

T.C.
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**METİL MAVİSİ VE METİL YEŞİLİ ORGANİK BİLEŞENLİ
SHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Aliye ÇEKİNMEZ
DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI

VAN-2015

T.C.
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**METİL MAVİSİ VE METİL YEŞİLİ ORGANİK BİLEŞENLİ
SHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Aliye ÇEKİNMEZ

VAN-2015

KABUL VE ONAY SAYFASI

Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI danışmanlığında, Aliye ÇEKİNMEZ tarafından sunulan “**Metil Mavisi ve Metil Yeşili Organik Bileşenli Schottky Diyotların Elektriksel Karakteristiklerinin İncelenmesi**” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 13/11/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Aytunç ATEŞ

İmza:

Üye: Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

İmza:

Üye: Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

.....
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Aliye ÇEKİNMEZ

ÖZET

METİL MAVİSİ VE METİL YEŞİLİ ORGANİK BİLEŞENLİ SHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÇEKİNMEZ, Aliye
Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI
Kasım 2015, 81 sayfa

Bu tez çalışmasında [100] doğrultulu, Czochralski yöntemiyle büyütülmüş, 610-640 μm kalınlıklı, öz direnci $\rho=12-16 \Omega\text{-cm}$ olan *p-Si* kristali kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarında metil mavisi ve metil yeşili organik bileşenlerin diyodun elektriksel karakteristikleri üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Bunun için *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* diyotları üretildi.

Üretilen *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* diyotların akım-gerilim (*I-V*), kapasite-gerilim (*C-V*), farklı gerilim değerlerinde kapasite-frekans (*C-f*) ölçümleri alındı. Oda sıcaklığında *I-V* karakteristiğinden yararlanılarak *Au/metil mavisi/p-Si/Al* yapısı için; idealite faktörü 2.82, engel yüksekliği 0.805 eV, *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapısı için; idealite faktörü 2.28, engel yüksekliği 0.756 eV olarak hesaplanmıştır. Bu parametreler Cheung ve Norde fonksiyonlarıyla hesaplanmış ve her iki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca organik ara yüzeyli Schottky diyotun ara yüzey durumlarını belirlemek için *C-V* ölçümleri alınmış ve $C^{-2}\text{-}V$ karakteristikleri yardımıyla V_d (difüzyon potansiyeli), E_F (fermi enerji seviyesi), N_a (akseptör yoğunluğu), W_d (arınma bölgesi genişliği) ve Φ_b (engel yüksekliği) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan engel yüksekliği diğer hesaplamalarla karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki metal/yarıiletken Schottky diyotlarla (MS) karşılaştırıldığında organik bileşenlerin diyodun idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi elektriksel karakteristiklerinde büyük bir etki yaptığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Organik bileşen, Schottky diyot, Elektriksel karakteristikler, Metil mavisi ve Metil yeşili, engel yüksekliği.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SCHOTTKY DIODES BASED ON METHYLENE BLUE AND METHYLENE GREEN DYES

ÇEKİNMEZ, Aliye

M. Sc., Department of Physics

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Bahri BATI

November 2015, 81 pages

In this study, we have used p-Si crystal with [100] direction, grown by Czochralski method, with 610-640 μm thickness, and $\rho=12\text{-}16\ \Omega\text{-cm}$ resistivity. The aim of this study investigating the impact the organic components (methylene blue and methylene green) on the electrical characteristics of the diodes. For this purpose, we have produced *Au/methylene blue/p-Si/Al* and *Au/methylene green/p-Si/Al* diodes.

We have investigated current-voltage (I - V), capacitance-voltage (C - V), capacitance-frequency (C - f) characteristics for different voltage measurements of *Au/methylene blue/p-Si/Al* and *Au/methylene green/p-Si/Al* diodes at room temperature. The values of ideality factor and barrier height were found to be as 2.82 and 0.805 eV for *Au/methylene blue/p-Si/Al*; and 2.28 and 0.756 eV for *Au/methylene green/p-Si/Al*, respectively. These parameters are calculated with Cheung and Norde functions and results obtained from both methods were compared. In addition, for defining the interface states of the Schottky diodes which has organic interface layer, C - V measurements was performed, and the values of V_d , E_F , N_a , W_d and Φ_b were calculated from C^{-2} - V characteristics of Schottky diodes. The obtained barrier heights values were compared with the previous values.

The organic compounds play an important role on the electrical parameters of Schottky diodes such as ideality factor, barrier height and series resistance when the obtained results were compared with traditional metal semiconductor Schottky (MS) diodes.

Key words: Organic components, Schottky diodes, Electrical characteristics, Methylene blue and Methylene green, barrier height.

ÖN SÖZ

Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' ne yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Organik Bileşenli Au/metil mavisi/p-Si/Al ve Au/metil yeşili/p-Si/Al Schottky Diyotların Elektriksel Karakteristiklerinin İncelenmesi” adlı çalışma Sayın Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI danışmanlığında yürütülmüştür. Bu çalışmam boyunca, çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi ve tecrübelerini esirgemeyerek katkıda bulunan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimimde tecrübe ve bilgilerinden istifade ettiğim Sayın Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Organik malzeme temininde destek veren laboratuvar çalışmalarında yardımını esirgemeyen ve bilgilerinden yararlandığım Yrd. Doç. Dr. Arife Gencer İMER'e teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans çalışmama katkıda bulunan, önerilerinden ve bilgilerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Aytunç ATEŞ'e teşekkürlerimi ayrıca sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgilerinden yararlandığım Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim üyelerinden Prof. Dr. Rıdvan KARAPINAR, Doç. Dr. Bahattin ERDİNÇ, Yrd. Doç. Dr. Emel KİLİT DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmaları ve ölçümlerindeki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Abdulkadir KORKUT'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatımın her aşamasında bana destek olan sevgili aileme, çalışmalarım süresince fedakârlık göstererek beni destekleyen eşim Ahmet Tayfun ÇEKİNMEZ'e teşekkür ederim.

2015

Aliye ÇEKİNMEZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖN SÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	5
3. KURAMSAL TEMELLER	9
3.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar	9
3.1.1. Metal/ <i>p-tipi</i> yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar	10
3.1.2. Metal/ <i>p-tipi</i> yarıiletken doğrultucu olmayan (omik) kontaklar	12
3.2. Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkiler	14
3.3. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları	15
3.3.1. Termoyonik emisyon teorisi	16
3.4. Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Schottky Diyot Karakteristiklerinin Belirlenmesi	21
3.5. Metal- <i>p-tipi</i> Yarıiletken-Metal Yapısı	23
3.6. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotların Engel Kapasitesi	24
3.7. Yüzey Hallerinin Varlığında Etkin Engel Yüksekliği	28
3.8. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarında Arayüzey Tabakası ve Arayüzey Hallerinin Etkileri	38
3.9. Organik Yarıiletkenler	39
3.9.1. Organik yarıiletkenlerin temel özellikleri	41
3.9.2. Organik yarıiletkenlerde akım iletim mekanizması	42
3.9.3. Organik yarıiletken aygıtlar	43
3.10. Norde Metodu	43
4. MATERYAL ve YÖNTEM	47

4.1. Giriş	47
4.2. Numunelerin Hazırlanması ve Temizlenmesi	47
4.2.1. <i>p</i> -Si [100] kristalinin kimyasal olarak temizlenmesi	47
4.2.2. <i>p</i> -Si [100] kristaline alüminyum (Al) omik kontak yapılması	48
4.2.3. Metil mavisi molekülü.....	51
4.2.4. Metil yeşili molekülü.....	51
4.2.5. Metil mavisi ve metil yeşili çözeltilerin hazırlanması ve kaplanması.....	52
4.2.6. Organik bileşenli Schottky diyotların yapılması	52
4.3. Ölçüm Alma	54
4.3.1. Organik bileşenlenli diyot karakteristiklerinin bulunması için elektriksel parametrelerinin belirtilmesi.....	54
4.3.1.1. Akım-gerilim (<i>I</i> - <i>V</i>) ölçümleri ve Cheung fonksiyonlarının kullanılması	54
4.3.1.2. Norde fonksiyonu yardımıyla engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin hesaplanması.....	62
4.3.1.3. Kapasite-gerilim (<i>C</i> - <i>V</i>) ölçümleri	64
4.3.1.4. Kapasite-frekans (<i>C</i> - <i>f</i>) ölçümleri	68
4.3.1.5. Arayüzey hal yoğunluğunun hesaplanması	70
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	72
KAYNAKLAR.....	77
ÖZ GEÇMİŞ.....	82

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının $\ln I-V$ karakteristiklerinden elde edilen elektriksel parametreler	58
Çizelge 4.2. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının $dV/d\ln I-I$ ve $H(I)-I$ karakteristiklerinden elde edilen elektriksel parametreler	62
Çizelge 4.3. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının $F(V)-V$ karakteristiklerinden elde edilen elektriksel parametreler	64
Çizelge 4.4. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının $C^{-2}-V$ karakteristiklerinden elde edilen elektriksel parametreler	68

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Metal/ <i>p-tipi</i> yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontağın enerji-bant diyagramı a)Kontaktan önce, b)Kontaktan sonra ve termal dengede, c) $V \neq 0$ durumunda.	12
Şekil 3.2. Metal/ <i>p-tipi</i> yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı a) kontakdan önce, b) kontakdan sonra ve termal dengede, c) $V \neq 0$ durumunda	13
Şekil 3.3. Düz beslem altındaki metal yarıiletken Schottky kontakta imaj azalma etkisine ait enerji-bant diyagramı	16
Şekil 3.4. P^+PM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant diyagramı	23
Şekil 3.5. Metal/ <i>p-tipi</i> yarıiletken yapısında: a) $\Psi(x)$ potansiyelinin x 'e göre değişimi, b) uzay yükü yoğunluğu $\rho(x)$ 'in x 'e göre değişimi	25
Şekil 3.6. Bir metal <i>p-tipi</i> yarıiletken Schottky diyodun termal dengede enerji bant diyagramı	29
Şekil 3.7. Denge dışı şartlar altında p-tipi yarıiletken üzerine imal edilmiş olan bir Schottky diyodun enerji bant diyagramı	37
Şekil 4.1. Omik kontak termal işlemi için fırın	50
Şekil 4.2. Omik kontak termal işlemi için fırın ve kontrol ünitesi şeması	50
Şekil 4.3. Metil mavisi molekül yapısı	51
Şekil 4.4. Metil yeşili molekül yapısı	51
Şekil 4.5. Diyot yapımında kullanılan maske.....	52
Şekil 4.6. Omik ve Schottky kontak için kullanılan buharlaştırma sistemi.....	53
Şekil 4.7. Organik metal-yarıiletken Schottky diyot şeması	54
Şekil 4.8. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının doğru ve ters beslem $InI-V$ karakteristikleri	57

Şekil 4.9. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının r - V karakteristikleri.....	59
Şekil 4.10. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının I - V eğrilerinden elde edilen $dV/d(\ln I)$ - I karakteristikleri.....	61
Şekil 4.11. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının I - V eğrilerinden elde edilen $H(I)$ - I karakteristikleri	61
Şekil 4.12. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının Norde fonksiyonlarından çizilen $F(V)$ - V karakteristikleri.....	64
Şekil 4.13. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının 250 kHz frekans değerinde C - V karakteristikleri	66
Şekil 4.14. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının 250 kHz frekans değerinde C^{-2} - V karakteristikleri	66
Şekil 4.15. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> yapısının 0.2 V ve 1 V aralığında C - f karakteristikleri.....	69
Şekil 4.16. <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapısının 0.2 V ve 1 V aralığında C - f karakteristikleri.....	69
Şekil 4.17. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının 0.8 V için C - f karakteristikleri.....	70
Şekil 4.18. <i>Au/metil mavisi/p-Si/Al</i> ve <i>Au/metil yeşili/p-Si/Al</i> yapılarının N_{ss} -(E_{ss} - E_v) karakteristikleri.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Diyodun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
Al	Alüminyum
Au	Altın
C	Schottky kapasitesi
d	Schottky bölgesinin genişliği
dn	Artan elektron konsantrasyonu
E_{F_m}	Metalin fermi seviyesi
$E_{F_{sc}}$	Yarıiletkenin fermi seviyesi
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_v	Değerlilik bant kenarı enerjisi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E'_c	Termiyonik emisyon için gerekli minimum enerji
$E_{ss}-E_v$	Arayüzey hal enerjisi
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_i	Arayüzey tabaka permivitesi
e	Bir elektronun yükü
eV	Elektron volt
$+e$	İmaj yükü
$f_F(E)$	Fermi- dirac ihtimaliyet fonksiyonu
$G_C(E)$	İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu

h	Plank sabiti
I	Akım
I_0	Doyma akım yoğunluğu
J	Metal-yarıiletken eklemine net akım yoğunluğu
J_0	Ters doyma akımı yoğunluğu (sızıntı akımı)
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletken metale doğru akan akım yoğunluğu
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletken doğru akan akım yoğunluğu
k	Boltzman sabiti
m_n^*	Elektronların etkin kütlesi
N_{ss}	Arayüzey tabakasındaki durum yoğunluğu
N_a	Yarıiletkenin akseptör konsantrasyonu
N_d	Yarıiletkenin donör yoğunluğu
N_v	Valans bandındaki etkin durumların yoğunluğu
n	İdealite faktörü
$p-Si$	p -tipi silisyum
Q_{sc}	Yarıiletkendeki uzay yükü
Q_{ss}	Yarıiletken arayüzeyinde mevcut yüzey yükü
Q_{it}	Arayüzey durum yük yoğunluğu
R_s	Seri direnç
T	Mutlak sıcaklık
V	Uygulanan potansiyel
V_d	Difüzyon potansiyeli
v_x	Taşıma yönündeki taşıyıcı hızı
Φ	İş fonksiyonu
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_{bn}	İdeal metal/yarıiletken kontakta engel yüksekliği
Φ_{b0}	Metal tarafından engel yüksekliği
Φ_0	Nötral seviye
δ	Arayüzey tabaka kalınlığı
Δ	Arayüz tabakasındaki voltaj düşmesi

Simgeler**Açıklama** $\Delta\Phi$

Schottky engel düşmesi

 $\rho(x)$

Konuma bağlı uzay yük yoğunluğu

 ρ

Özdirenç

 χ_s

Elektron yatkınlığı

 W_d

Arınma bölgesi genişliği

 X_m

Maksimum engelin konumu

 Ψ_s

Yüzey potansiyeli

Kısaltmalar**Açıklama****AE**

Alan Emisyonu

AMETY

Au/metil yeşili/p-Si/Al

AMETM

Au/metil mavisi/p-Si/Al

C-V

Kapasite- gerilim

C- f

Kapasite- frekans

HCl

Hidrojen klorür

HF

Hidrojen flörür

I-V

Akım- gerilim

LED

Işık yayan diyotlar

MS

Metal/Yarıiletken

MIS

Metal/Yalıtkan/Yarıiletken

OLED

Organik ışık yayan diyot

OTFT

Organik ince film transistör

RCA

Radio Corporation of America

TE

Termiyonik Emisyon Teorisi

TED

Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi

TAE

Tünelleme Termiyonik Alan Emisyonu

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde ve elektronik sanayide oldukça önemli bir yere sahip olan metal/yarıiletken (MS) kontaklar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Schottky kontaklardan hızlı anahtar uygulamaları, güneş pilleri, mikrodalga karıştırıcı algılayıcılar (dedektörler), frekans-gerilim değişimli kondansatörler (varaktörler) ve Schottky engel tabakalı alan etkili transistörler yapılmaktadır. Bu yapılarda uygun fiziksel koşullarda oluşabilen Schottky engel yüksekliği en önemli parametredir. Son yıllarda, engel yüksekliğinin daha fazla artırılması için ciddi bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda, organik/inorganik eklemin arayüzeyinde dipoller oluşabilceği ve bu sayede etkin engel yüksekliğinin arttığı yada azaldığı rapor edilmiştir (Barış, 2013). Metal ve yarıiletken arasına çok ince bir yalıtkan tabakanın yerleştirilmesi bu yöntemlerden birisidir. Metal ve yarıiletken arasında bazen kendiliğinden bazen de isteyerek yalıtkan bir tabaka oluşur ve bu yapılar genelde MIS olarak adlandırılır. Bununla birlikte Schottky engelli güneş pilinin açık devre voltajı ve verimliliğinde gözlenen artış nedeniyle MIS Schottky diyotlarına olan ilgi artmıştır.

Bilindiği gibi metal-yarıiletken kontakların elektriksel karakteristikleri metal ile yarıiletken arasında kullanılan ara yüzey malzemesine bağlı olarak değişmektedir. Metal-yarıiletken kontakların ara yüzey durumları engel yüksekliği, idealite faktörü gibi diyota ait birçok parametreyi değiştireceğinden kullanılan ara yüzey malzemesi doğrudan malzemenin özelliklerini, performansını ve verimini etkiler (Sze, 1981; Rhoderick, 1978). Yasak enerji aralıklarının farklı değerler alması, maliyetlerinin ucuz olması, organik ve farklı amaçlara uygun olarak farklı özellikte sentezlenebilir olması organik moleküllerin devre elemanları fabrikasyonunda tercih edilmelerine neden olmaktadır. İnorganik yarıiletken üzerinde oluşturulan organik filmler doğrultucu ya da omik özellik gösterebileceğinden metal ile moleküler yapı arası reaksiyonlar ve difüzyonlar doğrultucu ya da omik kontak oluşumunda önem arz eder.

Son zamanlarda birçok araştırmacı Schottky kontağın elektriksel özelliklerini modifiye etmek için arayüzey malzemesi olarak organik yarıiletken malzeme kullanımı üzerine çalışmalar yapmaktadır (Yakuphanoglu ve ark., 2010; Aydoğan ve ark., 2010; Okur ve ark., 2009; Gupta ve ark., 2005; Aydın ve ark., 2011; Yahia ve ark., 2011).

Araştırmacıları organik yarıiletken üzerine çalışmaya yönelten birçok sebep vardır. Bunlar; organik yarıiletkenlerin spin kaplama ve baskı gibi ucuz ve tek seferde oldukça fazla üretim yapılabilen kaplama teknikleriyle ucuz maliyetle üretilibilmeleri, bükülebilir olmaları, yüksek zarar eşiği ve yüksek nonlineerlik gibi daha birçok özelliğe sahip olmaları şeklinde sıralanabilir (Güllü ve ark., 2010). Bu özellikleri sayesinde elektronik ve optoelektronik alanında organik ışık yayan diyot (Organic Light Emitting Diode-OLED), organik Schottky engel diyotları, organik alan etkili transistörler (Organic Field Effect Transistor-OFET), fotovoltaiik ve güneş pilleri ve spintronik gibi teknolojik uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır (Yahia ve ark., 2011).

Organik yarıiletken malzemelerin elektriksel kararlılıklarından, fonksiyonelliklerinden ve performanslarından dolayı devam eden gelişmeler laboratuvar şartlarında yüksek verimli aygıt üretimine yol açtı. Yine bu alandaki ilerlemeler çalışmaları akademik alandan endüstriyel alana kaydırılmıştır.

Organik yarıiletken malzemelerin performansları bilim dünyasında yaygın bir şekilde tartışılmakta ve bu tartışma konularının en başında organik ve inorganik yapıların bir araya getirilmesi ile arayüzeyde oluşan elektriksel özelliklerin incelenmesi yer almaktadır. Bu sebeple organik/inorganik yapılarının arayüzeylerin elektriksel özelliklerini araştırmak için çok sayıda çalışma gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada organik malzeme kullanılarak doğrultucu kontak üretilirliiği ve kontak karakteristiklerinin organik materyal yardımıyla modifiye edilebilirliiği yarı iletken aygıt üretimi açısından çok büyük öneme sahiptir. Bununla beraber, birden fazla sayıda sistematik olarak üretilip, incelenecek olan organik/inorganik yarıiletken eklemlerin akım-gerilim ölçümleri beklentilerimiz doğrultusunda sonuçlanması büyük yüzey alanlı aygıt üretimine elverişliliği açısından önemli olacaktır. Ayrıca bu çalışmada metil mavisi ve metil yeşili organik molekülleri Schottky tipi kontaklarda arayüzey elemanı materyali olarak kullanıp, bu kontakların doğrultucu ya da omik özelliklerini incelemek ve akım-voltaj ($I-V$), kapasitans-gerilim ($C-V$), kapasitans-frekans ($C-f$) ölçümlerini alarak, grafikler yardımıyla ve hesaplamalarla karakterizasyon işlemlerini yapılması amaçlanmıştır. Organik/inorganik yarıiletkenin $\ln I-V$ ölçümlerinden idealite faktörleri (n), doyma akımları (I_0), engel yükseklikleri (Φ_b) ve Cheung fonksiyonları kullanılarak idealite faktörleri, engel yükseklikleri,

Norde fonksiyonları kullanılarak engel yükseklikleri hesaplanarak her iki fonksiyonunda I - V ölçümlerinden doğruluğu kontrol edilmiş ve bu diyotların seri dirençleri (R_s) belirlenmiştir. Buna ilave olarak C - V ölçümlerinden difüzyon potansiyelleri (V_d), engel yüksekliği (Φ_b), alıcı yoğunlukları (N_a), arınma bölgesi genişlikleri (W_d), Fermi enerji seviyeleri (E_F) değerlerinin bulunması hedeflenmiştir. Diyotların doğrultma katsayıları (r) değerlerinin gerilim (V) değerlerine göre değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. I - V ölçümlerinden yararlanarak arayüzey hal yoğunluğu (N_{ss})'nin, arayüzey hal enerjisine ($E_{ss}-E_v$) göre değişimi veren karakteristik çizilmiştir. Kısacası *Au/metil mavisi/p-Si* ve *Au/metil yeşili/p-Si* yapılarının elektriksel karakteristikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlardan organik moleküller kullanılarak doğrultucu kontak üretilebileceği ortaya koyulmuştur.

2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Metal ve yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik özelliklerinden faydalanmak ve onlara uygun kontaklar yaparak devrelerde kullanmak için ilk ciddi çalışma 1874'lü yıllarda Braun tarafından başlatılmıştır. Braun, metal-yarıiletken kontakların asimetrik özellikleri ile ilgili çalışarak kontakların doğrultucu özelliklerini incelemiştir. Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların, ayrıntılı yüzey koşullarına ve uygulanan gerilim kutuplanmasına bağlı olduğunu belirtmiştir.

1906'da Pickard silisyum nokta-kontak dedektörleri, 1907'de Pierce farklı yarıiletkenler üzerine metal püskürterek yaptığı diyotların doğrultucu özelliklerini gösteren karakteristikleri elde etmişlerdir. 1920'li yıllarda kurşun-sülfid kristali ile tungsten nokta-kontaklardan oluşan doğrultucular yapılmıştır.

Metal-yarıiletken diyotlar deneysel olarak geliştirilirken, kontaklardaki doğrultucunun fiziksel özelliklerinin anlaşılması çok daha sonralarda olmuştur. Büyük bir gelişme 1929'da Schottky ve Deutschman tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar bakır oksit doğrultucuların farklı kalınlıklı kapasitans ölçümlerini yapmışlardır. Yaklaşık olarak kalınlığı 3×10^{-5} cm olan bir paralel kapasitör kullanarak engel yüksekliğini modellemişlerdir. Onlar, böyle bir yüzey tabakasında yarıiletken içine nüfuz eden negatif bir uzay yükünün bulunduğu sonucuna varmışlardır. Yarıiletkenlerin bu davranışı metallerinkinden oldukça farklıdır.

