



**Au/(%1 GRAFEN KATKILI)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si SCHOTTKY ENGEL
DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİK İLE DİELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIK VE FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ**

Hayriye Gökçen ÇETİNKAYA

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2015

H. Gökçen ÇETİNKAYA tarafından hazırlanan “Au/(%1 GRAFEN KATKILI)- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x/\text{n-Si}$ SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİK İLE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIK VE FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Recep ŞAHİNGÖZ

Fizik Eğitimi Anabilim Dalı, Bozok 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. Şükrü KARATAŞ

Fizik Anabilim Dalı, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye : Doç. Dr. Perihan DURMUŞ

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 06/02/2015

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

.....
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
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.

H. Gökçen ÇETİNKAYA
06/02/2015

Au/(%1 GRAFEN (GP) KATKILI)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si SCHOTTKY ENGEL
DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİK İLE DİELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIK VE FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)

Hayriye Gökçen ÇETİNKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Şubat 2015

ÖZET

Au/(%1GP katkılı-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x)/n-Si Schottky engel diyotların (SBDs) elektrik ve dielektrik özellikleri, sırasıyla 120-300 K sıcaklık aralığının da 300 kHz' de ve 10kHz-2MHz frekans aralığında oda sıcaklığında incelendi. Deneysel sonuçlar; tüketim tabası genişliği (W_d) ve seri direnci (R_s) değerlerinin oldukça sıcaklığa bağlı olduğu görüldü. Ayrıca dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp tanjant ($\tan\delta$), elektrik modülüsün reel ve imajiner kısımları (M' , M'') ve ac iletkenlik (σ_{ac}) sıcaklık ve frekansın fonksiyonu olarak incelendi ve oldukça hem frekansa hemde sıcaklığa bağlı olduğu gözlemlendi. Tüm bu parametreler, kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik voltaj (G/w-V) verilerinden faydalanılarak elde edildi. C ve G değerlerindeki frekans ve sıcaklığa bağlı önemli değişiklikler arayüzey durumları (N_{ss}), yapının seri direnci (R_s), arayüzey tabakası ve yüzey polarizasyonuna atfedildi. İleri pozitif voltajlar da dielektrik özelliklerinin düşük frekanslar için açıkça negatif davranış (NC) sergilediği gözlemlendi. C-V veya ϵ' -V eğrilerinde gözlenen anormal pik ve NC davranış özellikle N_{ss} ile R_s nin varlığına ve tuzaktaki yüklerin azalmasına atfedildi. C-V veya ϵ' -V eğrilerindeki pik değeri artan frekansla azalırken negatif C ve ϵ' değerleri kaybolmaktadır. Ayrıca yeterince ileri pozitif voltajlarda maksimum G değerleri minimum C değerlerine karşılık gelmektedir. Bu davranış iletkenlik (indüktive) davranışı olarak bilinmektedir.

Bilim Kodu	: 202.1.147
Anahtar Kelimeler	: Au/(%1 grafen (GP) katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si (SBDs); Elektrik ve Dielektrik Özellikler; Frekansa ve Sıcaklığa Bağlılık; Negatif Kapasitans ve Dielektrik Sabiti.
Sayfa Adedi	: 93
Danışman	: Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

ELECTRICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES OF Au/(%1 GRAPHENE (GP)
DOPED)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x /n-Si SCHOTTKY BARRIER DIODES AS FUNCTION OF
TEMPERATURE AND FREQUENCY

(Ph. D. Thesis)

Hayriye Gökçen ÇETİNKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2015

ABSTRACT

Electrical and dielectric properties of Au/(%1 graphene (GP) doped)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schotkky barrier diodes (SBDs) have been investigated by using admittance spectroscopy method within the temperature of 160-300K at 300kHz and frequency range of 10 kHz-2 MHz at room temperature. Experimental results show that the main electrical parameters such as depletion layer width (W_d), series resistance (R_s) of the structure were found a strong function of temperature. In addition, dielectric parameters such as real and imaginary parts of the dielectric constant (ϵ' , ϵ'') and electric modulus (M' and M''), $\tan\delta$, and ac conductivity (σ_{ac}) were found a strong function of the temperature and frequency. Experimental results confirmed that both capacitance (C) and conductance (G) values were found strong functions of frequency and voltage especially in the depletion and accumulation regions due to the effect of charges at interface traps, series resistance (R_s) of the structure and surface polarization. Negative capacitance (NC) behavior was also observed in the forward bias C - V and ϵ' - V plot at low frequencies ($f \leq 70$ kHz) and then starts to disappear. It was found that interfacial polarizations and traps, and series resistance contributed to the negative dielectric. When the values of C begins to decrease as soon as the value of G begins to increase. Such behavior of C and G in the forward bias at low frequencies are a typical inductive behavior as a result of the introduction of more carries in the structure.

Science Code : 202.1.147

Key Words : Au/(%1 graphene (GP) doped)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si (SBDs);
Electrical and dielectric properties; Frequency and temperature
dependence; Negative capacitance and dielectric constant.

Page Number : 93

Supervisor : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca engin tecrübelerinden faydalandığım Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi saygıdeğer hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL' a ve TİK üyelerim Prof. Dr. Recep ŞAHİNGÖZ ile Doç. Dr. Adem TATAROĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Kullandığım numunenin yapımdaki katlılarından ötürü Kimya Eğitimi Bölümünden Prof. Dr.İbrahim USLU hocama teşekkür ederim.

Yardımlarını esirgemeyen kıymetli arkadaşım Dr. Seda BENGİ'ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana en büyük desteği sağlayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. METAL-YARIİLETKEN (MS) KONTAKLARIN TEORİSİ.....	7
2.1. Metal Yarıiletken (MS) Kontaklar	7
2.2. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Schottky Mott Teorisi.....	8
2.3. Schottky Diyotların İdeal Durumdan Sapma Nedenleri	12
2.3.1. Hayali (İmage) kuvvet (Schottky) etkisi.....	12
2.3.2. Seri direnç etkisi	14
2.3.3. Tünelleme etkisi.....	15
2.3.4. Kenar etkileri	15
2.3.5. Yüzey kusurları.....	16
2.4. Metal-Yalıtkan/Organik Arayüzey Tabaka-Yarıiletken Schottky Engel Diyotların Yapısı.....	17
2.5. İdeal MIS Yapı	18
2.5.1. Yığılım.....	21
2.5.2. Tükenim.....	21
2.5.3. Tersinim	22
2.6. Gerçek MIS Yapı	23
3. DİELEKTRİKLER ÖZELLİKLER.....	25

	Sayfa
3.1. Dielektriksiz ve Dielektrikli Paralel Plakalı Kondansatör	25
3.2. Dielektrik Kutuplanma	28
3.2.1. Kutuplanma yükleri	29
3.2.2. Kutuplanma yüklerinin alanı	30
3.3. Kutuplanma Mekanizmaları	32
3.3.1. Elektronik kutuplanma	32
3.3.2. İyonik kutuplanma	33
3.3.3. Yönelme kutuplanması	33
3.3.4. Arayüzey-uzay yük kutuplanması	34
3.4. Dipol Durulma Kavramı	35
3.5. Dielektrik Sabiti ve Dielektrik Kayıp Ölçüm Tekniği	38
4. DENEYSEL YÖNTEM	41
4.1. Au/(%1 GP katkılı-(Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x)/n-Si Yapıların Hazırlanması	41
4.1.1. Kristal temizleme	41
4.1.2. Omik kontağın oluşturulması	42
4.1.3. GP katkılı-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x arayüzey tabakanın oluşturulması	42
4.2. Deneysel Ölçüm Sistemi	45
4.2.1. HP 4192A LF empedans analizörü	47
4.2.2. Janis vpf-475 kriyostat ve Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi	47
5. DENEYSEL SONUÇLAR	49
5.1. Giriş	49
5.2. Yüzey Morfolojisi Ölçümü ve Analizi	49
5.3. Sıcaklığa Bağlı Elektrik ve Dielektrik Karakteristikleri	50
5.3.1. Sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω-V) karakteristikleri	50
5.3.2. Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Karakteristikleri	59

	Sayfa
5.4. Frekansa Bağlı Elektrik ve Dielektrik Karakteristikleri.....	67
5.4.1. Frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω -V) karakteristikleri.....	67
5.4.2. Frekansa bağlı dielektrik karakteristikler	73
6. SONUÇLAR.....	81
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Au/(%1 GP katkı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun farklı sıcaklıklarda C^{-2} -V eğrilerinden elde edilen çeşitli parametreler	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için elektron enerji bant diyagramı: (a) Birbirinden ayrılmış nötral materyaller, (b) Kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu.....	9
Şekil 2.2. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için öngerilimleme (a) Doğru öngerilimleme (b) Ters öngerilimleme durumu.....	12
Şekil 2.3. Sabit bir elektrik alanda imaj kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme.....	14
Şekil 2.4. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi.....	15
Şekil 2.5. Metal/yarıiletken kontaklarda kenar etkisi.....	16
Şekil 2.6. Homojen engel yüksekliğine sahip olmayan bir Schottky kontağın V gerilimi altındaki iki boyutlu bant diyagramı.....	17
Şekil 2.7. Bir MIS veya MPS yapının şematik gösterimi	18
Şekil 2.8. $V=0$ 'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken	19
Şekil 2.9. MIS kapasitansının eşdeğer devresi.....	20
Şekil 2.10. $V \neq 0$ durumunda n tipi yarıiletken için ideal MIS yapının enerji-bant şeması (a) Yığılım (b) Tükenim (c) Tersinim	23
Şekil 2.11. İdeal olmayan MIS yapıda arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması	24
Şekil 3.1. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör.....	25
Şekil 3.2. Dielektrikli kondansatör.....	27
Şekil 3.3. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri	29
Şekil 3.4. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu	30
Şekil 3.5. Dielektrik sabitinin gerçek(ϵ') ve sanal(ϵ'') bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi.....	37
Şekil 3.6. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_c) ile kayıp akımı (I_l) arasındaki ilişki	40

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Omik kontak oluşturulmak için kullanılan bakır maske.....	42
Şekil 4.2. Elektro-eğirme sistemi ve mekanizması	43
Şekil 4.3. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske	45
Şekil 4.4. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si /Au (MIS) yapıların şematik gösterimi	45
Şekil 5.1. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun SEM ile ölçülen çeşitli boyutlarda yüzey resimleri (a) 500nm, (b) 200nm	49
Şekil 5.2. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun farklı sıcaklıklarda C-V karakteristikleri.....	52
Şekil 5.3. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun farklı sıcaklıklarda G/ω-V karakteristikleri.....	53
Şekil 5.4. Au Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun farklı sıcaklıklarda seri direncin (R _s) değişimi.....	55
Şekil 5.5. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun C ² -V eğrileri.....	58
Şekil 5.6. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun (a) ε'-V (b) ε''-V karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı değişimi	61-62
Şekil 5.7. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun tanδ-V karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı değişimi.	63
Şekil 5.8. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun σ _{ac} -V karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı değişimi	64
Şekil 5.9. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun elektrik modülüsünün (a) gerçek kısmı M' ve b) sanal kısmı M'' karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı değişimi	66
Şekil 5.10. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun farklı frekanslarda Kapasitans-Voltaj (C-V) karakteristikleri	70
Şekil 5.11. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun farklı frekanslarda Kapasitans-Voltaj (G/w-V) karakteristikleri	71
Şekil 5.12. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si arayüzey tabakalı engel diyodun farklı frekanslarda için Seri Direnç-Voltaj (R _s -V) eğrileri.....	73

Şekil	Sayfa
Şekil 5.13. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun ϵ' -V karakteristiklerinin frekansa bağlı değişimi	77
Şekil 5.14. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun ϵ'' -V karakteristiklerinin frekansa bağlı değişimi	78
Şekil 5.15. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun $\tan\delta$ -V karakteristiklerinin frekansa bağlı değişimi.....	79
Şekil 5.16. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun ac elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) frekansa bağlı değişimi.....	79
Şekil 5.17. Au/(%1 GP katkılı)-Ca _{1.9} Pr _{0.1} Co ₄ O _x /n-Si Schottky engel diyodun elektrik modülüsünün (a) gerçek kısmı M' ve b) sanal kısmı M'' karakteristiklerinin frekansa bağlı değişimi.....	80

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Deneysel ölçüm sisteminin şematik görünümü	46
Resim 4.2. HP 4192A LF empedans analizörü	47
Resim 4.3. Janis vpf-475 kriyostat (solda) ve Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi.....	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Φ_B	Schottky engel yüksekliği
n	İdealite faktörü
R_s	Seri direnç
Φ_e	Etkin engel yüksekliği
Φ_{Bo}	Sıfır beslem engel yüksekliği
I_o	Ters beslem doyma akımı
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
C	Kapasitans
C_o	Boş kondansatörün kapasitansı
$C_{ex.}$	İlave kapasitans
C_{ox}	Yalıtkan tabakanın kapasitansı
C_{sc}	Uzay yükü kapasitansı
C_m	Ölçülen kapasitans değeri
C_c	Düzeltilmiş kapasitans değeri
G_c	Düzeltilmiş kondüktans değeri
E_v	Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
χ_e	Elektron yakınlığı
E_C	İletkenlik band kenarı
E_F	Fermi seviyesi
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
ϵ_o	Boşluğun elektrik geçirgenliği

Simgeler**Açıklama**

ϵ_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
Hz	Frekans birimi (Hertz)
T	Kelvin cinsinden sıcaklık
K	Kelvin cinsinden sıcaklık
k	Boltzmann sabiti
V_i	Kontak potansiyel farkı
V_F	Kontaga uygulanan doğru beslem gerilimi
V_R	Kontaga uygulanan ters beslem gerilimi
ϕ_o	Nötral seviye
δ	Yalıtkan tabaka kalınlığı
Q_{ox}	Oksit yükü
SiO_2	Silisyum dioksit
Si	Silisyum
E	Elektrik alan
PE	Potansiyel enerji
$\Delta\Phi$	Schottky engel düşmesi
J_o	Akım yoğunluğu
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
m_o	Serbest elektron kütlesi
N_A	Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu
N_v	Valans bandındaki durumların yoğunluğu
q	Elektrik yükü
A^*	Richardson sabiti
A^{**}	Etkin Richardson sabiti
$N(E)$	Bantlardaki durumların yoğunluğu
$f(E)$	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu

Simgeler**Açıklama**

W_D	Tüketim bölgesinin kalınlığı
V	Uygulanan gerilim
V_D	Diyot üzerine düşen gerilim
A	Diyodun alanı
$\text{\AA}$	Angström
χ_s	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
τ	Ara-yüzey tuzaklarının ömrü
$n(x)$	Elektron yoğunluğu
μ	Elektronun mobilitesi
D_n	Elektron difüzyon sabiti
N_C	İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu
V_d	Difüzyon potansiyeli
N_D	Verici katkı atomlarının yoğunluğu
V_r	Termiyonik rekombinasyon hızı
E_{Fn}	Quasi Fermi seviyesi
I_{rg}	Tüketim bölgesinde rekombinasyon akımı
n_i	Saf elektron yoğunluğu
D_p	Yarıiletken bölgedeki deşiklerin difüzyon sabiti
L	Nötral bölge kalınlığı
σ_s	Standart sapma
Au	Altın
χ	Etkin tünelleme faktörü

Kısaltmalar**Açıklamalar**

SD	Schottky diyot
SBD	Schottky engel diyot
I-V	Akım-voltaj
C-V	Kapasitans- voltaj

Kısaltmalar**Açıklamalar** **G/ω -V**

İletkenlik- voltaj

MS

Metal-Yarıiletken

MIS

Metal-Yalıtkan-Yarıiletken

MESFET

Metal-Yarıiletken alan etkili transistör

MOS

Metal-Oksit-Yarıiletken

MPS

Metal-Polimer-Yarıiletken

SBH

Schottky Engel Yüksekliği

GD

Gaussian dağılımı

TE

Termiyonik Emisyon

TFE

Termiyonik Emisyon Difüzyon

FE

Termiyonik Alan Emisyonu

AE

Alan Emisyonu

AC

Alternatif akım

DC

Doğru akım

1. GİRİŞ

Malzemeler, 19. asrın ilk yarısına kadar elektriksel iletkenliğine göre iletken ve yalıtkan olarak iki ana gruba ayrılırdı. Michael Faraday'ın 1833 tarihinde, gümüş sülfatın direncinin, iletken olan metallerin direncinin aksine artan sıcaklıkla azaldığını gözlemlemesinin ardından 19. yüzyılın sonlarında K. F. Braun metal oksitlerde iletkenlik ve doğrultma özelliklerini gözlemledi ve bu keşif Braun'a 1909 yılında Nobel Ödülü kazandırmıştır[1]. Bu gelişmelerden sonra malzemeler genelde öz-iletkenlik (σ) veya öz-dirençlerine ($\rho=1/\sigma$) göre, iletken-yarıiletken ve yalıtkan (dielektrik) olmak üzere üç ana gruba ayrılmıştır.

Schottky engel diyotlar (SBD) olarak adlandırılan metal-yarıiletken (MS) kontaklar elektronik endüstrisinde en çok kullanılan doğrultucu kontakların başında yer alır. Schottky kontaklar Schottky engel yüksekliğini ve yarıiletken aygıtın elektriksel özelliğini kontrol etmede önemli rol oynar. Schottky ve Mott, 1938 yılında MS kontakların doğrultma özelliklerinin incelenmesi üzerine ilk ciddi adımı, birbirlerinden bağımsız olarak ortaya atmışlardır. Mott'a göre, metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ve yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki farktan dolayı metal ile yarı iletken arasında bir potansiyel engeli (BH) ortaya çıkmaktadır [2-4]. Potansiyel engelin biçiminin belirlenmesinde, uzay yükünün rolü hakkındaki benzer düşünceler Sovyetler Birliğinde Davydov (1939, 1941) tarafından geliştirilmiştir [2]. Bunların yanı sıra Cowley ve Sze [3], Schottky diyotlarda kullanılan arayüzey tabakası üzerine ilk çalışmaları gerçekleştirerek, metal/yarıiletken (M/S) arayüzeyindeki Schottky engelin oluşumunu farklı metaller kullanarak analize ettiler. Metalden yarıiletkeneye doğru görülen engel yüksekliği oluşumunun temel olarak Φ_m ve Φ_s 'e, arayüzey tabakanın varlığına ve kalınlığına, yüzey hazırlama koşullarına, yarıiletkenin katkı konsantrasyonuna, arayüzeydeki tuzak yoğunluğuna, numune sıcaklığına ve uygulanan ön gerilime bağlı olduğunu öne sürdüler. Schottky engel yüksekliği metal/yarıiletken (M/S) yüzeylerde termal davranışa oldukça duyarlıdır. Son yirmi yıl göz önüne alındığında, Schottky engellere dayalı bileşenler, mikroelektronikte artarak kullanılmıştır ve engel oluşumu ve metal yarıiletken ara yüzeylerinden akımın taşınmasının fiziğinin tam olarak anlaşılması amacıyla, araştırma faaliyetleri süre gelmiştir [5-19]. Schottky engel diyotlar güneş pilleri, fotodedektörler, alan etkili transistörler, mikrodalga diyotlar gibi birçok yarıiletken elektronik aygıtların temelini oluşturmaktadır.

Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda metal ile yarıiletken arasında doğal ya da yapay olarak oluşturulan arayüzey tabakanın varlığı bu yapıların elektriksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği görülmüştür [20-29]. Metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey yalıtkan veya organik (polimer) tabaka MS diyodu metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) veya metal-polimer-yarıiletken (MPS) yapıya dönüştürür.

MIS yapıların hazırlanmasında yarıiletken olarak genelde silisyum (Si), germanyum (Ge) ve galyum-arsenide (GaAs) kullanılır. Bu yapılarda yarıiletkenin p veya n-tipi olmasına göre metal olarak genellikle yüksek saflıktaki alüminyum veya altın gibi metaller kullanılır. Silisyumun tercih edilmesinin sebebi doğada bol miktarda bulunması ve kristal yüzeyinde doğal olarak yalıtkan tabakanın elde edilebilmesidir. Yalıtkan (oksit) olarak kullanılan tabakalar metal ve yarıiletken tabakaları birbirinden izole ederler ve genellikle SiO_2 , SnO_2 , Si_3N_4 gibi malzemeler kullanılır. Bu yapılarda yarıiletken yüzey, arayüzey tabaka ve yalıtkan tabaka yapının elektrik performansı ve dielektrik özellikleri üzerinde büyük öneme sahiptir. Arayüzey tabakayı seçerken yüzeyi pasivize edecek, sızıntı akımını en aza indirecek, kontrol edilebilir akım-iletim mekanizması gerçekleştirecek ve doğrultucu özelliğe yaklaşacak malzemeler seçmeye dikkat edilir.

Günümüzde çoğunlukla arayüzey tabaka seçiminde, geleneksel yalıtkanlar yerine daha düşük maliyetli, kolay üretilen ve esnek olmalarından ötürü organik tabakalar tercih edilmektedir. Polimerlerin temel avantajı üretim masraflarını ciddi ölçüde düşüren spin kaplama gibi basit bir metod ile büyük miktarlarda üretilbilmelerinden kaynaklanmaktadır. Organik malzemeler çoğunlukla zayıf elektriksel iletkenlerdir fakat bunların içersine belli oranlarda metal atomlarının katkılanması ile iletkenlikleri önemli ölçüde arttırılabilmektedir. Elektriksel iletkenliğin yanı sıra katkılama sürece kimyasal yapıyı ve kristalliği etkilemektedir. Düşük katkılama az sayıda yük taşıyıcısıyla beraber yapıda geniş bir tüketim tabakası oluşmasına sebep olurken yüksek katkılama ise tünelleme olasılığının yüksek olduğu ince bir bariyer meydana getirebilir. Arayüzey tabaka olarak %1 Grafen katkılı polimer kullanılmıştır. Grafen, iki boyutlu bir atom kalınlığında, mekanik, elektrik, termal ve optik alanda çığır açan yeni keşfedilmiş karbon allotropudur. Elektronun silisyum içersindeki hızı grafene göre yüz kat daha yavaştır ve bilinen en ince malzeme olmasına rağmen en güçlü malzemedir.

Kullanılan arayüzey tabakanın aygıt performansı, kararlılığı ve güvenilirliği açısından çok önem taşıdığı bilinmektedir. Yapısal kusurlardan ve safsızlıklardan doğan arayüzey yük durumları arayüzey yakınlarında yarıiletkenin enerji bant yapısını değiştirebilir. Kapasitans karakteristikleri yarıiletken aygıtı zarar vermeyen güçlü bir spektroskopik metot olup yapısal ve fiziksel parametrelerin belirlenmesini sağlar. Ayrıca kapasitans ölçümleri yük dağılımının belirlenmesine ve ara yüzey durum varlığının tanımlanmasına izin verir. Çünkü yapıya bir voltaj uygulanması ara yüzeydeki tuzakta bulunan taşıyıcının yakalanmasına ya da salınmasına yol açabilir [13]. Schottky engel diyotların kapasitansı üzerine literatürde birçok çalışma mevcuttur, Ho ve meslektaşları [14] Pd-Si Schottky kontakların doğru ön-gerilim kapasitans-voltaj ($C-V$) eğrilerinde anormal bir pik gözlemişler ve bu piki arayüzey durumlarına atfetmişlerdir. Diğer taraftan Werner ve arkadaşları [15] ohmik ve ohmik olmayan (nonohmic) arka kontaklı Schottky engel aygıtların sistematik bir araştırmasını yaparak ohmik olmayan arka kontaklı aygıtların $C-V$ eğrisinde maksimum bir kapasitans sergilendiğini, ohmik arka kontaklı aygıtlarda hiçbir pik gözlenemediğini rapor etmişlerdir. Arka kontakta ohmik olmama (nonohmicity) durumu büyük bir seri dirençle sonuçlanacağı için, seri direnç ile $C-V$ eğrisindeki anormal pik arasında bir bağ kurulabilir. Chattopadhyay ve RayChaudhuri [16] seri direnç etkisinin $C-V$ karakteristiklerinde maksimuma (pik) sebep olduğunu rapor etmişlerdir. Kapasitansın pik değeri ve konumu arayüzey durumlarına, katkılama konsantrasyonuna, arayüzey tabakanın kalınlığına bağlıdır [17-18].

Son yıllarda, MS veya MIS tipi Schottky diyotların elektriksel özellikleri arayüzey durumları, seri direnç ve arayüzey tabaka etkisi göz önüne alınarak incelenmiştir [16-18]. Kapasitans ya da empedans spektroskopisi deneysel verilerin doğru değerlendirilmesi ile aygıt fiziğinin iç yüzünü anlamamızı sağlar. Bazı durumlarda kapasitans özellikleri alışlagelmişin dışında, normal olmayan davranışlar sergiler ve bunların en önemlilerinden birisi negatif kapasitans (NC) fenomenidir. Negatif kapasitans etkisi p-n eklemler, Schottky diyotlar, MIS ve MPS yapılar gibi pek çok çeşit elektronik aygıtta gözlenmiştir [19]. Farklı yapılarda gözlenen NC'nın fiziksel mekanizması yapıdan yapıya farklılık göstermektedir. NC'nın kaynağı literatürde çokça tartışılmış olmasına rağmen, onun fiziksel anlamı henüz tam olarak anlaşılamamıştır. NC etkisi literatürde olağan dışı ya da normal olmayan olarak adlandırılır. Pek çok durumda deneysel olarak elde edilen NC verileri negatif kapasitans etkisinin sebep olduğu karışıklıktan dolayı literatürde fazla yer almamıştır [19].

Yarıiletken ve metal üst kontak arasındaki arayüzey tabakanın varlığı diyot karakteristiklerinin değişmesine neden olur. Dielektrik maddeler elektriği iletmeyen ancak uygulanan elektrik alandan etkilenen maddelerdir. Elektrik alanın etkisiyle elektron ve atomlar yer değiştirerek elektrik yük merkezleri kayar ve elektriksel kutuplanma oluşur. Oluşan elektrik dipoller, dielektrik maddenin yüzeyinde elektriksel yük birikmesine neden olur. Malzemeye dışarıdan bir elektrik alan uygulandığı zaman enerji depolama yeteneğine sahipse “dielektrik” olarak sınıflandırılır [29,30]. Dielektrik maddeler, elektrostatik alanlara uzun süre karşı koyabilen malzemelerdir ve doğru gerilim (dc) uygulandığında, elektrik akımının geçmesine karşı çok büyük direnç gösterirler. Yani yalıtkan maddenin öz direnci çok büyük olmalıdır. Ancak deneysel olarak kullanılan yalıtkan maddelere dc gerilim uygulandığı zaman çok küçükte olsa bir sızıntı akımı taşırlar. Yalıtkan bir maddenin öz direnci ne kadar büyükse kalitesi de o oranda iyi olur.

Hazırlanan metal-yarıiletken (MS) ve metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken (MIS/MPS) tipi yarıiletken aygıtların gerek elektriksel gerekse dielektrik ve iletkenlik özellikleri; özellikle yapının seri direnci, M/S arayüzeyinde oluşan arayüzey durumları, engelin biçimi, numunenin sıcaklığı, uygulanan voltaj, M/S arayüzeyinde doğal veya yapay olarak oluşan engelin kalınlığı ve homojenliğine oldukça bağlıdır [2-5,11-20]. Sıcaklığa ve frekansa bağlı ölçümlerde C-V ve G/ω-V karakteristiklerindeki değişim özellikle düşük frekans ve sıcaklıklarda son derece belirgindir. Bu açıdan, hazırlanan yarıiletken aygıtların hem elektrik hem de dielektrik özelliklerinin düşük frekans ve sıcaklıklarda incelenmesi oldukça karmaşık olduğu için son derece önem taşımaktadır. Bu nedenle Au/(%1 GP katkılı-(Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x)/n-Si Schottky engel diyodu düşük sıcaklıklarda ve geniş bir frekans aralığında incelenmiştir.

Au/(%1 GP katkılı-(Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x)/n-Si Schottky engel diyotlar üzerine olan bu doktora tez çalışması toplam altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; yarıiletkenlerin ve yarıiletken yapıların tarih içinde gelişimine, metal-yarıiletken kontakların elektriksel karakteristiklerinin önemi ve kullanım alanlarına değinilerek çalışma hakkında özet bir bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, bu yapılarla ilgili gerekli teorik bilgi verilerek malzemenin temel bağzı özellikleri verildi. Dördüncü bölümde; Au/(%1 GP katkılı-(Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x)/n-Si Schottky engel diyotların hazırlanması aşama aşama anlatıldı; Yapının temizleme aşaması, omik kontakın oluşturulmasından sonra arayüzey tabakasının oluşturulması ve en son olarak da doğrultucu kontakların oluşturulması ile deneysel ölçüm

yöntemleri hakkında gerekli bilgi verildi. Beşinci bölümde, sıcaklığın ve frekansın fonksiyonu olarak elde edilen elektrik ve dielektrik verileri değerlendirip gerekli grafikler oluşturularak elde edilen sonuçlar mevcut literatür ile kıyaslandı. Son bölümde ise elde edilen tüm deneysel sonuçlar ile yorumlar gerekçeleri belirtilerek yapıldı. Elde edilen deneysel sonuçlar ışığında, ileride bu ve benzeri konularda yapılacak çalışmalarda yardımcı olmak düşüncesiyle bazı önerilerde bulunuldu.

2. METAL-YARIİLETKEN (MS) KONTAKLARIN TEORİSİ

2.1. Metal Yarıiletken (MS) Kontaklar

Tüm yarıiletken tabanlı devre elemanlarının temelini genelde metal-yarıiletken (MS) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) tipi kontaklar teşkil eder.

Bir metal ile yarıiletken iki tip kontak oluşabilir:

- ✓ Schottky kontak olarak adlandırılan, lineer olmayan doğrultucu akım-gerilim karakteristiğine sahip olan kontak.
- ✓ Omik kontak olarak adlandırılan, lineer akım-gerilim karakteristiğine sahip doğrultucu olmayan kontak.

Bir metal ile bir yarıiletken sıkı kontak edilip sırasıyla ohmik ve doğrultucu kontaklar oluşturulursa, yapıyla ilgili ilk önemli çalışmalarından dolayı W. Schottky engel diyotları (SBDs) denmiştir [2]. Schottky diyotların karakteristik parametrelerinin anlaşılabilmesi için yalıtkan ve yarıiletken kristallerinin iletkenlik özelliklerinin bilinmesi gerekir ve bunun bir yolu kristale uygun kontakların uygulanmasıdır.

Bir metal ile yarıiletken kontak edildiğinde, seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları oluşan kontağın omik veya doğrultucu olduğunu belirler. Başka bir ifadeyle MS kontaklar veya diğer adıyla SBDs' de ohmik ve Schottky (doğru) kontaklar oluşturulurken uygun iş fonksiyonlu metal ve yarıiletken seçimine dikkat edilmelidir.

Örneğin metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s de yarıiletkenin iş fonksiyonu olmak üzere, $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda ise omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için ise $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda omik kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda da doğrultucu kontak oluşur.

Oluşturulan kontağın ideal olması için, yarıiletken kristal ile kontak yapılacak malzeme mümkün olduğunca küçük dirençle atomik boyutta temas ettirilmeli ve kontak olarak kullanılan malzemenin yüzeyinin oldukça temiz ve pürüzsüz olması gereklidir. Arayüzey tabakalı MS diyotlarda da ohmik ve doğrultucu kontakların oluşturulması benzer şekilde yapılır.

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

İlk yarıiletken aygıtlar ondokuzuncu yüzyılın sonlarında yapılan metal-yarıiletken nokta kontak diyotlarıydı. Metal- yarıiletken kontak diyotlarda doğrultma olayı 1874 yılında F. Braun tarafından keşfedildi ve 1938 yılında Schotkky ve Mott tarafından izahı yapıldı [4]. Metal ile yarıiletken sıkı kontak edildiğinde oluşan potansiyel engel yüksekliği arayüzeydeki yüklerin ayrışması nedeniyle ortaya çıkmaktadır ve engel oluşum sürecini açıklamak amacıyla, her bölgesi eşit katkılanmış n-tipi yarıiletken üzerinde gösterilmiştir. Metal ile yarıiletken kontak edildiğinde, n-tipi yarıiletken tarafındaki çoğunlukta olan taşıyıcılar (elektronlar) difüzyon yoluyla metalin ön yüzeyine geçerek arkasındadeşikler (holler) bırakırlar. Bundan dolayı metal-yarıiletken arasında hareketli taşıyıcılardan arındırılmış yüksek dirençli bir bölge oluşur ve bu bölgeye, hareketli yük içermediğinden dolayı “yalıtkan arayüzey tabakası” ya da “Schottky tabası” denir. Metal yarıiletken kontak diyotlarda doğrultma olayı 1874 yılında F. Braun tarafından keşfedilmiştir ve 1938 yılında Schotkky ve Mott tarafından izahı yapılmıştır.

Schotkky ve Mott’ a göre; engel, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Şekil 2.1’ de n-tipi bir yarıiletken için enerji bant diyagramları ve engel oluşum süreci açıklanmaktadır. Şekil 2.11(a)’ da Φ_m iş fonksiyonuna sahip bir metalin, Φ_m ’den küçük olan Φ_s iş fonksiyonuna sahip n-tipi yarıiletken ile kontak edilmeden önceki elektron enerji bant diyagramlarını durumları gösterilmiştir. Bir metalin iş fonksiyonu, Fermi seviyesindeki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gereken enerji miktarı olarak tanımlanır. Şekil 2.1(a)’da gösterilen referans seviyesi yani vakum seviyesi ise metalin hemen dışında elektronun sıfır kinetik enerjiyle bulunduğu enerji seviyesidir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s ise Fermi seviyesinin katkılamaya göre değişkenlik göstermesi nedeniyle değişken bir niceliktir ve metalin iş fonksiyonu ile aynı şekilde tanımlanır. Elektron yakınlığı (χ_s) ise vakum seviyesinde ve iletim bandının alt kenarında bulunan bir elektronun enerji farkı olarak tanımlanan, katkılamaya bağlı olmayan önemli bir yüzey parametresidir. Φ_m ve Φ_s ile χ_s birimleri genelde elektron volt (eV) cinsinden verilir. Şekil 2.1(a); metal ve yarıiletkenin kontak edilmeden önceki durumu temsil etmektedir [4].

Şekil 2.1(b) ise metal ve yarıiletken malzemenin sıkı kontak edildikten sonraki termal denge durumundaki enerji-bant diyagramını temsil etmektedir. İki malzeme birbirleriyle

Şimdi, yarıiletkendeki enerji bantlarının ne kadar büküldüğü veya başka bir ifadeyle ne kadarlık bir engelin oluştuğu, termal denge durumu şartında incelenir: Metal ile yarıiletken kontak haline getirildiğinde yarıiletkenin yasak enerji aralığı (E_g), değişmeyeceğinden dolayı valans bandı kenarı E_v iletim bandı E_c 'ye paralel olarak şekilde görüldüğü gibi (Şekil 2.1(b)) yukarı doğru bükülerek M/S arayüzeyinde bir engel oluşur. Ancak metalden yarıiletkene geçen elektronların gördüğü engel, yarıiletkenden metale geçenlerin gördüğü engele göre daha büyüktür. Aynı şekilde yarıiletkendeki vakum seviyesi de E_c ile aynı davranışı sergileyerek yukarı doğru bükülür. Bu davranış, yarıiletkenin metal ile kontak edilmesinden sonra dahi elektron yakınlığının(χ_s) değişmemesinin bir sonucudur. Yani engel yüksekliğini belirleyen önemli unsur termal dengede olan bir metal ile yarıiletken için vakum seviyesinin geçiş bölgesi boyunca sürekli kalmasıdır. Bu nedenle, sürekliliği sağlamak için yarıiletken tarafındaki vakum seviyesi, metal tarafındaki vakum seviyesine yaklaşmalıdır.

Bantlardaki bükülme; genelde metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka eşit olur ve qV_i eV cinsinden verilen eklemnin built-in/kurulma potansiyeli olarak bilinen kontak potansiyel farkı olmak üzere bu farkın büyüklüğü, $qV_i = (\Phi_m - \Phi_s)$ kadardır. Yani qV_i miktarı yarıiletkenden metale geçmek isteyen elektronların aşması gereken minimum engeldir dolayısıyla yarıiletkenden metale geçen elektronların karşılaştığı engel yüksekliğidir. Metalden yarıiletkene geçecek taşıyıcıların karşılaştıkları potansiyel engel yüksekliği ise, qV_i miktarından büyük olup aşağıdaki eşitlikler yardımıyla elde edilir [2,3]:

$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \quad (2.1a)$$

$$\Phi_s = (\Phi_n + \chi_s) \quad (2.1b)$$

Eşitlik 2.1 (a) ve (b) den faydalanarak; metalden yarıiletkene doğru geçecek taşıyıcıların karşılaştığı potansiyel engel yüksekliği (Φ_B), ifadesi

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

eşitliği ile verilebilir. Burada E_c referans alındığında $\Phi_n = E_c - E_F$ eşitliği, yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi (E_F) dir. Eşitlik 2.2, metalin yarıiletkenle kontak edilmesinden sonra Φ_m ve Φ_s 'deki yüzey dipol katkılarının değişmediği kabul edilerek birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından bulunmuştur [2-4]. Yarıiletkendeki uzay yük bölgesi, hareketli

yüklerden yoksun, yüksek dirençli/yalıtkan tükenim bölgesi haline dönüşür çünkü birçok durumda engel yüksekliği Φ_B miktarı, termal enerji (kT/q) miktarından birçok kat büyüktür.

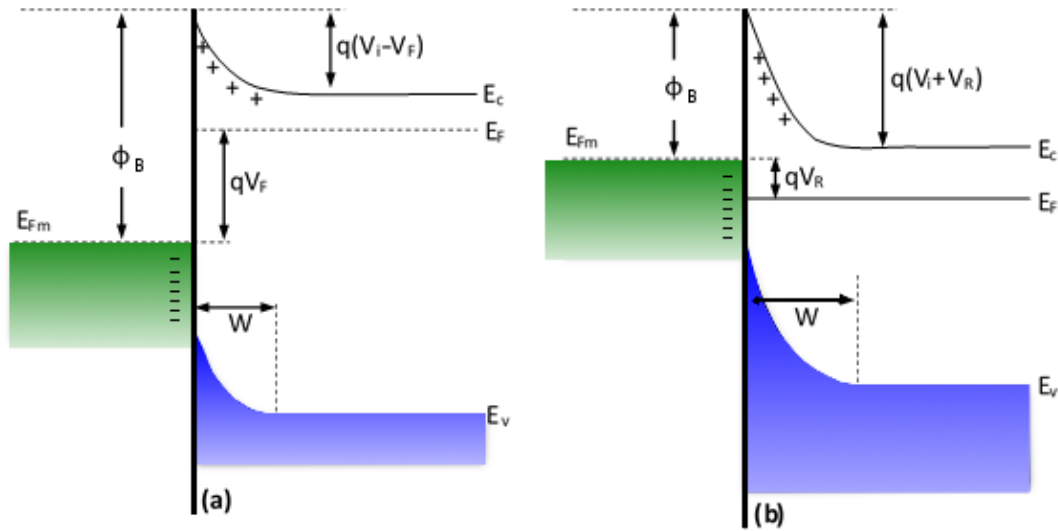
Schottky [3,4] yarıiletkenin metal arayüzeyine doğru düzgün şekilde katkılandığını kabul eder ve bu durum tükenim bölgesinde düzgün yük yoğunluğuna neden olur. Bu sabit uzay yük için artan uzaklıkla/derinlikle birlikte elektrik alan kuvveti uzay yük tabasının sınırından itibaren lineer olarak artar ve oluşan parabolik engel “Schottky engeli” olarak bilinir. Mott [2] ise homojen katkılanmış yarıiletken ile metal arasında sandviçlenmiş, herhangi bir yükten yoksun bir ince yarıiletken tabaka olarak kabul etmiştir. Bu ince bölgedeki elektrik alan kuvveti sabit ve bölge boyunca potansiyel lineer olarak artar. Bu tip engel “Mott engeli” olarak bilinir. Mott engeli, neredeyse intrinsik/saf bir yarıiletken gibi az/düşük katkılı ve ince bir tabakanın metal ve yüksek katkılı yarıiletken arasında konulmasıyla ortaya çıkar.

Termal denge durumunda olan Şekil 2.1(b)’de engel boyunca yarıiletkenden metale geçen elektronların miktarını ters yönde geçen elektronların miktarı dengelenmektedir dolayısıyla engel boyunca net akım sıfır olur. Eklemden akım geçmesi istendiğinde bu denge iki şekilde bozulabilir. Eğer kontak doğru öngerilimlenirse ($V_R < \Phi_{B0}$) yarıiletken metale göre negatif olduğunda, tükenim bölgesi genişliği daralır ve Şekil 2.2(a)’da görüldüğü gibi bu bölge boyunca voltaj V_i ’den ($V_i - V_R$)’ye düşer. Dolayısıyla, tüketim bölgesinin genişliği azalır ve yük geçişleri kolaylaşır. Bu durumda yarıiletken tarafındaki elektronlar daha düşük bir engelle karşılaşır ve yarıiletkenden metale doğru olan elektron akımı termal denge durumuna kıyasla artmış olur. Metal boyunca voltaj düşmesinin olmamasından dolayı Φ_B ’nin beslem voltajından etkilenmemesinin sonucu olarak denge durumundaki değerine göre metalden yarıiletkene olan elektron akımında bir değişiklik oluşmaz. Ancak, negatif beslem için, yarıiletkenden metale doğru net bir elektron akımı vardır ve bu kutuplanma türüne doğru öngerilimlenme denir.

Doğru öngerilim altında, akım lineer olamaz yeterince ileri voltajlarda R_s ve arayüzey tabakadan dolayı bir azalma meydana gelir [6-12]. Çünkü uygulanan voltaj R_s ve arayüzey tabaka arasında bölünecektir. Yani R_s ’nin etkisi düşük ileri voltajlarda ihmal edilebilecek kadar küçük iken yeterince büyük voltajlarda ise oldukça büyüktür.

Şekil 2.2(b), metal/n-yarıiletken kontakta ters öngerilim altında enerji bant diyagramını göstermektedir. Eğer kontak ters öngerilimlenirse ($V_F < \Phi_{B0}$) tükenim bölgesi genişliği yarıiletken metale göre pozitif olduğunda iyice artar. Hem iç hem dış elektrik alan aynı yönde olduğundan dolayı toplam elektrik alan iyice artar dolayısıyla tüketim bölgesi iyice genişler.

Ters akım ideal durumda sifıra yaklaşır ve Şekil 2.2(b)'den de görüldüğü gibi bu bölge boyunca olan voltaj V_i 'den $(V_i + V_F)$ 'ye yükselir. Bu kutuplanma türü ters/geri beslen olarak adlandırılır.



Şekil 2.2. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için öngerilimleme (a) Doğru öngerilimleme (b) Ters öngerilimleme durumu.

2.3. Schottky Diyotların İdeal Durumdan Sapma Nedenleri

2.3.1. Hayali (İmage) kuvvet (Schottky) etkisi

İdeal bir Schottky diyot için engel yüksekliği ifadesi;

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi_s \quad (2.3)$$

ile verilmektedir. Fakat hayali kuvvet etkisi veya Schottky etkisinden dolayı engel yüksekliğinin değeri azalır yani değişebilir. Metalden x kadar uzak bir mesafede bulunan

bir elektron x kadar içinde bir hayali kuvvat oluşmasından dolayı elektrik alan oluşturacaktır ve bu elektrik alan çizgileri, x kadarlık bir mesafede yerleşmiş bir $+q$ imaj yükününki ile aynı alacak şekilde metalin yüzeyinden iç kısma doğru akar. Bu etki Şekil 2.3' de gösterilmiştir. Hayali yük ile gerçel yükün Coulomb etkileşmesinden dolayı Coulomb kuvveti,

$$F = \frac{-q^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -qE \quad (2.4)$$

ifadesi ile verilirken potansiyel ifadesi ise,

$$-\Phi(x) = + \int_x^\infty E dx = + \int_x^\infty \frac{q}{4\pi\epsilon_s 4(x)^2} dx = \frac{-q}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.5)$$

ile verilir. Burada x integral değişkeni olup, $x = \infty$ için potansiyel sıfır olarak kabul edilir. Arayüzeydeki toplam potansiyel ifadesine imaj potansiyelide katkıda bulunacağından bu ifade şu şekilde yazılabilir,

$$-\Phi(x) = \frac{-q}{16\pi\epsilon_s x} - E \cdot x \quad (2.6)$$

Elektronun potansiyel enerji değişimi sabit bir elektrik alanın varlığında Şekil 2.3' de gösterilmiştir. Potansiyel engelin maksimum değeri Şekilde de görüldüğü gibi azalmaktadır ve bu azalma imaj-kuvvet etkisi ile engel yüksekliğinin azalması olarak bilinir.

Toplam potansiyelin türevi, değerinin maksimum olduğu noktada sıfır olacağından,

$$\frac{d(q\Phi(x))}{dx} = 0 \quad (2.7)$$

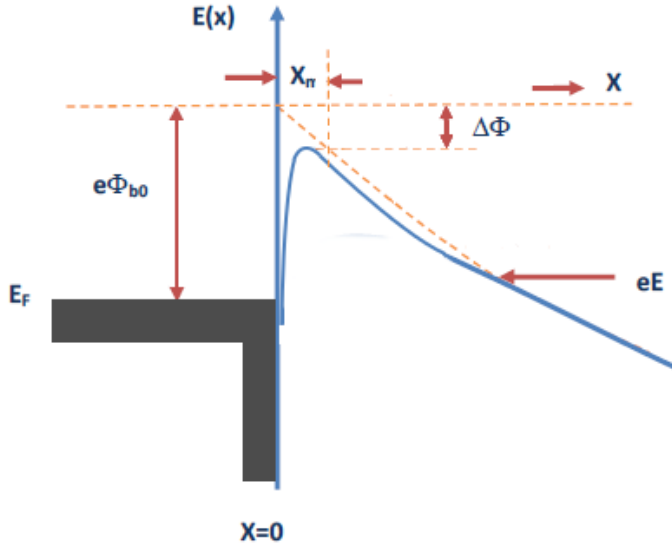
yani potansiyel engelinin maksimum olduğu konum,

$$x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_s E}} \quad (2.8)$$

olur ve imaj-kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin azalması,

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.9)$$

ile verilir [21].

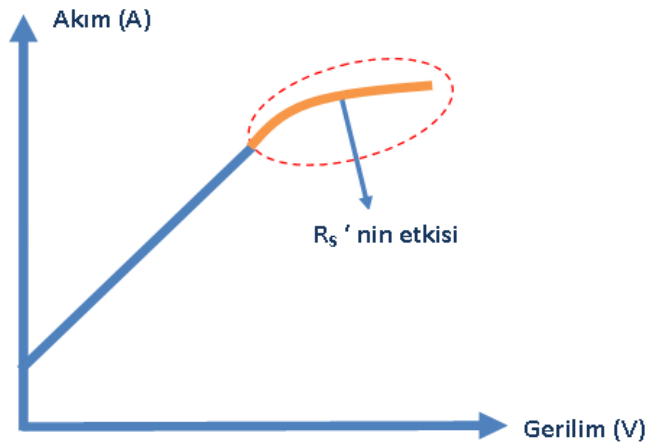


Şekil 2.3. Sabit bir elektrik alanda imaj kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme

2.3.2. Seri direnç etkisi

Seri direnç R_s ile gösterilir ve metal yarıiletken doğrultucu kontaklarda yarıiletken tarafında tüketim bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirençtir. Yüksek gerilim değerlerinde R_s etkisi baskın olmaya başlar ve akımın düşmesine sebep olur.

Schottky diyota yüksek gerilim uygulandığında seri direncin akımda doyum etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalma Şekil 2.4’ de görülmektedir[2].



Şekil 2.4. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi

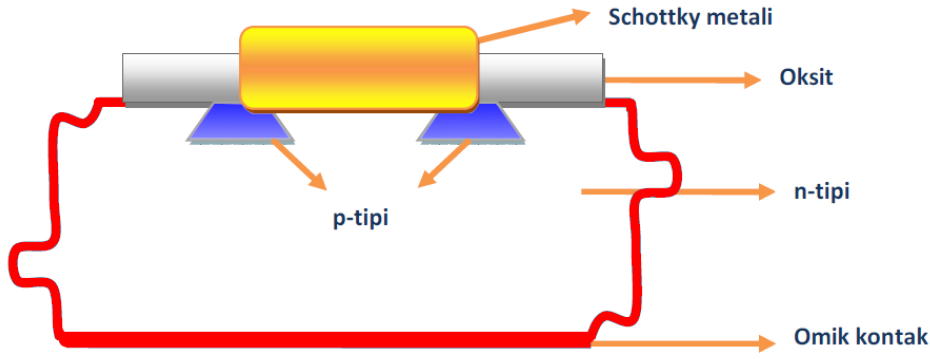
2.3.3. Tünelleme etkisi

Düşük sıcaklıklarda, oldukça yüksek katkılı yarıiletkenlerden yapılan Schottky kontaklarda baskın olan bir mekanizmadır. Bu mekanizmada yük taşıyıcıları, engel üzerinden normal olarak geçmeyip engeli kuantum mekaniksel tünelleyerek geçerler. Tünelleme etkisi, diyotun elektriksel karakteristiğinin ideal durumdan sapmasına yol açar [2]. Tünelleme termiyonik alan emisyonu (TFE) ve alan emisyonu (FE) olmak üzere ikiye ayrılır.

2.3.4. Kenar etkileri

Schottky kontaklar, genelde bir yarıiletken yüzeyine küçük bir metal nokta yapılarak oluşturulmaktadır ve metal noktanın kenarındaki ve merkezindeki elektrik alan ölçüldüğünde kenarındaki elektrik alan değerinin, merkezindeki alandan daha küçük olduğu görülmüştür.

Schottky kontaklarda deneysel olarak ölçülen ters belsem akım değerinin teorik değerden daha büyük olduğu görüldü ve bu durum kenar sızıntı akımı ile açıklanabildi. Kenar etkisini yok etmek için metal yarıiletken diyotlar guard (koruma yüzüğü) yapılı ve bu koruma yüzükleri *n*-tipi bir yarıiletken için *p*-tipi bölgeler oluşturularak yapılı [3].

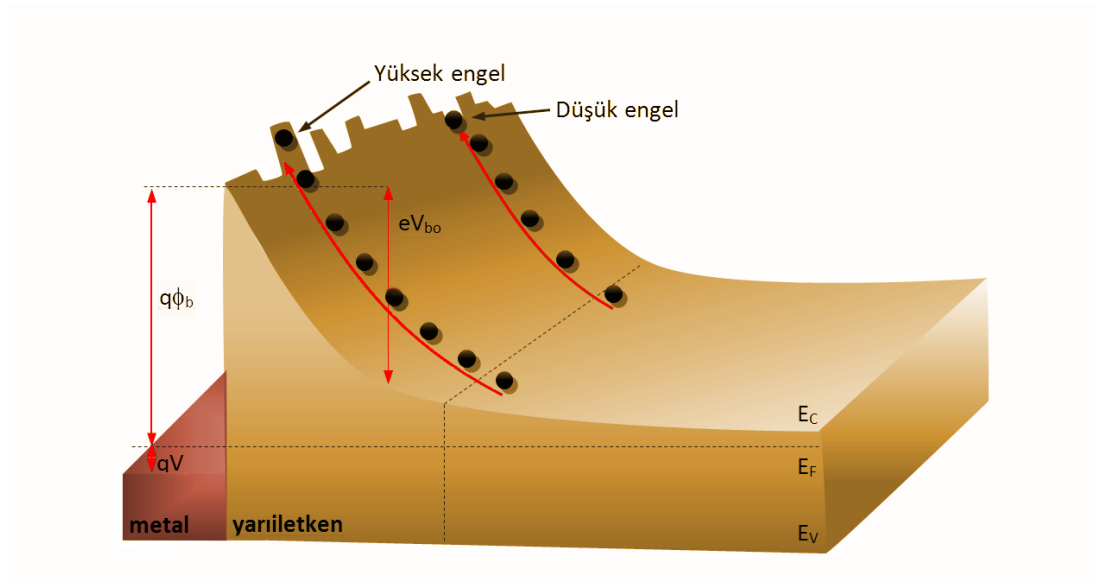


Şekil 2.5. Metal/yarıiletken kontaklarda kenar etkisi

2.3.5. Yüzey kusurları

Schottky diyotlarda I - V ve C - V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği genelde farklı sonuçlar verir. Öncelikle bu ölçümlerin doğası farklıdır. Yani biri doğru akım I - V ölçümleri diğeri de ters belsem C - V ölçümleridir. Engel yüksekliğinin elde edilen bu farklı değerleri, engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi ve idealite faktörünün 1' den büyük olması farklı şekillerde açıklanmaktadır. Yarıiletken veya metalden ya da her ikisinden kaynaklanan metal-yarıiletken arayüzeyinin düzgün olmaması, Şekil 2.6' da gösterilen V_{bo} (built-in voltajı) ve engel yüksekliğinin farklı uzaysal değişimlerine neden olarak homojen olmayan bir dağılıma neden olacaktır. Arayüzeyin pürüzlü olmasının birçok nedeni vardır, metaldeki atomik yapı, yarıiletken yüzeyinin yapısı, dislokasyonlar ve tanecik sınırlarının (grain boundary) yanı sıra metalin kalınlığının değişimide bu nedenler arasında sayılabilir. Yerel engel yüksekliğinin, FE' den dolayı azalması, arayüzeyde farklı metalik fazların etkisinin yanı sıra yarıiletkendeki donör atomlarının rastgele dağıldığı düzenli bir örgüde bu atomlar arasındaki düzensiz mesafeler de bahsedilen potansiyel değişimlerin başka nedenleri arasında olabilir [22]. Bu konuda daha önce, farklı engel yüksekliğine sahip olan homojen ve homojen olmayan Schottky diyotlar üzerinde farklı çalışmalar yapılmıştır. Ohdomari ve Tuy (1980) [23], PtSi/Si ve NiSi/Si gibi farklı diyotların özelliklerini inceleyerek, düşük engelli NiSi/Si ve yüksek engelli PtSi/Si Schottky kontaklara karşılık gelen toplam d.c. akımın, düşük engelli ve yüksek engelli akımlarının toplanması ile modifiye edilebileceğini açıklamışlardır. Benzer modeller, foto-tepki ve kapasite ölçümlerine de uygulanarak kapasite ve foto-emisyonu açıklayan etkin Schottky engellerin, düşük ve yüksek engelli kontak bölgelerinin oranına bağlı olduğu açıklanmıştır. Benzer başka bir çalışma I - V eğrileri için yapılmıştır ve I - V ölçümlerinden daha yüksek olan C - V

ölçümlerindeki engel yüksekliğinin artan sıcaklıkla azalmasını Ohdomari ve Tuy tarafından açıklanmıştır [23]. DC akımı düşük engelli diyotların alanına kuvvetlice bağlı olmasına karşın bütün bu modellerin düşük ve yüksek engel bölgelerindeki durumu farklıdır. Yani Schottky engellerin düzensiz olarak değiştiği kabul edilerek birbirinden ayrılmış yüksek ve düşük engellerin yüzey yükü bölgelerinin genişlikleri de farklıdır. Ohdomari ve arkadaşları (1980) ise bir engel dağılımının yerine iki farklı engelin varlığını kabul etmişlerdir. Daha sonraki çalışmalarda da bir simülasyon programı ile I - V ve C - V ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri ile iki farklı engelin varlığını doğrulamışlardır.



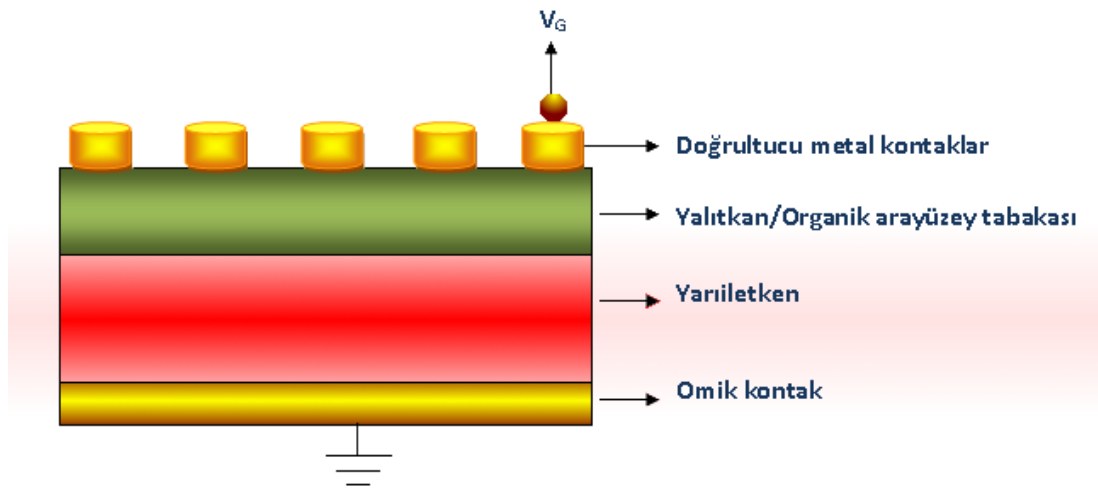
Şekil 2.6. Homojen engel yüksekliğine sahip olmayan bir Schottky kontağın V gerilimi altındaki iki boyutlu bant diyagramı.

2.4. Metal-Yalıtkan/Organik Arayüzey Tabaka-Yarıiletken Schottky Engel Diyotların Yapısı

Metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyin yalıtkan seçilmesi ile metal/yarıiletken (MS) yapıyı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıya, arayüzeyin organik (polimer) seçilmesi ile ise metal/yarıiletken (MS) yapıyı metal-polimer-yarıiletken (MPS) yapıya dönüştürebiliriz. Metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişini düzenleyerek metal ile yarıiletkeni birbirinden izole edebilecek arayüzey tabaka seçimi yapılmalı ve bu seçilen arayüzey tabaka aygıt performansı, kararlılığı ve güvenilirliği açısından oldukça önem taşımaktadır. Kontrol edilebilir akım iletim mekanizmaları gerçekleştirilmesi, sızıntı akımını azaltması ve yüksek

elektriksel iletkenlik sağlaması nedeniyle genellikle organik (polimer) arayüzey tabaka tercih edilmektedir.

Metal-yarıiletken Schottky diyotlar, hem arayüzey tabakaya hem de bir seri dirence sahip ise diyot üzerine uygulanan geçit voltajı (V_G); bu arayüzey tabaka, yapının seri direnci ve diyot tarafından ($V_G = V_D + V_{R_s} + V_i$) bölüşülür. Bu nedenle MIS/MPS yapılarda akım-iletimi MS yapılardan farklı olacaktır. Bir MIS/MPS yapının şematik diyagramı Şekil 2.7’de gösterilmiştir. M/S arayüzeyindeki doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan durumlar, yalıtkan tabaka büyütme sırasında yönetime bağlı olarak ortaya çıkan hareketli iyonlar, tuzaklar ve arayüzey yüklerinin bulunması MIS yapısının özelliklerini değiştirerek MIS yapısının ideal özelliklerinden sapmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.7. Bir MIS veya MPS yapının şematik gösterimi

2.5. İdeal MIS Yapı

İdeal MIS yapı aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır [3].

- ✓ Herhangi bir gerilim uygulanmadığı zaman metalin iş fonksiyonu ϕ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s arasındaki fark sıfırdır.

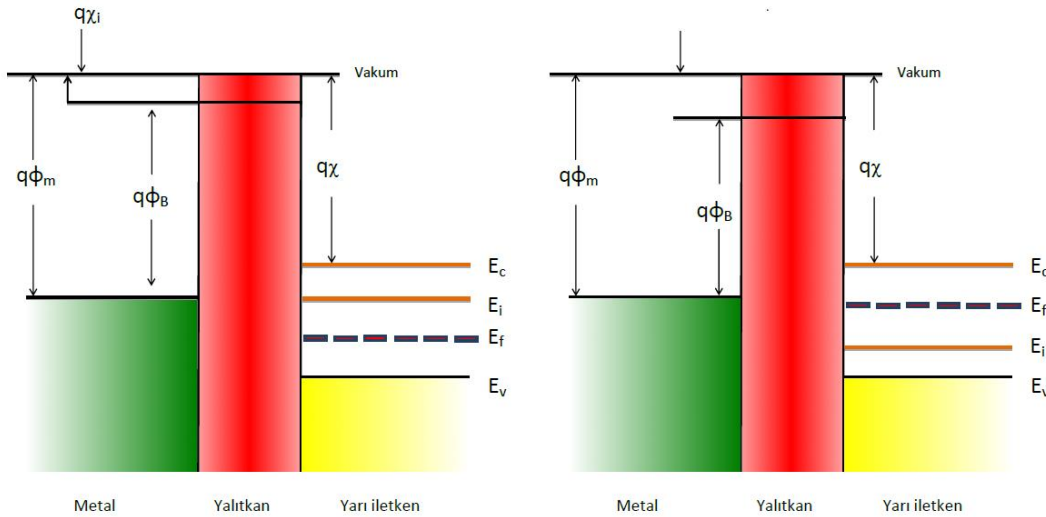
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \quad (\text{n-tipi}) \quad (2.10.a)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \quad (\text{p-tipi}) \quad (2.10.b)$$

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

- ✓ d.c. beslem şartları altında, yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi yoktur yani yalıtkanın öz direnci sonsuzdur.
- ✓ Herhangi bir beslem şartı altında, yapıdaki yükler yalıtkan ile bitişik, metal yüzeyindekiler ile yarıiletkenlerdeki eşit miktarda fakat zıt yönlüdür.

İdeal MIS yapının, $V=0$ durumunda enerji-bant diyagramı Şekil 2.8’ de gösterilmiştir.

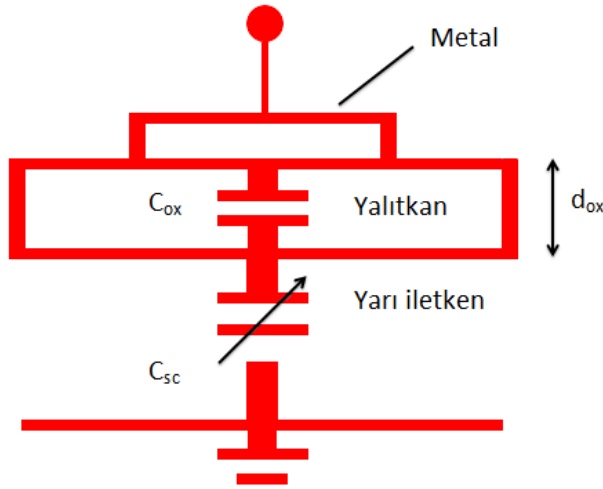


Şekil 2.8. $V=0$ 'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken

İdeal bir MIS yapıdaki metal elektroda gerilim uygulandığında yarıiletkende yük kaymaları oluşur ve yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha az olup uygulanan gerilime bağlıdır. Arayüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükü Q_{sc} oluşur ve termal denge durumunda oluşan uzay yükü potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yarıiletkende metallere göre serbest olmayan yükler vardır bu yükler katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcıları olarak adlandırılırlar ve uygulanan gerilime bağlı olarak ya uzay yükü bölgesini ya da arayüzey bölgesindeki yığılmaları oluştururlar. Uygulanan V_G geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da yalıtkan tabaka üzerine düşer ve aşağıdaki;

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (2.11)$$

eşitlik yazılabilir. Bu ifadede V_{ox} yalıtkan üzerine düşen gerilim, ψ_s ise arayüzeydeki gerilimdir [3,25]. Yalıtkan veya organik arayüzey tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında MIS kapasitansı olarak adlandırılan bir kapasitans oluşur. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler varsa MIS yapının kapasitansı C , yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} olarak gösterilebilir ve eşdeğer kapasitansları bize MIS kapasitansını verecektir.



Şekil 2.9. MIS kapasitansının eşdeğer devresi

Şekil 2.9' da ki eşdeğer devrenin çözümünde MIS kapasitansı aşağıdaki ifade ile verilir.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.12)$$

Yani MIS yapının kapasitansı, C_{sc} ve C_{ox} kapasitanslarının seri bağlanmasına eşdeğerdir. Yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ise,

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.13)$$

olarak verilir. Yukarıdaki ifadede ϵ_{ox} yalıtkan tabakasının dielektrik sabiti, d_{ox} ise onun kalınlığı olup uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından dolayı C_{ox} değeri uygulanan

gerilimle değişmez. Böylece MIS yapının kapasitansındaki değişimi sadece Q_{sc} uzay yükü kapasitansı belirler. Uygulanan gerilime bağlı olarak n-tipi bir yarıiletken için MIS kapasitansında meydana gelen durumlar Şekil 2.10'da gösterilmiştir ve bunları tanımlıyacak olursak[3,25,26];

2.5.1. Yığılım

Metale uygulanan geçit voltajı $V_G = V_{FB}$ (flatband voltajı) olduğu zaman yarıiletkende bantlar düzdür, bükülmez ve ideal bir MIS kapasitör için $V_{FB} = 0$ 'dır. Metale pozitif bir gerilim ($V_G > 0$) uygulandığında bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan sonucu yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronlar yarıiletken arayüzeyine doğru birikir ve bantlar yukarı doğru bükülür (Şekil 2.10.a) ve bu bükülme yüzeye yakın olan yerlerde gözlenir. Arayüzeydeki bu çoğunluk taşıyıcıların birikmesi olayına “yığılım” adı verilir.

2.5.2. Tükenim

Metal plakaya küçük bir negatif gerilim ($V_G < 0$) uygulandığında arayüzey tabaka içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindeki elektronları yüzeyden uzaklaştırır ve iyonlaşan vericilerden dolayı arayüzey bölgesinde pozitif yük oluşur. Dolayısıyla yarıiletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki elektron yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve enerji bantları (E_c ve E_v) aşağı doğru bükülür. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen tüketim tabakası (W_D) genişliği kadar bir bölgede, elektronların azaldığı tüketim bölgesi oluşur. Yarıiletken ön yüzeyinde elektronların azalmasından (tükenmesi) dolayı bu bölge “tüketim bölgesi” olarak adlandırılır (Şekil 2.10.b).

Tükenim bölgesinin kalınlığı aşağıdaki ifade ile verilir:

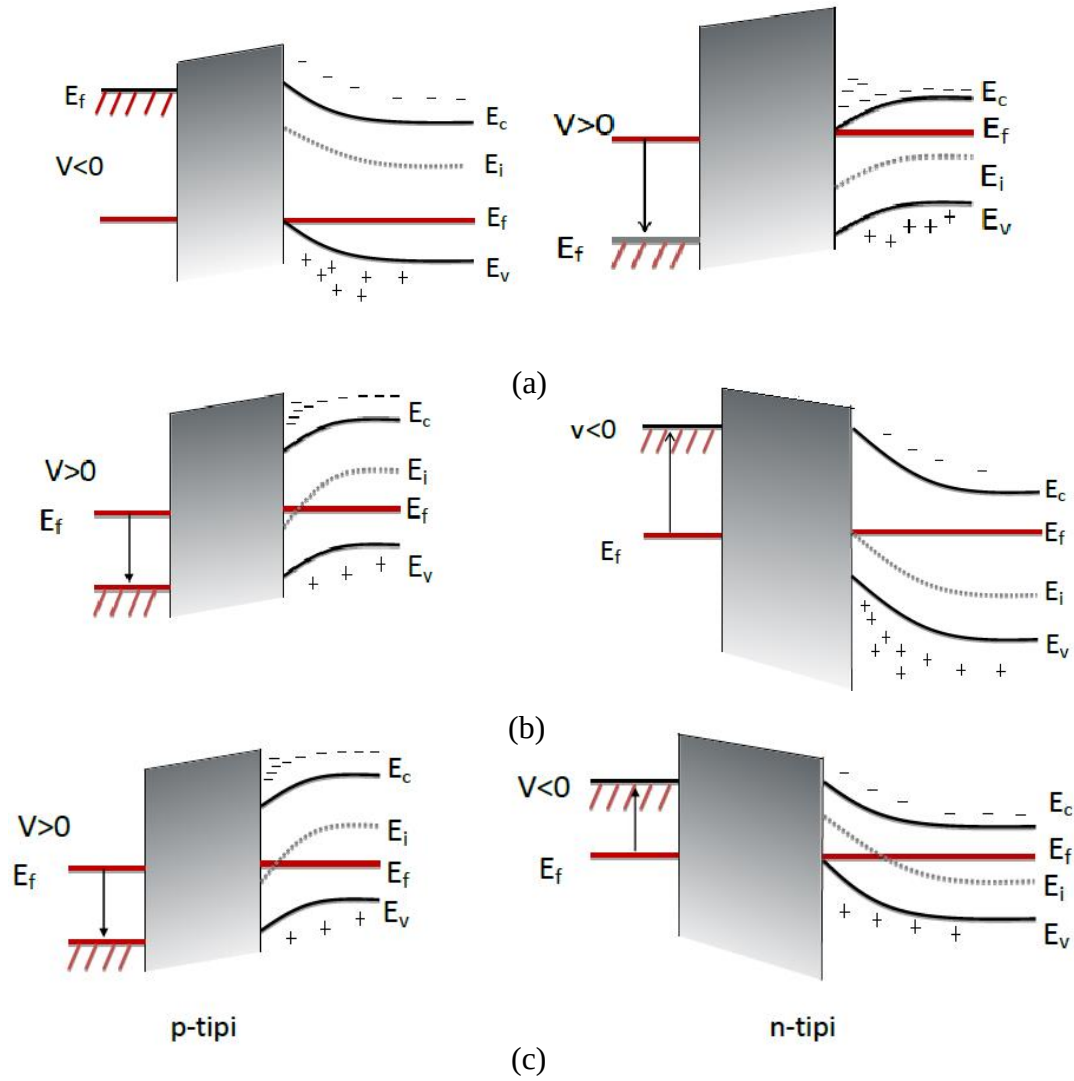
$$W_D = \varepsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.14)$$

Burada ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir.

2.5.3. Tersinim

Metale daha büyük bir negatif gerilim ($V_G < 0$) uygulandığı zaman bantlar daha fazla bükülür. Dolayısıyla yarıiletken arayüzeyinde azınlık taşıyıcısı olan hollerin yoğunluğu artarak elektron yoğunluğundan daha büyük olur. Fermi seviyesi saf durumdaki enerji seviyesinin (E_i) altına geçer ve n-tipi, p-tipi yarıiletken yüzeyi gibi davranır. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak adlandırılır ve şekil 2.10.c'de enerji bant şeması gösterilmiştir. Elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edebilme yeteneği MIS kapasitansını belirler.

Elektron yoğunluğu küçük frekanslarda a.c. sinyalini takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasitans artan gerilimle oksit kapasitans değerine ulaşır. Ara frekanslarda a.c. sinyalini daha yavaş takip edebileceğinden dolayı frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür. Yüksek frekanslarda ise sinyali takip edemez ve kapasitans C_{min} 'da kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin C_{min} 'un altında değerler almasına sebep olur.



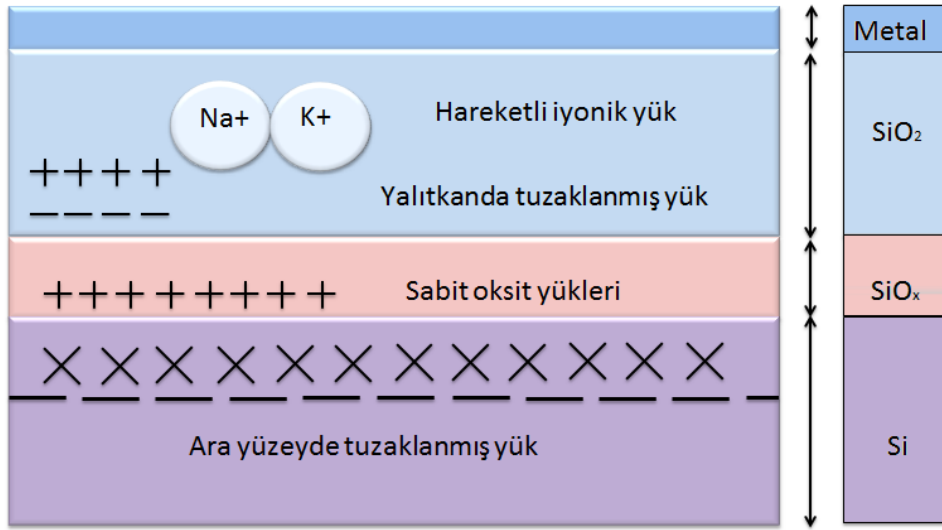
Şekil 2.10. $V \neq 0$ durumunda n tipi yarıiletken için ideal MIS yapının enerji-bant şeması (a) Yığılım (b) Tükenim (c) Tersinim

2.6. Gerçek MIS Yapı

Şekil 2.11'de verilen SiO_2 arayüzeyli bir MIS yapıda görüldüğü gibi arayüzey durumları, iyonlaşmış tuzaklar, hareketli iyonlar, sabit oksit ve arayüzey yükleri gibi nedenlerle ideal MIS yapısından sapmalar gözlenir [3, 27].

Arayüzey durumları: Yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde girilebilir enerji seviyesine arayüzey durumu denir. Arayüzey durumları, alıcı veya verici tipte olabilirler ve iletim bandı ve valans bandıyla yük alış veriş yapabilirler. Arayüzey durumlarında bulunan yükün yoğunluğu Q_{ss} , yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve yalıtkan kalınlığından

etkilenmez. Arayüzey durumları, direnç etkisi ve uzay yükü kapasitesine ek bir kapasite oluştururlar.



Şekil 2.11. İdeal olmayan SiO₂ arayüzey tabakalı bir MIS yapıda arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

İyonlaşmış Tuzaklar: Yalıtkan içindeki stokiometrik ve kimyasal yapı bozukluklarından dolayı yalıtkan içinde tuzaklar bulunur. İyonlaşmış tuzaklarda arayüzey durumları gibi alıcı ve verici tipte olabilirler. Bu tuzaklar, elektron yakalayarak veya bırakarak yüksüz duruma geçerler ve MIS yapısının C-V karakteristiğinde pozitif gerilimden negatif gerilime doğru ve aynı şekilde negatif gerilimden pozitif gerilime doğru gidilirken elektronik histerezis kaymalarına neden olurlar.

Hareketli İyonlar: Hareketli iyonlar genellikle yalıtkan film içinde bulunan ve 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hareketli olan Na⁺, K⁺ ve Li⁺ gibi alkali iyonlardır. MIS yapılarının hazırlanması sırasında kullanılan malzemelerdeki safsızlıklar nedeniyle kristal dilimlerinin yüzeyine yerleşirler ve elektrik alanda hareket ederek MIS yapının kararsızlığına neden olurlar [28].

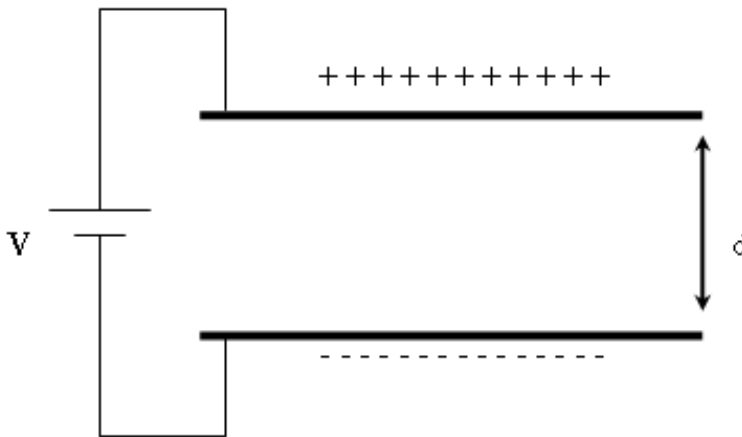
Sabit oksit ve arayüzey yükleri: Sabit oksit ve arayüzey yükleri yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde bulunurlar. Yalıtkanla yarıiletkenin kristal yapılarının farklı olmasından dolayı oksidasyon esnasında yarıiletkendeki yalıtkan tabakasına geçerken olan kristal bozuklukları yerel yüklere neden olurlar.

3. DİELEKTRİKLER ÖZELLİKLER

Dielektrikler, bir dış elektrik alan etkisi altında içerisinde hareket edebilen serbest taşıyıcı bulundurmamaları bakımından iletkenlerden ayrılırlar başka bir ifade ile yalıtkanlar, elektriksel iletkenliği sağlayacak kadar serbest taşıyıcıya sahip değildir ve serbest yük taşıyıcıların yoğunluğu 10^{13} cm^{-3} altında olan maddelerdir. Dielektriklerde tüm yükler belirli atom veya moleküllere bağlı olup hareketleri molekül içinde sınırlıdır ve elektrik alan etkisi altında kutuplanma(polarizasyon) özelliğine sahiptirler. Dielektrik bir madde, elektrik alan içerisine konulduğunda, pozitif ve negatif yükler oluşan elektrostatik kuvvet altında zıt yönlerdeki küçük yer değiştirmeler yaparlar ve bunun sonucunda dipol momentleri oluşur. Elektrik alan etkisi ortadan kaldırıldığında bu yükler eski yerlerine dönerler ve net dipol moment tekrar sıfır olur. Dielektrik maddelerin elektriksel özellikleri genellikle dielektrik sabitleri cinsinden ifade edilir. Çoğu maddelerde bu değer, elektrik alan şiddetinden bağımsızdır, ancak değişken elektrik alan etkisinde hem frekansa hemde sıcaklığa bağlıdır.

3.1. Dielektriksiz ve Dielektrikli Paralel Plakalı Kondansatör

Aralarında d uzaklığı bulunan ve A yüzey alanına sahip iki paralel plakalı bir kondansatör Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör

Plakalardan birinin yükünün $+Q$, diğerinin yükü $-Q$ olduğunu farzedelim. Eğer plakalar arasına bir yalıtkan madde (dielektrik madde) konulursa, yüklerin bir plakadan diğerine

geçişi sınırlanır ve bu plakalar bir üreticinin uçlarına bağlanırsa kondansatör kolaylıkla yüklenebilir. Plakalar arasında oluşan elektrik alan şiddeti,

$$E = \sigma / \epsilon_0 \quad (3.1)$$

ifadesi ile verilir. Burada, σ her bir plaka üzerinde birim alan başına düşen yüzey yük yoğunluğu, ϵ_0 ise boşluğun geçirgenlik sabitidir. Aralarında d uzaklığı bulunan plakalar arasında oluşan potansiyel farkı,

$$V = E.d \quad (3.2)$$

ifadesi ile verilir ve buna göre her plakanın sahip olduğu toplam yük σA olmak üzere paralel plakalı kondansatörün sığası,

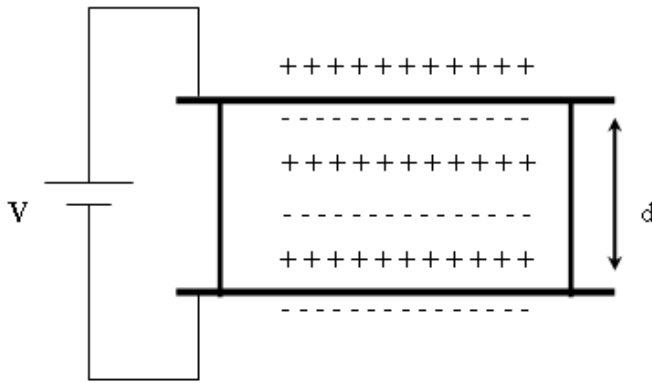
$$C = Q/V = \epsilon_0 A/d \quad (3.3)$$

olarak ifade edilir. Plakalar arasındaki bölgede elektrik yerdeğiştirme kaynağı olarak σ yüzey yük yoğunluğu düşünülebilir. Buna göre elektrik yerdeğiştirme;

$$D = \sigma = \epsilon_0 E \quad (3.4)$$

ile ifade edilir [29-32].

Eğer kondansatörün plakaları arasındaki boşluk tamamen bir dielektrik madde ile doldurulursa, kondansatörün sığası birimsiz ϵ' çarpanı yani dielektrik sabiti kadar artar. Bu sabit her zaman boşluğun geçirgenlik sabiti (ϵ_0) cinsinden ifade edilir ve birden büyük bir sayıdır.



Şekil 3.2. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör

Plakalar arasında dielektrik madde yokken kondansatörün sığası C_0 , kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı V_0 ve elektrik alanı E_0 olsun.

$$V = V_0 / \epsilon' \quad (3.5)$$

Eğer plakalar arasına bir dielektrik madde konulursa potansiyel farkı ve elektrik alan $1/\epsilon'$ çarpanı kadar azalır. Yani,

$$E = E_0 / \epsilon' \quad (3.6)$$

olur. Kondansatör üzerindeki Q yükü değişmez ve sığanın değeri ise ϵ' çarpanı kadar artmaktadır, yani,

$$C = Q_0 / V = \epsilon' Q_0 / V_0 = \epsilon' C_0 \quad (3.7)$$

olur. Plakalar arasındaki bölge tam olarak dielektrik madde ile dolduğu zaman paralel plakalı kondansatörün sığası,

$$C = \epsilon' \epsilon_0 A / d \quad (3.8)$$

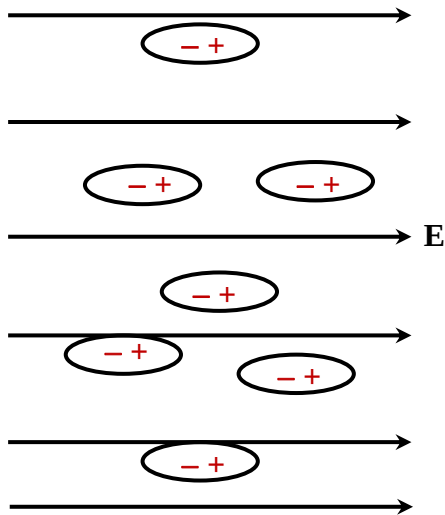
olarak ifade edilebilir. İki plaka arasına yerleştirilen dielektrik materyelin dielektrik sabiti ne kadar yüksekse, sığa o ölçüde artacaktır.

3.2. Dielektrik Kutuplanma

Bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik yerleştirildiği zaman potansiyelin azalması, elektrik alan şiddetinin ($E=V/d$) azalmasını gerektirir ve elektrik alan şiddetindeki ($E=\sigma/\epsilon_0$) bu azalma birim yüzeydeki net yük azaltır. Bu durum, dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde zıt işaretli yüklerin meydana gelmesiyle mümkün olur. Elektrik alan içersine yerleştirilen iletkenlerdeki serbest yükler, alan tarafından uygulanan kuvvetlerin etkisi ile yer değiştirirler ve etki ile meydana gelen yüklerin elektrik alanı elektrostatik denge kurulduğunda dış alanı nötürleştirir yani iletken içinde elektrik alan sıfır olur[29-31].

Kondansatör arasına konulan bir dielektriğin kondansatörün levhalarına karşı olan yüzlerinde yükler meydana gelir. Dielektrik moleküllerin bazıları daima dipol ihtiva ederler ve polar yani kutuplu denilen bu maddelerde pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezleri çakışmaz dolayısıyla yükler birbirinden çok az miktarda ayrılırlar. Polar moleküllere örnek olarak N_2O ve H_2O verilebilir ve her iki molekülde de hidrojen ve azot atomları oksijen atomunun aynı tarafında yer alır. H_2 , N_2 , O_2 gibi simetrik moleküller polar olmayan moleküllere örnek olarak verilebilir ve bu moleküllerde pozitif çekirdeğin ağırlık merkezi ile elektronların ağırlık merkezi çakışır.

Elektrik alan içersine yerleştirilen bir dielektrik içersinde yük hareketi olmamakla beraber elektronlar ait oldukları atomun çekirdeğine çok küçük bir yer değiştirme yaparlar dolayısıyla atomlar çok küçük dipoller geçer ve dielektrik kutuplanır. Elektrik alan kaldırıldığı zaman ise atomlar tekrar eski hallerine dönerler yani dipoller kaybolur. Polar olmayan molekül kutuplandığında yer değiştiren yükleri geri çağıran kuvvetler oluşur ve dış alan tarafından yüklere etkiyen kuvvet, bu geri çağırıcı kuvvete eşit oluncaya kadar yükleri birbirinden ayırır. Moleküller sabit bir uyarım içinde bulunduklarından tam bir yöneliş olmaz. Uygulanan elektrik alan şiddeti arttıkça ve sıcaklık küçüldükçe yönelme derecesi de artar [29].



Şekil 3.3. Dış elektrik alan etkisi altında dipollerin yönelimleri

Eğer dielektrik daimi dipoller yani polar moleküllerden meydana gelmiş ise dış alan olmadığında rastgele doğrultularda yönelirler. Şekil 3.3’ de bir dış alan etkisi altında bulunan P dipol momentlerinin alana paralel yönelimi görülmektedir[30]. Kısmen yönelen bu dipoller, dış elektrik alana karşı koyan zıt yönlü bir iç elektrik alan oluştururlar. Eğer dielektriğin molekülleri daimi dipol momentine sahip değilse dış elektrik alan bir miktar yük ayrışmasına sebep olur. Bu da dış elektrik alanın bir miktar azalmasına neden olur.

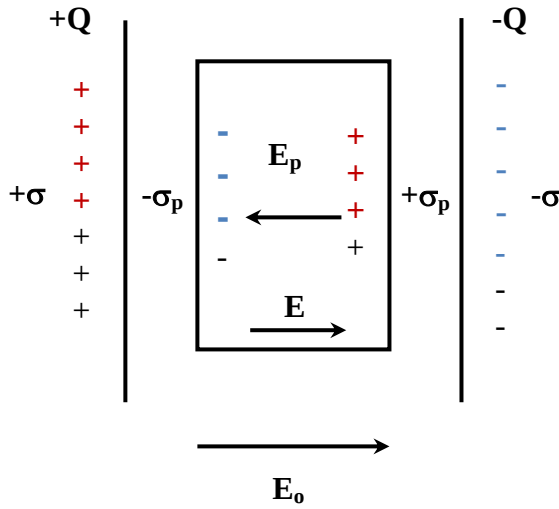
3.2.1. Kutuplanma yükleri

Bir dielektrik madde kondansatörün levhaları arasında bulunduğu zaman, yönelme ile olan kutuplanma, bütün dielektriğin pozitif yüklerinin merkezini, negatif yüklerin merkezinden uzaklaştıracak şekildedir. Dielektrik bütün olarak yük bakımından nötr olmakla beraber polarize olmuştur. Net etki dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde zıt işaretli yük meydana getirecek tarzdadır. Dielektriğin içinde herhangi bir hacim elemanında bir yük fazlalığı yoktur. Dielektrik bütün olarak, elektrik bakımından nötr olduğuna göre, yüzeyde meydana gelen negatif ve pozitif kutuplanma yükleri eşit olmalıdır. Bu olayda dielektriğin kondansatörün levhalarına bakan yüzlerinde meydana gelen yükler son derece ince bir tabaka içindedir. Bu yükler yakın atomların etkisi altındadır. Bunlara bağlı yükler denir. Çünkü dielektriğin yüzeylerine dokundurulan iletken bir levha ile bu yüzeylerden hiçbir yük kaldırılamaz. Bir iletkende serbest yükler bulunduğu halde, polarize bir yalıtkanda meydana gelen yükler bağılırlar [29,30].

3.2.2. Kutuplanma yüklerinin alanı

Dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerinde meydana gelen kutuplanma yükleri nedeniyle levhalar üzerindeki serbest yüklerden ileri gelen alana ters yönde bir alan meydana gelir. Bu durum Şekil 3.4' deki gibi açıklanabilir. Şekil 3.4' de görüldüğü gibi düzgün bir E_0 elektrik alan içindeki bir dielektrik maddede moleküllerin pozitif kısmı elektrik alan yönünde, negatif kısmı da alana zıt yönde yönelir. Böylece uygulanan elektrik alan, dielektrik madde tümü ile nötr olmasına karşın dielektriği polarize eder. Elektrik alanın etkisi sonucu, negatif yükler sol yüzeyde, pozitif yükler sağ yüzeyde birikmişlerdir. Dielektrik bütünü ile nötr kalmasından dolayı, negatif yüzeyde oluşan yük miktarı pozitif yüzeyde oluşan yük miktarına eşittir.

E_0 ile dielektrik bulunmadığı zamanki alan şiddetini ve E_p ile polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği alanın şiddeti gösterilirse, bileşke alan bunların vektörel toplamına eşit olur.



Şekil 3.4. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_p \quad (3.9)$$

E_0 polarize eden alan ile, polarize yüklerden ileri gelen E_p alanı zıt yönlüdürler. O halde Eş. 3.9 denklemi,

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}_p \quad (3.10)$$

yazılabilir. E_p alanı kutuplanmayı önlemeye çalışan alandır. Bileşke alan daima E_o yönündedir. Kondansatörün levhaları üzerindeki serbest yük yoğunluğu σ , dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerde meydana gelen kutuplanma yük yoğunluğu σ_p ise, etkili yük yoğunluğu $(\sigma - \sigma_p)$ olur. σ serbest yük yoğunluğu, E_o elektrik alanına,

$$E_o = \frac{\sigma}{\epsilon_o} \quad (3.11)$$

ile bağlıdır. σ_p kutuplanma yük yoğunluğu ise E_p elektrik alanına,

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (3.12)$$

bağıntısı ile bağlı olur. Bu nedenle dielektrik içindeki alan yani bileşke alan,

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_o} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (3.13)$$

olur.

Dielektriğin her noktasında P kutuplanma, bileşke E alanı ile aynı yönde ve doğru orantılıdır. Bu özellik lineer ve homojen izotropik dielektrikler için,

$$P = \epsilon_o \chi E \quad (3.14)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada χ , dielektriğin elektrik alınganlığı olarak adlandırılan bir niceliktir. Boşlukta polarize olacak madde olmadığından $\chi = 0$ olur.

$$\chi = (\epsilon' - 1) \quad (3.15)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Kutuplanma etkisi, dielektrik yüzeyde bulunan yüklerin iletken olduğu gibi serbestçe hareket edemeyip, yer değiştirmesi ile anlaşılır [29]. Polarize dielektrikler için, D elektrik yerdeğiştirme veya elektrik akı yoğunluğu, dielektrik içindeki E alanı ile orantılıdır. D elektrik yerdeğiştirme,

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (3.16)$$

ifadesiyle verilir. Eş. 3.14, Eş. 3.16' da yerine konulursa,

$$D = \varepsilon_0 (1 + \chi) E = \varepsilon_0 \varepsilon' E \quad (3.17)$$

olarak elde edilir [29-32].

3.3. Kutuplanma Mekanizmaları

Dielektrikler polar ve polar olmayanlar diye genelde iki kısma ayrılırlar. Polar maddeler içerdikleri moleküllerindeki atomların konumlarından kaynaklanan pozitif ve negatif iyonların yük merkezleri bir noktada çakışmadıklarından kalıcı elektrik dipol momentlerine sahiptirler. Bu elektrik dipol momentleri çoğu zaman çift-kutup momentleridir ve bunlara çift kutuplu maddeler denir. Dielektriklerde temelde üç tip kutuplanma meydana gelmektedir. Bunlar elektronik, iyonik ve yönelme kutuplanmalarıdır [31,33].

3.3.1. Elektronik kutuplanma

Elektrik alanın uygulanmasıyla bütün atomlar ve iyonlarda ortaya çıkar ve tüm dielektriklerde diğer tür kutuplanmalar olmazsa dahi gözlenebilir. Bunun nedeni, bir atomdaki elektronların oluşturduğu negatif yük dağılımının merkezinin çekirdeğin yük merkezine göre dış elektrik alanın etkisiyle atomik ölçekte kaymasıdır. Elektronun kütlesi oldukça küçük olduğundan uygulanan dış elektrik alanla kısa bir süre içinde oluşur (10^{-15} sn).

İyonik yapılı olmayan dielektriklerde yalnızca elektronik kutuplanma oluşur ve polar olmayan bu maddelerin optik kırılma indislerinin karesi dielektrik sabitine eşittir ($n^2 = \varepsilon$). Buna Maxwell ilişkisi denmektedir. Bunun fiziksel içeriği şöyle açıklanabilir: elektromanyetik dalganın elektrik vektörü madde içindeki yüklere, başlangıçtaki konumlarını değiştirecek kuvvet uygular ve sonuçta bir çift-kutup oluşturacaktır. Sıkı bağlı elektronlar oluşan bu kutuplanmaya daha az katkıda bulunurlar. Elektromanyetik dalganın

elektrik vektörü devamlı değiştiğinden elektronlar bu değişmeyi izleyebildiği sürece etkileşmeli çift-kutup momentleri oluşacaktır. Ağır iyonlar elektromanyetik alanı kızıl ötesi bölgeye kadar izleyebildiklerinden görünür bölgede kutuplanmaya çok az katkıda bulunurlar. Oysaki elektronlar bu bölgede de yanıt verebilirler ve elektronik kutuplanmayı oluştururlar. Sürekli yön değiştiren bu çift-kutuplar uyarıldığı frekansın aynıyla ışırlar. Bu yüklerin varlığı ve elektromanyetik alan ile etkileşimi herhangi bir enerji kaybına neden olmaz, yalnızca geçişini geciktirir. Bu malzeme, elektromanyetik dalganın hızını azaltarak, kendi içindeki dalganın hızının boşluktakine oranı biçiminde bilinen kırılma indisine sahip olur. Optiksel kırılma indisinin elektronik kutuplanmadan türediği görülür. Daha büyük kutuplanma daha fazla geciktirici davranışa neden olacağından bu da kırılma indisinin büyümesi demektir. Bu, manyetik olmayan malzemeler için elektromanyetik teoremin bir sonucudur. Kutuplanmayan yükler içeren bir ortamda ise dielektrik sabitinin (ϵ) değeri “1” olacak ve gecikme olmayacağından $n = 1$ olur.

3.3.2. İyonik kutuplanma

Elektronik ve iyonik kutuplanmanın ortak yönü, her ikisinde de yüklerin alan yönünde birbirlerine göre konum değiştirmesidir ve dolayısıyla bu iki kutuplanmaya etkileşmeli kutuplanma denmektedir. İyonik kutuplanmada farklı tip atomlar molekülleri oluşturduğundan, bu atom elektronları simetrik olarak paylaşmayacaktır. Yani, elektron bulutu yük merkezi kayarak daha kuvvetli bağlayıcı atomlara doğru yönelecektir. Böylece atomlar zıt kutuplu yükler kazanırlar ve bu net yüklere etkiyen bir dış elektrik alan, atomların kendi aralarında denge konumlarını değiştirecektir. Yüklü atomların veya atom gruplarının birbirlerine göre bu yer değiştirmesi ile ikinci bir tip etkileşmeli çift-kutup moment meydana gelecektir. Bu, dielektriğin iyonik kutuplanmasıdır. Elektronik kutuplanmaya göre uzun olmakla birlikte iyonik kutuplanma içinde oldukça kısa bir süre yeterlidir (10^{-13} - 10^{-12} sn). Bu kutuplanmanın varlığında Maxwell ilişkisi geçerli değildir. Bağlı dielektrik katsayısı her zaman optik kırılma indisinin karesinden büyük olacaktır.

3.3.3. Yönelme kutuplanması

Yönelme kutuplanması, dış elektrik alan olmadan da elektrik çift-kutup momentleri içeren, polar maddeler diye adlandırılan dielektriklerde oluşur. Bazı dielektriklerde kuadropol (dört kutuplu), oktopol (sekiz kutuplu) vb. çok kutuplular da bulunabilir. Fakat bunların

kutuplanmaya katkısı oldukça azdır. Böyle elektrik momentlerine (çift-kutuplara) dış elektrik alan bir tork uygulayarak kendisiyle aynı yönetime zorlayacaktır ve sonuçta yönelme kutuplanması ortaya çıkacaktır. Yönelim kutuplanmasında sıcaklık etkileri de göz önüne alınmalıdır. Yönelim kutuplanmasında çift-kutup momentli moleküllerin alan uygulanmadan önceki durumuna yeniden geçmesi için moleküllerin büyüklükleri ve ortamın viskozları ile doğru orantılı olan bir zamana ihtiyaç vardır.

Bu üç kutuplanmada dielektrik içinde yerel olarak bağlı yüklerle oluşmaktadır. İyonik ve elektronik kutuplanmanın ortak yönü; her ikisinde de yüklerin dönmeyip birbirlerinden uzaklaşmalarıdır. Yönelme kutuplanmasında kalıcı çift-kutuplar dış elektrik alan etkisiyle dönmeye zorlanırlar ve alanın hızlı değişimlerinde etkili değildirler. Düşük frekanslarda her üç kutuplanma da oluşur. Frekans arttıkça önce kalıcı, sonra iyonik ve en sonunda da elektronik çift-kutuplar ki, son ikisi etkileşmeli çift-kutuplar olup, dış alanın değişmesini izleyemez duruma gelirler ve ϵ_r “1” değerine ulaşır [30].

3.3.4. Arayüzey-uzay yük kutuplanması

Elektronik, iyonik ve çift-kutup yönelme kutuplanmalarının ortak yönü, malzemenin sınır yüklerinin yer değiştirmesi ve yönelme etkilerinin ortaya çıkmasıdır. Uzay yükü veya arayüzey kutuplanması diğerlerinden farklı olarak hareketli yüklerden oluşur. Diğerlerinde atom ve moleküller; kendilerini, çevrelerinin kutuplanması ile değişikliğe uğrayan, temelde ise uygulanan dış alanı da içeren bir yerel alan etkisi altında bulurlar. Arayüzey kutuplanmasında ise malzemenin hacmindeki uzay yüklerinin veya dielektriğin arayüzeylerindeki yüzey yüklerinin birikmesine sebep olan büyük ölçüde elektrik alan değişiklikleri etkili olmaktadır.

Polikristal malzemelerde birleşme yüzeylerinde serbest yükler birikebilir, bu da kristalin arayüzey kutuplanmasını doğurur. Bu birikmiş yükler, elektrotlardaki görüntü yükleri etkiler ve diğer kutuplanmalara olumlu etkide bulunurlar. Arayüzey kutuplanması üzerine temel düşünce; kristaller arası ayırıcı arayüzeylerle bağlantılıdır. Bu arayüzeyler, serbest yüklerin bir kristalden diğerine hareketini engelleyici rol oynarlar. Yani kristalleri birbirinden izole ederler. Bu engeller, herhangi bir hava katmanından veya yüzey katmanının bir yalıtkan ile kaplanmasından kaynaklanabilir. Bu konuda çalışanlardan bir kısmı arayüzey kutuplanmasının nedeninin, tek bir kristaldeki kusurlar(boşluklar,

safsızlıklar, çatlaklar) üzerinde boşluk yüklerinin birikimi olduğunu söylemişlerdir [30-32]. Bu kutuplanma, malzemenin içinde herhangi bir şekilde yerleşmiş uzay yüklerinin elektrotlar üzerindeki görüntü yükleri etkilemesinin bir sonucudur. Bu kutuplanma mekanizması, düşük ve orta düzey frekanslardaki dielektrik yapıların tasarımında büyük rol oynamaktadır [33].

3.4. Dipol Durulma Kavramı

Bir numune elektrik alan içerisine konulduğunda bu numune için elektrik yerdeğiştirme (D) ve elektrik alan (E) zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Elektrik yerdeğiştirme vektörünün (D) zamana bağlılığı (dipol-durulma olayı), daimi dipollere sahip numunelerde görülür. Bu durum, hiç dipolü olmayan numunelerden farklıdır. Bir kristale $t = 0$ anında statik bir elektrik alan (E) belli bir süre uygulanmış olsun. Kristaldeki dipollerin hareketi iki şekilde olur: Bu hareket, dipollerin, ya uygulanan elektrik alan yönünde hemen düzenlenmesi, ya da son konfigürasyonlarını yavaş bir şekilde bulmalarındır. Elektrostatikte elektrik yer değiştirme ve elektrik alan arasındaki ilişki, homojen izotropik ve lineer dielektrikler için,

$$D = \epsilon E \quad (3.18)$$

ifadesi ile verilir ve burada ϵ zamandan bağımsız gerçek bir sabittir. Numune, sabit bir elektrik alan etkisinde bırakıldığında elektrik alan ve dolayısıyla elektrik yerdeğiştirme niceliğinin zamanla değişimi görülmez. Bu durumda,

$$D = \epsilon_s E \quad (3.19)$$

olur. Burada ϵ_s , statik dielektrik geçirgenlik sabitidir. Dielektrik numuneye Δt süresince ΔE artırımları ile elektrik alan uygulanırsa D’de ΔD kadar bir artış meydana gelir. Bu artış,

$$\Delta D = \epsilon_\infty \Delta E \quad (3.20)$$

ile verilir. Burada ϵ_∞ , numunedeki daimi dipoller hareket etmeden önce, ΔD ve ΔE ’deki ani bir değişime karşılık gelen geçirgenlik değerini ifade eder.

Dielektrik numunedeki bir dipol yönelimi ise açısal frekansı ω olan periyodik bir elektrik alan uygulandığında meydana gelir. Periyodik alan,

$$E = E_1 e^{i\omega t} \quad (3.21)$$

olur. D elektrik yerdeğiştirme vektörü, elektrik alana uymaya çalışır. Bu durum aralarındaki muhtemel bir faz kayması ile ifade edilir. Sonuç olarak, dielektrik geçirgenlik sabitinin aynı fazda ve farklı fazda olan iki bileşeni bulunur. Bu durum aşağıda verilen kompleks gösterimle ifade edilir [34].

$$D = \varepsilon^* E = (\varepsilon' - i\varepsilon'')E \quad (3.22)$$

Burada, gerçek bileşen ε' ve sanal bileşen de ε'' ile ifade edilmektedir. Bu durumda kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti,

$$\varepsilon^* = \left[\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] + i \left[\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \right] \quad (3.23)$$

ile ifade edilir [34]. Burada τ zaman sabiti olup dielektrik durulma zamanı olarak adlandırılır. Numuneye özgü bir nicelik olan τ sıcaklığın bir fonksiyonudur ve ω ise sıcaklıktan bağımsızdır.

İlk terim gerçek terimdir. E ile çarpıldığı zaman, E ile aynı fazda olan D bileşeni elde edilir. İkinci terim, sanal terimdir. E ile çarpıldığında, D'nin E ile aynı fazda olmayan ya da aralarındaki faz farkı 90° olan bileşenini verir. Kompleks notasyonda ifade edilmiş olan dielektrik geçirgenlik sabitinin aynı faz ile farklı faz (gerçek bileşen-sanal bileşen) bileşenleri,

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3.24)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \quad (3.25)$$

olur. Eş. 3.24 ve Eş. 3.25 yeniden düzenlenirse,

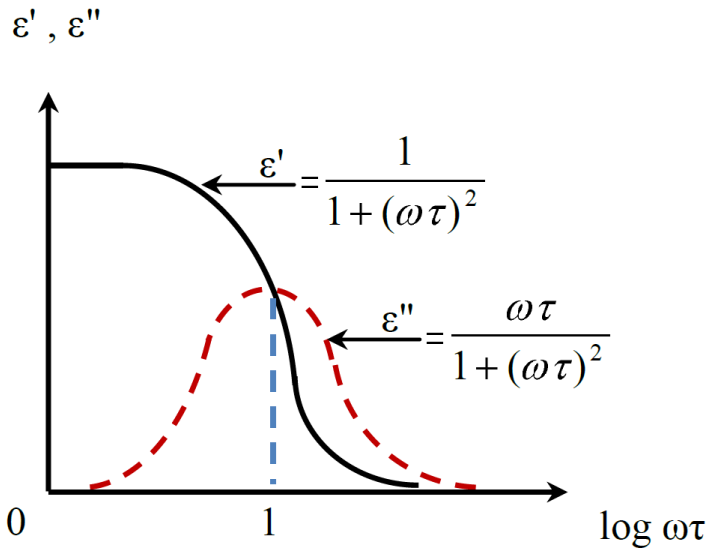
$$\frac{\epsilon' - \epsilon_\infty}{\epsilon_s - \epsilon_\infty} = \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (3.26a)$$

$$\frac{\epsilon''}{\epsilon_s - \epsilon_\infty} = \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (3.26b)$$

elde edilir [35]. Eş. 3.26a' nın sağ tarafı frekans sıfırla sonsuz arasında değiştiğinde sıfıra yaklaşır. Bu terim Şekil 3.5' de dolu çizgi ile verilmiş olan $\log \omega\tau$ 'nın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Çok düşük frekanslarda ($\omega \ll 1/\tau$), dielektrik sabitin gerçek bileşeni, statik dielektrik sabitine yaklaşır. Yüksek frekanslarda ($\omega \gg 1/\tau$) ise, gerçek bileşen ϵ_∞ değerine yaklaşır. Yüksek ve alçak frekans arasında kalan bölgede ise düzgün geçişler (iki faz bölgesi arasında) olur. Dielektrik sabitin sanal bileşeni ile ilgili eğri yine Şekil 3.5' de (kesik çizgili olan) verilmektedir. Eğride bu terimin $\omega = 1/\tau$ olduğu noktada belirli bir maksimum verdiği görülmektedir. Enerji kayıp değeri ise kayıp açısı δ ile tanımlıdır ve

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{\epsilon_s + \epsilon_\infty} \omega\tau \quad (3.27)$$

ile ifade edilir [34,36].



Şekil 3.5. Dielektrik sabitinin gerçek (ϵ') ve sanal (ϵ'') bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi

3.5. Dielektrik Sabiti ve Dielektrik Kayıp Ölçüm Tekniği

Dielektriklerin, dışardan uygulanan elektrik alana duyarlı olması onların elektriksel özelliklerini araştırmada önemli bir faktör olarak görülür. Bir dielektrik madde, bir elektriksel devre ile özdeşleştirilir. Araları bir dielektrik madde ile doldurulmuş paralel plakalı kondansatör yapısı, admittans ölçüm tekniği ile karakterize edilebilir. Buna göre admittans(Y),

$$Y = G + i\omega C \quad (3.28)$$

ile ifade edilir. G iletkenlik, ω sürücü geriliminin açısal frekansı, C ise toplam kapasitedir. Bu ifadede C yerine ϵ^*C_0 yazıldığında,

$$Y = G + i\omega(C_0\epsilon^*) \quad (3.29)$$

şekline dönüşür. C_0 kondansatörün dielektrik madde yok iken sahip olduğu kapasite, ϵ^* ise dielektrik maddenin boşluğa göre sahip olduğu bağıl dielektrik geçirgenlik sabitidir. Bağıl dielektrik sabiti,

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (3.30)$$

olarak ifade edilmektedir. Buna göre admittans,

$$Y = G + i\omega C_0(\epsilon' - i\epsilon'') = (G + \omega\epsilon''C_0) + i\omega C_0\epsilon' \quad (3.31)$$

olur. Buna göre admittansın gerçel ve sanal bileşenleri elde edilmiş olur. Empedans ise admittansın tersine eşittir. Yani, $Z = 1/Y$ olur. Buna göre,

$$Z = \frac{1}{i\omega C + G} = \frac{1}{i\omega C_0\epsilon^* + G} \quad (3.32)$$

ifade edilir. Eş. 3.30, Eş. 3.32’de yerine yazılırsa dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp;

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (3.33)$$

$$\epsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega R C_0} \quad (3.34)$$

olarak elde edilir [37].

Dielektrik maddenin elektriksel davranışı bir paralel RC devresi ile izah edilebilir. İdeal bir kondansatör, bir a.c. sinyal uygulandığında kondansatörden geçen akım üzerinde oluşan potansiyelden 90° ileridedir. Fakat paralel plakalar arasına bir dielektrik malzeme konulduğunda, sistemde dielektrik içindeki kutuplanmadan kaynaklanan kayıptan ötürü bu faz farkı 90° dereceden daha küçük değerlere iner. Bir kondansatöre a.c. gerilim ($V(t)=V_0\cos\omega t$) uygulandığında, kondansatördeki toplam akım,

$$I = I_c + I_l = (i\omega C + G)V \quad (3.35)$$

olarak ifade edilir. Burada I_l ; a.c. gerilim ile aynı fazda olan kayıp akımı, I_c ; a.c. gerilim ile farklı fazda olan yük akımı ve G ise dielektrik maddenin iletkenliği olarak adlandırılır [38].

Yük ve kayıp akımı,

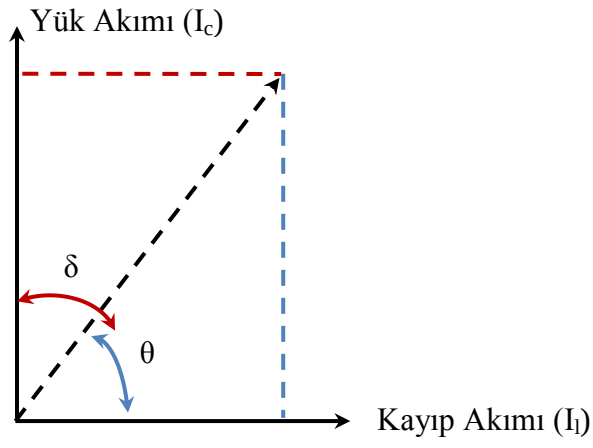
$$I_c = \omega CV = \omega C_o V \varepsilon' \quad (3.36)$$

$$I_l = GV = \omega C_o V \varepsilon'' \quad (3.37)$$

ile verilir.

Dielektrik içeren bir kondansatörden geçen akım, bileşenleri ile birlikte Şekil 3.6' da gösterilmiştir. Şekil 3.6' daki δ ve θ sırasıyla kayıp ve güç faktörü açılarıdır. δ terimi, numune üzerindeki a.c. gerilim etkisi nedeniyle, dielektrik bir maddenin davranışında ifade edilmiş olan periyodik elektrik alan ile onunla aynı fazda olmayan elektrik yerdeğiştirme arasındaki faz kayması olarak tanımlanır. $\tan \delta$ ise, sığasal olarak numunede depolanan enerjinin bir periyot kayıp miktarı biçiminde kayıp tanjant yada kayıp açısı olarak ifade edilir. Dielektrik maddenin iletkenliği arttıkça kayıp akımı artacağından kayıp açısı büyüyecektir. Kayıp açısı, ölçüm esnasında kayıp akımının yük akımına oranı olarak elde edilir ve Eş. 3.38 ile ifade edilir [38,39].

$$\tan \delta = \left| \frac{I_l}{I_c} \right| = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \quad (3.38)$$



Şekil 3.6. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_c) ile kayıp akımı (I_l) arasındaki ilişki

4. DENEYSEL YÖNTEM

4.1. Au/(%1 GP katkılı-(Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x)/n-Si Yapıların Hazırlanması

4.1.1. Kristal temizleme

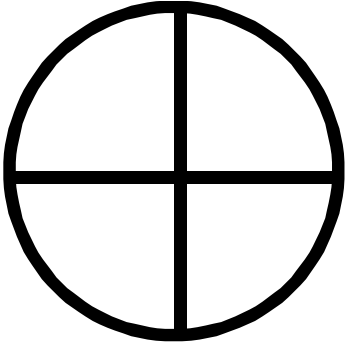
Yarıiletken kristalin yüzeyinde laboratuvar ortamındaki bazı organik kirliliklerden dolayı kimyasal temizleme ve numune büyütülme esnasında çok sayıda safsızlıklar oluşabilir. Oluşan bu safsızlıklar yarıiletken aygıtın performansını olumsuz yönde etkileyeceğinden dolayı kristal yüzeyinin son derece dikkatli temizlenmesi gerekir. Bu çalışmada, hazırlanan Au/(%1GP katkılı-(Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x)/n-Si Schottky engel diyotlarda yarıiletken olarak (100) yönelimli, 250 µm kalınlıklı, 0.001-0.005 Ω.cm öz dirençli ve P-katkılı n-Si kullanılmıştır. Doğrultucu ve omik kontaklar için % 99.999 saflıkta Au kullanılmıştır. Kullanılan n-Si kristaller, fabrikasyon olarak bir yüzeyi (ön yüzü) kimyasal olarak parlatılmış ve arka yüzeye ohmik kontak yapılacağı için mekanik parlatma yapılmasına gerek duyulmadı. Yarıiletken kristal üzerindeki organik ve diğer kirlilikleri temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri önemli ölçüde ortadan kaldırmak için kristaller ultrasonik banyo içerisinde kimyasal olarak bir takım aşamalardan geçirildi. Öncelikle kristalleri tutmak için kullanılan cımbız, beher ve diğer tüm araç-gereçler kral suyunda ultrasonik banyo içinde temizlenip de-iyonize suyla durulandıktan sonra fırında yaklaşık 80 °C de ısıtılarak sterilize edildi. Yarıiletken kristallerin yüzey temizlenmesi için şimdiye kadar literatürde birçok farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu çalışmada n-Si yarıiletken kristallerin temizlenmesinde kullanılan işlem basamakları aşağıda verildi:

1. n-Si kristaller, CP₄ olarak bilinen kral suyunda (HNO₃ (nitrik asit): HF (hidroflorik asit): COOHCH₂H₅:H₂O) ve 3:1:2:2 oranlarında yaklaşık 30 saniye süreyle ultrasonik banyoda yıkandıktan sonra 18 MΩ dirençli de-iyonize suda 5 dakika süreyle durulandı.
2. H₂SO₄, H₂O₂ ve %20 HF (1:1:1) karışımları 3 dakika süreyle yıkandıktan sonra yine 18 MΩ dirençli de-iyonize suda 5 dakika süreyle durulandı.
3. HNO₃, HF, H₂O, %20 HF (6:1:35:1) karışımları 3 dakika süreyle yıkandıktan sonra yine 18 MΩ dirençli de-iyonize suda 5 dakika süreyle durulandı.
4. Kimyasal olarak temizlenen n-tipi silisyum kristal yüzeyinde herhangi bir doğal oksitlenme olmasını önlemek için, n-Si kristaller kuru azot (N₂) ile iyice kurutulduktan

sonra omik kontak oluşturmak için hemen yüksek vakumlu metalde buharlaştırma sistemine alındı.

4.1.2. Omik kontağın oluşturulması

Omik ve doğrultucu kontağın oluşturulmasında Edwards marka Bendrix CVC1S buharlaştırma sistemi kullanıldı. Öncelikle, kontaklar için kullanılan Au, flaman (tungsten) ve maske olarak kullanılan ince bakır levhalar kral suyunda ultrasonik banyoda kimyasal olarak iyice temizlendikten sonra de-iyonize suda durulandı. Kimyasal olarak iyice temizlenen yarıiletkenin arka mat yüzeyine Şekil 4.1’ de gösterilen bakır maske yardımıyla 10^{-6} Torr’da yaklaşık 1500 Å kalınlığında %99.999 saflıkta Au buharlaştırıldı. Daha sonra düşük dirençli bir omik kontak oluşturmak için n-Si/Au 500 °C de 5 dakika süreyle tavlandı. Böylece n-Si yarıiletken kristalin arka yüzeyine buharlaştırılan yüksek saflıktaki Au’ nı yarıiletkenin içeresine çöktürülerek omik kontak oluşturuldu. Omik kontağın oluşup oluşmadığını test etmek amacıyla n-Si/Au yapının I-V ölçümleri alındı ve akım ile voltaj arasında bir lineerlik olduğu (omik davranış) gözlemlendi.



Şekil 4.1 Ohmik kontak oluşturulmak için kullanılan bakır maske.

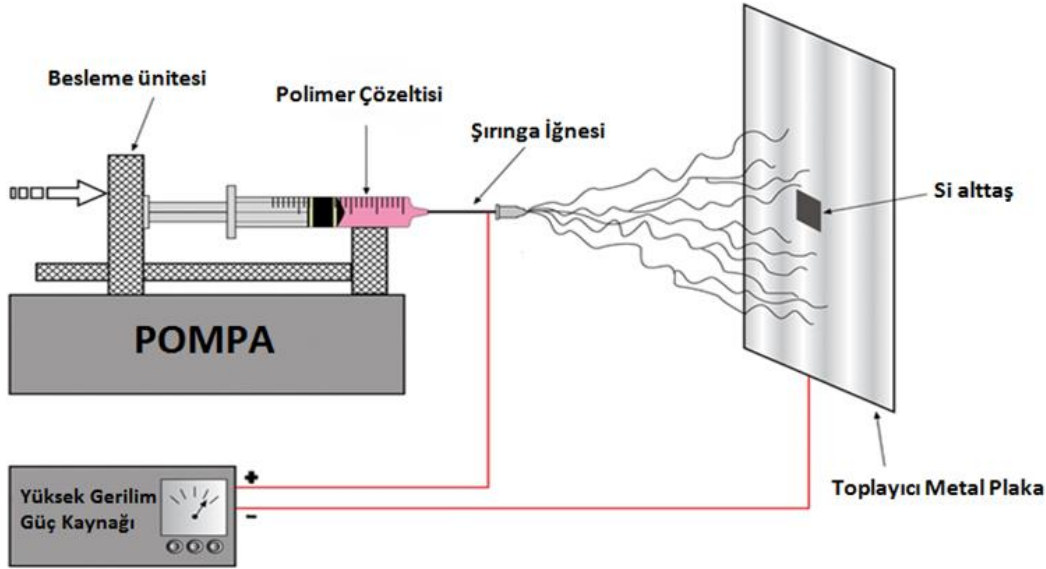
4.1.3. GP katkılı-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x arayüzey tabakanın oluşturulması

Omik kontak oluşturulduktan sonra arayüzey tabakanın oluşturulması için çözeltinin hazırlanması ile elektro-eğirme yöntemi aracılığıyla arayüzey kaplanmasına başlandı. Elektro-eğirme sisteminin kurulumu, Şekil 4.2’ de verildiği gibi 3 temel parçadan ibarettir:

- ✓ Şırınga pompası
- ✓ Yüksek gerilim güç kaynağı

- ✓ Elektrikli iletken toplayıcı

Şırınga pompası, polimerik çözeltiyi şırınga yardımıyla belirli aralıklarla (örneğin saatte 0.5 ml gibi) aktarabilen bir cihazdır dolayısıyla elektro-eğirme sistemi için önemli parçalardan birisidir.



Şekil 4.2. Elektro-eğirme sistemi ve mekanizması

Bu teknikte, polimer-metal tuzlarının çözeltisi şırınganın, yakınındaki bir toplayıcı levha arasına yüksek voltajlı güç kaynağına göre 50 kV' a kadar gerilim uygulanır. Böylece şırınga ucunda biriken çözelti damlacığı nano boyuttaki liflerden oluşmuş bir lif yumağı şeklinde düşünülebilir ve bu lif yumağındaki nano-lifler karşı taraftaki metal toplayıcı levhaya nanofiberler şeklinde aktarılmaktadır. Toplayıcı levhada oluşan fiberlerin yüzeyde çapları 30 nm' den 1 mikronun üzerindeki değerlere kadar değişebilmektedir. Elektro-eğirme yöntemi, yüksek elektrostatik alana maruz bırakılan polimer çözeltisinin benzer yükler ile yüklenerek ayrışma ve incelme gösterip, çok ince fibril yapılar oluşturması şeklinde özetlenebilir. Bu yöntemi en basit şekliyle anlatacak olursak;

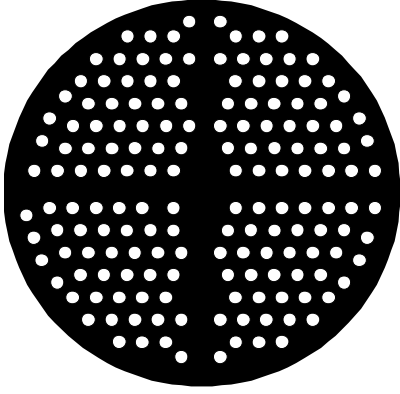
- ✓ Bir polimer çözeltisi şırınga içine konur ve bu şırıngadan belirli bir mesafe uzağa da toplayıcı-metal bir plaka yerleştirilir.
- ✓ Yüksek gerilim sağlayacak güç kaynağının artı ucu şırınganın metal olan ucuna bağlanırken, toplayıcı plaka da topraklanır.
- ✓ Böylece şırınga ve toplayıcı plaka arasında yüksek bir elektrik alan elde edilmiş olur.

- ✓ Güç kaynağı tarafından sağlanan gerilim arttırıldıkça yeterince yüksek bir değere ulaşan elektrik alan kuvvetleri, çözelti üzerindeki visko-elastik ve yüzey gerilimi kuvvetlerini yenerek polimer molekülleri şiringadan toplayıcıya doğru taşınır.
- ✓ Sonuç olarak toplayıcı plaka üzerinde nano boyutta çaplara sahip lifler oluşur.

Bu işlemde ilk olarak, kütlece % 10'luk PVA çözeltisi hazırlanmış olup, PVA tozu deiyonize su ile 80 °C'de 3 saat boyunca su banyosunda karıştırılarak elde edilmiştir. Ardından metal asetat ve nitrat tuzlarının çözeltisi deiyonize su ve asetik asit yardımıyla oda sıcaklığında 2 saat karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan kütlece % 10'luk PVA çözeltisi ile metal tuzların çözeltisi birbirlerine eklenerek oda sıcaklığında 2 saat daha karıştırılmış olup, bu işlem sonucunda elektrospinlenecek PVA/(%1GP katkılı- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$) hibrit polimer çözeltisi hazırlanmıştır. Böylece elektrospin işlemi, n-Si/Au yapının metal kolektöre yapıştırılması ve karşısındaki şiringaya da çözelti yerleştirilmesi sağlanmış olup, şiringa ucu ile metal kolektör arasına, güç kaynağı yardımıyla 17 kV'luk bir potansiyel farkı gönderilerek şiringa ucundaki çözeltinin nanolifler halinde n-Si/Au yapının üzerine birikmesi sağlanmıştır. Şiringa ucundaki çözelti bir şiringa pompası yardımıyla ittirilmiş olup, saatte 0.5 ml aktaracak şekilde ayarlanmıştır. Şiringa ucu ile metal kolektör arasındaki uzaklık da 15 cm olarak ayarlandı.

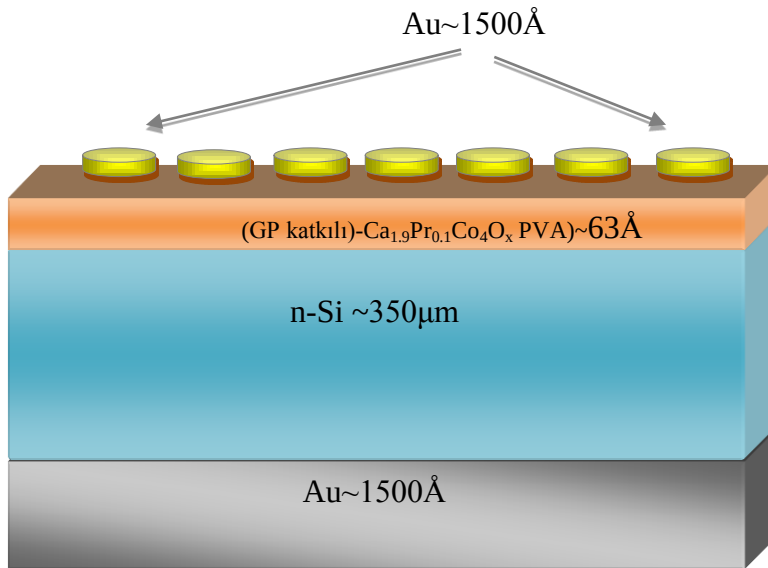
4.1.4 Doğrultucu kontağın oluşturulması

(%1 GP katkılı- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$) arayüzey tabakası n-Si yarıiletken kristalin ön parlak yüzeyine büyütüldükten hemen sonra yine aynı metal buharlaştırma sisteminde yaklaşık 1 mm çaplı ve 1500 Å kalınlıklı %99.999 saflıktaki altın (Au) Şekil 4.3' de gösterilen bakır maske kullanarak buharlaştırıldı. Buharlaştırma işleminden sonra herhangi bir tavlama yapılmadı.



Şekil 4.3 Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske

Böylece Au/(%1 GP katkılı-($\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$)/n-Si yapıların fabrikasyon işi tamamlanmış oldu ve yapının şematik diyagramı Şekil 4.4’ de verildi. Daha sonra elektriksel ölçümlerin alınması için yapılan çeyrek yarıiletken kristaller daire şeklindeki diyotlar ortada kalacak şekilde, elmas kesici yardımıyla uygun ebatlarda kesildi.



Şekil 4.4. Au/(%1 GP katkılı-($\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$)/n-Si /Au (MIS) yapıların şematik gösterimi.

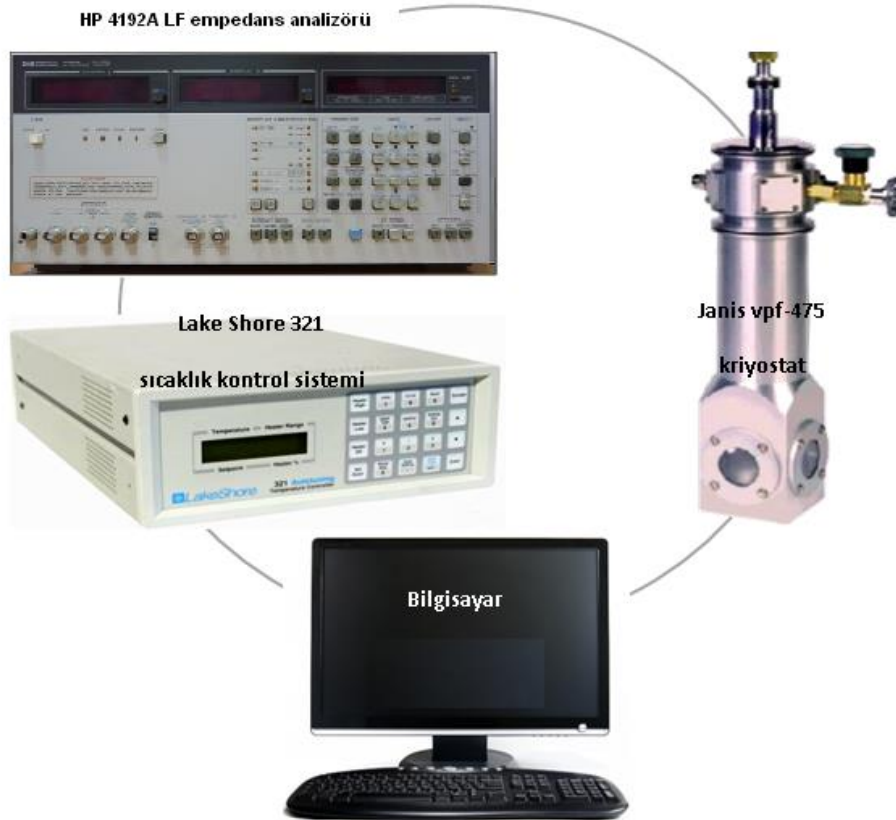
4.2. Deneysel Ölçüm Sistemi

Elektriksel ölçümlerin sağlıklı bir şekilde alınması için hazırlanan Au/(%1 GP katkılı-($\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$)/n-Si yapılar, elimizde mevcut bulunan Janis vpf-475 kriyostat tutucusuna

uygun ebatlardaki bir bakır tutucu üzerine iletken gümüş pasta yardımıyla yapıştırıldı. Üst doğrultucu kontaklar ise gümüş kaplı ince bakır teller kullanılarak yine iletken gümüş pasta yardımıyla yapıştırılıp kriyostat tutucusu üzerine sabitlendi. Hazırlanan deneysel ölçüm sisteminin şematik olarak Resim 4.1’ de verildi. Sıcaklığa bağlı C-V ölçümleri, HP 4192A LF empedans analizörü gerilim-voltaj kaynağı yardımıyla 120-300 K sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. Frekansa bağlı C-V ve G/ω -V ölçümleri ise HP 4192-A empedans metre (5 Hz-13 MHz) kullanılarak 10 Hz-2 MHz frekans aralığında oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

Deneysel ölçüm sisteminin şematik görüntüsü Resim 4.1’ de verildi. Bu deney sisteminde kullanılan cihazlar aşağıdaki gibidir.

- ✓ HP 4192A LF empedans analizörü
- ✓ Janis vpf-475 kriyostat
- ✓ Lake Shore model 321 Autotuning Temperature Controller



Resim 4.1. Deneysel ölçüm sisteminin şematik görünümü.

4.2.1. HP 4192A LF empedans analizörü

Resim 4.2' de verilen HP 4192 LF empedans analizörünün frekans ölçümleri sınırları 5Hz-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 arayüzey veri yoluna sahip olup test point yazılımı yardımı ile bilgisayar ile kontrol edebilmek mümkündür.



Resim 4.2. HP 4192A LF empedans analizörü.

4.2.2. Janis vpf-475 kriyostat ve Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi

Dış etkenlerin tüm ölçümler üzerindeki etkisini azaltmak için hazırlanan $\text{Au}/(\%1 \text{ GP katkılı-(Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x)/\text{n-Si}$ Schottky engel diyotların $C-V$ ve $G/\omega-V$ ölçümleri 4 optik pencereli bir Janis vpf-475 kriyostat içinde yaklaşık 10^{-2} mbar basınçta gerçekleştirildi. Resim 4.3' de görüle kriyostat, Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemine sahip olup, 79 K ile 425 K sıcaklık aralığında ölçüm yapabilme özelliğine sahiptir.



Resim 4.3. Janis vpf-475 kriyostat (solda) ve Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi.

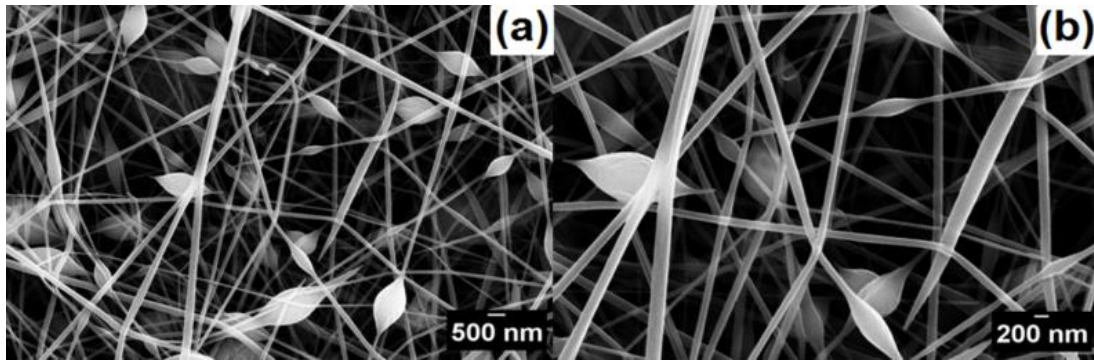
5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Giriş

Sıcaklığa ve frekansa bağlı ölçümlerde C-V ve G/ω -V karakteristiklerindeki değişim özellikle düşük sıcaklık ve frekanslarda son derece belirgindir. Bu nedenle hem elektrik hem de dielektrik özelliklerinin düşük sıcaklık ve frekanslarda incelenmesi oldukça karmaşık olduğu için son derece önem taşımaktadır. Bu çalışmada, (%1 GP katkılı)- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$ arayüzey tabakalı Au/n-Si Schottky engel diyodun kapasitans-voltaj (C-V), kondüktans-voltaj (G/ω -V) ve dielektrik karakteristikleri düşük sıcaklıklar (120-300 K) ve geniş bir frekans (10 kHz-2 MHz) aralığında incelendi.

5.2. Yüzey Morfolojisi Ölçümü ve Analizi

Fiziksel karakterizasyon teknikleri kullanılan malzemenin yapısını belirleyecek ve yapının yüzey homojenliğini ortaya koyacak yöntemlerle gerçekleştirilir. İnce film yüzey morfolojisi genellikle aygıtın performansını etkileyen elektriksel ve optiksel özelliklerinin belirlenmesi için önemlidir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) yüzey analizlerinde yaygın olarak kullanılan tekniklerdendir. Au/(%1 GP katkılı)- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$ /n-Si arayüzey tabakalı engel diyodun yüzey morfolojisi Şekil 5.1(a)' da 500nm (b) de ise 200nm altındaki resimleri görülmektedir.



Şekil. 5.1. Au/(%1 GP katkılı)-($\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$)/n-Si Schottky engel diyodun SEM ile ölçülen farklı boyutlarda yüzey resimleri (a) 500nm, (b) 200nm

SEM ölçümleri polimerin yüzey yapısı hakkında mikroskopik ölçüde bilgiler verir. (%1 GP katkılı)- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$ oluşumu ve morfolojisi JEOL JSM-6060LV SEM kullanılarak

çeşitli boyutlarda incelendi ve Şekil 5.1' de verildi. Fiberlerin çapları IMAGEJ (Image Processing and Analyzing in Java) dijital görüntü analiz programı kullanılarak analiz edildi. Şekil 5.1' den görüldüğü gibi (%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x solüsyonunun spinlenmesi geniş dağılımda fiber (lif) çaplarına sahip, üniform (düzgün) ve kesiksiz nanofiber oluşumları ortaya çıkarmıştır.

5.3. Sıcaklığa Bağlı Elektrik ve Dielektrik Karakteristikleri

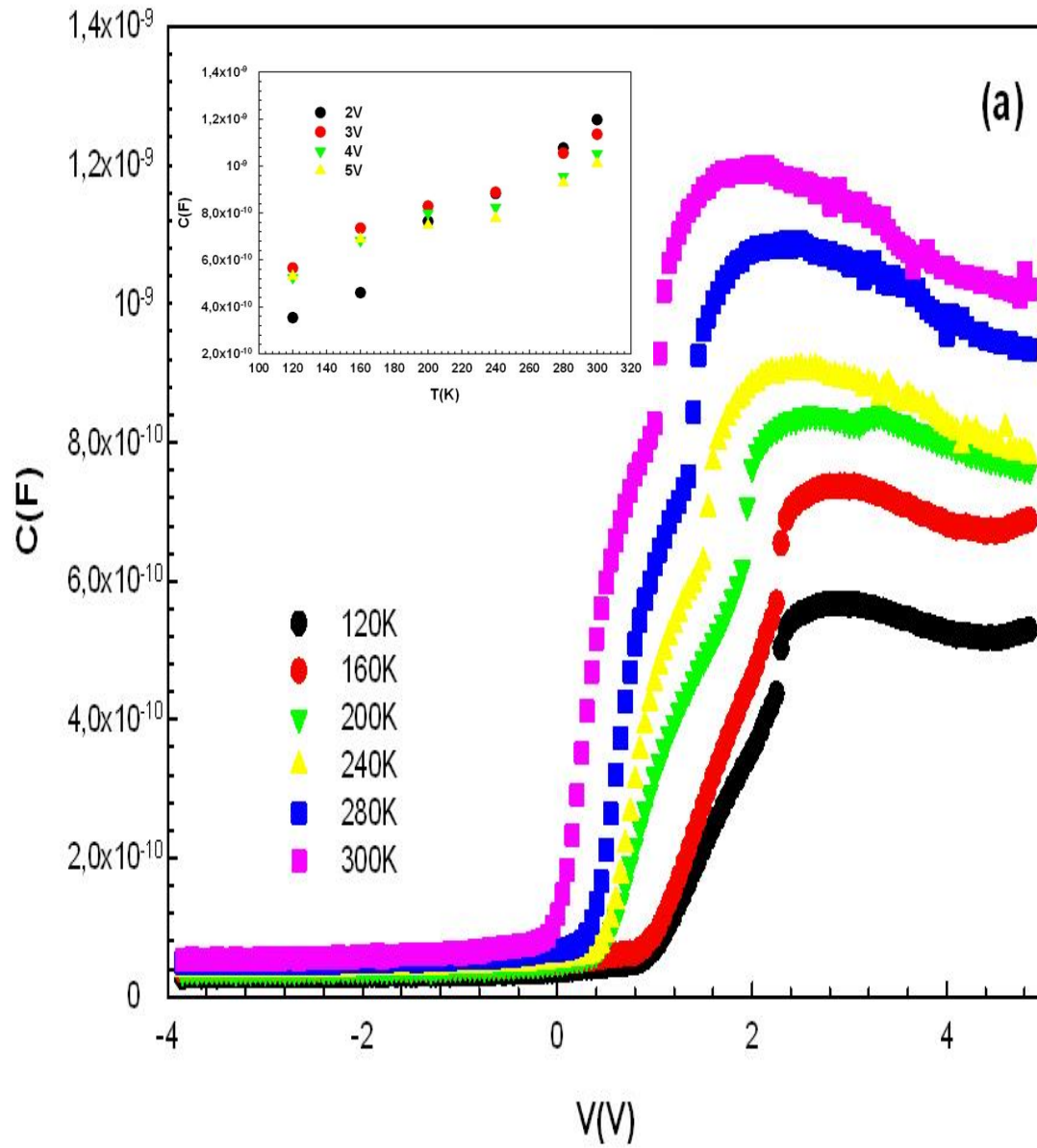
Hazırlanan Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si yapının bazı temel fiziksel özelliklerini araştırmak için kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri 300 kHz de düşük sıcaklıklar için yapıldı. Deneysel C-V ve G/ω-V ölçüm sonuçları kullanılarak yapının bazı temel elektriksel ve dielektrik parametreleri hesaplandı. Sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω-V ölçümlerinden arayüzey durumları (N_{ss}), seri direnç (R_s), difüzyon potansiyeli (V_d), katkılanan verici atomların sayısı (N_D), tüketim tabakasının genişliği (W_D) ve Fermi enerjisi (E_F) gibi temel parametreler elde edildi. Aynı zamanda, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülüsü (M' ve M'') ve ac elektrik iletkenliği (σ_{ac}) hesaplandı.

5.3.1. Sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω-V) karakteristikleri

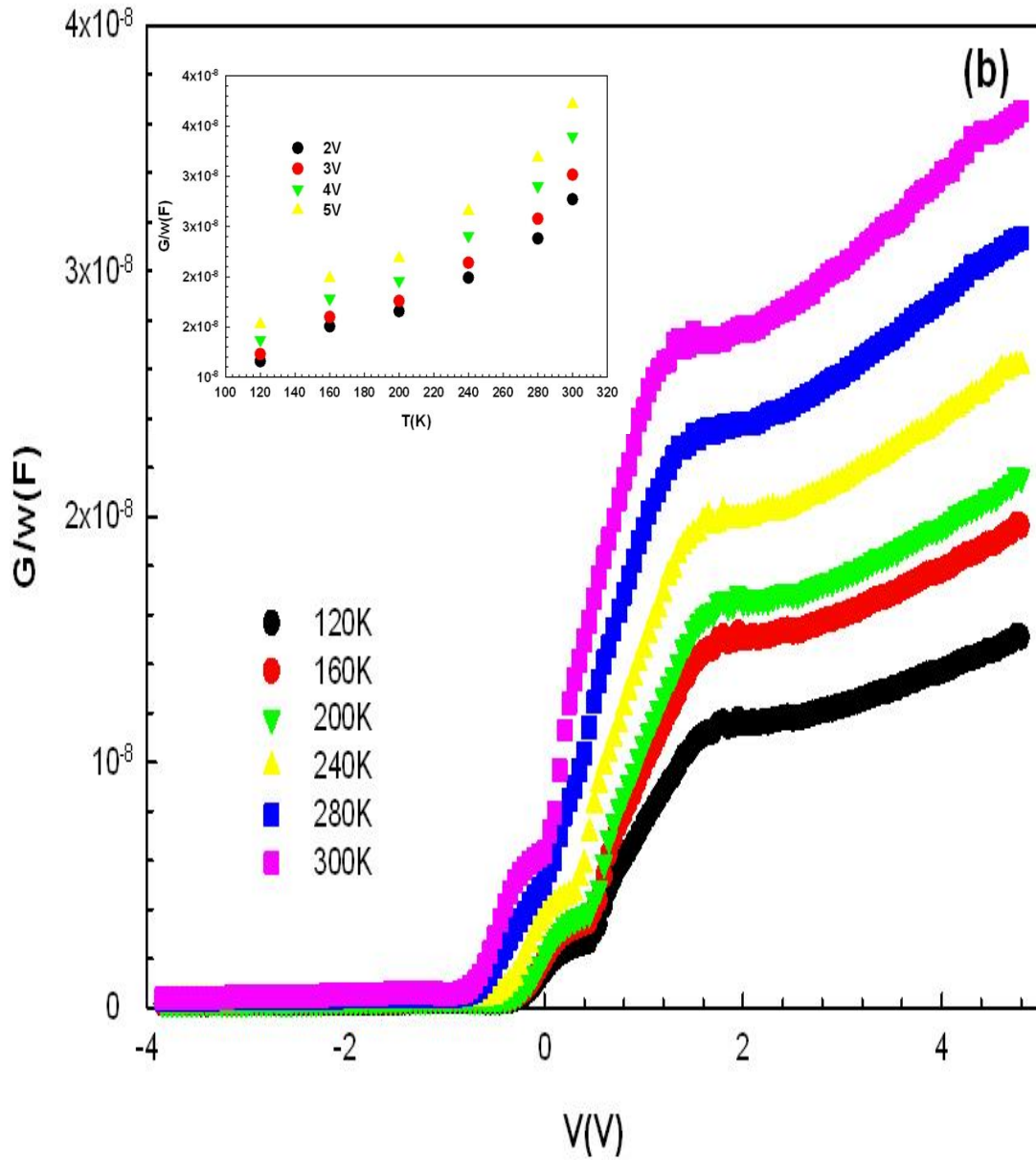
MS ve MIS tipi Schottky engel diyotların doğru ve ters öngerilim kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinin analizinin oda sıcaklığında veya tek bir voltaj altında yapılması diyotların iletim mekanizmaları ve metal ile yarıiletken (M/S) arayüzeyinde oluşan engelin biçimi hakkında bize yeterli bilgi sağlayamaz. Ancak, geniş bir sıcaklık ve gerilim bölgesinde (hem düz hem de ters gerilimler altında) gerçekleştirilen bu ölçümler hem iletim mekanizmaları hem de M/S arayüzeyinde oluşan engelin biçimi hakkında daha detaylı bilgi sağlar. Bu yüzden, Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun sıcaklık ve voltajın bir fonksiyonu olarak kapasitans $C(V,T)$ ve iletkenlik $G(V,T)$ karakteristikleri 300 kHz frekans için 120-300 K sıcaklık aralığında incelendi. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyot sıcaklık ve voltajın bir fonksiyonu olarak 120 K ile 300 K aralığında -4 V'dan +5 V'a kadar ölçülen $C(V,T)$ ve $G(V,T)$ grafikleri sırasıyla Şekil 5.2 ve 5.3'de verilmiştir. C-V ve G/ω-V eğrileri kuvvetli yığılma bölgesinde

bir bükülme (geniş bir pik) sergilemektedir. Bu pikin nedeni seri direncin ve yalıtkan arayüzey tabakanın varlığına atfedilir. İyi bilindiği gibi R_s değeri sadece yığılma bölgesinde etkili iken arayüzey durumları terslenim ve tükenim bölgelerinde etkindir. Bu nedenle, özellikle yüksek frekans $C-V$ ve $G/\omega-V$ eğrilerinin seri direnç etkisi dikkate alınarak yorumlanmasında fayda vardır. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklığın değişmesiyle pik değerleri ve konumları da değişmektedir. Oluşan bu geniş pikin varlığı moleküler yapılanma, arayüzey durum yoğunluğu, katkı atomları sayısı, seri direnç, yalıtkan tabakanın kalınlığı gibi parametrelere atfedilmiştir [16,17-25]. $C-V$ ve $G/\omega-V$ eğrilerindeki bu piklerin varlığı Schottky diyotlar üzerine çalışmalar yapan birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [16-18] ve bu davranış sıcaklık etkisiyle arayüzey durumlarının yeniden yapılanıp düzenlenmesine ve seri direnç etkisine atfedilebilir. Şekil 5.2' de kapasitans değerlerinin yüksek sıcaklıklarda düşük sıcaklıklara göre daha büyük olduğu görülmektedir ve bu davranış yeniden birleşme merkezleri olarak davranan arayüzey durumlarında sıcaklığın etkisiyle tuzakların dolup boşalmasına atfedilebilir [24].

Artan sıcaklık ile yasak enerji aralığı küçülür, valans band ve arayüzeyde tuzaklanmış olan taşıyıcılar termal hız kazanırlar dolayısıyla iletim bandına çıkan taşıyıcı sayısı artar. Sonuç olarak Şekil 5.2 ve 5.3'de verilmiş olan kapasitans ve iletkenlik grafiklerinde görülen bu artış; yasak enerji aralığının küçülmesi, taşıyıcıların termal hız kazanması, tuzakların dolup boşalması, arayüzey durum yoğunluğu, moleküler yapılanmadan kaynaklanırken ileri pozitif belsemdeki bükülmeler ise seri direnç etkisine ve arayüzeyde lokalize olmuş yüklerden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.2. Au/(%1 GP katkılı)- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x/\text{n-Si}$ Schottky engel diyodun farklı sıcaklıklarda $C-V$ karakteristikleri



Şekil 5.3. Au/(%1 GP katkı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun farklı sıcaklıklarda G/ω - V karakteristikleri

Seri direnç değerini MIS tipi Schottky diyotlarda belirlemek için literatürde çeşitli metotlar vardır fakat bu yapılarda gerçek seri direnci elde etmek için en doğru ve tercih edilen methot Nicolian ve Brews [25] tarafından geliştirilen admitans metodudur. Bu methota göre yüksek frekanslarda, paralel RC devresini kullanarak, aşağıda belirtildiği şekilde, kuvvetli yığılım altındaki eşdeğer devrenin toplam admitansı ve empedansı ($Y_{ma}=1/Z_{ma}$),

$$Y_{ma}=1/Z_{ma}=G_{ma}+j\omega C_{ma} \quad (5.1)$$

eşitliğiyle verilir. Gerçek seri direnç (R_s) değerleri, Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si engel diyot için verilen C - V ve G/ω - V eğrilerinin kuvvetli yığılma bölgesindeki değerlerinden faydalanılarak aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir [24]:

$$R_s = \frac{G_{ma}}{(G_{ma}^2 + C_{ma}^2 \omega^2)} \quad (5.2)$$

Burada C_{ma} ve G_{ma} sırasıyla kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Kuvvetli yığılma bölgesindeki C_{ma} ile R_s ve yalıtkan tabakanın C_{ox} arasındaki ilişki,

$$C_{ma} = \frac{C_{ox}}{(1 + \omega^2 R_s^2 C_{ox}^2)} \quad (5.3)$$

eşitliği ile verilir. Eş. 5.2 ve Eş. 5.3 kullanılarak C_{ox} değeri,

$$C_{ox} = C_{ma} \left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_{ox}} \quad (5.4)$$

Şeklinde yazılabilir. Burada $\epsilon_i = 8\epsilon_0$ [3] ve $\epsilon_0 (=8,85 \times 10^{-14} \text{ F/cm})$ sırasıyla arayüzey tabaka ve boşluğun geçirgenlik sabitleridir. Ayrıca, düzeltilmiş admitansın sanal ve gerçel kısmını ($Y_c = G_c + j\omega C_c$) karşılaştırarak düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve kondüktans (G_c) değerleri ise,

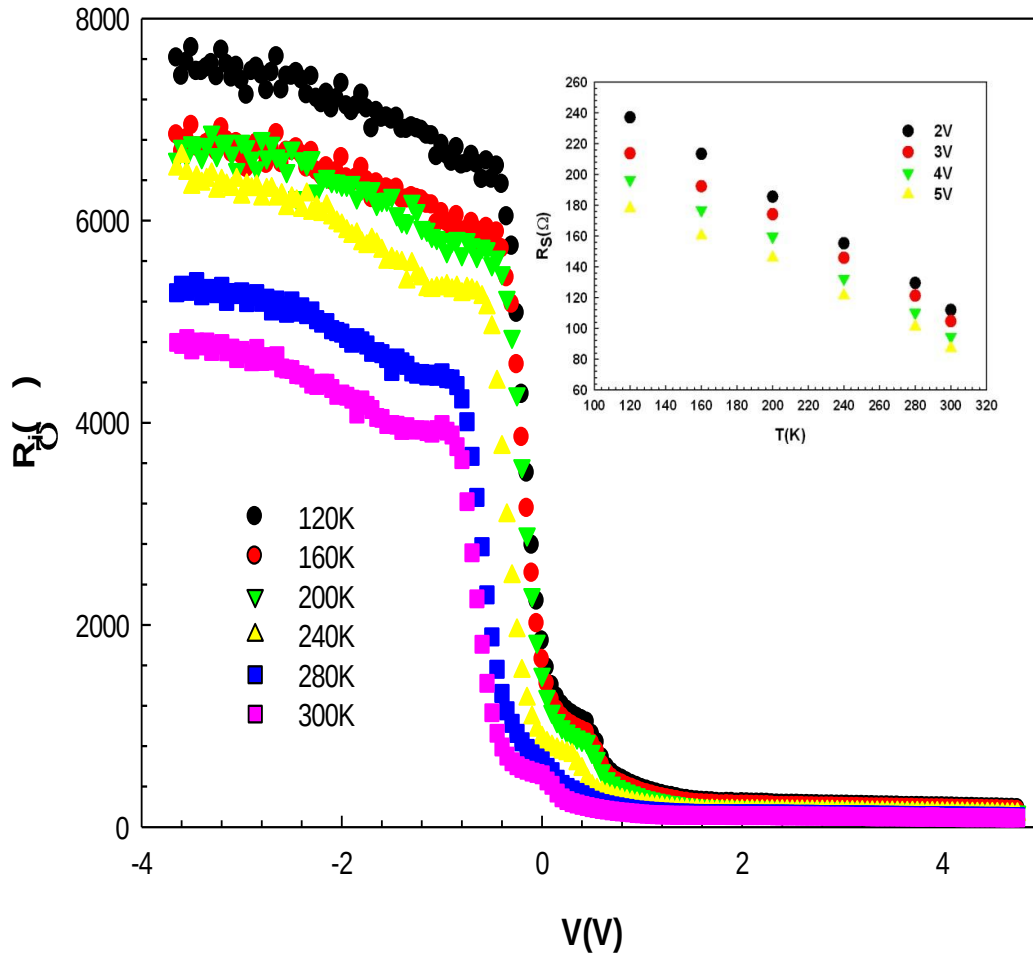
$$C_c = \frac{[G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2] C_{ma}}{a^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (5.5)$$

$$G_c = \frac{[G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2] a}{a^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (5.6)$$

eşitliklerinden elde edilebilir. Burada a parametresi aşağıdaki şekilde verilir:

$$a = G_{ma} - [G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2] R_s \quad (5.7)$$

Yarıiletken aygıtın gerçek seri direnç değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir ayrıca seri direnç ileri pozitif gerilimlerde gerçek değerine, ters gerilimlerde ise sonsuza doğru gider. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si (SBD) için sıcaklığa bağlı seri direnç Şekil 5.4' de verilmiştir ve şekilden de görüldüğü gibi R_s değerleri her sıcaklık için ani bir düşüş sergilemektedir ve bu azalış değerleri artan sıcaklıkla azalırken konumu da negatif voltaj bölgesine yani pozitif ön-gerilimden negatif ön-gerilime (tersinim bölgesine) doğru kaymaktadır. Seri direnç hem uygulanan gerilime hem de sıcaklığa bağlı olarak bölgeden bölgeye (yığılım, tükenim ve tersinim) değişmektedir. Artan sıcaklıkla kapasitansta meydana gelen artma hem arayüzey durumlarının sıcaklık (termal uyarma) bağımlılığıyla hem de seri direncin bu davranışıyla açıklanabilir.



Şekil 5.4. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun farklı sıcaklıklarda seri direncin (R_s) değişimi.

Schottky diyotların bazı elektriksel parametrelerini hesaplamak için ters ön-gerilim C^{-2} -V eğrilerinden yararlanılabilir. Metal-yarıiletken (MS) kontaklar için tüketim tabakasının kapasitansı [3,40];

$$C^{-2} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_o A^2 N_D} (V_o + V_R) \quad (5.8)$$

ile verilir. Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti ($\epsilon_s=11,8\epsilon_o$), N_D verici katkı atomlarının (P) yoğunluğu, V_R uygulanan ters ön-gerilim, A doğrultucu kontak alanı, V_o ise C^{-2} -V eğrisinin voltaj eksenine ekstrapole edilmesiyle elde edilen built-in potansiyelidir. V_o ile V_D difüzyon potansiyeli arasında:

$$V_D = V_o + \frac{kT}{q} \quad (5.9)$$

şeklinde ilişki vardır. Burada kT/q terimi eV cinsinden termal enerjidir. C - V ölçümlerinden engel yüksekliği Eş. 5.10'de verildiği gibi tanımlanabilir:

$$\Phi_B(C - V) = V_D + E_F - \Delta\Phi_B = V_D + \frac{kT}{q} \ln(N_c / N_D) - \Delta\Phi_B \quad (5.10)$$

Bu eşitlikte E_F yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi, N_c iletim bandındaki izinli durumların yoğunluğu ($N_c = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} (m_e^* / m_o)^{3/2}$ ve $(m_e^* / m_o) = 0,98$), $\Delta\Phi_B$ hayali kuvveti engel düşmesi olup [3];

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_o} \right]^{1/2} \quad (5.11)$$

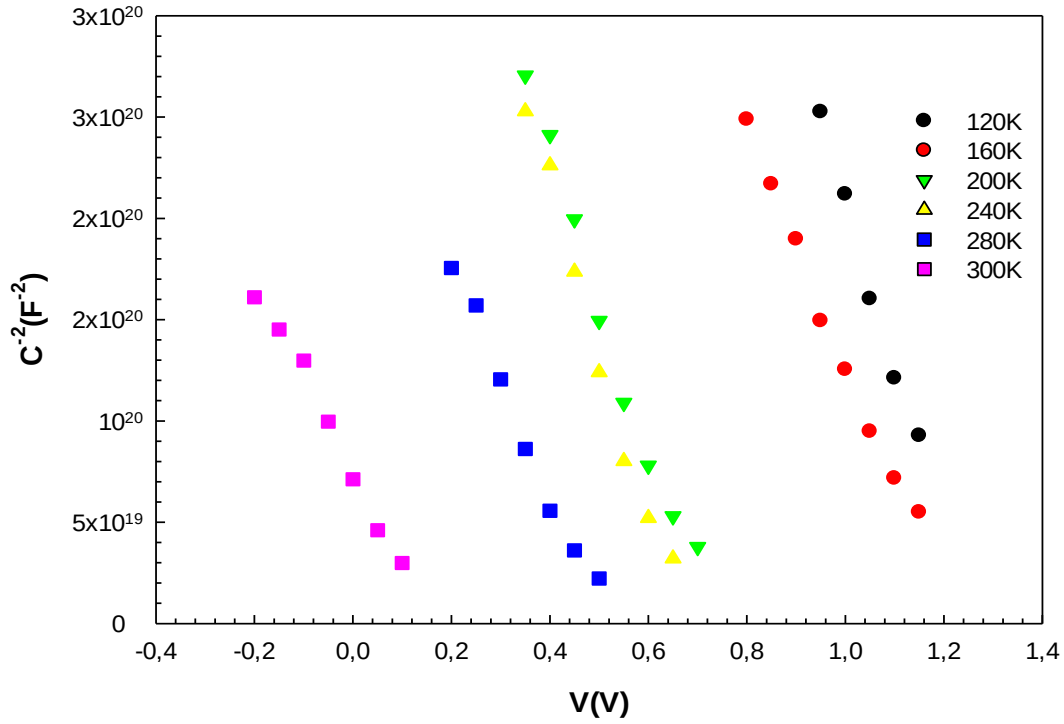
şeklinde yazılır. Burada E_m parametresi elektrik alanıdır ve aşağıdaki gibi yazılır:

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_D}{\epsilon_s\epsilon_o} \right]^{1/2} \quad (5.12)$$

Ters ön-gerilim C^{-2} - V eğrileri Eş. 5.8'e göre lineer doğrular verirler, bu doğruların kestiği noktalardan ve eğimlerinden diyotun N_D , E_F , W_D ve N_{ss} gibi temel elektriksel parametreleri hesaplanabilir. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si için elde edilen elektriksel parametreler Şekil 5.5' de verilen C^{-2} - V grafiğinden hesaplanılarak Çizelge 5.1'de verildi. Yapılan hesaplamalara göre W_D ve N_{ss} değerleri artan sıcaklıkla azalırken E_F ve N_D artmaktadır. Sıcaklık arttıkça ters beslem C^{-2} - V eğimlerinin azalması N_D değerinin artmasına yol açar ve düşük eğim değerleri arayüzey durumlarından kaynaklanan ilave kapasitansın varlığına atfedilebilir. Aynı zamanda, arayüzeyde tuzaklanmış ve tuzaktan kurtulma süreleri oldukça uzun olan yüklerde eğimdeki bu değişikliğin kaynaklanmasına sebep olabilirler.

Çizelge 5.1. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun farklı sıcaklıklarda C^{-2} - V eğrilerinden elde edilen çeşitli parametreler.

T (K)	N_D (cm ⁻³)	E_F (eV)	W_D (cm)	N_{ss} (eV ⁻¹ cm ⁻²)
120	2,84x10 ¹⁴	0,137	2,19x10 ⁻⁴	1,69x10 ¹¹
160	3,02x10 ¹⁴	0,158	2,08x10 ⁻⁴	1,51x10 ¹¹
200	3,83x10 ¹⁴	0,193	1,84x10 ⁻⁴	1,40x10 ¹¹
240	4,02x10 ¹⁴	0,231	1,80 x10 ⁻⁴	1,16x10 ¹¹
280	5,11x10 ¹⁴	0,255	1,60 x10 ⁻⁴	9,78x10 ¹⁰
300	6,70x10 ¹⁴	0,241	1,39 x10 ⁻⁴	8,55x10 ¹⁰



Şekil 5.5. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun C^{-2} - V eğrileri

Uzay yük bölgesinin derinlerine yerleşen arayüzey kusurları ile tüketim bölgesinin genişliği değişse de C - V ölçümleri diyotun arayüzeyindeki potansiyel dalgalanmalar, dislokasyonlar (kusurlar) ve deliklerden daha az etkilenir yani C - V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri daha güvenilir olacaktır.

Silisyumun yasak enerji aralığındaki arayüzey durumlarının hesaplanmasında Hill-Coleman metodu [42] kullanılabilir ve Eş. 5.13 ile ifade edilebilir:

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m / \omega)_{\max}}{((G_m / \omega)_{\max} C_{ox})^2 + (1 - C_m / C_{ox})^2} \quad (5.13)$$

Bu ifade de A , diyotun doğrultucu kontak alanı ($=7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$), ω açısal frekans ($=2\pi f$), C_{ox} arayüzey tabakanın kapasitansı, C_m ve $(G/\omega)_m$ ise C - V eğrilerindeki maksimum pik değerlerinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir.

5.3.2. Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Karakteristikleri

Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si arayüzey tabakalı engel diyot için, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülü (M' ve M''), ac elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) sıcaklık ve voltaja bağımlılığı, (-4V)- (+5V) ve 120-300 K sıcaklık aralığında incelendi.

Dielektrik madde ile doldurulmuş olan bir paralel plakalı kondansatör, admittans ile karakterize edilebilir ve admittans Y ile gösterilir, ϵ^* dielektrik maddenin boşluğa göre sahip olduğu bağıl dielektrik geçirgenlik sabitidir, ϵ'' dielektrik kayıp ve ϵ' dielektrik sabitidir ve bu ifadeler sırasıyla 3.28' den 3.34' e kadar olan eşitliklerde ayrıntılı şekilde verilmiştir.

Dielektrik malzemenin ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}),

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan \delta (d / A) = \epsilon'' \omega \epsilon_0 \quad (5.14)$$

olarak elde edilir [37,47]. Kompleks empedans (Z^*) ve kompleks elektrik modülü, dielektrik malzemelerin analiz edilmesine göre tartışılmıştır [37,47]. Z^* formülü içindeki kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti (ϵ^*) verinin analizi ($Z^*=1/Y^*=1/i\omega C_o\epsilon^*$), çoğunlukla hacim ve yüzey olayları birbirinden ayırmak ve malzemenin dc iletkenliği belirlemek için kullanılır [33,36]. Dielektrik durulma spektroskopisi hakkında daha detaylı bir bilgi elde etmek için genellikle elektrik modülü formülasyonu kullanılmaktadır ve elektrik modülünün gerilime bağlı değişik frekanslardaki profili bu yapının dielektrik durulma mekanizması hakkında önemli bilgiler vermektedir. Kompleks empedans veya kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti ($\epsilon^*=1/M^*$) verisi aşağıdaki bağıntı kullanılarak M^* formülüne dönüştürülmüştür [44,47].

$$M^* = j\omega C_o Z^* \quad (5.15)$$

veya;

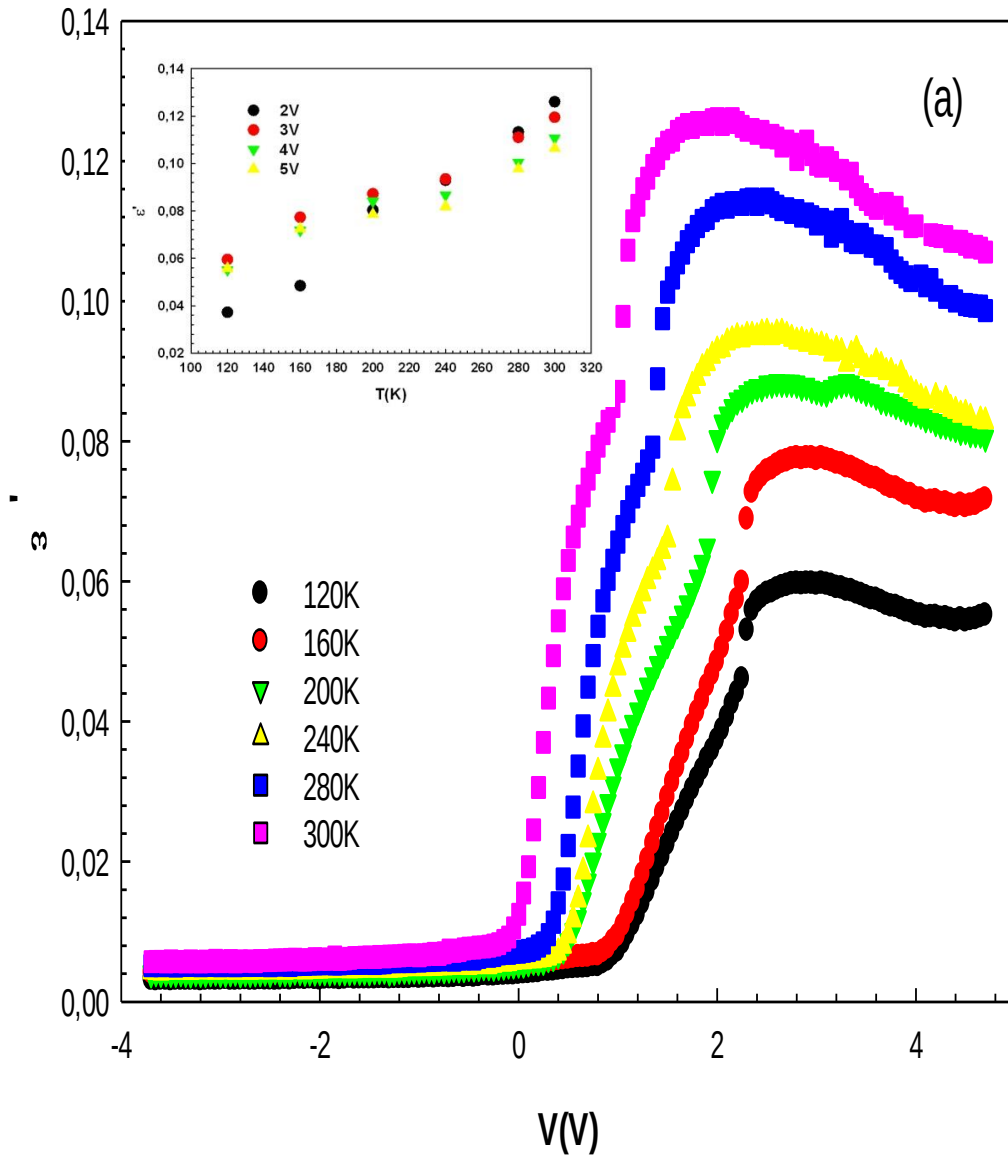
$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (5.16)$$

Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si arayüzey tabakalı engel diodun sıcaklık ve voltajın bir fonksiyonu olan dielektrik sabiti (ϵ' -V, ϵ' -T) dielektrik kayıp (ϵ'' -V, ϵ'' -T) ve dielektrik kayıp tanjant ($\tan\delta$ -V, $\tan\delta$ -T) karakteristikleri 300 kHz frekansta ve 120K ile 300K aralığında -4 V'dan +5 V'a kadar ölçülen değerleri sırasıyla Şekil 5.6 ve 5.7'de verilmiştir.

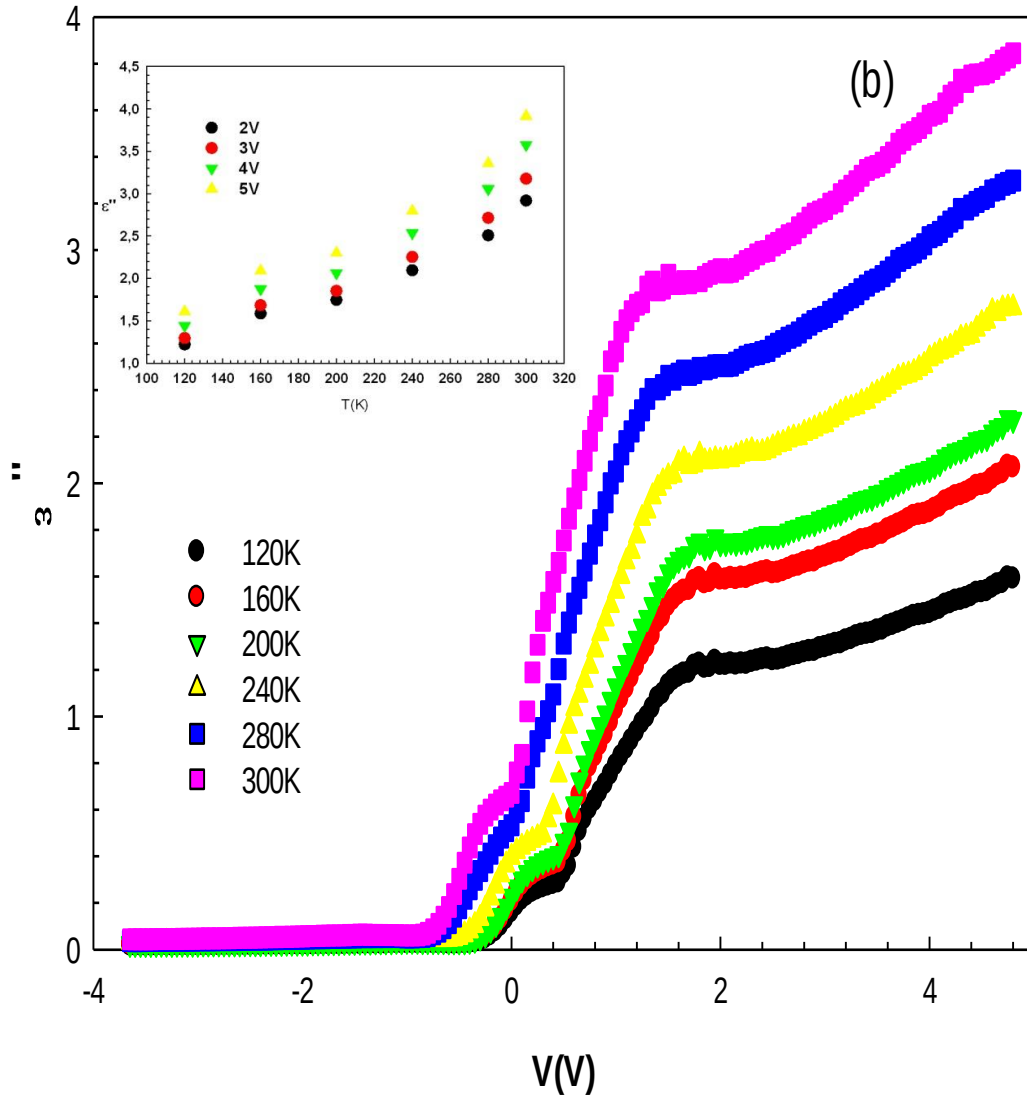
Bir numune elektrik alan içersine konulduğu zaman, bu numune için elektrik yerdeğiştirme (D) ve elektrik alan (E) zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Statik bir elektrik alan belli bir süre uygulanmış olsun, kristaldeki dipollerin hareketi iki şekilde olur. Bu hareket, dipollerin, ya uygulanan elektrik alan yönünde hemen düzenlenmesi ya da son konfigirasyonlarını yavaş şekilde bulmalarıdır. Dielektrik numunedeki dipol yönelimi açısal frekansı ω olan periyodik bir elektrik alan uygulandığında meydana gelir. Periyodik alan D elektrik yerdeğiştirme vektörü, elektrik alana uymaya çalışır. Bu durum muhtemel bir faz kayması ile ifade edilir. Sonuç olarak dielektrik sabitinin aynı fazda ve farklı fazda olan iki bileşeni olur. Aynı fazda olan gerçel kısım (ϵ') dielektrik sabiti olarak adlandırılır. Dielektrik sabiti bir malzemenin yük depolayabilme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Başka bir ifadeyle, zıt yükleri birbirinden ayırma gücünün bir ölçüsü olarak ifade edilebilir.

Sekil 5.6. (a)' da görüldüğü gibi oda sıcaklığına kadar olan değerlerde ϵ' değerleri artan sıcaklıkla artar. Sıcaklığın artmasıyla yüklü taşıyıcıların sayısı üstel olarak artmakta ve daha fazla uzay yükü polarizasyonu oluşmaktadır dolayısıyla bu durum dielektrik sabitinin hızlıca artmasına sebep olur ayrıca ileri voltajlardaki bükülmenin sebebi ise seri direnç etkisidir [45,48]. Aynı zamanda ϵ' voltaja bağlılık göstermektedir.

Şekil 5.6. (b)' de görüldüğü gibi ϵ'' değerleri oda sıcaklığına kadar artan sıcaklıkla düzgün bir şekilde artarken voltaja bağlı olduğu da görülmektedir. Şekil 5.7.' de görüldüğü gibi elde edilen $\tan\delta$ -V eğrileri her bir sıcaklık değeri için bir maksimuma sahiptir. Bu maksimum noktalarının hem pozitif hem de negatif gerilim değerleri için $\tan\delta$ azalmakta ve her bir sıcaklık değeri için pik değerleri kaymaktadır.

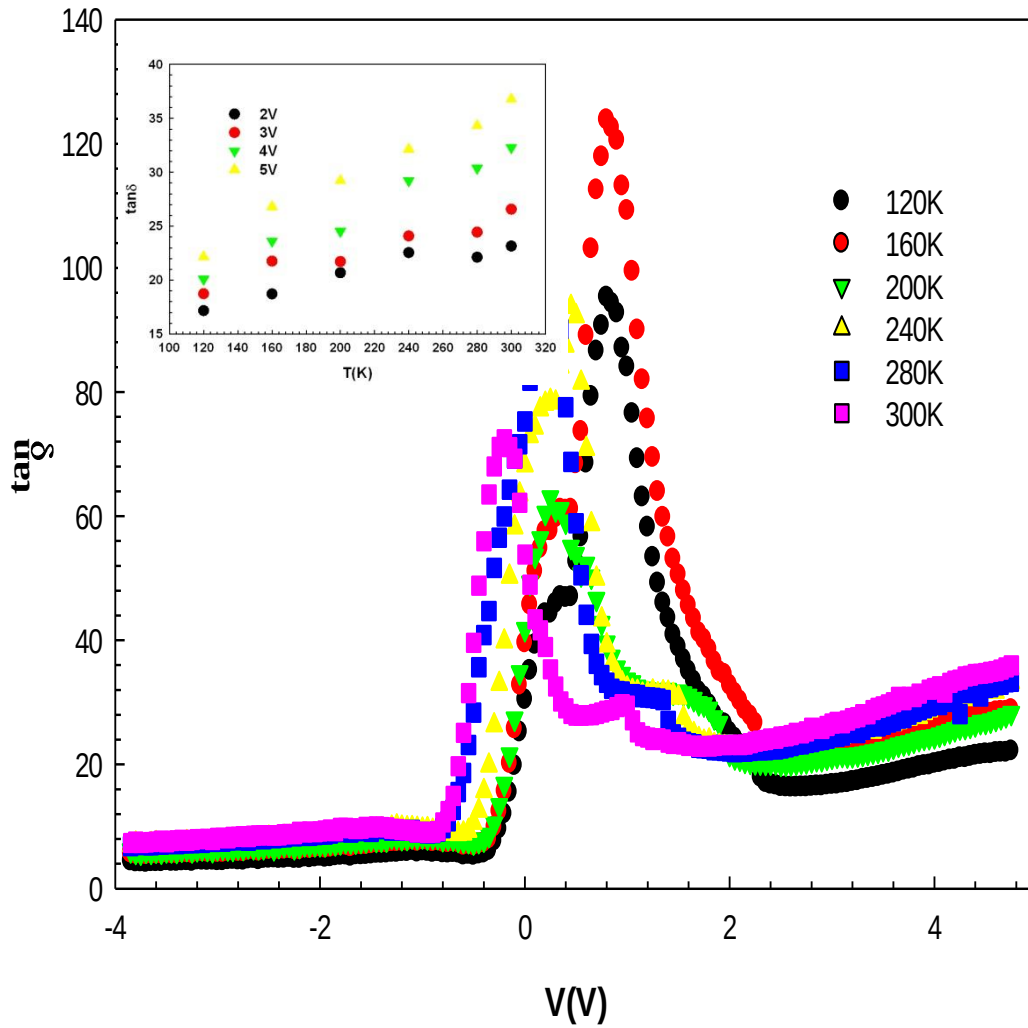


Şekil 5.6. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 5.6. (devam) Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı değişimi

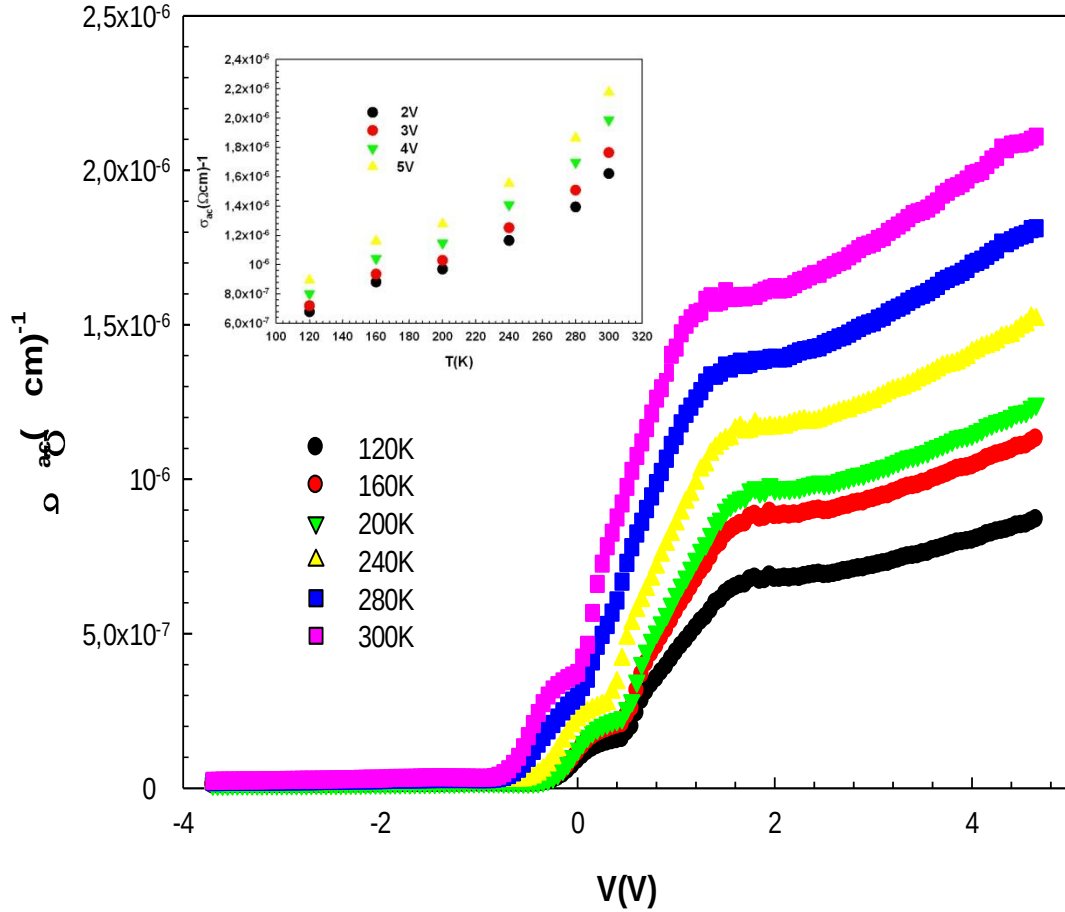
Şekil 5.5 ve 5.6' den görüldüğü gibi kuvvetli yığılma bölgesinde (ileri pozitif voltajlarda) yaklaşık 2V civarında ϵ' değerlerinde bir azalma ϵ'' değerlerinde ise bir artma olmaktadır bu durum Şekil 5.2' de ve 5.3' de C -V ve G/ω -V grafiklerinin davranışından kaynaklanmaktadır ve bu davranış iletkenlik davranışı olmaktadır. Yani yapının diyot özelliğinden ziyade iletken özelliği göstermeye başladığı söylenebilir.



Şekil 5.7. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si arayüzey tabakalı engel diyodun tan δ -V karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8’ de aynı zamanda MIS yapının farklı voltajlar için 300 kHz’de ki ϵ' , ϵ'' , σ_{ac} ve tan δ karakteristiklerinin sıcaklığa bağlılığını verilmiştir. ϵ' değerleri düşük sıcaklıklarda sıcaklığa bağlı olarak çok fazla değişmezken yüksek sıcaklıklarda ϵ' değerleri artan sıcaklıkla arttığı görülmektedir. Yük taşıyıcıları yarıiletkenlerde tuzaklanmış olup, harekette serbest değildir dolayısıyla bu durum bir arayüzey potansiyeline sebep olmaktadır. Yüklü taşıyıcıların sayısı sıcaklığın artmasıyla üstel olarak artar ve daha fazla uzay yükü polarizasyonu oluşur. Bu durum dielektrik sabitinin hızlıca artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca ϵ' -T eğrilerinin voltaja bağlı dağılımı yüksek sıcaklıklarda daha belirginken düşük sıcaklıklarda voltajdan bağımsız olarak hareket eder.

ε'' değerleri hem artan sıcaklıkla hem de artan gerilim voltajıyla artmaktadır. Ayrıca ε'' -T eğrilerinin voltaja ve sıcaklığa bağlı dağılımı ileri pozitif voltajlarda yüksek sıcaklıklar için daha belirgin olup düşük sıcaklıklarda bu dağılım kısmen azalmaktadır.



Şekil 5.8. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun σ_{ac} -V karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı değişimi

δ , numune üzerindeki a.c. gerilim etkisi nedeniyle, dielektrik bir maddenin davranışında ifade edilmiş olan periyodik elektrik alan ile onunla aynı fazda olmayan elektrik yerdeğiştirme arasındaki faz kayması olarak tanımlanır. $\tan\delta$ ise sığasal olarak numunede depo edilen enerjinin bir periyot kayıp miktarı olarak ifade edilir. Dielektrik maddenin iletkenliği arttıkça kayıp akım artacağından kayıp açısı büyüyecektir.

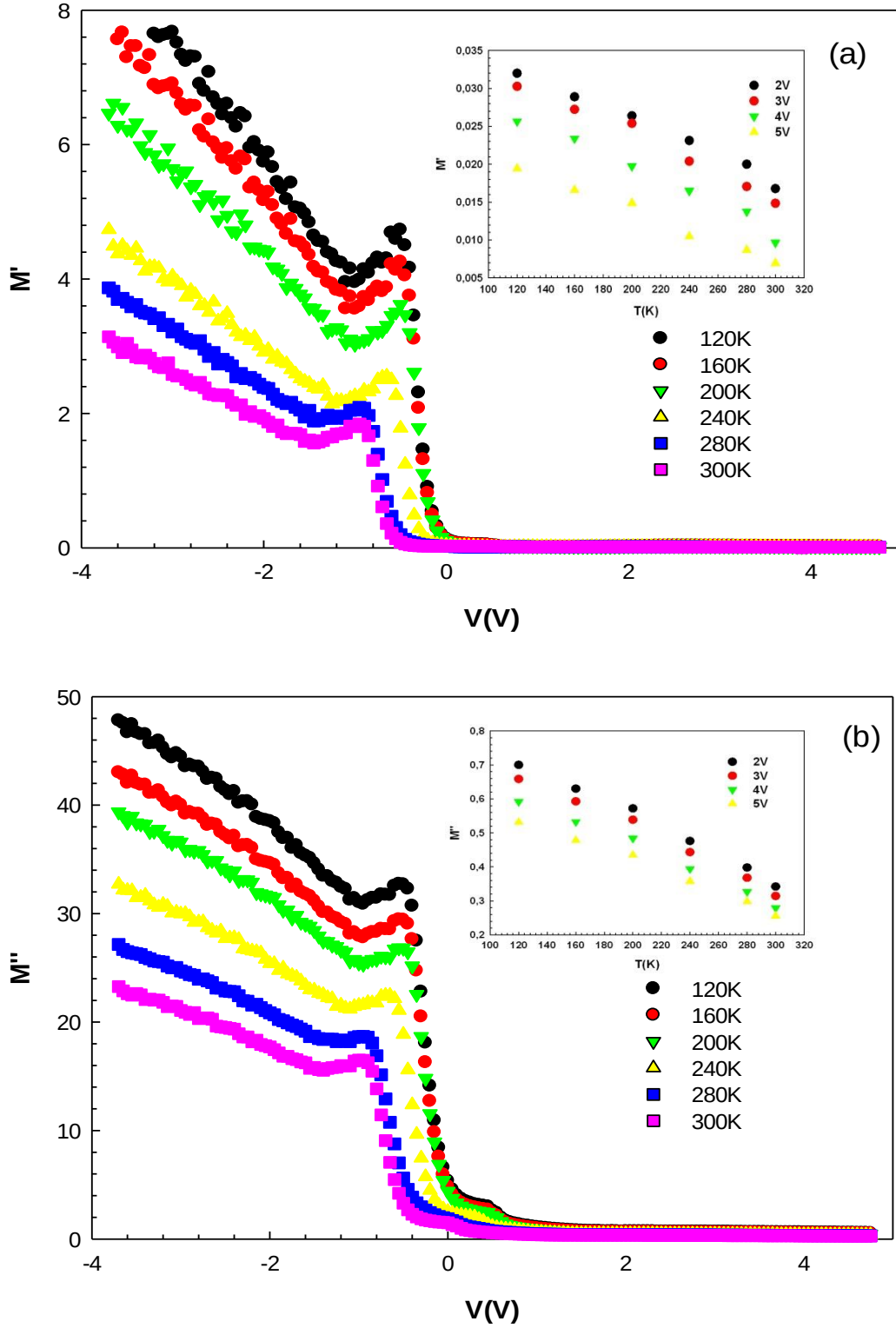
Şekil 5.7' de görüldüğü gibi $\tan\delta$ -V grafikleri her sıcaklık için bir pik vermiş ve pik pozisyonunun kayması özellikle M/S arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarındaki/tuzaklarındaki yüklerin sıcaklık etkisiyle yeniden yapılanmasına atfedildi.

Şekil 5.8’ de MIS yapının ac elektriksel iletkenliğinin (σ_{ac}) farklı sıcaklık değerleri için voltaja bağlı değişimi verilmiştir ve σ_{ac} değerlerinin sıcaklıkla arttığı görülmektedir. Seri direncin hızlı düşüşü ile birlikte iletkenlikte çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Aynı zamanda MIS yapının 300 kHz de farklı voltajlarda σ_{ac} -T değişimide verilmiştir ve görüldüğü gibi iletkenlik her bir voltaj değeri için sıcaklıkla düzgün bir şekilde artmaktadır.

$\tan\delta$ -T eğrilerine baktığımızda ise hem artan sıcaklıkla hem de artan gerilim voltajıyla arttığı görülmektedir. $\tan\delta$ -T eğrilerinin voltaja ve sıcaklığa bağlı dağılımı yüksek sıcaklıklar için daha belirgin olup düşük sıcaklıklarda bu dağılım kısmen azalmaktadır.

Şekil 5.9’ da MIS yapıya ait elektrik modülüsünün reel (M') ve sanal (M'') değerlerinin voltaja ve sıcaklığa bağlı değişimi verilmiştir ve M' değerlerinin artan sıcaklık ve gerilimle azaldığı görülmektedir. Elektrik modülüs sanal değerleri M'' ise reel değerlere göre farklı özellik sergilememektedir.

Kompleks dielektrik geçirgenlik sabitindeki ($\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$) ϵ' ve ϵ'' gerçel ve sanal kısımları olup, ϵ' elektrik alan altındaki depolanan enerjiyi belirlemek, ϵ'' ise enerji emilimi ve azalmasını belirlemek için kullanılır. Diğer bir yandan kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti ($\epsilon^* = 1/M^*$) verisi kullanılarak bulunan kompleks modülüs ($M^* = M' + jM''$) ifadesi yapının polarizasyon etkilerini belirlemek için oldukça önemlidir.



Şekil 5.9. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun elektrik modülüsünün (a) gerçek kısmı M' ve b) sanal kısmı M'' karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı değişimi

5.4. Frekansa Bağlı Elektrik ve Dielektrik Karakteristikleri

Hazırlanan Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si yapının bazı temel fiziksel özelliklerini araştırmak için kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri oda sıcaklığında geniş bir frekans aralığında yapıldı. C-V ve G/ω-V ölçümleri oda sıcaklığında Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analiz metres (5 Hz-13 MHz) ve bir IEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla bilgisayarda kumanda edilerek, hem doğru hem de ters ön gerilim altında -2V' dan +6V' a kadar 0.1 V adım aralıklarla ve 100kHz-2MHz frekans aralığında elde edildi. Böylece, C-V ve G/ω-V eğrileri kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılım bölgesine kadar (Tersinim, tükenim ve yığılım) elde edilmiş oldu. Frekansa ve voltajın bir fonksiyonu olan kapasitans $C(V,f)$, iletkenlik $G(V,f)$ karakteristikleri, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülüsü (M' ve M'') ve ac elektrik iletkenliği (σ_{ac}) hesaplandı.

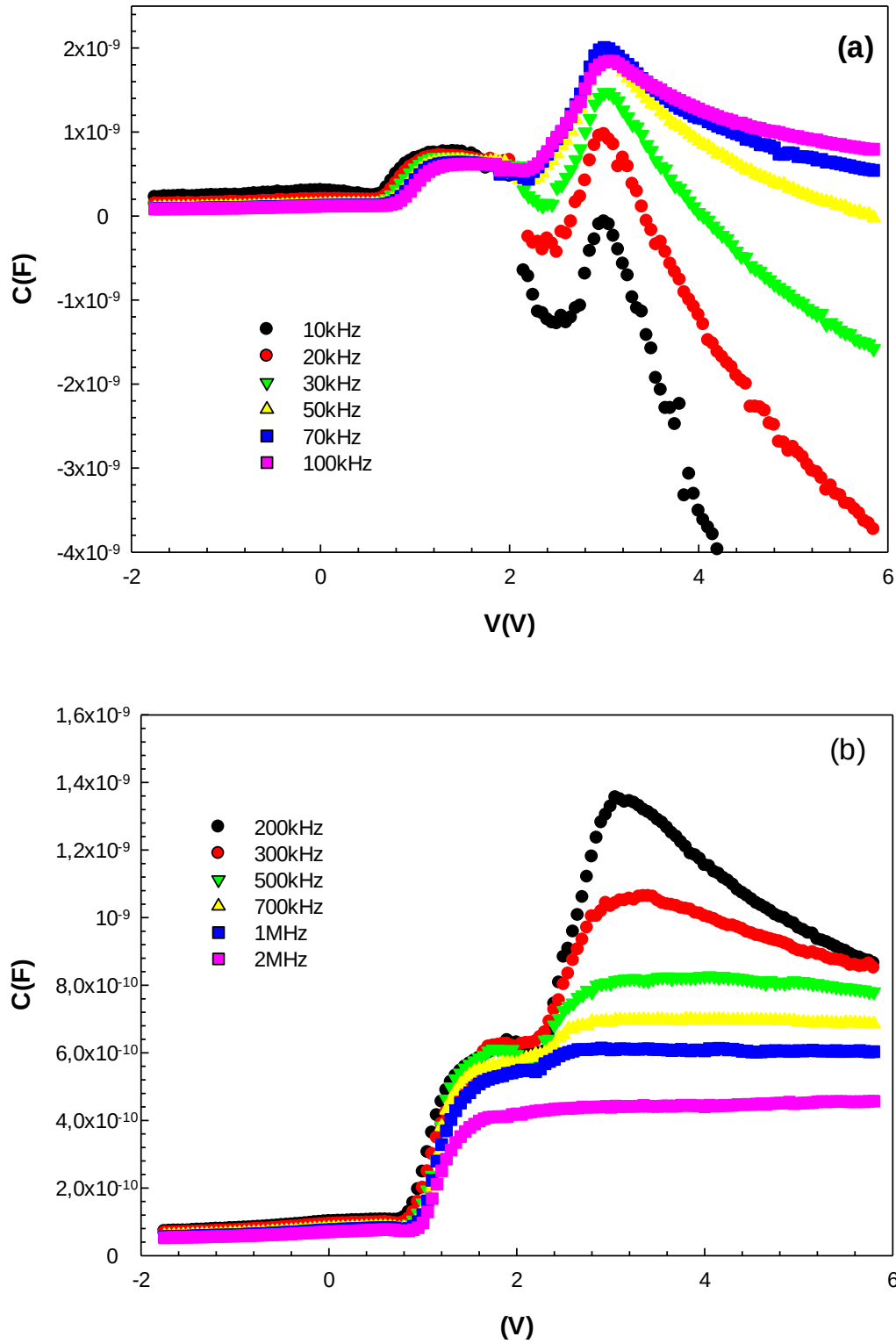
5.4.1. Frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω-V) karakteristikleri

Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si yapısının C-V ve G/ω-V grafikleri sırasıyla Şekil 5.10 (a,b) ve 5.11 (a,b)'de verildi. Geniş bir frekans aralığında C-V ve G/ω-V ölçümleri bize hazırlanan aygıtın temel elektriksel özellikleri hakkında önemli bilgiler verir. Son zamanlarda, (MPS) yapılarla ilgili literatürde birçok deneysel çalışma bulunmaktadır [3-22]. Gerek C-V gerekse G/ω-V eğrileri özellikle pozitif gerilim bölgesinde bir frekans dağılımına sahiptir. Bu bölgede belirgin olarak kapasitans ve kondüktans artan frekansla azalmaktadır. Düşük frekanslardaki kapasitans ve kondüktans değerlerinin büyüklüğü yapının arayüzeyindeki arayüzey durumlarının dolup bosalma zamanının frekans bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.10 (a,b)' de verilen eğrilerden de görüldüğü gibi her bir C-V eğrisi, yapının seri direncinin varlığından dolayı yığılım bölgesinde anormal bir pik vermektedir. Aynı zamanda Bu C-V piklerinin büyüklüğü artan frekansla hızla azalırken konumu ise fazla değişmemektedir yani frekansın artmasıyla kapasite değerleri azalıp düşük frekanslarda gözlenen pik kaybolmaktadır. Kapasitenin bu frekansa bağıllığı arayüzey durumlarından kaynaklanmaktadır. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarının ac sinyali rahatlıkla takip edebilmesi sonucu frekansa bağlı olarak bir ilave kapasitans meydana gelmektedir. Buna karşın yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) arayüzey

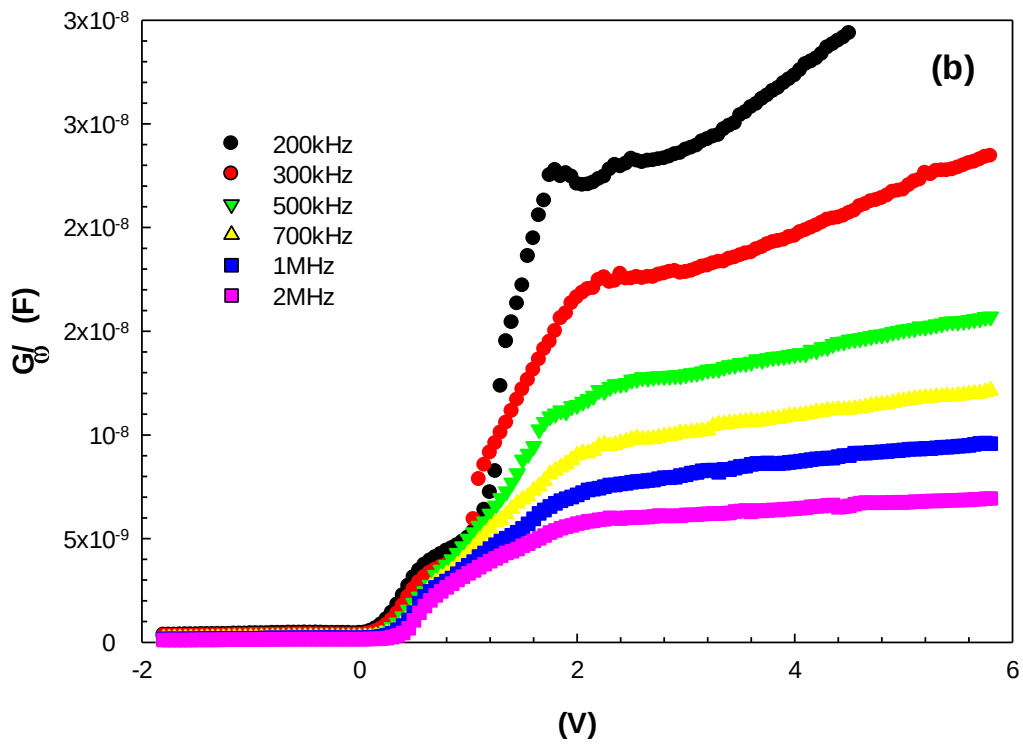
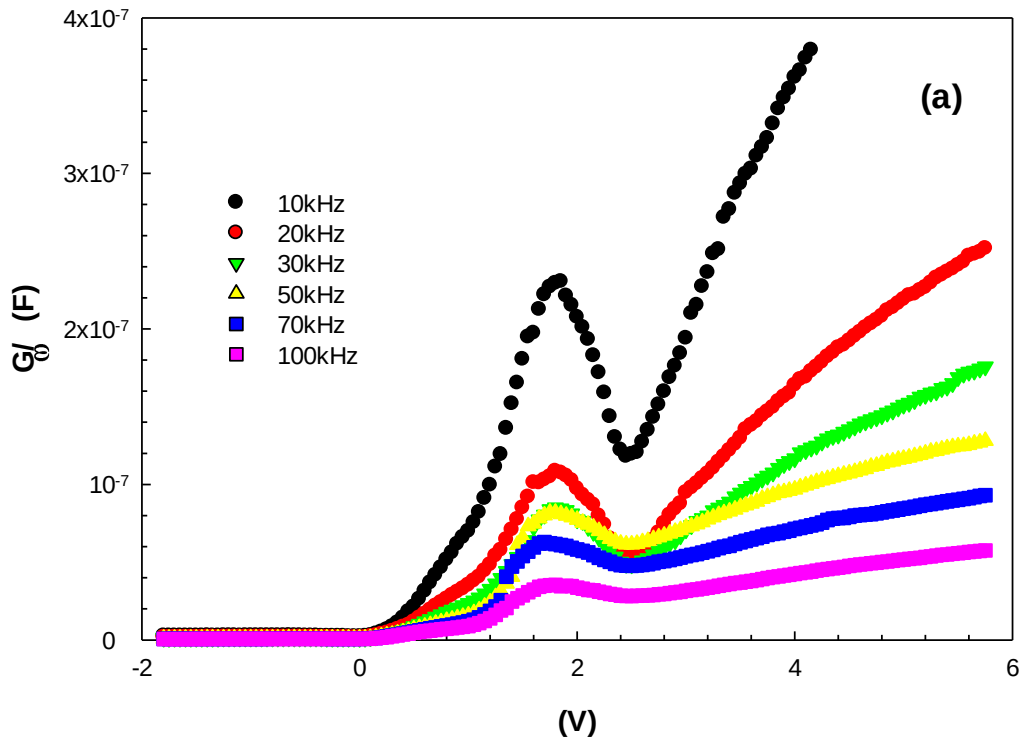
durumları ac sinyali takip etme gücü iyice azalır ve dolayısıyla ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m) değerlerine bir katkı gelmez. Yani yüksek frekanslar için ac sinyalin periyodu (T), arayüzey durumlarının ortalama ömürlerinden (τ) küçük olduğu için τ yüksek frekanslarda ($\omega=2\pi f=2\pi/T$) çok küçülen T yi takip edemez. Dolayısıyla yüksek frekans bölgesinde arayüzey durumlarından dolayı kapasiteye gelen bir katkı yoktur veya ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Böylece kapasiteye, düşük frekanslarda olduğu gibi yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) arayüzey durumlarından dolayı meydana gelen katkı ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu olay arayüzey durumlarının yüksek frekanslarda ac sinyali takip edememesi sonucunda artan frekansla kademeli olarak azaldığını gösterir. Literatürde arayüzey durumlarından hiçbir katkının gelmemesi için C-V ölçümü en az 500 kHz' de ve tüm arayüzey durumlarını görebilmek için ise en fazla 100 Hz' de yapılmalıdır [3,25,49-52].

Şekil 5.10 (a)'da düşük frekanslarda ($f < 70$ kHz) kapasitans değerinin negatif olduğu görülmektedir ve bu negatif davranış negatif kapasitans (NC) olarak adlandırılır, kapasitansın tüketim bölgesinde bir minimum değere ulaşması ise negatif diferansiyel kapasitans olarak adlandırılır. Yığılma bölgesinde görülen negatif kapasitans varlığına sadece seri direnç ve arayüzey durumlarının varlığı atfedilemez. Negatif kapasitans kavramı p-n eklemeler [53], metal-yarıiletken kontaklar/Schottky engel diyotlar [16,54-56] ve metal-yalıtkan-yarıiletken yapılar [57] gibi pek çok yapıyı içeren araştırmada gözlemiştir. Deneysel NC verileri bu davranışın etkilerinin sebep olduğu karışıklıklar sebebi ile literatürde fazla yer almamıştır ve NC etkilerinden literatürde bahsedilirken genellikle “anormal” ya da “olağandışı” kavramları kullanılır [19]. Deneysel olarak NC'nin ölçülmesi bazen parazitik etkiler [15,58] ya da kalibrasyondaki eksikler gibi alet hatalarına atfedilebilir [19]. Değişik cihazlardaki negatif kapasitansın mikroskobik boyuttaki fiziksel mekanizması; kontak enjeksiyonu, arayüzey durumları veya azınlık taşıyıcıların enjeksiyonuna atfedilmektedir [59]. Negatif kapasitansın oluşması, elektrotlardaki (tabakalar) yükün artan gerilim voltajıyla azalması gerektiğini göstermesi açısından önemlidir. Negatif kapasitans, malzemenin indükleyici bir davranış gösterdiği anlamına gelmektedir [60]. Azınlık taşıyıcıların enjeksiyonuyla negatif kapasitans oluşumu sadece doğru beslemde ve düşük frekanslarda gözlenebilmektedir [59]. Kontak durumundaki yarıiletken aygıtlarda (Schottky, MIS, MOS), arayüzey durumları ve kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yarıiletken içine enjekte

edilmesi ile böyle bir durum söz konusudur. Azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna bağlı olarak ortaya çıkan NC sadece doğru ön gerilim voltajı uygulanan bölgelerde gözlenir [15,61,62] ve sıcaklık ya da frekansa bağlı admitans spektroskopisi ölçümleriyle (C-V ve G/ ω -V) elde edilen verilerin davranışına bağlı olarak açıklanabilir [63] ve bu durum teorisinin şu tartışmalar üzerinde toplanmasına sebep olmuştur: Doğru ön gerilim altında fazla enerjiye sahip olan elektronlar Schottky engelini aşıp boş durumları doldururken arayüzeyde tuzaklanan elektronlar ile çarpıştıkları zaman bu elektronların tuzaklardan çıkmasına sebep olurlar. Schottky engelin enerjisi tuzakların bağlanma enerjisinden daha büyük olmak üzere, elektronu tuzaktan dışarı çıkarıp metal içersine taşımak için gereken enerji bulk içinde bir elektron-deşik çifti oluşturmak için gereken enerjiden daha azdır. Dolayısıyla, tuzak durumlarının metalin iletkenlik bandı ile çiftlenmesi ara yüzeyin her iki tarafındaki iyonizasyon enerjisinin çok farklı olmasını sağlar [62]. Werner ve arkadaşları [15] tamamı frekansa bağlı admitans ölçümlerinin duruma ait elektriksel verileri karakterize etme imkânı verdiğini ileri sürmüşlerdir. Si Schottky engel diyotlarda olduğu gibi düşük frekanslarda görülen indüktif etki, yüksek mertebede olan azınlık taşıyıcısının bulk yarıiletken içerisine enjekte edilmesi sonucu ortaya çıkar. Yük taşıyıcı enjeksiyonunda yerleşmiş ara yüzey tuzaklarında hopping mekanizmasının olduğuna inanılmakla beraber, enjeksiyon işleminin fiziksel mekanizması henüz ayrıntılı bir şekilde anlaşılamamıştır.

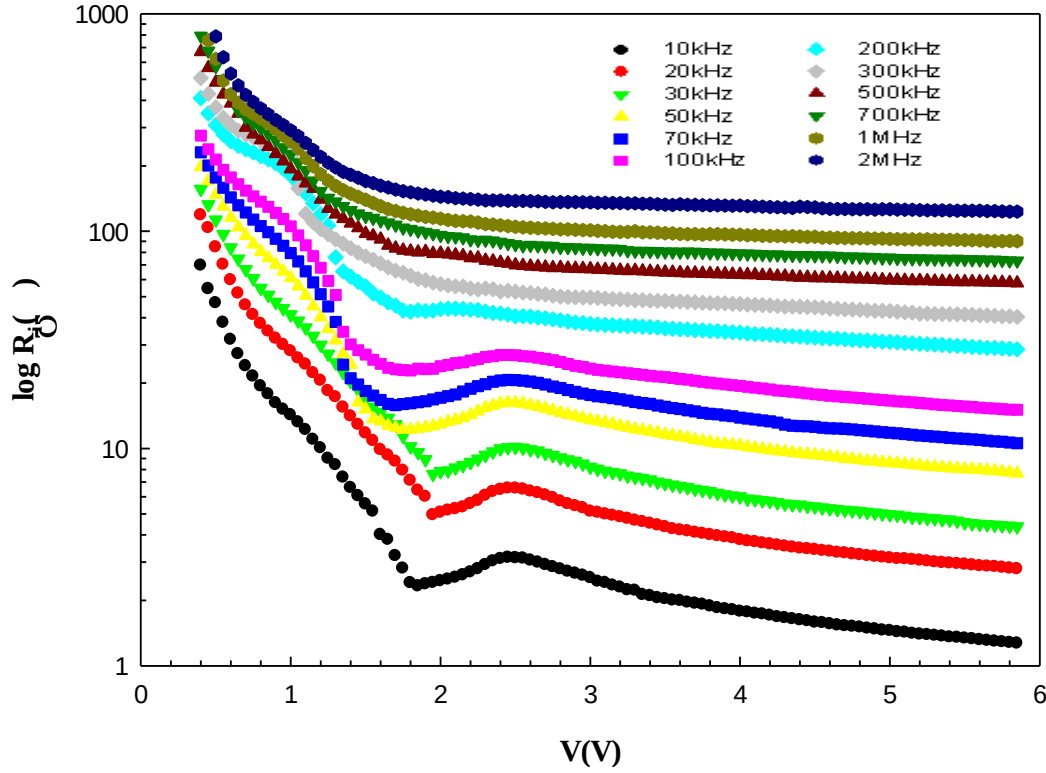


Şekil 5.10. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun farklı frekanslarda Kapasitans-Voltaj (C-V) karakteristikleri



Şekil 5.11. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun farklı frekanslarda Kapasitans-Voltaj (G_w -V) karakteristikleri

Seri direnç değerleri ölçülen kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) deneysel ölçümlerinden faydalanılarak Eş. 5.2' den hesaplandı [24]. Bir yarıiletken aygıtın (diyot v.b.) gerçek seri direnç değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir. Çünkü yarıiletkenin seri direnci ileri pozitif gerilimlerde gerçek değerine ve yeterince ters gerilimlerde (terslenim bölgesinde) sonsuza gider. Şekil 5.12' de seri direncin frekans ve voltaja bağlı değişimi verildi. Şekil 5.12' de görüldüğü gibi seri direnç voltaja bağlı olarak değişmekte ve özellikle düşük frekanslarda iki pik vermektedir. Bu piklerin meydana geldiği gerilim bölgelerinde arayüzey durumlarının yerleşmiş olduğuna atfedilebilir [3,25,13,46]. Frekans aralığı çok geniş olduğundan R_S -f grafiği yarı logaritmik olarak verilmiştir. Artan frekansla seri direnç değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Çünkü düşük frekanslarda elde edilen kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) değerleri için arayüzey durumları ac sinyali takip edebilir [49-51]. Şekilde de görüldüğü gibi yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) her iki pik de kaybolmuştur. Çünkü yüksek frekanslarda arayüzey durumları ac sinyali takip edemez. Bu nedenle Au/(%1 GP katkılı)- $Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co_4O_x/n$ -Si yapı veya benzeri eklem içeren yapıların temel parametreleri olan; katkı atomların yoğunluğu (N_A veya N_D), Fermi enerjisi (E_F), potansiyel engel yüksekliği (Φ_B), tüketim tabakasının genişliği (W_D) ve seri direnç (R_S) gibi değerler mutlaka yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) elde edilen C-V ve G/ω -V eğrilerinden hesaplanmalıdır. Aksi taktirde arayüzey durumlarından dolayı bu parametrelere katkı gelir.



Şekil 5.12. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun farklı frekanslarda için Seri Direnç-Voltaj (R_s -V) eğrileri

5.4.2. Frekansa bağlı dielektrik karakteristikler

Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si arayüzey tabakalı engel diyot için, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ve elektrik modülüsünün frekans ile voltaja bağlılığı, (-2V)- (+6V) voltaj ve 10kHz ile 2MHz frekans aralığında incelendi.

Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si arayüzey tabakanın C ve G verileri değerlendirilerek, ϵ' ve ϵ'' değerleri frekansın fonksiyonu olarak her bir ön gerilim için elde edildi ve yapının polimer ya da oksit/yalıtkan tabaka için kompleks geçirgenliği şöyle tanımlanabilir [39,44,64]:

Frekansa bağlı ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ gibi temel parametreler sırasıyla 3.28' den 3.34' e kadar olan eşitliklerden, ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) ise Eş. 5.14' den hesaplanmıştır.

(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x arayüzey tabakanın geniş bir frekans aralığında ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ parametreleri (-2 V)-(+6 V) voltaj aralığında, voltaja bağlı grafikleri sırasıyla Şekil.5.13, 5.14 ve 5.15' de verilmiştir. ϵ' değerleri, pozitif gerilime doğru gidildikçe C-V eğrilerine benzer şekilde bir pik vermektedir. Bu benzerlik beklenen bir durumdur. Ancak C-V eğrilerinin ve dolayısıyla ϵ' -V eğrilerinin doğru öngerilim bölgesinde bir pik vermesi beklenmeyen bir durumdur. Son yıllarda bazı araştırmacılar doğru öngerilim C-V ölçümlerinde hem negatif kapasitans hem de anormal bir kapasitans piki gözlemişlerdir [50,66-68]. Bu anormal pikin kaynağı, arayüzey durumlarının yoğunluğuna ve seri dirence atfedilir [50,68]. Ayrıca azınlık taşıyıcıların enjeksiyonu da diğer bir nedendir [59,69]. Şekil. 5.13'de özellikle düşük frekanslarda ϵ' değerlerinin oldukça yüksek olduğu ve tüketim bölgesinde gözlenen bu piklerin artan frekansla beraber kaybolduğu görülmektedir. Ayrıca, tersinim bölgesinde ϵ' de küçük bir değişiklik görülmektedir. Düşük frekanslarda ($f \leq 50$ kHz) oluşan bu pikler arayüzey durumlarına (N_{ss}) ve dipol polarizasyon bağlanabilir. Diğer taraftan yüksek frekanslarda ($f \geq 50$ kHz) yığılma bölgesinde görülen pikler seri direncin ve (%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x arayüzey tabakası etkisinden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda, Şekil 5.13(a)' da görüldüğü gibi, dielektrik-voltaj eğrilerinin negatif gerilimlerde ki frekans dağılımı yok denecek kadar küçüktür, ancak ileri pozitif gerilimler için frekans dağılımı oldukça büyüktür. Hatta dielektrik sabiti, artan pozitif gerilimle tüm frekanslar için hızla azalmaktadır. Dielektrik sabitindeki bu düşme, artan frekansla azalan polarizasyona atfedilebilir ve belirli bir yüksek frekansın üstünde elektron sıçramalarının bu dış elektrik alanı takip edememesinden kaynaklanmaktadır [70].

Bu yüzden yapının gerek elektriksel gerekse dielektrik özelliklerinin tayininde özellikle R_s , N_{ss} ve yalıtkan tabakanın kalınlığı (d_{ox}) dikkate alınmalıdır. Bunlar dikkate alınmadan hesaplanan temel fiziksel parametrelerin doğruluğu ve güvenilirliği azalmaktadır. Ayrıca temel fiziksel parametrelerin yalnız oda sıcaklığı ve bir frekans için belirlenmesi bize iletim mekanizması hakkında detaylı bir bilgi veremez. Bunun aksine hem geniş bir frekans hem de sıcaklık aralığında gerçekleştirilecek deneysel C-V ve G/ω -V ölçümleri, bize iletim mekanizmaları hakkında daha detaylı bilgiler verebilir.

Şekil 5.14'de görüleceği gibi ϵ'' -V eğrileri düşük frekanslarda ϵ' -V eğrilerine benzer şekilde yaklaşık olarak 2V civarında, arayüzey durumlarla ilgili bant arasında yerleşik az

sayıda çoğunluk taşıyıcılardan dolayı, tükenim bölgesinde bir pik vermektedir. Tükenim bölgesinde arayüzey durumlarından kaynaklanan pik, artan frekansla kaybolur. C ve G/ω nın N_{ss} , R_s ve arayüzey tabakasına karşılık tepkisi düşük ve yüksek frekans için farklıdır[65,73,74]. Özellikle düşük frekanslarda $\epsilon'-V$ ve $\epsilon''-V$ parametrelerinin tersinim ve tükenim bölgelerinde bu tür pik davranışları N_{ss} ve Maxwell-Wagner tipi arayüzey polarizasyona bağlanabilir [36,65]. Şekil 5.15’ de görüldüğü gibi $\tan\delta-V$ parametrelerinin tersinim ve tükenim bölgesinde pik vermektedir, ilk pik yüzeye yakın tuzaklarda ikinci pik ise derin tuzaklarda lokalize olmuş yüklerden kaynaklanmaktadır.

Sekil 5.16’de görüldüğü gibi σac değerleri azalan frekansla artmaktadır. İleri negatif gerilim bölgesinde artan gerilimle tersinim yüklerinin artışı iletkenliği artırırken, pozitif gerilim bölgesinde çoğunluk taşıyıcılar iletkenliği sağlamaktadır.

Elde edilen deneysel $\epsilon'-V$, $\epsilon''-V$ ve $\tan\delta-V$ grafikleri N_{ss} ve arayüzey polarizasyonu tersinim ve tükenim bölgesinde etkili iken, R_s ve (%1 GP katkılı)- $Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co_4O_x$ arayüzey tabakasının yığılma bölgesinde etkili olduğunu doğruladı.

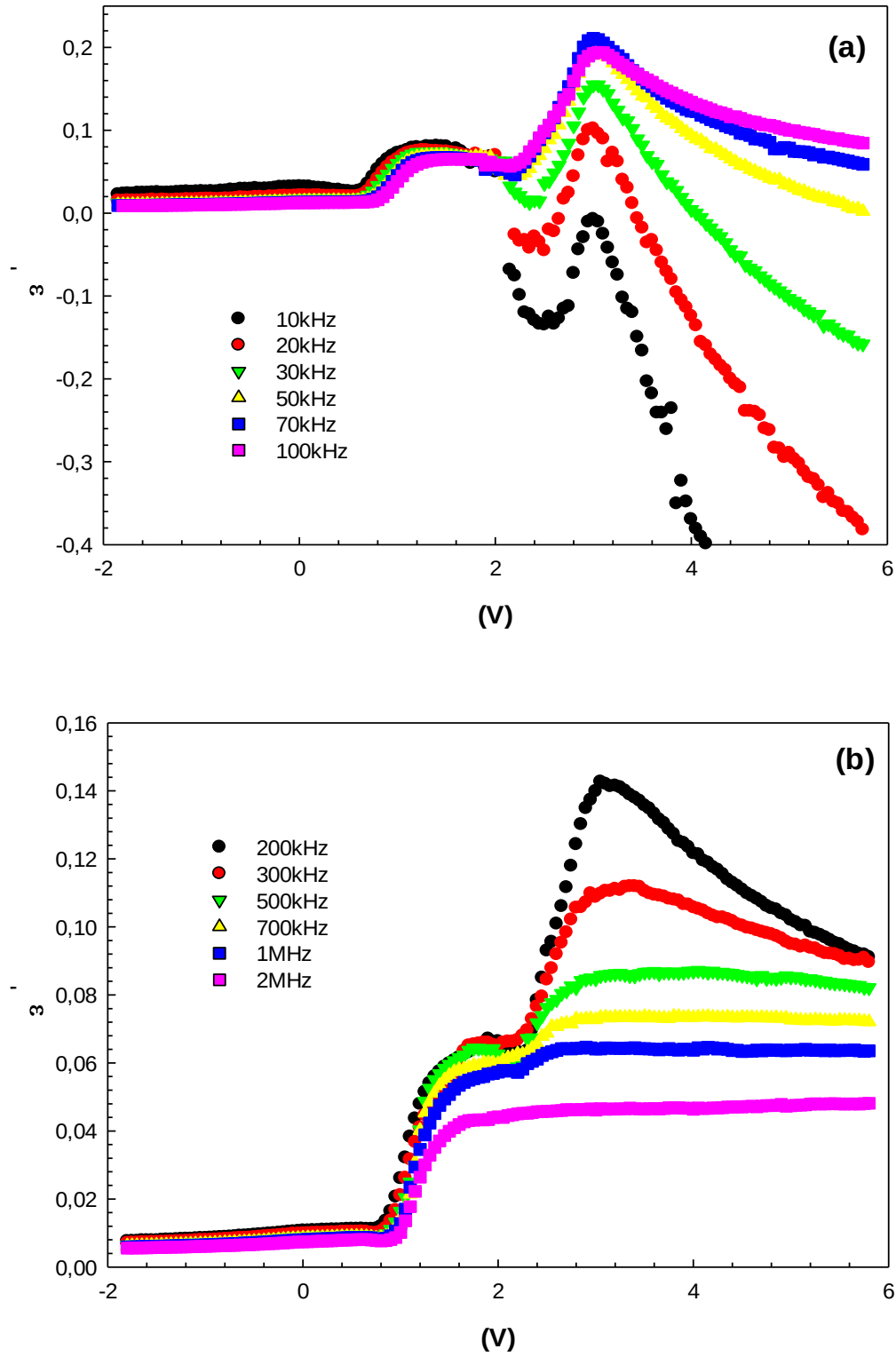
Kompleks empedans (Z^*) ve kompleks elektrik modülü (M^*), dielektrik malzemelerin analizine göre literatürde tartışılmıştır [44,65,75] ve bu malzemelerin dielektrik özelliklerini elektrik modülüslerinin formülizesini kullanarak tanımlamanın tercih edildiği görülmüştür [76-78]. Kompleks empedans ve kompleks geçirgenlik ϵ^* verisi kullanılarak M^* biçimine dönüştürülmüş hali Eş. 5.16’ da verilmiştir.

Elde edilen voltaja bağlı $M'-V$ ve $M''-V$ parametreleri Şekil 5.17. (a) ve (b)’ de $Au/(\%1 \text{ GP katkılı})-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co_4O_x/n-Si$ arayüzey tabakanın elektrik modüllerinin gerçel ve sanal kısımları (M', M'') ϵ' ve ϵ'' değerlerinden hesaplanarak farklı voltajlarda frekansa bağlı grafiklerini göstermektedir ve özellikle tükenim bölgesinde uygulanan ön gerilimin güçlü bir fonksiyonu olduğu bulunmuştur. Şekil 5.17’de frekansa bağlı olarak, elektrik modülünün gerçel kısmı (M') ve imajiner elektrik modülünün (M'') frekans arttıkça arttığı görülmektedir.

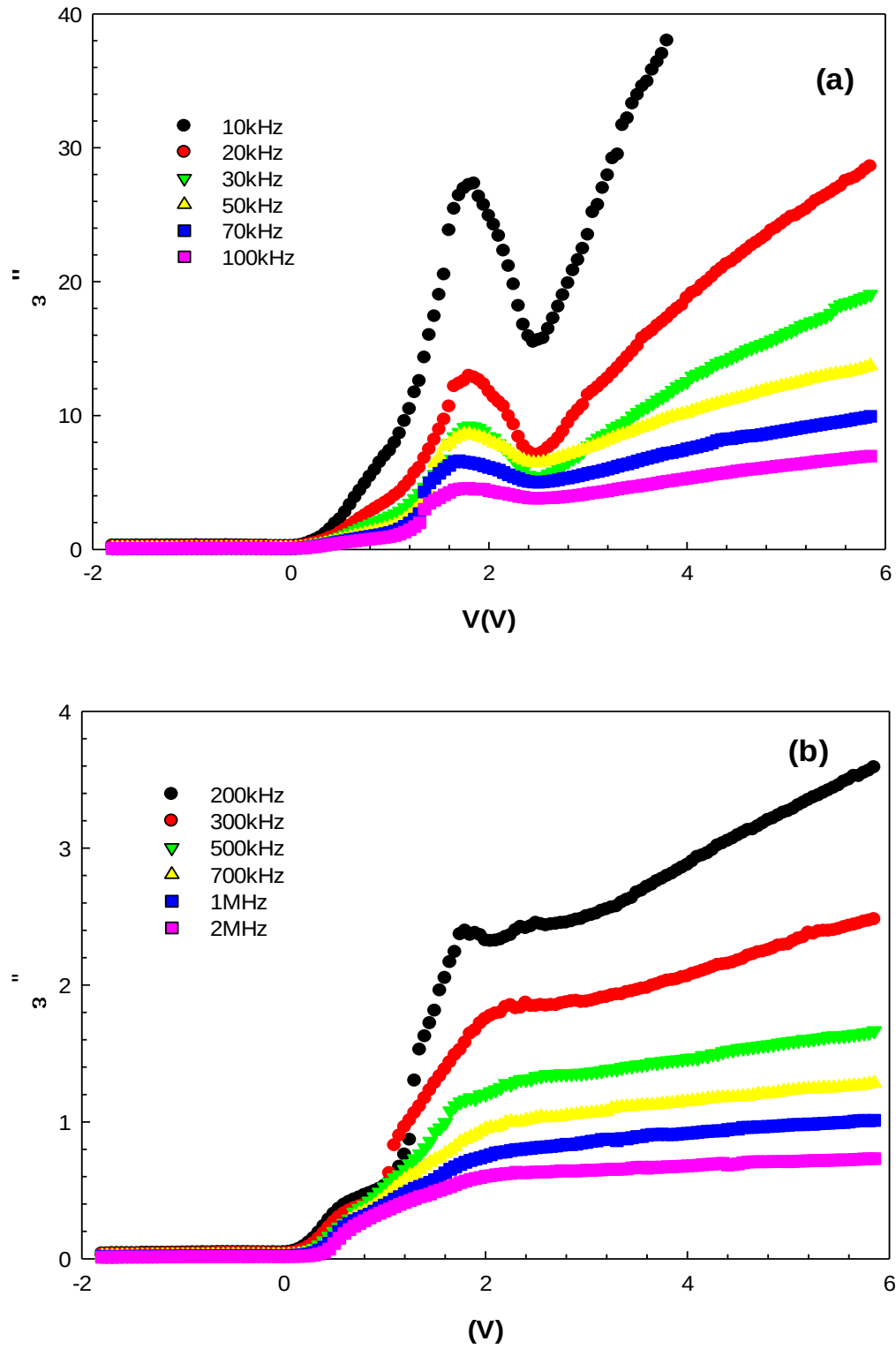
Klasik olarak dielektrik sabitinin boşluk haricindeki maddeler için 1’den büyük olduğu düşünülür fakat gevşemiş (relaxation) materyal denen maddeler için ($t_d \gg t_0$) birçok farklı

mekanizma yardımıyla kapasitansın şekil 5.9' da düşük frekanslarda görüldüğü gibi hızlıca azalarak sıfıra düştüğü hatta negatif olarak arttığı durumlar mümkündür [59,69]. Negatif kapasitans ve negatif dielektrik sabiti durumu, p-n eklemler, Schottky kontaklar ve GaAs yarıiletkenli cihazlar gibi birçok elektronik cihazda gözlenmiştir [59].

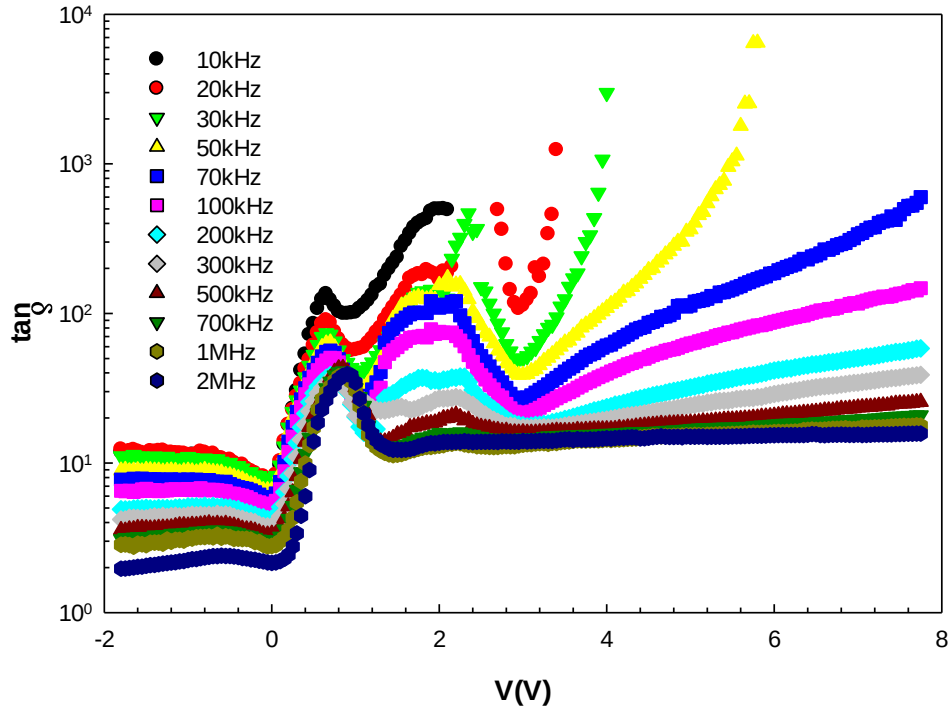
Artan frekanslarda arayüzey ve dipolar veya iyonik polarizasyonun ϵ' , ϵ'' ve arayüzey durumlarına katkıları etkisiz olmaktadır. Artan frekansla ϵ' değerlerinin azalması şöyle açıklanabilir; frekans artırıldığında arayüzey dipolleri alternatif alan doğrultusunda yönlenebilmeleri için daha az zamana sahip olmalarındandır.



