve
yüklerin sınıflandırılması…….19
Şekil 2.17. Metal/n-tipi yarıiletken schottky kontaklarda doğru beslem
akım-iletim mekanizmaları …….20
Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan metal
buharlaştırma cihazı……..…….....26
Şekil 3.2. Elektrospinning cihazı..... 27
Şekil 3.3. PLiMMA nano fiberlerin FEG-SEM resimleri..... 28
Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske.....29
Şekil 3.5. Au/PLiMMA/n-Si (MPS) yapının şematik gösterimi.....29
Şekil 4.1. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık ve farklı aydınlatma
şiddetlerindeki (I-V) grafiği……32

Şekil 4.2. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki (R_i-V) grafiği…….....35
Şekil 4.3. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık için dV/dln (I)-I grafiği…….……..37
Şekil 4.4. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık için H(I)-I grafiği……..……..…….....38
Şekil 4.5. Au/PLiMMA/n-Si diyotun farklı aydınlatma şiddetleri için dV/dln (I)-I grafiği……...39
Şekil 4.6. Au/PLiMMA/n-Si diyotun farklı aydınlatma şiddetleri için H(I)-I grafiği….....40
Şekil 4.7. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri için N_{ss}-(E_c-E_{ss}) grafiği.....43

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. MS kontaklar-İş fonksiyonuna göre omik ve Schottky kontaklar ve özellikleri…...……...…….…….……..9
Çizelge 3.1. Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı temel özellikleri……..24
Çizelge 4.1. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki I-V eğrilerinden elde edilen temel elektriksel parametreler…..…….34

KISALTMALAR

AE	Alan emisyonu
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DC	Doğru beslem
DÜBİT	Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi
F(V)	Norde fonksiyonu
FEG-SEM	Taramalı elektron mikroskobu
LED	Işık yayan diyot
MFS	Metal/Ferroelektrik/Yarıiletken
MIS	Metal/Yalıtkan/Yarıiletken
MPS	Metal/Polimer/Yarıiletken
MS	Metal/Yarıiletken
PVC	Polivinil klorür
RCA	Amerika Radyo Kurumu
SBD	Schottky bariyer diyotu
SCLC	Uzay yüküyle sınırlı akım
TAE	Tünel alan emisyonu
TE	Termiyonik emisyon
UV	Morötesi

SİMGELER

A	Diyot alanı
A*	Ekin Richardson sabiti
Å	Angström
Ag	Gümüş
Au	Altın
CdS	Kadmiyum Sülfür
CdSe	Kadmiyum Selenit
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
Eg	Yarıiletken yasak enerji aralığı
E_i	Saf enerji seviyesi
E_v	Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
E_{ss}	Arayüzey durumlarının enerjisi
GaAs,	Galyum Arsenit
Ge	Germanyum
h	Planck sabiti
HCl	Hidroklorik asit
InSb	İndiyum Antimont
I_o	Ters beslem doyum akımı
J_{SM}	Akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
m*	Taşıyıcı etkin kütlesi
n	İdealite faktörü
n_i	Saf taşıyıcı yoğunluğu
n(x)	Elektron yoğunluğu
N_D	Verici yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
p_n	Deşik (hol) yoğunluğu
q	Elektrik yükü
Q_{sc}	Uzay yükü
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Şönt direnç
T	Mutlak sıcaklık
V_F	Doğru ön gerilim
V_R	Ters ön gerilim
V_d	Kontak potansiyel farkı
V_{ox}	Yalıtkan (polimer) üzerine düşen gerilim
ν_x	İletim yönündeki taşıyıcı hızı
ε_S	Yarıiletken dielektrik geçirgenliği
μ	Elektronun mobilitesi
μ_p	Deşik (hol) mobilitesi,
τ_o	Tükenim bölgesini azınlık taşıyıcısı yaşam ömrü
Φm	Metalin iş fonksiyonu

Φs	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ	Elektron alınganlığı
ψ_B	Fermi enerji seviyesi ile saf enerji seviyesi arasındaki enerji farkı
ψ_s	Arayüzey bant gerilimi
W_D	Tükenim tabakasının genişliği
Φ_b	Potansiyel engel yüksekliği
Φ_{B0}	Sıfır beslem engel yüksekliği
Φ_e	Efektif engel yüksekliği

ÖZET

Au/POLİ (LİNOLEİK ASİT)-g-POLİ (METİL METAKRİLAT) (PLiMMA)/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Mustafa YASAN
Düzce Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Prof. Dr. Muharrem GÖKÇEN
Nisan 2019, 48 sayfa

Bu çalışmada poli (linoleik asit)-g-poli (metil metakrilat) (PLiMMA), graft kopolimer arayüzeyli Au/PLiMMA/n-Si diyotlar imal edilerek elektriksel karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. PLiMMA polimer tabakası n-Si tek kristal üzerine elktrospinning yöntemi ile kaplanmıştır. Bu polimer arayüzeyin nanofiber yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile doğrulanmıştır. Au/PLiMMA/n-Si Schottky diyotun karanlık ve bir halojen ışık kaynağı altındaki elektriksel parametreleri, oda sıcaklığında yapılan akım-voltaj (I-V) ölçümleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu diyota ait ters beslem doyum akımı *(I_o)*, engel yüksekliği *(Φ_b)*, idealite faktörü *(n)*, seri ve şönt direnç *(R_s* ve *R_{sh})*, ara yüzey durum yoğunluğu *(N_{ss})* gibi temel elektriksel parametreler elde edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Ara yüzey durum yoğunluğu, Elektriksel karakterizasyon, İdealite faktörü, Polimer, Schottky diyot.

ABSTRACT

ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF Au/POLY (LINOLEIC ACID)-g-POLY (METHYL METHACRYLATE) (PLiMMA) /n-Si SCHOTTKY DIODES

Student Mustafa YASAN
Düzce Üniversity
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics
Master's Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Muharrem GÖKÇEN
April 2019, 48 pages

In this study, electrical characterization of the Au/PLiMMA/n-Si diodes with poly (linoleic acid) -g-poly (methyl methacrylate) (PLiMMA) graft copolymer interfacial layer was performed. The PLiMMA polymer layer was coated on the n-Si single crystals by electrospinning method. The nanofiber nature of this polymeric interfacial layer was confirmed by a scanning electron microscope (SEM). The electrical parametres of the Au/PLiMMA/n-Si Schottky diode under dark and a halogen light source was obtained by using current-voltage (I-V) measurements at room temperature. Main electrical parameters such as reverse bias saturation current (I_o), barrier height (Φ_b), ideality factor (n), series and shunt resistance $(R_s$ and $R_{sh})$ and interface state density (N_{ss}) are obtained for this diode.

Keywords: Interface state density, Electrical characterization, Ideality factor, Polymer, Schottky diode.

1. GİRİŞ

Elektrik yüklerinin varlığı M.Ö 2500'lü yıllarda Yunanlı astronom ve filozof Miletli Thales tarafından keşfedilmiştir. Thales ipek veya yün ile sürtünen bir kehribar çubuğun saman ve benzeri parçaları çektiğini gözlemlemiştir. Bu gizemli özelliğin kehribar çubuktan kaynaklandığını düşünmüştür. Elektron, elektronik, elektrik ve benzeri kelimeler kehribarın yunanca karşılığı olan elektrondan türetilmiştir [1]. 1600 yılında William Gilbert, elektriklenmenin kehribar ile sınırlı kalmayıp genel bir olay olduğunu ortaya çıkarmıştır. 1785 yılında Charles Coulomb elektrik yükleri arasındaki ters kare kuvvet yasasını deneysel olarak doğrulamıştır. 19.Yüzyılda ise elektrik ve manyetizmanın birbiri ile ilişkili olduğuna dair deneysel gözlemler gerçekleştirilmiştir. James Clark Maxwell 1873 yılında tüm bu gözlem ve olguları, bugün elektromanyetik yasalar olarak bilinen Maxwell denklemlerini oluşturmakta kullanmıştır.

Transistörler icat edilmeden önce elektron lambaları kullanılmaktaydı. Bu lambalar ilk defa 1906 yılında Londra Üniversitesi'nde kullanılmıştır. Elektron lambalarının pahalı, kırılgan büyük boyutlu, çalışmak için ısınma gerekliliği ve güç tüketiminin fazla olması bu lambaların yerini alabilecek yeni devre elemanlarının arayışını hızlandırmıştır. Bu süreçte birçok bilim insanı tarafından çeşitli denemeler yapılmış olsa da teknik nedenler ve savaşlardan dolayı bu çalışmalar başarılı olamamıştır. İlk nokta kontaklı germanyum redresör (doğrultmaç), 1947 yılında Walter Houser Brattain ve John Bardeen tarafından yapılan çalışmalar sonrasında elde edilmiştir [2]-[5]. Bu redresör aynı yıl, bir radyo devresinde denenmiştir.

Nokta kontaklı bu doğrultmaç küçük boyutlu ve düşük tüketimli olup sinyalleri de, daha önce kullanılan lamba gibi güçlendiriyordu. Fakat buna karşın kararlı değildi ve üretimi oldukça zordu.

Bu aksaklıkları gidermek için William Shockley çalışmalarına devam ederek jonksiyon (yüzey temaslı) tipindeki transistörü geliştirdi. Seri üretime daha uygun olan bu transistör aynı zamanda kararlı da çalışıyordu. Walter Houser Brattain ve John Bardeen 17 Haziran 1948'de nokta kontaklı transistör için, William Shockley de 26 Haziran 1948'de jonksiyon (yüzey temaslı) tipindeki transistör için patent başvurularını yapmıştır. John

Bardeen, Walter Houser Brattain ve William Shockley 1956 yılında transistorü keşfettikleri için Nobel Fizik Ödülü'nü almışlardır.

İlk yapılan transistörler nokta kontaklı olup iki whiskerli bir kristal diyottan oluşmaktadır. Burada kristale "Base", whiskerlerden birine "emitter" diğerine de "collektör" adı verilmiştir. Bu tansistörlerde n-tipi germanyum kristali, base olarak kullanılmış olup, whiskerlar ise fosforlu bronzdan yapılmıştır. Daha sonra yüzey temaslı transistörler, NPN veya PNP olacak şekilde üç kristal parçasının birbirine yapıştırılması ile elde edilmiştir [2]-[5]. Yüzey temaslı transistörlerin icadı ile silisyum transistörler kullanılmaya başlanmış ve zamanla transistörlerin şekil ve kullanım alanları oldukça artmıştır.

Bir metal ile bir yarıiletken kontak edildiğinde, bu kontak metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonlarına bağlı olarak omik veya doğrultucu kontak olarak davranır. Doğrultucu kontaklar genel olarak Schottky kontak olarak da bilinirler. Doğrultucu kontak durumunda, Metal-yarıiletken (MS) yapı doğrultma özelliğine sahip temel bir Schottky diyot yapısıdır. Silisyum bazlı Schottky diyotlar birçok elektronik cihazın ve entegre devre teknolojisinin temelini oluştururlar.

Bu tip diyotlar; doğrultucular, güneş pilleri, foto-diyotlar, dedektörler ve kapasitörler gibi birçok amaçla kullanılmaktadırlar. Kullanım alanlarındaki bu çeşitliliğin temel sebebi metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey tabakadır. Genellikle bir arayüzey tabaka, yarıiletken yüzeyindeki aktif bağları pasifize etmek amacı ile kullanılır. Böylece uygun bir arayüzey tabaka, Schottky diyotu yukarıda sayılan kullanışlı bir devre elemanına dönüştürür. Buna ilave olarak diyotun elektro-optik karakteristikleri bu arayüzey tabaka aracılığı ile kontrol edilip geliştirilebilir.

Son zamanlarda; inorganik malzemelere göre daha ucuz ve basit olarak üretilebilen polimerik tabakalar arayüzey tabaka olarak Schottky diyotlarda kullanılmaktadır. Polimer ara yüzey tabakası içeren bu tür yapılar, metal-polimer-yarıiletken (MPS) yapılar olarak isimlendirilirler. Literatürde bazı polimerler kullanılarak elde edilen MPS yapılar için uygun elektro-optik, dielektrik ve fiziksel sonuçlara ulaşılmıştır [6]-[12]. Bu çalışmaların çoğunda Schottky diyotlar için pozitif sonuçlar ve bazı avantajlar elde edilmiştir. Ayrıca bazı polimerler ise elektronik devrelerde ilk defa kullanılmıştır. Bu tür çalışmalar, daha verimli cihazlar üretebilmek için yeni alternatif materyaller önerdiğinden oldukça önemlidir.

Sıklıkla kullanılan polimerik materyallerden birisi, literatürde birçok polimerizasyon yöntemi ile sentezlenebilen graft kopolimerlerdir [13]-[16]. Bu metotlardan önemli biri makroperoxy başlatıcılı serbest radikal polimerizasyonudur [16]-[17]. Bu polimerizasyon sistemi doğaya zararlı herhangi bir metal katalizör veya çözücü içermez. PLina-g-PMMA (PLiMMA) graft kopolimer bazı araştırmacılar tarafından sentezlenerek; ilaç taşıma [18], DNA tutunması [19], protein tutunması ve bakteriyel tutunma [20]; gibi özellikleri araştırma konusu yapılmıştır. Literatürdeki bu uygulamalara ilave olarak, çalışma grubumuz tarafından daha önce sentezlenen [8], PLiMMA polimeri Au/PliMMA/n-Si MPS diyotta arayüzey tabaka olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada Au/PliMMA/n-Si MPS diyotun temel elektriksel parametreleri karanlık ve bir halojen lamba ışığı (görünür bölge) altında incelenmiştir.

2. TEORİK BİLGİLER

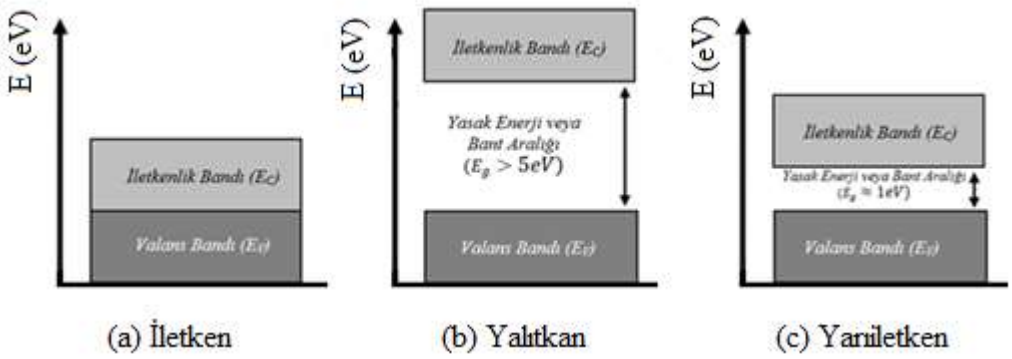
2.1. YARIİLETKENLER

2.1.1. Katıların Enerji Bant Teorisi

Maddeleri oluşturan atomlar, yaklaşık 10^{-10} m boyutlarında parçacıklar olup, pozitif yüklü bir çekirdek ile çekirdeğin etrafındaki negatif yüklü elektronlardan oluşmaktadır. Elektronlar Coulomb kuvveti ile çekirdek tarafından çekilirler ve bu şekilde daha düşük bir potansiyel enerjiye sahip olurlar. Çekirdek tarafından çekilen elektronlar, bulunma ihtimallerinin yüksek olduğu belirli yörüngelerde hareket ederler. Elektronların yerleştiği yörüngelerin enerji seviyeleri atomların elektronik yapısını belirler.

Maddelerin iletkenlikleri arasındaki bu farklılıklar katıların enerji-bant teoremi yardımıyla açıklanabilir. Bu teoriye göre katılar iletkenlikleri bakımından; iletken, yarı iletken ve yalıtkan olarak sınıflandırılabilirler. Kuantum mekaniğine göre atomların enerjileri kuantumlu (kesikli) değerlere sahiptir. Elektronlar, atomda belli enerji düzeylerinde bulunurlar ve en düşük enerji seviyesinden başlayarak üst enerji seviyelerine doğru seviyeleri doldururlar. Atomlar, bir katıyı meydana getirirken, komşu atomların elektronları ile etkileşerek enerji seviyelerinde yarılmalara sebep olurlar. Artan atom sayısı ile birlikte artan etkileşim, enerji düzeylerinin bir bant oluşturmasını sağlar. Bununla birlikte katıdaki atomların dalga özelliğinden dolayı bazı enerji seviyeleri yasaklıdır. Oluşan bu enerji bantlarının yapısı ve doluluk oranı maddenin iletkenliği hakkında yeterli bilgiyi verecektir.

Mutlak sıfırda (0 K) tamamen veya kısmen dolu en yüksek seviye valans bandı enerjisi (E_V) olarak isimlendirilir. Valans bandının hemen üzerinde yer alan ilk boş bant ise iletkenlik bandı enerjisi (E_C) olarak isimlendirilir. Valans bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumu arasındaki enerji farkı yasak enerji aralığı veya bant aralığı (E_g) olarak isimlendirilir [21].