Schottky, Störner ve Waibel, 1931 yılında potansiyel değişimlerin meydana getirdiği akım akışı yardımıyla birkaç çeşit potansiyel engelinin var olduğunu göstermişler ve MS kontaklarda doğrultma özelliğinin olduğunu ilk kez açıklamışlardır. Bu sırada kuantum mekaniği tam olarak kurulmuştur.

Schottky ve Mott, 1938 yılında birbirinden bağımsız olarak elektronların potansiyel engelini sürüklenme ve difüzyon olayları ile geçtiğini, böylece doğrultmanın yönünün incelenebileceğini göstermişlerdir. Yine aynı yıl Mott, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark nedeni ile oluşan potansiyel engel bölgesinin yüklerden arındığını ve elektrostatik potansiyelin uzaklıkla doğrusal olarak artan bir elektrik alanda engel bölgesinde sabit bir safsızlık yoğunluğu olduğunu göstermiştir.

1940'da Schottky ve Bethe'nin çalışmaları metal-vakum sistemlerindeki iletkenlikle, metal-yarıiletken diyotlardaki iletkenlik arasındaki benzerlikleri ortaya koymuştur.

İkinci dünya savaşı sırasında, mikrodalga radarların gelişmesiyle silisyum ve germanyumdan yapılan nokta-kontak diyotları tekrar önem kazanmıştır. Nokta kontak diyotları en çok frekans dönüştürücüsü ve mikrodalga dedektör diyotu olarak kullanılmıştır. Metal-yarıiletken (MS) kontakların gelişimi sırasındaki en büyük katkı 1942 yılında Bethe'nin termiyonik emisyon teorisi olmuştur. Bethe bu teorenin MS doğrultuculara uygulanabileceğini göstermiştir. 1945'ten sonra yarıiletken fiziği alanında metal-yarıiletken (MS) kontak çalışmaları nokta-kontak transistörlerin icadı ile sonuçlanmıştır. Daha sonra yüksek bir vakum sisteminde metal filmin buharlaştırılması ile daha sabit olan kontaklar üretilmiştir.

1950' li ve 1960'lı yıllar teorik ve teknolojik yönden MS kontak araştırmalarının en fazla olduğu dönemdir. Bu yıllarda düzlemsel Schottky diyotların yapımı birçok önemli uygulamaya sebep olmuştur.

Cowley ve Sze (1965), Schottky diyotlarının kontak metallerinin iş fonksiyonlarına bağımlılığını araştırmışlar ve arayüzlerdeki yüzey durum yoğunluğunun sadece yarıiletkenin yüzey özelliklerinden kaynaklandığını ve metalden bağımsız olduğunu öne sürmüşlerdir.

1966 yılında Crowell ve Sze, Schottky'nin difüzyon ve Bethe'nin termiyonik emisyon modelini birleştirerek Schottky diyotların akım-iletim olayında önemli bir yer tutan termiyonik emisyon-difüzyon teorisini ortaya koymuşlardır.

Chattopadhyay ve Daw (1985)'de metalin iş fonksiyonuna karşılık engel yüksekliğindeki ideal olmayan durumu, yüzey durumları varlığı ile açıklamıştır. Bu çalışmalarının Cowley ve Sze'nin engel yüksekliği modeliyle uyumlu olduğunu bulmuşlardır.

Çetinkara ve arkadaşları (1999), Au/n-Si Schottky diyotlarında, kontakta önce yüzeyde oluşan doğal oksidin diyot karakteristikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Omik kontakta sonra numuneyi parçalara bölerek, bunlardan bir parçasına hiç bekletilmeden Schottky kontak yapıp, referans numune ile bu numuneleri engel yükseklikleri bakımından karşılaştırmışlar ve yarıiletken yüzeylerin hava ortamında

kalma süreleri arttıkça, engel yükseklikleri de artarak, referans numunenin engel yüksekliğine yaklaştığını kaydetmişlerdir.

Kılıçoğlu ve arkadaşları (2007), Al/Metil kırmızısı/p-Si diyotunun farklı konsantrasyonda metil kırmızısı kullanarak yarıiletkenler arasındaki arayüzey durumlarının ve arayüzey tabakasının parametrelerini $I-V$ ve $C-V$ karakteristikleri yardımıyla incelemiştir. Arayüzey tabakasının Schottky diyotların performansına ve güvenilirliğine doğrudan etki ettiğini belirtmişlerdir.

Ocak ve arkadaşları (2009), Sn/Metilen mavisi/p-Si diyotunda metilen mavisini arayüzey tabakası olarak kullanarak $I-V$ ve $C-V$ karakteristiklerini incelemiştir. Arayüzey tabakasının engel yüksekliğini değiştirdiğini göstermişlerdir.

Soylu ve arkadaşları (2013), organik bileşenli p-Si/Al diyotlarda metilen mavisi kullanmışlardır. Arayüzeydeki organik tabakanın diyotun idealite faktörü, engel yüksekliği ve direnci üstünde büyük etkilerinin olduğunu görmüşlerdir.

Duman ve arkadaşları (2015), Al/SiO₂/p-Si ve Al/Metil yeşili(MG)/SiO₂/p-Si yapılarının karakteristik özelliklerini incelediler ve karşılaştırdılar. Düşük frekanslarda arayüzey hallerinin AC sinyalinin takip edebildiğini görmüşlerdir.

Gencer İmer ve ark. (2014), Pt(II)-APTH molekülünü arayüzey tabakası olarak kullanmış ve bu diyotun $I-V$ ölçümlerini almıştır. Diyotun doğrultucu özellik gösterdiğini, doğrultma oranının 4.40×10^2 olduğunu, ortalama engel yüksekliği değerinin 0.765 eV olduğunu kaydetmişlerdir.

Tuğluoğlu ve arkadaşlar (2015), Al/rubrene/n-GaAs yapısının elektriksel karakteristiklerini incelediler. İdealite faktörlerinin ve engel yüksekliklerinin sıcaklıkla yükseldiğini kaydetmişlerdir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Schottky diyotların genel yapısının daha iyi anlaşılabilmesi için iletken ve yarıiletkenin iletkenlik özellikleri iyi bilinmelidir. Yarıiletken kristal ile kontak yapılacak olan malzeme birbirine en az dirençle temas ettirilmelidir. İyi bir kontak yapı oluşturabilmek için kontak yapılacak malzemelerin yüzeyleri pürüzsüz ve temiz olmalıdır. Metal ve yarıiletken maddeler kontak bir yapı oluşturduğunda her iki maddeden birbirine doğru yük akışı meydana gelir ve bu yük akışı her iki maddenin fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder (Ziel, 1968).

Elektronlar, metal ve yarıiletkenin içinde iyonlar tarafından coulumb elektriksel etkileşimine maruz kalmaktadır. Bu nedenle kristalin içinden elektronların potansiyel enerjisi serbest elektronun enerjisinden küçüktür. Kristalin içinden elektronları dışarı (vakuma) atmak için elektronlara belirli bir miktarda enerji transferi olmalıdır. Elektronu katı malzemenin içinden dışarı atmak için verilmesi gereken en az enerji iş fonksiyonu veya çıkış işi olarak tanımlanır. İş fonksiyonu, E_{F_m} enerjisine sahip (metalin fermi seviyesi) bir elektronu metalden uzaklaştırmak için elektrona verilmesi gereken minimum enerji olarak tanımlanabilir. Benzer şekilde yarıiletkenin iş fonksiyonu bir elektronun yerleştiği $E_{F_{sc}}$ (yarıiletkenin fermi seviyesi) seviyesinden uzaklaştırmak için gerekli minimum enerji miktarıdır.

Bir metal ile bir yarıiletken arasındaki kontak yapılar; doğrultucu (Schottky) ve doğrultucu olmayan (omik) olmak üzere iki gruba ayrılır. Kontak yapının doğrultucu veya omik olması metal ve yarıiletken malzemenin iş fonksiyonlarına (Φ) bağlıdır. Φ_m (metalin iş fonksiyonu), Φ_s (yarıiletkenin iş fonksiyonu) olmak üzere;

n- tipi yarıiletken-metal kontaklarında;

$\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu (Schottky) kontak

$\Phi_m < \Phi_s$ ise doğrultucu olmayan (omik) kontak oluşur.

p-tipi yarıiletken- metal kontaklarında;

$\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu olmayan (omik) kontak,

$\Phi_m < \Phi_s$ ise doğrultucu (Schottky) kontak oluşur.

Bir metal, bir yarıiletken ile kontak haline getirildiğinde aralarında potansiyel engel meydana gelmektedir. Bu engelin oluşması yük taşıyıcıların (boşluk ve elektronlar) konsantrasyonunun yeniden dağılmasına bağlıdır. Bu tür kontakların elektriksel özellikleri ve dışardan uygulanan gerilim değeri ile yönü değişmektedir.

İki madde kontak haline getirildiğinde, ikisi arasında elektrik yükleri yeniden dağılır ve bu süreç her iki maddenin Fermi seviyeleri eşit düzeye gelinceye kadar devam eder. Kontak maddelerinin Fermi seviyelerinin aynı düzeye gelmesi bir denge durumudur, bu denge durumuna ulaşıldığında iki yönlü yük geçişleri minimuma düşer ve bunların cebirsel toplamı sifıra eşit olur. Bir metal-yarıiletken kontakta yük taşıyıcıları bir doğrultudan diğer doğrultuya kolay bir şekilde geçiyorsa yani bir doğrultudaki akım diğer doğrultudaki akıma göre daha kolay geçebiliyorsa bu kontak doğrultucu kontak olarak adlandırılır.

3.1.1. Metal/ *p-tipi* yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar

Bir metal-*p tipi* yarıiletken kontağı göz önüne alalım. Φ_m ; metalin iş fonksiyonu, Φ_s ; yarıiletkenin iş fonksiyonu, χ_s ; yarıiletkenin elektron yatkınlığı (elektron ilgisi: electron affinity) ve E_s yarıiletkende valans bandının tepesi ile vakum seviyesinin minimumu arasındaki derinlik olsun. Eğer $\Phi_m > \Phi_s$ ise kontak doğrultucu olmayan (omik), $\Phi_m < \Phi_s$ ise kontak doğrultucu (Schottky) olacaktır. Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının birbirine göre büyüklükleri, kontağın omik yada doğrultucu özellik göstermesinde önemli bir durumdur.

Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olduğu durumlarda ($\Phi_m < \Phi_s$) doğrultucu kontak oluşur. Oda sıcaklığında akseptörlerin hepsi iyonize olmuş olsun. Kontakten önce, Şekil 3.1.a'da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır (Rhoderick, 1988). Metal ile yarıiletken arasında kontak yapıldıktan sonra her iki maddenin Fermi seviyeleri aynı

seviyeye gelinceye kadar metalden yarıiletkeneye doğru elektron akışı olur. Bunun sonucu olarak, yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar.

Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş alıcılar (akseptörler) d kalınlığında bir uzay yükü tabakası içerisinde dağılırlar. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiği için, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

$$eV_{dif} = \Phi_s - \Phi_m \quad (3.1)$$

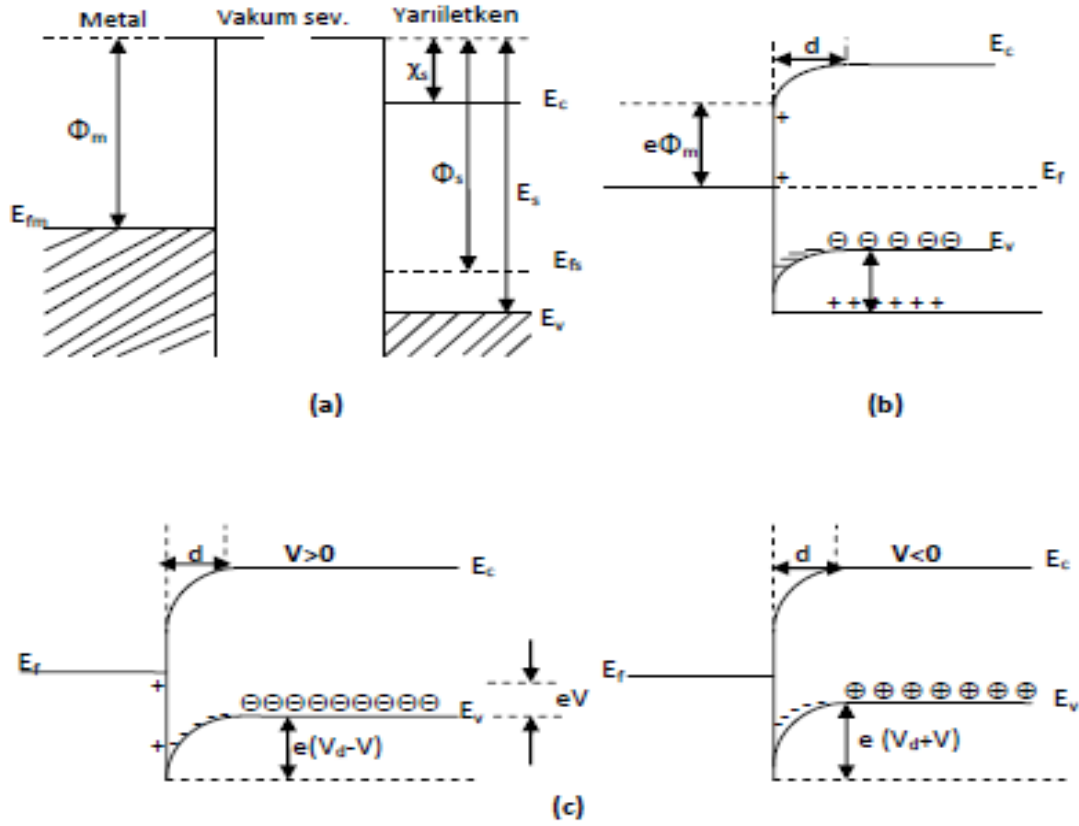
olur. Burada V_{dif} , difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontakın metal tarafındaki holler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \quad (3.2)$$

ifadesi ile verilir. Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkenindeki bazı holler potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanarak, metalin içine geçebilirler. Benzer şekilde metalde termal olarak oluşan bazı holler de engeli aşacak kadar enerji kazanarak, yarıiletkenin içine geçebilirler. Böylece kontakta engelden geçen eşit ve zıt yönlü iki I_0 akımı oluşur. Yarıiletkeneye bir V gerilimi uygulanırsa (Şekil 3.1b), soldan sağa akan hol akımı değişmez, fakat sağdan sola doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Bunun sonucu olarak yarıiletkenindeki enerji seviyelerinin tümü eV kadar düşer ve buna bağlı olarak yarıiletkenden metale geçen holler için engel yüksekliği eV kadar azalır. Sonuçta sağdan sola doğru olan akım pozitif kabul edilirse, karakteristik akım;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT} - 1\right) \right] \quad (3.3)$$

olacaktır. Bu bir doğrultucu kontaklıdır. Burada k Boltzman sabiti, I_0 doyma akım yoğunluğu, V uygulanan potansiyel ve T sıcaklıktır.

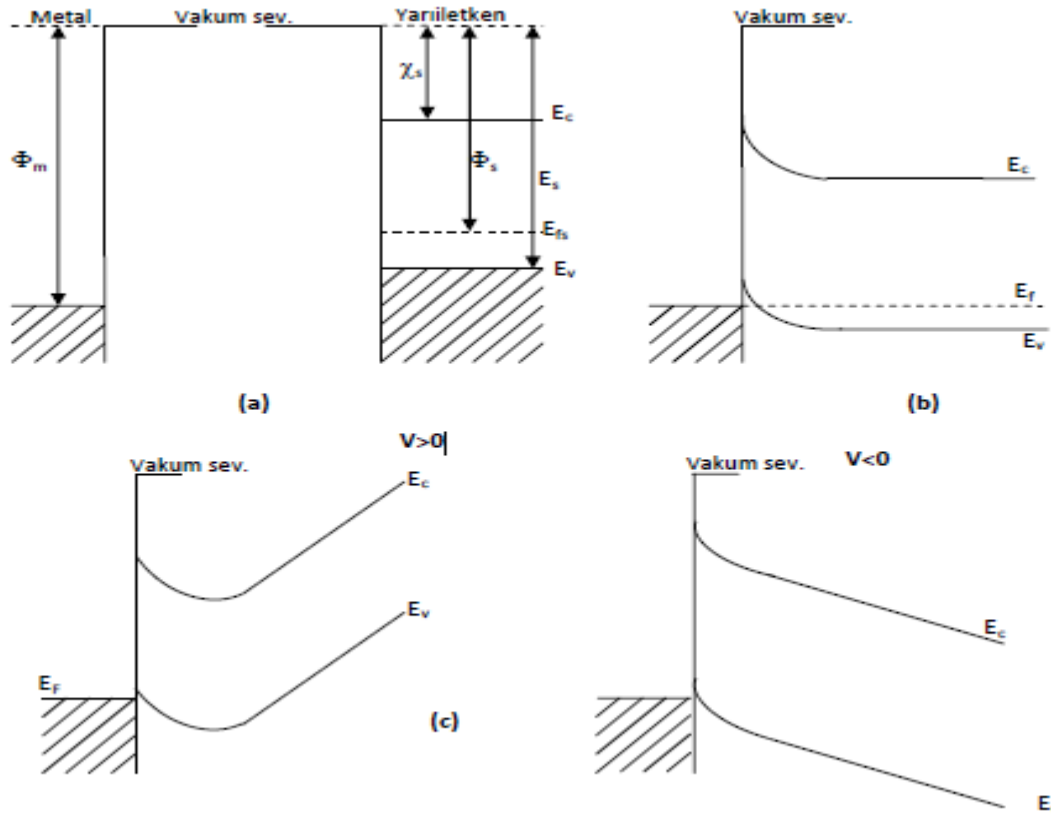


Şekil 3.1. Metal/*p-tipi* yarıiletken doğrultucu kontağın (Schottky) enerji-bant diyagramı a)Kontaktan önce, b)Kontaktan sonra ve termal dengede, c) $V \neq 0$ durumunda.

3.1.2. Metal/*p-tipi* yarıiletken doğrultucu olmayan (omik) kontaklar

Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu durumlarda ($\Phi_m > \Phi_s$) omik kontak oluşur. Oda sıcaklığında bütün akseptörler iyonize olmuş olsun. Kontaktan önce Şekil 3.2.a'da görüldüğü gibi, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Metal ile yarıiletkenin Fermi seviyesinin birbirine göre büyüklükleri, kontaktan sonra yük taşıyıcılarının yönü hakkında bize bilgi verir. Kontaktan sonra bir yük mübadelesi meydana gelecektir. Yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü (hollerden dolayı) bırakarak ve metal tarafında bir negatif yüzey yüküne neden olarak metal tarafına akarlar. Buna bağlı olarak yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 3.2. b'de görüldüğü gibi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağı düşer. Hol konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken yüzeyi daha

fazla *p-tipi* olur. Elektronlar, metalden yarıiletken içindeki boş durumlara kolayca akabilirler. Bu yük hareketi, hollerin yarıiletkenden metale akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen holler yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı hemen nötralize olurlar. Ters beslem durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan holler de kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler. Böyle her iki doğrultuda akımı kolayca geçirebilen kontaklar, omik kontaklar olarak bilinir. Omik kontak, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde akım akışına minimum direnç gösteren bir metal/yarıiletken eklemidir (Brillson, 1993; Neamen, 1992). Akım-gerilim ilişkisi Ohm kanunu ile verilen kontaklar omik bir davranış sergilerler. Kontak direncinin değeri ise omik kontağın kalitesini belirler.



Şekil 3.2. Metal/*p-tipi* yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı a) kontak öncesi, b) kontak sonrası ve termal dengede, c) $V \neq 0$ durumunda.

3.2. Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkiler

İdeal bir metal/yarıiletken kontakta engel yüksekliği;

$$\Phi_{bn} = \Phi_m - \chi_s \quad (3.4)$$

ile verilir. Bu ifade Φ_m , kontak metalin iş fonksiyonu, χ_s yarıiletkenin elektron yatkınlığıdır. Bazı etkiler schottky engel yüksekliğinde sapma meydana getirebilir. Bunlardan birisi katotta emisyon akımının, artan alan kuvvetiyle artmasıdır. Bu etki, Schottky etkisi olarak bilinir ve katodun iş fonksiyonunun, yüzey alan kuvvetine bağlı olduğunu ifade eder. Metalden x uzaklığında, dielektrikteki bir elektron, elektrik alanı oluşturacaktır. Alan çizgileri, metal yüzeyine dik ve metal yüzeyinden içeriye doğru x mesafede lokalize olan $+e$ imaj yükü ile aynı olacaktır. İmaj yükü ile coulomb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etkiyen kuvvete de imaj kuvveti denir ve

$$F = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -eE \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir. Potansiyel ise;

$$-\Phi_x = \int_x^\infty E dx = \int_x^\infty \frac{e}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} dx = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} \quad (3.6)$$

olarak bulunabilir. Burada x integral değişkeni ve $x = \infty$ için potansiyeli sıfır kabul ettik. Dış elektrik alan sıfır iken potansiyel yukarıda en son verilen eşitlikle verilmiştir. Eğer dış elektrik alan sıfırdan farklı ise o zaman ilave bir terim gelir ve en son bulunan ifade şu şekilde olur.

$$-\Phi_x = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} - Ex \quad (3.7)$$

olur. 3.6 eşitliği x' nin küçük değerleri için geçerliliğini kaybeder ve x sıfıra giderken $-\Phi_x \rightarrow \infty$ 'a yaklaşır. Eşitlikteki ikinci terim dış alandan dolayı potansiyel engelindeki düşme miktarını ifade eder. Potansiyel engelinin bu düşmesi, Schottky etkisi ya da imaj kuvvet etkisiyle düşmesidir. Schottky engel düşmesini $\Delta\Phi$;

$$\frac{d[e\Phi_x]}{dx} = 0 \quad (3.8)$$

Şartından maksimum engelin konumu, X_m şu şekilde elde edilir.

$$X_m = \frac{e}{16\pi\epsilon_s E} \quad (3.9)$$

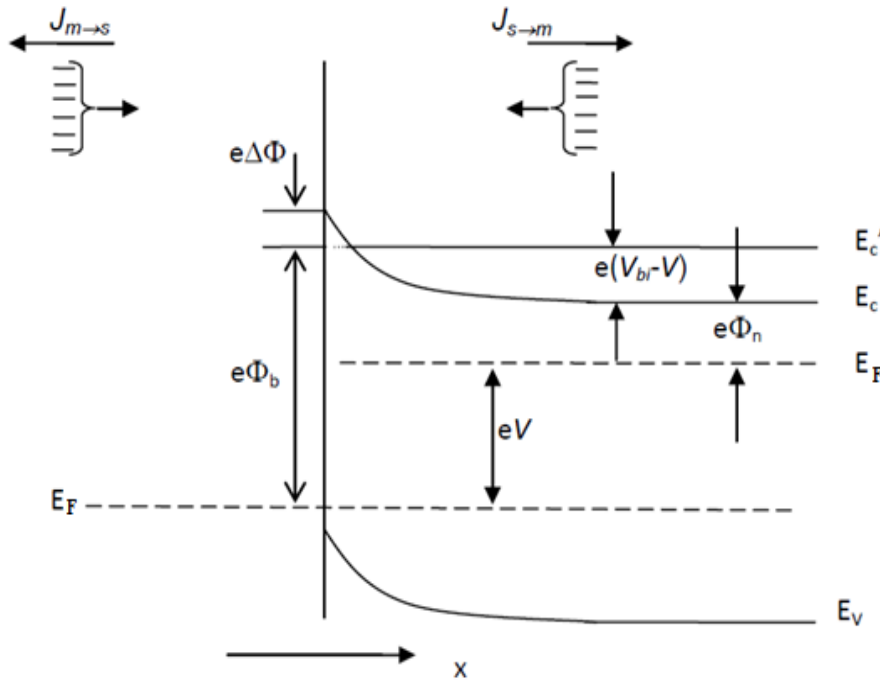
3.3. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları

Metal-yarıiletken kontakların dış gerilim altında akım-iletim mekanizmalarının tayini önemlidir. Kontakta arayüzey durumları, seri direnç, metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabaka, gerilimin yönü, sıcaklık, yarıiletkenin tipi gibi faktörlerin Schottky diyotlardaki etkisini dikkate alarak, hangi durumda, hangi iletim mekanizmasının oluştuğunu belirlemek, sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. MS (metal-yarıiletken) ve MIS (metal-yalıtkan-yarıiletken) yapılı kontaklarda başlıca akım-iletim mekanizmaları (Henisch, 1984)

- Termionik Emisyon Teorisi (TE)
- Difüzyon Teorisi
- Termionik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED)
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme Termionik Alan Emisyonu (TAE)
- Alan Emisyonu (AE), Çok katlı tünelleme
- Uzay yük bölgesinde yeniden birleşme

3.3.1. Termoiyonik emisyon teorisi

Schottky kontaklarda bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi termoiyonik emisyon teorisi ile açıklanmaktadır (Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı termoiyonik emisyon olarak bilinir.). Metal/yarıiletken Schottky diyotlarda termoiyonik emisyon teorisi taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir. Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Metal/*n-tipi* yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal/*p-tipi* yarıiletken Schottky diyotlarda ise boşluklar akımı sağlar. Termoiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için, doğrultucu kontağa ait potansiyel engelini, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve arınma bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok küçük olduğu kabul edilmektedir (Rhoderick and Williams, 1988).



