



**Au/(AgCdS:PVP)/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN AKIM-VOLTAJ (I-V) VE
KAPASİTANS/İLETKENLİK-VOLTAJ (C/G-V) ÖZELLİKLERİNİN
KARANLIK VE 100 mW/cm² IŞIK ŞİDDETİ ALTINDA İNCELENMESİ**

Gamze ASLANBAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

ETİK BEYAN

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

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

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

Gamze ASLANBAŞ

26/01/2024

**Au/(AgCdS:PVP)/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN AKIM-VOLTAJ (I-V) VE
KAPASİTANS/İLETKENLİK-VOLTAJ (C/G-V) ÖZELLİKLERİNİN KARANLIK VE
100 mW/cm² IŞIK ŞİDDETİ ALTINDA İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Gamze ASLANBAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Bu çalışmada, Au/(AgCdS:PVP)/n-Si (MPS) tipi Schottky bariyer diyotlarını (SBDs), fosfor katkılı ve 1 Ω .cm dirençli n-Si levha üzerine üretildi. Fabrikasyon işlemlerden sonra oda sıcaklığında akım-gerilim (I-V) ölçümleri gerçekleştirildi. Ln(I)-V grafikleri düşük/orta eğilim bölgeleri (LBR, MBR) olarak adlandırılan iki farklı doğrusal parçayı gösterdiği ortaya konuldu. Bu Ln(I)-V grafiğinin hem karanlıkta hem de 100 mW/cm² aydınlatma yoğunluğu altında arayüzey tabakasının yapının elektriksel karakteristiklerine olan etkisini araştırmak amacıyla Termiyonik Emisyon teorisi, Cheung ve Norde fonksiyonu kullanılarak ileri öngerilim I-V eğrilerinden n idealite faktörü, I₀ ters doyma akımı ve Φ_B (I-V) sıfır beslem bariyer engel yüksekliği gibi temel elektriksel parametreler elde edildi ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldı. Elde edilen sonuçların birbirinden farklılıklarının nedenleri olarak hesaplamalarda kullanılan yöntem farkı, N_{ss} arayüzey durumlarının varlığı ve engel homojensizliğine atfedildi. Daha sonra Card ve Rhoderick yöntemi kullanılarak, enerjiye bağlı N_{ss} ve (E_c-E_{ss}) grafikleri, I-V eğrileri, özellikle de voltaja bağlı n ve Φ_B değerleri kullanılarak çizildi. Yapının 1 MHz frekans altında çizilen 1/C²-V eğrisinden N_D katkı atomlarının yoğunluğu, Φ_B bariyer engel yüksekliği, W_D tüketim tabakası kalınlığı, R_s seri direnç, V_D difüzyon potansiyeli, N_{ss} arayüzey durumları ve E_F fermi enerjisi karakteristikleri elde edildi ve diyotun C-V ve G/ ω -V grafikleri çizildi. Au/(AgCdS:PVP)/n-Si Schottky diyotunun arayüzey durumlarının voltaj bağımlılığını araştırmak için Yüksek-Düşük (1 MHz & 3 kHz) Frekans Kapasitans Metodu kullanıldı. Elde edilen sonuçların mevcut literatür göz önüne alındığında, MPS yapı için uygun olduğu görüldü. Deneysel sonuçlar, hazırlanan Au/(AgCdS:PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotlarının ışığa duyarlı olduğunu ve (AgCdS:PVP) ara yüzey katmanının geleneksel izolatörlerde, fotodiyotlarda, foto sensör uygulamalarında ve güneş pillerinde başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

Bilim Kodu : 20227
Anahtar Kelimeler : (AgCdS:PVP) Polimer arayüzey tabakası; karanlıkta ve aydınlıkta elektriksel özellikler; yüzey durumları ve seri direnç etkileri
Sayfa Adedi : 73
Danışman : Prof. Dr. Perihan DURMUŞ
İkinci Danışman : Prof. Dr. Hayriye Gökçen ÇETİNKAYA

INVESTIGATION OF CURRENT-VOLTAGE (I-V) AND
CAPACITANCE/CONDUCTIVITY-VOLTAGE (C/G-V) PROPERTIES OF
Au/(AgCdS:PVP)/n-Si SCHOTTKY DIODES IN DARK AND UNDER 100 mW/cm²
ILLUMINATION INTENSITY

(M. Sc. Thesis)

Gamze ASLANBAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

In this study, Au/(AgCdS:PVP)/n-Si (MPS) type Schottky barrier diodes (SBDs) were produced on phosphorus-doped n-Si sheet with a resistance of 1 Ω .cm. After fabrication processes, current-voltage (I-V) measurements were performed at room temperature. It was revealed that $\ln(I)$ -V graphs show two different linear parts called low/medium trend regions (LBR, MBR). In order to investigate the effect of this $\ln(I)$ -V graph on the electrical characteristics of the interfacial layer of the structure both in the dark and under 100 mW/cm² illumination intensity, thermionic emission theory, Cheung and Norde function were used, and n ideality factor, I_0 reverse saturation were obtained from forward bias I-V curves. Basic electrical parameters such as current and $\Phi_B(I-V)$ zero power barrier barrier height were obtained and the results were compared with each other. The reasons for the differences between the obtained results were attributed to the difference in the method used in the calculations, the existence of N_{ss} interface states and barrier inhomogeneity. Then, using the Card and Rhoderick method, energy-dependent N_{ss} and (E_c-E_{ss}) graphs, I-V curves, especially voltage-dependent n and Φ_B values were drawn. The density of N_D dopant atoms, Φ_B barrier barrier height, W_D consumption layer thickness, R_s series resistance, V_D diffusion potential, N_{ss} interface states and E_F fermi energy characteristics were obtained from the $1/C^2$ -V curve of the structure drawn under 1 MHz frequency, and the C-V and E_F fermi energy characteristics of the diode were obtained. G/ω -V graphs were drawn. High-Low (1 MHz & 3 kHz) Frequency Capacitance Method was used to investigate the voltage dependence of the interfacial states of the Au/(AgCdS:PVP)/n-Si Schottky diode. The results obtained were found to be suitable for the MPS structure, considering the existing literature. Experimental results show that the prepared Au/(AgCdS:PVP)/n-Si (MPS) Schottky diodes are photosensitive and the (AgCdS:PVP) interfacial layer can be used successfully in conventional insulators, photodiodes, photo sensor applications and solar cells.

Science Code : 20227

Key Words : (AgCdS:PVP) Polymer interfacial layer, electrical properties in darkness and light, surface states and series resistance effects

Page Number : 73

Supervisor : Prof. Dr. Perihan DURMUŞ

Co-Supervisor : Prof. Dr. Hayriye Gökçen ÇETİNKAYA

TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteğini benden esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Perihan DURMUŞ'a ve süreç boyunca tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a teşekkür ederim.

Ayrıca sonsuz sevgi ve anlayışlarıyla her zaman yanımda olduğunu hissettiğim, başarılarımdan daima gurur duyan ve beni destekleyen değerli annem, babam ve kardeşlerime teşekkür ederim.

Son olarak aldığım her kararımı destekleyen ve olumlu fikirleriyle daima yanımda olan, bana yol gösteren, süreç boyunca karşılaştığım tüm zorluklarda bana yardım eden yol arkadaşım, kıymetli nişanlım Mehmet Mert BOYACIOĞLU'na teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER	5
2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar	5
2.1.1. Doğrultucu ve omik kontak.....	6
2.1.2. Metal/ n-tipi yarıiletken yapılarda Schottky (doğrultucu) kontaklar	7
2.1.3. Metal/ n-tipi yarıiletken yapılarda omik kontaklar	12
2.2. Schottky Kontakların İdeal Durumdan Sapma Sebepleri.....	13
2.2.1. Schottky engel yükseliğinin hayali kuvvet etkisiyle düşmesi (Hayali Schottky).....	13
2.2.2. Direnç etkisi	14
2.2.3. Arayüzey durumları	16
2.2.4. Hareketli iyonlar	20
2.2.5. Tünelleme.....	20
2.2.6. Kenar etkileri.....	21
2.3. İdeal MIS/MPS Yapı (Metal-Yarıiletken/Polimer-Yarıiletken).....	21
2.3.1. Yığılma bölgesi	25
2.3.2. Tüketim bölgesi.....	25
2.3.3 Terslenim bölgesi.....	26

	Sayfa
2.4. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları	27
2.4.1. Termiyonik emisyon teorisi	29
2.4.2. Difüzyon teorisi.....	31
2.4.3 Termiyonik emisyon-Difüzyon teorisi (TED)	32
2.5. Schottky Diyotlarda Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri	33
2.6. Schottky Diyotlarda Kapasitans-Voltaj (C-V) Karakteristikleri	34
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	37
3.1. Kadmiyum Sülfür ve Polivinilpirolidon Hakkında Bazı Genel Özellikler	37
3.1.1. Kadmiyum sülfür (CdS) ve Ag katkılı kadmiyum sülfür (AgCdS).....	37
3.1.2. Polivinilpirolidon (PVP)	38
3.2. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky Diyotun Elde Edilmesi	39
3.2.1. Kristal temizleme aşaması	39
3.2.2. Omik kontakın elde edilme aşaması	39
3.2.3. Doğrultucu kontakın oluşturulması.....	40
3.3. Deneysel Ölçüm Sistemi	41
4. DENEYSEL SONUÇLAR	43
4.1. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky Diyotunun Karanlık ve Aydınlik Koşullar Altında Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiklerinin İncelenmesi.....	43
4.2. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky Diyotunun İleri ve Ters Öngerilim Altında Kapasitans ve İletkenlik Analizi	55
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ.....	73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlı olarak doğrultucu (Schottky) ve omik kontak oluşması	7
Çizelge 3.1. CdS kristalinin oda sıcaklığında (300 K) bazı temel fiziksel özellikleri...	37
Çizelge 4.1. Au/(AgCdS:PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyot'unun I-V özelliklerinden karanlık ve aydınlık ortam için elde edilen idealite faktörü (n), doyma akımı (I_0), bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) ve doğrultma oranı (RR) değerleri ...	46
Çizelge 4.2. Au/(AgCdS:PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyot'unun Ohm Yasası kullanılarak hesaplanan seri direnç (R_s) ve şönt direnç (R_{sh}) değerleri.....	47
Çizelge 4.3. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık (A) ve aydınlık (B) (100 mW/cm^2) koşullar altında elde edilen $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri kullanılarak hesaplanan idealite faktörü (n), seri direnç (R_s), bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) değerleri.....	49
Çizelge 4.4. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık (A) ve aydınlık (B) (100 mW/cm^2) koşullar altında elde edilen seri direnç (R_s) ve bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) değerleri	52
Çizelge 4.5. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun 1 MHz frekans değeri için hesaplanan N_D , W_D , E_m , V_o , E_F ve $\Phi_B(C-V)$ değerleri	60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir MS yapının şematik gösterimi	5
Şekil 2.2. Metal ile n-tipi yarıiletkenin (a) kontak edilmeden önce ve (b) kontak edildikten sonra oluşan enerji bant diyagramı (Schottky kontak).....	8
Şekil 2.3. Metal/n-tipi (MS) yarıiletken için (a) doğru beslem (b) ters beslem altındaki enerji bant diyagramları	11
Şekil 2.4. Metal/n-tipi (MS) yarıiletken için (a) kontak öncesi (b) kontak sonrası enerji bant diyagramları (Omik kontak).....	12
Şekil 2.5. Schottky ve omik kontakın akım-voltaj grafiği	13
Şekil 2.6. Elektrik alan değeri sıfırken (a) ve elektrik alan değeri sıfırdan farklı sabit bir değerdeyken (b) görüntü kuvveti sonucunda oluşan potansiyel engel değişimi	14
Şekil 2.7. Silisyum kristali için kırık kovalent bağlar	17
Şekil 2.8. n-tipi bir yarıiletkende oluşan arayüzey tuzaklarının bir metalle kontak edilmeden önce (a) ve kontak edildikten sonra (b) meydana gelen enerji-bant diyagramı.....	17
Şekil 2.9. Bir MOS yapının kesitinde yarıiletken/oksit tabaka bulunan arayüzey durumları.....	19
Şekil 2.10. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapının şematik gösterimi	21
Şekil 2.11. Termal denge ($V=0$) durumunda n-tipi yarıiletken (a) ve p-tipi yarıiletken (b) ideal bir MIS yapı için enerji bant diyagramı.....	22
Şekil 2.12. MIS yapının eşdeğer devresi	23
Şekil 2.13. Uygulanan gerilimin değerine bağlı olarak n-tipi bir MIS yapının C-V eğrisi.....	24
Şekil 2.14. İdeal MIS yapının eşdeğer kapasitans devresi, (A) Yığılma, (B) Tüketim, (C) Terslenim	25
Şekil 2.15. İdeal MIS yapının $V \neq 0$ durumunda n-tipi yarıiletken (sağ) ve p-tipi yarıiletken (sol) için enerji-bant diyagramı (a) Yığılma (b) Tüketim (c) Terslenim	27
Şekil 2.16. Metal-yarıiletken (MS) Kontakların Doğru Beslem durumunda gerçekleşen akım-iletim mekanizmaları	28

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Omik kontak ve Doğrultucu kontak oluşumu için kullanılan buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi.....	40
Şekil 3.2. Doğrultucu kontak elde edilmesi için kullanılması gereken maske.....	41
Şekil 3.3. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky engel diyotunun sembolik gösterimi.....	41
Şekil 3.4. Akım-gerilim ölçümleri için kullanılan düzenek	42
Şekil 3.5. Empedans-gerilim ölçümleri için kullanılan düzenek	42
Şekil 4.1. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık ve aydınlık koşullar altında yarı-logaritmik Ln (I)-V grafiği	44
Şekil 4.2. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık ile aydınlık (100 mW/cm ²) koşullar altında yarı-logaritmik Ln (I)-V grafiğinin lineer bölgeleri	45
Şekil 4.3. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık ve aydınlık (100 mW/cm ²) koşullar altında ln(Ri)-V grafiği.....	48
Şekil 4.4. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık (A) ve aydınlık (B) (100 mW/cm ²) koşullar altında hesaplanan dV/dln(I)-I ve H(I)-I grafikleri	50
Şekil 4.5. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık (A) ve aydınlık (B) (100 mW/cm ²) koşullar altında elde edilen F(V)-V eğrisi	51
Şekil 4.6. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık ve aydınlık (100 mW/cm ²) koşullar altında elde edilen Nss - (Ec-Ess) grafiği.....	54
Şekil 4.7. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun ışığa tepkisi (A) ve ışığa duyarlılığı (B) (100 mW/cm ²) koşullar altında elde edilen grafikleri .	55
Şekil 4.8. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık koşullar altında elde edilen C-V grafiği.....	56
Şekil 4.9. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık koşullar altında elde edilen G/ω-V grafiği.....	57
Şekil 4.10. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık koşullar altında elde edilen Rs-V grafiği (Nicollian-Brews yöntemiyle elde edildi).	58
Şekil 4.11. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık koşullar altında ters öngerilimli C ⁻² -V grafiği	60
Şekil 4.12. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun Nss-V eğrisi (yüksek-düşük frekans kapasitans yöntemiyle elde edildi.).....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\text{\AA}$	Angström
A	Doğrultucu kontak alanı
A^*	Richardson sabiti
A_{ox}	Yalıtkan tabakanın alanı
C_i	Arayüzey/yalıtkan tabaka kapasitansı
C_{LF}	Düşük frekansta ölçülen kapasitans değeri
C_m	Ölçülen kapasitans
C_{ox}	Yalıtkan/oksit tabakanın kapasitansı
C_s	Yarıiletken kapasitansı
C_{ss}	Arayüzey tuzaklarının kapasitansı
d_i	Arayüzey tabakanın kalınlığı
E	İç elektrik alan
E_c	İletim bandı
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_v	Valans/değerlik bandı
G_m	Ölçülen iletkenlik
I_0	Doyma akımı
$I_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru geçen akım
$I_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru geçen akım
n	İdealite faktörü
N_A	Yarıiletkene katkılanan alıcı atomları
N_{ss}	Arayüzey yüzey durumları

Simgeler**Açıklamalar** Q_{SC}

Uzay yükü kapasitansı

 RR

Doğrultma oranı

 R_s

Seri direnç

 V_D

Difüzyon potansiyeli

 W_0

Uzay yükü bölgesi

 W_D

Tüketim bölgesi kalınlığı

 Z

Atom sayısı

 ρ

Özdirenç

 τ

Arayüzey durumlarının ömrü

 ω

Açısal frekans

 $\Delta\phi$

Schottky engel düşmesi

 Φ_B

Potansiyel engel yüksekliği

 $\Phi_B(C-V)$

Engel yüksekliği (C-V den ölçülen)

 $\Phi_B(I-V)$

Engel yüksekliği (I-V den ölçülen)

 Φ_{B0}

Engel yüksekliği

 Φ_m

Metalin iş fonksiyonu

 Ω

Ohm

 ϵ_0

Boşluğun geçirgenlik sabiti

 σ_{AC}

AC elektriksel iletkenliği

 σ_{AC}

AC İletkenlik

Kısaltmalar**Açıklamalar** $AgCdS$

Ag katkılı Kadmiyum Sülfür

 CdS

Kadmiyum Sülfür

 C_{HF}

Yüksek frekansta ölçülen kapasitans değeri

 $C-V$

Kapasitans-gerilim

Kısaltmalar**Açıklamalar** **E_g**

Yasak enerji aralığı

 G/ω -V

İletkenlik-gerilim

I-V

Akım-gerilim

KM

Kondüktans metodu

M/S

Metal-yarıiletken

MIS

Metal/yalıtkan/yarıiletken

MOS

Metal/oksit/yarıiletken

MPS

Metal/polimer/yarıiletken

 N_D

Yarıiletkene katkılanan verici atomları

PVP

Polivinilpirolidon

SBD

Schottky engel diyotları

SBH

Schotyky engel yüksekliği

TE

Termiyonik emisyon

YDFKM

Yüksek-düşük frekans kapasitans metodu

 χ_s

Yarıiletkenin elektron ilgisi

 Φ_s

Yarıiletkenin iş fonksiyonu

1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan elektronik ekipmanların birçoğu, hayatımızın bir çok alanında karşımıza çıkan ve yaşamı kolaylaştıran yarıiletkenlerden oluşmaktadır. Bu yarı iletkenler teknolojik gelişmelerle beraber insan hayatının bir çok alanına etkide bulunmaktadır. Etki alanı çok geniş olması sebebiyle günlük hayatımız içerisinde yarı iletkenlerle karşılaşmamak neredeyse imkansızdır. Bu cihazlar televizyon, bilgisayar, cep telefonu ve diğer elektronik aletlerde işlevlerine göre farklı türleri kullanılmakta hayatımızın birçok alanında karşımıza çıkmaktadır. Metal/ (yalıtkan/polimer/ferroelektrik)/ yarıiletken (MIS, MPS) tipi diyotlar, güneş pilleri, kapasitörler ve transistörler, yarıiletken ve elektronik endüstrisinin temel taşlarıdır [1,2]. Yarıiletkenler iletkenlik bakımından iletkenler ve yalıtkanlar arasında yer alır. Normal koşullarda yalıtkan durumda olan yarıiletkenler, ısı, ışık veya üzerlerine uygulanan uygun voltaj değerleri altında serbest halde bulunan elektronlarından birkaçı hareketli hale geçer ve bunun sonucunda iletken gibi davranmaya başlar. Yarım asrı aşkın bir süredir bu cihazlar üzerinde çalışmalar yapılmış olmasına karşın, bunların iletim mekanizmaları ,elektiriksel özellikleri, metaller arasındaki engel yüksekliğinin (BH) ve ara yüzey durumlarının (N_{ss}) şekillendirilmiş doğası hakkında, bilim adamları arasında henüz net bir fikir birliği sağlanmamıştır. Ayrıca bu cihazların bilimsel ve teknik sorunu, performanslarını veya kalitelerini artırır iken diğer taraftan maliyetlerinin düşürülmesi ve kolay üretim mekanizmalarının araştırılmasıdır. Metal-yarıiletken arayüzeyinde kontağın doğrultma özelliğinden ilk kez 1874 yılında F. Braun bahsetmiştir. Braun bu keşfi sonucunda 1909 Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmıştır [3]. Daha sonra 1930'lu yıllarda Walter Schottky'in yapmış olduğu teorik çalışmalar ve araştırmalar sonucunda bu alanda yaptığı katkılarından dolayı bu tür diyotlara Schottky engel diyotları adı verilmiştir [4]. Schottky engel diyotları yüksek frekanslı anahtarlama uygulamaları, yüksek akım düşük voltaj uygulamaları, AC-DC çeviriciler, haberleşme elektroniği, güneş pilleri, yarıiletken dedektörler, enstrumantasyon elektroniği uygulama alanlarına örnek olarak verilebilir. Bu sebeple içerisinde yarıiletken bulunmayan teknolojik bir aygıtın olduğunu söylemek neredeyse imkansızdır.

Schottky engel diyotları idealde sıfır dirençle yüksek sıcaklık ve düşük basınç ortamında metal ile yarıiletkenin sıkı kontak edilmesiyle oluşturulur [5]. 1931'de Wilson katıların bant teorisinden yola çıkarak yarıiletkenin iletim teorisini matematiksel olarak ifade etmiştir [4]. 1938'de Walter Schottky ve Sir Neville Mott arayüzeyde meydana gelen

potansiyel engel yüksekliği hakkında birbirlerinden bağımsız olarak farklı teoriler geliştirmişlerdir. Mott'un teorisine göre; metal ve yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliği yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) ile metalin iş fonksiyonu (Φ_m) arasındaki farktan dolayı oluşmaktadır. Bu bölgede arayüzeyin saflığından dolayı elektrik alanının sabit olduğunu ileri sürmüştür [6,7]. Schottky ise; arayüzeyin saf olmadığını ve bu durumdan dolayı elektrik alanının doğrusal olarak arttığını öne sürmüştür [8,9].

Yarıiletken cihazların performansı, yarı iletkenin yüzey hazırlığı, kalınlığı, homojenliği ve dielektrik değerinin büyüklüğü, engel yüksekliğinin (BH) doğası, uygulanan voltaj, seri ve şönt dirençler (R_s , R_{sh}), idealite faktörü (n), frekans ve sıcaklık bağımlılığı, ara yüzey durumlarının (N_{ss}) dahil olmak üzere M/S arayüzünde büyütülmüş arayüz tabakası gibi birçok faktöre bağlıdır [10,11].

1942 yılında Bethe kontaklardaki elektriksel davranışı tam olarak açıklayabilmek adına Termiyonik Emisyon (TE) Teorisini geliştirmiştir [4,12]. Bu teoride, metalin içinde bulunan elektronların vakuma geçiş yapması ile elektronların engelden geçiş yapması aynı şekilde gerçekleşmektedir. Standart termiyonik emisyon (TE) teorisi, sıcaklık, frekans ve radyasyon gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak geniş bir voltaj aralığında ileri öngerilim I-V ve ters öngerilim C-V ölçümlerinden ana elektriksel parametreleri çıkarmak için kullanılır. Genel olarak, I-V ve C-V grafikleri, uygulamalarda N_{ss} , R_s ve arayüzey katmanının etkilerinden dolayı düşük, orta ve daha yüksek ön gerilimde çeşitli davranışlar gösterir. Bunlar arasında N_{ss} , orta öngerilim altında I-V ve C-V özellikleri üzerinde daha etkilidir, ancak R_s ve arayüzey katmanı, daha yüksek öngerilim altında daha etkilidir. Bu nedenle, ileri öngerilim I-V ve C-V grafikleri, devreye uygulanan öngerilim durumu diyotun N_{ss} katkı atomları sayısı, R_s seri direnç değeri, arayüzey tabakası ve tüketim tabakası tarafından paylaşılacağı için yüksek öngerilim altında içbükey bir eğrilik gösterir [13-16]. Ayrıca bazen idealite faktörünün değeri birden oldukça yüksek olabilir ki bu da standart TE teorisinden sapmanın bir kanıtıdır. Bu durumlarda, hem engel yüksekliğinin (BH) hem de idealite faktörü (n), ileri öngerilim bölgesinde voltaja bağımlı hale gelir [17,18]

Aydınlatma etkisi altında ($hc/q\lambda \geq E_g$), metal-yarıiletken kontakların birleşme noktasında veya tükenme bölgesinin yakınında giderek daha fazla elektron ve boşluk çifti üretilebilir. Daha sonra bu elektronik yükler iç elektrik alanı altında zıt yönlerde ($F=\pm qE$) hareket

edecek ve böylece devre üzerinde net bir fotoakım oluşturacaktır. Elektron ve deşik çiftlerinin bu ayrılımları, ters ön gerilim bölgesinde daha baskın hale gelir. Çünkü M/S arayüzündeki iç ve dış elektrik alanlar ters ön gerilim bölgesinde aynı yöndedir ve bu nedenle toplam elektrik alan ileri ön gerilim bölgesinden daha güçlüdür. Bu nedenle, ters ön gerilim bölgesinde, foto akım değeri, ileri ön gerilim bölgesinden oldukça yüksektir. Bu yük taşıyıcıların artması, foto iletkenliğin artmasına neden olur. Ayrıca fotodiyot veya güneş pillerindeki ışığa olan duyarlılık performanslarının da bir ölçüsüdür. Genel olarak, polimerler düşük geçirgenlik ve düşük iletkenliğe sahiptir, ancak polimere uygun oranlarda bazı metal veya metal oksitler eklenerek artırılabilir veya ayarlanabilir. Metal-yarıiletken kontaklarda arayüzey tabakası olarak daha çok kullanılan polimerler genellikle polivinil-alkol/pirolidon (PVA, PVP), polivinil-asetat (PVAc) ve poli-anilin/pirolidür (PANI, PPy). Bunlar arasında, özellikle hem PVP hem de PVA, fiziksel olarak çapraz bağlı olarak benzer fonksiyonel gruba sahiptir. Ancak, PVP amorf bir polimer iken, PVA yarı kristal bir polimerdir ve suda kolayca çözünebilen sentetik polimerler olabilirler [19,20].

Bu çalışmanın ilk amacı, Au/(AgCdS:PVP)/n-Si (MPS) tipi metal-yarıiletken kontağı üretmek ve oda sıcaklığında hem karanlıkta hem de 100 mW/cm^2 aydınlanma yoğunluğunda geniş voltaj aralığında I-V ve C/G-V ölçümlerinden temel elektriksel parametrelerini araştırmaktır.