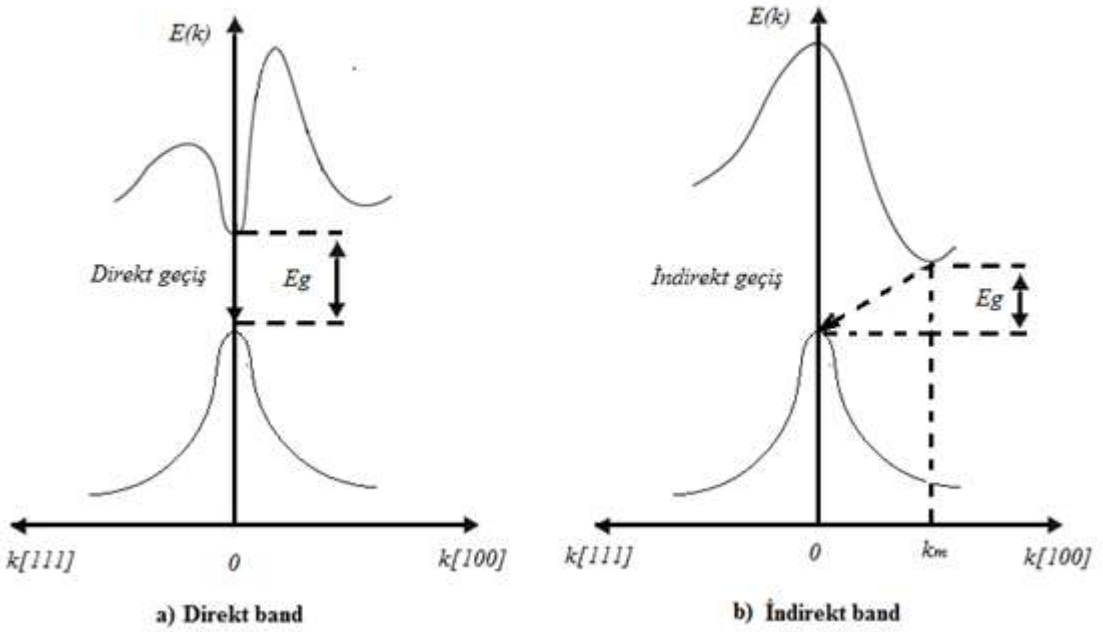
Şekil 2.1. Katıların enerji-bant diyagramı.

Şekil 2.1 (a)'da iletkenlerde valans bandı ya kısmen boş ya da valans bandı ile iletkenlik bandı çakışmış durumdadır. Bu nedenle iletkenlerde bir yasak enerji aralığından bahsedilemez. Dolayısıyla mutlak sıfırın üzerinde elektronlar iletime katkıda bulunabilir. Şekil 2.1 (b) yalıtkanlar ve (c) yarıiletkenler de ise izinli enerji seviyelerinin oluşturduğu bantlar arasında (valans ve iletim bandı) yasaklanmış enerji aralıkları vardır. Yarıiletkenler için bu yasak enerji aralığı birkaç eV mertebesinde ($E_g \approx 1$ eV) iken, yalıtkanlarda bu aralık genel olarak 5 eV ($E_g > 5$ eV) üzerindedir. T=0 K'de, tüm elektronlar valans bandında olup iletime katkıları yoktur. T>0 K'de ise elektronların yeterli termal enerjiyi alarak iletim bandına çıkması mümkündür. Bu durum yarıiletkenlerin küçük bir dış etkiyle iletken hale geçirilebilmesini mümkün kılmaktadır. Yalıtanlarda ise yasak enerji aralığının değeri elektronun termal enerjisinden çok daha büyük değerde olup bu durum, elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçişlerini engeller ve bu enerji-bant yapılarından dolayı normal şartlarda iletken değildirler.

2.1.2. Yarıiletkenlerin Bant Yapısı

Yarıiletkenlerde dalga vektörü (k) ile tanımlanan valans ve iletkenlik bandının, k uzayında birbirine göre konumları son derece önemlidir. Valans bandı ile iletkenlik bandı aynı doğrultuda (aynı k değerinde) olan yarıiletkenlere direkt (doğrudan), farklı doğrultuda (farklı k değerinde) olan yarıiletkenlere indirekt (dolaylı) bant aralıklı yarıiletkenler denir. Şekil 2.2'de direkt (GaAs) ve indirekt (Si) bant aralıklı yarıiletkenlere ait enerji bant grafikleri verilmiştir [21]. Günümüz elektronik teknolojisinde kullanılan yarıiletkenlerin çoğunda, valans bant maksimumu gama noktası olarak bilinen k=0'da oluşur. Direkt bant yapısına sahip yarıiletkenlere GaAs, ZnS, CdS, CdSe ve InSb örnek

olarak verilebilir. İndirekt bant yapısına sahip yarıiletkenlere de Si ve Ge örnek olarak verilebilir. Yük taşıyıcılarının bantlar arası geçişinde enerji ve momentumun korunması gerekmektedir. Direkt bant aralıklı bir yarıiletkende, bant kenarları aynı k değerinde olduğundan geçiş için sadece enerji korunumunun sağlanması yeterlidir. Dolayısı ile yarıiletkenin direkt veya indirekt bant aralığına sahip olması optik özelliklerini ve optoelektronik uygulamalar için kullanılabilirliğini belirler.



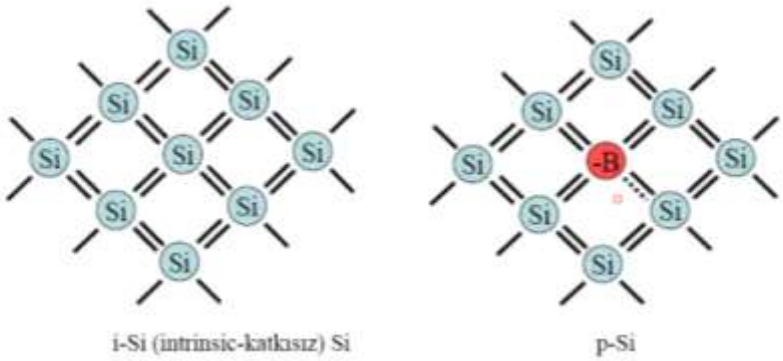
Şekil 2.2. (a) Direkt (doğrudan) bant aralığına sahip bir yarıiletkende,
(b) İndirekt (dolaylı) bant aralığına sahip bir yarıiletkende
banttan banda rekombinasyon.

2.1.3. Yarıiletken Tipleri ve Katkılama

Yarıiletkenlerde artan sıcaklıkla valans bandından daha fazla elektron yasak enerji aralığını aşarak iletim bandına geçer. İletim bandına geçen elektronlar valans bandında başka bir elektron tarafından doldurulabilecek boşluk bırakır. Bu boşluk deşik (hole) olarak adlandırılır ve pozitif yüklü ikinci bir taşıyıcı gibi davranır. Yarıiletkenlerde zıt yönlerde hareket eden bu elektron ve deşikler iletime katkıda bulunurlar. Hakiki (saf) bir yarıiletkende eşit sayıda elektron ve deşik vardır. Birim hacimdeki elektron sayısı *n*, ve deşik sayısı p olmak üzere, n=p olarak yazılabilir.

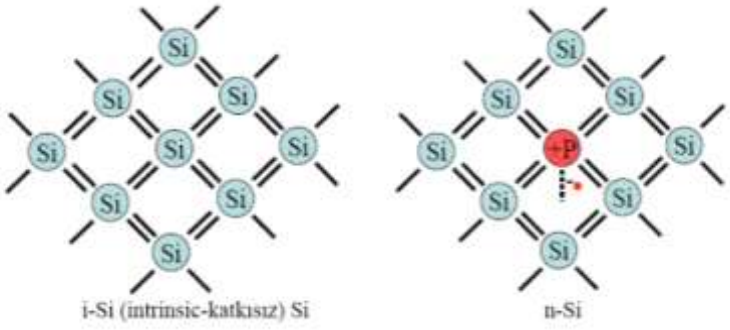
Eşit sayıda elektron ve deşik içeren saf yarıiletken kristale uygun safsızlık atomları katkılanmasıyla katkılı yarıiletkenler elde edilir. IVA grubu elementi olan Si yarıiletkeni en dış kabuğunda dört valans elektronuna sahiptir ve komşu dört atomla kovalent bağ

yapar. Silisyum; B, Al, In, Ga gibi valans bandında 3 elektrona sahip IIIA grubu elementlerinden birisi ile katkılandığında, bağların birinde bir elektron boşluğu meydana gelir. Bu elektron boşluğu tüm sıcaklıklarda iletime katkıda bulunur ve deşik (hole) olarak isimlendirilir. Bu tür fazlalık taşıyıcı deşik üreten (elektron alan) katkılara acceptor (alıcı), bu şekilde elde edilen katkılı yarıiletkenlere ise p-tipi yarıiletken denir. Şekil 2.3 Si yarıiletkeninin B ile katkılanması ve p-tipi yarıiletkenin elde edilmesini resmetmektedir.



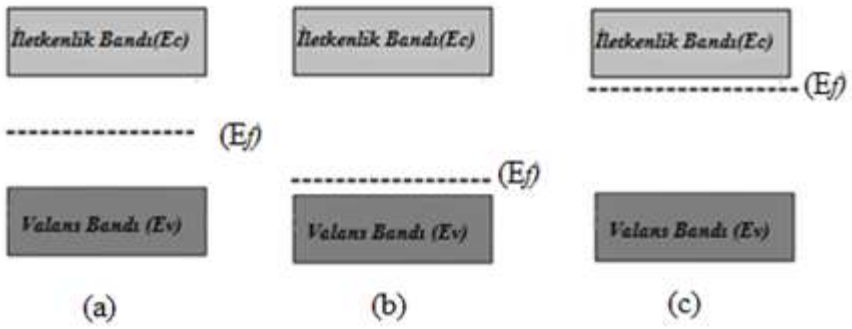
Şekil 2.3. Si yarıiletkeninin B ile katkılanması ile p-tipi yarıiletkenin elde edilmesi.

Si; As, N, Sb, P gibi valans bandında 5 elektrona sahip VA grubu elementlerinden birisi ile katkılandığında, bir elektron fazlalığı meydana gelir. Bu fazlalık elektron tüm sıcaklıklarda iletime katkıda bulunur. Bu tür fazlalık taşıyıcı elektronu olan katkılara donör (verici), bu şekilde elde edilen katkılı yarıiletkenlere ise n-tipi yarıiletken denir. Şekil 2.4 Si yarıiletkeninin P ile katkılanması ve n-tipi yarıiletkenin elde edilmesini resmetmektedir.



Şekil 2.4. Si yarıiletkeninin P ile katkılanması ile n-tipi yarıiletkenin elde edilmesi.

E_F ile gösterilen Fermi enerji seviyesinin, katkılanmamış saf yarıiletkenler için yasak enerji aralığının ortasında olduğu varsayılır. Katkılı yarıiletkenler için katkı türüne ve yoğunluğuna bağlı olarak Fermi enerji seviyesi yukarı veya aşağı doğru kayabilir [8]. Saf ve katkılı yarıiletkenler için Fermi enerji seviyeleri Şekil 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2.5. (a) Saf yarı iletkenlerde enerji bant diyagramı,
(b) p-tipi yarı iletkenler, (c) n-tipi yarı iletkenler.

Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasında olan saf yarıiletkenler katkılandığında Fermi enerji seviyesi, yasak enerji aralığının ortasından iletkenlik bant kenarına veya valans bant kenarına yaklaşır. p-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi valans bant kenarına yaklaşır. n-tipi yarıiletkenlerde ise Fermi enerji seviyesi iletkenlik bant kenarına yaklaşır. p-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcılar holler, n-tipi yarıiletkenlerde ise çoğunluk taşıyıcılar elektronlardır.

2.2. METAL YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR

Farklı iki madde aralarında başka bir madde olmadan birbirleri ile temas haline getirildiğinde kontak edilmiş olur. Bu maddeler bir metal ile bir yarıiletken olarak tercih edilirse oluşturulan yapı MS kontak olarak isimlendirilir. MS kontaklar birçok yarıiletken tabanlı devre elemanlarının temelini teşkil etmektedir. Bir metal ile bir yarıiletken arasında iş fonksiyonlarına bağlı olarak omik ve doğrultucu (Schottky) kontak olmak üzere iki tür kontak oluşabilir. Bir kontağın doğrultucu mu yoksa omik mi olduğunu metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. Bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan minimum enerji olarak tanımlanan iş fonksiyonu, yarıiletkenlerde katkılanan alıcı veya verici atomların miktarına bağlı olduğu için değişken bir niceliktir. Metalin iş fonksiyonu Φ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s ile gösterilir. Teorik olarak metal-n-tipi yarıiletken için $\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu kontak $\Phi_m < \Phi_s$ ise omik kontak oluşur. Metal-p-tipi yarıiletkenlerde ise $\Phi_m > \Phi_s$ omik kontak, $\Phi_m < \Phi_s$ ise doğrultucu kontak olur.

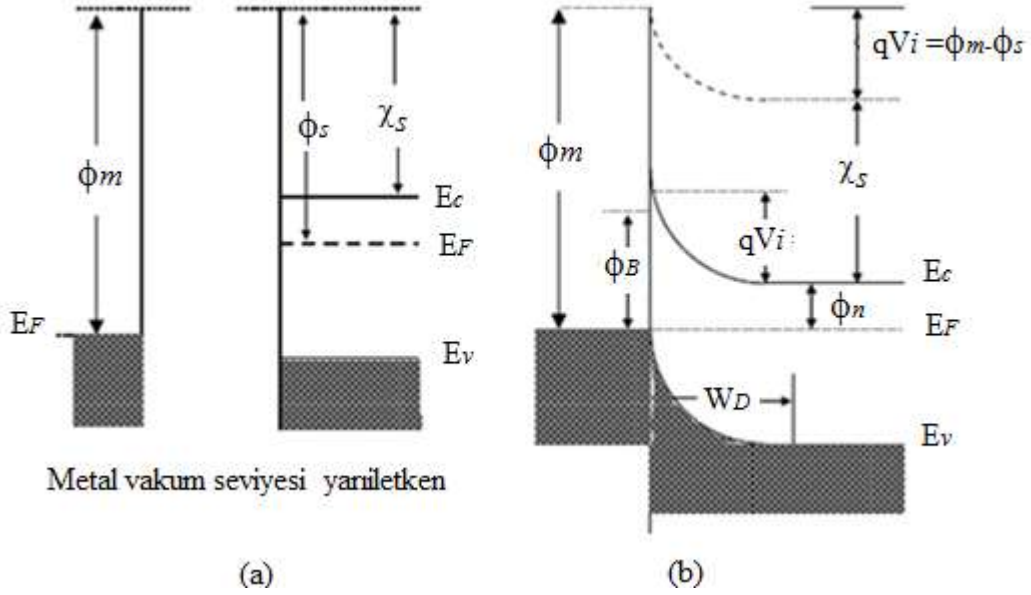
Çizelge 2.1. MS kontaklardan İş fonksiyonuna göre Omik ve Schottky kontak oluşumu.

	n-tipi	*p-tipi*
Doğrultucu kontak	$\Phi_m > \Phi_s$	$\Phi_m < \Phi_s$
Omik kontak	$\Phi_m < \Phi_s$	$\Phi_m > \Phi_s$

İdeal bir kontağın oluşturulabilmesi için, kontak edilecek malzemelerin yeterince pürüzsüz ve temiz olmaları gereklidir. MS kontağı sonrası Fermi enerji seviyeleri eşit olana kadar her iki yönde yük geçişleri olur. Bu geçişler termal denge kuruluncaya kadar devam eder. Yüklerin ayrışması metal-yarıiletken ara yüzeyinde potansiyel engel yüksekliği (Φ_b) meydana getirir. Meydana gelen bu arayüzde hareketli yükler olmadığından yüksek dirençli bir tabakadır ve bu tabakaya Schottky tabakası adı verilir.

2.2.1. Metal/n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda; $\Phi_m > \Phi_s$ ise metal ile n-tipi yarıiletken arasında doğrultucu kontak oluşmaktadır. Bu durumda metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip, yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metal tarafına geçerler. Bu yük geçişleri metal ile yarıiletkenin fermi enerji seviyeleri eşit olana kadar sürer. Yarıiletkenden metale geçen elektronlar, yarıiletkendeki elektron yoğunluğunu azaltırken, arkalarında + yüklü bir taşıyıcı olarak davranan boşluklar bırakırlar. Metal ve yarıiletken arasındaki bu yük geçişleri sonucunda; eklem bölgesinde bir potansiyel engeli, dolayısıyla aynı bölgede bir elektrik alan oluşur. Eklem bölgesindeki bu potansiyel engeli önemli bir parametre olup, yarıiletkendeki katkı atomlarının yoğunluğu ve sıcaklık gibi diğer fiziksel parametrelerle birlikte akım-iletim süreçleri üzerinde oldukça etkin bir rol oynar [22]-[23]. Yük geçişleri tamamlandıktan sonra eklemin yarıiletken tarafında serbest yüklü taşıyıcılardan arınmış bir bölge oluşur. Bu bölge tüketim bölgesi, Schottky bölgesi veya uzay yükü bölgesi olarak isimlendirilir.



Şekil 2.6. Metal/n-tipi doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı,
(a) Kontaktan önce, (b) Kontaktan sonra termal dengede.

Yarıiletken kontak oluşturulmadan önce yüzey durumları içermediğinden yarıiletkenin gövde enerji-bant yapısı ile yüzey enerji-bant yapısı aynıdır. MS kontak oluşurken yarıiletkenden metale geçen elektronlar nedeniyle, eklemin yarıiletken tarafında serbest elektron yoğunluğu azalır. Azalan bu elektron yoğunluğu, yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki (E_c-E_F) yarılmayı arttıracaktır. Termal denge durumunda E_F sabit kalıp yasak enerji aralığı değişmediğinden iletkenlik ve valans bant kenarları yukarı doğru bükülürler. Yarıiletkenin elektron yakınlığı (χ_s) ve vakum seviyesi, kontak durumunda değişmediğinden benzer şekilde yukarı doğru bükülürler. Kontak durumunda yük geçişleri nedeniyle yarıiletkenin metale bakan tarafında yüklü donör iyonları dolayısıyla bir pozitif uzay yükü, metalin yarıiletkene bakan tarafında ise yarıiletkenden geçen elektronlar dolayısıyla ince bir negatif yüzey yük tabakası oluşur. Bu iki yük tabakası arasındaki bölgelere sırasıyla, pozitif ve negatif uzay yükü bölgesi tabakaları denilir. Ayrıca bu iki yük tabakası arasındaki bölge, tüketim bölgesi, Schottky bölgesi veya uzay yükü bölgesi olarak da isimlendirilir.

