



**Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN
HAZIRLANMASI VE ELEKTRİK İLE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN
FREKANS VE VOLTAJA BAĞLI İNCELENMESİ**

Ömer SEVGİLİ

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2020

Ömer SEVGİLİ tarafından hazırlanan “Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİK İLE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS VE VOLTAJA BAĞLI İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Prof. Dr. Adem TATAROĞLU

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Üye: Prof. Dr. Abdullah YILDIZ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

.....

Üye: Doç. Dr. Perihan DURMUŞ

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Üye: Doç. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN

Fizik Ana Bilim Dalı, Karatekin Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 23/09/2020

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

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER

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.

Ömer SEVGİLİ

23/09/2020

Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN HAZIRLANMASI
VE ELEKTRİK İLE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS VE VOLTAJA
BAĞLI İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Ömer SEVGİLİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Au/(Ag-ZnO/polyvinylpyrrolidone)/n-Si Schottky engel diyotları (SBDs) hazırlandıktan sonra öncelikle n-Si ön yüzeyine büyütülen (Ag-ZnP/PVP) arayüzey tabakasının yapısal özellikleri X-Ray kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağıtım X-Ray (EDX) kullanılarak incelendi. XRD sonuçları Ag ve ZnO nano-parçacıkların verileri referans kodu 87-0717 (Ag) ve 80-0075 (ZnO) ile iyi bir şekilde eşleştiğini göstermektedir. SEM görüntülerinde Zn, O ve Ag iyi bir dağılım gösterdiği görüldü. EDX sonuçlarında ise Ag-katkılı ZnO/PVP parçacıklarının yüksek yoğunlukta oksijene sahip olduğu görüldü. MPS tipi-Schottky diyotun idealite faktörü (n), seri direnci (R_s) ve sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{B0}) değerleri ileri beslem I-V verilerinden Termiyonik Emisyon ve Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplandı ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldı. Sonuçların birbirinden biraz farklı çıkması özellikle arayüzey durumlarının (N_{ss}), n-Si/(Ag-ZnP/PVP) arayüzeyinde ve Si yasak enerji bandı içinde özel bir dağılıma sahip olması ve kullanılan metodun doğasına (farklı voltaj bölgelerine karşılık gelmesi) atfedildi. Buna ilave olarak, MPS diyotun N_{ss} , R_s , difüzyon potansiyeli (V_D), katkılanan verici atomların yoğunluğu (N_D), tüketim tabakasının genişliği (W_D) ve Fermi enerjisi seviyesi (E_F), ve engel yüksekliği ($\Phi_{B(C-v)}$) gibi diğer bazı temel elektriksel parametreleri ise ters beslem C^{-2} -V verileri kullanılarak hesaplandı. N_{ss} ve R_s değerlerinin sırasıyla enerjiye ve voltaja bağlı değişim profilleri Kondüktans Metodu ve düşük-yüksek (C_{LF} - C_{HF}) frekans metotları kullanılarak elde edildi. Elde edilen sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu ve N_{ss} değerleri ($\sim 10^{12}$ eV $^{-1}$ cm $^{-2}$) mevcut literatürle kıyaslandığında, MPS yapı için son derece uygun olduğu görülmektedir. Ters beslem C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin, ileri beslem I-V ölçümlerinkinden büyük çıkması ölçüm metodunun doğasına atfedildi. Tüm bu elektriksel parametreler ilave olarak, hazırlanan MPS diyotun dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), kompleks elektrik modülüsün reel/imaginer (M'/M'') değerleri ile ac elektrik iletkenliği (σ_{ac}) hem frekansa hem de voltaja bağlı ölçülen C/G-V-f verilerinden elde edildi. Düşük frekanslarda elde edilen yüksek ϵ' ve ϵ'' değerleri; arayüzey durumlarının varlığına, onların yaşam sürelerine ve yüzey ile dipol polarizasyonuna atfedildi.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : (Ag-ZnO/PVP) polimer arayüzey tabakası; frekans ve voltaja bağlılık, elektriksel ve dielektrik özellikler

Sayfa Adedi : 108

Danışman : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

THE FABRICATION OF Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) SCHOTTKY BARRIER
DIODES AND THE INVESTIGATION THEIR ELECTRICAL AND DIELECTRICAL
PROPERTIES AS FUNCTION OF FREQUENCY AND VOLTAGE

(Ph. D. Thesis)

Ömer SEVGİLİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2020

ABSTRACT

Au/(Ag-ZnO/polyvinylpyrrolidone)/n-Si (MPS) type Schottky Barrier Diodes (SBDs) were fabricated. Firstly, structural properties of the grown (Ag-ZnO/PVP) interfacial layer on the front of n-Si wafer were examined by using X-Ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersion X-ray (EDX) techniques. XRD results show that Ag and ZnO nanoparticles match well with reference codes 87-0717 (Ag) and 80-0075 (ZnO). In SEM images, Zn, O and Ag showed a good distribution. In EDX results, Ag-doped ZnO/PVP interlayer showed high density oxygen. The ideality factor (n), series resistance (R_s) and reverse-bias barrier height (Φ_{B0}) values for Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) type SBD diode were obtained from the thermionic emission (TE) and Cheung functions and then compared with each other. The observed some discrepancies between two these methods especially were attributed to the existence of a particular density distribution of surface states (N_{ss}) between interlayer and n-Si at forbidden bandgap of Si and the nature of measurement method due to difference voltages. The other basic some electrical parameters of the MPS type diode such as N_{ss} , R_s , diffusion potential (V_D), doping-donor atoms (N_D), depletion layer width (W_D), Fermi energy level (E_F) and $\Phi_{B(C-V)}$ were also obtained from the reverse bias C^{-2} -V data. The energy and voltage dependent profile of N_{ss} were obtained from the conductance and low-high frequency (C_L - C_H) capacitance methods, respectively. The calculated values of N_{ss} for two methods were found good agreement with each other and the magnitude of them ($\sim 10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$) is very suitable for these MPS type SBDs when compared with literature. The dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ''), loss tangent ($\tan\delta$), real and imaginary components of complex modulus (M' and M''), and ac electrical conductivity (σ_{ac}) values of the MPS type SBD were also investigated both as function of frequency and voltage. The obtained higher values of ϵ' and ϵ'' at low frequencies were attributed to the existence of N_{ss} , their relaxation time, and surface/dipole polarization.

Science Code : 20227

Key Words : (Ag-ZnO/PVP) polymer interfacial layer; frequency and voltage dependence; electric and dielectric properties

Page Number : 108

Supervisor : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın oluşmasında her konuda yardımını esirgemeyen ve engin tecrübelerinden faydalandığım değerli tez danışmanı hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a ve TİK üyelerim Prof. Dr. Adem TATAROĞLU ile Prof. Dr. Abdullah YILDIZ'a ve deneysel tecrübelerini benden esirgemeyen, sabırla öğreten, manevi desteğini ve tez çalışmamın en iyi şekilde noksansız olması için uğraşan Doç. Dr. İkrım ORAK'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Özellikle katkılı polimer/organik (Ag-ZnP/PVP) arayüzey tabakanın büyütülmesi ve yapısal analizleri konusundaki katkılarından dolayı, İran Mohaghegh-Ardabili Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Yashar Azizian KALANDARAGH'a teşekkür ederim.

Ayrıca desteklerinden dolayı değerli arkadaşlarıma (AS, VS, FÇ, RG, AS, ÖÇ, HK, HS) teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak en önemli teşekkürlerimi, bana her zaman destek veren ve aldığım her kararda daima yanımda olan çok kıymetli eşim, annem, babam, kardeşlerim ve çocuklarım Sadık Yavuz ile Selim Taha'ya bildiririm.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. METAL-YARIİLETKEN (MS) KONTAKLARIN TEORİSİ.....	7
2.1. Yarıiletken Materyaller	7
2.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar	8
2.3. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Enerji-Band Diyagramı	11
2.4. Schottky Diyotların İdeal Durumdan Sapma Nedenleri	15
2.4.1. Engel yüksekliğinde hayali kuvvet etkisinden dolayı düşme	15
2.4.2. Direnç etkisi	17
2.4.3. Arayüzey durumları	19
2.4.4. Hareketli iyonlar	25
2.4.5. Tünelleme (Termiyonik Alan Emisyonu (TFE) ve Alan Emisyonu (FE)).....	26
2.4.6. Kenar etkileri.....	26
2.5. İdeal MIS Yapı.....	26
2.5.1. Yığılma bölgesi	30
2.5.2. Tüketim bölgesi.....	31

	Sayfa
2.5.3. Terslenim bölgesi	31
2.6. Dielektrik Teori	33
2.6.1. Dielektriksiz ve dielektrikli paralel plakalı kondansatör	33
2.6.2. Dielektrik kutuplanma.....	36
2.6.3. Kutuplanma yükleri.....	37
2.6.4. Kutuplanma yüklerinin alanı.....	38
2.6.5. Kutuplanma Mekanizmaları.....	41
2.6.6. Dipol durulma kavramı	46
2.6.7. Dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp ölçüm tekniği.....	50
2.6.8. Elektrik modülüs formalizmi	52
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	53
3.1. Çinko Oksit ve Polivinilpirolidon Hakkında Bazı Genel Bilgiler	53
3.1.1. Çinko Oksit (ZnO) ve Ag katkılı Çinko Oksit (Ag-ZnO).....	53
3.1.2. Polivinilpirolidon (PVP)	55
3.2. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Diyotun Oluşturulması.....	56
3.2.1. Kristal temizleme	56
3.2.2. Omik kontakın oluşturulması.....	57
3.2.3. (Ag-ZnO/PVP) arayüzey tabakanın oluşturulması	58
3.2.4. Doğrultucu kontakın oluşturulması.....	58
3.3. Deneysel Ölçüm Sistemi	59
4. DENEYSEL SONUÇLAR	61
4.1. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Diyotun Yapısal Özellikleri	61
4.1.1. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun XRD analizi.....	61
4.1.2. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun SEM ve EDX analizi	61

Sayfa

4.2. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Diyotun Elektriksel ve Dielektriksel Özellikleri.....	63
4.2.1. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun I-V analizi	63
4.2.2. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun frekans ve gerilime bağlı kapasitans ve iletkenlik analizi	70
4.2.3. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun frekans ve gerilime bağlı dielektrik analizi	81
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çeşitli metallerin iş fonksiyon değerleri.....	9
Çizelge 2.2. Metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonlarına bağlı olarak doğrultucu ve omik kontak oluşumu.....	10
Çizelge 3.1. ZnO'ya ait farklı özellik ve değerleri	54
Çizelge 4.1. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun çeşitli frekanslar için hesaplanan V_D , N_D , E_F , W_D , $\Phi_{B(C-V)}$ ve R_s değerleri	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Schottky (doğrultucu) ve omik kontaklar için akım-gerilim grafiği	8
Şekil 2.2. M/S yapının şematik diyagramı.....	10
Şekil 2.3. Metal ile n tipi yarıiletkenin (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası enerji bant diyagramı.....	11
Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken (solda) ve metal/p-tipi yarıiletken (sağda) için (a) Termal denge (b) Doğru beslem ve (c) Ters beslem altında enerji bant diyagramı.....	14
Şekil 2.5. (a) Sıfır elektrik alan ve (b) sabit bir elektrik alan altında görüntü kuvvetinden dolayı potansiyel engel bükülmesi	16
Şekil 2.6. (a) MS/MIS tipi Schottky diyotun eşdeğer devresini (b) R_{sh} ve R_s ' nin MS/MIS tipi Schottky diyotun I-V karakteristiğine etkisi	18
Şekil 2.7. Metal/oksit tabaka bölgesinde oluşan arayüzey tabakalar.....	20
Şekil 2.8. Bir metalin yarıiletken ile (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası arayüzey durumlarının varlığında enerji bant diyagramı.....	21
Şekil 2.9. Kondüktans metodu için eşdeğer devreler; (a) standart bir MOS kapasitor devresi, (b) (a) durumunun basitleştirilmiş devresi ve (c) ölçülen sistem devresi	23
Şekil 2.10. Bir silisyum MOS kapasitör için farklı gerilimler altında $G_p/\omega - \omega$ grafiği ..	24
Şekil 2.11. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) diyotun en basit formu	26
Şekil 2.12. Denge durumunda ($V=0$) (a) n tipi (b) p tipi yarıiletken için MIS yapının enerji bant diyagramı	28
Şekil 2.13. Bir MIS yapının eşdeğer devre diyagramı.....	29
Şekil 2.14. (a) n-tipi ve (b) p-tipi MIS diyotların C-V eğrilerinin üç bölgeye ayrılması.....	30
Şekil 2.15. İdeal bir MMIS yapının elektronik eşdeğer devresi (a) Yığılma (b) Tüketim (c) Terslenim.....	30
Şekil 2.16. n-tipi yarıiletken (solda) ve p-tipi yarıiletken (sağda) $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının (a) yığılma (b) Tüketim (c) Terslenim enerji bant şeması.....	32

Şekil	Sayfa
Şekil 2.17. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör	34
Şekil 2.18. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör.....	35
Şekil 2.19. Dış elektrik alan etkisi altındaki dipollerin yönelimleri	37
Şekil 2.20. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu	39
Şekil 2.21. Dielektrik mekanizmalarının frekans karşılıkları	41
Şekil 2.22. (a) $E=0$ 'daki nötr atom ve (b) bir dış elektrik alan altındaki elektronik kutuplanma.....	42
Şekil 2.23. (a) $E=0$ da NaCl kristalindeki zincir. Ortalama net dipol moment sıfırdır. (b) dış bir elektrik alan altında iyonik kutuplanma	43
Şekil 2.24. Yönelme kutuplanması	44
Şekil 2.25. Arayüzey yük kutuplanması	46
Şekil 2.26. Dielektrik sabitinin gerçek (ϵ') ve sanal (ϵ'') bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi.....	50
Şekil 3.1. Metal buharlaştırma sisteminin şematik diyagramı	57
Şekil 3.2. Doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maske	59
Şekil 3.3. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Diyot yapıların şematik diyagramı.....	59
Şekil 3.4. Kapasitans-gerilim (C-V), iletkenlik-gerilim (G/ω -V) ve akım-voltaj (I-V) ölçümlerinin gerçekleştirildiği ölçüm düzeneği	60
Şekil 4.1. Ag-ZnO nano-parçacıkların XRD analizi.....	61
Şekil 4.2. Ag-ZnO nano-parçacıkların EDX sonuçları.....	63
Şekil 4.3. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $\ln I$ -V grafiği	64
Şekil 4.4. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun R_i -V grafiği	66
Şekil 4.5. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafiği.....	67
Şekil 4.6. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $F(V)$ -V grafiği	68
Şekil 4.7. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ grafiği.....	70

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun C-V grafiği	71
Şekil 4.9. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun G/ω -V grafiği	72
Şekil 4.10. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun C-ln(f) grafiği	73
Şekil 4.11. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun G/ω -ln(f) grafiği	73
Şekil 4.12. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun R_i -V grafiği	75
Şekil 4.13. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun C^{-2} -V grafiği	76
Şekil 4.14. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun G_p/ω -logf grafiği	78
Şekil 4.15. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun N_{ss} -ln(f) grafiği	79
Şekil 4.16. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun N_{ss} -V grafiği	80
Şekil 4.17. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun ϵ' -V grafiği	81
Şekil 4.18. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun ϵ'' -V grafiği	82
Şekil 4.19. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $\tan\delta$ -V grafiği	82
Şekil 4.20. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun ϵ' -ln(f) grafiği	84
Şekil 4.21. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun ϵ'' - ln(f) grafiği	84
Şekil 4.22. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $\tan\delta$ - ln(f) grafiği	85
Şekil 4.23. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun M' -V grafiği	86
Şekil 4.24. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun M'' -V grafiği	86
Şekil 4.25. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun M' -ln(f) grafiği	87
Şekil 4.26. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun M'' -ln(f) grafiği	87
Şekil 4.27. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun σ_{AC} -V grafiği	88
Şekil 4.28. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun σ_{AC} -ln(f) grafiği	89

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Empedans analizörü.....	60
Resim 4.1. Ag-ZnO nano-parçacıkların SEM görüntüsü.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
σ_{AC}	ac elektriksel iletkenliği
ω	Açısal frekans
$\text{\AA}$	Angström
τ	Arayüzey durumlarının ömrü
d_i	Arayüzey tabakanın kalınlığı
C_{ss}	Arayüzey tuzaklarının kapasitansı
N_{ss}	Arayüzey yüzey durumları
C_i	Arayüzey/yalıtkan tabaka kapasitansı
Z	Atom sayısı
ϵ_0	Boşluğun geçirgenlik sabiti
χ	Dielektriğin elektrik alınganlığı
ϵ''	Dielektrik ortamlardaki enerji kaybı
ϵ'	Dielektrik sabiti
V_D	Difüzyon potansiyeli
A	Doğrultucu kontak alanı
I_0	Doyma akımı
C_{LF}	Düşük frekansta ölçülen kapasitans değeri
D	Elektriksel yer değiştirme
Φ_{B0}	Engel yüksekliği
E_F	Fermi enerji seviyesi
$\Phi_{B(C-V)}$	Engel yüksekliği (C-V den ölçülen)
$\Phi_{B(I-V)}$	Engel yüksekliği (I-V den ölçülen)
E	İç elektrik alan
n	İdealite faktörü
E_c	İletim bandı
ϵ^*	Kompleks dielektrik geçirgenlik

Simgeler**Açıklamalar**

M^*	Kompleks elektrik modülü
M'	Kompleks elektrik modülünün gerçek kısmı
M''	Kompleks elektrik modülünün sanal kısmı
$I_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru geçen akım
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Ω	Ohm
G_m	Ölçülen iletkenlik
C_m	Ölçülen kapasitans
ρ	Özdirenç
σ_{AC}	AC iletkenlik
G_p/ω	Paralel kondüktans
C_p	Paralel kapasitans
Φ_B	Potansiyel engel yüksekliği
A^*	Richardson sabiti
E_i	Saf enoji seviyesi
$\Delta\phi$	Schottky engel düşmesi
R_s	Seri direnç
ϵ_r	Statik dielektrik sabiti
W_D	Tüketim bölgesi kalınlığı
W_0	Uzay yükü bölgesi
Q_{SC}	Uzay yükü kapasitansı
E_v	Valans/değerlik bandı
A_{ox}	Yalıtkan tabakanın alanı
$\epsilon_{ox}=(\epsilon_i)$	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
C_{ox}	Yalıtkan/oksit tabakanın kapasitansı
C_s	Yarıiletken kapasitansı
$I_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru geçen akım
N_A	Yarıiletkene katkılanan alıcı atomları
N_D	Yarıiletkene katkılanan verici atomları
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisidir

Simgeler Φ_s E_g C_{HF} **Açıklamalar**

Yarıiletkenin iş fonksiyonu

Yasak enerji aralığı

Yüksek frekansta ölçülen kapasitans değeri

Kısaltmalar**ALD****C-V****EDX****G/ ω -V****I-V****KM****M/S****MIS****MOS****MPS****PVP****SBD****SBH****SEM****TE****UV****XRD****YDFKM****ZnO****Açıklamalar**

Atomik tabaka biriktirme

Kapasitans-gerilim

Enerji dağılım X-ışını

İletkenlik-gerilim

Akım-gerilim

Kondüktans metodu

Metal-yarıiletken

Metal/yalıtkan/yarıiletken

Metal/oksit/yarıiletken

Metal/polimer/yarıiletken

Polivinilpirolidon

Schottky engel diyotları

Schotyky engel yüksekliği

Taramalı elektron mikroskobu

Termiyonik emisyon

Morötesi

X-ışını kırınımı

Yüksek-düşük frekans kapasitans metodu

Çinko oksit

1. GİRİŞ

19. yüzyılın ilk yarısına kadar katılar, iletkenlik (σ) ve öz dirençlerine ($\rho=1/\sigma$) göre iletken ve yalıtkan (dielektrik) olarak iki grupta incelenmekteyken, aynı yüzyılın ikinci yarısından itibaren yarıiletken materyallerin de keşfiyle üç ana başlıkta incelenmeye başladı. Genel olarak bir katının iletkenliği, iletim bandındaki (E_c) elektron ve değerlik (valans) bandındaki (E_v) deşik (hole) yoğunluğu ile bu iki bant arasındaki yasak enerji aralığının (E_g) genişliğine göre tanımlanabilir. Bu tanıma göre; iletim bandı ve valans bandı çakışık veya iç içe olan katılar iletken, iletim bandı ve valans bandı arasındaki yasak enerji aralığı ≥ 4 eV olan katılar yalıtkan (dielektrik) ve iletim bandı ile valans bandı arasındaki fark 0.1-4 eV olan katılara da yarıiletken denir.

Bir yarıiletken, elektriksel iletkenliği iletken ve yalıtkan arasında olan katılardır. İletken bir katının öziletkenliği $\geq 10^2$ (Ωcm)⁻¹ veya S/cm mertebesinde iken, yalıtkan bir katının öziletkenliği 10^{-8} - 10^{-18} (Ωcm)⁻¹ arasında ve yarıiletken bir katının öziletkenliği ise 10^2 - 10^8 (Ωcm)⁻¹ arasındadır. Bu iletkenlik, iyonizasyon aracılığıyla serbest hale gelen taşıyıcılar olan elektron ve deşik (hole) gibi elektronik parçacıklar tarafından neden olunur. Bu iyonizasyon termal olarak ışık, başka parçacıklar veya bir elektrik alanı ile üretilebilir.

Işık, uygulanan gerilim, manyetik alan veya sıcaklık gibi dış etkenler tarafından kontrol edilebilen elektronik özelliklerindeki değişiklikler ile yarıiletkenler, günlük hayatımızın bir parçası haline gelen elektronik cihazlar için en temel malzemelerden birisi olmuştur. Günümüzde yarıiletkenler, televizyonlarda ve bilgisayarlarda diyot, transistörler ve entegre devreler olarak; görüntüleme için görüntü sensörleri olarak; sıcaklık, ağırlık ve manyetik alanları ölçmek için çok çeşitli sensörler olarak endüstrinin her alanında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu nedenle yarıiletken bir aygıtı içermeyen modern bir cihaz düşünmek neredeyse imkânsızdır.

Yarıiletkenlere dair ilk bilgiler 1822 yılında kurşun sülfid için Seebeck [1] ve 1833 yılında gümüş sülfid için Faraday [2] tarafından bildirilmiştir. Bir aygıt olarak en eski yarıiletken aygıtların temelini oluşturan ilk uygulaması, 1874 yılında yarıiletkenler kristaller üzerine bakır (Cu) ve demir (Fe) gibi bazı metallerin nokta kontaklarının doğrultucu özelliğini

gözlemleyen Braun'un keşfine dayanır [3]. Braun'un bu keşfi kendisine 1909 Nobel Fizik Ödülü'nü kazandırmıştır.

Metal-yarıiletken (M/S) aygıtların ilk uygulamalı teorisi ise Walter Schottky tarafından geliştirmiştir [4]. Schottky'nin bu uygulamasından dolayı, onun adına metal-yarıiletken aygıtlar genellikle Schottky engel diyotları (SBD) olarak isimlendirilir. Daha sonraki yıllarda Schottky, Strömer ve Waibel [5] tarafından metal-yarıiletken kontakların doğrultucu özelliğini açıklamaya yönelik M/S arayüzeyindeki engel yüksekliğinin formülizasyonu gerçekleştirildi. Walter Schottky [4] ve Sir Neville Mott [6] engel yüksekliği oluşum mekanizmasını birbirinden bağımsız olarak açıkladılar ve engel yüksekliği ile engel şeklini hesaplamak için çeşitli modeller önerdiler. Mott'a göre, potansiyel engel, metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ve yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki farktan kaynaklanmaktaydı [6–8]. Ayrıca Mott, engel bölgesinin saf yükleri içerdiği için elektrik alanın sabit olduğunu öne sürdü [6, 7]. Schottky ise engel bölgesinin saf olmayan yüklerin sabit yoğunluğundan dolayı elektrik alanın doğrusal olarak yükseldiğini öne sürdü [7, 9]. 1942 yılında Bethe [10], Schottky engel kontaklara dair daha ayrıntılı bilgi edinmeye yönelik, akım iletimin engel üzerinden olduğunu ifade eden Termiyonik Emisyon (TE) teorisini öne sürdü.

Son çeyrek yüzyıldır, Schottky diyotlara dayalı bileşenlerin çeşitli alanlarda kullanımı gittikçe artmaktadır. Metal-yarıiletken kontaklar veya yaygın kullanılan adıyla Schottky engel diyotlar, bütün yarıiletken elektronik ve optoelektronik aygıtlarda en çok kullanılan doğrultucu kontakların başında gelmesinin yanında bunların önemli bir parçasını da oluşturmaktadır. Bu bağlamda, Schottky engel diyotlar güneş pilleri, fotodedektörler, alan etkili transistörler, mikrodalga diyotlar gibi birçok yarıiletken elektronik aygıtların temelini oluşturmaktadır [11–14]. Ayrıca, son yıllardaki araştırmalar metal-yarıiletken arayüzeyi boyunca akım iletiminin ve engel formunu/biçiminin fiziğini açıklamaya yönelik olarak devam etmektedir.

Bir M/S arayüzeyinin en önemli özelliklerinden birisi, metal-yarıiletken arayüzeyi boyunca çoğunluk taşıyıcılar için enerji seviyelerinin uyuşmazlığının bir ölçüsü olan Schottky engel yüksekliğidir (SBH). SBH, M/S arayüzeyi boyunca elektriksel özelliği kontrol etmede önemli bir rolü vardır. Metal-yarıiletken yapılara dair deneysel ve teorik çalışmalar Braun'un [3] keşfinden beri devam etmesine rağmen hala bu yapıların iletkenliği ve M/S arayüzeyinde oluşan potansiyel engel yüksekliği (Φ_B) hakkında henüz tam ve eksiksiz bilgiye sahip

değiliz. Bunun nedeni ise; bu yapıların iletkenliği ve potansiyel engel yüksekliğinin (Φ_B) sıcaklık, frekans, uygulanan voltaj veya elektrik alan, M/S arayüzeyinde ve yarıiletkenin yasak enerji aralığına karşılık gelen arayüzey durumları (N_{ss}), diyotun seri direnci (R_s), radyasyon ve yine M/S arayüzeyinde doğal veya yapay olarak oluşan bir yalıtkan veya polimer tabaka ile engelin biçimi gibi birçok farklı nedene bağlı olmasındandır [7, 8, 15].

Schottky diyotlar bir malzemenin fiziksel ve elektriksel özellikleri incelemek için bir aracı olarak kullanılabilir. Eğer metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey tabakası kalınlığı (d_i) birkaç yüz Angström ($\text{\AA}$)’den büyük olursa o zaman bu yapılar Schottky diyottan ziyade metal/yalıtkan-oksit-polimer/yarıiletken (MIS, MOS, MPS) diyot olarak isimlendirilirler. MPS tipi yapılarda, metal ve yarıiletken, arayüzey tabakasıyla birbirinden ayrılmaktadır.

Son yıllarda bu aygıtların özelliklerini arttırmak için farklı arayüzey malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır. Hazırlanan bu MS, MIS, MOS veya MPS tipi diyotların elektriksel özellikleri yapının seri direnci (R_s), M/S arayüzeyinde oluşan arayüzey durumları (N_{ss}), engelin biçimi, numunenin sıcaklığı, uygulanan voltaj, M/S arayüzeyinde doğal veya yapay olarak oluşan engelin kalınlığı ve homojenliğine oldukça bağlıdır [7, 8, 16–21]. Bu nedenle farklı koşullar altında ölçümler gerçekleştirilirken oldukça dikkatli ve hassas davranılmalıdır.

Metal ve yarıiletken arasında bir yalıtkan tabaka ister deneysel yollarla oluşturulsun ister doğal yollarla oluşsun, bu tabakanın kalınlığı ve fiziksel özellikleri aygıtın farklı karakteristiklerini etkiler. Örneğin, Si yarıiletkenini temizlerken kimyasal temizleme prosedürüne ne kadar dikkat edilirse edilsin Si yüzeyindeki doymamış bağlar hava ile reaksiyona girerek Silisyum-Dioksit (SiO_2) yalıtkan tabakasını oluşturur. Bu yalıtkan tabakanın kalınlığı arttıkça aygıtın farklı özellikleri de bu kalınlıktan etkilenir.

Metal ve yarıiletken arasında oluşan yalıtkan bir tabaka temel olarak aygıtlar üzerinde üç tür etkiye sahiptir. Bunlar [7];

- Arayüzeyde potansiyel düşmesi olacağı için, sıfır beslemdeki engel yüksekliği yalıtkan tabaka yokken ki engel yüksekliğinden daha düşük olacaktır.
- Uygulanan gerilimin bir kısmı bu yalıtkan yüzeyde gözlenebileceğinden dolayı engel yüksekliği uygulanan gerilime bağlı olarak değişecektir.

- Elektronlar bu yalıtkan tabaka içerisinde tünelleme yapmak zorunda kalacakları için aygıtın akımı ideal bir Schottky diyot akımından düşük olacağı için aygıtın Richardson sabiti de beklenen değerinden çok düşük çıkacaktır.

MS tipi yapıların veya Schottky diyotların elektrik ve optik özelliklerini iyileştirmek veya değiştirmek için, esnek ve düşük maliyetli üretim, iyi performans gibi teknik önemi nedeniyle Silisyum-Dioksit (SiO_2) veya Kalay-Oksit (SnO_2) gibi geleneksel olarak kullanılan düşük dielektrik özelliğe sahip izolator katmanına kıyasla düşük molekül ağırlıklı, geniş üretim alanı ve kolay işleme gibi nedenlerle metal veya katkılı polimer/polimer kompozit arayüzey katmanı kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır [22–26].

Polimerler genellikle metallerden çok daha düşük iletkenliğe sahiptirler. İletkenlik açısından zayıf olan polimerler farklı oranlarda farklı metaller katkılanarak iletkenlikleri artırılabilir. Bir kıyaslama yapacak olursak, iyi bir yalıtkan olan teflonun iletkenliği 10^{-16} S/m iken gümüş ile bakırın ki 10^8 S/m'dir. Metal katkı atomlarının görevi malzeme içerisinde elektron-deşik çiftlerinin sayısını arttırmaktır. Böyle bir “hole/deşik” komşu bir konumdan atlayan bir elektronla doldurulduğunda yeni bir deşik oluşturulur ve bunun böyle devam etmesiyle yükün uzun bir mesafeye göç etmesi sağlanır [27].

ÇinkoOksit (ZnO) üzerine birçok bilimsel çalışma mevcuttur. Fakat son zamanlarda safsızlık ya da katkılama yaparak ZnO 'nun özelliklerinin modifikasyonu onu bilimsel anlamda daha da ön plana çıkarmıştır. ZnO 'nun farklı oranlarda katkılanması aracılığıyla onun elektriksel yapısını değiştirerek optik, elektriksel ve manyetik özellikleri istenilen düzeye getirilebilmektedir.

$\text{Au}/(\text{Ag-ZnO/PVP})/\text{n-Si}$ (MPS) Schottky engel diyotlarının hem frekans hem de voltaja bağlı elektrik ve dielektrik özellikleri üzerine olan bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde; hem yarıiletken hem de yarıiletken yapıların tarihsel süreç içerisindeki gelişimi, metal-yarıiletken (MS) yapıların elektriksel karakteristiklerine değinilerek çalışmayla ilgili özet bir bilgi verilmiştir. İkinci bölümde; MS yapıların elektriksel ve dielektriksel özelliklerine dair bazı temel teorik bilgiler verildi. Üçüncü bölümde; (Ag-ZnO/PVP) hakkında bazı bilgilerin yanında, kristal temizleme, $\text{Au}/(\text{Ag-ZnO/PVP})/\text{n-Si}$ (MPS) yapılarının hazırlanması ve deneysel ölçüm sistemleri hakkında gerekli bilgiler verildi. Dördüncü bölümde; (Ag-ZnO/PVP) arayüzey tabakasının yapısal özellikleri ve hazırlanan

Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky engel diyetlerinin hem frekansa hem de gerilime bağlı ölçümler sonucu elde edilen elektrik ve dielektrik veriler incelenerek 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. Yarıiletken Materyaller

Bir yarıiletken ya periyodik cetvelin IV. grubundan ya III ve V. grubun kombinasyonundan ya da II. Ve VI. grubun kombinasyonundan elde edilen materyallerdir. Örneğin; yarıiletken Si veya Ge gibi tek bir elemandan oluşabileceği gibi GaAs, InP veya CdTe gibi bileşiklerden veya $\text{Si}_x\text{Ge}_{(1-x)}$ ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ gibi alaşımlardan da oluşabilmektedir. Periyodik cetvelin farklı gruplarından farklı yarıiletkenler oluşturulduğunda, elde edilen yarıiletkenlerin özellikleri de farklılık gösterir.

Entegre devre sistemlerinin ve çoğu güneş pilinin temelini oluşturan, periyodik cetvelin IV. grubunda yer alan Silisyum/Silikon (Si) en yaygın kullanılan yarıiletken materyaldir. Si yapısını inceleyecek olursak, her atomun 8 elektronla çevrili olduğu bir düzenleme sahip olmasının yanında, periyodik bir yapıda birbirine bağlanmış ayrı atomlardan oluşur. Tek bir atom, bir proton ve elektronlarla çevrili nötronlardan oluşan bir çekirdekten oluşur. Elektron ve proton sayısı eşittir, böylece atom genel olarak elektriksel olarak nötrdür. Bir yarıiletken içindeki her atomu çevreleyen elektronlar, bir kovalent bağın parçasıdır. Her atom, 4 çevre atomla 4 kovalent bağ oluşturur. Bu nedenle, her atom ile onun çevresindeki 4 atom arasında 8 elektron paylaşılmaktadır.

Yarıiletkende yükler katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcılardan oluşur. Örneğin; periyodik cetvelin dördüncü grubunda bulunan bir saf yarıiletkene (Si, Ge) periyodik cetvelin üçüncü grubunda bulunan bir atom (B, In) katkılanırsa p-tipi yarıiletken elde edilir ve burada holler (deşikler) çoğunluk taşıyıcı elektronlar ise azınlık taşıyıcı durumuna gelir. Buna benzer olarak aynı saf yarıiletkene (Si, Ge) beşinci gruptan bir atom (P, As, Sb) katkılanırsa n-tipi yarıiletken elde edilir ve burada çoğunluk taşıyıcı elektronlar olurken azınlık taşıyıcılar isedeşiklerdir.

Metallerle kıyaslandığından yarıiletkenlerde serbest olmayan yükler bulunur. Bu yükler uygulanan gerilime bağlı olarak ya uzay yükü bölgesinde ya da arayüzey bölgesindeki yığılmaları oluşturur. Yarıiletken diyotlarda iletkenlerde olduğu gibi akım iletimi sadece elektronlarla olmayıp hem elektronlar hem dedeşikler tarafından sağlanırken çoğunluk ve

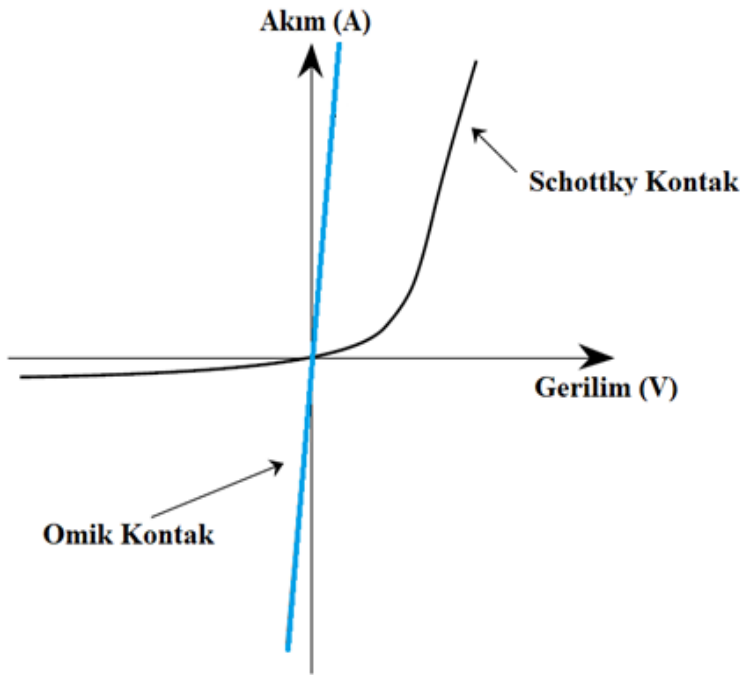
azınlık taşıyıcılar tarafından ayrı ayrı oluşturulan akımlara çoğunluk/azınlık taşıyıcı akımı denir.

2.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Bir metal ve yarıiletken kontak edildiği zaman, bu iki malzeme arasında iki tip kontak oluşur. Bunlar;

- Schottky (doğrultucu) kontaklar
- Omik kontaklardır.

Schottky (doğrultucu) kontaklar lineer olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahipken, omik kontaklar lineer akım-gerilim karakteristiğine sahiptir (Şekil 2.1)



Şekil 2.1. Schottky (doğrultucu) ve omik kontaklar için akım-gerilim grafiği

Bir metal ile yarıiletken bir malzeme kontak edildiğinde bu kontakın doğrultucu ve ya omik olmasını seçilen metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler.

Metalin iş fonksiyonu (Φ_m); metalden bir elektronu koparıp vakum seviyesine geçirmek için gerekli olan minimum enerjiyi tanımlar. Başka bir deyişle, metalin iletkenlik bandında bulunan Fermi enerji seviyesinden (E_F) bir elektronu koparıp vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan minimum enerjidir. Vakum seviyesi ise metalin tam dış yüzeyinde bulunan

sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesidir. Bazı metallerin iş fonksiyonlarına ait değerler Çizelge 2.1’de verilmiştir [28].

Çizelge 2.1. Çeşitli metallerin iş fonksiyon değerleri

Atom Sayısı (Z)	Element	Φ_m (eV)	Atom Sayısı (Z)	Element	Φ_m (eV)	Atom Sayısı (Z)	Element	Φ_m (eV)
3	Li	2,4	33	As	5,1	60	Nd	3,2
4	Be	3,4	34	Sc	5,9	62	Sm	2,7
5	B	4,5	37	Rb	2,1	63	Eu	2,5
6	C	4,8	38	Sr	2,59	64	Gd	3,1
12	Mg	3,66	39	Y	3,1	65	Tb	3,0
13	Al	4,2	40	Zr	3,8	71	Lu	3,3
14	Si	4,2	41	Nb	4,3	72	Hf	3,9
19	K	2,2	42	Mo	4,2	73	Ta	4,1
20	Ca	2,87	44	Ru	4,71	74	W	4,55
21	Sc	3,5	45	Rh	4,6	75	Re	5,0
22	Ti	4,1	46	Pd	5,0	76	Os	4,8
23	V	4,3	47	Ag	4,7	77	Ir	4,6
24	Cr	4,4	48	Cd	4,0	78	Pt	5,3
25	Mn	3,89	49	In	4,12	79	Au	4,8
26	Fe	4,4	50	Sn	4,3	80	Hg	4,49
27	Co	5,0	51	Sb	4,1	81	Tl	3,8
28	Ni	4,9	52	Te	4,8	82	Pb	4,0
29	Cu	4,5	55	Cs	2,14	83	Bi	4,4
30	Zn	4,3	56	Ba	2,5	90	Th	3,5
31	Ga	4,2	57	La	3,5	92	U	3,6
32	Ge	4,8	58	Ce	2,9			

Yarıiletken iş fonksiyonu (Φ_s) ise, E_F ile vakum seviyesi arasındaki fark olarak tanımlanır. Yarıiletkendeki E_F Fermi seviyesi yarıiletkene katılan alıcı veya verici atomların (N_A , N_D) yoğunlaşmasıyla değiştiğinden dolayı yarıiletkenlerde Φ_s değişen bir niceliktir.