Şekil 3.3. Düz beslem altındaki metal yarıiletken Schottky kontakta imaj azalma etkisine ait enerji-bant diyagramı.

Şekil 3.3’de V büyüklüğünde düz beslem gerilimi uygulanmış bir Schottky kontak görülmektedir. Burada $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletken metale doğru akan akım yoğunluğu ve $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğudur. $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu, x yönünde ve engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Bu durumda;

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E'_c}^{\infty} v_x dn \quad (3.10)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E'_c : Metal içindeki termoiyonik emisyon için gerekli minimum enerji, v_x : Taşıma yönündeki taşıyıcı hızı, dn : Artan elektron konsantrasyonu;

$$dn = G_c(E) f_F(E) d(E) \quad (3.11)$$

ile verilir.

$G_c(E)$: İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu

$f_F(E)$: Fermi- dirac ihtimaliyet fonksiyonu

Maxwell-Boltzmann yaklaşımını kullanarak elektron konsantrasyonu için;

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[-\frac{(E - E_c)}{kT}\right] dE \quad (3.12)$$

yazılabilir. $(E - E_c)$ enerjisi serbest elektronun kinetik enerjisi olarak kabul edilirse;

$$\frac{1}{2} m_n^* v^2 = (E - E_c) \quad (3.13)$$

$$dE = m_n^* v dv \quad (3.14)$$

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (3.15)$$

olur. Bu eşitlikler kullanılarak dn ifadesi yeniden düzenlenirse;

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp\left(\frac{-e\Phi_n}{kT}\right) \exp\left(\frac{-m_n^* v^2}{2kT}\right) 4\pi v^2 dv \quad (3.16)$$

olur. Bu denklem hızları v ile $v + dv$ arasında hızlara sahip birim hacim başına elektronların sayısını verir. Hız bileşenlerine ayrılırsa $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ dir. Differansiyel hacim terimi $(4\pi v^2 dv)$, $dv_x dv_y dv_z$ şekline dönüştürülerek (3.10) ifadesini şu şekilde yazabiliriz.

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp\left(\frac{-e\Phi_n}{kT}\right) \int_{v_{0x}}^{\infty} v_x \exp\left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT}\right) dv_x \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^* v_y^2}{2kT}\right) dv_y \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^* v_z^2}{2kT}\right) dv_z \quad (3.17)$$

şeklinde yazılır. v_{0x} hızı, x doğrultusunda elektronun potansiyel engelini aşabilmesi için gerekli minimum hızdır.

Bu ifadede şu değişken değiştirmeler yapılabilir.

$$\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \equiv \alpha^2 + \frac{e(V_{bi} - V)}{kT} \quad (3.18a)$$

$$\frac{m_n^* v_y^2}{2kT} \equiv \beta^2 \quad (3.18b)$$

$$\frac{m_n^* v_z^2}{2kT} \equiv \gamma^2 \quad (3.18c)$$

x yönünde engeli geçebilmek için gerekli minumum hız v_{0x} ,

$$\frac{1}{2} m_n^* v_{0x}^2 = e(V_{bi} - V) \quad (3.19)$$

yazılır. Bu durumda $v_x \rightarrow v_{0x}$ şartı için $\alpha = 0$ olur ve

$$v_x dv_x = \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right) \alpha d\alpha \quad (3.20)$$

Bu ifadeler (3.17)'da kullanılırsa;

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right) \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \exp \left[\frac{-e(V_{bi} - V)}{kT} \right] \\ x \int_0^\infty \alpha \exp(-\alpha^2) d\alpha \int_{-\infty}^\infty \exp(-\beta^2) d\beta \int_{-\infty}^\infty \exp(-\gamma^2) d\gamma \quad (3.21)$$

Son ifadenin integrali alınırsa;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e(\Phi_n + V_{bi})}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (3.22)$$

Ya da $\Phi_n + V_{bi} = \Phi_{bn}$ olarak yazılır ve eşitlik yeniden düzenlenirse;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\Phi_{bn}}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (3.23)$$

olur. Metalden yarıiletkene elektron akım yoğunluğu $J_{m \rightarrow s}$, tamamen $J_{s \rightarrow m}$ ile aynı şekilde elde edilir ve uygulanan alan sıfır ise;

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\Phi_{bn}}{kT} \right] \quad (3.24)$$

olur. Bu akım yoğunluğu sızıntı akımı olarak adlandırılan doyma akım yoğunluğuna karşılık gelir. Metal-yarıiletken eklemine net akım yoğunluğu J ;

$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} \quad (3.25)$$

yazılabilir. Metalden yarıiletkene doğru seçilen akım yoğunluğu pozitif olarak tanımlanırsa, bu durumda net elektron akım yoğunluğu;

$$J = \left[A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT} \right) \right] \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.26)$$

elde edilir. Burada A^* ; termoiyonik emisyonunda etkin Richardson sabiti olup

$$A^* = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) \quad (3.27)$$

ile verilir. Genel bir durum için net elektron akım yoğunluğu ifadesi alışılmış diyot formunda;

$$J = J_0 \exp \left(\frac{eV}{kT} - 1 \right) \quad (3.28)$$

yazılabilir. Burada J_0 ters doyma akımı yoğunluğudur (sızıntı akımı) ve;

$$J_0 = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT} \right) \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilir. Φ_{bn} schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti nedeniyle azalması ve $\Phi_{bn} = \Phi_{b0} - \Delta\Phi$ şeklinde verildiği dikkate alınırsa J_0 eşitliği;

$$J_0 = A^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{b0}}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\Delta\Phi}{kT}\right) \quad (3.30)$$

Engel yüksekliğindeki $\Delta\Phi$ değişimi artan elektrik alanla ya da artan ters beslem gerilimi ile artacaktır (Temirci ve ark., 2001).

3.4. Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Schottky Diyot Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Metal-yarıiletken kontak yapısının doğru beslem I - V karakteristikleri yardımıyla Schottky diyot parametrelerinin hesaplanmasında Cheung, (1986) tarafından farklı bir model sunuldu. Termoiyonik emisyonundan bulunan akım yoğunluğu (J), diyodun A etkin alanıyla çarpılırsa, diyottan geçen toplam akım;

$$I = A \cdot J = \left[AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{kT} - 1\right) \right] \quad (3.31)$$

olarak elde edilir. Bu ifadede $eV \gg 3kT$ ise, 1 ihmal edilir. Pratikte uygulanan voltajın tümü arınma bölgesinde düşmediğinden ideal durumdan sapmalar olacaktır. Bu ideal durumdan sapmaları da ifade edebilmek için, birimsiz bir sabit olan (n) idealite faktörünü de hesaba katmamız gerekir. Bu durumda akım denklemi

$$I = A \cdot J = \left[AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (3.32)$$

şekline dönüşür. Buradan uygulanan voltaj (V)'nın IR_s kadarlık voltajı seri direnç üzerinde düşeceği gözönüne alınırsa ($V \rightarrow V - IR_s$)

$$I = A \cdot J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (3.33)$$

şeklinde yazılabilir. Bu son ifadeyi V 'ye göre çözümlersek;

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) + n\Phi_{bn} + IR_s \quad (3.34)$$

olarak elde edilebilir. (3.34) eşitliğinin $\ln I$ 'ya göre türevi alınır

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (3.35)$$

elde edilir. (3.35) eşitliğinde $dV/d(\ln I)$ 'nın I 'ya göre grafiğinin bir doğru vereceği açıktır. Bu doğrunun eğimi, R_s seri direncini (nötral bölge direnci) verecektir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörü (n) bulunabilir (Cheung and cheung , 1986). Potansiyel engeli Φ_{bn} 'yi bulmak için;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \quad (3.36)$$

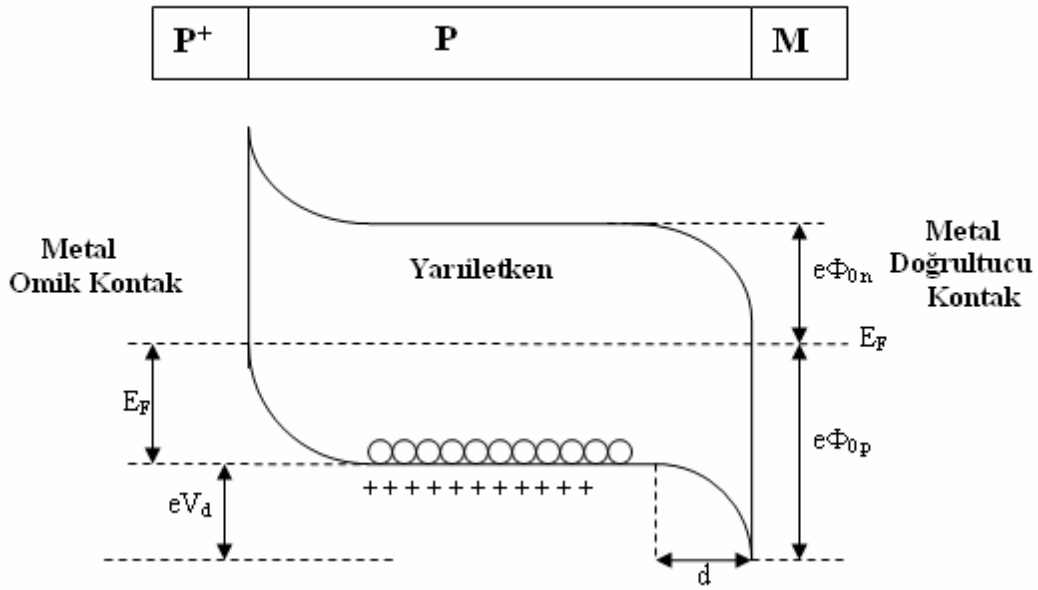
şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanabilir. (3.34) ve (3.35) eşitliklerinden

$$H(I) = n\Phi_{bn} + IR_s \quad (3.37)$$

şeklinde yazılabilir. (3.37) eşitliğinde $H(I)$ - I grafiğini çizilecek olursa yine bir doğru verecektir. Bu doğrunun eğimi, seri direnci (R_s) verecektir. Bu doğrunun $H(I)$ eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği $e\Phi_{bn}$ bulunur.

3.5. Metal-*p-tipi* Yarıiletken-Metal Yapısı

Metal-*p-tipi* yarıiletken- metal (P^+PM) yapısı *p-tipi* yarıiletkenin bir yüzeyine boşluk bakımından çok zengin P^+P omik kontağı ile diğer yüzeyine uygulanan PM doğrultucu kontağından meydana gelir. Termal dengede böyle bir yapının enerji bant diyagramı Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.4. P^+PM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant diyagramı.

P^+ omik kontak tarafına $V>0$ olacak şekilde bir gerilim uygulandığında, yapı doğru beslemde olur. P^+ tarafına $V<0$ olacak şekilde bir gerilim uygulandığında, yapı ters beslemde olur. P^+PM yapısı, diyot özelliğine sahip bir yapıdır. Böyle bir yapı kısaca yarıiletken diyot olarak adlandırılır. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi holler için engel yüksekliği $e\Phi_{p0} = eV_d + E_F$ ’ye eşittir.

3.6. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotların Engel Kapasitesi

Metal-yarıiletken yapılarda arınma bölgesi birbirine ters yüklenmiş uzay yükleri ve yüzey yükleriyle bir kondansatör gibi davranır. Ters bağlama durumunda gerilim artırıldığında yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar doğrultucu kontakta uzaklaşır. Buna bağlı olarak artan gerilimden dolayı arınma bölgesinin genişliği artar. Yarıiletkende metale yakın önemli bir hol yoğunluğu mevcutsa yeni Fermi seviyesi metaldeki Fermi seviyesi ile çakışacağından hol yoğunluğu düşecektir.

Bir metal bir yarıiletkenle doğrultucu kontak yaptığında ara bölgede bir kapasite oluşur. Bu ara bölgede Poisson denklemi ve sınır şartları yardımıyla bilinmeyenler bulunabilir. Bir doğrultucu metal/yarıiletken kontaktaki potansiyel dağılımı;

$$\frac{\partial^2 \Psi(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi(x, y, z)}{\partial z^2} = -\frac{\rho(x, y, z)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.38)$$

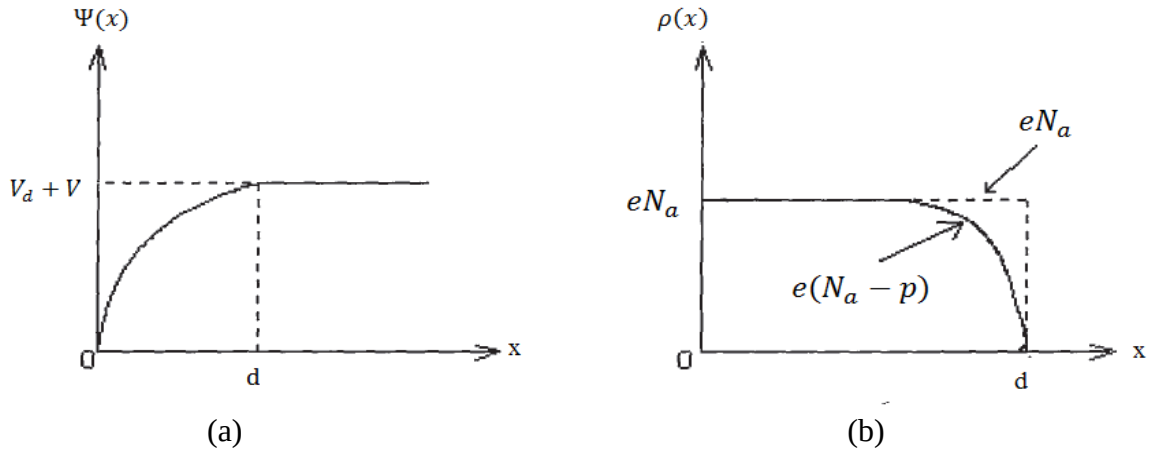
çözüldüğünde bu geçiş bölgesindeki engel yüksekliği ve dolayısıyla bu bölgenin kapasitesi bulunabilir. Bunun x, y ve z düzleminde çözümü karmaşıktır, bu nedenle akımın bir doğrultuda geçtiği varsayımıyla 3.38 bağıntısı;

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.39)$$

eşitliğine indirgenir. Buna göre Poisson denkleminin çözümünün sınırdaki $\Psi(x)$ potansiyel dağılımı bulunur. Burada ϵ_s yarıiletkenin, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, $\rho(x)$ konuma bağlı uzay yük yoğunluğudur. Uzay yükü yoğunluğu;

$$\rho(x) = e(N_a - N_d) \quad (3.40)$$

olarak yazılabilir (Rhoderick and Williams, 1988). Burada N_d , yarıiletkenin donör yoğunluğu, N_a , yarıiletkenin akseptör yoğunluğudur. $\Psi(x)$ potansiyel yoğunluğu ile uzay yük yoğunluğu $\rho(x)$ 'nin konuma göre değişikliği Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Metal/*p-tipi* yarıiletken yapısında: a) $\Psi(x)$ potansiyelinin x 'e göre değişimi, b) uzay yükü yoğunluğu $\rho(x)$ 'in x 'e göre değişimi.

Engel tabakasının difüzyon potansiyelini V_D ve kontağa uygulanan potansiyeli V temsil etsin. $e(V_D - V) \gg kT$ olduğundan $0 \leq x \leq d$ aralığında yük taşıyıcılar d uzunluğunda Debye difüzyon uzunluğu ile verilen bir bölgede kısmi olarak bulunacaktır. Dolayısıyla *p-tipi* yarıiletken için $N_a \gg N_d$ olduğundan uzay yük yoğunluğu için;

$$\rho(x) \cong eN_a \quad (3.41)$$

yazılabilir. Buradan;

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = -\frac{eN_a}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.42)$$

elde edilir. Bu son denklemin çözümü şu sınır şartları altında aranabilir.

- 1) $x = 0$ için $\Psi(x)=0$
- 2) $x = d$ için $\partial \Psi(x) / \partial x = 0$
- 3) $x \gg d$ için $\Psi(x) = V_D + V$

(3.43)

Denklem (3.42) için, ikinci sınır şartı göz önünde bulundurularak, integral alınırsa arınma bölgesi elektrik alanı elde edilebilir.

$$E(x) = -\frac{d\Psi(x)}{dx} = -\frac{eN_a}{\varepsilon_s\varepsilon_0}(x - d) \quad (3.44)$$

Bu denklemde birinci sınır şartı dikkate alınarak integral alınırsa;

$$\Psi(x) = -\frac{eN_a}{\varepsilon_s\varepsilon_0}\left(\frac{1}{2}x^2 - xd\right) \quad (3.45)$$

elde edilir. Denklem (3.45) çözümü üçüncü sınır şartıyla yapılırsa;

$$d = \left[\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0}{eN_a}(V_D \pm V)\right]^{1/2} \quad (3.46)$$

bulunur. Bu da Schottky bölgesinin genişliğidir. W_d (arınma bölge) engel bölgesinin genişliği, V uygulanan gerilim, V_D difüzyon potansiyeli olmak üzere Schottky bölgesinin genişliğini engel gerilimine bağlayan;

$$W_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0(V_D - V)}{eN_a}} \quad (3.47)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı düz beslem için geçerlidir. Ters beslemde V yerine $-V$ konulmalıdır. Bağıntıya göre Schottky engel genişliği uygulanan gerilim ve gerilimin yönüyle (polaritesiyle) veya yarıiletkenin safsızlık sayısı ile değiştirilebilir. Ayrıca Schottky tabakasının genişliği kullanılan yarıiletkenin safsızlık miktarı ayarlanarak istenilen değere getirilebilir.

Geçiş bölgesindeki uzay yükü; iyonize alıcı sayısı, bölgenin genişliği ve elektron yükünün çarpımı

$$Q = -eN_a \cdot W_d \quad (3.48)$$

ile verilir. 3.47 bağıntısı 3.48 bağıntısında yerine konulursa;

$$Q = -[2\varepsilon_s\varepsilon_0eN_a(V_D - V)]^{1/2} \quad (3.49)$$

bağıntısı elde edilir. Diğer taraftan kapasitenin;

$$C = \frac{Q}{V} = \left| \frac{dQ}{dV} \right| \quad (3.50)$$

şeklinde olduğu hatırlanır. Q 'nun V 'ye göre türevi alınır;

$$C = \left[\frac{\varepsilon_s\varepsilon_0eN_a}{2(V_D - V)} \right]^{1/2} \quad (3.51)$$

ifadesi bulunur. Bu bağıntıda dikkat edilirse Schottky kapasitesinin düz beslemde uygulanan gerilimle arttığı, ters beslemde azaldığı görülür. Schottky kapasitesi belirli bir ters beslem geriliminden sonra;

$$C = \frac{\varepsilon_s\varepsilon_0}{d} \quad (3.52)$$

geometrik kapasite değerine ulaşır. Görünüyor ki arınma bölgesinin kapasitesi, uygulama voltajı ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters, akseptör yoğunluğu ile doğru orantılıdır. 3.51 bağıntısı;

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_D - V)}{\varepsilon_s\varepsilon_0eN_a} \quad (3.53)$$

veya

$$-\frac{d(1/C^2)}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e N_a} \quad (3.54)$$

$$N_a = \frac{2}{e \varepsilon_s \varepsilon_0} \left(\frac{1}{d(1/C^2)/dV} \right) \quad (3.55)$$

şekillerinde de yazılabilir. N_a sabit olmak koşuluyla, $1/C^2$ 'nin V 'ye karşı çizilmiş grafiği çizgiseldir ve eğiminden N_a 'yı bulabiliriz. Eğer N_a sabit değil ise en son elde ettiğimiz bağıntıdan yararlanarak değişen kapasiteye bağlı olarak katkı eğilimi belirlenebilir.

3.7. Yüzey Hallerinin Varlığında Etkin Engel Yüksekliği

Bir *p-tipi* yarıiletken-metal doğrultucu (Schottky) diyodun enerji bant diyagramı Şekil 3.6'da görülmektedir. Burada $q\Phi_m$; metalin iş fonksiyonu, $q\chi$; yarıiletkenin elektron yatkınlığı, Δ ; arayüz tabakasındaki voltaj düşmesi, $q\Phi_0$; yarıiletken yüzeyinde valans bandının üst kenarından alınan, yüzey durumlarının nötral seviyesidir ve yük nötralitesinden dolayı üzerindeki bütün yüzey durumlarının dolu olması gerekli olan seviyeyi gösterir, V_d ; nötral bölgede valans bandının üstü ile Fermi seviyesi arasındaki potansiyel fark ve $\Phi_{bp,0}$; etkin engel yüksekliğidir. Arayüzey durum yük yoğunluğu $Q_{it}(C/cm^2)$;

$$Q_{it}(0) = -qD_{it}(q\Phi_{bp,0} - q\Phi_0) \quad (3.56)$$

olarak verilir. Burada D_{it} , akseptör gibi (acceptor-like) arayüzey durumlarının yoğunluğu olup, Φ_0 'dan Fermi seviyesine kadar enerji boyutu üzerinde sabit bir değer kabul edilir.