Termal dengede kontak potansiyeli qV_i, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir (qV_i=Φ_m-Φ_s) [2]. Kontak potansiyeli (qV_i), yarıiletkenden metale geçecek olan yüklerin gördüğü potansiyel engel yüksekliğidir. Metalden yarıiletkene geçecek olan yüklerin gördüğü potansiyel engel yüksekliği ise;

$\Phi_B = (\Phi_m - \chi s)$ (2.1)

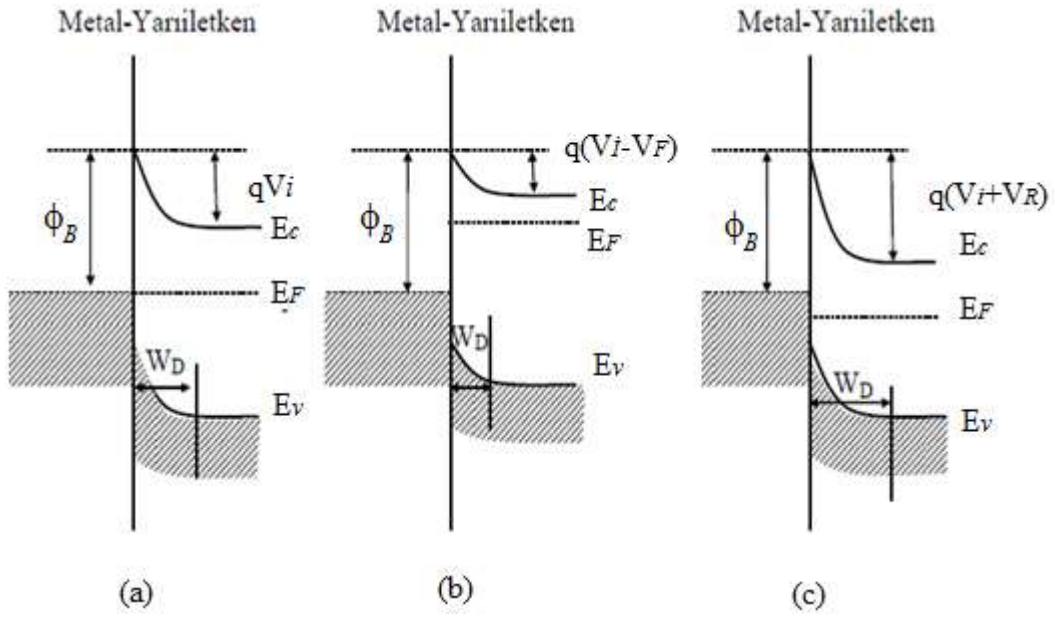
ile verilir.

$\Phi_s = \chi s + \Phi_n$ *ve* $\Phi_m = qV_i + \Phi_s$ eşitlikleri Denklem 2.1'de kullanılırsa,

$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n)$ (2.2)

olarak elde edilir.

Φ_B; Schottky ve Mott tarafından Denklem 2.1'de ayrı ayrı verilmiştir. Devreye bir ön-gerilim uygulandığında, metal ve yarıiletkene uygulanan gerilime göre metal/yarıiletken kontak, doğru veya ters beslenmiş olur. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda doğru beslem, metal kontağın pozitif, yarıiletkenin ise negatif olacak şekilde ön-gerilimlenmesi ile oluşur. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda metal kontağın negatif, yarıiletkenin ise pozitif olacak şekilde ön-gerilimlenmesi durumunda da ters beslem oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda ise bu ön-gerilimlemelerin tersi sırası ile doğru ve ters beslem olarak isimlendirilir.



Şekil 2.7. Metal/n-tipi doğrultucu kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Termal dengede, (b) Doğru beslem, (c) Ters beslem.

Bir Schottky kontağın termal denge durumundaki enerji bant diyagramı, bu kontağa uygulanacak olan doğru veya ters bir ön-gerilim voltajı ile değiştirecektir.

Termal dengedeki potansiyel engel yüksekliği qV_i olan bir kontağa V_F doğru ön-gerilimi uygulandığında, yeni durumda potansiyel engel yüksekliği, V_F kadar azalarak $q(V_i-V_F)$ olur.

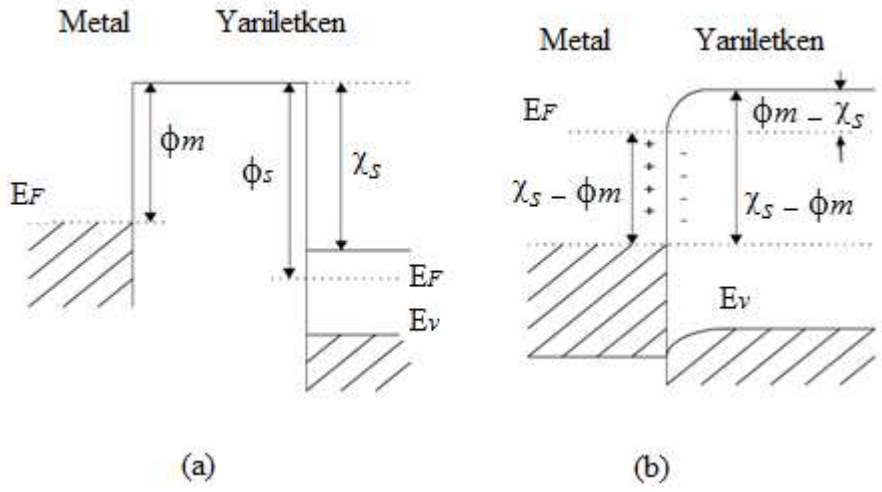
Termal dengedeki potansiyel engel yüksekliği qV_i olan bir kontağa V_R ters ön-gerilimi uygulandığında, yeni durumda potansiyel engel yüksekliği, V_R kadar artarak; $q(Vi+V_R)$ olur.

Bu durumda Schottky kontak doğru beslendiğinde engel yüksekliği azaldığından iletime geçerken, ters beslendiğinde ise artan engel yüksekliği sebebiyle hemen hemen hiç akım geçirmeyecektir. Genel olarak doğrultucu kontakların bu şekilde, bir yönde akım geçirmesi olayına "doğrultma" denir.

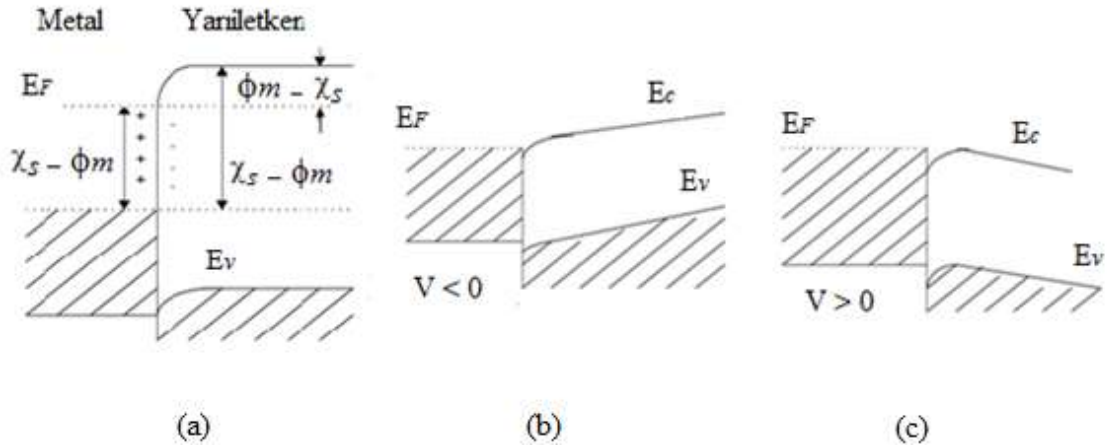
2.2.2. Metal/n-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Elektronların her iki yönde de kolayca hareket edebildiği kontaklar "Omik kontak" olarak bilinir. Metal/n-tipi omik kontağın oluşabilmesi için $\Phi_s > \Phi_m$ şartının sağlanması gerekmektedir. Metal ve n-tipi yarıiletken kontak haline getirilmeden önce, metalin Fermi enerji seviyesi, yarıiletkenin Fermi enerji seviyesinden daha yüksek olup kontak sağlandığında elektronlar metalden yarıiletkene doğru geçerler. Termal dengeye kadar devam eden yük akışı sonunda kontağın metal tarafında pozitif yüzey yüklerinin birikmesine, yarıiletken tarafında negatif uzay yüklerinin birikmesine sebep olur.

Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklarda, ister metal tarafına ister yarıiletken tarafına bir $+V$ ön-gerilimi uygulansın, elektronlar bir engel olmadığı için her iki yönde de kolayca hareket edebilirler.



Şekil 2.8. Metal/n-tipi omik kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Kontaktan önce, (b) Kontaktan sonra termal dengede.



Şekil 2.9. Metal/n-tipi omik kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Termal dengede, (b) V<0 olması durumu, (c) V>0 olması durumu.

2.2.3. Metal/ p-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m<\Phi_s$ olması durumunda metal ile p-tipi yarıiletken arasında doğrultucu kontak oluşur. Termal denge durumunda metalin Fermi enerji seviyesi yarıilekenin fermi enerji seviyesinden daha yüksek olduğundan, metal ve p-tipi yarıiletken kontak yapıldığında Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar metalden yarıiletkene elektron geçişi olur. Bunun sonucunda yarıiletkenin ön bölgesi negatif olarak, metalden yarıiletkene geçen elektronların arkasında bıraktıkları deşikler dolayısıyla da metalin ön yüzeyinde pozitif yükler birikir. Yarıiletkendeki negatif yük tabakası iyonize olmuş alıcılar (acceptor) tarafından oluşturulurlar ve d kalınlığındaki bir uzay yük tabakası içinde dağılırlar.

Yarıiletkendeki enerji seviyeleri kontak oluştuktan sonra, Φs-Φm kadar yükselir. Böylece yarıiletkendeki deşiklerin gördüğü engel yüksekliği;

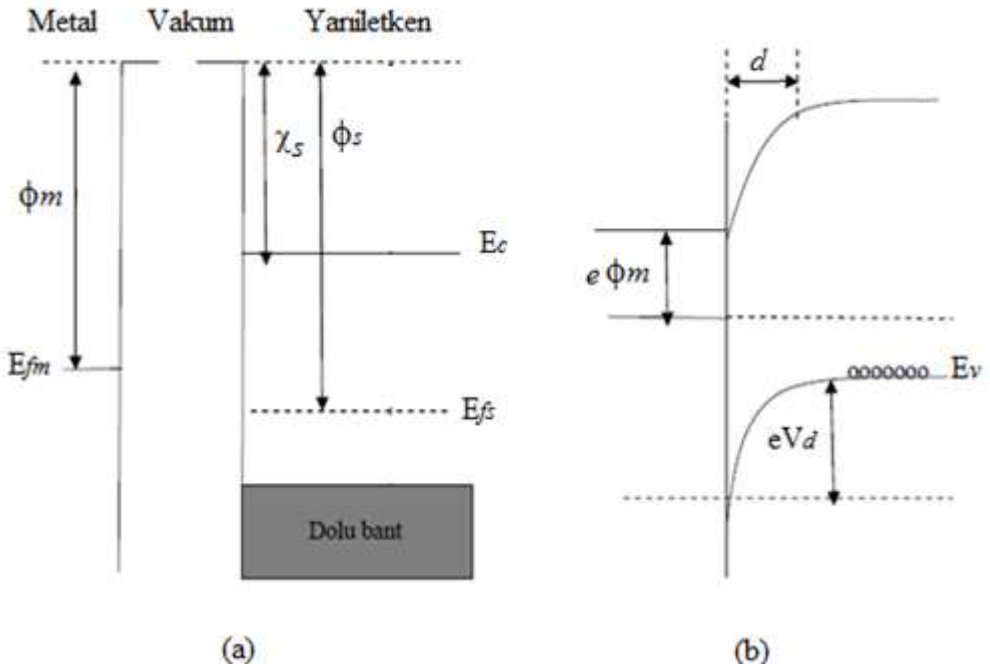
$$eV_d = \Phi_s - \Phi_m \tag{2.3}$$

olur. Burada V_d kontak potansiyelidir ve metalin yüzeyine göre alınır.

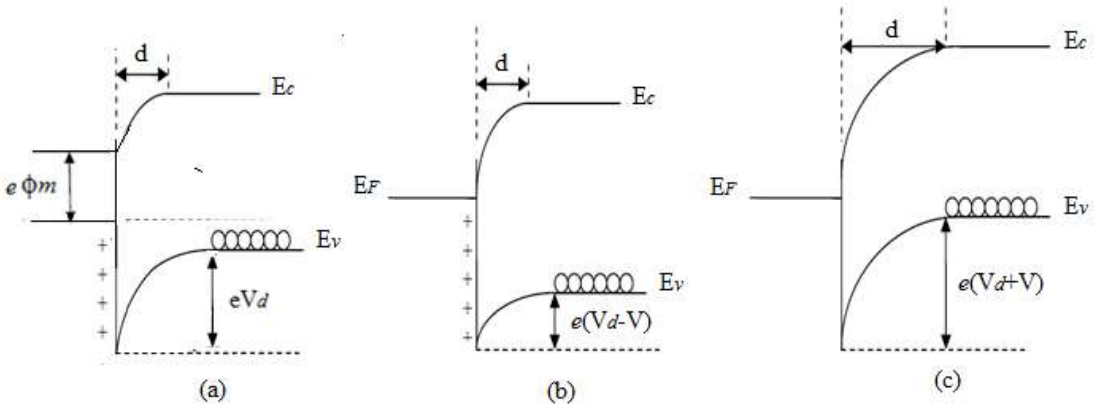
Kontağın metal tarafındaki deşikler için görülen engel yüksekliği ise;

$$e\Phi_{bn} = E_s - \Phi_m \tag{2.4}$$

olur.



Şekil 2.10. Metal/p-tipi doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı,
(a) Kontaktan önce, (b) Kontaktan sonra termal dengede.

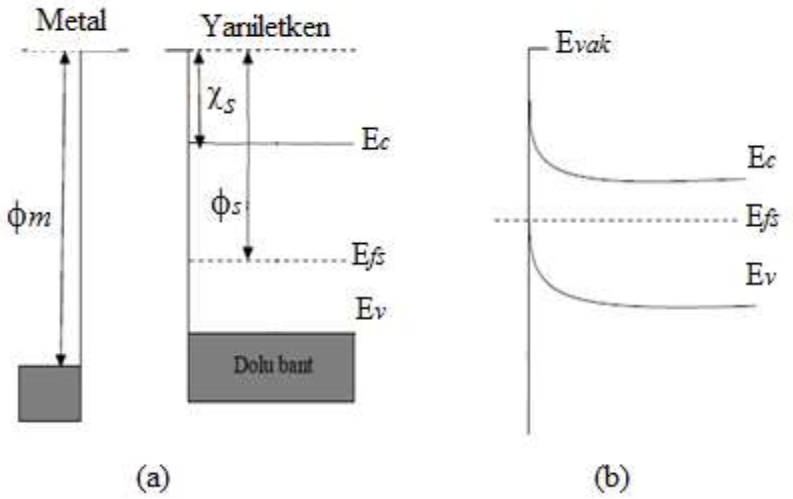


Şekil 2.11. Metal/p-tipi doğrultucu kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Termal dengede, (b) Doğru beslem, (c) Ters beslem.

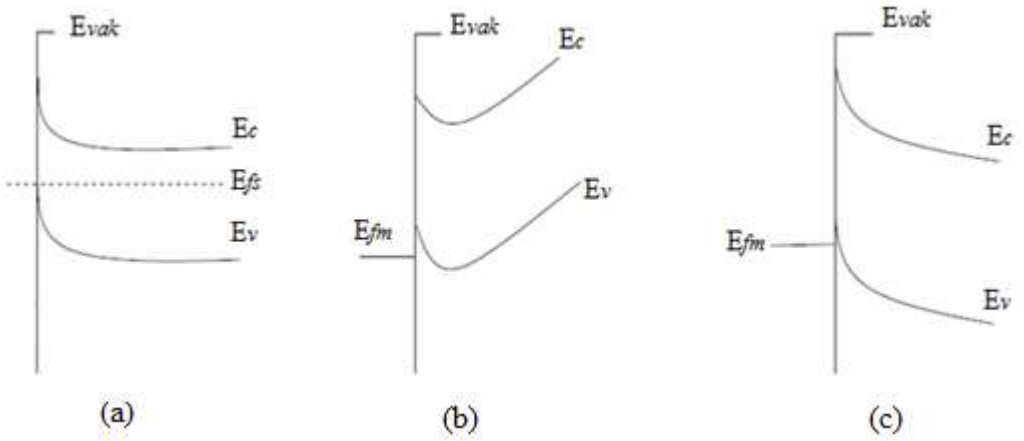
2.2.4. Metal/p-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalin Fermi enerji seviyesinden daha yukarıda olup, kontak edildikten sonra, yarıiletkendeki elektronların metal tarafına geçmesi ile yarıiletkende pozitif yükler, metalin ön yüzeyinde ise negatif yükler oluşur. Yaklaşık olarak omik kabul edilen ve her iki doğrultuda akım geçirebilen kontaklar "omik kontak" olarak isimlendirilir. Bu kontaklarda kontak direnci mümkün olduğu kadar düşük olmalıdır. Yarıiletken tarafında elektron yoğunluğunun azalmasından dolayı yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi; Φ_m-Φ_s kadar düşer. Metaldeki elektronlar, yarıiletkenin içindeki

izinli durumlara kolayca geçebilirler. Bu elektron geçişi deşiklerin yarıiletken tarafından metal tarafına geçişine karşılık gelir. Metal tarafındaki yüksek elektron yoğunluğundan dolayı metal tarafına geçen deşikler nötr hale geçerler.