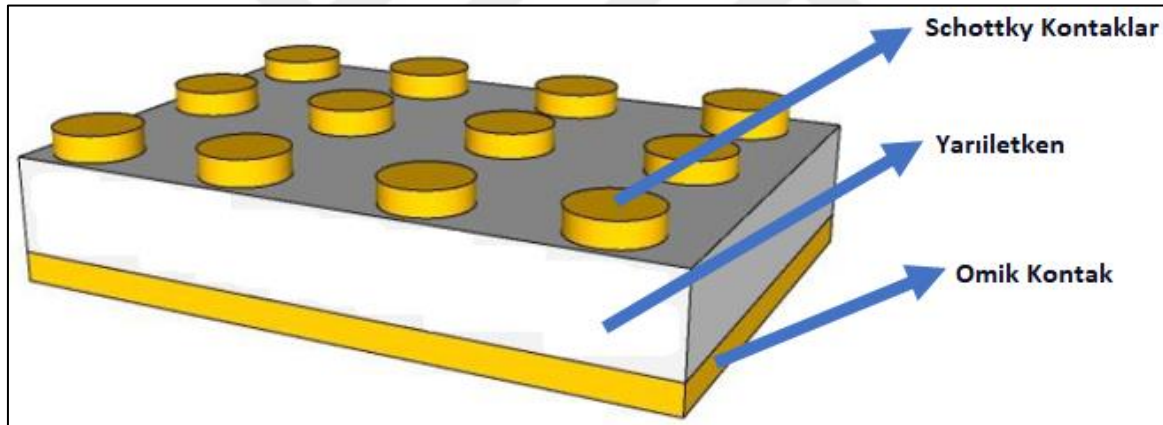
İkinci amaç, I-V ve C/G-V üzerindeki R_s , N_{ss} ve organik ara yüzey tabakasının etkisini belirlemektir. (AgCdS:PVP)/n-Si arayüzeyinde Keithley-2400 kaynak ölçer tarafından oda sıcaklığında karanlık ve 100 mW/cm^2 aydınlanma yoğunluğu altında alınan değerler ile 3 kHz ve 1 MHz arasında HP4192A LF empedans analizörü kullanılarak alınan değerler empedans ve akım ölçümlerinin (C/G-V ve I-V) hesaplanmasında kullanılmıştır.



2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar

Bir yarıiletken ile bir metal yüksek sıcaklık altında sıkı kontak edildiğinde enerji-bant diyagramlarının farklılığı nedeniyle aralarında bir yük akışı gerçekleşir. Isıl denge durumuna gelindiğinde ise bu olay sona erer. Malzemelerin ikisi içinde Fermi enerji seviyeleri ısı denge sonucunda aynı seviyeye gelir. İki malzemenin idealde sıfır dirençle temas etmesi sonucunda metal-yarıiletken kontak elde edilir [4,13,23,24]. Seçilen yarıiletken ve metalin atomik seviyede kontak edilmesi esnasında kullanılacak her türlü malzemenin temizliğinin iyi yapılması ve yüzeyinin pürüzsüz olmasına dikkat edilmesi gerekir. Bu sayede metal-yarıiletken (MS) diyotların karakteristik özelliklerinin anlaşılması kolaylaşır. Bir MS yapının şematik gösterimi Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Bir MS yapının şematik gösterimi

Bir metal ve yarıiletken atomik boyutta kontak edildiğinde, iki malzemenin iş fonksiyonuna ve yarıiletkenin türüne yani n veya p tipi olma durumuna göre Schottky (doğrultucu) kontak veya Omik kontak olmak üzere iki tür kontak oluşur. Bu nedenle öncelikle oluşacak bu kontakların bazı fiziksel tanımlarına değinmek gerekir. Bunlar;

- Metalin iş fonksiyonu (Φ_m): Elektronu serbest bir parçacık haline getirip çekirdekten koparmak için elektrona verilmesi gereken minimum enerji miktarıdır. Başka bir ifadeyle, metalin fermi enerji seviyesinde var olan bir elektronunu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli minimum enerji miktarıdır.

- Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s): Yarıiletkenin fermi enerji seviyesinde bulunan bir elektronunu vakum seviyesine çıkarmak için gereken minimum enerji miktarıdır. Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi alıcı veya verici katkı atomlarının (N_A , N_D) yoğunluğuna göre değiştiği için yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) buna bağlı olarak değişkenlik gösterir.
- Fermi enerjisi (E_F): İletkenlerde mutlak sıfır (0 K) sıcaklık altında metaller için elektronlar tarafından taban durumundan itibaren işgal edilen en yüksekteki dolu enerjili bölgedir. Yarıiletkenler için fermi enerjisi, sıcaklığa ve taşıyıcı atomların yoğunluğuna bağlı olarak valans bandı ile iletim bandı arasındaki bölgede bulunur. Fermi enerjisi n-tipi yarıiletkenlerde iletim bandının alt yüzeyine, p-tipi yarıiletkenlerde valans bandının üst yüzeyine daha yakındır.
- Vakum seviyesi: Metalin son yörüngesinde bulunan sıfır kinetik enerjiye sahip elektron için tanımlanan enerji seviyesidir. Vakum seviyesinin oluşacak yapı boyunca sürekli kalması MS yapının bariyer yüksekliğini etkileyen önemli bir parametredir.
- Elektron yakınlığı (χ_s): Farklı bir deyişle yarıiletkenin elektron ilgisi, katkı atomlarının yoğunluğuna bağlı olmayıp elektronun vakum seviyesi ile iletim bandının tabanı arasındaki enerji farkı olarak ifade edilir.

2.1.1. Doğrultucu ve omik kontak

MS yapı oluşturulurken kontak edilmek için seçilecek olan metal ile yarıiletkenin yapısı oldukça önemlidir. Bir metal ile yarıiletkenin yüksek sıcaklık altında sıkı kontak edilmesi sonucunda elde edilen diyotun, omik kontak veya Schottky (doğrultucu) kontak oluşturması, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin türüne (n veya p tipi) bağlı olarak değişkenlik gösterir. Metal ile yarıiletken yüksek sıcaklık altında kontak edildiğinde, taşıyıcı yükler metal içerisinde tek bir yönde hareket ediyorsa bu tür yapılara *doğrultucu kontak* veya *Schottky kontak* denir. Bu tür yapılar dışarıdan uygulanan gerilimin işaretine göre akımı bir yönde iletirken tersi yönde hemen hemen hiç iletmezler. Dışarıdan uygulanan gerilimin işaretine bağlı olmaksızın akımı her iki yönde de iletebilen yapılara ise *omik kontak* denir.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin türüne (n veya p tipi) bağlı olarak oluşturulan kontak türleri Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlı olarak doğrultucu (Schottky) ve omik kontak oluşması

Yarıiletkenin Türü	n-tipi yarıiletken	p-tipi yarıiletken
Omik kontak	$\Phi_S > \Phi_M$	$\Phi_S < \Phi_M$
Doğrultucu kontak	$\Phi_S < \Phi_M$	$\Phi_S > \Phi_M$

Metalin iş fonksiyonu Φ_M ve yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_S olmak üzere;

Bir metal ile n- tipi bir yarıiletken kontak edildiğinde; metalin iş fonksiyon değeri (Φ_M) , yarıiletkenin iş fonksiyon değerinden (Φ_S) büyük ($\Phi_M > \Phi_S$) ise bu tür kontaklara doğrultucu kontaklar, yarıiletkenin iş fonksiyon değeri (Φ_S) , metalin iş fonksiyon değerinden (Φ_M) büyük ($\Phi_S > \Phi_M$) ise bu tür kontaklara omik kontaklar denir [13, 25].

Bir metal ile p- tipi bir yarıiletken kontak edildiğinde; metalin iş fonksiyon değeri (Φ_M) , yarıiletkenin iş fonksiyon değerinden (Φ_S) büyük ($\Phi_S < \Phi_M$) ise bu tür kontaklara omik kontaklar, yarıiletkenin iş fonksiyon değeri (Φ_S) , metalin iş fonksiyon değerinden (Φ_M) büyük ($\Phi_S > \Phi_M$) ise bu tür kontaklara doğrultucu kontaklar denir [13, 25].

2.1.2. Metal/ n-tipi yarıiletken yapılarında Schottky (doğrultucu) kontaklar

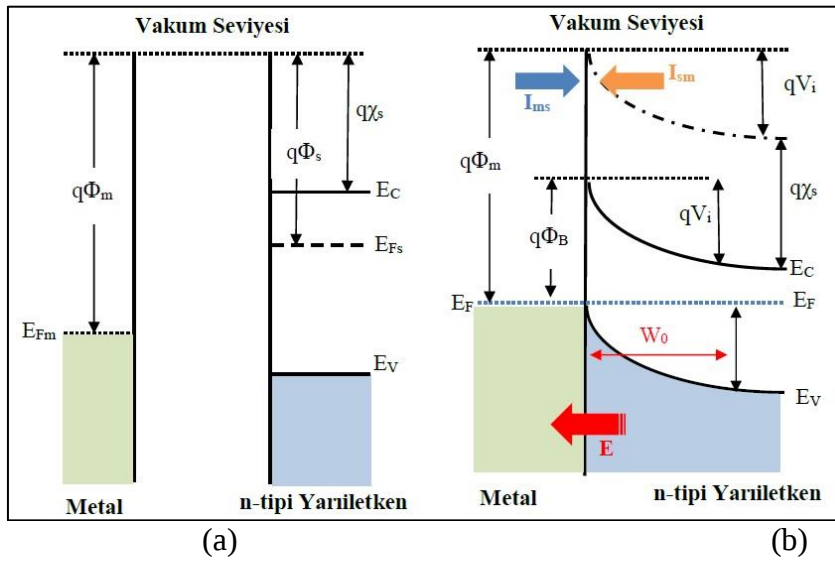
Schottky-Mott modeline göre, Şekil 2.2.(a)' da bir yarıiletken ile bir metal yüksek sıcaklık altında sıkı kontak edilmeden önceki enerji bant diyagramı verilmiştir. Şekle göre kontak öncesi yarıiletkenin fermi enerji seviyesi ile metalin fermi enerji seviyesi arasında fark bulunur. Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalin fermi enerji seviyesine karşı daha yüksektir. Ancak metal ile yarıiletken yüksek sıcaklık altında sıkı kontak edildikten sonraki termal denge durumunda, Şekil 2.2.(b)' de görüldüğü gibi enerji-bant diyagramlarında değişiklikler meydana gelmektedir.

Metal ile yarıiletken sıkı kontak edildikten sonra, elektronlar minimum enerjili hal yani kararlı hale geçecekleri için yarıiletkenin iletim bandında bulunan elektronlar metale doğru hareket ederek metalin ön yüzeyinde negatif yük bulunan bir bölge oluştururlar. Gerçekleşen bu olaya *difüzyon* denir. Metal ile yarıiletkenin fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar elektron akışı gerçekleşir. Bu eşitliğin sonucu *termal denge durumu* olarak kabul edilir. Yarıiletkenden geçip metale ulaşan elektronların arkalarında pozitif (+) yüklü atomlar (holes) kalır. Metal ile yarıiletken yüksek sıcaklık altında sıkı kontak edildikten

sonraki termal denge durumunda Şekil 2.2.(b)' de verilen enerji bant diyagramına göre yarıiletken tarafında bulunan elektronlar için aşmaları gereken engel yüksekliği ($E_C - E_F$) kadardır. Bu durumda elektron kolayca yarıiletkenden metale doğru geçiş yapabilir. Metal tarafında bulunan verici atomların yarıiletkene doğru gidebilmeleri için Φ_M büyüklüğünde bir potansiyel engel yüksekliğini geçmeleri gerekmektedir.

Yarıiletkenden metale doğru olan elektron geçişinin sonucunda yarıiletkenin ön yüzeyindeki valans elektronlarının sayısı düşer. Yarıiletkendeki elektron yoğunluğunun düşmesi yarıiletkenin fermi enerji seviyesi (E_F), valans bandı (E_V), iletkenlik bandı (E_C) yüksekliklerinin eşit miktarda aşağı doğru kaymasına sebep olur. Bunların sonucunda yarıiletkenin elektron yakınlığı (χ_s) kontak sonrasında da değişmez, sabit kalır. Metalde bulunan elektronların yoğunluğunun yarıiletkende bulunan elektronlardan fazla olması nedeniyle metaldeki seviyelerde yaşanan değişimler ihmal edilebilecek kadardır [8, 15].

Metalin ön yüzeyinde yarıiletkenden geçen serbest elektronları, iletim bandından metale geçen elektronlar ise arkasında pozitif yüklü deşikler bıraktığı için yarıiletkenin birleşim bölgesinde W_0 büyüklüğünde *deplasyon (boşaltılmış) bölge* isimli bir pozitif bir bölge meydana gelir. Oluşan bölge serbest halde bulunan elektronlar açısından arınmış olur. Bu nedenle oluşan bölgenin direnci yüksek, pozitif yüklü dolayısıyla da iletken değildir. Yarıiletken tarafından metal tarafa doğru giden iletim bandının verici atomları metalin birleşim kısmının olduğu tarafta ince ve negatif yüklü bir tabaka oluşturur.



Şekil 2.2. Metal ile n-tipi yarıiletkenin (a) kontak edilmeden önce ve (b) kontak edildikten sonra oluşan enerji bant diyagramı (Schottky kontak)

Termal dengeye ulaşıldıktan sonra yarıiletkenin ön tarafında pozitif (+) yük birikmesi, metalin ön tarafında ise negatif (-) yük birikmesi gerçekleşir. Bununla birlikte pozitif bölge olan yarıiletkenden, negatif bölge olan metal yüzeye doğru doğal bir elektrik alan veya kurulu elektrik alan oluşur.

Termal denge sağlanmasından yani metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyelerinin eşitlenmesinden ve tüketim bölgesinin oluşmasından dolayı yarıiletkende meydana gelen bant bükülmesi;

$$qV_i = q (\Phi_m - \Phi_s) \quad (2.1)$$

olarak ifade edilir [8,15,6,13]. Yani oluşan yapının bant bükülme miktarı, yarıiletken ile metalin iş fonksiyonlarının farkına eşittir. Burada, qV_i , yarıiletken tarafından metal tarafa doğru geçen elektronların karşılaştıkları *potansiyel engel yüksekliği* veya *bariyer yüksekliği* olarak adlandırılır. Başka bir ifadeyle, iletim bandında bulunan elektronların metale geçmeleri için aşmaları gereken minimum enerji miktarıdır.

Metalden yarıiletkene geçen elektronların karşılaştıkları engel yüksekliği, yarıiletkenden metale geçen elektronların karşılaştığı yükseklikten yarıiletkenin fermi seviyesi (E_F) kadar daha fazladır.

O halde metal tarafından yarıiletken tarafına doğru geçen elektronların karşılaştıkları engel yüksekliği aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir [8,15,6,13].

$$q\Phi_B = q(\Phi_M - \chi_s) = qV_i + (E_C - E_F) \quad (2.2)$$

Verilen eşitliği Schottky ve Mott birbirlerinden bağımsız olarak açıklamışlardır. Eş 2.2'nin ilk kısmı Schottky engeli şeklinde tanımlanır. Schottky bariyer yüksekliği (Φ_B) metalin iş fonksiyonu ve yarıiletkenin elektron ilgisine bağlıdır. Eşitlikte verilen χ_s ifadesi yarıiletkenin *elektron yatkınlığı*dır. Bu ifade katkılamağa bağlı olmayıp elektronun vakum seviyesi yüksekliği ile yarıiletkenin iletim bandının taban seviyesinin arasındaki enerji farkı olarak ifade edilir.

300 K sıcaklık altında V_i potansiyel engeli kT/q miktarından yüksektir yani bu engeli bu sıcaklıkta aşmak zordur. Bu nedenle yalnızca az miktarda elektron, bu engeli geçebilecek

enerjiye sahip olduğundan yarıiletken tarafından metal tarafa doğru geçen elektronlar bir akım ($I_{s \rightarrow m}$) oluşturabilir. Her hangi bir dış potansiyel uygulanmadığında ve termodinamik dengedeyken oluşan bu akım, metalden yarıiletkene doğru gelen akım ($I_{m \rightarrow s}$) ile birbirini dengeler. Sonuçta oluşan denge durumunda yarıiletken tarafından metal tarafa doğru geçen elektronların oluşturduğu akım ile metal tarafından yarıiletken tarafa doğru geçen yük taşıyıcıların oluşturduğu akım büyüklük olarak eşit yön olarak zıt olurlar. ($I_{m \rightarrow s} = -I_{s \rightarrow m}$). Akımların yönü zıt olduğu için termal denge durumunda diyot içerisinde oluşan net akım sıfır olur. Bu nedenle dış devre üzerinde net bir akımın oluşabilmesi için metal-yarıiletken kontağa ters veya doğru yönde öngerilim uygulanabilir.

MS yapıya dışardan uygulanan doğru veya ters öngerilim sonucunda gerilimin mertebesine göre termal denge durumundaki enerji-bant diyagramında oluşan kaymalar farklılık gösterir ve sonuçta devrede bir akım oluşur. Oluşan bu farklılıklar n-tipi/yarıiletken için şöyle açıklanabilir;

Doğru beslem:

Yapının yarıiletken ucuna negatif, metal ucuna pozitif $V_F > 0$ gerilimi uygulandığında yarıiletken tarafında termal denge durumunda V_i kadar olan potansiyel engeli ($V_i - V_F$) kadar düşer. Şekil 2.3. (a)'da yeni enerji bant diyagramında görüldüğü üzere elektronların aşmaları gereken engel yüksekliği düştüğü için metale kolayca geçebilirler. Metal boyunca gerilim düşmesi gerçekleşmediği için metal tarafın engel yüksekliği metal boyunca sabit yani değişmezken, yarıiletken taraftaki engel yüksekliği buna bağlı olarak azalır. Bu nedenle metalden yarıiletkene doğru oluşan net akım ($I_{m \rightarrow s}$) sabit kalır. Sonuçta doğru beslem altındayken yarıiletken tarafından metal tarafa doğru net bir elektron akımı oluşur.

Doğru beslem durumunda oluşan net akım termiyonik emisyon teorisine göre;

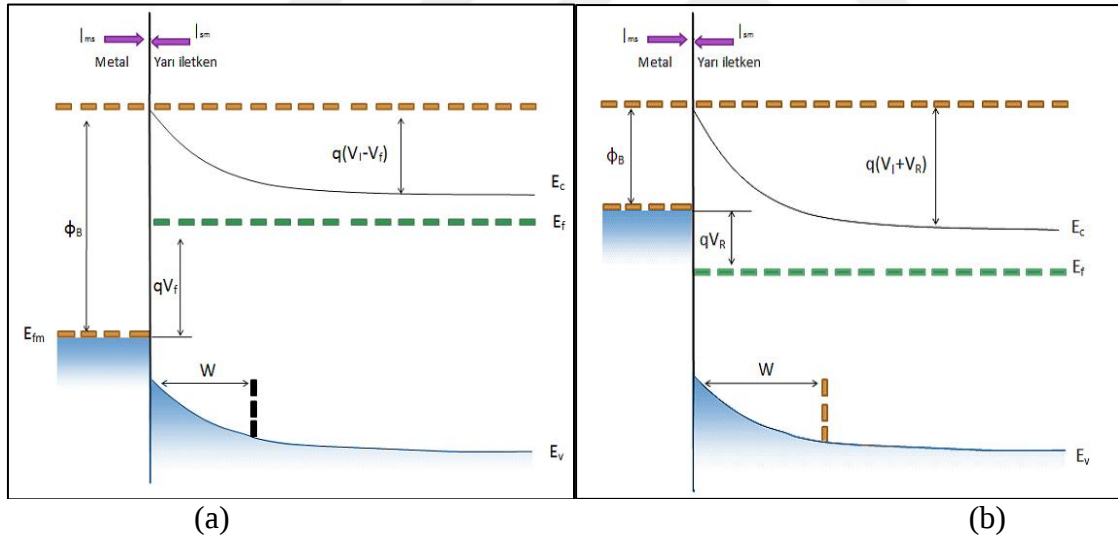
$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_F}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikte I_0 doyma akımı, I pozitif olan net akımdır.

Ters beslem:

Yapının yarıiletken ucuna pozitif, metal ucuna negatif $V_R < 0$ gerilimi uygulandığında yarıiletken tarafında termal denge durumunda V_i kadar olan potansiyel engeli ($V_i + V_R$) kadar yükselir. Şekil 2.3. (b)'de yeni enerji bant diyagramında görüldüğü üzere elektronların aşmaları gereken engel yüksekliği yükseleceği için metale geçmeleri daha zordur. Yarıiletken taraftaki engel yüksekliği artarken, metal tarafındaki engel yüksekliği metal boyunca gerilim yükselmesi gerçekleşmediğinden değişmez. Bu nedenle metalden yarıiletkeneye doğru oluşan net akım ($I_{m \rightarrow s}$) sabit kalır. Sonuçta ters beslem durumunda yarıiletkenenden metale doğru küçük bir *ters beslem elektron* ($-I_{s \rightarrow m}$) akımı oluşur. Sonuçta oluşan bu akıma *sızıntı akımı* (*leakage current*) adı verilir.

Kutupların tersine çevrilmesi durumunda p-tipi yarıiletken için de benzer sonuçlar geçerlidir.



Şekil 2.3. Metal/n-tipi (MS) yarıiletken için (a) doğru beslem (b) ters beslem altındaki enerji bant diyagramları

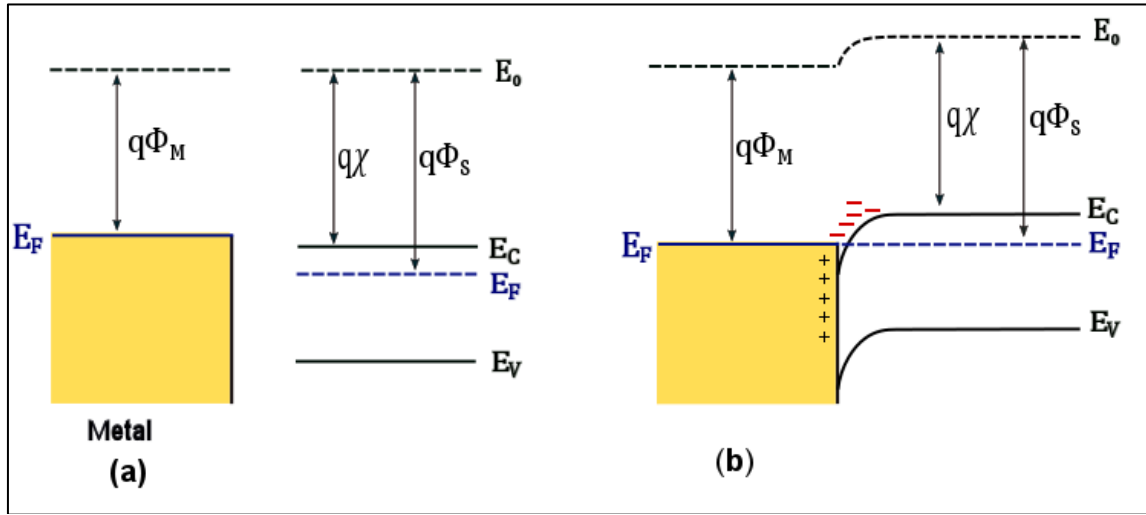
Doğru beslem ve Ters beslem durumlarında oluşan enerji bant diyagramları incelendiğinde (Şekil 2.3.a-b) tek bir Fermi enerjisi olmadığı görülür. Elektronların çıkış yaptığı bölgenin, giriş yaptığı bölgeye göre Fermi enerjisinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

Doğru ve Ters beslem durumlarında gerçekleşen bir diğer durumda tüketim bölgesinin genişliğindeki değişimdir. Termal denge durumundakine göre tüketim bölgesinin genişliği doğru beslem durumunda azalırken ters beslem durumunda artmaktadır. MS, MOS/MPS

yapılar uygulanan dış gerilime bağlı olarak değişen tüketim bölgesinin genişliği sonucunda kapasitans özellikleri önemli ölçüde değişim gösterebilmektedir.

2.1.3. Metal/ n-tipi yarıiletken yapılarda omik kontaklar

Yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan daha büyük olacak şekilde seçilip yüksek sıcaklık ve vakum altında kontak edilmesi sonucunda oluşan yapıya omik kontak denir. Şekil 2.4.'de omik kontakın kontak gerçekleştirilmeden önceki (a) ve kontak gerçekleştirildikten sonraki (b) enerji-bant diyagramı verilmiştir.



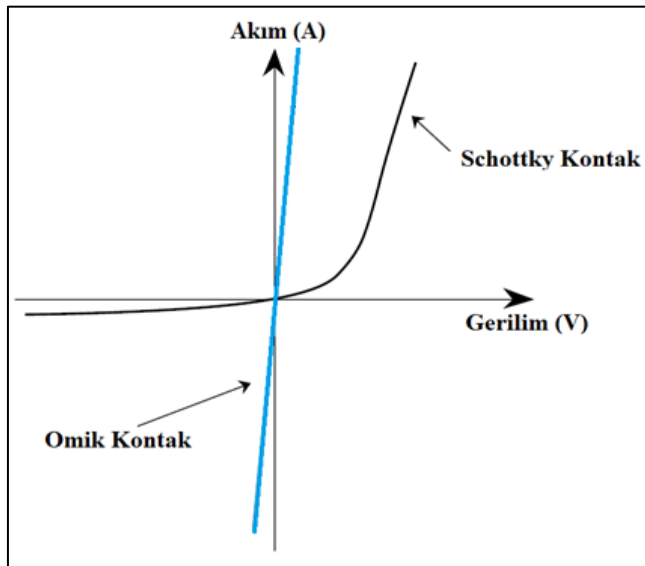
Şekil 2.4. Metal/n-tipi (MS) yarıiletken için (a) kontak öncesi (b) kontak sonrası enerji bant diyagramları (Omik kontak)

Kontak sonrası metalde bulunan elektronlar, her iki fermi enerji seviyesi eşitlenene kadar yarıiletken tarafına doğru geçmeye başlar. Metal elektronlarının yarıiletkenin iletim bandına akması sonucunda metalin kontak bölgesinde pozitif yük ve yarıiletkenin kontak bölgesinde ise negatif yük biriken bölge oluşmasına neden olur. Bu durum Şekil 2.4.(b) de verilmiştir. Oluşan kontakın termal dengeye ulaşması sonucunda fermi enerji seviyeleri eşitlenir ve yarıiletkenin fermi enerji seviyesinde yükselme meydana gelir. Bunun sonucunda yarıiletkende bir uzay yükü bölgesi veya tüketim tabakası oluşmayacağı için akım yalnızca yarıiletkenin yığılma bölgesinin direnci ile sınırlı kalır.

Yapıya bir dış voltaj uygulandığında, oluşan bir tüketim tabakası olmadığından uygulanan bu voltaj yarıiletken boyunca yayılır. Temas ileri yönlü olduğunda (metal kısmına pozitif yarıiletken kısmına negatif voltaj uygulandığında) elektronlar için oluşan bir engel

olmadığı için yarıiletkenenden metale kolayca akabilir. Temas ters yönde olduğunda (metal kısmına negatif yarıiletken kısmına pozitif voltaj uygulandığında) uygulanan voltaj metal elektronlarının karşılaştığı küçük engeli aşması için yeterli olacağından metalden yarıiletkene doğru kolayca akabilirler. Bunun sonucunda akım her iki yönde de oluşmuş olur.