Eğer bir metal ile n-tipi bir yarıiletken kontak edilirse [15, 29];

- Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyükse ($\Phi_m > \Phi_s$) bu durumda kontak doğrultucu kontaklıdır.
- Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçükse ($\Phi_s > \Phi_m$) bu durumda kontak omik kontaklıdır.

Eğer bir metal ile p-tipi bir yarıiletken kontak edilirse [15, 29];

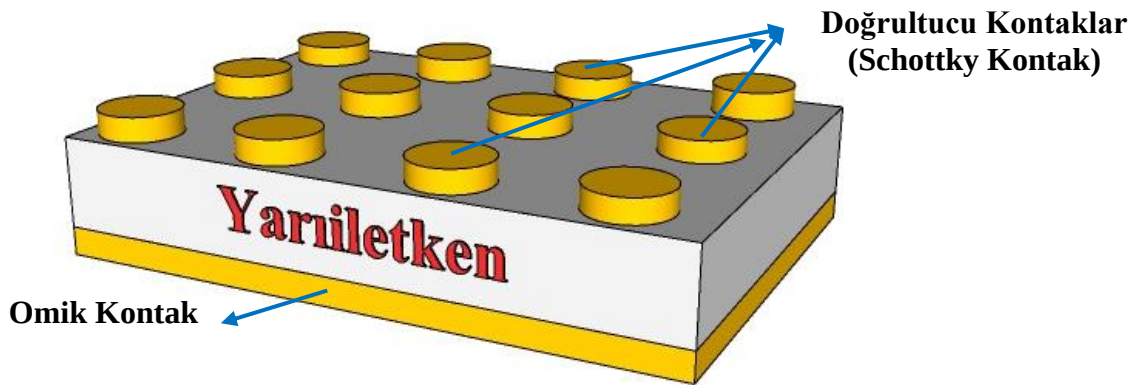
- Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyükse ($\Phi_m > \Phi_s$) bu durumda kontak omik kontaklıdır.
- Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçükse ($\Phi_s > \Phi_m$) bu durumda kontak doğrultucu kontaklıdır.

Hem doğrultucu hem de omik kontak oluşumu Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonlarına bağlı olarak doğrultucu ve omik kontak oluşumu

	n tipi yarıiletken	p tipi yarıiletken
Doğrultucu Kontak	$\Phi_m > \Phi_s$	$\Phi_s > \Phi_m$
Omik Kontak	$\Phi_s > \Phi_m$	$\Phi_m > \Phi_s$

Metal ve yarıiletkenin kontak edilmesi sırasında kullanılacak olan her tür malzemenin yüzeyinin oldukça temiz ve pürüzsüz olmasının yanında bu kantağın atomik boyutta kontak edilmesi istenir. Bu sayede ideal bir kontak edilmesiyle metal-yarıiletken (M/S) diyotların karakteristik parametrelerinin daha iyi anlaşılabilmesi sağlanır. Bir M/S yapının şematik diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

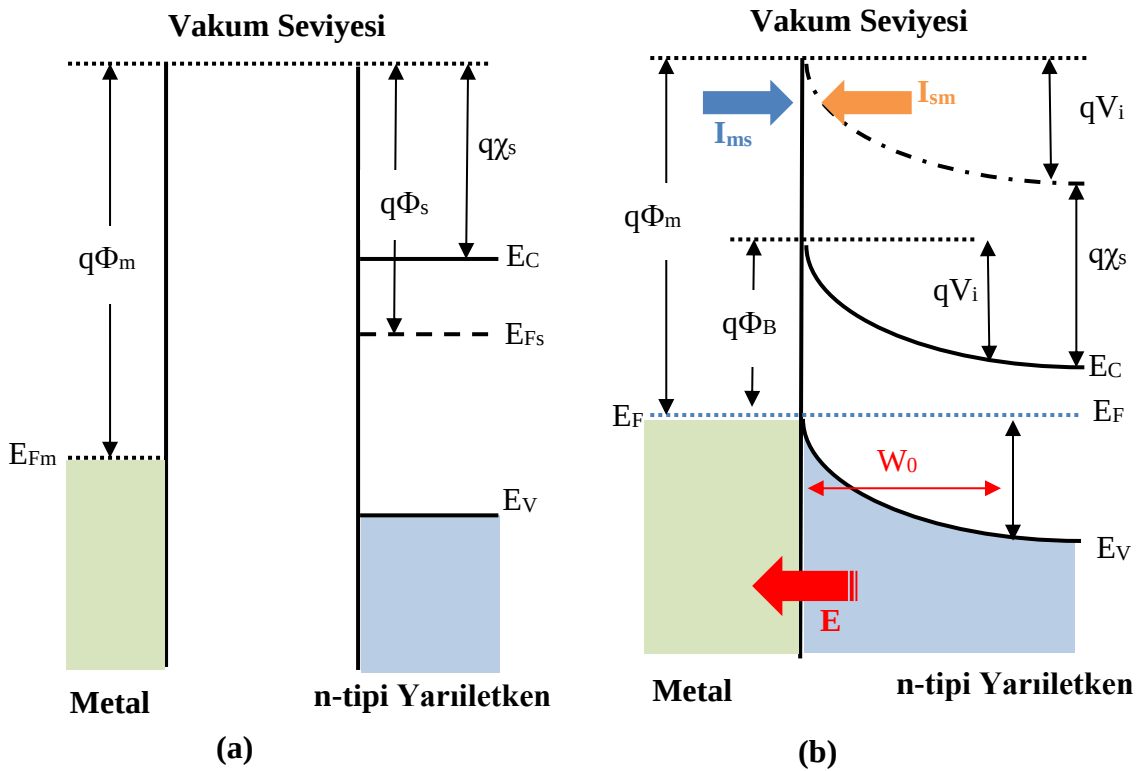


Şekil 2.2. M/S yapının şematik diyagramı

2.3. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Enerji-Band Diyagramı

Bir metalde iletkenlik bandı kısmen doludur ve Fermi enerji seviyesi iletkenlik bandının içinde yer alır. Metal ile n-tipi yarıiletken arasında yük alışverişi olmazsa, ideal bir metal ve yarıiletkenin (n-tipi) kontak öncesi durumunu gösteren enerji bant diyagramı Şekil 2.3 (a)'daki gibi olur. Kontak olmadan yarıiletkenden metale bir taşıyıcı geçmesi söz konusu değildir.

Fakat metal ile yarıiletken kontak edildikten sonra elektronlar kararlı olacakları yani minimum enerjili hali seçecekleri için yarıiletkenden metale doğru bir elektron geçişi oluşur. Bu geçiş her iki materyaldeki Fermi seviyeleri (E_F) eşitleninceye kadar devam eder. Bu eşitliğin sağlanması termal denge olarak kabul edilir. Metal-yarıiletken kontak denge durumunda yük alışverişi olmaksızın sabit bir değerde olur. Elektronlar için ($E_C - E_F$) kadarlık bir engel söz konusudur. Bu tür bir kontakta elektron rahatlıkla yarıiletkenden metale geçerler. Fakat metaldeki elektronların yarıiletkene geçebilmeleri için Φ_B kadarlık bir engel potansiyeli aşmaları gerekir.



Şekil 2.3. Metal ile n tipi yarıiletkenin (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası enerji bant diyagramı

Yarıiletkeniden metale elektron geçişinden dolayı yarıiletkenin kontak yüzeyi civarındaki serbest halde bulunan elektron yoğunluğu azalır. Yarıiletkendeki elektron yoğunluğu azalması yarıiletkenin iletkenlik bandı (E_c), Fermi seviyesi (E_F) ve valans bandı (E_v) seviyelerinin birbirine paralel olarak aynı miktarda aşağı doğru bükülmesine yol açarken (Şekil 2.3 (b)), metaldeki elektron yoğunluğu ($\sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$) yarıiletkeninkinden çok yüksek olduğu için metaldeki enerji seviyelerin değişimi ihmal edilecek kadardır [7, 8]. Yarıiletkeniden metale geçen elektronlar arkalarında pozitif yüklü iyonize donör (verici) atomları bırakır. Bundan dolayı, yarıiletkenin kontak yakınında W_0 genişliğinde deplasyon (boşaltılmış) bölge adında bir uzay yükü bölgesi oluşur. Bu uzay yükü bölgesinde serbest yük bulunmadığından, bölge yüksek dirençli, pozitif yüklü ve yalıtkandır. Yarıiletkeniden metale geçen iletim bandı elektronları ise metalin kontak kısmı tarafında $\sim 0,5 \text{ Å}$ kalınlığında ince bir negatif yüklü tabaka (negatif uzay yük bölgesi) oluşturur. Bu negatif yüklü tabaka Thomas-Fermi kalınlığı olarak adlandırılır.

Termal denge sonrasında, yarıiletkenin ön yüzeyi “pozitif” yüklenirken metalin ön yüzeyi “negatif” yüklenmiş olur. Bu yük düzenlemeleri sonucunda, yarıiletkeniden metale doğru doğal bir iç elektrik alan (E) meydana gelir.

Metal ve yarıiletkenin Fermi seviyelerinin eşitlenmesinden yani termal denge sağlandıktan ve tüketim bölgesinin varlığından dolayı yarıiletkendeki bant bükülmesi (qV_i);

$$qV_i = q(\phi_m - \phi_s) \quad (2.1)$$

olarak ifade edilir. Buradaki qV_i miktarı, yarıiletkeniden metale geçecek elektronların aşmak zorunda olduğu engel yüksekliğidir. Bununla birlikte metaldeki elektronlar için ise aşağıdaki eşitliğe denk bir potansiyel engeli görürler.

$$q\phi_B = q(\phi_m - \chi_s) = qV_i + (E_c - E_F) \quad (2.2)$$

eşitliği ile verilir [7, 8, 15]. Bu eşitlik, birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir [7]. Eşitliğin ilk tarafı Schottky engeli olarak bilinir. Burada χ_s yarıiletkenin elektron ilgisidir ve bir elektronun vakum seviyesi ile iletkenlik bandının tabanı arasındaki enerji farkına eşittir.

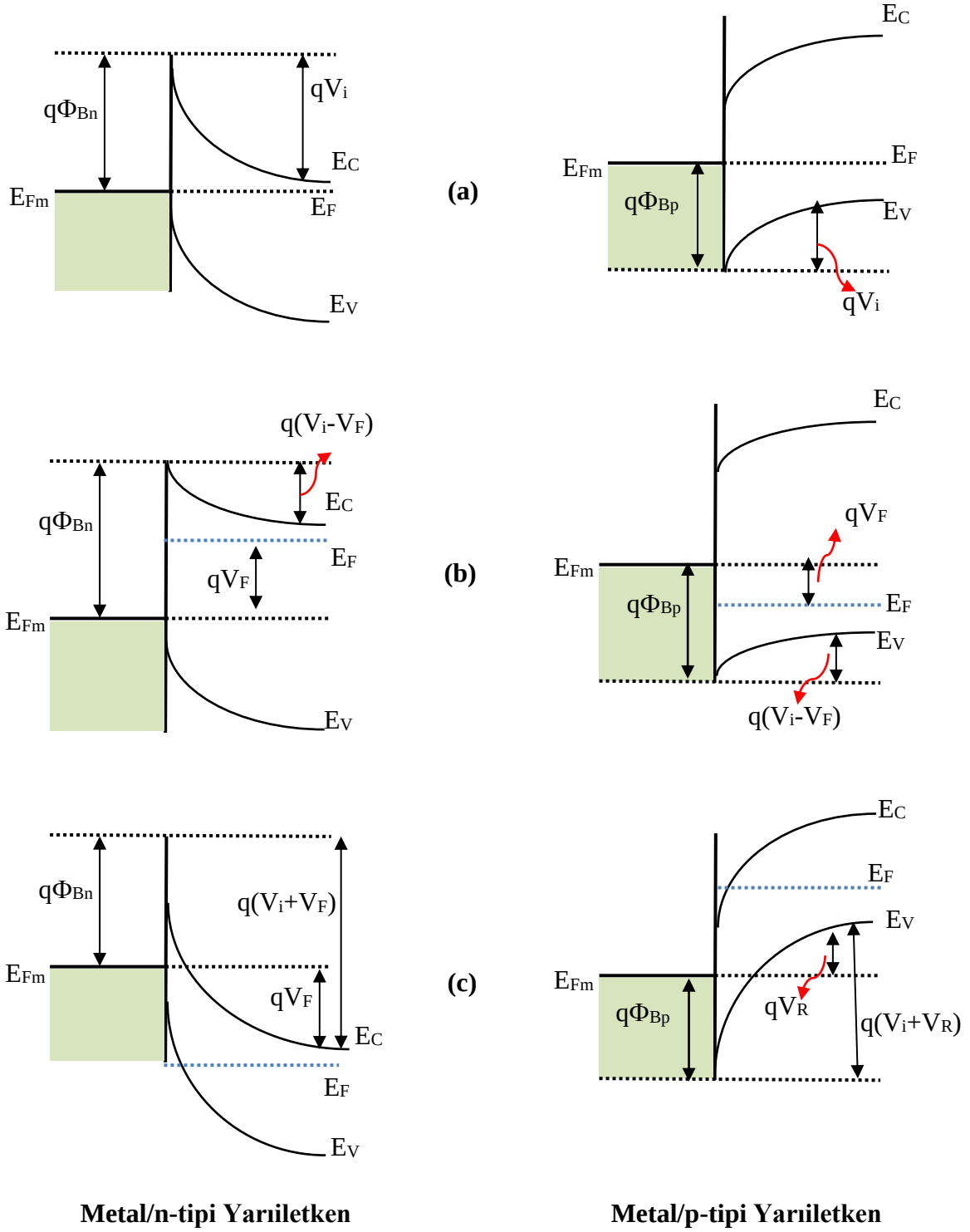
Oda sıcaklığında V_i , potansiyel engeli kT/q 'den oldukça fazla büyüktür ve çok az sayıda elektron bu engeli aşabilecek kadar yeterli enerjiye sahiptir. Engeli aşıp yarıiletken gelen elektronlardan kaynaklanan ve metale doğru geçen akım $I_{s \rightarrow m}$ ile temsil edilir.

Termodinamik dengede ve herhangi bir dış gerilim olmadığında, mevcut $I_{s \rightarrow m}$ akımı, metalden yarıiletkene geçen elektronların akımı $I_{m \rightarrow s}$ ile tam olarak dengededir. Bu durumda yani denge durumunda $I_{m \rightarrow s} = -I_{s \rightarrow m}$ olur. Bu akımlar zıt yönlü olduğu için sistem termal dengeye ulaştığında diyottan geçen net akım sıfırlanır.

Metal-yarıiletkenin kontak edildikten sonraki; termal denge durumunda yarıiletken metale geçen elektronlar, metalden yarıiletkene geçenlerle dengelenir. Yapıya dışardan bir doğru veya ters gerilim uygulandığında termal denge durumundaki enerji-bant diyagramı uygulanan gerilimin mertebesine göre farklılık gösterir ve devreden bir akım geçişi başlamış olur. Ancak doğru ve ters beslem altında enerji bantlarının davranışı oldukça farklılık gösterir. Oluşan bu durumları metal/n-tipi yarıiletken için inceleyecek olursak;

- i) Doğru Beslem; Eğer yapıya metal tarafında “pozitif (+)” yarıiletken tarafında “negatif (-)” olan bir $V_F > 0$ doğru beslem gerilimi uygulanırsa yarıiletken kenarı tarafındaki potansiyel engel V_i 'den $V_i - V_F$ 'ye düşer. (Şekil 2.4 (b)). Bu durumda elektronlar yarıiletkenden metale kolayca geçebilir. Fakat metal tarafındaki potansiyel engel (Φ_B) değişmeden sabit kaldığı için metalden yarıiletkene geçen elektronların akımı $I_{m \rightarrow s}$ 'de sabit kalır. Sonuç olarak yarıiletkenden metale doğru net bir elektron akımı gözlenir.
- ii) Ters Beslem; Eğer yapıya metal tarafında “negatif (-)” yarıiletken tarafında “pozitif (+)” olan bir $V_R < 0$ ters beslem gerilimi uygulanırsa yarıiletken kenarı tarafındaki potansiyel engel V_i 'den $V_i + V_R$ 'ye yükselir. (Şekil 2.4 (c)). Bu durumda elektronların yarıiletkenden metale geçmesi daha zordur. Sonuç olarak yarıiletkenden metale olan elektron akımı $I_{m \rightarrow s}$ azalırken, metalden yarıiletkene geçen elektronların akımı $I_{m \rightarrow s}$ değişmeden sabit kalır. Sonucunda metalden yarıiletkene doğru geçen küçük bir ters beslem akımı ($I_{m \rightarrow s} - I_{s \rightarrow m}$) ölçülmüş olur.

p-tipi yarıiletken için benzer sonuçlar elde edilir, ancak kutupların tersine çevrilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken (solda) ve metal/p-tipi yarıiletken (sağda) için (a) Termal denge (b) Doğru beslem ve (c) Ters beslem altında enerji bant diyagramı

2.4. Schottky Diyotların İdeal Durumdan Sapma Nedenleri

Schottky diyotların ideal durumdan sapmasına sebep olan bazı durumlar vardır. Bunlar [30–33];

- i. Engel yüksekliğinde hayali kuvvet etkisinden dolayı düşme (Hayali Schottky)
- ii. Direnç
- iii. Arayüzey durumları
- iv. Hareketli iyonlar
- v. Tünelleme
- vi. Kenar Etkileri

2.4.1. Engel yüksekliğinde hayali kuvvet etkisinden dolayı düşme

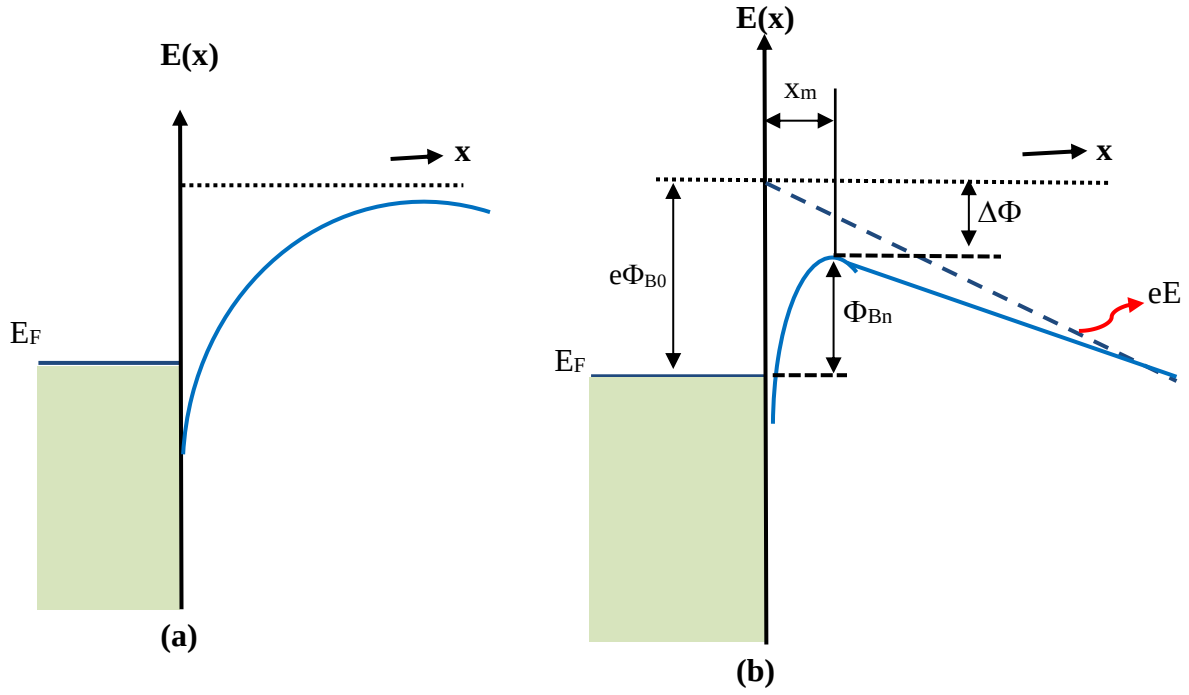
Metale geçen her elektron kadar yarıiletken de pozitif bir yük (deşik) kaldığı için tıpkı bir görüntünün aynada olan simetriği gibi bu yükler birbirinin görüntüsü olduğundan bu yüklere imaj (görüntü) yükler denir.

Fiziksel olarak, metalden (+x) kadar bir mesafedeki bir elektron metal yüzeyine dik bir elektrik alan oluşturur. Bu elektrik alan, metalin içinde (-x) kadar bir mesafede bulunan hayali bir pozitif görüntü yükü (+q) varsayılarak hesaplanabilir. Şekil 2.5 sıfır elektrik alan ve sabit bir elektrik alan altında görüntü kuvvetinden dolayı potansiyel engel bükülmesini göstermektedir.

Görüntü kuvvetiyle Coulomb etkileşiminden dolayı elektron üzerindeki kuvvet,

$$F = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_s (2x)^2} = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x^2} \quad (2.3)$$

ile ifade edilir.



Şekil 2.5. (a) Sıfır elektrik alan ve (b) sabit bir elektrik alan altında görüntü kuvvetinden dolayı potansiyel engel bükülmesi

İmaj kuvvetinden doğan son potansiyel enerji potansiyel aşağıdaki gibi bulunur.

$$-\phi(x) = + \int_x^\infty \frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x^2} dx = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.4)$$

Burada x integral değişkenidir ve $x=\infty$ 'da potansiyel sıfırdır.

Elektrik alanın olmadığı durumda elektronun potansiyel enerjisi $-q\phi(x)$ arayüzeydeki toplam potansiyel ifadesine imaj potansiyeli de katkıda bulunacağından bu ifade şu şekilde yazılabilir,

$$\phi(x) = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x} + eEx \quad (2.5)$$

Sabit bir elektrik alan altında elektronun potansiyel enerjisi Şekil 2.5 (b)'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi potansiyel enerjinin maksimum değeri azalmaktadır. Potansiyel enerjinin azalmasının nedeni hayali Schottky etkisinden dolayıdır.

Schottky engelinin ($\Delta\phi$) azalmasını ve maksimum engelin konumunu (x_m), toplam potansiyelin türevi sıfır olacağı için;

$$\frac{d[e\phi(x)]}{dx} = 0 \quad (2.6)$$

koşulundan bulabiliriz.

$$\frac{d[e\phi(x)]}{dx} = \frac{d}{dx} \left(e \left\{ \frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x} + eEx \right\} \right) \bigg|_{x=x_m} = 0 \quad (2.7)$$

$$-\frac{e^2}{16\pi\epsilon_s x_m^2} + eE = 0 \quad (2.8)$$

Yani potansiyel engelin maksimum olduğu konum

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_s E}} \quad (2.9)$$

elde edilir. x_m 'i Eş. 2.5'de yerine yazarsak imaj-kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin azalması,

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.10)$$

ifadesiyle elde edilir [33, 34].

2.4.2. Direnç etkisi

Bir Schottky diyotun I-V karakteristiğini etkileyen faktörlerden birisi de dirençtir. Schottky diyotların şönt (R_{sh}) ve seri direnç (R_s) olmak üzere iki karakteristik direnci vardır. Şönt

direnci (R_{sh}) ters beslem gerilimlerde etkiliyken, seri direnç (R_s) ise doğru beslem gerilimlerinde etkilidir.

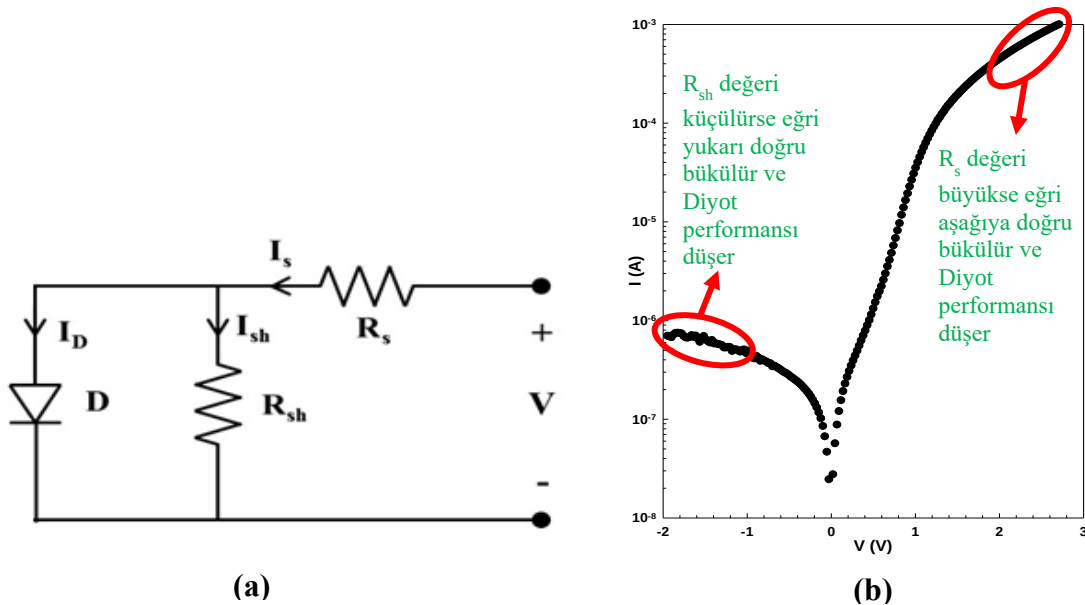
Şönt Direnç (R_{sh}) Etkisi

Bir Schottky diyotun Şönt Direnç (R_{sh}) özgül metal-yarıiletken kontak direncidir ve ideal diyot durumunun olmadığını gerçeğini modellemektedir. İdeal bir diyot için R_{sh} değeri sonsuzdur. Fakat deneysel olarak böyle bir durum söz konusu olmadığı için R_{sh} değerinin $\geq 10^9 \Omega$ olması ve R_s değerinden büyük olması istenir. Eğer diyot düşük R_{sh} değerine sahipse, bu durumda şönt direnci alternatif bir akım yolu oluşturacak ve sızıntı akımlarının artmasına neden olacaktır. Bundan dolayı aygıt performansı düşecektir.

Şönt direnç birkaç nedenden ortaya çıkabilir. Bunlar [29];

- Eklem sınırındaki kusurlar,
- Ölçüm sistemi
- Metal ve yarıiletken arasındaki oksit tabakanın varlığıdır.

Şekil 2.6 (a) ve (b)'de hem MS/MIS tipi Schottky diyotun eşdeğer devresini hem de şönt direncinin ters beslemdeki I-V karakteristiği üzerine etkisini göstermektedir. Burada R_{sh} üzerinden geçen akım I_{sh} 'dır. Yüksek R_{sh} değerine sahip diyotlarda akım şönt direnci yerine seri direnç üzerinden geçeceği için diyot maksimum güç değerine sahip olacaktır.



Şekil 2.6. (a) MS/MIS tipi Schottky diyotun eşdeğer devresini (b) R_{sh} ve R_s 'nin MS/MIS tipi Schottky diyotun I-V karakteristiğine etkisi

Seri Direnç (R_s) Etkisi

Metal yarıiletken doğrultucu kontaklarda yarıiletken tarafında tüketim bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı göstermiş olduğu dirence seri direnç denir ve R_s ile gösterilir. Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinde yüksek gerilim değerlerinde R_s baskın olmaya başlar ve akımın değerinin düşmesine sebep olur. Bundan dolayı aygıt performansı düşer. Ayrıca, Kapasitans-Gerilim ve İletkenlik-Gerilim (C-V ve G/ω -V) ölçümlerinde ise özellikle yüksek frekanslarda ($f \geq 1$ MHz) yığılım bölgesinde çok etkilidir [7, 35].

Yarıiletken aygıtlar ve devre performansı genellikle R_s tarafından etkilenir. Bundan dolayı yapıların seri direnci olabildiğince düşük olmalıdır. Fotodiyot gibi bazı aygıtlarda birkaç ohm'luk direnç değeri düşük öneme sahipken, güneş pili gibi aygıtlarda bu değer çok önemlidir [36].

Seri direnç birkaç nedenden ortaya çıkabilir. Bunlar [29];

- i. Doğrultucu kontak üzerinden ölçüm almak için kullanılan tel,
- ii. Kristalin arka yüzeyi üzerine yapılmış olan omik kontak,
- iii. Kristal ile omik kontak arasında büyütme sırasında ya da öncesinde oluşabilecek toz, kir gibi etkenler,
- iv. Metal ile yarıiletken arasında doğal ya da katkılanmış bir arayüzey tabakasının olması,
- v. Kristalin doğrultucu kontak tarafında bulunan tüketme tabakası

Şekil 2.6 (a) ve (b)'de hem MS/MIS tipi Schottky diyotun eşdeğer devresini hem de seri direncinin doğru beslemdeki I-V karakteristiği üzerine etkisini göstermektedir. Burada R_s üzerinden geçen akım I_s 'dir. Düşük R_s ve yüksek şönt direnci değerine sahip diyotlarda akım seri direnç üzerinden geçeceği için diyot maksimum güç değerine sahip olacaktır.

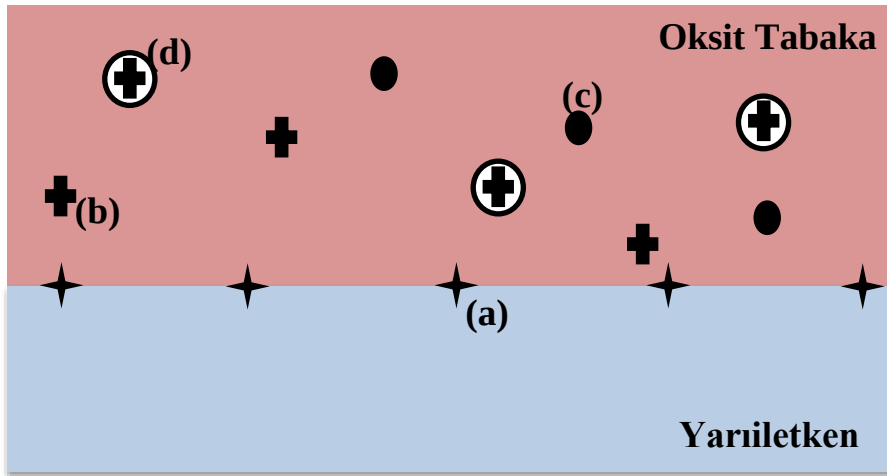
2.4.3. Arayüzey durumları

Yarıiletken bir kristalin periyodik doğası arayüzeyde bozulur. Bu durum arayüzeye yakın yerlerde yarıiletkenin yasak enerji aralığında müsaadeli hallerin oluşmasına sebep olur. Bu durumlar arayüzey durumları veya arayüzey tuzakları olarak isimlendirilir. Bu durumlar iletim bandı (E_c) ile valans bandı (E_v) enerjileri arasında değişen enerji değerlerine sahiptir.

Eğer bu arayüzey durumları Fermi seviyesinin altında enerji değerine sahiplerse elektronla doludurlar.

Şekil 2.7’de de gösterildiği gibi arayüzey durumları dört farklı grupta sınıflandırılabilir [37]. Bunlar;

- Arayüzey tuzak yükleri: Yarıiletken enerji bantlarında enerji durumları ile yarıiletken/arayüzey kısmında yerleşmiş yükler
- Sabit oksit yükler: Elektrik alan veya uygulanan gerilim altında genellikle hareketsiz duran ve arayüzeyde veya arayüzey yakınlarında yerleşmiş yükler
- Tuzaklanmış oksit yükler: X-ray gibi yüksek enerjili parçacıklar tarafından oluşturulmuş yükler
- Hareketli iyonik yükler: Na atomu iyonları gibi arayüzey tabakası içerisinde hareketli olan yükler



Şekil 2.7. Metal/oksit tabaka bölgesinde oluşan arayüzey tabakalar

Metal ile kontak edilmemiş bir yarıiletkende elektronlar yarıiletken kristalden kaynaklı arayüzey durumlarında tuzaklanırlar. Bunlar negatif bir yüzey yükü formundadırlar (Şekil 2.8 (a)).

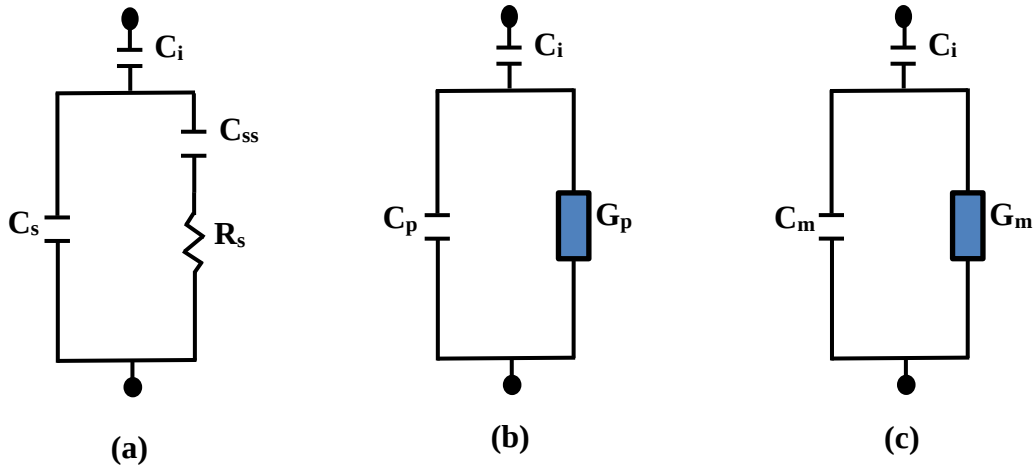
- Yarıiletkenin yüzeyine veya yakınına yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alanda hareketsiz duran sabit oksit yükleri,

MOS tipi yapılarda arayüzey durumlarının karakterizasyonu ve ölçümü ile ilgili farklı metotlar vardır [36, 38, 39]. Bunlar arasında, arayüzey durumlarının değerlendirmesinde hassas ve doğru bilgi verdiği için Nicollian ve Goetzberger [39] tarafından geliştirilen Kondüktans Metodu ve kolay hesaplama yöntemiyle Yüksek-Düşük Kapasitans Metodu öne çıkmaktadır.

Kondüktans Metodu

Kondüktans Metodu (KM) ilk olarak 1967 yılında Nicollian ve Goetzberger [39] tarafından geliştirilmiştir. Bu metodun en önemli özelliklerinden birisi, arayüzey durumlarının hesaplanmasında kesin ve doğru bir sonuç vermesidir [29, 39]. KM'nin bir avantajı da $10^9 \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ sınırının da altındaki arayüzey durumlarının ölçülmesinde kullanılabilir olmasıdır. KM kullanılarak yalnızca band boşluğundaki hem tüketim hem de terslenim bölgesindeki N_{ss} değeri değil aynı zamanda yüzey potansiyel değişmesi de ölçülebilmektedir. KM, bir MOS tipi yapıların ölçülen kapasitans ve iletkenlik (C_m ve G_m) ölçümlerine dayanılarak elde edilir.

Şekil 2.9 (a)'da KM için kullanılan bir MOS yapının eşdeğer devresini göstermektedir [36]. Burada C_i arayüzey tabaka kapasitansı, C_s yarıiletken kapasitansı, C_{ss} arayüzey tuzakları kapasitansı ve R_s arayüzey durumları taşıyıcıları yakalayıp yayarken kayıp mekanizmasını temsil eden dirençtir.



Şekil 2.9. Kondüktans metodu için eşdeğer devreler; (a) standart bir MOS kapasitor devresi, (b) (a) durumunun basitleştirilmiş devresi ve (c) ölçülen sistem devresi

Paralel iletkenlik (G_p/ω) elde etmek için, paralel kapasitans (C_p) ve G_p/ω 'ye ait olan Eş. 2.11 ve 2.12 kullanarak Şekil 2.9 (a)'nın devresini (b)'nin devresi ile değiştirebiliriz.

$$C_p = C_s + \frac{C_{ss}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.11)$$

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{q\omega\tau N_{ss}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.12)$$

Burada $C_{ss}=q^2N_{ss}$, $\tau=R_sN_{ss}$ (τ arayüzey durumları zaman sabiti) ve $\omega=2\pi f$ (f ölçülen frekanstır). Yukarıdaki eşitliklerden, arayüzey durumları (N_{ss}) enerji bandında tek bir enerji seviyesidir. Ama arayüzey durumları yarıiletken/oksit arayüzeyde yarıiletken enerji bandında sabit bir dağılıma sahiptir. Arayüzey durumları için tuzaklama ve yayma Fermi seviyesi E_F 'nin birkaç kT/q üzerinde gerçekleşir. Bu yüzden bir zaman sabiti dağılımı ve normalleştirilmiş paralel iletkenlik aşağıdaki gibi tanımlanır [29, 39].

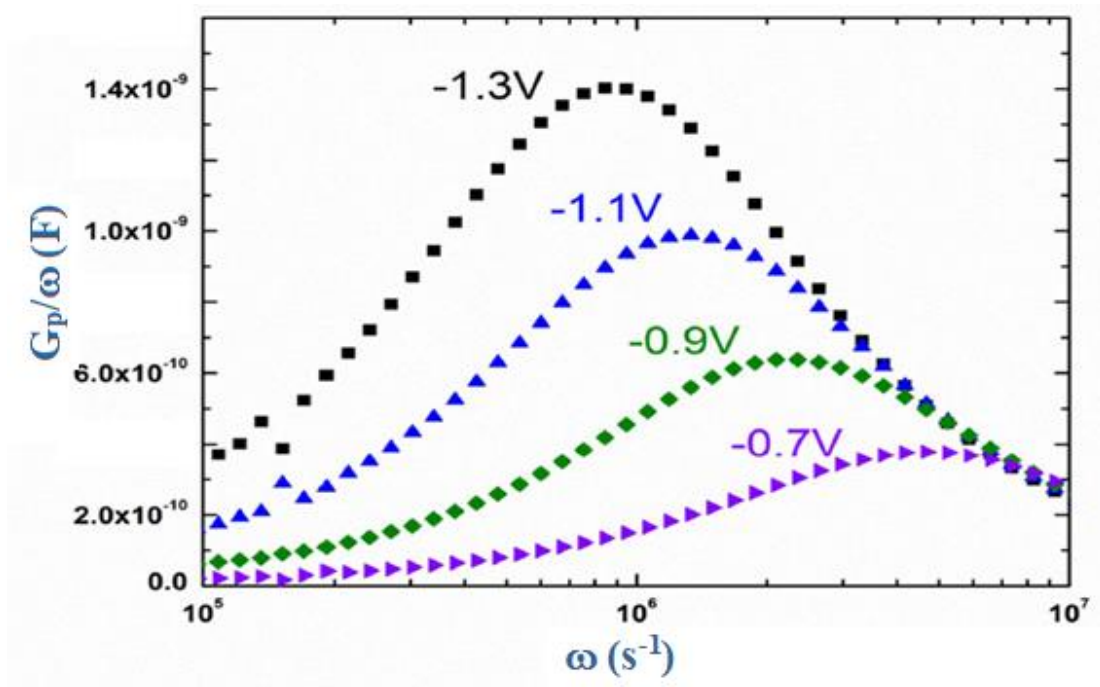
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qN_{ss}}{2\omega\tau} \ln[1 + (\omega\tau)^2] \quad (2.13)$$

C-V ve G/ω -V ölçümlerinde empedansmetre aygıtın paralel C_m ve G_m birleşiminden oluştuğu varsayılır [36]. Burada Şekil 2.9 (b)'deki devreyi Şekil 2.9 (c)'deki devreye dönüştürerek G_p/ω ifadesi C_m , C_{ox} ve G_m cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega G_m C_{ox}^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{ox} - C_m)^2} \quad (2.14)$$

Burada C_{ox} ise oksit tabakanın kapasitans değeridir. Arayüzey durumlarını tam hesaplamak için kapasitans ve iletkenlik frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülür ve G_p/ω - ω grafiği çizilir [36]. G_p/ω - ω grafiğinde N_{ss} ve τ paralel iletkenliğin (G_p/ω) maksimum değeri ve ona ait olan frekans kullanılarak bulunur. Eş. 2.14'de maksimum G_p/ω değeri $\omega=1/\tau$ 'da olur ve burada $N_{ss}=1,98/(G_p/q\omega)$ 'dır. G_p/ω değerindeki bu pik davranışı Si'nin yasak enerji aralığındaki arayüzey/Si'deki arayüzey durumlarının dağılımlarına atfedilir [15, 29, 39].

Şekil 2.10'da bir silisyum MOS kapasitör için tüketim bölgesinde farklı gerilimler altında G_p/ω serisini göstermektedir [37].



Şekil 2.10. Bir silisyum MOS kapasitör için farklı gerilimler altında G_p/ω - ω grafiği

Yüksek-Düşük Frekans Kapasitans Metodu

Kapasitans ölçümleri kullanılarak arayüzey durumlarını hesaplamada kullanılan bir yöntem de Yüksek-Düşük Frekans Kapasitans Metodudur (YDFKM). 1962 yılında Terman [40] tarafından geliştirilen Yüksek-Frekans metodu ve 1967 yılından Berglund [41] tarafından geliştirilen Düşük-Frekans metodlarını, Castagne ve Vapaille 1971 yılında birleştirerek YDFKM'yi geliştirmişlerdir [42].

YDFKM, KM ile karşılaştırıldığında hesaplamalar daha hızlı ve kolaydır. Arayüzey durumları çok yüksek frekansta ac sinyali takip edemezken, çok düşük frekanslarda ac sinyali takip edebilir. YDFKM burada devreye girerek bu iki frekansa bağlı kapasitans eğrisi arasındaki farktan arayüzey durumlarını hesaplamada yardımcı olur. Castagne ve Vapaille'a göre YDFKM aşağıdaki gibi tanımlanır [42].

$$N_{ss} = \frac{1}{qA} \left\{ \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} \right\} \quad (2.15)$$

burada A diyotun alanı, C_{LF} düşük frekansta ölçülen kapasitans değeri, C_{HF} yüksek frekansta ölçülen kapasitans değeri, C_{ox} ise oksit tabakanın kapasitans değeridir.

2.4.4. Hareketli iyonlar

Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Bu hareketli iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonlarıdır [36]. Böyle iyonlar nispeten düşük sıcaklıklarda oksit içinde hareketli olduklarından sürüklenme olabilir. Hareketsiz oksit yükü, beslem sıcaklığı ile hareketli iyonik yükten ayırt edilebilir. Hareketli iyonlar, kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları içinde bulundurması, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitleme fırını, kuartz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden oksit içinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alanda altında hareket ettiklerinden MIS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar.

2.4.5. Tünelleme (Termiyonik Alan Emisyonu (TFE) ve Alan Emisyonu (FE))

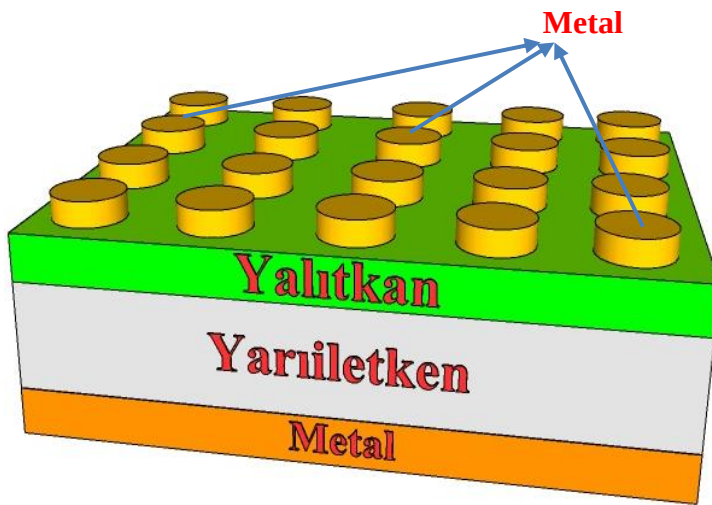
Tünelleme olayı yüksek katkılanmış yarıiletkenlerden yapılmış Schottky kontaklarda, özellikle düşük sıcaklıklarda baskın olan bir mekanizmadır. Bu mekanizmada taşıyıcı olan yükler, engel üzerinden normal olarak geçmek yerine engelden tünelleme (Termiyonik Alan Emisyonu (TFE) veya Alan Emisyonu (FE)) yaparak geçerler. Tünelleme olayından dolayı diyotun elektriksel karakteristiklerinde ideal durumlardan sapmalar meydana gelir.

2.4.6. Kenar etkileri

Genellikle yarıiletken yüzeyine küçük metal nokta kaynak olarak oluşturulan Schottky kontaklarda, metal noktanın merkezindeki elektrik alan değerinin bu metal noktanın kenarındaki elektrik alan değerinden büyük olduğu görülmüştür. Bundan dolayı Schottky kontaklarda teorik olarak elde edilen ters beslem akımının deneysel değerden küçük olduğu görüldü. Bu durum kenar sızıntı akımı ile açıklanabildi.

2.5. İdeal MIS Yapı

Metal/yarıiletken veya diğer adıyla Schottky diyotlarda yarıiletken ile metal arasına yalıtkan bir tabaka kaplandığında bu yapılar Schottky diyottan ziyade meal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) tabaka olarak adlandırılırlar. Bir MIS yapının şematik diyagramı Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) diyotun en basit formu

İdeal bir MIS diyot aşağıdaki durumları sağlamalıdır.

- i. Metal ve yarıiletken arasında hiçbir dc akımı yoktur, yani yalıtkana geçen herhangi bir taşıyıcı olmadığı için yalıtkanın iletkenliği sıfırdır.
- ii. Herhangi bir dış gerilim uygulanmaksızın, yarıiletkenin iş fonksiyonu ve metalin iş fonksiyonu arasındaki enerji farkı Φ_{ms} sıfırdır.

n-tipi için;

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0 \quad (2.16)$$

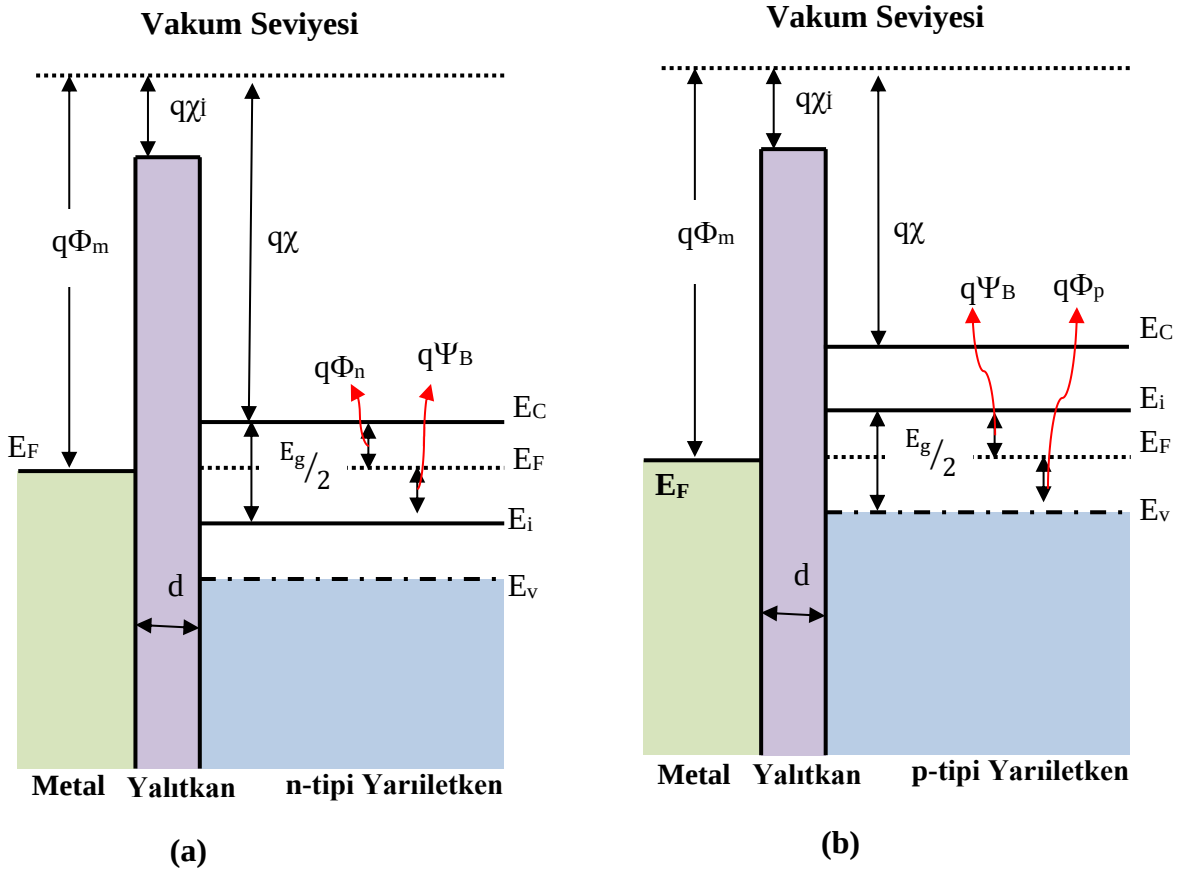
p-tipi için;

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \quad (2.17)$$

Burada ψ_{Bn} ile ψ_{Bp} ise sırasıyla yarıiletken ve yalıtkan için Fermi enerji seviyesi (E_F) ile saf enerji seviyesi (E_i) arasındaki enerji farkı, E_g ise yasak enerji aralığıdır.

- iii. Herhangi bir gerilim altında yapıdaki yükler yalıtkana yakın metal yüzeyinde ve yarıiletkende eşit miktardadır fakat zıt yönlüdür.

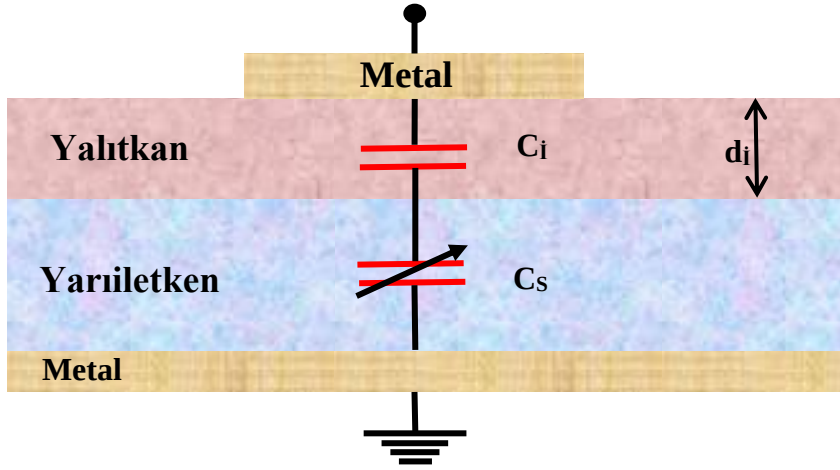
Hem metal/n-tipi hem de metal/p-tipi bir yarıiletken ideal MIS yapının $V=0$ durumunda enerji bant diyagramı Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Denge durumunda ($V=0$) (a) n tipi (b) p tipi yarıiletken için MIS yapının enerji bant diyagramı

İdeal bir MIS yapıda, doğrultucu kontağa bir gerilim uygulandığında, yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletkendeki serbest yüklerin yoğunluğu uygulanan gerilime bağlıdır ve metaldekine göre daha azdır. Yarıiletken arayüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükü Q_{sc} oluşur. Termal denge durumunda oluşan uzay yükü potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir.

Metal/yarıiletken kontaklar bir paralel plakalı kondansatöre benzetilebilir. Yalıtkan ya da organik arayüzey tabakanın varlığında metal ile yarıiletken tabaka arasında bir kapasitans meydana gelir. Bu kapasitans MIS kapasitansı olarak adlandırılır. Şekil 2.13’de bir MIS kapasitans yapısına karşılık gelen eşdeğer elektronik devresi görülmektedir.



Şekil 2.13. Bir MIS yapının eşdeğer devre diyagramı

Uygulanan gerilimde çok küçük değişimler söz konusu ise MIS yapının toplam kapasitansı, yalıtkan tabakanın kapasitansı (C_i) ve uzay yükü kapasitansı (C_{sc})’den oluşur.

Şekil 2.13’deki eşdeğer devrenin kapasitansı aşağıdaki gibi verilir [29].

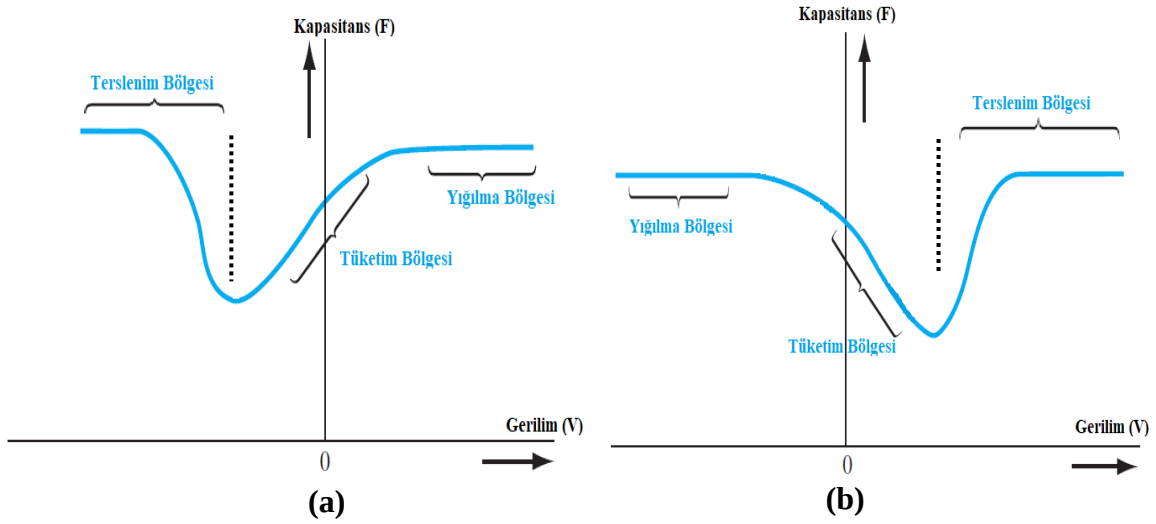
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_i} \quad (2.18)$$

Bu sonuca göre seri bağlı C_{sc} ve C_i kapasitansları bir MIS yapının eşdeğer devresine ait kapasitansı oluşturur. C_i aşağıdaki gibi verilir.

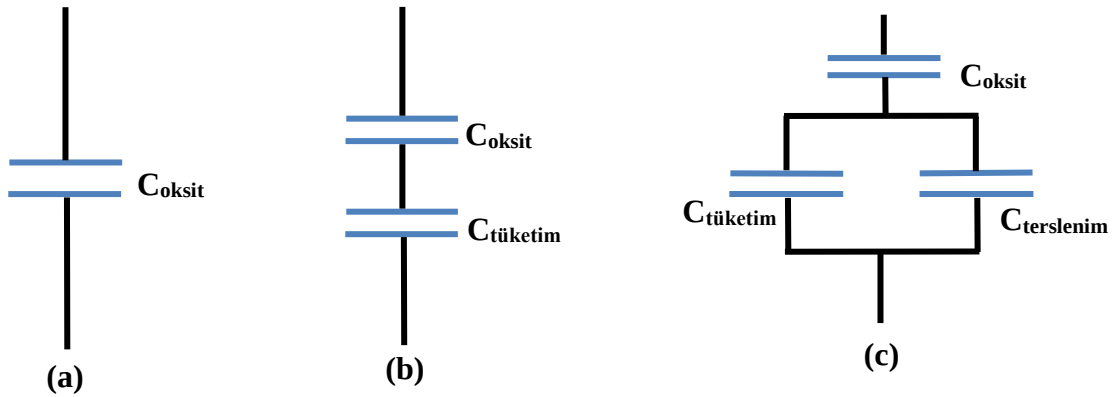
$$C_i = \frac{\epsilon_{ox}}{d_i} A \quad (2.19)$$

Burada d_i arayüzey tabakanın kalınlığı, ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti olup hem yarıiletkenin hem de yalıtkanın veya başka bir malzemenin dielektrik sabitleri boşluğun/vakumun dielektrik sabiti ($\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ F/m) cinsinden verilirken, A doğrultucu kontak alanıdır. Bir MIS yapının kapasitansındaki değişiklikleri sadece Q_{sc} uzay yükü belirler. Bir MIS yapıda kapasitans uygulanan gerilime göre değişir. Ayrıca MIS yapının kapasitans-gerilim eğrisi uygulanan bu gerilime göre yığılma, tüketim ve terslenim bölgeleri diye üç gruba ayrılabilir.

Şekil 2.14 (a) ve (b)'de sırasıyla n-tipi ve p-tipi MIS diyotların C-V eğrilerinin üç bölgeye ayrılması görülmektedir. Şekil 2.15'de ise oluşan bu üç bölgenin eşdeğer elektronik devresi verilmiştir.



Şekil 2. 14. (a) n-tipi ve (b) p-tipi MIS diyotların C-V eğrilerinin üç bölgeye ayrılması



Şekil 2.15. İdeal bir MMIS yapının elektronik eşdeğer devresi (a) Yığılma (b) Tüketim (c) Terslenim

2.5.1. Yığılma bölgesi

n-tipi bir MIS yapıda metal plakaya doğru beslem ($V > 0$) (metale (+) yarıiletken (-)) gerilim uygulandığı zaman gerilim kaynaklı olarak meydana gelen elektrik alan n-tipi yarıiletkenindeki çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronları yarıiletken arayüzüne doğru çekerek elektronları burada biriktirir ve yüzeye yakın yerlerde bantlar yukarı doğru bükülür

(Şekil 2.16 (a)). İletkenlik bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı, valans bandının da buna bağlı olarak yukarı doğru büküldüğü bu duruma çoğunluk yük taşıyıcıların arayüzeyde birikmelerinden dolayı yığılma adı verilir. Bu durumda sonucu olarak arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle yüzey yük kapasitansı sonsuza gider ($C_{sc} \rightarrow \infty$) ve dolayısıyla ölçülen kapasitans arayüzey tabakasının kapasitansı olacaktır ($C \rightarrow C_i$).

2.5.2. Tüketim bölgesi

n-tipi bir MIS yapıda metal plakaya küçük bir ters beslem ($V < 0$) (metale (-) yarıiletkene (+)) gerilim uygulandığı zaman arayüzey tabakası içinde oluşan elektrik alan n-tipi yarıiletken arayüzeyindeki elektronları yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu yarıiletkenin iç kısımlarındaki elektron yoğunluğundan küçük olmaya başlar iletim bandı (E_c) ve valans bandı (E_v) aşağı doğru bükülür (Şekil 2.16 (b)). İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerindedeşikler toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilime bağlı olan elektronların azaldığı ve genişliğin değiştiği bir tüketim bölgesi oluşur. Yarıiletkenin ön yüzeyinde elektronların azalmasından (tükenmesi) dolayı bu bölge tüketim bölgesi (W_D) olarak adlandırılır. Tüketim bölgesinin kalınlığı aşağıdaki ifade ile verilir.

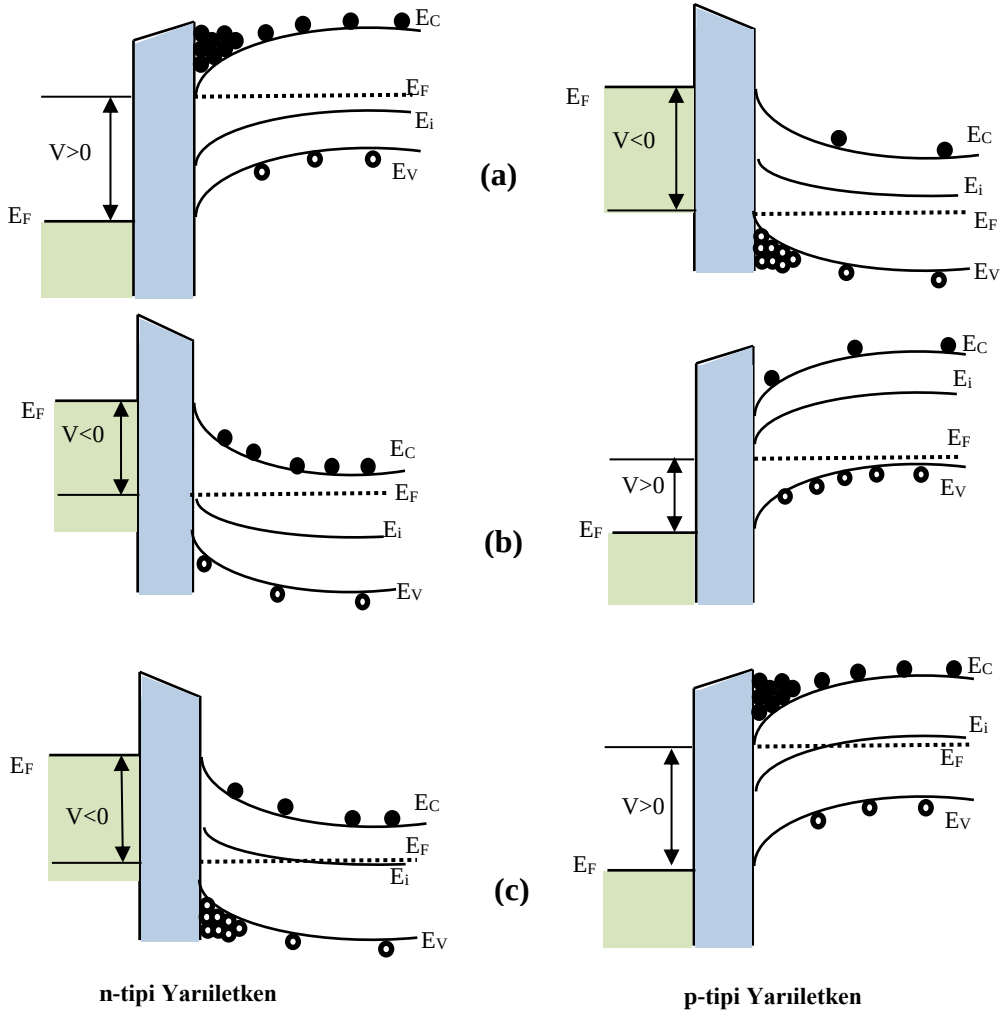
$$W_D = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.20)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, A_{ox} metal ile yarıiletken arasında kalan yalıtkan tabakanın alanı, C_{ox} yalıtkan/oksit tabakanın kapasitansıdır.

2.5.3. Terslenim bölgesi

n-tipi bir MIS yapıda metal plakaya daha büyük bir ters beslem ($V \ll 0$) (metale (-) yarıiletkene (+)) gerilim uygulandığında, bütün bantlar aşağı doğru iyice bükülürler. Dolayısıyla yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olandeşiklerin yoğunluğu artarak elektron yoğunluğundan fazla olur. Bu andan itibaren Fermi seviyesi (E_F) saf durumdaki enerji seviyesi (E_i)'nin altına geçer (Şekil 2.16 (c)). Bundan sonra n-tipi yarıiletken yüzeyi

p-tipi yarıiletken gibi davranmaya başlar. Başka bir deyişle, başlangıçta yüzeyinde elektronlar çoğunlukta olduğu n-tipi yarıiletkenin elektronlarının metal tarafına geçmesi ile arkasında pozitif yüklü deşikler bırakır. Yarıiletkenin ön yüzeyinde deşiklerin çoğunlukta olduğu bir bölge oluşur. Bu olay, yarıiletken yüzeyindeki yüklerin işaret değiştirmesinden dolayı terslenim olarak adlandırılır. Elektron yoğunluğu küçük frekanslarda ac sinyalini takip edebildiklerinden dolayı, kapasitans artan gerilimle birlikte oksit kapasitans değerine ulaşır. Ara frekanslarda ac 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.



Şekil 2.16. n-tipi yarıiletken (solda) ve p-tipi yarıiletken (sağda) $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının (a) yığılım (b) Tüketim (c) Terslenim enerji bant şeması

2.6. Dielektrik Teori

Dielektrikler dış bir elektrik alan altında elektriksel iletkenliği sağlayacak kadar taşıyıcısı olmayan katılardır. Bundan dolayı dielektrik malzemeler yalıtkan olarak ta isimlendirilirler. İletkenlerin öz direnci 10^{-4} (Ωcm) civarında iken dielektrik malzemelerde öz direnç 10^{16} (Ωcm) civarlarındadır.

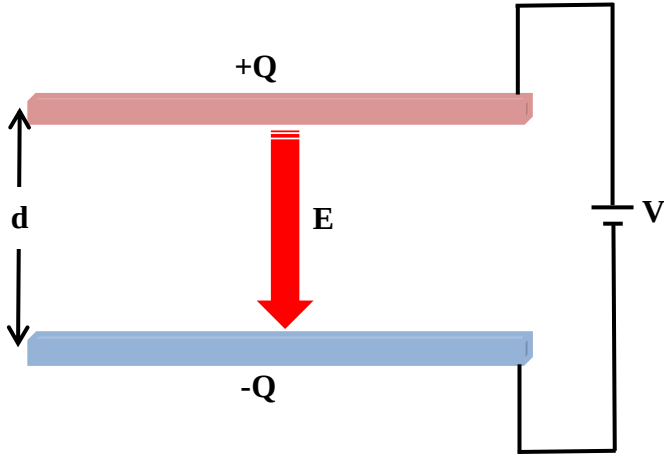
Dielektriklerde tüm yükler atom veya moleküllere bağlıdır. Bundan dolayı bu yüklerin hareketleri de moleküller içerisinde sınırlıdır. Ayrıca bir elektrik alana maruz kaldıklarında pozitif ve negatif yükler oluşan elektrostatik alan altında zıt yönlerde yer değiştirmeler yapması sonucu dipol moment oluştururlar. Bu elektrik alan ortadan kaldırıldığında ise pozitif ve negatif yükler tekrar eski yerlerine dönerler ve net dipol moment sıfır olur. Çoğunlukla bu dielektrik sabiti elektrik alan şiddetinden bağımsızdır. Eğer ortamda değişen bir elektrik alan söz konusu olursa bu değer sıcaklık ve frekanstan etkilenir.

2.6.1. Dielektriksiz ve dielektrikli paralel plakalı kondansatör

Elektrik yükünü depolayan cihazlara kondansatör denir. Bu cihazlar elektronikte birçok önemli uygulamaya sahiptir. Bunların bazı örnekleri; elektrik potansiyel enerjisinin depolanmasını, dirençlerle birleştğinde voltaj değişikliklerini geciktirmeyi, istenmeyen frekans sinyallerini filtrelemeyi, rezonans devreleri oluşturmayı ve dirençlerle birleştirildiğinde frekansa bağlı ve bağımsız voltaj bölücülerini yapmayı içerir.

Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör

Aralarında d uzaklığı bulunan A yüzey alanına sahip $(-Q)$ ve $(+Q)$ yüklü ve plakalar arasında dielektrik malzeme olmayan bir kondansatör Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Plakalar uygulanan sabit bir V gerilime bağlıdır.



Şekil 2.17. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör

Plakalar arasında oluşan elektrik alan şiddeti;

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.21)$$

eşitliği ile verilir. Burada σ her plaka üzerindeki birim alan başına düşen yüzey yük yoğunluğu, ϵ_0 ise boşluğun geçirgenlik sabitidir ($=8,85 \times 10^{-12}$ F/m). Aralarında d uzaklığı bulunan plakalar arasındaki potansiyel fark;

$$V = E.d \quad (2.22)$$

ile verilir. Eş. 2.22'deki E değeri Eş. 2.21'de yerine yazılırsa ve her plakanın sahip olduğu toplam yük $Q = \sigma A$ olduğu düşünüldüğünde, paralel plakalı kondansatörün sığası;

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.23)$$

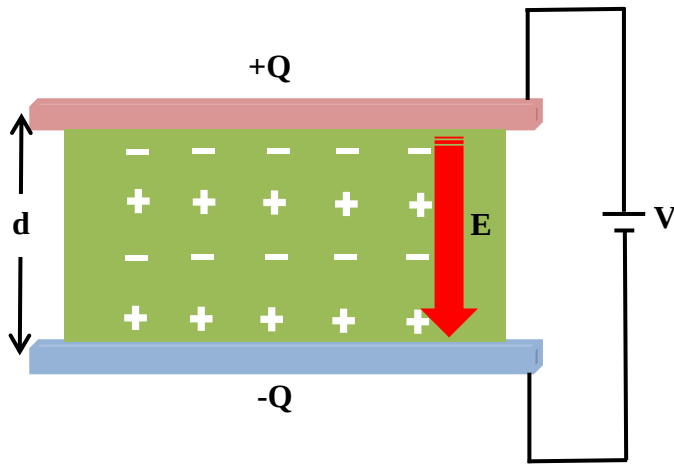
olarak ifade edilir. Plakalar arası bölgede elektriksel yer değiştirme kaynağı olarak σ yüzey yük yoğunluğu düşünülebilir. Buna göre elektriksel yer değiştirme;

$$D = \sigma = \epsilon_0 E \quad (2.24)$$

ile ifade edilmektedir [33, 43–45].

Dielektrikli Paralel Plakalı Kondansatör

Eğer paralel plakalara sahip kondansatörün arasındaki boşluk Şekil 2.18'deki gibi dielektrik bir malzeme ile doldurulursa, o zaman kapasitans birim hacim başına yük depolayabilir ve bu yük depolama birimsiz dielektrik sabit çarpanı (ϵ') kadar artar. Bu sabit daima ϵ_0 cinsinden ifade edilir ve birden büyük bir sayıdır. Yük depolamadaki artış elektrik alan tarafından dielektriğin kutuplanmasından dolayıdır [46].



Şekil 2.18. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör

Plakalar arasında dielektrik madde yokken kondansatörün sığası C_0 , kondansatörün uçları arasındaki potansiyel fark V_0 ve elektrik alan da E_0 olsun.

$$V = \frac{V_0}{\epsilon'} \quad (2.25)$$

Plakalar arasına dielektrik bir madde konulursa potansiyel fark ve elektrik alan $1/\epsilon'$ çarpanı kadar azalır. Bundan dolayı elektrik alan ifadesi de;

$$E = \frac{E_0}{\epsilon'} \quad (2.26)$$

olacaktır. Kondansatör üzerindeki Q yükü değişmez ancak sığanın değeri ϵ' çarpanı kadar artacaktır. Yani;

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\varepsilon' Q_0}{V_0} = \varepsilon' C_0 \quad (2.27)$$

olur. Plakalar arasındaki bölge dielektrik maddeyle dolduğunda kondansatörün sığası;

$$C = \varepsilon' \frac{\varepsilon_0 A}{d} \quad (2.28)$$

olarak ifade edilebilir. Eş. 2.28'den de görüldüğü gibi kondansatörün sığası ε' ile doğru orantılıdır. Yani, plakalar arasına yerleştirilen dielektrik materyalin dielektrik sabiti ne kadar yüksek olursa sığa da o ölçüde artacaktır.

2.6.2. Dielektrik kutuplanma

Kondansatörün levhaları arasına dielektrik malzeme yerleştirildiğinde azalan potansiyel ile birlikte elektrik alan şiddetinde ($V=E.d$) azalma olur ve bunun azalması da birim yüzeydeki net yükü ($\sigma=E.\varepsilon_0$) azaltır. Bu durum kondansatör levhaları arasına yerleştirilen dielektrik malzemenin levhalara bakan kısımlarında zıt yüklerin oluşmasıyla gerçekleşir.

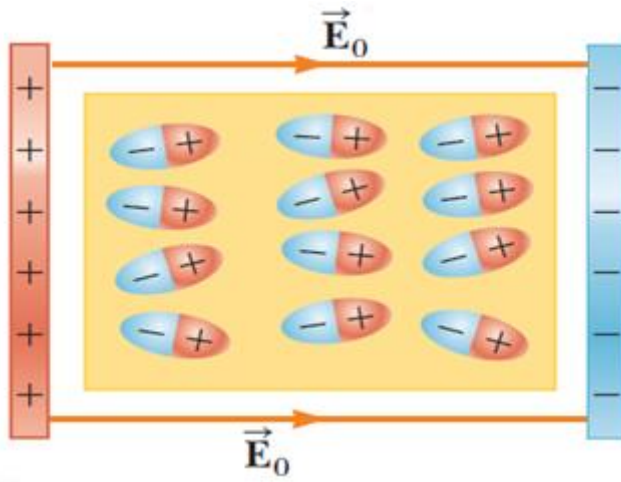
Elektrik alan içerisine yerleştirilen iletkendeki serbest yükler alan tarafından uygulanan kuvvetlerin etkisi ile yer değiştirir ve bu etki sonucu kutuplanan yüklerin elektrik alanı, elektrostatik denge kurulduğunda dış alanı nötrleştirir. Bunun sonucunda da iletken içinde elektrik alan sıfır olur [43, 44].

Dielektrik malzemelerin bazıları daimi dipol bulundurlar. Polar (kutuplu) denilen bu maddelerde pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezleri çakışmaz, dolayısıyla yükler birbirinden çok az ayrılır. Polar moleküllere örnek olarak H_2O ve N_2O verilebilir. Her iki molekülde de hidrojen ve azot atomları oksijen atomunun aynı tarafında yer alır. H_2 , N_2 ve O_2 gibi simetrik moleküller ise polar olmayan moleküllere örnek olarak verilebilir. Bu moleküllerde pozitif çekirdeğin ağırlık merkezi elektronların ağırlık merkezi ile çakışır.

Elektrik alana yerleştirilen dielektrik içerisinde yük hareketi olmamakla birlikte elektronlar ait oldukları atomun çekirdeğine doğru çok küçük bir yer değiştirme yaparlar. Atomlar çok

küçük dipoller haline geçerek dielektrik kutuplanır. Böylece dipolar hale geçen molekülün dipol momenti elektrik alana paralel olacak şekilde yönelir. Elektrik alan kaldırıldığında atomlar tekrar eski haline döner yani dipoller kaybolur.

Polar olmayan molekül kutuplandığı zaman yer değiştiren yükleri geri çağıran kuvvetler oluşur. Dış alan tarafından yüklere etkiyen kuvvet, bu geri çağırıcı kuvvete eşit oluncaya kadar yükleri birbirinden ayırır. Moleküller sabit bir uyarım içinde bulunduklarından tam bir yönelim olmaz. Uygulanan elektrik alanın şiddeti arttıkça ve sıcaklık azaldıkça yönelme derecesi artar [47].



Şekil 2.19. Dış elektrik alan etkisi altındaki dipollerin yönelimleri

Dielektrik, daimi dipollerden meydana gelmişse dış alan olmadığında rastgele doğrultularda yönelirler. Şekil 2.19'da bir dış elektrik alan etkisi altında P dipol momentlerinin alana paralel yönelimleri görülmektedir [43]. Kısmen yönelen bu dipoller, dış elektrik alana karşı koyan zıt yönlü bir iç elektrik alan meydana getirir. Eğer dielektriğin molekülleri daimi dipol momente sahip değilse dış elektrik alandan dolayı bir miktar yük ayrışması meydana gelir. Bu da dış elektrik alanın bir miktar azalmasına neden olur.

2.6.3. Kutuplanma yükleri

Dielektrik malzeme kondansatör levhaları arasındayken oluşan kutuplanma, tüm dielektrik maddenin pozitif yüklerinin merkezini negatif yüklerin merkezinden uzaklaştıracak yönelimdedir. Dielektrik bütün olarak yük bakımından nötr olmasına karşın polarize durumdadır. Bu durum dielektriğin kondansatörün levhalarına bakan yüzlerinde zıt işaretli

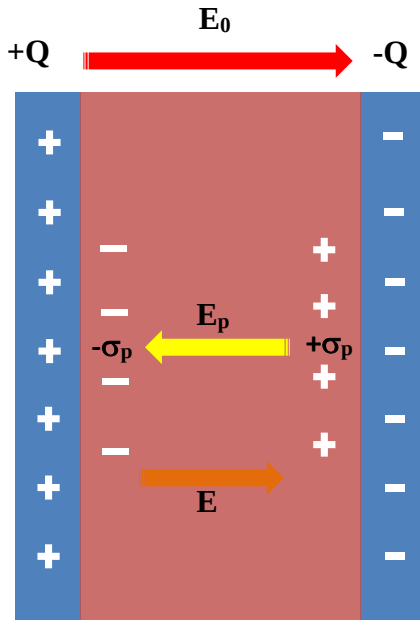
yük meydana gelmesi anlamı taşır. Dielektriğin içindeki herhangi bir hacim elemanında yük fazlalığı yoktur.

Dielektrik bütün olarak elektrik bakımından nötr olduğuna göre yüzeyde meydana gelen negatif ve pozitif kutuplanma yükleri eşit olmalıdır. Burada dielektrik malzemenin, kondansatörün levhalarına bakan yüzlerindeki yükler çok ince bir tabaka halindedir. Bu yükler yakın atomların etkisi altındadır ve bağlı yükler olarak adlandırılır. Çünkü dielektriğin yüzeylerine dokundurulan iletken bir levha ile bu yüzeylerden hiçbir yük kaldırılamaz. Bir iletkende serbest yükler bulunduğu halde polarize bir dielektrikte meydana gelen yükler bağlıdır [43, 47].

2.6.4. 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 2.20'deki gibi açıklanabilir. Şekilden de görüldüğü gibi düzgün bir dış E_0 elektrik alan içindeki bir dielektrik maddede moleküllerin pozitif (+) kısmı uygulanan elektrik alan ile aynı yöne yönelirken negatif (-) kısmı ise uygulanan elektrik alana ters yönde yönelir.

Dielektrik madde yük bakımından bütünü ile nötr olmasına karşın uygulanan dış elektrik alanın etkisiyle polarize olur. Uygulanan elektrik alanının etkisi sonucu, negatif (-) yükler sol plaka yüzeyinde, pozitif (+) yükler ise sağ plaka yüzeyde birikmişlerdir. Dielektrik yük bakımından bütünü ile nötr kalmasından dolayı, negatif yüzeyde oluşan yük miktarı pozitif yüzeyde oluşan yük miktarına eşittir. E_0 ile dielektrik malzemenin bulunmadığı zamanki elektrik alan şiddetini ve E_p ile polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği elektrik alanın şiddeti gösterilirse, toplam bileşke elektrik alan bunların vektörel toplamına eşittir.



Şekil 2.20. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_p \quad (2.29)$$

Burada E_0 polarize eden elektrik alan, E_p ise polarize yüklerden ileri gelen elektrik alandır ve bu alanlar birbirlerine zıt yönlüdürler. O halde Eş. 2.29 denklemi,

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}_p \quad (2.30)$$

yazılabilir. E_p elektrik alanı kutuplanmayı önlemeye çalışır. Toplam bileşke elektrik alan daima dış elektrik alan E_0 yönündedir. Etkili yük yoğunluğu $(\sigma - \sigma_p)$, kondansatörün levhaları üzerindeki serbest yük yoğunluğu σ ile dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerde meydana gelen kutuplanma yük yoğunluğu σ_p arasındaki farka eşit olur. Kondansatörün levhaları üzerindeki serbest yük yoğunluğu σ , E_0 elektrik alanına,

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.31)$$

bağıntısı ile bağlıdır. Kutuplanma yük yoğunluğu σ_p ile E_p elektrik alanını arasındaki ilişki ise;

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_0} \quad (2.32)$$

bağıntısı ile verilir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak dielektrik içindeki bileşke alan;

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} - \frac{\sigma_p}{\varepsilon_0} \quad (2.33)$$

şeklinde elde edilir. Dielektriğin her bir noktasındaki P kutuplanması, elektrik alanı ile hem aynı yönde hem de doğru orantılıdır. Bu özellik lineer ve homojen yapıya sahip olan izotropik dielektrik malzemeler için,

$$P = \varepsilon_0 \chi E \quad (2.34)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Burada, χ dielektriğin elektrik alınganlığı olarak adlandırılan bir niceliktir ve

$$\chi = (\varepsilon' - 1) \quad (2.35)$$

bağıntısı ile verilir. Ayrıca boşlukta polarize olacak madde olmadığından $\chi=0$ olur. Kutuplanma etkisi, dielektrik malzemelerin yüzeyde bulunan yüklerin iletkende olduğu gibi serbestçe hareket edemeyip, yer değiştirmesiyle anlaşılır [47]. Polarize dielektrikler malzemeler için, elektrik yerdeğiştirmesi D veya elektrik akı yoğunluğu, dielektrik içindeki E elektrik alanı ile orantılıdır. Elektrik yerdeğiştirmesi D,

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (2.36)$$

ifadesi ile verilir. Eş. 2.34, Eş. 2.36'de yerine yazılırsa;

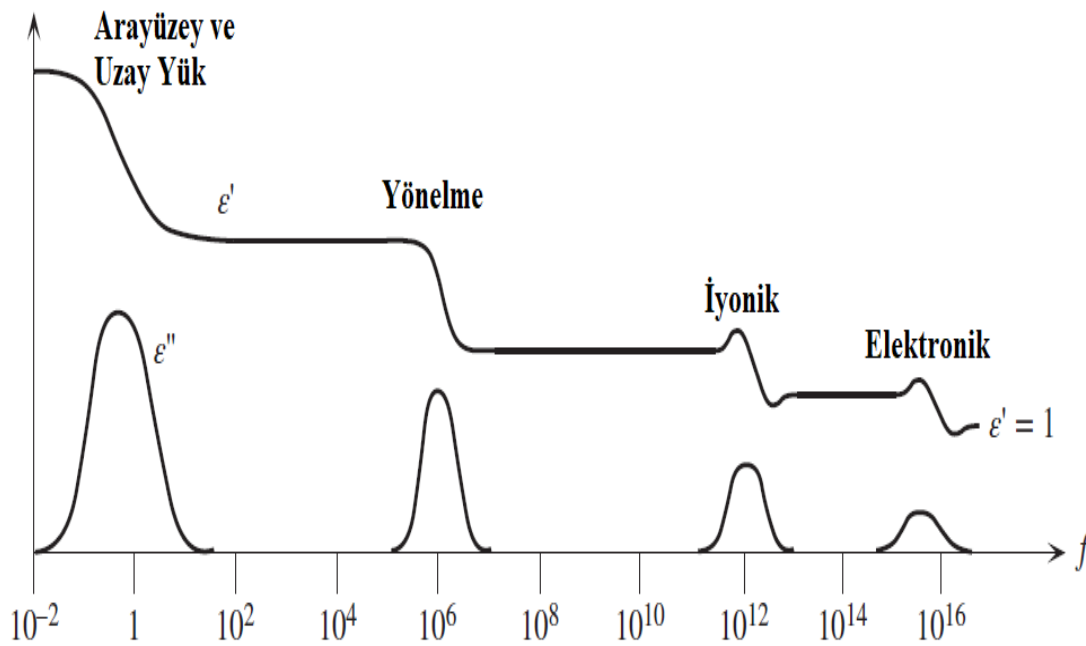
$$D = \varepsilon_0 (1 + \chi) E = \varepsilon_0 \varepsilon' E \quad (2.37)$$

olarak elde edilir [43–45, 47].

2.6.5. Kutuplanma Mekanizmaları

Dielektrikler polar ve polar olmayan olmak üzere genelde iki kısma ayrılır. Polar olanlar moleküllerindeki atomların konumlarından dolayı pozitif ve negatif iyonların yük merkezleri bir noktada çakışmadığı için kalıcı elektrik dipol momentlerine sahiptir. Bu elektrik dipol momentleri çoğu zaman çift kutup (dipolar) momentleridir. Bu yüzden bunlara çift kutuplu denir.

Dielektriklerde temelde dört tip kutuplanma meydana gelmektedir. Bunlar elektronik kutuplanma, iyonik kutuplanma, yönelme kutuplanması ve arayüzey-uzay yük kutuplanmasıdır (Şekil 2.21) [44, 46, 48].



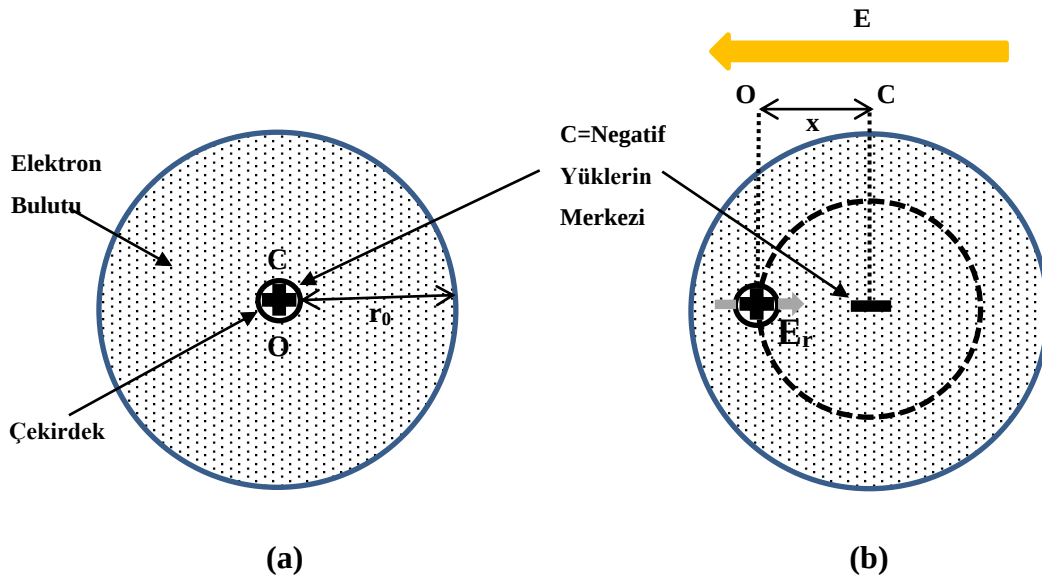
Şekil 2.21. Dielektrik mekanizmalarının frekans karşılıkları

Elektronik Kutuplanma

Nötr bir atomda net yük sıfırdır. Yani negatif yükler ile pozitif yükler birbirine eşittir. Böyle bir atomda Şekil 2.22 (a)'da gösterildiği gibi net dipol moment sıfırdır [46]. Ama bu atom dış bir elektrik alan içerisine konulduğunda dipol moment oluşur. Pozitif yükten daha hafif olan elektronlar bu dış elektrik alan etkisi ile Şekil 2.22 (b)'de gösterildiği gibi pozitif yük

merkezinden negatif yük merkezinin ayrılmasıyla yer değişimi veya kayma oluşur [46]. Bu kayma, elektronun kütlesinin oldukça küçük olmasından dolayı uygulanan dış elektrik alan etkisiyle 10^{-15} sn gibi kısa bir sürede gerçekleşir.

Bütün dielektriklerde diğer kutuplanma türleri oluşmasa bile bu tip bir kutuplanma gözlenebilir. Pozitif ve negatif yüklerin ayrışması sonucu atomda oluşan bu dipol moment kutuplanma olarak adlandırılır. Eğer bir atom etkili bir dipol momente sahipse o atomun kutuplandığı söylenebilir.



Şekil 2.22. (a) $E=0$ 'daki nötr atom ve (b) bir dış elektrik alan altındaki elektronik kutuplanma

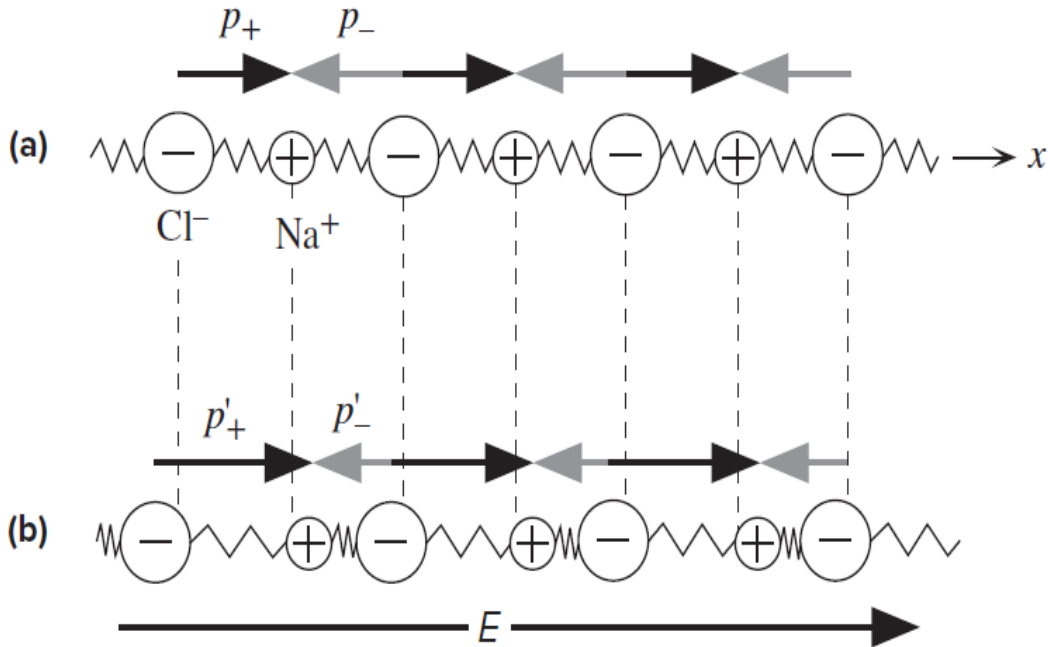
Dış elektrik alanının olmadığı durumda, elektronların hareket merkezi C ile pozitif yük merkezi O aynı noktadadır. Bundan dolayı net dipol moment sıfırdır (Şekil 2.22 (a)). Belirli sayıda elektronu olan ve tüm bu elektronların r_0 yarıçaplı bir küre içerisinde belirli bir yörüngede olduğunu varsayalım. E dış elektrik alanı uygulandığında hafif olan elektronlar bu dış elektrik alanına ters yönde yer değiştireceklerdir. O noktasını orijin olarak aldığımızda negatif yük merkezi C pozitif yük merkezi O'dan x mesafesi kadar kayacaktır (Şekil 2.22 (b)). Elektronlar uygulanan dış elektrik alan tarafından itildiğinden, elektronlar ve pozitif yük merkezi arasındaki Coulomb etkileşimi elektronları çekerek onları tekrar eski konumuna getirmeye çalışır. Elektronlar üzerindeki kuvvet, E nedeniyle onları nükleer yükten uzaklaştırmaya çalışıyor. Elektronlar ve pozitif yük merkezi arasındaki Coulomb çekici

kuvveti yer değiştirme olan x ile orantılıdır. $x=0$ durumunda yani O merkezi ile C merkezi çakıştığı zaman bu kuvvet sıfırdır.

İyonik Kutuplanma

Elektronik ve iyonik kutuplanmanın ortak yönü yüklerin alan yönünde birbirine göre konum değiştirmesidir. Bundan dolayı bu iki kutuplanmaya etkileşimli kutuplanma denilmektedir. İyonik kutuplanma NaCl, KCl ve LiBr gibi iyonik kristallerde olur. İyonik kristal örgü noktalarında yerleşmiş Na^+ ve Cl^- gibi tanımlanmış iyonları vardır. Bu yüzden karşılıklı olarak yüklü komşu iyonların her çiftinin bir dipol momentı vardır.

şekil 2.23 (a)'da gösterildiği gibi Na^+ ve Cl^- iyon zincirine sahip tek boyutta NaCl kristali varsayalım [46]. Elektrik alan olmadığında katı eşit büyüklükteki dipol momentler başa baş ve arka arkaya dizildiği için net bir kutuplanmaya sahip değildir ve bundan dolayı net dipol moment sıfırdır. Pozitif doğrultusundaki (+x) dipol moment p_+ negatif doğrultusundaki (-x) dipol moment p_- ile aynı değere sahiptir. Bundan dolayı net dipol moment sıfırdır.



şekil 2.23. (a) $E=0$ da NaCl kristalindeki zincir. Ortalama net dipol moment sıfırdır. (b) dış bir elektrik alan altında iyonik kutuplanma

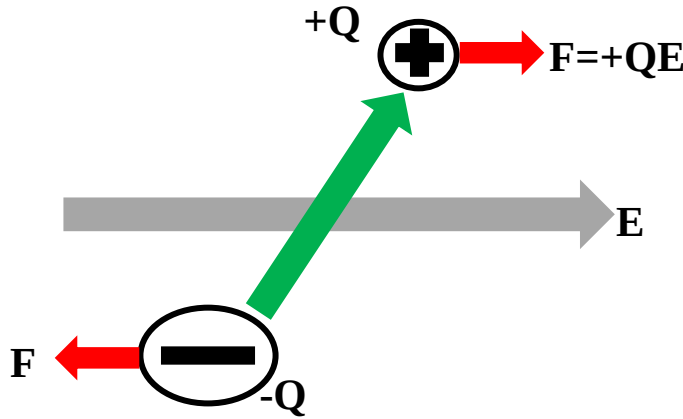
Ama pozitif doğrultuda (+x) bir E dış elektrik alanı uygulandığında Na^+ ve Cl^- iyonları sırsıyla denge konumundan (+x) ve (-x) doğrultularında itilirler. Sonucunda (+x)

doğrultusundaki dipol moment p_+ değeri p'_+ değerine artarken, $(-x)$ doğrultusundaki dipol moment p_- değeri ise p'_- değerine azalacaktır (Şekil 2.23 (b)). Bu durumdan sonra net dipol moment artık sıfır değildir. İyon başına net dipol moment dış elektrik alana bağlı olan $[(p'_+)-(p'_-)]$ ' dir.

Her bir iyon aynı zamanda pozitif yük merkezine göre uygulanan bir elektrik alanının varlığında yer değiştiren bir elektron merkezine sahiptir ve bu nedenle de katı maddenin kutuplanmasına katkıda bulunurlar. Eelektronik kutuplanma iyonik kutuplanmanın çok az miktarda da olsa artmasını sağlar. Ayrıca, iyonik kutuplanma için 10^{-13} - 10^{-12} sn'lik oldukça kısa bir süre yeterlidir.

Yönelme Kutuplanması

Bu kutuplanma türü genelde su, aseton ve alkol gibi polar sıvılarda ve HCl gibi polar gazlarda ortaya çıkmasının yanında sürekli dipol momente sahip katı yapılarda da ortaya çıkar. Bu tür kutuplanma sabit bir dipol momente sahip moleküllerin elektrik alan doğrultusunda yönelmeleri ile gerçekleştiği için dipolar kutuplanma olarak da bilinmektedir. İlk defa Debye tarafından incelenmiştir.



Şekil 2.24. Yönelme kutuplanması

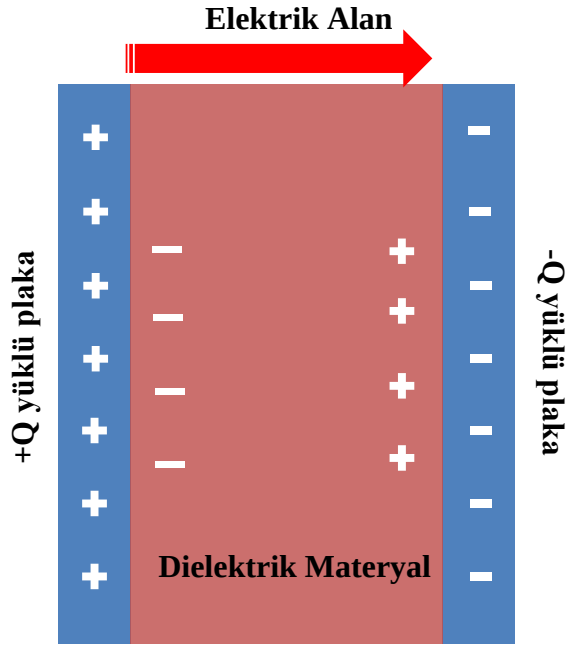
Yukarıda da bahsedildiği gibi bazı moleküller sürekli bir dipol momente sahiptir. Örneğin, HCl molekülü Cl^- iyonundan H^+ iyonuna doğru olmak üzere sürekli bir dipol momenti vardır. Sıvı veya gaz fazlarında, bu moleküller, bir elektrik alan olmadığında, termal çalkalamanın bir sonucu olarak rastgele yönlendirilir. Bir dış E elektrik alanı uygulandığında ise dış elektrik alan bir tork uygulayarak dipolleri kendisine paralel olarak hizalamaya çalışır

(Şekil 2.24) [46]. Bunun sonucunda da yönelme kutuplanması ortaya çıkacaktır. Cl^- ve H^+ yükleri zıt yönlerde yönelirler. Fakat Cl^- ve H^+ arasındaki katı bağ bu iyonları bir arada tutar. Yönelme kutuplanması (10^{-9} - 10^{-3} sn) zaman aralığında, radyo frekans bölgesinde meydana gelir.

Elektronik ve iyonik kutuplanmanın aksine yönelme kutuplanması güçlü bir şekilde sıcaklığa bağlıdır. İyonik ve elektronik kutuplanmanın ortak yönü yüklerin dönmeden birbirinden uzaklaşmasıdır. Yönelme kutuplanmasında kalıcı çift-kutuplar dış elektrik alan etkisiyle dönmeye zorlanırlar ve alanın hızlı değişimlerinde etkili değildirler. Düşük frekanslarda her üç kutuplanma da meydana gelir. Frekans arttıkça önce kalıcı sonra iyonik ve en son elektronik çift-kutuplar ki; son ikisi etkileşmeli çift-kutup olup dış alanın değişimini izleyemez duruma gelirler. Böylece statik dielektrik sabiti (ϵ_r) 1 değerine ulaşır [43].

Arayüzey-Uzay Yük Kutuplanması

Arayüz polarizasyonu, iki malzeme arasında veya bir malzeme içinde iki bölge arasında bir arayüzeyde bir yük birikimi olduğunda meydana gelir. Elektronik, iyonik ve yönelme kutuplanmalarının ortak özelliği, malzemenin sınır yüklerinin yer değiştirmesi ile etkilerinin ortaya çıkmasıdır. Uzay yükü ya da arayüzey kutuplanması diğerlerinden farklı olarak hareketli yüklerden oluşur. Diğer kutuplanma türlerinde atom ve moleküller kendilerini çevrelerinin kutuplanması ile değişikliğe uğrayan, temelde uygulanan dış alanı da içeren bir yerel alan etkisi altında bulurlar. Arayüzey kutuplanmasında ise malzemedeki uzay yüklerinin ya da dielektriğin arayüzeylerindeki yüzey yüklerinin birikiminde büyük ölçüde elektrik alan değişiklikleri etkili olmaktadır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25. Arayüzey yük kutuplanması

Polikristal malzemelerin birleşme yüzeylerinde serbest yükler birikebilir. Bu da ara yüzey kutuplanmasını meydana getirir. Biriken yüklerin elektrotlardaki görüntü yüklerini etkilemesi diğer kutuplanmalara da olumlu etki sağlar. Ara yüzey kutuplanması üzerine temel düşünce kristaller arası ayırıcı ara yüzeylerle bağlantılıdır. Bu ara yüzeyler serbest yüklerin bir kristalden diğerine hareketini engelleyici, kristalleri birbirinden izole edici bir rol üstlenir. Bu engeller, herhangi bir hava katmanı veya yüzeyin bir yalıtkan ile kaplanmasıyla oluşabilir. Bu konu ile ilgili çalışanlardan bir kısmı ara yüzey kutuplanmasının nedeninin, tek bir kristaldeki kusurlar (safsızlıklar, çatlaklar) üzerinde boşluk yüklerinin birikmesi olduğunu savunmuşlardır [43–45].

Ara yüzey yük kutuplanması için “malzemenin içerisine herhangi bir biçimde yerleşmiş uzay yüklerinin elektrotlar üzerindeki görüntü yüklerini etkilemesinin bir sonucudur” denilebilir. Bu kutuplanma mekanizması, düşük ve orta düzey frekanslarda dielektriklerin karakteristik davranışları üzerinde önemli rol oynamaktadır [48].

2.6.6. Dipol durulma kavramı

Bir numune elektrik alan içerisine konulduğunda numune için elektrik yerdeğiştirme (D) ve elektrik alan (E) zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Elektrik yerdeğiştirme

vektörünün (D) zamana bağıllığı (dipol durulma olayı) daimi dipollere sahip numunelerde görülür. Bu durum, hiç dipolü olmayan numunelerden farklıdır.

Bir kristale $t=0$ anında statik bir elektrik alan belirli bir süre boyunca uygulandığında kristaldeki dipoller ya elektrik alan yönünde düzenlenirler ya da son konfigürasyonlarını korurlar. Dipollerin elektrik alan yönünde düzenlenmesi statik durum olarak adlandırılır. Dipollerin konfigürasyonlarını korumaları ise elektrik alan ile kutuplanma vektörünün aynı fazda olmamalarından kaynaklanmaktadır.

Elektrostatikte E ile D arasındaki ilişki, homojen izotropik ve lineer dielektrikler için;

$$D = \epsilon E \quad (2.38)$$

ifadesi ile verilir. Burada ϵ zamandan bağımsız gerçek bir sabittir. Numune, sabit bir elektrik alan etkisinde kaldığında elektrik alan ve dolayısıyla elektrik yerdeğiştirme niceliğinin zamanla değişimi görülmez. Bu koşul statik durum koşuludur. Bu durumda,

$$D = \epsilon_s E \quad (2.39)$$

olur. Burada ϵ_s statik dielektrik geçirgenlik sabitidir.

Eğer dielektrik numuneye Δt süresince ΔE arttırmalarla elektrik alan uygulanırsa D’de ΔD kadar bir artış meydana gelir. Bu artış;

$$\Delta D = \epsilon_\infty \cdot \Delta E \quad (2.40)$$

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

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

$$E = E_1 \omega^{i\omega t} \quad (2.41)$$

olur. Elektrik yerdeğiştirme vektörü D, elektrik alana uymaya çalışır. Bu durum aralarındaki muhtemel faz kayması ile ifade edilir. Sonuçta, dielektrik geçirgenlik sabitinin aynı ve farklı fazda olmak üzere iki bileşeni bulunur. Bu bileşenler aşağıda verilen kompleks gösterimle ifade edilir [49].

$$D = \varepsilon^* E = (\varepsilon' - i\varepsilon'')E \quad (2.42)$$

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

$$\varepsilon^* = \left\{ \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \right\} + i \left\{ \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \right\} \quad (2.43)$$

ile ifade edilir [49]. Burada τ zaman sabiti olup dielektrik durulma zamanı olarak bilinir. Numuneye özgü bir nicelik olan τ sıcaklığa bağımlıken; ω ise sıcaklıktan bağımsızdır.

İlk terim gerçek terimdir. E ile çarpıldığında 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 belirtilmiş olan dielektrik geçirgenlik sabitinin aynı faz ile farklı fazlı yani gerçek ve sanal bileşenleri;

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.44)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \quad (2.45)$$

olur. Burada yukarıdaki eşitlikler yeniden düzenlenirse;

$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty} = \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.46)$$

$$\frac{\varepsilon''}{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty} = \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2.47)$$

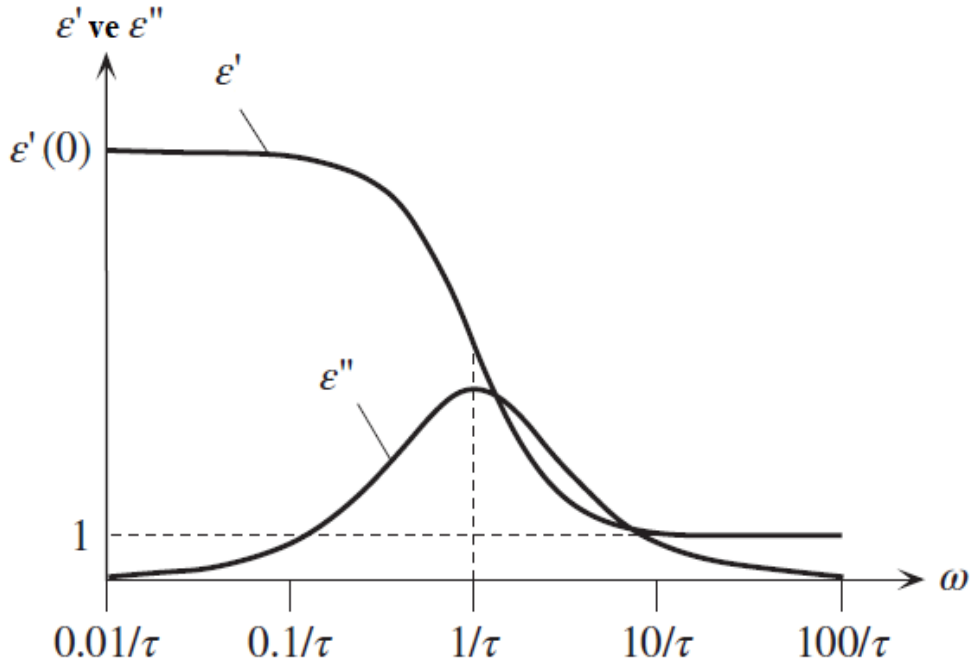
elde edilir [50]. Eş. 2.46'nın sağ tarafı frekans sıfırla sonsuz arasında değiştiğinde sıfır değerine yaklaşır.

Şekil 2.26' da dielektrik sabitinin gerçekte ve sanal kısmının frekansa bağlı grafiği verilmiştir [46]. Şekilden de görüldüğü gibi, çok düşük frekanslarda ($\omega \ll 1/\tau$) dielektrik sabitinin gerçekte bileşeni statik dielektrik sabitine yaklaşır. Yüksek frekanslarda ($\omega \gg 1/\tau$) ise gerçekte bileşen değerine yaklaşır. Orta frekanslarda ise iki faz bölgesi arasında düzgün geçişler olur. Dielektrik sabitinin sanal bileşeni için ise eğride $\omega = 1/\tau$ olduğu noktada belirli bir maksimum verdiği görülmektedir. Bu değer Debye kayıp piki olarak isimlendirilir.

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

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2.48)$$

ile ifade edilir [49, 50].



Şekil 2.26. Dielektrik sabitinin gerçek (ϵ') ve sanal (ϵ'') bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi

2.6.7. Dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp ölçüm tekniği

Dielektrik malzemelerin dışarıdan uygulanan elektrik alana duyarlı oluşu onların elektriksel özelliklerinin araştırılmasında önemlidir. Bu araştırma için bir dielektrik madde, bir elektriksel devre ile özdeşleştirilir. Plakaları arası bir dielektrik madde ile doldurulmuş paralel plakalı kondansatör yapısı, admittans ölçüm tekniği ile karakterize edilebilir.

Buna göre admittans (Y) ifadesi;

$$Y = G + i\omega C \quad (2.49)$$

olarak verilir. G iletkenlik, ω sürücü geriliminin açısal frekansı, C ise toplam kapasitedir. Bu ifadede C yerine $\epsilon^* C_0$ yazıldığında,

$$Y = G + i\omega(\epsilon^* C_0) \quad (2.50)$$

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

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (2.51)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadeye göre admittans tekrar düzenlenecek olursa,

$$Y = G + i\omega C_0(\varepsilon' - i\varepsilon'') = (G + \omega\varepsilon''C_0) + i\omega C_0\varepsilon' \quad (2.52)$$

olur. Buna göre admittansın gerçel ve sanal bileşenleri elde edilmiş olur. Empedans, admittansın tersine eşit olduğundan ($Z=1/Y$)

$$Z = \frac{1}{i\omega C + G} = \frac{1}{i\omega C_0\varepsilon^* + G} \quad (2.53)$$

ile ifade edilir. Eş. 2.51, Eş. 2.53'de yerine yazılırsa dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp, sırasıyla;

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} = \frac{Cd_i}{A\varepsilon_0} \quad (2.54)$$

$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{Gd_i}{\omega A\varepsilon_0} \quad (2.55)$$

olarak elde edilir [51]. Burada C ve G sırasıyla ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri ve $\omega (=2\pi f)$ ise açısal frekanstır. C_0 ifadesi $\varepsilon_0 A/d_i$ 'ye eşittir ve buradaki d_i ifadesi arayüzey tabakasının kalınlığıdır.

2.6.8. Elektrik modülüs formalizmi

Saf maddelerin çok düşük frekansta dielektrik geçirgenlikleri bulunur. Kil, polimer ve komposit polimerik malzemelerde safsızlıkların bulunması nedeniyle arayüzeyssel kutuplanma daima vardır. Genel olarak iletken katkılı sistemlerde arayüzeyssel kutuplanma, iletkenlikten dolayı belirsizleşir. Yüksek olabilen dielektrik geçirgenlik ve iletkenlik yüzünden ara yüzeyssel durulma görülmeyebilir.

Mc Crum, Read ve Williams [52] tarafından ortaya atılan elektrik modülü formalizmi ile bu zorluğun üstesinden gelebilmektedir. Elektrik modülü kullanmanın diğer bir avantajı da düşük frekanslardaki iletkenlik ve geçirgenliği büyük değerlerindeki değişiklikleri en aza indirmesidir.

Kompleks modüler elektrik modülü veya ters kompleks geçirgenlik, (M^*) aşağıdaki eşitlikle belirlenir [48, 50, 52, 53].

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = \frac{1}{\varepsilon' - i\varepsilon''} = \frac{\varepsilon'}{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} + i \frac{\varepsilon''}{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} \quad (2.56)$$

burada eşitliğin sol tarafı elektrik modülüsün gerçek (M') kısmı, sağ tarafı ise elektrik modülüsün sanal (M'') kısmıdır.

M' ve M'' ifadeleri ise;

$$M' = \frac{\varepsilon'}{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} \quad (2.57)$$

$$M'' = \frac{\varepsilon''}{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} \quad (2.58)$$

şeklinde tanımlanır.

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Çinko Oksit ve Polivinilpirolidon Hakkında Bazı Genel Bilgiler

Çinko Oksit (ZnO) ve Polivinilpirolidon (PVP) çeşitli metaller ile katkılanarak bunların yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin yanında elektriksel ve manyetik özelliklerini iyileştirilebilmektedir.

3.1.1. Çinko Oksit (ZnO) ve Ag katkılı Çinko Oksit (Ag-ZnO)

Çinko Oksit (ZnO), yapısında çinko (Zn) ve oksijen (O) atomlarını bulunduran, hekzagonal wurtzit kristal yapıya sahip bir yarıiletkenidir. ZnO, nanoteknoloji ve nanobilim için son zamanlarda teknolojiye kullanılan materyaller arasında önemli bir aday konumuna gelmiştir. ZnO yeryüzünde bolca bulunması, toksit olmayışı, kimyasal stabiliteye sahip olması ve görünür bölge ile yakın kızılötesi bölgede iyi bir şeffaflık göstermesinden dolayı Kalay Oksit (SnO_2) ve Titanyum Dioksit (TiO_2) gibi diğer rakipleri üzerinde hem özel bir avantaja sahiptir hem de umut verici bir fotokatalizördür [54, 55]. Direk ve geniş bant aralığı (düşük sıcaklıklarda 3,44 eV, oda sıcaklığında 3,37 eV), yüksek serbest bağlanma enerjisi (60 meV), yüksek yansıtma indeksi (1.99), yüksek ergime sıcaklığı (1975 °C) ve yüksek iletkenliği ile ZnO, optik ve elektriksel özelliklerinin yanında düşük maliyetiyle dikkat çekmektedir. Çizelge 3.1’de ZnO’ya ait farklı özellikler verilmiştir. Ayrıca ZnO optik, mekanik ve biyomedikal cihazlar, gaz ve kimyasal sensörleri, güneş hücrelerinde saydam elektrotlar, fotokataliz ve UV fotoiletken dedektörler gibi birçok optoelektronik cihaz uygulamalarında umut verici bir malzeme olarak kullanılmaktadır [56–60]. ZnO fotokatalizörlerin çok büyük avantajına sahip olmasına karşın yüksek fotojenlenmiş taşıyıcıların rekombinasyon hızı ve dar spektrum aralığı, fotokatalizörler alanındaki geniş uygulamasını sınırlar.

Çizelge 3. 1. ZnO'ya ait farklı özellik ve değerleri

Özellik	Değer
Kimyasal formülü	ZnO
Kristal yapısı	Wurtzit
Örgü sabitleri	a=325 Å ve c=521 Å
Serbest bağlanma enerjisi	60 meV
Deşik etkin kütlesi	0,59
Elektron etkin kütlesi	0,24
Bant aralığı	3,37-3,44
Yansıtma katsayısı	2,008-2,029
Dielektrik sabiti	8,656
Deşik mobilitesi	180 cm ² /V.s
Elektron mobilitesi	200 cm ² /V.s
Erime noktası	1975 °C
Yoğunluk	5,606 g/cm ³
Doğrusal genleşme katsayısı	a ₀ =6,5x10 ⁻⁶ c ₀ =3,0x10 ⁻⁶

Genel olarak ZnO iki tür emisyon sergiler; bunlardan birisi 370-380 nm'de eksitonik morötesi (UV), diğeri ise 510-530 nm'de bir maksimum değer noktasına sahip görünür emisyonudur [61, 62]. Ayrıca mavi/UV bölgesinde lazer diyot, foto dedektör ve ışık yayan diyot gibi optoelektronik uygulamalarda kullanılmasının yanında, yeşil-beyaz spektrum bölgesinde güçlü lüminesans özelliğinden dolayı fosfor uygulamalarında da kullanılmaktadır. ZnO tüm asitlerde ve alkalilerde kolayca kaldırılabilir ve bu nano boyutlu cihazların üretimi için iyi bir fırsat sağlar [61]. Ek olarak, ZnO GaN'a yakın bir kristal yapıya ve örgü parametrelerine sahip olduğu için yüksek kaliteli GaN filmlerinin epitaksiyel büyümesi için bir alt tabaka olarak kullanılabilir [61].

ZnO ince filmlerinin fiziksel özellikleri katkılama, tavlama, biriktirme yöntemleri ve sentez parametreleri ile belirlenebilir. Bu faktörler arasında, ZnO'nun bazı soy metaller ile katkılanması, kristal yapılarında herhangi bir değişiklik yapmadan yapısal, morfolojik, optik, elektriksel ve manyetik özelliklerini iyileştirmek için etkili bir yöntem sunabilir [54]. Yani, ZnO örgüsüne bazı soy metaller katkılanarak uygulama özellikleri ayarlanabilir. Bu yöntem aracılığıyla ZnO'nun fotokatalitik aktivitesi, yüzey yükü transferinin yoğunlaştırılması ve/veya elektron ve deşiklerin rekombinasyonunun azaltılmasıyla artırılabilir [63]. Örneğin; ZnO'ya Al katkılanarak onun iletkenliği artırılabilir, Cr katkılarak direnci düşürülebilir, Mn katkılanması ferromanyetik özellik katarken Sülfür katkılar UV emisyon yoğunluğunu önemli ölçüde azaltılabilir.

Katkılanan metaller arasında en dikkat çekenler Bakır (Cu), Altın (Au) ve Gümüş (Ag) metallerinin de bulunduğu 1B grubu elementleridir [64]. Bunlar arasında Ag, ZnO'da yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri arttırıcı en uygun aktivatör olarak bulunmuştur [54, 65, 66]. Antibakteriyel ve anti-toksit bir metal olan Ag diğer soy metallerle karşılaştırıldığında yüksek termal iletkenliğe, iyi elektriksel iletkenlik ve düşük maliyeti ile geniş kullanım alanına sahiptir [62, 67]. Ag iyonları ZnO'da alıcı atom olarak görev alır. Ag iyonlarının eklenmesi yarıiletken enerji aralığında azalmaya sebep olur ve bundan dolayı ışık emisyonu artabilir [68].

Ag katkılı ZnO, Atomik darbeli lazer birikimi (PLD) [69], RF magnetron sıçraması [70], atomik tabaka biriktirme (ALD) [71], elektrokimyasal biriktirme [72], sprey piroliz tekniği [73] ve sol-gel yöntemi [74] gibi çeşitli yöntemler kullanılarak hazırlanabilir.

3.1.2. Polivinilpirolidon (PVP)

Nano-parçacık sentezinde geniş bir şekilde kullanılmasının yanında iyi bir hidrofilikliği ve biyoyumluluğa sahip sentetik bir polimer olan Polivinilpirolidon aynı zamanda PVP veya Povidone olarak da adlandırılır [75–77]. Koruyucu cihazlar, yapıştırıcılar, deterjanlar, boyalar, tıbbi cihazlar ve biyolojik mühendislik malzemelerinin yanında tekstil, kâğıt, yapıştırıcı, plastik, kozmetik ve gıda endüstrileri imalatı gibi sayısız endüstriyel uygulama alanında kullanılan bir polimer [78–82]. PVP genellikle N-vinilpirolidonun (NVP) çözelti polimerizasyonu ile hazırlanır [83]. C=O, C-N ve CH₂ fonksiyonlarına sahip iyonik olmayan bir polimerdir [84]. PVP'ye ait bazı özellikler aşağıda listelenmiştir. Bunlar [75, 82, 85–89];

- Toksik olmayan hidrofilik bir malzemedir ve biyolojik olarak çoğu organik çözücünde çözünabilir bir sentetik polimerdir.
- Düşük dielektrik kayba sahip olmasının yanında iyi bir termal kararlılığı da vardır.
- Ucuz maliyetli, biyoyumluluğu olan ve mükemmel film oluşturma özelliği vardır.
- Moleküler ağırlığı 40.000'den 360.000'e kadar değişmektedir.
- İyi çevresel stabilizeye ve kolay işlenebilirliğe sahiptir.

PVP, çözücülerin içinde bulunan ve birbirleriyle etkileşime giren hidrofobik karbon zincirlerinden kaynaklanan itici kuvvetler vasıtasıyla nano-parçacık birikimini önleyen

mükemmel bir dengeleyicidir [84]. Ayrıca nano-parçacıkların çoklu hidroksil sentezinde dengeleyici ve şekillendirici bir ajan olarak yaygın şekilde kullanılır [82]. Bu nano-parçacıkların örnekleri arasında plazmonik elementler (Ag, Au, Cu) [90–92], katalitik elementler (Pd, Pt) [93, 94], manyetik elementler (Co, Ni) [95, 96] ve bimetallik bileşimler (Au–M, Pt–M) [97, 98] vardır. Çoklu hidroksil gruplarındaki dağılımlarda, PVP güçlü bir şekilde Ag'nin {100} yüzeylerine tutunur ve Ag nano-fiber elde etmek için <111> yönünde büyüme sağlar [82].

3.2. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Diyotun Oluşturulması

Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun oluşturulmasında kristal temizleme, omik kontak, arayüzey tabakası ve doğrultucu kontak oluşturulması olarak dört adımda gerçekleştirildi.

3.2.1. Kristal temizleme

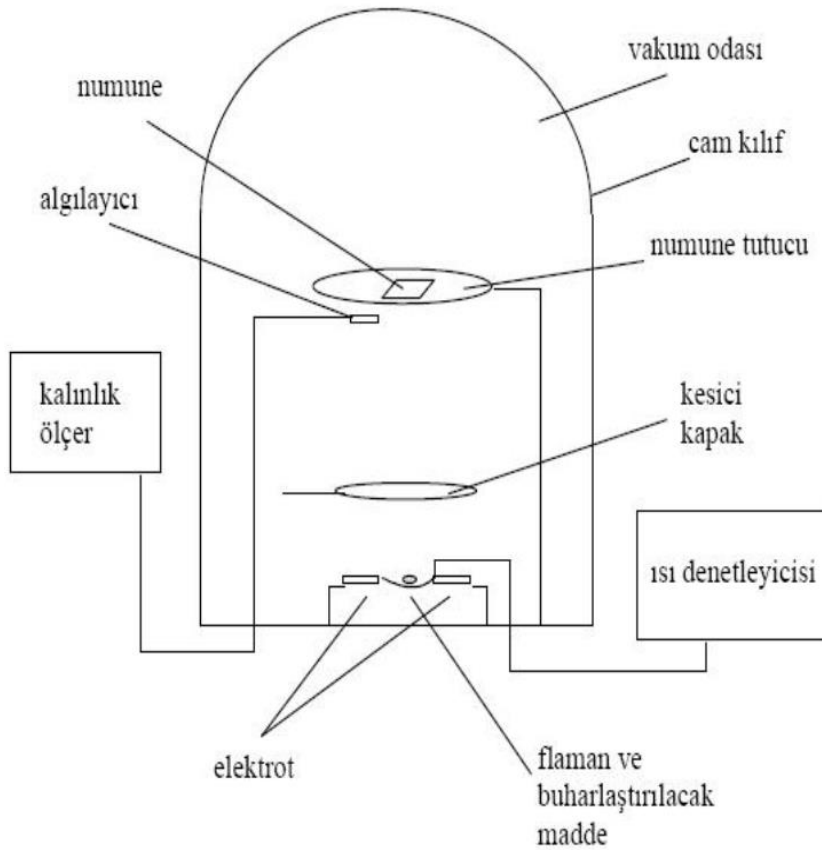
Schottky diyot fabrikasyonunda aygıtların verimli çalışabilmesi için yarıiletken yüzeyi çok temiz olmalıdır. İyi temizlenmemiş bir yarıiletkende laboratuvar ortamında bazı organik kirlilikler veya kontak oluşturma sırasında çok sayıda safsızlıklar oluşabilir. Bu yarıiletkenler kimyasal olarak iyi temizlenerek çok sayıda yüzey kusuru ve organik kirlilikler önlenabilir. Bu tip kirlilikler ultrasonik banyo kullanılarak kirlilik minimum seviyeye indirgenebilir. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotu oluşturulurken (100) yönelimli, 1-10 Ωcm öz dirençli, 300 μm kalınlıklı, 2" çaplı ve P-katkılı n-Si tek kristal yapraklar kullanıldı. Kullanılan kristaller yurt dışından Crys.Tec. firmasından, fabrikasyon yöntemiyle bir yüzeyi parlatılmış olarak satın alınmıştır. Kimyasal temizleme için aşağıdaki adımlar sırasıyla uygulandı.

1. n-Si kristali Sülfirik Asit (H_2SO_4): Hidrojen Peroksit (H_2O_2): Deiyonize su (H_2O) (=3:1:1) karışımında 60 saniye boyunca ultrasonik banyoda yıkandı.
2. Daha sonra n-Si kristali Hidroklorik Asit (HCl): Deiyonize su (H_2O) (=1:10) karışımında 5 dakika boyunca ultrasonik banyoda yıkandı.
3. n-Si kristali 18-M Ω öz dirençli deiyonize suda 5 dakika boyunca ultrasonik banyoda yıkandı.

4. Kimyasal olarak temizlenen n-Si kristal yüzeyinde herhangi bir doğal oksitlenme olmasını önlemek için, n-Si kristaller kuru azot (N_2) ile iyice kurutulduktan sonra omik kontak oluşturmak için hemen metalde buharlaştırma sistemine alındı.

3.2.2. Omik kontağın oluşturulması

Omik ve doğrultucu kontak oluşturmak için Şekil 3.1'deki sistem kullanıldı.



Şekil 3.1. Metal buharlaştırma sisteminin şematik diyagramı

Omik kontak oluşturmak için, kimyasal olarak temizlenen n-Si arka mat yüzeyine (~99,999%) saflıkta altın (Au) kaplamak için yarıiletken hemen metal buharlaştırma sistemine alındı. $\sim 10^{-6}$ Torr basınç altında üzerinden akım geçirilen molibden pota yardımı ile metal buharlaştırıldı. Düşük dirençli bir omik kontak elde etmek için yaklaşık olarak 550 °C'de N_2 ortamında 5 dakika tavlansak Au metalinin yarıiletken içine çöktürülmesi sağlandı ve yaklaşık 150 nm kalınlığında Au omik kontak elde edildi.

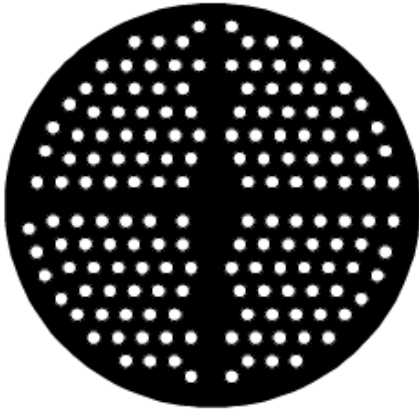
3.2.3. (Ag-ZnO/PVP) arayüzey tabakanın oluşturulması

Ag-ZnO/PVP arayüzey tabakasını sentezlemek için gümüş nitrat (AgNO_3), Polivinilpirolidon (PVP) ve çinko asetat kimyasal olarak kullanıldı. Çinko asetatın 0,87 gr 20 ml çift damıtılmış su içerisinde bir deney tüpü içerisinde çözündürüldü. Benzer şekilde 0,67 gr gümüş nitrat ta bir deney tüpü içerisinde 20 ml damıtılmış su vasıtasıyla çözündürüldü. Daha sonra çinko asetatlı çözelti ile gümüş nitratlı çözelti birleştirildi. Bu birleşim bir santrifüj yardımıyla iyice karıştırıldı. Karıştırıldıktan sonra, bu karışımın 0,1 gr, başka bir deney tüpünde gümüş nitrat ve çinko asetat çözeltisine benzer olarak hazırlanan PVP çözeltisine eklendi. En son olarak elde edilen bu Ag-ZnO/PVP çözeltisi bir ultrasonik banyo kullanılarak iyice karıştırıldı.

Omik kontağı yapılmış olan n-Si yarıiletkeni ön parlak yüzeyi yukarı gelecek şekilde spin kaplama sistemine yerleştirildi. Elde edilen Ag-ZnO/PVP arayüzey tabakası n-Si'nin parlak tarafına bir damla olacak şekilde damlatılarak arayüzey tabakasının n-Si üzerine kaplanması sağlandı.

3.2.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Doğrultucu kontak yapmak için, hazırlanan arayüzey (Ag-ZnO/PVP) tabakalı yarıiletken, metal buharlaştırma sistemine alınarak burada arayüzey kaplı yüzeyi üzerine 1 mm çapında (Şekil 3.3) ve 1500 Å kalınlığında yine yüksek saflıkta (~99,999%) Au dairesel kontaklar veya diğer adıyla doğrultucu kontaklar aynı yüksek vakum metal buharlaştırma sisteminde 6×10^{-6} Torr'da gerçekleştirildi. Böylece Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Diyot yapıların fabrikasyonu tamamlanmış oldu.



Şekil 3.2. Doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maske

Yapımı tamamlanan Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Diyot yapıların şematik diyagramı Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Diyot yapıların şematik diyagramı

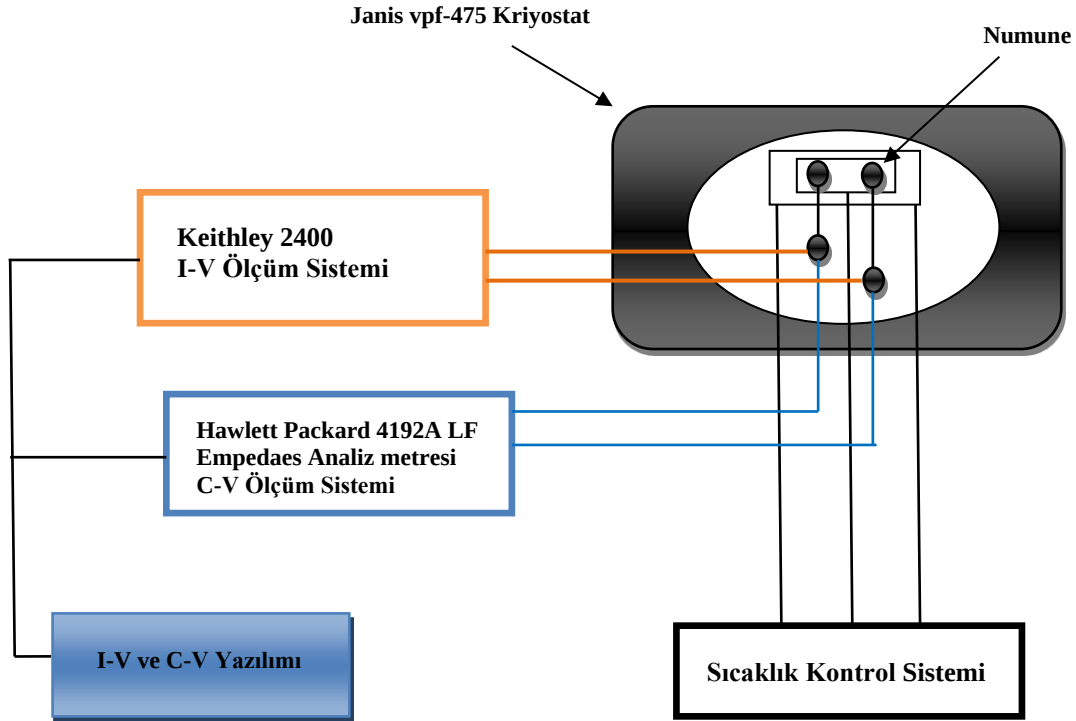
3.3. Deneysel Ölçüm Sistemi

Elektriksel karakteristikler için Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinde Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı kullanılırken, Kapasitans-Gerilim (C-V) ve İletkenlik-Gerilim (G/ω-V) ölçümlerinde ise 5 Hz-13 MHz aralığında $\pm 0,15\%$ hassasiyetle ölçüm yapabilen Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analiz metre (Resim 3.1) kullanıldı. Tüm

bu ölçümler Hawlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 ac/dc çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek Janis vpf-475 kriyostat içinde $\sim 10^{-3}$ Torr basınç altında gerçekleştirildi. Kapasitans-gerilim (C-V) , iletkenlik-gerilim (G/ω -V) ve akım-voltaj (I-V) ölçümlerinin yapıldığı deneysel ölçüm sistemleri şematik olarak Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Resim 3.1. Empedans analizörü



Şekil 3.4. Kapasitans-gerilim (C-V), iletkenlik-gerilim (G/ω -V) ve akım-voltaj (I-V) ölçümlerinin gerçekleştirildiği ölçüm düzeneği

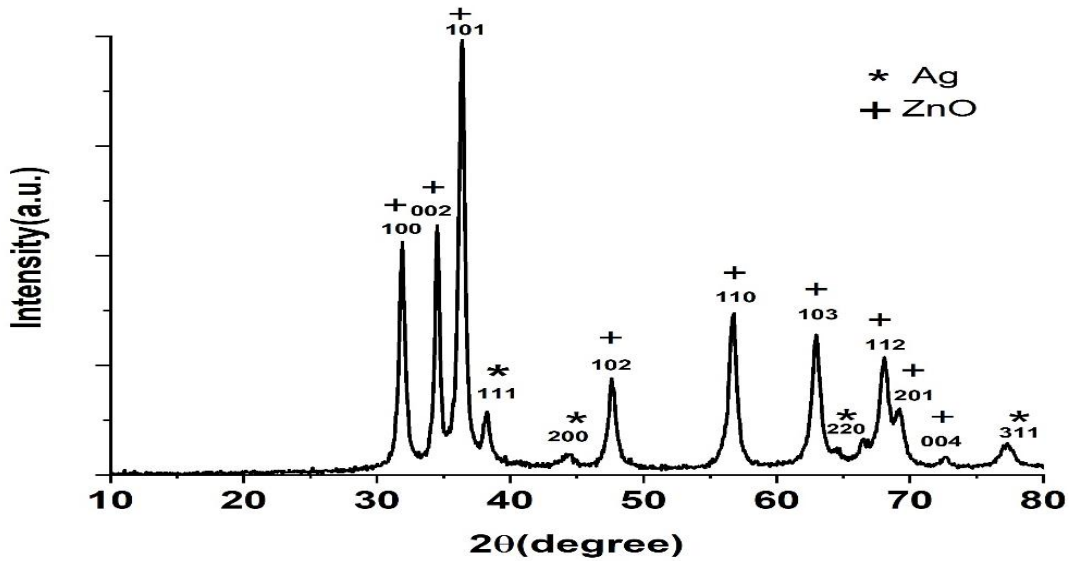
4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Diyotun Yapısal Özellikleri

XRD, SEM ve EDX ölçümleri kullanılarak arayüzey tabakasının (Ag-ZnO/PVP) yapısal özellikleri incelenebilir.

4.1.1. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun XRD analizi

X-ışınları malzemelerin tanımlanmasını, yapısal analizlerini ve karakterize edilmesini sağlayan temel yöntemlerden birisidir. Ag-ZnO nano-parçacık için X-ışını Kırınımı (XRD) sonucu Şekil 4.1’de verilmiştir. Burada XRD ölçümleri 10 ile 80 arasında değişen 2θ açısında taranmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi, XRD tepe noktalarını gösteren model, Ag ve ZnO nano-parçacıkların verileri referans kodu 87-0717 (Ag) ve 80-0075 (ZnO) ile iyi bir şekilde eşleşmektedir [35].



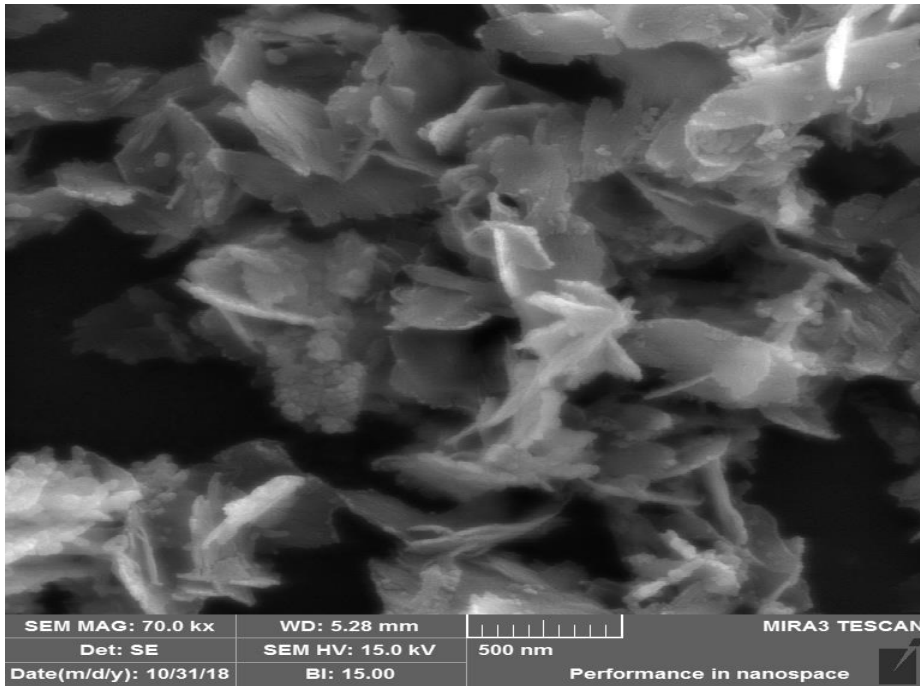
Şekil 4.1. Ag-ZnO nano-parçacıkların XRD analizi

4.1.2. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun SEM ve EDX analizi

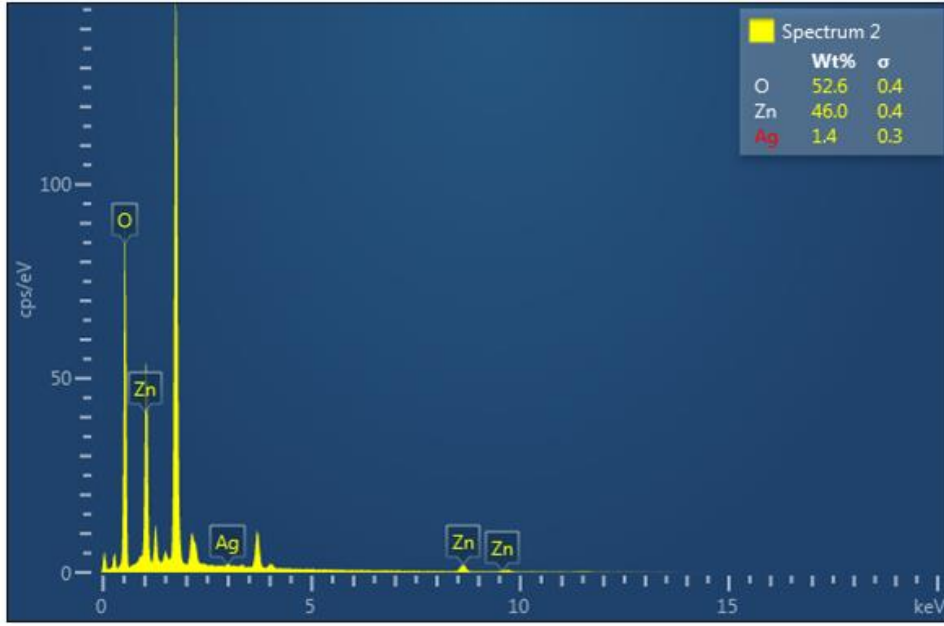
Hazırlanan Ag-ZnO nano-parçacıkların yüzey morfolojisi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılım X-ışını (EDX) ile incelendi. Elde edilen SEM ve EDX görüntüleri

Resim 4.1 ve Şekil 4.2’de sırasıyla verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi yüzey morfolojisi iyi bir dağılım göstermekte. Bununla birlikte Zn, O ve Ag malzemelerinin stokiyometrik olmayan oranlarla varlığını da doğrulamaktadır.

EDX sonucu gösteriyor ki Oksijence zengin olan bu karışımda Zn, O ve Ag 46:52,6:1,4 atomik yüzde oranında bir dağılım göstermektedir. Zhang [99] ve Hemalatha’a [100] göre, katkılı ZnO malzemesinin konsantrasyonundaki bir artış, arayüz alanında, bir miktar yük taşıyıcısına (elektron ve deşikler) ve polimerin geçirgenliğinde bir miktar artışa neden olmasının yanında, metal-oksit katkılı polimerlerin dielektrik ve optik özellikleri de iyileştirebilmektedir.



Resim 4.1. Ag-ZnO nano-parçacıkların SEM görüntüsü



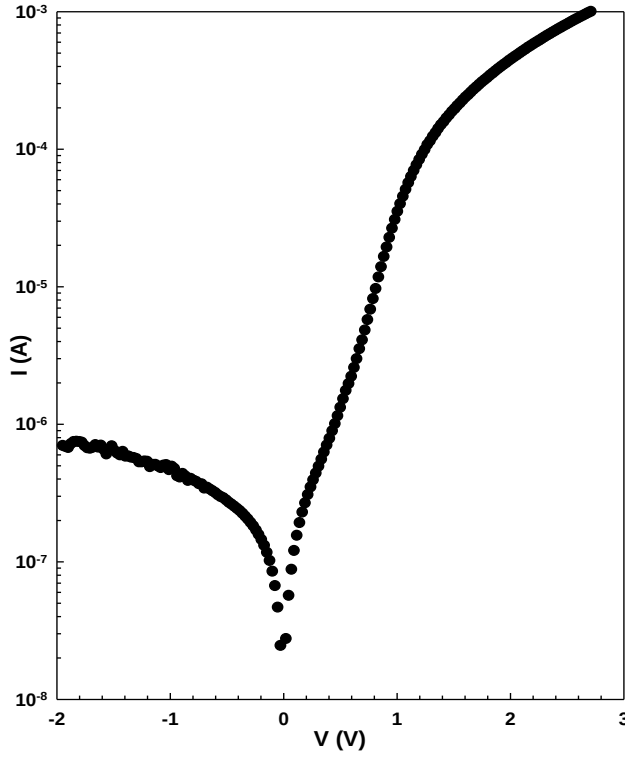
Şekil 4.2. Ag-ZnO nano-parçacıkların EDX sonuçları

4.2.Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Diyotun Elektriksel ve Dielektriksel Özellikleri

Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun I-V, C-V ve G/ω -V ölçümleri kullanılarak elektriksel özellikleri incelenirken, C-V ve G/ω -V ölçümleri kullanılarak dielektriksel hesaplamaları yapılarak dielektrik özellikleri incelenir.

4.2.1. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun I-V analizi

Şekil 4.3, Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $\ln I$ -V grafiğini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi $\ln I$ -V grafiği iyi bir doğrultma özelliği göstermektedir. Ters beslem akımı gerilime zayıf bir şekilde bağlıken, doğru beslem akımı uygulanan gerilim ile üstel olarak artmaktadır. Ayrıca $\ln I$ -V lineer bir davranış gösteriyorken, seri direnç ve arayüzey tabakasının etkisiyle ~1,5 V civarında lineerlikten sapmaktadır [7, 15, 35].



Şekil 4.3. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun LnI-V grafiği

Termiyonik Emisyon (TE) teorisine göre akım (I) ve gerilim (V) arasındaki ilişki aşağıdaki gibi tanımlanır [7, 15];

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

Burada $V_D = V - IR_s$ seri direnç (R_s) üzerine düşen gerilimdir, I_0 doyma akımıdır ve sıfır gerilim altında $\ln(I)$ -V'nin lineer kısmının düşey eksenini kestiği noktadan elde edilir. A^* Richardson sabiti (n-Si: $112 \text{ A.cm}^{-2}.\text{K}^{-2}$, p-Si: $32 \text{ A.cm}^{-2}.\text{K}^{-2}$), n idealite faktörü ve Φ_{B0} ise engel yüksekliğidir. Φ_{B0} aşağıdaki eşitlik yardımıyla elde edilir [15];

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

Burada A diyotun alanı, A^* Richardson sabiti ve k Boltzmann sabitidir. Φ_{B0} değeri Eş. 4.2, diyotun alanı A ve doyma akımı I_0 deneysel değeri kullanılarak elde edilir.

İdealite faktörü n ise bir diyotun kalitesinin bir ölçüsüdür ve $\ln(I)$ - V 'nin eğimi ve Eş. 4.3 kullanılarak elde edilir [15,101];

$$n = \frac{q}{kT} \frac{d(V - IR_s)}{d(\ln(I))} \quad (4.3)$$

n , I_0 ve Φ_{B0} deneysel değerleri sırasıyla 5,53; $4,88 \times 10^{-8}$ A ve 0,703 eV olarak bulunmuştur. Burada görülüyor ki idealite faktörü n engel yüksekliğinin uygulama gerilimine bağlı olması, M/S arayüzey hal yoğunluklarının dağılımı, yarıiletkenin nötral bölgesinin seri direncinin büyük olması, hayali kuvvetten dolayı engel düşmesi, tüketim tabakası genişliği (W_D), tünel mekanizması, arayüzey tabakasının dielektrik değeri (ϵ_i), arayüzey/n-Si arasında yerleşmiş arayüzey durumlarından (N_{ss}) dolayı ideal durumundan ($n=1$) sapmıştır [7, 8, 15, 101].

Schottky tipi aygıtlarda, direnç (R_i) uygulanan gerilimin bir fonksiyonudur. Ama seri direnç (R_s) gerçek değeri yeterli derecede yüksek gerilimlerde ortaya çıkmaktadır. R_s varlığı hem doğru öngerilim I-V hem de C-V grafiklerinde bükülmeye sebep olmaktadır.

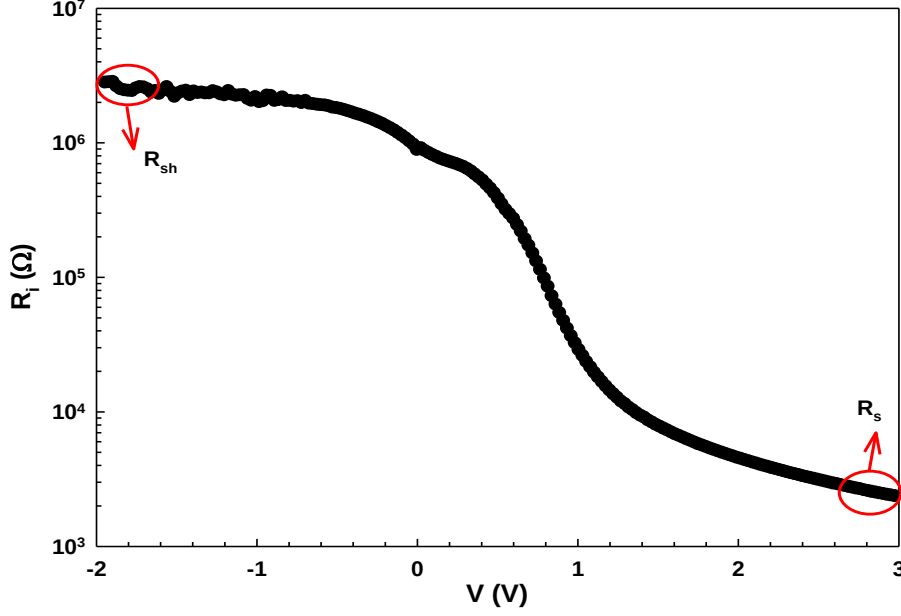
Yapının R_s değeri hem I-V hem de C-V değerleri kullanılarak hesaplanabilmektedir. R_s hesaplamalarında Ohm Kanunu, Cheung Fonksiyonu, Norde Methodu ve Nicollian–Brews yöntemleri bulunmaktadır [15, 29, 102, 103]. Bunlardan Nicollian–Brews ölçülen C-V verilerini kullanarak R_s değerini bulurken diğer üç yöntemde I-V verilerini kullanılır.

Ohm Kanunu: Bu yöntemde R_i değeri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir [15].

$$R_i = \frac{V}{I} \quad (4.4)$$

Burada R_s değeri yeterli derecede yüksek gerilimlerde hesaplanan R_i değerine eşittir. Ohm yasası kullanılarak elde edilen R_i - V grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir. Yeterli derecede yüksek gerilimlerde elde edilen R_s değeri 2,4 k Ω olarak hesaplanmıştır. Değerin yüksek olması

doğrultucu/omik kontak, kirlilik, prob teli ve katkı atomları konsantrasyonunun homojensizliğine atfedilir [35].



Şekil 4.4. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun R_d -V grafiği

Cheung Fonksiyonu: Bu fonksiyon kullanılarak yalnızca R_s değeri değil aynı zamanda n ve Φ_B değeri de hesaplanabilir. Bu değerler Eş. 4.5 ve 4.6 yardımıyla doğru öngerilim I-V grafiğinin aşağı doğru bükülmeye başladığı bölgedeki verilerin lineer davranışı kullanılarak hesaplanabilmektedir [102].

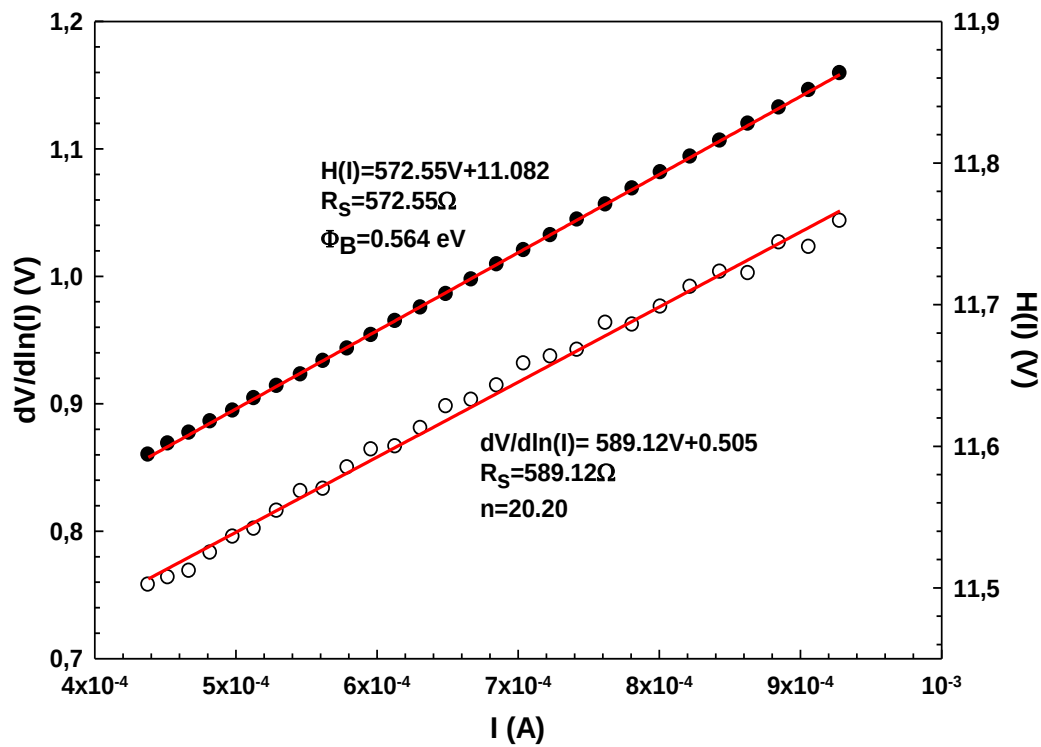
$$\frac{dV}{d(\ln(I))} = n \left(\frac{kT}{q} \right) + IR_s \quad (4.5)$$

$dV/d(\ln(I))$ 'nın I 'ya göre grafiği çizildiğinde lineer bir bölge elde edilir. Bu lineer bölgenin eğiminden R_s seri direnci, düşey ekseni kestiği noktadan da n idealite faktörü değerleri bulunur [102].

$$H(I) = V - n \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) = n\Phi_B + IR_s \quad (4.6)$$

$H(I)$ 'nın I 'ya göre grafiği çizildiğinde lineer bir bölge elde edilir. Bu lineer bölgenin eğiminden R_s seri direnci ve düşey eksenini kestiği noktadan da Φ_B engel yüksekliği hesaplanabilmektedir.

Eş. 4.5 ve 4.6 kullanılarak Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotu için elde edilen $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Eş. 4.5 ve $dV/d\ln(I)$ - I eğimi kullanılarak hem n hem de R_s hesaplanabilir. n ve R_s için deneysel sonuçlar 20,20 ve 589,12 Ω olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Eş. 4.6 ve $H(I)$ - I eğimi kullanılarak da hem Φ_B hem de R_s hesaplanabilir. Φ_B ve R_s için deneysel sonuçlar 0,564 eV ve 572,55 Ω olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I grafiği

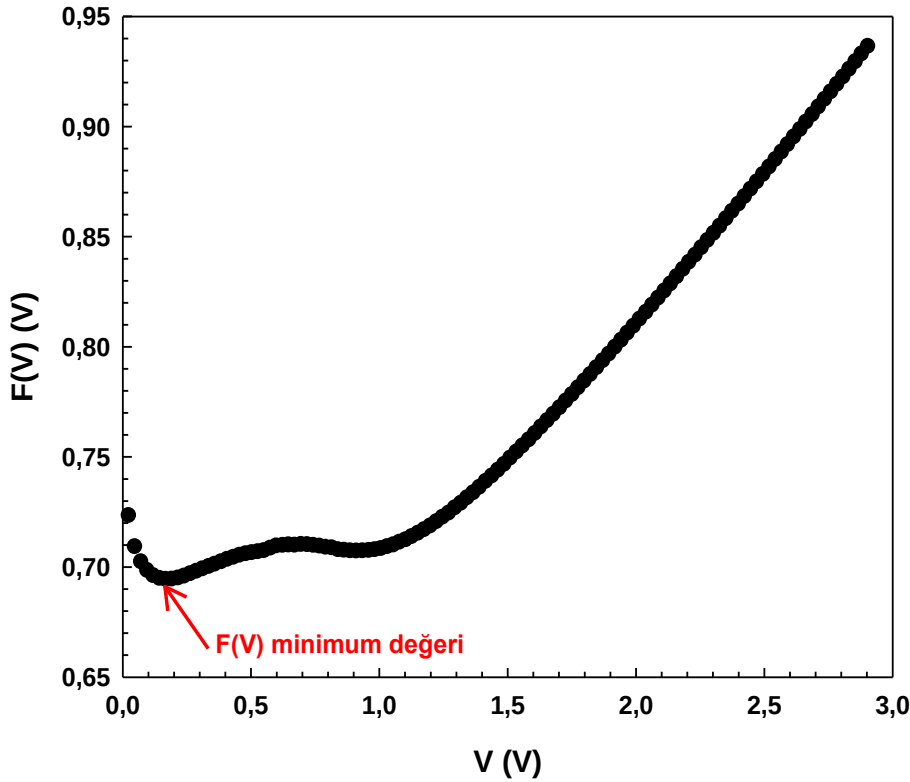
Norde Metodu: Norde methodu I - V ölçümlerini kullanarak R_s ve Φ_B değerini bulmamızda yardımcı olan diğer bir hesaplama yöntemidir. Norde'ye göre [103];

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T}\right) \quad (4.7)$$

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.8)$$

$$R_s = \left(\frac{kT}{qI} \right) (\gamma - n) \quad (4.9)$$

eşitlikleri kullanılır. Burada gama (γ) idealite faktöründen büyük en küçük tam sayı, $I_{\min}$ ve V_0 sırasıyla Norde fonksiyonundaki minimum akım ve minimum gerilim değerleridir. Eş. 4.7 kullanılarak elde edilen Norde fonksiyonu Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Eş. 4.8 ve 4.9 kullanılarak R_s ve Φ_B değerleri sırasıyla 51,4 k Ω ve 0,697 eV olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $F(V)$ - V grafiği

Cheung Fonksiyonundan hesaplanan n değeri TE'den hesaplanan değerden oldukça farklıdır. Bu fark N_{ss} , arayüzeyin dielektriği (ϵ_i) ve onun kalınlığı (δ) yanında R_s , hesaplamada kullanılan metot farkı (farklı voltaj bölgelerine karşılık gelmesi), engelin homojensizliğine dayanmaktadır [35, 104–106]. Ayrıca Cheung, TE ve Norde metodundan hesaplanandan engel yükseklikleri ve R_s değeri nispeten birbirlerinden farklıdır. Çünkü TE

doğru öngerilimlemedeki I-V eğrisinin lineer kısmını, Norde doğru öngerilimlemedeki I-V eğrisinin tamamındaki verileri ve Cheung fonksiyonu ise I-V eğrisinin bükülmeye başladığı yerdeki lineer olmayan kısmı kullanır. Bundan dolayı Norde metodundan elde edilen R_s değeri Cheung fonksiyonundan elde edilen değerden oldukça büyüktür [107].

Nicollian–Brews Metodu: Bu metoda dair bilgi ve hesaplamalar Bölüm 4.2.2’de bulunabilir.

Arayüzey durumları (N_{ss}), bir diyodun ideal olmayan davranışına sebep olabildiği için diyodun performansını belirleyebilir. Yarıiletken ve fabrikasyon süreçlerinin yüzey temizliği sırasında çoğu N_{ss} metal/yarıiletken (M/S) arayüzeyde olabilir. Bu N_{ss} aynı zamanda yapıların empedans ve I-V karakteristiği üzerinde etkiye sahiptir. Card ve Rhoderick [101] hem engel yüksekliği hem de n , N_{ss} varlığından dolayı I-V grafiğinin lineer kısmından sonra uygulanan gerilimin bir fonksiyonu haline gelir. Onlara göre, idealite faktörü n sonradan oluşturulmuş veya kendiliğinden oluşmuş arayüzey tabakası, N_{ss} ve R_s ’den dolayı Schottky diyotlar için birim değeri olan bir ($=1$) den büyüktür. Bu durumda, uygulanan gerilime bağlı n ve R_s aşağıdaki gibi tanımlanır [101].

$$n(V) = \frac{q}{kT} \left(\frac{(V - IR_s)}{\ln \left\{ \frac{I}{I_0} \right\}} \right) = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left(\frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right) \quad (4.10)$$

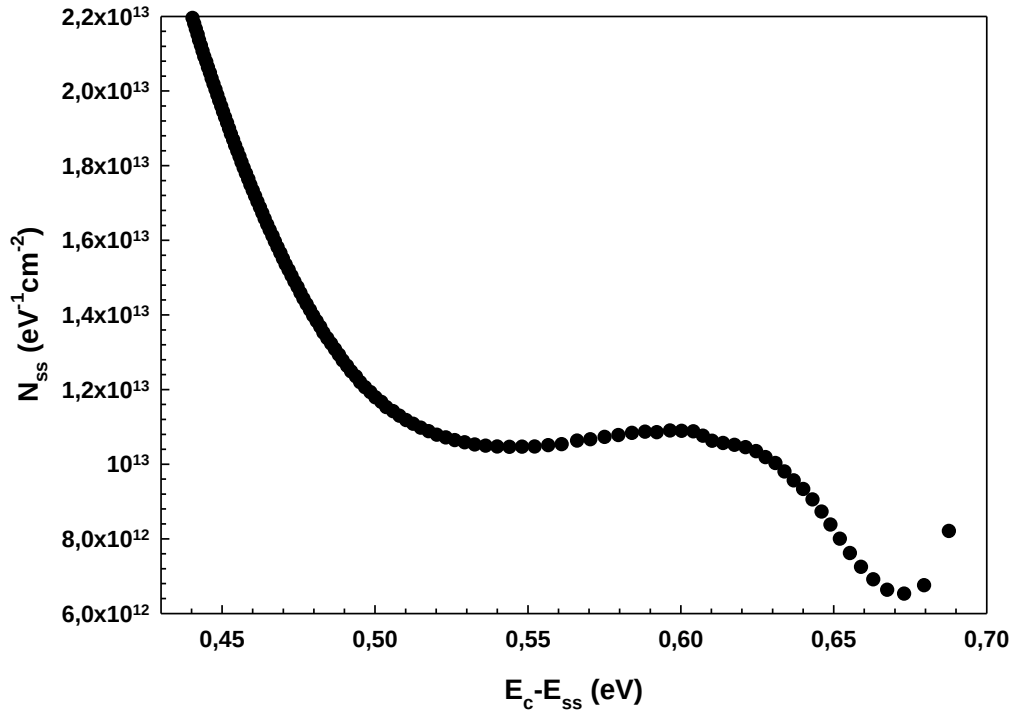
$$\Phi_e = \Phi_{B0} + \beta(V - IR_s) = \Phi_{B0} + \left(1 - \frac{1}{n(V)} \right) (V - IR_s) \quad (4.11)$$

Burada δ arayüzeyin kalınlığı, W_D tüketim bölgesi genişliği, ϵ_i arayüzeyin dielektrik sabiti ve ϵ_s ise yarıiletkenin dielektrik sabitidir. W_D ve δ değerleri yeterli derecede yüksek frekanstaki (~ 1 MHz) C-V verilerinden elde edilir. n-tipi yarıiletken için N_{ss} enerji seviyesi aşağıdaki gibi tanımlanır [7, 15, 101].

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.12)$$

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left\{ \frac{\varepsilon_i}{d} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right\} \quad (4.13)$$

N_{ss} enerji dağılımı Rhoderick-Williams [7], Card-Rhoderick [101] ve Eş. 4.10-4.13 kullanılarak hesaplanabilir. N_{ss} 'in enerji dağılım grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi N_{ss} değeri yasak enerji aralığının (E_g) orta kısmından iletkenlik bandına artan E_c-E_{ss} değeri ile kadar üstel olarak artmaktadır. Uygulanan öngerilim ile N_{ss} dağılım yoğunluğu değişmektedir. N_{ss} değeri ($E_c-0,69$) eV'da $8,19 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 'den ($E_c-0,44$) eV'da $2,2 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 'a kadar değişmektedir.

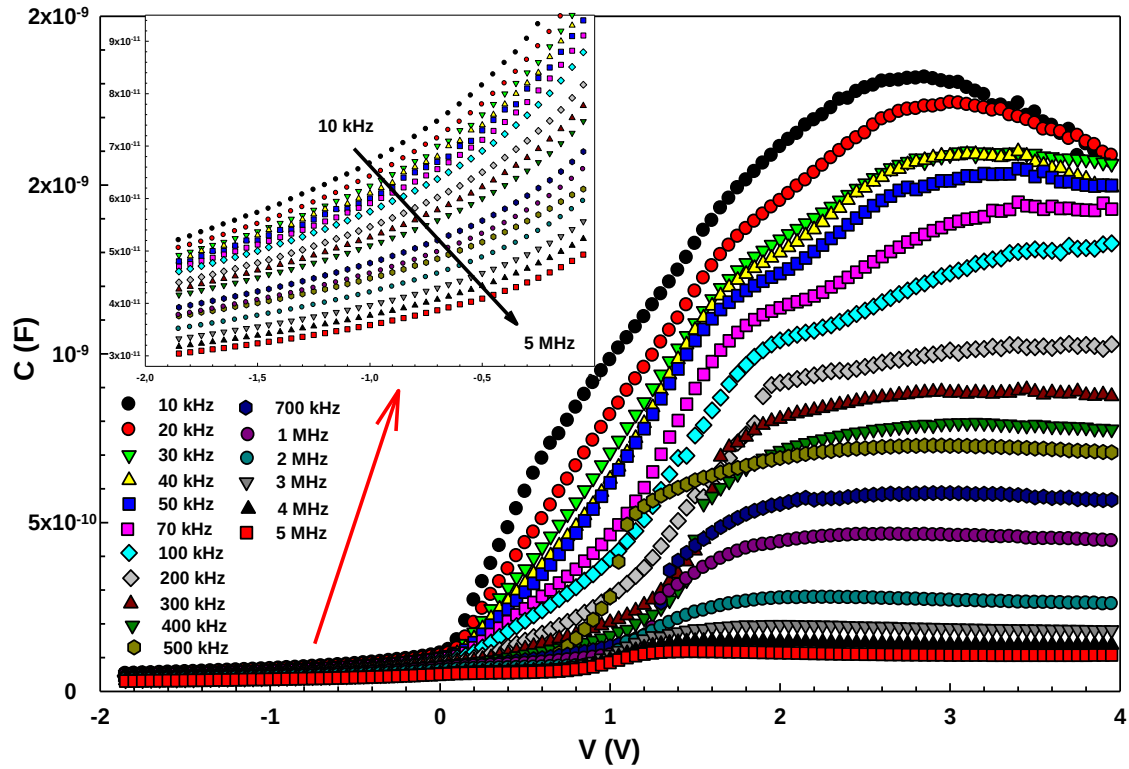


Şekil 4.7. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ grafiği

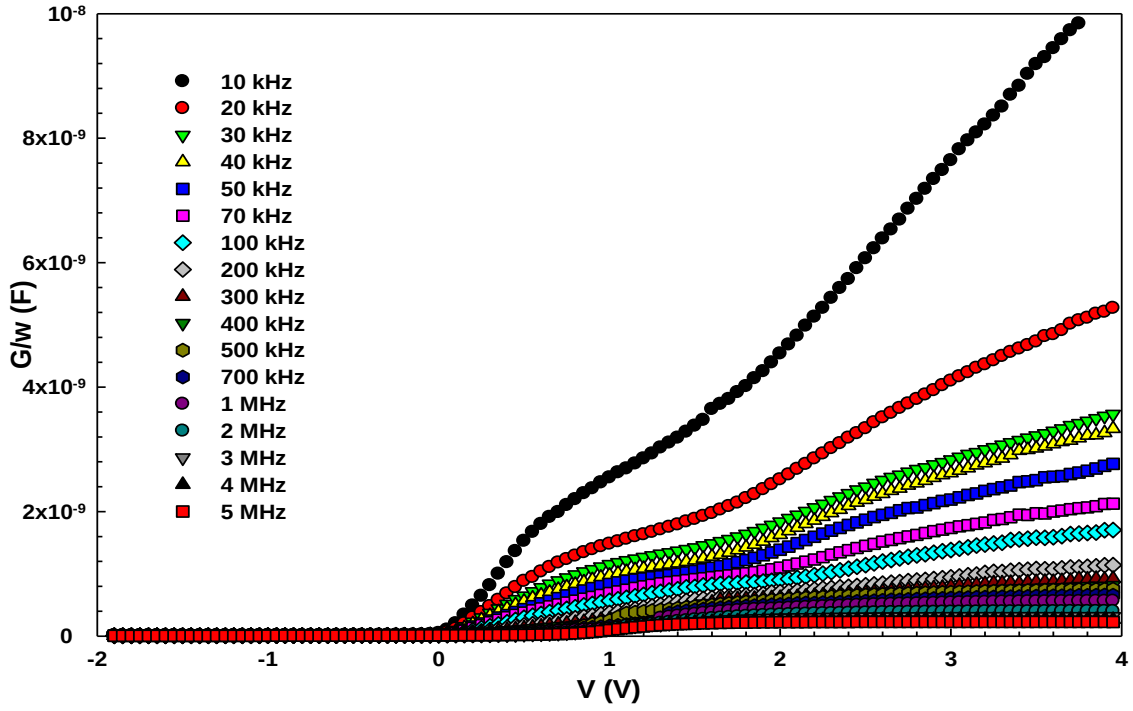
4.2.2. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun frekans ve gerilime bağlı kapasitans ve iletkenlik analizi

Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun hem C-V hem de G/ω -V grafikleri 10 kHz-5 MHz frekans aralığı ve (-2V)-4V aralığındaki ölçümleri Şekil 4.8 ve 4.9'da gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi C-V ve G/ω -V terslenim (-2V/0V), tüketim (0V/2V) ve yığılma (2V/4V) olmak üzere tıpkı MIS yapılar gibi üç bölgeye sahiptir. Özellikle yüksek frekanslarda olmak üzere terslenim ve yığılma bölgelerinde C-V ve G/ω -V sabit bir değer

almakla birlikte, tüketim ve yığılma bölgelerinde gerilimle birlikte artmaktadır. Çünkü Si'nin ön yüzeyinde çoğunlukta olan elektronlar metal yüzeyin ön kısmına geçerler ve böylece C değeri, denge durumuna kadar elektronların azalmasıyla birlikte azalır. Yani, C ve G/ω değerleri N_{ss} etkilerinde olduğu gibi frekans ve gerilimle büyük ölçüde ilişkilidir. Yeterince küçük negatif gerilim de (terslenim bölgesi) ise C ve G/ω değerlerinde kayda değer önemli bir değişim olmayıp bu bölgede gerilimin C ve G/ω değerlerine etkisi hemen hemen hiç yoktur. Ayrıca C-V eğrisinde seri direncin büyüklüğü ve etkisinden dolayı yığılma bölgesinde aşağı doğru bükülme meydana gelmektedir.

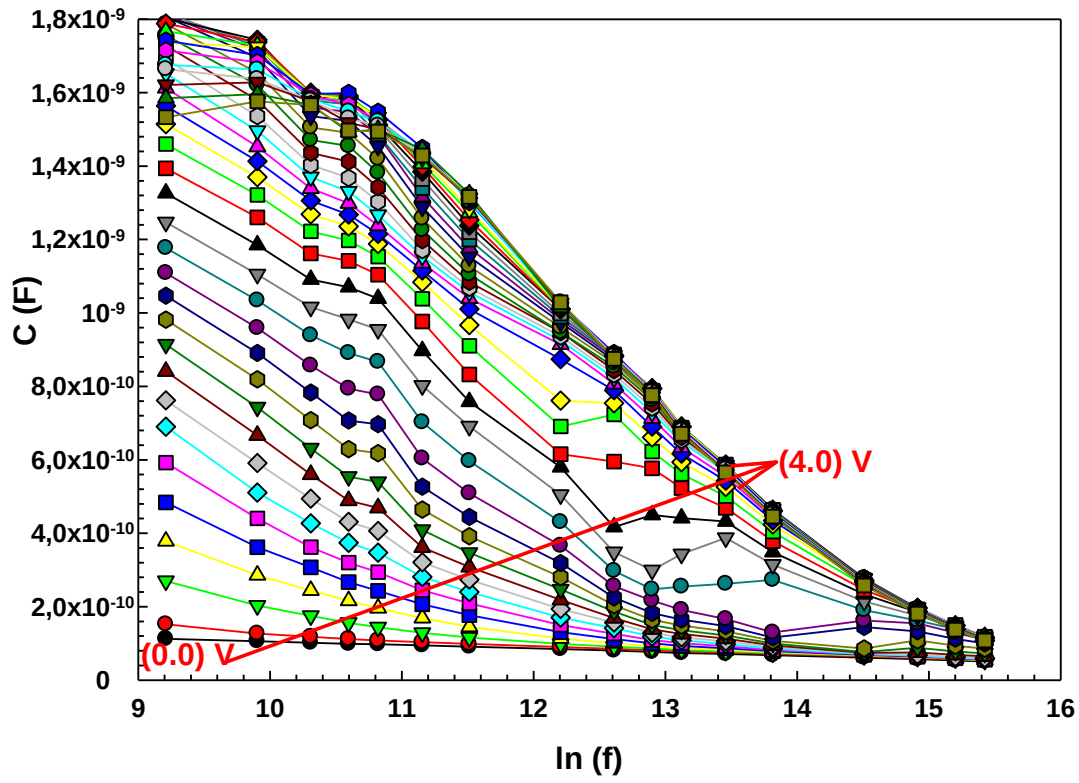


Şekil 4.8. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun C-V grafiği

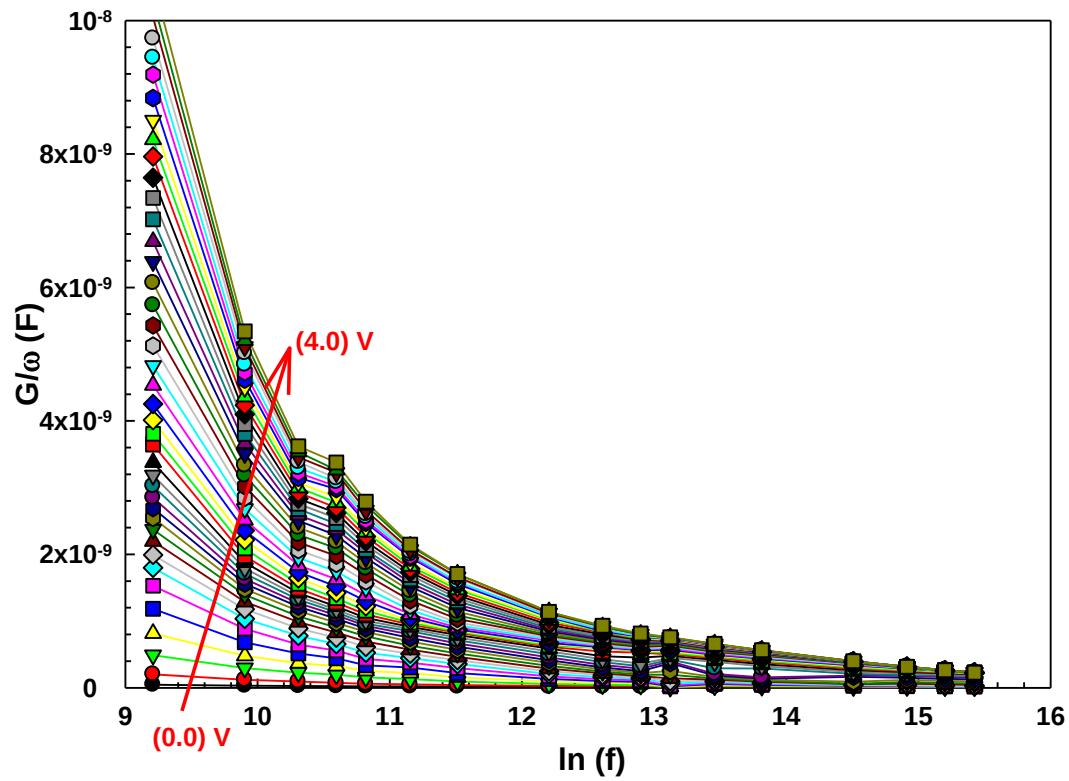


Şekil 4.9. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun G/ω -V grafiği

Uygulanan gerilimin C ve G/ω değerleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı gerilimlerdeki $C-\ln(f)$ ve $G/\omega-\ln(f)$ grafikleri Şekil 4.10 ve 4.11’de verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi hem C hem de G/ω değerleri artan frekans ile azalmakta ve düşük frekanslarda uygulanan gerilime bağlı iken yüksek frekanslarda uygulanan gerilimden bağımsızdır. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarının C ve G/ω değerlerine katkı yapmasından dolayı bu frekanslarda hem C hem de G/ω değerleri yüksektir. Ayrıca gerilimin yüksek frekanslarda G/ω üzerinde hemen hemen etkisinin olmadığı görülüyor.



Şekil 4.10. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $C-\ln(f)$ grafiği



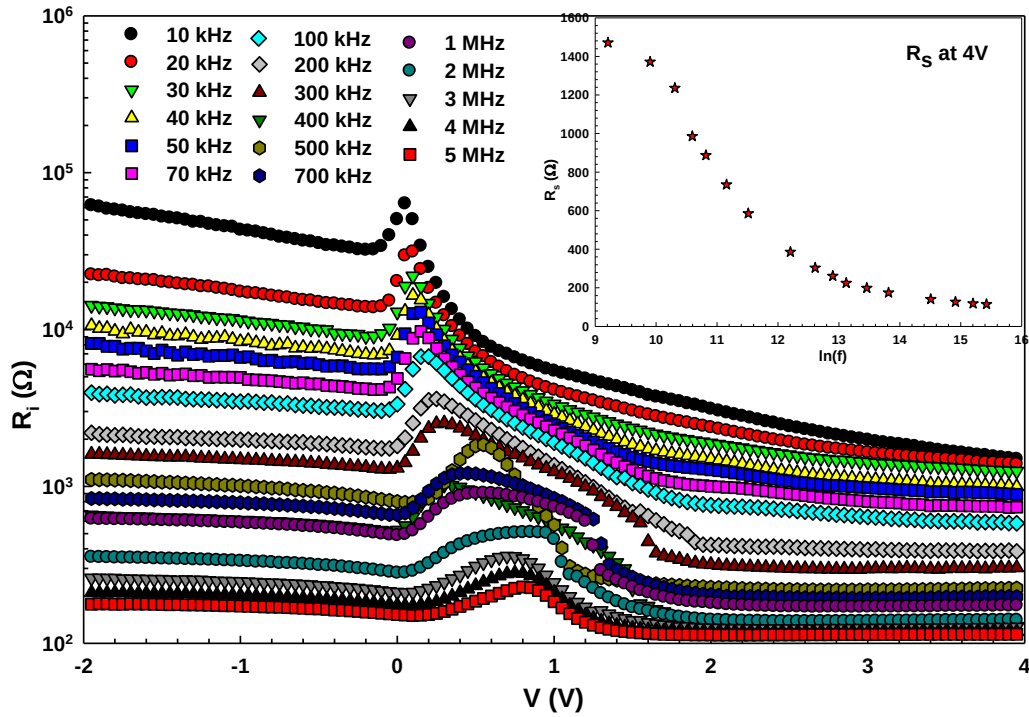
Şekil 4.11. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $G/\omega-\ln(f)$ grafiği

R_s değeri özellikle yığılma bölgesinde C-V grafiğinde etkilidir ve bu bölgede bükülmeye sebep olur. Düşük frekanslarda, N_{ss} dış ac sinyali takip edebilir ve bundan dolayı C ve G/ω değerlerinde artmalar oluşur. Werner ve Güttler [108] göre bu durum azınlık taşıyıcılardan kaynaklanmaktadır. R_i değerinin gerilime bağıllığı Bölüm 4.2.1’de de bahsedildiği gibi Nicollian–Brews [29] metodu kullanılarak ta hesaplanabilir.

Bir yarıiletken aygıtın gerçek R_s değeri yeterince yüksek pozitif gerilimde elde edilen değerdir. Çünkü yarıiletken aygıtın seri direnci yüksek pozitif gerilimlerde gerçek değerine ve ters gerilimlerde ise sonsuza doğru gitmektedir. Budan dolayı ileri yığılma bölgesinde yüksek frekanslar ($f \geq 1$ MHz) için R_i değeri yapının R_s değerine karşılık gelmektedir. Nicollian–Brews [29] metoduna göre R_i değerini hesaplamada aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$R_i = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.14)$$

Farklı frekanslar için Eş. 4.14 kullanılarak hesaplanan R_i değerlerinin gerilime bağlı grafiği Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Güçlü yığılma bölgesi ve yüksek frekanstaki R_i değeri yapının R_s değerini verir ve bu değer grafikten de görüldüğü gibi hemen hemen sabit bir değere sahiptir. Ayrıca Şekil 4.12’nin içerisine gömülmüş olarak 4 V’daki seri direncin frekansa bağımlılığını incelemek amaçlı R_s -Ln(f) grafiği verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi artan frekansla birlikte R_s değeri üstel olarak azalmaktadır.



Şekil 4.12. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun R_i -V grafiği

Hem doğru hem de ters beslemde Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun deneysel olarak difüzyon potansiyeli (V_D), verici atomları sayısı (N_D), fermi enerji seviyesi (E_F), tüketim bölgesi genişliği (W_D) ve frekansa bağlı engel yüksekliği ($\Phi_{B(C-V)}$) gibi elektriksel parametrelerini C^{-2} -V'nin terslenim bölgesi eğimi ve (4.15)-(4.19) eşitliklerin yardımıyla hesaplayabiliriz [7, 8, 15, 101].

$$N_c = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (4.15)$$

$$N_D = \frac{2}{q \varepsilon_s A^2} \left[- \frac{1}{d(C^{-2})/dV} \right] = \frac{2}{q \varepsilon_s A^2 \tan(\theta)} \quad (4.16)$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_D} \right) \quad (4.17)$$

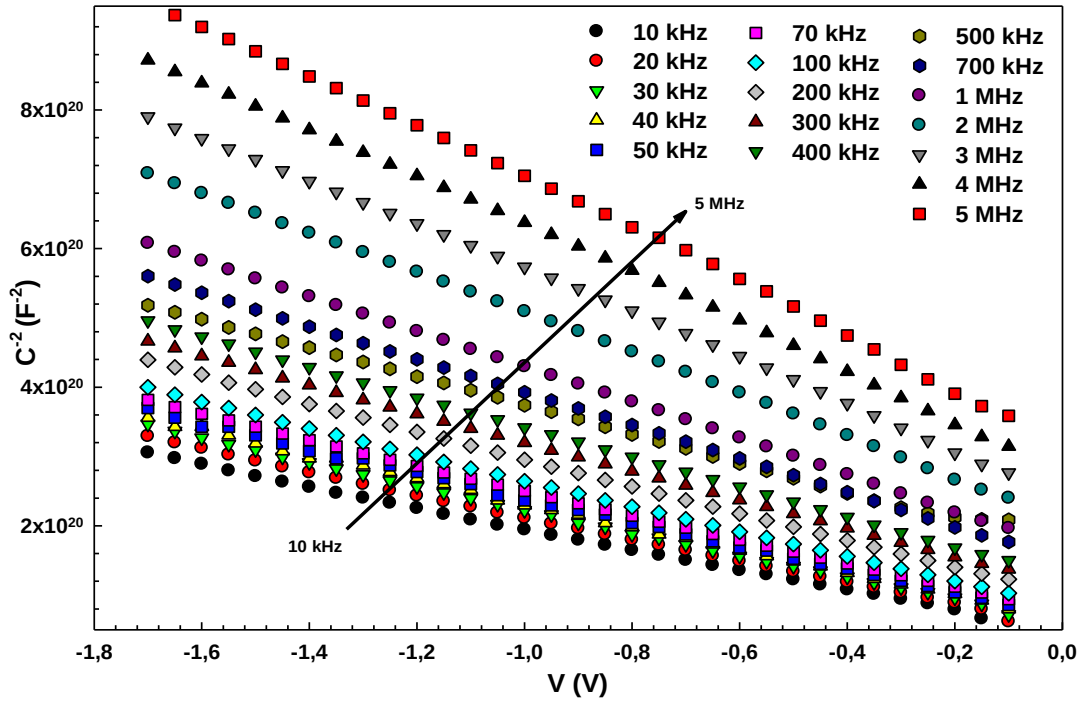
$$W_D = \left(\frac{2 \varepsilon_s V_D}{q N_D} \right)^{1/2} \quad (4.18)$$

Burada $V_D (=V_0+kT/q)$ difüzyon potansiyelidir. Ayrıca buradaki V_0 ise ters beslemdeki lineer C^{-2} -V grafiğinin eğiminin yatay eksenini kestiği noktadır.

$$\Phi_{B(C-V)} = V_D + E_F \quad (4.19)$$

Burada $(m_e^*/m_0)=0,55$, N_c iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu, ϵ_0 ise uzayın geçirgenliğidir ve değeri $8,85 \times 10^{-14}$ F/cm'dir.

Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun geniş bir frekans aralığındaki C^{-2} -V eğrisi Şekil 4.13'de verilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi $(-1,7)$ ve $(-0,1)$ V aralığında çok iyi bir lineer özellik göstermektedir.



Şekil 4.13. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun C^{-2} -V grafiği

C^{-2} -V eğrisi ve Eş. 4.15-4.19 kullanılarak çeşitli frekanslar için hesaplanan V_D , N_D , E_F , W_D , $\Phi_{B(C-V)}$ ve 4V'deki R_s değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Frekans arttıkça ters beslem C^{-2} -V eğimlerinin artma meydana geldiğinden dolayı W_D ve E_F değerleri artan frekans ile artarken, N_D değeri artan frekans ile azalmaktadır. Düşük frekanslardaki $\Phi_{B(C-V)}$ değeri bu frekanslardaki ac sinyali takip edebilen N_{ss} ile belirlenir. Ama yüksek frekanslarda bu

arayüzey durumları ac sinyali takip edemezler ve bundan dolayı ölçüm kapasitansının katkısı göz ardı edilebilir [8,102].

Genelde C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği I-V ölçümlerinden elde edilenden büyüktür. Yani her iki ölçümden elde edilen engel yükseklikleri birbirinden farklıdır. Bu fark imaj kuvvetin etkisi, kenar sızıntı akımları, metal ile yarıiletken arasına doğal veya deneysel yollarla oluşturulmuş herhangi bir yalıtkan tabaka, engel yüksekliği homojensizliği, safsızlık seviyesi ve ölçüm sistemlerinin tekniğinden dolayı kaynaklanmaktadır. [108–112]. Ayrıca, katkılama seviyesi arttıkça I-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği azalırken, C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği sabit kalır [112].

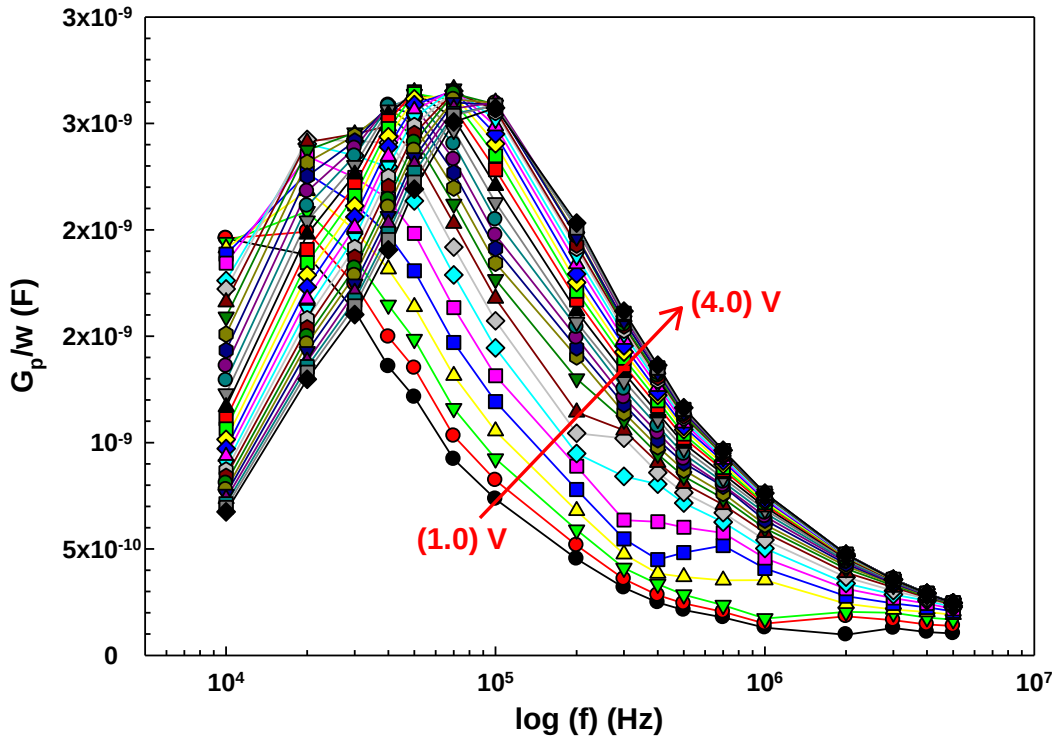
Çizelge 4.1. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun çeşitli frekanslar için hesaplanan V_D , N_D , E_F , W_D , $\Phi_{B(C-V)}$ ve R_s değerleri

Frekans (kHz)	V_D (eV)	$N_D \times 10^{15}$ (cm ⁻³)	E_F (eV)	$W_D \times 10^{-5}$ (cm)	$\Phi_{B(C-V)}$ (eV)	$R_s (+4V)$ (k Ω)
10	0,315	1,29	0,250	5,65	0,565	1,47
20	0,363	1,22	0,251	6,23	0,614	1,37
30	0,383	1,18	0,252	6,52	0,635	1,24
40	0,400	1,14	0,253	6,76	0,652	0,99
50	0,417	1,12	0,253	6,96	0,670	0,89
70	0,445	1,10	0,254	7,27	0,698	0,73
100	0,471	1,06	0,255	7,63	0,726	0,59
200	0,533	0,98	0,256	8,40	0,789	0,39
300	0,578	0,94	0,257	8,95	0,836	0,30
400	0,608	0,90	0,259	9,40	0,867	0,23
500	0,632	0,87	0,260	9,75	0,892	0,26
700	0,658	0,81	0,261	10,3	0,920	0,20
1000	0,688	0,75	0,263	10,9	0,951	0,17
2000	0,749	0,66	0,266	12,2	1,016	0,14
3000	0,790	0,60	0,269	13,1	1,058	0,13
4000	0,828	0,55	0,271	14,0	1,099	0,18
5000	0,849	0,52	0,273	14,7	1,122	0,14

Genellikle, arayüzey durumlarının oluşmasında yarıiletkenin periyodik örgüsündeki kesinti, fabrikasyon sırasında oluşabilecek kirlilikler, arayüzey tabakası formasyonu, yarıiletkenin kirlilik konsantrasyonu, laboratuvarındaki organik kirlilikler neden olur [112, 113]. Nicollian

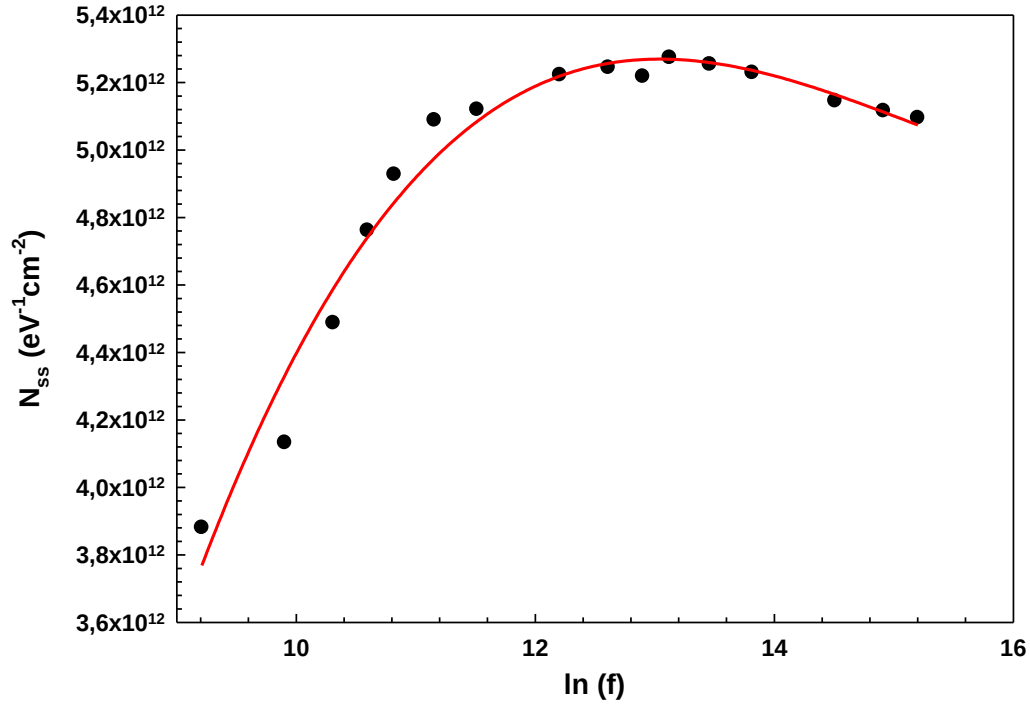
ve Goetzberger [39], Tamm [113] ve Shockley [114] arayüzey durumları üzerinde çalışmışlar ve bu durumların yarıiletken kristalin yüzeyindeki periyodik örgü yapısının kesintisinden dolayı yarıiletkenin yasak enerji aralığında (E_g) var olduklarını belirtmişlerdir. Bundan dolayı arayüzey durumları yapıların elektriksel özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Bu tez çalışmasında N_{ss} değerlerini hesaplamak için Kondüktans Metodu (KM) [39] ve Yüksek-Düşük Frekans Kapasitans Metodu (YDFKM) [42] metotları uygulandı.

KM metodunda Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotunun N_{ss} değerini hesaplamak için Eş. 2.14 kullanılarak G_p/ω -logf grafiği çizilmelidir. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotu için elde edilen G_p/ω -logf grafiği Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi G_p/ω her bir gerilim değeri için ayrı bir maksimum değere (pik) sahiptir. Bu pikler arayüzey durumlarının düzensizliklerinden dolayı görülür. Pik değeri uygulanan gerilimin artması ile birlikte yüksek frekanslara kaymaktadır. Ayrıca uygulanan gerilimle birlikte pik değeri de nispeten artmaktadır. Pik değerinin bu değişimi bant aralığındaki arayüzey durumu enerji seviyelerinin sürekli dağılımını gösterir. Ayrıca pikin büyüklüğü arayüzey tuzak seviyeleri üzerinde yakalama oranına bağlıdır. G_p/ω ’nın maksimum değeri $\omega=1/\tau$ ’da olur ve burada $N_{ss}=1,98(G_p/q\omega)$ ’dir.



Şekil 4.14. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun G_p/ω -logf grafiği

Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotu için N_{ss} değeri $(G_p/\omega)_{\max}$ ve onun frekansı (f) kullanılarak elde edilir. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotu için elde edilen $N_{ss}-\ln(f)$ grafiği Şekil 4.15'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi N_{ss} değeri artan frekans ile üstel olarak artmaktadır. N_{ss} değeri elektronik aygıtlar için uygun olan $10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ sınırındadır.

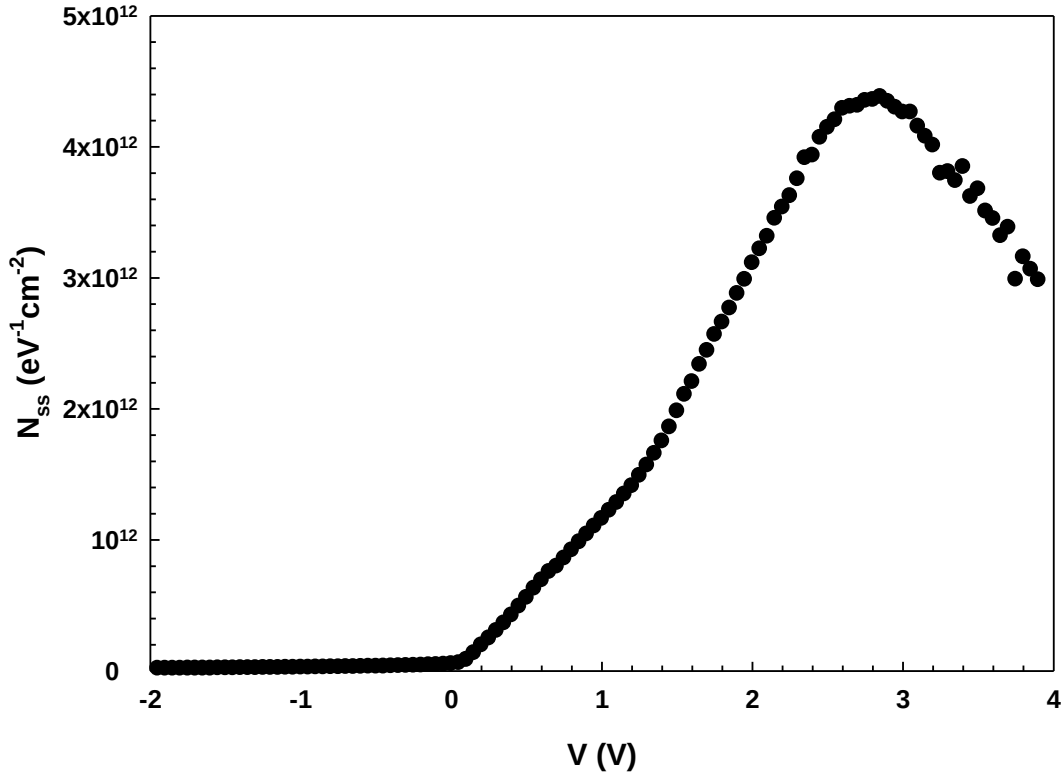


Şekil 4.15. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $N_{ss}-\ln(f)$ grafiği

N_{ss} değerini hesaplamada kullanılan diğer bir yöntem de $C_{HF}-C_{LF}$ olarak ta bilinen YDFKM'dur. YDFKM yönteminin KM yöntemine göre en büyük avantajı N_{ss} değerlerini hesaplamada kolay ve hızlı bir yöntem olmasıdır. Ayrıca bu yöntemle elde edilen veriler KM yönteminden elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olmasıdır. YDFKM yönteminde yeterli derecede yüksek ($f \geq 1\text{MHz}$) ve düşük ($f \leq 1 \text{ kHz}$) frekanslarda elde edilen kapasitans değerleri kullanılır.

N_{ss} yüksek frekanslarda dış ac sinyali takip edemez bundan dolayı ölçülen kapasitans değerine katkıda bulunmaz [29]. Fakat düşük frekanslarda N_{ss} dış ac sinyali takip edebildiği için ölçülen kapasitans değerine bir katkıda bulunur [29]. YDFKM'de N_{ss} değerleri Eş. 2.15 yardımıyla yüksek ($C_{HF}=5 \text{ MHz}$) ve düşük ($C_{LF}=10 \text{ kHz}$) frekans arasındaki farktan

hesaplanabilir. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotu için YDFKM yöntemi kullanılarak hesaplanan N_{ss} -V grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi N_{ss} terslenim bölgesinde artan voltaj ile artmaktadır. Ayrıca N_{ss} değeri yaklaşık 3 V civarında bir pik vermektedir. Çünkü arayüzey durumlarının yoğun olduğu bölgelerde büyüklükleri ve yoğunlukları mertebesinde C-V veya G/ω -V eğrileri bir pikten geçer.

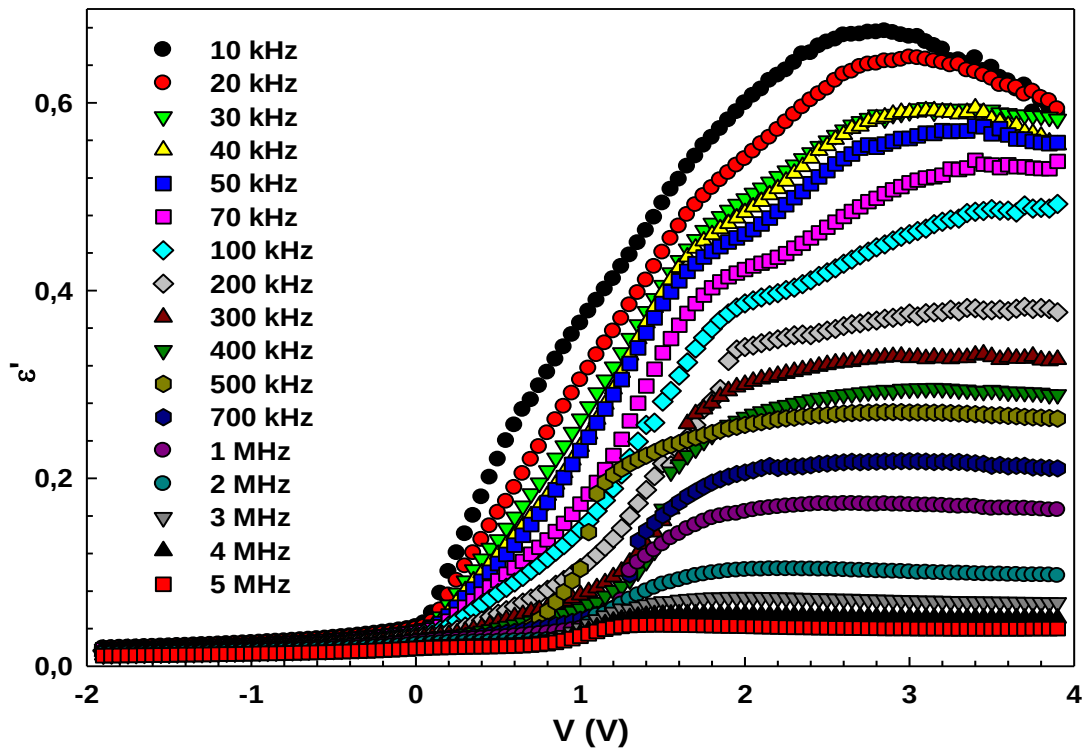


Şekil 4.16. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun N_{ss} -V grafiği

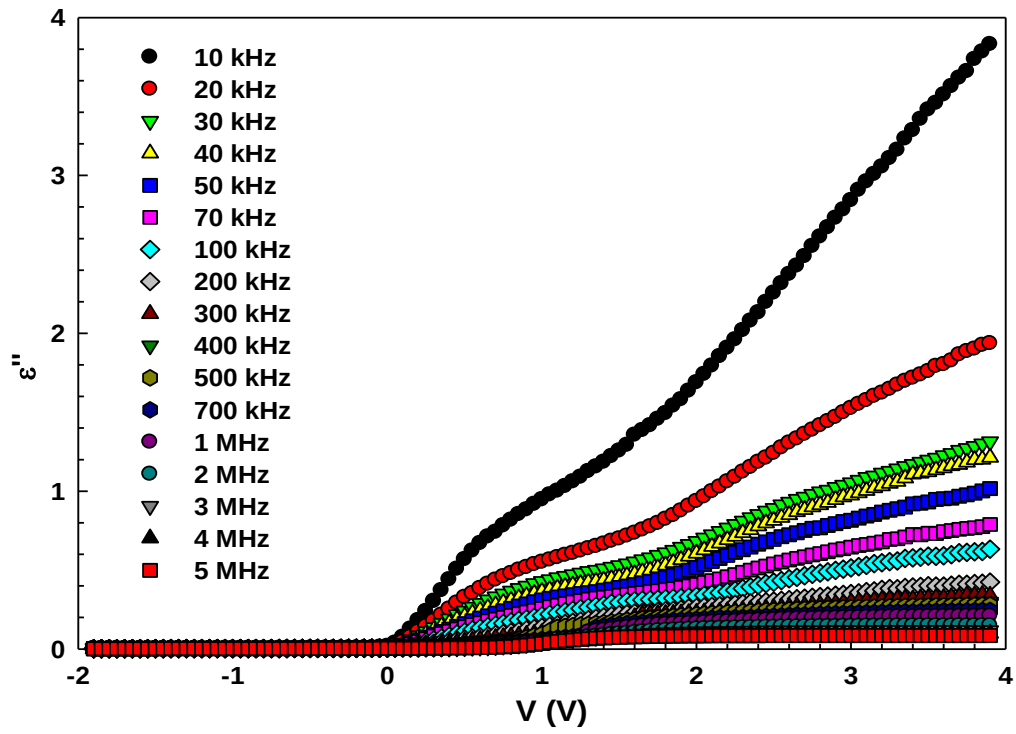
İdeal bir elektronik aygıtlar için N_{ss} değerinin yaklaşık olarak 10^{12} eV⁻¹cm⁻² değerlerinde olması istenir. Ancak yarıiletkenin yasak enerji aralığında yarıiletken ve arayüzey tabakası arasında oluşan arayüzey durumları, metal ile yarıiletken arasında homojen olmayan bariyer, aygıtın R_s değeri, alıcı ve verici atomların konsantrasyonundaki homojensizlik gibi başlıca sebepler yapının ideallikten sapmasına neden olur. Bu yüzden arayüzey durumları aygıtın kapasitans ve iletkenlik değerlerine güçlü bir şekilde etki etmektedir. Şekil 4.15 ve 4.16'dan da görüldüğü gibi Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun N_{ss} değerleri ideal bir elektronik aygıtın N_{ss} değerleri sınırındadır.

4.2.3. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun frekans ve gerilime bağı dielektrik analizi

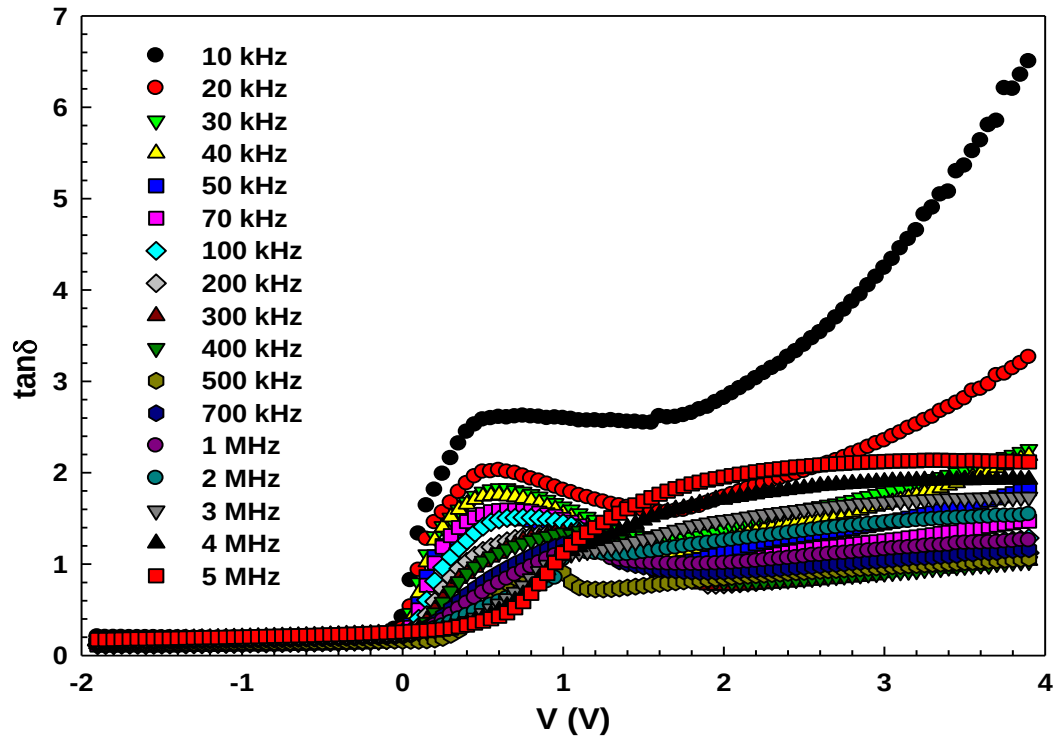
Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun dielektrik özellikleri ve elektrik modülüslerini incelemek için ölçümler geniş bir frekans aralığında (10 kHz-5 MHz) ve geniş bir gerilim aralığında ((-2)V-4V) gerçekleştirildi. Yapının kompleks dielektriksel (ϵ' ve ϵ'') özellikleri Eş. 2.54 ve 2.55 ve kompleks dielektriğin sanal kısmının gerçek kısmına oranı olan enerji kayıp değeri ($\tan\delta$) de Eş. 2.48 kullanılarak elde edilmiştir ve Şekil 4.17-4.19'da verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri özellikle düşük frekanslarda tüketim ve yığılma bölgelerinde frekans ve gerilime güçlü bir şekilde bağlıdır. ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ her bir frekans için terslenim, tüketim ve yığılma bölgelerinde tipik MIS ve MOS tipi yapıların davranışını göstermektedir. Ayrıca ϵ' ve ϵ'' değerleri terslenim bölgesinde hemen hemen frekans ve gerilimden bağımsızken tüketim ve yığılma bölgesinde artan frekans ile azalmaktadır. $\tan\delta$ değeri ise terslenim bölgesinde sabitken özellikle tüketim bölgesinde bir pik aldığı ve bu pikin artan frekans ile birlikte kaybolduğu görülmektedir. Bunun nedeni, arayüzey durumlarındaki yüklü taşıyıcılarının yakalanmasından kaynaklanan yük etkileridir [114, 115].



Şekil 4.17. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun ϵ' -V grafiği



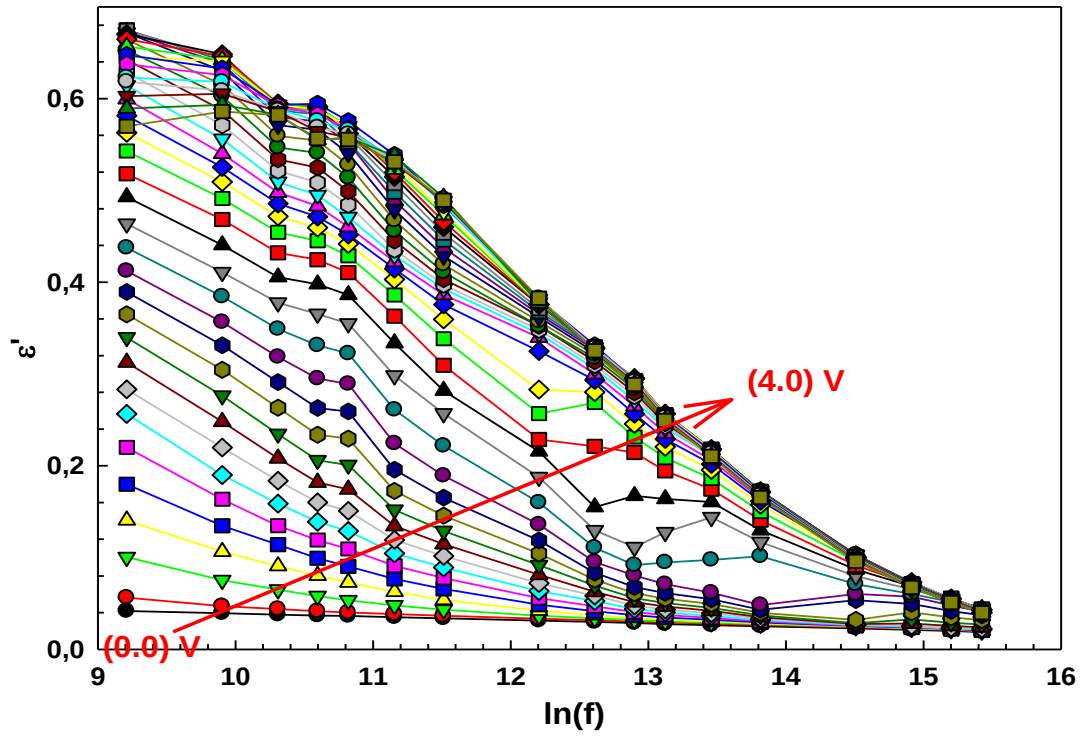
Şekil 4.18. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun ϵ'' -V grafiği



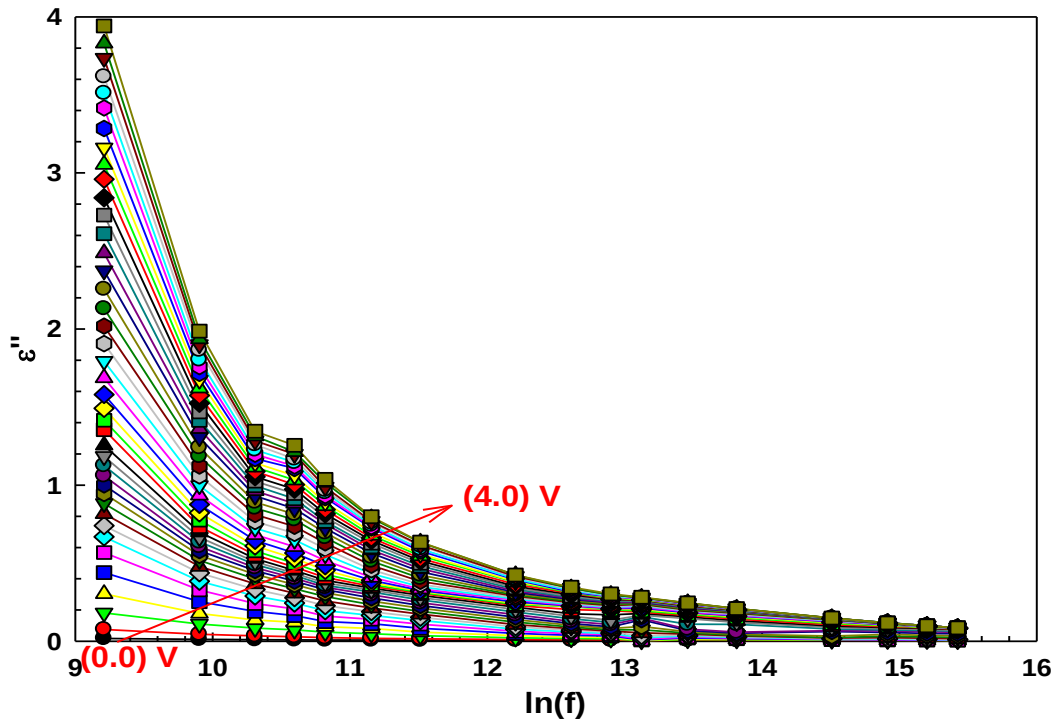
Şekil 4.19. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $\tan\delta$ -V grafiği

Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinin oda sıcaklığında frekansa bağlı nasıl değiştiğini incelemek için (0,0) V'dan (4,0) V'a kadar (0,1) V aralıklarla ϵ' -ln(f), ϵ'' -ln(f) ve $\tan\delta$ -ln(f) grafikleri çizilmiştir ve Şekil 4.20-4.22'de verilmiştir. ϵ' ve ϵ'' değerleri azalan frekansla birlikte artmaktadır. Düşük frekanslarda ϵ' ve ϵ'' değerlerinin yüksek olmasının sebebi numunede oluşan uzay yüklerinin elektrotlardaki görüntü yüklerini etkilemesi sonucu oluşan arayüzey kutuplanma mekanizmasına atfedilebilir [26, 116, 117].

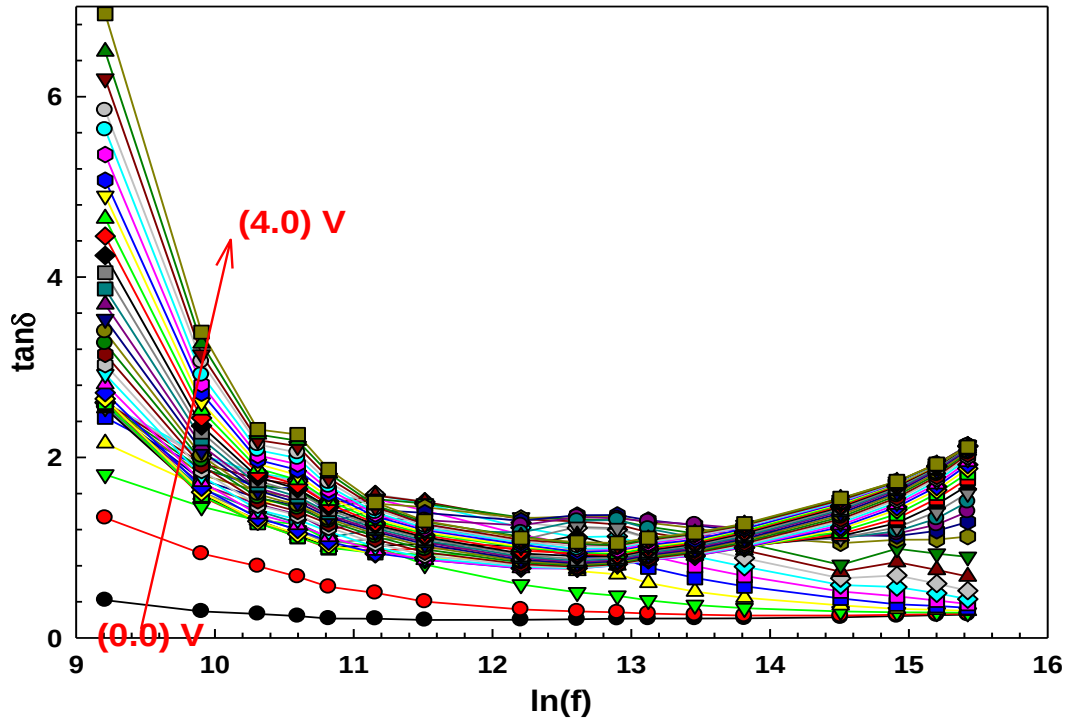
(Ag-ZnO/PVP) arayüzeyinde yüklü taşıyıcıların taşınması ve birikmesi dielektrik sabitinin artışına katkıda bulunan yüksek kutuplanmaya sebep olur. Dış elektrik alan etkisi altında numune içerisinde hareket eden uzay yükleri numunede bulunan kusurlar tarafından yakalanır. Tuzaklanan bu yüklerin arayüzeyde birikmesi ile dipol momente oluşur. Bu dipol moment düşük frekanslarda dış elektrik alan değişimlerini takip edebildiği için ϵ' ve ϵ'' büyük değerlere sahip olur. Yüksek frekanslarda ise dipol moment dış elektrik takip edemez ve hemen hemen frekanstan bağımsız hale gelerek ϵ' ve ϵ'' sabit bir değer alır [116, 117]. Ayrıca, arayüzey durumları yüksek frekansta ac sinyali takip edemezler ve bu yüzden C, G/ ω , ϵ' ve ϵ'' değerlerine katkı yapmazken düşük frekanslarda ac sinyali takip edebildiği için bu değerlere katkı yapar. ϵ' ve ϵ'' değerlerinin frekans ile değişmesi kutuplanma süreci mekanizmasının iletim mekanizmasına benzer olduğu varsayılarak açıklanabilir. Ayrıca $\tan\delta$ düşük gerilimlerde hemen hemen sabit bir değer alırken, gerilim artmasıyla birlikte değeri artmakta fakat gerilimle birlikte frekansında artmasıyla hemen hemen sabit bir değere ulaşır. ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerindeki frekansa ve gerilime bağlı bu dağılım Maxwell–Wagner tipi arayüzey kutuplanmasına atfedilir [119]. Maxwell–Wagner yüklü parçacıkların daha az iletken olan bölgelerin kenarlarında birikmesiyle arayüzey polarizasyonunu yaratmasına bu durumunda homojensizliklerin iletkenliğin frekansa bağımlılığına sebep olabileceğini öne sürmüştür [119].



Şekil 4.20. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun ε'' - $\ln(f)$ grafiği

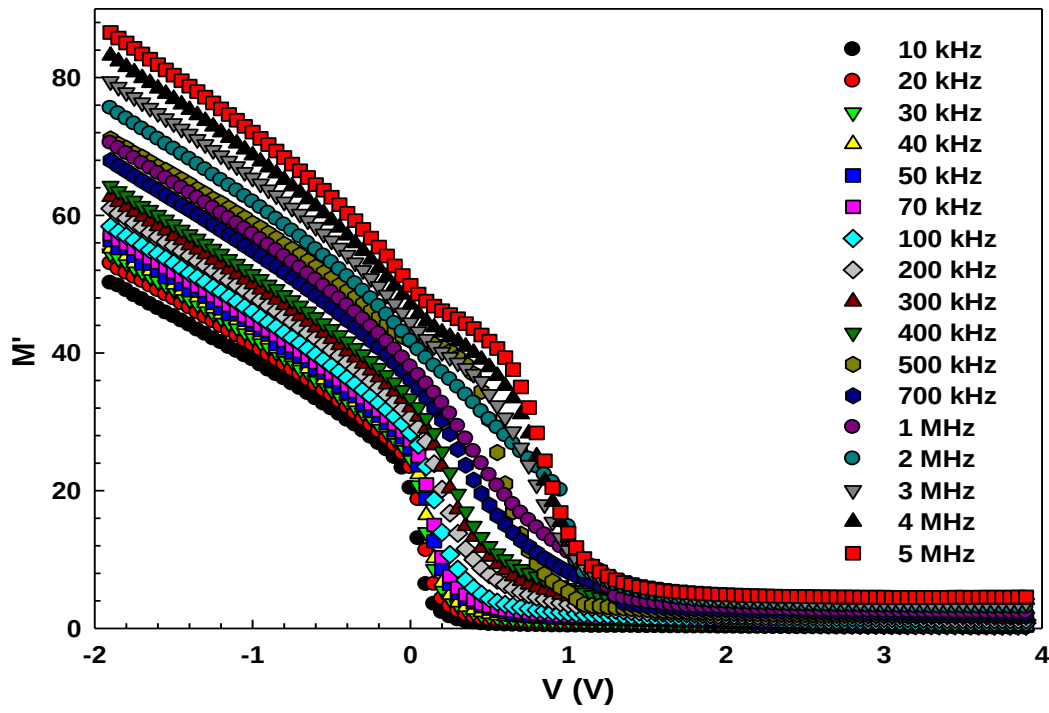


Şekil 4.21. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun ε' - $\ln(f)$ grafiği

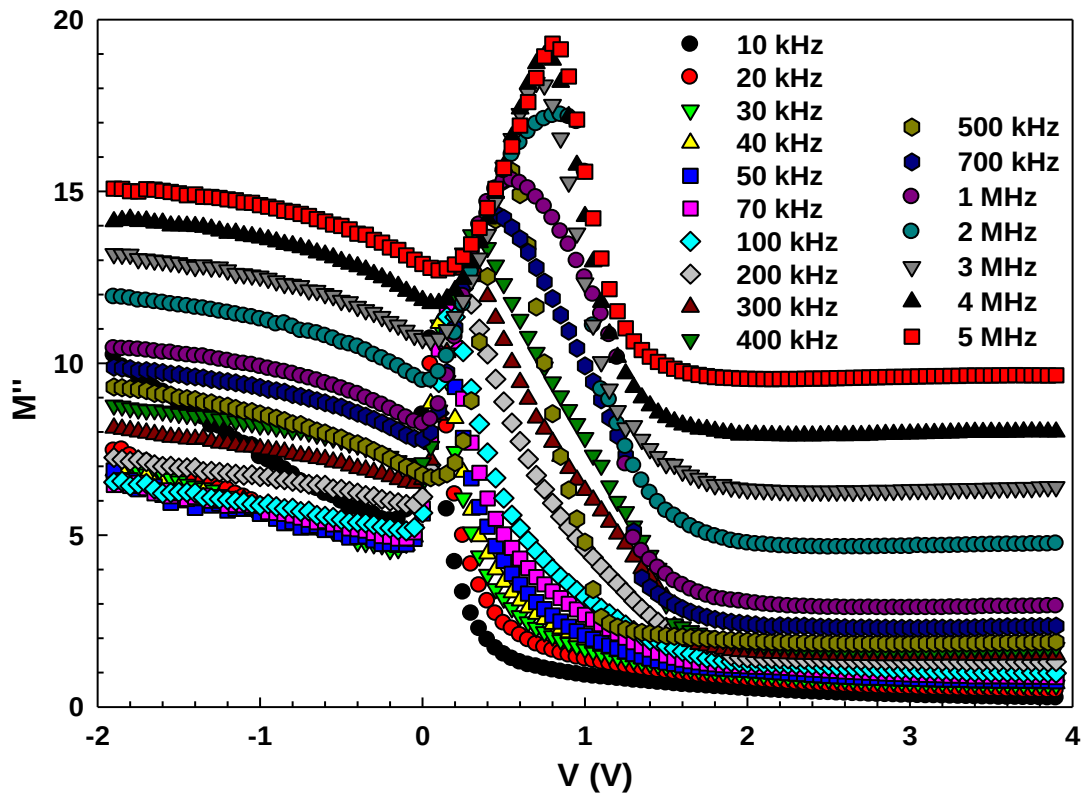


Şekil 4.22. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun $\tan\delta$ - $\ln(f)$ grafiği

Kompleks elektrik modülüsü yapıların dielektrik özelliklerini incelemeye kullanılan bir diğer yöntemdir. Kompleks dielektrik geçirgenlik (ϵ^*) ve kompleks elektrik modülüsü (M^*) arasındaki ilişki Eş. 2.56'da verilmiştir. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun 1 kHz-5 MHz aralığında çeşitli frekanslarla elde edilen ϵ' ve ϵ'' değerleri ve Eş. 2.57 ve 2.58 kullanılarak kompleks elektrik modülüsün gerçek (M') ve sanal (M'') kısımları hesaplandı ve Şekil 4.23 ve 4.24'de verilmiştir. Şekil 4.23'den görüldüğü gibi, M' değeri terslenim ve tüketim bölgesinde artan frekans ile artmakta iken yığılma bölgesinde hemen hemen frekanstan bağımsızdır. Yasak enerji aralığındaki arayüzey tuzaklarında yerleşmiş kısa mesafeli elektron-deşik hareketliliğinden dolayı iletim sürecine katkıda bulunabilmesinden dolayı M' böyle davranışı sergiler [26]. M'' ise tüketim bölgesinde bir pik değere ulaşır ve bu pik değeri artan frekans ile yığılma bölgesine doğru kayar. Bu durum (Ag-ZnO/PVP)/n-Si arayüzeyinde yerleşmiş arayüzey durumlarının dağılımına ve Maxwell-Wagner tipi arayüzey kutuplanmasına atfedilir [26, 118]. Farklı ömürlere sahip arayüzey durumlarının çoğu türü düşük frekanslarda kullanılabilir ve bu durumlar uygulanan gerilimden etkilenirler.

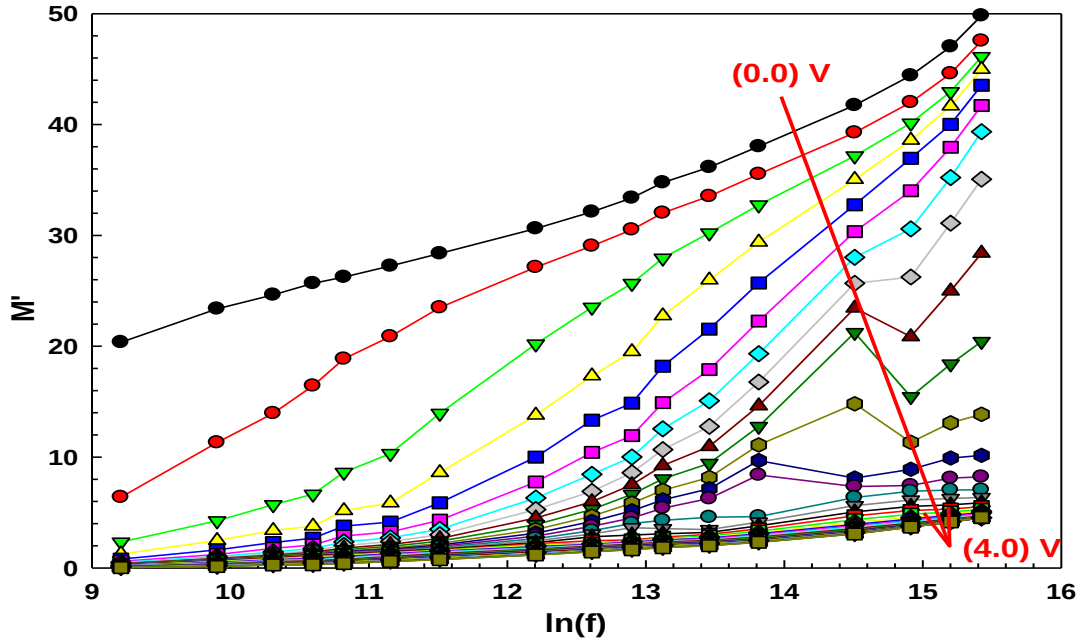


Şekil 4.23. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun M' - V grafiği

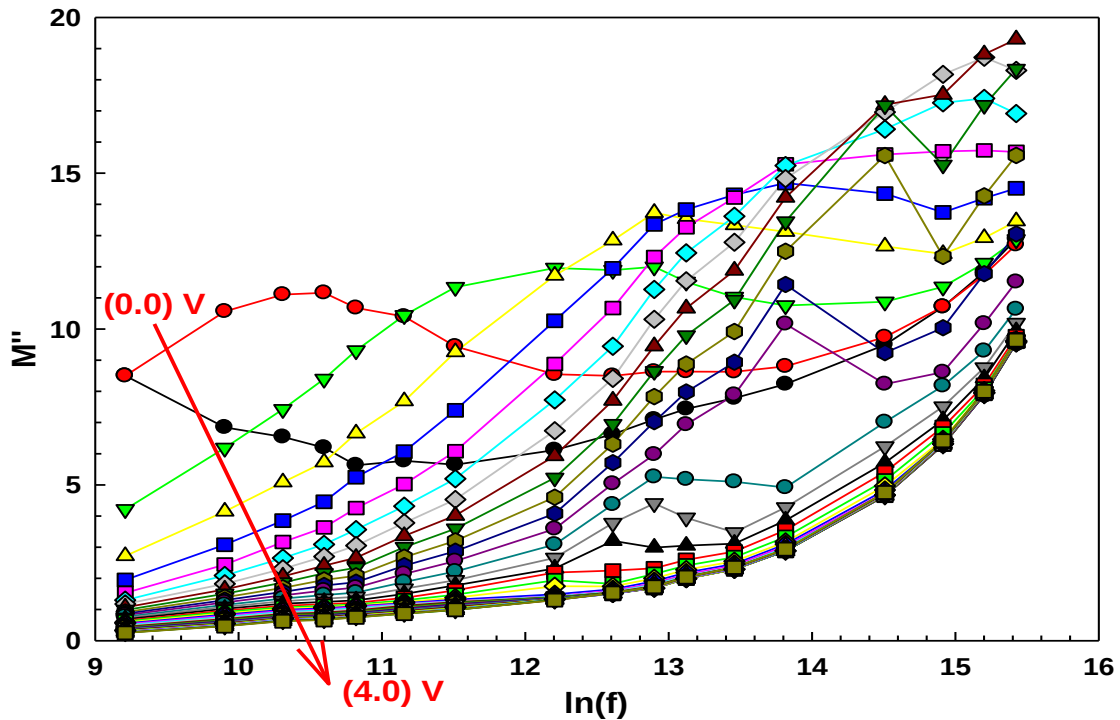


Şekil 4. 24. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun M'' - V grafiği

M' ve M'' ifadelerinin uygulanan gerilim ile nasıl değiştiğini anlamak için M' - $\ln(f)$ ve M'' - $\ln(f)$ grafikleri çizildi ve Şekil 4.25 ve 4.26'da verildi. Şekil 4.25'den de görüldüğü gibi M' değeri artan gerilimle birlikte hemen hemen sıfıra yaklaşmaktadır. Özellikle yüksek frekanslarda, dipol molekülleri elektrik modülüsün dielektrik gevşeme sürecinden dolayı $M_\infty=1/\epsilon_\infty$ 'a karşılık gelen maksimumda sabit bir değer alır.



Şekil 4.25. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun M' - $\ln(f)$ grafiği

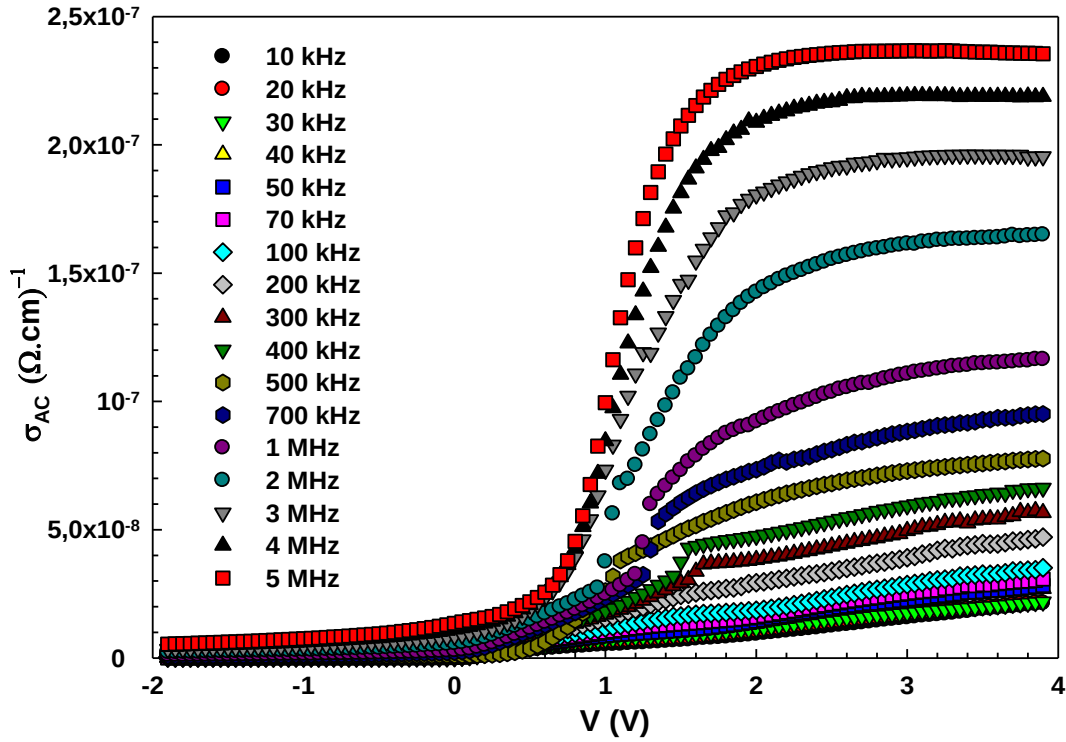


Şekil 4.26. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun M'' - $\ln(f)$ grafiği

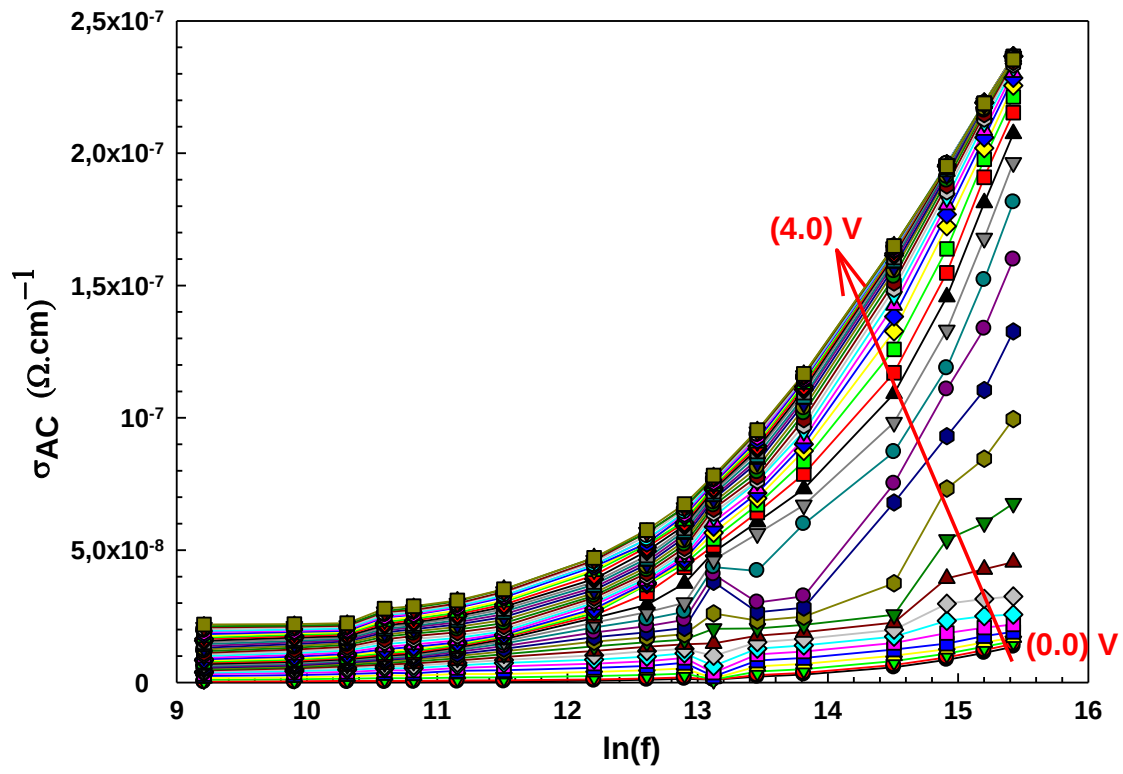
Numunenin iletkenliğinin frekansa bağlılığından elektriksel iletim mekanizmaları belirlenebilir. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun ac elektriksel iletkenliği (σ_{AC}) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı ve frekans ile gerilime bağlı grafikleri Şekil 4.27 ve 4.28’de verilmiştir [48, 51, 119].

$$\sigma_{AC} = \left(\frac{d_i}{A} \right) \omega C \tan \delta = \varepsilon'' \omega \varepsilon_0 \quad (4.20)$$

Eş. 4.20 bize σ_{AC} değeri ε'' ile doğru orantılı olduğunu gösteriyor. Şekil 4.27’den de görüldüğü gibi σ_{AC} değeri arayüzey kutuplaşmasının azalması nedeniyle artan frekans ile artmaktadır. σ_{AC} değerindeki artış akımda bir artışa neden olur ve bu da enerji kaybı $\tan \delta$ da azalmaya neden olur [18]. σ_{AC} değerindeki bu artışı seri dirençteki azalmaya atfedilebilir [121–123].



Şekil 4.27. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun σ_{AC} -V grafiği



Şekil 4.28. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun σ_{AC} - $\ln(f)$ grafiği

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Polimerler düşük iletkenliğe sahip oldukları için bu malzemelere metal katkılanarak iletkenliği artırılabilir. Bu nedenle polimerler ile birlikte Ag gibi plazmonik elementlerin ZnO'ya katkılanması ile elde edilen yapıların (Ag-ZnO/PVP) optik ve yapısal özelliklerinin yanında elektrik ve dielektrik özelliklerini de iyileştirmektedir. Böyle bir organik arayüzey yükleri denge durumundan uzaklaştıran dış bir elektrik alan altında dielektrik malzemeler gibi kolayca kutuplanabilir. Bu nedenle organik bir arayüzeye sahip MPS tipi Schottky diyotlar yalıtkan bir arayüzeye sahip MIS tipi Schottky diyotlarla karşılaştırıldığında birçok avantaja sahip olurlar.

Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıların elektriksel ve dielektriksel özellikleri incelenirken tek bir frekans veya gerilime bağlı ölçüm o yapıların akım iletim mekanizmaları hakkında bize ayrıntılı ve kesin bir sonuç vermez. Ancak bu yapıların elektriksel ve dielektriksel ölçümleri geniş bir frekans ve gerilim aralığında gerçekleştirilirse hem yapıların akım iletim mekanizması hem de M/S arayüzeyinde oluşan potansiyel engel hakkında bize daha kesin ve ayrıntılı bilgiler verir.

Bu çalışmada hazırlanan Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotunun elektriksel ve dielektriksel ölçümleri 10 kHz-5 MHz frekans aralığında ve (-2,0) V'dan (4,0) V'a kadar (0,05) V adım aralıklarla Hewlett Packard 4192A LF Impedans Analiz metres (5 Hz-13 MHz) kullanılarak gerçekleştirildi. I-V ölçümleri ise Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı kullanılarak (-2,0)V-(3,0)V aralıklarında gerçekleştirildi. Arayüzey tabakasının yapısal özelliklerini incelemek amacıyla XRD, SEM ve EDX ölçümleri alındı.

Arayüzey tabakasının (Ag-ZnO/PVP) elektriksel parametreler üzerine etkisini araştırmak amacıyla da idealite faktörü (n), sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{B0}), doyum akımı (I_0), seri direnç (R_s) ve arayüzey durumları yoğunluğu (N_{ss}) oda sıcaklığında I-V ölçümleri Termiyonik Emisyon (TE), Cheung fonksiyonu ve Norde metodu kullanılarak hesaplandı. Elde edilen sonuçlardaki bazı tutarsızlıklar N_{ss} , arayüzeyin dielektriği (ϵ_i), arayüzeyin kalınlığı (δ), R_s , hesaplamada kullanılan metot farkı (farklı voltaj bölgerine karşılık gelmesi), engel yüksekliği homojensizliğine atfedildi.