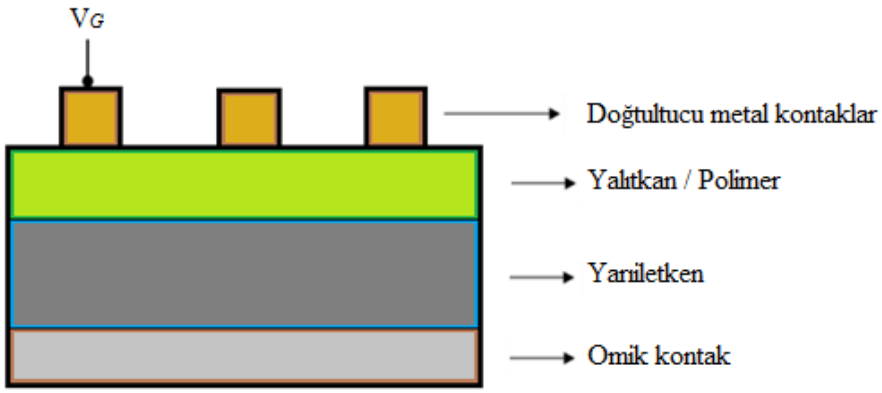
Şekil 2.12. Metal/p-tipi omik kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Kontaktan önce, (b) Kontaktan sonra termal dengede.



Şekil 2.13. Metal/p-tipi omik kontak için enerji-bant diyagramı,
(a) Termal dengede, (b) V<0 olması durumu, (c) V>0 olması durumu.

2.3. METAL-POLİMER-YARIİLETKEN (MPS) KONTAKLAR

Metal ile yarıiletken arasında herhangi bir yalıtkan veya polimer bir arayüzey tabakası oluşturulursa, MS yapı, MIS veya MPS yapıya dönüşür. MIS yapıların oluşturulmasında genellikle Silisyum (Si) yarıiletkeniyle Silisyum dioksit (SiO_2) yalıtkan tabakası kullanılır. Çoğu durumda bu oksit tabakası fabrikasyon aşamasında kendiliğinden ince bir katman olarak Si yüzeyine büyüyebilmektedir. SiO_2 tercih edilmesindeki nedenlerden birisi bu yalıtkanın ideal örgü sürekliliğine yakın bir eklem oluşturmasıdır. Bu nedenle SiO_2 birçok yüzey etkisini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar [24]. Kaplanan bu arayüzey tabaka, metal ile yarıiletkeni birbirinden ayırırken aynı zamanda metal ve yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. Ayrıca bu arayüzey tabaka MS yapıyı, değişken bir kapasitör, güneş pili, foto diyot ve sensör gibi çeşitli elemanların yapımında kullanılır hale getirebilir. Literatürde arayüzeyde inorganik bileşikler yerine, üretim ve kullanım esnekliği sağlayan polimerlerin kullanılması da son derece yaygındır. Böyle bir duruma karşılık gelen bir MPS yapının şematik diyagramı Şekil 2.14'de gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Bir MPS yapının şematik gösterimi.

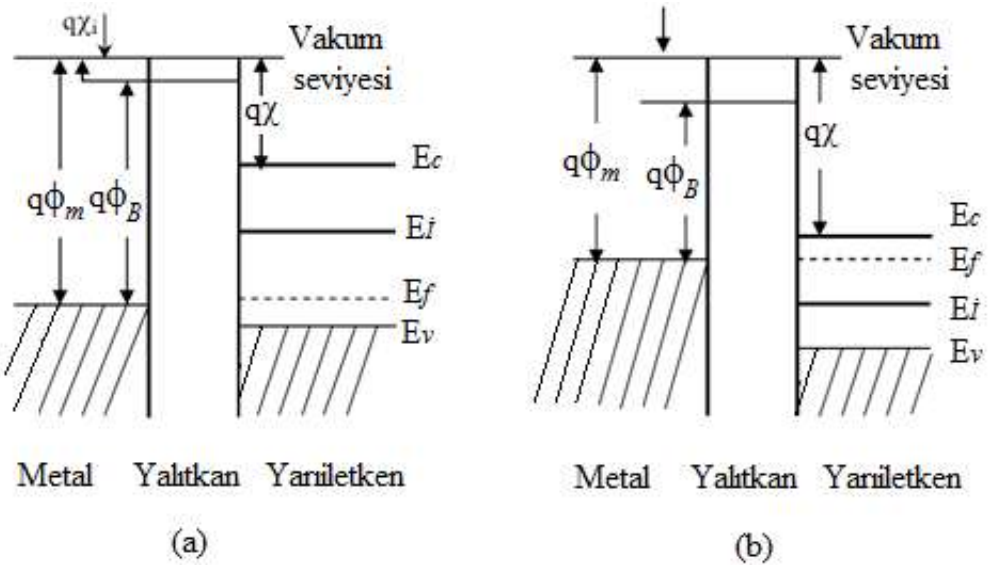
Kullanılan polimer arayüzey tabakanın fiziksel özellikleri, cihazın kararlılığı, güvenilirliği ve performansı açısından oldukça önemlidir. MS yapılarda kullanılan uygun fiziksel özelliklere sahip bir polimer arayüzey tabaka; sızıntı akımını azaltarak daha iyi bir akım kontrolü sağlaması ve cihazın elektro-optik özelliklerini iyileştirmesi gibi olumlu katkılarından dolayı özellikle tercih edilmektedir [23], [25].

Bir MS Schottky diyota bir V_G voltajı uygulanırsa, bu voltaj; arayüzey tabaka, seri direnç ve diyot tarafından; $V_G = V_D + V_{RS} + V_i$ olacak şekilde bölüşülecektir.

Safsızlıklardan veya doymamış bağlardan kaynaklanan MS arayüzeyindeki durumlar ile kullanılan yöntemden kaynaklı olarak oluşan hareketli iyonlar ve arayüzey yüklerinin bulunması, MIS/MPS yapısının özelliklerini değiştirmekte ve MIS/MPS yapısının idealden sapmasına sebep olmaktadır.

2.3.1. İdeal MIS/MPS Yapı

Metal ve yarıiletken arasındaki yalıtkan/polimer tabaka, bant aralığı büyük olduğundan iyi bir izalasyon görevi görmektedir. İdeal MIS/MPS yapıda yalıtkan içinde, yalıtkan-yarıiletken ara yüzeyinde sabit ve hareketli iyonlar ve ayrıca yalıtkan-yarıiletken ara yüzeyinde arayüzey yükleri bulunmaz [26]-[27]. İdeal MIS yapının, V=0 Volt durumunda enerji-bant diyagramı Şekil 2.15'de gösterilmiştir.



Şekil 2.15. V=0'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı,
a) p-tipi yarıiletken, b) n-tipi yarıiletken.

İdeal bir MIS yapıda;

- Denge durumunda metalin iş fonksiyonu Φ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s arasındaki fark sıfırdır.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = 0 \qquad \text{(n-tipi)} \qquad (2.6)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bp} \right) = 0 \qquad \text{(p-tipi)} \qquad (2.7)$$

Burada χ yarıiletken elektron yakınlığı, E_g yarıiletkenin yasak enerji aralığı, ψ_B ise Fermi enerji seviyesi (E_F) ile saf enerji seviyesi (E_i) arasındaki enerji farkıdır.

- Yalıtkanın özdirenci çok büyüktür, dolayısı ile doğru *(dc)* gerilim altında yalıtkana doğru, yük geçişi yoktur.
- Herhangi bir beslem altında, yapıdaki yükler, yalıtkanın her iki tarafında metal yüzeyindekiler ile yarıiletkendekiler eşit miktarda, fakat zıt yüklüdür.
- Yalıtkan içerisinde ve yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde; arayüzey durumları, tuzaklar, sabit ve hareketli yükler ile yüzey yükleri bulunmaz.
- Yalıtkanın bant aralığı çok büyük olduğundan iletkenlik bandındaki taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

İdeal bir MIS yapıda, metal elektroda herhangi bir gerilim uygulanırsa yarıiletkende yük değişimleri oluşur. Yarıiletkendeki serbest taşıyıcı yoğunluğu metaldekine göre daha az olup uygulanan gerilime bağlı olarak değişmektedir. Yarıiletkenin arayüzeye bakan bölgesinde enerji bantlarının bükülmesine neden olan bir uzay yükü (Q_{sc}) oluşur. Termal dengede bu uzay yük miktarı, uygulanan gerilimin büyüklüğüne bağlıdır. Katkılamanın türüne göre yarıiletkendeki yükler çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olup, serbest yükler yanında serbest olmayan yükler de bulunduğundan, bu yükler uygulanan gerilime bağlı olarak bir uzay yükü bölgesi oluştururlar [4], [22], [26]-[28].

Metal elektrota uygulanan gerilim;

$$V = V_{ox} + \psi_s \tag{2.8}$$

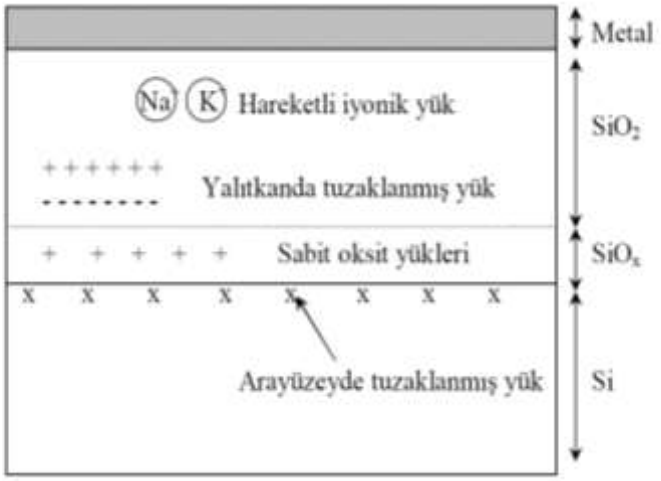
eşitliği ile verilebilir. Burada, V_{ox} yalıtkan üzerine düşen gerilim, ψ_s ise arayüzeydeki bant gerilimidir [29].

2.3.2. Gerçek MIS Yapı

Gerçek MIS yapılarda yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyi, yalıtkan ve arayüzeydeki hareketli yüklerin varlığından dolayı elektriksel olarak hiçbir zaman nötr değildir. Yarıiletken yüzeyinde kristal örgünün kesilmesinden dolayı doymamış bağlar mevcuttur. Gerçek MIS yapısında, bu doymamış bağlardan ve safsızlıklardan kaynaklanan yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak isimlendirilen birçok tuzaklanmış yükler mevcuttur. Ayrıca, arayüzey yalıtkan polimer tabakanın oluşturulma şartları ve yöntemine bağlı olarak ortaya çıkan çeşitli hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ve arayüzey yüklerinin bulunması MIS/MPS yapının elektriksel özelliklerini değiştirerek,

MIS/MPS yapının ideal özelliklerinden sapmasına neden olmaktadır [2], [4], [26]-[27].

Gerçek bir MIS/MPS yapıda birçok yük ve arayüzey durumu bulunmaktadır. Bunlar, yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri, yalıtkan içindeki hareketli iyonlar ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde yasak enerji aralığı içindeki seviyeler gibi tanımlanan arayüzey durumlarıdır. Genel olarak bir MIS yapıdaki yük ve arayüzey durumları Şekil 2.16'da gösterilmiştir [2].



Şekil 2.16. İdeal olmayan MIS yapıda ara yüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.

2.4. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLARDA AKIM İLETİM MEKANİZMALARI

Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletimi genel olarak çoğunluk taşıyıcılarla sağlanır. Buna karşın yeterince yüksek doğru besleme bölgesinde azınlık taşıyıcıların sürüklenme akım bileşeni ihmal edilemez. Böylece bir MS kontakta, doğru beslem bölgesindeki temel akım iletim mekanizmaları aşağıdaki gibi sıralanabilir [2].

a) Termiyonik Emisyon

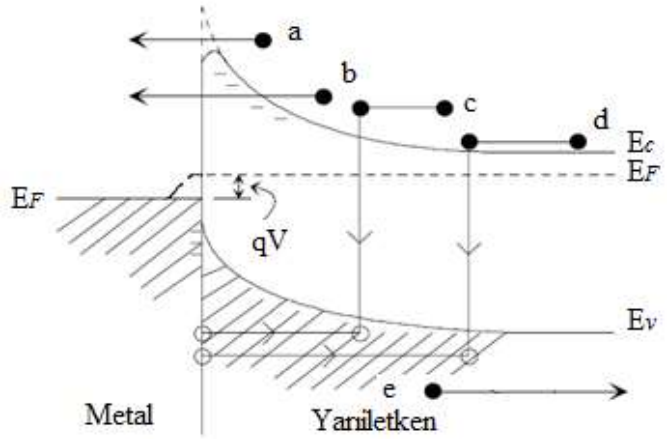
b) Tünelleme

c) Yeniden Birleşme

d) Elektronların Difüzyonu

e) Deşiklerin Difüzyonu

Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda doğru beslem akım-iletim mekanizmaları Şekil 2.17'de gösterilmiştir [2].



Şekil 2.17. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda doğru beslem akım-iletim mekanizmaları, a) Termiyonik emisyon, b) Tünelleme, c) Yeniden birleşme, d) Elektron difüzyonu, e) Deşiklerin difüzyonu.

Bahsedilen akım iletim mekanizmalarından, oda sıcaklığında ve orta katkılama bölgesi için termiyonik emisyon teorisi oldukça etkin bir mekanizmadır ve bu teori, diyot parametrelerinin hesaplanmasında oldukça kullanışlıdır. Tünelleme ve uzay yük bölgesinde yeniden birleşme, genellikle yüksek katkılı yarıiletkenler ($N_D \geq 10^{17}$ cm^{-3}) için uygun bir modeldir. Bu çalışmada termiyonik emisyon teorisi kullanılarak diyot karakterizasyonu yapılmış ve temel elektriksel parametreleri elde edilmiştir.

2.4.1. Termiyonik Emisyon (TE) Teorisi

Bethe, metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda, akımın çoğunluk taşıyıcılar tarafından taşındığını varsayarak termiyonik emisyon teorisini oluşturmuştur. Termiyonik emisyon (TE), ısıl enerji kazanan yüklü taşıyıcıların, metal tarafından yarıiletkene veya yarıiletken tarafından metale potansiyel engelini aşarak geçmelerine dayanır. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda ise deşikler akımın iletilmesini sağlamaktadır.

Termiyonik emisyon teoremine [30] göre;

- Engel yüksekliği (Φ_B), ısıl enerji (kT/q) değerinden oldukça büyüktür.
- Yüklü taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin kalınlığından büyüktür. Dolayısı ile Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmamaktadır,
- Akım engelin şeklinden bağımsız olup, engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır.

Böylece yarıiletkenden metale doğru elektrik akım yoğunluğu, engel yüksekliğini aşmak için gerekli enerjiye sahip elektronların dağılımına ve yönüne bağlı olarak verilir. Yarıiletkenden metale doğru olan J_{sm} akım yoğunluğu, potansiyel engelini aşmaya yetecek miktarda enerjiye sahip elektronların sayısına ve bu elektronların hızına bağlı olarak şu şekilde ifade edilir;

$$J_{sm} = \int_{E_F+q\phi_B}^{\infty} q v_x dn \tag{2.9}$$

Burada $(E_F + q\Phi_B)$ yarıiletkenden metale termiyonik emisyon (TE) için gerekli minimum enerji, v_x ise iletim yönündeki taşıyıcı hızıdır. Elektron yoğunluğu (dn) ise küçük bir enerji artışı için aşağıdaki gibi verilir.

$$dn = N(E)F(E)dE \tag{2.10}$$

Böylece bir metal/n-tipi yarıiletken kontakta J_{sm} akım yoğunluğu,

$$J_{sm} = \left[\left(\frac{4\pi m^* k^2}{h^3}\right] T^2 \exp\left[\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right)\right] exp\left[\frac{qV}{kT}\right] \tag{2.11}$$

biçiminde verilir. Bu ifadede m*, k ve h sırasıyla taşıyıcının etkin kütlesi, Boltzmann sabiti ve Planck sabitidir. Buradan,

$$J_{sm} = A^* T^2 exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \tag{2.12}$$

denklemi elde edilir. Bu denklemde, A^*; *TE* için etkin Richardson sabitidir. Metalden yarıiletkene geçişlerde engel yüksekliği sabit olup, dolayısı ile bu akım yoğunluğu uygulanan voltajdan etkilenmez.

Metalden yarı iletkene doğru olan akım yoğunluğu sıfır beslem ($V=0$) ve termal dengede, yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğuna eşittir. Böylece metalden yarıiletkene doğru olan J_{ms} akım yoğunluğu,

$$J_{ms} = -A^* T^2 exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \tag{2.13}$$

şeklinde verilir.

Toplam akım yoğunluğu ise, yarı iletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu ile, metalden yarı iletkene doğru olan akım yoğunluğunun toplamı olup aşağıdaki gibi verilir.

$$J_{TE} = A^{*}T^{2}exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] \quad (2.14)$$

Burada sızıntı akım yoğunluğu olarak da isimlendirilen doyma akım yoğunluğu aşağıdaki gibi verilir.

$$A^{*}T^{2}exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.15)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

3.1.1. PLiMMA Polimerinin Temel Özellikleri

Au/PliMMA/n-Si MPS diyotta arayüzey tabaka olarak, çalışma grubumuz tarafından daha önce sentezlenen poli (linoleik asit)-g-poli (metil metakrilat) (PLiMMA) graft kopolimeri kullanılmıştır [8], [25]. Bu çalışmada, önce saf linoleik asit güneş ışığı ve hava oksijeni altında polimerleştirilerek polimerik linoleik asit peroksitlere (PLina) dönüştürülmüş, sonra PLina metil metakrilat ile polimerleştirilerek, poli (linoleik asit)-g-poli (metil metakrilat) (PLiMMA) graft kopolimeri elde edilmiştir. Polimerizasyon aşamalarında herhangi bir çözücü ve katalizöre ihtiyaç duyulmadan, PLiMMA; polimerik linoleik asit (PLina) ile metil metakrilatın (PMMA) serbest radikal polimerizasyonu yeşil kimya ya (green chemistry) uygun olarak sentezlenmiştir.

3.1.2. Silisyum Kristalinin Temel Özellikleri

Doğada genel olarak, silikat ve silisyum dioksit (kum) bileşikleri formunda olan silisyum, oksijenden sonra en çok bulunan elementtir. Silisyum, dörtlü bağ yapısı ile kimyasal olarak karbona benzediği için önemli bir elementtir. Doğada silisyum, Silisyum-28 (%92,22), Silisyum-29 (%4,6), Silisyum-30 (%3,1) şeklinde üç kararlı izotop olarak bulunur. Silisyumun oda sıcaklığında kristal ve amorf olmak üzere iki allotropu vardır. Kristal formdaki silisyum, metalik-gri, parlak renkte iken, Amorf silisyum ise kahverengi toz halindedir.