Omik kontaklarda akım her iki yönde de oluştuğu için akım-voltaj karakteristiği doğrusal yapıda iken, schottky kontaklarda akım tek yönlü oluştuğu için doğrusal olmayan yapıdadır. Kontakların akım-voltaj grafiği Şekil 2.5.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Schottky ve omik kontakların akım-voltaj grafiği

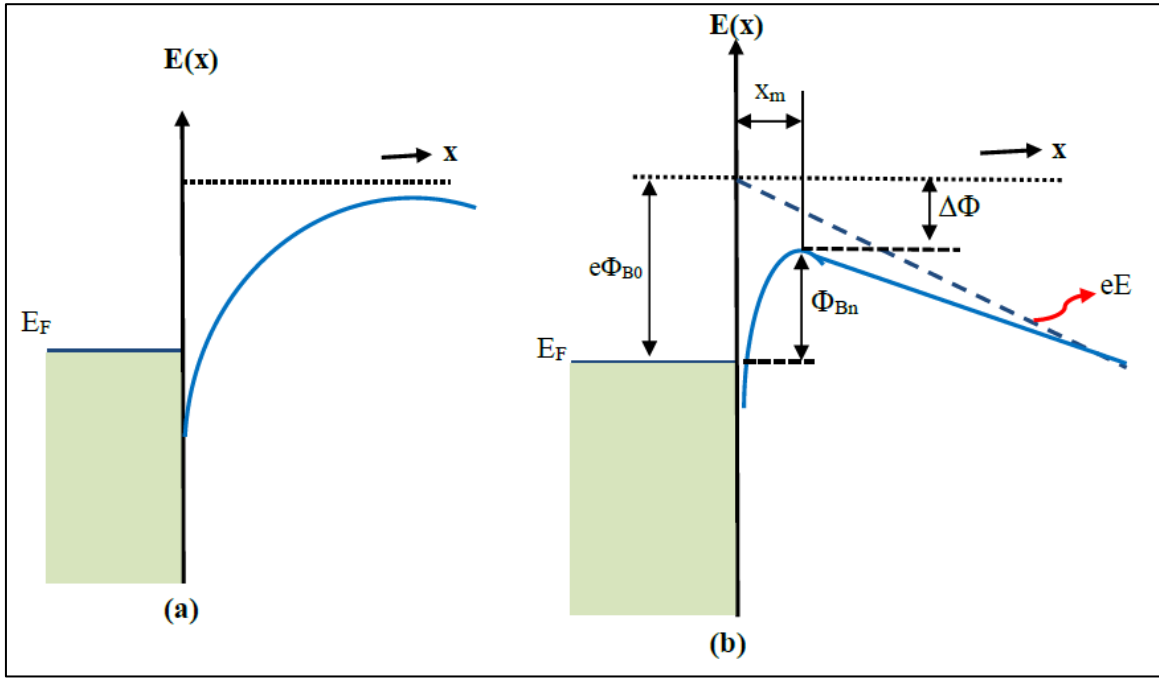
2.2. Schottky Kontakların İdeal Durumdan Sapma Sebepleri

Schottky kontakların ideal durumdan sapma nedenlerini birkaç başlık altında incelemeye çalışalım.

2.2.1. Schottky engel yükseliğinin hayali kuvvet etkisiyle düşmesi (Hayali Schottky)

Yarıiletkenenden metale geçen elektronlar arkalarında pozitif boşluklar bırakır. Bu nedenle geçen elektron sayısı kadar boşluk oluşur. Bu elektron ve boşluklar simetrik olduklarından bu yüklere *imaj (görüntü) yükleri* nedir.

Bir metal-vakum sisteminde metal taraftan $+x$ kadar uzakta bulunan bir elektron metale doğru dik bir elektrik alan oluşturur. Oluşan bu elektrik alan metale $-x$ kadar uzaklıkta bulunan hayali bir pozitif yük referans alınarak hesaplanabilir. Şekil 2.6 'da Metal-vakum sisteminde elektrik alan değeri sıfırken ve elektrik alan değeri sıfırdan farklı sabit bir değerdeyken görüntü kuvveti sonucunda oluşan potansiyel engelde bir kıvrılma meydana gelmektedir.



Şekil 2.6. Elektrik alan değeri sıfırken (a) ve elektrik alan değeri sıfırdan farklı sabit bir değerdeyken (b) görüntü kuvveti sonucunda oluşan potansiyel engel değişimi

Buna göre sabit bir elektrik alan altında görüntü kuvveti etkisiyle engel yüksekliği azalmaktadır. Bu durum her ne kadar elektrik alan etkisiyle gerçekleşmiş olsa bile MS veya MIS tipi diyotlarda uygulanan gerilim düşük olduğu için oluşan bu engel düşmesi ihmal edilecek kadar küçüktür. Dolayısıyla bu durum hesaplamada dikkate alınmayabilir [26,27].

2.2.2. Direnç etkisi

Direnç faktörü Schottky diyotların I-V karakteristiklerini etkiler. Schottky diyotların seri direnç (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}) olmak üzere iki tür karakteristik değeri bulunur. Ters beslem gerilim altında şönt direnci (R_{sh}) etkiliyken, doğru beslem gerilim altında ise seri direnç (R_s) etkilidir.

Şönt direnç (R_{sh}) etkisi

Schottky diyotun metal-yarıiletken kontak direncine *şönt direnci* denir. Bu direnç R_{sh} ile gösterilir. Teorik olarak ideal bir diyot için şönt direnci sıfırdan farklı ve sonsuzdur. Elde edilen deneysel sonuçlara göre ise bu durum söz konusu değildir ve şönt direnç değeri $\geq 109 \Omega$ olması ve seri direnç değerinin bu değerden küçük olması gerekmektedir. Diyotun şönt direnç değerinin düşmesi sonucunda kaçak akımlar oluşabilir. Bunun sonucunda diyotun doğrultma oranı ve performansı önemli ölçüde düşmektedir.

Şönt direnci aşağıdaki nedenlerden dolayı oluşabilir. Bunlar [25];

- i. Diyotun eklem bölgesindeki bozulmalar,
- ii. Ölçme sistemi
- iii. Metal-yarıiletken tabaka arasındaki oksit bölgenin oluşmasıdır.

Seri direnç (R_s) etkisi

Schottky engel diyotun yarıiletken tarafındaki tüketim tabakasının dışında bulunan nötr bölgenin bu diyota karşı gösterdiği direnç değerine *seri direnç* adı verilir. Bu direnç R_s ile şeklinde ifade edilir. Seri direnç değeri, Akım-Voltaj (I-V) hesaplamalarında voltaj uygulamasının fazla olduğu durumlarda ortaya çıkar ve akım değerinde düşme meydana getirebilir. Dolayısıyla diyotun verimliliği (performansı) düşer. Bu duruma ek olarak seri direnç, Kapasitans-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj (C-V ve G/ω -V) hesaplamalarında özellikle frekans değerinin fazla ($f \geq 1$ MHz) olduğu durumlarda yığılma bölgesine daha çok etki eder [5,36].

Seri direnç beş sebepten dolayı meydana gelebilir. Bu nedenler aşağıdaki gibi sıralanabilir [25];

- i. Yarıiletken ve omik kontak arasında büyütme esnasında kullanılan filmin yüzey kirliliği, toz veya organik kirlilikler
- ii. Yarıiletkenin arka yüzeyine yapılan omik kontak
- iii. Kontak üzerinden ölçüm alma esnasında kullanılan tel

- iv. Yarıiletken-Metal arasında bulunan katkılanmış veya doğal bir arayüzey bölgesinin var olması
- v. Yarıiletkenin doğrultucu kontak bölgesindeki tüketim tabakasıdır.

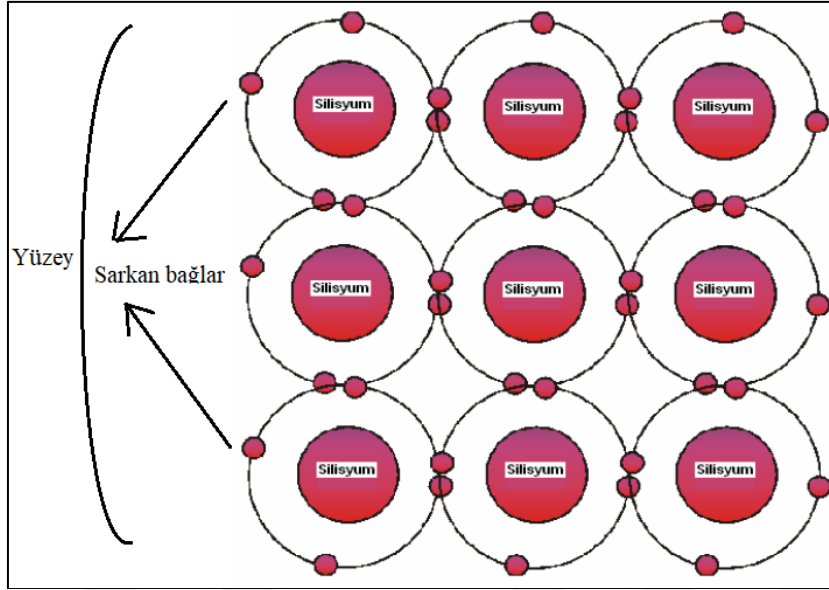
2.2.3. Arayüzey durumları

Metalin iş fonksiyonuna bağlı olarak bariyer yüksekliğinin (Φ_B) doğrusal olarak arttığı Eş. 2.1' de görülmektedir. İyonik yapılı yarıiletkenlerde bariyer yüksekliği metalin iş fonksiyonuna çoğunlukla bağlıdır. Kovalent yapılı yarıiletkenlerin (Si, Ge, GaAs vb.) bariyer yüksekliği iş fonksiyonuna çoğunlukla bağlı değilken bazı durumlarda neredeyse tamamen bağımsızdır.

Bariyer yüksekliğinin metalin iş fonksiyonuna olan bağlılığın yarıiletken yüzeyinde yüksek yoğunluklu yüzey durumlarının varlığının sebep olduğu ilk olarak Bardeen tarafından açıklanmıştır.

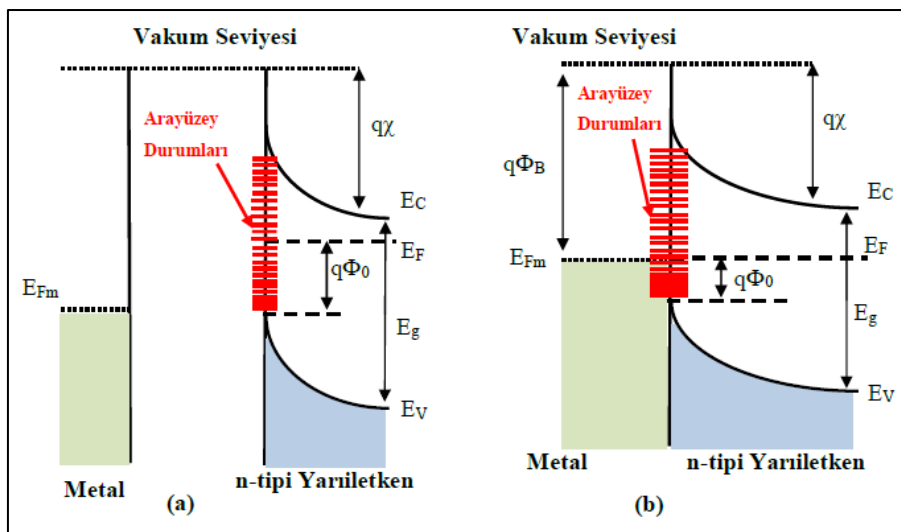
Yarıiletkenin kristal örgü düzeni vakum seviyesinde son bulur. Kovalent bağ yapılı yarıiletkenlerde yüzey atomları yarıiletken tarafında kalan kısmında bağ yapan atomları bulunur. Dolayısıyla yüzeyde bağ yapabileceği atomlar bulunmaz. Bu nedenle vakum seviyesindeki her bir atomun bağ yapabileceği sadece tek bir elektron bulunur. Bu nedenle bir elektronun eksik olduğu kırık kovalent bağ yani *sarkan bağlar* (*dangling bonds*) oluşur.

Şekil 2.7.' de silisyum kristali için sarkan bağlar diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Silisyum kristali için kırık kovalent bağlar

Kırık kovalent bağlar yarıiletken içerisindeki elektronların kolayca yerleşebileceği enerji durumlarının oluşmasına neden olur. Bu duruma *arayüzey durumları* veya *arayüzey tuzakları* denir. Arayüzey tuzakları nötr bir Φ_0 seviyesi ile ifade edilebilir. Bu nötr seviye, yarıiletkende bant bükülmesi yaşanmadığı durumda arayüzey tuzaklarının elektronlar tarafından yüzeyin nötrleneceği bir konumdur. Yarıiletkende oluşan arayüzey tuzaklarının bir metalle kontak öncesi ve kontak sonrası enerji-bant diyagramı Şekil 2.8.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. n-tipi bir yarıiletkende oluşan arayüzey tuzaklarının bir metalle kontak edilmeden önce (a) ve kontak edildikten sonra (b) meydana gelen enerji-bant diyagramı

Oluşan bu nötr bölgenin Φ_0 altındaki enerji seviyeleri verici enerji seviyeleri dolayısıyla Φ_0 üzerindeki enerji seviyeleri alıcı enerji seviyeleri gibi davranır. Metal ile yarıiletken kontak edilmediği durumda elektronlar yarıiletken kristalden dolayı arayüzey durumlarında tuzaklanır. n-tipi bir yarıiletken ile metal sıkı kontak edildiği durumda ve bunun sonucunda bant bükülmesi oluştuğunda arayüzey durumları fermi enerji seviyesi üzerindeyken iletim bandına doğru sıkışır. Bu durumda tuzaklanmış olan bazı elektronlar iletim bandından metale doğru geçer. Süreç fermi seviyeleri eşitlenince yani sistem termal denge durumuna gelince sona erer. (Şekil 2.8. (b)). Eğer arayüzey tuzak durumlarının yoğunluğu fermi enerji seviyesindeki değişime karşın çok büyükse çok sayıda yük alışverişi arayüzey tuzakları ile metal arasında gerçekleşir. Bu durumda yarıiletkendeki uzay yükü bölgesi neredeyse hiç değişime uğramadan kalır.

Fermi seviyeleri eşitlendiğinde potansiyel engel yüksekliği, metalin iş fonksiyonundan bağımsız olarak;

$$q \Phi_B = (E_g - q \Phi_0) \quad (2.4)$$

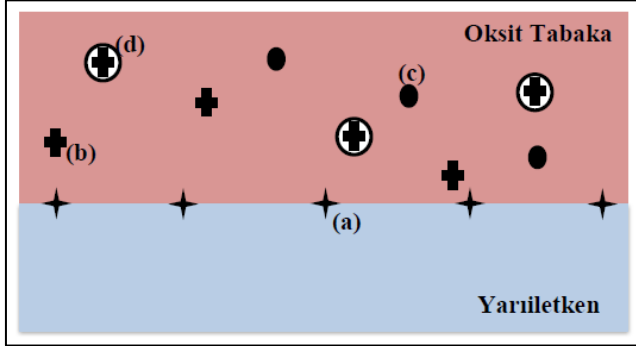
eşitliği ile ifade edilebilir.

Bunun sonucunda potansiyel engel yüksekliği ve fermi seviyesinin arayüzey tuzakları tarafından sabitlendiği sonucu çıkartılabilir ve bu duruma *fermi seviyesi sabitlenmesi* (*fermi level pinned*) denir.

Arayüzey durumları dört farklı grupta sınıflandırılabilir. Şekil 2.9.' da bu gruplar temsili olarak gösterilmiştir [28].

- a. *Arayüzey tuzak yükleri* (Q_{it}): Yarıiletkenin yasak enerji aralığında yarıiletken ile arayüzey kısmında tuzaklanmış yüklerdir. Bu tuzaklar arayüzeye uygulanan gerilime bağlı olarak yüklenip boşalabilir.
- b. *Sabit oksit yükler* (Q_f): Uygulanan bir dış elektrik altında genelde sabit ve arayüzeye yakın veya arayüzeye yerleşmiş yüklerdir.
- c. *Tuzaklanmış oksit yükler* (Q_m): Yapı içerisine dağılmış halde tuzaklanmış elektron veya hollerden sonucu oluşabilir. Yüksek enerjili parçacıklar (X-ray gibi) kaynaklı oluşabilir.

d. *Hareketli iyonik yükler* (Q_{ot}): İyonik safsızlıkların (Na^+ , H^+ vb.) neden olduğu yüklerdir. Arayüzey tabakası içerisinde hareketli olarak bulunabilirler.



Şekil 2.9. Bir MOS yapının kesitinde yarıiletken/oksit tabaka bulunan arayüzey durumları

Arayüzey tuzaklarının ölçülmesinde MOS tipi diyotlar için bazı yöntemler kullanılabilir [22,29,30].

Kondüktans metodu

Bu metod 1967 yılında ilk kez Nicollian ve Goetzberger tarafından geliştirilmiştir [30]. Bu metodun arayüzey durumlarının hesaplanmasında kesin ve doğru sonuç vermesi en önemli özelliklerinden birisidir [25,30]. Kondüktans metodunun bir diğer önemli özelliği $10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ gibi küçük bir sınırın altında arayüzey durumlarının ölçülmesine olanak tanımasıdır. Bu metod ile yüzey potansiyel değişimi, tüketim ve terslenim bölgelerindeki N_{ss} değeri ölçülebilmektedir. Kondüktans metodu, MOS tipi kontağın ölçülmüş kapasitans ve iletkenlik değerlerin referans alınarak elde edilir.

Yüksek-düşük frekans kapasitans metodu

Arayüzey tuzaklarının kapasitans ölçümleriyle hesaplanan bir diğer yöntemde Yüksek-Düşük Frekans Kapasitans Metodudur.

Terman [31] tarafından geliştirilen Yüksek-frekans metodu ile Berglund [32] tarafından geliştirilen Düşük-frekans metodlarını 1971 yılında birleştiren Castagne ve Vapaille Yüksek-Düşük Frekans Kapasitans Metodunu geliştirmişlerdir [33].

Kondüktans Metoduna göre daha kolay ve kullanışlı bir yöntemdir. Arayüzey durumları frekans değeri arttıkça ac sinyalinin takip edemezken, frekans değeri düştükçe takip edebilir. YSFKM ise yüksek ve düşük frekans değerlerine bağlı olarak kapasitans eğrisi arasındaki farkı kullanarak arayüzey durumlarını hesaplayabilir. Castagne ve Vapaille'a göre Yüksek-Düşük Frekans Kapasitans Metodun aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi tanımlanır [33].

$$N_{SS} = \frac{1}{qA} \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{OX}} \right)^{-1} - \left(\left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{OX}} \right)^{-1} \right) \right] \quad (2.5)$$

formülde C_{LF} diyotun düşük frekans değeri için ölçülmüş kapasitans değeri, C_{HF} yüksek frekans değeri için ölçülmüş kapasitans değeri, C_{OX} oksit bölgenin kapasitans değeri ve A ise diyotun alanıdır.

2.2.4. Hareketli iyonlar

Na^+ , K^+ , Li^+ , H_3O^+ şeklinde örnek verebileceğimiz hareketli iyonlar veya yükler metal-yarıiletken arayüzeylerinde veya yarıiletken-yalıtkan arayüzeylerinde bulunurlar. Oksit içinde düşük sıcaklık altında bu iyonlar hareketli olmaları nedeniyle sürüklenebilirler. Hareketli iyonlar bazı durumlarda oksit içinde bulunabilirler. Bunlara mekanik parlatma durumunda eldivensiz temaslar, bu iyonları içinde bulunduran kimyasal maddeler, oksitleme fırını, kirlenmiş kuartz tutucuları örnek olarak verilebilir. MIS yapının kararlılığı bu iyonların uygulanan elektrik alan altında harekete geçmesi sonucunda bozulabilir.

2.2.5. Tünelleme

Yarıiletkenin düşük sıcaklıklarda fazla katkılanması sonucunda tüketim tabakası kalınlığı inceler. Bunun sonucunda yarıiletkende bulunan elektronlar engelin tamamını aşmadan iletim bandından metale geçebilir. Bu durum *tünelleme(tunneling)* olarak adlandırılır. Bu durum yarıiletkenden metale geçen elektronlarda görüldüğü gibi metalden yarıiletkene geçen elektronlarda da görülebilir. Metal/n-tipi yarıiletken yüksek sıcaklık altında sıkı kontak edilmesi sonrasında elde edilen yapıya Şekil 2.3(b)' de gösterildiği gibi ters VR voltajı uygulandığında tüketim tabakasının genişliği inceler. Bu durumda her iki yönde de (metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale) geçiş yapan elektronların sayısı artar. Tünelleme, Termiyonik Alan Emisyonu (TFE) ve/veya Alan Emisyonu (FE) olarak da

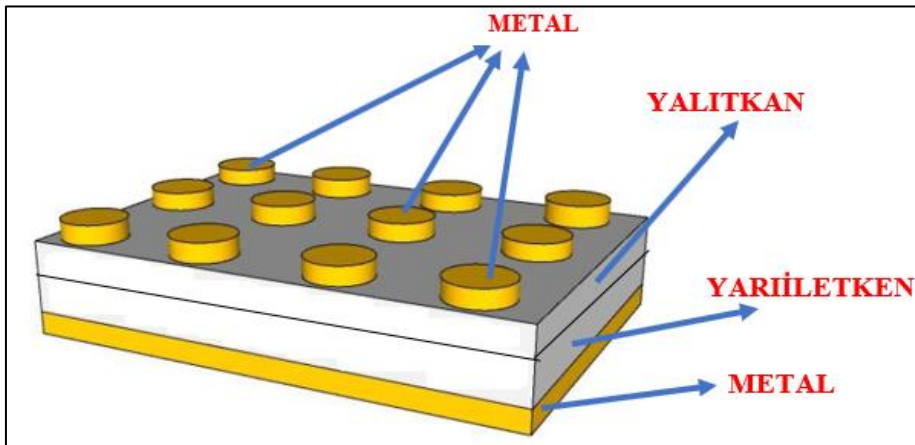
adlandırılabilir. Bu durum nedeniyle Schottky diyotların elektriksel özelliklerinde ideal duruma göre değişimler gözlenebilmektedir [34,35].

2.2.6. Kenar etkileri

Schottky kontaklar çoğunlukla yarıiletken tarafın üzerine küçük bir metal nokta kaynak yapılarak oluşturulduğunda, bu metal nokta kaynağın iç kısımlarında (merkezinde) oluşturulan elektrik alanın, kenar kısımlarında oluşan elektrik alandan fazla olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda genellikle, ters öngerilim altındaki Schottky kontaklardan teorik hesaplamalarla bulunan ters beslem akımının deneysel değerlere göre daha az olduğu görülmüştür. Oluşan bu durumun sızıntı akımından kaynaklanabileceği ortaya konuldu.

2.3. İdeal MIS/MPS Yapı (Metal-Yarıiletken/Polimer-Yarıiletken)

Schottky kontaklarda metal-yarıiletken yüzey arasına iletken olmayan bir malzeme kaplanmasıyla oluşturulan yapılara MIS (metal-insulator-semiconductor) yapılar, polimer bir malzeme kaplanmasıyla oluşturulan yapılara MPS (metal-polymer-semiconductor) yapılar olarak adlandırılırlar. Aşağıda MIS yapının şematik gösterimi Şekil 2.10' da verilmiştir.

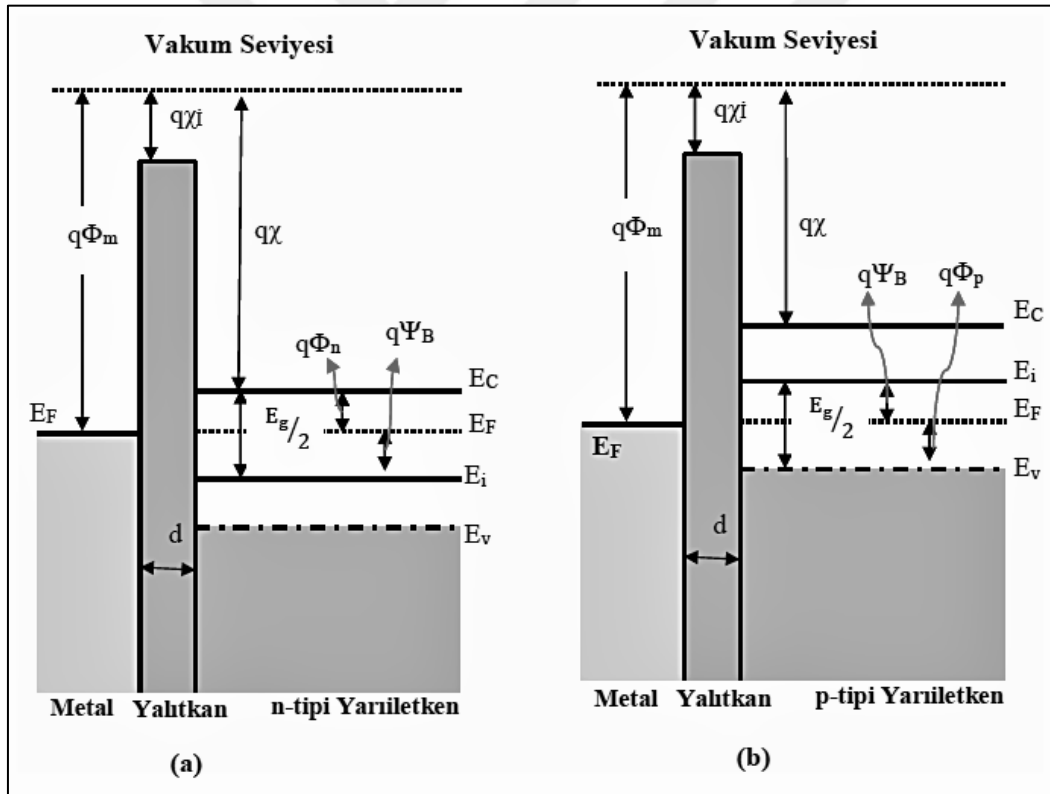


Şekil 2.10. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapının şematik gösterimi

İdeal bir MIS yapı aşağıdaki özellikleri bulundurmalıdır. Bunlar;

- i. Metalden yarıiletkene geçecek herhangi bir taşıyıcı yük bulunmadığı için yalıtkanın iletkenlik durumu sıfır olur. Metal-yarıiletken arasında herhangi bir akım oluşmaz. Başka bir deyişle arayüzey tuzak yükleri bulunmaz.
- ii. Bir dış DC gerilimi altında yalıtkan yapı üzerinde taşıyıcı akım bulunmaz dolayısıyla yalıtkanın direnci sonsuz olur. Dış gerilim olmaksızın ($V=0$) metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki enerji farkı Φ_{ms} , termal denge durumunda fermi enerji seviyesinin yapı boyunca sürekli olması gerektiğinden sıfırdır.
- iii. Uygulanan dış voltaj altında yalıtkan yüzeye yakın metal yüzeydeki yükler ile yarıiletkendeki yükler zıt yönlü ve eşit miktardadır.

Termal denge ($V=0$) durumunda n-tipi yarıiletken (a) ve p-tipi yarıiletken (b) ideal bir MIS yapı için enerji bant diyagramı Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Termal denge ($V=0$) durumunda n-tipi yarıiletken (a) ve p-tipi yarıiletken (b) ideal bir MIS yapı için enerji bant diyagramı

Termal denge durumunda yarıiletken ile metalin iş fonksiyonları arasındaki enerji farkının sıfır olmasından ve verilen bu diyagramdan faydalanarak;

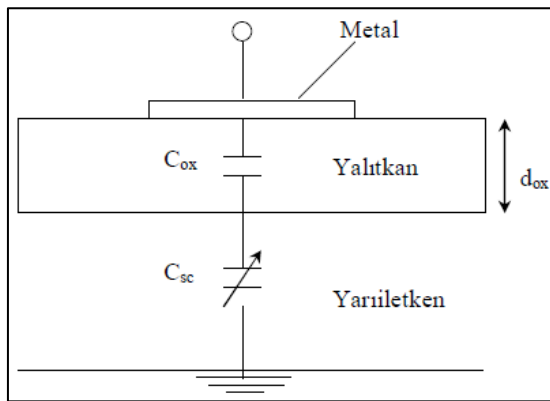
$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \Phi_m - (\chi + \Phi_n) = 0 \quad (\text{n-tipi}) \quad (2.6)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \Phi_p \right) = 0 \quad (\text{p-tipi}) \quad (2.7)$$

eşitliklerini yazabiliriz.