Yarıiletkenin deplasyon tabakasındaki uzay yük yoğunluğu,

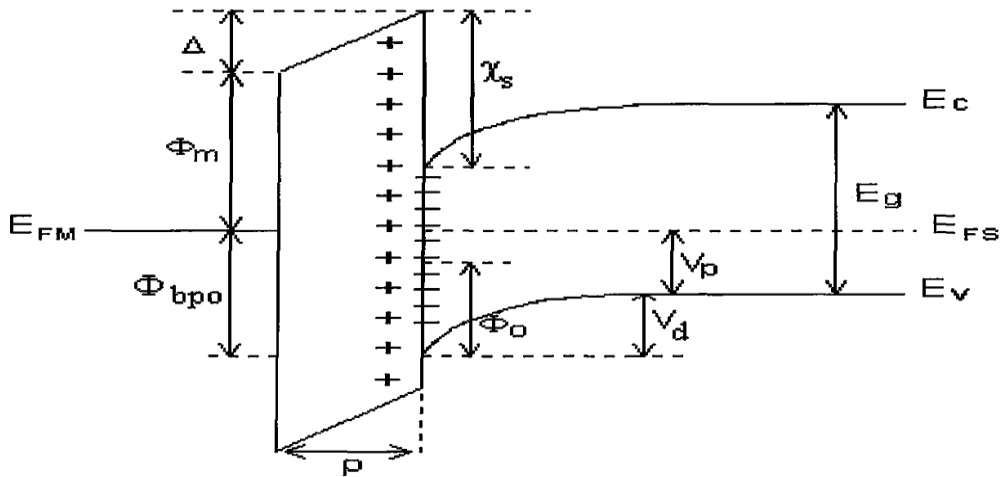
$$Q_{sc}(0) = -[2q\epsilon_s N_a (\Phi_{bp,0} - V_p)]^{1/2} \quad (C/cm^2) \quad (3.57)$$

olarak ifade edilir. Burada N_a , yarıiletkenin akseptör konsantrasyonu ve ϵ_s , yarıiletkenin dielektrik sabitidir.

Termal denge durumunda, enerji-bant diyagramına göre arayüzey tabakası boyunca düşen Δ potansiyeli, Gauss kanunundan

$$\Delta = (\delta/\epsilon_i)[Q_{it} + Q_{ss} + Q_{sc}] = -[E_g/q + \chi - \Phi_{bp,0} - \Phi_m] \quad (V) \quad (3.58)$$

olarak elde edilir.



Şekil 3.6. Bir metal *p-tipi* yarıiletken Schottky diyodun termal dengede enerji bant diyagramı.

Burada Q_{ss} ; yarıiletken arayüzeyinde mevcut, sabitleşmiş (fixed) yüzey yükü, δ ; arayüzey tabakasının kalınlığı ve ϵ_i ; arayüzey tabakasının permivitesidir.

(3.56), (3.57), (3.58) ifadeleri kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$= -[E_g/q + \chi - \Phi_{bp,0} - \Phi_m] = -[(2q\epsilon_s N_A \delta^2 / \epsilon_i^2)(\Phi_{bp,0} - V_p)]^{1/2}$$

$$-[(q^2 \delta D_{it} \varepsilon_i)(\Phi_{bp,0} - \Phi_0)] + (\delta/\varepsilon_i)Q_{ss} \quad (3.59)$$

Bu denklemden engel yüksekliği

$$\begin{aligned} \Phi_{bp,0} = & c_2(E_g/q + \chi - \Phi_m) + (1 - c_2)\Phi_0 + c_2(\delta/\varepsilon_i)Q_s\{(c_1 c_2^2/2) \\ & - [c_1^2 c_2^4/4 + c_1 c_2^3(E_g/q + \chi - \Phi_m + \delta Q_s/\varepsilon_i + ((1 - c_2)\Phi_0 - V_p)c_1 c_2^2)^{1/2}\} \end{aligned} \quad (3.60)$$

olarak elde edilir. Bu ifadede

$$\alpha = q^2 \delta D_{it} / \varepsilon_i \quad (\text{boyutsuz}) \quad (3.61a)$$

$$c_1 = 2q\varepsilon_s N_A \delta^2 / \varepsilon_i^2 \quad (V) \quad (3.61b)$$

$$c_2 = 1/(1 + \alpha) = \varepsilon_i / (\varepsilon_i + q^2 \delta D_{it}) \quad (\text{boyutsuz}) \quad (3.61c)$$

olarak alındı. Arayüzey tabakasının kalınlığı atomik boyutlarda olacağından c_1 çok küçük olur ve 3.60 ifadesinde $\{\}$ içindeki kısım ihmal edilebilir, sadece termal dengede etkin engel yüksekliği;

$$\Phi_{bp,0} = c_2(E_g/q + \chi - \Phi_m) + (1 - c_2)\Phi_0 \quad (3.62)$$

Yukarıdaki analizler dikkatlice takip edilerek, arayüzey tabakalı Schottky diyot için difüzyon potansiyeli $\Psi(V)$, uygulanan beslem potansiyelinin (V) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned} \Psi(V) = & \Phi_{bp} - c_2 V - V_p + c_2(\delta Q_{ss}/\varepsilon_i) + \left\{ (c_1 c_2^2/2) - \left[c_1 c_2^2(\Phi_{bp} - c_2 V - V_p + \right. \right. \\ & \left. \left. c_2(\delta Q_{ss}/\varepsilon_i)) + \frac{1}{4} c_1^2 c_2^4 \right]^{1/2} \right\} \end{aligned} \quad (3.63)$$

Burada c_1 'in küçük değeri için 3.63 eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\Psi(V) = \Phi_{bp} - c_2 V - V_p \quad (3.64)$$

İdeal bir metal-yarıiletken MS kontağının birim yüzey alanı başına deplasyon (arınma) bölgesinin sığası

$$C = [q\epsilon_s N_a / 2(V_d - V)]^{1/2} \quad (3.65)$$

olarak yazılabilir. 3.65 eşitliğinden

$$C^{-2} = 2(V_d - V) / q\epsilon_s N_a \quad (3.66)$$

yazabiliriz. Bu eşitlikten görüleceği üzere C^{-2} - V grafiğinden bir doğru elde edilir ve bu doğrunun V eksenini kestiği nokta V_d değerini verir. Arayüzey tabakalı bir metal-yarıiletken (MIS) kontak gözönüne alındığında deplasyon sığası C , şu şekilde ifade edilebilir:

$$C = c_2 \{q\epsilon_s N_a / 2[\Phi_{bp} - c_2 V - V_p]\}^{1/2} \quad (3.67)$$

ve

$$C^{-2} = 2[\Phi_{bp} - c_2 V - V_p] / c_2^2 q\epsilon_s N_a \quad (3.68)$$

Genel olarak yeterince yüksek frekanslarda yarıiletkenle dengede bulunan arayüzey halleri sığaya katkıda bulunmadığı durumda C^{-2} - V grafiği bir doğrudur. Bundan dolayı 3.68 eşitliği yüksek frekans C^{-2} - V grafiğinin eğiminin sabit olduğunu gösterir. C^{-2} - V grafiğinin eğiminden c_2 şöyle yazılır.

$$c_2 = 2 / \{q\epsilon_s N_a [d(C^{-2})/dV]\} \quad (3.69)$$

Doğrunun, yatay eksenini kestiği noktadan Φ_{bp} aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\Phi_{bp} = c_2 V_0 + V_p \quad (3.70)$$

olarak yazılabilir. Burada V_0 , doğrunun V eksenini kestiği noktadaki voltaj değeri olan kesişim voltajıdır.

Yarıiletken den metale çoğunluk taşıyıcı akım yoğunluğunu J_{s-m} ile, metalden yarıiletken e çoğunluk taşıyıcı akım yoğunluğunu J_{m-s} ile temsil edersek, net çoğunluk taşıyıcı akım yoğunluğu;

$$J = J_{s-m} - J_{m-s} = A^* T^2 Q_p \exp(-q\Phi_b/kT) \times \exp(-qV_i/kT) \exp[(qV/kT) - 1] \quad (3.71)$$

olarak ifade edilebilir. Burada A^* ; Richardson sabiti, $Q_p = a\delta\chi^{1/2}$; ince arayüzey tabakası boyunca transmisyon (tünelleme) sabiti, $a = 4\pi/h(m_p^*)^{1/2}$, etkin kütleye sahip bir sabittir. χ , arayüzey tabakasının ortalama engel yüksekliği ve V_i ; Schottky diyoda uygulanan bir doğru beslem voltajı (V) uygulandığında, arayüzey tabakası boyunca voltaj düşmesidir. Denge dışı durumda p -tipi Schottky diodun enerji bant diyagramı 3.7'de görülmektedir, burada doğru beslem voltajı (V), $V_i + V_F$ 'ye eşittir ve V_F , yarıiletkenin deplasyon tabakasındaki voltaj, Φ_b ise termal dengenin olmadığı (bir gerilim uygulandığında) durumunda engel yüksekliğidir. (3.71) eşitliği geliştirilen termoiyonik emisyon teorisi kullanılarak, arayüzey tabakalı bir kontak için yazılabilir. Doğru beslem durumunda, $qV/kT \gg 1$ (3.71) eşitliği

$$J_F = J_0 \exp(qV_F/nkT) \quad (3.72)$$

olarak yazılabilir. Burada J_0 ; doyma akım yoğunluğu olup;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.73)$$

ve n idealite faktörüdür. Bu durumda idealite faktörü, I - V karakteristiklerinin eğimi vasıtasıyla

$$1/n = d/dV_F[(kT/q)\ln(J_F/J_0)] \quad (3.74)$$

olarak elde edilir. Arayüzey durumları yarıiletkende dengede ise, idealite faktörü

$$n = 1 + \delta/\varepsilon_i[(\varepsilon_s/w) + qD_{it}] \quad (3.75)$$

olarak verilir. Burada w , uzay yük bölgesinin genişliği olup, aşağıdaki ifadeyle verilmektedir.

$$w = [(2\varepsilon_s/qN_a)V_d]^{1/2} \quad (3.76)$$

Burada V_d (difüzyon potansiyeli), C^{-2} - V grafiğindeki eğrinin $c_2 = 1$ için V eksenini kestiği noktadır. Arayüzey tabakasındaki durum yoğunluğu N_{ss} ($cm^{-2}eV^{-1}$) olmak üzere, sıfır beslemde (dengede) yüzey yük yoğunluğu;

$$Q_{ss}(0) = -qN_{ss}(\Phi_{b0} - \Phi_0) \quad (\text{coul}/cm^2) \quad (3.77)$$

olarak ifade edilebilir. Bu ifadede Φ_{b0} , metal tarafından engel yüksekliği ve Φ_0 , nötral seviyedir. Nötral seviye basit olarak, eğer yarıiletken yüzeyi yük bakımından nötr ise Fermi seviyesinin bulunduğu konumdur. Eğer nötral seviye ile Fermi seviyesi çakışmıyorsa yüzey yük bakımından nötr değildir. Uzay yük bölgesinin genişliği w olmak üzere, denge durumunda uzay yükü

$$Q_{sc}(0) = -qwN_a \quad (3.78)$$

ile ifade edilir. Burada uzay yük bölgesinin genişliği w için (3.76) eşitliğindeki V_d yerine V_{d0} yazacak olursak,

$$w = \left[\frac{2\varepsilon_s V_{d0}}{qN_a} \right]^{1/2} \quad (3.79)$$

olur. (3.79) eşitliği dikkate alınarak (3.78) eşitliği yeniden düzenlenirse,

$$Q_{sc}(0) = -[2q\epsilon_s N_a V_{do}]^{1/2} \quad (3.80)$$

olur. Termal denge durumunda arayüzey tabakasındaki potansiyel düşmesi

$$\Delta = E_g + \chi - \Phi_m - \Phi_{b0} \quad (3.81)$$

olarak yazılabilir. Termal dengede yük nötralizasyonu şartından aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$Q_m + Q_{ss} + Q_{sc} = 0 \quad (3.82)$$

Burada Q_m , metal tarafındaki yüzey yüküdür. Dengede arayüzey tabakasındaki potansiyel düşmesini, Gauss kanununu metal tarafındaki yüzey yüküne tatbik ederek şu şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta = -\frac{\delta}{\epsilon_i} Q_m = \frac{\delta}{\epsilon_i} [Q_{ss}(0) + Q_{sc}(0)] \quad (3.83)$$

3.83 ve 3.81 eşitliğinden;

$$Q_{ss}(0) + Q_{sc}(0) = \frac{\epsilon_i}{\delta} [E_g + \chi - \Phi_m - \Phi_{b0}] \quad (3.84)$$

elde edilir. (3.84) eşitliği denge durumunda, uzay ve yük yoğunluklarının toplamını ifade eder.

Yarıiletken-arayüz tabakası bölgesindeki yüzey yükünü $Q_{ss}(V)$, uygulanan V (doğru beslem voltajı altında) şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q_{ss}(V) = -qN_{ss}[\Psi_s(V) + V_p - \Phi_0] \quad (3.85)$$

Bu ifadede Ψ_s , yüzey potansiyeli ve Φ_0 , nötral seviyedir. Doğru beslem altında uzay yükü $Q_{sc}(V)$,

$$Q_{sc}(V) = -qN_a w = -[2q\epsilon_s N_a \Psi_s(V)]^{1/2} \quad (3.86)$$

yazılabilir. Gauss kanununu metal tarafındaki yüzey yüküne tatbik ederek, beslem altında arayüzey tabakasındaki voltaj düşmesini $V_i(V)$,

$$V_i(V) = \frac{\delta}{\epsilon_i} [Q_{ss}(V) + Q_{sc}(V)] \quad (3.87)$$

olarak yazabiliriz. Ayrıca 3.6'dan beslem altındaki voltaj düşmesi $V_i(V)$ ni

$$V_i(V) = - \left[\frac{E_g}{q} + \chi - \Psi_s(V) - V_p - (V - IR_s) - \Phi_m \right] \quad (3.88)$$

olarak yazabiliriz. Burada $\Psi_s(V)$, yüzey potansiyeli olup (3.85)-(3.88) eşitliklerinden

$$\Psi_s(V) = \Phi_{b0} - c_2(V - IR_s) - V_p \quad (3.89)$$

şeklinde elde edilir. Burada c_2 ;

$$c_2 = \frac{1}{n} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + q^2 N_{ss} \delta} \quad (3.90)$$

ile verilir. (3.89) ve (3.90) eşitlikleri dikkate alınarak (3.88) eşitliğinin V 'ye göre türevi;

$$\frac{dV_i(V)}{d(V)} = \left(\frac{n-1}{n} \right) \left(1 - R_s \frac{dI}{dV} \right) \quad (3.91)$$

olarak elde edilir. 3.85 eşitliğinin V 'ye göre türevi alınıp, 3.89 eşitliğide dikkate alınır,

$$\frac{dQ_{ss}(V)}{dV} + \frac{dQ_{sc}(V)}{dV} = \frac{\varepsilon_i}{\delta} \left[\left(\frac{n-1}{n} \right) \left(1 - R_s \frac{dI}{dV} \right) \right] \quad (3.92)$$

eşitliği elde edilir. (3.91) ifadesinin integralini alırsak,

$$Q_{ss}(V)Q_{sc}(V) = \frac{\varepsilon_i}{\delta} \left[\left(\frac{n-1}{n} \right) (V - IR_s) \right] + C \quad (3.93)$$

denklemini elde edilir. Burada, C integral sabiti olup, $V \rightarrow 0$ iken $I \rightarrow 0$ şartına göre çözülür ve (3.93) eşitliği buna göre yeniden yazılırsa,

$$Q_{ss}(V) = \frac{\varepsilon_i}{\delta} \left[\left(\frac{n-1}{n} \right) (V - IR_s) \right] + [Q_{ss}(0) + Q_{sc}(0)] - Q_{sc}(V) \quad (3.94)$$

olarak bulunur. (3.94) eşitliği, beslem altında yarıiletken-arayüz tabakası bölgesindeki yüzey yük yoğunluğunu ve uzay yük yoğunluğunu, denge durumundaki parametreleri de kullanarak ifade eder.

Metal yarıiletken kontaklarda bir yarıiletken tabaka varsa yani diyot bir MIS (Metal-yalıtkan-yarıiletken) diyodu şekline dönüşmesinde tünellemeden ötürü termiyonik emisyon akımı

$$I = AA^*T^2 \exp(-\Phi^{1/2}\delta) \exp\left(-\frac{q(\Psi_s + V_p)}{kT}\right) \quad (3.95)$$

olarak ifade edilir (Chattopadhyay and Raychaudhri, 1991). Burada A ; etkin diyot alanı, A^* ; Richardson sabiti, $\Phi^{1/2}\delta$; arayüzey tabakasının kalınlığından (δ) dolayı tünelleme sabiti, Ψ_s ; yüzey potansiyeli, T ; mutlak sıcaklık ve k ; boltzman sabitidir.

(3.83) ve (3.95)'den doğru beslem akım-voltaj (I - V) karakteristiklerini

3.8. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarında Arayüzey Tabakası ve Arayüzey Hallerinin Etkileri

Tanım olarak bir arayüzey durumu yarıiletken ile metal arasında girilebilir bir enerji seviyesidir. Arayüzey durumları donör veya akseptör tipte olabilirler. Donör tipte enerji düzeyi dolu iken yüksüz, boşken pozitif yüklüdür. Akseptör tipte enerji düzeyi dolu iken negatif yüklü, boşken yüksüzdür. İletim veya değerlik bandı ile yük değiş tokuşu yapabilen arayüzey durumları yarıiletken ile metal arasındaki arayüzey yakınında yer alır.

Schottky-Mott teorisine göre Schottky diyotlarında engel yüksekliği, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki farka eşittir. Bu nedenle potansiyel engel yüksekliğin metalin iş fonksiyonu ile orantılı olduğu kabul edilir. Bardeen, yarıiletken üzerinde yüzey halleri konusunda yaptığı çalışmalarda *n-tipi* bir yarıiletken ile doğrultucu kontak haline getirilen bir metalin *p-tipi* için omik kontak oluşturması gerekirken doğrultucu kontak da oluşturabileceğini açıkladı. Yüzey halleri yarıiletkenin içini metalden perdeleyerek engel yüksekliğinin beklenen değerden daha değişik olmasına sebep olur. Söz konusu modelde de yarıiletken ile metal arasında yüzey hazırlama şartlarına bağlı olarak bir yalıtkan arayüzey tabakası oluşabilir. Arayüzey hallerine aşağıda sıralanan durumlarda rastlanabilir.

1) Metal ile kontakta önce yarıiletken ve vakum seviyesi ara yüzeyinde mevcut olan asal yüzey halleri olarak rastlanabilir. Bu durum genel olarak yarıiletken kristalin periyodik yapısının yüzeyde keskin bir şekilde son bulmasıyla ortaya çıkar.

2) Yarıiletken metal ile kontak haline getirildikten sonra yarıiletkenle arayüzey tabakası arasında lokalize olmuş asal olmayan arayüzey halleri şeklinde de rastlanılabilir. Bu hal genel olarak kontak yapılan yarıiletken yüzeylerin yeterince temiz olmayışı durumunda yüzeyde biriken yabancı atomların varlığından dolayı oluşur.

3) Kontak yapan metal ve yarıiletkenin yüzey tabakasında bulunan kusur ve safsızlıklardan oluşan asal olmayan yüzey halleridir. Bu haller, yarıiletkenin yüzeyine metal buharlaştırıldıktan sonra, yarıiletkenin ince bir tabakasıyla metalden ayrılırlar. Böylece bu hallerin yarıiletkenle dengede olduğu kabul edilir. Uygulamalarda en çok

rastlanan arayüzey halleri bunlardır. Bu arayüzey halleri Schottky diyot karakteristiklerinin beklenenden farklı çıkmasına, deneysel ve teorik sonuçların farklılıklar göstermesine sebep olurlar. Schottky engel diyotlarını ideallikten uzaklaştıran başka bir etkende, metal ve yarıiletken arasında ince bir oksit tabakasının oluşmasıdır. Kontak metali ile yarıiletken yüzeyi arasındaki kimyasal reaksiyonlardan da ortaya çıkabilir. Bazen metal temiz yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırıldığı zaman metal ve yarıiletken arasında kimyasal bir reaksiyon oluşur. Bu reaksiyonlardan dolayı arayüzeyde yeni bir arayüzey tabakası oluşabilir. Bu tabaka boyunca potansiyel düşmesinden dolayı ısı dengedeki sıfır beslem engel yüksekliğinin ideal bir Schottky diyotunkinden daha düşük olması gibi bir etki meydana gelir. Bu etkiler Schottky diyotların $C-V$ ve $I-V$ karakteristiklerin bazı değişmelerine sebep olur. Bu ideallikten sapmalar doğru beslem $I-V$ karakteristiklerinde idealite faktörü ile ifade edilir. Ters beslem $I-V$ karakteristiklerinde artan uygulama voltajıyla ters beslem akımı artar ve doyma akımı gözlenmez. Arayüzey halleri, ancak düşük frekanslarda alternatif akım sinyallerine cevap verdiklerinden dolayı (dolup boşaldıklarından), yüksek frekanslarda değil düşük frekanslarda ($\nu < 1$ MHz) engel sığasına katkıda bulunurlar. Düşük frekanslarda; arayüzey tabakası sığası Schottky engel sığası ile seri, arayüzey hallerinin sığası ise Schottky engel sığası ile paralel kabul edilir. Arayüzey tabakasının sığası o kadar büyüktür ki Schottky engel sığasına olan katkısı ihmal edilir.

3.9. Organik Yarıiletkenler

Son yıllarda organik elektronik aygıtlar optoelektronik teknolojide en çok dikkat çeken alanlardan bir tanesidir. Bu aygıtlar fonksiyonlarına göre üç ana sınıfa ayrılır: Organik ışık yayan diyot (OLED), organik güneş pilleri, organik ince film transistörler (OTFT). Fonksiyonları bir yana, bu aygıtlar genelde anot/organik malzeme/katod şeklindeki bir sandviç yapıya sahiptirler. OLED’lerde genelde aygıt ışıkla temasa izin veren ve mekanik desteği sağlayan düz bir cam üzerine büyütülür. Ortadaki aktif organik malzeme organik yarıiletken olarak adlandırılır. Bir organik yarıiletken zayıf van der Waals kuvvetleriyle bağlanmış organik molekül düzenine sahiptir. Bu moleküller elektriksel iletimden sorumlu olan gevşek-elektronları içerir. OLED ve

güneş pillerinde organik yarıiletkenler genellikle normal yarıiletkenlerin aksine bir yalıtkan gibi davranır. OTFT uygulamalarında iletkenlikleri daha fazladır.