Silisyum elementi ile ilgili ilk bilimsel çalışmalar 1811 yılında yapılmaya başlanmıştır. Joseph Gay-Lussac ve Louis Jacques Thenard, silisyum tetraklorürü potasyum metaliyle tepkimeye sokarak çok saf olmayan silisyum elde etmiştir. İlk defa saf silisyumun eldesi 1824 yılında gerçekleştirilmiştir. İsveçli bir kimyager olan Jöns Jacob Berzelius, potasyum fluorosilikatı ısıtarak nispeten daha saf silisyum tozu elde etmiştir. Kristal silisyum ise ilk kez 1854 yılında Henry Deville tarafından üretilmiştir [31].

Yarıiletken özelliğe sahip oluşu ve doğada bol miktarda bulunması çeşitli elektronik cihazlar, entegre devreler ve bilgisayarların silisyum teknolojisi üzerine inşa edilmesini sağlamıştır. Bu nedenle günümüzde önemli teknoloji merkezleri bu element ile özdeşleştirilmiş ve Amerika Birleşik Devletleri'nin Kaliforniya eyaletinde bir bölge "Silikon vadisi" adı ile anılmaktadır.

Kristalik bir silisyumun oda sıcaklığındaki (300 K) bazı fiziksel parametreleri Çizelge 3.1'de verilmiştir [31].

Çizelge 3.1. Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı temel özellikleri.

Özellikleri	Si
Atom Numarası	14
Atom ağırlığı	28,0855
Kristal yapısı	Elmas
Örgü Sabiti (Å)	5,4307
Örgü Yönelimi	(100)
Yoğunluk (g/cm^3)	2,328
Erime noktası (^0C)	1414
Kaynama noktası (^0C)	2355
Yasak enerji aralığı (300 K/0 K) (eV)	1,124/1,170
Dielektrik sabiti	11,7
Saf taşıyıcı yoğunluğu (n_i) (cm^{-3})	$1,45x10^{10}$
Mobilite elektron/hol ($cm^2/V.s$)	1350/450
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu (N_C) (cm^{-3})	$3,22x10^{19}$
Valans bandındaki durumların yoğunluğu (N_V) (cm^{-3})	$1,83x10^{19}$
Saf özdirenç (kΩ.cm)	235
Deşiklerin etkin kütlesi, m^*/m_0	m_{lh}*=0,16 m_{hh}*=0,49
Elektronların etkin kütlesi, m^*/m_0	m_l^*=0,98, m_t^*=0,19
Elektron yakınlığı-eV)	4,05
Kırılma alanı (V/cm)	$3x10^5$
Mineral sertliği	6,5
Molar Hacmi (ml/mol)	12,06
Termal iletkenliği (W/cm.K)	1,56
Yoğunluğu (g/cm^3) (25^0C)	2,33

3.2. Au/PLiMMA/n-Si YAPININ HAZIRLANMASI

3.2.1. Kristal Temizleme

Au/PLiMMA/n-Si diyotu elde etmek için çapı 2 inç, kalınlığı 500 μm ve yönelimi (100) olan fosfor katkılı n-tipi silisyum tek kristal kullanılmıştır. Bir MS veya MPS yapısındaki arayüzey kusurlarını minimize etmek ve ideale yakın bir diyot oluşturmak için yarıiletkenin yüzey temizliği başta olmak üzere kullanılacak tüm malzemelerin temizliği uygun şekilde yapılmalıdır. Kristal silisyum için Werner Kern; 1965 yılında Amerika Radyo Kurumunda (Radio Corporation of America-RCA), yüksek sıcaklık işleme aşamalarından (oksidasyon, difüzyon, CVD, v.b.) önce yapılması gereken standart bir kristal temizleme prosedürü geliştirmiştir [32],[33]. RCA prosedürü olarak bilinen bu yöntem; isteğe bağlı bir yüzey oksiti temizleme prosedürü ile, iki temel temizlik prosedüründen (SC-1 ve SC-2) oluşmaktadır. Au/PLİMMA/n-Si diyotu oluşturulurken, bu prosedürler temel alınarak kristal temizleme işlemi aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir.

1. Kristal temizleme işleminde kullanılacak olan maske, cımbız vb. araç ve kaplar fırında yaklaşık 80 ^{o}C de ısıtıldı. Isıtılma işleminden sonra bu malzemeler, hidrojen peroksit (H_2O_2), aseton (C_3H_6O) ve ardından da de-iyonize (DI-H_2O) su ile durulandı. Temizleme işlemleri 16-18 MΩ dirençli DI-H_2O su kullanılarak ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi.
2. Silisyum kristaller de-iyonize su içinde ve ultrasonik banyoda 10 dakika süreyle yıkandı.
3. RCA standart temizleme 1 (SC-1) (Organik+parçacık temizliği) prosedürü uygulandı.

   5 hacim DI-H_2O,

   1 hacim NH_4OH (%29-Kütlece),

   1 hacim H_2O_2 (%30)

Karışımı içinde ve ultrasonik banyoda, Si kristaller, 75-80 ^{o}C' de 10 dakika boyunca temizlendi.

SC-1 prosedürü silisyum yüzeyinde ince bir oksit tabakası (yaklaşık 10-20 Å) oluşturarak belirli derecede bir metalik kirlenmeye sebep olabilir. SC-1 prosedürü silisyum yüzeyindeki organik ve ağır metallerin oksitlendirilmesini sağlarken, SC-2 prosedürü, oksit tabakası ile birlikte kalan inorganik kirliliklerin temizlenmesini sağlar.

4. Yüzey oksit temizliği yapıldı.

SC-1 aşamasında silisyum yüzeyinde oluşan ince oksit tabakasının kaldırılması için yaklaşık 15 saniye boyunca 25 ^{o}C de 1/50 sulu HF çözeltisine daldırma işlemi uygulandı.

5. SC-2 (İyonik temizlik) prosedürü uygulandı.

   6 hacim DI-H_2O, 1 hacim HCl (%27-Kütlece), 1 hacim H_2O_2 (%30)

karışımı içinde ve ultrasonik banyoda, bazıları SC-1 temizleme adımında ortaya çıkan metalik (iyonik) kalıntıları gidermek için, Si kristaller 75-80 ^{o}C' de 10 dakika boyunca temizlendi.

6. Durulama ve kurutma işlemi yapıldı.

Si kristaller, DI-H_2O da ultrasonik olarak 10 dakika temizlenip Azot (N_2) ile kurutularak vakum ortamına alındı.

3.2.2. Omik Kontağın Oluşturulması

Au/PliMMA/n-Si MPS yapının omik kontağı oluşturulurken aşağıda resmi verilen bir yüksek vakumlu metal buharlaştırma cihazı kullanılmıştır. Cihazın parçaları ile kullanılacak maske, cımbız v.b. tüm malzemelerin temizliği ultrasonik banyoda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan metal buharlaştırma cihazı.

Beş dakikalık periyotlarla yapılan her bir temizleme işleminde, sırasıyla karbontetraklorür, trikloretilen ve aseton kullanılmış, daha sonra kimyasal olarak temizlenmiş bu malzemeler DI-H_2O ile yıkanmıştır. Tungsten potaya % 99,99'luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş Gümüş (Ag) metal parçacıkları konulmuş ve yarıiletken Si parçalar maske üzerine mat yüzeyi alt tarafa gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra cihaz vakumlama işlemi için hazır hale getirilerek vakum değeri yaklaşık 10^{-6} Torr'a ulaşana kadar shutter (perde) kapalı vaziyette beklenilmiştir. İstenilen vakum seviyesi oluştuğunda flaman üzerinden akım geçirilerek metal buharlaşma işlemi gerçekleşmeye başladıktan sonra shutter açılarak Si yüzeyine yaklaşık 250 nm kalınlığında Ag metal tabakasının buharlaşması sağlanmıştır. Yarıiletkenin mat yüzeyine buharlaştırılan Ag tabakası vakum ortamında 350 ^oC'de 30 dakika boyunca tavlanarak Si içerisine çöktürülmüş ve omik kontak oluşması sağlanmıştır [9].

3.2.3. PLiMMA Tabakasının Oluşturulması

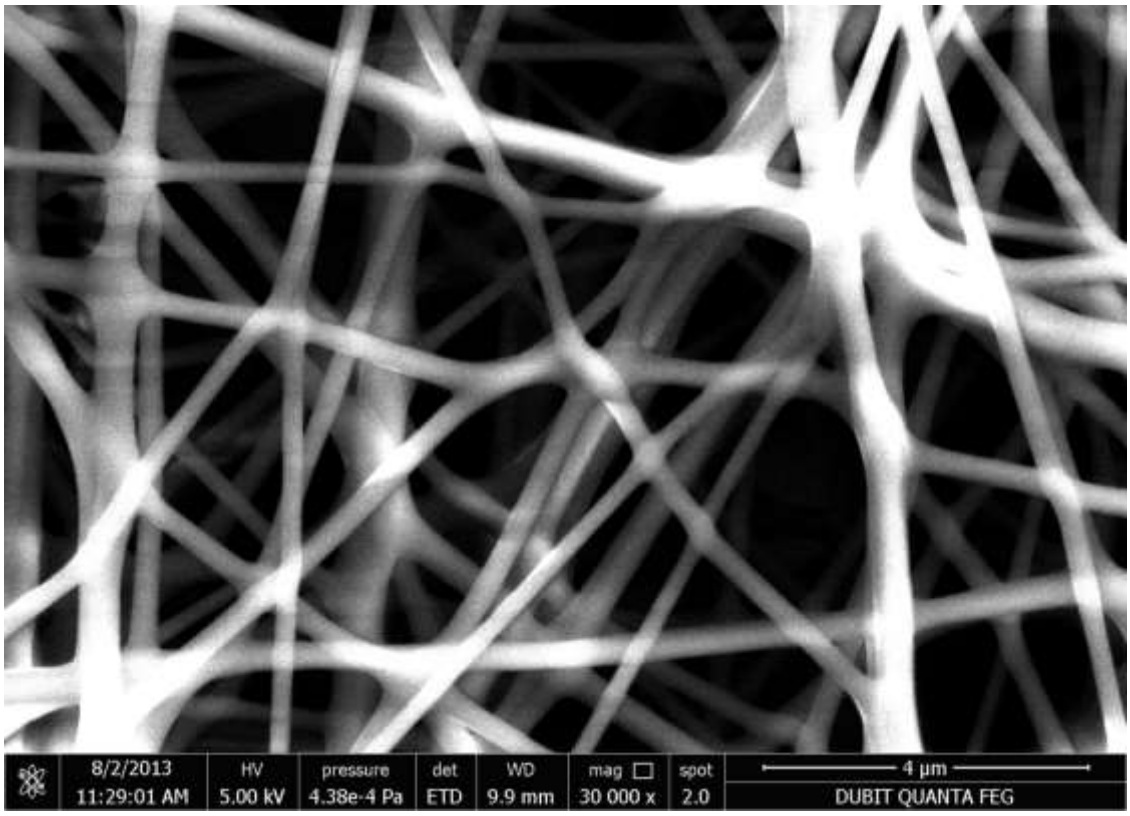
Bu çalışmada, arayüzeye bir nanofiber polimer tabaka oluşturmak için elektrospinning yöntemi kullanıldı. Elektrospinning yönteminde kullanılan cihaz Şekil 3.3'de verilmiştir. Bu sistem genel olarak, yüksek gerilim güç kaynağı, şırınga pompası ve iletken bir toplayıcı levhadan oluşur. Yüksek gerilim güç kaynağı, toplayıcı levha ve şırınga arasında yüksek elektrik alan oluşturmak için kullanılırken, şırınga pompası ise polimerik çözeltinin sabit ve ayarlanabilir bir besleme oranıyla püskürtülmesini sağlamak için kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Elektrospinning cihazı.

Elektrospinning işleminden önce n-tipi Si, üzerindeki doğal silisyum oksit tabakasını temizlemek için %20'lik hidroflorik asit (HF) çözeltisi kullanıldı. Dimetilformamid (DMF) içerisinde çözülen PLiMMA çözeltisi, şırıngaya alınarak pompa yardımıyla akış hızı 0,8 ml/s olacak şekilde 0,8 mm iç çaplı bir püskürtücü (nozzle) ile püskürtülmüştür. Püskürtücü ile toplayıcı ekran arası uzaklık 15 cm olarak ayarlandı. Yüksek voltaj güç kaynağı ise 28 kV'a ayarlanarak PLiMMA polimer nano fiberlerinin Si yüzeyini kaplaması sağlanmıştır [9].

Si yüzeyine oluşturulan, PLiMMA fiberlerin varlığı ve morfolojisi FEG-SEM (Field Emission Gun-Scanning Electron Microscope) kullanılarak incelenmiş ve sonuçlar Şekil 3.3'de verilmiştir. Şekil 3.3'de görüldüğü üzere, PLiMMA nano fiberler hemen hemen homojen ve yaklaşık 200 nm genişliğe sahiptir.



Şekil 3.3. PLiMMA nano-fiberlerin FEG-SEM resimleri.

3.2.4. Doğrultucu Kontağın Oluşturulması

Önce omik kontak oluşturuldu, daha sonra Si tabakanın ön yüzüne elektrospinning yöntemi ile PLiMMA nano-fiber tabakası oluşturuldu. Son olarak, PLiMMA nano-fiber ile kaplanmış yüzey üzerine doğrultucu (schottky) kontakları oluşturmak için, çok sayıda 2 mm çaplı delikler bulunan Şekil 3.4'de benzeri görülen bir maske kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske.

Cihazın parçaları ile kullanılacak maske, cımbız vb. tüm malzemeler ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Kimyasal olarak temizlenmiş altın (Au) parçaları flaman üzerine konularak, yaklaşık 10^{-6} Torr vakumda yüzey üzerine, 250 nm kalınlığında buharlaşması sağlandı. Au doğrultucu kontaklarında oluşturulmasıyla Au/PLiMMA/n-Si MPS yapısı elde edilmiş oldu. Şekil 3.5'de MPS yapının şematik bir gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.5. Au/PLiMMA/n-Si (MPS) yapının şematik gösterimi.

3.3. DENEYSEL ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ

Au/PLiMMA/n-Si MPS yapısının imalat ve elektriksel karakterizasyonları, Düzce Üniversitesi Fizik Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş olup, PLiMMA polimerik tabakanın morfolojik özellikleri Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (DÜBİT) incelenmiştir.

3.3.1. İnovenso Nanospinner Ne100

Düzce Üniversitesi Fizik Laboratuvarında bulunan bu cihaz ile PLiMMA polimeri dimetil formamid (DMF) içinde çözülerek silisyum yüzeyine nanofiber polimerik tabaka kaplanmıştır.

3.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

PLiMMA polimerik tabakanın morfolojik özellikleri DÜBİT'te bulunan FEI marka Quanta FEG 250 model FEG-SEM (Field Emission Gun-Scanning Electron Microscope) cihazı ile görüntülenerek incelenmiştir.

3.3.3. Keithley 2400 Akım-Gerilim Kaynağı

Düzce Üniversitesi Fizik Laboratuvarında bulunan Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı ile laboratuvar ortamında imal edilen Au/PLiMMA/n-Si diyotun akım-gerilim (I-V) ölçümleri, oda sıcaklığında yapılmıştır.

3.3.4. Halojen lamba (Görünür ışık kaynağı)

Düzce Üniversitesi Fizik Laboratuvarında bulunan halojen lamba (Görünür ışık kaynağı) ve ayarlanabilir bir güç kaynağı kullanılarak, hazırlanan Au/PLiMMA/n-Si diyotun aydınlatma şiddetine bağlı akım-gerilim (I-V) ölçümleri gerçekleştirildi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. GÖRÜNÜR IŞIK ALTINDAKİ AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİ

Hazırlanan Au/PLiMMA/n-Si diyotun doğru ve ters beslem akım-voltaj (I-V) ölçümleri karanlıkta ve bir halojen lamba kullanılarak farklı aydınlatma şiddetleri (50-250 mW/cm^2) için -5 ve +5 volt aralığında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bu diyota ait karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki akım-voltaj (I-V) grafikleri Şekil 4.1'de verilmiştir [9].

Şekilde görüldüğü gibi Au/PLiMMA/n-Si diyot, karanlıkta yaklaşık 10^4 gibi yeterli bir doğrultma oranına sahiptir. Bu tür diyotlarda MS arasında oluşturulan ara yüzey polimer tabakalar Schottky diyot üzerine düşen gerilimi değiştirecektir. Bu durum Schottky diyotlar için akım voltaj ilişkisini veren termiyonik emisyon denkleminde, ideal durumdan farklı olarak bir idealite faktörü ilavesiyle aşağıdaki gibi verilir [2].