Burada ψ_{Bn} ve ψ_{Bp} yalıtkan ile yarıiletken için fermi enerji yüksekliği (EF) ile saf fermi enerji yüksekliği arasındaki potansiyel farktır. E_g yasak enerji aralığı, χ elektron yatkınlığı, Φ_p , p-tipi yarıiletken için valans bandının en üst noktası ile fermi enerji seviyesi arasındaki potansiyel fark, Φ_n , iletim bandının en alt noktası ile fermi enerji seviyesi arasındaki potansiyel farktır.

İdeal bir MIS/MPS yapı bir dış voltaj altında, yapıların arayüzeylerinde yarıiletken tarafında bantların bükülmesine neden olan uzay yükü (Q_{sc}) oluşurken metal tarafında yüzey yükleri oluşur. Uygulanan voltaja göre yarıiletken yüzey yüklerinin yoğunluğu metaldekilere göre daha azdır. Metal-yarıiletken arasına yerleştirilen yalıtkan tabaka ile yapı bir kondansatöre benzetilebilir. Bu yalıtkan tabakanın eklenmesi sonucunda metal-yarıiletken arasında kapasitans oluşabilir ve bazı şartlara göre bu kapasitans değeri değişebilir. Sonuçta oluşan bu kapasitansa *MIS kapasitans* adı verilir. Şekil 2.12.'de MIS yapının eşdeğer devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.12. MIS yapının eşdeğer devresi

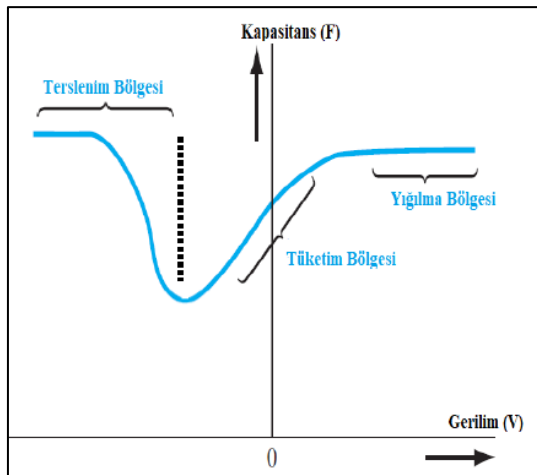
MIS yapıya dışarıdan uygulanan voltajda diferansiyel değişiklikler küçük olduğu durumda yapının toplam kapasitansı MIS yapının (C), yalıtkan tabakanın (C_i) ve uzay yükün (C_{sc}) kapasitans değerleri kullanılarak oluşturulabilir. Tüm bunların eşdeğer kapasitansı sonuçta MIS yapının kapasitansını verir.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{SC}} + \frac{1}{C_i} \quad (2.8)$$

Buna göre C_i ve C_{SC} kapasitanslarının seri bağlanması sonucunda oluşan eşdeğeri MIS yapının kapasitansına eşittir. Yalıtkan tabakanın kapasitansı Eş. 2.9.'de verilmiştir.

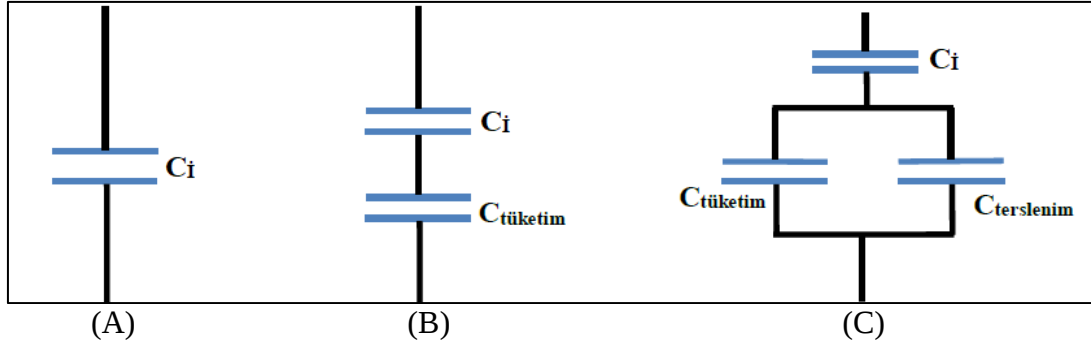
$$C_i = \frac{\epsilon_{ox}}{d_i} A \quad (2.9)$$

Burada ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, d_i arayüzey tabakasının kalınlığı, A doğrultucu kontağın alanıdır. Bu nicelikler uygulanan voltaja göre değişmediğinden C_i değeri de voltaja bağlı olarak değişmez. Bunun sonucunda MIS yapının kapasitans değerinin değişimi yalnızca uzay yükü kapasitansı (Q_{SC}) belirlenir. Uygulanan gerilim ve bu gerilimin büyüklüğüne bağlı olarak MIS yapının kapasitans değişimi üç gruba ayrılabilir. Şekil 2.13.'de n-tipi bir MIS yapının C-V eğrisinde bu duruma karşılık gelen bölgeler; *terslenim bölgesi* (*inversion region*), *tüketim bölgesi* (*depletion region*), *yığılma bölgesi* (*accumulation region*) gösterilmiştir. [13,37].



Şekil 2.13. Uygulanan gerilimin değerine bağlı olarak n-tipi bir MIS yapının C-V eğrisi

Ayrıca Şekil 2.14.'de bu üç bölgeyi temsil eden eşdeğer kapasitans devreleri verilmiştir [13].



Şekil 2.14. İdeal MIS yapının eşdeğer kapasitans devresi, (A) Yığılma, (B) Tüketim, (C) Terslenim

2.3.1. Yığılma bölgesi

n-tipi, MIS yapıya doğrultucu kontak tarafından doğru beslem ($V > 0$) (metal tarafa (+) yarıiletken tarafa (-) voltaj uygulanması) voltajı uygulandığında termal denge durumundayken sabit olan Fermi enerji seviyesi düşürüldüğünde metalden kopan elektronlar yarıiletken doğru harekete geçer. Bunun sonucunda bir iç elektrik alan oluşur ve yarıiletkenin metale yakın yüzeyinde elektron birikmesi gerçekleşir. Bunun sonucunda arayüzeye yakın bölgelerde bantlar yukarı yönde bükülür (Şekil 2.15 (a)). Yarıiletken tarafında biriken negatif yüke karşılık metal yüzeyde de aynı oranda pozitif yük birikmesi gerçekleşir. Yarıiletkenin arayüzeyinde iletkenlik bandı fermi seviyesine yaklaşırken, valans bandı da onunla birlikte yukarı doğru bükülür. Çoğunluk yük taşıyıcıları (elektronlar) bu bölgede biriktiği için bölgeye *yığılma(accumulation)* adı verilir. Bu durum sonucunda arayüzeyde birikim gösteren yükün yüzey yükü olması nedeniyle yarıiletken kapasitansı sonsuza gider ($C_{sc} \rightarrow \infty$) ve dolayısıyla ölçülen kapasitans yalıtkanın (arayüzey tabakasının) kapasitansı olacaktır.

2.3.2. Tüketim bölgesi

n-tipi bir MIS yapıya doğrultucu kontak tarafından ters beslem ($V < 0$) (metal tarafa (-) yarıiletken tarafa (+) voltaj uygulanması) voltajı uygulandığında termal denge durumundayken sabit olan Fermi enerji seviyesi yükseltildiğinde bu sefer yarıiletken bulanan elektronlar metale doğru harekete geçer. Bunun sonucunda yarıiletken taraftan metal tarafa doğru doğal bir iç elektrik alan oluşur ve n-tipi yarıiletkenin elektronları yüzeyden uzaklaşmış olur. Sonuçta yarıiletkenin iç taraflarındaki elektron yoğunluğu, yarıiletkenin yüzeyindeki elektron yoğunluğundan büyük olur ve valans ile iletim bandı

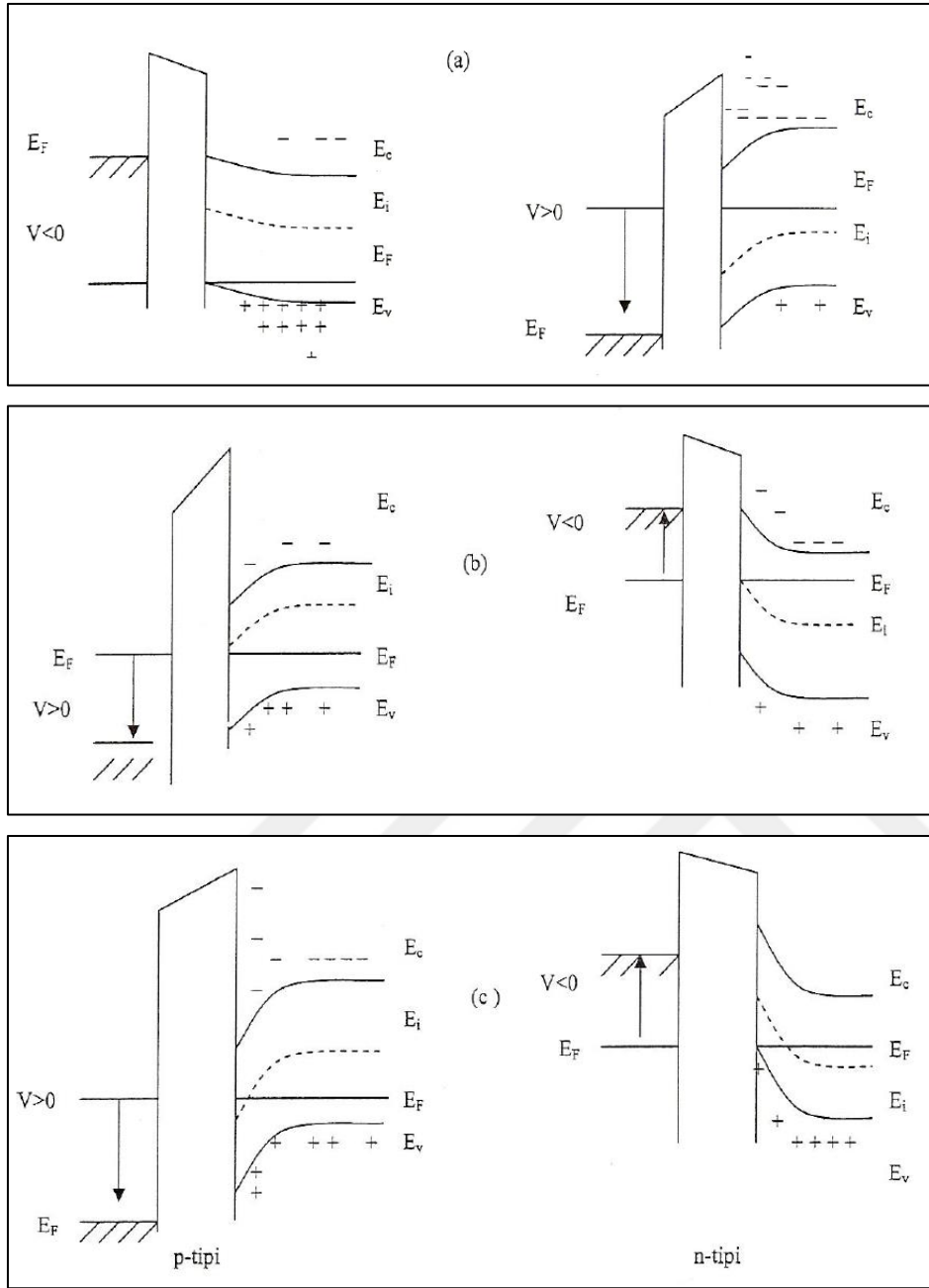
aşağı yönlü kırılır (Şekil 2.15 (b)). İletkenlik bandının yarıiletken tarafına yakın olan yüzeylerinde pozitif yük (deşik) çoğunluğu oluşur. Yüzey bölgesinde elektronların sayı olarak azalması veya genişliğin değişmesinden ötürü bu duruma *tüketim (depletion)* denir. Oluşan bu tüketim tabakasının genişliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$W_D = \epsilon_s A_i \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_i} \right) \quad (2.10)$$

Burada A yalıtkan tabakanın yüzey alanı, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, C_i yalıtkan/oksit tabakanın kapasitansıdır. MIS yapının kapasitansı bu bölgede yarıiletkenin uzay yükü ile yalıtkan tabakanın kapasitansı sonucunda belirlenir.

2.3.3 Terslenim bölgesi

n-tipi bir MIS yapıya doğrultucu kontak tarafından bu kez daha büyük bir ters beslem ($V < 0$) (metal tarafa (-) yarıiletken tarafa (+) voltaj uygulanması) voltajı uygulandığında termal denge durumundayken sabit olan Fermi enerji seviyesi yükseltildiğinde bütün bantlar aşağı doğru bükülür. Yarıiletkende bulunan elektronların sayısı iyice azalır ve yarıiletkendeki azınlık taşıyıcılar olandeşiklerin sayısı artar. Bunun sonucunda fermi enerji seviyesi (E_F), ideal durumdaki fermi enerji seviyesinin (E_i) altına düşer (Şekil 2.15(c)). Bu durumdan beraber n-tipi yarıiletken p-tipi yarıiletken gibi davranır. Başka bir ifade ile başlangıçta yoğunlukta bulunan n-tipi yarıiletkendeki elektronlar, metal yüzeye geçmesi sonucunda arkasında pozitif yüklüdeşikler bırakır. Bu olaya yarıiletken yüklerinin işaret değiştirmesinden dolayı *terslenim (inversion)* denir. Bu durum altında uygulanan dış voltajın ac sinyalinin takip edebilme durumuna bağlı olarak MIS yapının kapasitansı belirlenir. Düşük frekanslarda uygulanan voltaj ac sinyalinin takip edebilir ve voltaj artarken yapının kapasitansı yalıtkan kapasitans değerine yaklaşır. Ara frekans değerlerinde daha yavaş takip edebilir ve bu durumda frekansa bağlı olarak ara frekans meydana gelir. Frekans değeri arttıkça uygulanan voltaj ac sinyalinin takip edemez ve yapının kapasitansı en küçük C değerine yaklaşır.



Şekil 2.15. İdeal MIS yapının $V \neq 0$ durumunda n-tipi yarıiletken (sağ) ve p-tipi yarıiletken (sol) için enerji-bant diyagramı (a) Yığılım (b) Tüketim (c) Terslenim

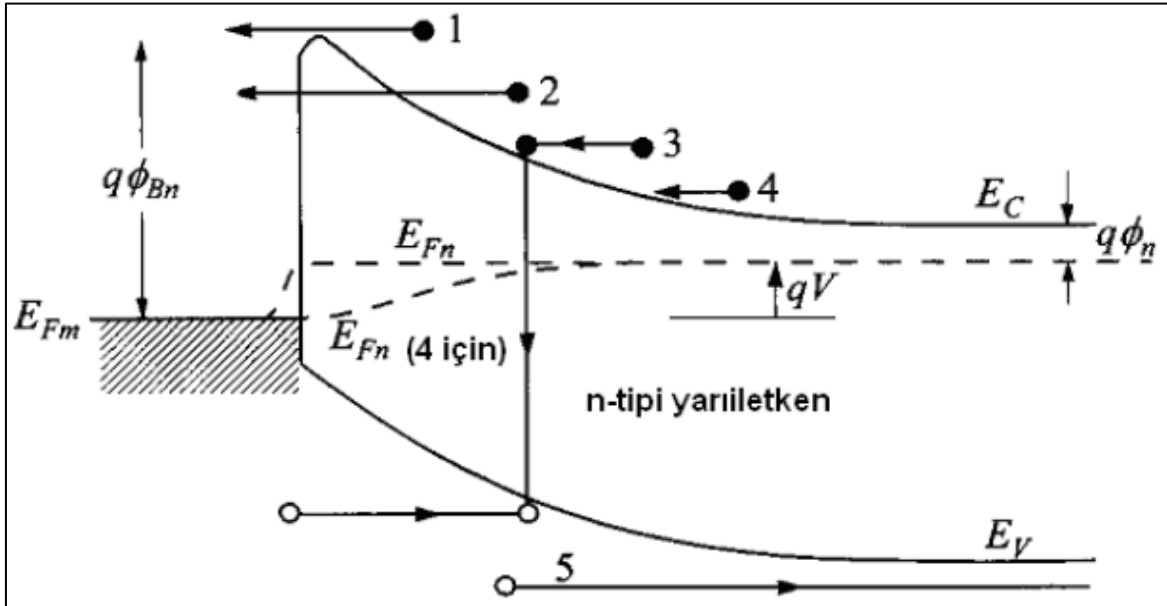
2.4. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları

Kontaklara uygulanan dış gerilim altında metal-yarıiletken kontağın akım iletim mekanizmaları bir çok faktörden etkilenmektedir. Bunlar seri direnç, metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabaka, uygulanan gerilim yönü, sıcaklık ve yarıiletkenin tipi şeklinde sıralanabilir. Bu nedenle metal-yarıiletken (MS) kontakların elektriksel parametrelerinin açıklanabilmesi için hangi akım-iletim mekanizmasının daha çok etki gösterdiği

belirlenmesi gerekmektedir. MS veya MIS tipi yapılarda etkili olan akım-iletim mekanizmaları [8,15,21];

- Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)
- Difüzyon Teorisi
- Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED)
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme (Termiyonik Alan Emisyonu (TAE), Alan Emisyonu (AE), Çok katlı tünelleme)
- Uzay yük bölgesinde rekombinasyon
- Yüksüz bölgede rekombinasyon
- Deşik enjeksiyonu
- To etkili akım iletimi

Şekil 2.16.'da doğru beslem altında metal/n-tipi yarıiletken için akım iletim mekanizmaları verilmiştir. Burada, (1); potansiyel engel tepesini geçebilecek elektronların iletimi, (2); elektronlar için kuantum mekaniksel tünelleme, (3); uzay yük bölgesinde birleşme, (4); elektronların difüzyonu, (5); deşiklerin difüzyonunu ifade eder.



Şekil 2.16. Metal-yarıiletken (MS) Kontakların Doğru Beslem durumunda gerçekleşen akım-iletim mekanizmaları

2.4.1. Termiyonik emisyon teorisi

Metal-yarıiletken Schottky kontaklarda, yük ileticilerinin (elektron veya holler) sıcak bir yüzeyde kazandıkları yeterli termal enerjiyle potansiyel engel yüksekliğini aşarak metal taraftan yarıiletken tarafa doğru veya yarıiletken taraftan metal tarafa doğru geçmesi olayına *termiyonik emisyon teorisi* denir [40].

Metal n-tipi yarıiletken kontaklarda bu durum elektronlar, metal p-tipi yarıiletken kontaklarda ise holler tarafından gerçekleştirilir [27,41]. Yapının metal tarafı dışarıdan verilen bu voltajdan bağımsızdır. Bu nedenle termal enerjileri sebebiyle metal taraftaki engeli aşan elektronların oluşturduğu akımın yoğunluğuna *termiyonik akım yoğunluğu* denir ve J_0 ile gösterilir. Beethe'nin, MS tipi kontaklarda oluşan akımın çoğunluk taşıyıcılarla gerçekleştirildiği durumunu kabul ederek oluşturduğu Termiyonik Emisyon Teorisinin varsayımları şunlardır [13,15].

- kT/q enerjisi değeri, potansiyel engel yüksekliği değerinden çok küçüktür.
- Schottky bölgesinde taşıyıcılar birbirleriyle çarpışmazlar. Başka bir ifadeyle Schottky bölgesinin kalınlığı, yük taşıyıcılarının serbest halde hareket edebildikleri yollardan daha küçüktür.
- Akım değeri engel yüksekliği ne zayıf bir şekilde bağlıyken oluşan engelin biçimi önemsiz olup, hayali (görüntü) yüklerinin akıma etkisi ihmal edilir.

Bu varsayımlar kullanılarak akımın yönü engel yüksekliğinin şeklinden bağımsız olduğu söylenebilir. Akım engel yüksekliğinin sadece büyüklüğüne bağlı olarak düzenlenebilir. O halde yarıiletkenden metale akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_{y \rightarrow m} = \int_{E_f + q\Phi_B}^{\infty} qV_X dn \quad (2.11)$$

Burada V_X iletim yönündeki taşıyıcıların hızı ve $E_f + q\Phi_B$ de metalde termiyonik emisyon için var olması gereken en düşük enerji miktarıdır. Eş 2.11'da da görüldüğü üzere $J_{y \rightarrow m}$ potansiyel engelini aşabilmek için gerekli termal enerjide olan elektronların hızlarıyla doğrudan ilişkilidir. Belli bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu dn ,

$$dn = N(E)f(E)d(E) = \left[\frac{4\pi(2m^*)^{3/2}}{h^3} \right] \sqrt{E - E_C} \exp \left[\frac{-(E - E_C + qV_n)}{kT} \right] dE \quad (2.12)$$

Eş. 2.12’da $f(E)$ fermi-dirac dağılım fonksiyonu, $N(E)$ ifadesi bantlardaki durum yoğunluğu, $qV_n = E_C - E_F$ ve m^* elektronun etkin kütesidir. Eş. 2.11’den yola çıkarak metal yüzeyden yarıiletken yüzeye doğru giden elektronlar için akım eşitliği;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-qV_n}{kT} \right) \exp \left(\frac{-m^* V_{OX}^2}{2kT} \right) \quad (2.13)$$

şeklinde verilir. Eşitlikte sırasıyla h ve k Planck ve Boltzmann sabiti, T sıcaklık değeri ve V_{OX} engeli aşabilmek için minimum eşik hız ifadesidir ve $\frac{1}{2} m^* V_{OX}^2 = q(V_d - V)$ şeklinde gösterilir.

Buradan;

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp \left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.14)$$

elde edilir. Burada A^* Richardson sabitidir ve $A^* = \frac{4\pi m^* k^2}{h^3}$ şeklinde ifade edilir.

Metalden yarıiletkene hareket eden elektronların karşılaştıkları engel yüksekliği uygulanan voltajın değerinden bağımsızdır. Bu nedenle yarıiletkenin akım yoğunluğu ifadesi, yarıiletkene uygulanan voltaj sonucunda değişmez. Bununla beraber termal denge durumunda, yarıiletkenden metal yüzeye doğru olan akım yoğunluğu ile metalden yarıiletken yüzeye doğru oluşan akım yoğunlukları ifadesi aynı sonucu verir. Ve bu iki akım yoğunluklarının toplamı ($J_n = J_{s \rightarrow m} + J_{s \rightarrow y}$) ifadesine eşit olur. Buna göre metal yüzeyden yarıiletken yüzeye doğru geçen toplam akım yoğunluğu;

$$J_{m \rightarrow y} = -A^* T^2 \exp \left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \quad (2.15)$$

eşitliği şeklinde verilir. Toplam akım yoğunluğu ifadesi için Eş. 2.14 ve Eş. 2.15 kullanılarak;

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q \Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.16)$$

elde edilir. Burada $J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q \Phi_{Bn}}{kT}\right)$ ifadesi doyma akımı (sızıntı akımı) dır.

Buna göre akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

yazılabilir [4-13].

2.4.2. Difüzyon teorisi

Yoğunluk değerlerinin birbirleriyle aynı olmadığı ortamlarda, çok yoğun olan ortamdan az yoğun ortama doğru yük akışının gerçekleşmesi olayına difüzyon denir. Düşük geçirgenliğe sahip yarıiletkenlerde difüzyon teorisi akım iletimi için uygulanabilir. Schottky tarafından tanımlanan difüzyon teorisinin dayandığı varsayımlar şöyledir [4,13,42,43];

- kT/q enerjisi potansiyel engel yüksekliğinden küçüktür.
- Tüketim tabakasındaki verici atomların çarpışma durumları göz önüne alınmalıdır.
- Termal denge durumuna sahip oldukları için $x=0$ ve $x=w$ 'da ki taşıyıcı konsantrasyonları akım geçişine bağlı olarak değişmez.
- Yarıiletkende bulunan katkı atomlarının sayısı sabittir.

Buna göre akım yoğunluğu;

$$J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir. Burada difüzyon ile TE teorisinin akım yoğunluğu ifadeleri (Eş. 2.17 ve Eş. 2.18) birbirlerine benzerlik gösterir. Doyma akım yoğunlukları birbirlerinden farklılık gösterir. Difüzyon teorisi sonucunda bulunan doyma akım yoğunluğunun uygulanan voltaja göre değişimi hızlı gerçekleşirken TE teorisinden elde edilen doyma akım yoğunluğunun sıcaklık karşısındaki duyarlılığı daha azdır [4,13,25].

2.4.3 Termiyonik emisyon-Difüzyon teorisi (TED)

Bethe (termiyonik emisyon teorisi) ve Schottky (difüzyon teorisi) teorilerini, Crowell ve Sze ortak bir model olan termiyonik emisyon difüzyon (TED) modeli şeklinde birleştirmiştir. Bu teori metal ile yarıiletken arayüzey kenarı için tanımlanmış olan V_r rekombinasyon hızının sınır şartları üzerine kurulmuştur [4,8,40].

Metal-yarıiletken arasına uygulanan gerilim sonrasında yarıiletken tarafından metal tarafa doğru bir elektron akışı gerçekleşir. Buna göre TED teorisi için akım yoğunluğu;

$$J_{ED} = \frac{qN_C V_R}{1 + \left(\frac{V_R}{V_D}\right)} \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right] \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlikte V_D Dawson integralidir. Tüketim bölgesi için bu integral $V_D \approx \mu_n E_m$ değerine yaklaşabilir. Bu durumda yarıiletkenden metale geçen elektronlar metalden geri dönmez. Akım yoğunluğu, Elektron dağılımı Maxwellian ise, $q n_0 V_R$ ile bağlantılıdır. Bunun sonucuda termiyonik bir salıncı gibi davranan yarıiletkenin V_R termal hızı;

$$V_R = \int_0^\infty V_X \exp\left(-\frac{m^* V_X^2}{2kT}\right) dV_X / \int_0^\infty \exp\left(-\frac{m^* V_X^2}{2kT}\right) dV_X = \sqrt{\frac{kT}{2m^* \pi}} = \frac{A^* T^2}{q N_C} \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilir. A^* Richardson sabitidir. TED teorisinde akım yoğunluğu değeri Eş. 2.18 için $V_D \gg V_R$ ise termiyonik emisyon teorisinin akım yoğunluğu değerine, $V_D \ll V_R$ ise difüzyon teorisinin akım yoğunluğu değerine eşit olur.

Çoğunluk yük taşıyıcılarının bir kısmı optik fononlar ile geldiği tarafa doğru saçılırken bir kısmı da kuantum mekaniksel yansımalarla maruz kalarak akım değerini azaltır [4,40]. TE'ye göre yük taşıyıcılarının metal ile yarıiletken arayüzeyinde optik fononlar ile etkileşmeden potansiyel engeli üzerinden atlama durumu ve ortalama iletim katsayısı ele alındığında A^* Richardson sabiti yerine A^{**} etkin Richardson sabiti tercih edilir. Akım-voltaj ifadesini yazacak olursak;

$$J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilir. J_0 burada doyma akım yoğunluğudur ve $J_0 = -A^{**}T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right)$ ile gösterilebilir. İfade de A^{**} etkin Richardson sabitidir. β sıcaklığa bağlı olarak değişimini ifade eden engel yüksekliğinin katsayısı olmak üzere;

$$A^{**} = A^* \exp\left(\frac{\beta}{kT}\right) \quad (2.22)$$

eşitliği ile ifade edilir.

