



**POLİMER ARAYÜZEY TABAKALI VE TABAKASIZ SCHOTTKY ENGEL
DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

Çiğdem BİLKAN

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2016

Çiğdem BİLKAN tarafından hazırlanan “POLİMER ARAYÜZEY TABAKALI VE TABAKASIZ SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Necati YALÇIN

Fen Bilgisi Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Adem TATAROĞLU

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN

Fizik Anabilim Dalı, Çankırı Karatekin Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Habibe TECİMER

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 02/06/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

Çiğdem BİLKAN

02/06/2016

POLİMER ARAYÜZEY TABAKALI VE TABAKASIZ SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN
ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI
(Doktora Tezi)

Çiğdem BİLKAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2016

ÖZET

Bu çalışmada, arayüzey tabakasının elektriksel karakteristikler üzerine etkilerinin ve pozitif voltaj C-V eğrilerindeki anormal pik ile negatif kapasitans davranışlarının kaynaklarının incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla Polypyrrole (PPy) polimer arayüzey tabakalı Cr/PPy/p-Si (MPS) ve arayüzey tabakasız Cr/p-Si (MS) Schottky engel diyotlarının (SBDs) üretimi yapılmıştır. Üretimi yapılan MS ve MPS tipi SBD'lerin 10 kHz-5 MHz frekans ve (-4V)-(+4V) voltaj aralığında kapasitans-voltaj (C-V), kondüktans-voltaj (G/ω -V) karakteristikleri ve aynı voltaj aralığında akım-voltaj (I-V) karakteristikleri incelenmiş ve diyotların karşılaştırılması yapılmıştır. Diyotların elektriksel karakteristiklerini önemli ölçüde etkileyen faktörlerden olan arayüzey durumlarının (N_{ss}) dağılımı ve diyotun seri direnci (R_s), sırasıyla Hill Coleman ve Nicollian-Brews metotları kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen C-V eğrilerinin pozitif voltaj (yığılma) bölgesinde anormal pik gösterdiği ve daha sonra her bir frekans için negatif kapasitansa (NC) gittiği gözlemlenmiştir. C'deki azalmaya karşılık kondüktansta (G/ω) bir artış gözlemlenmiş ve aygıtın indüktif davranış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlara göre MPS tipi SBD'nin C-V eğrilerinde pozitif voltaj bölgesindeki NC davranışının, PPy arayüzey tabakası nedeniyle kaybolduğu gözlemlenmiştir. MPS tipi SBD'nin daha yüksek doğrultma oranına, daha düşük kaçak akım değerine ve daha az N_{ss} değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bütün bu deneysel sonuçlara göre N_{ss} 'lerin, R_s 'nin ve arayüzey PPy tabakasının, diyotların I-V, C-V ve G/ω -V karakteristiklerinde oldukça etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 20227
Anahtar : MS ve MPS tipi Schottky engel diyotları (SBD); Elektriksel
Kelimeler : karakteristikler; Arayüzey polimer tabaka; Negatif kapasitans;
Seri direnç; Arayüzey durumları.
Sayfa Adedi : 91
Danışman : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

THE COMPARISON OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SCHOTTKY
BARRIER DIODES WITH AND WITHOUT POLYMER INTERFACIAL LAYER

(Ph. D. Thesis)

Çiğdem BİLKAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2016

ABSTRACT

In this study, the effects of interface layer on electrical characteristics, the anomalous peak and the sources of negative capacitance behavior in positive voltage C-V curves were investigated. For this purpose, Cr/p-Si Schottky barrier diodes (SBDs) with and without Polypyrrole (PPy) polymer interfacial layer have been fabricated. Both the capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω -V) measurements of the Cr/p-Si (MS) and Cr/PPy/p-Si (MPS) SBDs have been investigated in the applied bias voltage range of (-4V)-(+4V) as function of frequency (10 kHz-5 MHz) and they have been compared in detail. The distribution of interface states (N_{ss}) which affects the electrical characteristics of the diodes and series resistance of the diodes (R_s) were obtained using Hill-Coleman and Nicollian and Brews methods, respectively. It is seen that the resulting C-V curves of the positive voltage (clutter) region showed anomalous peak and then for each frequency, they went to negative capacitance (NC). Compared to the reduction in C, conductance (G/ω) showed an increase and the device has showed inductive behavior. Experimental results also show that, in an interesting way, this negative capacitance (NC) behavior in the forward bias region disappears in the C-V plot of MPS type SBD due to the existence of PPy interlayer. As a result, MPS type SBD has a higher rectification rate with low reverse leakage current and N_{ss} when compared with the MS type SBD. All of these experimental results confirmed that the distribution of N_{ss} , R_s and Ppy interface layer has significantly improved the electrical characteristics of the diode.

Science Code : 20227

Key Words : MS ve MPS type Schottky barrier diodes (SBDs); Electrical characteristics; Interfacial polymer layer; Negative capacitance; Series resistance; Interface states.

Page Number : 91

Supervisor : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyuncaengin tecrübelerinden faydalandığım ve şahsıma olan desteğini esirgemeyen Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi saygıdeğer hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL’a teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmalarım boyunca tarafıma tahsis ettiği Doktora Bursu’ndan dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederim. Lisansüstü eğitim çalışmalarım boyunca tarafıma gerekli her türlü çalışma imkânı sağlayan Gazi Üniversitesi Fizik Bölüm Başkanlığına ve Çankırı Karatekin Üniversitesi Fizik Bölüm Başkanlığına çok teşekkür ederim. Hayatım boyunca maddi ve manevi destek olan aileme, değerli eşim Dr. Mustafa Tuğfan BİLKAN’a ve en değerli varlığım, canım kızım Firdevs BİLKAN’a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER	7
2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar	7
2.2. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Schottky Mott Teorisi.....	8
2.2.1. Metal /n tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar ($\Phi_m > \Phi_s$)	8
2.2.2. Metal /n tipi yarıiletken ohmik kontaklar ($\Phi_s > \Phi_m$).....	11
2.3. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları.....	13
2.3.1 Termoyonik emisyon (TE) teorisi.....	14
2.3.2. Difüzyon teorisi.....	17
2.3.3. Tünelleme (Alan emisyonu ve termoyonik-alan emisyonu).....	18
2.3.4. Tükenim bölgesi jenerasyon-rekombinasyonu	19
2.3.5. T_0 etkili akım iletimi	20
2.4. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojensizlikler	21
2.5. Metal-Yalıtkan/Polimer-Yarıiletken Schottky Diyotların Yapısı	25
2.6. Schottky engel diyotların kapasitansı.....	26

	Sayfa
2.7. İdeal MIS Yapı.....	27
2.7.1. Yığılım	30
2.7.2. Tükenim	30
2.7.3. Tersinim	30
2.8. Schottky Diyotlarda İdeal Durumdan Sapma Nedenleri	31
2.8.1. Hayali (Image)-kuvvet (Schottky) etkisi	31
2.8.2. Seri direnç etkisi	33
2.8.3. Tünelleme etkisi.....	34
2.8.4. Kenar etkileri	34
2.8.5. Arayüzey durumları (N_{ss}).....	35
3. DENEYSEL YÖNTEM	41
3.1. Silisyum Kristali.....	41
3.2. Polypyrrole (PPy).....	41
3.3. Termal Buharlaştırma Sistemi.....	43
3.4. Kristal Temizleme, MS ve MPS Yapılarının Hazırlanması.....	45
3.4.1. Akım-gerilim kaynağı	47
3.4.2. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçüm sistemi	48
3.4.3. Kriyostat ve sıcaklık kontrol sistemi.....	49
4. DENEYSEL SONUÇLAR	51
4.1. Cr/p-Si (MS) tipi SBD'un frekansa bağlı C-V karakteristikleri	51
4.2 Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ların karşılaştırılması	63
4.2.1. Akım-voltaj (I-V) karakteristiklerinin karşılaştırılması	63
4.2.2. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj karakteristikleri	68
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77

Sayfa

KAYNAKLAR 83

ÖZGEÇMİŞ 89



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve ohmik kontakların oluşumu.....	8
Çizelge 4.1. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD’lar için ln I-V verilerinden elde edilen bazı temel elektriksel parametreleri	65
Çizelge 4.2. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD’lar için sırasıyla negatif voltaj C^{-2} -V eğrisinden elde edilmiş bazı parametreler.	73



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal/n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda a) Kontak oluşmadan önceki metal ve yarı iletkenin enerji bant diyagramı, b) Kontak oluşuktan sonraki termal denge durumu, c) Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın pozitif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı, d) Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın negatif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı.....	9
Şekil 2.2. Metal/n tipi yarıiletken ohmik kontağın $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda, a) Kontak oluşmadan önceki metal ve yarıiletkenin enerji-bant diyagramı, b) Kontak oluşuktan sonraki termal denge durumu, c) Metal/n-tipi yarıiletken ohmik kontağın doğru öngerilim altındaki enerji-bant diyagramı, d) Metal/n-tipi yarıiletken ohmik kontağın ters öngerilim altındaki enerji bant diyagramı	12
Şekil 2.3. Metal/n-Si yarıiletkende pozitif voltaj uygulandığında oluşabilecek temel akım iletim mekanizmaları; (a) Potansiyel engelin tepesi üzerinden, metalin içersine doğru elektronların iletimi (TE), (b) Elektronların engel içinden doğrudan kuantum-mekaniksel tünellemeleri (engel içinde tünelleme), (c) Uzay yük bölgesinde yeniden birleşme, (d) Metalden yarıiletkene deşik enjeksiyonu	14
Şekil 2.4. a) FE ve b) TFE mekanizmalarının oluşumu.....	19
Şekil 2.5. Voltaja bağlı farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren $nkT/q-kT/q$ eğrisi.....	21
Şekil 2.6. Metal/yarıiletken arayüzeyinde homojen olmayan engel modeline göre şematik enerji bant diyagramı	23
Şekil 2.7. Homojen olmayan engel yüksekliğine sahip bir Schottky engel diyotunun V gerilimi altındaki iki boyutlu bant diyagramı.....	23
Şekil 2.8. Bir MS tipi SBD için homojen olmayan bir potansiyel engelinin üç boyutlu görünümü.....	24
Şekil 2.9. Bir MIS ya da MPS tipi SBD için yapının şematik diyagramı.....	26
Şekil 2.10. Bir metal/n-tipi yarıiletken SBD'un voltaja bağlı değişen enerji-bant diyagramı.....	27
Şekil 2.11. $V=0$ 'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı (n-tipi yarıiletken).....	28
Şekil 2.12. MIS kapasitansının eşdeğer devresi.....	29

Şekil	Sayfa
Şekil 2.13. $V \neq 0$ durumunda n tipi yarıiletken için ideal MIS yapının enerji-bant şeması. (a) Yığılım (b) Tükenim (c) Tersinim.....	31
Şekil 2.14. Sabit bir elektrik alanda hayali kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme.....	32
Şekil 2.15. Metal/yarıiletken kontaklarda seri direnç etkisi	34
Şekil 2.16. Metal/yarıiletken kontaklarda kenar etkisi	35
Şekil 2.17. İdeal olmayan MIS yapıda arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması	36
Şekil 2.18. MIS yapısının eşdeğer devresi a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için	38
Şekil 3.1. α ve α' konumlarındaki pyrrole halkalarından oluşan PPy'nin moleküler yapısı.	42
Şekil 3.2. Termal buharlaştırma sistemi şematik gösterimi	43
Şekil 3.3. (a) Ohmik kontak ve (b) Doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maskeler.....	46
Şekil 3.4. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ların gösterimi	46
Şekil 3.5. Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi	47
Şekil 4.1. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-5 MHz frekans aralığında ölçülen C-V karakteristikleri.	52
Şekil 4.2. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-5 MHz frekans aralığında ölçülen G/ω -V karakteristikleri.	52
Şekil 4.3. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında farklı voltajlarda C-lnf karakteristikleri.....	53
Şekil 4.4. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında farklı voltajlarda G/ω -lnf karakteristikleri.....	54
Şekil 4.5. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-5 MHz frekans aralığında R_i -V karakteristikleri.	55
Şekil 4.6. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında farklı voltajlarda R_i -f karakteristikleri.....	55
Şekil 4.7. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında düzeltilmiş Cc-V karakteristikleri.....	57

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında düzeltilmiş G_c/ω -V karakteristikleri.	57
Şekil 4.9. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında sırasıyla (a) 10 kHz, (b) 100 kHz, (c) 500 kHz , (d) 5 MHz, frekanslarda C-V ve G/ω -V karakteristikleri.....	59
Şekil 4.10. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında C-I ve G/ω -I karakteristikleri	61
Şekil 4.11. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için ara yüzey durumlarının yoğunluk dağılım profili (N_{ss} -f).	62
Şekil 4.12. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için pozitif ve negatif voltajlarda yarı logaritmik I-V eğrileri.....	64
Şekil 4.13. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için pozitif ve negatif voltajlarda yarı logaritmik R_i -V özellikleri.....	66
Şekil 4.14. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için arayüzey durumlarının (N_{ss}) enerji yoğunluk dağılımı.....	68
Şekil 4.15. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için (a) C-V ve (b) G/ω -V özellikleri	69
Şekil 4.16. (a) Cr/p-Si (MS) ve (b) Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için sırasıyla C-V ve G/ω -V özelliklerinin bir arada çizimi.	70
Şekil 4.17. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için sırasıyla C^{-2} -V özellikleri	73
Şekil 4.18. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için R_s -V özellikleri	74
Şekil 4.19. (a) Cr/p-Si (MS) ve (b) Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için sırasıyla düzeltilmiş C-V özellikleri.....	75
Şekil 4.20. (a) Cr/p-Si (MS) ve (b) Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için sırasıyla düzeltilmiş G/ω -V özellikleri.....	76

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Vaksis - PVD handy 4O termal organik buharlaştırma sistemi.....	44
Resim 3.2. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı.....	48
Resim 3.3. HP 4192 LF empedans analizörü.....	49
Resim 3.4. Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi (solda) ve Janis vpf-475 kriyostat.....	49



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

A	Alan
$\text{\AA}$	Angstrom
A^*	Etkin Richardson sabiti
C	Kapasitans/sığa
C_0	Boş kondansatörün sığası
C_{ox}	Yalıtkan tabakanın sığası
d_{ox}/d_i	Oksit/Yalıtkan tabakanın kalınlığı
ϵ_{ox}	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
C_{ex}	İlave yük kapasitansı
C_{sc}	Uzay yükü kapasitansı
C_{ss}	Arayüzey kapasitansı
C_m	Ölçülen kapasitans değeri
G_m/ω	Ölçülen iletkenlik değeri
C_c	Düzeltilmiş kapasitans değeri
G_c/ω	Düzeltilmiş iletkenlik değeri
E_v	Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
E_i	Saf durumdaki enerji seviyesi
E_0	Tünelleme etkin katsayısı
E_{00}	Tünelleme ihtimaliyetini temsil eden enerji
eV	Elektron volt
ϵ_0	Boşluğun elektrik geçirgenliği
ϵ_i	Arayüzey tabakanın dielektrik sabiti

Simgeler**Açıklama** ϵ_s

Yarıiletkenin dielektrik sabiti

 Hz

Frekans birimi (Hertz)

 $^{\circ}\text{K}$

Kelvin cinsinden sıcaklık

 k

Boltzmann sabiti

 m_e^*

Elektronun etkin kütlesi

 m_o

Serbest elektron kütlesi

 N_d

Verici katkı atomlarının yoğunluğu

 N_a

Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu

 N_C

İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu

 N_V

Valans bandındaki durumların yoğunluğu

 N_{ss}

Arayüzey durum yoğunluğu

 Q_{sc}

Uzay yükü

 q

Elektrik yükü

 R_i

Direnç

 R_s

Seri direnç

 R_{ss}

Arayüzey direnci

 R_{sh}

Kısa devre direnci

 T

Mutlak sıcaklık

 V

Gerilim

 V_D

Difüzyon potansiyeli

 V_F

Doğru ön-gerilim

 V_R

Ters ön-gerilim

 V_G

Doğrultucu metal kontağa uygulanan gerilim

 W_D

Tükenim tabakasının genişliği

 Y

Admittans

 Z

Empedans

 Φ_B

Potansiyel engel yüksekliği

 Φ_{Bo}

Sıfır voltaj potansiyel engel yüksekliği

 Φ_s

Yarıiletkenin iş fonksiyonu

 Φ_m

Metalin iş fonksiyonu

 Φ_e

Etkin engel yüksekliği

 V_{bi}

Kontak potansiyel farkı

Simgeler**E****Açıklama**

Elektrik alan

 $\Delta\Phi_B$

Engel düşmesi

 Φ_{ap}

Görünen engel yüksekliği

 Φ_n n- tipi bir yarıiletkenin E_C ile E_F enerji farkı **ψ_B** E_F ile E_i arasındaki enerji farkı **ψ_s**

Yüzey potansiyeli

 I_o

Doyum akımı

J

Akım yoğunluğu

 J_{sm}

Yarıiletkeniden metale doğru akım yoğunluğu

 J_{ms}

Metalden yarıiletkenine doğru akım yoğunluğu

 δ

Arayüzey tabaka kalınlığı

 Ω

Ohm

 ρ

Öz direnç

 χ_s

Yarıiletkenin elektron yakınlığı

n

İdealite faktörü

 n_{ap}

Görünen idealite faktörü

 ρ_2 ve ρ_3

Engel yüksekliğinin sıcaklık katsayıları

 σ_0

Standart sapma

 ω

Açısal frekans

v

Çizgisel hız

 μ

Mobilite

Kısaltmalar**Açıklama****AC**

Alternatif akım

DC

Doğru akım

C-V

Kapasitans-voltaj

FE

Alan emisyon

G/ ω -V

Kondüktans-voltaj

I-V

Akım-voltaj

LED

Işık yayan diyot

MESFET

Schottky engel tabakalı alan etkili transistör

Kısaltmalar**Açıklama**

MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOSFET	Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
MPS	Metal-Polimer-Yarıiletken
MS	Metal-Yarıiletken
NC	Negatif kapasitans
OLED	Organik ışıık yayan diyot
PPy	Polypyrrole
SBD	Schottky engel diyotu
TE	Termoiyonik Emisyon
TFE	Termoiyonik Alan Emisyon

1. GİRİŞ

Schottky engel diyotları (SBDs) temelde bir metal ve bir yarıiletkenin birbiri ile yüksek sıcaklık ve düşük basınç ortamında mümkün olan en az dirençle (idealde sıfır dirençle) sıkı kontak edilmesiyle oluşturulan elektronik aygıtlardır. Metal-yarıiletken (MS), Metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken (MIS/MPS) tipi SBDs, Güneş pilleri (SCs), fotodedektörler (PDs) ve alan etkili transistörler (FETs) gibi birçok elektronik aygıt elektronik/yarıiletken endüstrisinin temelini oluştururlar. MS tipi Schottky engel diyotların zamanla teknolojik gelişimi kısaca şöyle özetlenebilir: İlk olarak 1874’de Braun, doğrultma özelliğini keşfetmiştir [1-3]. 1906 yılında Pickard, silisyumu kullanarak metal-yarıiletken kristal dedektörler için patente layık görülmüştür. İkinci dünya savaşı sırasında ise nokta kontak ve doğrultucular mikrodalgalarda ve frekans dönüştürücülerinde kullanılmıştır. 1907’de Pierce, yarıiletken üzerine metal püskürtüldüğünde diyotların doğrultma özelliği gösterdiğini keşfetmiştir. 1920’li yıllarda radyo dalgalarının algılanmasında vakum tüpleri kullanılmıştır. Metal ve yarıiletken kontak edildiğinde zamanla metal ve yarıiletken arayüzeyinde oksitlenme dediğimiz arayüzey oluşur. Yarıiletken ve metalin ara yüzeyin oluşumundaki etkileri 1930’lu yıllarda incelenmeye başlandı. 1938’de Schottky ve Mott metal ile yarıiletkenin ara yüzeyinde oluşan potansiyel engeli ile ilgili teoriler üretmişlerdir [3]. Arayüzeyde meydana gelen bazı akım iletim mekanizmalarını daha iyileştirmek, metal ile yarıiletkeni birbirinden izole etmek ve yük geçişlerini düzenlemek amacı ile metal/yarıiletken (M/S) arayüzeyine yapay olarak inorganik ya da organik (polimer) yüzeyler büyütülebilir. Bütün yarıiletken aygıtların güvenilirliği ve kararlılığında ortaya çıkan problemlerin çoğu yüzey koşulları ile yakından alakalı olduğu için, MIS kapasitörler kullanılarak yüzey fiziğini anlamak aygıt uygulamalarında büyük önem taşımaktadır. MIS yapılar ilk olarak Moll ve Pfann ve Garrett tarafından voltaj kontrollü varistör (değişken kapasitör) olarak önerildi. Daha sonra karakteristik özellikleri Frankl ve Linder tarafından incelendi. İlk başarılı MIS yapısı 1960’larda Ligenza ve Spitzer tarafından Si yüzeyine termal olarak SiO₂ büyütülmesiyle oluşturuldu [3]. Yine SiO₂-Si üzerinde başka bir çalışma Terman, Lehovec ve Slobodskoy tarafından yapıldı [2].

Metal ile yarıiletken kontak edildiğinde metal/yarıiletken arayüzeyindeki yüklerin ayrışmasından dolayı bir potansiyel engeli oluşur. Oluşan bu engelin açıklanması için ilk detaylı çalışmalar Schottky ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [1]. Bu nedenle de MS diyotlar zaman zaman Schottky engel diyotları (SBD) olarak isimlendirilmiştir. Daha

sonra ise Schottky ve Mott engelin oluşum mekanizması ve bu engelin yüksekliğinin hesaplanması hakkında eş zamanlı olarak çeşitli modeller önermişlerdir [1-3]. Schottky-Mott teorisine göre, potansiyel engel metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları (Φ_m , Φ_s) arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Ancak daha sonraki çalışmalarda bu teorinin tümüyle doğru olmadığı kanıtlanmıştır. Çünkü bu teori metal/yarıiletken arayüzeyinde var olan bir tabakanın varlığını dikkate almamaktadır. Bu tabakanın kalınlığı ve kimyasal yapısı kontağın hazırlanma şartlarına göre değişmektedir. Bu tabaka çok ince bile olsa içinde bulunan iyonlar ve oluşacak arayüzey durumları yarıiletkene ait Fermi seviyesinin yasak enerji aralığındaki hareketini sınırlamaktadır. Yani Schottky-Mott teorisi yalnızca ideal durumlar için geçerli olmuştur. Daha sonra Cowley ve Sze'de arayüzey tabakası ile ilgili ilk çalışmaları gerçekleştirmişler ve farklı metaller için M/S arayüzeyinde oluşan engelleri incelemişlerdir [4]. Çalışmalar sonucunda metalden yarıiletkene doğru veya yarıiletkenden metale doğru görülen engel yüksekliğinin, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının yanısıra arayüzey tabakanın varlığına, arayüzey tabakasının kalınlığına, arayüzey tuzaklarının yoğunluğuna, sıcaklık ve uygulama voltajı gibi birçok nedene bağlı olduğunu görülmüştür.

Literatürde MS, MIS veya MPS yapılar ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen muhtemel akım-iletim mekanizmaları, M/S arayüzeyinde oluşan engelin biçimi, yapısal ve elektriksel özellikleri ile ilgili hala bilinmeyen ve iyileştirilmesi gereken özellikler bulunmaktadır. Bu nedenle de bu tip Schottky engel diyotlarının akım iletim mekanizmalarını özellikle geniş sıcaklık ve voltaj aralığında incelemek hala büyük ilgi uyandırmaktadır. Akım iletimi esnasında hangi akım iletim mekanizmasının baskın olacağını belirleyen birçok etken mevcuttur. Bunlardan bazıları; M/S arayüzeyinde oluşan engel yüksekliği, doğal ya da yapay arayüzey tabakası, yüzeyin hazırlama süreci, M/S arayüzeyinde yasak enerji aralığında oluşan arayüzey durumlarının enerji yoğunluğu dağılımı, yarıiletkenin katkı konsantrasyonudur [5].

Kapasitans (C) ve kondüktans (G/ω) karakteristikleri taşıyıcıların özellikle düşük frekanslarda dışardan uygulanan sinyali takip edebilme yeteneğine bağlı olarak değişebilir. Çünkü düşük frekanslarda azınlık taşıyıcıların (elektron ve holler) iletimi sinyal değişimiyle sürdürülür ve bu şekilde yüklerin geçmesi sağlanır. Diğer bir deyişle yüzey durumları ve tuzaklardaki yükler düşük frekansta dışardan uygulanan sinyali kolayca takip

edebilirler. Çünkü düşük frekanslarda tuzaklarda yüklerin durulma zamanı (τ) yani yaşama ömrü, uygulanan sinyalin bir periyodundan ($T=2\pi/\omega$) daha düşüktür ve bu durum ara yüzey durumlarının veya tuzaklardaki yüklerin ölçülen kapasitansta bir ilave kapasitans olarak eklenmesine yol açar. Diğer taraftan yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) yüzey durumları dışardan uygulanan sinyali takip edemez. Bu yüzden ölçülen kapasitansa ya da kondüktansa yüzey durumlarından kaynaklanan herhangi bir katkı olmaz. Bu nedenle de yüksek frekanslardaki C ve G değerleri yüzey durumlarından kaynaklanan etkileri içermez. Genellikle MIS diyotlarda küçük sinyal enerji kayıplarının iki önemli kaynağı vardır. Birincisi, N_{ss} ve tuzak seviyeleri, ikincisi ise diyotun seri direncidir (R_s).

Bu çalışmada R_s değerleri ile metal ve yarıiletken arasında oluşan N_{ss} 'lerin dağılım profili gibi durumları incelemek amacı ile Admittans yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem frekansa bağlı C-V ve G/ω -V ölçümleri kullanılarak yapılan bir elektriksel özellik inceleme yöntemidir. İdealde C-V ve G/ω -V değerleri frekanstan bağımsızdır ve artan pozitif uygulama voltajı ile artmaktadır. Ancak uygulamada durum özellikle düşük frekanslarda ($f < 500$ kHz) tükenim ve yığılma bölgelerinde ara yüzey durumlarındaki taşıyıcıların katkısı, arayüzeydeki yalıtkan veya polimer tabaka, N_{ss} ve R_s gibi nedenlerle idealden farklı olmaktadır. Bunlardan R_s sadece yığılma bölgesinde aktif olurken diğerleri hem tükenim hem de terslenim bölgesinde aktiftirler. R_s ve arayüzey tabaka nedeniyle, MS, MIS veya MPS yapılarında yarı logaritmik I-V eğrilerinde pozitif voltaj altında lineerlikten önemli ölçüde sapmalar olmaktadır. Benzer şekilde C-V ve G/ω -V karakteristiklerini de etkilediği için R_s bir diyotun elektriksel özelliklerin belirlenmesinde dikkate alınmalıdır.

Arayüzey tabaka oluşurken M/S arayüzeyinde yarıiletkenin enerji bant yapısını değiştiren, aygıtın performansını etkileyen safsızlıklar ve yapısal kusurlar meydana gelebilir. Bu nedenle MS kontaklarda metal ile yarıiletkeni birbirinden izole etmek, aralarındaki yük geçişlerini düzenlemek ve kaçak akımı azaltmak için geleneksel SiO_2 yerine daha yüksek dielektrikli Si_3N_4 , TiO_2 gibi tabakalar kullanılmaktadır. Ancak bu tabakaların oluşturulması hem zor hem de yüksek enerji gerektirir. Üstelik bu inorganik ince filmleri büyütmek hem pahalıdır hem de gelişmiş laboratuvar koşulları gerektirmektedir. Bunun için geleneksel yollarla büyütülmüş yalıtkan tabakaların yerine son zamanlarda rhodamine-101, poly(aniline), tetraamide-I, phenolsulfonphthalein, chitin, β -carotene, safranin T,

polyvinyl alcohol (PVA), P_2CIAn , PEDOT, polyindole ve perylene, polypyrrole vb gibi çeşitli organik (polimer) tabakalar tercih edilmektedir. Bu polimerlerden herhangi biri metal ve yarıiletken arayüzeyine yeleştirilirse MS tipi SBD artık MPS tipi SBD haline gelir. Polimerler sahip oldukları kimyasal ve fiziksel özellikler nedeniyle endüstriyel uygulamalarda oldukça dikkat çekmektedirler. Normalde zayıf bir iletken olmalarına rağmen uygun oranlarda metallerle katkıldıklarında iletkenlik özellikleri büyük ölçüde artmaktadır. Dolayısı ile ince bir organik tabakanın varlığı aygıt performansını artırmak için tercih edilebilmektedir. Polimerlerin ucuz ve kolay yollarla üretilebilebilmesi, inorganik materyallere göre daha iyi kontrol edilebilir akım iletim mekanizmaları gerçekleştirilmesi, sızıntı akımını azaltması, yüksek elektriksel iletkenlik sağlaması, sıcaklığa karşı kararlı ve dayanıklı olması organik tabakaları metal-yarıiletken kontak yapımında tercih edilen materyaller haline getirmiştir [6-26].

Bu çalışmada Cr/p-Si SBD'un performansını geliştirmek amacı ile arayüzey tabaka olarak polypyrrole (PPy) polimeri kullanılmıştır. Çünkü literatürde PPy polimerinin arayüzey tabaka olarak kullanımı konusunda bir açık bulunmaktadır.

Bu çalışmanın ilk amacı, Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10kHz-5MHz frekans aralığında pozitif voltajda C-V eğrilerinde oluşan NC ve anormal pik davranışını, R_s ve N_{ss} 'in pozitif ve negatif voltajda C-V ve G/ω -V eğrilerine etkisini araştırmaktır. İkinci amaç ise Cr/p-Si SBD üzerinde PPy arayüzey tabakasının etkisini araştırmak ve bunun için Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD üreterek oda sıcaklığında I-V, C-V ve G/ω -V ölçümleri kullanılarak iki diyot için karşılaştırma yapmaktır. Ayrıca C^{-2} -V eğrilerinden her bir frekans için Fermi eneji seviyesi (E_F), katkı atomlarının sayısı (N_a) ve etkin engel yüksekliği ($\Phi_B(C-V)$) ile R_s gibi temel elektriksel parametreleri frekansa bağlı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada üzerinde durulan önemli noktalardan bir diğeri de pozitif voltajda C-V eğrilerinde oluşan anormal (anomalous) pik diye isimlendirilen davranış ve negatif kapasitans davranışlardır. Son zamanlarda pozitif voltajda C-V eğrilerinde oluşan anormal pik hakkında çeşitli çalışmalar yapılmış, ancak aygıtlar için negatif kapasitansın fiziksel mekanizması hakkında herbir çalışmada farklı farklı yorumlar yapılmıştır [27-32]. Örneğin, yığılma bölgesinde böyle bir anormal pikin kaynağı Ho ve arkadaşları tarafından

metal ve yarıiletken arasında N_{ss} 'lerin varlığına atfedilmektedir [27]. Diğer taraftan Werner ve arkadaşları [28], Bati ve arkadaşları [29] ile Yücedağ ve arkadaşları [30], pozitif voltajda C-V eğrisindeki anormal pikin nedeninin R_s olduğunu söylemişlerdir. Werner ve arkadaşları anormal pik için ilave kapasitansının azınlık taşıyıcı katkısı ile açıklanabileceğini söylemişlerdir [28]. Wu ve Yang [31] ve Chattopadhyay ve arkadaşları [32] deneysel C-V eğrilerindeki anormal piklerin hem R_s hem de N_{ss} 'den kaynaklandığını söylemişlerdir.

NC davranışı için literatürdeki bazı çalışmalarda MS, MIS, MPS tipi Schottky engel diyotlarında, organik ışık yayan diyotlarda (OLED), ışık yayan diyotlarda (LED), heterojunctions'larda ve uzak kızılötesi dedektörlerde deneysel C-V eğrilerinde bir NC davranışı gözlemlenebileceğini ortaya koyulmuştur. C-V eğrilerinde yığılma bölgesinde NC'nin incelenmesi çok önemlidir çünkü bu durum uygulanan voltaj artarken elektrotlarda yüklerin sayısında bir azalma olduğunu gösterir. Diğer bir deyişle NC davranışı malzemenin indüktif (indükleyici) davranış sergilediğini gösterir [25,33]. Butcher ve arkadaşlarına [34] ve Huang ve arkadaşlarına [35] göre deneysel NC ölçümleri bazen tamamen parazit indüktans [27] ya da zayıf deney ölçüm kalibrasyonu [32] gibi deneysel problemlere de atfedilebilir. Farklı aygıtlarda NC'nin fiziksel mekanizması farklı olabilir ve bunun anlamı malzemenin indüktif davranış göstermesidir. Champless ve arkadaşlarına göre [36], NC davranışı pozitif voltajda azınlık taşıyıcıların ilavesi etkisiyle oluşmaktadır. Diğer taraftan NC'nin teorik değerlendirmeleri onun aygıtta sadece elektrostatik yüklerin yer değiştirmesinden kaynaklandığını söylemektedir [37]. Yük taşıyıcılarının enjeksiyonuna, yerleşmiş ara yüzey durumlarının neden olduğuna inanılmasına rağmen, fiziksel mekanizması henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Bize göre NC'nin üç kaynağı vardır: Bunlar, yarıiletkende azınlık taşıyıcıların yüksek oranda hareketi, iyonizasyon süreci etkisi nedeniyle metal ve yarıiletken arasına yerleşmiş olan ara yüzey yükleri ile arayüzey durumlarının azalması ve R_s 'dir.