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right)\left[exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] = I_0\left[exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] \quad (4.1)$$

Burada;

A : Diyot alanı

A^* : Etkin Richardson sabiti

T : Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık

Φ_{Bo} : Sıfır beslem engel yüksekliği

q : Elementer yük

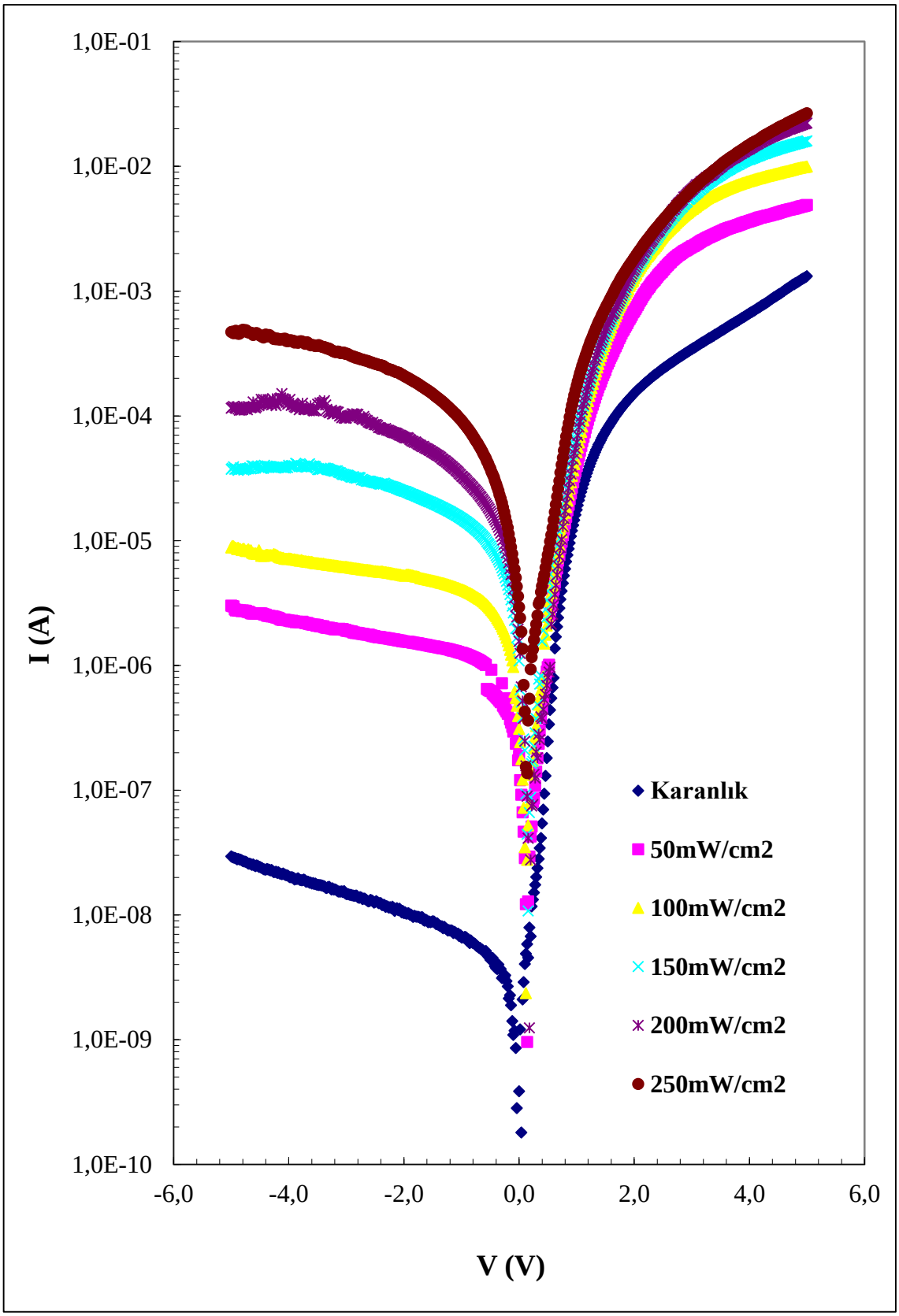
n : İdealite faktörü

I_o : Sızıntı akımı (Ters beslem doyum akımı)

k : Boltzmann sabiti'dir.

Böylece sızıntı akımı şu şekilde verilir.

$$I_o = AA^* \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki (I-V) grafiği.

İdeal durumda bir Schottky diyot için n=1 iken, metal ile yarıiletken arasında oluşan doğal oksit tabakası veya oluşturulan polimer tabaka nedeniyle diyot ideallikten sapar. Arayüzey polimer tabakanın varlığı yarıiletken yüzey yük yoğunluğunun ve yasak enerji aralığındaki arayüzey durumlarının uygulanan elektrik alanla değişimi gibi çeşitli sebeplerle, idealite faktörü 1'den büyük olmaktadır [34]-[36].

Ara yüzey polimer tabakası, idealite faktörünü arttırmanın yanında ilave bir seri dirence sebep olmaktadır. Diyot üzerine düşen gerilim, seri direncin varlığından dolayı IR_s kadar düşer. Düşük ve orta gerilim bölgelerinde IR_s terimi diyota uygulanan gerilim yanında ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Dolayısı ile bu iki faktörün birlikte hesaba katıldığı durumlarda, Schottky diyotlar için akım-voltaj ilişkisi aşağıdaki gibi verilir.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_S)}{nkT}\right) - 1\right] \tag{4.3}$$

Düşük ve orta beslem bölgesinde IR_s düzeltmesi düşük akım çarpanı dolayısıyla ihmal dilebilir. Ayrıca yine bu bölgede $V>>kT/q$ olduğundan, temel parametreleri hesaplamak için matematiksel olarak oldukça sadeleşen akım-voltaj denklemi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \tag{4.4}$$

Sadeleşen bu denklem ve *I-V* grafikleri kullanılarak diyotun temel elektriksel parametreleri elde edilebilir. İdealite faktörü (*n)* ve sızıntı akımı (I_o) değerleri; Ln (I)-V grafiğinin eğimi ve grafiğin düşey ekseni kestiği noktalar kullanılarak Denklem 4.4 ve 4.5 yardımıyla bulunur.

$$n = \frac{q}{kT}\left(\frac{dV}{dlnI}\right) \tag{4.5}$$

Ayrıca elde edilen I_o değerleri Denklem 4.2'de yerine yazılarak Φ_{Bo} değerleri elde edilebilir.

Au/PLiMMA/n-Si diyot için, termiyonik emisyon teorisi ve Cheung&Cheung yönteminden [36], elde edilen temel elektriksel parametreler, karanlık ve her bir aydınlatma şiddeti için Çizelge 4.1'de verilmiştir.

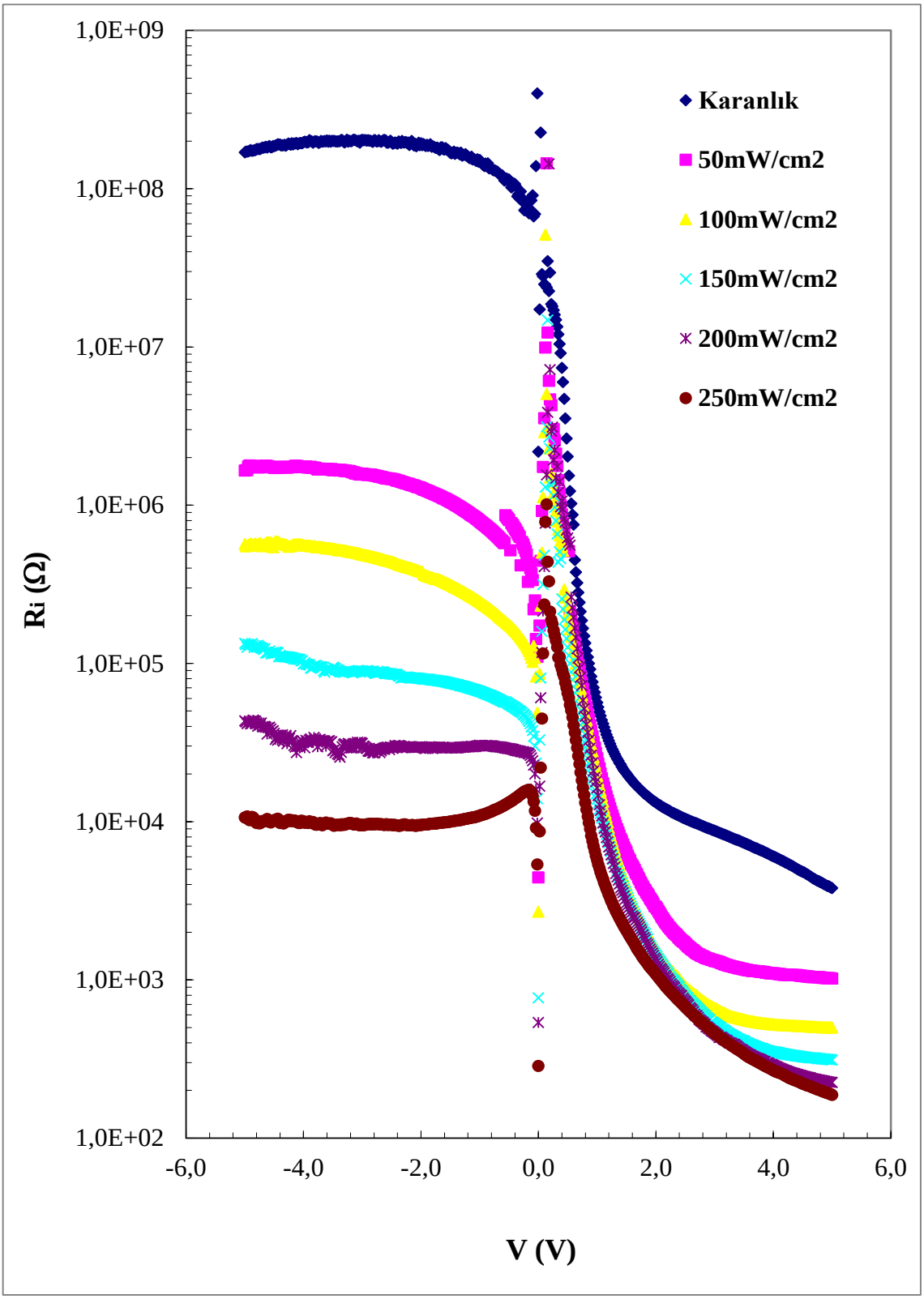
Çizelge 4.1. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki akım-gerilim eğrilerinden elde edilen temel elektriksel parametreler.

	I_o (A)	Φ_{Bo} (eV)	n	n (dV/dLn(I))	R_S (Ω) (dV/dLn(I))	Φ_B(eV) (H(I))	R_S (Ω) (H(I))
Karanlık	$2,4x10^{-10}$	0,87	2,8	4,6	8096	0,68	8224
50 mW/cm^2	$1,0x10^{-07}$	0,71	6,3	6,6	1539	0,65	1265
100 mW/cm^2	$1,2x10^{-07}$	0,71	6,3	6,7	676	0,64	619
150 mW/cm^2	$2,1x10^{-07}$	0,69	6,3	7,1	633	0,60	586
200 mW/cm^2	$2,2x10^{-07}$	0,69	6,9	7,3	463	0,62	465
250 mW/cm^2	$5,0\ x10^{-07}$	0,67	7,0	8,9	421	0,50	462

Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere artan aydınlatma şiddeti ile I_o ve n değerleri artarken, Φ_{Bo} değerleri azalmaktadır. Aydınlatma dolayısı ile oluşan ilave yüklü taşıyıcılar ters beslem akımında bir artışa sebep olmaktadır. Bu durum I_o ve n değerlerinde artış olarak gözlenmektedir. Artan aydınlatma şiddeti ile artan I_o ve n değerleri termiyonik emisyon teorisinden sapmanın bir göstergesidir. *I-V* grafiklerinde bükülmeye sebep olan, termiyonik emisyon teorisinden sapmanın sebepleri arasında, seri direnç (R_s), arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), idealite faktörü ($n(V)$) ve engel yüksekliğinin ($\Phi_B\ (V)$) voltaj bağımlılığı sayılabilir.

Seri direnç ve arayüzey durum yoğunluğu, Schottky diyotlar için önemli parametrelerdendir. Çünkü uygulanan voltaj: arayüzey polimerik tabaka, tükenim tabakası ve seri direnç tarafından paylaşılır. Bu paylaşım oranı, seri dirence, polimerik arayüzey tabakasının pürüzlülüğüne ve bu tabakanın elektriksel özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle diyotların performans ve güvenirliliği seri direnç ve arayüzey durum yoğunluğu etkileri dolayısıyla ara yüzey tabakasının üretim kalitesine oldukça bağlıdır. Direnç, her bir voltaj bölgesinde değişmekte olup, *I-V* karakteristikleri üzerinde özellikle ileri beslem bölgesinde artan voltaj düşmesi dolayısıyla oldukça etkindir. Seri direnci hesaplamak için Ohm yasası yaklaşımı [10], Cheung&Cheung fonksiyonları [36] ve Norde denklemleri [37] gibi yöntemlerde vardır. Bunlardan Ohm yasası, basitçe $R_i=dV/dI$ şeklinde verilir. Bu denklem yardımı ile tüm bölgelerde direnç değeri hesaplanabilir. İleri doğru beslem bölgesinde hesaplanan değerler seri direnç (R_s) olarak isimlendirilirken, ileri ters beslem bölgesinde ise şönt direnci (R_{sh}) olarak isimlendirilir.

Bu yaklaşımla elde edilen direnç değerlerinin voltaja bağlı değişimi karanlık ve her bir aydınlatma şiddeti için Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki (R_i-V) grafiği.

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi R_i değerleri aydınlatma şiddetine oldukça bağlıdır ve hem R_s hem de R_{sh} değerleri artan aydınlatma şiddeti ile azalmaktadır. Artan ışık şiddeti ile oluşan ilave yüklü taşıyıcılar her iki yönde akımın artmasına ve direncin azalmasına neden olmaktadır.

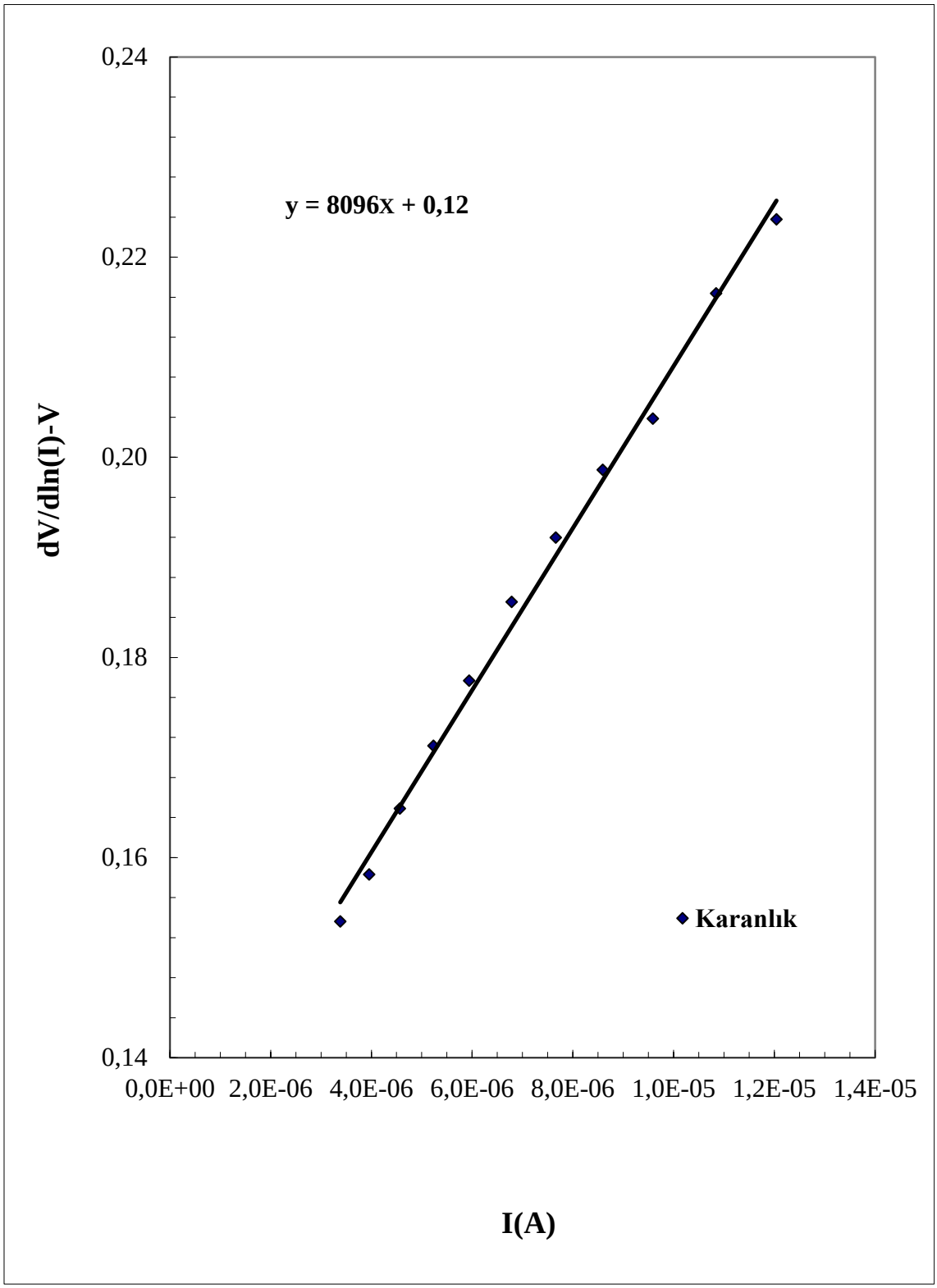
Diyotun temel elektriksel parametreleri, logaritmik *I-V* grafiğinin düşük beslem voltajı bölgesine karşılık gelen ($kT/q << V << IR_s$) karakteristik lineer bölgede termiyonik emisyon teorisi kullanılmıştır. Daha yüksek ileri beslem bölgesinde ise seri direncin büyük olması durumunda, diyotun üzerine düşmesi gereken gerilimin çoğunluğu seri direnç üzerine düşeceğinden lineerlik bozulur ve termiyonik emisyon modelinin tek başına kullanılması yetersiz kalır. Bu nedenle Cheung&Cheung fonksiyonları, özellikle *Ln(I)-V* eğrilerinin dar bir bölgede lineer veya lineer bölge seçiminin zor olduğu durumlar için temel diyot parametrelerinin hesaplanmasında alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir.

Au/PLİMMA/n-Si Schottky diyotun bazı elektriksel parametreleri karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri için aşağıda verilen Cheung&Cheung fonksiyonları yardımı ile hesaplandı.