Cheung, TE ve Norde metodundan hesaplanandan engel yükseklikleri ve R_s değeri birbirlerinden farklı olarak hesaplandı. Bu farklılığın en önemli sebebi üç yönteminde I-V eğrisinin farklı bölgelerinde çalışılmasına atfedilebilir. Çünkü TE doğru öngerilimlemedeki I-V eğrisinin lineer kısmını, Norde doğru öngerilimlemedeki I-V eğrisinin tamamındaki verileri ve Cheung fonksiyonu ise I-V eğrisinin bükülmeye başladığı yerdeki lineer olmayan kısmı kullanmaktadır.

Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotunun doğru öngerilimlemede I-V eğrisinin lineerlikten sapmanın nedeni seri direnç (R_s) varlığına ve arayüzey durumlarının etkisine (N_{ss}) atfedildi. İdealite faktörü (n) değerinin 1'den büyük olmasının nedeni yalıtkan (Ag-ZnP/PVP) tabakanın kalınlığı, engel homojensizliği, tünel mekanizması, hayali Schottky etkisi ve arayüzey durumlarının M/S arayüzeyindeki dağılımına atfedildi.

C-V ve G/ω -V ölçümlerinden görüldü ki MPS tipi diyot tipik bir MIS yapının özelliği olan terslenim, tüketim ve yığılma olmak üzere üç bölgeye sahiptir. MPS tipi diyotun temel fiziksel özellikleri araştırmak için C^2 -V ölçümleri kullanılarak 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) ve engel yüksekliği (Φ_{B0}) gibi temel parametreler elde edildi. Elde edilen verilerden görüldü ki, frekans arttıkça ters beslem C^2 -V eğimlerinin artma meydana geldiğinden dolayı W_D ve E_F değerleri artan frekans ile artarken, N_D değeri artan frekans ile azalmaktadır. Düşük frekanslardaki Φ_{B0} değerinin düşük olması düşük frekanslardaki N_{ss} varlığına atfedildi.

I-V ve C-V değerleri kullanılarak elde edilen engel yüksekliği değerlerinin birbirinden farklı olduğu görüldü. Bu farklılık engel homojensizliği, metal-yarıiletken arayüzeyindeki yalıtkan tabakanın varlığı, kenar sızıntı akımı ve ölçüm sisteminin doğasına atfedildi.

Arayüzey durumları düşük frekanslarda ac sinyali takip edemezken yüksek frekanslarda bu sinyali takip edebilir. Bundan dolayı ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerlerine güçlü bir şekilde etki etmektedir. Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun arayüzey durumları hesaplanırken hem için Kondüktans Metodu hem de Yüksek-Düşük Frekans Kondüktans Metodu kullanıldı. Elde edilen sonuçlar ışığında görüldü ki iki yöntemden de

elde edilen değerler birbirleriyle uyum içerisinde ve N_{ss} değeri elektronik aygıtlar için uygun olan $10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ sınırındadır.

Aynı zamanda Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun dielektrik özelliklerini hem frekansa hem de gerilime bağlı incelemek amacıyla C-V ve G/ω -V kullanılarak dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülü (M' ve M'') ve ac elektrik iletkenliği (σ_{ac}) hesaplandı. ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerindeki frekansa bağlı değişimler Maxwell–Wagner tipi arayüzey kutuplanmasına atfedildi. M' değerinin terslenim ve tüketim bölgesinde frekansa bağımlı ve yığılma bölgesindeki değerinin frekanstan bağımsız olması yasak enerji aralığındaki arayüzey tuzaklarında yerleşmiş kısa mesafeli elektron-deşik hareketliliğinden dolayı iletim sürecine katkıda bulunabilmesine atfedildi. M'' değerinin tüketim bölgesinde pik alması ve pikin artan frekans ile yığılma bölgesine kayması Maxwell–Wagner tipi arayüzey kutuplanmaya ve (Ag-ZnO/PVP)/n-Si arayüzeyinde yerleşmiş arayüzey durumlarının dağılımına atfedildi. Ayrıca σ_{AC} değerinin artan frekans ile artması yüzey kutuplaşmasının azalmasına ve yapının seri direncine atfedildi.

Bu çalışmada hazırlanan Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun yapısı için gerçekleştirilen I-V, C-V, G/ω -V ve kapasitans-iletkenlik ölçümleri kullanılarak elde edilen ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$, M' , M'' ve σ_{AC} değerlerinin ölçümlerinden elde edilen sonuçlar ışığında aşağıda verilen öneri ve tavsiyelerin dikkate alınmasının bundan sonraki çalışmalarda yararlı olabilir;

- Arayüzey tabakasını yalnız ZnO olarak kullanmaktan ziyade buna PVP gibi polimer ve Ag gibi farklı plazmonik elementler katkılayarak elektriksel, yapısal ve optik özellikleri iyileştirilebilir.
- Hazırlanan Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky diyotun elektriksel ölçüm analizinde I-V ölçümlerinin yanı sıra diğer C-V ve G/ω -V ölçümlerinin de geniş bir frekans ve gerilim aralığında analiz edilmesi bize yapının özelliklerine dair daha kapsamlı bilgi verecektir.
- Arayüzey durumları (N_{ss}) aygıtın performansını etkileyen önemli bir parametre olduğu için bu durumların detaylıca incelenmesinin yanında analizinin de iyi yapılmasında fayda vardır.

- Özellikle yapıların metal-yarıiletken arasında oluşan engel biçimi hakkında net bilgiye sahip olunabilmesi için ölçümlerin sadece tek bir frekans veya gerilime bağlı değil daha geniş bir frekans ve gerilim aralığında analiz edilmesi gerekmektedir.
- Özellikle arayüzey durumları (N_{ss}) ve seri direnç (R_s) gibi yapıların ideallikten sapmasına neden olan parametrelerin I-V, C-V ve G/ω -V ölçümleri üzerinde azımsanmayacak kadar çok büyük bir etkiye sahip olduğu için detaylıca araştırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Seebeck, T.J. (1822). *Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperaturdifferenz*. Berlin: Abhandl Deut Akad Wiss, 265.
2. Faraday, M. (1833). *Experimental researches in electricity*. London: Bernard Quaritch, 433.
3. Braun, F. (1874). Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle. *Annual Review of Physical Chemistry*, 53, 556.
4. Schottky, W. (1938). Halbleitertheorie der Sperrschicht. *Naturwissenschaften*, 26, 843.
5. Schottky, W. Strömer, R. Waibel, F. (1931). On the rectifying action of cuprous oxide in contact with other metals. *Hochfrequenztechnik*. 37, 165.
6. Mott, N.F. (1938). Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34(4), 568–572.
7. Rhoderick, R. H., Williams, E.H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. London: Oxford University Press, 257–267.
8. Sharma, B.L. (1984). *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York: Plenum Press.
9. Schottky, W. (1939). Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht-und Spitzengleichrichter. *Zeitschrift für Physik*, 113(5–6), 367–414.
10. Bethe, H.A. (1942). *Theory of the boundary layer of crystal rectifiers*. MIT Radiation Laboratory Report.
11. Salimi, K., Atilgan, A., Aydin, M.Y., Yildirim, H., Celebi, N., Yildiz, A. (2019). Plasmonic mesoporous core-shell Ag-Au@TiO₂ photoanodes for efficient light harvesting in dye sensitized solar cells. *Solar Energy*, 193, 820–827.
12. Huang, Z., Carey, J.E., Liu, M., Guo, X., Mazur, E., Campbell, J.C. (2006). Microstructured silicon photodetector. *Applied Physics Letters*, 89(3), 033506.
13. Lee, C.-W., Afzalian, A., Akhavan, N.D., Yan, R., Ferain, I., Colinge, J.-P. (2009). Junctionless multigate field-effect transistor. *Applied Physics Letters*, 94(5), 053511.
14. Haus, H.A., Statz, H., Pucel, R.A. (1971). Noise measure of metal-semiconductor--metal Schottky-barrier microwave diodes. *Electronics Letters*, 7(22), 667–669.
15. Sze, S.M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*. New York: Wiley, 362–380.

16. Chattopadhyay, P. (1996). The effect of shunt resistance on the electrical characteristics of Schottky barrier diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29(3), 823–829.
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. Demirezen, S., Kaya, A., Yerişkin, S.A., Balbaşı, M., Uslu, I. (2016). Frequency and voltage dependent profile of dielectric properties, electric modulus and ac electrical conductivity in the PrBaCoO nanofiber capacitors. *Results in Physics*, 6, 180–185.
19. Güçlü, Ç.Ş., Özdemir, A.F., Karabulut, A., Kökce, A., Altındal, Ş. (2019). Investigation of temperature dependent negative capacitance in the forward bias C-V characteristics of (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 89, 26–31.
20. Demirezen, S., Orak, I., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal. (2017). Series resistance and interface states effects on the C–V and G/w–V characteristics in Au/(Co₃O₄-doped PVA)/n-Si structures at room temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(17), 12967–12976.
21. Kanbur, H., Altındal, Ş., Tataroğlu, A. (2005). The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes. *Applied Surface Science*, 252(5), 1732–1738.
22. Siva Pratap Reddy, M., Lee, J.-H., Jang, J.-S. (2013). Frequency dependent series resistance and interface states in Au/bio-organic/n-GaN Schottky structures based on DNA biopolymer. *Synthetic Metals*, 185–186, 167–171.
23. Rajagopal Reddy, V., Manjunath, V., Janardhanam, V., Kil, Y.H., Choi, C.J. (2014). Electrical properties and current transport mechanisms of the Au/n-GaN Schottky structure with solution-processed high-k BaTiO₃ interlayer. *Journal of Electronic Materials*, 43(9), 3499–3507.
24. Reddy, V.R. (2014). Electrical properties of Au/polyvinylidene fluoride/n-InP Schottky diode with polymer interlayer. *Thin Solid Films*, 556, 300–306.
25. Zhang, L., Cheng, Z.-Y. (2011). Development of Polymer-Based 0–3 Composites With High Dielectric Constant. *Journal of Advanced Dielectrics*, 01(04), 389–406.
26. Sevgili, Ö., Taşçıoğlu, İ., Boughdachi, S., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş. (2019). Examination of dielectric response of Au/HgS-PVA/n-Si (MPS) structure by impedance spectroscopy method. *Physica B: Condensed Matter*, 566, 125–135.
27. Kumari, N., Parui, J., Varma, K.B.R., Krupanidhi, S.B. (2006). C–V studies on metal–ferroelectric bismuth vanadate (Bi₂VO_{5.5})–semiconductor structure. *Solid State Communications*, 137(10), 566–569.

28. Grundmann, M. (2016). *The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Nanophysics and Applications*. Switzerland: Springer International Publishing, 585.
29. Nicollian, E.H., Brews, J.R. (1982). *Metal oxide semiconductor (MOS) physics and technology*. New York, 257–264.
30. Ho, J., Jow, T.R., Boggs, S. (2010). Historical introduction to capacitor technology. ***IEEE Electrical Insulation Magazine***, 26(1), 20–25.
31. Jayalakshmi, M., Balasubramanian, K. (2008). Simple capacitors to supercapacitors-An overview. ***International Journal of Electrochemical Science***, 3(11), 1196–217.
32. Kaya, A., Sevgili, Ö., Altındal, Ş. (2014). Energy density distribution profiles of surface states, relaxation time and capture cross-section in Au /n-type 4H-SiC SBDs by using admittance spectroscopy method. ***International Journal of Modern Physics B***, 28(17), 1450104.
33. Neamen, D.A. (2011). *Semiconductor Physics And Devices: Basic Principles*. New York: McGraw-Hill.
34. Ziel, A. (1968). *Solid State Physical Electronics*. Minnesota: Prentice-Hall International Inc. 260–300.
35. Altındal, S., Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). The Structural and Electrical Properties of the Au/n-Si (MS) Diodes With Nanocomposites Interlayer (Ag-Doped ZnO/PVP) by Using the Simple Ultrasound-Assisted Method. ***IEEE Transactions on Electron Devices***, 66(7), 3103–3109.
36. Schroder, D.K. (1998). *Semiconductor Material and Device Characterization*. New York: Wiley.
37. Kao, W.-C. (2015). *Characterization of Interface State in Silicon Carbide Metal Oxide Semiconductor Capacitors* (Doctoral dissertation, Arizona State University, 2015).
38. Sze, S.M., Kwok, K.N. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*. New Jersey: John Wiley & Sons. 362–390.
39. Nicollian, E.H., Goetzberger, A. (1967). The Si-SiO₂ Interface – Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique. ***The Bell System Technical Journal***, 46, 1055–1133.
40. Terman, L.M. (1962). An investigation of surface states at a silicon/silicon oxide interface employing metal-oxide-silicon diodes. ***Solid-State Electronics***, 5, 258–299.
41. Berglund, C.N. (1966). Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces. ***IEEE Transactions On Electron Devices***, 13(10), 701–705.

42. Castagne, R., Vapaille, A. (1971). Description of the SiO₂-Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance Measurements. ***Surface Science***, 28, 157–193.
43. Tareev, B. (1979). *Physics of Dielectric Materials*. Moscow: Mir Publishers, 67–95, 140–156.
44. Von Hippel, A.R. (1959). *Dielectrics and Waves*. New York: John Wiley & Sons, 3–8, 63–122, 160–166, 228–234.
45. Fröhlich, H. (1958). *Theory of Dielectrics*. Oxford: Clarendon Press, 1–21, 70–78.
46. Kasap, S.O. (2018). *Principles Of Electronic Materials And Devices*. New York: McGraw- Hill.
47. Oral, M. (1983). *Elektrostatik*. İzmir: Ege Üniversitesi Matbaası, 221–252.
48. Popescu, M., Bunget, I. (1984). *Physics of Solid Dielectrics*. Amsterdam: Elsevier.
49. Wert, C.A., Thomson, R.M. (1970). *Physics of Solids*. New York: McGraw-Hill.
50. Chelkowski, A. (1980). *Dielectric Physics*. Amsterdam: Elsevier.
51. Symth, C.P. (1995). *Dielectric Behaviour and Structure*. New York: McGraw-Hill.
52. Mc Crum, N.G., Read, B.E., Williams, G. (1967). *Anelastic and Dielectric Effects in Polymeric Solids*. London: John Wiley.
53. Macedo, P.B., Moynihan, C.T., Bose, R. (1972). Dielectric modulus: experiment, application, and interpretation,. ***Physics and Chemistry of Glasses***, 13(6), 171–179.
54. Dridi, D., Litaïem, Y., Karyauoui, M., Chtouron, R. (2019). Correlation between photoelectrochemical and photoluminescence measurements of Ag-doped ZnO/ITO photoanode. ***The European Physical Journal Applied Physics***, 85(2), 1–11.
55. Lam, S.M., Sin, J.C., Abdullah, A.Z., Mohamed, A.R. (2012). Degradation of wastewaters containing organic dyes photocatalysed by zinc oxide: A review. ***Desalination and Water Treatment***, 41(1–3), 131–169.
56. Nickel, N.H., Terukov, E. (2005). *Zinc Oxide-A Materialfor Micro-and Optoelectronic Applications*. Netherlands: Springer.
57. Jagadish, C., Pearton, S.J. (2006). *Zinc Oxide Bulk, Thin Films, and Nanostructures*. New York: Elsevier.
58. Znaidi, L., Touam, T., Vrel, D., Souded, N., Yahia, S., Brinza, O., Fischer, A., Boudrioua, A. (2013). AZO Thin Films by Sol-Gel Process for Integrated Optics. ***Coatings***, 3(3), 126–139.

59. Gurav, K.V., Gang, M.G., Shin, S.W., Patil, U.M., Deshmukh, P.R., Agawane, G.L., Suryawanshi, M.P., Pawar, S.M., Patil, P.S., Lokhande, C.D., Kim, J.H. (2014). Gas sensing properties of hydrothermally grown ZnO nanorods with different aspect ratios. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 190, 439–445.
60. Thongsuriwong, K., Amornpitoksuk, P., Suwanboon, S. (2012). Photocatalytic and antibacterial activities of Ag-doped ZnO thin films prepared by a sol-gel dip-coating method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 62(3), 304–312.
61. Özgür, Ü., Alivov, Y.I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M.A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S.J., Morkoç, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 1–103.
62. Gouthaman, A., J., A.A., Gnanaprakasam, A., Sivakumar, V.M., Thirumarimurugan, M., Riswan Ahamed, M.A., Azarudeen, R.S. (2019). Enhanced dye removal using polymeric nanocomposite through incorporation of Ag doped ZnO nanoparticles: Synthesis and characterization. *Journal of Hazardous Materials*, 373, 493–503.
63. Molla, M.A.I., Furukawa, M., Tateishi, I., Katsumata, H., Kaneco, S. (2019). Fabrication of Ag-doped ZnO by mechanochemical combustion method and their application into photocatalytic Famotidine degradation. *Journal of Environmental Science and Health-Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 54(9), 914–923.
64. Khomchenko, V., Mazin, M., Sopinsky, M., Lytvyn, O., Dan'ko, V., Piryatinskii, Y., Demydiuk, P. (2019). Preparation, structural and luminescent properties of nanocrystalline ZnO films doped Ag by close space sublimation method. *Applied Nanoscience*, 9(5), 623–930.
65. Yan, Y., Al-Jassim, M.M., Wei, S.H. (2006). Doping of ZnO by group-IB elements. *Applied Physics Letters*, 89(18), 181912.
66. Duan, L., Lin, B., Zhang, W., Zhong, S., Fu, Z. (2006). Enhancement of ultraviolet emissions from ZnO films by Ag doping. *Applied Physics Letters*, 88(23), 1–4.
67. Li, X., He, S., Liu, X., Jin, J., Meng, H. (2019). Polymer-assisted freeze-drying synthesis of Ag-doped ZnO nanoparticles with enhanced photocatalytic activity. *Ceramics International*, 45(1), 494–502.
68. Bian, H.Q., Ma, S.Y., Zhang, Z.M., Gao, J.M., Zhu, H.B. (2014). Microstructure and Raman scattering of Ag-doping ZnO films deposited on buffer layers. *Journal of Crystal Growth*, 394, 132–136.
69. Lu, Y.M., Li, X.P., Su, S.C., Cao, P.J., Jia, F., Han, S., Zeng, Y.X., Liu, W.J., Zhu, D.L. (2014). The effect of O₂ partial pressure on the photoluminescence of ZnO thin films grown by pulsed laser deposition. *Journal of Luminescence*, 152, 254–257.

70. Li, W.J., Kong, C.Y., Ruan, H.B., Qin, G.P., Huang, G.J., Yang, T.Y., Liang, W.W., Zhao, Y.H., Meng, X.D., Yu, P., Cui, Y.T., Fang, L. (2012). Electrical properties and Raman scattering investigation of Ag doped ZnO thin films. ***Solid State Communications***, 152(2), 147–150.
71. Cheng, Y.-C., Yuan, K.-Y., Chen, M.-J. (2016). ZnO thin films prepared by atomic layer deposition at various temperatures from 100 to 180 °C with three-pulsed precursors in every growth cycle. ***Journal of Alloys and Compounds***, 685, 391–394.
72. Thomas, M.A., Sun, W.W., Cui, J.B. (2012). Mechanism of Ag doping in ZnO nanowires by electrodeposition: Experimental and theoretical insights. ***Journal of Physical Chemistry C***, 116(10), 6383–6391.
73. Kumar, M., Singh, B., Yadav, P., Bhatt, V., Kumar, M., Singh, K., Abhyankar, A.C., Kumar, A., Yun, J.-H. (2017). Effect of structural defects, surface roughness on sensing properties of Al doped ZnO thin films deposited by chemical spray pyrolysis technique. ***Ceramics International***, 43(4), 3562–3568.
74. Touam, T., Boudjouan, F., Chelouche, A., Khodja, S., Dehimi, M., Djouadi, D., Solard, J., Fischer, A., Boudrioua, A. (2015). Effect of silver doping on the structural, morphological, optical and electrical properties of sol–gel deposited nanostructured ZnO thin films. ***Optik***, 126(24), 5548–5552.
75. Rathinamoorthy, R. (2019). Performance analysis of Polyvinylpyrrolidone. ***International Journal of Clothing Science and Technology***, 31(5), 619–629.
76. Toloman, D., Pana, O., Stefan, M., Popa, A., Leostean, C., Macavei, S., Silipas, D., Perhaita, I., Lazar, M.D., Barbu-Tudoran, L. (2019). Photocatalytic activity of SnO₂-TiO₂ composite nanoparticles modified with PVP. ***Journal of Colloid and Interface Science***, 542, 296–307.
77. Ismael Raafat, A., El-Hag Ali, A. (2019). A novel Lawsonia inermis (Henna)/(hydroxyethylcellulose/polyvinylpyrrolidone) wound dressing hydrogel: radiation synthesis, characterization and biological evaluation. ***Polymer Bulletin***, 76(8), 4069–4086.
78. Haaf, F., Sanner, A., Straub, F. (1985). Polymers of N-Vinylpyrrolidone: Synthesis, Characterization and Uses. ***Polymer Journal*** volume, 17, 143–152.
79. Chin, W.W.L., Heng, P.W.S., Thong, P.S.P., Bhuvaneswari, R., Hirt, W., Kuenzel, S., Soo, K.C., Olivo, M. (2008). Improved formulation of photosensitizer chlorin e6 polyvinylpyrrolidone for fluorescence diagnostic imaging and photodynamic therapy of human cancer. ***European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics***, 69(3), 1083–1093.
80. Xu, X., Wang, Q., Choi, H.C., Kim, Y.H. (2010). Encapsulation of iron nanoparticles with PVP nanofibrous membranes to maintain their catalytic activity. ***Journal of Membrane Science***, 348(1–2), 231–237.

81. Yu, D.-G., White, K., Yang, J.-H., Wang, X., qian, W., Li, Y. (2012). PVP nanofibers prepared using co-axial electrospinning with salt solution as sheath fluid. **Materials Letters**, 67(1), 78–80.
82. Koczkur, K.M., Mourdikoudis, S., Polavarapu, L., Skrabalak, S.E. (2015). Polyvinylpyrrolidone (PVP) in nanoparticle synthesis. **Dalton Transactions**, 44(41), 17883–17905.
83. Lu, X., Niu, M., Qiao, R., Gao, M. (2008). Superdispersible PVP-Coated Fe₃O₄ Nanocrystals Prepared by a “One-Pot” Reaction. **The Journal of Physical Chemistry B**, 112(46), 14390–14394.
84. Ziaei-Azad, H., Semagina, N. (2014). Bimetallic catalysts: Requirements for stabilizing PVP removal depend on the surface composition. **Applied Catalysis A: General**, 482, 327–335.
85. Martín-Alfonso, J.E., Číková, E., Omastová, M. (2019). Development and characterization of composite fibers based on tragacanth gum and polyvinylpyrrolidone. **Composites Part B: Engineering**, 169, 79–87.
86. Zhang, Y., Park, M., Kim, H.-Y., El-Newehy, M., Rhee, K.Y., Park, S.-J. (2015). Effect of TiO₂ on photocatalytic activity of polyvinylpyrrolidone fabricated via electrospinning. **Composites Part B: Engineering**, 80, 355–360.
87. Raimi-Abraham, B.T., Mahalingam, S., Edirisinghe, M., Craig, D.Q.M. (2014). Generation of poly(N-vinylpyrrolidone) nanofibres using pressurised gyration. **Materials Science and Engineering: C**, 39, 168–176.
88. Nasouri, K., Shoushtari, A.M., Mojtahedi, M.R.M. (2015). Evaluation of effective electrospinning parameters controlling polyvinylpyrrolidone nanofibers surface morphology via response surface methodology. **Fibers and Polymers**, 16(9), 1941–1954.
89. Kumar, K.S., Divya, A., Reddy, P.S. (2011). Synthesis and characterization of Cr doped CdS nanoparticles stabilized with polyvinylpyrrolidone. **Applied Surface Science**, 257(22), 9515–9518.
90. Wang, Y., Chen, P., Liu, M. (2006). Synthesis of well-defined copper nanocubes by a one-pot solution process. **Nanotechnology**, 17, 6000–6006.
91. Dreaden, E.C., Alkilany, A.M., Huanh, X., Murphy, C.J., El-Sayed, M.A. (2012). The golden age: gold nanoparticles for biomedicine. **Chemical Society Reviews**, 41, 2740–2779.
92. Sun, Y., Xia, Y. (2002). Large-Scale Synthesis of Uniform Silver Nanowires Through a Soft, Self-Seeding, Polyol Process. **Advanced Materials**, 14(11), 833–837.
93. Wang, Y., Xie, S., Liu, J., Park, J., Huang, C.Z., Xia, Y. (2013). Shape-Controlled Synthesis of Palladium Nanocrystals: A Mechanistic Understanding of the Evolution from Octahedrons to Tetrahedrons. **Nano Letters**, 13, 2276–2281.

94. Ye, F., Hu, W., Zhang, T., Yang, J., Ding, Y. (2012). Enhanced electrocatalytic activity of Pt-nanostructures prepared by electrodeposition using poly(vinyl pyrrolidone) as a shape-control agent. ***Electrochimica Acta***, 83, 383–386.
95. Zhang, Y.J., Yao, Q., Zhang, Y., Cui, T.Y., Li, D., Liu, W., Lawrence, W., Zhang, Z.D. (2008). Solvothermal Synthesis of Magnetic Chains Self-Assembled by & Desing. ***Crystal Growth & Design***, 8(9), 3206–3212.
96. Zhou, W., Lin, L., Zhao, D., Guo, L. (2011). Synthesis of nickel bowl-like nanoparticles and their doping for inducing planar alignment of a nematic liquid crystal. ***Journal of the American Chemical Society***, 133(22), 8389–8391.
97. Singh, S.K., Yadav, M., Behrens, S., Roesky, P.W. (2013). Au-based bimetallic nanoparticles for the intramolecular aminoalkene hydroamination. ***Dalton Transactions***, 42, 10404–10408.
98. Villa, A., Wang, D., Su, D.S., Prati, L. (2015). New challenges in gold catalysis: bimetallic systems. ***Catalysis Science & Technology***, 5, 55–68.
99. Zhang, Q.M.; Hengfeng, Li ; Martin, Poh ; Feng, Xia ; Cheng, Z-Y. ; Haisheng, Xu ; Cheng, H. (2002). An all-organic composite actuator material with a high dielectric constant. ***Nature***, 419, 284–287.
100. Hemalatha, K.S., Sriprakash, G., Ambika Prasad, M.V.N., Damle, R., Rukmani, K. (2015). Temperature dependent dielectric and conductivity studies of polyvinyl alcohol-ZnO nanocomposite films by impedance spectroscopy. ***Journal of Applied Physics***, 118(15), 154103.
101. Card, H.C., Rhoderick, E.H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. ***Journal of Physics D: Applied Physics***, 4, 1589–1601.
102. Cheung, S.K., Cheung, N.W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. ***Applied Physics Letters***, 49(2), 85–87.
103. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. ***Journal of Applied Physics***, 50, 5052–5053.
104. Ahmed, M.A., Mwankemwa, B.S., Carleschi, E., Doyle, B.P., Meyer, W.E., Nel, J.M. (2018). Effect of Sm doping ZnO nanorods on structural optical and electrical properties of Schottky diodes prepared by chemical bath deposition. ***Materials Science in Semiconductor Processing***, 79, 53–60.
105. Yildırım, M., Kocyigit, A. (2018). Characterization of Al/In:ZnO/p-Si photodiodes for various In doped level to ZnO interfacial layers. ***Journal of Alloys and Compounds***, 768, 1064–1075.
106. Rebaoui, Z., Bachir Bouiajra, W., Abboun Abid, M., Saidane, A., Jammel, D., Henini, M., Felix, J.F. (2017). SiC polytypes and doping nature effects on electrical properties of ZnO-SiC Schottky diodes. ***Microelectronic Engineering***, 171, 11–19.

107. Zhu, S., Detavernier, C., Van Meirhaeghe, R., Cardon, F., Ru, G.-P., Qu, X.-P., Li, B.-Z. (2000). Electrical characteristics of CoSi₂/n-Si(1 0 0) Schottky barrier contacts formed by solid state reaction. ***Solid-State Electronics***, 44(10), 1807–1818.
108. Werner, J.H., Güttler, H.H. (1991). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. ***Journal of Applied Physics***, 69(3), 1522–1533.
109. Siad, M., Keffous, A., Mamma, S., Belkacem, Y., Menari, H. (2004). Correlation between series resistance and parameters of Al/n-Si and Al/p-Si Schottky barrier diodes. ***Applied Surface Science***, 236(1–4), 366–376.
110. Crowell, C.R. (1977). The physical significance of the T₀ anomalies in Schottky barriers. ***Solid-State Electronics***, 20(3), 171–175.
111. Tuy, T.Q., Mojzes, I., Szentpali, B. (1993). Dependence of Schottky barrier height on the ratio of different metal components. ***Periodica Polytechnica Electrical Engineering***, 37(1), 3–19.
112. Tung, R.T. (2001). Recent advances in Schottky barrier concepts. ***Materials Science and Engineering: R: Reports***, 35(1–3), 1–138.
113. Tamm, I. (1932). Über eine mögliche Art der Elektronenbindung an Kristalloberflächen. ***Zeitschrift für Physik***, 76(11–12), 849–850.
114. Shockley, W. (1939). On the surface states associated with a periodic potential. ***Physical Review Journals Archive***, 56(4), 317–323.
115. Abdullah, O.G., Salman, Y.A.K., Saleem, S.A. (2016). Electrical conductivity and dielectric characteristics of in situ prepared PVA/HgS nanocomposite films. ***Journal of Materials Science: Materials in Electronics***, 27(4), 3591–3598.
116. Batoo, K.M., Ansari, M.S. (2012). Low temperature-fired Ni-Cu-Zn ferrite nanoparticles through autocombustion method for multilayer chip inductor applications. ***Nanoscale Research Letters***, 7, 1–31.
117. Yücedağ, İ., Altındal, Ş., Tataroğlu, A. (2007). On the profile of frequency dependent series resistance and dielectric constant in MIS structure. ***Microelectronic Engineering***, 84(1), 180–186.
118. Tataroglu, 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(1), 140–149.
119. Maxwell, J.C. (1973). *Electricity and Magnetism*. London: Oxford Press.
120. Daniel, V. (1967). *Dielectric Relaxation*. London and New York: Academic Press.

121. Maril, E., Tan, S.O., Altındal, S., Uslu, I. (2018). Evaluation of Electric and Dielectric Properties of Metal–Semiconductor Structures With 2% GC-Doped- $(\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{Ga}_{0.001}\text{O}_x)$ Interlayer. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65(9), 3901–3908.
122. Lapa, H.E., Kökce, A., Özdemir, A.F., Uslu, İ., Altındal, Ş. (2018). A comparative study on dielectric behaviours of Au/(Zn-doped PVA)/n-4H-SiC (MPS) structures with different interlayer thicknesses using impedance spectroscopy methods. *Bulletin of Materials Science*, 41(3), 82.
123. Baraz, N., Yücedağ, İ., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş. (2018). Determining electrical and dielectric parameters of Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) structures in wide range of temperature and voltage. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(15), 12735–12743.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SEVGİLİ, Ömer
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 03.10.1990, Çankırı
 Medeni hali : Evli
 e-mail : omersevgili06@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Fizik	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	2013
Lisans	Ahi Evran Üniversitesi / Fizik	2011
Lise	Pursaklar Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	Bingöl Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

A. Science Citation Index (SCI) ve Science Citation Index-Expanded (SCI-Exp.) Kapsamındaki Dergilerde Yayımlanmış Yayın Bilgileri

- Sevgili, Ö., Yıldırım, M., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş. (2020). A comparison study regarding Al/p-Si and Al/(carbon nanofiber-PVP)/p-Si diodes: current/impedance-voltage (I/Z-V) characteristics. *Applied Physics A Materials Science & Processing*, 126, 634.
- Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş. (2020). Frequency and voltage dependence of electrical and dielectric properties in metal-interfacial layer-semiconductor (MIS) type structures. *Physica B:Condensed Matter*, 587, 412122.

3. Taşcıoğlu, İ., Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş. (2020). Frequency-Dependent Admittance Analysis of Au/n-Si Structure with CoSO₄-PVP Interfacial Layer. **Journal of Electronic Materials**, 49, 3720-3727.
4. Sevgili, Ö., Canlı, S., Akman, F., Orak, İ., Karabulut, A., Yıldırım, N. (2020). Characterization of aluminum 8-hydroxyquinoline microbelts and microdots, and photodiode applications. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, 136, 109128.
5. Altındal, Ş., Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). The Structural and Electrical Properties of the Au/n-Si (MS) Diodes with Nanocomposites Interlayer (Ag-Doped ZnO/PVP) by Using the Simple Ultrasound-Assisted Method. **IEEE Transactions on Electron Devices**, 66, 3103–3109.
6. Çetinkaya, H.G., Sevgili, Ö., Altındal, Ş. (2019). The fabrication of Al/p-Si (MS) type photodiode with (%2 ZnO-doped CuO) interfacial layer by sol gel method and their electrical characteristics. **Physica B:Condensed Matter**, 560, 91–96.
7. Sevgili, Ö., Lafzi, F., Karabulut, A., Orak, İ., Bayındır, S. (2019). The synthesis of new bola-amphiphile TPEs and the comparison of current transformer mechanism and structural properties for Al/Bis(HCTA)-TPE/p-Si and Al/Bis(HCOA)-TPE/p-Si heterojunctions. **Composites Part B:Engineering**, 172, 226–233.
8. Sevgili, Ö., Taşcıoğlu, İ., Boughdachi, S., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş. (2019). Examination of dielectric response of Au/HgS-PVA/n-Si (MPS) structure by impedance spectroscopy method. **Physica B:Condensed Matter**, 566, 125–135.
9. Altındal, Ş., Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). A comparison of electrical parameters of Au/n-Si and Au/(CoSO₄-PVP)/n-Si structures (SBDs) to determine the effect of (CoSO₄-PVP) organic interlayer at room temperature. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, 30, 9273–9280.
10. Bilkan, Ç., Azizian-Kalandaragh, Y., Sevgili, Ö., Altındal, S. (2019). Investigation of the efficiencies of the (SnO₂-PVA) interlayer in Au/n-Si (MS) SDs on electrical characteristics at room temperature by comparison. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, 30, 20479–20488.
11. Sevgili, Ö., Yılmaz, S., Altındal, Ş., Bacaksız, E., Bilkan, Ç. (2017). The Investigation of Current-Conduction Mechanisms of Te/NaF:CdS/SnO₂ Structure in Wide Temperature Range of 80–400 K. **Proceedings of the National Academy of Sciences India Section A-Physical Sciences**, 87, 409–417.
12. Kaya, A., Sevgili, Ö., Altındal, Ş., Öztürk, M.K. (2015). Current-conduction mechanism in Au/n-4H-SiC Schottky barrier diodes. **Indian Journal of Pure and Applied Physics**, 53, 56–65.
13. Kaya, A., Sevgili, Ö., Altındal, Ş. (2014). Energy density distribution profiles of surface states, relaxation time and capture cross-section in Au /n-type 4H-SiC SBDs by using admittance spectroscopy method. **International Journal of Modern Physics B**, 28, 1450104.

B. TR Dizin ve Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Yayın Bilgileri

1. Özdemir, M. C., Sevgili, Ö., Orak, İ., Türüt, A., (2020). The Effect of Measurement Frequency on Dielectric Characteristics in Al/p-Si Structures with Interfacial Native Oxide Layer. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10 (1), 91-100.
2. Özdemir, M. C., Sevgili, Ö., Orak, İ., Türüt, A., (2019). Effect of measurement frequency on admittance characteristics in Al/p-Si structures with interfacial native oxide layer. *International Journal of Chemistry and Technology*, 3 (2), 129-135.

C. Hakemli Uluslararası Bilimsel Kongrede Sözlü Olarak Sunulan ve Yayımlanan Tam Bildiri Bilgileri

1. Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş. (2019, 17.08.2019-19.08.2019). A Comparison Electrical Parameters of Au/n-Si (MS) and Au/(ITO-PVP)/n-Si (MPS) Structures Obtained from the Forward Bias (I-V) and Reverse Bias (C-V) Characteristics, *1st International Conference on Optoelectronics*, Applied Optics and Microelectronics, Namin, Ardabil, Iran.

D. Uluslararası Kongrelerde Sunulan Poster Özetleri

1. Şahinkaya, M. A., Sevgili, Ö., Orak, İ. (2019, 04.09.2019-08.09.2019). *The Electrical Characteristics Of Schottky Diode Fabricated with and without the Interface in a Wide Frequency*, Turkish Physical Society 35th International Physich Congress, Bodrum.
2. Orak, İ., Sevgili, Ö., Akman, F. (2018, 19.06.2018-21.06.2018). *The Organic Thin Film Characterization and Its Optical and Electrical Band Gap Properties*, International Conference On Physical Chemistry and Functional Materials, Elazığ.
3. Şahinkaya, M. A., Bayındır, S., Orak, İ., Sevgili, Ö., (2018, 19.06.2018-21.06.2018). *Design and Fabrication of Organic-Silicon Photodiode*, International Conference On Physical Chemistry and Functional Materials, Elazığ.
4. Sevgili, Ö., Şahinkaya, M. A., Orak, İ., Özel, F., Altındal, Ş. (2018, 05.09.2018-09.09.2018). *Frequency Dependent on Electric Properties of Al/TiO₂-(R-CuWs)/p-Si Schottky Diode*, Turkish Physical Society 34th International Physich Congress, Bodrum.
5. Şahinkaya, M. A., Sevgili, Ö., Orak, İ. (2018, 05.09.2018-09.09.2018). *Examination of Electrical Properties of Doped Organic Layer/Scottky Diodes*, Turkish Physical Society 34th International Physich Congress, Bodrum.
6. Sevgili, Ö., Şahinkaya, M. A., Orak, İ., Altındal, Ş. (2018, 05.09.2018-09.09.2018). *The Photovoltaic Properties of Al/TiO₂/p-Si Schottky Diode*, Turkish Physical Society 34th International Physich Congress, Bodrum.
7. Şahinkaya, M. A., Sevgili, Ö., Orak, İ. (2018, 05.09.2018 -09.09.2018). *On the Electrical and Photovoltaic Properties of Al/p-Si Schottky Diode*, Turkish Physical Society 34th International Physich Congress, Bodrum.

8. Sevgili, Ö., Orak, İ., Geçibesler, İ. H., Türüt, A. (2017, 17.08.2017-19.08.2017). *The Electrical Characterization Of Organic Interfaceon Electronic Device*, International Congress On Semiconductor Materials And Devices, Konya.
9. Sevgili, Ö., Bağcı, U., Orak, İ. (2017, 28.06.2017-30.06.2017). *The Investigation of Electrical and Photovoltaic Properties of Au/n-GaAs Schottky Diodes Under Dark and Illumination Conditions*, 4th International conference on materials science and nanotechnology for next generation, Sarajevo.
10. Sevgili, Ö., Altındal, Ş., Bacaksız, E. (2017, 28.06.2017-30.06.2017). *The Investigation Of The Frequency Dependent Profile Of Te/NaF:CdS/SnO₂ Schottky Diodes*, 4th International conference on materials science and nanotechnology for next generation, Sarajevo.
11. Sevgili, Ö., Bağcı, U., Orak, İ. (2017, 28.06.2017-30.06.2017). *The Analysis Of Electrical Characteristics Of Al/Graphane/p-Si Schottky Diodes*, 4th International conference on materials science and nanotechnology for next generation, Sarajevo.
12. Vural, Ö., Sevgili, Ö., Kaya, A., Tecimer, H., Altındal, Ş. (2014, 13.01.2014-15.01.2014). *Current Voltage Temperature I-V-T Characteristics of Al/V doped PVC-TCNQ/p-Si Structures*, International Semiconductor Science & Technology Conference, İstanbul.



GAZİ GELECEKTİR..