Bu çalışmada, Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ların üretilmesinden sonra Cr/p-Si Schottky engel diyotunun pozitif ve negatif voltaj C-V ve G/ω -V karakteristikleri 10 kHz-5 MHz frekans aralığında ve (-4V)-(+4V) voltaj aralığında N_{ss} ve R_s etkisi dikkate alınarak incelenmiştir. R_s , N_{ss} ve PPy arayüzey tabakasının elektriksel özellikler üzerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Literatürde yapılan diğer çalışmalara ilave niteliğinde olabilecek katkılar sağlanmıştır. Öncelikle fiziksel mekanizması ve kaynağı henüz tam

olarak belirlenmemiş ve çoğu zaman açıklanamadığı için yok kabul edilen NC davranışı hakkında önemli gelişmeler elde edilmiştir. Kaynağının bir değil birden fazla etkene bağlı olduğu tespit edilmiştir. Frekansa bağlı olarak yapının temel elektriksel parametreleri I-V, C-V, G/ω -V ölçümlerinden elde edilerek, metal ile yarıiletken arasında büyütülen PPy tabakasının, seri direncin ve arayüzey durumlarının bu temel elektriksel parametreler üzerine etkisi hesaplama ve grafik yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Diğer taraftan Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ların I-V eğrileri ve 1MHz frekansta C-V ve G/ω -V eğrileri çizilerek karşılaştırılması yapılmıştır. Polimerlerin, diyotların elektriksel özellikleri üzerine olumlu etkisi, daha önce hakkında çok az çalışma yapılmış olan yeni bir polimer (PPy polimeri) kullanılarak bir kez daha doğrulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada diyotun elektriksel özelliklerini iyileştirmesi amacıyla kullanılan PPy arayüzey polimer tabakasının diyotta oluşan NC davranışını ortadan kaldırdığı tespit edilmiştir. Yani yarıiletkende azınlık taşıyıcıların yüksek oranda hareketi, iyonizasyon süreci etkisi nedeniyle metal ve yarıiletken arasına yerleşmiş olan ara yüzey yükleri ile arayüzey durumlarının azalması ve R_s , gibi nedenlerle oluştuğunu düşündüğümüz NC davranışı PPy arayüzey polimer tabaka kullanımı sonucunda yok olmuştur. Bu da PPy arayüzey tabakasının diyotun performansını geliştirir.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde Schottky diyotların tarihsel gelişimi hakkında genel bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, bu yapılarla ilgili gerekli mevcut teorik bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ların hazırlanması aşama aşama anlatılmış ve ölçümler için kullanılan deneysel sistemler tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde elde edilen deneysel sonuçlarla ilgili grafikler ve çizelgeler oluşturulmuş ve mevcut literatürle kıyaslanarak yorumlanmıştır. Son bölümde ise deneysel I-V, C-V ve G/ω -V karakteristikleri ile ilgili elde edilen mevcut deneysel ve teorik çalışmalarla kıyaslamalı olarak yorumlanmış ve bu konuda bundan sonra yapılabilecek çalışmalarla ilgili bazı öneriler sıralanmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar

MS diyotların elektriksel özelliklerinin anlaşılabilmesi için yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi gerekir. MS kontakların iletkenlik özelliklerinin incelenebilmesi uygun kontakların uygulanması ile mümkündür. Yarıiletken ile kontak yapılacak metal veya alaşımın mümkün olduğu kadar düşük bir dirençle atomik boyutta temas etmesi gerekmektedir. Oluşturulan kontağın özelliklerinin ideale yakın olabilmesi için, kontak malzemelerinin yüzeyleri mümkün olduğu kadar temiz ve pürüzsüz olmalıdır. [5]. Diyodun doğrultma özelliğinin iyi olabilmesi için kullanılan saf metallerin en uygun olanı seçilmelidir. Bir metal ile yarıiletken kontak edildiğinde, termal denge kuruluncaya kadar metal ile yarıiletken arasında yük geçişleri (difüzyon) meydana gelir. Metal ile yarıiletkenin E_F seviyeleri eşitleninceye kadar her iki yöne doğru yük alışverişi gerçekleşir. [16] Bir yarıiletkenin özelliklerini anlatmak için aşağıdaki gibi ifadelerden yararlanılmaktadır:

Fermi Enerjisi (E_F): İletkenlerde, mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0\text{ K}^0$), elektronlar tarafından taban durumundan itibaren işgal edilen en yüksekteki dolu seviyenin enerjisine denir. Yarıiletkenlerde ise iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak, yasak enerji bölgesinde yer alan izafî seviye olarak tanımlanır. Fermi enerjisi n tipi yarıiletkenlerde iletim bandından itibaren ölçülürken, p tipinde valans bandından itibaren ölçülür.

Vakum seviyesi: Bir metalin tam dışındaki kinetik enerjisi sıfır olan bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu tamamen serbest hale getirebilmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

İş fonksiyonu (Φ): Bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır. Fermi enerjisi katkılanan madde atomlarının yoğunluğu ile değiştiğinden iş fonksiyonu da değişken bir niceliktir.

Elektron ilgisi (χ): Vakum seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki enerji farkıdır [6].

Bir metal ile yarıiletken kontak edildiklerinde Schottky-Mott modeline göre oluşan kontak türünün (ohmik veya doğrultucu) hangisi olacağı seçilen metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ve yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki duruma göre belirlenir.

Çizelge 2.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve ohmik kontakların oluşumu

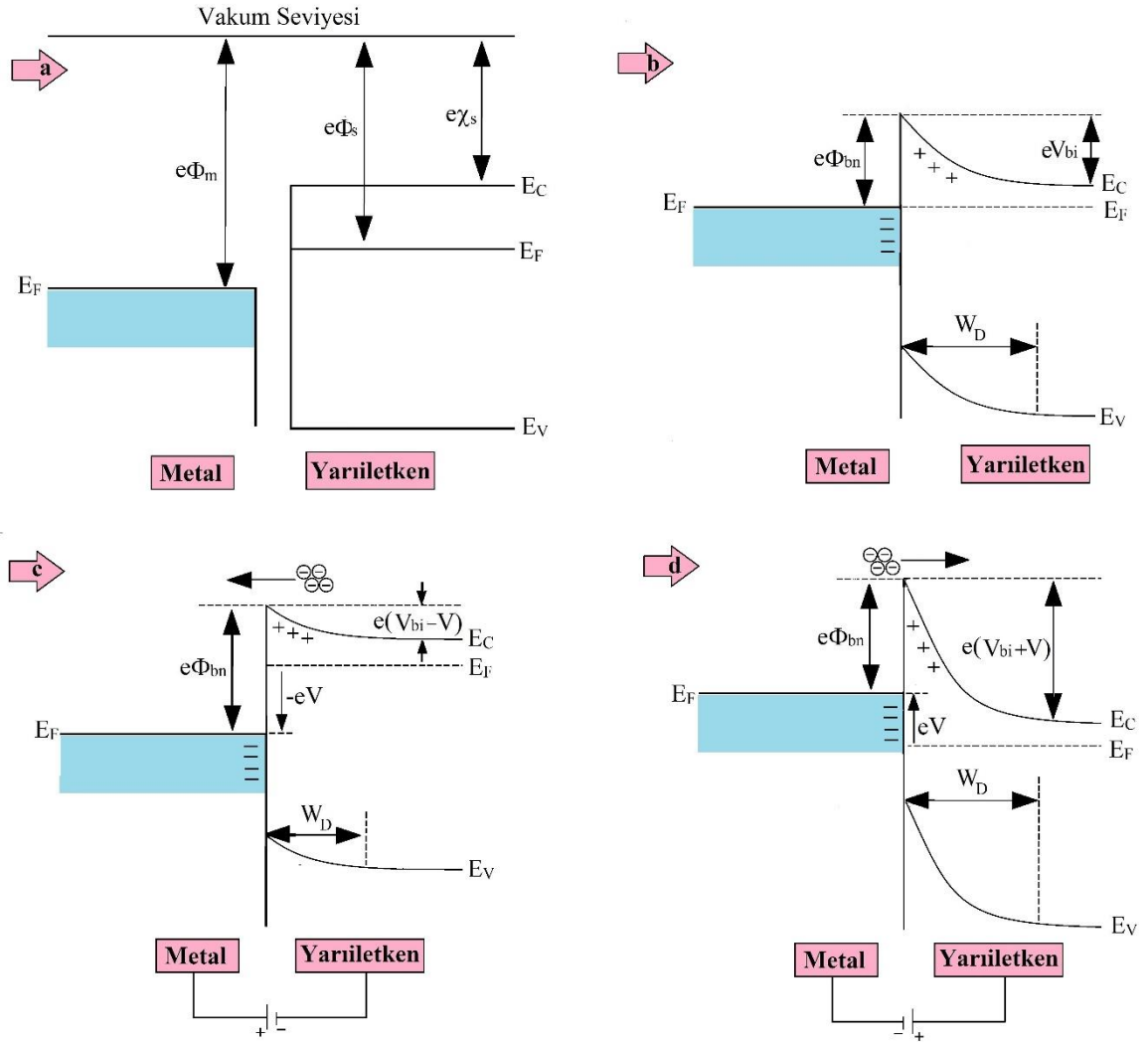
İş fonksiyonlarının durumu	Yarıiletken türü	Kontak türü
$\Phi_m > \Phi_s$	n-tipi	Doğrultucu
$\Phi_m < \Phi_s$	n-tipi	Ohmik
$\Phi_m > \Phi_s$	p-tipi	Ohmik
$\Phi_m < \Phi_s$	p-tipi	Doğrultucu

2.2. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Schottky Mott Teorisi

2.2.1. Metal /n tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar ($\Phi_m > \Phi_s$)

Metal ile yarıiletken kontak edildiğinde, Schottky-Mott teorisine göre, metal ile yarıiletken ara yüzeyinde yüklerin ayrılmasından dolayı metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanan bir potansiyel engeli meydana gelir. Başlangıçta ayırık durumda olan ve $\Phi_m > \Phi_s$ şartını sağlayan metal ile yarıiletken (Şekil 2.1 (a)) kontak edildiğinde, iki malzeme içinde ortak bir termodinamik denge durumu oluşuncaya kadar iş fonksiyonu küçük olandan iş fonksiyonu büyük olana doğru yani yarıiletkenden metale doğru bir elektron geçişi olur. Yarıiletken sınırının yanındaki bölgede elektronların geçişi nedeniyle serbest elektron yoğunluğunda bir azalma meydana gelir. Termodinamik dengedeki E_F değeri, yarıiletken boyunca sabit kalacağı için iletkenlik bandı ve onunla beraber valans bandı eğilir (Şekil 2.1 (b)). Yarıiletkenden metale geçen elektronlar arkalarında pozitif yükler (holler) bırakırlar. Bu pozitif yükler bir W_D (tükenim tabakasının kalınlığı) kalınlığına kadar yayılarak burada bir pozitif yük bölgesi oluştururlar. Metale geçen elektronların oluşturduğu elektronlar ise, metal tarafında ince bir negatif bölge oluştururlar. Negatif ve pozitif yüklerden oluşan bir tabaka meydana gelir ve bu tabaka arayüzeyden Thomas-Fermi film mesafesi kadar ($\approx 0,5\text{\AA}$) uzakta oluşur. Oluşan pozitif ve negatif yük bölgeleri arasında bir iç elektrik alan oluşur. Bu alanın yönü pozitif bölgeden negatif bölgeye yani yarıiletkenden metale doğrudur. Şekil 2.1 (b)'de gösterilen enerji-bant

yapısında, yarıiletkenin yasak enerji aralığı (E_g), metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ve yarıiletkenin elektron ilgisi (χ_s) değerleri kontak yapıldıktan sonra sabit kalmaktadır. E_g sabit kalacağı için valans (E_V) ve iletkenlik (E_C) bantları birbirlerine paralel olarak hareket ederler. Ayrıca χ_s sabit kalacağından sürekliliği korumak amacıyla geçiş bölgesinde yarı iletkendeki vakum seviyesi de aşamalı olarak metaldeki vakum seviyesine yaklaşır. Bütün seviyelerin bükülme miktarı iş fonksiyonları arasındaki fark kadardır.



Şekil 2.1. Metal/n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda a) Kontak oluşmadan önceki metal ve yarı iletkenin enerji bant diyagramı, b) Kontak oluşuktan sonraki termal denge durumu, c) Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın pozitif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı, d) Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın negatif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı.

$$qV_{bi} = (\Phi_m - \Phi_s) \quad (2.1)$$

Burada V_{bi} kontak potansiyel farkıdır. qV_{bi} yarı iletken den metale geçebilmek için elektronların sahip olması gereken enerji yani potansiyel engelidir. Ancak yarıiletken tarafından görülen engel yüksekliği ile metal tarafından görülen engel yüksekliği birbirinden farklıdır ve aşağıdaki gibi verilir;

$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \quad (2.2)$$

$\Phi_s = \chi_s + \Phi_n$ ve $\Phi_m = qV_{bi} + \Phi_s$ ifadelerine göre yeniden düzenlenirse engel yüksekliği için aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \quad (2.3)$$

Burada; $\Phi_n = (E_C - E_F)$, $q = e$ elektronik yüküdür. Eş. 2.1 Schottky tarafından ifade edilmiştir ve Schottky yaklaşımı olarak bilinir. Φ_B potansiyeli kT/q değerinden büyüktür ve iletkenlik bant elektronlarının çok az bir kısmı bu engeli aşabilecek kadar enerjiye sahiptirler. Sahip olan elektronlar yarıiletken den metale akarak akıma neden olurlar. Bu akım termal denge durumuna gelinceye kadar akmaya devam eder. Yarıiletkenin uzay yükü bölgesi yüksek dirençli, yalıtkan, çok az hareketli taşıyıcı içeren bir tükenim tabakası haline gelmeye başlar. Termal denge durumunda oluşan bu akım metalden yarıiletkene doğru akan ve eşit büyüklükteki akım ile dengelenir. Net akım sıfır olur. Yarıiletkenin tükenim bölgesinin direnci metal ve yarıiletkenin nötr kısımlarının direncine göre çok büyüktür dolayısıyla iletkenliği azdır. Neredeyse uygulanan pozitif veya negatif voltajın tamamına yakını bu bölgeye düşer ve denge durumundaki enerji-bant yapısında değişikliğe neden olur. Diyota pozitif voltaj (V_F) uygulandığı zaman yani Şekil 2.1 (c)'de gösterildiği gibi bataryanın pozitif tarafı metale negatif tarafı da yarıiletkene bağlandığında denge durumunda oluşan iç elektrik alana zıt yönde bir alan oluşur ve bunun etkisiyle tükenim tabakasının genişliği azalır. E_F uygulanan voltaj kadar yukarı çıkar ve yarıiletken tarafından görülen engel yüksekliği V_{bi} 'den $(V_{bi} - V_F)$ 'ye düşer. Metalden yarıiletkene doğru olan akımda bir değişiklik olmazken yarıiletken den metal tarafına geçen elektron sayısında

dolayısıyla akımda artış olur. Yarıiletkenden metale doğru V potansiyeliyle üstel olarak artan net bir I_{net} akımı oluşur ve aşağıdaki gibi verilir;

$$I_{net} = I_o \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.4a)$$

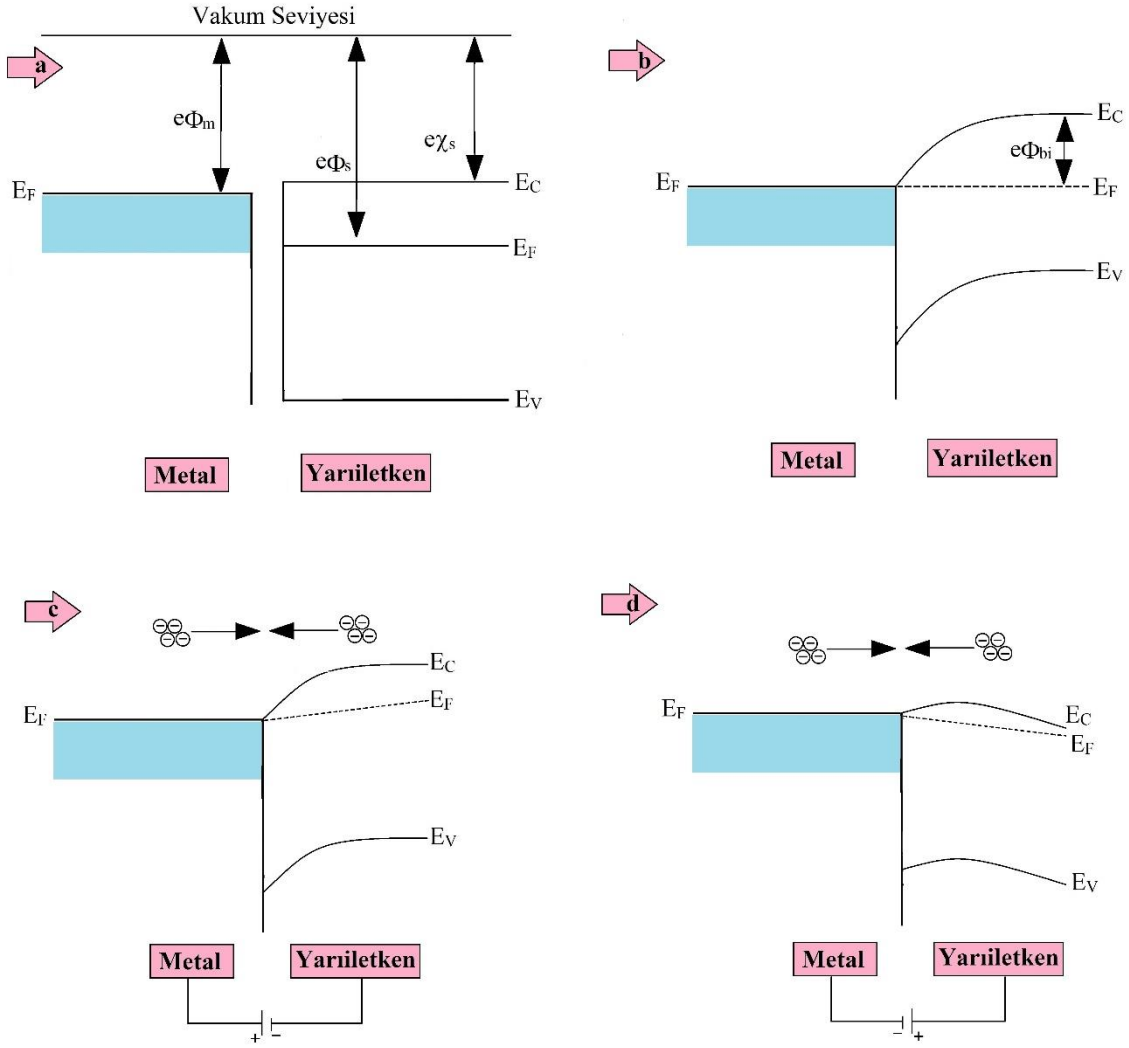
Burada k Boltzman sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık, I_o diyotun doyma akımı olup aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$I_o = AA^* \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \quad (2.4b)$$

Eşitlikteki A diyotun alanı, A^* etkin Richardson sabiti ve Φ_{Bo} M/S arasında oluşan sıfır beslem engel yüksekliğidir. Diyota negatif voltaj (V_R) uygulandığı zaman yani Şekil 2.1 (d)'de gösterildiği gibi bataryanın pozitif tarafı yarıiletkene negatif tarafı da metale bağlandığında denge durumunda oluşan iç elektrik alan ile aynı yönde bir alan oluşur ve bunun etkisiyle tükenim tabakasının genişliği artar. E_F uygulanan voltaj kadar aşağı iner ve yarıiletken tarafından görülen engel yüksekliği V_{bi} 'den $(V_{bi}+V_R)$ 'ye çıkar. Metalden yarıiletkene doğru olan akımda bir değişiklik olmazken yarıiletkenden metal tarafına geçen elektron sayısında dolayısıyla akımda azalma olur. Metalden yarıiletkene doğru küçük bir sızıntı akımı oluşur ve böylece metal-yarıiletken doğrultucu kontak özelliği gözlenmiş olur [2, 38]

2.2.2. Metal /n tipi yarıiletken ohmik kontaklar ($\Phi_s > \Phi_m$)

Metal ve yarıiletken kontak edildiğinde eğer yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan büyük ise ($\Phi_s > \Phi_m$) oluşan kontak türü ohmik kontak türüdür. Yani termal denge durumundan sonra dışardan uygulanacak pozitif ya da negatif voltaj fark etmeden her durumda akım iletimine neden olacaktır. Yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalinkinden büyük olduğu durum için metal-n tipi yarıiletkenin kontak oluşmadan önceki enerji-bant diyagramı Şekil 2.2 (a)'da gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Metal/n tipi yarıiletken ohmik kontağın $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda, a) Kontak oluşmadan önceki metal ve yarıiletkenin enerji-bant diyagramı, b) Kontak oluşuktan sonraki termal denge durumu, c) Metal/n-tipi yarıiletken ohmik kontağın doğru öngerilim altındaki enerji-bant diyagramı, d) Metal/n-tipi yarıiletken ohmik kontağın ters öngerilim altındaki enerji bant diyagramı

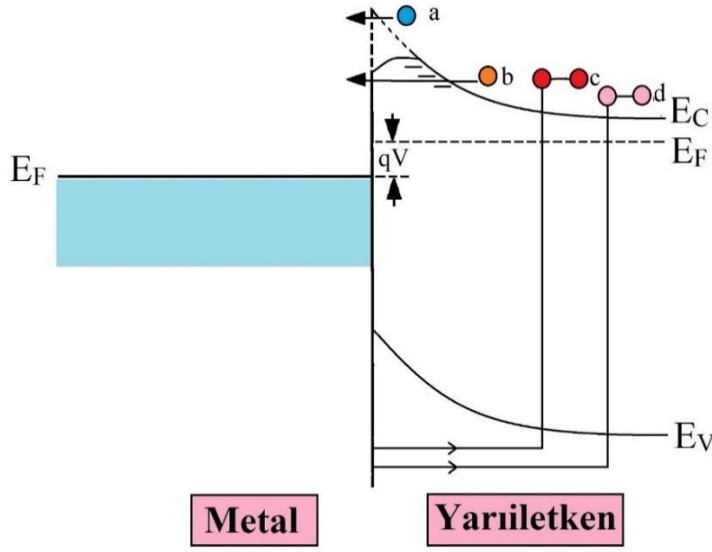
Eklem oluşuktan sonra, termal dengeye ulaşınca kadar, elektronlar metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına geçer ve geride metalde pozitif yükler bırakırlar. Denge sağlandığında yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 2.2 (b)'de görüldüğü gibi, $\Phi_s - \Phi_m$ değeri kadar yukarı yönelir. Metaldeki elektron yoğunluğu çok fazla olduğu için, metaldeki pozitif yükler metal-yarıiletken ara yüzeyinde yüzey yük tabakası oluştururlar. Yarıiletkende tükenim bölgesi oluşmaz. Bu nedenle yarıiletkenden metale ya da metalden yarıiletkene geçen elektronlar için herhangi bir potansiyel engeli söz konusu değildir. Elektron yoğunluğu ara yüzey kenarında artar ve sistemin en büyük öz direnci yarıiletkenin yapısından kaynaklanır. Şekil 2.2 (c) ve Şekil 2.2 (d)' de görüldüğü gibi, uygulanacak

pozitif ya da negatif voltaj, her iki durumda da eklem boyunca akım oluşmasına neden olur. Akım, eklem direnci ile belirlenir ve uygulanan gerilimin yönünden bağımsızdır. Yani ohmik kontak özelliği gösterir [6].

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

Termal denge durumunda bir metal-yarıiletken kontağa voltaj uygulandığında yükler hareket etmeye başlar ve yük taşıyıcıları metal ile yarıiletken arasındaki potansiyel engeli ile karşılaştıklarında ya engeli aşarak akım oluştururlar, ya engel boyunca tünelleme yaparlar ya da yeniden birleşmek suretiyle daha farklı akım iletim mekanizmaları gerçekleştirebilirler. Oluşan bu mekanizmalar diyotun seri direnci, M/S arasyüzeyindeki tabaka, uygulama voltajının yönü, sıcaklık, yarıiletkenin tipi gibi faktörlerden oldukça etkilenmektedir. Metal ile yarıiletken arasında bir akım iletiminden bahsedildiğinde aslında birçok mekanizma bir arada gerçekleşmektedir. Bu durumda baskın olan akım iletim mekanizmasından bahsetmek ve diğerlerini ihmal etmek doğru bir yaklaşım olacaktır. Elektronlar potansiyel engeli ile karşılaştıklarında oluşma ihtimali olan başlıca akım iletim mekanizmaları Şekil 2.3 ile verilmiştir.

Schottky engel diyotlarında oluşma ihtimali en yüksek olan akım iletim mekanizması elektronların engeli aşmak için yeterli termal enerjiyi kazandıklarında potansiyel engeli üzerinden atlamalarıdır yani termoiyonik emisyon (TE) mekanizmasıdır. Bu mekanizma, Schottky engel yüksekliğini elde edebilmek için kullanılan geleneksel bir modeldir. Bunun dışında oluşabilecek diğer mekanizmalar: termoiyonik alan emisyonunu (TFE), alan emisyonu (FE) ve engel boyunca tünelleme, difüzyon teorisi, deplasyon bölgesinde rekombinasyon ve jenerasyon mekanizmalarıdır (Şekil 2.3) [2].



Şekil 2.3. Metal/n-Si yarıiletkende pozitif voltaj uygulandığında oluşabilecek temel akım iletim mekanizmaları; (a) Potansiyel engelin tepesi üzerinden, metalin içersine doğru elektronların iletimi (TE), (b) Elektronların engel içinden doğrudan kuantum-mekaniksel tünellemeleri (engel içinde tünelleme), (c) Uzak yük bölgesinde yeniden birleşme, (d) Metalden yarıiletkeneye deşik enjeksiyonu

2.3.1. Termoyonik emisyon (TE) teorisi

Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletim mekanizmaları ilk Bethe tarafından ortaya atılmış ve daha ayrıntılı olarak da Crowell ve Sze tarafından incelenmiştir [2]. Metal-yarıiletken kontaklarda termoyonik emisyon mekanizması, taşıyıcıların (elektron veya hollerin) çeşitli etkilerle termal denge durumundan sonra oluşan potansiyel engelini (Φ_B) aşabilecek kadar enerji kazandıklarında engeli aşarak yarıiletkenenden metale veya metalden yarıiletkeneye geçmesi durumudur. Bilindiği gibi Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcılar tarafından sağlanır. Bu çoğunluk taşıyıcılar metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlar için elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken Schottky diyotlar için ise hollerdir. Termal denge durumunun bozulmaması ve TE mekanizmasına Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi için potansiyel engelini kT/q enerjisinden daha büyük olduğu, geçiş bölgesinde taşıyıcı çarpışmalarının minimum olduğu yani taşıyıcıların ortalama serbest yollarının geçiş bölgesinin kalınlığından büyük olduğu ve akımın hayali (image) kuvvetlerin etkisinden çok fazla etkilenmediği farzedilmektedir [2,4].

J_{sm} akım yoğunluğu, +x yönünde ve potansiyel engelini aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$J_{sm} = \int_{E_F + q\Phi_B}^{\infty} q \mathcal{G}_x dn_x \quad (2.5)$$

Burada $(E_F + q\Phi_B)$ TE için gerekli minimum enerji, $\mathcal{G}_x$ taşınma yönündeki kontak yüzeyine dik doğrultuda elektronların x yönündeki hız bileşenidir, yarıiletken yapıda hızları $\mathcal{G}_x$ ile $(\mathcal{G}_x + \Delta \mathcal{G}_x)$ arasında olan elektronların yoğunluk ifadesi aşağıdaki gibi verilir;

$$dn_x = N_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{m_n^* \mathcal{G}_x^2}{2kT} \right) d\mathcal{G}_x \quad (2.6)$$

Burada N_d yarıiletkendeki katkı atomlarının yoğunluğu, m_n^* elektronun etkin kütlesi, k Boltzman sabiti ve T ise Kelvin cinsinden mutlak sıcaklıktır. Yarıiletkenden metale doğru olan J_{sm} akım yoğunluğu, $\frac{1}{2} m_n^* \mathcal{G}_x^2 \rangle eV_D$ şartını sağlayan elektronlar için aşağıdaki gibi verilir;

$$\begin{aligned} J_{sm} &= \int_{\mathcal{G}_{0x}}^{\infty} q \mathcal{G}_x dn_x = \int_{\mathcal{G}_{0x}}^{\infty} q N_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \mathcal{G}_x \exp \left(-\frac{m_n^* \mathcal{G}_x^2}{2kT} \right) d\mathcal{G}_x \\ &= q N_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{m_n^* \mathcal{G}_x^2}{2kT} \right) = q N_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{qV_D}{kT} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Burada V_D difüzyon potansiyelidir. Metal tarafından görülen potansiyel engel yüksekliği ve elektronlar için etkin Richardson sabiti A^* aşağıda verildiği gibidir;

$$q\Phi_{Bn} = qV_D + E_F \quad (2.8)$$

$$A^* = \frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.9)$$

Buna göre bu değerler cinsinden yarıiletkenden metale olan akım yoğunluğu ifadesi için aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.10)$$

Metal n-tipi yarıiletken Schottky kontağına pozitif voltaj uygulandığında engel yüksekliği azalacağı için akım yoğunluğu değeri $\exp(eV/kT)$ çarpanıyla orantılı olacak şekilde artar ve yarıiletkendeki metale doğru akım yoğunluğu J_{sm} için aşağıdaki ifade elde edilir;

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.11)$$

Termal denge durumunda, her iki yönde akım yoğunlukları eşittir ve toplam akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

olur. Burada $J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right)$ ifadesi sızıntı akımı olarak bilinen ters doyma akım yoğunluğudur [1].

Schottky etkisi, uygulanan gerilim vedeşikler ile elektronlar arasındaki elektrostatik etkileşmeden dolayı engel yüksekliğinde $q(\Delta\Phi_{Bn})$ kadar engel alçalması meydana gelir. Bu engel alçalması;

$$q(\Delta\Phi_{Bn}) = \alpha_o (V_D + V)^{1/4} \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Dolayısıyla J_n ifadesinde $q\Phi_{Bn}$ 'nin yerine $(\Phi_{Bn} - \Delta\Phi_{Bn})$ 'nin ifadesi yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir;

$$J_o = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\alpha_o (V_D + V)^{1/4}\right) \quad (2.14)$$

Görüldüğü gibi akım yoğunluğu gerilime bağlıdır. Burada Φ_{Bn} sıfır beslemde ve Schottky etkisinin olmadığı durumdaki engel yüksekliğidir ve α_0 sabiti aşağıdaki gibidir;

$$\alpha_0 = \left\{ \frac{q^4 N_d}{8(\epsilon_s \epsilon_0)^3 \pi^2} \right\}^{1/4} \quad (2.15)$$

Burada ϵ_s ve ϵ_0 yarıiletkenin ve boşluğun dielektrik sabitleridir [5].

2.3.2. Difüzyon teorisi

Aralarında yoğunluk farkı olan iki bölge arasında, çok yoğun bölgeden az yoğun bölgeye doğru yük geçişi gerçekleşir. Bu olaya difüzyon adı verilir. Bu teori ilk defa Schottky tarafından ileri sürülmüştür [3]. Bu teori ileri sürülürken, $x=0$ ve $x=W$ deki taşıyıcı yoğunluğu termal denge değerlerine sahip olup akımdan etkilenmez, potansiyel engel yüksekliği kT/q enerjisinden daha büyüktür, akım difüzyon ve sürüklenme ile sınırlanmıştır, tükenim bölgesindeki elektronların çarpışma ihtimalleri dahil edilmiştir ve yarıiletkenindeki safsızlık yoğunluğu dejenere değildir yani katkı atomların yoğunluğu değişmez şeklinde bazı varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımlardan yola çıkarak tükenim tabakasındaki akımın metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğu dikkate alınarak aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$J_x = J_n = q \left[n(x) \mu_n E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] = q D_n \left[\left(-\frac{qn(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.16)$$

Burada D_n elektron difüzyon sabiti, $E(x)$ Tükenim bölgesinin elektrik alanı, μ_n taşıyıcı hareketliliği (mobilité) ve $n(x)$ herhangi bir x noktasında taşıyıcı yoğunluğudur.

Buna göre difüzyon teorisine göre akım yoğunluğu aşağıdaki gibi verilir;

$$J = J_{SD} \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

Burada J_{SD} doyum akım yoğunluğu olup aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$J_{SD} = \left(\frac{q^2 N_c D_n}{kT} \right) \left[\frac{q(V_d - V) 2N_D}{\varepsilon_s} \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.18)$$

Burada N_c iletkenlik bandında taşıyıcı yoğunluğu, ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. Difüzyon teorisinin voltaja bağlılığı daha fazladır ancak sıcaklığa bağlılığı TE teorisine nazaran daha azdır. Yukarıdaki bağıntılarda D_n yerine D_p , $n(x)$ yerine $p(x)$, N_c yerine N_v , N_D yerine de N_A yazılırsa benzer işlemler metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için de geçerli olur.

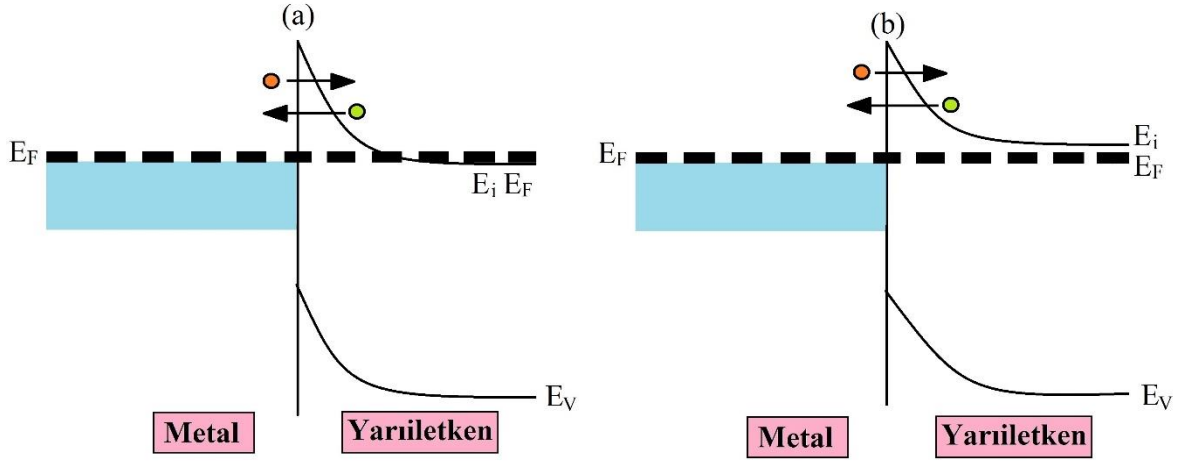
2.3.3. Tünelleme (Alan emisyonu (FE) ve termoiyonik-alan emisyonu (TFE))

Metal-yarıiletken kontaklarda potansiyel engeli ile karşılaşan elektronlar potansiyel engelinin ince olduğu yani tükenim tabakasının genişliğinin, az olduğu durumlarda engel üzerinden atlamaya gerek kalmadan direk engel içinden tünelleme yoluyla metal tarafına geçebilirler [1]. Bu tünelleme mekanizması Padovani tarafından açıklanmıştır. Ona göre tünelleme iki şekilde gerçekleşir. Birincisi, alan FE diye adlandırılan elektronun yarıiletkenin Fermi seviyesinden direk metale doğru geçmesidir. İkincisi de TFE denilen yüksek enerjilere uyarılabilecek ve dar üçgen potansiyel boyunca tünellenebilecek olan elektronların termal enerjisi yardımıyla akıma katkıda bulunmasıdır. Doğrudan tünelleme ve FE'nin gerçekleşmesi yarıiletkenin aşırı katkılı olduğu durumlarda Şekil 2.4'de gösterildiği gibi Fermi enerji seviyesinin iletkenlik bandı ile çakışması durumlarında daha çok ortaya çıkmaktadır. Termoiyonik alan emisyonu mekanizması aşağıda ayrıntılı olarak incelenecektir. Alan emisyonu ve termoiyonik alan emisyon için akım aşağıda verildiği gibidir;

$$I = I_o \exp\left(-\frac{qV}{E_o}\right) \quad (2.19)$$

Bu ifadedeki $E_o = E_{oo} \coth\left(\frac{qE_{oo}}{kT}\right)$ ve $E_{oo} = \frac{\hbar}{2} \left(\frac{N_d}{m^* \varepsilon_s} \right)^{1/2}$ şeklinde verilmektedir. Burada m^* elektron etkin kütlesi, ε_s dielektrik sabiti, N_d taşıyıcı yoğunluğudur E_{oo} tünelleme olasılığını temsil eden karakteristik enerjidir ve E_{oo} aynı zamanda tükenim tabakası kenarında iletkenlik bandının tabanıyla çakışık enerjili bir elektron için karşı tarafa geçme

ihtimaliyetinin $1/e'$ ye karşılık gelen Schottky engelini difüzyon potansiyelidir. kT/qE_{oo} ifadesi bize akım iletim mekanizması hakkında bilgi verir. $kT \ll qE_{oo}$ ise alan emisyonu (FE), $kT \sim qE_{oo}$ ise termoiyonik alan emisyon (TFE) ve $kT \gg qE_{oo}$ ise termoiyonik emisyon (TE) mekanizmalarının olma ihtimali daha yüksektir [1].



Şekil 2.4. a) FE ve b) TFE mekanizmalarının oluşumu [39]

2.3.4. Tükenim bölgesi jenerasyon-rekombinasyonu

Tükenim bölgesinde jenerasyon-rekombinasyonu etkisi özellikle orta sıcaklık değerlerinde etkili olan lokal durumlar sonucunda ortaya çıkan ve TE mekanizmasına paralel değişim gösteren bir mekanizmadır [2]. Tükenim bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyonun önemi Yu ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [40]. Schottky diyotlarda rekombinasyon durumlarındaki akım iletim mekanizması pn eklem diyotun akım iletim mekanizmasına benzer. Shockley-Read ve Hall teorilerine göre, en etkin rekombinasyon merkezleri, yasak enerji aralığının ortasına yakın yerlerdedir. Küçük bir pozitif voltaj bölgesinde baskın rekombinasyon akım yoğunluğunu aşağıdaki gibi verilmektedir [5];

$$J_r = J_{ro} \exp\left(\frac{qV}{E_o}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.20)$$

Burada $J_{ro} = qn_i W / 2\tau_r$ olup buradaki n_i , asal elektron yoğunluğudur ve n_i ile $(-qE_g/2kT)$ orantılıdır. Burada W , tükenim bölgesinin genişliği, τ_r elektronlar bu bölgeyi geçene kadar

geçen süredir. Homojen dağılımlı bölgelerde, elektron ve hollerin yakalama tesir kesitleri aynıdır.

Rekombinasyon akımının termoiyonik emisyon akımına oranı aşağıdaki gibidir;

$$T^2 T_r \exp \left[q \left(\frac{E_g + V - 2\Phi_B}{2kT} \right) \right] \quad (2.21)$$

Bu orana göre τ_r değeri V ve E_g ile doğru orantılı iken, Φ_B ile ters orantılıdır. Pozitif voltajda rekombinasyon akımı sıcaklık ile ters orantılıdır ve aktivasyon enerjisi $(E_g - V)/2$ değerine yakın olan düşük sıcaklık ve aktivasyon enerjisi $\Phi_B - V$ değerine yaklaşık eşit olan yüksek sıcaklık değerleri için rekombinasyon akımı iki farklı eğime sahip bir doğru belirtir. Aktivasyon enerjisi, diyotun iletme geçmesi için gereken minimum enerji miktarı olarak tanımlanabilir. Rekombinasyon etkisi nedeniyle ideal durumdan sapmalar genellikle düşük sıcaklıklarda daha aktiftir ve Schottky engel diyotlarında özellikle düşük sıcaklıklarda mutlaka dikkate alınması gereken bir mekanizmadır. Eğer taşıyıcı yoğunluğunu azaltılırsa, tünelleme ve hayali (image) kuvvet ihtimali azaltılır. Tükenim bölgesinde elektron holl çiftlerinin oluşması nedeniyle ters akım oluşur ve bu işlem jenerasyon olarak bilinmektedir. Jenerasyon mekanizması akımı aşağıdaki gibidir;

$$J_g = qn_i w / 2r\tau \quad (2.22)$$

Akım yoğunluğu negatif uygulama voltajı ile artar çünkü tükenim bölgesinin genişliği $V_d + V$ ile orantılıdır. Jenerasyon akımı kısa ömürlü yarıiletkenlerde ve engel yüksekliğinin büyük olduğu durumlarda ve özellikle düşük sıcaklıklarda daha önemli olmaktadır. Çünkü TE'dan daha düşük aktivasyon enerjisine sahiptirler [2].

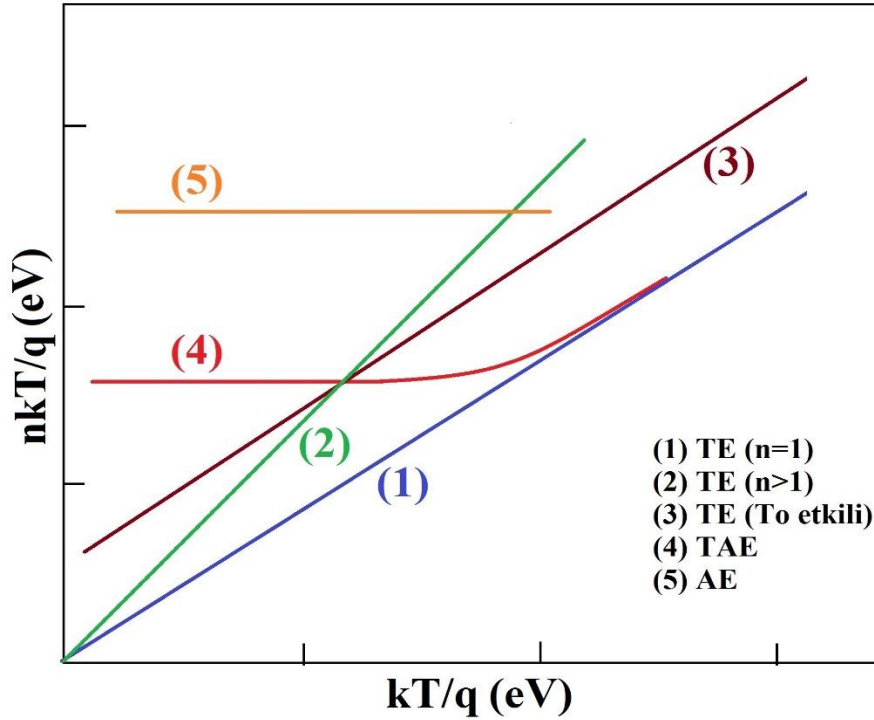
2.3.5. T_o etkili akım iletimi

İdealite faktörü (n) değerinin birden büyük olması hayali kuvvet ya da arayüzey durumları ile ortaya çıkıyor ise n sıcaklığa bağlı olmamalı, ancak termoiyonik alan emisyonu veya tükenim bölgesindeki rekombinasyon akımları nedeniyle ortaya çıkıyorsa n sıcaklığa bağlı olmalıdır ve genellikle Schottky diyotlarda n sıcaklığa bağlı olmaktadır. T_o etkili akım

yoğunluğu ifadesi aşağıda verildiği gibidir [1];

$$J = A^{**} T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_B}{k(T+T_o)} \right] \left(\exp \left[\frac{qV}{k(T+T_o)} \right] - 1 \right) \quad (2.23)$$

Burada T_o sıcaklık ve uygulama voltajından bağımsız sabit bir parametredir. n 'nin sıcaklığa bağlı ifadesi $n = 1 + T_o/T$ şeklindedir. Şekil 2.5, voltaja bağlı olarak oluşabilecek akım-iletim mekanizmalarını göstermektedir. (1) $n=1$, (2) $n>1$ ve (3) T_o etkili şeklinde gösterilen eğriler TE mekanizmasının baskın olduğu durumları belirtmektedir. (4) TAE ve (5) AE mekanizmalarının etkin olduğu durumları göstermektedir [41].



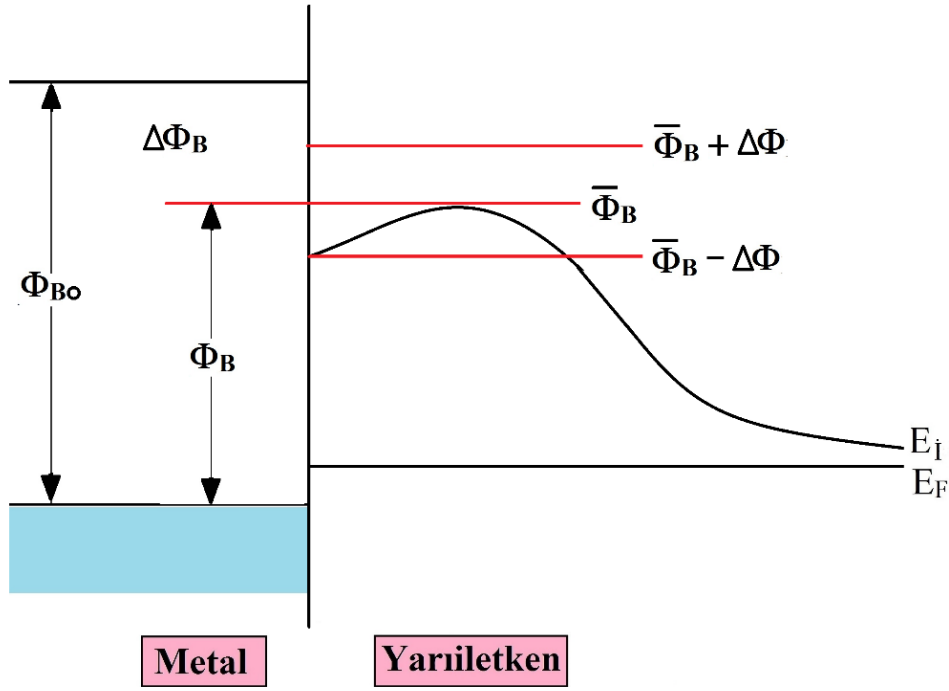
Şekil 2.5. Voltaja bağlı farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren $nkT/q-kT/q$ eğrisi

2.4. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojensizlikler

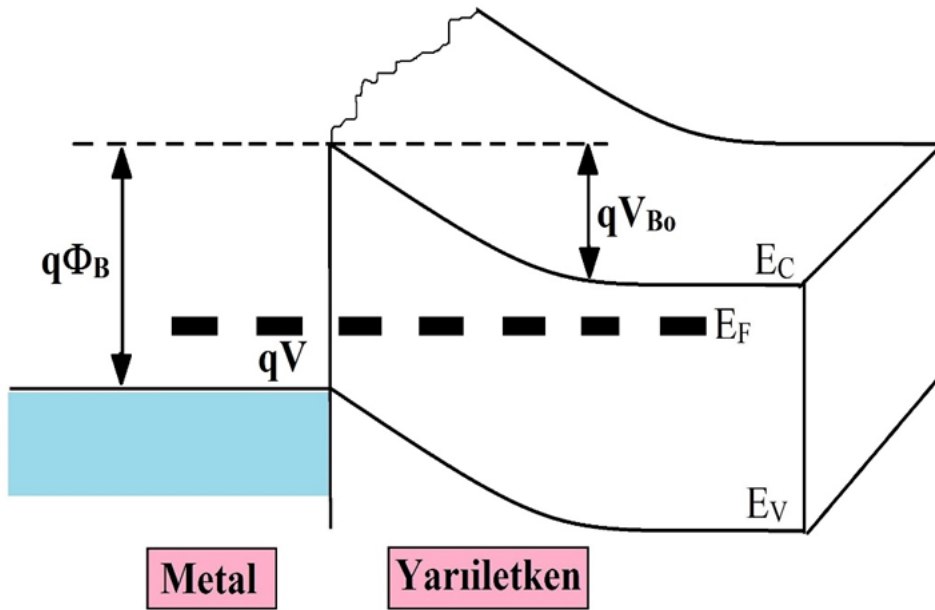
Metal ve yarıiletken arayüzeyinde uzaysal homojensizlikler söz konusudur ve bu homojensizlikler I-V eğrilerinde idealden sapmalara ($n>1$) neden olabilir. MS tipi SBD'larda pozitif voltaj I-V eğrisinden elde edilen Φ_B ile negatif voltaj C-V eğrisinden elde edilen Φ_B aynı sonuçları vermemektedir. I-V ve C-V'den elde edilen engel

yüksekliğinin değişimi ile n 'nin 1 den büyük olması çeşitli şekillerde açıklanmaya çalışılmıştır. Metal ve yarıiletken arayüzeyi atomik yapı bakımından düzenli değildir. Metaldeki atomik ve yapısal kusurlar, kalınlık farklılıkları, alan emisyonundan dolayı lokal engel yüksekliğinin azalması, farklı metalik fazların etkisi ve donör atomlarının rastgele dağıldığı düzenli bir örgüde, donör atomları arasındaki düzensiz mesafeler arayüzeyin pürüzlü olmasına neden olur. Dolayısı ile bu durum farklı V_D ve farklı Φ_B değerlerine ve dağılımda homojensizliğe neden olur. Bütün bu etkenlerden dolayı engel yüksekliğinin bir Gaussian dağılıma sahip olduğu düşünülmektedir [42, 43].

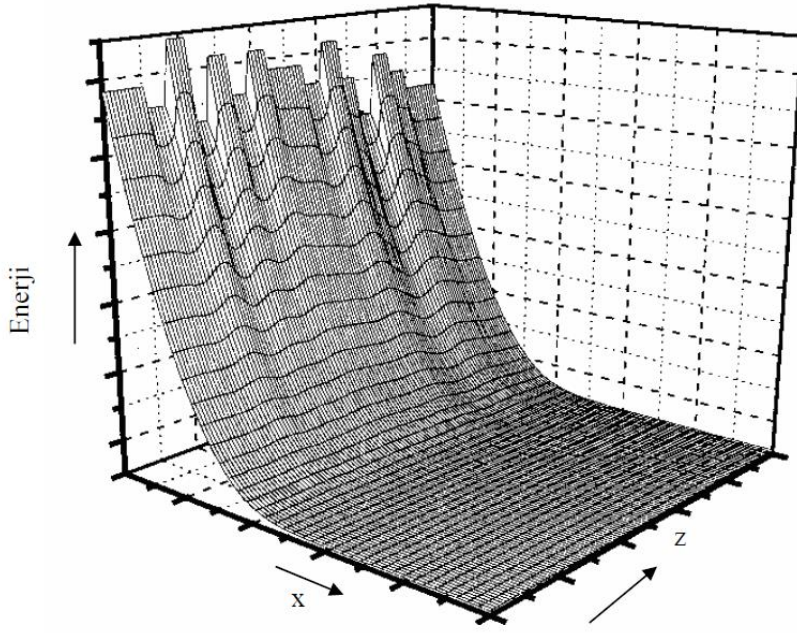
SBD'larda özellikle düşük sıcaklıklarda genellikle ideal durumdan sapmalar gözlenmektedir. Özellikle düşük sıcaklıklarda n değerinin büyük olması ve $\ln(I_0/T^2) - 1/nT$ eğrisi lineer iken $\ln(I_0/T^2) - 1/T$ grafiğinin lineer olması durumlarını tünelleme, imaj-kuvvet ya da deplasyon bölgesindeki rekombinasyon akımı etkileri ile izah etmek mümkün değildir [42, 44]. Bu durumları açıklamak için engel homojensizlikleri, arayüzey tabaka ve arayüzey durumları gibi birçok durum incelenmiştir [42, 45]. Düşük sıcaklıklardaki bu normal olmayan durumları en iyi açıklayan model engel homojensizliği modelidir. Bu modelde Schottky engelinin düzgün olmadığı farz edilerek homojen olmayan engeller için akım-voltaj ilişkisine dair bir ifade elde edilmiştir [42,45]. Yalnız bu modelde bilinmeyen çok sayıda parametre vardır. Daha sonra Werner ve arkadaşları tarafından [46] model geliştirilerek n için modifiye edilmiş yeni bir ifade ileri sürülmüştür. Ayrıca bu modelde bir engel yüksekliği için olasılık yoğunluğunun uygulanan voltaj ve sıcaklığa bağlı olmayan, ortalama bir standart sapmaya sahip Gauss dağılımlı olduğu kabul edilmiştir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi bazı kısımlarda Φ_B , ortalama engel yüksekliğinden ($\overline{\Phi_B}$), $\Delta\Phi$ kadarlık bir sapmaya sahiptir. Burada daha çok potansiyel engeli ve engel yüksekliğinin Gauss dağılımıyla ilgilenilmektedir. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de ise metal-yarıiletken arayüzeyindeki homojensizlikler 2 ve 3 boyutlu uzayda gösterilmektedir. [47].



Şekil 2.6. Metal/yarıiletken arayüzeyinde homojen olmayan engel modeline göre şematik enerji bant diyagramı



Şekil 2.7. Homojen olmayan engel yüksekliğine sahip bir Schottky engel diyotunun V gerilimi altındaki iki boyutlu bant diyagramı



Şekil 2.8. Bir MS tipi SBD için homojen olmayan bir potansiyel engelinin üç boyutlu görünümü [39, 47].

Song ve arkadaşları [43] tarafından ortaya atılan teoriye göre, σ_s standart sapma, $\bar{\Phi}_B$ ortalama engel yüksekliği olmak üzere Φ_B engel yüksekliğinin aşağıdaki gibi bir Gaussian dağılıma sahip olduğu kabul edilmektedir;

$$P(\Phi_B) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\Phi_B - \bar{\Phi}_B)^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (2.24)$$

$\bar{\Phi}_B = \bar{\Phi}_{B0} + \rho_2 V$ ve $\sigma_s^2 = \sigma_{s0}^2 + \rho_3 V$ şeklinde lineer olarak bağlı olduğu kabul edilirse ozitif voltaj potansiyeline bağlı toplam akım ifadesi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$I(V) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\Phi_B, V) P(\Phi_B) d\Phi_B \quad (2.25)$$

Burada ρ_2 ve ρ_3 voltaj katsayılarıdır. İntegral alındığında elde edilen sonuç aşağıdaki gibidir;

$$I(V) = A^* T^2 \exp \left[-\frac{q}{kT} \left(\bar{\Phi}_B - \frac{q\sigma_s^2}{2kT} \right) \right] \exp \left(\frac{qV}{n_{ap} kT} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{qV}{kT} \right) \right] \quad (2.26)$$

$$I_o = AA^* T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{ap}}{kT} \right) \quad (2.27)$$

ile verilir n_{ap} ve Φ_{ap} sırasıyla görünen idealite faktörü ve görünen engel yüksekliğidir ve aşağıdaki gibi tanımlanırlar;

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_{Bo} - \frac{q\sigma_{so}^2}{2kT} \quad (2.28)$$

$$\frac{1}{n_{ap}(T)} - 1 = -\rho_1(T) = -\rho_2 + \frac{q\rho_3}{2kT} \quad (2.29)$$

Sonuç olarak elde edilen ifade aşağıdaki gibidir;

$$\ln \left(\frac{I_o}{T^2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{q\sigma_{so}}{kT} \right)^2 = \ln(AA^*) - \frac{q\bar{\Phi}_{Bo}}{kT} \quad (2.30)$$

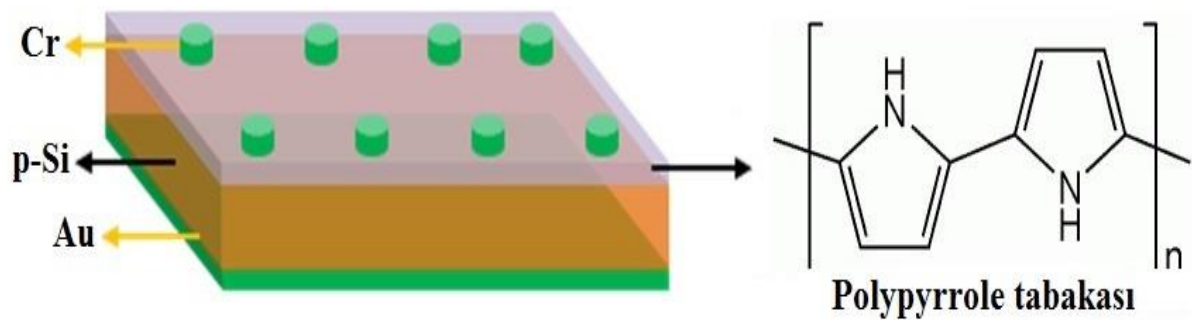
Elde edilen ifadelerden de görülebileceği gibi artan sıcaklık ile sıfır voltajdaki engel yüksekliği de artar ve buna özellikle düşük sıcaklıklarda Gaussian dağılımı neden olur. Etkilenme miktarı engel yüksekliğinin standart sapmasına bağlıdır. İdealite faktöründeki artışlar engel yüksekliğinin ortalaması ve voltaj değişimi ile oluşan standart sapmaya bağlıdır [48].

2.5. Metal-Yalıtkan/Polimer-Yarıiletken Schottky Diyotların Yapısı

MS kontaklarda yani SBD'lerde metal ile yarıiletken arasına hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eden hem de aralarındaki yük geçişlerini düzenleyen ince bir yalıtkan tabaka veya rhodamine-101, poly(aniline), tetraamide-I, phenolsulfonphthalein, chitin, β -carotene, safranin T, polyvinyl alcohol (PVA), P2CIAn, PEDOT, polyindole ve perylene vb. polimerlerden biri yerleştirildiğinde bu MS yapısı artık MIS ya da MPS yapısı olur.

İnorganik ince filmleri büyütebilmek için birçok metot vardır ancak bu metotlar pahalıdır ve gelişmiş laboratuvar koşulları gerektirmektedir. Bu nedenle geleneksel yollarla büyütülmüş yalıtkan tabakaların yerine son zamanlarda üretim maliyetini ciddi ölçüde düşüren, bol miktarlarda üretilebilen, organik ince filmler yani polimerler kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, mekanik olarak dayanıklı olması, hem metal hem de yarıiletken gibi davranabilmesi, inorganik materyallere göre daha iyi kontrol edilebilir akım iletim mekanizmaları gerçekleştirilmesi, yüksek elektriksel iletkenlik sağlaması, sızıntı akımını azaltması, sıcaklığa karşı kararlı ve dayanıklı olması organik ince filmleri yani polimerleri metal-yarıiletken kontak imalinde tercih edilen materyaller haline getirmiştir. Bu tür yapılar modern elektronik endüstrisinde, elektronik sanayinde, MOSFET (Metal-Oksit-Yarıiletken alan etkili transistörler), MESFET (Schotkky engel tabakalı alan etkili transistörler), hızlı anahtar (switching) uygulamaları, mikrodalga karıştırıcı dedektörleri, varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilime göre değişen kondansatörler), fotovoltaiik güneş pilleri, lazer boyaları, organik ışık yayan diyotlar gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

MS tipi SBD'larda uygulama voltaj (V_G), arayüzeydeki tabaka ve seri direnç etkisiyle diyot tarafından ($V_G = V_D + V_{R_s} + V_i$) bölüşülecektir. Bu nedenle MIS veya MPS yapılarında akım-iletimi MS yapılardan oldukça farklı olacaktır. Bir MIS ya da MPS yapının şematik diyagramı Şekil 2.9' da gösterilmiştir [49].



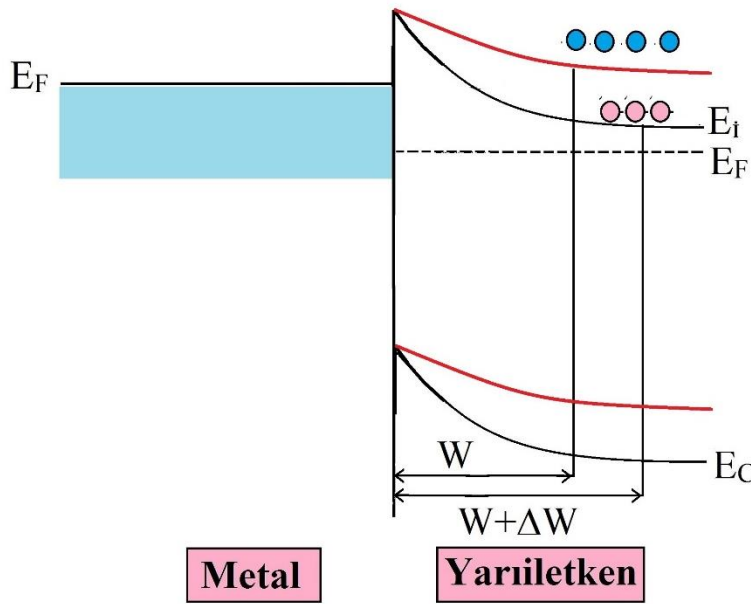
Şekil 2.9. Bir MPS tipi SBD için yapının şematik diyagramı.

2.6. Schotkky engel diyotların kapasitansı

Metal ile yarıiletken kontak edildikten sonra yüklerin pozitif ve negatif bölgeler oluşturduklarını söylemiştik. İşte bu yük ayrışmasından dolayı Schotkky kontaklar aslında

birer paralel plakalı kondansatör gibi düşünülebilirler. Ayrıca Şekil 2.10'dan da görülebileceği gibi tükenim bölgesi yük durumlarına ve uygulama voltajına karşı duyarlıdır. Diyota ait kapasitans ölçümleri yapıldığında özellikle negatif voltaj altında elde edilen veriler bize bazı diyot parametreleri hakkında önemli bilgiler verebilir. Çünkü negatif voltaj değeri arttıkça yarıiletkenin iletkenlik bandı elektronları geriye çekilerek tükenim tabakasının genişliğinin $W+\Delta W$ kadar genişlemesine ve dolayısıyla kapasitansta değişime neden olurlar. Bu voltaja bağlı C-V ölçümleri yapılırken bir dc sinyal üzerine küçük genlikli bir AC sinyal bindirilir. Voltajın bir fonksiyonu olarak birim alan başına Schottky kapasitansı aşağıda verildiği gibi ifade edilir [5];

$$C = \left[\frac{q\epsilon_s N_D}{2V_{bo} + V} \right]^{0.5} \quad (2.31)$$



Şekil 2.10. Bir metal/ n -tipi yarıiletken SBD'un voltaja bağlı değişen enerji-bant diyagramı

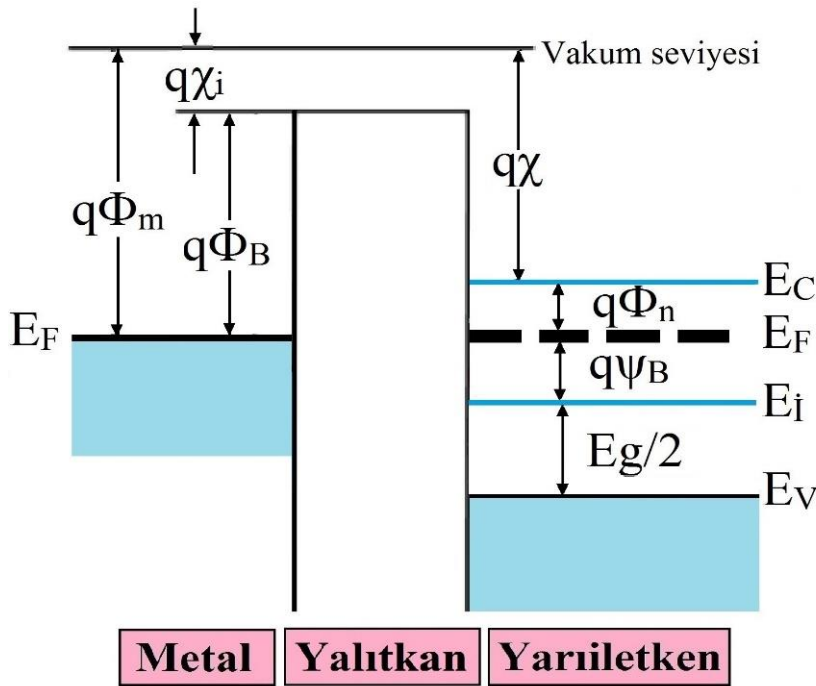
2.7. İdeal MIS Yapı

Metal ve yarıiletken kontak edilip termal dengeye ulaştıktan sonra herhangi bir voltaj uygulanmadığı zaman metalin iş fonksiyonu Φ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s arasındaki fark sıfır olmaktadır. Bir dc sinyali altında metal ile yarıiletken arasındaki yalıtıkanda yük geçişleri yoktur yani yalıtkanın direnci sonsuzdur. Eğer voltaj uygulanırsa yapıdaki yükler yalıtkan yüzeyinde toplanırlar. Metal ve yarıiletken yüzeyindeki yükler

eşit miktarda ve zıt yönlüdürler. İdeal MIS yapının, $V=0$ durumunda enerji-bant diyagramı Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Buradan yola çıkarak aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \quad (\text{n-tipi}) \quad (2.32)$$

Burada χ yarıiletken elektron ilgisi, E_g yasak enerji aralığı ve ψ_B ise Fermi enerji seviyesi E_F ile saf enerji seviyesi E_i arasındaki enerji farkıdır.



Şekil 2.11. $V=0$ ’da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı (n-tipi yarıiletken).

Yarıiletkendeki serbest yük sayısı metale göre daha azdır, katkılama göre çoğunluk ya da azınlık taşıyıcılarıdır ve hareketleri uygulama gerilimine bağlıdır. Termal denge durumunda arayüzeydeki uzay yük miktarı voltajın büyüklüğü ile belirlenir. İdeal bir MIS yapıda metale voltaj uygulanırsa yarıiletkende yük kaymaları olur ve yarıiletken arayüzeyinde bantların bükülmesine neden olan uzay yükü (Q_{sc}) oluşur. Yarıiletkendeki yükler metaldekiler gibi serbest yükler değildir ve uygulanan voltaja bağlı olarak ya uzay yük bölgesinde ya da arayüzey bölgede yığılmalar meydana getirirler. V_G uygulama geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerinde düşerken geri kalanı yalıtkan tabaka üzerine düşer;

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (2.33)$$

2.7.1. Yığılım

Metale pozitif voltaj ($V_G > 0$) uygulandığında oluşan elektrik alan sonucunda yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronlar yarıiletken arayüzeyine doğru birikirler ve Şekil 2.13 (a)'da görüldüğü gibi yüzeye yakın olan yerlerde bantlar yukarı doğru bükülür. Arayüzeydeki bu çoğunluk taşıyıcıların birikme olayına “yığılım” adı verilir.

2.7.2. Tükenim

Metale negatif bir voltaj ($V_G < 0$) uygulandığı zaman, arayüzey tabaka içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyinde biriken elektronları yüzeyden uzaklaştırır ve arayüzey bölgesinde, uzaklaşan elektronlar nedeniyle pozitif yükler (holl) oluşur. Böylece yarıiletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki elektron yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve 2.13 (b)'de görüldüğü gibi enerji bantları (E_C ve E_V) aşağı doğru bükülür. Tükenim tabakasının genişliğinde (W_D) elektronların azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur. Yarıiletken ön yüzeyinde elektronların azalmasından (tükenmesi) dolayı bu bölge “tükenim bölgesi” olarak adlandırılır. Bu tükenim bölgesinin kalınlığı aşağıdaki ifade ile verilir;

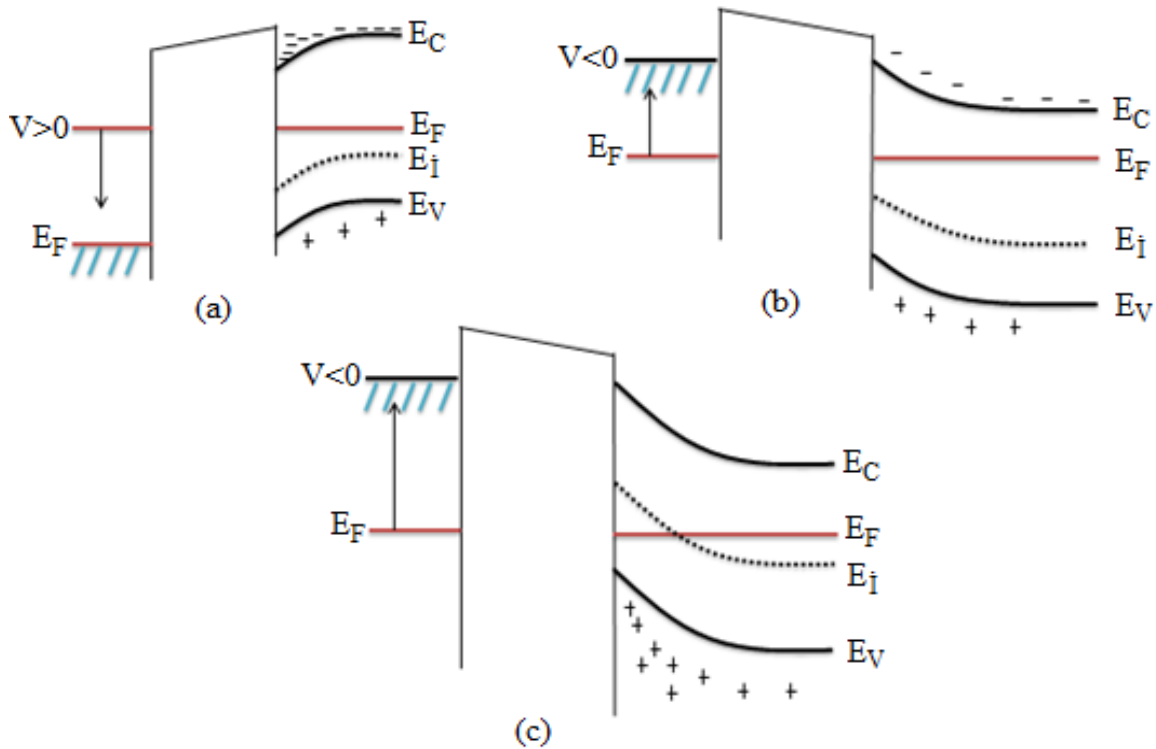
$$W_D = \varepsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.36)$$

Burada ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir.

2.7.3. Tersinim

Metale daha fazla negatif voltaj ($V_G < < 0$) uygulandığı zaman bantlar daha fazla bükülür. Yarıiletken arayüzeyinde elektronların geride bıraktıkları azınlık taşıyıcılar olan hollerin yoğunluğu iyice artar ve yarıiletkende elektronların yoğunluğundan daha fazla olmaya başlar. 2.13 (c)'de görüldüğü gibi Fermi seviyesi saf durumdaki enerji seviyesinin (E_i) de altına iner. Bu nedenle de n-tipi yarıiletken yüzeyi p-tipi yarıiletken gibi davranmaya başlar. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak adlandırılır. Böyle durumlarda MIS kapasitansının değeri elektron yoğunluğunun AC sinyali takip edebilme yeteneği ile belirlenir. Küçük frekanslarda AC sinyali takip edilebilir ve kapasitansa ilave bir

kapasitans ile oksit kapasitans değerine ulaşır. Orta büyüklükte frekanslarda takip yeteneği azalır ve ara frekans eğrileri görünür. Yeterince yüksek frekanslarda ise artık takip ademez ve kapasitans minimum değerine ulaşır. Yüksek frekansta eğer voltaj ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak tersinim yükleri daha geç birikir ve kapasitansın C_{min} 'un altında değerler almasına sebep olur.



Şekil 2.13. $V \neq 0$ durumunda n tipi yarıiletken için ideal MIS yapının enerji-bant şeması. (a) Yığılım (b) Tükenim (c) Tersinim [5]

2.8. Schottky Diyotlarda İdeal Durumdan Sapma Nedenleri

2.8.1. Hayali (Image)-kuvvet (Schottky) etkisi

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi_s \quad (2.37)$$

ile verilen ifade ideal bir Schottky diyot için potansiyel engel yüksekliği ifadesidir. Fakat bu engel yüksekliği çeşitli nedenlerden dolayı değişebilmektedir. Bunlardan biri imaj-kuvvet etkisi (Schottky etkisi) nedeniyle engel yüksekliğindeki azalmadır. Metalden x kadar uzaklıktaki bir mesafede, yarıiletkendeki bir elektron çevresinde elektrik alan oluşur.

Elektrik alan çizgileri, metal yüzeyine diktir ve bu çizgiler metalin yüzeyinden iç kısma doğru x mesafesinde yerleşmiş bir $+q$ imaj yükünün çizgileri ile aynıdır. İmaj yükü ile Coulomb etkileşmesinden dolayı, elektron üzerine etki eden kuvvet ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$F = -\frac{1}{4\pi\epsilon_s} \left(\frac{q}{2x} \right)^2 = -qE \quad (2.38)$$

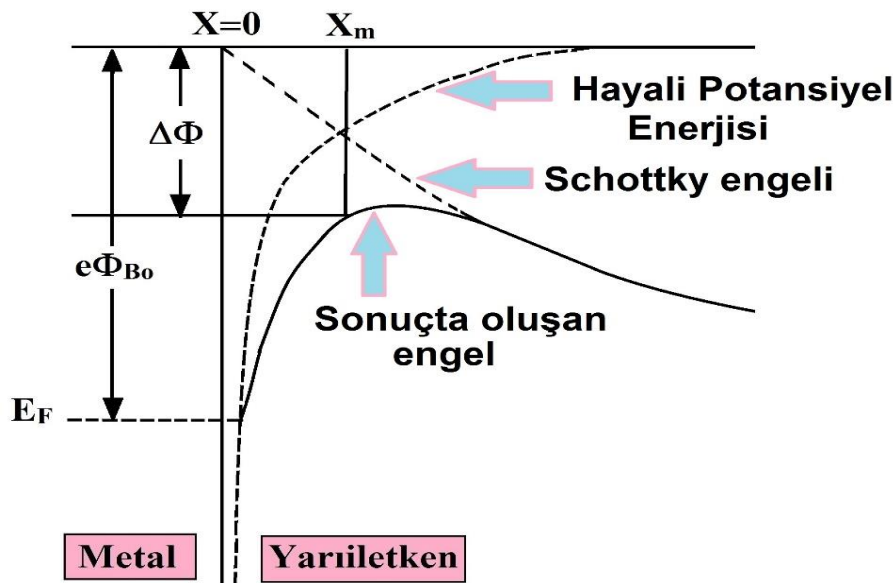
Potansiyel ifadesi de aşağıdaki gibidir;

$$-\Phi(x) = + \int_0^\infty E dx = + \int_0^\infty \frac{q}{4\pi\epsilon_s 4(x)^2} dx = -\frac{q}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.39)$$

Burada x integral değişkeni olup, $x=\infty$ için potansiyel sıfır olarak kabul edilmektedir. Elektronun potansiyel enerjisinin $-q\Phi(x)$ değişimi başka herhangi bir elektrik alanın olmadığı düşünülerek Şekil 2.10'da gösterilmektedir.

Metal-yarıiletken arayüzeyindeki toplam potansiyele, bu imaj potansiyelinin de katkısı olacağından toplam potansiyel ifadesi aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir;

$$-\Phi(x) = -\frac{q}{16\pi\epsilon_s x} - E \cdot x \quad (2.40)$$



Şekil 2.14. Sabit bir elektrik alanında hayali kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme

Şekil 2.14'dan görülebileceği gibi sabit bir elektrik alanının varlığında potansiyel engelin maksimum değeri azalmaktadır. Potansiyel engelin bu şekilde azalması imaj-kuvvet etkisi ile engel yüksekliğinin azalması olarak bilinir.

Değerin maksimum olduğu noktada toplam potansiyelin türevi sıfıra eşit olacaktır. Buradan yola çıkılırsa potansiyelin maksimum olduğu nokta için aşağıdaki ifade elde edilebilir;

$$x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_s E}} \quad (2.41)$$

Sonuç olarak imaj-kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin azalması aşağıdaki gibi verilir [50];

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.42)$$

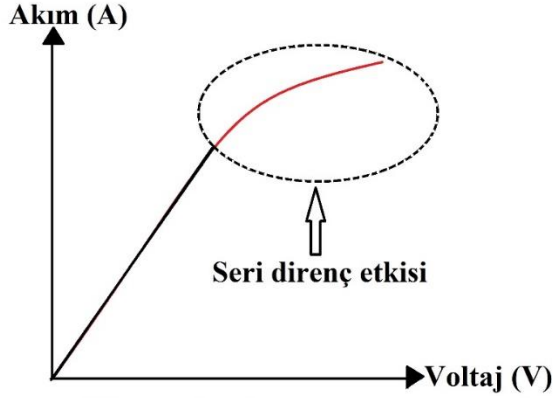
2.8.2. Seri direnç etkisi

Seri direnç metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yarıiletken tarafında oluşan uzay yük bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirençtir ve R_s ile gösterilir. R_s 'nin beş farklı kaynağı vardır;

- (1) Doğrultucu kontağın bir tel prop ile ve arka kontağın ise yarıiletkenle direk ohmik olarak kontak edilmesi,
- (2) Metal ve yarıiletken arasında doğal ya da katkılanmış bir ara yüzey tabakasının olması,
- (3) Arka/doğrultucu kontak ile yarıiletken arasında quasi-nötral yarıiletken direnci ve yarıiletken yüzeyinde tükenim tabakasının kenar etkisi,
- (4) Donor ve akseptör atomlarının aşırı katkılanması,
- (5) Metal ve yarıiletken arasındaki ara yüzey durumlarının (N_{ss}) yoğunluk dağılımı [26].

R_s etkisi yeterince yüksek voltaj değerlerinde baskın olmaya başlar ve diyot akımının artan pozitif voltajla azalmasına yani I-V eğrilerinde ileri pozitif voltaj bölgesinde eğride bir bükülmeye neden olur. Şekil 2.15, bir Schottky diyota yüksek gerilim

uygulandığı zaman seri direncin doyum etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı göstermektedir [3].



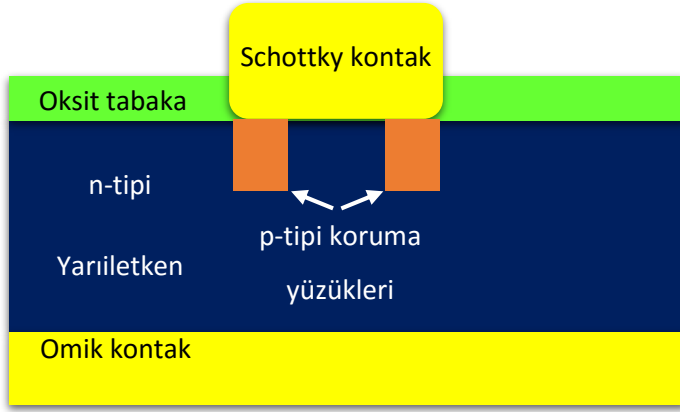
Şekil 2.15. Metal/yarıiletken kontaklarda seri direnç etkisi

2.8.3. Tünelleme etkisi

Tünelleme metal-yarıiletken kontaklarda aşırı katkılanmış bir yarıiletken kullanılması durumunda ve özellikle düşük sıcaklıklarda baskın olan bir akım iletim mekanizmasıdır. Bu tip bir akım iletim mekanizmasında yük taşıyıcıları, engel üzerinden geçmez, engeli kuantum mekaniksel tünelleme yoluyla geçerler. Bu mekanizma diyotun elektriksel karakteristiklerinin ideal durumdan sapmasına yol açar [3].

2.8.4. Kenar etkileri

Önceki bölümlerde metal ile yarıiletken arasında elektrik alan çizgilerinin ekleme dik olduğu farzedilmişti. Ancak normalde Schottky kontaklar, bir yarıiletken yüzeyine maskeler yardımıyla küçük metal noktalar (dotlar) yapılarak oluşturulmaktadır. Bu durumda da yapılan ölçümlerde metal noktanın kenarındaki elektrik alanın, merkezindeki alandan daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, SBD'larda negatif voltajdaki akım değerlerinin teoride olması gereken değerlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durumun kenar sızıntı akımı ile açıklanabileceği düşünülmüştür. SBD'larda kenar etkisini yok etmek için örneğin n-tipi bir yarıiletken için p-tipi bölgeler oluşturulmak suretiyle guardlar (koruma yüzükleri) yapılmaktadır [2].



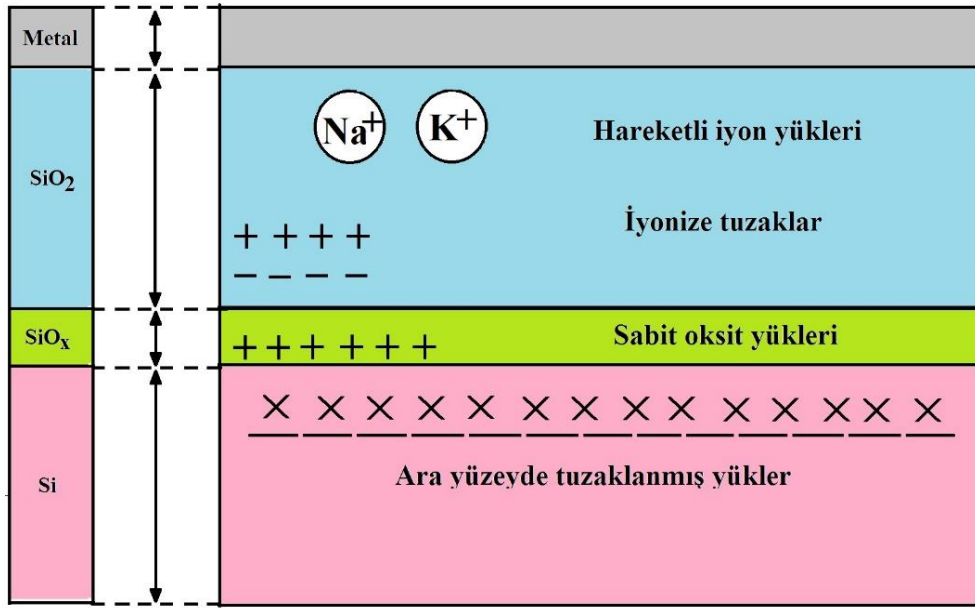
Şekil 2.16. Metal/yarıiletken kontaklarda kenar etkisi [51]

2.8.5. Arayüzey durumları (N_{ss})

İdealde bir yalıtkan içinde ve yalıtkan ile yarıiletkenin birleşim yüzeyinde hareketli yük yoktur. Ancak gerçek yapılarda bu bölgeler hiçbir zaman elektriksel olarak nötr olmaz. Arayüzey durumları denilen bu yükler MIS ya da MPS yapıların özelliklerini ciddi oranda değiştirmekte ve idealden sapmalara neden olmaktadır [2]. Bunların başlıca çeşitleri şunlardır;

- ✓ Yarıiletken ve yalıtkanın arayüzeyinde bulunan ve yasak enerji aralığında izinli enerji seviyeleri gibi davranan arayüzey durumları,
- ✓ Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit oksit yükleri,
- ✓ Yalıtkan içindeki hareketli iyonlar,
- ✓ Numunenin x-ışını radyasyonuna maruz kalmasıyla oluşabilen iyonize tuzaklar.

Bu arayüzey durumların ve yüklerin sınıflandırılması Şekil 2. 17'de şematik olarak gösterilmiştir [49].



Şekil 2. 17. İdeal olmayan MIS yapıda arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

Arayüzey durumları, kısa bir zamanda yarıiletken ile yük alışverişi yapabilen yarıiletken ve yalıtkan arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleridir. Bir voltaj uygulandığında, arayüzey tuzak seviyeleri, Fermi seviyesi sabit kalırken valans ve iletkenlik bantları ile birlikte aşağı ve yukarı hareket edebilirler. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, arayüzey tuzaklarının iletkenlik bandı ve valans bandı ile yük alışverişi yapması sonucunda meydana gelir. Bu yükün değişimi MIS kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MIS eğrisinde değişikliğe neden olur. Arayüzey durumlarında bulunan yükün yoğunluğu Q_{ss} , yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve yalıtkan kalınlığından etkilenmez. Arayüzey durumları, uzay yükü kapasitesine ek bir kapasite ve direnç etkisi oluştururlar. Arayüzey durumları verici veya alıcı tipte olabilirler. Alıcı tiptekilerde enerji seviyesi dolu ise negatif yüklü, boş ise yüksüzdür. Verici tiptekilerde ise, enerji seviyesi dolu ise yüksüz, boş ise pozitif yüklüdür. Arayüzey durumlarının elektriksel etkileri şunlardır;

Kapasite: Bir arayüzey duruma, arayüzeyde izin verilen başka bir durumun eklenmesiyle meydana gelir. Bu yüzden durum başına temel yükün bir kapasitesi eklenir. Bu kapasite uygulanan gerilimin keskin bir pikidir. Fermi seviyesi Arayüzey durum seviyesini aştığı için pik gerilim için görülür.

İletim: Arayüzey durumları tarafından taşıyıcıların yayınlanması ve yakalanması sonsuz hızda olmadığından zaman gecikmesi ile birleştirilir. Bu zaman gecikmesi arayüzey

durumunun bir RC devresiyle özdeşleştirilmesiyle ifade edilir. Bu zaman kayması aynı zamanda dolum boşalım zamanıdır ve $\tau=1/(R_{ss}C_{ss})$ bağıntısı ile verilir ve burada R_{ss} arayüzey direncidir [49].

Devredeki arayüzey kapasitansı C_{ss} aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.43)$$

Arayüzey potansiyeli: Yukarıda ifade ettiğimiz kapasite ve iletim AC etkisindedir. Arayüzey durumları bunlara ek olarak bir dc etkisine de sebep olur. Arayüzey durumlarında depo edilmiş yük, arayüzey elektrik alanını değiştirir. Arayüzey durumları mevcut iken arayüzey potansiyelini değiştirmek için ideal durumdan daha fazla gerilim uygulanması gerekmektedir. Bu etki kapasite-gerilimin zorunlu genişlemesi (stretchout) şeklindedir.

Arayüzey durumları C-V eğrisinin ideal C-V eğrisine göre kaymasına sebep olur. Arayüzey durumlarının birim enerji ve birim alan başına durum yoğunluğu;

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.44)$$

ile verilir. Yani, birim enerji başına birim arayüzey durum yükü olarak tanımlanır.

Burada E enerji olup $E=q\psi_s$ ile verilir. E'nin diferansiyeli alınırsa $dE = qd\psi_s$ elde edilir.

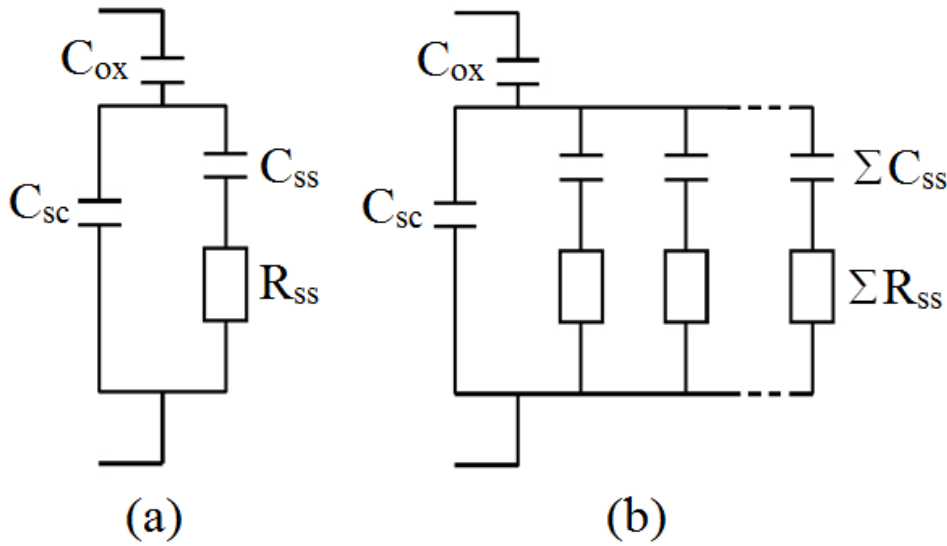
Bunu (2.10) eşitliğinde yerine koyup tekrar düzenlersek durum yoğunluğu:

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \frac{\partial \psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \quad (2.45)$$

şeklinde yazılır. Arayüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez.

Bir elektron veya deşik tarafından bir arayüzey durumunun işgal edilme olasılığı, bu yüzey durumunun safsızlık enerji seviyelerindeki gibi Fermi seviyesiyle belirlenir. Bu şekilde yüzey potansiyeli değıştikçe arayüzey durumun enerji seviyesi de onunla hareket eder. Sonuçta Fermi seviyesinin bu bağıl değışikliği bir elektron tarafından bu arayüzey durumunun işgal edilme olasılığının değışimine sebep olur.

Arayüzey durumları, uzay yükü kapasitansına paralel kapasitans ve seri direnç etkisi yaptığıında temel eşdeğer devre Şekil 2. 18’de verildiğı gibidir [49].



Şekil 2.18. MIS yapısının eşdeğer devresi a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için

Sabit oksit ve arayüzey yükleri

Sabit oksit yükleri yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde bulunurlar. Genellikle pozitifdir ve oksidasyona, tavlama şartlarına ve silisyumun yönüne bağlıdır. Yalıtkanla yarıiletkenin kristal yapılarının farklı olmasından dolayı oksidasyon esnasında yarıletkenden yalıtkan tabakasına geçerken kaçınılmaz olan kristal bozuklukları yerel yüklere neden olurlar. Arayüzeyde pozitif veya negatif sabit oksit yükleri olduğunda yüksek frekans C-V eğrilerinin gerilim eksenini boyunca değışmeler meydana gelir. Elektriksel ölçümlerde sabit oksit yükü, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tabaka halinde yerleşmiş yükler gibi görülebilir. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için, C-V eğrisinin, uygulama geriliminin negatif değerlerine doğru kaymasına pozitif sabit oksit yükleri ($+Q_f$), ileri pozitif uygulama

gerilimine doğru kaymasına da negatif sabit oksit yükleri ($-Q_f$) sebep olurlar [52]. Pozitif uygulama gerilimleri için hareketli iyonlar yalıtkan-yarıiletken arayüzeyine sürüklenirler. Negatif uygulama gerilimleri için hareketli yük metal- yalıtkan arayüzeyine çekilir.

Hareketli iyonlar

Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Bu hareketli iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonlarıdır [53]. Böyle iyonlar nispeten düşük sıcaklıklarda oksit içinde hareketli olduklarından sürüklenme olabilir. Hareketsiz oksit yükü, beslem sıcaklığı ile hareketli iyonik yükten ayırt edilebilir. Hareketli iyonlar, kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları içinde bulundurması, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitleme fırını, kuartz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden oksit içinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alanda altında hareket ettiklerinden MIS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar.

İyonlaşmış tuzaklar

Kimyasal yapı bozukluklarından ve radyasyondan kaynaklanan bu tuzaklar yalıtkan tabaka içinde bulunurlar. Yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Böylece yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. Bir yalıtkan tabakada elektron-deşik çiftleri meydana gelmişse (iyonlaştırıcı radyasyon ile) bu elektron ve deşiklerin bir kısmı sonradan oksitte tuzaklanabilir. Yapının üretiminde ortaya çıkan elektron ve deşik tuzakları daha sonradan tavlama ile kaldırılabilir. Oksitte tuzaklanmış yük, yalıtkan doğru dağıldığından genellikle yalıtkan-yarıiletken yüzeye yerleşmezler [53]. İyonlaşmış tuzaklar elektron yakalayarak yüksüz hale geçerler. Bu tuzaklar kapasitans-voltaj eğrisine etki ederler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasite değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasitans değerleri arasında farklılıklar meydana gelir [54]. Kapasitans-voltaj eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı yalıtkan içindeki tuzakların miktarını verir [49].



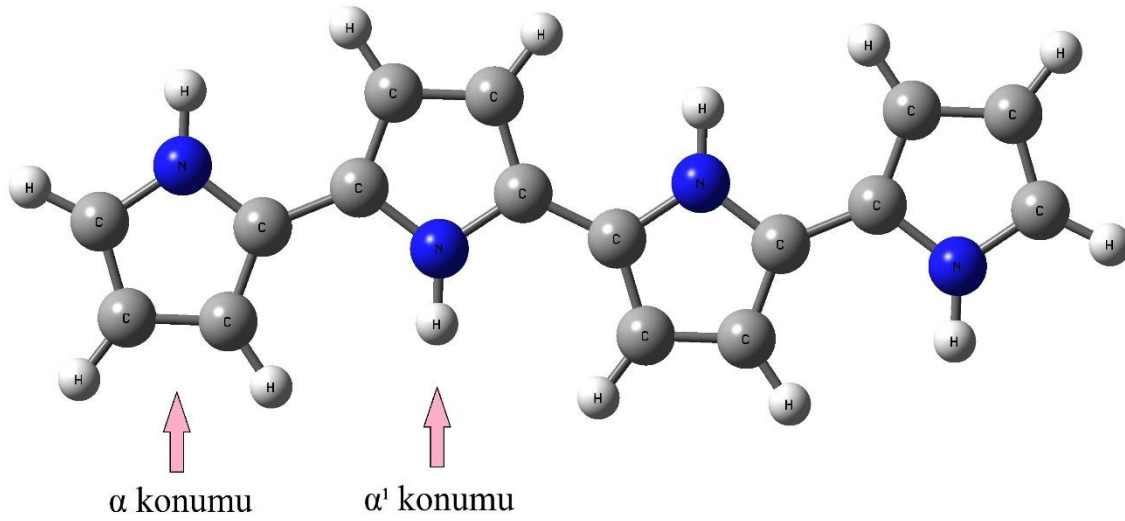
3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Silisyum Kristali

Silisyum doğada bol miktarda bulunan, elmas yapıda ve genellikle silikat, SiO_2 gibi bileşikler halinde olan bir yarıiletkenidir. Yasak enerji aralığı 1,12 eV, elektron yakınlığı 4,05 eV 'dur. Dielektrik sabiti 11,9'dur. Silisyum dioksitin elektrik arkında redüklenmesi sonucu elde edilen silisyum saf değildir. Bu nedenle silanlı (SiH_4) bir bileşiğe dönüştürülür. Sıvı olan bu bileşik, kademeli distilasyon yöntemi ile ayrılır ve silisyumu içeren kısım kendi başına veya hidrojen atmosferinde ısıtılarak saf silisyuma ulaşılır. Bu yöntemlerle kimyasal saflığa getirilen silisyum yarıiletkeni henüz elektronik eleman yapımı için yeterli saflıkta değildir. Bu nedenle fiziksel saflaştırma yöntemi kullanılır. Bölgesel eritme adı verilen yöntemde, bazı safsızlık maddelerinin sıvı haldeki yarıiletkende çok daha çabuk çözünmesi gerçeğinden yararlanılarak, yarıiletken istenmeyen safsızlık maddelerinden arındırılır. Bu yöntemle saflaştırılan yarıiletken henüz polikristal özelliğindedir. Bundan sonra yarıiletkenin tek kristal halinde büyütülmesi ve içine arzu edilen öz direnci sağlayacak safsızlık maddelerinin katkılanması gerekir. Katkılanan safsızlığın cinsi yarıiletkenin tipini belirler, miktarı ise öz direncini ($\rho = 1/\mu\text{eN}$) tayin eder [55].

3.2. Polypyrrole (PPy)

1977 yılında değişik konjuge polimerler üzerinde yapılan çalışmalarda polyacetylene sınıfından katkılı polimerlerin yüksek iletkenliğe sahip olduğu görüldü. Bu sınıfın elemanlarından bazıları şunlardır; poly(p-phenylene), polythiophene, polyaniline ve polypyrrole (PPy). Bunlardan PPy polimeri pyrrole ($\text{C}_4\text{H}_4\text{NH}$) monomerlerinin α ve α' konumlarında kimyasal ya da elektrokimyasal oksidasyon ile bir araya getirilmesi ile oluşan lineer zincir yapıda bir polimerdir. PPy'nin moleküler yapısı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. İletken polimerlerin üretimi ve özelliklerinin kontrol edilebilmesi konularında bugün literatürde birçok çalışma mevcuttur. Ancak literatürde PPy ile ilgili çok az çalışma vardır. Bu nedenle bu çalışmada PPy polimeri tercih edilmiştir.



Şekil 3.1. α ve α' konumlarındaki pyrrole halkalarından oluşan PPy'nin moleküler yapısı.

Polimerler normalde iyi iletken değildirler ancak kimyasal ya da elektrokimyasal oksidasyon (p-katkılama) ve indirgenme (n-katkılama) şeklinde katkılama yapıldığında iyi iletken olabilirler. İletken polimerler diğer adıyla sentetik metaller katkılama ile 10^{-10} - 10^{-5} S cm⁻¹ arasında değişen iletkenliğe sahip olabilirler. Katkılama seviyesinin ayarlanması ile polimerin iletkenlik seviyesi kontrol edilebilir. Ayrıca bu katkılama tersinirdir. Yani katkılama ortadan kaldırıldığında bozulmamış polimer yapısı yeniden elde edilebilir. Ancak bu katkılama onları kırılğan hale getirebilmektedir. Katkılanma miktarına bağlı olarak PPy filmlerinin rengi sarıdan maviye hatta siyaha dönüşebilmektedir. Film kalınlığı 10 nm üzerinde ise yüzeye daha iyi yapışma sağlanabilmektedir. Yapışma özelliği malzemelerin kalitesine, yapışma yüzeyinin özelliklerine ve çözücüye bağlı olarak da değişebilmektedir. [56]. Bazı diğer polimer gruplarına göre PPy ailesi daha çevre dostudur ve daha iyi iletkenlik sağlar.

PPy'nin kullanım alanları: İletken polimerler bilim ve teknoloji alanında çalışan bilim adamlarının çok ilgisini çekmektedir ve elektronik uygulamalarında ya çeşitli aygıtların yapı malzemesi olarak ya da bir ayırıcı tabaka olarak kullanılmaktadır. Bunlardan PPy çeşitli elektronik aygıtlarda aktif olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanlarının bazıları aşağıda verilmiştir;

- 1) Enerji depolama aygıtları (elektrokimyasal piller ve kapasitörler),
- 2) İlaç üretiminde,
- 3) Fotoelektrokimyasal aygıtlarda,
- 4) Yapay kaslarda,

Bu sistem mikro ve nanofabrikasyon süreçlerinde alttaşların yüzeylerine metal kaplamalar yapmak üzere kullanılmaktadır. Sistemde genellikle yüksek buhar basıncına sahip ve kolay kontamine edilen metaller termal yöntem ile buharlaştırılmaktadır. Sistemin minimum vakum seviyesi 2×10^{-6} Torr seviyesindedir ve iki adet buharlaştırma kaynağı kullanılabilir. Kaynak örtücüleri ve örnek döndürme özellikleri ile 100 mm çaplı alttaşlara homojen kaplamalar yapmak mümkündür. Sistem yarıotomatik bir sistemdir.

Çalışma Prensipleri: Cihazın kaynak tutucularına takılan tungsten bot veya sepetlerin içerisine yerleştirilen kaynak metal, bu bot veya sepetten geçirilen yüksek akım sayesinde oluşan yüksek sıcaklıkta buharlaşır. Buharlaşan malzeme kaynakların üzerinde yerleştirilmiş örnek tutucuya sabitlenmiş örnek üzerinde yoğunlaşır. Kaplama kalınlığı quartz kristal osilatörü yöntemi ile kaplama sırasında ölçülebilmektedir.

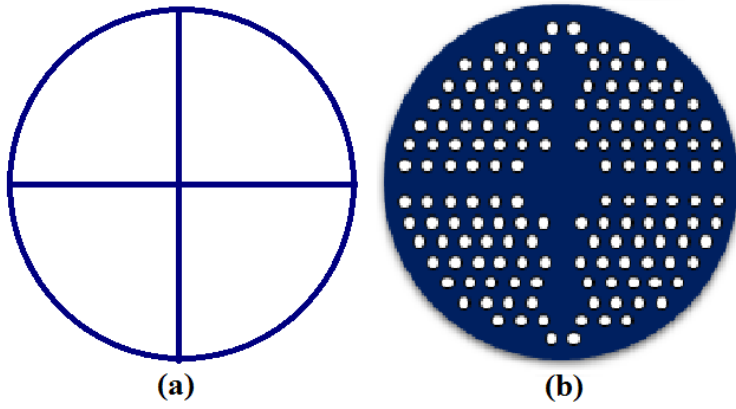


Resim 3.1. Vaksis - PVD handy termal organik buharlaştırma sistemi

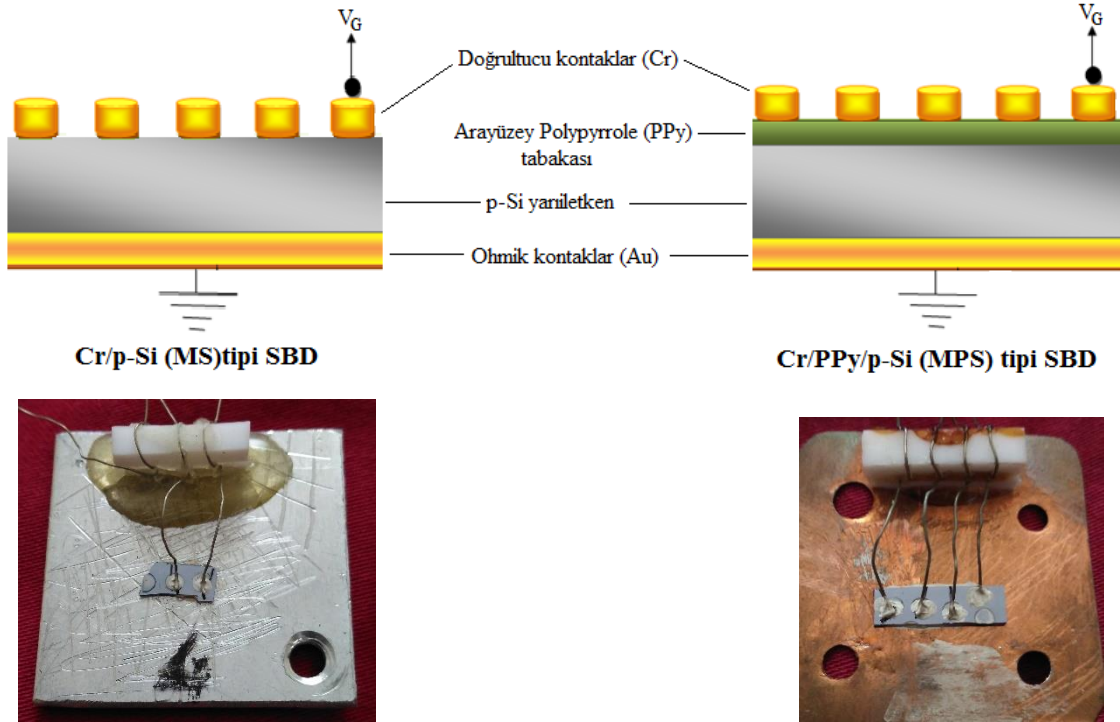
3.4. Kristal Temizleme, MS ve MPS Yapılarının Hazırlanması

Bilindiği gibi ideale yakın bir Schottky diyot elde edebilmek için yarıiletken yüzeyi çok temiz olmalıdır. Çünkü iyi temizlenmiş bir yarıiletken çok sayıda yüzey kusurunu ortadan kaldırır. Kristal üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için kimyasal temizleme işlemi yapılmıştır. Hem Cr/p-Si (MS) hem de Cr/Polypyrrole (PPy)/p-Si (MPS) tipi SBD'ları (Schottky engel diyotları) üretilirken Bor katkılı (p tipi), 100 yönelimli, ~300 µm kalınlıklı ve 0,4 Ω cm öz dirençli tek kristal Silisyum (Si) yarıiletkeni kullanılmıştır. Kullanılan kristaller sigma-aldrich firmasından, fabrikasyon yöntemiyle bir yüzeyi parlatılmış olarak, kullanılan PPy polimeri de yine aynı firmadan hazır olarak satın alınmıştır. Temizleme işleminde direnci yaklaşık 16-18 MΩ olan deiyonize su (H₂O) kullanılmıştır. Bu deiyonize su (saf su) RO&UP Water Purification System ile elde edilmiş bir üründür. Tüm kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içinde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle kristalleri tutmak için kullanılan cımbız v.b araç ve kaplar fırında yaklaşık 80 °C ısıtılarak sterilize edilmiş daha sonra hidrojen peroksit (H₂O₂), aseton ve ardından da deiyonize su ile iyice durulanmıştır. Kristaller ilk önce 20 ml trikloretilen (C₂HCl₃), daha sonra 20 ml aseton ve en son da 20 ml metil alkol (CH₃OH) karışımı içerisinde üç dakika ultrasonik olarak temizlenmiş ve kristaller deiyonize suda 5 dakika yıkanmıştır. 30 ml sülfürik asit (H₂SO₄) ve 30 ml hidrojen peroksit (H₂O₂) karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlenmiş ve daha sonra deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır. 30 ml %38 hidroflorik asit (HF) ve 30 ml deiyonize su karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlenmiş, deiyonize suda 10 dakika ultrasonik olarak yıkanmış ve 30 ml nitrik asit (HNO₃), 10 ml hidroflorik asit (HF) ile 50 ml hidrojen peroksit (H₂O₂) karışımında 5 dakika ultrasonik olarak temizlenmiştir. Daha sonra deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır. 40 ml %38 hidroflorik asit (HF) ve 50 ml deiyonize su karışımında 3 dakika ultrasonik olarak temizlenmiş ve son olarak Si yapraklar deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika temizlenmiştir. Son olarak da kristal yüzeyde oksitlenme olasılığını önlemek için kuru azot (N₂) ile kurutulduktan sonra hemen vakum ortamına alınmış ve yüksek vakum termal buharlaştırma sisteminde yaklaşık 10⁻⁶ Torr basınçta p-Si numunelerin bütün arka yüzeyleri Şekil 3.3 (a)'da verilen maske kullanılarak % 99,999 saflıkta ve 1200 Å kalınlığında Au ile termal olarak buharlaştırılmıştır. Düşük öz dirençli ohmik arka kontak elde etmek için numuneler nitrojen ortamında yaklaşık 450 °C de tavlanmıştır. Arayüzey tabakasının diyotun elektriksel özellikleri üzerine etkisini görmek için PPy arayüzey

tabakası p-Si/Au yapılarından biri üzerine Vaksis - PVD handy termal organik buharlaştırma sistemi (Resim 3.1) ile büyütülmüştür ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ları elde edilmiştir. Daha sonra doğrultucu kontakların yapılması için her iki numune üzerine aynı yüksek vakum termal buharlaştırma sisteminde Şekil 3.3 (b)'de verilen maske kullanılarak 1 mm çaplı ($7,85 \times 10^{-3} \text{cm}^{-2}$) ve $\sim 1200 \text{ \AA}$ kalınlıklı yüksek saflıkta Cr dotlar büyütülmüştür. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ların üretim süreci de böylece tamamlanmıştır ve şematik gösterimleri Şekil 3.4'de verilmiştir.

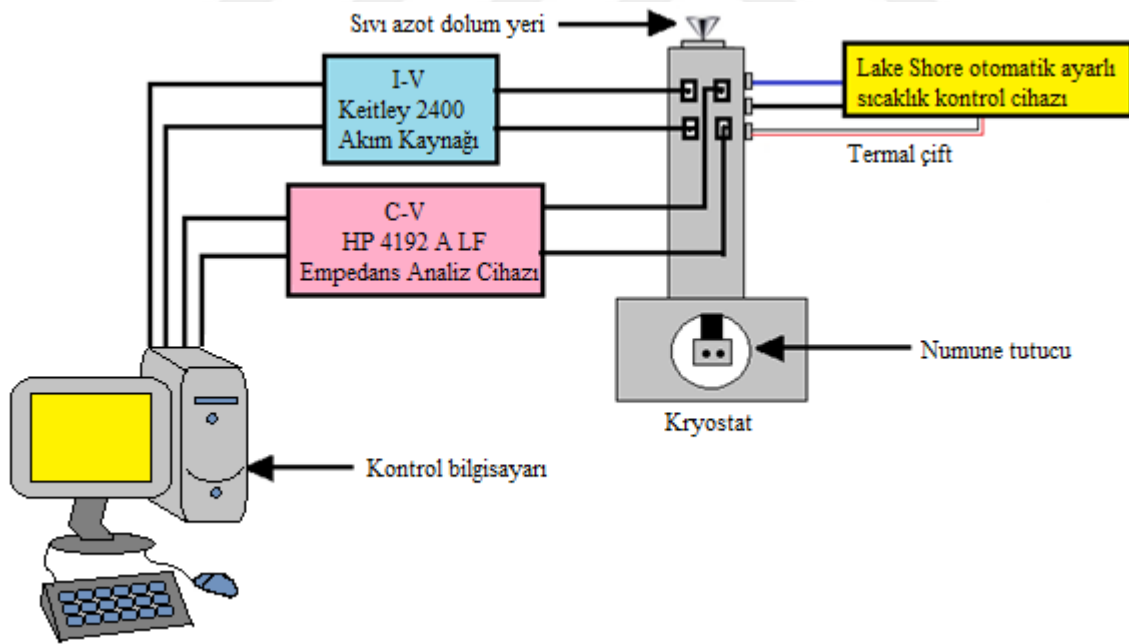


Şekil 3.3. (a) Ohmik kontak ve (b) Doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maskeler.



Şekil 3.4. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ların gösterimi

Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ların üretilmesinden sonra pozitif ve negatif voltajda I-V, C-V ve G/ ω -V ölçümlerinin alınabilmesi için numuneler bakır tutucu üzerine gümüş tutkal yardımıyla yapııştırılmıştır. Üst elektriksel kontaklar için gümüş tutkal ve yine gümüş kaplı ince teller kullanılmıştır. Hem pozitif hem de negatif voltajda I-V ölçümleri için Keitley 2400 akım-gerilim kaynağı, C-V ve G/ ω -V ölçümleri için de HP4192A LF empedans analizörü (5 Hz-13 MHz) kullanılmıştır. I-V, C-V ve G/ ω -V ölçümleri alınırken oda sıcaklığında uygun vakum ortamı sağlayabilmek için numuneler Janis vpf-475 kriyostat içine yerleştirilmiş ve Lake Shore model 321 Autotaning Temperature Controller yardımıyla sıcaklık oda sıcaklığında sabit tutulmuştur. Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.5'de gösterilmiştir. C-V ve G/ ω -V ölçümleri 10 kHz- 5 MHz frekans aralığında yapılmıştır. Ayrıca tüm ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen C-V ölçümlerinden yani C_i arayüzey durum kapasitansından ($=\epsilon'\epsilon_0 A/d_i$), PPy arayüzey tabakasının kalınlığı (d_i) 55 Å olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi

3.4.1. Akım-gerilim kaynağı

Resim 3.2'de Keithley 2400 akım-gerilim ölçüm cihazı görülmektedir ve hem akım kaynaklı gerilim ölçümü, hem de gerilim kaynaklı akım ölçümü yapabilmektedir. Bu cihaz

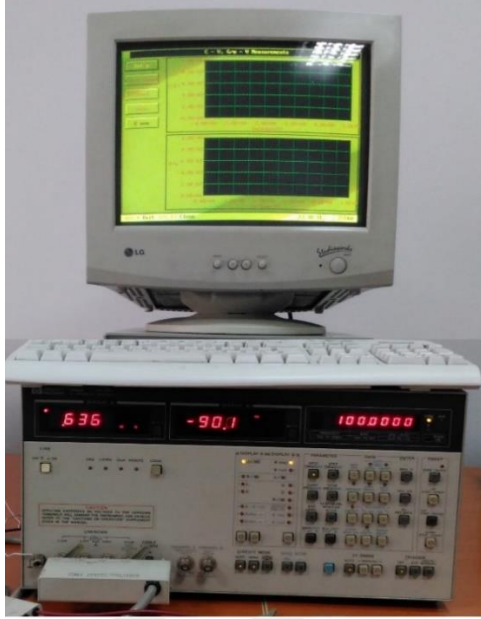
$\pm 1 \mu V$ ' dan $\pm 200 V$ ' a gerilim ölçümü ve $\pm 10 pA$ ' den $\pm 1 A$ ' e kadar akım ölçüm gücüne sahiptir. $\pm \% 0,15$ hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Ölçümler Hewlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi.



Resim 3.2. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı.

3.4.2. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçüm sistemi

Frekansa bağlı kapasitans-voltaj ve kondüktans voltaj ölçümlerini almak için Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analizörü kullanıldı. Resim 3.3'de verilen HP4192A LF empedans analizörünün frekans ölçümleri sınırları 5 Hz-13 MHz olup, osilatör genlik aralığı 5 mV-1 V arasındadır. Doğru akım, ileri ve ters besleme özelliğine sahip cihazın -35 V tan +35 V' a kadar ayarlanması mümkündür. Aynı anda empedans, admitans, kapasitans, indüktans ölçebilmekle birlikte, aralarındaki faz değerlerini ve kalite faktörlerini de ölçebilmektedir. $\pm \% 0,15$ hassasiyetle ölçüm yapabilen cihaz IEEE-488 arayüzü veri yoluna sahip olup test point yazılımı yardımı ile bilgisayar ile kontrol edebilmek mümkündür.



Resim 3.3. HP 4192 LF empedans analizörü

3.4.3. Kriyostat ve sıcaklık kontrol sistemi

Dış etkenlerin tüm ölçümler üzerindeki etkisini azaltmak için hazırlanan Schottky engel diyotların I-V ölçümleri 4 optik pencereli bir Janis vpf-475 kriyostat içinde yaklaşık 10^{-2} mbar basınçta gerçekleştirildi. Bu makine, Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemine sahiptir ve 77 °K ile 450 °K sıcaklık aralığında ve $\pm 0,1$ °K hassasiyetiyle ölçüm yapabilmektedir.



Resim 3.4. Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi (solda) ve Janis vpf-475 kriyostat

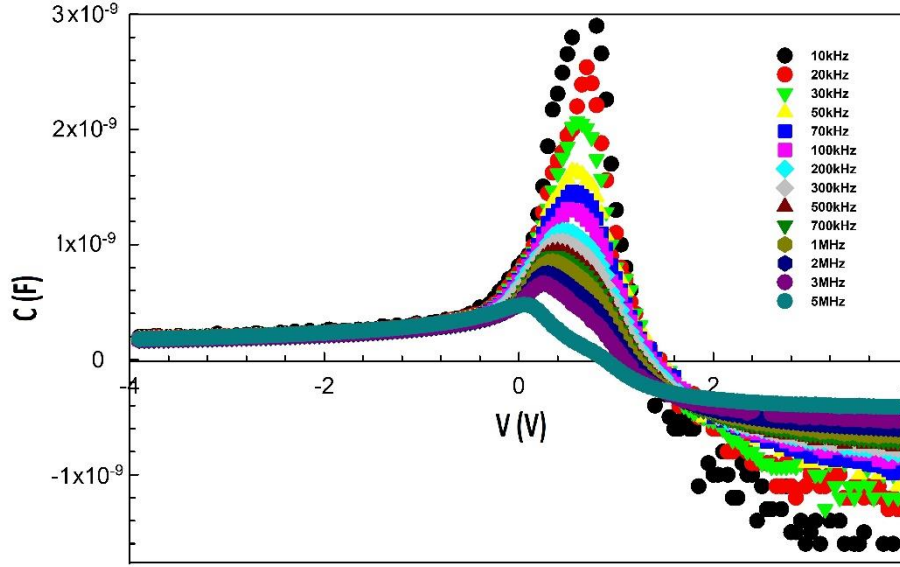


4. DENEYSEL SONUÇLAR

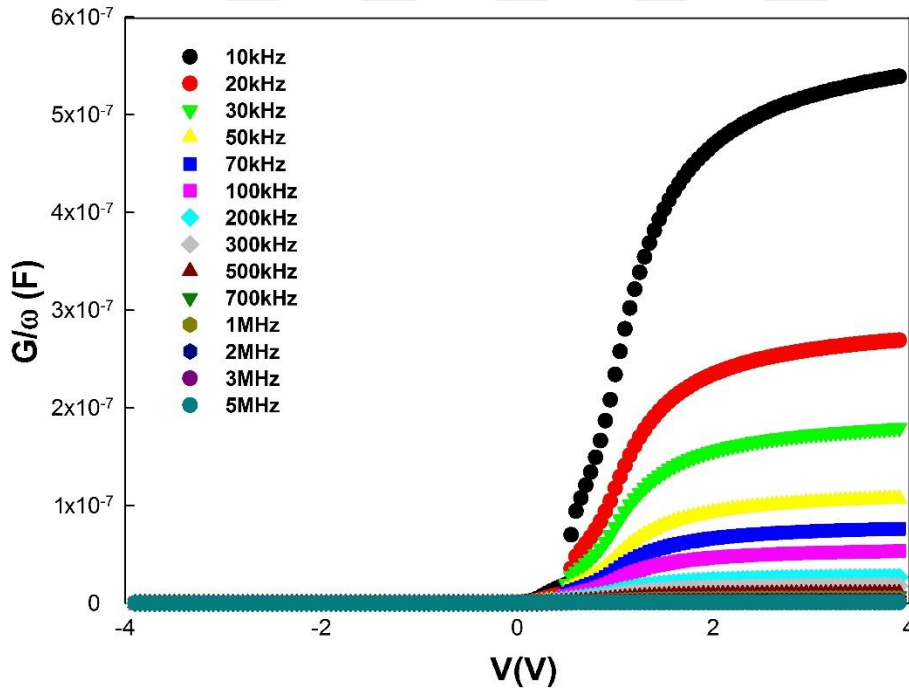
4.1. Cr/p-Si (MS) tipi SBD'un frekansa bağı C-V karakteristikleri

MS tipi Schottky engel diyotu ile MIS veya MPS tipi Schottky engel diyotlarının birbirinden farklı özellikler gösterdiği bilinen bir gerçektir [16]. Metal ve yarıiletken arasında bir ara yüzey tabakasının varlığı, yapının C-V ve G/ω -V karakteristiklerini ideal ya da MS tipi Schottky engel diyotlara göre önemli ölçüde değiştirmektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 Cr/p-Si (MS) tipi Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında sırasıyla deneysel C-V ve G/ω -V karakteristiklerini göstermektedirler. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi MS tipi Schottky engel diyotun her bir frekans için C-V eğrileri tükenim, terslenim ve yığılma bölgelerine sahiptir.

Şekil 4.1'den görüldüğü gibi C değerleri uygulanan voltaj ile artmış ve sonra yaklaşık 0,5 V da bir anormal pik vermiştir. C'nin pozitif voltaj bölgesinde verdiği bu pik değerleri frekans arttıkça azalmaktadır ve pik pozisyonu artan frekansla negatif voltaj yönünde kayma göstermektedir. Çünkü farklı yaşama ömürlerine sahip ara yüzey durumları söz konusudur ve bunlar dışardan uygulanan a.c. sinyali düşük frekanslarda takip edebilirler ancak yüksek frekanslarda takip edemezler. Bu yüzden düşük frekanslarda deneysel değerlere (C_m ve G_m) ara yüzey durumlarından gelen bir katkı ile bir ilave kapasitans (C_{ex}) ve ilave kondüktans (G_{ex}) etkisi söz konusu olur. Pozitif voltaj C-V eğrilerindeki bu anormal pik N_{ss} 'lerin yoğunluk dağılımına, R_s 'ye ve yüzey kutuplaşmasına atfedilebilir [16].



Şekil 4.1. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-5 MHz frekans aralığında ölçülen C-V karakteristikleri

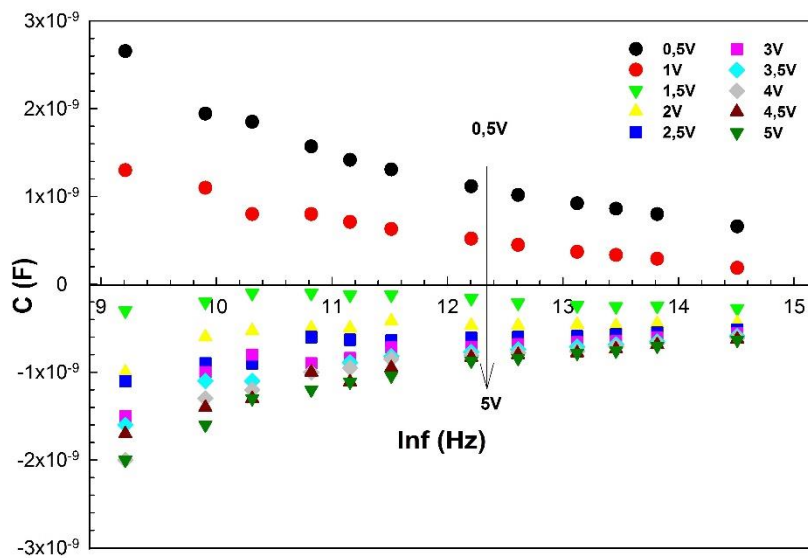


Şekil 4.2. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-5 MHz frekans aralığında ölçülen G/ω -V karakteristikleri

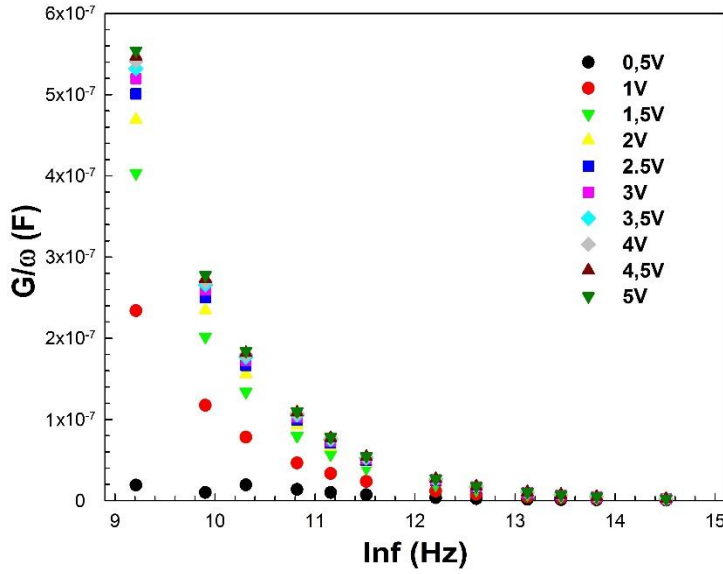
Pozitif voltajda C-V eğrilerinde anormal pik için literatürde deneysel ve teorik birçok çalışma mevcuttur [31]. Yığılma bölgesinde böyle bir anormal pikin kaynağı Ho ve arkadaşları [27] ile Tunç ve arkadaşları [15] tarafından metal ve yarıiletken arasında N_{ss} 'lerin varlığına atfedilmektedir. Diğer taraftan Werner ve arkadaşları [28], Bati ve arkadaşları [29] ve Yücedağ ve arkadaşları [30], pozitif voltajda C-V eğrisindeki anormal

pikin nedeninin R_s olduğunu söylemişlerdir. Wu ve Yang [31] ile Chattopadhyay ve arkadaşları [32] deneysel C-V eğrilerindeki anormal piklerin hem R_s hem de N_{ss} den kaynaklandığını söylemişlerdir. Yine Şekil 4.1'e bakıldığında pik noktasından sonra kapasitans hızla azalmaya başlamakta ve her bir frekansta negatif değerlere doğru gitmektedir. Kapasitansın aksine Şekil 4.2'de görüldüğü gibi aynı pozitif voltaj değerlerinde G/ω hızlı bir şekilde artmaya başlamakta ve C'nin ileri pozitif voltaj değerlerinde maksimum değer almaktadır. Pozitif voltaj ya da yığılma bölgelerinde NC ve anormal pik gözlenmesi elektrotlardaki yüklerin sayısında bir azalma olduğunun göstergesidir [16]. Yakın zamanlarda NC ve anormal pikin sebebi Altındal ve arkadaşları [16] ile Vural ve arkadaşları [57] tarafından hem N_{ss} hem de R_s olarak açıklanmıştır.

C ve G/ω değerlerinin her ikisinin de hem frekansa hem de voltaja bağlı olarak değiştiği görülmektedir. C ve G/ω 'daki voltaja bağlı değişim terslenim bölgesinde önemsiz iken tükenim ve yığılma bölgelerinde oldukça etkin olmaktadır. Bu yüzden uygulanan voltajın etkisini açıklayabilmek için farklı voltajlarda C-f ve G/ω -f eğrileri çizilmiş ve Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sırasıyla gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi hem C hem de G/ω değerleri yüksek frekanslarda voltaja bağıllık göstermektedir. Ayrıca Şekil 4.3'ten görüldüğü gibi C'nin pozitif değerleri artan frekansla azalırken negatif değerleri artan frekansla artmaktadır. C'nin tersine G/ω değerleri ise her bir voltajda artan frekansla exponansiyel olarak azalmaktadır.



Şekil 4.3. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında farklı voltajlarda C-f karakteristikleri.



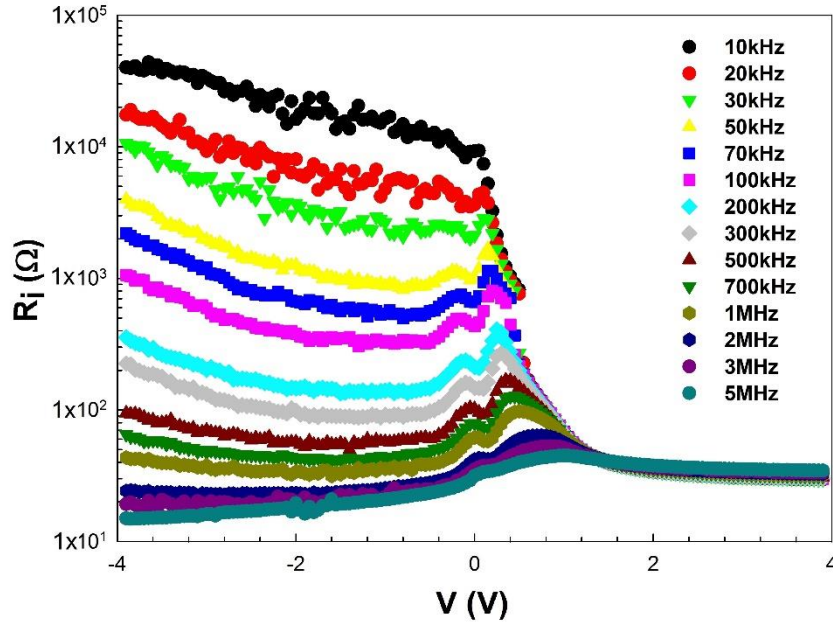
Şekil 4.4. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında farklı voltajlarda G/ω -lnf karakteristikleri

R_s Schottky engel diyotlarında çok önemli bir parametredir ve C ve G/ω 'nın voltaja bağlı karakteristiklerinde ideal davranışını etkilemektedir. R_s 'nin gerçek değeri Nicollian ve Brews tarafından geliştirilmiş olan admitans metodu ile güçlü yığılma bölgesinde hesaplanabilmektedir ve bu metot yapının voltaja bağlı rezistansının (R_i)'de hesaplanmasında kullanılabilir [26]. Bu yüzden bu çalışmada hem frekansa hem de voltaja bağlı R_i değerleri deneysel C_m ve G_m/ω değerleri kullanılarak her bir frekansta aşağıdaki eşitlik kullanılarak elde edildi;

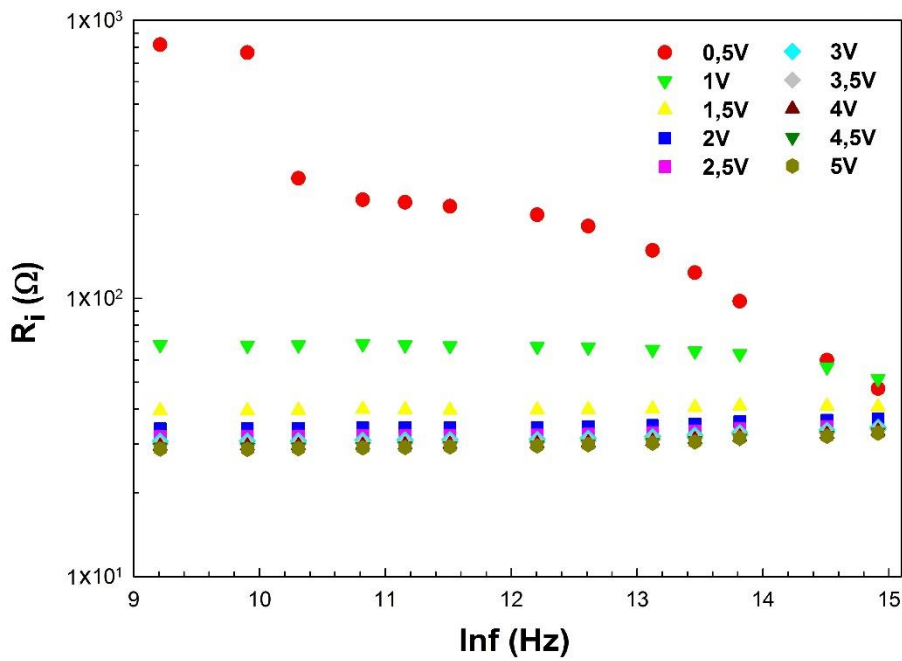
$$R_i = \frac{G_{mi}}{G_{mi}^2 + \omega^2 C_{mi}^2} \quad (4.1)$$

Burada C_{mi} ve G_{mi}/ω değerleri deneysel olarak herhangi bir voltajda ölçülen kapasitans ve kondüktans değerleridir. Dolayısıyla hem frekansa hem de voltaja bağlı R_i değerleri, C_{mi} ile G_{mi}/ω değerleri kullanılarak hesaplandı ve sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 da verildi. Bu R_i değerleri R_s 'nin C-V ve G/ω karakteristiklerine etkisini görebilmek için çok önemlidir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi her bir voltajda artan frekansla R_i değerleri azalmaktadır, ancak yüksek voltajlarda ya da yığılma bölgesinde frekansa bağımlılık giderek azalmaktadır. R_s -V eğrisi 0V ve 1V arasında neredeyse bütün frekanslarda iki tane pik vermektedir. Bu piklerin değerleri artan frekansla azalmakta ve pik pozisyonları uygulanan voltajla yeniden

düzenlenme ve yeniden birleşme nedeniyle pozitif bölgeye doğru kaymaktadır [26]. R_s değerlerinin voltaja ve frekansa bağlılığı Şekil 4.6' dan da görülebilmektedir.



Şekil 4.5. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-5 MHz frekans aralığında R_i -V karakteristikleri



Şekil 4.6. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında farklı voltajlarda R_i -f karakteristikleri

R_s etkisi MS ya da MIS tipi Schottky engel diyotlarında özellikle yüksek frekanslarda ve yığılma bölgesinde elektriksel parametrelerin gerçek değerlerinde ciddi hatalara neden olabilir. Hesaplamalarda hatalardan kaçınmak için yüksek frekanslarda C ve G/ω değerleri için R_s etkisinden arındıracak bir düzeltme yapılmalı. C ve G/ω değerlerindeki R_s etkisini görebilmek için 1MHz de bütün voltajlarda aşağıdaki eşitlikler kullanılarak C ve G/ω değerleri için düzeltilmiş yeni değerler elde edildi ve sırasıyla Şekil 4.7 ve 4.8’de sırasıyla gösterildi [26]:

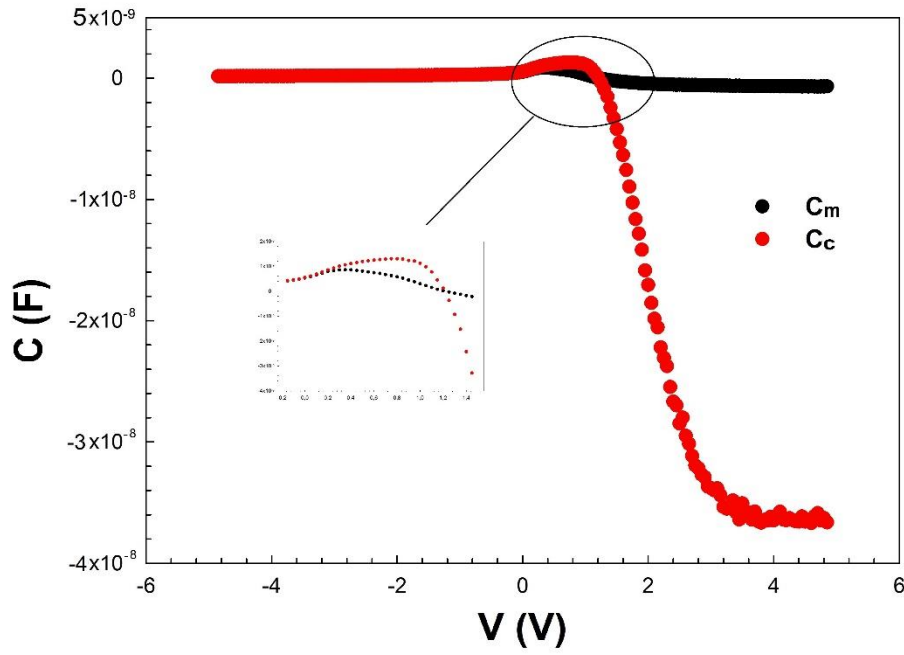
$$C_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{\alpha^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.2)$$

$$G_c / \omega = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] \alpha}{\alpha^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.3)$$

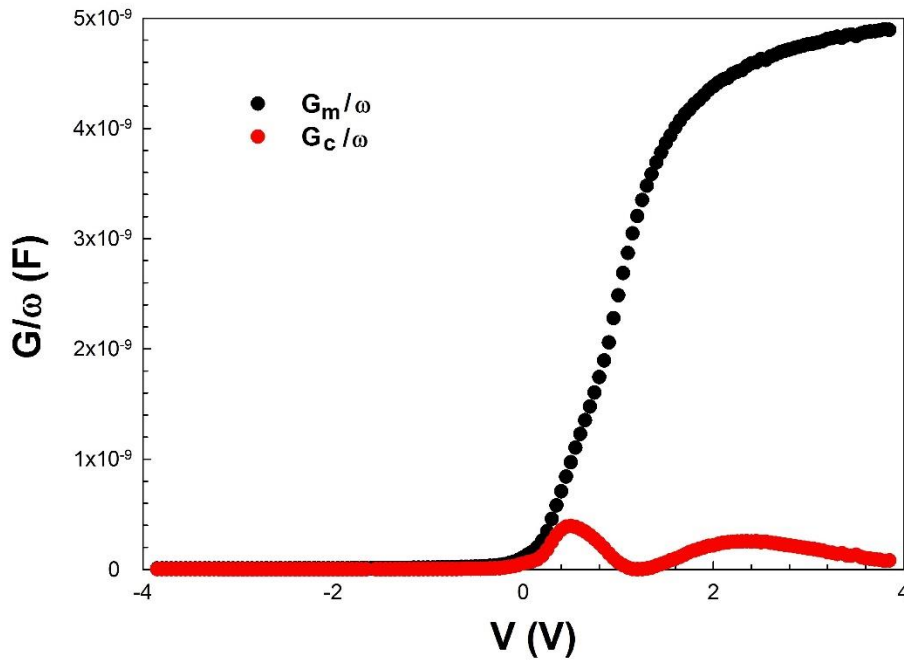
Burada α sabiti aşağıda verilen ifade ile hesaplandı;

$$\alpha = C_m - [G_m^2 + (\omega C_m)^2] R_s \quad (4.4)$$

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi C_c -V eğrilerinde düzeltme yapıldığı zaman C_c değerleri özellikle tükenim ve yığılma bölgelerinde uygulanan voltajla artmaktadır. Diğer taraftan Şekil 4.8’de görüldüğü gibi G_c/ω -V eğrileri tükenim bölgesinde iki pik vermektedir. Bu durum yük geçişlerinin ara yüzey seviyeler arasında gerçekleşebileceğinin kanıtıdır. Bu iki pikin kaynağı için metal yarıiletken ara yüzeyinde N_{ss} ’lerin iki farklı enerji seviyesinde lokalize olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu durum R_s ’nin özellikle tükenim ve yığılma bölgelerinde çok etkili olduğunun kanıtıdır. Bu yüzden frekansa ve voltaja bağlı elektriksel karakterizasyon hesaplamalarında R_s etkisi mutlaka dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.7. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında düzeltilmiş C_c -V karakteristikleri

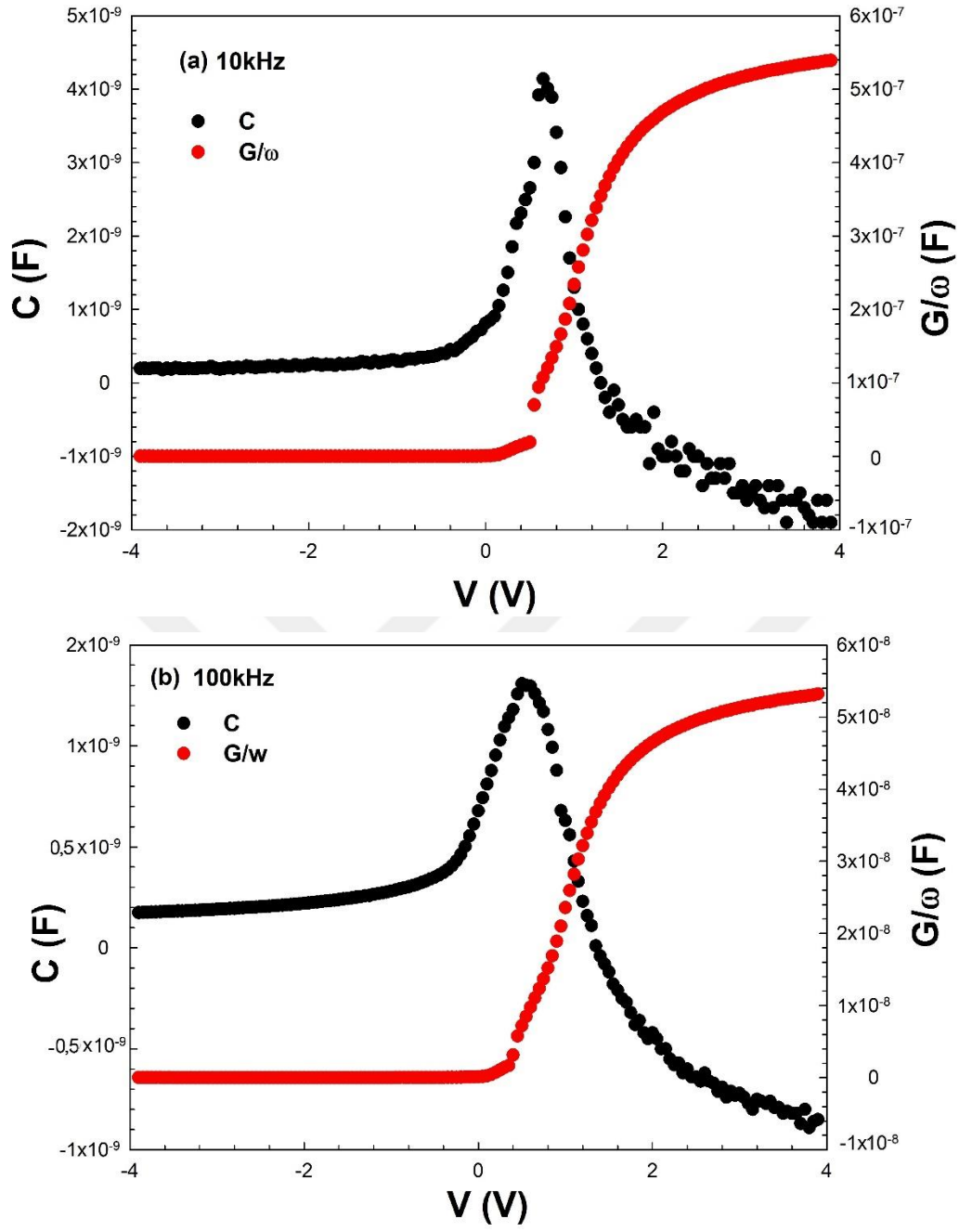


Şekil 4.8. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında düzeltilmiş G_c/ω -V karakteristikleri

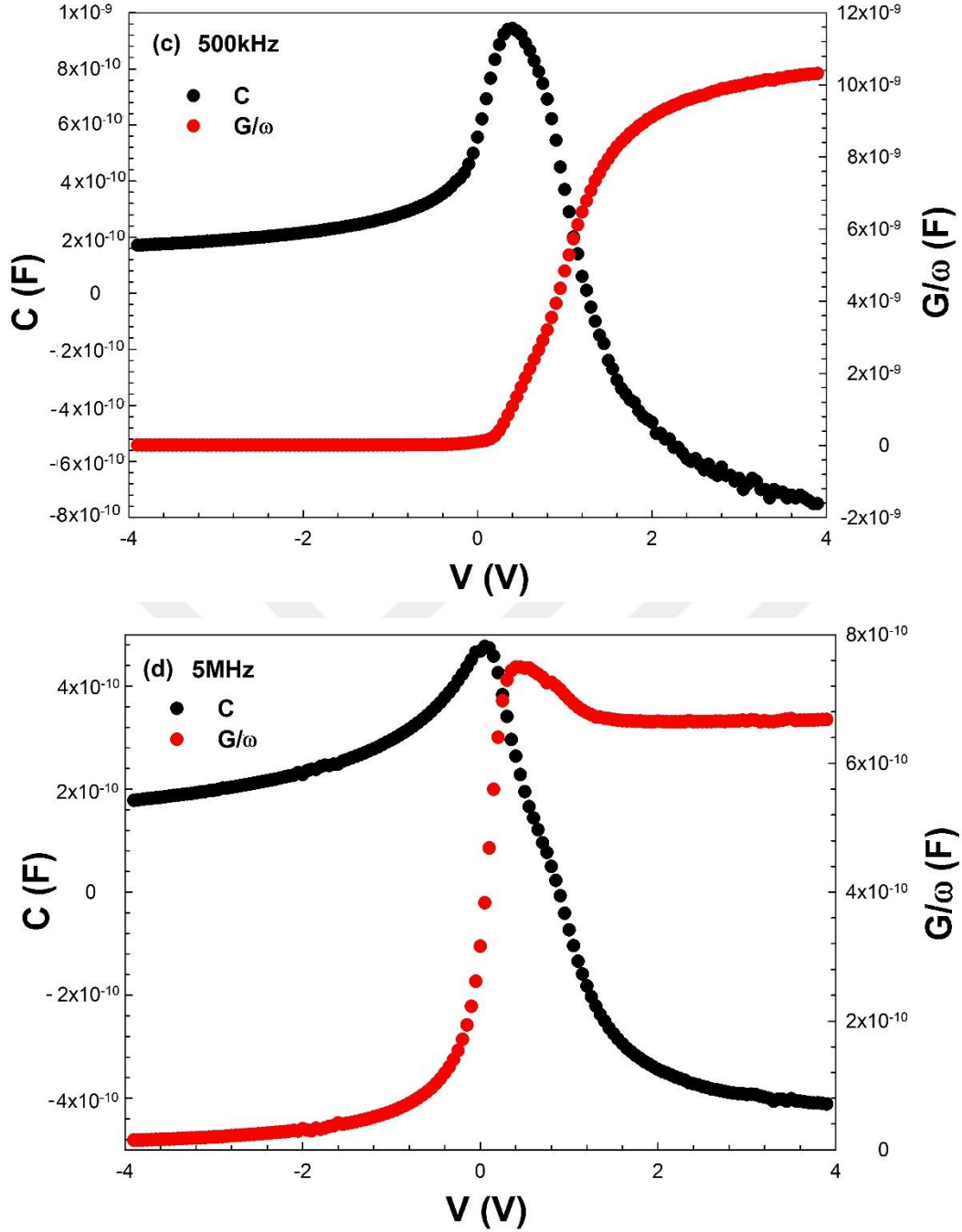
Cr/p-Si Schottky engel diyotunda C ve G/ω 'nın voltaja bağlı değişimini görebilmek için C - V ve G/ω - V eğrileri dört farklı frekans için (10 kHz, 100 kHz, 500 kHz, 5 MHz) sırasıyla çizildi ve Şekil 4.9 (a-d)'de gösterildi. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi C - V eğrileri bir pik

verdikten sonra C değerleri artan voltajla azalmakta ve sırasıyla 1,45 V, 1,35 V, 1,25 V ve 0,9 V değerlerinde negatif değerler almaya başlamaktadır. Kapasitans değerlerinin aksine G/ω değerleri artan voltajla artmakta ve her bir frekans için yığılma bölgesinde daha hızlı bir şekilde artmaya başlamaktadır. Diğer bir deyişle C 'deki azalma G/ω 'daki artmaya karşılık gelir. Hatta güçlü yığılma bölgesinde (yaklaşık 4 V) C 'nin minimum olduğu nokta ile G/ω maksimum olduğu noktaya karşılık gelmektedir. C 'nin bu davranışı yani C değerlerinin azalması yapıda artan polarizasyon ve daha fazla taşıyıcı olması olarak yorumlanır [16]. Schottky engel diyotlarında çok büyük NC görölmesi R_s , N_{ss} ve doğal ya da katkılanmış ara yüzey tabaka varlığı nedeniyledir. Son olarak her bir frekansta NC'ın varlığı diyotun kondüktansını maksimuma götürür.





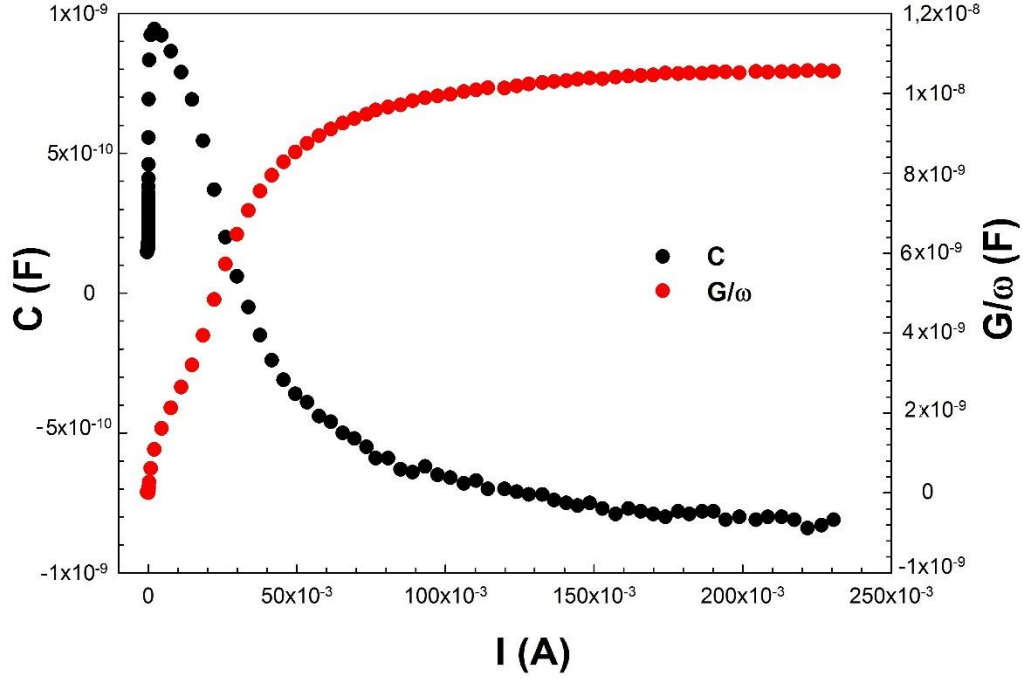
Şekil 4.9. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında sırasıyla (a) 10 kHz, (b) 100 kHz, (c) 500 kHz, (d) 5 MHz, frekanslarda C-V ve G/ω -V karakteristikleri



Şekil 4.9. (devam). Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında sırasıyla (a) 10 kHz, (b) 100 kHz, (c) 500 kHz , (d) 5 MHz, frekanslarda C-V ve G/ω -V karakteristikleri

Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında, 500 kHz frekansta kapasitans ve kondüktans eğrileri akıma (I) karşı çizildi ve Şekil 4.10'da gösterildi. Şekil 4.10'da da Şekil 4.9'dakine benzer olarak C değerleri kritik voltajda negatif değerlere gitmekte ve C'nin minimum değerleri kondüktansın maksimum değerlerine karşılık gelmektedir. Şekil 4.9 ve 4.10'da görüldüğü gibi pozitif voltaj bölgesinde ya da yığılma bölgesindeki NC

empedans ya da admitans'a ($Z=1/Y$) gelen indüktif katkı nedeniyledir. Ayrıca yarıiletken içinde azınlık taşıyıcıların artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [16].



Şekil 4.10. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında C-I ve G/ω -I karakteristikleri

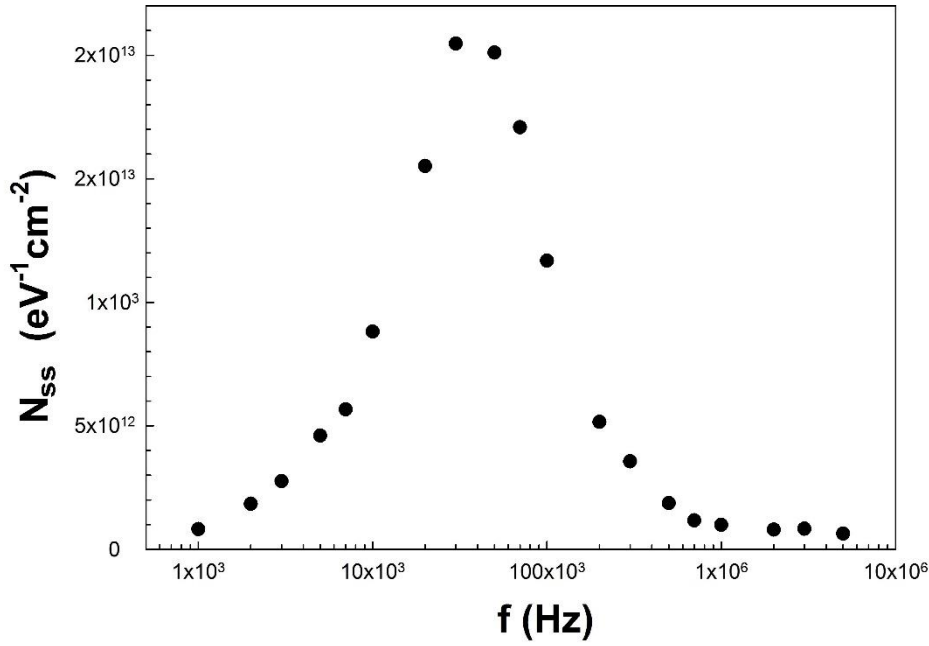
Frekansa bağlı olarak N_{ss} 'lerin yoğunluk dağılım profili Hill- Coleman metodu kullanılarak elde edildi [58]. Bu metoda göre N_{ss} değerleri her bir frekans için C ve G/ω değerlerini içeren aşağıdaki eşitlik kullanılarak tespit edilebilmektedir;

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G/\omega)_m}{((G/\omega)_m / C_i)^2 + (1 - C_m / C_i)^2} \quad (4.5)$$

Burada, A diyot ya da doğrultucu kontak alanı, ω ($=2\pi f$) açısal frekans, C_m ölçülen kapasitansın pik değerleri, $(G/\omega)_m$ C'nin pik değerlerine karşılık gelen voltaj değerlerindeki kondüktans değerleri ve C_i arayüzey tabakanın kapasitans değeridir. C_i değerleri C-V ve G/ω -V ölçümlerinden aşağıdaki eşitlik kullanılarak 25 nF olarak bulunmuştur [26]:

$$C_i = C_m \left[1 + \left(\frac{G_m}{\omega C_m} \right)^2 \right] \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.5 kullanılarak N_{ss} değerleri her bir frekans değeri için elde edildi ve Şekil 4.11’de gösterildi. Şekil 4.11’den görüldüğü gibi N_{ss} -f eğrisi yaklaşık 30 kHz de bir pik vermektedir. N_{ss} ’in frekansa bağlı böyle bir davranışı ara yüzey durumlarında yüklerin özel bir dağılımına atfedilebilir. C-V ve G/ω -V karakteristiklerde R_s , N_{ss} ve polarizasyon etkisini belirlemek için, bu ölçümler geniş bir frekans (10 kHz-5 MHz) ve voltaj aralığında ((-4V)-(+4V)) oda sıcaklığında alındı ve sonuçlar gösterdi ki tek bir frekans ya da tek bir voltaj için yapılan ölçümler elektriksel karakteristik ve iletim mekanizması hakkında bize bilgi veremeyecek kadar yetersiz kalmaktadır. Ayrıca bildiğimiz kadarıyla Cr/p-Si için çok az sayıda çalışma mevcuttur ve olanların çoğu akım-voltaj ilişkisi hakkındadır [33].

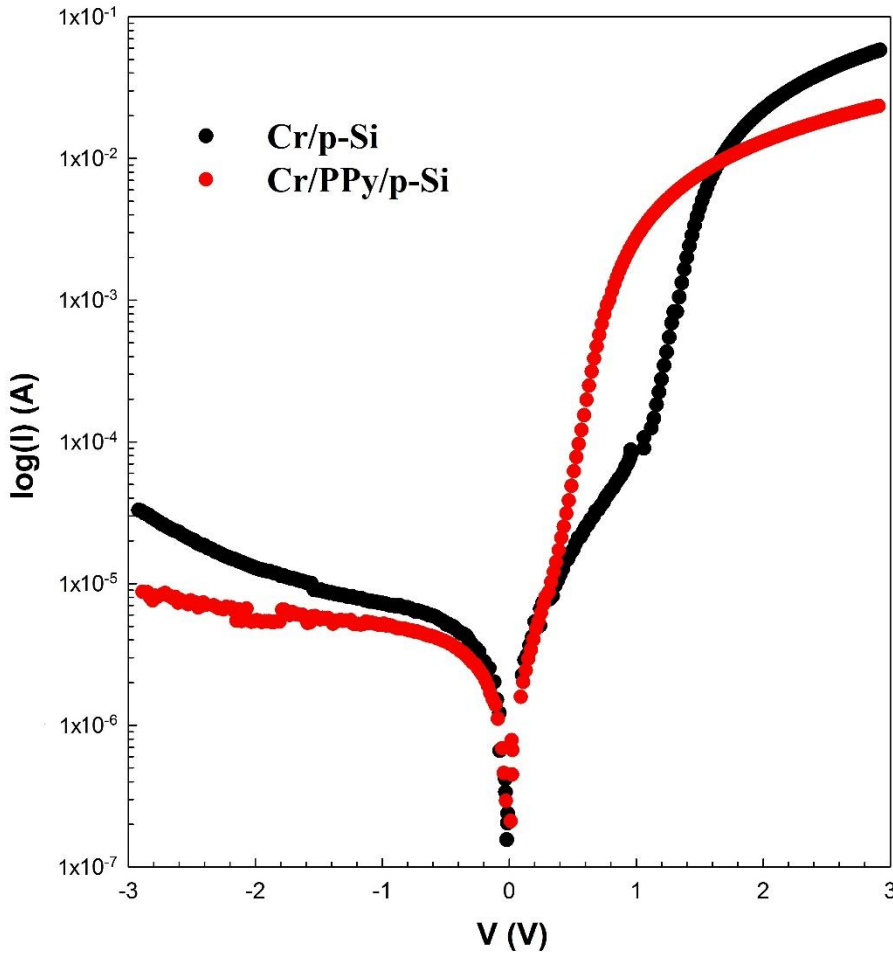


Şekil 4.11. Cr/p-Si Schottky engel diyotu için ara yüzey durumlarının yoğunluk dağılım profili (N_{ss} -f)

4.2. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ların karşılaştırılması

4.2.1. Akım-voltaj karakteristiklerinin karşılaştırılması

Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD ve referans Cr/p-Si (MS) tipi SBD'larının oda sıcaklığında pozitif ve negatif voltajda I-V ölçümleri elde edildi ve Şekil 4.12'de her iki diyot için birlikte verildi. Şekil 4.12'ye bakıldığında arayüzey PPy tabakasının varlığı nedeniyle MPS tipi SBD'un MS tipi SBD'tan oldukça farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca özellikle R_s nedeniyle her iki SBD'un ideal davranışlarından önemli ölçüde saptıkları görülmektedir. Ancak düşük ve orta gerilimlerinde R_i üzerine düşen voltaj diyota uygulanan voltaj yanında ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi, negatif voltajda akımın voltaja bağımlılığı zayıftır ve pozitif voltajda üstel olarak artan akım her iki diyot için doğrultucu davranış özellikleri göstermektedir. Diyotların doğrultma oranları $DO=I_F/I_R$ ifadesinden (-3V) ve (3V) voltaj değerlerine karşılık gelen akım değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Burada I_F (3V)'daki akım değeri, I_R ise (-3V)'daki akım değeridir. Hesaplamalara göre MS tipi SBD için doğrultma oranı 1810 iken MPS tipi SBD için 3888 olarak bulunmuştur. Yani PPy arayüzey tabakasının kullanımı doğrultma oranını yaklaşık olarak iki katına çıkarmaktadır. I-V eğrisi (Şekil 4.12) gösterdi ki Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD için kaçak akım değerleri Cr/p-Si (MS) tipi SBD'a göre daha azdır. Diğer taraftan her iki diyot için yeterince yüksek voltajlarda I-V eğrileri R_s etkisi nedeniyle lineerlikten sapmaktadır ancak bu sapma referans numunede daha fazladır.



Şekil 4.12. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için pozitif ve negatif voltajlarda yarı logaritmik I-V eğrileri

Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD için düşük ve orta voltaj bölgelerinde $\ln(I)$ -V karakteristiğinin lineer davranışı literatürde açıklanan sonuçlara benzer olarak diyotta akım ile uygulanan voltaj arasında açıkça üstel bir ilişki olduğunu göstermektedir [59-61]. Bu lineer davranış pozitif voltaj $\ln(I)$ -V karakteristiğinde paralel iki farklı engel yüksekliği olduğunu gösteriyor [59-61]. Bu yüzden, pozitif voltajda akım ve voltaj değerleri arasındaki ilişki aşağıda verildiği gibidir [61, 62]:

$$I = I_{s1} \left\{ \exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right\} + I_{s2} \left\{ \exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right\} + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (4.7)$$

Burada I_{s1} ve I_{s2} ters beslem doyuma akımıdır, n_1 ve n_2 ise SBD için idealite faktörleridir ve IR_s terimi R_s üzerine düşen voltajdır. Şekil. 4.12'de gösterildiği gibi I-V eğrileri aynı

voltaj aralığında Cr/p-Si (MS) tipi SBD için iki farklı lineer bölgeye sahip iken Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD için sadece bir lineer bölgeye sahiptir. Pozitif voltaj bölgesinde iki lineer bölge gözlenmesi genellikle paralel diyot modeli olarak adlandırılır. Eşitlik 4.7’de birinci ve ikinci terimler sırasıyla difüzyon ve yeniden birleşme akım bileşenlerini tanımlamak için kullanılır. Bu yüzden, I_0 , n ve Φ_{Bo} gibi temel diyot parametreleri her iki diyot için bu lineer bölgelerin eğimlerinden aşağıdaki eşitlik kullanılarak elde edildi ve bu değerler Çizelge 4.1’de verildi.

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (4.8)$$

$$\Phi_{Bo} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_s} \right) \quad (4.9)$$

Burada, A diyotun doğrultucu kontak alanı, Φ_{Bo} sıfır voltaj engel yüksekliği, A^* etkin Richardson sabiti (p-Si için değeri $32 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$), k Boltzmann sabiti ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

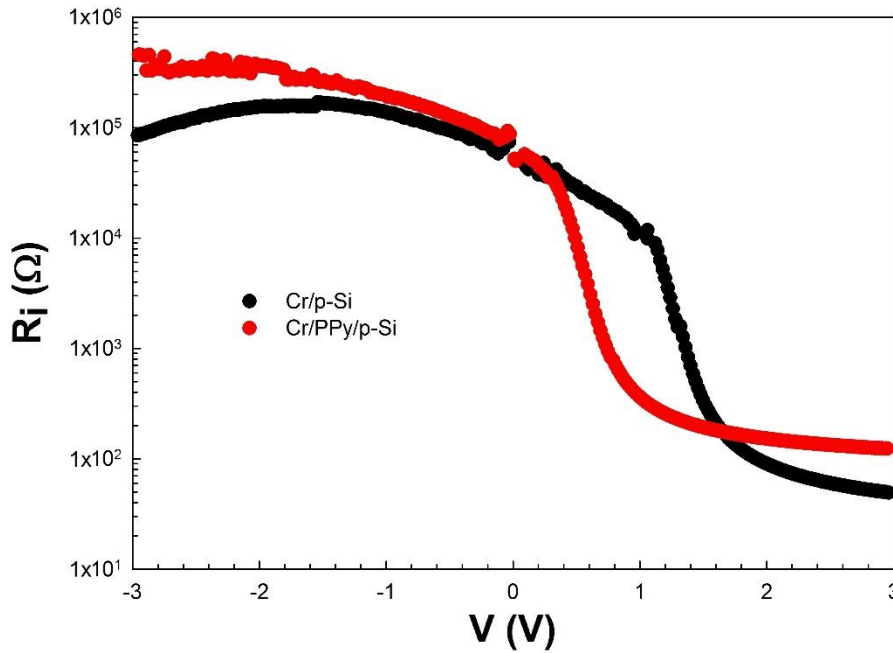
Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi, her iki diyot için n değerleri olması gerekenden yüksektir. Bu yüksek n değerleri metal-yarıiletken arayüzeyine yerleşmiş N_{ss} ’lerin yoğunluk dağılımı, doğal (SiO_2) ve katkılanmış (PPy) tabakaları ve engel yüksekliğindeki homojensizlikleri atfedilebilir [61, 63]. Hayali (image)-kuvvet etkisi, engel boyunca yeniden birleşme ve tünelleme durumları n değerlerinin olması gerekenden daha yüksek olmasına sebep olan diğer mümkün mekanizmalardır [42].

Çizelge 4.1. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD’lar için $\ln I$ - V verilerinden elde edilen bazı temel elektriksel parametreleri.

	n_1	$I_{01} \text{ (A)}$	$\Phi_{Bo1} \text{ (eV)}$	n_2	$I_{02} \text{ (A)}$	$\Phi_{Bo2} \text{ (eV)}$
Cr/p-Si	10,62	$2,32 \times 10^{-6}$	0,513	4,69	$1,10 \times 10^{-8}$	0,647
Cr/PPy/p-Si	4,27	$5,92 \times 10^{-7}$	0,548	—	—	—

SBD’un R_s ve N_{ss} değerleri çok önemli parametrelerdir ve pozitif voltaj I - V eğrilerini veya diyotun performansını etkilerler. Bu yüzden Ohm kanunu kullanılarak her iki diyot için

yapının R_i değerleri elde edildi R_i -V eğrisi çizildi ve Şekil 4.13’de gösterildi. Yeterince yüksek pozitif voltajlarda eğrinin sabitlendiği noktalardaki R_i değeri SBD’un gerçek R_s değerlerine en yakın olan değerlerdir. Bu şekilde grafiğe bakılarak R_s değerleri oda sıcaklığında sırasıyla MS tipi SBD için $52,4 \Omega$ ve MPS tipi SBD için $123,4 \Omega$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.12 ve 4.13’de görüldüğü gibi yaklaşık $1,6 \text{ V}$ ’da bir kesişme noktası mevcuttur. MPS tipi diyot için R_i değerleri kesişme noktasından önce daha düşük iken N_{ss} ’lerin parçacık yoğunluk dağılımı ve PPy arayüzey tabakası nedeniyle kesişme noktasından sonra daha yüksek olmaktadır. Yani diyotların dirençleri bölgesel homojensizlikler göstermektedir. Yine Şekil 4.12 ve 4.13’ye bakıldığında yeterince yüksek negatif voltajlarda eğrinin sabitlendiği noktalardaki R_i değeri SBD’un gerçek şönt direnç (R_{sh}) değerlerine en yakın olan değerleri vermektedir ve bu R_{sh} değerleri MS tipi SBD için $90 \text{ k}\Omega$ ve MPS tipi SBD için $450 \text{ k}\Omega$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.13. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD’lar için pozitif ve negatif voltajlarda yarı logaritmik R_i -V özellikleri.

Arayüzey tabaka kalınlığı 30 Å ’dan daha yüksek ise arayüzey durumları yarıiletkenle dengededir. Yani yarıiletkenle arayüzey durumları arasında yük geçişleri olur. Fakat $d_i < 30 \text{ Å}$ ise arayüzey durumları ile metal arasında yük geçişleri olur. Pozitif voltajdaki I-V verilerinden faydalanarak ve hem idealite faktörünün $n(V)$ hem de etkin engel

yüksekliğinin (Φ_e) voltaja bağlı değiştiği dikkate alınarak hesaplanabilmekte ve bunlara dair eşitlikler sırasıyla aşağıdaki gibi verilmektedir [3].

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{V - IR_s}{\ln(I/I_o)} \right) = 1 + \frac{d}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (4.10)$$

$$\Phi_e = \Phi_{Bo} + \beta(V - IR_s) = \Phi_{Bo} + \left(1 - \frac{1}{n(V)} \right) (V - IR_s) \quad (4.11)$$

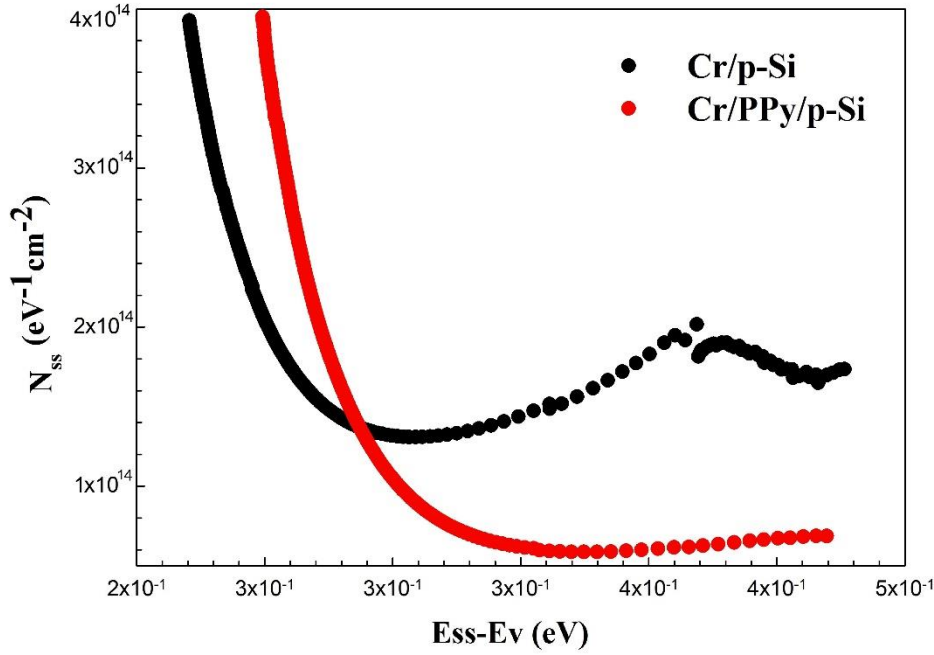
Burada β ($=d\Phi_e/dV=1-1/n(V)$) değeri Φ_e 'nin yerine kullanılan voltaj katsayısıdır. Bu ifadeler kullanılarak $n(V)$ ve Φ_e değerleri hesaplanmış ve bunlar kullanılarak N_{ss} 'ler hesaplanmıştır. Card ve Rhoderick tarafından önerilen N_{ss} 'lerin yoğunluğu ifadesi basitleştirilerek ve aşağıdaki gibi verilmiştir [9].

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{d_i} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right] \quad (4.12)$$

Burada d_i arayüzey yalıtkan tabakanın kalınlığı, W_D tükenim bölgesinin genişliği, ϵ_i ve ϵ_s sırasıyla arayüzey tabakanın ve yarıiletkenin dielektrik sabitleri ve ϵ_o boşluğun dielektrik sabitidir. Referans [61, 63]'e göre p tipi yarıiletken için N_{ss} 'lerin enerjisi yarıiletkenin yasak enerji bandının ortası ile yaklaşık olarak valans bandının üst kısmı arasındadır. Her iki diyot için W_D değeri deneysel C^2-V verilerinden 1 MHz frekansta $1,29 \times 10^{-5}$ cm olarak elde edilmiştir. N_{ss} 'lerin enerji seviyesi (E_{ss}) ve E_v 'deki seviyeler arasında aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi bir ilişki mevcuttur.

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (4.13)$$

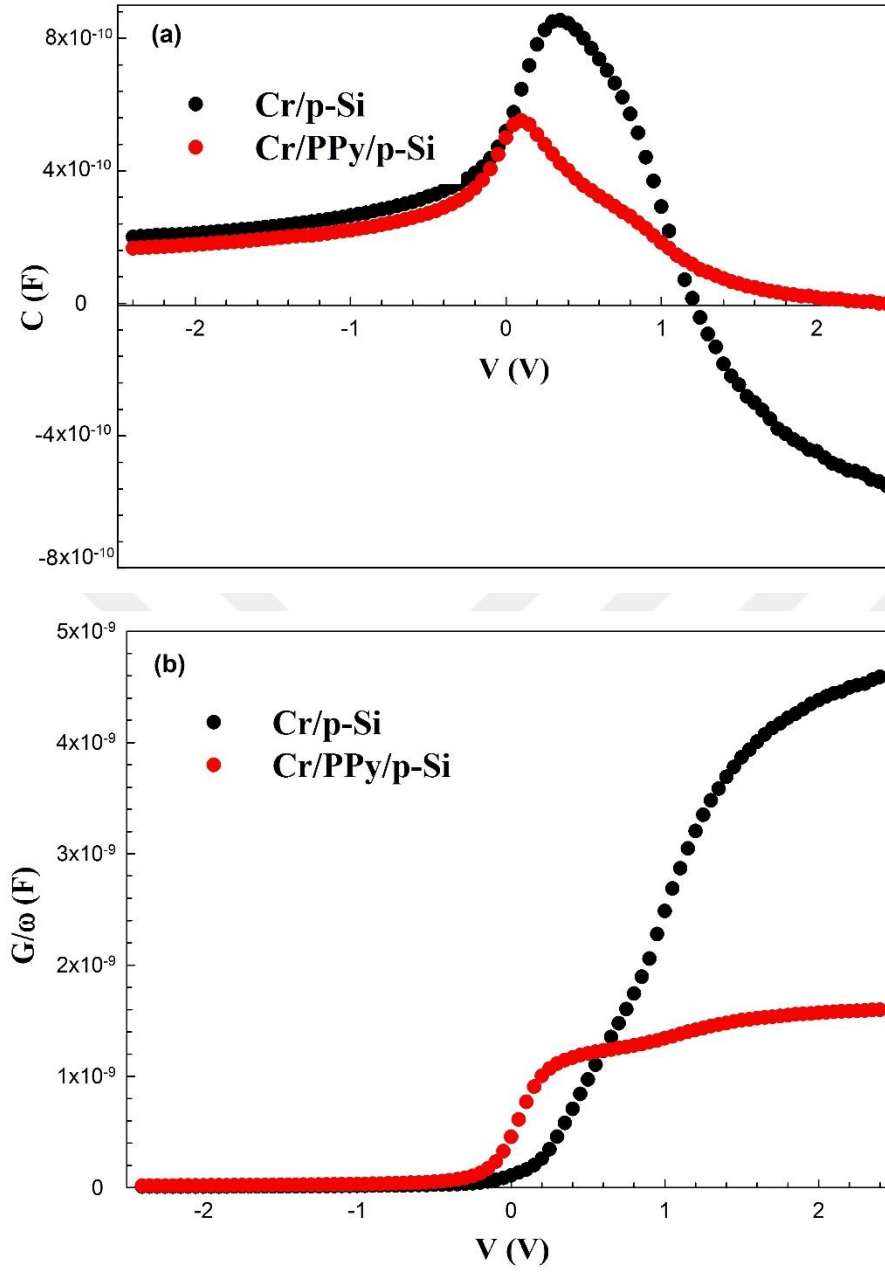
MS ve MPS tipi SBD'lar için N_{ss} 'lerin enerji yoğunluk dağılımı Eşitlik 4.12 ve 4.13 kullanılarak elde edildi ve aynı zamanda Şekil 4.14'te verildi. Şekil 4.14'ten görüldüğü gibi her iki diyot için de N_{ss} 'ler yaklaşık olarak Si'un yasak bandı ortalarından E_v 'nin üstüne doğru üstel olarak büyümektedir. PPy arayüzey tabakasının pasivasyon etkisi nedeniyle Si'un yasak enerji bölgesinde MPS tipi diyot için N_{ss} 'lerin değerleri, MS tipi SBD için olan değerlerinden önemli ölçüde düşüktür.



Şekil 4.14. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için arayüzey durumlarının (N_{ss}) enerji yoğunluk dağılımı

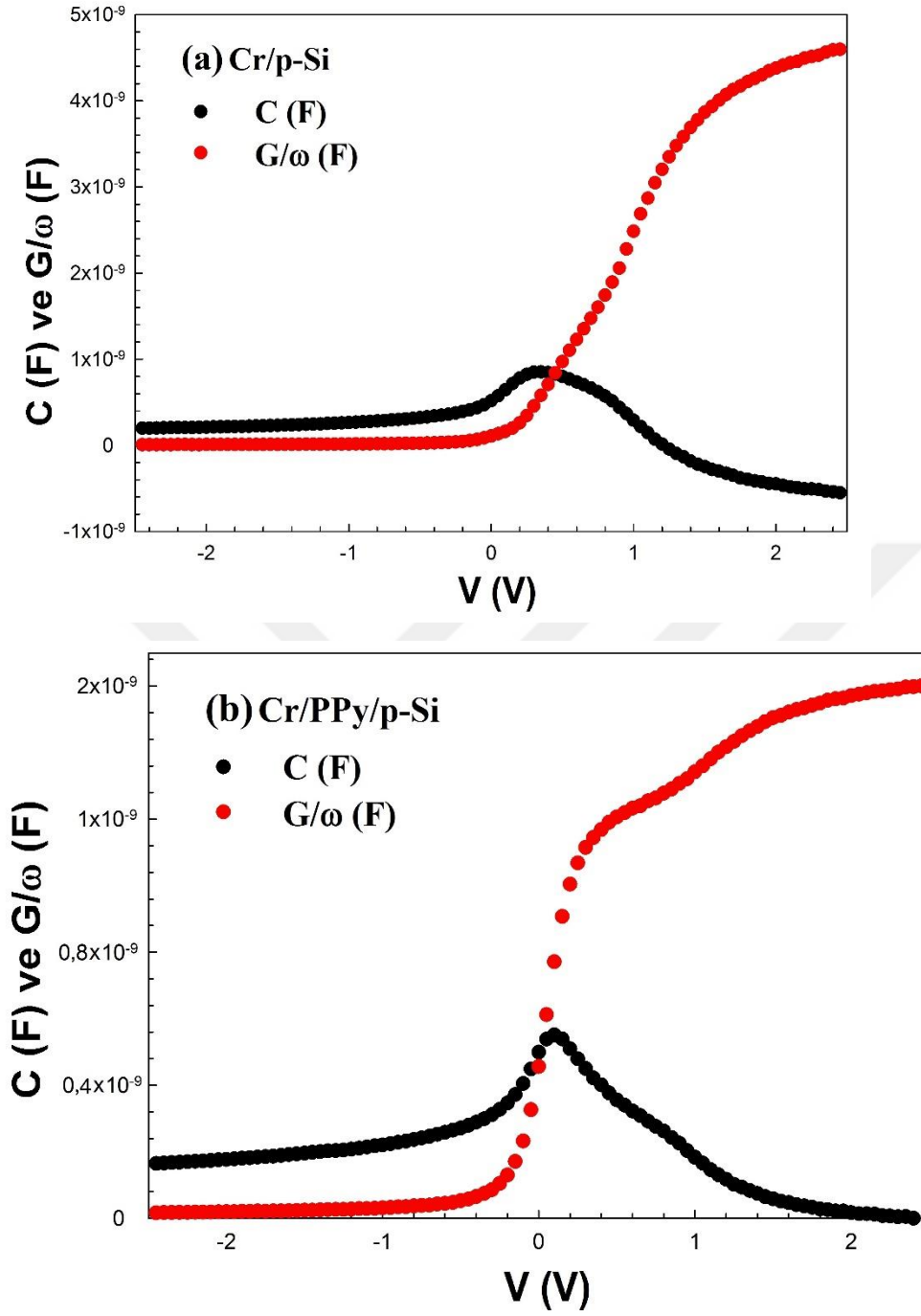
4.2.2. Kapasitans-voltaj ve kondüktans voltaj karakteristiklerinin karşılaştırılması

Şekil 4.15 (a) ve (b) Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için deneysel C-V ve G/ω -V özelliklerinin voltaja bağlı bir fonksiyonunu göstermektedir. Şekil 4.15 (a)'dan görülebileceği gibi, C-V eğrileri pozitif voltaj bölgesinde bir anormal pik vermektedir. Literatürde deneysel olarak Yücedağ ve arkadaşları [30] ile Wu ve Yang [31] tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlara varılmıştır. Onlara göre bu anormal pik davranışı metal-yarıiletken arayüzeyinde N_{ss} 'lerin varlığına atfedilebilir. Werner ve arkadaşları [28], Bati ve arkadaşları [29] aynı zamanda diyota bir kontak direnci oluşturan kusurlu ohmik kontağa atfetmektedir ve ohmik kontağın özellikleri önemli ölçüde azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna bağlamaktadır. Diğer taraftan pozitif voltajda C-V eğrilerindeki pik davranışı Tunç ve arkadaşları [15] tarafından R_s ve N_{ss} 'lerin varlığına atfedilmektedir. C değerlerinin aksine terslenim bölgesinde G/ω değerleri artan voltajla artmaktadır.



Şekil 4.15. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için (a) C-V ve (b) G/ω -V özellikleri

C ve G/ω değişimini karşılaştırmak için bütün voltaj aralıklarında herbir diyot için C ve G/ω grafikleri birlikte çizildi ve Şekil 4.16 (a) ve (b) de sırasıyla gösterildi.



Şekil 4.16. (a) Cr/p-Si (MS) ve (b) Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için sırasıyla C-V ve G/ω -V özelliklerinin bir arada çizimi

Bu şekillerden görüldüğü gibi G/ω değerleri voltaj arttıkça artmaktadır ve C değerlerinden daha fazla olmaktadır. Ayrıca yığılma bölgesinde G/ω 'nın maksimum değeri C 'nin minimum değerlerine karşılık gelmektedir. Böyle C ve G/ω 'nın kesişme davranışı aygıtın indüktif davranış gösterdiğini belirtmektedir.

C-V eğrilerinin MS tipi SBD’da diğer olağanüstü özelliği de NC davranışdır. Şekil 4.15 (a)’da görüldüğü gibi C değerleri uygulanan voltaj ile artmakta ve yaklaşık 0,3 V’da bir pik vermektedir. Daha sonra giderek azalmaya başlayıp yaklaşık 1,2 V’da negatif değerlere gitmektedir. İlginç bir şekilde, MPS tipi SBD için C-V eğrilerinde pozitif voltajda (yığılma bölgesinde) NC davranışı PPy arayüzey tabakanın varlığı nedeniyle kaybolmaktadır. Diğer bir deyişle metal ve yarıiletken arasında organik arayüzey tabakasının varlığı C değerlerinin negatif değerlere gitmesini önlemektedir. Organik tabanlı SBD’lar için literatürde benzer sonuçlar rapor edilmiştir [15, 16, 25]. Genellikle NC’ın farklı aygıtlar için fiziksel mekanizması farklıdır ve temel olarak kontak enjeksiyonuna, N_{ss} ’lere ve azınlık taşıyıcı enjeksiyonu etkilerine bağlanmaktadır. Ancak Zhu ve arkadaşları [64] C değerlerindeki değişimin, pozitif voltaj değeri belli bir değere ulaştığında, uygulama voltajının (V_i , yani $C=dQ/dV_i$) bir sonucu olarak yükün Q bir diferansiyel etkinin sonucu olduğunu göstermişlerdir. Yeniden birleşme etkisi difüzyon etkisini geçer. Böylece diyot kapasitansı negatif değerler alır. Çünkü dV_i değeri daima pozitiftir.

SBD’un negatif voltaj bölgesindeki C^{-2} -V eğrilerinden yararlanarak engel yüksekliğinin homojen olmadığı durumlarda ortalama engel yüksekliği bulunabilir. Bu yüzden MS ve MPS tipi SBD’ların oda sıcaklığında negatif voltaj bölgesinde 1 MHz için C^{-2} -V eğrileri elde edildi ve Şekil 4.17’de verildi. Şekil 4.17’den görüldüğü gibi, bu eğriler geniş bir voltaj aralığında Schottky tipi diyotların oluşumunu gösteren bir lineer bölgeye sahipler [6,9]. MS ve MPS tipi SBD’lar için V_o , E_F , N_a ve $\Phi_B(C-V)$ gibi bazı temel elektriksel parametreleri negatif voltaj bölgesinde C^{-2} -V eğrilerindeki lineer bölgelerin eğiminden aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edildi ve Çizelge 4.2’de verildi [2];

$$C^{-2} = \frac{2(V_R + V_o)}{q\epsilon_s N_a A^2} \quad (4.14)$$

Burada, V_R negatif voltaj, N_a akseptör atomlarının katkılanma yoğunluğu ve V_o sıfır voltta kesme voltajıdır. V_o değerleri kullanılarak sıfır voltta difüzyon potansiyeli (V_D) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir;

$$V_D = V_o + \frac{kT}{q} \quad (4.15)$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_V}{N_a} \right) \quad (4.16)$$

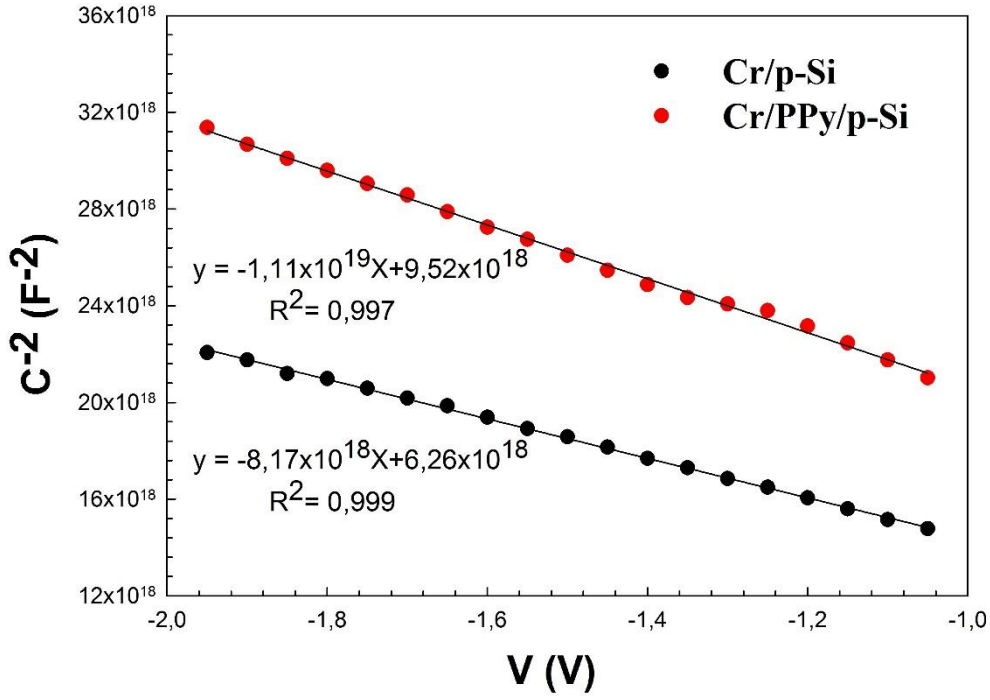
Burada N_V Si'un valans bandında etkin durumların yoğunluğudur. Her iki diyot için Φ_B (C-V) değerleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir;

$$\Phi_B(C-V) = c_2 V_o + \frac{kT}{q} + E_F = V_D + E_F \quad (4.17)$$

$c_2 \approx N_a / N_a'$ katsayısı taşıyıcı atom konsantrasyonunun teorik değeri ($N_a' = 3,47 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$) ve onun deneysel değerinin (N_a) birbirine oranı olarak bilinir [65]. MS ve MPS tipi SBD'lar için bu katsayı kullanılarak N_{ss} 'lerin yoğunluğu aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilmektedir [65, 66];

$$c_2 = \frac{1}{1 + \frac{q d_i N_{ss}}{\epsilon_i}} \quad (4.18)$$

Her iki diyot için Eşitlik 4.18 kullanılarak ve d_i değeri olarak 55 Å alınarak hesaplanan N_{ss} değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi, V_o değerleri Si'un yasak enerji aralığına göre oldukça yüksektir. Bu ideal durumdan sapmanın PPy arayüzey tabakanın varlığı nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle c_2 değerleri dikkate alınarak Eşitlik 4.17 ile Φ_B (C-V) değerleri hesaplanmıştır. Arayüzey PPy tabakası nedeniyle MPS tipi SBD için elde edilen Φ_B (C-V) değerleri MS tipi SBD için elde edilenlerden daha yüksektir. Elde edilen sonuçlar gösterdi ki metal-yarıiletken arayüzeyinde PPy tabakasının kullanılması geleneksel SiO_2 arayüzey tabakasının yerine alternatif olabilmektedir ve Si tabanlı elektronik yapıların geliştirilmesi için organik arayüzey tabaka kullanımları giderek daha önemli olmaya başlayacaktır.



Şekil 4.17. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için sırasıyla C^2 -V özellikleri

Çizelge 4.2. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için sırasıyla negatif voltaj C^2 -V eğrisinden elde edilmiş bazı parametreler

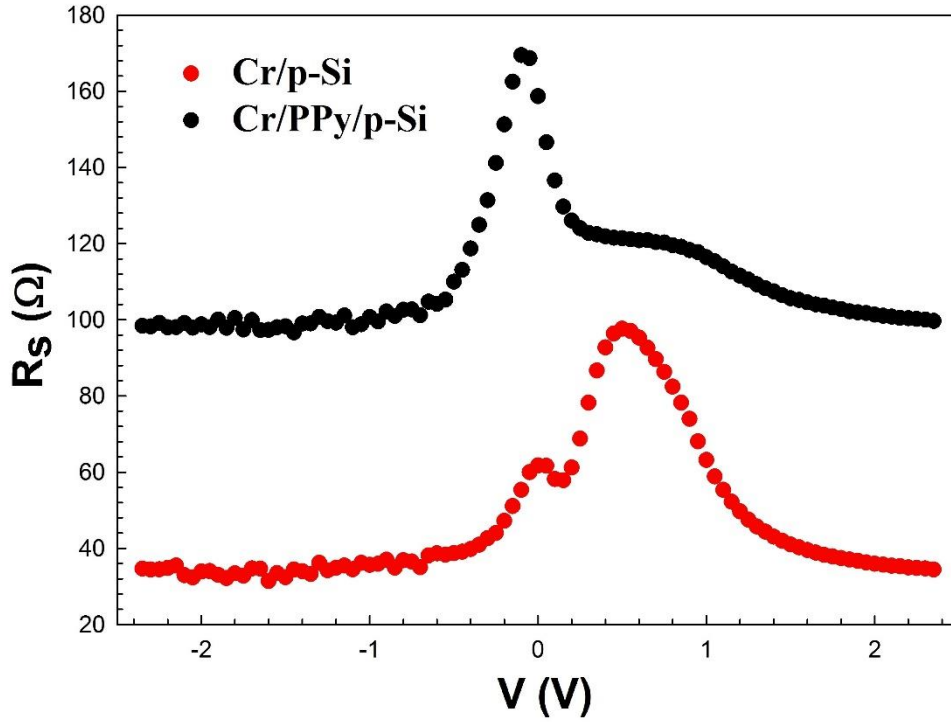
	V_0 (V)	N_a (cm^{-3})	E_F (eV)	$\Phi_B(C-V)$ (eV)	c_2 (...)	N_{ss} ($\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$)
Cr/p-Si	0,75	$2,43 \times 10^{16}$	0,157	0,708	0,700	$1,64 \times 10^{12}$
Cr/PPy/p-Si	1,00	$1,94 \times 10^{16}$	0,163	0,749	0,559	$3,01 \times 10^{12}$

R_s değerleri yeterince yüksek voltajlarda, yüksek frekanslarda (1MHz) yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans ve kondüktans değerleri kullanılarak hesaplanabilir. Paralel RC devresi kullanılarak diyotun yığılma bölgesinde ölçülen admitans ya da empedans ($Z=1/G$) toplam empedans devresine eşdeğerdir [26, 67]. R_s 'nin gerçek değerleri güçlü yığılma bölgesinden aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir [26, 67];

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.18)$$

MS ve MPS tipi SBD'lar için R_s 'nin voltaja bağlı değişimi Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Şekil 4.18'de görüldüğü gibi MPS tipi SBD için bulunan R_s değerleri arayüzey değişimleri,

ilave oksit yükleri, PPy'de tuzaklanmış yükler ve p-Si ile PPy arayüzeyine yerleşmiş tuzak yükleri gibi nedenlerle MS tipi SBD için bulunan R_s değerlerinden daha yüksektir [26]. PPy arayüzey tabakasının homojensizliği ve onun kalınlığı R_s 'nin değerinin yüksek olmasının diğer nedenleridir. Şekil 4.18'den görüldüğü gibi, R_s -V eğrisinde MS tipi SBD için farklı pozisyonlarda iki pik varken, MPS tipi SBD için sadece bir pik vardır. R_s 'nin bu davranışı N_{ss} 'lerin parçacık yoğunluk dağılımına atfedilebilir. R_s değerlerinin C-V ve G/ω -V özellikleri üzerinde çok etkili olduğu biliniyor. Bu nedenle R_s etkisinden arındırılmış gerçek kapasitans ve kondüktans değerleri elde etmek için aşağıdaki eşitlikler kullanılarak düzeltme yapılmaktadır [26];

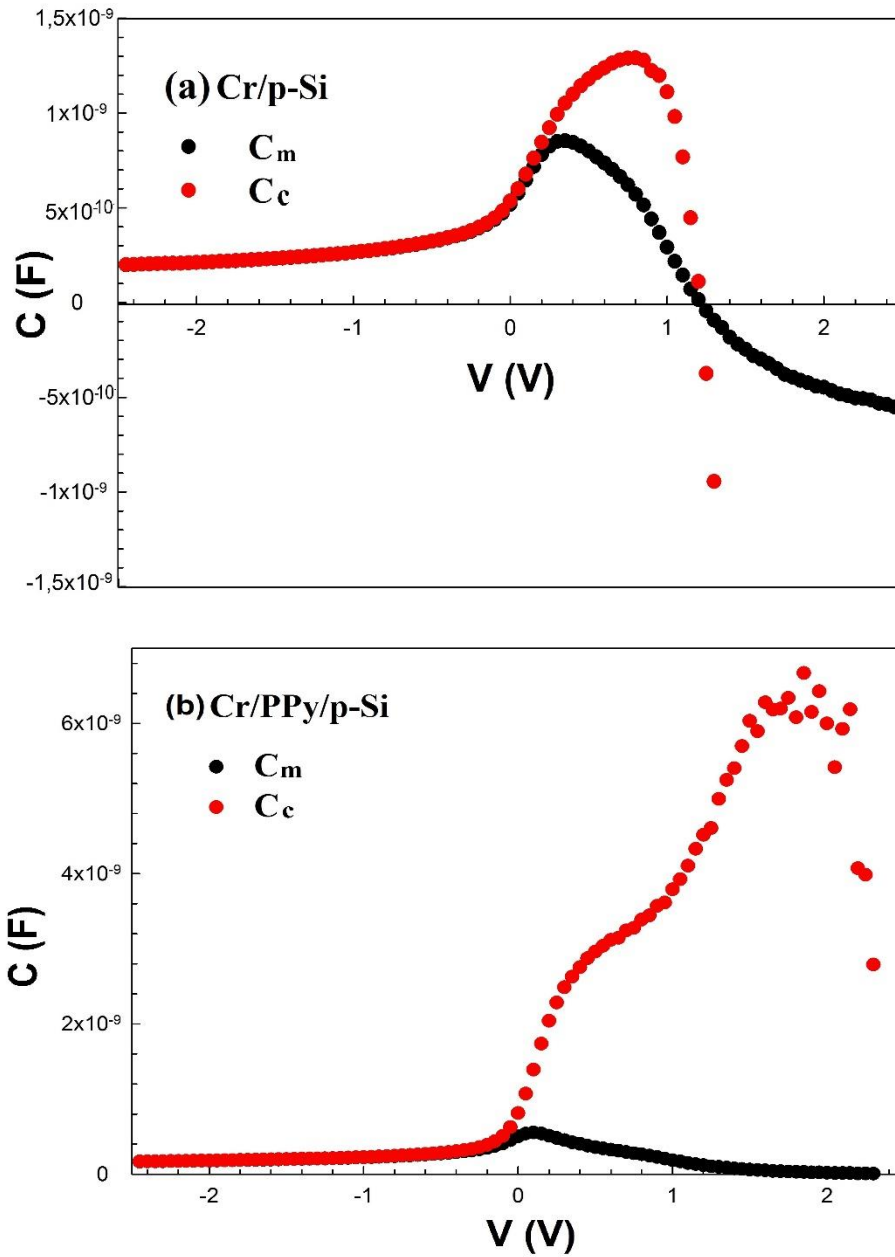


Şekil 4.18. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için R_s -V özellikleri

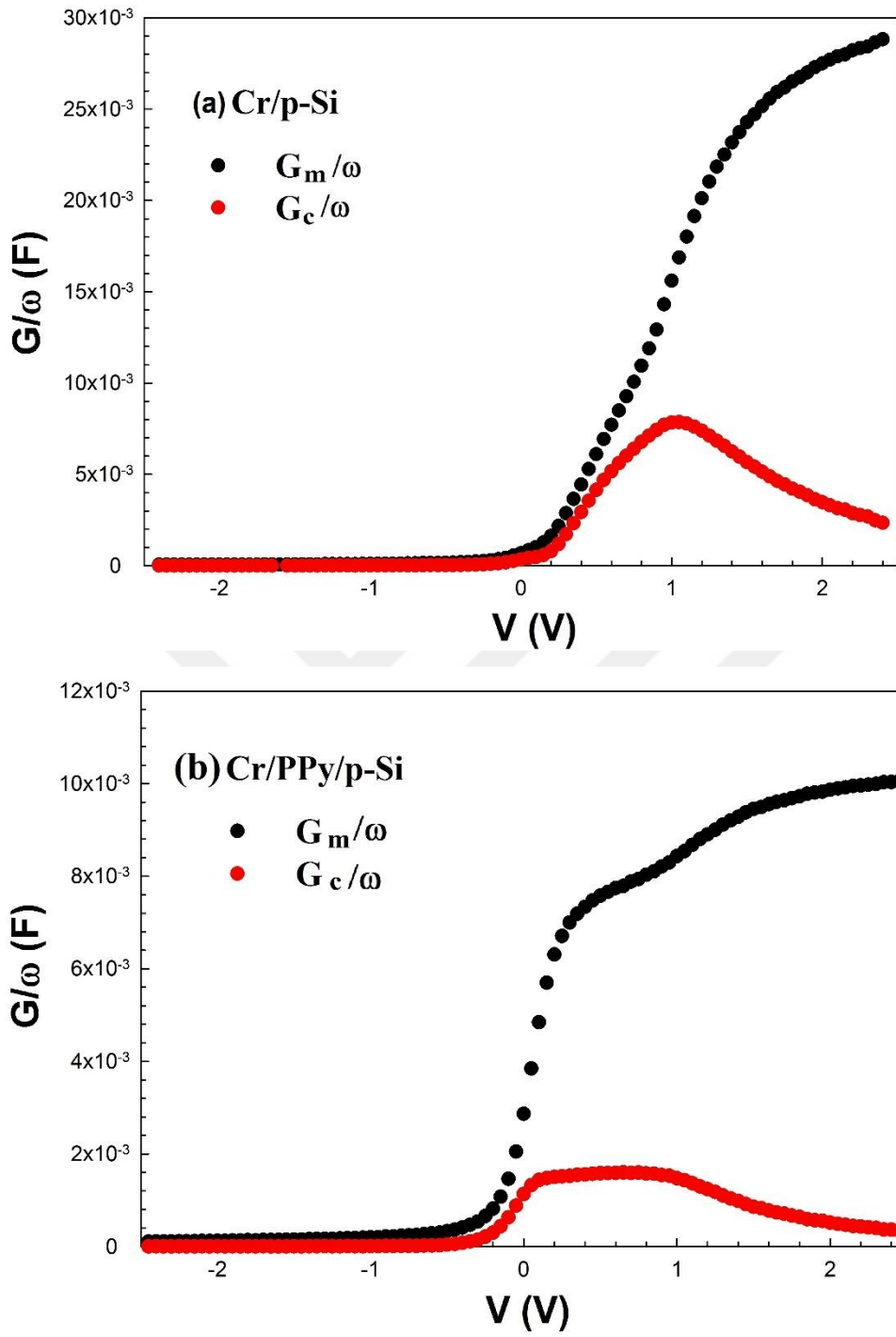
$$C_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.19)$$

$$G_c / \omega = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.20)$$

burada $a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s$ 'dir. Böylece MS ve MPS tipi SBD'lar için C_c -V ve G_c -V değerleri elde edilmiş ve grafikleri Şekil 4.19 (a) ve (b) ile Şekil 4.20 (a) ve (b)'de sırasıyla verilmiştir. Bu şekillerden görülebileceği gibi her iki diyot için yığılma bölgesindeki değerleri karşılaştırıldığında C_c değerleri artarken G_c değerleri azalmaktadır. Diğer taraftan R_s değerleri hem terslenim hem de deplasyon bölgesinde çok etkili değildir. Aynı zamanda Şekil 4.20 (a) ve (b) eğrileri birer pik vermektedir. Bu sonuçlar gösterdi ki R_s değerleri diyot parametrelerini hesaplarken mutlaka dikkate alınması gereken çok önemli bir etkidir.



Şekil 4.19. (a) Cr/p-Si (MS) ve (b) Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için sırasıyla düzeltilmiş C-V özellikleri



Şekil 4.20. (a) Cr/p-Si (MS) ve (b) Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar için sırasıyla düzeltilmiş G/ω - V özellikleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kristal üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için p-Si yapraklar (wafers) ultrasonik banyoda kimyasal temizleme işlemi gerçekleştirildikten sonra kristal yüzeyde oksitlenme olasılığını önlemek için kuru azot (N_2) ile kurutulurken hemen vakum ortamına alındı. Yüksek vakum termal buharlaştırma sisteminde yaklaşık 10^{-6} Torr basınçta p-Si yarıiletkenlerin tüm arka yüzeyleri % 99,999 saflıkta ve 1200 Å kalınlığında Au ile kaplandı. Düşük özdirençli arka ohmik kontak elde etmek için numuneler nitrojen ortamında yaklaşık 450 °C de tavlandı. Arayüzey tabakasının diyotun elektriksel özellikleri üzerine etkisini görmek için PPy arayüzey tabakası p-Si/Au yapılarından biri üzerine Vaksis - PVD handy 40 termal organik buharlaştırma sistemi ile büyütülmüştür ve daha sonra hem üzerine PPy büyütülmüş hem de büyütülmemiş p-Si yaprağın ön yüzeylerine ~1200 Å kalınlığında, 1 mm çaplı ($7,85 \times 10^{-3} \text{cm}^2$) Cr doğrultucu kontaklar yine yüksek vakum termal buharlaştırma sisteminde oluşturuldu. Böylece hem Cr/p-Si (MS) hem de Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ları elde edilmiştir. Hem Cr/p-Si (MS) hem de Cr/Polypyrrole (PPy)/p-Si (MPS) tipi SBD'ları üretilirken Bor katkılı (p tipi), 100 yönelimli, ~300 µm kalınlıklı ve 0,4 Ω cm özdirençli tek kristal Silisyum (Si) yarıiletkeni kullanılmıştır. Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'ların üretilmesinden sonra pozitif ve negatif voltajda I-V, C-V ve G/ω-V ölçümlerinin alınabilmesi için numuneler bakır tutucu üzerine gümüş yapıştırıcı yardımıyla yapıştırılmış ve bakır teller, gümüş tutkal ile üst elektriksel kontakları alınmıştır. Hem pozitif hem de negatif voltajda I-V, C-V ve G/ω-V ölçümleri oda sıcaklığında alınmıştır.

Cr/p-Si Schottky engel diyotunun pozitif ve negatif voltaj C-V ve G/ω-V karakteristikleri için 10 kHz-5 MHz frekans aralığında ve (-4V)-(+4V) voltaj aralığında N_{ss} ve R_s etkisi dikkate alınarak incelendi. R_s , N_{ss} ve PPy arayüzey tabakasının elektriksel özellikler üzerine etkisi detaylı olarak incelendi. Deneysel sonuçlara göre C-V ve G/ω-V karakteristikleri frekansa ve uygulanan voltaja güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermiştir. Artan voltajla C değerlerinin arttığı ve sırasıyla 1,45 V, 1,35 V, 1,25 V ve 0,9 V voltaj değerlerinde negatife gittiği gözlemlenmiştir. C değerlerinin aksine G/ω değerleri artan voltajla artış göstermiş ve her bir frekans için yığılma bölgesinde hızlı bir şekilde artmaya başlamıştır. Diğer bir deyişle C'nin değerleri azalırken G/ω'nın değerleri

yükselmiştir. Yaklaşık +4 V da C'nin minimum değeri G/ω 'nın maksimum değerine karşılık gelmektedir. C'nin bu davranışı yani C değerlerinin azalması yapıda artan polarizasyon ve daha fazla taşıyıcı olması olarak yorumlanmıştır. Schottky engel diyotlarında çok büyük NC değerlerinin görülmesi mevcut literatürde R_s , N_{ss} ve doğal ya da katkılanmış ara yüzey tabaka varlığına atfedilmektedir. Her bir frekansta NC'nin varlığı diyotun kondüktansını maksimuma götürür. NC davranışını daha iyi açıklayabilmek için C-I ve G/ω -I eğrilerini de aynı voltaj değerleri için çizilmiş ve incelenmiştir. Elde edilen yüksek frekans C-V ölçümlerinden ($C_i = \epsilon' \epsilon_0 A/d_i$), PPy arayüzey tabakasının kalınlığı (d_i) 55 Å olarak hesaplanmıştır. Voltaja bağlı R_s eğrileri Nicollian ve Brews metodu kullanılarak hesaplandı. Frekansa bağlı olarak N_{ss} dağılım profili ise Hill- Coleman metodu kullanılarak elde edilmiş ve yaklaşık 30 kHz değerinde bir pik verdiği görülmüştür. N_{ss} 'lerin frekans ile gösterdikleri bu davranış yüzey durumlarında ya da tuzaklarda yüklerin özel bir dağılımına atfedilebilir. C-V ve G/ω -V karakteristikleri R_s , N_{ss} ve arayüzey tabakasının deneysel sonuçlar üzerinde oldukça etkili parametreler olduğunu göstermiştir ve hesaplamalarda bu parametreler mutlaka dikkate alınmalıdır.

İkinci kısım olarak SBD'lar üzerinde PPy arayüzey tabakasının etkisini araştırmak için hem Cr/p-Si (MS) hem de Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'lar üretilmiş ve oda sıcaklığında I-V, C-V ve G/ω -V ölçümleri kullanılarak iki diyotun karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca her iki tip diyot için diyotun temel elektriksel parametreleri (n , Φ_{Bo} , R_s , E_F , N_a ve Φ_B (C-V) gibi) elde edilerek kıyaslandı. Değerlendirmeler N_{ss} , R_s ve PPy arayüzey tabakası dikkate alınarak yorumlanmıştır. Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD'un yarı logaritmik I-V eğrilerinin farklı eğimlerde iki farklı lineer bölgeye sahip olduğu görülmüştür. Bu durum farklı engel yüksekliğine sahip iki paralel diyot modeli olarak bilinir. Ayrıca MS ve MPS tipi SBD'lar için N_{ss} 'in enerji yoğunluk dağılım profili voltaja bağlı n ve BH değerleri dikkate alınarak, pozitif voltaj I-V verileri kullanılarak elde edilmiştir. MPS tipi SBD için N_{ss} 'in elde edilen değeri PPy arayüzey tabakasının pasivasyon özelliği nedeniyle MS tipi SBD için elde edilenden daha düşüktür. Sırasıyla Ohm kanunu, Nicollian ve Brews metotları kullanılarak pozitif voltaj I-V, C-V ve G/ω -V ölçümlerinden voltaja bağlı R_i profili elde edilmiştir. MS tipi SBD için C değerleri uygulanan voltajla artarak yaklaşık 0,3 V değerinde bir pik vermektedir ve bu noktadan sonra azalmaya başlayarak 1,2 V değerinden sonra negatif değerler almaktadır. Diğer taraftan ilginç bir şekilde NC davranışı MPS tipi SBD için C-V eğrilerinde pozitif voltaj bölgesinde PPy arayüzey tabakası nedeniyle yok olmaktadır.

Özetle PPy arayüzey tabakası kapasitansın negatife gitmesine engel olmaktadır. Gerçek C ve G/ω değerleri elde edebilmek için R_s etkisinden arındırılmış ve düzeltilmiş değerler elde edilmiştir. Bütün bu deneysel sonuçlar gösterdi ki metal ile yarıiletken arasında PPy arayüzey tabakası geleneksel olarak kullanılan SiO_2 yalıtkan tabakasına alternatif olarak kullanılabilen ve birçok avantaj sağlayan bir arayüzey tabakasıdır. Bu avantajlar bazı diyot parametreleri açısından da değerlendirilerek aşağıda maddelendirilmiştir. PPy arayüzey tabakası kullanılmasıyla I-V ölçüm sonuçlarından elde edilen parametreler ve avantajları şunlardır;

- *Doğrultma oranı:* Bu diyot parametresi ne kadar yüksek olursa diyot performansı veya modifikasyonu bir o kadar iyi olacaktır. Diyotların doğrultma oranları $DO=I_F/I_R$ ifadesinden (-3V) ve (3V) voltaj değerlerine karşılık gelen akım değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Burada I_F (3V)'daki doğru akım değeri, I_R ise (-3V)'daki akım değeridir. Hesaplamalara göre MS tipi SBD için doğrultma oranı 1810 iken MPS tipi SBD için bu değer 3888'e yükselmiştir. Yani PPy arayüzey tabakasının kullanımı doğrultma oranını iki katından daha fazla artırmıştır. Doğrultma oranının yüksek olması aynı zamanda diyodun düşük R_s ve yüksek R_{sh} değerlerine sahip olduğunun göstergesidir.
- *İdealite faktörü:* Diyotun ideal davranışa yakınlığının bir ölçüsü olan bu parametrenin ideal değeri 1 olmalıdır. Yani bir diyot parametresinin değerinin "1" e yakın olması beklenir. İdealite faktörü pozitif voltaj I-V eğrilerindeki lineer bölge eğiminden bulunabilir. I-V eğrileri aynı voltaj aralığında Cr/p-Si (MS) tipi SBD için iki farklı lineer bölgeye sahip iken Cr/PPy/p-Si (MPS) tipi SBD için sadece bir lineer bölgeye sahiptir. Pozitif voltaj bölgesinde iki lineer bölge gözlenmesi genellikle paralel diyot modeli olarak adlandırılır. MS tipi SBD için n değerleri düşük ve orta gerilim bölgesi için sırasıyla 10,62 ve 4,69 iken MPS tipi SBD için 4,27 olarak hesaplanmıştır. Her iki diyot için n değerleri olması gerekenden yüksektir. Bu yüksek n değerleri metal-yarıiletken arayüzeyine yerleşmiş N_{ss} 'lerin yoğunluk dağılımı, doğal (SiO_2) yada katkılanmış (PPy) tabakalar ve engel yüksekliğindeki homojensizliklerine atfedilebilir [61, 63]. Hayali (image) kuvvet etkisi, engel boyunca yeniden birleşme ve tünelleme durumları n değerlerinin olması gerekenden daha yüksek olmasına sebep olan diğer mümkün mekanizmalardır [42].

- *Engel (Barrier) Yüksekliği:* Modifiye edilen bir parametre olan Φ_B , potansiyel engel yüksekliğidir. Pozitif voltaj I-V eğrilerinin lineer olduğu bölgenin akım eksenini kestiği noktadan hesaplanabilen Φ_{B0} değerleri MS tipi diyot için düşük ve orta gerilim bölgeleri için sırasıyla 0,513 eV ve 0,647 eV iken MPS tipi diyot için 0,548 eV ve olarak belirlenmiştir. Bu değerler, Si yarıiletkenin yasak enerji aralığına yakın değerlerdir. Yani bir MS veya MPS tipi SBD için uygun değerlerdir. Φ_B 'nin büyük olması akım iletimini zorlaştırırken, küçük olması da ohmik davranışa yol açabilir.
- *Seri Direnç:* SBD'un R_s değeri çok önemli parametrelerinden biridir ve pozitif voltaj I-V eğrilerini yani diyotun performansını etkilerler. Bu yüzden Ohm kanunu kullanılarak her iki diyot için yapının R_i değerleri elde edilmiş ve R_i -V eğrisi çizilmiştir. Yeterince yüksek pozitif voltajlarda eğrinin sabitlendiği noktalardaki R_i değeri SBD'un gerçek R_s değerlerine yaklaşmaktadır. Bu şekilde R_i -V eğrilerine bakılarak R_s değerleri oda sıcaklığında sırasıyla MS tipi SBD için 52,4 Ω ve MPS tipi SBD için 123,4 Ω olarak elde edilmiştir. Eğride yaklaşık 1,6 V'da bir kesişme noktası vardır. MS tipi diyot için R_i değerleri kesişme noktasından önce daha düşük iken N_{ss} 'lerin parçacık yoğunluk dağılımı ve PPy arayüzey tabakasının varlığı nedeniyle kesişme noktasından sonra daha yüksek olmaktadır. Bu olay literatürde kesişme (intersection) davranış olarak adlandırılır. İdealde R_s değerinin sıfır olması beklenir.
- *Kısa Devre (Shunt) Direnci:* Kısa devre direnci R_{sh} , Schottky diyotların önemli parametrelerinden biridir. İdealde R_{sh} değerinin sonsuza yaklaşması ($>10^9\Omega$ olması) beklenir. Yeterince yüksek negatif voltajlarda eğrinin sabitlendiği noktalardaki R_i değeri SBD'un gerçek R_{sh} değerlerine yakın değerler vermektedir ve bu değerler MS tipi SBD için 90 k Ω ve MPS tipi SBD için 450 k Ω olarak elde edilmiştir. Yani polypyrrole arayüzey tabakası nedeniyle R_{sh} değeri yaklaşık beş kat artırılmıştır.
- *Arayüzey Durumları:* MS ve MPS tipi SBD'lar için N_{ss} 'lerin enerji yoğunluk dağılımı elde edilmiştir. Her iki diyot için de N_{ss} 'ler Si'un yasak enerji aralığı (E_g) ortalarından E_v 'nin üst seviyelerine doğru üstel olarak büyümektedir. PPy arayüzey tabakasının pasivasyon etkisi nedeniyle Si'un yasak enerji bölgesinde MPS tipi diyot için N_{ss} 'lerin değerleri, MS tipi SBD için olan değerlerinden önemli ölçüde düşüktür. Yani polypyrrole arayüzey tabakasının varlığı N_{ss} 'lerin, $E_{ss}-E_v$ enerji aralığındaki yoğunluğunu deneysel olarak azaltıcı yönde bir etki yaptığı ve p-Si yüzeyini pasifize ettiği söylenebilir.

Polypyrrole arayüzey tabakası kullanılarak modifiye edilen Cr/p-Si diyot ve modifiye edilmemiş diyot kıyaslandığında Cr/PPy/p-Si diyotun açıkça performansının daha iyi olduğu hesaplamalar ile doğrulanmıştır.

Cr/p-Si (MS) ve Cr/PPy/p-Si (MPS) diyotun C-V ve G/ω-V eğrileri 1 MHz frekans için çizilmiştir. Bu eğrilerde gözlenen pik ve yarımların uygulanan dc gerilime bağlılık göstermesinin sebebi arayüzey durumlarının özel dağılım profiline atfedildi. Her iki diyot için de çizilen C⁻²-V eğrilerinde bazı temel diyot parametreleri hesaplanmıştır. PPy arayüzey tabakası kullanılmasıyla C-V ve G/ω ölçüm sonuçlarından elde edilen parametreler ve avantajları şunlardır;

- *Akseptör Taşıyıcı Yoğunluğu (N_a):* MPS tipi diyota ait N_a değeri C⁻²-V eğrilerinin eğiminden $1,94 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak elde edilirken referans MS tipi diyot için N_a değeri $2,43 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Cr/PPy/p-Si diyota ait bu farkın sebebi polypyrrole tabakasının varlığına ve arayüzey durumlarının M/S arayüzeyinde özel bir dağılımına atfedildi.
- *Tüketim Tabakasının Kalınlığı (W_D):* Tüketim tabakasının kalınlığı W_D $1,29 \times 10^{-5} \text{ cm}$ olarak hesaplandı. Bu değer arayüzey tabakasına sahip bir diyota göre yüksektir. Bu durum arayüzey tabakasının varlığı doğrulamıştır. Bu değerler yüksek katkılı yarıiletkenler için beklenen değerlerdir. Yüksek katkılı yarıiletkenlerde W_D değeri iyice azalarak tünellemeye yol açar.
- *Engel (Barrier) Yüksekliği (Φ_B(C-V)):* Daha önce I-V eğrilerinden elde edilen ve Φ_B parametresi burada ters beslem C⁻²-V eğrilerinin eğiminden ve kesim noktasından MPS tipi SBD için 0,749 eV ve MS tipi SBD için 0,708 eV olarak hesaplanmıştır. Bu değerler doğru beslem I-V ölçümlerinden elde edilen değerlerle yaklaşılarak E_F kadar yükseltir. Bu durum ölçümün doğasına atfedilir.
- *Arayüzey Durumları:* MS ve MPS tipi SBD'lar için N_{ss}'lerin enerji yoğunluk dağılımı farklı bir yöntem olarak C-V ve G/ω değerleri kullanılarak da elde edilmiştir. N_{ss} değerleri MPS tipi SBD için $3,01 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ iken, MS tipi SBD için $1,64 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak hesaplandı. Her iki N_{ss} değerinde 10¹² mertebesinde bulunmuştur.

Bu deneysel sonuçlar bize metal ile yarıiletken arasında PPy arayüzey tabakası ve buna benzer polimerlerin kullanımının geleneksel olarak kullanılan SiO₂ yalıtkan tabakasına

birer alternatif olabileceğini ve bunun birçok avantaj sağlayacağını göstermektedir. Bu tez çalışması ışığında ilerde yapılacak benzer çalışmalar için başlıca öneriler şunlardır;

- Tüm elektriksel ölçüler yeterince geniş sıcaklık, frekans ve voltaj aralığında gerçekleştirilerek özellikle daha düşük sıcaklıklarda etkin olabilecek akım-iletim mekanizmaları belirlenebilir.
- Yine tüm elektriksel ölçümler zamana bağlı olarak da gerçekleştirilip hem ölçümlerin tekrarlanabilirliği hem de temel elektriksel parametrelerin zamana bağlı değişimi incelenebilir.
- M/S arayüzeyinde oluşturulan organik/polimer materyalleri değişik oranlarda Zn, Co, Ni gibi materyaller veya grafen ile katkılarla suretiyle daha yüksek dielektrikli bir arayüzey tabaka oluşturularak bir taraftan MPS tipi diyotlarda doğrultma oranı ve kısa devre direncini artırıp diğer taraftan R_s , N_{ss} ve kaçak akımı azaltılabilir.

KAYNAKLAR

1. Cowley, A. M. and Sze, S. M. (1965). Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36, 3212-3221.
2. Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices* 2nd ed, New York: John Wiley & Sons: 362-390.
3. Sharma, B. L. (1984). *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, New York: Plenum Press, 1-50.
4. Rhoderick, E. H., Williams R. H. (1988). *Metal Semicondutor Contacts*, Oxford: Oxford Press, 257-264.
5. Taşçıoğlu, İ. (2012). *Au/PVA:Zn/n-Si (MPS) Schottky Engel Diyodun Elektriksel Özelliklerinin Sıcaklık ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-49.
6. Bilkan, Ç. (2013). *Perilensiz ve perilenli Al/p-Si Schootky engel diyotların elektriksel özelliklerinin oda sıcaklığında karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-36.
7. Çakar, M., Yıldırım, N., Karataş, Ş., Temirci, C., Türüt, A. (2006). Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of Sn/rhodamine-101/n-Si and Sn/rhodamine-101/p-Si Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Physics*, 100, 74505-74510.
8. Özdemir, A.F., Gök, A., Türüt, A. (2007). The electrical measurements in poly(2-chloroaniline) based thin film sandwich devices. *Thin Solid Films*, 515, 7253-7258.
9. Kılıçoğlu, T., Aydın, M.E., Topal, G., Ebeoğlu, M.A., Saygılı, H. (2007). The effect of a novel organic compound chiral macrocyclic tetraamide-I interfacial layer on the calculation of electrical characteristics of an Al/tetraamide-I/p-Si contact. *Synthetic Metals*, 157, 540-545.
10. Güllü, Ö., Türüt, A. (2009). Electrical analysis of organic interlayer based metal/interlayer/semiconductor diode structures. *Journal of Applied Physics*, 106, 103717-103722.
11. Akkılıç, K., Aydın, M.E., Uzun, İ., Kılıçoğlu, T. (2006). The calculation of electronic parameters of an Ag/chitin/n-Si Schottky barrier diode. *Synthetic Metals*, 156 (14-15): 958-962.
12. Aydın, M.E., Kılıçoğlu, T., Akkılıç, K., Hoşgören, H. (2006). The calculation of electronic parameters of an Au/ β -carotene/n-Si Schottky barrier diode. *Physica B*, 381, 113-117.
13. Güllü, Ö., Aydoğan, Ş., Türüt, A. (2008). Fabrication and electrical properties of Al/Safranin T/n-Si/AuSb structure. *Semiconductor Science and Technology*, 23, 075005.

14. Demirezen S., Sönmez Z., Aydemir U., Altındal Ş. (2012). Effect of series resistance and interface states on the I-V, C-V and G/ω -V characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature. *Current Applied Physics*, 12, 266-272.
15. Tunc T., Uslu H., Altındal S. (2011). Preparation and Dielectric Properties of Polyvinyl Alcohol (Co, Zn Acetate) Fiber/n-Si and Polyvinyl Alcohol (Ni, Zn Acetate)/n-Si Schottky Diodes. *Fibers and Polymers*, 12, 886-892.
16. Altındal S., Uslu H. (2011). The origin of anomalous peak and negative capacitance in the forward bias capacitance-voltage characteristics of Au/PVA/n-Si structures. *Journal of Applied Physics*, 109, 074503.
17. Uslu H., Altındal S., Aydemir U. (2010). The interface states and series resistance effects on the forward and reverse bias I-V, C-V and G/ω -V characteristics of Al-TiW-Pd₂Si/n-Si Schottky barrier diodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 503, 96-102.
18. Ozdemir A.F., Ozdemir D.A., Kökçe A., Altındal S. (2009). Electrical properties of Al/conducting polymer (P₂ClAn)/p-Si/Al contacts. *Synthetic Metals*, 159, 1427-1432.
19. Ozdemir A.F., Kotan Z., Aldemir D.A., Altındal S. (2009). The effects of the temperature on I-V and C-V characteristics of Al/P₂ClAn (C₂H₅COOH)/p-Si/Al structure. *The European Physical Journal Applied Physics*, 46, 20402.
20. Sahingoz R., Kanbur H. (2008). The determination of interface states and series resistance profile of Al/polymer/PEDOT-PSS/ITO heterojunction diode by I-V and C-V methods. *Synthetic Metals*, 158, 727-731.
21. Altındal S., Sari B., Unal H. I., Yavas N. (2009). Electrical Characteristics of Al/Polyindole Schottky Barrier Diodes. I. Temperature Dependence. *Journal of Applied Polymer Science*, 113, 2955-2961.
22. Bilkan, Ç., Zeyrek, S., San, S. E., Altındal, Ş. (2015). A compare of electrical characteristics in Al/p-Si (MS) and Al/C₂₀H₁₂/p-Si (MPS) type diodes using current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurements. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 12, 071.
23. Gümüş, A., Altındal, Ş. (2014). Current-transport mechanisms in gold/polypyrrole/n-silicon Schottky barrier diodes in the temperature range of 110-360 K. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28, 66-71.
24. Lee, B.H, Jeon, Y., Zawadzki, K., Qi, W.J., Lee, J. C. (1999). Effects of interfacial layer growth on the electrical characteristics of thin titanium oxide films on silicon. *Applied Physics Letters*, 74, 3143-3145.
25. Bilkan, Ç., Gümüş, A., Altındal, Ş. (2015). The source of negative capacitance and anomalous peak in the forward bias capacitance-voltage in Cr/p-Si Schottky barrier diodes (SBDs). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 39, 484-491.

26. Nicollian, E.H., Brews, J.R. (1982). *Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology*. New York: John Wiley and Sons.
27. Ho, P. S., Yang, E. S., Evans, H.L., Wu, X. (1986). Electronic states at silicide-silicon interfaces. *Physical Review Letters*, 56, 177.
28. Werner, J., Levi, A.F.J., Tung, R.T., Anzlowar, M., Pinto, M. (1988). Origin of the Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts. *Physical Review Letters*, 60, 53.
29. Bati, B., Nuhoglu, C., Sağlam, M., Ayyildiz, E., Türüt, A. (2000). On the forward bias excess capacitance at the intimate and MIS Schottky barrier diodes with perfect or imperfect ohmic back contact. *Physica Scripta*, 61, 209.
30. Yücedağ, İ. (2009). On the anomalous peak at low and moderate frequency C-V curves of Al/SiO₂/p-Si structure at the forward bias region. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 3, 612-615.
31. Wu, X., Yang, E.S. (1989). Interface capacitance in metal semiconductor junctions. *Journal of Applied Physics*, 65, 3560.
32. Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B. (1992). Origin of the anomalous peak in the forward capacitance-voltage plot of a Schottky barrier diode. *Solid State Electronics*, 35, 875.
33. Karataş, Ş., Yıldırım, N., Türüt, A. (2013). Electrical properties and interface state energy distributions of Cr/n-Si Schottky barrier diode. *Superlattices and Microstructures*, 64, 483-494.
34. Butcher, K.S.A., Tansley, T.L., Alexiev, D. (1996). An instrumental solution to the phenomenon of negative capacitances in semiconductors. *Solid State Electronics*, 39, 333-336.
35. Huang, X.L. (1997). Thermally induced capacitance and electric field domains in GaAsAl_{0.3}Ga_{0.7}As quantum well infrared photodetector. *Solid State Electronics*, 41, 845-850.
36. Champness, C.H, Clark, W.R. (1990). Anomalous inductive effect in selenium Schottky diodes. *Applied Physics Letters*, 56, 1104.
37. Ershov, M., Liu, H.C., Li, L., Buchanan, M., Wasilewski, Z.R., Jonscher, A.K. (1998). Negative Capacitance Effect in Semiconductor Devices. *IEEE Transactions on Electrical Devices*, 45, 2196-2206.
38. Tyagi, M. S. (1991). *Introduction to Semiconductor Materials and Devices*. New York: John Wiley& Sons, 271-291.
39. Güllü Ö. (2008). *H₂ Ön Tavlamalı Au/n-GaAs Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Schottky Metal Kalınlığı ve Sıcaklığa Bağlı Değişiminin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 24-38.

40. Yu, A.Y.C., Snow, E.H. (1968). Surface Effects on Metal-Silicon Contacts. *Journal of Applied Physics*, 39, 3008.
41. Altındal, S., Dökme, I., Bülbül, M.M., Yalçın, N., Serin, T. (2006). The role of the interface insulator layer and interface states on the current-transport mechanism of Schottky diodes in wide temperature range. *Microelectronic Engineering*, 83, 499-505.
42. Tung, R.T. (1992). Electron-Transport at Metal-Semiconductor Interfaces-General Theory. *Physical Review B*, 45, 13509-13523.
43. Song, Y.P., Van Meirhaeghe, R.L., Laflere, W.H., Cardon, F. (1986). On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers. *Solid State Electronics*, 29, 633-638.
44. Wittmer, M., Freeouf, J.L. (1994). Schottky barriers and the reactivity of the interface. *Europhysics Letters*, 26, 135-140.
45. Tung, R.T. (1991). Electron-Transport of inhomogeneous schottky barriers. *Applied Physics Letters*, 58, 2821-2823.
46. Werner, J.H., Gütter, H.H. (1991). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 69, 1522-1532.
47. Osvald, J. (1999). Numerical study of electrical transport in inhomogeneous Schottky diodes. *Journal of Applied Physics*, 85, 1935.
48. Soylu, M. (2007). *Au/n-InP ve Au/Pyronine-B/n-InP Schottky Yapıların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 47-49.
49. Kaya, A. (2013). *Metal-Polimer-Yarıiletken (MPS) yapıların elektrik ve dielektrik özelliklerinin geniş frekans aralığında incelenmesi*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-21.
50. Ziel, A. (1968). Solid State Physical Electronics. 2nd.ed. (Prentice-Hall Electrical Engineering Series) Prentice-Hall Inc, 260-300.
51. Alialy, S. (2015) *Au/TiO₂/n-4H-SiC (MIS) Diyotlarda Muhtemel Akım-İletim Mekanizmalarının Geniş Bir Sıcaklık Aralığında İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 26.
52. Goetzberger, A., Klausmann, E., Schulz, M. J. (1976). Interface states on semiconductor/insulator surfaces. *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, 6, 226-233.
53. Schroder, D. K. (1998). *Semiconductor Material and Device Characterization*, New York: 2nd ed. John Wiley & Sons, 337-379.

54. Hofstein, S.R., Warfield, G. (1965). Physical limitations on the frequency response of a semiconductor surface inversion layer. *Solid State Electronics*, 8, 321- 341.
55. Tataroğlu, A. (2004). *MOS yapılar da temel fiziksel parametrelerin frekans ve radyasyon miktarına bağılı incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 67.
56. Vernitskaya, T.V., Efimov, O.N. (1997). Polypyrrole: a conducting polymer; its synthesis, properties and applications. *Russian Chemical Reviews*, 66, 443-457.
57. Vural, Ö., Safak, Y., Turut, A., Altındal, S. (2012). Temperature dependent negative capacitance behavior of Al/rhodamine-101/n-GaAs Schottky barrier diodes and R_s effects on the C-V and G/ω -V characteristics. *Journal of Alloys and Compounds*, 513, 107-111.
58. Hill, W.A., Coleman, C.C. (1980). A single-frequency approximation for interface-state density determination. *Solid State Electron*, 23, 987.
59. Ewing, D.J., Portter, L.M., Wahab, Q., Ma, X., Sudarshan, T., Tumakha, S., Gao, M., Brillson, L.J. (2007). Inhomogeneities in Ni₄H-SiC/Ni₄H-SiC Schottky barriers: Localized Fermi-level pinning by defect states. *Journal of Applied Physics*, 101, 114514.
60. Skromme, B.J., Luckowski, E., Moore, K., Bharnagar, M., Weitzel, C.E., Gehoski, T., Ganser, D. (2000). Electrical Characteristics of Schottky Barriers on 4H-SiC: The Effects of Barrier Height Nonuniformity. *Journal of Electronic Materials*, 29, 376.
61. Demirezen, S., Altındal, Ş., Uslu, I. (2013). Two diodes model and illumination effect on the forward and reverse bias I-V and C-V characteristics of Au/PVA (Bi-doped)/n-Si photodiode at room temperature. *Current Applied Physics*, 13, 53-59.
62. Konofaos, N. (2004). Electrical characterisation of SiON/n-Si structures for MOS VLSI electronics. *Microelectronics Journal*, 35, 421-425.
63. Card, H.C., Rhoderick, E.H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, 1589.
64. Zhu, C.Y., Feng, L.F., Wang, C.D., Cong, H.X., Zhang, G.Y., Yang, Z.J., Chen, Z.Z. (2009). Negative capacitance in light-emitting devices. *Solid-State Electronics*, 53, 324-328.
65. Chattopadhyay, P., Daw, A.N. (1986). On the current transport mechanism in a metal-insulator-semiconductor (MIS) diode. *Solid State Electronics*, 29, 555-560.
66. Singh, A. (1985). Characterization of interface states at Ni/nCdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation. *Solid State Electronics*, 28, 223-232.
67. Yakuphanoglu, F., Tataroğlu, A., Al-Ghamdi A.A., Gupta, R.K., Al-Turki, Y., Şerbetçi Z., Bin Omran, S., El-Tantawy, F. (2015). Ferroelectric Bi_{3.25}La_{0.75}Ti₃O₁₂ photodiode for solar cell applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 133, 69-75.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BİLKAN, Çiğdem
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.01.1986, Erzurum
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (543) 607 65 83
 Faks :
 E-mail : cigdembilkan@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi /Yoğun Madde Fiziği	2016
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Yoğun Madde Fiziği	2013
Lisans	Atatürk Üniversitesi /Fizik (Bölüm Birincisi)	2009
Lise	Erzurum Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2016	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010-2012	Çankırı Karatekin Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Çiğdem Bilkan, Sedat Zeyrek, S. Eren. San, Şemsettin Altındal “A compare of electrical characteristics in Al/p-Si(MS) and Al/C₂₀H₁₂/p-Si (MPS)type diodes using current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurements” Materials Science in Semiconductor Processing. 32 (2015) 137-144.
2. Çiğdem Bilkan, Ahmet Gümüş, Şemsettin Altındal “The source of negative capacitance and anomalous peak in the forward bias capacitance-voltagein Cr/p-Si

Schottky barrier diodes (SBDs)” Materials Science in Semiconductor Processing, 39 (2015) 484-491.

Katıldığı Uluslararası Kongreler

1. Ç. Bilkan, A. Gümüş, Ş. Altındal, M.T. Bilkan, “The source of negative capacitance and anomalous peak in the forward bias capacitance-voltage of Cr/p-Si/Au Schottky barrier diodes (SBDs)”, **1st International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT’2015)**, Elazig (2015) (Poster Bildiri).
2. Ç.BİLKAN, A. GÜMÜŞ, M.T. BİLKAN, Ş. ALTINDAL, “On the forward bias negative capacitance and interface traps (D_{it}) and series resistance (R_s) effects in Cr/p-Si (MS) contacts with and without PPy interfacial layer at room temperature”. **2nd International Nanoscience and Nanotechnology for Next Generation Conference (NaNoNG)**, Kemer/Antalya (2015) (Poster Bildiri).
3. M. T. BİLKAN, S. ZEYREK, Ç. BİLKAN, Ş. ALTINDAL, “Electrical characteristics and energy density distribution of surface states (N_{ss}) of Ag/perylene/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) at room temperature”. **2nd International Nanoscience and Nanotechnology for Next Generation Conference (NaNoNG)**, Kemer/Antalya (2015) (Poster Bildiri).
4. Lida BADRİNEZHAD, Çiğdem BİLKAN, Şemsettin ALTINDAL, Ali NEMATOLLAHZADEH, Yashar AZİZİAN-KALANDARAGH, “The fabrication of Au/(cross-linked PVA)/n-Si/Au Schottky barrier diodes (SBDs) and investigation their electrical characteristics at room temperature”. **9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union- BPU9**, İstanbul Üniversitesi, İstanbul (2015) (Poster Bildiri).
5. Çiğdem Bilkan, İkrâm Orak, Şemsettin Altındal, “Frequency and Voltage Dependence of Dielectric, ac Electrical conductivity and Electric Modulus Profiles in Al/Co₃O₄-PVA/p-Si Structures in the Wide Frequency Range”, **1st International Physics Conference at the Anatolian Peak (IPCAP)** Erzurum Atatürk Üniversitesi (2016) (Poster Bildiri).
6. Ş. Altındal, Ç. Bilkan, Y. A. Kalandaragh, “Frequency and Voltage Dependence Surface States and Series Resistance Profiles in Al/Co₃O₄-PVA/p-Si Structures from Admittance Measurements”, **1st International Physics Conference at the Anatolian Peak (IPCAP)** Erzurum Atatürk Üniversitesi (2016) (Poster Bildiri).
7. Çiğdem Bilkan, Şemsettin Altındal, “The effects of surface states (N_{ss}), series resistance (R_s) and interlayer on the current-voltage and impedance-voltage characteristics in Au/n-Si/Ag Schottky barrier diodes (SBDs)”, **2nd International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT’2016)**, Çanakkale (2016) (Poster Bildiri).
8. Şemsettin Altındal, Çiğdem Bilkan, “Two diodes model and (CdSe-PVA) interfacial layer effect on the forward bias current-voltage (I-V) characteristics of Au/CdSe-

PVA/n-Si Schottky barrier diodes”, **2nd International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT’2016)**, Çanakkale (2016) (Poster Bildiri).

9. Mustafa Tuğfan Bilkan, Çiğdem Bilkan, “Structural and vibrational properties of polypyrrole organic polymer”, **2nd International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT’2016)**, Çanakkale (2016) (Poster Bildiri).

Hobiler

Kitap okuma, Yüzme, Süsleme sanatı.





GAZİ GELECEKTİR...