İnorganik elektronik aygıtlarda (ışık yayan diyotlar-LED), Si tabanlı alan etkili transistörler, vb.) aktif elektronik malzemesi olarak kristal olarak bilinen inorganik malzemeleri kullanılır (Sze ve ark., 2006). Bunun bir sonucu olarak inorganik yarıiletkenler çok sert yapıdadır. Organik aygıtlarda ise polikristal ya da amorf denilen organik yarıiletkenler kullanılır. Organik yarıiletkenlerin inorganik yarıiletkenlere göre bazı üstün özellikleri vardır. Bunlardan ilki, organik yarıiletkenlerin mekanik olarak esnek olmalarıdır. Bu özelliklerinden ötürü bükülebilir elektronik aygıtlar elde etmek için plastik bir yüzey üzerine büyütülebilirler (bükülebilir ve taşınabilir organik güneş pilleri). Ayrıca zayıf bağlı van der Waals kuvvetlerinden dolayı organik yarıiletkenlerin sıcaklık süreçleri inorganiklere göre daha zayıftır. Bundan dolayı belli bir süre içinde çok fazla üretim yapılabilen tekniklerle büyütülürler. Organik sentezindeki çok yönlülüğünden dolayı, organik malzemeler aygıtın uygulamasına göre farklı özelliklerde sentezlenebilir. Örneğin molekülün moleküler ağırlığı, yasak enerji aralığı, moleküler orbital enerji seviyeleri, yapısal özellikler ve katkılama gibi malzemeye ait birçok özellik ve parametre değiştirilebilir (So, 2010).

Organik elektronik malzemelerin sayılan avantajlarının yanında bazı zorlukları da mevcuttur. Bu zorlukların başında organik malzemenin kararlılığı gelmektedir. Van der Waals kuvvetleri organik yarıiletkenlerin esnekliğine yol açtığından aynı zamanda bu malzemelerin erime noktasını ve cam geçiş sıcaklığını düşürür. Tipik olarak pratik malzemelerde cam geçiş sıcaklığı 100 °C'den daha düşüktür. Bu yüzden organik yarıiletkenlerin ince filmleri ısıya dayanıklı değildir. İnce film cam geçiş sıcaklığına ulaştığında organik film kristal olma eğilimindedir ve yakın elektron kontakta ya da organik filminden tabakalara ayrılır. Bu nedenle organik filmin ısısal olarak daha dayanıklı olmasını sağlayacak çalışmalar devam etmektedir. Organik elektronik aygıtlardaki bir diğer zorluk ise elektriksel süreçlerin anlaşılmasında yatar. Bir organik yarıiletken büyük bir enerji aralığına sahiptir. Bu yüzden oda sıcaklığında bile ısısal yolla oluşan çok sayıda taşıyıcı vardır. Uygun işlemlerle iç elektrottan serbest yük taşıyıcıların enjeksiyonu sağlanır. Organik yarıiletkenlerin taşıyıcı mobiliteleri inorganiklere göre çok daha küçüktür.

3.9.1. Organik yarıiletkenlerin temel özellikleri

Organik yarıiletkenler karbon tabanlı küçük moleküller ve polimerler olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Moleküler organik elektronik materyaller kendisini tekrarlamayan oldukça küçük moleküllerdir ve aynı zamanda monomerler olarak da adlandırılırlar. Polimer organik elektronik materyaller ise tekli, ikili veya daha çok monomerin (kopolimer) bağlı zincirlerinden oluşur. Hem monomer hem de polimer malzemeler konjuge bantların bel kemiğini içerir. Molekülde iletim bu bantlar sayesinde gerçekleşir. Polimerler küçük moleküllere oranla daha çok çözelti durumunda bulunur. Bu yüzden polimerler bir çözeltilerden spin kaplama yöntemi yardımıyla büyütülürler. Küçük moleküller ise genellikle vakumda buharlaştırma ya da süblimleşme gibi yöntemler ile büyütülmektedirler. Hem polimer hem de moleküler aygıtlar taşıyıcı enjeksiyonunu optimize etmek ve optik emisyonunda taşıyıcıların yeniden birleşme verimini kontrol etmek için çoklu tabakalar içerirler. Ayrıca polimerlerin bir üstünlüğü de ince aktif tabakada pinholler ve küçük molekül filmlerdeki diğer kusurlar olmadan üretilir. Bu durum aygıtın daha düşük potansiyel altında oluşumuna izin verir (Rockett, 2008).

Organik elektronik malzemeler tamamen konjuge yapıdadır. Yani kendi yapıları boyunca devamlı bir çift bağ yapısına sahiptir. Konjuge moleküller çiftli bağları kırarak yükleri iletebilir. Kırılan bandın yeniden oluşturulması ışık yayımına sebep olabilir. Konjuge organik malzemelerde temel özellik molekülün uzunluğu boyunca çift bağların sürekli bir seri olmasıdır. Burada zincirdeki her bir karbon atomu yakın komşularıyla bir bağ yapar ve ikili bağ zincirleri oluştururlar. Çünkü her bir karbon atomu ikili bağ yapısına bir bağ katkı yapar (Rockett, 2008).

Moleküller katı fazda olduğunda zayıf van der Waals bağlarıyla etkileşirler. Bu etkileşim yeterince zayıfsa içerisinde moleküllerin hiçbir uzun menzilli düzen göstermediği düzensiz bir katı oluşur. Bu düzensizlik molekülün lokal çevresinin, geometrisinin ve moleküldeki kimyasal kusurların bir sonucudur. Ayrıca zayıf etkileşimlerden dolayı komşu moleküllerin merkezindeki dalga fonksiyonun moleküller arası üst üste gelmesi oldukça küçüktür. Bu yüzden organik yarıiletkenlerin elektriksel karakterleri moleküler enerji seviyeleri göz önüne alınarak incelenir (So, 2010).

3.9.2. Organik yarıiletkenlerde akım iletim mekanizması

Organik katı bir molekülde deşik ve elektronların geçişini incelemek için iyonik moleküler seviyelerin göz önüne alınması gerekmektedir. Örneğin, nötr molekülünden bir katyon oluşturularak bir elektron kopartılabilir. Bu elektron bir molekülden diğerine hareket edebilir. Elektron geçişi aynı zamanda negatif yüklü bir iyonu gerektirir. Polimerler için bu durum pozitif ve negatif polaranlar tarafından gerçekleştirilir. Gaz fazındaki yalıtılmış moleküllerle kıyaslandığında, bu iyonik seviyeler katıda polarizasyon enerjileri nedeniyle kararlıdır. Temel seviye ile ilk uyarılmış tekli seviye arasında optiksel aralık eksitonuna karşılık gelen bağlantısız bir elektron-deşik çifti oluşturmak için gerekli tek parçacık enerji aralığından önemli ölçüde daha küçüktür. Moleküler kristallerden düzensiz organik katılara gidildiğinde, farklı moleküler düzenlemelerden dolayı bölgesel değişen polarizasyon enerjisi göz önüne alınır. (Brütting, 2005).

Organik yarıiletkenlerde taşıyıcı yük geçiş mekanizması aşamaları, band ve hopping geçişi olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Band geçişi genellikle çok yüksek sıcaklıklarda olmayan yüksek saflıktaki organik kristallerde gözlenir. Bununla birlikte, elektronik lokal bozulmalar zayıf olduğundan, band genişliği inorganik yarıiletkenlerle kıyaslanacak kadar küçüktür (oda sıcaklığında birkaç kT civarında). Bu yüzden moleküler bir kristalde oda sıcaklığındaki mobiliteler $1-10 \text{ cm}^2/Vs$ arasındaki değerleri alır. Band geçişinin karakteristik bir özelliği olarak sıcaklık bağımlılığı, düşük sıcaklıklara gidildikçe $\mu \propto T^{-n}$ şeklinde daha güçlü bir davranış izler (Brütting, 2005). Diğer bir geçiş türü olan hopping geçiş mekanizması ise 1993'te Landau tarafından önerilen bir mekanizmadır. Organik bir yarıiletkende yük taşıyıcıları hareket ettiği zaman kusurlardan, düzensizliklerden ya da polarizasyondan kaynaklanan potansiyel tarafından lokalize olurlar. Yük iletimi, ısısal olarak aktiflendirilmiş örgü titreşimlerinden dolayı iki komşu molekül arasındaki yüklerin zıpladığı bir molekül içi süreçtir. Hopping hareketi, adyabatik olmayan elektron transfer reaksiyonu olarak bilinir (So, 2010). Bu tür geçişlerde mobilité değeri düşerek $10^{-3} \text{ cm}^2/Vs$ değerine yaklaşır.

Organik yarıiletkenlerdeki taşıyıcı yoğunluğunu arttırmak için;

- Elektrokimyasal katkılama
- Kontaklardan taşıyıcı enjektisi
- Taşıyıcıların fotonlarla oluşturulması
- Alan etki katkılama

gibi işlemler yapılabilir (Brütting, 2005).

3.9.3. Organik yarıiletken aygıtlar

Son zamanlarda organik yarıiletkenler avantajlarından dolayı organik yarıiletken aygıt yapım çalışmaları farklı bir ivme kazandı. Elektronik ve optoelektronik teknolojilerinde daha çok, OLED, OFET ve organik güneş pilleri gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. OLED'ler elektrik akımı uygulandığında ince bir film tabakası halinde organik moleküller kullanılarak imal edilmiş ışık üretebilen cihazlardır. İki metal arasına bir ya da daha fazla organik yarıiletken tabaka konulmasıyla hazırlanır. Anot ve katot iş fonksiyonları bakımından farklıdır. Hem anot hem katot yarı geçirgen olabilir. Elektrolüminesans durumunda cihaz ışık yayan diyot (OLED) olarak adlandırılır. OLED'ler çoğunlukla düz ekran için kullanılmaktadır. LCD teknolojisine alternatif olarak sunulmaktadır. Düşük enerji tüketmesi, ince ve hafif olması gibi özelliklere sahip olmaları nedeniyle son zamanlarda cep telefonlarında kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Başlangıçta gösterge uygulamaları için geliştirilen OLED'ler parlak renkli görüntüleri ile düşük güçte geniş görüş açısı sağlayan ekranların yapılabilmesini sağladılar (Zafer, 2006; El-Nahass ve ark., 2005).

3.10. Norde Metodu

Schottky diyotlarının en önemli elektriksel parametreleri olan engel yüksekliği (Φ_{bn}), idealite faktörü (n) ve seri direnç (R_s) değerlerini hesaplamak için genel olarak, deneysel $I-V$ ve $C-V$ karakteristikleri kullanılır. Ancak R_s çok büyük ve ara yüzey durumları yeterince yüksek ise $I-V$ ve $C-V$ karakteristikleri ideal durumdan sapmalar

gösterir. Bu durumda hesaplamalar daha karışık bir hal almakta ve hesaplanan temel parametrelerin güvenilirliği azalmaktadır (Karataş ve Altındal, 2004). Schottky diyotları için doğru gerilim I - V karakteristiği $eV \gg 3kT$ sınırında azınlık taşıyıcıların etkisi ihmal edilirse TE teorisine göre, bir diyodun ideal durumdan sapmalarını ifade edebilmek için birimsiz sabit olan (n) idealite faktörünü dikkate alıp akım denklemi (3.32)'de verilmiştir. Seri direncin varlığında termoiyonik emisyon teorisi denklem (3.33)'de verilmiştir. Dolayısıyla idealite faktörü 1 kabul edilir ve denklem (3.34) yeniden düzenlenirse;

$$V - \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) = n\Phi_{bn} + IR_s \quad (3.99)$$

olur. Schottky engel diyotlarda doğru beslem akım-voltaj grafiğinde voltaj değeri arttıkça lineer bölge azalır. Yani, seri direncin yüksek olduğu yerde, lineer bölge $kT/e \ll V \ll IR_s$ aralığında, sınırlanır ve geleneksel yarı logaritmik I - V grafiğinden hesaplanan parametrelerde güvenilir sonuçlar elde edilemez. Bu durumda bu grafikten hesaplanan, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerinin daha doğru hesaplanması için, yeni yöntemlere ihtiyaç duyulur.

Bunlardan ilki Norde tarafından, ideal durum için ($n=1$) seri direnç ve engel yüksekliğini tanımlanan bir $F(V)$ fonksiyonu yardımıyla elde edilmesi amaçlanmıştır (Norde, 1979). Bohlin ise Schottky diyodunun I - V ölçümünden elde edilen $1 < n < \gamma$ (γ keyfî bir sayı olmak üzere) durumunda R_s ve Φ_{bn} 'nin belirlenmesini mümkün kılabilen Norde fonksiyonunun modifiye edilmiş bir modelini ileri sürer (Bohlin, 1986).

Her iki taraftaki potansiyel varlığı için 3.99 denklemi yeniden düzenlenirse sağ taraftaki eşitlikten;

$$F(V) = n\Phi_{bn} + IR_s - \frac{V}{2} \quad (3.100)$$

elde edilecektir. Bu (3.100) eşitliğinde ideal bir durumda $R_s = 0$ için eğimi $-1/2$ olan lineer bir çizgi elde edilecektir. Bu lineer çizginin $F(V)$ eksenini kestiği nokta ise Φ_{bn} değerini verecektir. Eşitlik (3.99) yeniden düzenlenirse;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (3.101)$$

olacaktır. Norde fonksiyonu seri direncin küçük olduğu durumlarda geçerliliğini korurken, ideal olmayan yapılar için geçerli olan diyot parametrelerini hesaplama yöntemi, Norde fonksiyonları değiştirilerek gerçekleştirilmiştir (Bohlin, 1986).

$$F(V) = \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (3.102)$$

γ , n 'den büyük ilk tamsayı değeridir. $I(V)$, I - V karakteristiğinden elde edilen akım değeridir. Engel yüksekliği; $F(V)$ - V grafiğinin minimum noktası bulunduktan sonra hesaplanır. Engel yüksekliği,

$$\Phi_{bn} = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{e} \quad (3.103)$$

Burada $F(V_0)$, $F(V)$ - V grafiğinin minimum $F(V)$ noktasındaki değeridir ve V_0 değeri bu minimum noktadaki voltaj değeridir. Seri direnç;

$$R_s = \frac{kT}{e} \frac{(\gamma - n)}{I_0} \quad (3.104)$$

formülü ile bulunur. Burada I_0 , V_0 minimum noktasındaki akım değeridir.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Giriş

Bu bölüm *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* metal-yarıiletken (Schottky) kontak diyodun yapımı için izlenen yöntemleri içerir. Bu çalışmada kullanılan kontaklar, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü yarıiletken işlem laboratuvarı'nda bulunan 'EDWARDS Auto-306 turbo moleküler pompalama sistemli vakum kaplayıcı' (Auto-306 coater with turbo molecular pumping system) cihaz kullanılarak üretilmiştir. Diyot parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç) ve karakteristikleri için, 'Keithley 6487 pikoampermetre/voltaj kaynağı' (Keithley 6487 picoammeter/voltage source) cihazı, kapasitans-voltaj ve kapasitans- frekans ölçümleri için ise 'Agilent' firmasının 'HP 4294A (40Hz-110MHz) impedance analyzer' cihazı kullanılmış. Elde edilen diyot parametreleri ve karakteristikleri bu bölümde yer almaktadır.

4.2. Numunelerin Hazırlanması ve Temizlenmesi

4.2.1. *p-Si* [100] kristalinin kimyasal olarak temizlenmesi

Bu çalışmada [100] doğrultusunda Czochralski yöntemiyle büyütülmüş, 610-640 μm kalınlıklı, öz direnci $\rho=12-16 \Omega\text{-cm}$ olan *p-Si* kristali kullanılmıştır. Diyot yapımında iyi netice alınabilmesi için, kullanılacak numunenin yüzeyinin organik ve mekanik kirlere arınmış olması gerekir. Numunelerin kimyasal olarak temizlenmesi için aşağıdaki aşamalar takip edildi.

- 1) Kristali yağdan ve diğer kirlere arındırmak için Trikloretilen (C_2HCl_3) ile oda sıcaklığında ultrasonik olarak 5 dakika yıkandı.
- 2) Kristal saf su ile 4 kez yıkandı.
- 3) Asetonla (CH_3COCH_3) ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.

- 4) Kristal saf su ile 2 kez yıkandı.
- 5) Metanol ile ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 6) Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 7) RCA1 (veya SC-1) ($H_2O: H_2O_2: NH_3$; 6:1:1) prosedürü ile 60°C’de 10 dakika kaynatıldı.
- 8) Seyreltik HF ($H_2O: HF$; 10:1) ile 30 saniye yıkandı.
- 9) RCA2 (veya SC-2) ($H_2O: H_2O_2: HCl$; 6:1:1) prosedürü ile 60°C’de 10 dakika kaynatıldı.
- 10) Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 11) Seyreltik HF ($H_2O: HF$; 10:1) ile 30 saniye yıkandı.
- 12) 15-20 dakika akan deiyonize su ile yıkandı.
- 13) Azot gazı (N_2) ile kurutuldu.

Ayrıca buharlaştırma işleminde kullanılacak metallere (*Al* ve *Au*) kimyasal temizleme işlemi yapıldı. Metal pelet yada toz şeklindedir. *p-Si* kristalinin yüzeyine göre peletten 0.00045 gr alınarak beher içine konuldu.

- 1) Asetonla ultrasonik olarak 5 dakika yıkandı.
- 2) Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 3) Metanolla ultrasonik olarak 5 dakika yıkandı.
- 4) Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 5) Kağıt üzerine konularak kurutuldu.

4.2.2. *p-Si* [100] kristaline alüminyum (*Al*) omik kontak yapılması

Kontağın iyi bir omik karakter gösterebilmesi, *Al*’un *p-Si* içerisine iyice difüze olması ile ilgilidir. Bu da şöyle mümkündür:

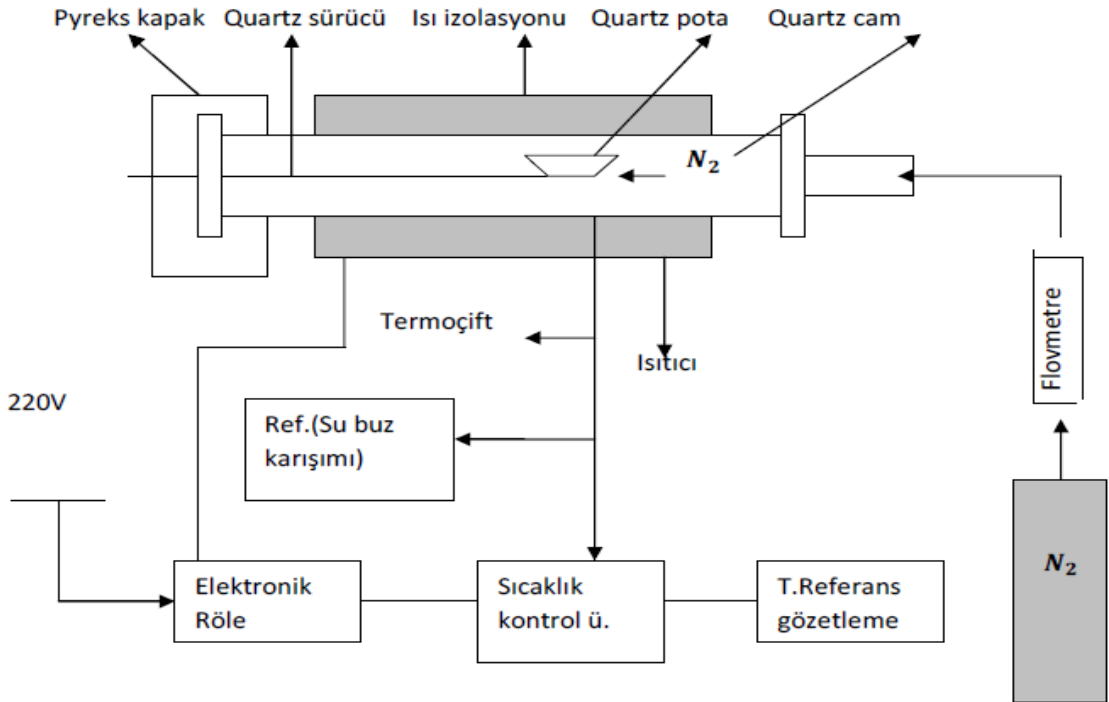
- 1) Omik kontak *p-Si*’un mat (pürüzlü, girintili çıkıntılı) tarafına yapılmalıdır.
- 2) Buharlaştırılan *Al*’un *p-Si* içerisine iyice difüze olması için buharlaştırma esnasında örnek tutucu ısıtıcıya yakın tutulmalıdır.

Omik ($p-Si$) kontak yapmak için;

- 1) Buharlaştırma ünitesinde bulunan ve buharlaştırılacak malzemenin (Al) konacağı tungsten ısıtıcı önce %10'luk HCl ile yıkandı. Deiyonize su ile iyice yıkanıp temizlendi. Hemen kurutuldu ve buharlaştırma ünitesine yerleştirildi. Muhtemel kirlilik kalıntılarını gidermek için buharlaştırma ünitesi çalıştırılıp vakum yapıldı ve ısıtıcıya (henüz boş iken) elektrik verilerek ısıtıldı. Sonra vakum cihazına hava verilip buharlaşma ünitesi açıldı.
- 2) Omik kontak yapımı için kullanılacak % 99.98'lik Al ısıtıcıya yerleştirildi.
- 3) Numune tutucu ısıtıcıya yakın mesafeye getirildi.
- 4) Üzerine omik kontak yapılacak olan $p-Si$, mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde (Al 'a doğru) numune tutucuya yerleştirildi.
- 5) Buharlaştırma ünitesinin cam fanusu kapatılıp vakum cihazı çalıştırılarak vakumun 10^{-5} torr mertebesine inmesi beklendi.
- 6) Basınç 10^{-5} torr mertebesine ulaşıncı ısıtıcı tungsten flamaya çok kısa süreliğine akım verilerek % 99.98'lik Al , $p-Si$ 'un mat yüzeyine kaplandı.
- 7) Bir müddet bekledikten sonra ters işlem yapılarak vakum cihazına hava verilip buharlaşma ünitesi açıldı.
- 8) Omik kontak yapılmış olan ($p-Si/Al$) numune tutucudan alınıp önceden kimyasal olarak temizlenmiş olan quartz potanın içine konularak daha önce ısıtılan tavlama fırınının $570^{\circ}C$ gelmesi beklendi. İstenilen dereceye gelmesiyle $p-Si/Al$ 3 dakika boyunca tavlandı. Tavlama işlemi yapılan fırınının şekli (4.1) ve kontrol ünite şeması (4.2) verilmiştir.
- 9) Böylece omik kontak işlemi tamamlanmış oldu. $p-Si/Al$ numunelerinden 2 tane hazırlayarak bu numunelere gerekli kimyasal temizleme işlemi şu şekilde yapıldı.
 - a) Al omik kontak yapılan kısma zarar vermeden %10'luk HF çözeltisi ile temizlendi.
 - b) Kimyasal olarak temizlenen $p-Si/Al$ numuneleri bol miktarda deiyonize suyla yıkandı. Oksit tabakasının oluşmaması için hemen kurutuldu.



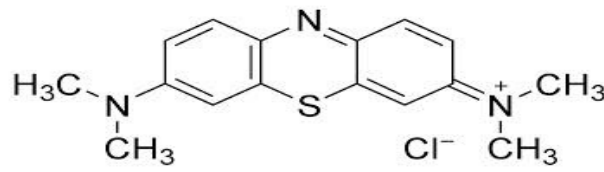
Şekil 4.1. Omik kontak termal işlemleri için fırın.



Şekil 4.2. Omik kontak termal işlemleri için fırın ve kontrol ünitesi şeması.

4.2.3. Metil mavisi molekülü

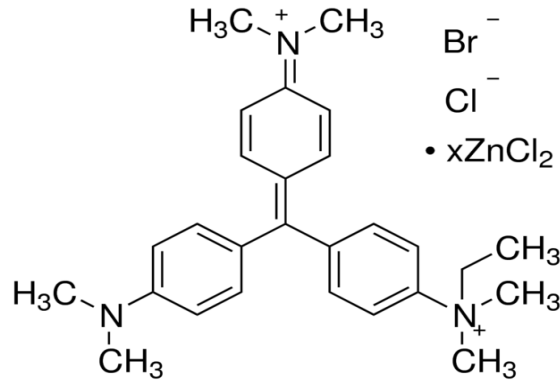
Bu çalışmada kullanılan metil mavisi ($C_{16}H_{18}N_3SCl$) molekülünün molekül yapısı Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Metil mavisi molekülün maksimum dalga boyu 665 nm, suda çözünürlüğü % 3.55, molekül ağırlığı 319.85 g/mol, alkolde çözünürlüğü % 1.48 olup kimya, biyoloji, eczacılık ve gıda sanayiye kullanılan tiyazin boyar madde grubudur.



Şekil 4.3. Metil mavisi molekül yapısı.

4.2.4. Metil yeşili molekülü

Bu çalışmada kullanılan metil yeşili ($C_{27}H_{35}BrClN_3 \cdot ZnCl_2$) molekülünün molekül yapısı Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Metil yeşili molekülün maksimum dalga boyu 635 nm, molekül ağırlığı 653.24 g/mol, erime noktası 300 °C olan belirli pH aralığı için (0.2-1.8) sarıdan maviye doğru bir görünüme sahip boyar maddedir. π bağları açısından zengin metil yeşili molekülü biyoloji, kimya, eczacılıkta intikatör olarak kullanılır.



Şekil 4.4. Metil yeşili molekül yapısı.

4.2.5. Metil mavisi ve metil yeşili çözeltilerinin hazırlanması ve kaplanması

Çözeltileri hazırlamak için;

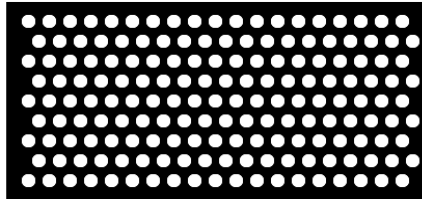
- 1) 20 ml metanol ile 0.0639 gr metil mavisi
- 2) 20 ml metanol ile 0.131 gr metil yeşili kullanıldı.

Kimyasal olarak temizlenip kurutulan *p-Si/Al* numunelerinin her birinin parlak tarafı üste gelecek şekilde hazırlanmış olan metil mavisi ve metil yeşili çözeltisi biohit proline cihazı ile damlatıldı. 2-3 dakika aralarla damlatma işlemi tekrar edildi. Böylece *metil yeşili/p-Si/Al* ve *metil mavisi/p-Si/Al* yapısı elde edildi.

4.2.6. Organik bileşenli Schottky diyetlerin yapılması

Doğrultucu kontak yapmak için;

- 1) Buharlaştırma ünitesinde (Şekil 4.6) bulunan ve buharlaştırılacak malzemenin (*Au*) konacağı tungsten ısıtıcı önce % 10'luk *HCl* ile yıkandı. Deiyonize su ile iyice yıkanıp temizlendi. Hemen kurutuldu ve buharlaştırma ünitesine yerleştirildi. Muhtemel kirlilik kalıntılarını gidermek için buharlaştırma ünitesi çalıştırılıp vakum yapıldı ve ısıtıcıya (henüz boş iken) elektrik verilerek ısıtıldı. Sonra vakum cihazına hava verilip buharlaşma ünitesi açıldı.
- 2) Kullanılacak % 99.99'lik *Au* (Altın) ısıtıcıya yerleştirildi.
- 3) Her bir deliği 1.2 mm çapında olan maske (Şekil 4.5) uygun kontaklar yapabilmek için numune tutucuya yerleştirildi.



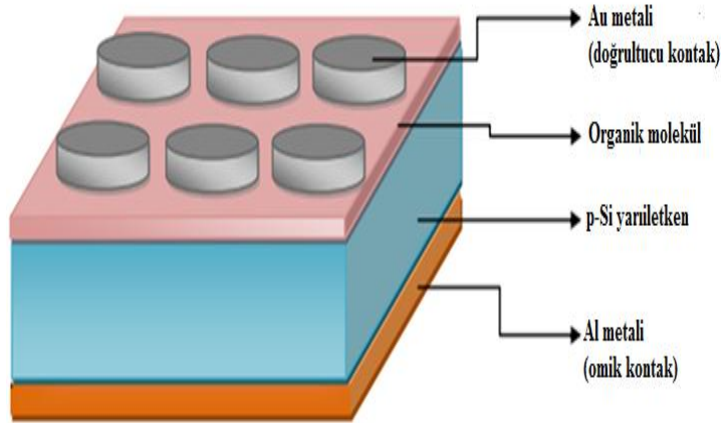
Şekil 4.5. Diyet yapımında kullanılan maske.

- 4) Numunenin organik tarafı aşağıya bakacak şekilde numune tutucudaki maskenin üzerine yerleştirildi.
- 5) Buharlaştırma ünitesinin cam fanusu kapatılıp vakum cihazı çalıştırılarak vakumun 10^{-5} mertebesine kadar inmesi beklendi.
- 6) Basınç 10^{-5} torr mertebesine ulaşıncaya, ısıtıcı tungsten flamaya çok kısa süreliğine akım verilerek % 99.99'lık *Au*, *metil mavisi/p-Si*'un metil mavisi yüzeyine maskenin delikleri üzerinden kaplanıp kontak noktaları oluşturuldu. Aynı işlem basamakları *metil yeşili/p-Si* için de yapılarak doğrultucu kontak noktaları oluşturuldu.



Şekil 4.6. Omik ve Schottky kontak için kullanılan buharlaştırma sistemi.

Elde edilen *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının şematik görünümü Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Organik metal-yarıiletken Schottky diyet şeması.

4.3. Ölçüm Alma

Kolaylık olması açısından organik moleküllerden metil mavisi numune Diyet AMETM, metil yeşili numune ise Diyet AMETY olarak adlandırıldı. Numunelerin akım-voltaj ($I-V$), kapasitans-voltaj ($C-V$) ve kapasitans-frekans ($C-f$) ölçümleri alındı. $I-V$ ölçümleri için Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, yarıiletken işlem laboratuvarı'nda bulunan 'Keithley 6487 pikoampermetre/voltaj kaynağı' (Keithley 6487 picoammeter/voltage source) cihazı, $C-V$ ve $C-f$ ölçümleri için ise 'Agilent' firmasının 'HP 4294A (40Hz-110MHz) impedance analyzer' cihazı kullanıldı ve ölçümler oda sıcaklığında alındı.

4.3.1. Organik bileşenli diyet karakteristiklerinin bulunması için elektriksel parametrelerin belirlenmesi

4.3.1.1. Akım-gerilim ($I-V$) ölçümleri ve Cheung fonksiyonlarının kullanılması

Bir metal-yarıiletken kontağın elektriksel özelliklerini belirlemek için en çok kullanılan metotlardan biri de akım-gerilim karakteristiklerini belirlemektir. Numunenin $I-V$ ölçümleri için 'Keithley 6487 pikoampermetre/voltaj kaynağı' cihazı kullanılarak $\ln I-V$ grafikleri çizildi. Ters beslem ve doğru beslem akım-gerilim grafikleri Şekil

4.8’da verilmiştir. Hazırlanan *Au/metil mavisi/p-Si/Al* (Diyot AMETM) ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* (Diyot AMETY) Schottky diyotlarının elektriksel özellikleri termiyonik emisyon teorisine göre incelendi. Teoriden yararlanılarak idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri hesaplandı. Teoriye göre bir diyodun akım ifadesi;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $eV \gg 3kT$ ise, 1 ihmal edilir denklem şu şekle indirgenir;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (4.2)$$

Bu denklemde her iki tarafın tabi logaritması alınarak;

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{eV}{nkT} \quad (4.3)$$

V ’ye göre türev alınırsa n idealite faktörü;

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

elde edilir. Burada T ; kelvin cinsinden ortamın sıcaklığı ($T = 300\text{ K}$), k ; Boltzman sabitidir ($k = 8.625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$). Bu son ifadedeki $dV/d\ln I$ ifadesi $\ln I$ - V grafiğinin doğru kesiminin eğiminden okunarak denklem (4.4) yerine yazıldı ve idealite faktörü değeri hesaplandı. Ölçümler sonucunda Şekil 4.8 ve eşitlik (4.4) kullanılarak idealite faktörü AMETM için $n = 2.82$, AMETY için $n = 2.28$ olarak hesaplandı. İdealite faktörü değerlerinin 1’den büyük çıkması metal/yarıiletken ara yüzey durumlarının dağılımının ve metal/yarıiletken arasında yalıtkan ara yüzey tabakasının varlığının

sebebi olduğu gösterilmektedir (Singh, 1985; Szatkowski and Sieranski, 1988; Cova and Singh, 1990; Singh ve ark., 1990).

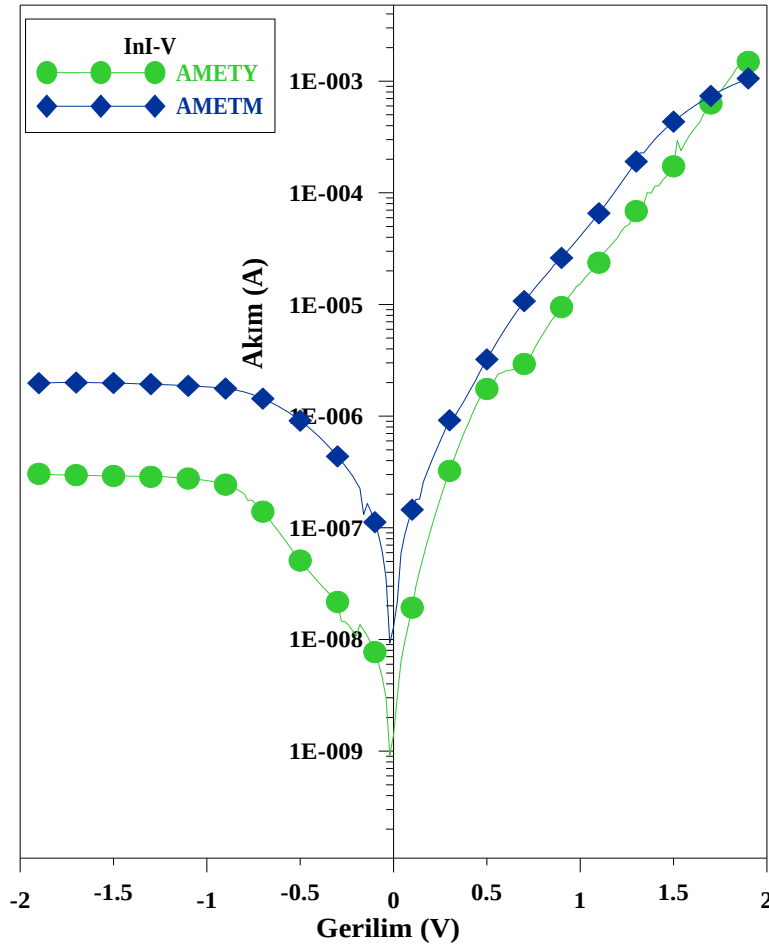
Doyma akım yoğunluğu;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (4.5)$$

Her iki tarafın tabii logaritması alınarak Φ_b 'ye göre çözümlenirse;

$$e\Phi_b = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.6)$$

elde edilir. Burada A ; diyodun etkin alanı ($5.024 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$), A^* ; Richardson sabiti ($32A/\text{cm}^2 \text{ K}^2$, $p\text{-Si}$), T ; kelvin cinsinden ortamın sıcaklığı ($T = 300 \text{ K}$), k ; Boltzman sabitidir ($k = 8.625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$). I_0 ; doyma akım yoğunluğu akım-gerilim grafiğinin eksen kesim noktasından hesaplanarak (4.6) eşitliğinde yerine yazıldı ve *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* organik diyotlar için engel yüksekliği değerleri hesaplandı. Yapılan hesaplamalar sonucunda engel yüksekliği AMETM için 0.805 eV , AMETY için 0.756 eV olarak bulundu. Deneysel olarak doyma akım yoğunluğu (I_0) $\ln I$ - V grafiğindeki eğrinin doğru kısmının düşey eksen kestiği noktadan belirlenir.



Şekil 4.8. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının doğru ve ters beslem *InI-V* karakteristikleri.

InI-V grafiği Schottky kontaktlar hakkında bize önemli bilgiler verir. *InI-V* grafiğini doğru beslem kısmını bölgelere ayırarak inceleyebiliriz:

1. Düşük voltaj bölgesi: kT 'in ilk birkaç katı için geçerlidir. Bu bölgede $InI = InI_0 + eV/nkT$ denklemi henüz yeterli değildir ve uzunca lineerlik bağıntısı yoktur.
2. Orta voltaj bölgesi: Bu bölge eğri akımının birkaç onluk katı kadar tam lineerdir, eğrinin eğimi e/nkT 'dir. İdeallik çarpanı $InI = InI_0 + eV/nkT$ üste sözü edilen denkleme çok iyi uyar. Yüksek kaliteli Schottky diyotların idealite faktörleri 1'e yakındır.

3. Yüksek voltaj bölgesi: Bu bölgede diyot iletme geçer ve iletkenliğin direnç etkisinin önemli olduğu akım yeterince yüksektir.

Au/metil mavisi/p-Si/Al ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının Şekil 4.8’de *InI-V* karakteristikleri görülmektedir. (4.4) ve (4.6) eşitlikleri kullanılarak idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplandı ve Çizelge 4.3’de verildi.

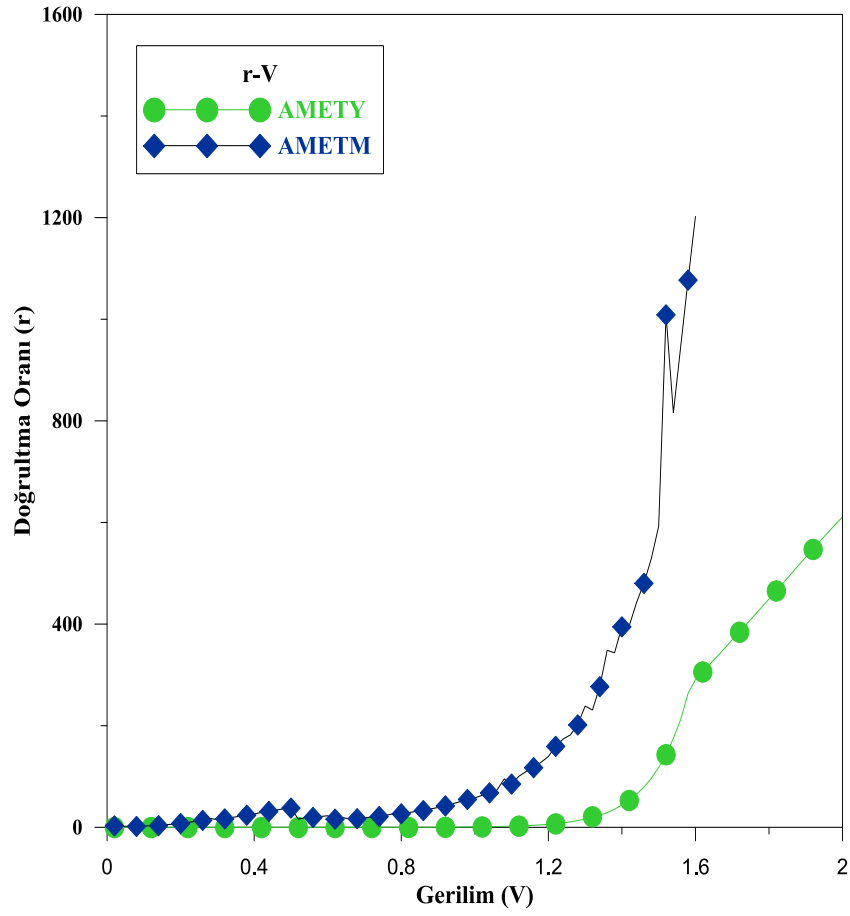
Çizelge 4.1. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının *InI-V* karakteristiklerinden elde edilen elektriksel parametreler

Diyot	I_0 (A)	n	Φ_b (eV)
AMETM	4.32×10^{-10}	2.82	0.805
AMETY	2.92×10^{-9}	2.28	0.756

Akım-gerilim karakteristiğinin ters beslemde, uygulanan gerilimin büyük değeri için diyotdan geçen akım sabittir ve doyma akım yoğunluğu olarak belirlenir. Uygulanan belirli bir gerilim değeri için ($|V|=\text{sabit}$) doğru beslem değerinin ters beslem akım yoğunluk değerine oranı doğrultma katsayısı olarak tanımlanır. Doğru beslem akım yoğunluğu (J_d), ters beslem akım yoğunluğu (J_t) için doğrultma katsayısı;

$$r = \frac{J_d}{J_t} \quad (4.7)$$

ile verilir (Cafer, 2000). Bu büyüklük diyot kalitesiyle doğru orantılıdır. Şekil 4.9’da AMETM ve AMETY diyotlarının doğrultma oranının gerilim’e göre ($r-V$) karakteristiği verilmiştir.



Şekil 4.9. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının *r-V* karakteristikleri.

Diyot AMETM ve Diyot AMETY yapılarının ara yüzey enerji dağılımlarını belirlerken seri direnç (R_s) etkisi de göz önüne alınmıştır. Bunun için Cheung fonksiyonu kullanılmıştır (Cheung and Cheung, 1986). Bu yöntemle göre, seri direnç düz beslem $\ln I-V$ grafiklerinin tam dönüm noktasından itibaren etkilidir. Burada uygulanan V gerilimin IR_s seri direnç üzerinden düşeceği göz önüne alınırsa (4.2) eşitliğinde eV yerine $e(V-IR_s)$ yazılmasıyla akım ifadesi elde edilir.

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) \quad (4.8)$$

Bu ifadenin her iki tarafının logaritmasını alıp V 'ye göre çözümlersek;

$$V = \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) + n\Phi_b + IR_s \quad (4.9a)$$

ifadesi elde edilir. Eşitliğin $\ln I$ 'ya göre türevi alınıp yeniden çözülürse;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (4.9b)$$

bulunur. Buradan $dV/d(\ln I)$ - I grafiği çizildiğinde bu grafik bir doğru verecektir. Bu doğrunun eğiminden seri direnç R_s tespit edilir. (4.9b) eşitliğinde $I=0$ iken doğrunun düşey eksenini kestiği nokta nkT 'yi verir ve bu ifade kT 'ye bölünerek n idealite faktörü elde edilir.

Engel yüksekliğini hesaplamak için kullanılan diğer bir yöntem olarak $H(I)$ fonksiyonu,

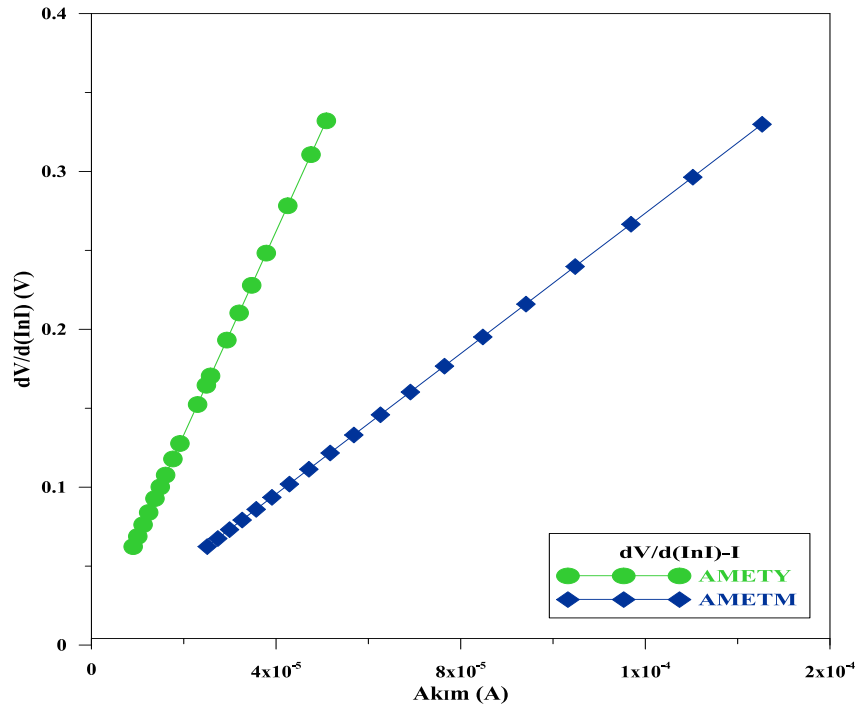
$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.9c)$$

tanımlanarak da seri direnç bulunabilir. Buna göre $H(I)$ fonksiyonu,

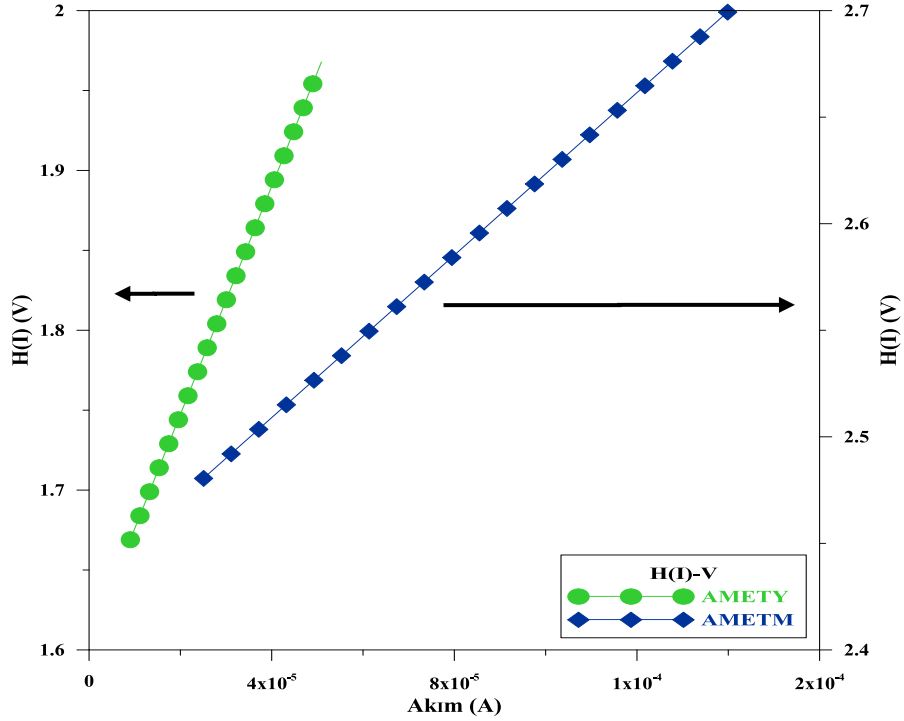
$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (4.9d)$$

şeklinde ifade edilir. $H(I)$ - I grafiği çizilirse yine bir doğru elde ederiz. (4.9d) eşitliğinde $I = 0$ iken ikinci terim $IR_s = 0$ olur. $H(I) = n\Phi_b$ ve doğrunun düşey eksenini kestiği nokta $n\Phi_b$ 'yi verir. Buradaki n değerini bildiğimize göre ifadeyi n 'e bölerek engel yüksekliği hesaplanabilir.

$dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafiklerinin çizilmesinden eşitlik 4.9b ve 4.9d'e uyan lineer doğrular elde edilmiştir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'da görüldüğü gibi lineer doğruların eğimlerinden seri direnç değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.10. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının *I-V* eğrilerinden elde edilen $dV/d(\ln I)$ -*I* karakteristikleri.



Şekil 4.11. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının *I-V* eğrilerinden elde edilen $H(I)$ -*I* karakteristikleri.

Çizelge 4.2. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I karakteristiklerinden elde edilen elektriksel parametreler

Diyot	$dV/d(\ln I)$ - I		$H(I)$ - I	
	n	$R_s(\Omega)$	Φ_b (eV)	$R_s(\Omega)$
AMETM	2.58	2224	0.86	1906
AMETY	2.66	6446	0.70	7139

4.3.1.2. Norde fonksiyonu yardımıyla engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin hesaplanması

$$F(V) = \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (4.10)$$

Burada γ ifadesi n değerinden büyük olan ilk tamsayıdır. $I(V)$ ifadesi I - V ölçümünden elde edilen akım değeridir. Bu çalışmada idealite faktörü Diyet AMETM için 2.28, Diyet AMETY için 2.82 olarak hesaplandı.

Norde metodunda engel yüksekliği ifadesi,

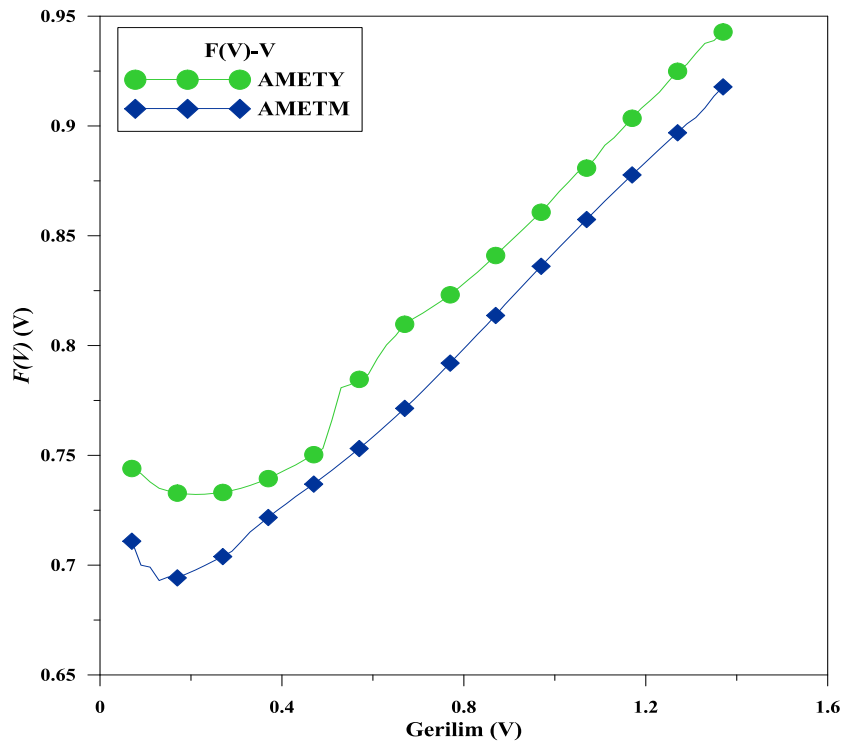
$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{3} - \frac{kT}{e} \quad (4.11)$$

şeklinde verilmektedir. Burada $F(V_0)$ ifadesi F - V grafiğinin minumum $F(V)$ değeridir.

AMETM için yapılan hesaplamalarda $F(V_0)$ değeri 0.6921 olarak bulundu. V_0 ise bu değere karşılık gelen V değeridir ve 0.21 V olarak hesaplandı. Bu değerler yardımıyla Φ_b engel yüksekliği ifadesi 0.734 eV olarak bulundu. AMETY için ise $F(V_0)$ değeri 0.7323, bu değere karşılık gelen V_0 değeri 0.23 V olarak hesaplandı. Bu değerler yerine yazılarak Φ_b engel yüksekliği 0.781 eV olarak bulundu. Norde metodunda seri direnç değeri;

$$R_s = \frac{kT}{e} \frac{(\gamma - n)}{I_0} \quad (4.12)$$

formülü ile verilir. AMETM için 0.21 V karşılık gelen akım 4.5816×10^{-7} A olarak hesaplandı ve bu değerler kullanılarak seri direnç değeri 101 k Ω olarak hesaplandı. AMETY için 0.23 V karşılık gelen akım 1.2565×10^{-7} A olarak hesaplandı ve bu değerler kullanılarak seri direnç değeri 147 k Ω olarak hesaplandı. Elde edilen parametreler Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.12. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının Norde fonksiyonlarından çizilen $F(V)$ - V karakteristikleri.

Çizelge 4.3. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının $F(V)$ - V karakteristiklerinden elde edilen elektriksel parametreler

Diyot	V_0	$F(V_0)$	I_0 (A)	R_s (k Ω)	Φ_b (eV)
AMETM	0.21	0.69	4.58×10^{-7}	101	0.734
AMETY	0.23	0.73	1.27×10^{-7}	147	0.781

Seri direnç R_s genellikle, diyodun direnci ve seri bileşenlerinin direncinin toplamından oluşur. Diyotta düşen toplam gerilim bu toplam dirençte düşen gerilimdir. Yüksek seri direnç davranışları, yüksek voltaj değerinde organik filme uzay yükü enjeksiyonu nedeniyle akımdaki eksponansiyel artış oranının azalmasına atfedilebilir. Norde modeli yüksek idealite faktörlü diyotlar için çok uygun bir model olmadığı literatürde bahsedilmiştir. Dolayısıyla norde fonksiyonları vasıtasıyla elde edilen diyot dirençleri termiyonik emisyon ile elde edilen direnç sonuçlarıyla uyum içinde olmayabilir. Bizim çalışmamızda da bu durum görülmektedir. Bu yüzden Norde fonksiyonları vasıtasıyla elde edilen seri direnç değerleri Cheung fonksiyonuyla elde edilen seri direnç değerlerinden büyük olduğu görüldü. Bu durum diyotların tam ideal olmadığına atfedilebilir (Güllü ve Türüt, 2010).

4.3.1.3. Kapasite-gerilim ($C-V$) ölçümleri

Kapasite-gerilim ($C-V$) karakteristiği Schottky diyotların en önemli özelliklerinden biridir. Schottky diyotların $C-V$ karakteristiği ara yüzey durumlarına karşı çok hassastır ve arayüzey durumlarının devre elamanlarının elektriksel özellikleri üzerine etkisi söz konusudur. Kapasite ters beslem ölçümlerinden engel yüksekliği, taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli (built-in potansiyeli), arınma bölgesi genişliği (W_d) ve fermi seviyesi gibi diyota ait birçok parametre elde edilebilir. Şekil 4.13 AMETM ve AMETY diyoduna ait $C-V$ ölçümleri oda sıcaklığında -4 V ile +4 V gerilim aralığında, 250 kHz frekansında ölçülmüştür. Grafikten de çok net bir şekilde anlaşılacağı gibi diyotların ters beslemde kapasite değerleri daha küçük değerler olarak gözlenirken düz beslemde gerilim arttıkça kapasitenin arttığı gözlenmiştir.

Yüksek frekanslardaki sığa değeri sadece uzay yük sığası olarak tanımlanırken düşük frekanslardaki sığa değeri uzay yük sığası ve arayüzey sığasının toplamı olarak tanımlanmaktadır (Yakuphanoglu ve ark., 2010).

Ara yüzey durumları dikkate alındığında (3.66) eşitliğini yeniden yazarsak;

$$C^{-2} = 2(V_d - V) / q\epsilon_s N_a \quad (4.13)$$

elde edilir. Bu eşitlikte V_d , difüzyon potansiyeli, q , elektronon yükü, ϵ_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti ve N_a , akseptör yoğunluğudur. (4.13) eşitliğinde C^{-2} - V grafiği ters beslemde lineer kısmın eğiminden diyodun akseptör yoğunluğu ve yatayda kestiği noktadan da difüzyon potansiyel değeri elde edilir. Bu eşitliğin V' ye göre türevi alınırsa yüzey alanı A olan bir diyot için;

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{A^2 \epsilon_s \epsilon_0 q N_a} \quad (4.14)$$

elde edilir. (4.14) eşitliği N_a 'ya göre çözümlenirse;

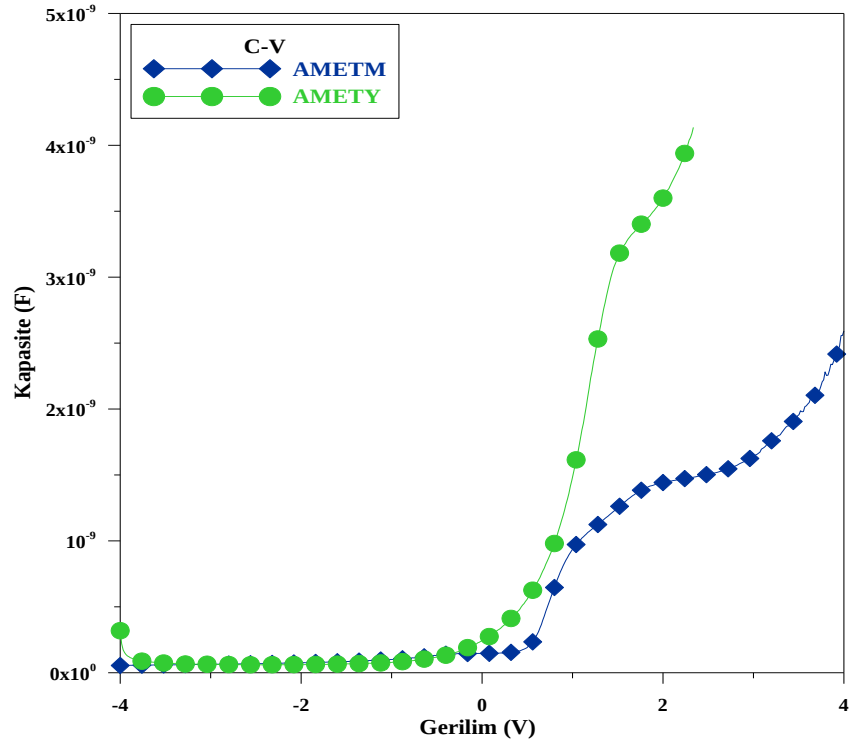
$$N_a = \frac{2}{A^2 \epsilon_s \epsilon_0 q} \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (4.15)$$

elde edilir. Özdirenci $\rho=12-16 \Omega\text{-cm}$ $p\text{-Si}$ kristalinin mobilitesi $\mu_p=450 \text{ cm}^2/V.\text{sn}$ (Sze and Kwog, 2007) ve $N_v=1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ dür. Bu değerler $N_a = 1/e\mu_p\rho$ ifadesinde yerine yazılırsa akseptör yoğunluğu teorik olarak $N_a = 1.08 \times 10^{15}$ - $0,814 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ arasında bulunur. Fermi enerji seviyesini bulmak için $N_a = N_v \exp(-E_F/kT)$ ifadesinde değerler yerine yazılırsa fermi enerjisi 0.237-0.245 eV arasında hesaplanır.

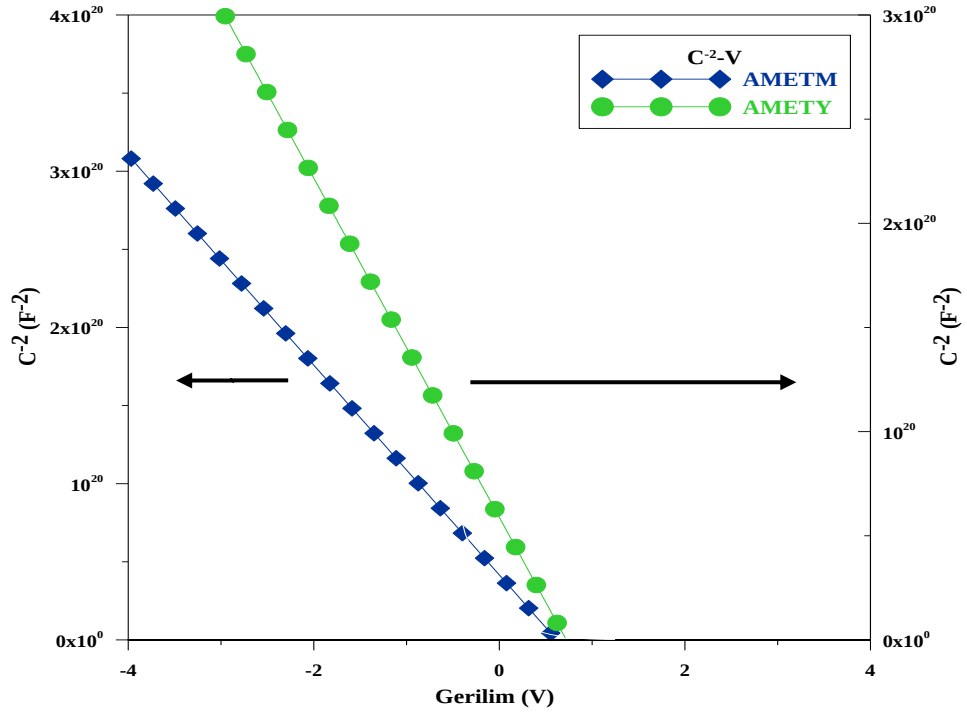
Kapasite-gerilim ölçümlerinden engel yüksekliği;

$$\Phi_{bp} = c_2 V_d + E_F \quad (4.16)$$

elde edilir.



Şekil 4.13. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının 250 kHz frekans değerinde $C-V$ karakteristikleri.



Şekil 4.14. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının 250 kHz frekans değerinde $C^{-2}-V$ karakteristikleri.

Şekil 4.14'ün lineer kısmının ekstrapole edilmesiyle AMETM için $V_d = 0.614$ eV, AMETY için $V_d = 0.722$ eV bulunmuştur. Aynı eğrinin lineer kısmının eğiminden ve (4.15) eşitliğinden yararlanarak akseptör yoğunluğu AMETM için $N_a = 7.04 \times 10^{15}$ cm⁻³, AMETY için $N_a = 5.823 \times 10^{15}$ cm⁻³ olarak hesaplandı. Ayrıca donör veya akseptör yoğunluğunun bu tip organik Schottky diyotlarda 10^{10} - 10^{19} cm⁻³ aralığında değerler aldığı bilinmektedir. Buna göre AMETM ve AMETY için bulunan akseptör yoğunluğu literatüre uygun çıkmıştır. Ayrıca eşitlik (4.16)'da bulunan değerlerin yerine yazılmasıyla AMETM Schottky diyodun engel yüksekliği $\Phi_b = 0.802$ eV ve AMETY Schottky diyodun engel yüksekliği $\Phi_b = 0.916$ eV olarak bulundu. Engel yüksekliği, kapasite-gerilim karakteristiklerinden bulunan değerle akım-gerilim karakteristiklerinden bulunan değer karşılaştırılacak olursa, kapasite-gerilimden elde edilen engel yüksekliğinin akım-gerilim karakteristiğinden elde edilen engel yüksekliğiyle uyum içinde olduğu görülmektedir. (4.15) eşitliğinden deneysel olarak hesaplanan akseptör yoğunluğu $N_a = N_v \exp(-E_F/kT)$ ifadesinde yerine yazılarak Fermi enerji seviyesi deneysel olarak AMETM ve AMETY için sırasıyla 0.188 eV, 0.194 eV olarak hesaplandı.

W_d arınma bölgesi genişliği iyonize akseptör yoğunluğundan ve built-in potansiyelinden hesaplanabilir.

$$W_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0}{qN_a}}(V_d - V) \quad (4.17)$$

Burada uygulanan V potansiyel olup ters beslem durumunda negatif, doğru beslem durumunda pozitif işaretini almaktadır. AMETM ve AMETY diyotları için kapasite-gerilim karakteristiklerinden hesaplanan arınma bölgesi genişliği (4.17) eşitliğinden sırasıyla 3.36×10^{-5} cm ve 4.02×10^{-5} cm olarak hesaplandı. Kapasite-gerilim ölçümlerinden elde edilen parametreler Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının C^{-2} - V karakteristiklerinden elde edilen elektriksel parametreler

Diyot	V_d (eV)	Φ_b (eV)	N_a (cm ⁻³)	W_d (cm)	E_F (eV)
AMETM	0.614	0.802	7.04×10^{15}	3.36×10^{-5}	0.188
AMETY	0.722	0.916	5.82×10^{15}	4.02×10^{-5}	0.194

4.3.1.4. Kapasite-frekans (C - f) ölçümleri

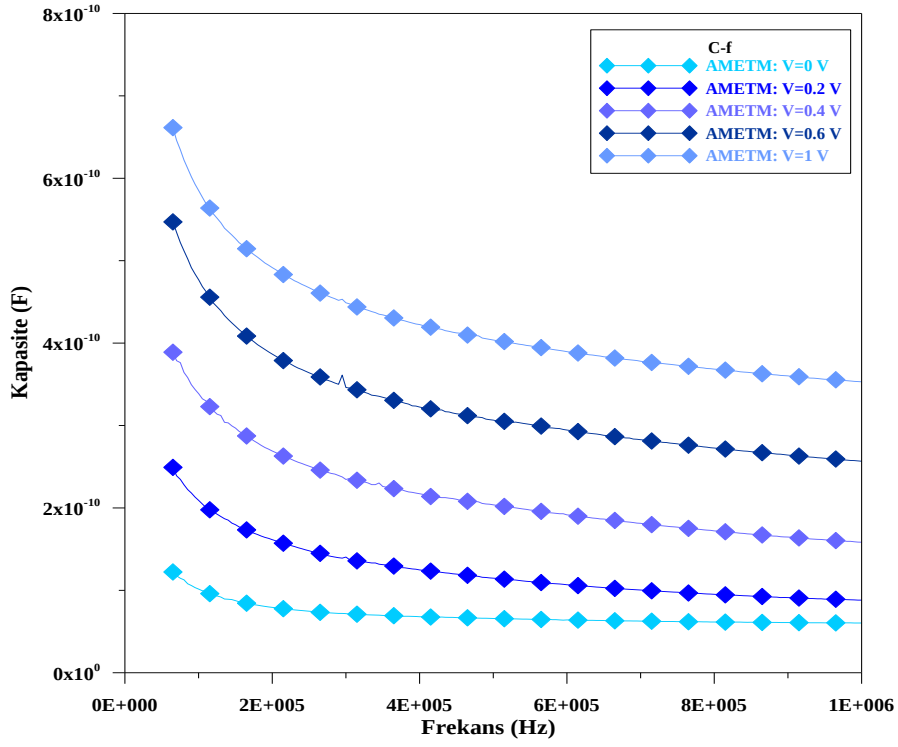
Diyotların 100 kHz-1MHz aralığında 0.2 V, 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V ve 1 V'luk sabit gerilim altında C - f ölçümleri alındı. Düşük frekanslarda diyodun kapasitesi arayüzey hallerinden gelen katkılar, yüksek frekansa doğru gidildikçe azalmakta ve yeterince yüksek frekanslarda ara yüzey hallerinden gelen sığa katkısı sıfıra yaklaşır ve ihmal edilebilir.

$$C = C_{sc} + C_{it} \text{ (düşük frekanslarda)} \quad (4.18)$$

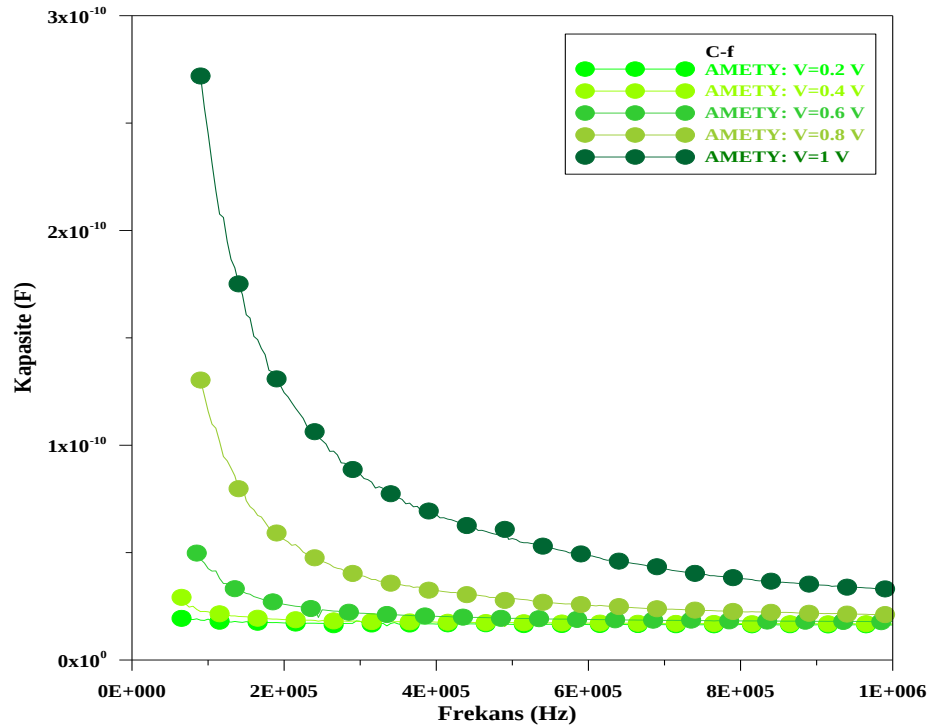
$$C = C_{sc} \text{ (yüksek frekanslarda)} \quad (4.19)$$

(4.19) eşitliğinde yüksek frekanslarda kontak kapasitesi sadece uzay yükünden ileri gelen kapasiteye (C_{sc}) eşittir. (4.18) eşitliğinde düşük frekanslarda ise arayüzey hallerinden gelen kapasite (C_{it}) ve uzay yükünden ileri gelen kapasitenin (C_{sc}) toplamı olarak ifade edilir.