2.5. Schottky Diyotlarda Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Schottky diyotlarda doğru beslem gerilim değerinin fazla olduğu durumlarda akım iletimi termiyonik emisyonu uygun olacak şekilde gerçekleşir. Schottky kontaklarda doğru beslem voltaj değeri için akım-voltaj (I-V) arasındaki ilişki [5,13,25];

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Eşitlikte V_D engel tabakası boyunca gerilim düşmesi I_0 ise doyma akım yoğunluğudur. Pratikte schottky diyotlarda doğru beslem altında I-V karakteristiklerinde ideal durumdan ($n=1$) sapmalar görülebilir. Yani saf termiyonik emisyon teorisinde boyutsuz olan idealite faktörü birden büyük ($n>1$) olabilir. Dolayısıyla Eş. 2.23 'daki akım yoğunluğu ifadesi [21];

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.24)$$

Burada $\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \gg 1$ durumlar için diyota verilen voltajın bir bölümü diyoda bağlı seri direnç üzerine düşeceği için (IR_S) eklenmesi ile denklemi tekrar yazabiliriz;

$$I = AA_n^{**}T^2 \exp\left(\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left[\frac{q(V-IR_S)}{nkT}\right] \quad (2.25)$$

olarak ifade edilebilir. Eşitlikte V diyota verilen dış voltaj V_D engel tabakası boyunca gerilim düşmesi ise $V_D = V - IR_s$ 'dır. İdealite faktörü ve seri direnç değerinin yüksek olduğu Schottky kontaklarda bazı temel diyot parametrelerini (seri direnç (R_s), idealite faktörü (n), engel yüksekliği ($q\Phi_{Bn}$) gibi) elde edebilmek için bazı yöntemler geliştirilmiştir [22,44]. Eş. 2.25'in logaritma ifadesi hesaplandıktan ve eşitlik için gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra;

$$V = R_s I + n\Phi_{Bn} + \left(\frac{n}{\beta}\right) \ln \left(\frac{I}{AA_n^{**}T^2}\right) \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilir. Burada R_s diyotun seri direnci, A diyotun yüzey alanı ve $\beta = q/kT$ şeklinde ifade edilir. Eş. 2.26'nin $\ln I$ 'ya göre diferansiyeli alındığında;

$$\frac{dV}{d \ln I} = R_s I + \left(\frac{nkT}{q}\right) \quad (2.27)$$

$dV/d(\ln I)$ 'nın I 'ya karşı çizilen eğrisi bir doğru oluşturur. Bu doğrunun eğimi kullanılarak diyotun R_s seri direnç değeri, doğrunun $dV/d(\ln I)$ eksenini kestiği noktadan ise diyotun idealite faktörü (n) hesaplanabilir. Eş. 2.26'de

$R_s I + n\Phi_{Bn}$ yerine $H(I)$ yazılırsa;

$$H(I) = V - \left(\frac{n}{\beta}\right) \ln \left(\frac{I}{AA_n^{**}T^2}\right) \quad (2.28)$$

eşitliğine ulaşılır. Eşitlikte $H(I)$ 'nın I 'ya karşı çizilen eğrisi yine bir doğruyu verir. Bu doğrunun eğimi kullanılarak R_s seri direnci, doğrunun $H(I)$ eksenini kestiği noktadan ise diyotun $q\Phi_{Bn}$ engel yüksekliği bulunabilir.

2.6. Schottky Diyotlarda Kapasitans-Voltaj (C-V) Karakteristikleri

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda bulunan elektron ve deşikler, metal ile yarıiletken arayüzeyindeki dağılımı ile direnci fazla olan bir tükenme tabakası meydana gelir. W_D yani tükenme tabakasının yüksekliği diyota verilen dış voltaja bağlı olarak değişkenlik gösterir. Sonuçta kondansatöre benzeyen Metal-yarıiletken kontağın arayüzeyinde bir kapasite

oluşur. Arayüzeyde sınır şartları kullanılarak poisson denklemi çözümlenirse engel yüksekliği ve kapasite hesaplanabilir. Metal-yarıiletken doğrultucu kontak için akımın tek bir doğrultuda geçtiğini varsayılarak potansiyel dağılımı (kolaylık olması açısından);

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} [N_D + p(x) - n(x)] \quad (2.29)$$

şeklinde elde edilir [15]. Burada N_D donör konsantrasyonu, $n(x)$ elektron ve $p(x)$ deşik konsantrasyonudur. Uzak yük bölgesi kenarında yarıiletkenin nötr gövde bölgesinde potansiyelini sıfır olarak kabul edersek;

$$n(x) = n_0 \exp \left[\frac{q\Phi(x)}{kT} \right] \quad (2.30)$$

$$p(x) = p_0 \exp \left[-\frac{q\Phi(x)}{kT} \right] \quad (2.31)$$

şeklinde ifade edilir. Burada n_0 yarıiletkenin nötral bölgesinde dengedeki elektron konsantrasyonu ve p_0 yarıiletkenin nötr olan bölgelerindeki deşik konsantrasyonunu verir.

Poisson denkleminin sınırlardaki potansiyel dağılımı;

$$W > X > 0 \quad \text{ise} \quad \frac{\partial^2 \Phi(x)}{\partial x^2} = \frac{q}{\epsilon^2} N_D \quad (2.32)$$

$$W < X \quad \text{ise} \quad 0 \quad (2.33)$$

Burada $x=W$ ve $\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0$ diğer sınır şartlarını oluşturur. Bu şartlara göre tüketim bölgesindeki elektrik alanın büyüklüğü;

$$E(x) = -\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} = E_m \left(1 - \frac{x}{W} \right) \quad (2.34)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $x=0$ 'da oluşan maksimum elektrik alanın değeri;

$$E_m = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} W \quad (2.35)$$

yazılabilir. Tüketim tabakası genişliği;

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_D}} |V_i - V| \quad (2.36)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem yazılırken donör, elektron ve deşik konsantrasyonları ihmal edilmiştir. Diyot ters beslem altında olması sonucunda oluşan kapasitansı elde edilebilir. Ters beslem altındaki bir diyota birkaç mV büyüklüğünde ac sinyali uygulaması sonucunda oluşan tüketim bölgesinin kapasitansı;

$$C = A \left[\frac{\varepsilon_2 q N_D}{2(V_i + V_R - kT/q)} \right] \quad (2.37)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlikte A diyotun alanıdır ve diyotun yalıtkan bir tabakasının olmadığı varsayılır ve n-tipi bir yarıiletken dağınık olmayan bir katkı konsantrasyonuna sahip olur. Eş.2.37'e göre $1/C^2$ 'nin V_R 'ye göre eğimi lineerdir. Burada eğim $2/A^2 \varepsilon_2 q N_D$, yatay eksen kesen voltajı değeri $V_0 = (V_i - kT/q)$ şeklinde ifade edilir. Bu eğim kullanılarak katkı konsantrasyonu elde edilebilir.

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Kadmiyum Sülfür ve Polivinilpirolidon Hakkında Bazı Genel Özellikler

Kadmiyum Sülfür ve Polivinilpirolidon çeşitli metaller ile uygun koşullar altında katkılanması sonucunda yapısal, optik, elektrik ve manyetik özellikleri iyileştirilip, geliştirilebilir.

3.1.1. Kadmiyum sülfür (CdS) ve Ag katkılı kadmiyum sülfür (AgCdS)

Kadmiyum Sülfür kimyasal formülü CdS olan periyodik cetvelin II B grubu atom numarası 48, atom ağırlığı 112.411 g/mol olan Cd elementi ile VI. Grubu atom numarası 16, atom ağırlığı 32 g/mol olan S elementinin birleşimi ile oluşturulan inorganik bir bileşik, yarıiletkenidir [45-47]. CdS kristalinin oda sıcaklığı altında (300 K) bazı temel fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. CdS kristalinin oda sıcaklığında (300 K) bazı temel fiziksel özellikleri

Atom ağırlığı	144,48 g/mol
Renk	Sarı-turuncu
Kristal yapısı	Altıgen kristal
Yoğunluk	4,83 g/cm ³
Erime noktası	1750 °C
Yasak enerji aralığı	2,42-2,5 eV

Parlak sarı rengi dolayısıyla 18.yyda kadmiyum sarısı olarak adlandırılan kadmiyum sülfür, kükürt ve oksidasyona olan direnci nedeniyle yüksek direnç gösteren boyalar ve sanatçı pigmentlerinde de tercih edilen bir bileşiktir. Gerek izole edilme şekli gerek saflaştırma uygulamasının kolaylığı açısından ticari uygulamalar için ana kadmiyum kaynağıdır. Yüksek soğurma özelliğine sahip olan kadmiyum sülfür kristali aralarında bulundurduğu kükürt boşlukları nedeniyle n-tipi yarıiletken özelliği gösterir. Görünür bölgede yüksek geçirgenlik, infrared bölgede yüksek yansıma özelliğine sahiptir [48,49]. Birbirinden farklı tekniklerle hazırlanan CdS yarıiletken filmlerinin yasak enerji bant aralığı 2,32-2,45 eV arasında değişmektedir [49-51]. Kadmiyum sülfür, moleküllerin sıkı paket haline getirilerek elde edilen hekzagonal yapı ve yüzey merkezli kübik yapı olmak üzere iki farklı kristal yapı olarak bulunabilir. Büyük ölçekli filmlerde çoğunluk hekzagonal, küçük ölçekli filmlerde ise kübik yapı daha baskındır [49]. Kadmiyum sülfür

birçok yöntem ile elde edilebilir. Bu yöntemlerden bazıları vakum (termal) buharlaştırma, kimyasal püskürtme (saçtırma), kimyasal banyo depolama şeklinde sıralandırılabilir. Kimyasal banyo depolama yönteminde film banyosunun pH değeri, oluşturulan CdS filmlerinin kristal örgü yapısı, optik, elektrik ve manyetik özellikleri üzerinde önemli ölçüde etkilidir [52]. Bu metot kullanılarak 100° C sıcaklığından düşük sıcaklıklarda farklı tabanlara çöktürme işlemi yapılarak numuneler elde edilebilmektedir [53]. Kimyasal püskürtme yöntemi ise geniş yüzeyli filmlerin üretimi için kolaylık tanıyan, düşük maliyetli ve basit bir yöntemdir [54]. Kadmiyum sülfür kristali yasak enerji bant aralığı geniş olması nedeniyle fotovoltaik güneş pillerinde hazırlanan güneş panellerinin pencereleri için kullanımı oldukça yaygın bir yarıiletkenidir. Düşük öz direnci, üzerine gelen ışığı toplayıp iletme sokmasıyla yüksek geçirgenliği, yüksek elektrik iletimi ve üretim maliyetinin düşük olması dolayısıyla güneş pilleri oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır. Kadmiyum sülfür kristalinin farklı elementlerle oluşturulan bileşiklerinin (CdTe, CuZnSeS vb.) güneş pillerinde kullanılması da verimliliği artırmaktadır [55].

3.1.2. Polivinilpirolidon (PVP)

Polivinilpirolidon veya bir diğer adı ile povidone nano-parçacık sentezinde su moleküllerine olan bağlanma özelliğiyle, eklenen malzemeye uyum sağlamasıyla bilinen, sentetik ve geniş kullanım alanına sahip polimerdir. Kısaca PVP olarak ifade edilir [56-58]. Mobilya üretimi, yapıştırıcılar, gıda ve kozmetik endüstrileri imalatı, deterjan gibi temizlik malzemeleri, boyalar, tıbbi cihazlar gibi geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir [59-62]. Genellikle NVP(N-vinilpirolidonun) 'nin çözelti polimerizasyonu işlemi sonucunda PVP elde edilir. PVP polimerinin bazı özellikleri;

- Zararlı olmayan hidrofilik özelliği baskın, çoğu organikle birlikte çözünebilir, sentetik bir polimerdir.
- Yapısında C=O, C-N ve CH₂ bileşikleri bulunduran bir malzemedir.
- Dielektrik değeri düşükken termal kararlılığı yüksektir.
- Üretim maliyeti uygun, biyoyumluluğu yüksek ve kolayca film haline getirilebilme özelliği bulunur.
- 4,0e⁴ ile 3,6e⁵ arasındaki değişen molekül ağırlığına sahiptir.
- Erişilebilirliği yüksektir.

şeklinde sıralanabilir [56,63,64].

3.2. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky Diyotun Elde Edilmesi

Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky engel diyotunun elde edilmesinde kristal temizleme, omik ve doğrultucu kontağın oluşturulması şeklinde toplamda üç adımdan oluşan bir sıralama gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Kristal temizleme aşaması

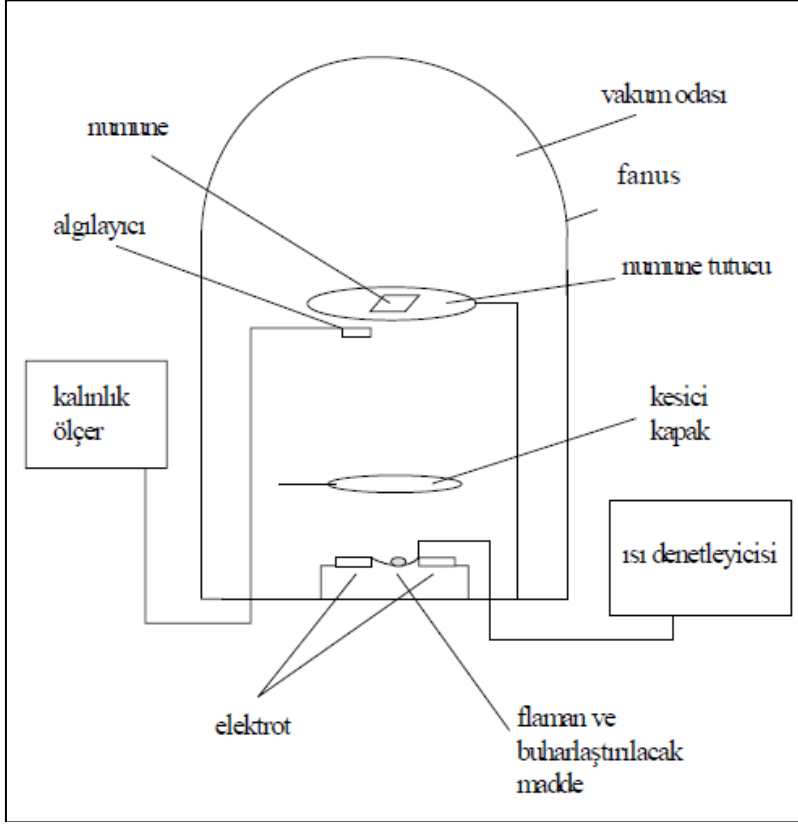
Schottky aygıtların veriminin yüksek olması ve doğru bir şekilde çalışabilmesi için yarıiletken tarafı kirden arındırılmış ve olabildiğince temiz olmalıdır. Bunun sonucunda aygıt doğru ve verimli çalışabilmektedir. Aygıt temizliği ultrasonik banyo yöntemi ile yapılabilir ve bu sayede yarıiletken yüzeyindeki kirlilik oranı düşürülebilir. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky engel diyotu elde edilirken <100> yönelimli, 350 µm kalınlıklı, 5,08 cm çapında, 1-10 Ω.cm öz direncine sahip n- tipi silikon (fosfor katkılı) levha kullanılarak hazırlandı. N-Si levhadaki doğal oksit tabakasını ve diğer kirleri gidermek amacıyla aşağıda belirtilen temizleme işlemlerinden geçirildi.

1. Amonyum peroksitte 1 dakika boyunca durulandı.
2. (H₂SO₄:H₂O₂:H₂O) ile (3:1:1 oranında) kimyasal solüsyon ve (HCl:H₂O) (1/1) solüsyonunda ultrasonik banyoda bir dakika süreyle çalkalanarak aşındırıldı.
3. Levha yüksek dirençli (18 MΩ.cm) deiyonize su içerisinde durulandı.
4. Yüksek saflıkta N₂ gazı ile kurutuldu ve omik kontak oluşumu için termal buharlaştırma sisteminin haznesine konuldu.

3.2.2. Omik kontağın elde edilme aşaması

Omik kontağı elde edebilmek adına levha, termal buharlaştırma sisteminin haznesine alındı ve hazne 10⁻⁶ Torr'a ulaşana kadar hava vakumlandı. Daha sonra yüksek saflıkta Au (%99.999), n-Si levhanın arka tarafında 150 nm kalınlığında bir Au katmanı büyüyene kadar levhanın tüm arka tarafı üzerinde homojen bir alan oluşturacak şekilde buharlaştırılma gerçekleştirildi. Direnci düşük bir omik geri kontak oluşturulması adına altlık, nitrojen atmosferinde 500 °C'de 5 dakika süreyle tavlandı. Diyot yapımı için kullanılan buharlaştırma sisteminin Şekil 3.1'de şematik gösterimi verilmiştir. Böylece Au

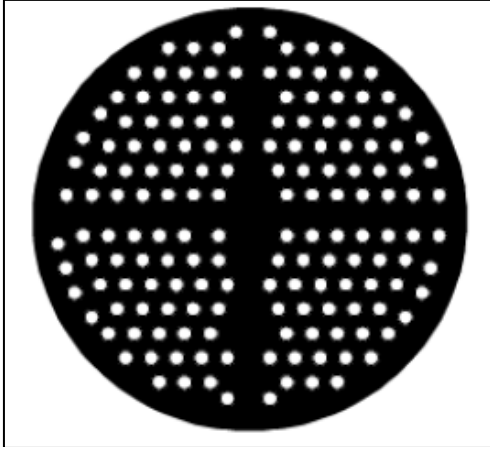
metalinin yarıiletken içerisine çöktürülmesi gerçekleştirildi ve sonuçta Au omik kontak oluşturulmuş oldu.



Şekil 3.1. Omik kontak ve Doğrultucu kontak oluşumu için kullanılan buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi

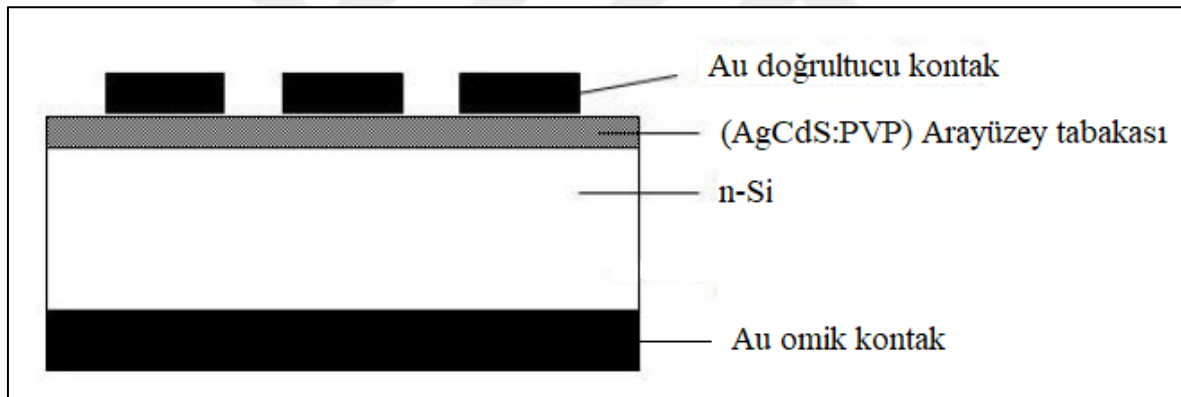
3.2.3. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Polimerik ara katman için ortalama molekül ağırlığı 130.000 g/mol olan PVP, Sigma Aldrich'ten satın alınmıştır. PVP tozu, 80°C'de oranı %8 olacak şekilde deiyonize su içerisinde çözülerek çözelti yaklaşık 3 saat karıştırıldıktan sonra hazırlanan çözelti oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Daha sonra çözeltiye AgCdS ilave edildi ve n-Si levhanın ön yüzeyi sol jel tekniği kullanılarak polimerik çözelti ile kaplandı. Ara yüzey (CdS:PVP) kalınlığı, katmanlar arası kapasitans kullanılarak 60 nm olarak tahmin edildi. Substrat yüksek vakum sistemine alındı ve yüksek saflıkta Au (%99,999) AgCdS:PVP katmanı üzerinde gölge maskesi kullanılarak büyütüldü, böylece 150 nm kalınlığındaki doğrultucu kontaklar omik kontakla aynı koşullar altında oluşturuldu. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyot yapıların böylelikle fabrikasyon aşamaları tamamlanmış oldu.



Şekil 3.2. Doğrultucu kontak elde edilmesi için kullanılması gereken maske

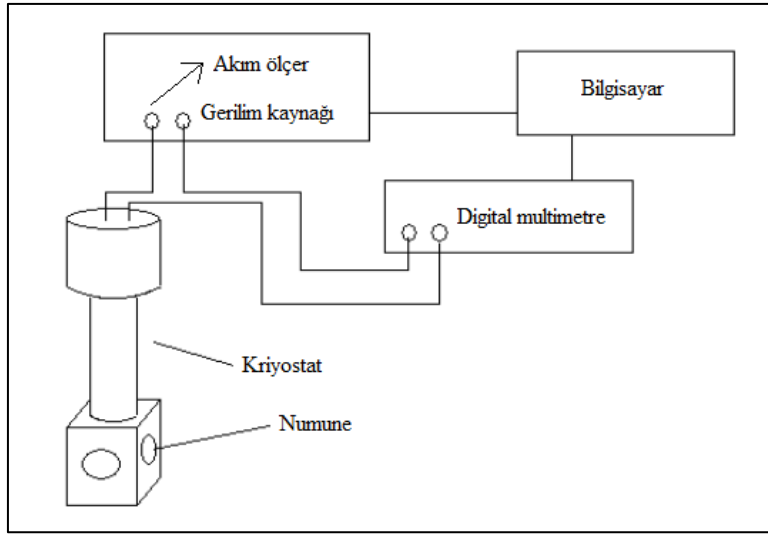
Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky engel diyotunun yapımı tamamlandığında ki sembolik gösterimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



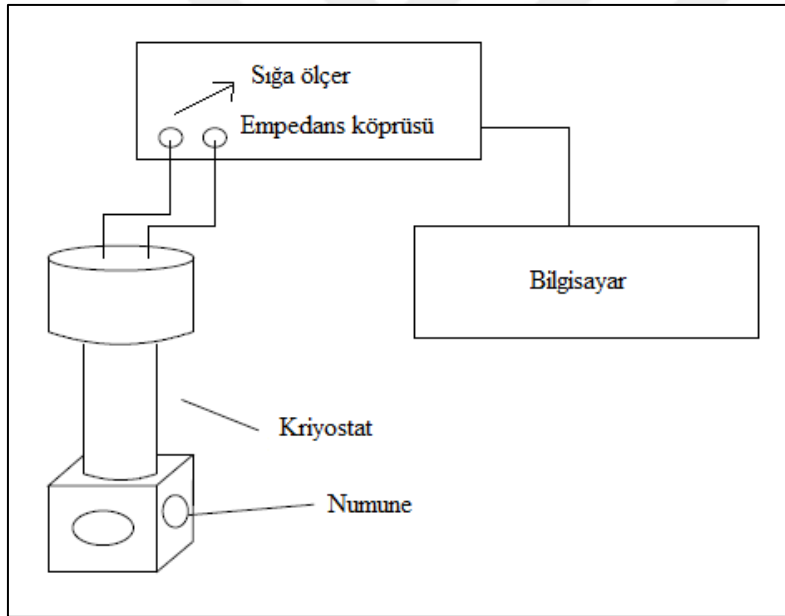
Şekil 3.3. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky engel diyotunun sembolik gösterimi

3.3. Deneysel Ölçüm Sistemi

Elektriksel parametrelerinin ölçüm işlemleri, Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Starlab Yarıiletken Laboratuvarında gerçekleştirildi. Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri için 300 K sıcaklıkta, karanlıkta ve 100 mW/cm^2 aydınlatma yoğunluğu altında Şekil 3.4’de gösterilen Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı kullanıldı. Kapasitans-Gerilim (C-V) ve İletkenlik-Gerilim (G/ω -V) ölçümleri için 3kHz-1 MHz aralığında, $\pm\% 0,15$ hassasiyetle ölçüm yapabilen Şekil 3.5’de gösterilen Hawlett Packard 4192 A LF Empedans Analizmetre kullanıldı.



Şekil 3.4. Akım-gerilim ölçümleri için kullanılan düzenek



Şekil 3.5. Empedans-gerilim ölçümleri için kullanılan düzenek

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky Diyotunun Karanlık ve Aydınlik Koşullar Altında Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiklerinin İncelenmesi

Hazırlanan ideal Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun doğru beslem akım-voltaj (I-V) karakteristikleri $V \geq 3kT/q$ şeklinde termiyonik emisyon teorisine (TE) [5,13,14] göre incelendi.

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

Verilen eşitlikte V_D uygulanan doğru beslem gerilimi, I_0 ters doyum akımı, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık olup (Kelvin birimi cinsinden), yarı-logaritmik $\ln(I)$ - V grafiğinde eğrinin sürekli (lineer) olan tarafı voltaj sıfır olarak alınıp ($V=0$) akım eksenine fit edilerek bulunur. $\ln(I)$ - V grafiği ara ön gerilimler için neredeyse doğrusal bir bölge gösterdiğinden, aşağıdaki Eş. 4.2’de verildiği gibi bu grafiğin kesişim noktasını kullanarak I_0 hesaplamak mümkündür.

$$I_0 = A^* A T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT} \right) \quad (4.2)$$

İfade de A schottky diyodunun yüzey alanı, A^* n-tipi silisyum için Richardson sabiti ($A^* = 32 A cm^{-2} K^{-2}$), n diyotun idealite faktörü, Φ_{B0} sıfır beslem potansiyel engel yüksekliğidir [13,14]. Φ_{B0} sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği ;

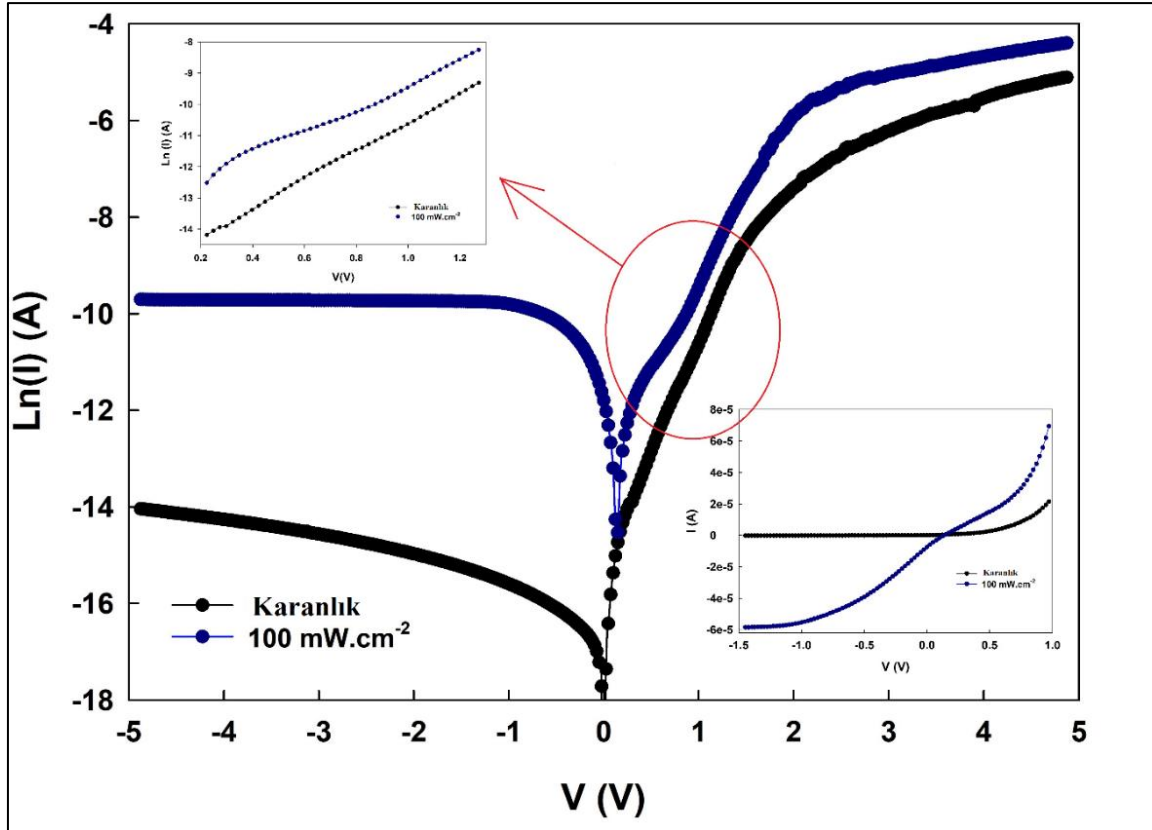
$$\Phi_{bo} = \left(\frac{kT}{q} \right) \cdot \ln \left(\frac{A A^* T^2}{I_0} \right) \quad (4.3)$$

şeklinde elde edilir. Eşitlik A^* Richardson sabiti, A diyotun alanı, k Boltzmann sabiti, T kelvin cinsinden mutlak sıcaklık ve I_0 doyma akımı kullanılarak elde edilmiştir.

Diyotun kalitesinin bir ölçüsü olarak ele alınan n idealite faktörü Eş. 4.4 ve $\ln(I)$ - V grafiğinin eğimi kullanılarak elde edilir [5,13].

$$n = \frac{q}{kT \tan(\theta)} = \left(\frac{q}{kT} \right) \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (4.4)$$

n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık ve aydınlık (100 mW/cm²) koşullar için yarı-logaritmik doğru beslem akım-voltaj (I-V) karakteristikleri Şekil 5.1’de verilmiştir.

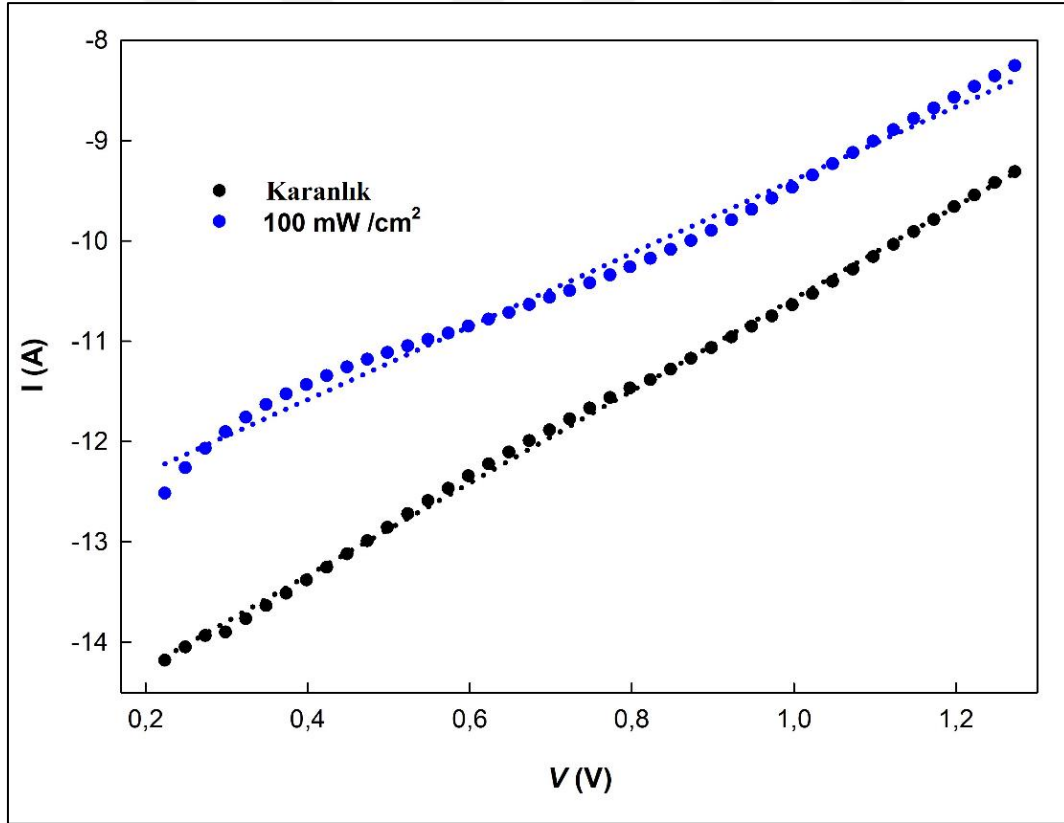


Şekil 4.1. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık ve aydınlık koşullar altında yarı-logaritmik Ln (I)-V grafiği

In(I)-V grafiğinde her iki durum için de ara gerilimlerde lineerlik sergileyen geniş bölümlere sahip olduğu ve doğrultma özelliğinin iyi olduğu Şekil 4.1.’de görülmektedir. Hem karanlık hem aydınlık koşullar altında ters beslem akımı iyi bir doyma davranışına sahiptir. Başka bir deyişle ters beslem akımı her iki durumda da herhangi bir zayıf doyma davranışı göstermemektedir. Şekle göre her iki ortam içinde ters beslem akımının voltaja olan bağıllığı zayıfken, doğru beslem akımının uygulanan voltaja olan bağıllığı bir şekilde üstel olarak artmaktadır. Karanlık ortam için akımın bu davranışı, üretim-rekombinasyon akımına ve bariyer yüksekliği görüntü kuvvetinin düşmesine atfedilebilir.

Şekil 4.1.'de lineerliğin yalnızca $\ln(I)$ - V grafiğinin düşük öngerilim voltaj aralığında olduğu görülmektedir. Bu lineer bölge hem karanlık hem de aydınlık ortam için iki bölge olarak ele alınabilir. Şekil 4.2.'de bu bölgenin daha yakın grafiği verilmiştir. Yapılan hesaplamalarda iki ortam için de düşük ve orta gerilim bölgesi dikkate alınmıştır.

Geriye kalan voltaj sapmaları schottky diyot üzerindeki toplam voltajdan, seri direnç etkisinden (R_s) ve polimerik ara yüzey tabakasının etkilerinden meydana gelmektedir. Burada polimerik katman, seri direnç (R_s) ve schottky diyotun tüketim tabakası arasında bölünmüştür ($V_a = V_i + V_{R_s} + V_D$). Aydınlık ortam diyot üzerinde çiftler halinde elektron ve deşikler (holl) oluşmasına neden olur. Dolayısıyla öngerilim bölgesinin tamamında fotoakım oluşturur ve bunun sonucunda cihazdan geçen akım artar.



Şekil 4.2. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık ile aydınlık (100 mW/cm^2) koşullar altında yarı-logaritmik $\ln(I)$ - V grafiğinin lineer bölgeleri

Böylece hazırlanan Au-(AgCdS:PVP)-nSi (MPS) SD'nin hesaplanan temel deneysel elektriksel parametreleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Tabloda verilen temel elektriksel parametrelerin ön gerilim ile aydınlatma yoğunluğunun da güçlü fonksiyonları olduğu açıkça görülmektedir. İdealite faktörü hem karanlıkta hem de 100 mW/cm^2 'nin altında

ideal değerinden ($n=1$) oldukça yüksek değerlere sahiptir. Bu kadar yüksek idealite faktörü değerleri, (AgCdS:PVP) polimerik ara katmanın varlığı, arayüz tabakası (N_{ss}), tüketim tabakasının genişliği (W_d), bariyer homojensizliği ve bariyer yüksekliğinin görüntü kuvvetinin düşürülmesinin varlığıyla açıklanmaktadır [2,15].

$$n(V) = 1 + \left(\frac{d_i}{\varepsilon_i}\right) \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon_s}{W_d}\right) + qN_{ss}\right] \quad (4.5)$$

Bariyer yüksekliği üzerinden yük taşınmasında, alt kısımlar gibi metal ve yarı iletken arasında bariyer homojensizliğinin varlığı da etkili olabilir. Elektronik yükler, bariyerin alt bölümleri veya parçaları boyunca kolaylıkla taşınabilir, dolayısıyla ideallik faktörü ve akım artar.

Çizelge 4.1. Au/(AgCdS:PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyot'unun I-V özelliklerinden karanlık ve aydınlık ortam için elde edilen idealite faktörü (n), doyma akımı (I_0), bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) ve doğrultma oranı (RR) değerleri

Güç(mW/cm ²)	Bölge	Termiyonik Emisyon Teorisi			
		n	I ₀ (A)	Φ _{B0} (eV)	RR
Karanlık	Düşük gerilim bölgesi	7,85	2,21x10 ⁻⁷	0,689	7,73x10 ³
	Orta gerilim bölgesi	8,56	2,72x10 ⁻⁷	0,684	
100	Düşük gerilim bölgesi	5,28	7,09x10 ⁻⁷	0,659	0,21x10 ³
	Orta gerilim bölgesi	13,81	3,66x10 ⁻⁶	0,616	

Direnç (R_i) değeri Schottky tipi diyotlar için yapıya verilen voltajın bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Fakat seri direnç (R_s) değeri uygulanan voltajın yüksek olduğu bölgelerde ortaya çıkmaktadır. Seri direncin varlığı çizilen I-V ve C-V grafiklerinde bükülmeler veya saplamalar meydana getirmektedir.

Schottky diyot yeterince yüksek seri direnç değerine sahip olduğundan, $\ln(I) - V$ eğrisinin yüksek ileri ön gerilim bölgesi doğrusal olmayan bir eğilime sahiptir (Şekil 4.1). Daha yüksek R_s değerleri genellikle üst ve arka elektrotlardan (Schottky ve omik kontaklar), elektriksel ölçümler için kullanılan prob tellerinden, yarıiletkenin direncinden ve katkı atomlarının homojen olmamasından kaynaklanır [13,15,25]. Literatürde ileri öngerilim I-V değerlerinden seri direncin hesaplanmasına yönelik birçok yöntem bulunur. Bunlar arasında en çok tercih edilen yöntemler Norde fonksiyonu [65], Cheung fonksiyonları [44] ve Ohm Yasası [13] şeklinde sıralanabilir. Ek olarak, diyotun geri kalan temel elektriksel

parametreleri (n , R_s , Φ_B) ikinci yol olarak Cheung fonksiyonları kullanılarak da hesaplanabilir [44].

Ohm yasası

Diyotun (R_i) direnç değeri aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

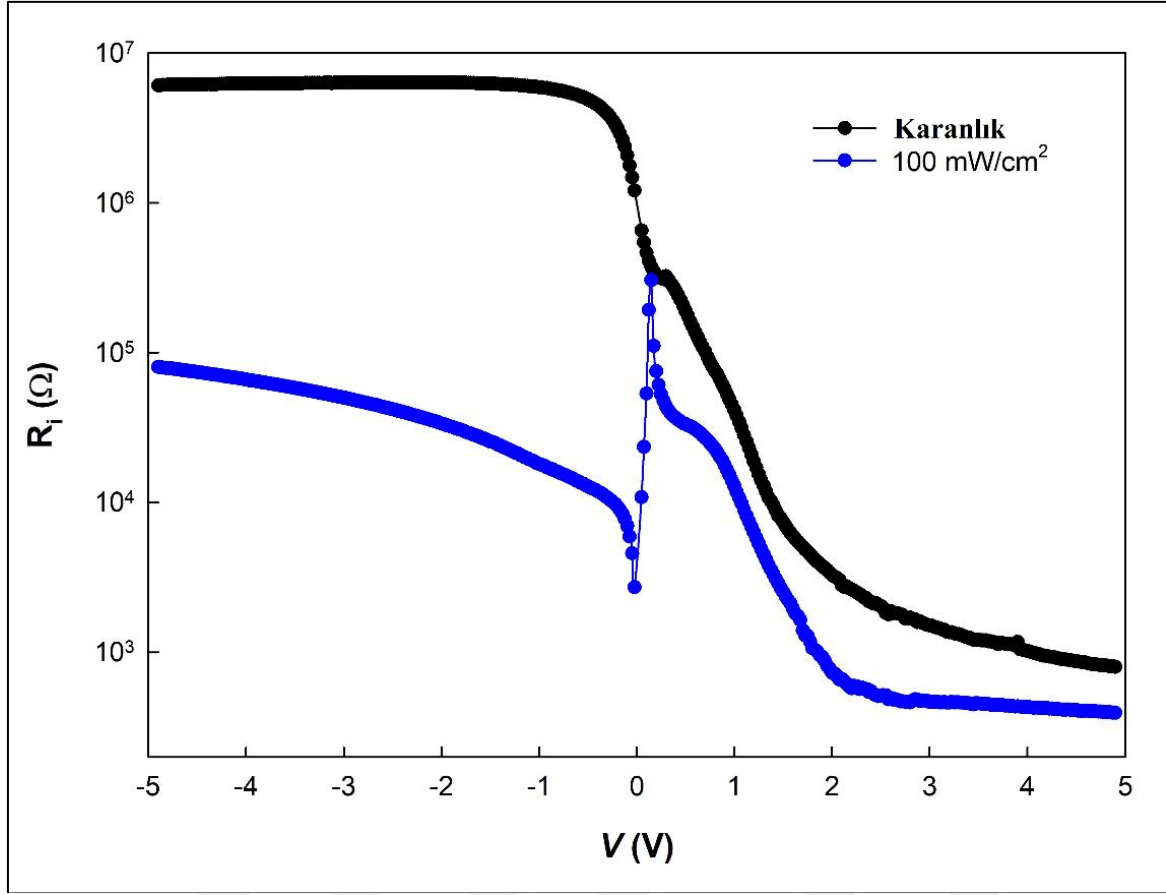
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} \quad (4.6)$$

Diyotun seri direnç (R_s) değeri yüksek voltaj değerlerinde elde edilen R_i ifadesine eşit olur. Burada direnç değeri ohm yasası ile hesaplanan R_i -V eğrisi Şekil 4.3.'de gösterilmiştir. Yeterince yüksek voltaj bölgesinde karanlık ve aydınlık ortam için ohm kanunu kullanılarak hesaplanan R_{sh} ve R_s değeri Çizelge 4.2. ve Şekil 4.3. 'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Au/(AgCdS:PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyot'unun Ohm Yasası kullanılarak hesaplanan seri direnç (R_s) ve şönt direnç (R_{sh}) değerleri

<i>Ohm Yasası</i>		
Güç(mW/cm ²)	R_s (5V)(k Ω)	R_{sh} (-5V)(M Ω)
Karanlık	0,79	6,09
100	0,39	0,082

Çizelgede yaklaşık $\pm 5V$ 'de hesaplanmış değerler yeterince yüksek ileri ve ters öngerilim için R_i 'nin neredeyse gerilimden bağımsız veya neredeyse sabit hale geldiğini gösterir. Dolayısıyla +5V ve -5V'deki R_i değerlerinin sırasıyla R_s ve R_{sh} değerlerine karşılık geldiğini söyleyebiliriz. Beklendiği gibi iletkenlikteki artışa bağlı olarak aydınlatma sonrasında R_s ve R_{sh} değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Çünkü diyota ışık altında zamanla giderek daha fazla elektrona (N_e) valans bandından iletim bandına doğru uyarım için enerji verilebilir, bunun sonucunda iletkenlik artar ($\sigma = e\mu N_e = 1/\rho$). Ancak bu cihazların şönt direnç değeri (R_{sh}) genel olarak toprağa giden prob tellerinden, diyotta bulunan bazı fiziksel bozukluklardan, yabancı maddelerden veya diyotun yüzeyinin yeterince temiz olmamasından, cihaz kontaklarındaki ara yüzey katmanı boyunca kaçak akım oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bu cihazların direnç değerinin (R_i) diyota uygulanan ön gerilimden güçlü bir şekilde etkilendiği iyi bilinmektedir.



Şekil 4.3. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık ve aydınlık (100 mW/cm²) koşullar altında ln(R_i)-V grafiği

Cheung fonksiyonu:

Bu yöntem kullanılarak yeterince yüksek ileri öngerilim altında Au/(AgCdS:PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotunun R_s , n ve Φ_{B0} değerleri hesaplanabilir. Eş. 4.7 ve 4.8 kullanılarak yeterince yüksek ileri öngerilim altında çizilen I-V grafiğinin karanlık ve aydınlık koşullar için aşağı doğru kırılmaya başladığı bölgedeki değerlerin lineer davranışı ile bulunabilmektedir [30].

$$\frac{dV}{d\ln(I)} = n \cdot \left(\frac{kT}{q} \right) + R_S I \quad (4.7)$$

$$H(I) = V - n \cdot \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{A A^* T^2} \right) = n \Phi_B + R_S I \quad (4.8)$$

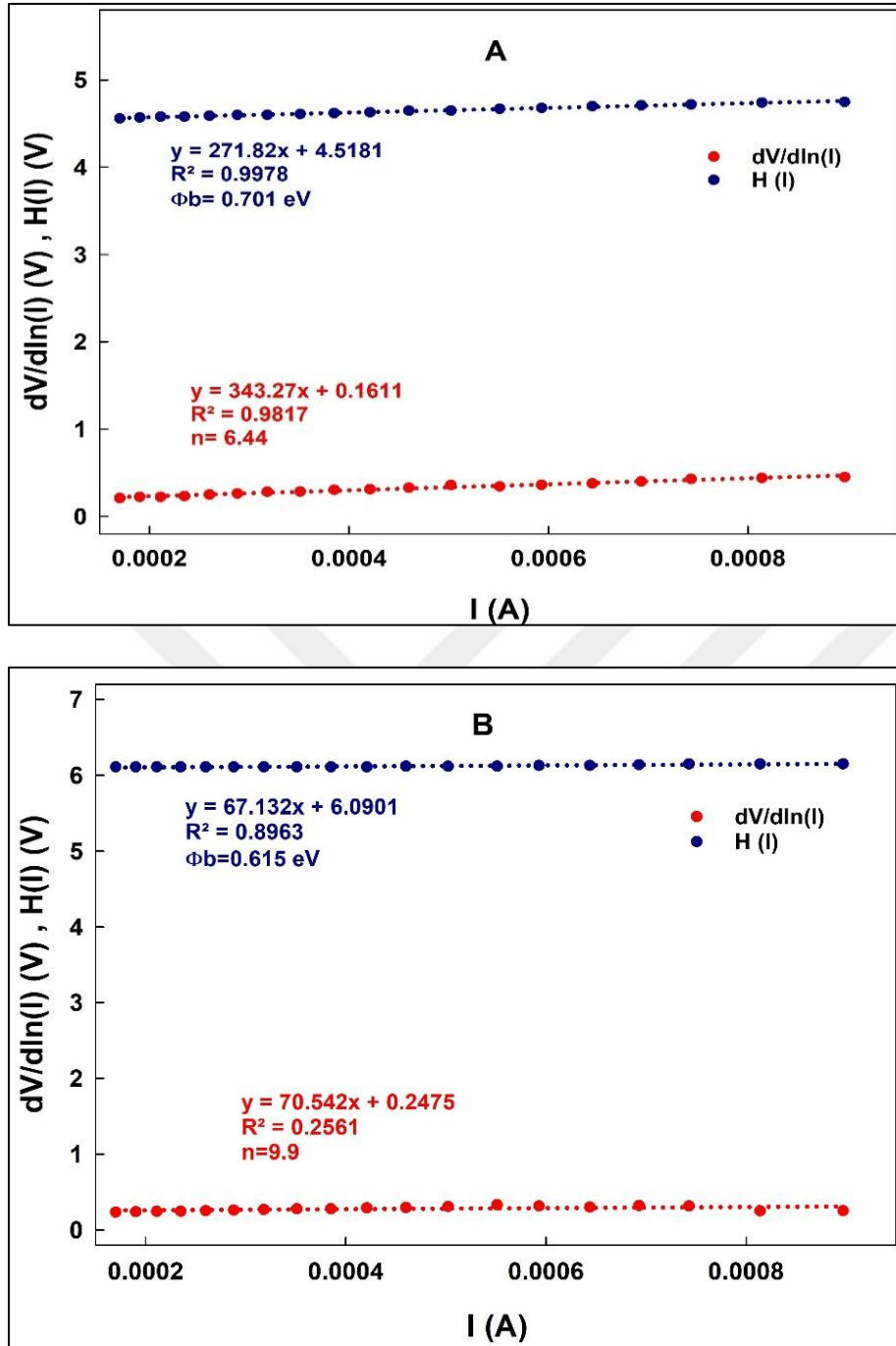
$dV/d\ln(I)$ 'nın I 'ya karşı grafiği elde edildiğinde lineer bölge oluşturulur. Bu lineer bölgenin eğimi alındığında diyotun seri direnç R_s değeri, bu bölgenin yatay eksenini kestiği noktadan ise idealite faktörü hesaplanır [44].

$H(I)$ 'nın I 'ya karşı grafiği çizildiğinde lineer bir bölge oluşturulur. Bu lineer bölgenin eğimi alındığında seri direnci R_s değeri, bu bölgenin yatay kestiği noktadan da Φ_{B0} bariyer yüksekliği hesaplanır [44]. Bunlara göre Şekil 4.4'de Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık (A) ve aydınlık (B) (100 mW/cm^2) koşullar altında elde edilen $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafiklerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3' de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık (A) ve aydınlık (B) (100 mW/cm^2) koşullar altında elde edilen $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri kullanılarak hesaplanan idealite faktörü (n), seri direnç (R_s), bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) değerleri

<i>Cheung Fonksiyonu</i>				
	$dV/d\ln(I)$		$H(I)$	
Güç(mW/cm^2)	n	R_s (5V)($\text{k}\Omega$)	Φ_{B0} (eV)	R_s (5V)($\text{k}\Omega$)
Karanlık	6,44	0,34	0,70	0,27
100	9,90	0,07	0,62	0,067

Şekil 4.4'de Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık (A) ve aydınlık (B) (100 mW/cm^2) koşullar altında hesaplanan $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri verilmiştir. Grafiğe göre hesaplanan $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ değerleri, yeterli akım aralığı için akıma doğrusal bağımlılık sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.4. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık (A) ve aydınlık (B) (100 mW/cm^2) koşullar altında hesaplanan $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri

Termiyonik Emisyon teorisi ile Cheung fonksiyonlarından faydalanılarak sonuçlar arasında açıkça farklılıkların var olduğunu (Çizelge 4.1 ve 4.3) görülmektedir. Bu parametrelerin uygulanan gerilime olan bağlılığından ve parametre çıkarımı için farklı öngerilim bölgesi verilerini kullanan bu farklı tekniklerin doğasından kaynaklandığına inanılmaktadır.

Norde yöntemi:

Bu metot bulunan I-V ölçümleri yardımıyla R_s ve Φ_B değerlerini hesaplamaya yardımcı olmaktadır. Norde'ye göre [65];

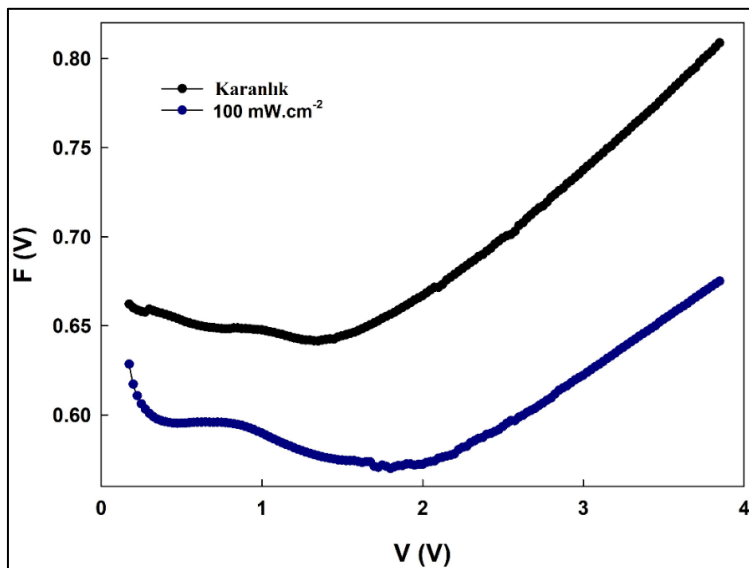
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I}{T^2 A^* A} \right] \quad (4.9)$$

$$\Phi_{B0} = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.10)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI_{min}} \quad (4.11)$$

eşitlikleri kullanılır. Denklemden γ değeri idealite faktöründen büyük seçilmesi gereken, en küçük boyutsuz tam sayıdır. Norde fonksiyonundaki I_{min} değeri minimum akım, V_0 değeri minimum gerilimdir.

Eş. 4.9 yardımıyla hesaplanan Norde fonksiyonu Şekil 4.5'de verilmiştir. Norde fonksiyonu kullanılarak bulunan diğer değerler olan bariyer yüksekliği ve seri direnç Çizelge 4.4'de verilmiştir. Eş. 4.10 ile 4.11 kullanılarak minimum voltaj ve minimum akım değerleri hesaplanabilir.



Şekil 4.5. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık (A) ve aydınlık (B) (100 mW/cm^2) koşullar altında elde edilen $F(V)$ - V eğrisi

Çizelge 4.4. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık (A) ve aydınlık (B) (100 mW/cm^2) koşullar altında elde edilen seri direnç (R_s) ve bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) değerleri

<i>Norde Fonksiyonu</i>		
Güç(mW/cm^2)	Φ_{B0} (eV)	R_s (5V)($\text{k}\Omega$)
Karanlık	0,72	1,19
100	0,79	0,48

Çizelge 4.1 ile Çizelge 4.4’de farklı yöntemler kullanılarak bulunan değerlerde bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bulunan sonuçların birbirlerinden farklılık göstermesinin nedeni, kullanılan hesaplama yöntemlerinde (TE, Cheung ve Norde fonksiyonları) R_s ’ nin farklı voltaj bölgelerine karşılık gelmesi, bunların voltaj bağılılığıyla, arayüzey durumlarının (N_{ss}) yoğunluk dağılımıyla, arayüzeyin dielektriği (ϵ_i) ve diyotun arayüzeyindeki bariyer homojensizlikleriyle ilişkilendirilebilir. Cheung, Norde fonksiyonları ve TE yöntemiyle hesaplanan bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri birbirlerinden çok da farklı sonuçlar göstermemiştir. Bunun nedeni Termiyonik Emisyon yönteminde doğru öngerilimde oluşturulan I-V eğrisinin doğrusal kısmını, Norde de eğrinin tamamını, Cheung fonksiyonunda ise eğrinin kırılmaya başladığı yerdeki doğrusal olmayan tarafı referans olarak kullanılır. Bunun sonucunda Cheung fonksiyonu kullanılarak hesaplanan seri direnç değeri Norde fonksiyonu kullanılarak hesaplanan değerden küçüktür [66].

Genel olarak arayüzey durumları (N_{ss}) diyotun davranışlarının idealden sapmasına neden olup performansını düşürebilir. Bu nedenle arayüzey durumları yarıiletken levhanın hazırlanması veya temizlenmesi işlemlerinden, yüzey kusurlarından, katkı atomlarından, metalizasyon sonucu yapısal yeniden düzenlemelerden ve metal ile yarıiletken arasındaki ara katmandan kaynaklanır [20,65,44].

Arayüzey durumları (N_{ss}), yük taşıyıcılarının rekombinasyonu için merkez görevi görür. Ayrıca yük taşıyıcıları elektrik alanı ve aydınlatmanın etkisi altında yakalanabilir veya serbest bırakılabilir hale gelir. Arayüzey durumları (N_{ss}), özellikle orta öngerilim bölgelerinde I-V ve C/G-V eğrileri üzerinde oldukça etkilidir. Arayüzey durumları (N_{ss}) hesaplamak için Card ve Rhoderick düşük-yüksek frekans kapasitans ve giriş yöntemleri gibi çeşitli yöntemler mevcuttur [67]. Card ve Rhoderick idealite faktörü ve engel yüksekliğinin, ön gerilime bağlı parametreler olduğunu yani arayüzey durumlarının

sonucunda hesaplanan I-V eğrisinin doğrusal olan kısmından sonra uygulanan voltajın sonucu haline geldiğini ileri sürmektedir. Buna göre idealite faktörü arayüzey durumları ve seri direnç etkisi sonucunda schottky diyotlarda sonradan kendiliğinden oluşmuş veya oluşturulmuş olabilir. Ayrıca idealite faktörü, aşağıdaki denkleme göre polimerik ara katman, arayüzey durumları, katkılı donör/alıcı atomları, tüketim tabakası genişliği ve bariyer homojensizliği sonucunda 1'den oldukça büyük ($n>1$) değer alabilir. Bu durumda, uygulanan dış voltaja bağlı olarak n ve R_s değerleri;

$$n(V) = \frac{q}{kT} \left[\frac{(V-IR_s)}{\ln(I_i/I_0)} \right] = 1 + \frac{d_i}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (4.12)$$

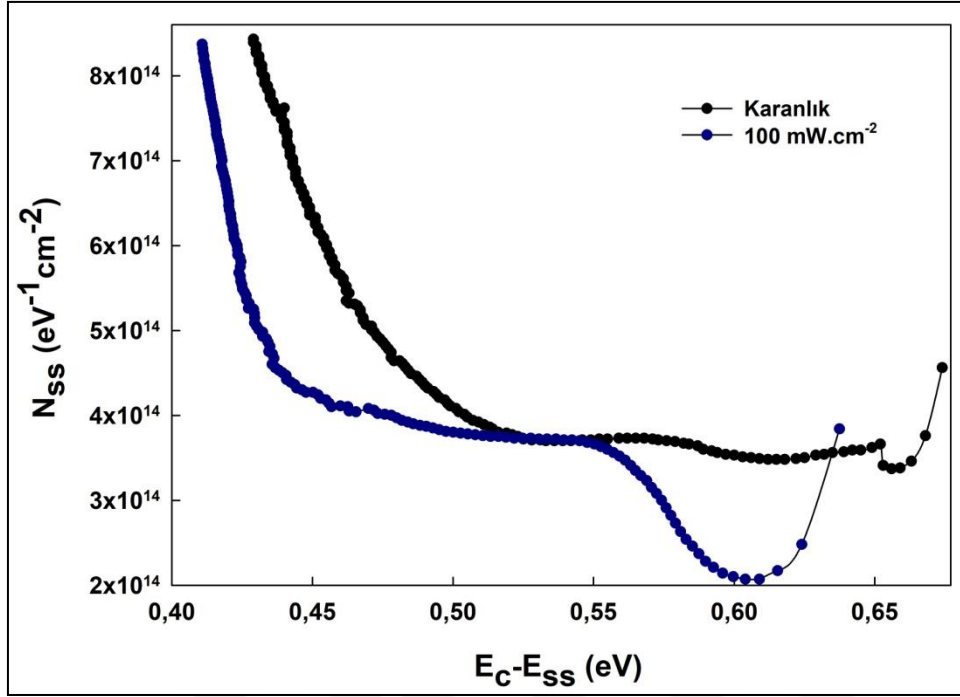
$$\Phi_e = \Phi_{B0} + \alpha(V - IR_s) = \Phi_{B0} + \left(1 - \frac{1}{n(V)} \right) (V - IR_s) \quad (4.13)$$

şeklinde tanımlanır [67]. Eşitlik 4.13'de bariyer yüksekliği gerilimin fonksiyonu olarak ifade edilir. Eşitlik 4.12'de verilen d_i değeri arayüzey katmanı kalınlığı, ε_i ve ε_s ise sırasıyla ara katmanın ve yarıiletkenin dielektrik değeridir. W_D ise 1 MHz'de ters öngerilim C^{-2} -V eğrisinden hesaplanan tüketim tabakası kalınlığıdır [67]. n-tipi yarıiletken Schottky diyotun yüzeyindeki N_{ss} 'nin enerji durumları, iletkenlik bandının tabanına göre aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.14)$$

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\varepsilon_i}{d} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right] \quad (4.15)$$

Au-(AgCdS:PVP)-nSi (MPS) Schottky diyotunun enerjiye bağımlı N_{ss} dağılım grafiği, Eş. 4.12-4.15 kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 4.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık ve aydınlık (100 mW/cm²) koşullar altında elde edilen N_{ss} - (E_c-E_{ss}) grafiği

Şekil 4.6.'da N_{ss} eğrileri, yüzey durumlarının üç boyutlu dağılımı ve gevşeme süreleri nedeniyle neredeyse U şeklinde bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu eğriler, N_{ss}'nin yarıiletkenin yasak enerji bant aralığının orta noktasından iletim bandının alt kısımlarına doğru katlanarak artacağı şekilde yorumlanabilmektedir. Enerji bant aralığındaki ara yüzey durumlarının bu davranışı, donör veya V grubu N_{ss}'deki artışa atfedilebilir. Ancak yasak enerji bant aralığından sonra N_{ss}'deki artış, alıcı veya III. grup tipi yüzey durumlarının katkısına bağlanılabilir.

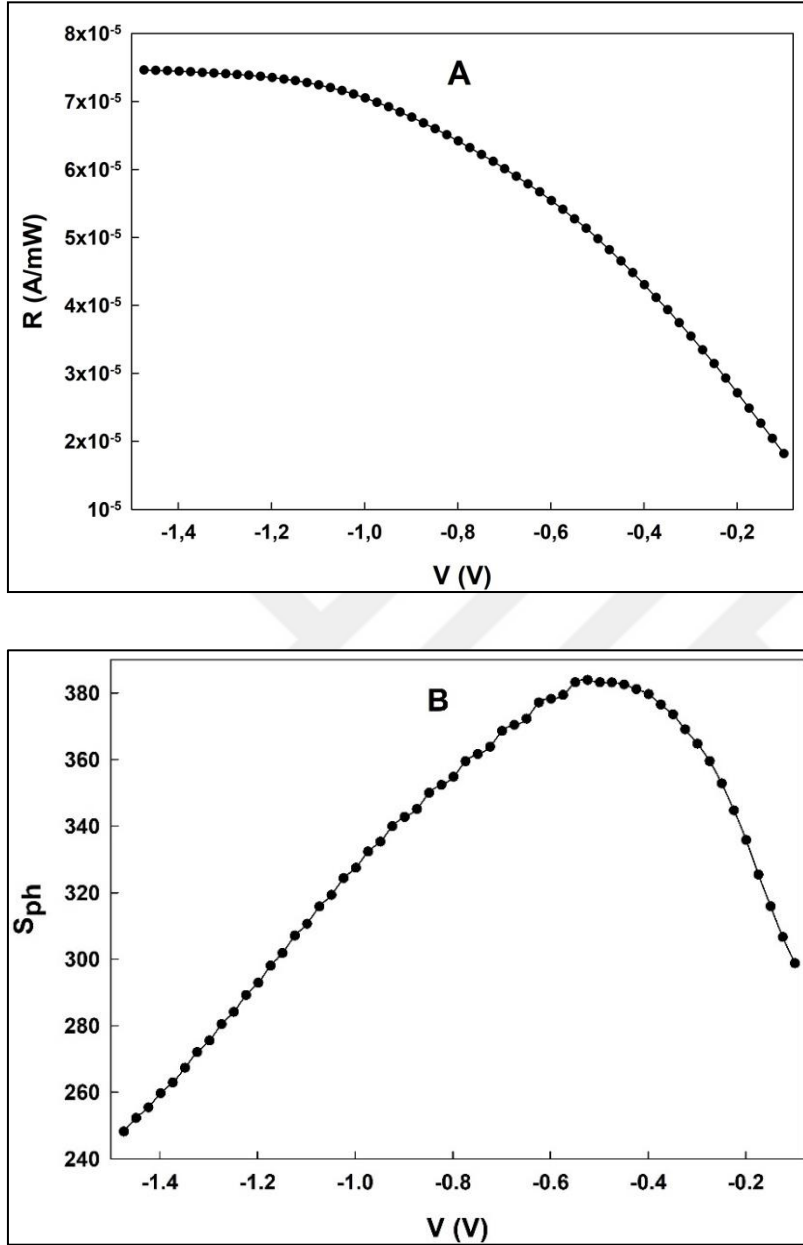
Au-(AgCdS:PVP)-nSi (MPS) Schottky diyotunun 100 mW/cm² ışık şiddeti ve karanlık ortam altında ışığa tepkisi (R), ışığa karşı duyarlılığı (S_{ph}) Eş. 4.16 ve 4.17 kullanılarak elde edilmiştir.

$$S_{ph} = I_{aydınlık}/I_{karanlık} \quad (4.16)$$

$$R = I_{aydınlık}/(A \times P) \quad (4.17)$$

Eşitlik 4.16 ve 4.17'da verilen I_{aydınlık}, I_{karanlık}, P ve A miktarları sırasıyla ışık altında ki aydınlatma akımı, karanlık ortam akımı, aydınlatma yoğunluğu ve doğrultucu kontağın alanıdır. Hesaplanan S ve R değerleri sırasıyla Şekil 4.7.'de ön gerilimin fonksiyonları

olarak gösterilmiştir. 100 mW/cm^2 nin altındaki maksimum S_{ph} ve R değerleri sırasıyla 384 ve 78 mW/A olarak bulunmuştur.



Şekil 4.7. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun ışığa tepkisi (A) ve ışığa duyarlılığı (B) (100 mW/cm^2) koşullar altında elde edilen grafikleri

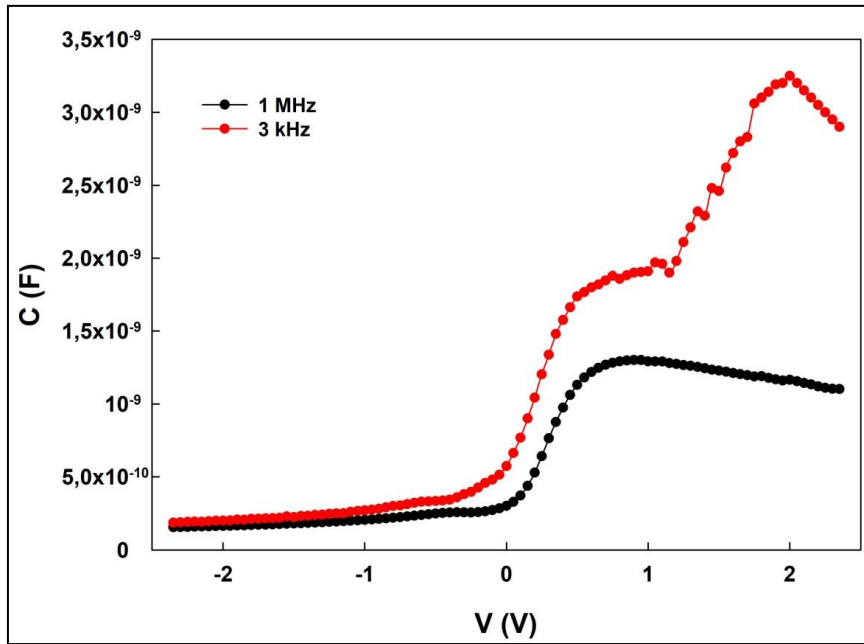
4.2. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky Diyotunun İleri ve Ters Öngerilim Altında Kapasitans ve İletkenlik Analizi

C-V ve G/ω -V ölçümleri, yüzey durumlarını, seri direncini ve bunların voltaj bağımlılığını elde etmek için yeterince düşük (3 kHz) ve yüksek (1 MHz) frekanslarda gerçekleştirilen ölçümlerin C-V ve G/ω -V'nin grafikleri Şekil 4.8. ve 4.9.'da gösterilmiştir. Burada

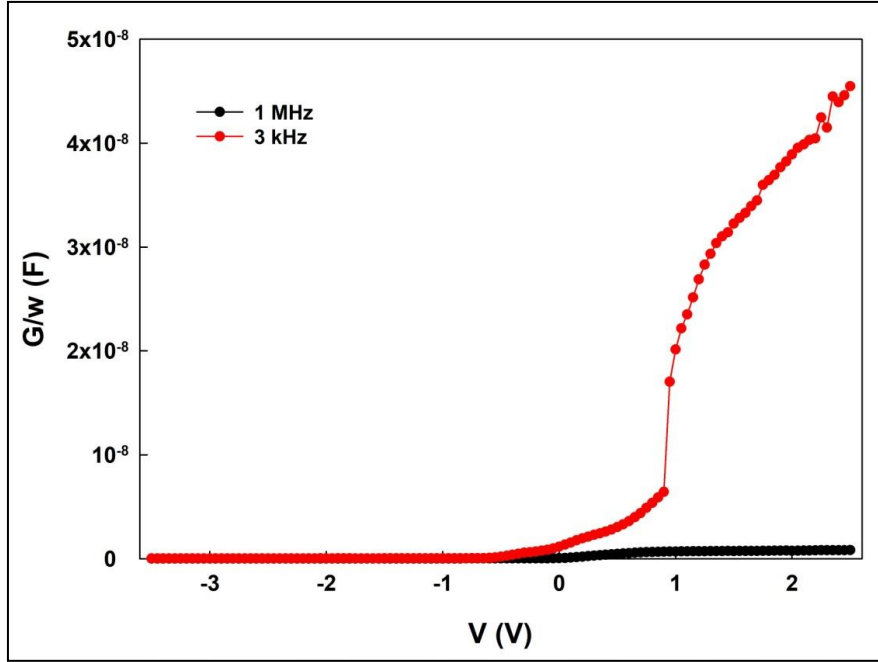
ölçümler sırasıyla ters, orta ileri ve yüksek ileri eğilim bölgelerine karşılık gelen terslenim ($-2,5 \text{ V} - 0 \text{ V}$), tüketim ($0 \text{ V} - 1 \text{ V}$) ve yığılma ($1 \text{ V} - 2,5 \text{ V}$) olmak üzere MIS tipi yapılarda olduğu gibi üç bölge oluşturmaktadır. Yığılma bölgesinde özellikle C-V eğrisinde gözlemlenen bükülme veya dar tepe noktası R_s 'den (seri direnç) ve polimerik ara katmandan kaynaklanmaktadır.

Frekans değeri arttığında (1 MHz) C-V ve G/ω -V eğrilerinde oluşan terslenim ve yığılma bölgelerinde değerler sabit iken, tüketim ve yığılma bölgelerinde uygulanan voltaja bağlı olarak artış gözlenmektedir. Silisyum yarımetalinde uygulanan voltaja bağlı olarak yarıiletkenin yüzeyinde bulunan taşıyıcı yükler metalin ön yüzeyine doğru geçer. Bunun sonucunda kapasitans (C) değerinde denge durumuna göre taşıyıcı atomların sayısının düşmesiyle azalma gözlenmektedir. Tıpkı arayüzey durumlarında (N_{ss}) olduğu gibi kapasitans (C) ve iletkenlik (G/ω) değerleri de uygulanan voltajdan ve frekanstan etkilenmektedir.

C-V ve G/ω -V eğrilerinde uygulanan yeterince düşük negatif voltaj değerinde özellikle terslenim bölgesinde büyük bir değişiklik gözlenmemektedir. Dolayısıyla terslenim bölgesinde uygulanan voltajın C ve G/ω değerlerine neredeyse hiç etkisi yoktur.



Şekil 4.8. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık koşullar altında elde edilen C-V grafiği

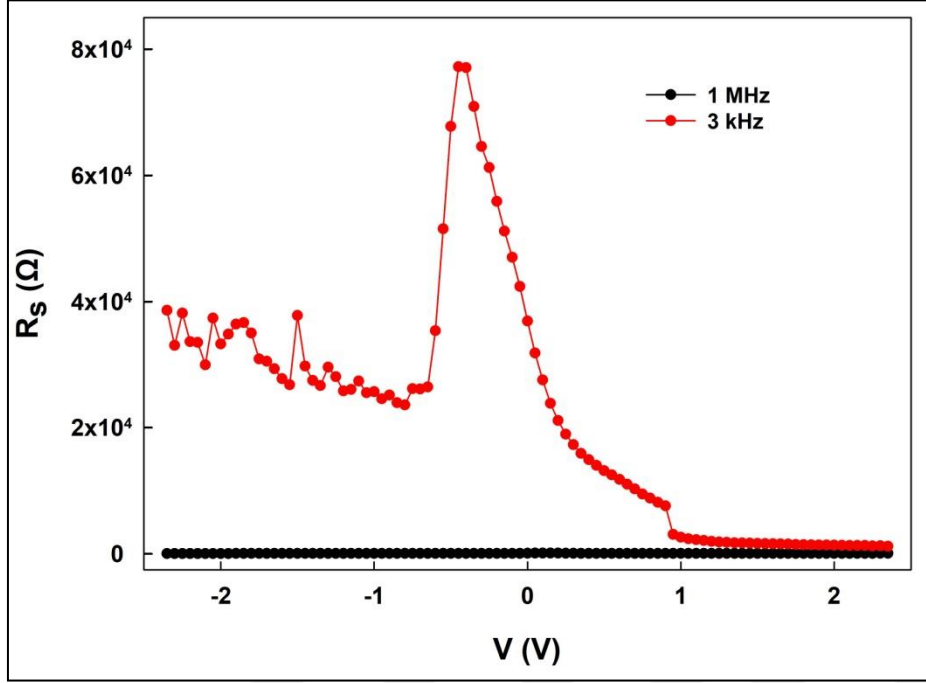


Şekil 4.9. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık koşullar altında elde edilen G/ω -V grafiği

Yapının R_s ve N_{ss} değerleri (C/G) -V ve I-V özelliklerini etkileyen iki önemli cihaz parametresidir. Ancak R_s değeri özellikle pik davranışı gözlenmiş olan yığılma bölgesinde C-V grafiğinde etkili olurken, N_{ss} 'nin özellikle düşük frekanslarda uygulanan dış ac sinyali takip edebilmesinden dolayı terslenim ve tükenim bölgelerinde daha çok etkisinin olduğu Şekil 4.8.-4.9.'da görülmektedir. Şekil 4.8. ve 4.9.'da ölçüm düşük frekans değerinde (3kHz) gerçekleştirildiğinde C ve G/ω için daha yüksek değerlerin elde edildiği görülmektedir. Bu sonuç Werner ve Güttler [68] göre düşük frekanslarda tuzaklardaki azınlık yük taşıyıcılarından kaynaklanmaktadır. Yarıiletken yapının sahip olduğu gerçek seri direnç değeri uygulanan yüksek pozitif voltaj sonucunda elde edilir. Çünkü yarıiletken aygıtın seri direnç değeri yüksek pozitif voltaj altında gerçek değerindeyken, ters voltaj altında (terslenim bölgesinde) sonsuza gitmektedir. Yığılma bölgesindeki G/ω artışı ve kapasitans değerindeki azalma, R_s ve arayüzey katmanından kaynaklanan “endüktif davranış” olarak bilinmektedir [1,13,67]. Bu nedenle voltaja bağlı R_i değeri 1 MHz gibi yüksek bir frekans için yapının R_s değerine karşılık geldiğinden, Eş. 4.18 verilen Nicollian-Brews [13,67] yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

$$R_s(V) = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.18)$$

Burada C_m ve G_m sırasıyla yeterince ileri pozitif voltaj altında ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir.



Şekil 4.10. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık koşullar altında elde edilen R_s -V grafiği (Nicollian-Brews yöntemiyle elde edildi)

Şekil 4.10'da seri direncin (R_s) gerçek değerinin genel olarak ters öngerilim bölgesinden, yeterince yüksek bir frekans (1 MHz) için elde edilebildiği ileri öngerilim bölgesine doğru uygulanan voltajdan bağımsız olduğu yani değer voltaja bağlı olarak değişmediği, sabit kaldığı açıktır. Ayrıca seri direnç değeri uygulanan voltaja bağlı olarak düşük frekans değerinde özellikle pik vermektedir. Bu durum kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) değerleri için N_{ss} değerinin özellikle düşük frekans değerinde uygulanan dış ac sinyali takip etmesi ve yeterince yüksek frekans değerinde ise ac sinyali takip edememesi ve dolayısıyla piklerin kaybolması bu duruma atfedilebilir. Bu nedenle, bu cihazların elektrik veya dielektrik parametrelerinin çıkarılması sırasında özellikle yığılma bölgesindeki yüksek frekanslarda C-V ve G/ω -V eğrileri üzerindeki etkisini ihmal edebilmek için R_s değerinden faydalanılması gerekmektedir.

MIS veya MOS tipi yapıların birim alan başına tükenme katmanı kapasitansı (C) aşağıdaki şekilde verilmiştir [13].

$$C = \frac{|\partial Q_{SC}|}{\partial V} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s\epsilon_0 N_D}{2(V_0 - V - \frac{kT}{q})}} \quad (4.19)$$

Ters öngerilim altında yapının C-V karakteristikleri kullanılarak elektriksel parametrelerinin çıkarılması için Eş. 4.19 kullanılarak denklem aşağıdaki şekilde düzenlenebilir;

$$1/C^2 = \frac{2(V_0 - V - \frac{kT}{q})}{q\epsilon_s\epsilon_0 N_D} \quad (4.20)$$

Eş.4.20’da V_0 , ters beslem altında $1/C^2$ ’ye karşı çizilen V grafiğinin eğiminin düşey eksenini kestiği noktadır. Burada $V_D = (V_0 + kT/q)$ difüzyon potansiyeli, N_D verici (katkı) atomlarının yoğunluğu, yeterince yüksek frekanslar için $1/C^2$ ’ye karşı çizilen V grafiğinin eğimi kullanılarak aşağıdaki şekilde belirlenebilir;

$$N_D = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 \left(\frac{dC^{-2}}{dV} \right)} \quad (4.21)$$

Ayrıca doğru ve ters beslem altında Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık koşullar için deneysel olarak fermi enerji yüksekliği (E_F), tükenme bölgesinin kalınlığı (W_D) ve frekansa bağlı olarak değişen engel yüksekliği (Φ_B) yarıiletken arayüzeyindeki maksimum elektrik alanı (E_m) gibi elektriksel karakteristiklerinin C^2 -V grafiğinin terslenim bölgesinin eğimi ve Eş. 4.22-4.25 kullanılarak hesaplayabiliriz [5,15,13].

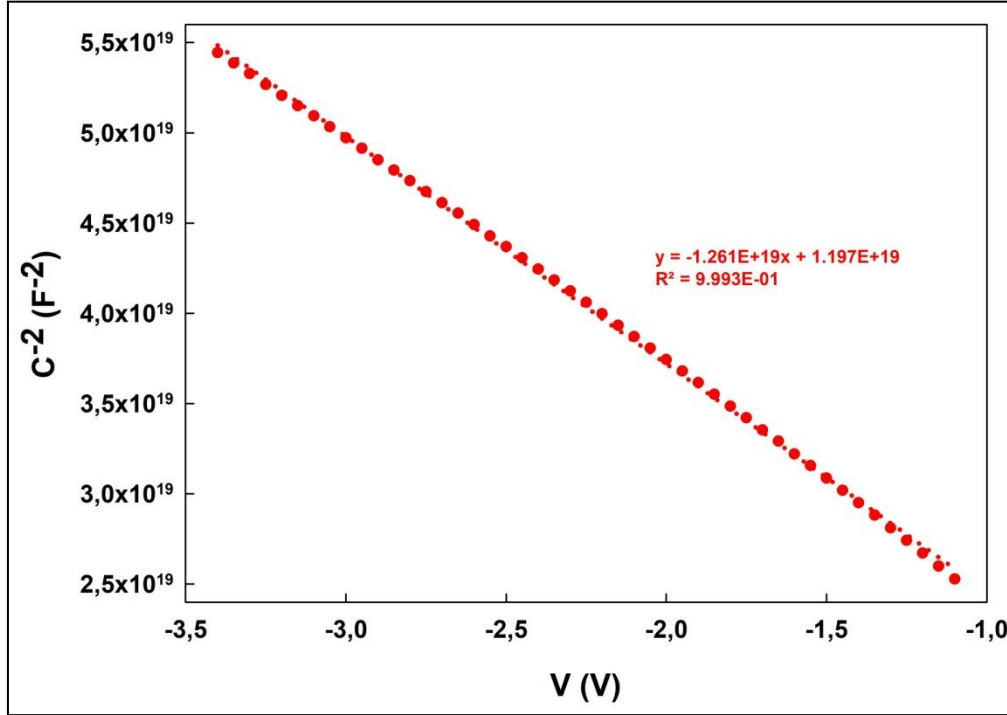
$$E_F = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_c}{N_D} \right) \quad (4.22)$$

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0 V_0}{qN_D}} \quad (4.23)$$

$$\Phi_{B(CV)} = V_0 + \frac{kT}{q} + E_F \quad (4.24)$$

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s \epsilon_0}} \quad (4.25)$$

Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık koşullar altında elde edilen 1 MHz frekansı için C^{-2} -V eğrisi Şekil 4.11.'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi (-3,5 V) ve (-1 V) aralığında iyi bir lineer davranış görülmektedir.