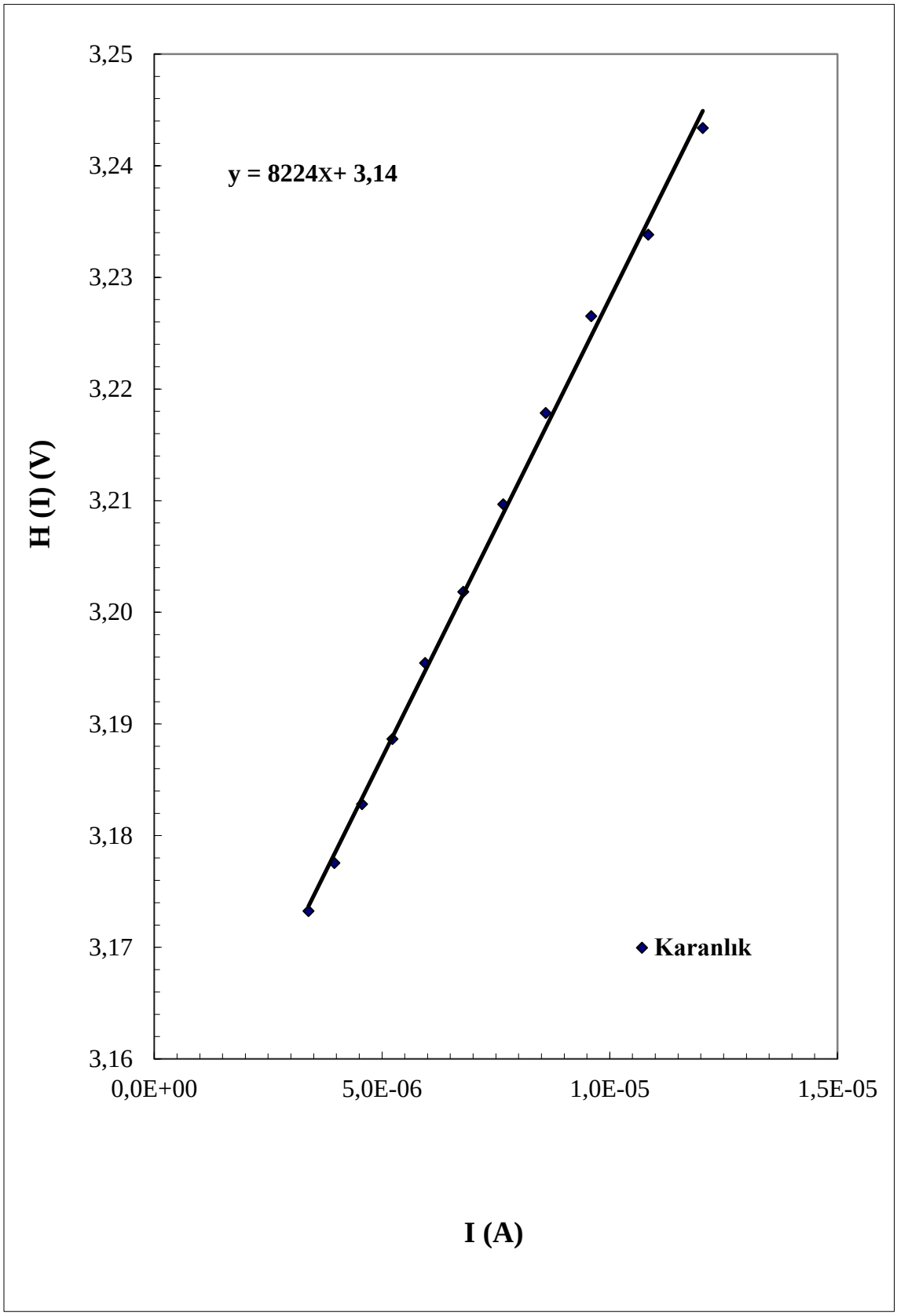
$$\frac{dV}{dLn(I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \tag{4.6}$$

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right)\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = IR_s + n\phi_B \tag{4.7}$$

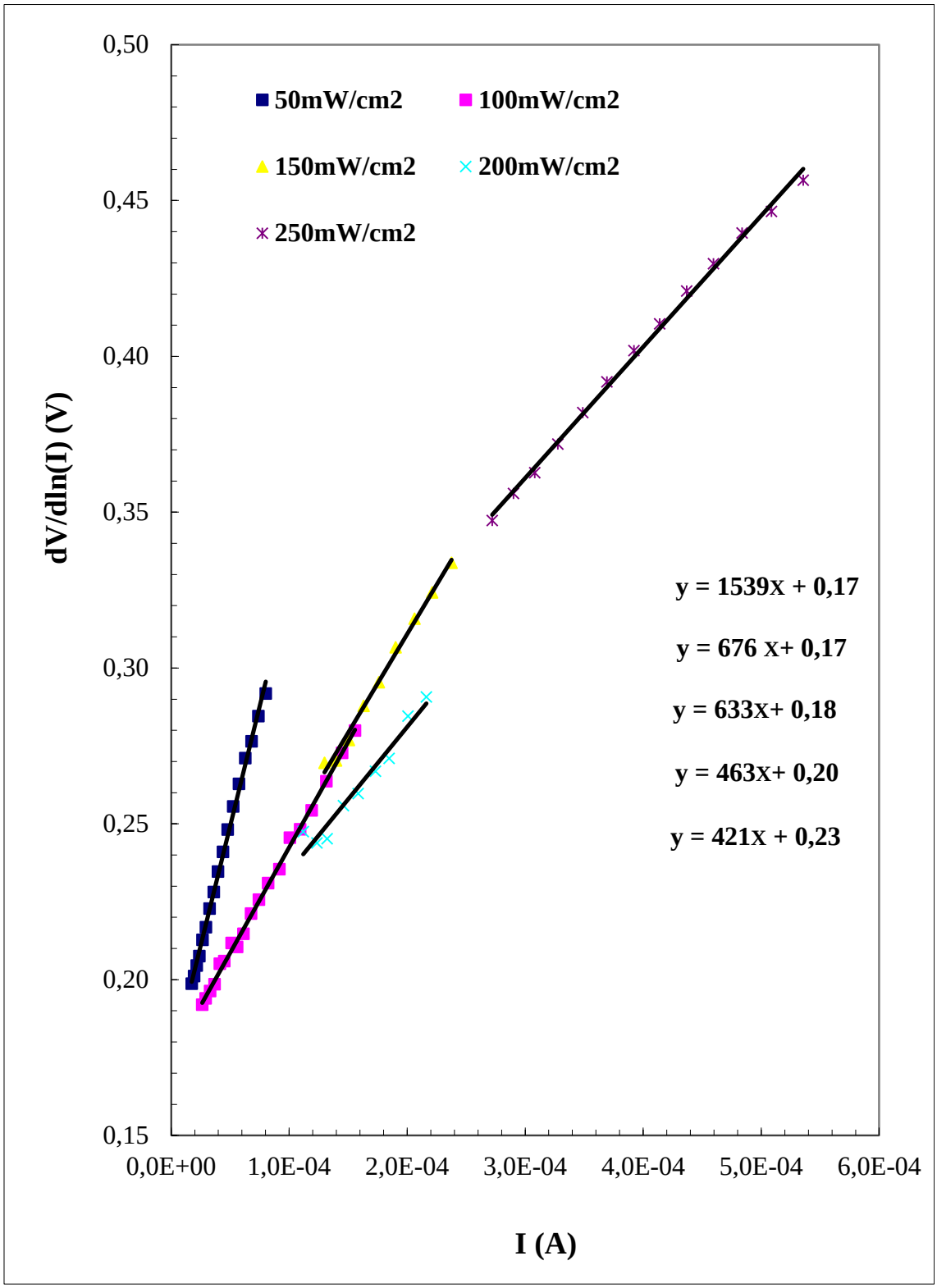
Au/PLİMMA/n-Si Schottky diyotun Cheung&Cheung fonksiyonları yardımı ile hesaplanan *dV/dLn(I)-I ve H(I)-I* eğrileri karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri için sırası ile Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir. *dV/dLn(I)-I* grafiğinin eğiminden diyotun seri direnci (R_s) ve grafiğin düşey ekseni kestiği noktadan ise idealite faktörü (n) bulundu. *H(I)-I* grafiğinde ise, yine grafiğin eğiminden seri direnç (R_s), düşey ekseni kestiği nokta yardımı ile de engel yüksekliği (Φ_{Bo}) hesaplandı. Au/PLİMMA/n-Si Schottky diyot için Cheung&Cheung fonksiyonları ile hesaplanan idealite faktörü (n), seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_{Bo}) değerleri karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri için Çizelge 4.1'de verilmiştir.



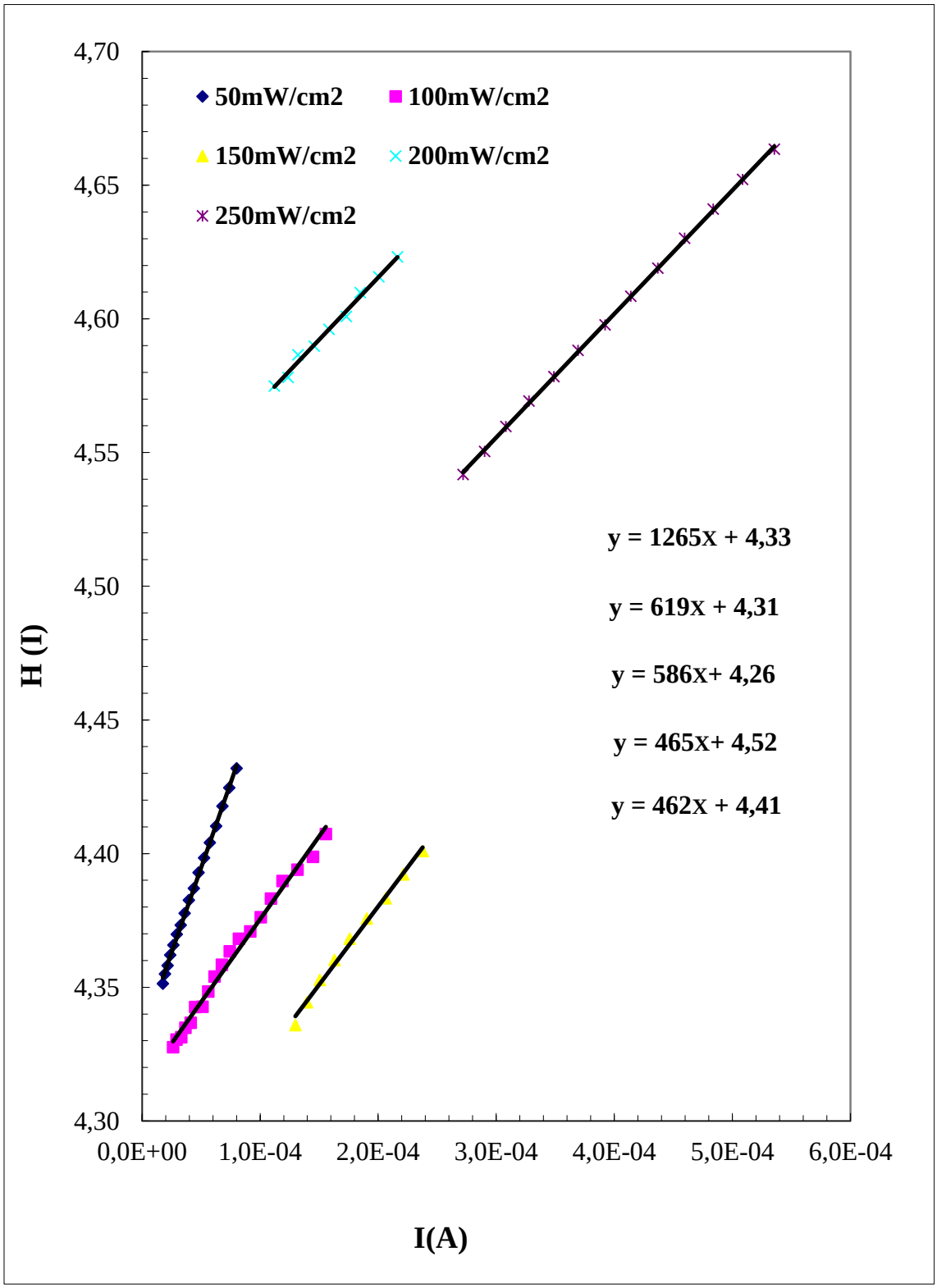
Şekil 4.3. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık için *dV/dln(I)-I* grafiği.



Şekil 4.4. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık için *H(I)-I* grafiği.



Şekil 4.5. Au/PLiMMA/n-Si diyotun farklı aydınlatma şiddetleri için *dV/dln(I)-I* grafiği.



Şekil 4.6. Au/PLiMMA/n-Si diyotun farklı aydınlatma şiddetleri için *H(I)-I* grafiği.

Çizelge 4.1'den Cheung&Cheung fonksiyonları yardımıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Her iki durumda elde edilen seri direnç (R_s) değerleri yöntemin doğruluğunu kontrol amaçlı olarak da kullanılabilir. Cheung&Cheung fonksiyonları yardımıyla hesaplanan *n* değerleri artan aydınlatma şiddeti ile artarken, Φ_B değerleri ise azalmaktadır. Tüm aydınlatma durumları için, Cheung&Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanan *n* değerleri termiyonik emisyon teorisinden elde edilen değerlerden daha büyükken Φ_B değerleri ise daha küçüktür. Termiyonik emisyon teorisine göre daha ileri beslem bölgesinde hesaplanan bu parametreler; seri dirençten, arayüzey durum yoğunluğundan ve arayüzey tabaka boyunca gerilim düşmesinden daha kuvvetli etkilenirler.

I-V eğrilerinin bükülerek ideal termiyonik emisyon teorisinden sapmasının diğer nedenleri olarak; arayüzey polimer tabakanın varlığından dolayı arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), idealite faktörünün voltaj bağımlılığı ($n(V)$) ve engel yüksekliğin voltaj bağımlılığı ($\Phi_B(V)$ veya Φ_e) gösterilebilir. Ayrıca bariyer yüksekliğinin şekli ve homojenitesi de diyotun temel elektriksel parametrelerini etkilemektedir.

İdealite faktörü ve engel yüksekliği uygulanan voltaj ile değiştiği için etkin engel yüksekliği aşağıdaki gibi verilebilir [9], [38]-[39].

$$\phi_e = \phi_{Bo} + \beta(V - IR_s) = \phi_{Bo} + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right).V \tag{4.8}$$

Bu denklemde β, engel yüksekliğinin uygulanan voltaj ile değişim katsayısıdır. Arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), doğru beslem *I-V* ölçümlerinden durum enerjilerinin (E_c-E_{ss}) bir fonksiyonu olarak Φ_e nin yukarıda verilen ifadesi de dikkate alınarak elde edilebilir. İdealite faktörü, arayüzey durumları ve ilave bir arayüzey tabakasının varlığından dolayı 1'den büyük değerler almaktadır. İdeal durumdan farklı olarak uygulanan voltaja bağlı hale gelen idealite faktörü *n* (*V*), aşağıdaki gibi verilir [39]-[40].

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i}\left[\frac{\varepsilon_s}{W_D} + qN_{ss}\right] \tag{4.9}$$

Burada ε_i, ε_s, δ ve W_D sırasıyla arayüzey polimer tabakanın elektriksel geçirgenliği, yarıiletkenin elektriksel geçirgenliği, polimer tabakanın kalınlığı ve tükenim tabakasının genişliğidir. Böylece N_{ss} değerleri, Card&Rhoderick [40] tarafından verilen aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanabilir.

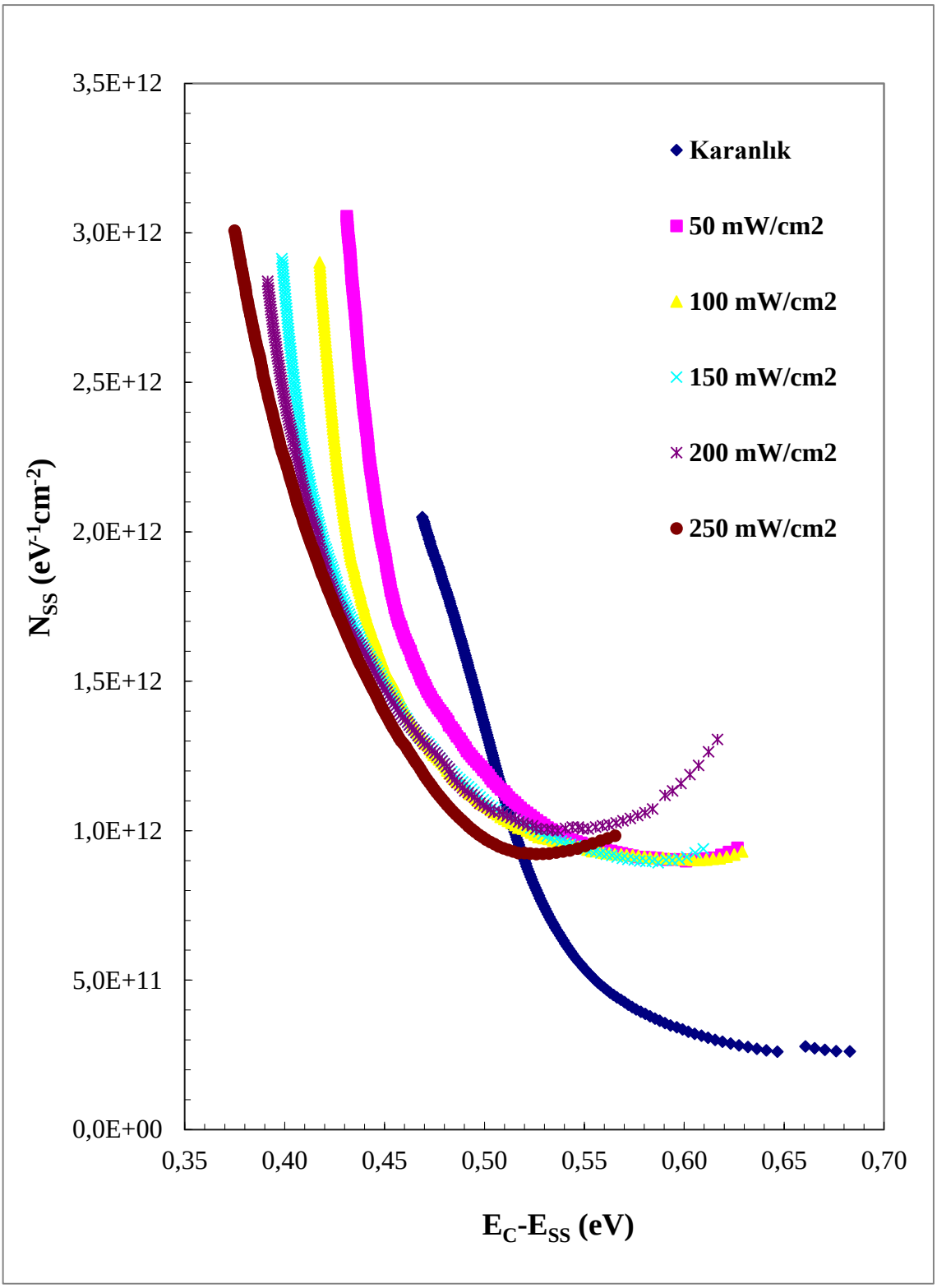
$$N_{ss}=\frac{1}{q}\left[\frac{\varepsilon_i}{\delta}(n-1)-\frac{\varepsilon_s}{W_D}\right] \tag{4.10}$$

n-tipi yarıiletkenlerde arayüzey durumlarının enerjileri (E_{ss}) iletim bant kenarına (E_c) göre ölçülür ve aşağıdaki gibi verilir.

$$E_c - E_{ss} = q(\phi_e - V) \tag{4.11}$$

Au/PLİMMA/n-Si Schottky diyotun arayüzey durum yoğunluğunun enerji dağılım profili Şekil 4.7'de karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri için verilmiştir.