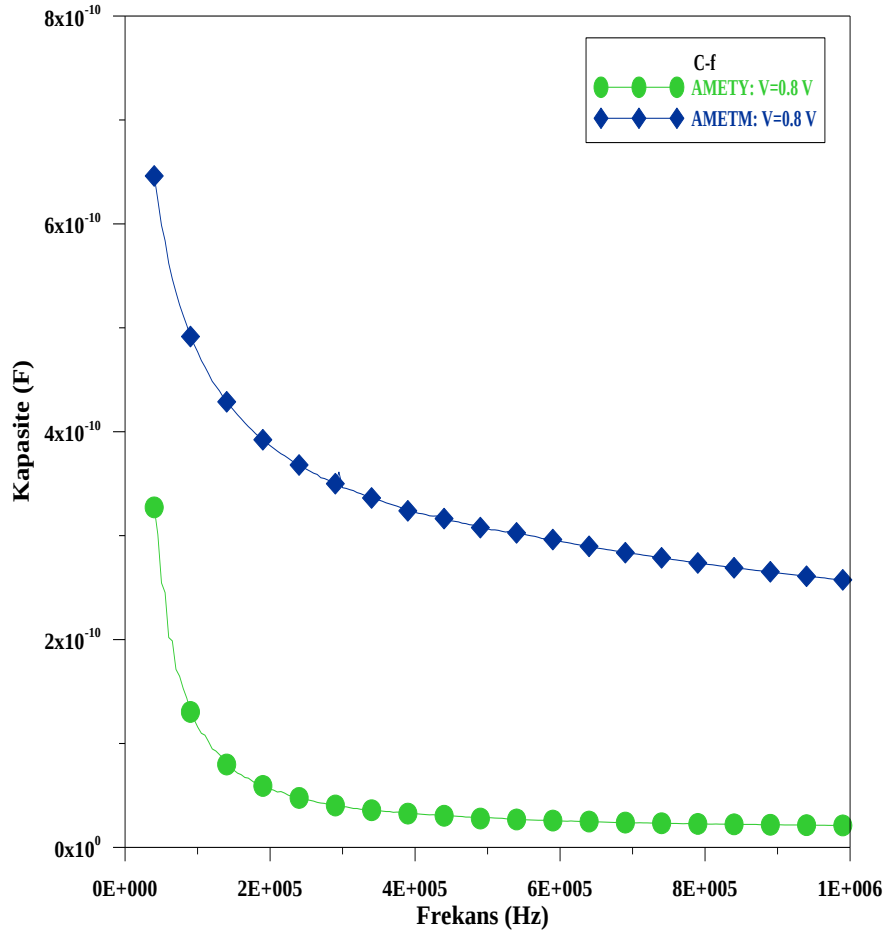
Diyotların C - f karakteristiklerinde düşük frekanslarda artık kapasite gözlemlendi. Bu artık kapasite ve diyot kapasitelerinin büyük idealite faktörlü diyotlarda daha büyük ve küçük idealite faktörlü diyotlarda daha küçük olduğu C - f grafiklerden görülmektedir. Artık kapasitenin MIS diyotlarında arayüzey halleri, azınlık taşıyıcıları ve omik kontakın direncinin yüksekliğinden oluştuğu literatürde bahsedilmektedir. Bunun nedeni arayüzey hallerinin a.c. sinyali düşük frekanslarda takip edebildiğinden, yüksek frekanslarda ise takip edemediğinden oluştuğu literatürde belirtilmektedir. Bu artık kapasite uzay yükü kapasitesiyle paraleldir (Batı ve ark., 2000).



Şekil 4.15. $Au/metil\ mavisi/p-Si/Al$ yapısının 0.2 V ve 1 V aralığında $C-f$ karakteristikleri.



Şekil 4.16. $Au/metil\ yeşili/p-Si/Al$ yapısının 0.2 V ve 1 V aralığında $C-f$ karakteristikleri.



Şekil 4.17. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının 0.8 V için C-f karakteristikleri.

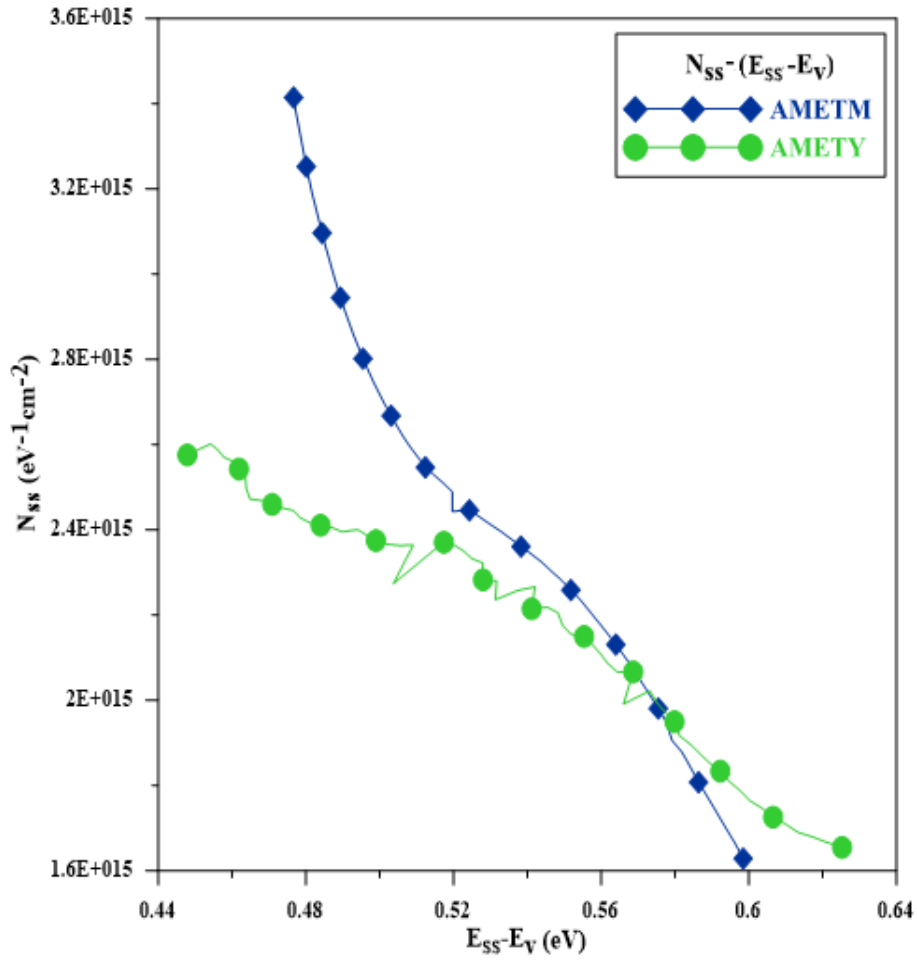
4.2.1.5. Arayüzey durum yoğunluğunun belirlenmesi

Doğru beslem I - V karakteristiklerinden faydalanarak arayüzey hallerinin enerjilerine karşılık arayüzey hallerinin yoğunluğu hesaplanabilir. Yarıiletken arayüzey ile arayüzey tabakası arasına yerleşmiş arayüzey durumlarının dağılımı ve arayüzey tabakası boyunca voltaj düşmesinden dolayı idealite faktöründe artış olduğu düşünülebilir (Card ve Rhoderick, 1971). Dolayısıyla arayüzey durumları diyot parametrelerini etkileyerek idealite faktörü değerini ideal olan $n=1$ değerinden uzaklaştırarak ideal durumdan sapmalara neden olmaktadır.

p-tipi yarıiletkende arayüzey hal enerjisi;

$$E_{ss} - E_v = q\Phi_{bp} - qV \quad (4.20)$$

denklemleri ile verilmektedir. Arayüzey hal yoğunluğunun (N_{ss}), arayüzey hal enerjisine göre değişimi eşitlik (4.20) ve (3.98) kullanılarak çizildi.



Şekil 4.18. *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapılarının $N_{ss}-(E_{ss}-E_v)$ karakteristikleri.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, [100] doğrultulu, Czochralski yöntemiyle büyütülmüş, 610-640 μm kalınlıklı, öz direnci $\rho=12-16 \Omega\text{-cm}$ olan *p-Si* kristal üzerine metil mavisi ve metil yeşili kaplanarak organik filmlerin *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* için elektriksel karakteristikler üzerinde etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için oda sıcaklığında doğrultucu ve omik tarafları aynı olan ara yüzey malzemesi farklı olan bu yapıların akım-gerilim (*I-V*), kapasite-gerilim (*C-V*), farklı voltajlarda kapasite-frekans (*C-f*) ölçümleri incelenmiştir.

Uygulanan belirli bir gerilim değeri için ($|V|=\text{sabit}$) doğru beslem değerinin ters beslem akım yoğunluk değerine oranı doğrultma katsayısı olarak tanımlanır. Bu büyüklük diyot kalitesiyle doğru orantılıdır. Şekil 4.9’da AMETM ve AMETY diyotlarının doğrultma oranının gerilim’e göre (*r-V*) karakteristiği verilmiştir.

Üretilen diyotların *I-V* karakteristikleri Şekil 4.8’ de görüldüğü gibi eğrinin orta voltaj bölgesinden faydalanarak incelendi; idealite faktörü, engel yüksekliği, doyma akımı ve seri direnç gibi diyot parametreleri hesaplandı. Elde edilen hesaplamalarda idealite faktörü *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapıları için sırasıyla 2.82 ve 2.28, engel yükseklikleri ise 0.805 eV ve 0.706 eV olarak belirlendi. Termiyonik emilasyon teorisine göre ideal bir diyotun idealite faktörü değeri 1 olmalıdır. Ancak idealite faktörü değerleri 1’den büyük çıkmıştır. Bu durum arayüzey metal/yarıiletken arayüzey durumlarının dağılımına, metal ile yarıiletken arasında istenmeden oluşan doğal oksit tabakasına ve ara yüzey tabakasının varlığının sebep olduğu düşünülmektedir. İdealite faktörünün 1’den büyük olmasının bir diğer önemli nedeni de seri direnç etkisidir ve arayüzey dağılım eğilimini önemli oranda etkilemektedir. Yapıların seri dirençlerini ve engel yüksekliklerini belirlemek için Cheung fonksiyonu ve Norde fonksiyonu kullanıldı. Cheung fonksiyonları incelendiğinde (Çizelge 4.4), *Au/metil mavisi/p-Si/Al* için idealite faktörü 2.58, engel yüksekliği 0.86 eV ve seri direnç değerleri 2224 Ω -1906 Ω , *Au/metil yeşili/p-Si/Al* için idealite faktörü 2.66, engel yüksekliği 0.70 ve seri direnç değerleri 6446 Ω -7139 Ω olarak hesaplandı. Norde fonksiyonları incelendiğinde, *Au/metil mavisi/p-Si/Al* için

seri direnç değeri 101 k Ω , engel yüksekliği 0.734 eV ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* için seri direnç değeri 147 k Ω , engel yüksekliği 0.781 olarak hesaplandı. Bu çalışmada Norde fonksiyonları vasıtasıyla elde edilen seri direnç değerleri Cheung fonksiyonuyla elde edilen seri dirençlerinden büyük olduğu görüldü. Bu durum diyotların ideal olmadığına ve metodların karakteristik özelliklerinin farklı oluşuna atfedilebilir.

Hazırlanan diyotların arayüzey durumlarını incelemek için kapasite-gerilim karakteristikleri Şekil 4.13'de incelendi. Kapasite değerlerinde düşük gerilim değerinden yüksek gerilim değerine doğru keskin bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Yapıların ters beslem C^{-2} - V karakteristiğinin eğiminden alıcı yoğunlukları hesaplandı. Akseptör yoğunluğunun bu tip organik Schottky diyotlarda 10^{10} - 10^{19} cm⁻³ aralığında değerler aldığı bilinmektedir. Deneysel olarak hesaplanan diyotların alıcı yoğunlukları *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapıları için sırasıyla 7.04×10^{15} cm⁻³, 5.823×10^{15} cm⁻³ olarak hesaplandı. Bulunan akseptör yoğunluğu organik malzeme kullanımına bağlı olarak beklenen aralığa uygun çıktığı görülmüştür. Engel yüksekliği *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapıları için sırasıyla 0.802 eV, 0.916 eV olarak hesaplandı. Sığa-gerilim karakteristiklerinden bulunan değerle akım-gerilim karakteristiklerinden bulunan değer karşılaştırılacak olursa engel yüksekliklerinin uyum içinde olduğu görülmektedir.

Diyotların 100 kHz-1MHz aralığında C - f grafikleri 0.2 V-1 V'luk sabit gerilim altında *Au/metil mavisi/p-Si/Al* yapısı için Şekil 4.15'de aynı şekilde *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapısı için Şekil 4.16'da çizildi. Ayrıca 0.8 V gerilim altında *Au/metil mavisi/p-Si/Al* ve *Au/metil yeşili/p-Si/Al* yapıları için Şekil 4.17'de birlikte çizildi. Bu grafikten *Au/metil mavisi/p-Si/Al* diyodun sığasının *Au/metil yeşili/p-Si/Al* diyodun sığasından daha büyük karakteristik gösterdiği görüldü. Diyotların C - f grafikleri kullanılarak arayüzey halleri hakkında bilgi verilmeye çalışılmıştır. Diyotların karakteristiklerinde düşük frekanslarda artık kapasite gözlemlendi. Artık kapasitenin düşük frekanslarda arayüzey halleri a.c. sinyali takip ettiğinden, yüksek frekanslarda arayüzey halleri a.c. sinyali takip edemediklerinden etkisi azalmaktadır. Dolayısıyla toplam sığa ve sığanın pik değeri artan frekansla azalır.

Diyotların akım-gerilim karakteristiğinden faydalanarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine göre değişimini veren $N_{ss}-(E_{ss}-E_v)$ karakteristiği belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada *p-tipi* yarıiletken üzerine metil mavisi ve metil yeşili bileşen kullanılarak elde edilen diyotların $I-V$, $C-V$ ve $C-f$ karakteristikleri ve diyot parametrelerinden yararlanılarak organik arayüzey tabakalı doğrutucu kontak üretilebildiği gösterilmiştir. Organik arayüzeyin diyodun idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direncinde MS diyotlarla karşılaştırıldığında artırıcı bir etki yaptığı görülmüştür. Diyot yapımında özellikle engel yüksekliğinin büyüklüğü istenmektedir. Bu çalışma ile organik bileşenlerin bu amaç için kullanılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Aydın, M. E., Soylu, M., Yakuphanoglu, F., Farooq, W. A., 2011. Controlling of electronic parameters of GaAs Schottky diode by poly (3,4-ethylenedioxythiophene)-block-poly (ethylene glycol) organic interlayer. **Microelectronic Engineering**, **88** (6): 867-871.
- Batı, B., Nuhoglu, Ç., Sağlam, M., Ayyıldız, E., Türüt A., 2000. On the forward bias excess capacitance at intimate and MIS Schottky barrier diodes with perfect or imperfect ohmic back contact. **Phys. Scripta**, **61** (2): 209-212.
- Barış, B., 2013. Frequency dependent dielectric properties in Schottky diodes based on rubrene organic semiconductor, **Physica E**, **54**: 171-176.
- Bethe, H. A., 1942. **Massachusetts Institute of Technology Radiation Laboratory Report**, **43**.
- Bethe, H. A., 1942. **Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers**. Radiation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
- Bohlin, K. E., 1986. Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. **J. Appl. Phys.**, **60** (3): 1223-1224.
- Brillson, L. J., 1993. **Contacts to Semiconductors**. Naves Publications, New Jersey, USA.
- Brütting, W., 2005. **Physics of Organic Semiconductors**. Wiley-Vch-Verlag, Weinheim.
- Cafer, T., 2000. **Katıhal Elektroniği**. Yıldız Teknik Üniversitesi Basın Yayın Merkezi, İstanbul.
- Card, H.C., Rhoderick, E.H., 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. **J. Appl. Phys D**, **4** (10): 1589.
- Chattopadhyay, P., Daw, A. N., 1985. Effect of surface states on the barrier height in a MIS diode in the presence of inversion. **International Journal of Electronics**, **58** (5): 775–779.
- Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., 1991. A modified conductance technique for the determination of series resistance of MIS tunnel-diodes. **Solid-State Elect.**, **34** (12): 1455-1456.

- Cheung, S. K., Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. ***Appl. Phys. Lett.*, 49 (2): 85-87.**
- Cova, P., Singh, A., 1990. Temperature dependence of I-V and C-V characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky barrier type diodes. ***Solid-State Electronics*, 33 (1): 11-19.**
- Cowley, A. M., Sze, S. M., 1965. Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. ***J. Appl. Phys.*, 36 (10): 3212-3220.**
- Crowell, C.R., Sze, S. M., 1966. Current transport in metal-semiconductor barriers. ***Solid-State Electronics*, 9 (11): 1035-1048.**
- Çetinkara, H. A., Sağlam, M., Türüt, A., Yalçın, N., 1999. The effects of the time-dependent and exposure time to air on Au/epilayer n-Si Schottky diodes. ***Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 6 (01): 89-94.**
- Duman, S., Özçelik, F. Ş., Gürbulak, B., Gülnahar, M., Türüt, A., 2015. Current-voltage and capacitance-conductance-voltage characteristics of Al/SiO₂/p-Si and Al/Methyl Green (MG)/p-Si structures. ***Metallurgical and Materials Transactions A*, 46 (1): 347-353.**
- El-Nahass, M. M., Zeyada, H. M., Aziz, M. S., El-Ghamaz, N. A., 2005. Carrier transport mechanisms and photovoltaic properties of Au/p-ZnPC/p-Si solar cell. ***Solid-State Electronics*, 49 (8): 1314-1319.**
- Gencer Imer, A., Temirci, C., Gülcan, M., Sönmez, M., 2014. Electrical characteristics of organic-inorganic Pt(II) complex/p-Si semiconductor contacts. ***Mater. Sci. Semicon. Proc.*, 28: 31-36.**
- Gupta, R. K., Singh, R. A., 2005. Fabrication and characteristics of Schottky diode based on composite organics semiconductor. ***Composites and Science and Technology*, 65 (3): 677-681.**
- Güllü, Ö., Asubay, S., Aydoğan, Ş., Türüt, A., 2010. Electrical characterization of the Al/new fuchsin/n-Si organic-modified device. ***Physica E*, 42 (5): 1411-1416.**
- Güllü, Ö., Türüt, A., 2010. Electrical analysis of organic dye-based MIS Schottky contacts. ***Microelectronic Engineering*, 87 (12): 2482-2487.**
- Henisch, H. K., 1984. ***Semiconductor Contact***. Celerondon Press, New York.

- Karataş, Ş., Altındal, Ş., 2004. İdeal olmayan Schottky diyotlarının temel parametrelerinin akım-voltaj (I-V) karakteristiklerinden hesaplanması. **Journal of Science and Engineering**, 7 (2).
- Kılıçoğlu, T., Aydın, M. E., Ocak, Y. S., 2007. The determination of the interface state capacitance method. **Physica B**, 388 (1): 244-248.
- Mott, N. F., 1938. Note on the contact between metal and an insulator or semiconductor. **Proc. Cambr. Philos. Soc.**, 34 (04): 568.
- Neamen, D.A., 1992. **Semiconductor Physics and Devices**. Basic Principles, Irwin, Inc., 144.
- Norde, H. A., 1979. A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. **J. Appl. Phys.**, 50 (7): 5052-5053.
- Ocak, Y. S., Kulakci, M., Kılıçoğlu, T., Turan, R., Akkılıç, K., 2009. Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of a Sn/Methylene Blue/p-Si Schottky diode. **Synt. Met.**, 159 (15): 1603-1607.
- Okur, S., Yakuphanoglu, F., Özsoz, M., Kadayifçılar, P. K., 2009. Electrical and interface properties of Au/DNA/n-Si organic-on-inorganic structures. **Microelectronic Engineering**, 86 (11): 2305-2311.
- Rhoderick, E. H., Williams, R. H., 1988. **Metal-Semiconductor Contacts**. Clarendon Press, Oxford.
- Rhoderick, E. H., 1988. **Metal-Semiconductor Contacts**. Oxford University Press, Oxford.
- Rhoderick E.H. and Williams R.H., 1988. **Metal-Semiconductor Contacts**. 2nd ed. Clarendon, M. A. Press, Oxford.
- Rockett, A., 2008. **The Materials Science of Semiconductors**. Springer-Verlag, New York – USA.
- Schottky, W., Stormer, R., Waibel, F., 1931. Rectifying action at the boundary between Cuprous oxide and applied metal electrodes. **Zeits Hoch Frequenztechnik**, 37: 162-165.
- Singh, A., 1985. Characterization of interface states at Ni/n-CdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation. **Solid-State Electronic**, 28 (3): 223-232.

- Singh, A., Reinhardt, K. C., Anderson, W. A., 1990. Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor. **J. Appl. Phys.**, **68** (7): 3475- 3483.
- So, F., 2010. **Organic Electronics Materials, Processing, Devices and Applications**. CRC Press, USA.
- Soylu, M., Al-Hartomy, O. A., Al Said S. A. F., Al-Ghamdi, A. A., Yahia, I. S., Yakuphanoglu, F., 2013. Controlling of conduction mechanism and electronic parameters of silicon-metal junction by mixed Methylene Blue/2',7'-dichlorofluorescein. **Microelectronics Reliability**, **53** (12): 1901-1906.
- Szatkowski, J., Sieranski, K., 1988. Interface effects on Mg-Zn₃P₂ Schottky diodes. **Solid-State Electronic**, **31** (2): 257-260.
- Sze, S. M., Ng, K. K., 2006. **Semiconductor Devices**. 3rd edn., Wiley, New York.
- Sze, S. M., 1981. **Physics of Semiconductor Devices**. Wiley, New York 134-153.
- Sze, S. M., Kwog, K. Ng., 2007. **Physics of Semiconductor Physics**. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Temirci, C., Batı, B., Sağlam, M., Türüt, A., 2001. High-barrier height Sn/p-Si schottky diodes with interfacial layer by anodization process. **Appl. Surf. Sci.**, **172** (1): 1-7
- Tuğluoğlu, N., Çalışkan, F., Yüksel, Ö. F., 2015. Analysis of inhomogeneous barrier and capacitance parameters for Al/rubrene/n-GaAs (100) Schottky diodes. **Synt. Metals**, **199**: 270-275.
- Uğur, A., Gencer Imer, A., Ocak, Y.S., 2015. Electrical and photoelectrical characterization of an organic-inorganic heterojunction based on quinoline yellow dye. **Mater. Sci.Semicon. Proc.**, **39**: 569-574
- Yahia, I. S., Farag, A. A. M., Yakuphanoglu, F., Farooq, W. A., 2011. Temperature dependence of electronic parameters of organic Schottky diode based on fluorescein sodium salt. **Synthetic Metals**, **161** (9): 881-887.
- Yakuphanoglu, F., Okur, S., 2010. Analysis of electronic parameters and interface states of boron dispersed triethenolemine/p-Si structure by AFM, I-V, C-V-f and G/w-V-f techniques, **Mikroelektronik Engineering**, **87** (1): 30-34.
- Zafer, C., 2006. **Organik Boya Esashi Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi** (doktora tezi, basılmamış). Ege Üniversitesi Fen Bil. Enst., İzmir.

Ziel, A. V., 1968. *Solid State Physical Electronics*. (Prendice-Hall, New-Jersey). p.245.

ÖZ GEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Aliye ÇEKİNMEZ

Doğum Yeri : Merkez/VAN

Doğum Tarihi : 14.10.1989

Medeni Durumu : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Kazım Karabekir Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı) (2007)

Lisans : Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü (2012)