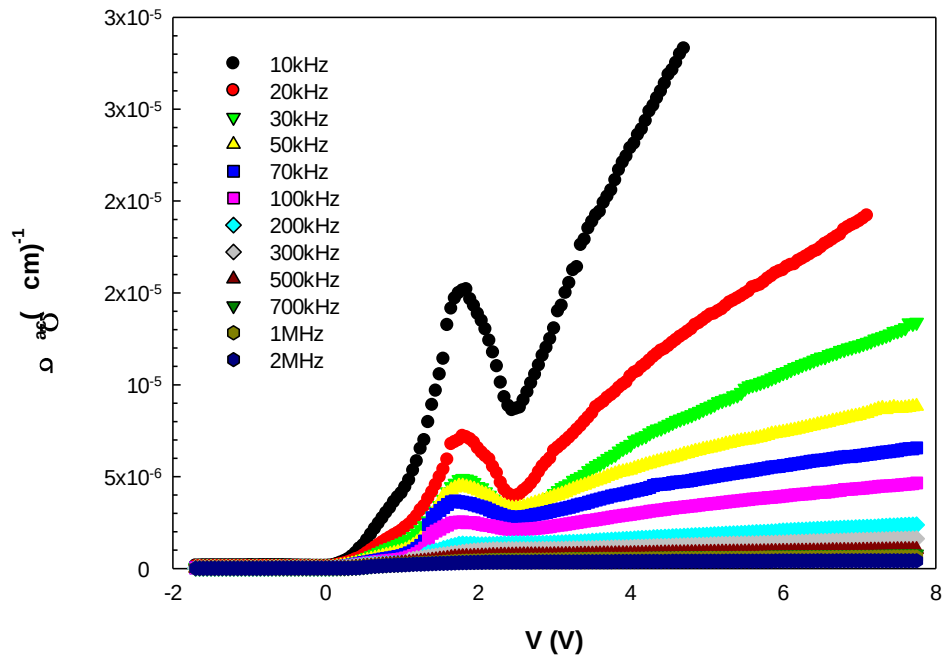
Şekil 5.13. Au/(%1 GP katkı)- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x/\text{n-Si}$ Schottky engel diyodun ϵ' -V karakteristiklerinin frekansa bağlı değişimi



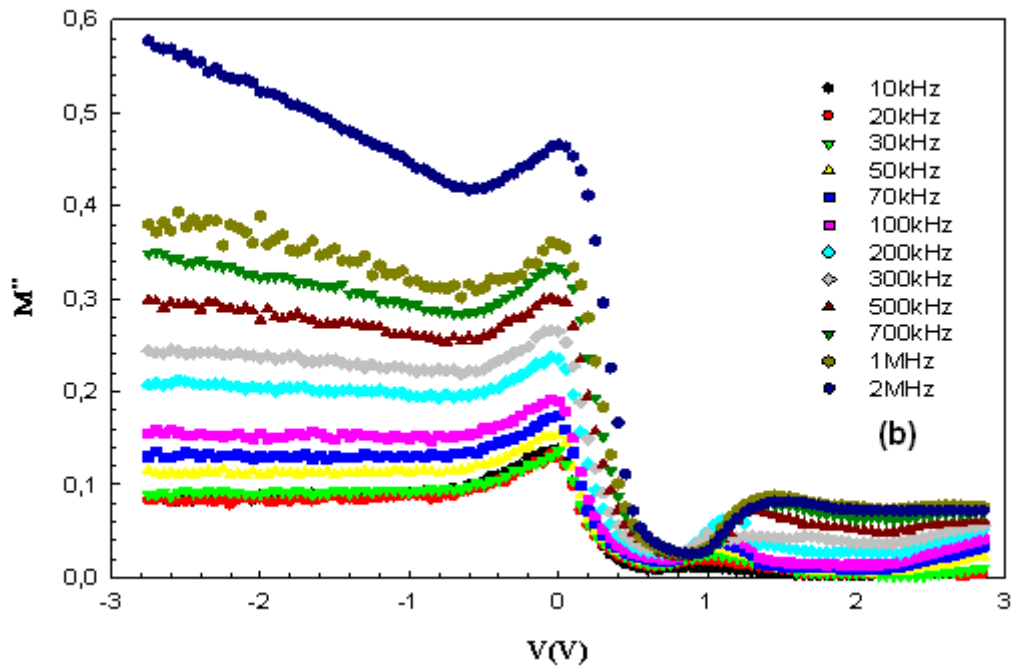
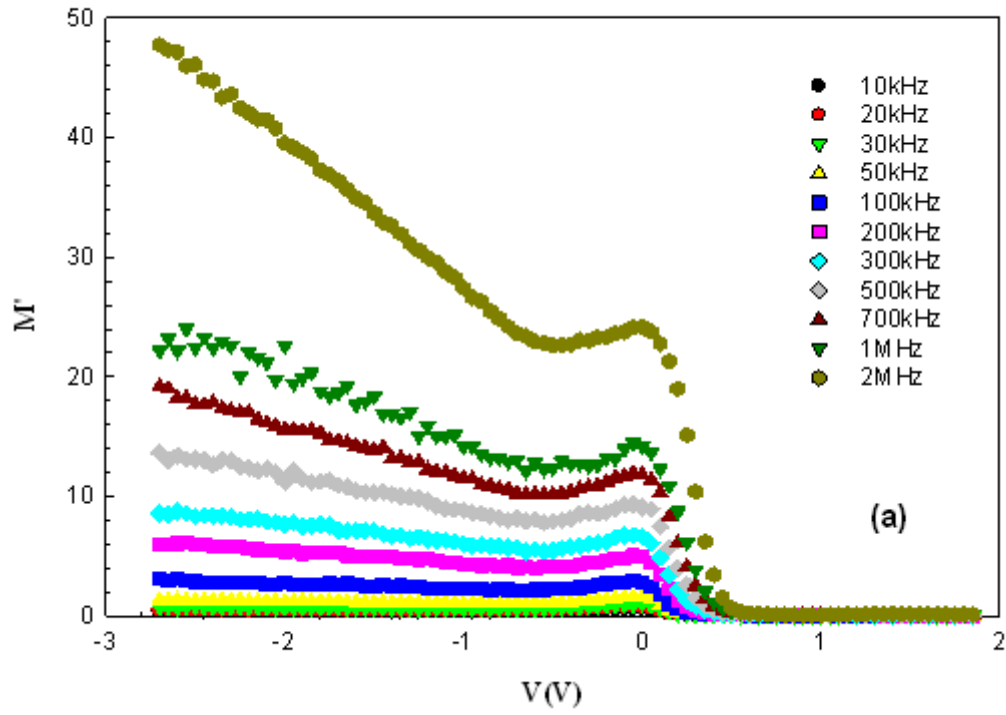
Şekil 5.14. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun ϵ'' -V karakteristiklerinin frekansa bağlı değişimi



Şekil 5.15. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si arayüzey tabakalı engel diyodun $\tan\delta$ -V karakteristiklerinin frekansa bağlı değişimi



Şekil 5.16. Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky engel diyodun ac elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) frekansa bağlı değişimi



Şekil 5.17. Au/(%1 GP katkılı)- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x/\text{n-Si}$ Schottky engel diyodun elektrik modülüsünün (a) gerçek kısmı M' ve b) sanal kısmı M'' karakteristiklerinin frekansa bağlı değişimi

6. SONUÇLAR

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıların elektriksel ve dielektrik özelliklerinin yalnızca oda sıcaklığında ve tek bir frekansta incelenmesi bu yapıların iletim mekanizmaları hakkında çok detaylı bilgi sağlayamaz. Dolayısıyla bu yapıların elektrik ve dielektrik özelliklerinin geniş bir frekans ve sıcaklık aralığında incelenmesi hem iletim mekanizmaları hem de M/S arayüzeyinde oluşan engel hakkında daha detaylı ve güncel bilgiler elde etmemize neden olur. Hazırlanan Au/(%1 GP katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si yapının bazı temel fiziksel özelliklerini araştırmak için kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri oda sıcaklığında geniş bir frekans aralığında Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analiz metres (5 Hz-13 MHz) ve bir IEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla bilgisayarda kumanda edilerek, hem doğru hem de ters ön gerilim altında -2V' dan +6V' a kadar 0.1 V adım aralıklarla ve 100kHz-2MHz frekans aralığında elde edildi sıcaklığa bağlı ölçümleri ise 300 kHz için 120K-300K sıcaklık aralığı için gerçekleştirildi. Çalışmanın birinci kısmında sıcaklığa bağlı bazı temel fiziksel özellikleri araştırmak için C-V ve G/ω -V ölçümlerinden arayüzey durumları (N_{ss}), seri direnç (R_s), difüzyon potansiyeli (V_d), katkılanan verici atomların sayısı (N_D), tüketim tabakasının genişliği (W_D) ve Fermi enerjisi (E_F) gibi temel parametreler elde edildi. Aynı zamanda, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülüsü (M' ve M'') ve ac elektrik iletkenliği (σ_{ac}) hesaplandı. Çalışmanın ikinci kısmında ise C-V ve G/ω -V ölçümleri oda sıcaklığında 100kHz-2MHz frekans aralığında incelendi. Frekans ve voltajın bir fonksiyonu olan kapasitans $C(V,f)$, iletkenlik $G(V,f)$ karakteristikleri, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülüsü (M' ve M'') ve ac elektrik iletkenliği (σ_{ac}) hesaplandı.

Sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω -V eğrilerindeki pozitif ileri belsemdeki bükülmeler sıcaklık etkisiyle arayüzey durumlarının yeniden yapılanıp düzenlenmesine ve seri direnç etkisine atfedildi [50-52]. Ayrıca kapasitans değerlerinin yüksek sıcaklıklarda düşük sıcaklıklara göre daha büyük olduğu görülmektedir ve bu davranış yeniden birleşme merkezleri olarak davranan arayüzey durumlarında sıcaklığın etkisiyle tuzakların dolup boşalmasına atfedilebilir [64-68]. G/ω -V eğrilerinden de yine iletkenliğin sıcaklık arttıkça arttığı gözlenmiştir. Bu durum yüksek sıcaklıklarda etkili olan arayüzey uzay yüklerine atfedildi. Bir MS veya MIS tipi SBDs hem arayüzey tabakaya hemde R_s ' ye sahipse ye uygulanan

voltaj; seri direnç, tüketim tabakası ve arayüzey tabaka üzerinde paylaşılacaktır. Yarıiletken aygıtın gerçek seri direnç değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir dolayısıyla seri direnç ileri pozitif gerilimlerde gerçek değerine ulaşır. R_s değerleri her sıcaklık için ani bir düşüş sergilemektedir ve bu azalış değerleri artan sıcaklıkla azalırken konumu da negatif voltaj bölgesine yani pozitif ön-gerilimden negatif ön-gerilime doğru kaymaktadır. Artan sıcaklıkla kapasitansta meydana gelen artma hem arayüzey durumlarının sıcaklık (termal uyarma) bağımlılığıyla hem de seri direncin bu davranışıyla açıklandı. Ters ön-gerilim C^{-2} -V eğrileri lineer doğrular verirler ve bu doğruların kestiği noktalardan ve eğimlerinden diyotun N_D , E_F , W_D , Φ_B (C-V) ve N_{ss} gibi temel elektriksel parametreleri hesaplandı. Yapılan hesaplamalara göre W_D ve N_{ss} değerleri artan sıcaklıkla azalırken E_F ve N_D artmaktadır. Sıcaklık arttıkça ters beslem C^{-2} -V eğimlerinin azalması N_D değerinin artmasına yol açar ve düşük eğim değerleri arayüzey durumlarından kaynaklanan ilave kapasitansın varlığına atfedildi.

Sıcaklığa bağlı dielektrik özelliklere bakıldığında ise ϵ' değerleri artan sıcaklıkla arttığı görüldü ve sıcaklığın artmasıyla yüklü taşıyıcıların sayısı üstel olarak artmakta yani daha fazla uzay yükü polarizasyonu oluşmaktadır dolayısıyla bu durum dielektrik sabitinin hızlıca artmasına sebep olur aynı şekilde ϵ'' değerlerinin de artan sıcaklıkla düzgün bir şekilde arttığı görülmektedir. $\tan\delta$ -V eğrilerinde ise her bir sıcaklık değeri için bir maksimuma sahiptir ve her bir sıcaklık değeri için pik değerleri kaymaktadır.

Frekansa bağlı ölçümlerde ise C-V ve G/ω -V eğrileri özellikle pozitif gerilim bölgesinde frekans dağılımına sahiptirler ve bu bölgede kapasitans ve kondüktans artan frekansla azalmaktadır. Düşük frekanslardaki kapasitans ve kondüktans değerlerinin büyüklüğü yapının arayüzeyindeki arayüzey durumlarının dolup bosalma zamanının frekans bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarının ac sinyali takip edebilmesi sonucu frekansa bağlı olarak bir ilave kapasitans meydana gelmektedir. Buna karşın yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) arayüzey durumları ac sinyali takip edemez Bu olay “arayüzey durumlarının yüksek frekanslarda ac sinyali takip edememesi” olarak belirtilir. Literatürde arayüzey durumlarından hiçbir katkının gelmemesi için C-V ölçümü en az 500 kHz’ de ve tüm arayüzey durumlarını görebilmek için ise en fazla 100 Hz’ de yapılmalıdır. Düşük frekanslarda ($f < 70$ kHz) kapasitans değerinin negatif olduğu görülmektedir. Bu davranış literatürde malzemenin indüktif özelliğe sahip olması olarak

açıklanır. Azınlık taşıyıcıların enjeksiyonuyla negatif kapasitans oluşumu sadece doğru beslemde ve düşük frekanslarda gözlenebilmektedir. Schottky engel diyotlarda olduğu gibi düşük frekanslarda görülen indüktif etki, yüksek mertebede olan azınlık taşıyıcısının bulk yarıiletken içerisine enjekte edilmesi sonucu ortaya çıkar. Yük taşıyıcı enjeksiyonunda yerleşmiş ara yüzey tuzaklarında hopping mekanizmasının olduğuna inanılmakla beraber, enjeksiyon işleminin fiziksel mekanizması henüz ayrıntılı bir şekilde anlaşılamamıştır.

Frekansa bağlı dielektrik özelliklere bakıldığında ise artan frekanslarda arayüzey ve dipolar veya iyonik polarizasyonun ϵ' , ϵ'' ve arayüzey durumlarına katkıları etkisiz olmaktadır. Artan frekansla ϵ' değerlerinin azalması frekans artırıldığında arayüzey dipolleri alternatif alan doğrultusunda yönlenebilmeleri için daha az zamana sahip olmalarındandır şeklinde açıklanmıştır.

Hem C-V-T, G/ω -V-T hemde C-V-f ve G/ω -V-f grafiklerindende görüldüğü gibi temel elektrik ve dielektrik parametreler sıcaklık, frekans ve voltajla önemli ölçüde değişmektedir. Bu değişim özellikle tüketim ve yığılma bölgelerinde gözlemlendi ve tüketim bölgesindeki değişimler genelde arayüzey durumlarına yüzeysel kutuplanmaya ve arayüzey tabakaya atfedilirken yığılma bölgesindeki değişiklikler genellikle sadece R_s ye atfedildi.

DeneySEL C-V-f ve G/ω -V-f ile C-V-T, G/ω -V-T ölçümlerinden elde edilen sonuçlar ışığında bundan sonra yapılacak bu ve benzeri çalışmalara yardımcı olmak düşüncesiyle aşağıda verilen bazı görüş ve önerilerimiz şunlardır:

- ✓ MS yapılarında geleneksel SiO_2 arayüzey tabakası yerine daha ucuz ve kolay büyütülebilecek yüksek dielektrik sabitli saf veya katkılı polimerlerin kullanılması.
- ✓ Schottky diyotlarda iletim mekanizmaları ve M/S arayüzeyinde oluşan engelin biçimi hakkında daha güvenilir bilgi etmek amacıyla, gerek frekans gerekse sıcaklığa bağlı elektriksel ölçümlerin geniş bir frekans sıcaklık ve voltaj aralığında gerçekleştirilmesi.
- ✓ Tüm fabrikasyon aşamaları mümkün olduğu kadar temiz ve yüksek vakum altında gerçekleştirilmeli.

- ✓ Elektriksel ölçümlere geçmeden önce diğer yapısal ve benzeri analizlerin mümkün olan en kısa sürede yapılması.
- ✓ Hazırlanan bu yapılar hakkında daha kapsamlı bilgi elde etmek amacıyla radyasyona (görünür bölge, x ve gama ışınları gibi) karşı tepkilerinin de belirlenmesi.
- ✓ Gürültü ve ışık gibi dış etkenlerin etkisini önemli ölçüde azaltmak için tüm ölçümleri mümkünse vakumlanmış bir kriyostat veya benzeri bir düzenek içinde gerçekleştirilmesi.
- ✓ Sıcaklık, frekans ve voltaj ölçümlerinin mümkün olduğu kadar sık aralıklarla gerçekleştirilmesi, elde edilen sonuçların doğruluğu ve güvenilirliğini arttıracaktır.

KAYNAKLAR

1. Braun, F. (1874). Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle. ***Annual Review of Physical Chemistry***, 153, 556.
2. Rhoderick, E. H., Williams, R. H. (1988). Metal-Semiconductor Contacts, Clarendon, ***Oxford***.
3. Cowley, A.M., Sze, S.M. (1965). Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems, ***Journal of Applied Physics***, 36 (10): 3212-3221.
4. Sharma, B.L. (1984). Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications, ***Plenum Press***, New York.
5. Özavcı, E., Demirezen, S., Aydemir, U., Altındal, Ş. (2013). A detailed study on current-voltage characteristics of Au/n-GaAs in wide temperature range, ***Sensors and Actuators A***, 194: 259–268.
6. Padovani, F. A., Sumner, G.G. (1965). Experimental study of gold gallium arsenide Schottky barriers, ***Journal of Applied Physics***, 3:3744.
7. Padovani, F. A. (1966). Graphical determination of the barrier height and excess temperature of a Schottky barrier, ***Journal of Applied Physics***, 37: 921.
8. Borrego, J. M., Gutmann, R. J., Ashok, S. (1977). Interface state density in Au-nGaAs Schottky diodes, ***Solid-State Electronics***, 20:125.
9. Hackam, R., Harrop, P. (1972). Electrical Properties of Nickel-Low-Doped *n*-Type Gallium Arsenide Schottky-Barrier Diodes, ***IEEE Transactions on Electron Devices***, 19(12):1231.
10. Saxena, A.N. (1969). Forward Current-Voltage Characteristic of Schottky Barriers on Type Silicon, ***Surface Science***, 13: 151-171.
11. Aboelfotoh, M. O. (1991). ***Solid-State Electronics***, 34 51.
12. Güllü, Ö., Biber, M., Duman, S., Türüt, A., (2007). Effects Of The Barrier Metal Thickness And Hydrogen Pre-Annealing On The characteristic Parameters Of Au/*n*-GaAs Metal-Semiconductor Schottky Contacts, ***Applied Surface Science***, 253: 7246.
13. Byrum L. E., Ariyawansa G., Jayasinghe R. C., Dietz N., Perera A. G. U., Matsik S. G., Ferguson I. T., Bezinger A., Liu H. C. (2009). Negative capacitance in GaN/AlGaIn heterojunction dual-band detectors, ***Journal of Applied Physics*** 106:053701-5.
14. Ho, P.S., Yang, E.S., Evans, H.L., Wu, X. (1986). Electronic states at silicide-silicon interfaces, ***Physical Review Letters***, 56(2): 177-180.

15. Werner, J., Levi, A.F.J., Tung, R.T. (1988). Anzlowar, M., Pinto, M., Origin of the Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts, **Physical Review Letters**, 60(1): 53-56.
16. Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B. (1993). Frequency dependence of forward capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes, **Solid State Electronics**, 36 (4): 605-610.
17. Bülbül, M.M., Zeyrek, S., Altındal, Ş., Yüzer, H. (2006). On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Schottky diodes, **Microelectronic Engineering**, 83(3): 577-581.
18. Altındal, S., Parlaktürk, F., Tataroğlu, A., Parlak, M., Sarımasov, S.N., Agasiev, A.A. (2008). The temperature profile and bias dependent series resistance of Au/Bi₄Ti₃O₁₂/SiO₂/n-Si (MFIS) structures, **Vacuum**, 82(11): 1246-1250.
19. Ershov M., Liu H.C., Li L., Buchanan M., Wasilewski Z.R., Jonscher A.K. (1998). Negative capacitance effect in semiconductor devices, **IEEE Transactions Electron Devices**, 45:2196-2205.
20. 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 (3): 499-505.
21. Ziel, A., (1968). Solid State Physical Electronics, **Prentice-Hall International Inc.**, Minnesota, 260-300.
22. Werner, J. H., Gütter, H. H. (1991). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. **Journal of Applied Physics**, 69 (3), 1522-1532.
23. Ohdomari, I., Tu, K.N. (1980). Parallel Silicide Contacts, **Journal of Applied Physics**, 51, 3735.
24. Aydoğan, S., Sağlam, M., Turut, A. (2008). Reverse bias capacitance-voltage characteristics of Al/polyaniline/p-Si/Al structure as a function of temperature, **Journal of Non-Crystalline Solids**, 354(45-46): 4991-4995.
25. Nicollian, E. H., Brews, J. R. (1982). MOS Physics and Technology, **John Wiley & Sons**, New York, 40-175, 222-226, 288, 423-439.
26. Neamen, D. A. (1997). Semiconductor Physics and Devices 2nd ed., **Mc Graw-Hill**, New York, 420-450, 517-523.
27. Cooke, M. J. (1990). Semiconductor Devices, **Prentice Hall**, New York, 294-308.
28. Ghandhi, S. K. (1983). VLSI Fabrication Principles, **John Wiley & Sons**, New York, 401-405.

29. Oral, M. (1983). Elektrostatik, *Ege Üniversitesi Matbaası*, İzmir, 221-252.
30. Tareev, B. (1979). Physics of Dielectric Materials, *Mir Publishers*, Moscow, 67-95, 140-156.
31. Von Hippel, A.R. (1959). Dielectrics and Waves, *John Wiley & Sons*, New York, 3-8, 63-122, 160-166, 228-234.
32. Fröhlich, H. (1958). Theory of Dielectrics, *Clarendon Press*, Oxford, 1-21, 70-78.
33. Popescu, M., Bunget, I. (1984). Physics of Solid Dielectrics, *Elsevier*, Amsterdam, 206-245, 282-291.
34. Wert, C. A., Thomson, R. M. (1970). Physics of Solids 2nd ed., *McGraw-Hill*, New York, 410-421, 388-403.
35. Pakma, O., Serin, N., Serin, T., Altındal, Ş. (2008). The influence of series resistance and interface states on intersecting behavior of I-V characteristics of Al/TiO₂/p-Si (MIS) structures at low temperatures, *Semiconductor Science Technology*, 23(10): 105014-(1-9).
36. Chelkowski, A. (1980). Dielectric Physics, *Elsevier*, Amsterdam, 97-105.
37. Symth, C. P. (1955). Dielectric Behaviour and Structure, *McGraw-Hill*, New York, 52-61, 202-215.
38. Von Hippel, A. R. (1954). Dielectric Materials and Applications, *John Wiley & Sons*, New York, 3-9, 18-24, 36-39, 63-122.
39. Daniel, Vera V. (1967). Dielectric Relaxation, *Academic Press*, London, 1-19, 79-87.
40. Arslan, E., Şafak, Y., Altındal, S., Kelekçi, O., Özbay, E. (2010). Temperature dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGaIn/AlN/GaN heterostructures, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(20-22): 1006-1011.
41. Naik, S.S., Reddy, V. R., Choi, C-J., Bae, J-S. (2011). Electrical and structural properties of double metal structure Ni/V Schottky contacts on n-InP after rapid thermal process, *Journal of Materials Science*, 46(2): 558-565.
42. Hill, W.A., Coleman, C.C. (1980). A single-frequency approximation for interface-state density determination, *Solid State Electronics*, 23(9): 987-993.
43. Şahin, B., Çetin, H., Ayyıldız, E. (2005). The effect of series resistance on capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes, *Solid State Commun.*, 135: 490.
44. Pissis, P., Kyritsis, A. (1997). Electrical conductivity studies in hydrogels, *Solid State electronics*, 97(1-4): 105–113.

45. Yücedağ, İ. (2007). Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapılarda Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık Ve Frekansa Bağlı İncelenmesi, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**.
46. Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Bülbül, M. M. (2005). Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure, **Microelectronic Engineering**, 81: 140-149.
47. Prabakar, K., Narayandass, S.K., Mangalaraj, D. (2003). Dielectric properties of Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te thin films, **Physica status solidi (a)**, 199(3): 507-514.
48. Gökçen, M. (2008). Au/SiO₂/n-GaAs (MOY) Yapıların Elektrik Ve Dielektrik Karakteristiklerinin Frekans Ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**.
49. Gökçen, M. (2003). MOS Yapılarda Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/W-V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi, Y.Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-30.
50. Depas, M., Van Meirhaeghe, R. L., Lafere, W. H. and Cardon, F. (1994). Electrical characteristics of Al/SiO₂/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation, **Solid State Electron.**, 37(3): 433-441.
51. Kar, S. and Narasimhan, R. L. (1987). Characteristics of the Si-SiO₂ interface states in thin (70-230 Å) oxide structures, **Journal of Applied Physics**, 61(12): 5353-5359.
52. Akkal, B., Benamara, Z., Gruzza, B., Bideux, L. (2000). Characterization of interface states at Au/InSb/InP(100) Schottky barrier diodes as a function of frequency, **Vacuum**, 57: 219-228.
53. Noguchi T., Kitagawa M., Taniguchi I. (1980). Negative capacitance of silicon diode with deep level traps, **Journal of Applied Physics**, 19: 1423-1424.
54. Zhu C.Y., Wang C.D., Feng L.F., Zhang G.Y., Yu L.S., Shen J. (2006). A novel method of electrical characterization of a semiconductor diode at forward bias, **Solid State Electronics**, 50: 821-825.
55. Wang C.D., Zhu C.Y., Zhang G., Shen J. (2003). Accurate electrical characterization of forward ac behavior of real semiconductor diode: Giant negative capacitance and nonlinear interfacial layer, **IEEE Transactions Electron Devices**, 50 (4): 1145-1148.
56. Champness C.H., Clark W.R. (1990). Anomalous inductive effect in selenium Schottky diodes, **Applied Physics Letters**, 56: 1104-1106.
57. Jayatissa A.H., Li Z. (2005). Effect of temperature on capacitance-voltage characteristics of SOI, **Materials Science and Engineering B**, 124-125: 331-334.
58. Ehrenfreund E., Lungenschmied C., Dennler G., Neugebauer H., Sariciftci N.S. (2007). Negative capacitance in organic semiconductor devices: Bipolar injection and charge recombination mechanism, **Applied Physics Letters**, 91:012112-3.

59. Champness C. H. and Clark, W. R. (1990). Anomalous inductive effect in selenium Schottky diodes, ***Applied Physics Letters***, 56(12):1104–1106.
60. Jones, B. K., Santana, J., McPherson, M. (1998). Negative capacitance effects in semiconductor diodes, ***Solid State Communications***, 107(2):47-50.
61. Perera A.G.U., Shen W.Z., Ershov M., Liu H.C., Buchanan M., Schaff W.J. (1999). Negative capacitance of GaAs homojunction far-infrared detectors, ***Physical Review Letters***, 74: 3167-3169.
62. Shen W.Z., Perera A.G.U. (2001). Effect of interface states on negative capacitance characteristics in GaAs homojunction far-infrared detectors, ***Applied Physics A***, 72: 107-111.
63. Wu X., Yang E.S., Evans H.L. (1990). Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces, ***Journal of Applied Physics***, 68: 2845.
64. Kar, S., Narasimhan, R.L. (1987). Characteristics of the Si-SiO₂ interface states in thin (70-230 Å) oxide structures, ***Journal of Applied Physics***, 61: 5353.
65. Afendiyeva, I.M., Dökme, İ., Altındal, Ş., Bülbül, M.M., Tataroğlu, A. (2008). Frequency and voltage effects on the dielectric properties and electrical conductivity of Al-TiW-Pd₂Si/n-Si structures, ***Microelectronic Engineering***, 85: 247.
66. Yücedağ, D., Altındal, S., Tataroğlu, A. (2007). On the profile of frequency dependent series resistance and dielectric constant in MIS structure, ***Microelectronic Engineering***, 84: 180-186.
67. Tataroğlu, A., Altındal, S. Bülbül, M.M. (2005). Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure, ***Microelectronic Engineering***, 81 (1): 140-149.
68. Bülbül, M.M. (2007). Frequency and temperature dependent dielectric properties of Al/Si₃N₄/p-Si(100) MIS structure, ***Microelectronic Engineering***, 84: 124- 128.
69. Roosbroeck, W. Van and Jr. Casey, H. C. (1972). Transport in relaxation semiconductors, ***Physical Review B***, 5 (6): 2154-2175.
70. Tareev, B., Physics of Dielectric Materials, ***Mir Publishers***, Moscow, 67-95,(1979).
71. Oreshkin, P.T. (1977). Physics of Semiconductors and Dielectrics, ***Visshaya Shkola***, Moscow.
72. Kaya, A., Altındal, Ş., Asar, Y.Ş., Sönmez, Z. (2013). On the Voltage and Frequency Distribution of Dielectric Properties and ac Electrical Conductivity in Al/SiO₂/p-Si (MOS) Capacitors, ***Chinese Physics Letters***, 30: 017301.

73. Tataroğlu, B., Altındal, Ş., Tataroğlu, A. (2006). The C-V-f and G/w-V-f characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures, ***Microelectronic Engineering***, 83: 2021.
74. Altındal, Ş., Kanbur, H., Yücedağ, İ., Tataroğlu, A. (2008). On the energy distribution of interface states and their relaxation time and capture cross section profiles in Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes, ***Microelectronic Engineering***, 85: 1495.
75. Sattar, A.A., Rahman, S.A. (2003). Dielectric Properties of Rare Earth Substituted Cu-Zn Ferrites, ***Physica State Solids (A)*** 200: 415.
76. 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.
77. Camaioni N., Casalbore-Miceli G., Beggiato G., Cristani M. and Summonte C. (2000). Photoelectrical Characterization of Schottky Junctions Between Poly(4h-Cyclopenta[2,1-b:3,4-b']Dithiophene) and Aluminium: Effect of Hexadecyl Hroups in 4 Position, ***Thin Solid Films***, 366: 211-215.
78. Gupta, R. K., Singh, R. A. (2004). Electrical Properties of Junction Between Aluminium and poly(aniline)-poly(vinyl choloride) Composite, ***Journal of Materials Chemistery And Physics***, 86: 279- 283.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇETİNKAYA, Hayriye Gökçen
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 29.01.1988 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0505 831 63 06
e-mail : gokcencetinkata@gazi.edu.tr,
gokcen_ctnky@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi	2011
Lisans	Gazi Üniversitesi	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-Devam ediyor	Gazi Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

MAKALELER, KONGRELER-KONFERANSLAR

A. Science Citation Index (SCI) tarafından taranan dergilerde yayınlanan makaleler

- ✓ H.G. Çetinkaya, H. Tecimer, H. Uslu, S. Altındal “Photovoltaic characteristics of Au/PVA (Bi-doped)/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) at various temperatures” Current Applied Physics 13 (2013) 1150-1156.
- ✓ H. G. Çetinkaya, D. E. Yıldız, Ş. Altındal “On the negative capacitance behavior in the forward bias of /n-4 - (MS) and comparison between MS and /n-4 - (MIS) type diodes both in dark and under 200 W illumination intensity” Int. J. Mod. Phys. B (IJMPB) 28, (2014) 1450237.
- ✓ H. G. Çetinkaya, Sahar Alialy, Ş. Altındal, A. Kaya, İ. Uslu “Electrical and dielectric properties of Au/%1 graphene (GP)+Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x doped Poly(vinyl alcohol)/n-Si structures as function of temperature and voltage” Journal of Materials Science: Materials in Electronics, (2015) DOI: 10.1007/s10854-015-2816-7.

B. Ulusal Kongrelerde sunulan Poster Özetleri

- ✓ H.G. Çetinkaya, D.E. Yıldız, Ş. Altındal “A comparative study on the electrical characteristics of Au/n-type 4H-SiC Schottky barrier diodes (SBDs) with and without TiO₂ interfacial insulator layer” 1st International Semiconductor Science and Technology Conference (ISSTC-2014)
- ✓ H.G. Çetinkaya, H. Tecimer, H. Uslu “The Effect of Series Resistance on Current-Voltage (I-V) Characteristics of Au/PVA/n-Si Schottky Barrier Diodes (SBDs) in Dark and Under Illumination Conditions” Mini-Workshop on Surface Science for Inauguration of the Turkish Surface Science Society (TuSSS) 23 May 2011, Ankara.

- ✓ H.G. Çetinkaya, H. Tecimer, H. Uslu, Ş. Altındal “*Illumination Dependent of Current-Voltage Characteristics of Au/(Bi-Katkılı) PVA /n-Si Schottky Diodes (SDs) at 80 K and 320 K Temperatures*” 28th International Physics Congress 6-9 September 2011, Bodrum.
- ✓ H.G. Çetinkaya, Ş. Altındal, A. Kaya, S. Koçyiğit “*On the Origin of Capacitance and Anomalous Peak in the Forward Bias Capacitance-Voltage plots in Au/%1 graphene doped- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$ /n-Si Structure*” Nanoscience & Nanotechnology for Next Generation (NanoNGe’14) 20-22 August 2014, Elazığ.
- ✓ H.G. Çetinkaya, S. Alialy, Ş. Altındal, İ. Uslu, A. Kaya, “*Investigation of Negative Dielectric Constant at Forward Biases Using Impedance Spectroscopy Analysis in Au/%1 graphene doped- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$ /n-Si Structure*” Nanoscience & Nanotechnology for Next Generation (NanoNGe’14) 20-22 August 2014, Elazığ.
- ✓ H.G. Çetinkaya, A. Kaya, Ş. Altındal, S. Koçyiğit “*Temperature and Voltage Dependence of Electrical and Dielectric Properties of Au/%1 graphene doped- $\text{Ca}_{1.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Co}_4\text{O}_x$ /n-Si Structure*” Nanoscience & Nanotechnology for Next Generation (NanoNGe’14) 20-22 August 2014, Elazığ.
- ✓ E. Marıl, A. Kaya, H.G. Çetinkaya, S. Koçyiğit, Ş. Altındal “*On the Temperature and Voltage Dependence Forward Bias Current-Voltage (I-V) Charectiristics in Au/ $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{Ga}_{0.001}\text{O}_x$ (2% grapheme cobalt)/n-Si Structure*” Nanoscience & Nanotechnology for Next Generation (NanoNGe’14) 20-22 August 2014, Elazığ.



GAZİ GELECEKTİR..