Şekil 4.11. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun karanlık koşullar altında ters öngerilimli C^{-2} -V grafiği

1 MHz frekans değerinde Eş.4.20-4.24 ve C^{-2} -V grafiği kullanılarak hesaplanan N_D , W_D , E_m , V_0 , E_F ve $\Phi_B(C-V)$ değerler Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun 1 MHz frekans değeri için hesaplanan N_D , W_D , E_m , V_0 , E_F ve $\Phi_B(C-V)$ değerleri

Frekans (MHz)	V_0 (V)	$N_D \times 10^{16}$ (cm ⁻³)	E_F (eV)	$W_D \times 10^{-5}$ (cm)	$\Phi_B(C-V)$ (eV)	$E_m \times 10^4$ (V.cm ⁻¹)
1	0,949	1,54	0,188	2,84	1,162	6,87

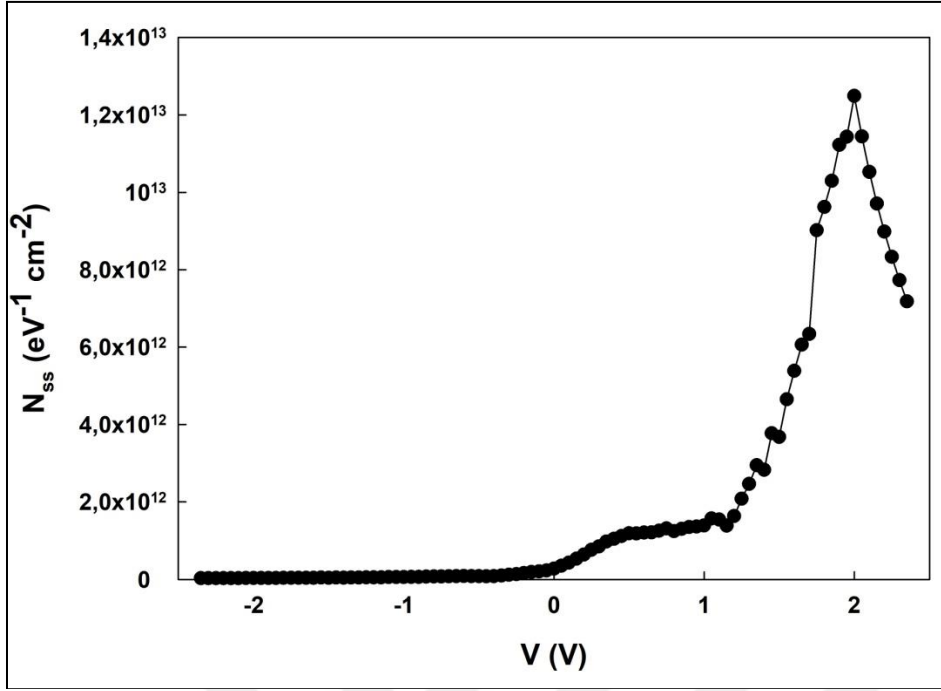
$1/C^2$ -V eğrisinden elde edilen bariyer yüksekliği değeri ($\Phi_B (C-V)$) , $\ln(I)$ -V eğrisinden elde edilen değerden ($\Phi_{B_0} (I-V)$), fermi enerji seviyesi kadar (E_F) yüksektir. Yani iki farklı ölçüm sonucunda elde edilen değerler aynı değildir. Dolayısıyla yük taşıyıcılarının

yarıiletken den metale doğru geçerken ki karşılaştıkları bariyer yüksekliği, metalden yarıiletkene doğru geçerken ki karşılaştıkları bariyerden her zaman yaklaşık fermi enerji seviyesi kadar (E_F) büyüktür. Φ_{B0} (I-V) ve Φ_B (C-V) arasındaki bu fark, kullanılan ölçüm veya hesaplama tekniğiyle, imaj kuvvetinin etkisiyle, sızıntı akımıyla, MS tabaka arasında oluşan yalıtkan tabaka bulunmasıyla, engel boyunca oluşan homojensizliklerle ilişkilendirilebilir. Bunlarla beraber yapının katkılanma oranının artmasıyla beraber Φ_{B0} (I-V) değeri artarken, Φ_B (C-V) değerinde herhangi bir değişiklik olmaz, sabit kalır [68-70].

Yarıiletkenin üretimi sonucunda oluşan yüzey kirlilikleri, periyodik örgü yapısındaki düzensizlikler, arayüzey tabakasının formasyonu gibi birçok etkinin sonucunda arayüzey durumlarının oluştuğunu söylenmişti. Bu nedenle arayüzey durumları yapının elektriksel parametrelerini etkiler. Yapının arayüzey durumlarının büyüklüğünü hesaplamak için bu tez çalışmasında Yüksek-Düşük Frekans Kapasitans Metodu (YDFKM) [33] metodu uygulandı. Bu metot için düşük frekans değerinde (C_{LF}) 3 kHz ve yüksek frekans değerinde (C_{HF}) 1 MHz frekans değerleri kullanılarak Eş 4.26'den elde edildi, sonuçlar Şekil 4.12.'de gösterildi.

$$qAN_{ss} = \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \right] \quad (4.26)$$

Burada C_i tabakalar arası kapasitans, C_{LF} düşük frekanslı kapasitans, C_{HF} yüksek frekanslı kapasitans ve A Schottky diyotun yüzey alanıdır.



Şekil 4.12. Au/(AgCdS:PVP) n-Si (MPS) Schottky diyotunun N_{ss} -V eğrisi (yüksek-düşük frekans kapasitans yöntemiyle elde edildi.)

Şekil 4.12., N_{ss} 'nin voltaja bağlı değişimini göstermektedir. N_{ss} değerinin düşük frekans altında uygulanan dış ac sinyali takip edebilmesi durumunda ölçülen kapasitans değerine önemli ölçüde etkisi gözlenir [25]. Buna ek olarak yüksek frekans altında uygulanan dış ac sinyali takip edemez ve kapasitans değerine herhangi bir katkısı bulunmaz [25]. N_{ss} -V eğrisi, yarıiletkenin yasak bant aralığındaki yüzey durumlarının (tuzakların) uzaysal dağılımı nedeniyle terslenim bölgesinde artan voltaj ile artmış ve yaklaşık olarak 2 V'de belirgin bir tepe noktası vermiştir. İletkenlik yöntemine göre daha kolay ve hızlı uygulanabilen yüksek-düşük frekanslı kapasitans tekniği, iletkenlik yöntemiyle elde edilen sonuçlara çok yakın ve doğru sonuçlar verdiği göz önüne alındığında tercih edilebilir bir yöntemdir. Ayrıca literatürde aydınlatmanın ve yüzey durumlarının fonksiyonu olarak elektriksel parametrelerle ilgili benzer sonuçlar rapor edilmiştir [32-37].

İdeal durumlarda yarıiletken aygıtların N_{ss} değeri yaklaşık olarak $10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerinde olmalıdır. Fakat yapı boyunca oluşan yüzey kirlilikleri, periyodik örgü yapısındaki düzensizlikler, arayüzey tabakasının formasyonu, katkı atomlarında homojensizlikler, yapının R_s değeri gibi bazı sebepler sonucunda yasak enerji aralığında arayüzey tabakası ile yarıiletken arasında oluşan arayüzey durumları yapının ideallikten uzaklaşmasına ve aygıtın kapasitans-iletkenlik değerlerinde değişimine neden olmaktadır.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Au-(AgCdS:PVP)-nSi (MPS) Schottky diyotunun deneysel ileri öngerilim akım-voltaj (I-V), ters öngerilim kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) karakteristikleri kullanılarak elektriksel parametrelerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Çalışmada hazırlanan Au-(AgCdS:PVP)-nSi (MPS) Schottky diyotunun elektriksel karakteristiklerin ölçüm işlemleri, Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Starlab Yarıiletken Laboratuvarında gerçekleştirildi. Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinde 300 K sıcaklıkta, karanlıkta ve 100 mW/cm^2 aydınlatma yoğunluğu altında Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı kullanıldı. Kapasitans-Gerilim (C-V) ve İletkenlik-Gerilim (G/ω -V) hesaplamalarında -5,0 V'dan 5,0 V'a aralığında ve 3 kHz ile 1 MHz frekans değerlerinde, $\pm\% 0,15$ hassasiyetle ölçümler alan Hawlett Packard 4192 A LF Empedans Analizmetre kullanıldı.

Öncelikle karanlık ve aydınlık (100 mW/cm^2) koşullar altında arayüzey tabakasının yapının elektriksel karakteristiklerine olan etkisini araştırmak amacıyla Termiyonik Emisyon teorisi, Cheung ve Norde fonksiyonu kullanılarak ileri öngerilim I-V eğrilerinden n idealite faktörü, I_0 ters doyma akımı ve Φ_{B0} (I-V) sıfır beslem bariyer engel yüksekliği, R_s diyotun seri direnci ve R_{sh} şönt direnci gibi temel elektriksel parametreler elde edildi. Elde edilen sonuçların birbirinden farklılıklarının nedenleri olarak hesaplamalarda kullanılan yöntem farkı (farklı gerilim değerlerine karşılık gelmesi) N_{ss} arayüzey durumlarının varlığı ve engel homojensizliğine atfedildi. İkinci olarak, enerjiye bağlı N_{ss} ve (E_c - E_{ss}) grafikleri, I-V eğrileri, özellikle de voltaja bağlı n ve Φ_B değerleri kullanılarak çizildi.

Termiyonik Emisyon teorisiyle karanlık ortamda düşük öngerilim bölgesi için $n=7,85$, $I_0=2,21 \times 10^{-7} \text{ A}$, $\Phi_{B0}=0,689 \text{ eV}$, orta öngerilim bölgesi için $n=8,56$, $I_0=2,72 \times 10^{-7} \text{ A}$, $\Phi_{B0}=0,684 \text{ eV}$ her iki bölge için de $RR=7,73 \times 10^3$ olarak hesaplandı. Aydınlık ortamda (100 mW/cm^2) ise düşük öngerilim bölgesi için $n=5,28$, $I_0=7,09 \times 10^{-7} \text{ A}$, $\Phi_{B0}=0,659 \text{ eV}$, orta öngerilim bölgesi için $n=13,81$, $I_0=3,66 \times 10^{-7} \text{ A}$, $\Phi_{B0}=0,616 \text{ eV}$ her iki bölge için de $RR=0,21 \times 10^3$ olarak hesaplandı.

Cheung fonksiyonu kullanılarak karanlık ortamda $dV/d\ln(I)$ -I grafiğinden $n=6,44$, $R_s=0,34 \text{ k}\Omega$, $H(I)$ -I grafiğinden, $\Phi_{B0}=0,70 \text{ eV}$, $R_s=0,27 \text{ k}\Omega$ değerleri elde edilmiştir. Aydınlık

ortamda (100 mW/cm^2) ise $n = 9,90$, $R_s = 0,07 \text{ k}\Omega$, $H(I)-I$ grafiğinden, $\Phi_{B0} = 0,62 \text{ eV}$, $R_s = 0,067 \text{ k}\Omega$ değerleri elde edilmiştir

Norde fonksiyonu kullanılarak karanlık ortamda $\Phi_{B0} = 0,72 \text{ eV}$, $R_s = 1,19 \text{ k}\Omega$, aydınlık ortamda (100 mW/cm^2) $\Phi_{B0} = 0,79 \text{ eV}$, $R_s = 0,48 \text{ k}\Omega$ olarak hesaplanmıştır.

Bu hesaplamalarla beraber ileri öngerilim I-V eğrilerinden elde edilen verilerin birbirlerinden farklılık gösterdiği sonucuna ulaşıldı. Sonuçların birbirinden farklı çıkmasının temel sebebi üç yöntem için de I-V eğrisinin farklı bölgelerinin referans olarak alınmasına atfedildi. Burada Termiyonik Emisyon yöntemi için I-V eğrisinin ileri öngerilimdeki lineer bölgesi, Cheung fonksiyonu için eğrinin bükülmeye başladığı yer, Norde fonksiyonu için eğrinin tamamının verileri ele alınmaktadır.

Au-(AgCdS:PVP)-nSi (MPS) Schottky diyotunun ileri öngerilimleme altında I-V eğrisinin doğrusallıktan uzaklaşma nedeni olarak yapının seri direnç ve arayüzey durumlarının varlığına atfedildi. Yapının idealite faktörünün 1'den büyük bir değer çıkması, polimerik ara katman, arayüzey durumları, katkılı donör/alıcı atomları, tüketim tabakası genişliği ve bariyer homojensizliğine atfedildi.

Yapının kapasitans-voltaj (C-V) ile iletkenlik-voltaj (G/ω -V) eğrilerinin sonucunda ideal bir MIS yapıda var olduğu gibi Au-(AgCdS:PVP)-nSi (MPS) Schottky diyotunun da terslenim, tüketim ve yığılma olmak üzere üç adet bölge oluşturduğu görüldü. Bununla beraber üçüncü olarak, 1 MHz 'de $1/C^2$ -V eğrisinden yapının N_D katkı atomlarının yoğunluğu, Φ_B bariyer engel yüksekliği, W_D tüketim tabakası kalınlığı, R_s seri direnç, V_D difüzyon potansiyeli, N_{ss} arayüzey durumları ve E_F fermi enerjisi karakteristikleri elde edildi ve diyotun C-V ve G/ω -V grafikleri 1 MHz 'de çizildi.

$1/C^2$ -V eğrisinden elde edilen $\Phi_{B0}(C-V)$ bariyer yüksekliği değeri, $\ln(I)$ -V eğrisinden elde edilen $\Phi_{B0}(I-V)$ değerinden fermi enerji seviyesi kadar (E_F) düşük çıktığı görüldü. İki değer arasındaki bu fark, kullanılan ölçüm veya hesaplama tekniğiyle, imaj kuvvetinin etkisiyle, sızıntı akımıyla, MS tabaka arasında oluşan yalıtkan tabaka bulunmasıyla, engel boyunca oluşan homojensizliklerle atfedildi.

Arayüzey durumları düşük frekans değerinde (3 kHz) ac sinyali takip edemezken, yüksek frekans değerinde (1 MHz) ac sinyali takip edebildiği görüldü. Bunun sonucunda arayüzey durumları yapının hem kapasitans hem de iletkenlik değerlerini etkilemektedir. Au/(AgCdS:PVP)/n-Si Schottky diyotunun arayüzey durumlarının voltaj bağımlılığını araştırmak için Yüksek-Düşük (1 MHz & 3 kHz) Frekans Kapasitans Metodu kullanıldı. Yapının arayüzey durumları maksimum $10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ mertebesinde olmalı ve bir tepe oluşmalıdır. Dolayısıyla yapının arayüzey durumları bu mertebe sınırlarındadır ve uygulanan voltaja bağlı olarak değişmektedir. N_{ss} -V grafiğinin tepe davranışı, yarıiletkenin yasak enerji bant aralığındaki yüzey durumlarının/tuzaklarının uzaysal dağılımına atfedildi.

Sonuç olarak bu çalışmada hazırlanan Au-(AgCdS:PVP)-nSi (MPS) Schottky diyotunun hem karanlık hem de aydınlık ortamlar altında ve farklı frekans değerlerinde I-V, C-V ve G/ω -V parametreleri ele alındığında hazırlanan diyotun performansı ve akım-iletim mekanizmaları hakkında bilgi verir. Au-(AgCdS:PVP)-nSi (MPS) Schottky diyotunun 100 mW/cm^2 'nin altındaki S_{ph} ve R değerleri sırasıyla 384 ve 78 mW/A olarak bulundu. Bu kadar yüksek hassasiyet veya 100 mW/cm^2 'nin altındaki akım değerinde gerçekleşen yüksek artış, üretilen Au/(AgCdS:PVP)/n-Si Schottky diyotunun iyi fotodiyot davranışı sergilediğini ve bununla birlikte yüksek mekanik dayanıklılık, esneklik, düşük maliyet, hafiflik, kolay üretim süreçleri gibi avantajları da dikkate alındığında geleneksel MS tipi diyotlar yerine elektronik ve optoelektronik uygulamalara aday olabileceğini göstermektedir.



KAYNAKLAR

1. Tecimer, H. U., Alper, M. A., Tecimer, H., Tan, S. O., and Altındal, Ş. (2018). Integration of Zn-doped organic polymer nanocomposites between metal semiconductor structure to reveal the electrical qualifications of the diodes. *Polymer Bulletin*, 75, 4257-4271.
2. Reddy, V. R., Manjunath, V., Janardhanam, V., Kil, Y. H., and Choi, C. J. (2014). Electrical properties and current transport mechanisms of the Au/n-GaN Schottky structure with solution-processed high-k BaTiO₃ interlayer. *Journal of Electronic Materials*, 43(9), 3499-3507.
3. Braun, F. (1874). Über die stromleitung durch schwefelmetalle. *Annual Review of Physical Chemistry*, 53, 556.
4. Sze, S. M., Li, Y., and Ng, K. (2007). *Metal-Semiconductor Contacts* (3rd ed.), New York: John Wiley & Sons, 245-300.
5. Rhoderick, R. H., Williams, E.H. (1988). *Metal-semiconductor contacts*. London: Oxford University Press, 257–267.
6. Schottky, W. (1938). Halbleitertheorie der sperrschicht. *Naturwissenschaften*, 26(52), 843-843.
7. Mott, N.F. (1938). Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34(4), 568–572.
8. Rhoderick, E.H. and Williams, R.H. (1988). “Surfaces, Interfaces, and Schottky Barriers”, *Metal-Semiconductor Contacts* (2nd ed.), Oxford: Clarendon Press, 1-47
9. Schottky, W. (1939). Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht-und Spitzengleichrichter. *Zeitschrift für Physik*, 113(5–6), 367–414.
10. Bucurgat, M. (2021). Voltage dependent barrier height, ideality factor and surface states in Au/(NiS-PVP)/n-Si (MPS) type Schottky barrier diodes. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(2), 1058-1067.
11. Turut, A. (2020). On current-voltage and capacitance-voltage characteristics of metal-semiconductor contacts. *Turkish Journal of Physics*, 44(4), 302-347.
12. Bethe, H.A. (1942). *Theory of the boundary layer of crystal rectifiers*. New York: MIT Radiation Laboratory Report.
13. Sze, S. M. (1981). *Metal-semiconductor contacts* (2nd ed.), New York: John Wiley & Sons, 250-270.
14. Taşçıoğlu, İ., Farooq, W. A., Turan, R., Altındal, Ş., and Yakuphanoglu, F. (2014). Charge transport mechanisms and density of interface traps in MnZnO/p-Si diodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 590, 157-161.

15. Sharma, B.L. (1984). *Physics of schottky barrier junctions*. London: Plenum Press, 1-56.
16. Reddy, V. R., and Prasad, C. V. (2018). Surface chemical states, electrical and carrier transport properties of Au/ZrO₂/n-GaN MIS junction with a high-k ZrO₂ as an insulating layer. *Materials Science and Engineering: B*, 231, 74-80.
17. Kaushal, P., and Chand, S. (2016). Numerical analysis of inhomogeneous Schottky diode with discrete barrier height patches. *International Journal of Electronics*, 103(6), 937-949.
18. Karataş, Ş., El-Nasser, H. M., Al-Ghamdi, A. A., and Yakuphanoglu, F. (2018). High photoresponsivity Ru-doped ZnO/p-Si heterojunction diodes by the sol-gel method. *Silicon*, 10, 651-658.
19. Çetinkaya, H. G., Sevgili, Ö., and Altındal, Ş. (2019). The fabrication of Al/p-Si (MS) type photodiode with (% 2 ZnO-doped CuO) interfacial layer by sol gel method and their electrical characteristics. *Physica B: Condensed Matter*, 560, 91-96.
20. Altındal, Ş., Sevgili, Ö., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). A comparison of electrical parameters of Au/n-Si and Au/(CoSO₄-PVP)/n-Si structures (SBDs) to determine the effect of (CoSO₄-PVP) organic interlayer at room temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 9273-9280.
21. Singh, A., Reinhardt, K. C., and Anderson, W. A. (1990). Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor junctions. *Journal of Applied Physics*, 68(7), 3475-3483.
22. Ashok, S., Borrego, J. M., and Gutmann, R. J. (1979). Electrical characteristics of GaAs MIS Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 22(7), 621-631.
23. Neamen, D. A. (1992). *Semiconductor physics and devices: Basic Principles*. Irwin, Inc, Universty of New Mexico.
24. Cordona, M., and Yu P. Y. (2001). *Fundamentals of Semiconductors*, (3rd Edition), New York: Springer-Verlag, 12.
25. Nicollian, E.H., and Brews, J.R. (1982). *Metal oxide semiconductor (MOS) physics and technology*. New York: Springer-Verlag, 257–264.
26. Neamen, D.A. (2011). *Semiconductor physics and devices: Basic principles*. New York: McGraw-Hill.
27. Ziel, A. (1968). *Solid state physical electronics*. Minnesota: Prentice-Hall International Inc., 260–300.
28. Kao, W.-C. (2015). *Characterization of interface state in silicon carbide metal oxide semiconductor capacitors*. Doctoral dissertation, Arizona State University.
29. Schroder, D.K. (1998). *Semiconductor material and device characterization*. New York: John Wiley & Sons, 15.

30. Nicollian, E.H., and Goetzberger, A. (1967). The Si-SiO₂ interface – electrical properties as determined by the metal-insulator-silicon conductance technique. *The Bell System Technical Journal*, 46, 1055–1133.
31. Terman, L.M. (1962). An investigation of surface states at a silicon/silicon oxide interface employing metal-oxide-silicon diodes. *Solid-State Electronics*, 5, 258–299.
32. Berglund, C.N. (1966). Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces. *IEEE Transactions On Electron Devices*, 13(10), 701–705.
33. Castagne, R., Vapaille, A. (1971). Description of the SiO₂-Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements. *Surface Science*, 28, 157–193.
34. Padovani, F. A., Sumner, G. G. (1965). Experimental study of gold-gallium arsenide schottky barriers. *Journal of Applied Physics*, 36, 3744-3747.
35. Padovani, F. A. (1966). Graphical determination of the barrier height and excess temperature of a schottky barrier. *Journal of Applied Physics*, 37, 921-923.
36. Altındal, S., Sevgili, Ö., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). The structural and electrical properties of the Au/n-Si (MS) diodes with nanocomposites interlayer (Ag-Doped ZnO/PVP) by using the simple ultrasound-assisted method. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(7), 3103–3109.
37. Neamen, D. A. (1997). *Semiconductor physics and devices* (2nd ed), New York: Mc Graw-Hill, 420-450.
38. Ghandhi, S. K. (1983). *VLSI fabrication principles*. New York: John Wiley & Sons, 401-405,
39. Schroder, D. K. (1998). *Semiconductor material and device characterization*. (2nd ed.), New York: John Wiley & Sons, 337-379
40. Crowell, C. R., and Sze, S. M. (1966). Current transport in metal-semiconductor barriers. *Solid-State Electronics*, 9(11-12), 1035-1048.
41. Bengi, A., Altındal, S., Özçelik, S., and Mammadov, T. S. (2007). Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs structures. *Physica B: Condensed Matter*, 396(1-2), 22-28.
42. Kar, S., Panchal, K. M., Bhattacharya, S., and Varma, S. (1982). On the mechanism of carrier transport in metal-thin-oxide semiconductor diodes on Polycrystalline silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(12), 1839-1845.
43. Cova, P., and Singh, A. (1990). Temperature dependence of IV and CV characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky barrier type diodes. *Solid-State Electronics*, 33(1), 11-19.
44. Cheung, S. K., and Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87.

45. Enríquez, J. P., and Mathew, X. (2003). Influence of the thickness on structural, optical and electrical properties of chemical bath deposited CdS thin films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 76(3), 313-322
46. Kim, D. J., Yu, Y. M., Lee, J. W., and Choi, Y. D. (2008). Investigation of energy band gap and optical properties of cubic CdS epilayers. *Applied Surface Science*, 254(22), 7522-7526.
47. Pradhan, B., Sharma, A. K., and Ray, A. K. (2007). Conduction studies on chemical bath-deposited nanocrystalline CdS thin films. *Journal of Crystal Growth*, 304(2), 388-392.
48. Sivaraman, T., Nagarethinam, V. S., and Balu, A. R. (2014). CdS thin films Fabricated by a simplified Spray technique from different Substrate Temperatures—Structural, Morphological, Optical and Electrical analysis. *Research Journal of Material Sciences*, 2(2), 6-15.
49. Zyoud, A., Saa'deddin, I., Khudruj, S., Hawash, Z. M., Park, D., Campet, G., & Hilal, H. S. (2013). CdS/FTO thin film electrodes deposited by chemical bath deposition and by electrochemical deposition: a comparative assessment of photo-electrochemical characteristics. *Solid State Sciences*, 18, 83-90.
50. Kong, L., Li, J., Chen, G., Zhu, C., & Liu, W. (2013). A comparative study of thermal annealing effects under various atmospheres on nano-structured CdS thin films prepared by CBD. *Journal of Alloys and Compounds*, 573, 112-117.
51. Metin, H., and Esen, R. (2003). Annealing studies on CBD grown CdS thin films. *Journal of Crystal Growth*, 258(1-2), 141-148.
52. Kwon, J. H., Ahn, J. S., and Yang, H. (2013). Chemical bath deposition of CdS channel layer for fabrication of low temperature-processed thin-film-transistors. *Current Applied Physics*, 13(1), 84-89.
53. Sam, M., Bayati, M. R., Mojtahedi, M., & Janghorban, K. (2010). Growth of Cu₂S/CdS nano-layered photovoltaic junctions for solar cell applications. *Applied Surface Science*, 257(5), 1449-1453.
54. Takanezawa, K., Hirota, K., Wei, Q. S., Tajima, K., and Hashimoto, K. (2007). Efficient charge collection with ZnO nanorod array in hybrid photovoltaic devices. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(19), 7218-7223.
55. Huang, L., Wei, Z. L., Zhang, F. M., and Wu, X. S. (2015). Electronic and optical properties of CdS films deposited by evaporation. *Journal of Alloys and Compounds*, 648, 591-594.
56. Rathinamoorthy, R. (2019). Performance analysis of polyvinylpyrrolidone. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 31(5), 619–629.
57. Toloman, D., Pana, O., Stefan, M., Popa, A., Leostean, C., Macavei, S., Silipas, D., Perhaita, I., Lazar, M.D., and Barbu-Tudoran, L. (2019). Photocatalytic activity of SnO₂-TiO₂ composite nanoparticles modified with PVP. *Journal of Colloid and Interface Science*, 542, 296–307.

58. Ismael Raafat, A., El-Hag and Ali, A. (2019). A novel Lawsonia inermis (Henna)/(hydroxyethylcellulose/polyvinylpyrrolidone) wound dressing hydrogel: radiation synthesis, characterization and biological evaluation. *Polymer Bulletin*, 76(8), 4069–4086.
59. Haaf, F., Sanner, A., and Straub, F. (1985). Polymers of n-vinylpyrrolidone: synthesis, characterization and uses. *Polymer Journal* volume, 17, 143–152.
60. Chin, W.W.L., Heng, P.W.S., Thong, P.S.P., Bhuvaneswari, R., Hirt, W., Kuenzel, S., Soo, K.C., and Olivo, M. (2008). Improved formulation of photosensitizer chlorin e6 polyvinylpyrrolidone for fluorescence diagnostic imaging and photodynamic therapy of human cancer. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 69(3), 1083–1093.
61. Xu, X., Wang, Q., Choi, H.C., and Kim, Y.H. (2010). Encapsulation of iron nanoparticles with PVP nanofibrous membranes to maintain their catalytic activity. *Journal of Membrane Science*, 348(1–2), 231–237.
62. Yu, D.-G., White, K., Yang, J.-H., Wang, X., qian, W., and Li, Y. (2012). PVP nanofibers prepared using co-axial electrospinning with salt solution as sheath fluid. *Materials Letters*, 67(1), 78–80.
63. Koczur, K.M., Mourdikoudis, S., Polavarapu, L., and Skrabalak, S.E. (2015). Polyvinylpyrrolidone (PVP) in nanoparticle synthesis. *Dalton Transactions*, 44(41), 17883–17905.
64. Martín-Alfonso, J.E., Číková, E., and Omastová, M. (2019). Development and characterization of composite fibers based on tragacanth gum and polyvinylpyrrolidone. *Composites Part B: Engineering*, 169, 79–87.
65. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053.
66. Zhu, S., Detavernier, C., Van Meirhaeghe, R., Cardon, F., Ru, G.-P., Qu, X.-P., and Li, B.-Z. (2000). Electrical characteristics of CoSi₂/n-Si(1 0 0) Schottky barrier contacts formed by solid state reaction. *Solid-State Electronics*, 44(10), 1807–1818.
67. Card, H.C., and Rhoderick, E.H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, 1589–1601.
68. Werner, J.H., and Güttler, H.H. (1991). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 69(3), 1522–1533.
69. Crowell, C.R. (1977). The physical significance of the T₀ anomalies in Schottky barriers. *Solid-State Electronics*, 20(3), 171–175.
70. Tung, R. T. (2001). Recent advances in Schottky barrier concepts. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 35(1-3), 1-138.





Gazili olmak ayrıcalıktır