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere hem karanlıkta hem de farklı aydınlatma şiddetleri için verilen N_{ss} değerleri, iletim bant kenarından yasak enerji bant aralığının ortasına doğru hızlıca azalmaktadır. Bu davranış, arayüzey durumlarının çoğunlukla verici (donör) tipi olduğunu ve iletim bandı kenarına yakın olduğunu göstermektedir. Yasak enerji aralığının ortalarına doğru ise alıcı (acceptor) tipi arayüzey durumlarının etkisi hızlıca azalmaktadır. Artan aydınlatma şiddeti ile N_{ss}-(E_c-E_{ss}) eğrileri bant ortasından iletim bant kenarına doğru kaymaktadır. Aydınlatma dolayısıyla yasak enerji aralığında elektron-deşik çiftleri oluşur ve oluşan yük taşıyıcıları ve iyonize kusurlar bir yandan akıma katkıda bulunurken bir yandan da arayüzey durum yoğunluğunda artışa sebep olmaktadır.



Şekil 4.7. Au/PLiMMA/n-Si diyotun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri için N_{ss} - (E_c-E_{ss}) grafiği.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada poli (linoleik asit)-g-poli (metil metakrilat) (PLiMMA) graft kopolimerin silisyum tabanlı schottky diyotlarda kullanımının araştırılması ve elektriksel karakterizasyonunun literatüre kazandırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla PLiMMA arayüzeyli Au/PLiMMA/n-Si diyotlar imal edilmiştir. Yarıiletken olarak fosfor katkılı n-Si tek kristal kullanılırken, arayüzey polimer tabaka elektrospining yöntemi ile nanofiberler olarak silisyum yüzeyine kaplanmıştır. Omik ve Schottky kontaklar metal buharlaştırma yöntemi ile oluşturulmuştur. Si tek kristal üzerinde oluşturulan benzer özellikli diyotlardan birisi seçilerek karanlık ve bir halojen ışık kaynağı altında farklı aydınlatma şiddetleri için (50-250 mW/cm^2) akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri yapılmıştır. Bu veriler kullanılarak diyota ait I_o, Φ_b, n, R_s, R_{sh} ve N_{ss} gibi temel elektriksel parametreler hesaplanmıştır.

Au/PLiMMA/n-Si diyot karanlıkta 4.5x10^4 gibi yeterli bir doğrultma oranına sahiptir. Termiyonik emisyon teorisi kullanılarak, karanlıkta I_o, Φ_{Bo} ve n için sırasıyla 0,24 nA, 0,87 eV ve 2,8 olarak elde edilmiştir. Arayüzey polimer tabakanın varlığı yarıiletken yüzey yük yoğunluğunun ve yasak enerji aralığındaki ara yüzey durumlarının uygulanan elektrik alanla değişimi gibi çeşitli sebeplerle idealite faktörü 1'den büyük olmaktadır. Arayüzey polimer tabakası, idealite faktörünü arttırma yanında ilave bir seri dirence sebep olmaktadır. Diyot üzerine düşen gerilim seri direncin varlığından dolayı IR_s kadar düşer. Au/PLiMMA/n-Si diyot için, omik yaklaşım kullanılarak seri ve şönt direnç elde edilmiş ayrıca alternatif olarak Cheung&Cheung yöntemi kullanılarak engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç için hesaplamalar yapılmıştır.

Termiyonik emisyon teorisinden hesaplanan I_o ve n değerleri artan aydınlatma şiddeti ile artarken, Φ_{Bo} değerleri azalmaktadır. Aydınlatma dolayısı ile oluşan ilave yüklü taşıyıcılar ters beslem akımında bir artışa sebep olmaktadır. Bu durum, I_o ve n değerlerinde artış olarak gözlenmektedir.

Cheung&Cheung yöntemi kullanılarak her bir aydınlatma şiddeti için elde edilen engel yüksekliği, termiyonik emisyon teorisinden elde edilenlere göre daha düşük değerlere

sahipken, idealite faktörü daha yüksek değerlere sahiptir. Termiyonik emisyon teorisine göre daha ileri beslem bölgesinde hesaplanan engel yüksekliği, uygulanan voltaj dolayısı ile düşmekte iken, bu bölgedeki arayüzey durum yoğunluğu ve seri direnç etkisi ile idealite faktörü artmaktadır. Yine bu durum Cheung&Cheung yönteminden hesaplanan seri direncin omik yaklaşımdan hesaplanan değerlere göre daha yüksek çıkmasına sebep olmuştur.

Hem karanlık hem de farklı aydınlatma şiddetleri için N_{ss} değerleri, arayüzey durumlarının verici (donor) tipte olmasına uygun olarak iletim bandının alt kenarından yasak enerji aralığının ortasına doğru hızlıca azalmaktadır. Artan aydınlatma şiddeti ile N_{ss}-(E_c-E_{ss}) eğrileri bant ortasından iletim bant kenarına doğru kaymaktadır. Aydınlatma dolayısıyla yasak enerji aralığında elektron-deşik çiftleri oluşur ve oluşan yük taşıyıcıları ve iyonize kusurlar bir yandan akıma katkıda bulunurken bir yandan da arayüzey durum yoğunluğunda artışa sebep olmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar ve hesaplamalar; Au/PLiMMA/n-Si diyotların temel elektriksel parametrelerinin, halojen ışık kaynağı altındaki aydınlatma şiddetine, arayüzey polimer tabaka dolayısı ile değişen seri direnç ve arayüzey durum yoğunluğu profiline oldukça bağlı olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında poli (linoleik asit)-g-poli (metil metakrilat) (PLiMMA) graft kopolimerin Schottky diyotlarda arayüzey tabaka olarak kullanıma uygun olduğu, bu tür polimerlerin uygun gruplarla dallandırma/aşılama (graft) yaparak ve/veya katkılanarak arayüzey özelliklerinin daha da geliştirilebileceği düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

[1] D. K. *Cheng, Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri,* 2.baskı, Ankara, Türkiye: Palme Yayıncılık, 2012, ss.1-11.

[2] S. M. Sze, *Semiconductor Devices Physics and Technology,* 2nd edition, New Jersey, USA: John Wiley&Sons, 2002, pp. 85-390.

[3] J. Bardeen and W. H. Brattain, "The transistor, asemiconductor triode," *Physical review journals*, c. 71, ss. 230-236, 1948.

[4] M. Gökçen, "Au/SiO_2/n-GaAs (MOY) yapıların elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008.

[5] M. Gökçen, "MOS yapılarda kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) karakteristiklerinin frekans ve radyasyona bağlı incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2003.

[6] M. Gökçen and A. Allı, "Investigation of electrical and photovoltaic properties of Au/poly (propylene glycol)-b-polystyrene/n-Si diode at various illumination intensities," *Philosophical Magazine,* c. 94, s. 9, ss. 925-932, 2014.

[7] M. Gökçen, T. Tunç, Ş. Altındal and İ. Uslu, "Electrical and photocurrent characteristics of Au/PVA(Co-doped)/n-Si photocondustive diodes," *Materials Science and Engineering B*, c. 177, ss. 416-420, 2012.

[8] H. Çulcu, A. Allı, S. Allı and M. Gökçen, "Synthesis and characterization of poly (linoleic acid)-g-poly (methyl methacrylate) graft copolymer with applying in Au/PLiMMA/n-Si diode," *Materials Science in Semiconductor Processing*, c. 31, ss. 639-643, 2015

[9] M. Yasan, M. Gökçen, A. Allı and S. Allı, "Electrical characterization of Au/poly (linoleic acid)-g-poly (methyl methacrylate) (PLiMMA)/n-Si diode in dark and under illumination," *Current Applied Physics*, c. 15, s. 1, ss. 14-17, 2015.

[10] Ü. Gürsel, M. Gökçen and A. Allı, "Improving effect of poly (linolenic acid)-g-poly (caprolactone)-g-poly (t-butyl acrylate) interfacial layer on Au/n-Si diodes," *Materials Chemistry and Physics*, c. 213. ss. 1-5, 2018.

[11] T. T. Do, H. S. Hong, Y. E. Ha, J. Park, Y-C. Kang and J. H. Kim "Effect of Polyelectrolyte Electron Collection Layer Counteranion on the Properties of Polymer Solar Cells," *ACS Appliedn Materials & Interfaces*, c. 7, ss. 3335-3341, 2015.

[12] Z. Quan, L. Xiangzhi, L. Wei, S. Jun, W. Yuefeng and W. Dapeng, "The interface modification for GNWs/Si Schottky junction with PEI/PEIE interlayers," *Materials Research Express* ,c. 5, ss. 3, 2018.

[13] M.A. Zulfikar, A.W. Mohammed, A.A. Kadhum and N. Hilal, "Synthesis and characterization of poly(methyl methacrylate)/SiO_2 hybrid membrane," *Materials Science Engineering:A,* c. 452-453, ss. 422-426, 2007.

[14] A. Allı and B. Hazer, "Synthesis and Characterization of Poly (N-isopropyl acryl amide)-g-Poly(Linoleic Acid)/Poly(Linolenic Acid) Graft Copolymers," *Journalof the American Oil Chemists' Society*, c. 88, ss. 255-263, 2011.

[15] A. Allı and B. Hazer, "Poly(N-isopropylacrylamide) thermoresponsive cross-linked conjugates containing polymeric soybean oil and/or polypropylene glycol," *European Polmyer Journal*, c. 44, ss. 1701-1713, 2008.

[16] S. Savaşkan and B. Hazer,"Synthesis of a new macromonomeric peroxyinitiator (MMPI) having poly tetrahydrofurane units," *Angewandtle. Makromolekulare Chemie*, c. 239, ss. 13-26, 2003.

[17] U. Yıldız and B. Hazer, "Dispersion redox copolymerization of methyl methacrylate with azoinitiator as a macrocrosslinker," *Polymer*, c. 41, ss. 539-544, 2000.

[18] E. Kilicay, B. Cakmakli, B. Hazer, E. B. Denkbas and B. Acikgoz,"Acetylsalicylic Acid Loading and Release Studies of the PMMA-g-Polymeric Oils/Oily Acids Micro and Nanospheres," *Journal of Applied Polymer Science* c. 119, ss. 1610-1618, 2011.

[19] B. Çakmaklı, B. Hazer, T. Erdoğan and A. G. Mutlu,"DNA adsorption and dynamic mechanical analysis of polymeric oil/oil acid copolymers," *Journal of Polymer Research* c. 20, ss. 1-11, 2013.

[20] B. Çakmaklı, B. Hazer, Ş. Açkgöz, M. Can and F. B. Cömert,"PMMA-multigraft copolymers derived from linseed oil, soybean oil, and linoleic acid: Protein adsorption and bacterial adherence," *Journal of Applied Polymer Science*, c. 105, ss. 3448-3457, 2007.

[21] Ş. Aydoğan, *Katıhal Fiziği*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Yayınları, 2011, böl. 5, ss. 189-302.

[22] Ş. Altındal, "Al-SiOx-pSi aygıtların ve günes pillerinin elektriksel karakteristikleri," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1993.

[23] H. Uslu, "Au/(Co, Zn-Katkılı) polivinil alkol/n-Si Schottky engel diyotlarının hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin aydınlatma şiddetine bağlı incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.

[24] K. Sato andY. Yasamura, "Study of forward I-V plot for Schottky diyotes with highseries resistance," *Journal of Applied Physiology*, c. 58, ss. 3655-3657, 1985.

[25] H. Çulcu, "Poli (linoleik asit)-g-poli (metil metakrilat) graft kopolimerin sentezive elektriksel karakterizasyonu," Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, DüzceÜniversitesi, Düzce, Türkiye, 2015.

[26] E. H. Nicollian and J. R. Brews, *MOS Physics and Technology*, 1st edition, New York, USA: John Wiley&Sons, 1982, pp. 40-175, 222-226, 423-439.

[27] D. A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices,* 2nd edition, New York, USA: McGraw-Hill, 1997, pp. 420-450, 517-523.

[28] İ. Yücedağ, "Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarda elektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.

[29] M. Yıldırım, "Au/SiO_2/n-Si yapıların elektriksel parametrelerinin sıcaklığa bağlı incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.

[30] H. A. Bethe, "Theory of the boundary layer of crystal rectifiers," Radiation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United Kingdom, Rep. 43-12, 1942.

[31] F. Hartmann, "Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics," *Particle and Nuclear Physics,* 2nd edition, Karlsruhe, Germany: Springer, 2017, ch. 1, pp. 1-20.

[32] W. Kern and D. A. Puotinen, "Radio Corporaion of America review," *Radio Corporaion of America,* c. 31, ss. 187, 1970.

[33] W. Kern, "The evolution of silicon wafer cleaning technology," *Journal of the Electrochemical Society*. c. 137, s. 6, ss. 1887-1892, 1990.

[34] R. Özaydın, "Au/PVA/n-Si MIS yapıların akım-voltaj (I-V) ölçümlerinin sıcaklığa bağlı incelenmesi,"Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.

[35] Ş. Karataş, "Au/Poli (3-Sübsitüetiyofen) (P3DMTFT)/n-tipi InP/In yapının elektriksel karakterizasyonu,"Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2011.

[36] S. K. Cheung and N. W. Cheung, "Extraction of Schottky diode parameters fromforward current-voltage characteristics," *Applied Physics Letters*, c. 49, s. 2, ss. 85-88, 1986.

[37] H. Norde, "A Modified Forward I- V plot for Schottky diodes with high series resistance," *Journal of Applied Physics*, c. 50, s. 7, ss. 5052-5053, 1979.

[38] A. Turut, M. Saglam, H. Efeoglu, N. Yalcin, M. Yildirim and B. Abay, "Interpreting the nonideal reverse bias C-V characteristics and importance of the dependence of Schottky barrier height on applied voltage,"*Physica B,* c. 41. ss. 205, 1995.

[39] V.R. Reddy, M.S.P. Reddy, A.A. Kumar and C.J. Choi, "Effect of annealing temperature on electrical properties of Au/polyvinyl alcohol/n-InP Schottky barrier structure,"*Thin Solid Films*, c. 530, ss. 5715, 2012.

[40] H. C. Card and E. H. Rhoderick, "Studies of tunnel MOS diodes. Interface effects in silicon Schottky diodes," *Journal of Physics D*: *Applied Physics*, c. 4, s. 10, ss. 1589-1971.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mustafa YASAN

Doğum Tarihi ve Yeri : 01.07.1968-DÜZCE

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : my-yasan@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fen Bilimleri Enstitüsü	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Fen Edebiyat Fakültesi	Selçuk Üniversitesi	1990
Lise	Elektrik Bölümü	Düzce Endüstri Meslek Lisesi	1985

Yayınlar

1. Uluslararası SCI Yayınlar:

- M. Yasan, M. Gökçen, A. Allı, S. Allı, "Electrical characterization of Au/poly (linoleic acid)-g-poly (methyl methacrylate) (PLİMMA)/n-Si diode in dark and under illumination," *Current Applied Physics*, 15(1), ss. 14-17, 2015.

2. Bildiriler:

- M. Gökcen, H. Çulcu, S. Allı, S. Taran, M. Yasan, A. Allı "Synthesis, characterization and electronic application of poly (linoleic acid)-g-poly(methyl methacrylate) graft copolymer", 7th Workshop on Fats and Oils as Renewable Feedstock for the Chemical Industry, Karlsruhe/Germany (March 23-25, 2014) P16.

- M. Gökcen, M. Yasan, A. Allı, A. Demir, H. Çulcu, S. Allı "Illumination effect on electrical characterization of Au/poly (linoleic acid)-gpoly(methyl methacrylate) (PLiMMA)/n-Si diode,", 7th Workshop on Fats and Oils as Renewable Feedstock for the Chemical Industry, Karlsruhe/Germany (March 23-25, 2014) P17.

- H. Çulcu, M. Yasan, M. Gökcen, S. Allı, A. Allı, " Poli (linoleik asit)-g-poli(metil metakrilat) (PLiMMA) graft kopolimerin sentezi, karakterizasyonu ve UV dedektörlerde kullanımının araştırılması", IV. Fiziksel Kimya Kongresi, Denizli, (05-08 Haziran, 2014) P77.

3. Projeler

- Düzce Üniversitesi BAP-2014.05.02.216 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi.