
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

BETA RADYASYONUNA MARUZ BIRAKILAN Au/(PVA:Gr)/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİK VE DİELEKTRİK PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Özlem ABAY

DOKTORA TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;91

- 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 çalışmasında 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.

Özlem ABAY
19/12/2025

BETA RADYASYONUNA MARUZ BIRAKILAN Au/(PVA:Gr)/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİK VE DİELEKTRİK PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Özlem ABAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2025

ÖZET

Bu çalışmada, Au/%3 Grafen katkılı PVA/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar elektro-eğirme yöntemi ile hazırlanmış ve beta radyasyonunun MPS yapısı üzerine elektrik ve dielektrik özellikleri araştırılmıştır. 1 MHz frekansında akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω-V) ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçümlerden ln(I)-V grafiğinin lineer bölgesinden faydalanılarak sıfır-beslem bariyer yüksekliği (Φ_{B0}), idealite faktörü (n) ve ters doyum akımı (I_0) gibi diyot parametreleri beta radyasyonundan önce ve sonra elde edilmiştir. Ayrıca seri direnç (R_s), şönt direnç (R_{sh}) ve doğrultma oranı (RR) gibi diğer diyot parametreleri de hesaplanarak literatürle karşılaştırılarak yorumlanmıştır. n, Φ_{B0} ve R_s gibi diyot parametrelerinin radyasyona bağlı değişimlerini ikinci bir yöntem olarak Cheung fonksiyonları ile, Φ_{B0} ve R_s parametre değerleri üçüncü bir yöntem olarak Norde fonksiyonu ile hesaplandı. Bu üç yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır. MPS yapısına ait beta radyasyonun C–V ve G/ω–V ölçümleri kullanılarak C^{-2}–V grafiğinden Fermi enerji seviyesi (E_F), bariyer yüksekliği (Φ_B), verici katkı atom yoğunluğu (N_D) ve tükenim tabakası genişliği (W_D) gibi diğer diyot parametreleri de elde edilerek beta radyasyonunun MPS yapısı üzerine etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Radyasyon yokken yüksek (1 MHz) ve düşük (1 kHz) frekans kapasitans (C_{HF}-C_{LF}) yöntemi ile radyasyondan önce ve sonra kapasitans (C_{After}-C_{Befor}) yöntemi kullanılarak 22 kGy beta radyasyon dozundan sonra arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) değerleri elde edilerek yorumlanmıştır. Ayrıca MPS yapısının dielektrik sabitinin (ε′), dielektrik kayıp (ε′′), kayıp tanjantı (tan δ), ac iletkenlik (σ_{ac}), elektrik modülüsünün gerçel (M′) ve sanal (M′′) birleşenleri, empedansın gerçel (Z′) ve sanal (Z′′) birleşenleri ile faz açısı (θ) gibi dielektrik özellikleri beta radyasyonundan önce ve sonra hesaplanmıştır. Sonuç olarak tüm elektrik ve dielektrik parametrelerinin beta radyasyonundan etkilendiği sonucuna varılsa da 0-22 kGy beta radyasyon dozu aralığındaki MPS yapısının çalışmasını önleyecek önemli bir kusur/bozulma tespit edilmemiştir. Ayrıca polimer tabakası, geleneksel yalıtkan tabakalar ile karşılaştırıldığında, daha az enerji gerektirmesinin yanı sıra esnek, ucuz ve molekül başına hafif olma gibi bazı avantajlara sahiptir. Dolayısıyla, polimer arayüzey tabakası kullanılarak hazırlanan MPS yapısı, uygulamalarda MIS/MOS tipi yapılar yerine başarılı bir şekilde kullanılabilirler. Üretilen MPS yapısından elde edilen yüksek dielektrik sabiti (ε′~ 408) üretilen yapıda daha fazla yük/enerji depolanabileceğini göstermiştir.

Bilim Kodu : 91704
Anahtar Kelimeler : Schottky diyotlar, beta radyasyon etkileri, MPS yapı, grafen, elektrik ve dielektrik özellikler
Sayfa Adedi : 142
Danışman : Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK

INVESTIGATION OF ELECTRICAL AND DIELECTRIC PARAMETERS OF Au/(PVA:Gr)/n-Si SCHOTTKY DIODES EXPOSED TO BETA RADIATION

(Ph. D. Thesis)

Özlem ABAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2025

ABSTRACT

In this study, Au/3% graphene doped PVA/n-Si (MPS) type Schottky diodes were prepared by electrospinning method, and the electrical and dielectric properties of beta radiation on the MPS structure were investigated. Current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V), and conductance-voltage (G/ω-V) measurements were taken at 1 MHz frequency. Using the linear region of ln(I)–V plot, diode parameters, the zero-bias barrier height (Φ_{B0}), ideality factor (n), and reverse saturation current (I_0) were obtained before and after beta irradiation. Likewise, from the I–V characteristics, additional diode parameters, series resistance (R_s), shunt resistance (R_{sh}), and rectification ratio (RR) were determined and discussed in comparison with the literature. As a second approach, Cheung's functions were used to evaluate irradiation-induced changes in n, Φ_{B0}, and R_s; as a third method, the Norde function was employed to determine Φ_{B0} and R_s. Results from the three methods were compared and interpreted. Using C^{-2}–V plots derived from the C–V and G/ω–V measurements of the MPS structure, further parameters, the Fermi level (E_F), barrier height (Φ_B), donor density (N_D), and depletion width (W_D) were extracted to examine in detail the influence of beta irradiation. In the absence of irradiation, using the high (1 MHz) and low (1 kHz) frequency capacitance (C_{HF}-C_{LF}) method and, by employing the capacitance-difference method (C_{After}-C_{Before}) before and after irradiation, the interface-state density (N_{ss}) values after a 22 kGy beta irradiation dose were obtained. In addition, the dielectric properties of the MPS structure, such as the dielectric constant (ε′), dielectric loss (ε″), loss tangent (tan δ), ac conductivity (σac), the real (M′) and imaginary (M″) components of the electric modulus, the real (Z′) and imaginary (Z″) components of the impedance, and the phase angle (θ) were calculated before and after beta irradiation. In conclusion, although it was concluded that all electrical and dielectric parameters were affected by beta irradiation, no significant defect or degradation that could hinder the operation of the MPS structure was detected within the 0-22 kGy dose range. Moreover, compared to conventional insulating layers, the polymer layer offers several advantages such as lower energy requirements, flexibility, low cost, and light molecular weight. Therefore, MPS structure fabricated using a polymer interfacial layer can be effectively utilized in place of MIS/MOS-type structures in various applications. The high dielectric constant obtained from the fabricated MPS device ($\varepsilon' \approx 408$) indicates that the polymer interfacial layer can successfully replace conventional insulators and that the resulting MPS structure can store a larger amount of charge or energy.

Science Code : 91704
Key Words : Schottky diodes, beta irradiation effects, MPS structure, graphene, electrical and dielectric properties
Page Number : 142
Supervisor : Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma sürecinde bilgi ve tecrübelerinden her zaman yararlandığım. Bilimsel katkı ve yardımlarıyla beni yönlendirerek çalışmalarım için desteğini ve emeğini esirgemeyen, beni yüreklendiren, özverisini ve iş disiplinini örnek aldığım, öğrencisi olarak her zaman gurur duyacağım değerli tez danışmanım Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK'a tüm içtenlikle teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Tezdeki çalışmalara akademik olarak katkıda bulunan Tez İzleme Komitesi üyelerinden "Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Ana Bilim Dalı" ndan Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a ve "Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği" nden Prof. Dr. Abdullah YILDIZ'a çok teşekkür ederim. Ayrıca "Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü" Prof. Dr. Uğur GÖKMEN hocamıza da sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmalarım boyunca üstün deneyim ve tecrübelerini benimle paylaşan, ilgi, hoşgörü ve yardımlarını hiç esirgemeden paylaşan çok değerli hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a yeniden teşekkür eder saygılarımı sunarım. Ayrıca malzemelerin radyasyon ile ışınlanmasında bana yardımcı olan "Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Ana Bilim Dalı" ndan Dr. Öğr. Üyesi Esra UYAR'a ile diyot kontakların alınması ve yapılan ölçümlerde bana yardımcı olan "Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Ana Bilim Dalı" ndan Arş. Gör. Murat ULUSOY'a çok teşekkür ederim.

Yoğun çalışmalarım esnasında beni destekleyen, bana güvenen ve anlayışını her zaman yanımda hissettiğim canım kızım İrem ABAY'a, sevgili eşim Bekir ABAY'a, canım ablam ve yeğenim Ayşe ÇİFTÇİ COŞGUN ve Berk COŞGUN'a çok teşekkür ederim.

ve çalışmamı canım anneme ve babama ithaf ediyorum…

Bu tez Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinasyon Birimi tarafından FGA-2023-8522 nolu poje olarak desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. METAL–YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR 7

2.1. Metal/n-tipi Yarıiletken Omik Kontak 7

2.2. Metal/n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak 9

3. METAL–YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) KONTAKLAR 13

3.1. İdeal MIS Yapılar 13

3.1.1. Yığılım 17

3.1.2. Tükenim 18

3.1.3. Tersinim 19

3.2. Gerçek MIS Yapılar 20

3.2.1. Arayüzeyde tuzaklanmış yükler (Q_{it}) 21

3.2.2. Sabit oksit yükleri (Q_F) 22

3.2.3. Yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yük (Q_{ot}) 24

3.2.4. Hareketli iyonik yük (Oksit yükleri=Q_m) 25

3.3. Arayüzey Durumlarının Etkisi 25

Sayfa

4. RADYASYON VE ETKİLERİ 31
4.1. Beta Radyasyonu 32
4.1.1. β^- bozunması veya elektron yayınımı 34
4.1.2. β^+ bozunması veya pozitron yayınımı 34
4.1.3. Çekirdeğin elektron yakalaması 34
4.2. Yarıiletken Malzemelerde Radyasyon Etkileri 35
4.2.1. Yerdeğiştirme hasar mekanizmaları 35
4.2.2. Yer değiştirme hasar mekanizmalarının ortaya çıkardığı etkiler 36
4.3. Yarıiletken Yapılarda Radyasyon Etkileri 39
5. DİELEKTRİK 41
5.1. Dielektrik malzemeler 41
5.2. Dielektriksiz ve Dielektrikli Paralel Plakalı Kapasitör 41
5.3. Dielektrik Kutuplanma (Polarizasyon) 43
5.4. Kutuplanma Mekanizmaları 46
5.4.1. Elektronik kutuplanma 47
5.4.2. Atomik (iyonik) kutuplanma 48
5.4.3. Yönelimli (dipolar) kutuplanma 48
5.4.4. Arayüzey (uzay) yük kutuplanma 49
5.5. Dielektrik Durulma (Relaksasyon) 49
5.6. Dielektrik Sabiti ve Dielektrik Kayıp Ölçüm Tekniği 52
5.7. Dielektrik Malzemelerin Sınıflandırması 53
6. DENEYSEL YÖNTEM 55
6.1. Giriş 55
6.1.1. Polivinil Alkolün (PVA) temel özellikleri 55
6.1.2. Grafenin (Gr) temel özellikleri 58
6.2. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) Yapıların Hazırlanması 60

Sayfa

6.2.1. n-Si kristalinin temizlenmesi 60

6.2.2. Omik arka kontakların oluşturulması 61

6.2.3. (%3 Grafen katkılı- PVA) arayüzey tabakasının oluşturması 63

6.2.4. Doğrultucu kontakların oluşturulması 65

6.3. Deneysel Ölçümlerde Kullanılan Ölçüm Cihazları 68

6.3.1. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı 68

6.3.2. Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörü 68

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARIŞMA 71

7.1. Yapısal Analiz 71

7.1.1. X-ışını kırınım (XRD) analizi 71

7.1.2. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ve Enerji Dağıtıcı Spektrometri (EDS) analizi 72

7.2. Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiklerinde Beta Radyasyon Etkisi 73

7.3. Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) Karakteristiklerinde Beta Radyasyonu Etkisi 86

7.4. Dielektrik Karakteristiklerinde Beta Radyasyon Etkisi 101

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 115

KAYNAKLAR 123

ÖZGEÇMİŞ 141

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 7.1. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısına ait diyot parametrelerinin beta radyasyonuna bağlı değişimi 77

Çizelge 7.2. Termoiyonik emisyon (TE), Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonundan elde edilen n, Φ_{B0} ve R_s diyot parametreleri 83

Çizelge 7.3. C-V ve G/ω-V ölçümlerinden elde edilen elektriksel parametreler 98

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. $\Phi_m<\Phi_s$ olan metal ve n-tipi yarıiletkenin; (a) omik kontaktan önce ve (b) omik kontaktan sonra denge durumu için enerji bant diyagramı 8

Şekil 2.2. Yarıiletkene a) negatif ve b) pozitif gerilim uygulandığında metal/n-tipi yarıiletken omik kontak için enerji bant diyagramı 9

Şekil 2.3. $\Phi_m>\Phi_s$ olan bir n-tipi yarıiletken ile metalin; (a) kontak yapılmadan önce ve (b) kontak yapıldıktan sonra denge durumu için enerji bant diyagramı 10

Şekil 2.4. (a) Doğru beslem, (b) Ters beslemin bir metal-yarıiletken bant yapısı üzerindeki etkisi, (c) bir diyotun tipik akım-gerilim karakteristik eğrisi..... 12

Şekil 3.1. Metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken (MIS/MPS) yapısının şematik gösterimi 13

Şekil 3.2. Sıfır beslemede n-tipi yarıiletkenli ideal MIS/MPS yapının denge durumunda enerji bant diyagramı 14

Şekil 3.3. MIS yapının eşdeğer devresi 16

Şekil 3.4. Uygulanan gerilime bağlı olarak oluşan (a) yığılım, (b) tükenim, (c) tersinim bölgeleri için n-tipi yarıiletkenin ideal MIS yapısının enerji-bant diyagramı 17

Şekil 3.5. Yığılım bölgesine ait metal ve yarıiletken yüzeyinde oluşan yük dağılımı.... 18

Şekil 3.6. Tükenim bölgesine ait metal ve yarıiletken yüzeyinde oluşan yük dağılımı ... 19

Şekil 3.7. Tersinim bölgesine ait metal ve yarıiletken yüzeyinde oluşan yük dağılımı ... 20

Şekil 3.8. İdeal MIS yapının C-V eğrisi 20

Şekil 3.9. Gerçek MIS yapıda ortaya çıkan durumlar ve yükler..... 21

Şekil 3.10. MIS yapının arayüzey durum yoğunluğuna bağlı olarak eşdeğer devresi.... 22

Şekil 3.11. Gerçek MIS yapının C-V eğrisi..... 23

Şekil 3.12. Histeresis etkisi..... 25

Şekil 3.13. Arayüzey durumlarını içeren eşdeğer devre 26

Şekil 3.14. MIS yapının eşdeğer devresi 27

Şekil 4.1. Radyasyon çeşitlerinin iyonlaştırma durumuna göre sınıflandırılması 31

Şekil 4.2. Elektriksel etkiler..... 38

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.3. MIS kapasitörde iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumların şematik gösterimi 39

Şekil 5.1. Boş paralel plakalı kondansatör 41

Şekil 5.2. Dielektrik malzemeli paralel plakalı kondansatör 42

Şekil 5.3. Dielektrik malzeme bulunan paralel plakalı kapasitörün kutuplanması 43

Şekil 5.4. Dielektrik kutuplanmanın frekansa bağlılığı 46

Şekil 5.5. Dielektrik kutuplanmanın dış elektrik alan etkisiyle zamana bağlı değişimi ... 47

Şekil 5.6. (a) Elektronik kutuplanma, (b) iyonik kutuplanma, (c) yönelimsel kutuplanma ve (d) uzay- yük kutuplanması olmak üzere kutuplanma türleri ve elektrik alan tepkileri 48

Şekil 5.7. Dielektrik sabitinin gerçel (ε') ve sanal (ε'') bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi 52

Şekil 6.1. Polivinil alkolün yapı formülü 56

Şekil 6.2. Polivinil alkolün kimyasal yapısı 56

Şekil 6.3. Grafenin kimyasal yapısı 59

Şekil 6.4. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların (SDs) için altın (Au) omik kontakların hazırlanmasında kullanılan termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi 61

Şekil 6.5. n-Si tipi alttaşın mat yüzeyine oluşturulan altın (Au) omik kontakların hazırlanması 63

Şekil 6.6. Elektrospinning (elektro eğirme) yönteminin şematik gösterimi 65

Şekil 6.7. Termal buharlaştırma sisteminde Au doğrultucu kontakların hazırlanması ... 66

Şekil 6.8. Hazırlanan Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si tipi (MPS) yapıların şematik gösterimi... 67

Şekil 6.9. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısının ölçümünde kullanılan deneysel ölçüm sistemi 67

Şekil 7.1. Grafen ve PVA tozlarının XRD kırınım pikleri 71

Şekil 7.2. (a) Grafen tozunun FESEM, (b) Grafen tozunun EDS (c) PVA tozunun FESEM ve (d) PVA tozunun EDS görüntüleri 72

Şekil 7.3. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra yarı logaritmik I-V grafiği 73

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.4. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra ln(I)-V grafiğinin lineer bölgesi 75

Şekil 7.5. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra R_i-V grafiği 79

Şekil 7.6. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra dV/d(lnI)-I ve H(I)-I grafikleri 80

Şekil 7.7. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra F(V)-V grafiği 82

Şekil 7.8. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra N_{ss}- (E_c-E_{ss}) grafiği 85

Şekil 7.9. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra C- V grafiği 87

Şekil 7.10. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra G/ω-V grafiği 89

Şekil 7.11. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısının ait (a) 0 kGy, (b) 10 kGy ve (c) 22 kGy radyasyon dozlarında C-G/ω -V grafikleri 90

Şekil 7.12. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra ln(R_i)-V grafiği 92

Şekil 7.13. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısına beta radyasyonundan önce (0 kGy) N_{ss}-V grafiği (Ek: 1 kHz ve 1 MHz frekanslarında 0 kGy'de Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısının C-V grafiği) 94

Şekil 7.14. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısına 22 kGy beta radyasyonu uygulandıktan sonra N_{ss} -V grafiği 95

Şekil 7.15. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra (a) $1/C^2$-V ve (b) $1/C^2$-V' nin lineer bölgesine ait grafikleri 97

Şekil 7.16. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının N_D ve W_D parametrelerinin beta radyasyon dozlarına bağlı değişim grafiği 99

Şekil 7.17. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının Φ_B' nin beta radyasyon dozlarına bağlı değişim grafiği 100

Şekil 7.18. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının E_F ve N_D' nin beta radyasyon dozlarına bağlı değişim grafiği 101

Şekil 7.19. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra a) ε′−V, b) ε″−V ve c) tanδ−V grafikleri 103

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.20. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra σ_{ac}-V grafiği 106

Şekil 7.21. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra M′-V grafiği 107

Şekil 7.22. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra M″-V grafiği..... 109

Şekil 7.23. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra M″- M″ (Cole-Cole) grafiği..... 110

Şekil 7.24. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra Z′-V grafiği 111

Şekil 7.25. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra Z″-V grafiği..... 112

Şekil 7.26. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra faz açısı(θ)-V grafiği..... 113

Şekil 7.27. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısı için 1 kHz frekansında radyasyonsuz (0 kGy) ε′-V grafiği..... 114

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 6.1. a) Omik ve b) doğrultucu kontaklarda kullanılan maskeler 62

Resim 6.2. Keithley 2400 akım- gerilim cihazı 68

Resim 6.3. (a) Hewlett Packard 4192A LF empedans analizör ile IEEE-488 ac/dc dönüştürücü kart takılı bilgisayar ve (b) ölçüm düzeneği 69

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Doğrultucu kontak alanı
A*	Etkin Richardson sabiti
ac	Alternatif akım
C	Kapasitans
C-V	Kapasitans-Voltaj
D	Dielektrik yokken elektrik yerdeğiştirme
dc	Doğru akım
E	Elektrik alan
$\mathbf{E_C}$	Yarıiletkenin iletkenlik bant kenarı enerjisi
$\mathbf{E_F}$	Fermi enerjisi
$\mathbf{E_g}$	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
$\mathbf{E_v}$	Yarıiletkenin valans bant kenarı enerjisi
F	Sığa birimi-Farad
f	Frekans
G/ω	İletkenlik
Gr	Grafen
Hz	Frekans birimi-Hertz
$\mathbf{I_0}$	Ters beslem doyum akımı
$\mathbf{I_F}$	Düz beslem akımı
$\mathbf{I_r}$	Ters beslem akımı
I	Toplam akım
k	Boltzman sabiti
$\mathbf{m^*}$	Elektronun etkin kütlesi
$\mathbf{m_0}$	Serbest elektron kütlesi
M	Elektrik modülüs
M*	Kompleks elektrik modülüs
M´	Elektrik modülüsün reel kısmı

Simgeler	Açıklamalar
M''	Elektrik modülüsün sanal kısmı
n	İdealite faktörü
N_A	Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu
N_D	Verici katkı atomlarının yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durumları
P	Dielektrik polarizasyon
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Kısa devre direnci
T	Kelvin cinsinden sıcaklık
$\tan\delta$	Kayıp açı tanjantı
W_d	Tükenme bölgesi genişliği
V_0	Kesme potansiyeli
V_i	Uygulanan voltaj
V_D	Difüzyon potansiyeli
V_F	Düz beslem voltajı
V_R	Ters beslem voltajı
Y	Admitans
Z	Empedans
Z^*	Kompleks empedans
Z'	Empedansın reel kısmı
Z''	Empedansın sanal kısmı
Φ_B	Bariyer yüksekliği (C-V' den ölçülen)
Φ_{B0}	Sıfır beslem bariyer yüksekliği
Φ_e	Etkin bariyer yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ω	Açısal frekans
μ	Dipol momenti
ε^*	Kompleks dielektrik sabiti
ε'	Dielektrik sabiti
ε''	Dielektrik kayıp
ε_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti

Simgeler	**Açıklamalar**
ε_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ε_0	Boş uzayın dielektrik sabiti
σ_{ac}	Elektriksel iletkenlik
χ	Elektron yakınlığı

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
FE-SEM	Alan EmisyonluTaramalı Elektron Mikroskobu
MIS	Metal Yalıtkan Yarıiletken
MOS	Metal Oksit Yarıiletken
MOSFS	Metal Oksit Metal Ferroelektrik Yarıiletken
MPS	Metal Polimer Yarıiletken
MS	Metal Yarıiletken
PVA	Polyvinilalkol
SBD	Schottky Bariyer Diyot
TE	Termiyonik emisyon
XRD	X-Işınları Kırınımı

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinin büyük bir çoğunluğunu oluşturan elektronik endüstrisinin temelini yarıiletkenlerin yer aldığı yarıiletken devre elemanları oluşturmaktadır. Elektronik devre elemanları çeşitli nedenlerle radyasyona maruz kalırlar. Radyasyon, cihazların elektriksel performansı değiştirebilir, hatta radyasyon ortamlarında kullanılan elektronik bileşenlerin kalıcı olarak arızalanmasına yol açabilir. Radyasyonun cihazlar üzerindeki etkisi radyasyonun türüne bağlıdır. Örneğin, gama radyasyonu çoğunlukla cihazın dielektrik katmanında iyonlaşmaya neden olurken, enerjik parçacıklar çoğunlukla elastik saçılma süreciyle yarıiletkende kristal hasarı oluştururlar. Günümüzde, silisyum (Si) cihaz üretiminde en çok kullanılan bir elektronik malzemedir. Nispeten büyük bant aralığı ve termal iletkenliği nedeniyle yüksek güç, sıcaklık ve radyasyon açısından zengin ortamlar için ideal bir malzemedir [1, 2]. Radyasyon ortamları, yüksek elektriksel güç uygulamaları ve yüksek sıcaklık kullanımı gibi birçok uygulamada büyük bant aralığı, daha yüksek termal iletkenlik ve yer değiştirme enerjisi gerekir. Geniş bant aralığına sahip yarıiletken malzemeler, bu tür ortamlarda daha iyi performans verme imkanı sağlamaktadır. Bu malzemeler arasında Silisyum (Si), Silisyum karbür (SiC), Galyum nitrür (GaN) ve Çinko oksit (ZnO) bulunur. Silisyum yarıiletken malzemesi, diğer malzemelere göre daha çok incelenmiş ve geliştirilmiş olması nedeniyle ilgi çekici bir malzeme olmuştur. Si malzemesindeki gelişmeler, güç cihazlarında ve zorlu ortam uygulamalarına yönelik cihazlarda bir fırsat sağlamıştır [3-5]. Si tabanlı yarıiletken malzemenin radyasyon etkisi hem elektriksel hem de yapısal olarak kapsamlı bir şekilde araştırmacılar tarafından incelenmeye devam edilmektedir. Radyasyona tabi tutulan Si tabanlı yarıiletken cihazlar için elektriksel performansın bozulmasında yer alan nedenleri anlamak için çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu tür çalışmalar, cihaz toleransı ve eşik radyasyon dozları hakkında bilgi sağlar ve cihazları derecelendirmek ve belirli uygulamalar için cihaz tasarımını iyileştirmek çok önemlidir. Radyasyonun Si diyotlar [6, 7], MOSFET'ler [8] ve radyasyon dedektörleri [9] üzerindeki etkileri incelenmiş ve Si tabanlı cihazların radyasyona karşı oldukça dirençli olduğu ve bozulmaları için daha yüksek eşik radyasyon doz değerleri verdiği görülmüştür.

Bir metal ve yarıiletkenin birbirine temas ettirilmesiyle elde edilen metal yarıiletken (MS) kontaklar ya da Schottky engel diyotları (SBD) olarak isimlendirilir. MS kontakların doğrultma özelliği Schottky tarafından 1938 yılında keşfedilmiştir. Schottky, metal ve yarıiletken arasında oluşan potansiyel engelin, arayüzeyde kimyasal bir tabaka

oluşturulmadığında, bunun yalnızca yarıiletkende meydana gelen kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığını belirtmiştir. Daha sonra Schottky ve Mott, potansiyel engelin oluşum mekanizması ve yüksekliğini hesaplayarak potansiyel engelin şekli için modeller önermişlerdir [10-12].

MS yapılarında kullanılan arayüzey tabakasıyla ilgili ilk araştırmalar Cowley ve Sze tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar, metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliğinin; metalin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s), arayüzey tabakasının varlığı ve kalınlığı, yüzeyin hazırlanma biçimi, yarıiletkenin katkı yoğunluğu, arayüzey durumlarının yoğunluğu ve uygulanan dış gerilim gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. MS arasındaki yalıtkan (dielektrik) arayüzey tabakası ile metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS), metal-organik-yarıiletken (MOS) ve metal-polimer-yarıiletken (MPS) tipi yapılar oluşur. Yakın geçmişte, söz konusu yapılar üzerine yapılan teorik ve deneysel araştırmaların sayısında önemli bir artış gözlenmiştir [10-12]. MS arasında geleneksel yöntemlerle büyütülen SiO_2 yerine yalıtkan malzeme kullanılarak elde edilen yapılar teknolojik uygulamalarda dikkati çekmiştir [13]. Dielektrik malzemeler, elektrik akımını iletmemeleri ve yük depolayabilmeleri gibi temel elektriksel özellikler açısından önemlidir. Bununla birlikte bu malzemeler, harici bir elektrik alan uygulandığında kutuplanma özelliğine sahiptir. Dielektrik malzemeler, elektrik alan içerisine konulduğunda yük merkezlerinde bir miktar kayma olur ve dielektrik kutuplanma oluşur. Kullanılan yalıtkan arayüzey tabakasının yüksek dielektrik sabitine sahip olması, yapının genel elektriksel karakteristiklerini iyileştirmede önemli rol oynar. Bu tür yüksek dielektrik sabitine sahip arayüzey malzemelerin kullanılması seri direnç, arayüzey durum yoğunluğu, idealite faktörü, kaçak akım, doğrultma oranı ve kısa devre direnci gibi elektriksel parametrelerde belirgin bir azalma sağlanabilir [14]. Ayrıca arayüzeyde bulunan yalıtkan veya polimer ara yüzey tabakanın varlığı hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. Bu nedenle MIS veya MPS yapıların akım-iletimi MS yapılarından oldukça farklı olacaktır [15].

Organik iletken polimerlerin keşfiyle birlikte, organik/polimer arayüzey tabakalı yarıiletken yapılar büyük önem kazanmıştır. Düşük maliyetleri, kolay üretim süreçleri ve mekanik esneklik gibi özellikleri nedeniyle bu malzemeler, son yıllarda elektronik ve optoelektronik cihaz üretiminde geniş bir kullanım alanına sahiptirler [15-20]. Yarıiletken aygıtın performansını artırmak için metal ile yarıiletken arasına genel olarak SiO_2, SnO_2, Si_3N_4,

TiO_2 gibi inorganik yalıtkan tabakalar veya poliindol, polianilin ve polivinil alkol (PVA) gibi organik tabakalar büyütülür. Arayüzey tabakası seçimi yapılırken; yüzeyi etkin bir şekilde pasivize edebilen, sızıntı akımını en aza indirebilen, akım-iletim mekanizması kontrol edilebilir hale getiren, doğrultucu davranışa yakın özellik gösterecek ve yüksek dielektrik sabitine sahip malzemelerin tercih edilmesine dikkat edilmelidir [21-27].

Bu çalışmada arayüzey malzemesi olarak kullanılan polimerler arasında polyvinil alkolün (PVA) en önemli özelliği hidroksil (OH^-) gruplarını ve hidrojen bağını içermesidir [28]. Ayrıca yüksek yük depolama kapasitesi, dielektrik kuvveti (>1000 kV/mm) ve katkılama ile değişen elektrik-optik özellikleri, bu malzemeyi elektronik devre elemanları için uygun bir malzeme olarak tercih edilmektedir. Düşük elektriksel iletkenliği nedeniyle yalıtkan özellik gösteren PVA'ya grafen, kobalt (Co), nikel (Ni) ve çinko (Zn) gibi iletkenlerle katkılıyarak elektrik iletkenliği arttırılabilir. Böylece, metal katkılı PVA veya diğer polimer malzemeler, MS arasında ara difüzyonu azaltmak için arayüzey tabakası olarak kullanılabilir [29-32]. Katkılama işlemi, moleküllerin hareket kabiliyetini değiştirdiği için kristal ve kimyasal yapısı ile polimerin çapraz bağ yapısında farklılıklara neden olur [33]. Bu çalışmada, katkı maddesi olarak kullanılan grafen, grafitin tek tabakalı haline verilen bir isimdir. Novoselov ve arkadaşları tarafından ilk kez grafitin mekanik eksfoliasyonu ile keşfedilen [34] grafen yapılar mükemmel elektriksel, mekanik, optik ve termal özellikleri sayesinde keşfedildiğinden beri araştırmacılardan büyük ilgi gören en önemli iki boyutlu (2D) malzemelerden biri olmuştur. Ayarlanabilir bant aralığı, ultra yüksek yük taşıyıcı hareketliliği, yüksek şeffaflık, yüksek iletkenlik ve esneklik gibi üstün fiziksel özellikleri sayesinde elektronik, opto-elektronik**,** enerji depolama, kompozit malzemeler ve biyomedikal cihaz uygulamaları için tercih edilen malzemeler arasında yer alır. Grafen tabanlı cihazlar, grafenin avantajlarını yarıiletken teknolojisiyle birleştirmiştir. Örneğin grafen/silikon (Gr/Si) bağlantısı grafenin kullanıldığı ilgi çekici cihazlardan biridir. Grafen, ince filmler oluşturmak için uygun bir malzeme olduğundan, yarıiletken cihaz teknolojisine kolayca entegre edilebilir ve diğer birçok malzemeye kıyasla en büyük algılama alanı sağlar. Son çalışmalarda grafenin, Schottky diyotlar gibi yarıiletken malzemelerle de entegre yapılar oluşturabileceği gösterilmiştir [35-44]. Grafen-yarıiletken tabanlı Schottky kontak yapısı güneş pilleri, fotodedektörler ve sensörler dahil olmak üzere birçok grafen tabanlı cihazlarda kullanılabilir.

MPS/MIS yapılar yüksek enerjili radyasyona (gamma ışını, beta ışını, yüksek enerjili elektronlar, nötronlar ve iyonlar gibi) maruz kalması çok sayıda örgü kusuruna neden olur. Yeniden birleşme merkezleri veya azınlık/çoğunluk taşıyıcı görevi gören bu kusurlar diyot performansı veya uygulamalarında bozulmaya yol açar. Da Silva ve arkadaşları [45], Ma [46], Winokur [47] gibi araştırmacılar MIS/MPS yapılarındaki MS arayüzeyinde radyasyon etkisiyle oluşan arayüzey durumlarını radyasyon uygulandıktan sonra etkisini araştırmışlardır. Yapılan bu araştırmalar sonucunda özellikle radyasyonun iki etkisi üzerinde durmuşlardır. Bunlardan ilki geçici etki olarak adlandırılan elektron-deşik (hol) çifti oluşumu, ikincisi ise radyasyon uygulaması sonucunda kristal örgüde değişikliklere sebep olan kalıcı etkidir. MIS/MPS yapılarda metal ve yarıiletken arasında bulunan bir arayüzey tabakası radyasyona karşı duyalı olan bölgedir. Arayüzey tabakasında radyasyon nedeniyle oluşan elektronlardan daha az hareketli olan deşikler (holler) arayüzey yalıtkan tabaka içine yayılarak çok sayıda sabit deşik tuzakları oluşmasına neden olurlar. Radyasyonla oluşan tuzakların çoğu yalıtkan/yarıiletken arayüzeyi çevresine lokalize olur. Arayüzey tabakası, MIS/MPS yapılarının elektriksel ve dielektrik özelliklerini etkilediğinden, arayüzeyi etkileyen herhangi bir mekanizma bu tür aygıtların performansını doğrudan etkilemektedir.

Literatürde radyasyonun MS, MIS ve MPS tipi SD'lar, MOS transistörler ve kapasitörler üzerine etkisi araştırılsa bile [48-52], bu tür yapıların elektrik ve dielektrik karakteristikleri üzerindeki radyasyon etkileri tam olarak açıklanamamıştır. Radyasyonun, akım-voltaj (I-V), kapasitans voltaj (C-V) ve iletkenlik voltaj (G/ω-V) ölçümleri sonucunda elektrik ve dielektrik karakteristikler üzerindeki etkilerinin araştırılması, meydana gelebilecek değişimler ve bu değişimlerin sonuçları ortaya çıkaracaktır. Ayrıca kullanılan arayüzey tabakasının türünün radyasyona karşı tepkisinin incelenmesi de ayrıca önem arz etmektedir.

Yukarıda anlatılan nedenlerden dolayı bu çalışmada, %3 grafen katkılı PVA polimer arayüzey tabakasına sahip Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) tipi yapıların elektro-eğirme yöntemiyle üretilmesi hedeflenmiş ve bu üretim süreci çalışmanın kapsamı içersine alınmıştır. Üretimi tamamlanan elektriksel karakteristikleri benzer davranış gösteren MPS yapılardan seçilen örnek bir diyotun 1 MHz'de, karanlık ortamda, oda sıcaklığında (300 K), 22 mGy/saat şiddetindeki ^{90}Sr (Stronsiyum-90) beta (β) radyasyon kaynağı ile çeşitli dozlarda (2, 6, 10, 14, 18 ve 22 kGy) ışınlanarak, $-4V \leq V \leq 3V$ voltaj aralığında I-V, C-V ve G/ω-V ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerden faydalanılarak elde edilen elektriksel ve dielektrik parametreler vasıtasıyla MPS yapısı üzerinde beta radyasyonu etkilerinin doğru

ve kapsamlı bir şekilde açıklanması için literatür ile kıyaslamalı olarak incelenmesi yine bu çalışmanın amaçları arasında yer almaktadır. Sonuç olarak arayüzey tabakasının cinsi ve katkılama oranı, arayüzey tabakası kalınlığı ve ölçüm frekansı gibi parametrelerin radyasyon dozuna bağlı olarak değişen araştırmalar incelenmiş ve grafen katkılı PVA arayüzey tabakasına sahip MPS yapısının beta radyasyonuna bağlı olarak incelenmediği tespit edilmiştir. Bu yüzden Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotları üretilmiş ve bu diyotlar üzerinde çeşitli dozlarda beta radyasyonunun etkilerinin araştırılması amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının amacı hakkında bilgi verildiği birinci bölüm ile giriş yapıldı, ikinci ve üçüncü bölümde ise sırasıyla metal-yarıiletken (MS) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıların işleyişi hakkında bilgi verildi. Radyasyonun tanımı ve yarıiletken malzemelerde radyasyon etkileri dördüncü bölümde, dielektrik hakkında teorik bilgiler beşinci bölümde ele alındı. Altıncı bölümde ise, MPS yapısının nasıl üretidiği ve yapılan ölçüm sistemleri hakkında genel bilgi bulunmaktadır. Arayüzey tabakasında kullanılan grafen ve PVA'ya ait karakterizasyon işlemi ile ölçüm sonucunda elde edilen elektrik ve dielektrik parametreleri, seri direnç ve arayüzey durum yoğunluğunun farklı beta radyasyon dozuna bağlı değişim grafikleri çizilerek yedinci bölümde literatür ile karşılaştırılmasını içermektedir. Son olarak sekizinci bölümde ise sonuçlar ve öneriler bulunmaktadır.

2. METAL–YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR

Metalin yarıiletken malzeme ile temas etmesi sonucunda metal/yarıiletken (MS) yapısı oluşmaktadır. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki farka bağlı olarak bu temaslar, kontağın doğrultucu (Schottky) ve omik davranış göstermesine neden olur.

2.1. Metal/n-tipi Yarıiletken Omik Kontak

Her iki doğrultuda akım geçişine izin veren ve Ohm yasasına uyan kontaklar, omik kontak olarak adlandırılır. Omik kontak yarıiletkenin iş fonksiyonu, metalin iş fonksiyonundan büyük olması durumunda ($\Phi_m<\Phi_s$) meydana gelmektedir. Metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı omik kontak yapılmadan önce Şekil 2.1'de gösterilmektedir [12, 53, 54]. Şekilden de görüleceği gibi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalin Fermi enerji seviyesinden Φ_s-Φ_m kadar aşağı konumdadır.

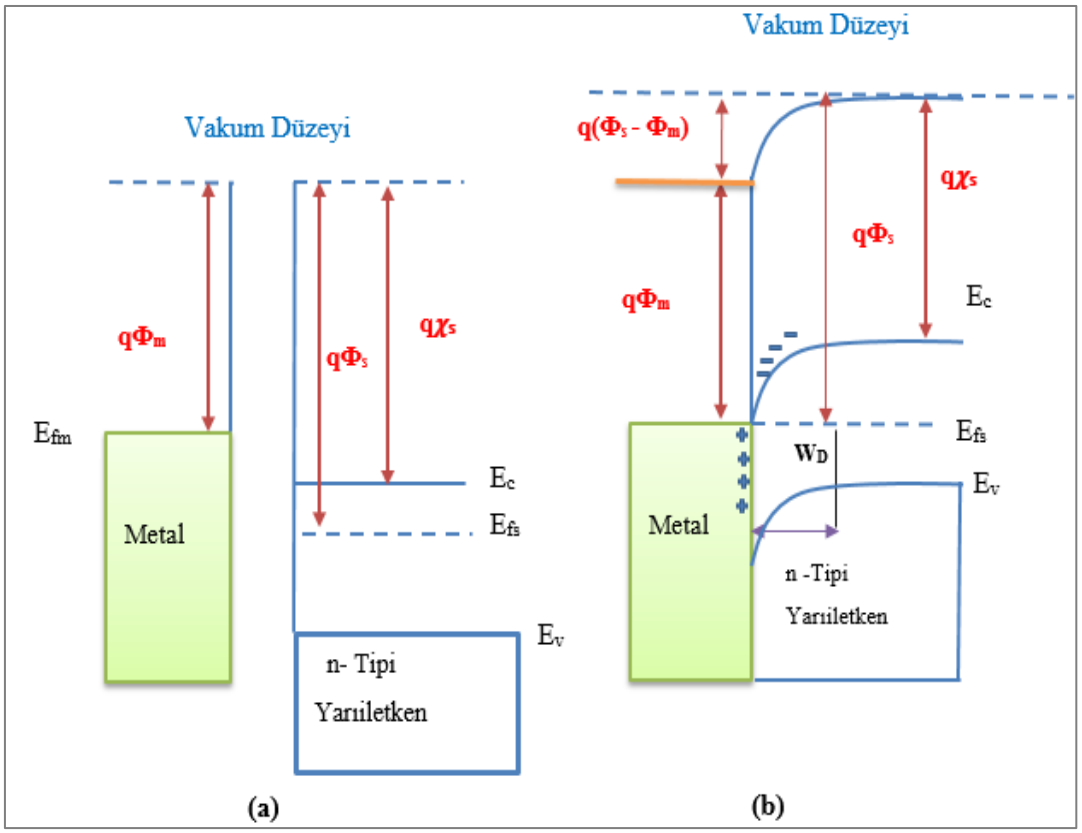
Şekil 2.1.a'da gösterilen,

- Φ_m, metalin iş fonksiyonu olarak ifade edilir; metaldeki bir elektronu bulunduğu Fermi seviyesinden koparıp vakum seviyesine çıkarmak için gereken minimum enerji miktarını,
- Φ_s, yarıiletkenin iş fonksiyonu olarak ifade edilir; yarıiletkendeki bir elektronu bulunduğu Fermi seviyesinden koparıp vakum seviyesine çıkarmak için gereken minimum enerji miktarıdır. Başka bir deyişle yarıiletkenin iş fonksiyonu, Fermi seviyesiyle vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır,
- χ_s, yarıiletkenin elektron yakınlığı olarak ifade edilir; vakum seviyesine iletkenlik bandının en üst seviyesinde bulunan bir elektronu çıkarmak için gereken enerji miktarını,
- Vakum seviyesi, bir metal yüzeyinin hemen dışında bulunan sıfır kinetik enerjili bir elektrona karşılık gelen enerji düzeyini ya da metal yüzeyinden bir elektronu koparmak için gereken en düşük enerji miktarını,
- E_c ve E_v, iletkenlik ve valans bandı enerjisini

ifade eder.

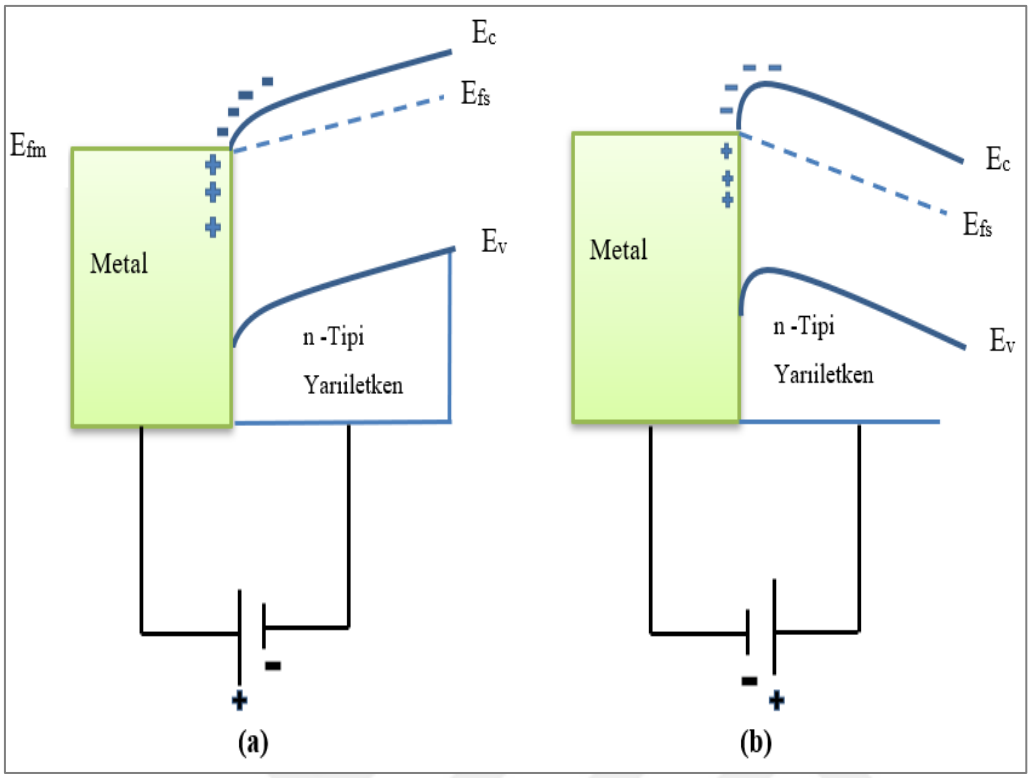
Şekil 2.1.b'de n-tipi yarıiletken ve metal omik kontak yapıldıktan sonra enerji bant yapısı verilmektedir. Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar metalden yarıiletkene elektron geçişi

olur. Bu geçiş sırasında metal tarafında pozitif yüzey yükleri (deşikler) oluşur. Bu süreçte metal yüzeyinde pozitif yükler (deşikler) birikirken, negatif yükler de yarıiletkenin önyüzeyin de birikir. Termal dengeye ulaşıldığında yarıiletkenin Fermi seviyesi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar artmakta ve buna bağlı olarak iletkenlik ile valans bantları da eşit miktarda yukarı yönde bükülmektedir.



Şekil 2.1. $\Phi_m<\Phi_s$ olan metal ve n-tipi yarıiletkenin; (a) omik kontaktan önce ve (b) omik kontaktan sonra denge durumu için enerji bant diyagramı

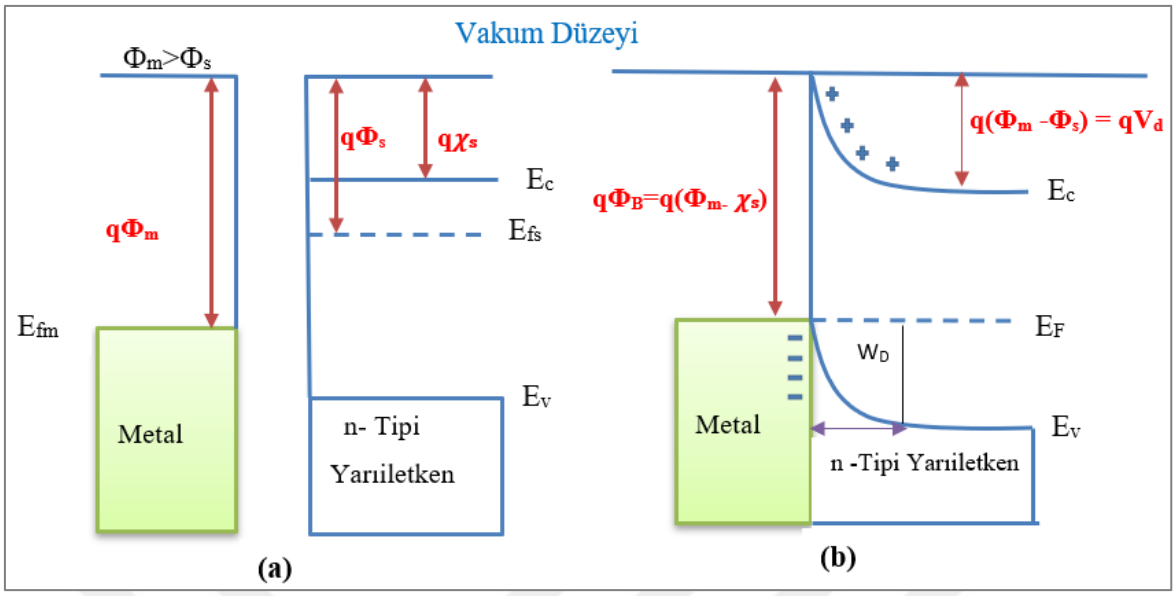
MS yapısı omik kontak yapıldığında, metale sırasıyla negatif ve pozitif voltaj uygulandığında enerji bant yapısı Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Şekil 2.2.a'da, yarıiletkene negatif metale de pozitif bir voltaj uygulandığında, elektronlar hiçbir engelle karşılaşmadan yarıiletkenden metale doğru geçerler. Elektronlar engel ile karşılaşmadıkları için bu yönde kolay bir şekilde yük geçişi olur. Yarıiletkene pozitif, metale negatif bir gerilim uygulanması durumunda ise metaldeki elektronlar engel ile karşılaşmadan yarıiletkene doğru kolay bir şekilde geçebilirler (Şekil 2.2.b). Sonuç olarak, akımı iki yönlü ileten doğrultucu olmayan kontaklar omik kontak olarak adlandırılır [53].



Şekil 2.2. Yarıiletkene a) negatif ve b) pozitif gerilim uygulandığında metal/n-tipi yarıiletken omik kontak için enerji bant diyagramı

2.2. Metal/n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak

Doğrultucu veya diğer adıyla Schottky kontak, yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan küçük ($\Phi_m > \Phi_s$) olması durumunda oluşan kontağa denir. Metal ile yarıiletken doğrultucu kontak yapıldığında yarıiletkendeki elektronlar difüzyonla metale geçtiğinde, geride deşikler bıraktıkları için yarıiletkende elektron yoğunluğu azalır. Metal ile yarıiletken arasında bu geçişle birlikte hareketli yüklerden arınmış, yüksek dirençli bir bölge meydana gelir. Bu tabaka, literatürde Schottky engeli (tabakası) denir [10, 12]. Şekil 2.3.a, metal ve n-tipi yarıiletkenin doğrultucu kontak yapılmadan önce enerji-bant diyagramı göstermektedir [10, 12, 53, 54]. Şekil 2.3.a'da görüldüğü gibi, yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi, metalin Fermi enerji seviyesinden Φ_m-Φ_s kadar yukarıdadır.



Şekil 2.3. $\Phi_m > \Phi_s$ olan bir n-tipi yarıiletken ile metalin; (a) kontak yapılmadan önce ve (b) kontak yapıldıktan sonra denge durumu için enerji bant diyagramı

Metal ile n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak yapıldığında enerji-bant yapısı Şekil 2.3.b'deki gibidir. Doğrultucu kontak durumunda, yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar, metaldeki elektronlardan daha büyük enerjiye sahiplerdir. Bu durumda yarıiletkenden metale doğru elektron geçişi, yarıiletken ve metalin Fermi enerji seviyesi eşit oluncaya kadar devam eder. Yarıiletkenin dış yüzeyinde bu geçişlerden dolayı elektron miktarı yani yoğunluğu azalır ve yarıiletkendeki Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasına doğru kayar. Termal denge durumunda Fermi enerji seviyesi sabit kaldığından dolayı valans ile iletkenlik bantları Şekil 2.3.b 'deki gösterildiği gibi bükülme meydana gelir [11, 56]. Öte yandan, elektron yakınlığı kontak ile değişmeyip sabit kalması nedeniyle yarıiletkenin vakum seviyesi bant bükülmesi ile orantılı olarak bükülür. Oluşan bu bükülme miktarı ise yarıiletken ve metalin iş fonksiyonu arasındaki fark kadardır. Bu fark;

$$qV_d = q(\Phi_m - \Phi_s) \tag{2.1}$$

şeklinde ifade edilir. Burada, qV_d yarıiletkenden metale geçecek olan elektronun sahip olması gereken enerji olarak adlandırılırken engel yüksekliği şeklinde de ifade edilir, V_d difüzyon potansiyelidir. Metal tarafında oluşan potansiyel engel yüksekliği ise;

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi_s \tag{2.2}$$

ile ifade edilir [10, 11].

$$\Phi_s = \chi_s + \Phi_n \tag{2.3}$$

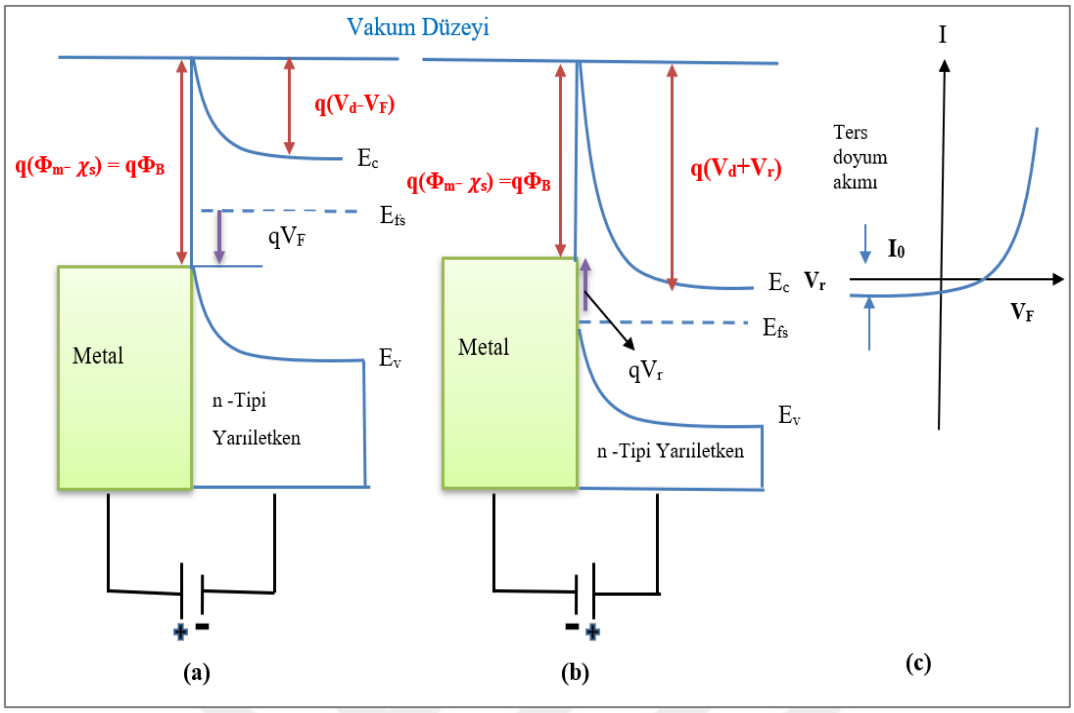
$$\Phi_m = qV_d + \Phi_s \tag{2.4}$$

eşitlikleri Eş. 2.2'de yerlerine yazıldığında,

$$\Phi_B = qV_d + \Phi_n \tag{2.5}$$

eşitliği elde edilir. Burada Φ_n ($\Phi_n = E_c - E_F$), Fermi enerji seviyesi ile iletim bandı enerji seviyesi arasındaki farktır.

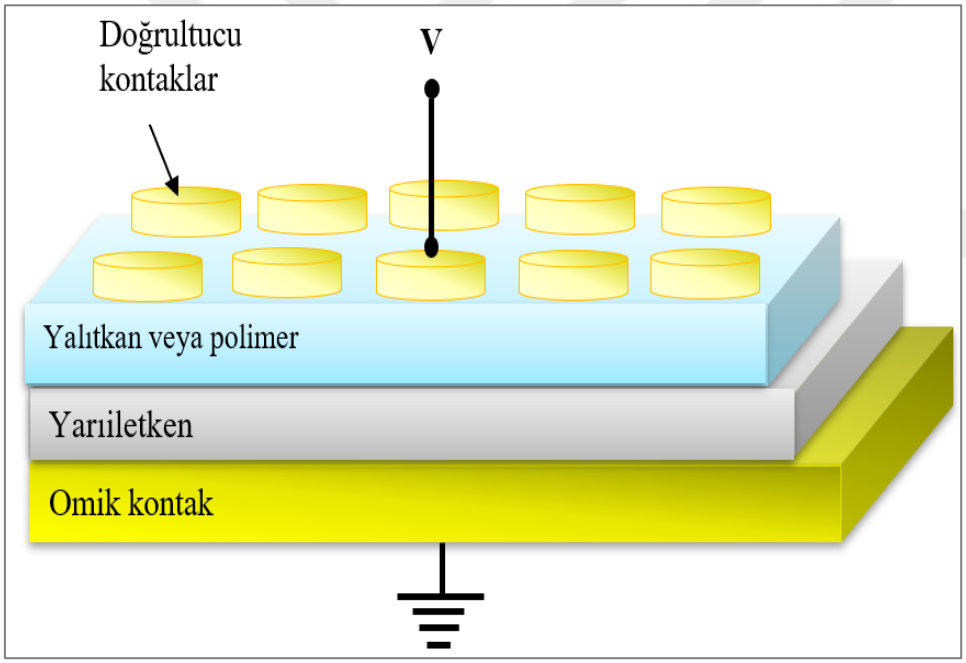
Metal ile n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak yapıldığında, yarıiletkene sırasıyla ters (V_r) ve doğru (V_F) beslem voltajı uygulandığında enerji bant yapısı Şekil 2.4'de verilmiştir. Şekil 2.4.a'da, yarıiletkene negatif metale de pozitif bir gerilim uygulandığında, tükenim tabakası genişliği ile qV_F kadar potansiyel engel yüksekliğinde azalma meydana gelir. Yarıiletkenden metale doğru geçen elektronlar küçülmüş potansiyel bariyer ile karşılaşması nedeniyle termal denge göre yarıiletkenden metale doğru olan elektron geçişinde artış meydana getirir. Metal tarafında ise herhangi bir gerilim düşmesi oluşmaz. Ayrıca, metal tarafı uygulanan gerilimden potansiyel engeli (Φ_B) etkilenmediği için, metalden yarıiletkene doğru gerçekleşen elektron geçişi termal dengedeki değerini korur. Sonuç olarak, yarıiletken tarafına negatif metal tarafına ise pozitif gerilim uygulandığı zaman, yarıiletkenden metale doğru bir akım oluşur ve doğru beslem akımı uygulanan gerilim ile üstel olarak artar [10, 12]. Yarıiletkene pozitif metale de negatif bir gerilim uygulandığında enerji bant yapısı Şekil 2.4.b'de gösterilmektedir. Ters beslem durumunda ise; tükenim bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği qV_r kadar artmakta ve bunun sonucunda yarıiletkenden metale geçen elektron geçişi, termal denge durumuna kıyasla azalma meydana getir [11, 56].



Şekil 2.4. (a) Doğru beslem, (b) Ters beslemin bir metal-yarıiletken bant yapısı üzerindeki etkisi, (c) bir diyotun tipik akım-gerilim karakteristik eğrisi

3. METAL–YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) KONTAKLAR

MS kontak arasına oksit, yalıtkan veya polimer bir arayüzey tabakası kendiliğinden veya sonradan büyütülerek oluşturulması durumunda Metal- Oksit/Yalıtkan/Polymer -Yarıiletken (MOS/MIS/MPS) yapılar oluşur. Yarıiletken cihazlarda karşılaşılan güvenilirlik ve stabilite sorunlarının büyük bir kısmı yüzey özellikleriyle yakından ilişkilidir. Bu yüzden, ideal MIS yapılar; MIS yapıları anlamada ve yarıiletken fiziğini incelemde model görevi görmektedir. Oksit, yalıtkan veya polimer arayüzey tabakalarından birisinin kullanımı, metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişini düzenler ve metal ile yarıiletkeni birbirinden ayırır. Şekil 3.1 'de metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken (MIS/MPS) yapısı gösterilmektedir. Bu bölümde, metal yarıiletkene göre pozitif V voltajı uygulandığını düşüneceğiz.



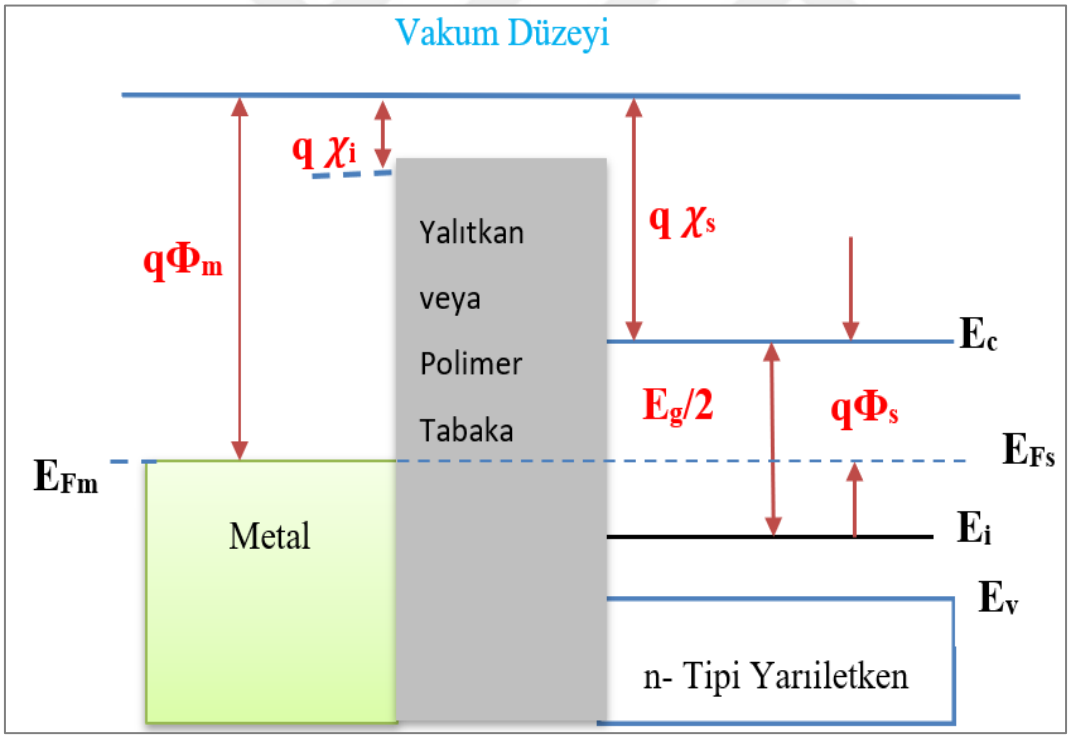
Şekil 3.1. Metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken (MIS/MPS) yapısının şematik gösterimi

3.1. İdeal MIS Yapılar

İdeal bir MIS yapısının enerji bant diyagramı, sıfır beslem (V=0) için Şekil 3.2'de verilmiştir. İdeal MIS yapısında; arayüzey tuzakları ya da herhangi bir oksit yük yoktur. Doğru beslem (dc) koşulları altında yalıtkan tabakadan herhangi bir yük taşıyıcı geçmemektedir, yani yalıtkanın özdirenci sonsuzdur. Ayrıca termal denge koşullarında ve gerilim uygulanmadığında, yarıiletken ile metalin Fermi enerji seviyeleri aynı hizaya gelir. Bu

durumda, metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki enerji farkı ortadan kalkar ($\Phi_{ms}= \Phi_m - \Phi_s= 0$).

MPS (veya MIS) yapıda metal-polimer-yarıiletken üçlü yapısı ara yüzeyleri metal-polimer ve polimer-yarıiletken olmak üzere iki ara yüzeyi ayrıca incelemek gerekmektedir. Doğru akım uygulandığı durumda polimerden akım geçmez. İdeal dışı duruma sebep olan ise yarıiletken yüzeyinde bulunan durumların varlığıdır. Yalıtkan tabakanın buradaki görevi metaldeki elektronların bu boş durumlara yakalanmaması ve aygıt performansını düşümemesi için bir bariyer oluşturmasıdır. Yarıiletken yüzeyi kristal sonu olduğu için boş bağlar, kusurlar ve buna bağlı durumlar ortaya çıkmaktadır. Metal ile doğrudan bağlantı yapıldığı zaman bunlar aygıt performansını önemli bir şekilde düşürmektedir. Yalıtkan tabaka bu boş bağları pasifleştirerek arayüzey durum yoğunluğunu azaltmaktadır. Şekil 3.2'de voltaj uygulanmadığında (V=0), MPS yapısının enerji bant diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sıfır beslemede n-tipi yarıiletkenli ideal MIS/MPS yapının denge durumunda enerji bant diyagramı

İdeal MIS yapısında kolaylık açısından metal ve yarıiletken arasında herhangi bir iş fonksiyonu farkının olmadığı varsayılmaktadır ($\Phi_{ms} = 0 = \Phi_m - \Phi_s$). Yani n tipi bir yarıiletken kullanılarak oluşturulan MIS yapı için;

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi_s + \frac{E_g}{2q} - \Psi_B\right) = \Phi_m - \left(\chi_s + \Phi_n\right) = 0 \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, Ψ_B Fermi enerji seviyesi ile saf enerji seviyesi arasındaki enerji farkı olup bu da Fermi potansiyeli olarak adlandırılır, E_g ise yarıiletkenin yasak enerji bant aralığıdır [57, 58].

İdeal bir MIS yapıya uygulanan gerilim, yarıiletken içinde yük dağılımının değişmesine dolayısıyla yük taşıyıcılarının yeniden düzenlenmesine yani yük taşıyıcılarının kaymasına neden olur. Yarıiletkende bulunan hareketli yük taşıyıcı yoğunluğu metale kıyasla daha düşüktür ve bu yoğunluk uygulanan dış gerilime bağlı olarak değişkenlik gösterir. Ayrıca, yarıiletkende uzay yükü bölgesinde ya da arayüzey bölgesinde serbest olmayan yüklerin birikmesi sonucunda yığılmalar oluşturur. Bu bölgede oluşan uzay yükü, yarıiletkenin enerji bantlarının bükülmesine yol açar. Termal denge durumu, arayüzey bölgesinde oluşan uzay yükü potansiyelinin büyüklüğü ile belirlenir. Yapıya uygulanan gerilim (V_G), yarıiletken ile yalıtkan (oksit) tabakaları arasında paylaşılır ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$V_G = V_{ox} + \Psi_s \quad (3.2)$$

Burada, Ψ_s arayüzeydeki bant gerilimi ve V_{ox} ise oksit (yalıtkan) üzerine düşen gerilimdir. Ayrıca metal yüzeyinde oluşan yük (Q_m) ile yarıiletkende oluşan yük (Q_s) miktarları birbirine eşittir.

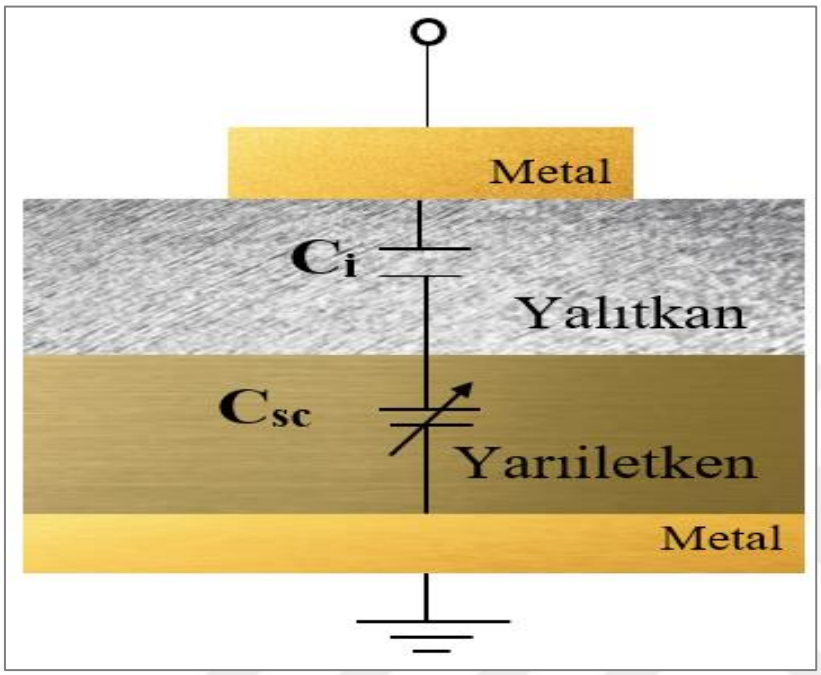
$$Q_m + Q_{sc} = 0 \quad (3.3)$$

burada, uzay yük bölgesindeki yük Q_{sc} ile ifade edilmiştir. Bu yükler nedeniyle elde edilen MIS yapısının kapasitansı (C), yalıtkan tabaka kapasitansı (C_i), uzay yükü kapasitansı (C_{sc}) Eş. 3.4 ile ifade edilir.

$$C = \frac{dQ_m}{dV_G} A, \qquad C_{ox} = \frac{dQ_m}{dV_{OX}} A \quad \text{ve} \quad C_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{d\Psi_S} A \quad (3.4)$$

burada, A doğrultucu kontağın alanıdır.

MIS yapılar, paralel plakalı kondansatöre benzer bir yapıya sahiptir ve MIS kapasitansı, metal ile yarıiletken arasında meydana gelen toplam kapasitans olarak tanımlanır. Şekil 3.3'de MIS yapının eşdeğer kapasitans devresi gösterilmektedir.



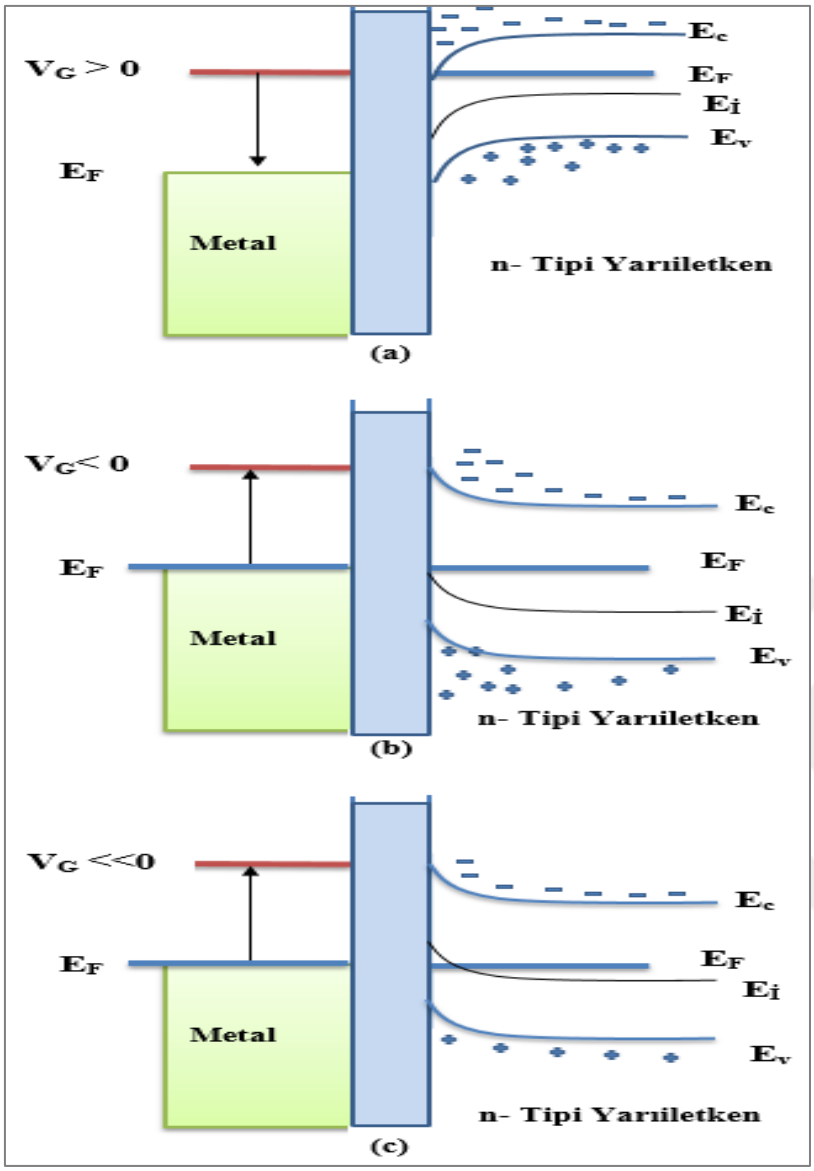
Şekil 3.3. MIS yapının eşdeğer devresi

MIS kapasitansı (C); seri bağlı uzay yükü kapasitansı (C_{sc}) ile yalıtkan tabakanın (C_i) kapasitanslarının eşdeğer kapasitansıdır [59]. Aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{a_i}{\varepsilon_i A} \tag{3.5}$$

burada, d_i yalıtkan tabaka kalınlığı ve ε_i yalıtkan tabakanın dielektrik sabitidir. C_i değeri uygulanan gerilimden etkilenmediği için MIS yapısının toplam kapasitansındaki değişimi yalınızca uzay yükü kapasitansına bağlıdır.

n-tipi yarıiletken içeren MIS yapıda, uygulanan gerilime bağlı olarak oluşan durumlar ve enerji bant diyagramları Şekil 3.4' de verilmiştir [55, 57-61].

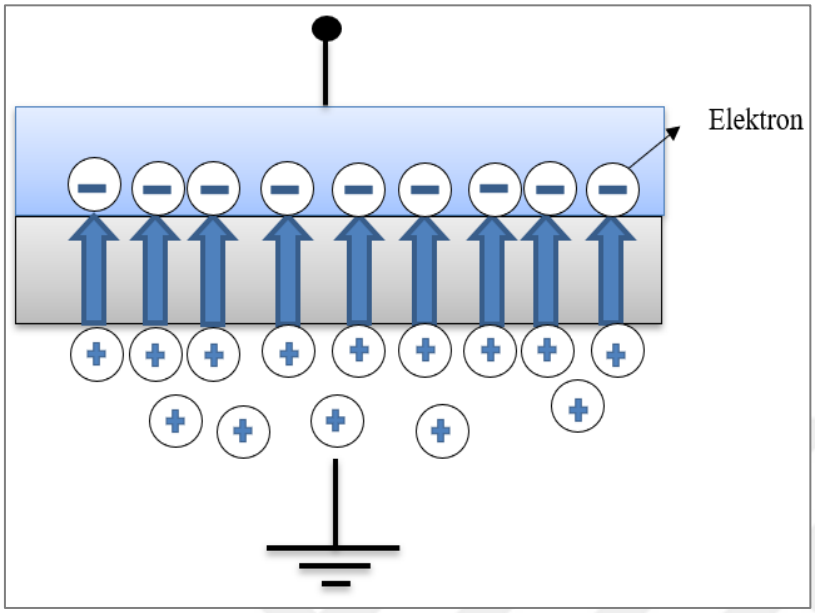


Şekil 3.4. Uygulanan gerilime bağlı olarak oluşan (a) yığılım, (b) tükenim, (c) tersinim bölgeleri için n-tipi yarıiletkenin ideal MIS yapısının enerji-bant diyagramı

3.1.1. Yığılım

Metal plakaya $V_G > 0$ olacak şekilde küçük bir doğru beslem gerilimi uygulandığında, bu gerilimle oluşan elektrik alan, n tipi yarıiletkenin iletim bandı elektronlarını yarıiletken-metal yüzeyine doğru yönelmesine neden olur. Yarıiletken arayüzeyinde valans bandının Fermi enerji seviyesine yaklaştığı ve iletkenlik bandının da aşağı doğru büküldüğü bu duruma yığılım adı verilir (Şekil 3.4.a). Bu durumunda arayüzeyde biriken yükün uzay yükü olması nedeniyle uzay yük kapasitansı $C_{sc} \rightarrow \infty$ ve MIS yapısına ait kapasitans da $C \rightarrow C_i$ olur. Yığılım bölgesinde MIS yapının kapasitansı, elektron yoğunluğunun uygulanan

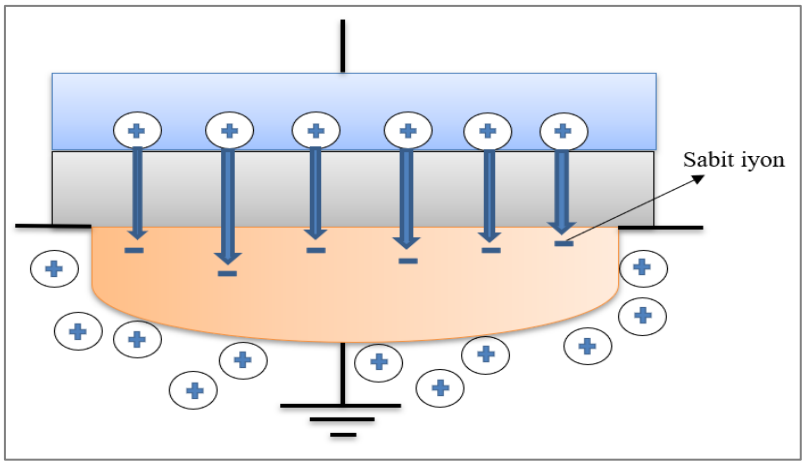
gerilimin alternatif akım (ac) sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Yığılım bölgesine ait metal ve yarıiletken yüzeyinde oluşan yük dağılımı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Yığılım bölgesine ait metal ve yarıiletken yüzeyinde oluşan yük dağılımı

3.1.2. Tükenim

Metale V_G <0 olacak şekilde küçük bir ters beslem gerilimi uygulandığında, yarıiletken arayüzeyindeki elektronları yalıtkan tabaka içinde oluşan elektrik alan yüzeyden uzaklaştırır. Elektronlar yarıiletken yüzeyiden uzaklaşırken arayüzey bölgede deşikler (holler) oluşur. Yarıiletkenin yüzeyinde elektron yoğunluğu, iç bölgesine kıyasla azalmaya başlar, enerji bantları (iletkenlik ve valans bantları) yukarı yönde bükülür (Şekil 3.4.b). Sonuç olarak uygulanan bu gerilim etkisiyle yarıiletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu azaldığı bir bölge oluşur. Elektron yoğunluğunun azaldığı bu alan, tükenim (uzay yükü) bölgesi olarak tanımlanır. Tükenim bölgesine ait metal ve yarıiletken yüzeyinde oluşan yük dağılımı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Tükenim bölgesine ait metal ve yarıiletken yüzeyinde oluşan yük dağılımı

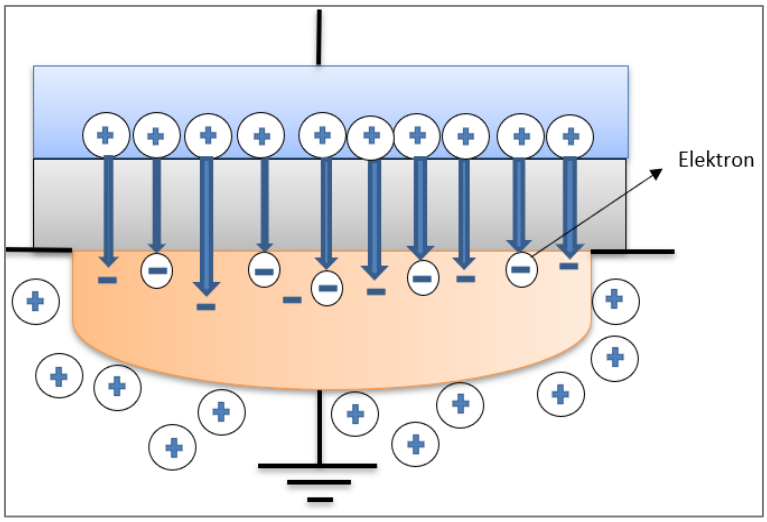
Tükenim tabakası genişliği,

$$W_D = \varepsilon_s A(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_i}) \tag{3.6}$$

şeklinde ifade edilir, buradaki ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. MIS yapının tükenim bölgedeki kapasitans değeri, uzay yük ve yalıtkan kapasitansı belirler [55].

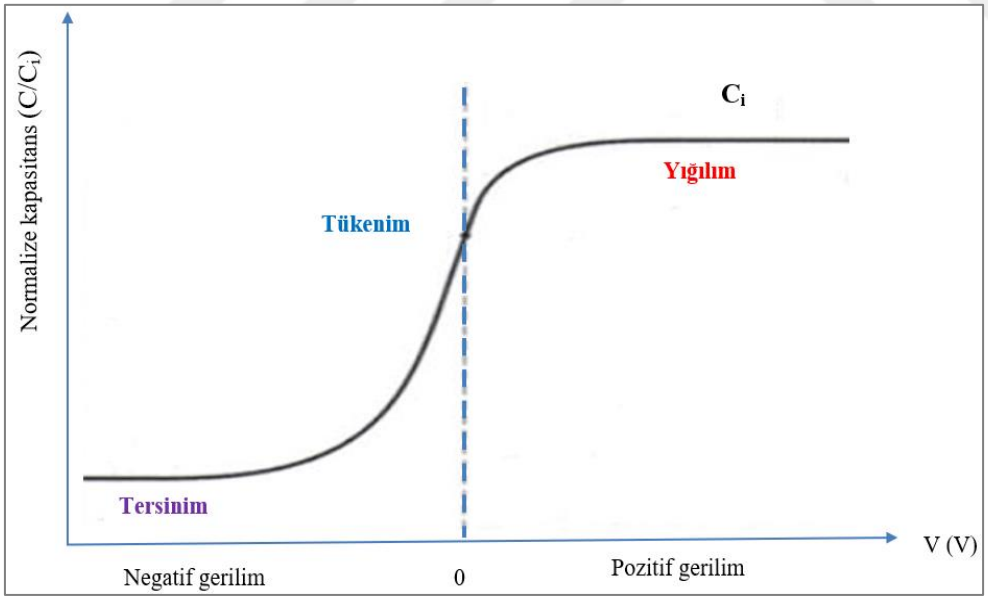
3.1.3. Tersinim

Metal plakaya $V_G \ll 0$ olacak şekilde ters beslem gerilimi uygulandığında, iletkenlik ve valans bantları yukarı doğru daha çok bükülür. Bu bükülme nedeniyle Fermi enerji seviyesine iletkenlik bandı yaklaşır, saf enerji seviyeside (E_i) Fermi enerji seviyesinin altına geçer (Şekil 3.4.c). Yarıiletken yüzeyinde deşik yoğunluğu arttığından, n-tipi yarıiletken yüzeyi p-tipi gibi davranması nedeniyle tersinim denilmektedir. Tersinim bölgesine ait, metal ve yarıiletken yüzeyinde oluşan yük dağılımı Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Tersinim bölgesine ait metal ve yarıiletken yüzeyinde oluşan yük dağılımı

Frekans düşük olduğunda, yüzey elektronları uygulanan ac sinyalini takip edebildiği için MIS kapasitansı, artan gerilim ile C_i değerine ulaşır. Yüksek frekanslarda ise elektron yoğunluğu ac sinyalini takip edemez ve MIS kapasitansı C_{min} değerini alır. Şekil 3.8' de ideal MIS yapının C-V eğrisi verilmiştir.

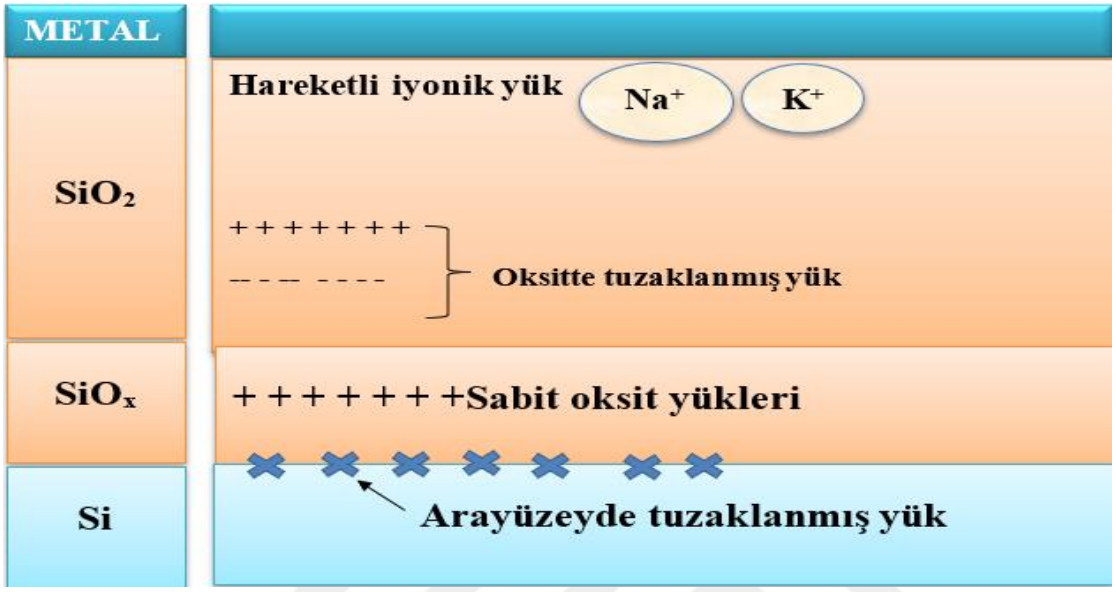


Şekil 3.8. İdeal MIS yapının C-V eğrisi

3.2. Gerçek MIS Yapılar

Pratikte MIS yapısı, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde bulunan tuzaklanmış yükler ile yalıtkan tabaka büyütülmesi sürecinde oluşan tuzaklar, hareketli iyonlar, sabit oksit ve

arayüzey yükleri nedeniyle ideal MIS yapısı özelliği sergilemezler. Pratikte MIS yapısını ideal yapısından uzaklaştıran bu yükler ve arayüzey durumları Şekil 3.9'da gösterilmektedir [12, 62, 63].



Şekil 3.9. Gerçek MIS yapıda ortaya çıkan durumlar ve yükler

3.2.1. Arayüzeyde tuzaklanmış yükler (Q_{it})

Arayüzey durumları yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içinde bulunan girilebilir enerji seviyeleridir. Arayüzey durumları alıcı veya verici özelliğe sahip olabilirler. Alıcı arayüzey tuzağı boşken nötrdür; ancak bir elektron yakaladığında negatif yüklenir. Verici arayüzey tuzağı doluyken nötr durumdadır ve bir elektron verdiğinde pozitif yüklenir. Bu arayüzey tuzak seviyeleri MIS yapıya bir gerilim uygulandığında iletkenlik ve valans bantlarıyla birlikte hareket eder. Arayüzey tuzaklarının iletkenlik ve valans bandı ile yük alışverişi arayüzey tuzaklarında yük yoğunluğunun değişimine neden olur. MIS yapısının kapasitansına katkıda bulunan arayüzey tuzaklarındaki bu yük değişimi, ideal MIS yapısındaki C-V eğrisinin değişmine neden olur. Şekil 3.10'da arayüzey durumlarının etkisini içeren eşdeğer devre gösterilmiştir. Arayüzey durumları yük yoğunluğu Q_{ss}, yarıiletkendeki katkı atom yoğunluğu ve oksit tabakası kalınlığından etkilenmez. Şekil 3.10' da verilen devredeki arayüzey kapasitansı C_{ss},

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_{ss}} A_{OX} \tag{3.7}$$

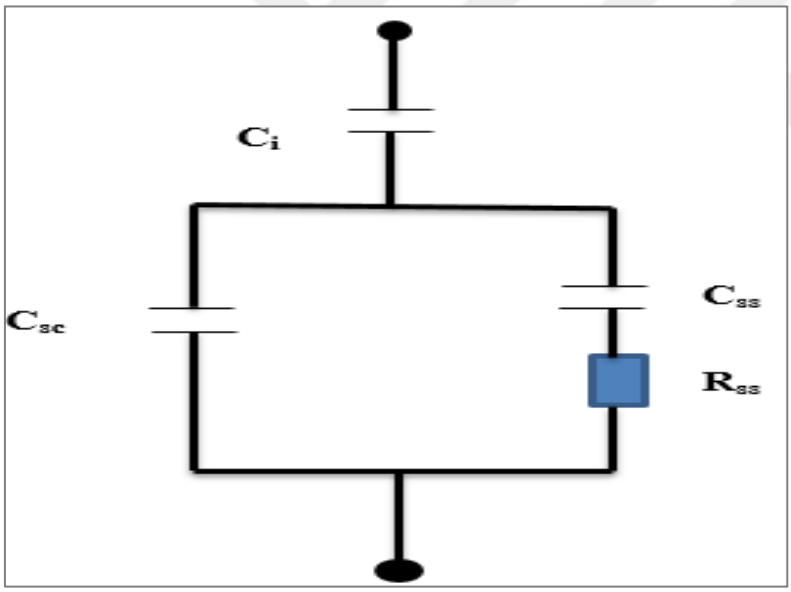
eşitliği ile verilir. Şekil 3.10'da R_{ss}, arayüzey direncini tanımlamakta ve C_{ss} ile R_{ss} kullanlarak durulma zamanı $\tau = R_{ss}C_{ss}$ şeklinde ifade edilir. Arayüzey durumlarının birim enerji başına yük yoğunluğu,

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \tag{3.8}$$

ile ifade edilir. $E = q\Psi_s$ olarak alındığında ve Eş.3.8 tekrar düzenlendiğinde arayüzey durum yoğunluğunu,

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{SS}}{\partial \Psi_S}\frac{\partial \Psi_S}{\partial E} = \frac{1}{q}\frac{\partial Q_{SS}}{\partial \Psi_S} \tag{3.9}$$

elde ederiz [64].

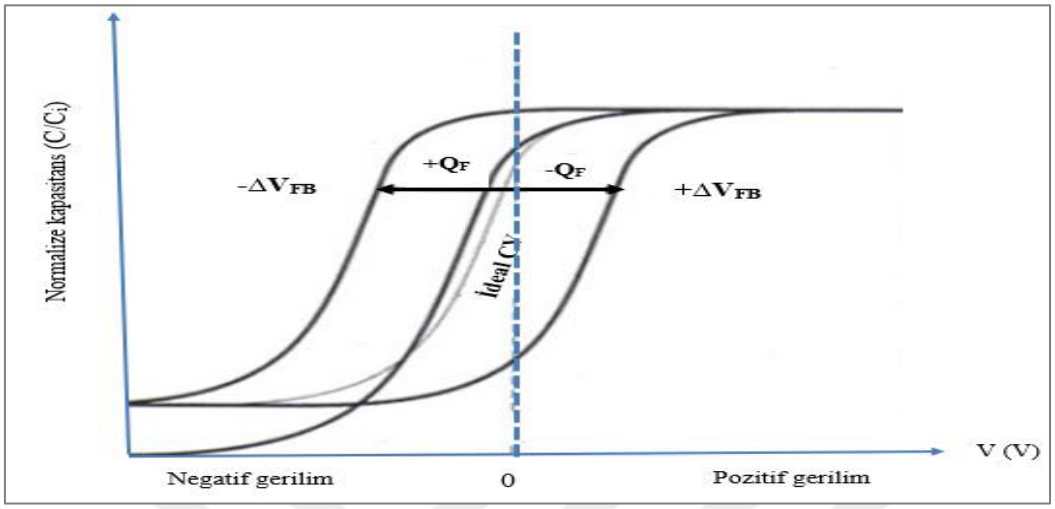


Şekil 3.10. MIS yapının arayüzey durum yoğunluğuna bağlı olarak eşdeğer devresi

3.2.2. Sabit oksit yükleri (Q_F)

Sabit oksit yükler, yalıtkan arayüzeyinde bulunan tavlama şartlarına, oksidasyona ve silisyumun yönelimine bağlı olarak meydana gelir. Oluşan bu yükler pozitif veya negatif yüklü olabilir ve yüksek frekanslarda MIS yapısının C-V grafiğini değiştirir. Pozitif sabit oksit yükler ($+Q_F$), gerçek C-V eğrisini ideal C-V eğrisine göre negatif voltaja doğru kaymasına, negatif sabit oksit yükler ($-Q_F$) ise gerçek C-V eğrisini ideal C-V eğrisine göre

pozitif voltaja doğru kaymasına neden olur [62]. Gerçek MIS yapısının bu kaymaları gösteren C-V eğrisi Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Gerçek MIS yapının C-V eğrisi

Sabit oksit yüklerin MIS kapasitansına etkisi, C eğrisinin voltaj ekseni boyunca paralel bir şekilde kaymasıdır. Kayma miktarı (ΔV) ise,

$$\Delta V = \frac{Q_{SC}}{C_i} = \frac{\Delta Q_i}{C_i} q \tag{3.10}$$

eşitliği ile verilir. İdeal ve gerçek C-V eğrileri arasındaki fark kullanılarak, yalıtkan tabakada oluşan sabit oksit yükler, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde oluşan toplam yük ve arayüzey durumları yük yoğunlukları hesaplanabilir. Sırasıyla oluşan bu yükler Eş.3.11-13 ile ifade edilir,

$$\Delta Q_i = \frac{\Delta V_{MG} C_i}{q} \tag{3.11}$$

$$\Delta Q_{eff} = \frac{\Delta V_{FB} C_{\text{i}}}{q} \tag{3.12}$$

$$\Delta \mathrm{Q_{ss}} = \Delta \mathrm{Q_{eff}} - \Delta \mathrm{Q_i} \tag{3.13}$$

Burada, ΔV_{FB} düz bant gerilim kaymasıdır ve bu kaymaya oksit içindeki hareketli yükler neden olur. ΔV_{MG} ise gerçek ve ideal C-V eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kaymasını ifade eder.

3.2.3. Yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yük (Q_{ot})

Yalıtkan tabakadaki kimyasal yapı bozuklukları ve radyasyon nedeniyle yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yükler oluşur. Bu yükler yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparak yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. Radyasyon etkisi ile yalıtkan oksitte meydana gelen elektron-deşik çiftlerinin bir kısmı sonradan yalıtkan içerisinde tuzaklanabilir. Ayrıca, tünelleme yoluyla elektron ve deşik enjekte edildiğinde bunların bazıları da yalıtkan oksit içerisinde tuzaklanabilir [55, 56]. Oksitte tuzaklanmış yük (Q_{ot}),

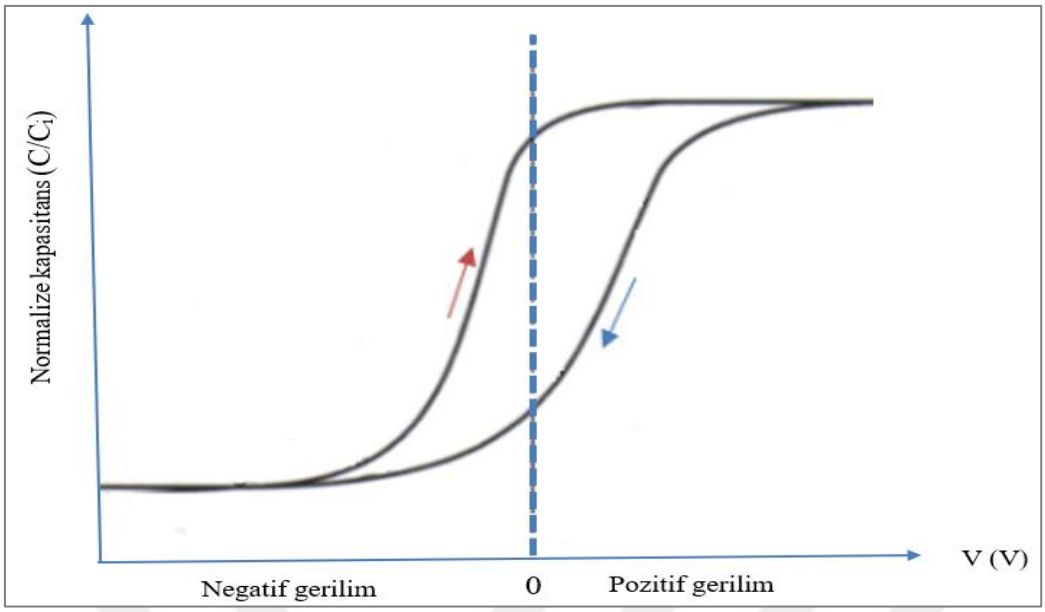
$$Q_{ot} = -\Delta V_{FB} C_i \tag{3.14}$$

şeklinde ifade edilir. İyonlaşmış tuzaklar, negatiften pozitife ve pozitiften negatif gerilimlere doğru ölçülen kapasitans değerleri arasında oluşan farktan dolayı C-V eğrisinde histeresis etkisi ortaya çıkar [55, 65].

Yeterince yüksek negatif gerilim uygulandığında oksit tabakasındaki tuzaklar, elektronların deşikler tarafından yakalanmasıyla boşalmasına neden olur. Pozitif gerilim altında ise, Fermi enerji seviyesi iletim bandına doğru kayarak oksit tuzaklarının dolmasına neden olur. Uygulanan gerilimin azalması durumunda ise Fermi seviyesinin valans bandına yaklaşır, tuzaklardaki elektronlar deşikler tarafından yakalanarak tuzaklar boşalır. Bu tuzaklarda oluşan dolum ve boşalım süreçlerindeki elektron sayıları arasındaki fark, C–V eğrisinde kaymaya neden olan histeresis yükünü oluşturur. C-V eğrisinin her iki yönde (negatiften pozitife) ölçülen değerleri arasındaki kayma miktarı, oksit içerisindeki tuzak yoğunluğu hakkında bilgi verir. Dolayısıyla histeresis yük yoğunluğu,

$$\Delta Q_{Hiss} = \frac{\Delta V_{HissFB} C_i}{q} \ (cm^{-2}) \tag{3.15}$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada ΔV_{HissFB} düz banttaki kayma miktarıdır. Şekil 3.12'de histeresis etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Histeresis etkisi

3.2.4. Hareketli iyonik yük (Oksit yükleri=Q_m)

Metal-yalıtkan ya da yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde bulunan Na^+, K^+, Li^+, H^+, H_3O^+ gibi hareketli iyonik yükler, uygulanan elektrik alan etkisiyle yer değiştirerek C-V eğrisinde kaymalara sebep olur. Genellikle bu iyonlar, fabrikasyonu sırasında kimyasal temizleme için kullanılan kimyasal maddeleri içerir ya da oksitleme gazlarında bulunan safsızlık atomları gibi nedenlerden dolayı bu iyonların yapının arayüzeyinde oluşmasına neden olur. İdeal C-V eğrisindeki düz bant kaymasından yararlanarak hareketli iyonik yükler,

$$Q_m = -\Delta V_{FB} C_i \tag{3.16}$$

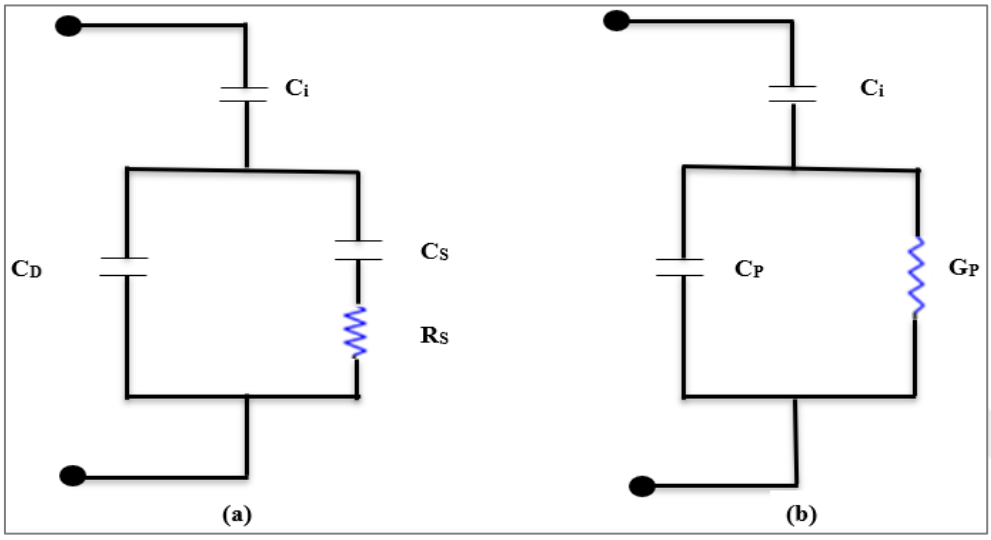
eşitliği ile hesaplanır [63].

3.3. Arayüzey Durumlarının Etkisi

Arayüzey durumlarının varlığı MIS yapısının elektriksel performansını ve karakteristik özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Tuzaklanmış arayüzey yükleri, yarıiletkenin yasak enerji bant aralığında bulunan enerji durumlarıdır. Bu yükler, yarıiletkenin iletkenlik veya valans bandı ile yük alış-verişi yapabilmeleri nedeniyle bu yüzey durumlarına yeniden birleşme (rekombinasyon) merkezleri denilir. Arayüzey durumları yavaş ve hızlı olmak üzere ikiye ayrılır. Yavaş yüzey durumları, metal ile yalıtkan arasında bulunur, termal oksidasyon

yöntemi kullanılarak bu yüzey durumları ortadan kaldırılabilir ve kapasitansı etkilemez. Hızlı yüzey durumları ise yalıtkan ile yarıiletken arasında bulunur ve yarıiletkenin yasak enerji bant aralığının ortasına yakın enerjiye sahiptirler. Arayüzey durumlarını içeren eşdeğer devre Şekil 3.13'de verilmektedir.

Şekil 3.13'de yer alan C_D yarıiletkenin tükenim tabakası kapasitansı ve C_i yalıtkan arayüzey tabakası kapasitansıdır. Şekil 3.13.a'nın paralel bağlı devresinin eşdeğeri Şekil 3.13.b'de verilen paralel bağlı kapasitans (C_p) ve iletkenlik (G_p) şeklinde yazılabilir.



Şekil 3.13. Arayüzey durumlarını içeren eşdeğer devre

Buna göre, Şekil 3.13.b' de verilen paralel koldaki admitans;

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_s + \frac{1}{j\omega C_s}} = G_p + j\omega C_p \tag{3.17}$$

ile ifade edilir. G_p ve C_p'ler ise,

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{C_s \omega^{\angle} \tau}{1 + \tau^2 \omega^2} \tag{3.18}$$

$$C_p = C_D + \frac{C_s}{1 + \tau^2 \omega^2} \tag{3.19}$$

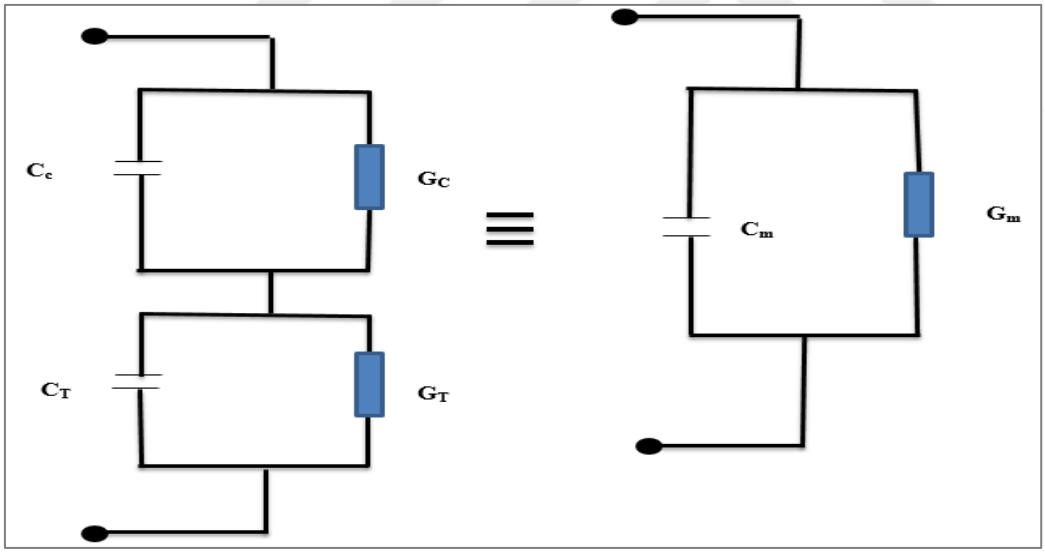
Eşdeğer devrenin toplam empedansı Z,

$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_p + j\omega C_p} = -j\left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}\right) + \frac{G_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \quad (3.20)$$

eşitliği ile verilir. Buradan, toplam admitans Y,

$$Y = \left(\frac{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}{G_p}\right) + j\omega\left(\frac{(G_p^2 + \omega^2 C_p^2)C_i}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2 + \omega C_p}\right) = G_m + j\omega C_m \quad (3.21)$$

Arayüzey tuzaklarının ömrü (τ), $\tau = C_s R_s$ şeklinde tanımlanır ve bu arayüzey tuzaklarının davranışını etkiler. Buradaki R_s seri dirençtir ve elde edilen R_s değeri büyükse, ölçümler sonucunda elde edilen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m) değerleri gerçek değerler değildir. Bu nedenle ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerlerinin yeniden hesaplanıp düzeltilmesi gerekir. Bu durumda düzeltilmiş kapasitans ve iletkenlik C_c ve G_c ile gösterilir. Şekil 3.14'de ölçülen ve düzeltilmiş kapasitans ile iletkenlik eşdeğer devresi verilmektedir.



Şekil 3.14. MIS yapının eşdeğer devresi

Şekil 3.14'deki devrenin empedans ifadeleri,

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_c + G_c}, \qquad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T}, \qquad Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \quad (3.22)$$

ile verilir. Buna göre, $Z=Z_1+Z_2$' den $Z_1=Z-Z_2$ yazılırsa;

$$\frac{1}{Z_1} = j\omega C_c + G_c = \left(\frac{1}{j\omega C_m + G_m} - \frac{1}{j\omega C_T + G_T}\right)^{-1} \quad (3.23)$$

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) - j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j(C_T - C_m)} \quad (3.24)$$

Eş. 3.24'ün $G_T=1/R_s$ alınıp, C_T değeri ihmal edilirse ve paydası eşleniği ile çarpılırsa düzeltilmiş iletkenlik ifadesi,

$$G_C = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (3.25)$$

elde edilir. Seri direnç (R_s) değeri; yüksek frekansta kuvvetli yığılım bölgesinde ölçülen C_m ve G_m değerlerinden hesaplanır [62].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (3.26)$$

eşitliğinden R_s,

$$R_S = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (3.27)$$

elde edilir. Eş. 3.23 eşitliğinin imajiner kısmı ise,

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (3.28)$$

$$a = G_m - [G_m^2 + (\omega C_m)^2] R_s \quad (3.29)$$

yukarıdaki C_c ifadesi düzeltilmiş kapasitanstır. Eş. 3.25 ve Eş. 3.28 eşitliklerindeki ifadelerin düzeltilmiş C_c ve G_c değerleri ile aşağıdaki şekilde (Eş. 3.30 ve Eş. 3.31) ifade edilir.

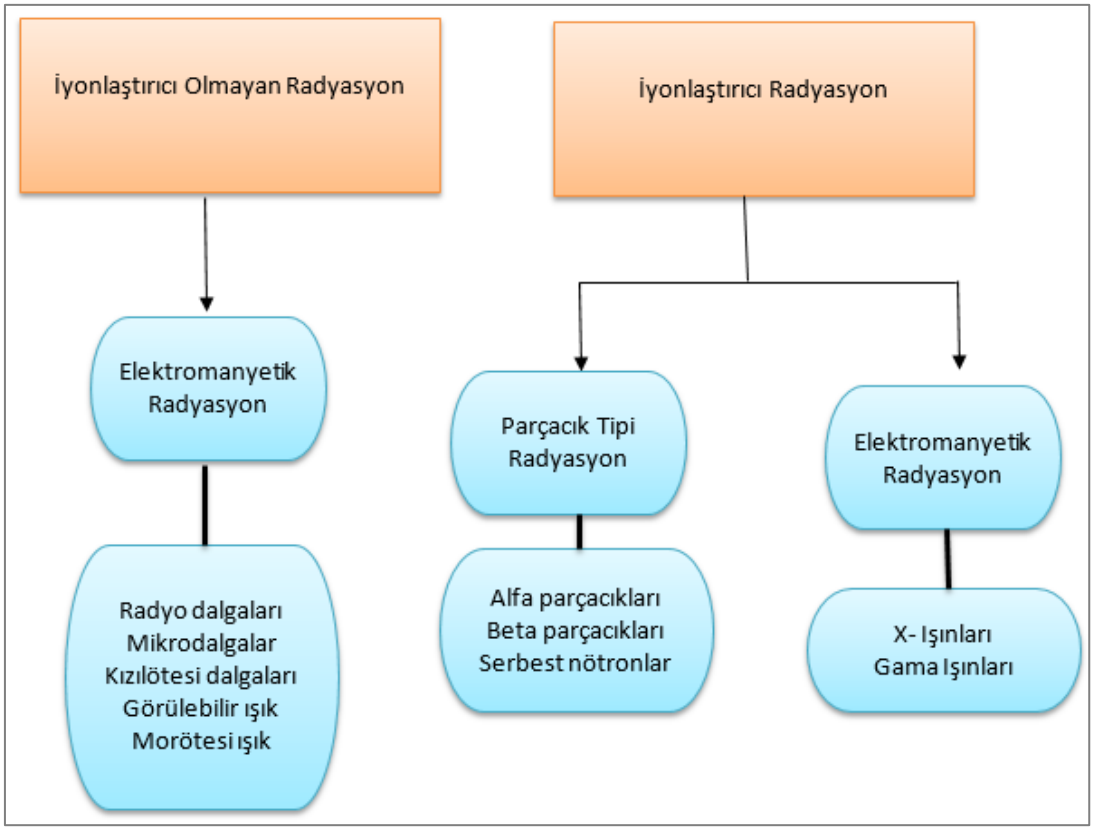
$$C_c = \frac{\left(G_m^2 + (\omega^2 C_m^2)\right) C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (3.30)$$

$$G_c = \frac{\left(G_m^2 + (\omega^2 C_m^2)\right)a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \tag{3.31}$$

R_s=0 olması durumunda C_c =C_m ve G_c =G_m olur.

4. RADYASYON VE ETKİLERİ

Radyasyon, kararsız atom çekirdeklerinin radyoaktif bozunması sonucu ortaya çıkan ve enerji dalgaları veya yüksek enerjili parçacıklar halinde yayılan enerji olarak tanımlanır. Radyasyonu, türüne göre elektromanyetik ve parçacık radyasyonu olarak ikiye ayrılır. Elektromanyetik radyasyon; elektrik ve manyetik dalgalar şeklinde yayılan, kütlesiz, iyonlaştırıcı veya iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak ikiye ayrılır. Parçacık radyasyonu, kütlesi ve yüksek enerjiye sahip olan iyonlaştırıcı radyasyondur [66]. Şekil 4.1'de iyonlaştırma durumuna göre radyasyon çeşitlerini göstermektedir.



Şekil 4.1. Radyasyon çeşitlerinin iyonlaştırma durumuna göre sınıflandırılması

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, bir moleküldeki atomları hareket ettirmek veya titreşmelerine neden olmak için yeterli enerjiye sahiptir, ancak atomlardan elektronları koparmak için yeterli enerjiye sahip değildir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyona radyo dalgaları, mikrodalgalar ve görünür ışık örnek olarak verilebilir.

İyonlaştırıcı radyasyon ise atomlardan elektronları koparark iyonizasyona sebep olan yüksek enerjili radyasyondur. İyonlaştırıcı radyasyona örnek olarak cihazlardan yayınlanan x ışınları, gama ışınları, radyoaktif elementler ve uzaydan gelen kozmik parçacıklar gösterilebilirler.

4.1. Beta Radyasyonu

Beta radyasyonu, bazı radyoizotoplar tarafından yayınlanan ya da çoğunlukla gamma ışınları ile birlikte ortaya çıkan parçacık radyasyonudur. Radyoaktif çekirdeklerde proton ve nötron sayılarının dengesiz olması durumunda bu dengesizliği yok etmek için bir protonun nötrona, bir nötronun ise protona dönüşmesi veya çekirdeğin bir elektron yakalaması sonucunda beta radyasyonu yayınlanır.

Eğer çekirdekte bir proton bir nötrona dönüşüyorsa, çekirdek içindeki pozitif yük bir birim azalmakta ve protonlar arasındaki itme kuvveti de azalmaktadır. Çekirdekte bir nötron bir protona dönüşüyor ise, çekirdek içindeki pozitif yük bir birim artmakta ve protonlar arasındaki itme kuvvetinde de artış meydana gelmektedir. Bu şekilde, çekirdekte maydana gelen itme kuvvetindeki artış/azalış, çekirdek içindeki dengeyi sağlayarak çekirdeği karasız durumdan karalı hale geçmesine neden olur.

Radyoaktif elementler tarafından yayınlanan gamma ışınları ve alfa parçacıkları çekirdekteki enerji seviyeleri arasındaki farklara karşılık gelen belirli enerji değerlerinde yayınlanırken, beta parçacıkları ise neredeyse sıfırdan başlayarak izotopa bağlı olarak değişen maksimum bir enerjiye kadar uzanan sürekli bir enerji spektrumu gösterir.

Beta parçacıkları kendisini yayınlayan radyoizotopa bağlı olarak maksimum enerji değeri farklılık göstermektedir ve bu maksimum enerjiye sahip olarak yayınlanan beta parçacıklarının sayısı oldukça azdır. Beta parçacıklarının 0,5 MeV ≤ MeV ≤ 5 MeV arasında maksimum enerjileri değişmektedir. Ancak, bu değerlerin altında ve üstünde beta ışınları yayan nadir de olsa bazı radyoizotoplar mevcuttur. Beta spektrumunun ortalama enerjisi ise yayınlanan beta radyasyonunun maksimum enerjisinin üçte biri kadardır.

Beta parçacıklarının hızı, ışık hızının 0,99'u kadardır. Gerek pozitif gerekse negatif β parçacıklarının enerjileri, radyoizotoplar tarafından yayımlanan α parçacıklarınınkinden

daha küçüktür. Beta parçacıklarının çoğu 4 MeV'den daha küçük enerjiye sahipken, α parçacıkları 4 MeV'den daha büyük enerjilerde yayımlanırlar. Bununla birlikte, aynı kinetik enerjiye sahip olduklarında β^- parçacıkları daha küçük kütleye sahip oldukları için ortamda α parçacıklarından daha hızlı hareket ederler.

Bir beta parçacığı ile soğurucu ortamın atomundaki yörünge elektronu arasındaki etkileşimlerini anlayabilmek için tüm etki koşullarının dikkate alınması gerekmektedir. Örneğin; beta parçacığı ile yörünge elektronu arasındaki kütle ilişkisi göz önüne alındığında, bu iki elektron arasındaki çarpışma iki bilardo topunun çarpışmasına benzetebiliriz. Normalde, beta parçacığı tek bir çarpışmada bütün enerjisini kaybedebilir. Yörünge elektronu ise iyonlaştırıcı bir parçacığa dönüşebilir. Ancak, genelde beta parçacıkları enerjilerini genellikle alfa parçacıklarında olduğu gibi, çok sayıda iyonizasyon ve uyarılma yoluyla kaybederler.

Beta parçacıkları küçük kütleli ve bir elemanter yüke sahip olmaları nedeniyle alfa parçacıkları gibi kolayca durdurulamasalar bile, katı maddeler içinde yüksek enerjilere sahip olmasa bile yüksek nüfuz etme özelliği göstermezler. Beta parçacıklarının madde içindeki maksimum menzilli, en yüksek enerjiye sahip beta parçacıklarının ulaşabileceği en büyük derinlik olarak tanımlanır. Maksimum enerjili beta parçacıklarının sayısının oldukça az olması, mutlak erişme uzaklığının kesin olarak belirlenmesini güçleştirmektedir. Düşük atom numaralı elementlerde ise beta parçacıklarının menzili, maddenin cinsinden bağımsız olup yalnızca yoğunluk ve kalınlıkla ilişkilidir. Bu nedenle genellikle menzil mg/cm^2 cinsinden ifade edilir ve beta parçacıklarına ait menzil 1 -2000 mg/cm^2 arasında değişir.

Beta parçacıklarının katı içindeki erişme uzaklığının az olmamasına rağmen hava içindeki erişme uzaklığı daha büyüktür. Bu nedenle, beta yayımlayan radyoizotoplar için havada uzun menzile sahip olması nedeniyle dış radyasyon tehlikesi yaratır. Ayrıca, elektronun küçük kütlesi ve yükü olmasından dolayı, beta radyasyonunun madde ile etkileşim olasılığı oldukça düşüktür. Bu nedenle, aynı enerjiye sahip alfa parçacıklarına kıyasla beta parçacıklarının erişme uzaklığı önemli ölçüde daha fazladır. Dolayısıyla, beta parçacıkları ortam içerisinde alfa parçacıklarına göre daha uzun mesafelere gidebilmektedir.

Beta bozunması üç yolla gerçekleşebilmektedir: β^- bozunması veya elektron yayınımı, β^+ bozunması veya pozitron yayınımı ve çekirdeğin elektron yakalaması.

4.1.1. β^- bozunması veya elektron yayınımı

Çekirdekteki nötron sayısının fazla olmasından dolayı atomun çekirdeğinde kararsızlık meydana geldiğinde, çekirdek içindeki bir nötron bir protona dönüşmekte ve fazla enerji çekirdek dışına bir elektron (β^-) ve bir antinötrino (ν^-) yayınımı ile çekirdek karalı hale gelir. Eş. 4.1'de β^- bozunumu verilmektedir.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z+1}{}^{A}Y + e^- + \nu^- \tag{4.1} $$

Çekirdeğin elektron yayınımında atom numarası bir artarken kütle numarası değişmez. Oluşan elektron ve antinötrino arasındaki enerji paylaşımı rastgele olması nedeniyle elektronlar farklı kinetik enerjilere sahiptir.

4.1.2. β^+ bozunması veya pozitron yayınımı

Çekirdekteki proton sayısının fazla olmasından dolayı atomun çekirdeğinde kararsızlık meydana geldiğinde, çekirdek içindeki bir proton bir nötrona dönüşmekte ve fazla enerji çekirdek dışına bir pozitron (β^+) ve bir nötrino (ν^+) yayınımı ile çekirdek karalı hale gelir. Pozitron (β^+), kütlesi ve madde ile etkileşimi elektronla aynı olan pozitif yüklü bir elektrondur. Eş. 4.2 ile β^+ bozunumu gösterilmektedir.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + e^+ + \nu \tag{4.2} $$

Çekirdeğin pozitron yayınımında, çekirdeğin atom numarası bir azalırken kütle numarası değişmez [70]. Elektron yayınımında olduğu gibi pozitron yayınımı da bir spektrum şeklinde meydana gelmektedir.

4.1.3. Çekirdeğin elektron yakalaması

Çekirdeğin elektron yakalamasında ise çekirdekteki bir proton, yörünge elektronlarından birini yakalayarak bir nötrona dönüşmesi şeklinde meydana gelir. Bu dönüşüm sonucunda sadece nötrino yayınımı olmaktadır. Çekirdeğin elektron yakalaması Eş. 4.3 ile ifade edilebilir.

$$ {}^{A}_{Z}X + e^{-} \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + \nu \quad (4.3) $$

Yörüngedeki elektronun çekirdek tarafından yakalanması sonucunda, yörüngede oluşan boşluğu bir üst seviyede bulunan elektron tarafından doldurulur. Bu geçiş sırasında elektron kararlı hale gelebilmek için karakteristik X ışını yayınımı olmaktadır. Bu ışınlar madde içinde Auger elektronlarının oluşumuna da neden olmaktadırlar [70].

4.2. Yarıiletken Malzemelerde Radyasyon Etkileri

Radyasyonun yarıiletken malzemeler üzerinde geçici ve kalıcı olmak üzere iki önemli etkiye sahiptir. Geçici etki elektron-hol (deşik) çiftlerinin oluşumu (rekombinasyonu) olarak adlandırılırken, kalıcı etki ise radyasyonun neden olduğu atomik yer değiştirme sonucu malzemenin kristal yapısında meydana gelen bozukluklar veya yapısal değişiklikler olarak adlandırılır. Radyasyona bağlı olarak oluşan kusurlar, arayüzey tuzakları, sarkan bağlar ve yeniden kristalizasyon gibi durumlar yapının performansını değiştirmektedir [67-69].

4.2.1. Yerdeğiştirme hasar mekanizmaları

Radyasyonun malzeme içinde yerdeğiştirme etkisi veya kusur oluşumu olarak tanımlanan yapısal bozulmalara sebep olabilir. Yerdeğiştirme eşik enerjisine sahip bir atomla etkileşen parçacık, kristal örgüden bir atomu yerinden koparak boşluk oluşumuna neden olabilir. Koparılan atom, boşluğun yakınına yerleşerek kristalde örgü yapısının düzenini bozduğu için bu duruma örgü kusuru denir. Yerdeğiştirme kusurları, iyonizasyona göre nadiren meydana gelse bile kristalde örgü yapısında kalıcı hasarlara neden olabilir. İyonizasyon parçacık türüne bağlı olmayıp yalnızca parçacığın enerjisine, yerdeğiştirme kusurları ise genellikle parçacığın türüne bağlı olarak değişir [62, 71].

a. *Kusurların Üretilmesi:* Radyasyon bir malzeme ile etkileştiğinde iyonize olan ve olmayan şeklinde enerjilerini kaybederler. Bu enerji kaybının sonucunda elektron-hol çiftlerinin (iyonizasyon) oluşumu veya yer değiştirme hasarıları meydana gelmektedir. Böylece oluşan ilk örgü kusurları, atom boşlukları ve arayer bozuklukları olacaktır. Atom boşluğu, normal örgü konumunda bir atomun olmaması durumudur. Yer değiştiren bu atom örgüsüz bir konuma hareket ederse, ortaya çıkan kusura da arayer bozukluğu denir. Bir atom boşluğu ve komşu bir arayer atomu kombinasyonu, yakın-çift veya Frenkel-çifti

olarak bilinmektedir. Ayrıca yan yana iki atom boşluğu çift boşluk adı verilen başka bir kusur türünü oluşturur. Radyasyona maruz kalmış bir silikonda, daha çok bölgesel atom boşluğu kümeleri bulunur. Atom ve arayer boşluklarının, safsızlık atomlarına bitişik olması durumunda ise yeni kusur türlerinin oluşumasına neden olabilir. Radyasyona maruz kalan malzemelerde üretilen kusurların çoğu nokta kusurlar olarak adlandırılmaktadır. 1 MeV mertebesinde enerjiye sahip elektronlar ve fotonlar bu tür kusurlara neden olabilmektedir. Bu kusurlar birbirine yakın konumlarda üretildiklerinde kristal örgüde lokal bir bozukluk bölgesi meydana gelebilir, bu tür bölgelere literatürde kusur kümesi (düzensiz bölge) denilmektedir. Sonuç olarak, enerjik parçacıklar hem yalıtılmış kusurlar hem de kümelenmiş kusurların oluşumuna yol açmaktadır [72].

b. *Kusurların Yeniden Düzenlenmesi:* Radyasyon nedeniyle oluşan kusurlar kararlı yapılar meydana getirmek için yeniden düzenlenirler. Örneğin, radyasyon nedeniyle silikondaki oluşan atom boşluğu oda sıcaklığında oldukça hareketli olan kararsız bir kusurdur. Silikondaki atom boşlukları, oluştuktan sonra kristal örgü boyunca hareket ederek yeniden düzenlenir ve kararlı kusurların oluşmasına neden olur. Bu hareket sonucunda çift-boşluklar veya boşluk-safsızlık karışımı meydana getir. Kusurların varlığı, özellikli kusurların tipine ve belirli bir sıcaklıkta oluşumlarından sonraki süreye bağlı olarak değişiklik gösterir. Ayrıca kusurların yeniden düzenlenmesi sıcaklık ve taşıyıcı miktarına bağlı olarak değişir [72].

4.2.2. Yer değiştirme hasar mekanizmalarının ortaya çıkardığı etkiler

2003 yılında J.R. Srour ve arkadaşları tarafından yapılan gözden geçirme makalesinde [72]. Malzemelerde oluşan yer değiştirme hasar mekanizmasının oluşumu, radyasyonun türü ve enerjisine, ışınlama ve ölçüm sıcaklığına, yarıiletkenin tipine ve safsızlık miktarına/tipine bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, hasar mekanizmasının sekiz etkisinden bahsedilmiştir. Bu etkileri aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür [73-75].

Birinci etki, radyasyon sonucu oluşan kusurların enerji seviyeleri iletim ve valans bandının tam orta boşluğuna yakın seviyede elektron-deşik (hol) çiftlerinin oluşumu ile mümkündür. Bu etki, valans bandında bulunan bir elektronunun kusur merkezine ve daha sonra da iletim bandına uyarılması sonucunda meydana gelir (Şekil 4.2). Dolayısıyla bu olayı elektron-deşik (hol) çiftinin oluşumu şeklinde düşünmek mümkündür. Orta seviyeden iletkenlik bandına

doğru kusur enerji seviyeleri yaklaştıkça çift oluşum miktarı üstel olarak azalır. Bu etki özellikle tükenim bölgesinde daha çok etkisini gösterir ve silikon tabanlı cihazlarda kaçak akımların artmasına neden olur.

İkinci etki, elektron-deşik çiftlerinin rekombinasyonudur. Bu etkide, taşıyıcılardan biri kusur merkezi tarafından yakalanır daha sonra diğer taşıyıcı da aynı kusur merkezi tarafından yakalanması sonucu oluşan etkidir. Rekombinasyon, taşıyıcı üretim sürecinin tersine, sistemde bulunan elektron-deşik çiftlerinin azalmasıyla sonuçlanır. Rekombinasyon hızı çoğunlukla; kusur (veya rekombinasyon) merkezlerinin yoğunluğuna, serbest taşıyıcıların miktarına, elektron ile deşik yakalama kesitlerine ve kusur enerji seviyesinin bant aralığındaki yerine bağlı olarak belirlenmektedir.

Üçüncü etki, enerji bandının sığ seviyelerinde taşıyıcıların kısa süreli olarak tuzaklanmasıyla oluşan etkidir. Elektronun iletkenlik bandının yakınında veya hollerin ise valans bandı yakınında bulunan kusur merkezi tarafından tuzaklanmasıdır. Bu olayın özelliği, bir taşıyıcının kusur merkezi tarafından tuzaklanmasının ardından herhangi bir rekombinasyon süreci gerçekleşmeden yeniden kendi bandına geri salınmasıdır. Bu olayda genelde çoğunluk taşıyıcıları ile azınlık taşıyıcıları farklı seviyelerde tuzaklanmakadır. Radyasyon nedeniyle oluşan bu tuzaklar cihazın iletim veriminin düşmesine neden olur.

Dördüncü etki, radyasyon nedeniyle oluşan kusur merkezleri tarafından alıcıların veya vericilerin dengelenmesi (telafisi) ile sonuçlanan bir etkidir. Bu durumda, mevcut elektronların bir kısmı, radyasyon etkisiyle oluşan deşikler tarafından dengelenir. Mesela n-tipi yapıda, radyasyonun neden olduğu alıcılar merkezler, verici seviyesinden sağlanabilen elektronları yakalayarak dengelendiğinde, çoğunluk taşıyıcı miktarında bir düşüş meydana gelir.

Beşinci etki, potansiyel engelin taşıyıcıların kusur seviyeleri aracılığıyla tünellenmesidir. Kusur (tuzak) destekli tünelleme sonucunda cihaz akımlarında artma meydana gelebilmektedir.

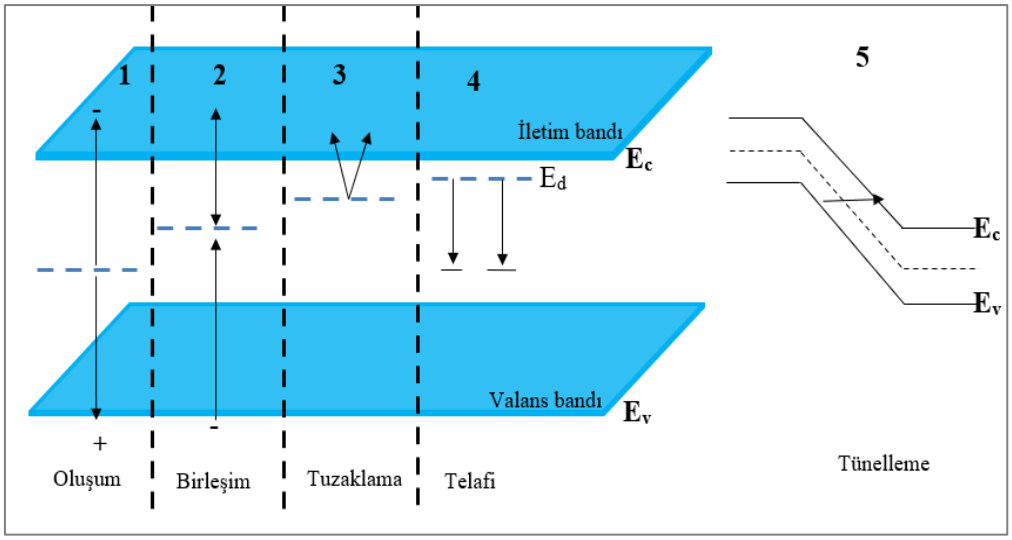
Altıncı etki, radyasyon etkisiyle oluşan kusurların saçılma merkezleri gibi davranması sonucunda taşıyıcı mobilitesinin azalmasıdır. Mobilitenin azalmasına artan iyonize safsızlık

konsantrasyonu ve radyasyona bağlı kusurların artması neden olur. Özellikle oda sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda bu etki meydana gelir.

Yedinci tip dönüşüm etkisi, yer değiştirme hasarı sonucunda taşıyıcıların çıkarılmasıyla oluşan etkidir. Örneğin Germanyumda tip dönüşüm olayı, alıcıların yenilenmesi, n-tipi bir malzemenin direncinin artmasına neden olması sebebiyle p-tipi bir malzemeye dönüşür. Bahsedilen tip dönüşüm olayı, silisyum malzemede gözlenmemektedir. Bununla birlikte, genellikle yüksek enerjili parçacıkların tespiti amacıyla kullanılan p/n eklemli silisyum cihazlarında, tip dönüşüm olayı tükenim bölgesinde meydana gelebilmektedir.

Sekizincisi ise taşıyıcıların oluşturulması için artırılmış etkidir. Yüksek bir elektrik alanı içeren cihaz bölgesinde çalıştırıldığında kusurlar meydana gelmektedir. Etkiye sebep olan mekanizma ise, taşıyıcıların oluşturulması için potansiyel engelin azaltılmasıdır. Aynı zamanda bu etkiye Poole-Frenkel etkisi de denilir.

Radyasyonun malzemede meydana getirdiği etkiler genel olarak ifade etmek gerekirse, yarıiletkenin yasak enerji aralığında kusur seviyeleri, elektron-hol çiftlerini üretimi (rekombinasyon), taşıyıcıların geçici tuzaklanması, yük taşıyıcılarının dengelenmesi, tünelleme, tip dönüşümü, arttırılmış etki ve taşıyıcıların oluşması için arttırılmış etkilere neden olabilir. Bahsedilen etkilerden biri veya birkaçı, hatta tümü eş zamanlı olarak gözlenebilir. Ayrıca bu etkiler sıcaklık, taşıyıcı yoğunluğu ve cihaz bölgesine (tersinim vb.) bağlı olarak değişmektedir.

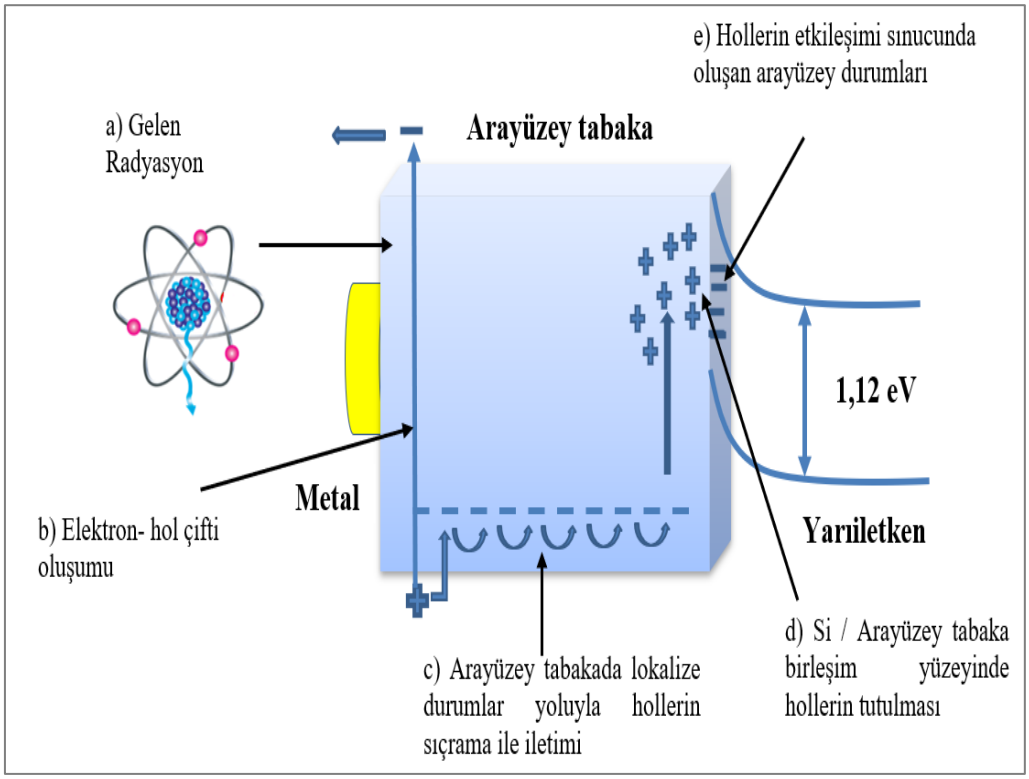


Şekil 4.2. Elektriksel etkiler

4.3. Yarıiletken Yapılarda Radyasyon Etkileri

MIS/MPS yapısındaki yalıtkan tabaka radyasyona karşı en duyarlı kısımdır. Şekil 4.3' de radyasyonun MIS/MPS yapısı ile yaptığı etkileşimler gösterilmiştir. Radyasyon MIS/MPS yapısı ile etkileştiğinde ilk olarak arayüzey tabakasında elektron ve deşik (hol) çiftlerini oluşturur (durum: a). Arayüzey malzemesi küçük dirence sahip ise metal/yalıtkan arasındaki elektron-deşik (hol) çiftleri hemen kaybolur. Farklı mobiliteleri nedeniyle elektronlar ve deşikler, yalıtkan tabaka içinde aynı davranışları sergilemezler [76]. Radyasyondan dolayı oluşan elektron- deşik (hol) çiftleri oluşumlarını takiben kısa süre içerisinde tekrar birleşebilir. Yalıtkan tabaka içinde birleşmeyen elektron- deşik (hol) çiftleri, uygulanan elektrik alanın etkisiyle birbirlerinden ayrılırlar (durum: b). Örneğin, metale pozitif bir voltaj uygulandığında elektronlar kısa bir sürede (10^{-12} sn) metale ulaşırken, deşikler yarıiletkenin yüzeyine doğru hareket ederler (durum: c). Arayüzeye yakın bölgede, halen ya

lıtkanda sabit pozitif yük sağlayabilen deşiklerin bazıları burada tuzaklanabilir (durum: d). Ayrıca, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyine gelen deşikler yarıiletkenin yasak bant aralığında arayüzey tuzakları oluşturur (durum: e).



Şekil 4.3. MIS kapasitörde iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumların şematik gösterimi

5. DİELEKTRİK

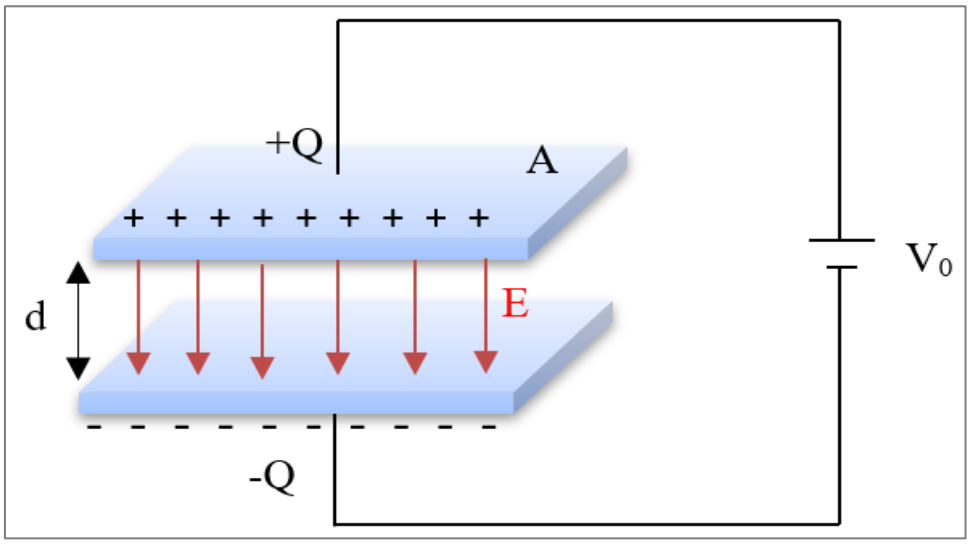
5.1. Dielektrik malzemeler

Elektrik alan etkisi altında serbest hareket eden yük taşıyıcıları bulunmayan yalıtkan melzemeleri tanımlamak için kullanılan bir ifadedir. Elektrik alana tepki olarak yük merkezlerinde bir kayma meydana gelir ve bu durumda kutuplanmaya neden olur. Elektrik alanın iletilmesinin istendiği durumda iletken kullanılırken akımı sınırlamak, kaçak akımları ve gürültü gibi elektronikte istenmeyen diş etkileri engellemek için dielektrik malzemeler yaygın olarak kullanılır.

Atom ve moleküllerin yük merkezleri dielektrik malzemeler için eş merkezlidir ve serbest yük neredeyse yoktur. Fakat elektrik alan altında bu merkezlerde pozitif ve negatif yükler elektrik alan etkisi ile konum değişikliği yaparlar. Bu konum değişikliği kutuplanmayı meydana getirir. Bu durumda yükler arasında dipol moment meydana gelir. Bu durum elektrik alan varlığında gerçekleşir. Elektrik alan etkisinden çıkan malzemedeki yükler tekrar eş merkezli yerlerini alırlar. Dipol moment ortadan kaybolur.

5.2. Dielektriksiz ve Dielektrikli Paralel Plakalı Kapasitör

Aralarındaki mesafe (d) ve yüzey alanları (A) olan iki paralel levha bir araya geldiğinde boş bir paralel plakalı kapasitör oluşur (Şekil 5.1).



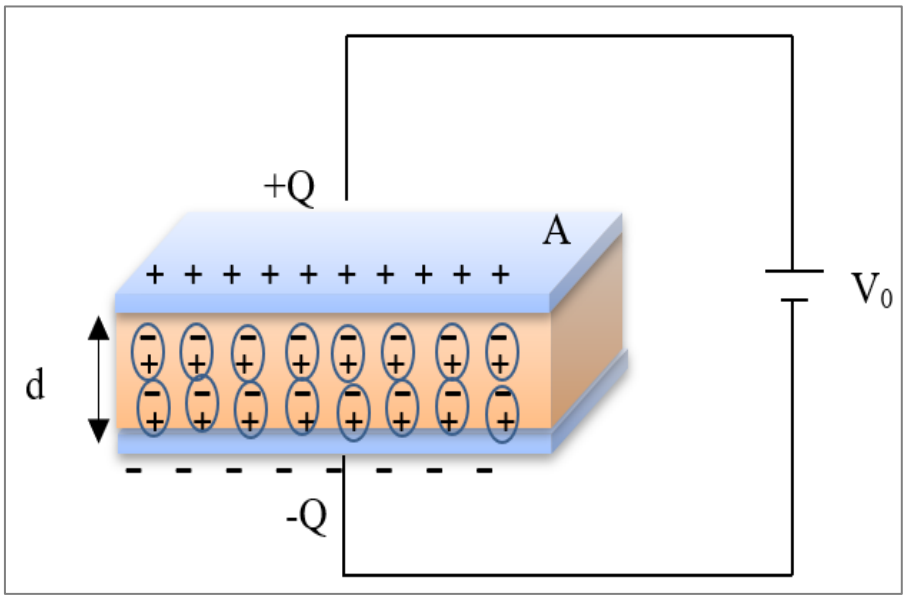
Şekil 5.1. Boş paralel plakalı kondansatör

Levhalar Şekil 5.1' de olduğu gibi doğru akım (dc) voltajı uygulandığı zaman levhalar voltaj kulbu ile aynı yönlü olacak şekilde bir Q yükü ile dolmuş olur. Birim yüzeydeki yük miktarı σ (σ = Q/A), boşluğun elektriksel geçirgenliği ε_0 (ε_0=8,85x10^{-14} F/cm) olmak üzere; levhalar arasındaki elektrik alan $E_0=\sigma/\varepsilon_0$ ile verilir. Levhalar arasındaki potansiyel fark ise $V_0= E_0 d = \sigma d/\varepsilon_0$ ile ifade edilir. Dielektrik yokken kapasitör için sığa ifadesi,

$$C_0 = \frac{Q}{V_0} = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \tag{5.1}$$

şeklindedir. Ayrıca σ yüzey yük yoğunluğu, plakalar arasındaki bölgede elektrik yerdeğiştirme kaynağı olarak düşünülebilir. Buna göre elektrik yerdeğiştirme $D=\sigma= \varepsilon_0 E_0$ ile ifade edilir.

Kondansatör levhaları arasındaki boşluğa dielektrik malzeme yerleştirildiğinde (Şekil 5.2) kondansatörün sığası, dielektirik malzemenin ε′ (>1) dielektrik sabiti çarpanı kadar artış gösterir (Eş. 5.2). Bu ε′ çarpanına yalıtkanın dielektrik sabiti denir. Aynı şekilde levhalar arasındaki potansiyel fark da bu çarpan kadar azalmış olur ($V=V_0/\varepsilon'$) ve buna bağlı olarak da $E=E_0/\varepsilon'$ olur.



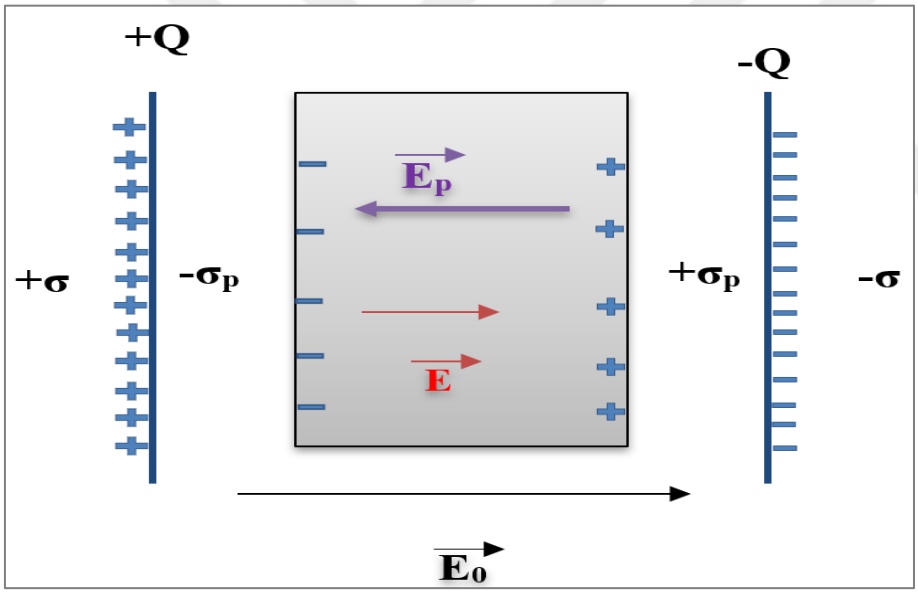
Şekil 5.2. Dielektrik malzemeli paralel plakalı kondansatör

Dielektrik malzeme varken kondansatörün kapasitansı Eş. 5.2 ile verilir [78,79].

$$C = \varepsilon' C_0 = \frac{\varepsilon\, \varepsilon_0 A}{d} \tag{5.2}$$

5.3. Dielektrik Kutuplanma (Polarizasyon)

Dielektrik malzeme kondansatör plakaların arasına konulduğunda potansiyel farkın azalmasına dolayısıyla elektrik alan şiddetinin azalmasına neden olur. Buna bağlı olarak birim yüzeydeki net yükün miktarı da azalır. Bu da ancak, dielektriğin levhalara bakan yüzeylerinde zıt işaretli yüklerin oluşmasıyla mümkündür. Elektrik alan içine dielektrik malzeme konulduğunda elektronlar atomun çekirdeğinden küçük bir yerdeğiştirme yaparlar. Böylece atomlar çok küçük atomik boyutlarda kutuplanarak dipolar hale gelirler. Elektrik alan kaldırıldığında atomlar tekrar normal hallerine dönerler ve dipoller kaybolur.



Şekil 5.3. Dielektrik malzeme bulunan paralel plakalı kapasitörün kutuplanması

Şekil 5.3'de elektrik alan (E_0) içinde bulunan dielektirik maddenin moleküllerinde, pozitif yükleri alan yönünde, negatif yükler ise alanın tersine doğru yönlendirir. Böylece nötr madde bile polarize olur ve negatif yükler sol yüzeyde, pozitif yükler sağ yüzeyde birikir. Dielektrik madde nötr olduğundan dolayı pozitif yüzeyde oluşan yük miktarı ile negatif yüzeyde oluşan yük miktarı birbirine eşittir.

$\overrightarrow{E_0}$, dielektrik madde yokken oluşan elektrik alan şiddeti ve $\overrightarrow{E_p}$ ise polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği alanın şiddeti olarak gösterilirse. Bileşke alan ($\vec{E}$)

$$\vec{E} = \overrightarrow{E_0} + \overrightarrow{E_p} \tag{5.3}$$

bunların nicel olarak bileşke elektrik alanı E ($E=E_0-E_p$), E_0 dielektrik malzeme yokken oluşan elektrik alan ile polarize yüklerden dolayı oluşan elektrik alan (E_p) arasındaki farka eşittir. Kutuplanmayı önlemeye çalışan alan E_p olarak adlandırılır ve bileşke elektrik alan (E) ise daima E_0 doğrultusundadır. Kondansatör levhalar üzerinde oluşan serbest yük yoğunluğu (σ) ile levhalara karşı olan dielektrik yüzeylerde meydana gelen kutuplanma yük yoğunluğu (σ_p) arasındaki fark net yük yoğunluğunu ($\sigma-\sigma_p$) verir (Şekil 5.3). Eş. 5.4'de σ serbest yük yoğunluğu E_0 elektrik alanına,

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \tag{5.4}$$

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

$$E_P = \frac{\sigma_P}{\varepsilon_0} \tag{5.5}$$

bağıntısı ile bağlıdır. Dolayısıyla dielektrik içindeki alan yani bileşke alan şu şekilde yazılır.

$$E = E_0 - E_P = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} - \frac{\sigma_P}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma - \sigma_P}{\varepsilon_0} \tag{5.6}$$

Dielektrik bir madde paralel levhalar arasına konulduğunda, potansiyel farkı ile elektrik alanın şiddeti,

$$V = \frac{V_0}{\varepsilon'}, \qquad E = \frac{E_0}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\varepsilon'\varepsilon_0} \tag{5.7}$$

ile verilir. Eş. 5.6 ile verilen elektrik alan ile Eş. 5.7' de verilen elektrik alan eşitlenirse,

$$\frac{\sigma}{\varepsilon'\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} - \frac{\upsilon_p}{\varepsilon_0} \tag{5.8}$$

Bu denklemden

$$\sigma_p = \sigma(1 - \frac{1}{\varepsilon'}) \tag{5.9}$$

elde edilir. $E_0 > E_p$ olduğunda dielektrik üzerinde σ_p kutuplanma yük yoğunluğu, kondansatörün plakaları üzerindeki σ serbest yük yoğunluğundan küçüktür ($\sigma_p < \sigma$). Dielektrik malzeme olmadığında $\sigma_p = 0$ olduğu için $\varepsilon' = 1$'dir. Dielektrik malzeme yerine iletken bir malzeme yerleştirildiğinde $E = 0$'dır, bu durumda $E_0 = E_p$ yani $\sigma_p = \sigma$ olmasına neden olur. Yani plakalar üzerinde oluşan yük, dilektrikte kutuplanan yüke eşit ve zıt işaretli olması nedeniyle yarıiletkende oluşan bileşke elektrik alanın sıfırdır. Dielektriğin her noktasında oluşan P kutuplanma, bileşke E alanı ile aynı yönde ve doğru orantılıdır. Bu özelliklerin lineer ve homojen dielektrikler için kutuplanma,

$$\mathrm{P} = \varepsilon_0 \chi \mathrm{E} \tag{5.10}$$

ile ifade edilir. Burada $\mathcal{X}$ dielektriğin elektrik alınganlığıdır; boşluk için polarize olacak madde olmadığı için $\mathcal{X} = 0$ ve dielektrik malzemeler için;

$$\mathcal{X} = \varepsilon' - 1 \tag{5.11}$$

şeklindedir. Kutuplanma etkisi, iletkende olduğu gibi dielektrik yüzeyde bulunan yükler serbest hareket edemedikleri için bu etki elektriksel yerdeğiştirme ile anlaşılır. D elektrik yerdeğiştirme (akı) yoğunluğu polarize dielektrik için dielektrik içindeki elektrik alanla orantılıdır. D elektrik yerdeğiştirme,

$$\mathrm{D} = \varepsilon_0 \mathrm{E} + \mathrm{P} \tag{5.12}$$

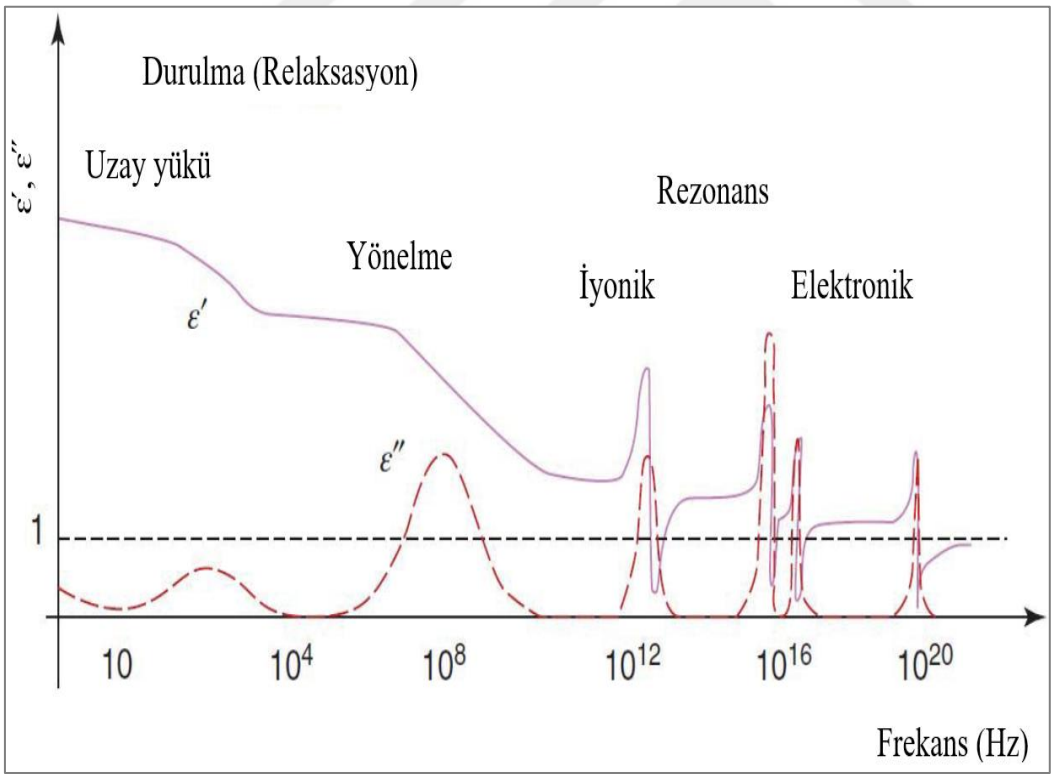
ifadesi ile verilir. Eşitlikler yerine konursa,

$$\mathrm{D} = \varepsilon_0 \mathrm{E} + \varepsilon_0 \mathcal{X} \mathrm{E} = \varepsilon' \varepsilon_0 \mathrm{E} \tag{5.13}$$

olarak elde edilir [78, 79].

5.4. Kutuplanma Mekanizmaları

Dielektrik malzemelerde kutuplanma mekanizması elektronik, atomik (iyonik), yönelimli ve arayüzey (uzay) yük kutuplanması olarak dörde ayrılır (Şekil 5.4). Bu kutuplanma mekanizmalarının herbiri karakteristik bir rezonans ve durulma frekansına sahiptir. Rezonans olayı dipolün dönme frekansı uygulanan alternatif alanın frekansına eşit olduğunda meydana gelir. Durulma (relaksasyon) ise, dipolün dönme frekansı uygulanan alternatif alanın frekansının gerisinde kaldığında meydana gelir. Geride kalmasının sebebi dipolün sürtünmeli ortamda bulunması dönmesinde sönüm meydana getirir. Genellikle elektronik ve atomik kutuplanmada rezonans etkisi görülürken, yönelimli ve arayüzey (uzay) yük kutuplanmasında ise durulma (relaksasyon) görülür. Şekil 5.4'de farklı frekans bölgelerinde kutuplanma türleri eşleştirilmiştir. Şekil 5.4'de uygulanan alternatif alan frekansına bağlı olarak dielektrik kutuplanma mekanizmalarının değişimi gösterilmiştir [80, 81].

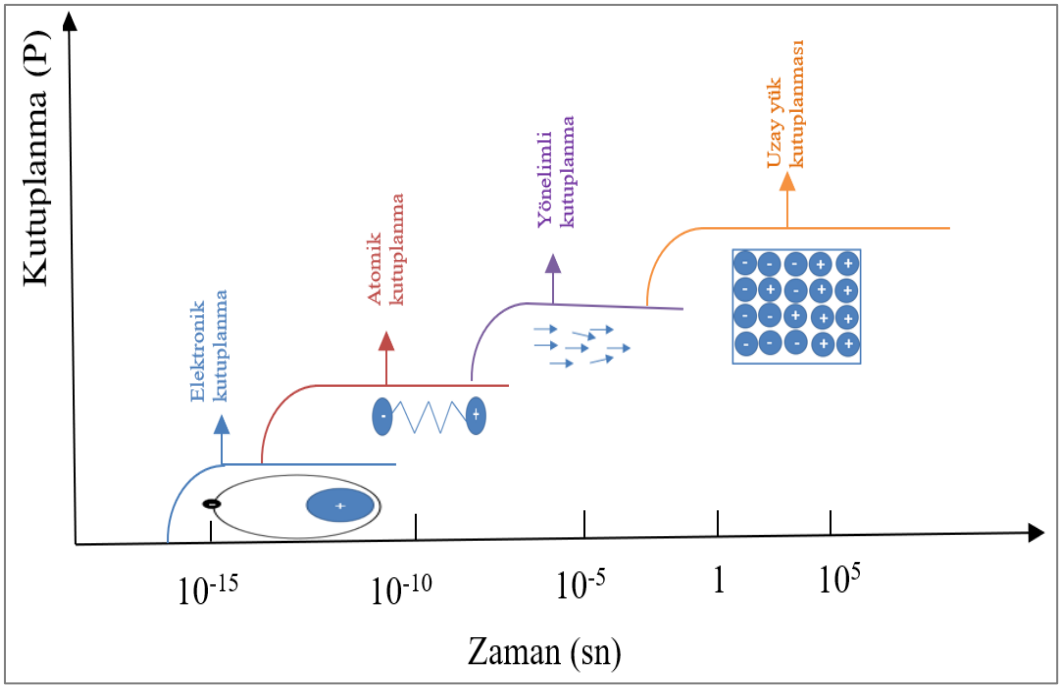


Şekil 5.4. Dielektrik kutuplanmanın frekansa bağlılığı

Bir dielektrik malzemenin toplam kutuplanabilirliği α ifade edilir; bu değer, dört ayrı mekanizmasının kutuplanabilirliklerinin toplamına karşılık gelir [82].

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_o + \alpha_d \quad (5.14)$$

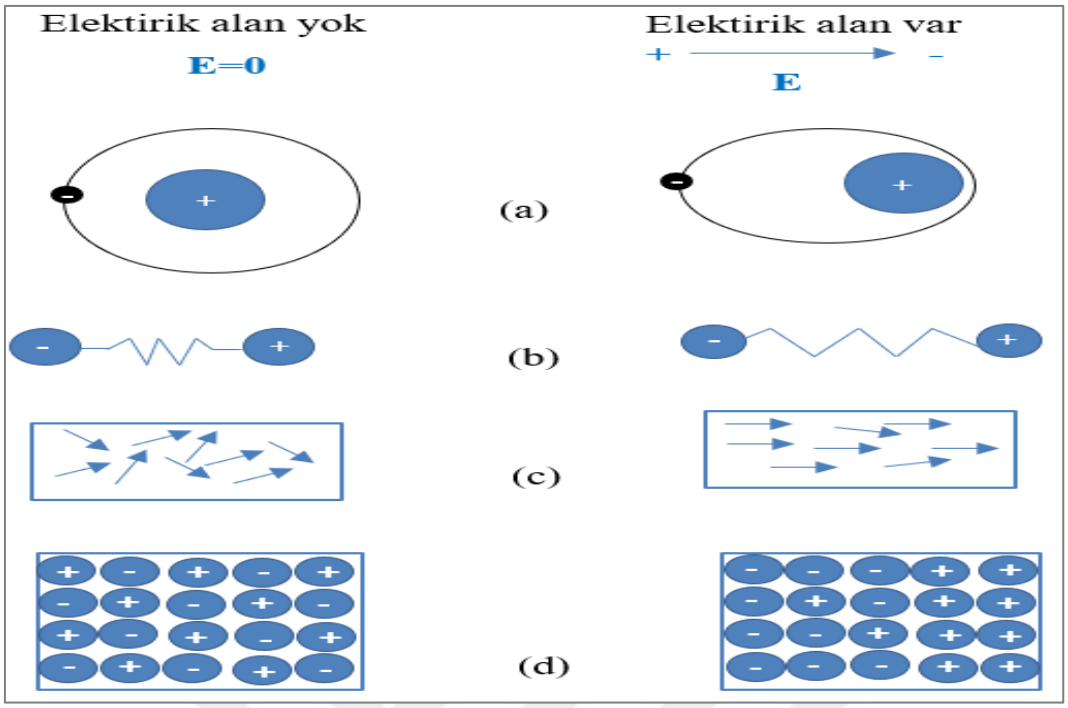
Buradaki α_e, α_i, α_o ve α_d değerleri elektronik, atomik, yönelimli ve arayüzey (uzay yük) kutuplanmalarının kutuplanabilirliğini sırasıyla ifade eder. Şekil 5.5'de dielektrik kutuplanmanın dış elektrik alan etkisiyle zamanla nasıl değiştiği verilmiştir.



Şekil 5.5. Dielektrik kutuplanmanın dış elektrik alan etkisiyle zamana bağlı değişimi

5.4.1. Elektronik kutuplanma

Elektronik kutuplanma durumunda proton (+) ve elektronların (-) yük merkezleri çakışıken elektrik alan etkisi ile atom çekirdeği alan doğrultusunda, elektronlar ise ters doğrultuda yer değiştirme yapar. Yani dış elektrik alanın etkisiyle çekirdeğin yük merkezi elektronların negatif yük merkezine göre atomik ölçüde kayması nedeniyle atomun simetrisi bozulur ve dielektrik içinde elektronik kutuplanma oluşur (Şekil 5.6.a). Küçük kütleye sahip olan elektronlar elektrik alana ve yüksek frekansa daha kolay tepki verir. Bu kutuplanma mekanizması morötesi/görünür bölge (10^{15} Hz) yüksek frekansında elektrik alan frekansı ile rezonansa girer, kutuplanma etkisi oldukça azdır ve kısa süreli olarak ortaya çıkar. Dielektriklerde görülen elektronik kutuplanma, tüm atom ve iyonlarda meydana gelir.



Şekil 5.6. (a) Elektronik kutuplanma, (b) iyonik kutuplanma, (c) yönelimsel kutuplanma ve (d) uzay- yük kutuplanması olmak üzere kutuplanma türleri ve elektrik alan tepkileri

5.4.2. Atomik (iyonik) kutuplanma

Elektrik alan altında iyonik bağlı malzemelerde, komşu pozitif ve negatif iyonları zıt yönlerde hareket ettirerek bağlarda gerilme oluşturur. Böylece malzemede etkileşmeli çift-kutup moment meydana gelir (Şekil 5.6.b). Elektronik ve iyonik kutuplanmada kutuplanma, yüklerin alan yönünde birbirlerine göre konum değiştirmesiyle oluşur. Burada daha büyük kütleli birimlerin yer değiştirmesi söz konusu olduğu için burada frekans tepkisi elektronik kutuplanmaya göre daha düşüktür. Kırmızı ötesi ve ona yakın frekanslarda (~10^{12}-10^{13} Hz) atomik kutuplanma gerçekleşir.

5.4.3. Yönelimli (dipolar) kutuplanma

Dış elektrik alan olmadığında rasgele yönelmiş net ve kalıcı dipol momente sahip yani elektrik çift-kutup momentleri içeren polar dielektrik maddelerde yönelimli kutuplanma meydana gelir. Uygulanan elektrik alanın dipoller momentlerine tork uygulayarak onların alan yönünde yönelmeye zorlar. Bu kutuplanma şekli, yönelimli (dipolar) kutuplanma olarak ifade edilir (Şekil 5.6.c). Yönelimli kutuplanma radyo frekans bölgesinde (~10^{3}-10^{9} Hz) gerçekleşir.

5.4.4. Arayüzey (uzay) yük kutuplanma

En yavaş gerçekleşen süreç olan uzay-yük kutuplanması iyonların birçok atomik mesafeyi katetmesiyle oluşan kutuplanmadır (Şekil 5.6.d). Bu mekanizmanın frekans tepkisi yüklerin boşluklardan atlayabilme kapasitesine bağlıdır. Genellikle kHz mertebesindeki frekanslarda tepki verir [83]. Elektronik, atomik ve yönelimli kutuplanma, homojen maddelerde atom veya moleküle bağlı yerel yüklerin hareketiyle meydana gelir. Genellikle yapısal düzensizliklerin ve tuzakların bulunduğu heterojen, amorf veya polikristal malzemelerde gözlenir. Malzeme üzerine düşük frekanslı bir elektrik alan uygulanırsa, malzeme içindeki yük taşıyıcıları (elektronlar, deşikler veya iyonlar) belirli bir mesafeye kadar hareket edebilir. Bazı yük taşıyıcıları ise malzemenin içinde tuzaklanabilir. Uzay yükleri de yük taşıyıcılarının kontaklarda serbest deşarj olamadığından/yerdeğiştiremediğinden hareketleri engellendiğine oluşur. Arayüzeyde yüklerin birikmesiyle oluşan kutuplanma mekanizmasına arayüzey (uzay) yük kutuplanması denir. Malzemedeki kutuplanma bu dört ayrı mekanizmanın toplamı şeklinde verilir.

5.5. Dielektrik Durulma (Relaksasyon)

Elektrik alan etkisi altında dielektrik malzemede zamana bağlı olarak elektriksel yerdeğiştirme (D) ve elektrik alan (E) değişir. Sürekli dipol momente sahip malzemelerde D vektörünün zamana bağlı değişimi dipol durulmayı oluşturur.

Malzemedeki dipollerin harakete geçmeden önceki statik elektriksel kuvvet, elektrik alan ile dipollerin aynı yönde yönelmelerini veya muvcut durumlarını korumasını sağlar. Elektrik alan çizgileriyle aynı yönde olmalarına rağmen statik durumda mevcut yönelimlerini değiştirmemeleri, vektörler arasındaki faz farkından kaynaklanmıştır. Homojen, değişme göstermeyen (statik) ve lineer dielektrik malzemelerde E ve D arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir;

$$D = \varepsilon E \tag{5.15}$$

ε, gerçel bir sayı olup zamana bağlı değildir. Belirli bir değişmeyen (statik) elektrik alan altında kalan dielektrikte yer değiştirmenin zamandan bağımsız olduğu görülmüştür. Normal durumda gerçekleşir. Bu durumda ε_{st} zamandan bağımsız dielektrik geçirgenlik olmak üzere;

$$D = \varepsilon_{st} E \tag{5.16}$$

Değişken bir elektrik alan altında ise yer değiştirme, zamana bağlı elektrik alandaki değişime ayak uydurmaya çalışır. Δt süreli ve ΔE büyüklüğündeki elektrik alan değişimleri dielektrik malzemeye için ΔD kadar elektriksel yer değiştirmeye yol açar. Bu artış;

$$\Delta D = \varepsilon_{\infty} \Delta E \tag{5.17}$$

ile hesaplanır. Burada ε_{∞}, dielektrik malzemedeki sürekli dipollerin harekette geçmeden önce ΔD ve ΔE'deki anlık değişimlere karşı gösterdiği geçirgenliktir. Dipol yönelim açısal frekansı (ω) değeri ile periyodik şekilde elektrik alanın uygulanması sonucunda meydana gelir. Dipollerin yönelimindeki değişim, periyodik şekilde uygulanan elektrik alan ile sağlanır. Değişken elektrik alan etkisine giren dielektrik malzemede dipol yönelimleri bu periyodik harekete uymaya çalışır. Bu elektrik alan;

$$E = E_i \, e^{j\omega t} \tag{5.18}$$

ile verilir. Elektriksel yerdeğiştirme (D) ise elektrik alanı ile uyum içinde olmaya çalışır. Bu nedenle oluşan aradaki faz farkı faz kaymasıyla açıklanır. Bu elektrik alana maruz kalan dielektrik dipolleri ile elektrik alan arasında bir faz farkı oluşması olasıdır. Bu bağlamda dielektrik sabitinin bu faza uyum sağlayan ve sağlayamayan iki bileşeni bulunmaktadır. Bu da aşağıdaki şekilde verilir [84];

$$D = \varepsilon^* E = (\varepsilon' - j\varepsilon'')E \tag{5.19}$$

Burada, Yer değiştirmenin gerçel ve sanal kısımları sırasıyla ε', ε" ile gösterilir. Kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti;

$$\varepsilon^* = \left[\varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{st} - \varepsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2}\right] + j\left[\frac{\omega\tau(\varepsilon_{st} - \varepsilon_{\infty})}{1 + (\omega\tau)^2}\right] \tag{5.20}$$

ile verilir [84]. Burada τ, durulma zamanıdır ve numuneye özgü değerdir. τ sıcaklığa bağlı iken ω sıcaklıktan bağımsız bir değişekdir. Eş.5.20'deki denklemi E ile çarpıldığında, ilk

terim olan gerçel kısım E ile aynı fazda olan D bileşenini, İkinci terim ise E ile aynı fazda olmayan ve D bileşeni ile 90° faz farkı gösteren sanal kısmı verir.

Kompleks dielektrik sabitinin gerçel ve sanal bileşenleri aynı fazda olan ve olmayan bileşenleri;

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \tag{5.21}$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega\tau(\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty)}{1 + (\omega\tau)^2} \tag{5.22}$$

ile ifade edilir [85]. Yukardaki denklemler yeniden düzenlendiğinde;

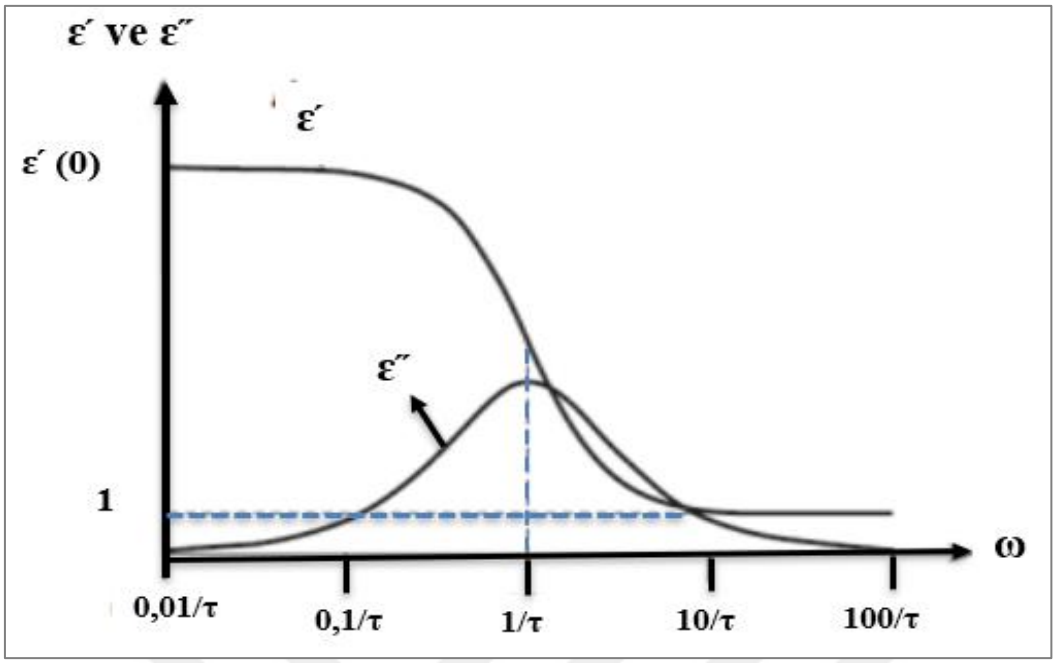
$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty} = \left(\frac{1}{1 + \omega^2\tau^2}\right) \tag{5.23}$$

$$\frac{\varepsilon''}{\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty} = \left(\frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}\right) \tag{5.24}$$

eşitlik [85] bu durumu ifade eder. Eş. 5.24' ün sağı, frekans sıfırdan başlayıp sonsuza gittiğinde sıfıra yaklaşır. Şekil 5.7'de dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişimi verilmektedir [86]. Şekil 5.7'de $\omega << 1/\tau$ küçük frekans değerinde gerçel bileşen, orta frekans değerinde ise farklı fazlar birbirine geçer ve $\omega = 1/\tau$ olduğunda dielektriğin sanal bileşeni belli bir maksimumu değeri alır, buna Debye kayıp piki denilir. δ dielektrik malzemede, alternatif gerilim nedeniyle düzenli elektriksel alan çizgileri ve farklı fazdaki elektriksel değişim arasındaki faz değişimidir. *Tanδ* ise, numunede depo edilen enerjinin bir peryot boyunca kaybedilen miktarını ifade eden sığasal bir terimdir. Dielektrik malzemenin iletkenliği arttığı zaman, kayıp akımın artması nedeniyle kayıp açısı da büyümektedir. Bu büyüklük;

$$tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{\varepsilon_{st} + \varepsilon_\infty(\omega\tau)^2} \tag{5.25}$$

ifadesi ile verilir [84, 85].



Şekil 5.7. Dielektrik sabitinin gerçel (ε') ve sanal (ε") bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi

5.6. Dielektrik Sabiti ve Dielektrik Kayıp Ölçüm Tekniği

Dielektrik malzemelerin dış elektriksel alanla uyumlu elektriksel karakteristiklerinin analiz edilmesi önemlidir. Plakalar arasındaki boşluk dielektrik malzeme ile doldurulan kondansatörler, admittans yöntemiyle analiz edilir. Böylece admitans (*Y*);

$$Y = G + j\omega C = G + j\omega\varepsilon^{*}C_0 \tag{5.26}$$

ile verilir. Kompleks dielektrik sabiti ($\varepsilon^{*}=\varepsilon'-j\varepsilon''$) ifadesi admitans ifadesinde yerine konulduğunda;

$$\mathrm{Y} = (\mathrm{G} + \omega\varepsilon''\mathrm{C}_0) + \mathrm{j}\omega\varepsilon'\mathrm{C}_0 \tag{5.27}$$

eşitliği çıkar. Burada admitans ifadesinin sanal ve gerçel bileşenleri oluşmuştur. Empedans, admitansın tersi (Z=1/Y) olup,

$$Z = \frac{1}{G + j\omega C} = \frac{1}{G + j\omega C_0\varepsilon^{*}} \tag{5.28}$$

bulunur. Bu denklemden admitansın reel ve sanal bileşenleri,

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \tag{5.29}$$

$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{G\,d}{\omega \varepsilon_0 A} = \frac{1}{\omega R C_0} \tag{5.30}$$

elde edilir [79].

Mc Crum, Read ve Williams elektrik modülüsü tanımlamışlardır. Söz konusu modülüs tanımı ise, küçük frekans değerlerinde iletkenliğin ve geçirgenliğin büyük değişimlerini aza indirilmesidir. Elektrik modülüs (M*), aşağıdaki denklem ile tanımlanır [81, 85, 87].

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \tag{5.31}$$

bu eşitliğin sol tarafı M' ile gösterilen elektrik modülüsünün gerçek kısmını, sağ tarafı ise M'' ile gösterilen sanal kısmını verir.

Ayrıca alternatif akım iletkenliği, σ_{ac};

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan\delta \left(\frac{d}{A}\right) = \varepsilon_0 \varepsilon'' \omega \tag{5.23}$$

eşitliği ile verilir.

5.7. Dielektrik Malzemelerin Sınıflandırması

Dielektrik malzemeler özelliklerine göre apolar, polar ve dipolar olarak üç gruba ayrılır [14, 61, 88]. Bunlar,

a. *Apolar Dielektrikler:* Dış elektrik alan yokken, kalıcı dipol momenti oluşturmayan dielektrik malzemelere apolar dielektrikler denir. Bu tür moleküllerde pozitif ve negatif yük merkezleri çakışır ve moleküller simetrik bir yapıya sahiptir. Tek tip atomdan oluşan silikon (Si), elmas (C), katı, sıvı ve gaz fazdaki asal elementlerdir.

Ayrıca polarizasyon vektörü ve toplam dipol moment elektrik alan olmadığında sıfır olur. Apolar moleküller kutuplandığında, yüklerin yer değiştirmesini dengelemeye yönelik geri çağırıcı kuvvet ortaya çıkar. Dış elektrik alan, yüklere kuvvet uygulayarak geri çağırıcı kuvvetler ile denge sağlanana kadar yüklerin ayrılmasına neden olur. Geri çağırıcı kuvvetlerin moleküller arasında farklı olması nedeniyle, yüklerin yer değiştirme miktarı değişkenlik gösterir. Alan şiddeti yükseldikçe, moleküllerin yönelme derecesi artar.

Eğer dielektrik moleküller kalıcı dipol momentine sahip değilse, uygulanan elektrik alan etkisiyle yalnızca küçük bir yük ayrışması meydana gelir. Dış alanın bir kısmı bu etki nedeniyle zayıflar. Apolar malzemelerde elektrik alan valans elektron bulutlarının elastik yer değiştirmesini sağlar ve yalnızca elektronik kutuplanma meydana gelir.

Apolar malzemelerde rezonans frekansında soğurma görülür; bu rezonans aralığı, görünür bölgeden morötesine kadar uzanır. Rezonans frekansından altındaki frekanslarda ise, dielektrik sabiti frekansla değişmez ve malzemenin dielektrik sabiti değerini alır

b. Polar Dielektrikler: Dış elektrik alan olmadığında rastgele yönelmiş ve kalıcı dipol momenti oluşturan asimetrik moleküllerden oluşmuş dielektriklere (örneğin N_2O ve H_2O) polar dielektrikler denir. Bu moleküllerde pozitif ve negatif yük merkezleri çakışık değildir. Uygulanan elektrik alan, iyonlar ve valans elektron bulutlarının konumlarının küçük elastik yerdeğişmesine neden olur. Yani, elektrik alan nedeniyle iyonlar birbirine göre konumlarını değişmesinden dolayı elektronik ve iyonik kutuplanma meydana gelir. Bu malzemelere iyonik kristaller, bazı oksitler, parafinler, benzen ve karbon tetraklorür gibi yapılar örnek olarak verilebilir. Ayrıca, bu malzemelerde soğurma optik ve daha küçük rezonans frekanslarında yani kızılötesi bölgesinde meydana gelir. Elektronik kutuplanma optik frekans bölgesinde, iyonik kutuplanma kızılötesi bölgesine oluşur.

c. Dipolar Dielektrikler: Dielektrikte kalıcı dipol momentine sahip moleküllere denir. Dış elektrik alan dielektrik malzemelerde yönelimli kutuplanma nedeniyle kalıcı dipollerin uzaysal yönelimine neden olurlar. Bu durum gazlarda, sıvılarda ve belirli sıcaklıklardaki bazı katılarda (ör. katı HCl, H_2SO_4 gibi) kalıcı dipol momenti oluşur. Elektronik, iyonik ve yönelimli kutuplanma mekanizması dipolar malzemelerde görülür.

6. DENEYSEL YÖNTEM

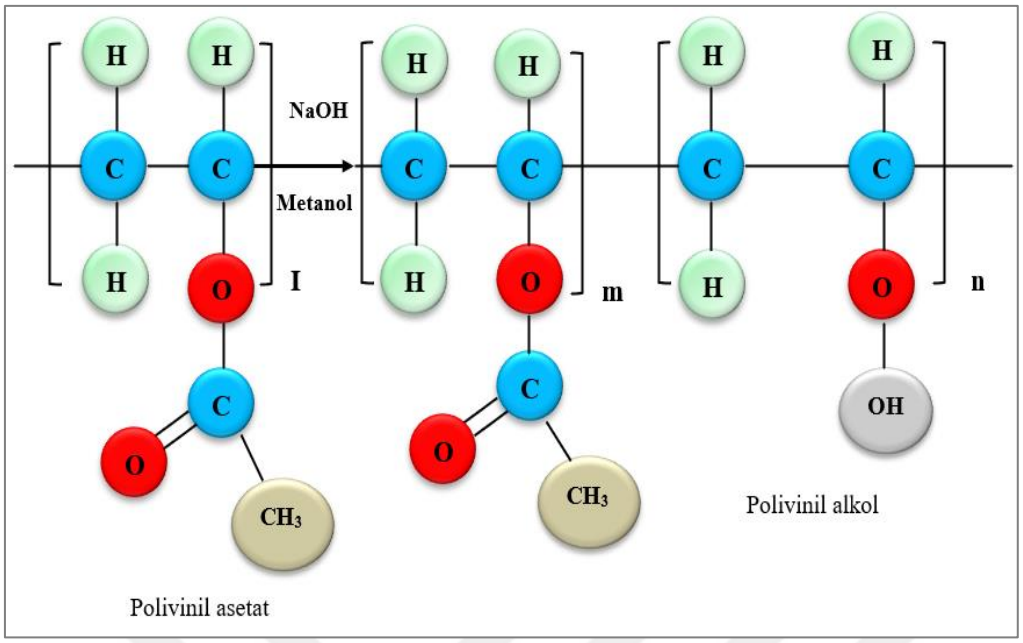
6.1. Giriş

MIS tipi diyotlarda yarıiletken malzemenin yüzey temizliği, arayüzey malzemesinin homojenlığı, tabaka kalınlığı ve türü, dielektrik sabiti ile malzemenin ucuz ve kolay üretilebilir olması cihaz performansı açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel olarak arayüzey tabakası olarak silisyumdioksit (SiO_2) kullanılırken, son zamanlarda yarıkristalin (amorf) yapıya sahip polimer malzemeler de tercih edilmeye başlanmıştır. Polimerlerin iletkenlikleri ve dielektrik sabitleri düşük olmakla birlikte, yalıtkan özellik gösteren bu malzemelere bizmut (Bi), kobalt (Co), çinko (Zn), nikel (Ni) veya grafen (Gr) gibi iletken katkı maddeleri eklenerek hem iletkenlik hem de dielektrik sabiti artırılabilmektedir [89-93]. Yarıiletken yapılar üzerinde kondansatör üretimi için yüksek dielektrik sabitine sahip malzemler tercih edilmekte; bu kapsamda ultra/süper kapasitörler üreteminde TiO_2, Si_3N_4, $Bi_3Ti_4O_{12}$ gibi ferrro-elektrik malzemeler ile grafen ve grafen oksit (GO) gibi katkılar kullanılmaktadır. Polimerlerin arayüzey malzemesi olarak kullanılmı, üretim kolaylığı ve düşük maliyet avantajı sayesinde elektriksel ve dielektrik özelliklerin araştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasında Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların (SDs) hazırlanmasında; PVA arayüzey malzemesi, Grafen (Gr) katkı malzemesi, altın (Au) metal ve n-Si yarıiletken malzemesi olarak kullanılmıştır. Aşağıda bu malzemelerin özelliklerinden bahsedilmektedir.

6.1.1. Polivinil Alkolün (PVA) temel özellikleri

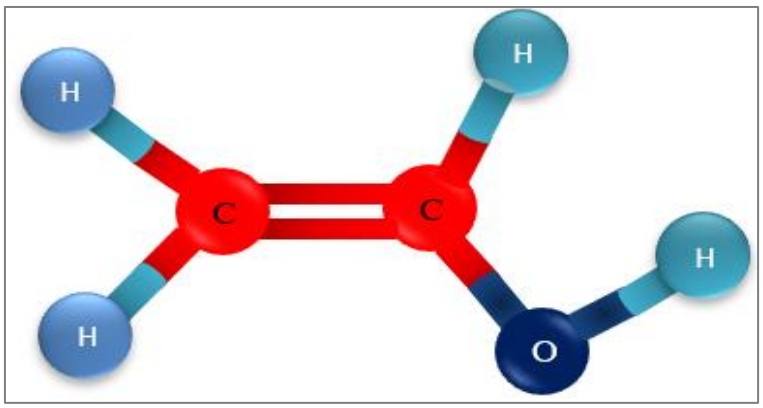
Polivinil alkol (PVA), genellikle polivinil asetatın hidroliz edilmesiyle sentezlenen, yarı kristal yapıya sahip ve suda çözünebilen bir polimerdir. Moleküler yapısında çoğunlukla, 1,3-diol [$-CH_2–CH(OH)–CH_2–CH(OH)–$] zincirleri yer almakla birlikte, yapıda az oranda1,2-diol [$-CH_2–CH(OH)–CH(OH)–CH_2–$] zincirleri de bulunur. Polivinil asetatın alkol (metanol) içerisinde çözündürülmesi ve alkalin katalizör (sodyum hidroksit-NaOH) ile işlenmesiyle PVA elde edilir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Polivinil alkolün yapı formülü

Vinil asetatın zincir uzunluğu ve hidroliz derecesi değiştirildiğinde, asidik veya bazik koşullar altında farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösteren PVA'lar üretilir. Esneklik, gerilme mukavemeti, dispersiyon gücü, yapışkanlık ve çözünürlük gibi özellikler örnek olarak verilebilir [94, 95].

Polivinil alkol (PVA) suda çözünebilen, yapısında hidroksil (OH^-) grupları içeren, hidrojen bağları açısından zengin ve yarıkristal yapıda polimerdir. PVA'nın kimyasal ve fiziksel dayanıklılığı nedeniyle araştırmacılar tarafından özellikleri kapsamlı biçimde incelenmış ve pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [96, 97, 29]. Şekil 6.2, PVA'nın kimyasal yapısını göstermektedir.



Şekil 6.2. Polivinil alkolün kimyasal yapısı

PVA kokusuz, toksik olmayan, yağlara ve çözücülere karşı dayanıklı bir polimer olup, mükemmel film oluşturma ve yapışkanlık özelliklerine sahiptir. Ayrıca PVA'nın suda çözünürlüğü, gerilme mukavemeti, oksijen bariyer özellikleri ve termoplastik davranışı gibi fiziksel özellikleri kristalleşme kabiliyetiyle doğrudan ilişkilidir ve bu özellikler kristalizasyon derecesinin kontrolüyle ayarlanabilir. Tamamen hidrolize edilmiş ve yüksek molekül ağırlığına sahip PVA'nın erime noktası yaklaşık 230 ^{o}C, camsı geçiş sıcaklığı 85 ^{o}C olarak belirlenmiştir.

Farklı elektriksel iletkenlik derecesine sahip polimer kompozitler; kapasitörler, sensörler, mikrodalga emici, iletken kaplamalar ve elektromanyetik girişim koruyucu malzemeler gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. PVA yüksek dielektrik geçirgenlik değerine sahip olması nedeniyle arayüzey yalıtkan tabaka olarak kullanılan organik bir malzemedir. PVA, polimerler içinde büyük ölçekli elektronik ve optoelektronik uygulamalar için en uygun malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir [98].

Zayıf elektriksel iletkenliğe sahip bir polimer olan PVA'nın, iletkenliğinin artırılabilmesi için yapısına iletken katkı maddelerinin eklenmesi gerekmektedir. Katkılama işlemi polimerin, mikroyapısal özelliklerinide ve moleküler yapısında değişimlere yol açar. Bu durum, PVA'nın elektrik ve dielektrik özelliklerinde de belirgin farklılıklar oluşturur. Ayrıca PVA'nın bu özellikleri yalnızca katkı maddesinin kimyasal yapısı ve karakteristiğine değil aynı zamanda katkı oranı ve uygulanan işlem parametrelerinden de etkilenmektedir. Örneğin PVA'ya $CoCl_2$, $CuCl_2$ ve $FeCl_3$ gibi metal tuzların katkılanması, bu polimerin kızıl ötesi absopsiyon bantlarında yoğunluk değişikliği meydana getirdiği ve filmlerin elektriksel iletkenliğinde 100 kat artış olduğu görülmektedir [98]. Çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO_2) ve bizmut oksit (Bi_2O_3) gibi metal oksitlerin PVA'ya eklenmesi sonucunda elektronik, optik ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği ile ilgili araştırmalar yapılmıştır [99-102]. Ayrıca PVA'nın elektriksel iletkenliği, nikel (Ni), çinko (Zn) ve grafen gibi yüksek iletkenlik gösteren malzemelerin katkılanması sonucunda artırılabilir. Bu katkılama işlemi, PVA zincirlerinin hareketliliğini etkileyerek kristal yapıda ve çapraz bağ yoğunluğunda değişiklikler meydana getirir.

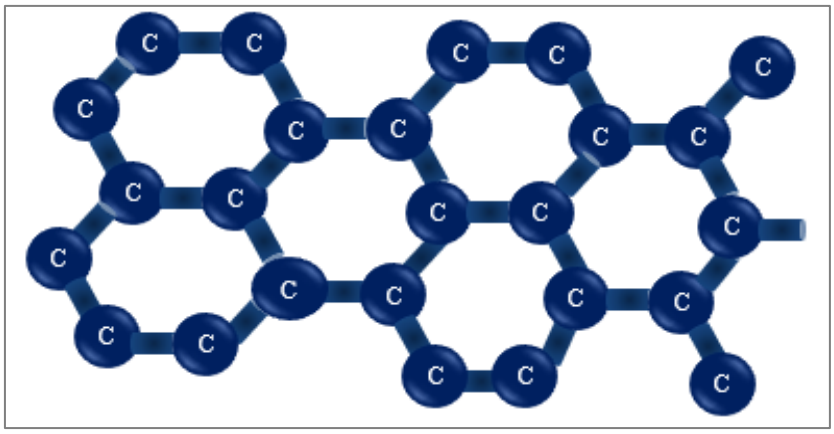
PVA bu özelliklerden dolayı bu tez çalışmasında arayüzey malzemesi olarak kullanılmıştır. Yalıtkan bir malzeme olan PVA'nın iletkenliğinin artırmak için Grafen (Gr) katkı malzemesi olarak seçilmiştir.

6.1.2. Grafenin (Gr) temel özellikleri

Grafen (Gr) grafitin tek katmanlı hali olduğu Andre Geim ve Konstantin Novoselov tarafından 2004 yılında keşfedildi. Bu keşif ile 2010 yılında Nobel Fizik Ödülünü kazandılar. Grafen, iki boyutlu bir malzeme olarak, grafit karbon nanotüp veya fullerene gibi karbon atomunun allotropları arasında yer alır. İki boyutlu yapısında çok sayıda karbon atomu barındıran grafenin karbon-karbon bağ uzunluğu 0,142 nm'dir ve karbon atomlarının petek örgü şeklinde düzenlenerek düzlemsel bir yapı oluşturur. Çok ince bir yapıya sahip olmasına rağmen, grafen kimyasal ve mekanik açıdan oldukça dayanıklıdır. Üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri sayesinde grafenin sadece elektronik uygulamalarda değil, aynı zamanda farklı bilim ve endüstri alanlarında da ilgi çekici bir malzem olarak öne çıkmaktadır [103]. Şekil 6.3'de grafene ait kimyasal yapıyı göstermektedir.

İki boyutlu yapısı ve sp^2 hibritleşmesi sayesinde grafen, yüksek spesifik yüzey alanı, mükemmel elektriksel iletkenlik ve üstün mekanik stabilite gibi özellikler sergiler; bu da onu çeşitli uygulamalarda umut vadeden bir malzeme haline getirmiştir. Ayrıca, grafenin rulo hâline getirilmiş yapısı karbon nanotüplerin temelini oluşturur.

Geçmişten günümüze kadar karbon nanotüplerin elektronik, sağlık ve diğer birçok alanda farklı şekillerde kullanımları araştırılmıştır. Grafende karbon nanotüplerin kullanıldığı tüm alanlara uyarlanabilir bir yapıya sahiptir. Nanotüpler üzerine yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler, grafen malzemesinin teknoloji alanındaki kullanımını her geçen gün artırmaktadır. Grafen kimyasal sensörler, nanokompozitler, elektronik ve optoelektronik aygıtlar ve enerji depolama sistemlerinde kullanılabilmektedir [104]. Ayrıca, elektrik iletimini çok küçük ölçeklerde dahi etkin bir şekilde sağlayabildiğinden, çok düşük miktarlarda kullanımıyla bile süper hızlı bilgisayarların, ultra/süper kapasitörlerin ve transistörlerin üretiminde önemli bir rol oynamaktadır [105-108].



Şekil 6.3. Grafenin kimyasal yapısı

Grafenin dikkat çekici özelliklerinden biri, oda sıcaklığında yaklaşık 250,000 cm^2/Vs değerine ulaşan elektron mobilitesi (hareketliliğidir) sayesinde olağanüstü elektriksel iletkenliğe sahip olmasını sağlar. [109, 110]. Polimer matrisine dahil edilen grafen, polivinil alkol (PVA) ve polivinil klorür (PVC) gibi düşük iletkenlikli polimerlerin zincirleri arasında yer alarak iletken bir yol oluşturarak elektriksel iletkenliği artırır [111, 112]. Böyle oluşturulan grafen/polimer kompozitlerinde, elektriksel iletkenlik artışı lineer olmayan davranış gösterir ve belirli bir katkı oranının üzerine çıkıldığında kompozit malzeme iletken özellik kazanmaya başlar. Grafen, anormal kuantum Hall etkisi ve lokalizasyon göstermeme özelliği sayesinde katkı malzemesi olarak kullanıldığında, katkısız bir taşıyıcı parçacık gibi davranır [113, 109, 110]. Grafenin katkı malzemesi olarak kullanımı sırasında; uygulanan üretim yöntemi, katkı oranı, fonksiyonel grupların varlığı, grafen tabakasının en-boy oranı ve matris içerisindeki dağılımı gibi faktörler, oluşan grafen/polimer kompozitin elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde etkilemektedir [113].

Grafen, üstün elektriksel özelliklerine rağmen mekanik özelliklerinin sınırlı olması nedeniyle büyük ölçeklerde üretilemez; bu süreçte yüzeyde pullanma ve dökülmeler oluşur. Bilindiği gibi termal iletkenlik elektronik elemanların kalite, performans ve güvenilirliğini etkileyen önemli karakteristiklerdendir. Elektronik elemanın çalışması sırasında ortaya çıkan ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması gerekir. Oda sıcaklığında katkısız grafen için termal iletkenliği yaklaşık 5000 W/mK olup, bu değer malzemeler arasında ölçülen en yüksek termal iletkenliktir.

Sahip olduğu üstün fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde grafen; tek moleküllü gaz sensörleri, süper kapasitörler ve lityum iyon pilleri, enerji depolama sistemleri, şeffaf iletim

elektrotları ve kompozit malzemeler gibi birçok ileri teknoloji alanında kullanılmaktadır. Bu özellikleri ile grafenin, gelecekte kompozit ve elektronik endüstrisinin gelişmesinde önemli bir rol oynaması öngörülmektedir [113].

6.2. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) Yapıların Hazırlanması

6.2.1. n-Si kristalinin temizlenmesi

Yarıiletken kristallerinin büyütülmesi, ne kadar kontrollü koşullarda ve yüksek vakum sisteminde yapılırsa yapılsın, laboratuvar ortamında bulunan organik kirler, kristal örgüde meydana gelen kusurlar ve çeşitli safsızlıklar nedeniyle yarıiletken yasak enerji bant aralığında çok sayıda istenmeyen arayüzey durumlarının (Nss) oluşmasına yol açar. Bu durumlar, aygıtın performansını olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle yarıiletken kristallerinin büyütülmesi işlemi, temiz ve kontrollü ortamda gerçekleştirilmelidir. MS kontakların üretiminde yalnızca yarıiletken kristalin yüzey kalitesi değil aynı zamanda oluşturulan ohmik ve doğrultucu metal kontaklar da yüksek saflıkta olması ve bu işlemlerin yüksek vakum koşullarında gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca MS arayüzeyinde yalıtkan veya polimer tabaka (MIS veya MPS) oluşturulacaksa, bu tabakanın homojenliği ve kullanılan büyütme yönteminin uygunluğu da cihaz performansı açısından büyük önem taşır.

Çalışmamızda, Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) tipinde (100) yüzey yönelimli, 0,50 Ωcm özdirençli, 350 μm kalınlığa sahip, 2 inch (5,08 cm) çaplı, bir yüzeyi parlatılmış ve Silisyum içine fosfor ($4{,}3x10^{15}cm^{-3}$) katkıllanması ile elde edilen n-tipi silisyum yarıiletkeni üzerine oluşturulmuştur. Kristal temizlenmesinde ve yapının üretilmesinde kullanılan tüm malzemeler (cımbız, beher gibi) asetonla (Aldrich marka) temizlendi ve yüksek dirençli ($\sim 16^{-18}$ MΩ) deiyonize su karışımında ultrasonik banyoda yıkandı. Daha sonra 80 ^{o}C fırında sıcaklık uygulanarak sterilizasyon işlemi yapıldı. Fabrikasyon işleminden önce bu n-Si yapraklar iyice ultrasonik banyoda çeşitli asit ve deiyonize su karışımlarında iyice temizlenip deiyonize suda durulandıktan sonra kuru azot (N_2) gazı ile kurutuldu.

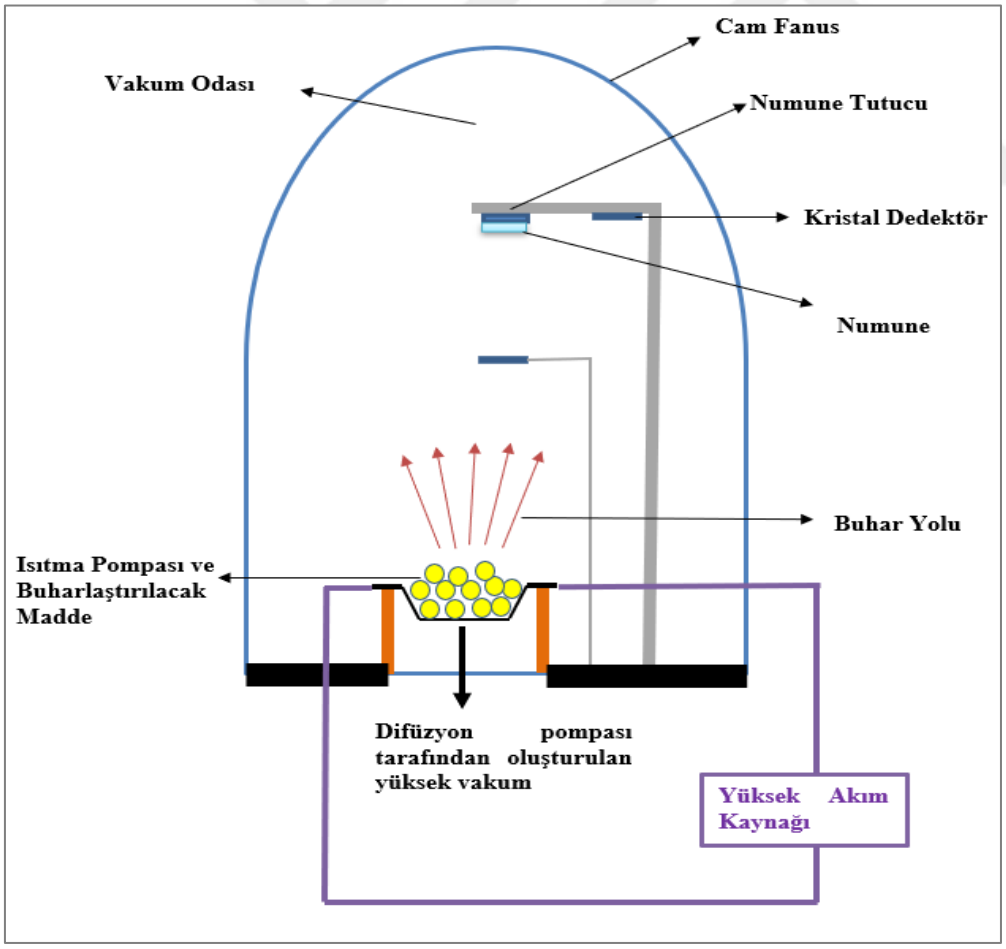
Kristal yüzeyinin hazırlanmasında izlenen işlem basamakları aşağıda sıralanmıştır.

- n-Si alttaş yüzeyinde doğal yollarla oluşan oksit tabaka Ammonium Peroxide içinde ultrasonik banyoda 40 sn çalkalanarak temizlendi,

- Daha sonra yine ultrasonik banyoda deiyonize su içinde 5 dakika durulandı,
- Sırasıyla H_2SO_4: H_2O_2: H_2O=3: 1: 1 çözeltisi hazırlanarak, çözelti içinde n-Si alttaş 1 dakika ultrasonik olarak temizlendi,
- Yine HCl: H_2O = 1: 1 oranında çözeltisi içerisinde 1 dakika ultrasonik olarak temizlendi,
- Son olarak deiyonize suda 10 dakika durulandıktan sonra kuru nitrojen (N_2) gazıyla kurutularak alt ve üst ohmik ve doğrultucu kontakları üretmek için vakum fanusa konuldu.

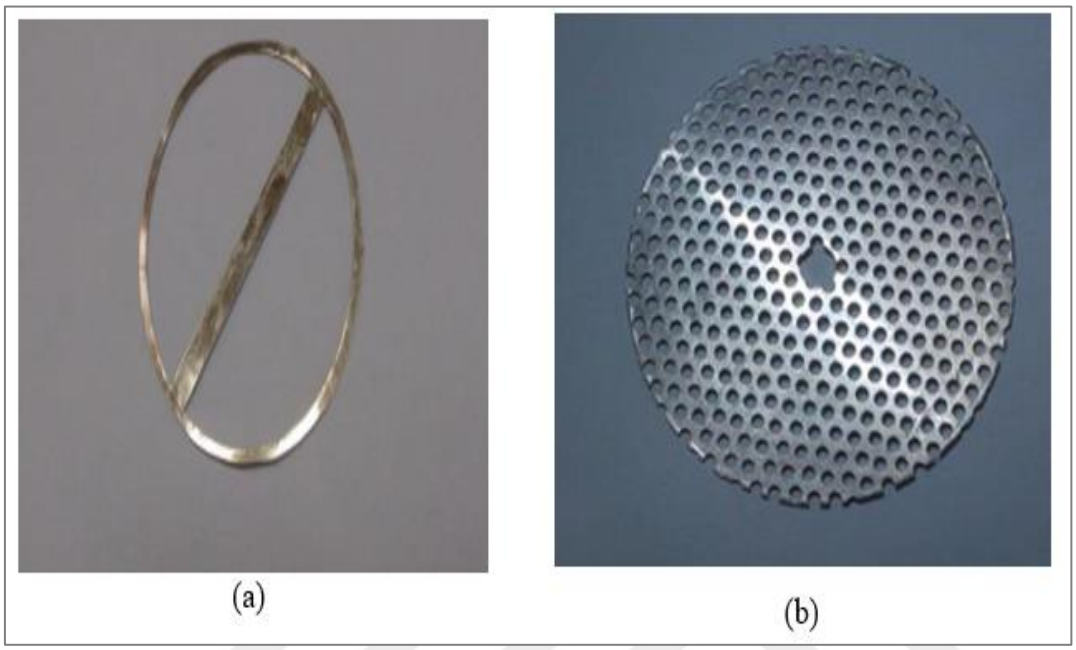
6.2.2. Omik arka kontakların oluşturulması

İnce filmler genellikle, kaplama malzemesinin buharlaştırılarak kontrollü biçimde alttaş üzerine biriktirilmesini sağlayan termal buharlaştırma yöntemi ile hazırlanır (Şekil 6.4, sistem şeması).



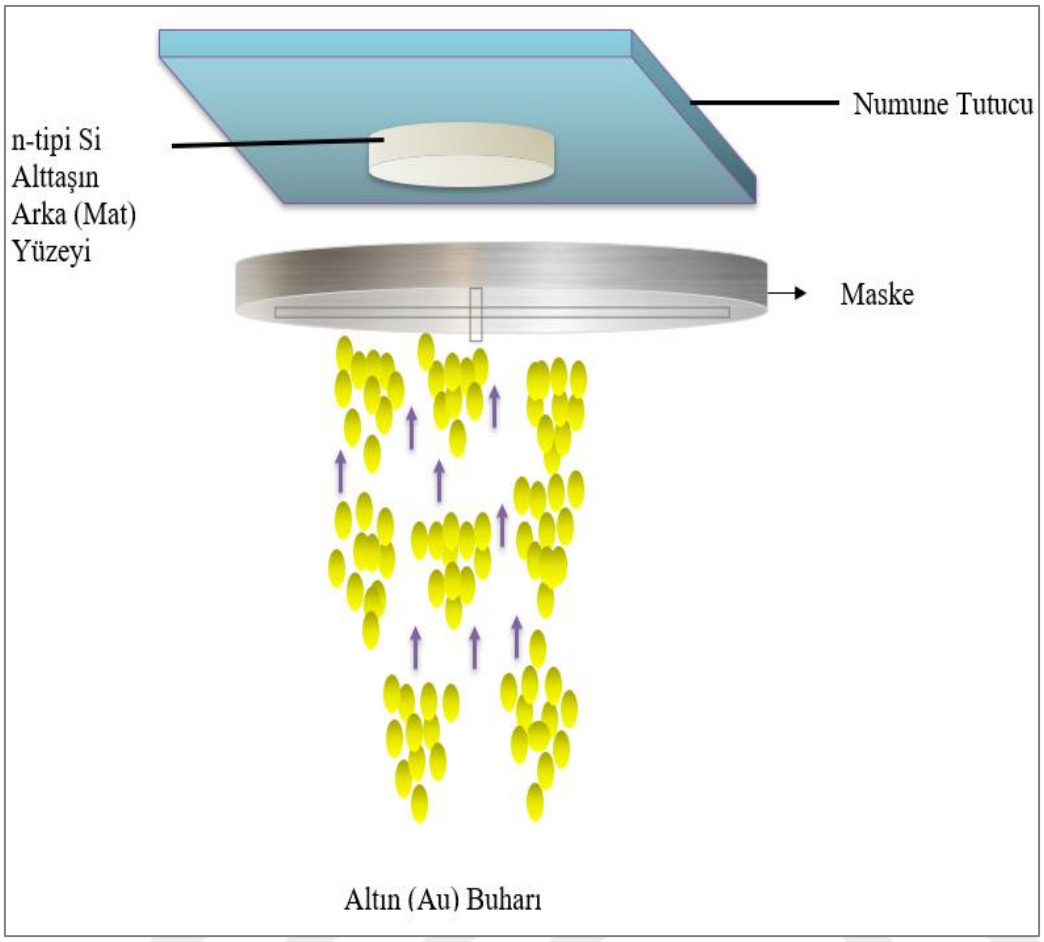
Şekil 6.4. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların (SDs) için altın (Au) omik kontakların hazırlanmasında kullanılan termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi

n-Si yarıiletkenin arka yüzeyine ohmik kontak ve ön yüzeyine doğrultucu kontaklar oluşturmak için kullanılan 1 mm kalınlıkta ve 2 inch (5,08 cm) çaplı maskeler Resim 6.1' de gösterilmiştir.



Resim 6.1. a) Omik ve b) doğrultucu kontaklarda kullanılan maskeler

n-Si alttaşın arka yüzeyine omik kontak oluşturmak amacıyla, yüksek vakumlu (~10^{-6} Torr) metal buharlaştırma sisteminde, akım verilen tungsten flaman yardımıyla ~1500 Å (150 nm) kalınlığında yüksek saflıkta (%99,995) altın (Au) büyütüldü. Düşük dirençli omik kontak kontak sağlamak için n-Si yarıiletken, nitrojen (N_2) gazı ile yaklaşık 3 dakika 500 ºC'de tavlandı. Bu işlem sayesinde, altın n-Si yaprağın üzerine homojen şekilde büyütülerek arka ohmik kontak oluşturuldu. Şekil 6.5'de Au omik kontakların oluşumu şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.5. n-Si tipi alttaşın mat yüzeyine oluşturulan altın (Au) omik kontakların hazırlanması

6.2.3. (%3 Grafen katkılı- PVA) arayüzey tabakasının oluşturması

0,03 Gr: PVA arayüzey tabakasını oluşturmak için, polyvinil alkol (PVA, Sigma Aldrich, Mw ~130,000 g/mol), Grafen (Grafen, Chemical Industries Co.) ve çüzücü olarak deiyonize su ile asetik asit kullanıldı. İlk aşamada PVA tozu, 3 saat 80 ^{o}C sıcaklıkta ultra saflıkta deionize su içinde manyetik karıştırıcı içinde karıştırılarak ağırlıkça %8'lik PVA çözeltisi hazırlandı. Hazırlanan çözeltinin oda sıcaklığında soğuması sağlandı. Ağırlıkça %1,6 grafen çözeltisi hazırlamak için N-dimethylformamide çözücü olarak kullanıldı. Grafen ve çözücü sonik parmak (Ultrasonic Shaker, Bandelin Sonorexi Berlin) ile 25 kHz frekansta sonik dalgalara 2 gün maruz bırakıldı. Bu aşamadan sonra elektro-eğirme (Electrospinning) işlemine geçilecek çözelti için %8'lik PVA çözeltisi ve %1,6'lık grafen çözeltisi oda sıcaklığında karıştırıldı. Son olarak, n-Si alttaşın parlak yüzeyi malzeme tutucusu üzerine yapıştırıldı ve 0,03 Gr: PVA çözeltisi alttaş yüzeyi üzerine 10 dakika boyunca nano boyutlu fiberler halinde kaplanmıştır. Elektro-eğirme işlemi sırasında silikon alttaş ile hibrit polimer

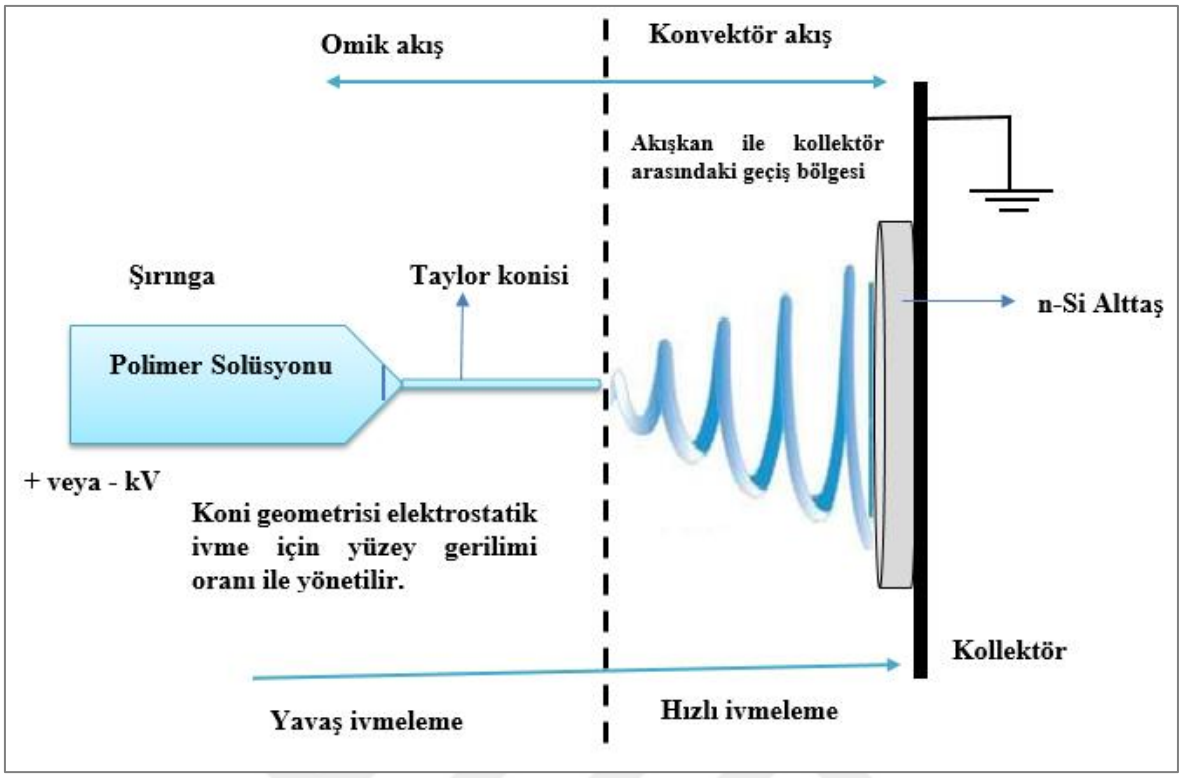
çözeltisini içeren enjektör arasındaki mesafe 18 cm olarak ayarlanmış ve çözelti 0,5 ml/saat akış hızında 17 kV'luk bir gerilime tabi tutulmuştur. Böylece silikon alttaşın parlak yüzeyi üzerine polimer nano boyutlu fiberler büyütüldü. Hibrit polimer çözeltisi güç kaynağına bağlanmadan önce enjektör bakır uça konuldu. Böylece, hazırlanan polimer arayüzey (0,03 Gr: PVA) tabakası, n-Si alttaşın parlak ön yüzeyine electrospinning yöntemiyle büyütülmüş oldu.

Elektro eğirme tekniği

Elektro eğirme yöntemi polimer, seramik ve metal oksitler gibi çeşitli malzemelerden nano boyutlu fiberlerin üretiminde yaygın olanak kullanılan bir tekniktir. Bu teknikle üretilen ve çapı genellikle 1000 nm'den daha küçük olan lif yapılar nanofiber olarak adlandırılır [114].

Elektro eğirme düzeneği, topraklanmış (negatif gerilim) kollektör ile yüksek gerilime bağlanmış metalik kılcal nozulden oluşur. Elektrik alan kritik değere geldiğinde, polimer çözeltisinin yüzey gerilimini elektrostatik kuvveti aşar ve iğne ucundan ince jelin atılması sağlanmış olur [115]. Elektro eğirme yöntemiyle üretilen liflerin yapısı ve çapı; polimerin viskozitesi, içsel çözelti özellikleri (iletkenlik, yüzey gerilimi vb.), süreç parametreleri, ortam (sıcaklık ve nem gibi) koşulları, uygulanan gerilim ve uç ile toplayıcı arasındaki uzaklık gibi çalışma koşullarına bağlıdır [116]. Ayrıca, istenen özelliklerde polimer çözeltilerinin büyütülmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bunun nedeni, elektro-eğirme sürecinde polimer çözeltisinin viskozitesinin önemli bir rol oynamasıdır. Polimer çözeltinin viskozitesinin artması, yüzey gerilimi ile viskosite akış arasındaki dengeyi değiştirerek damlacık oluşumu yerine silindirik jel oluşumunu kolaylaştırır [94, 116].

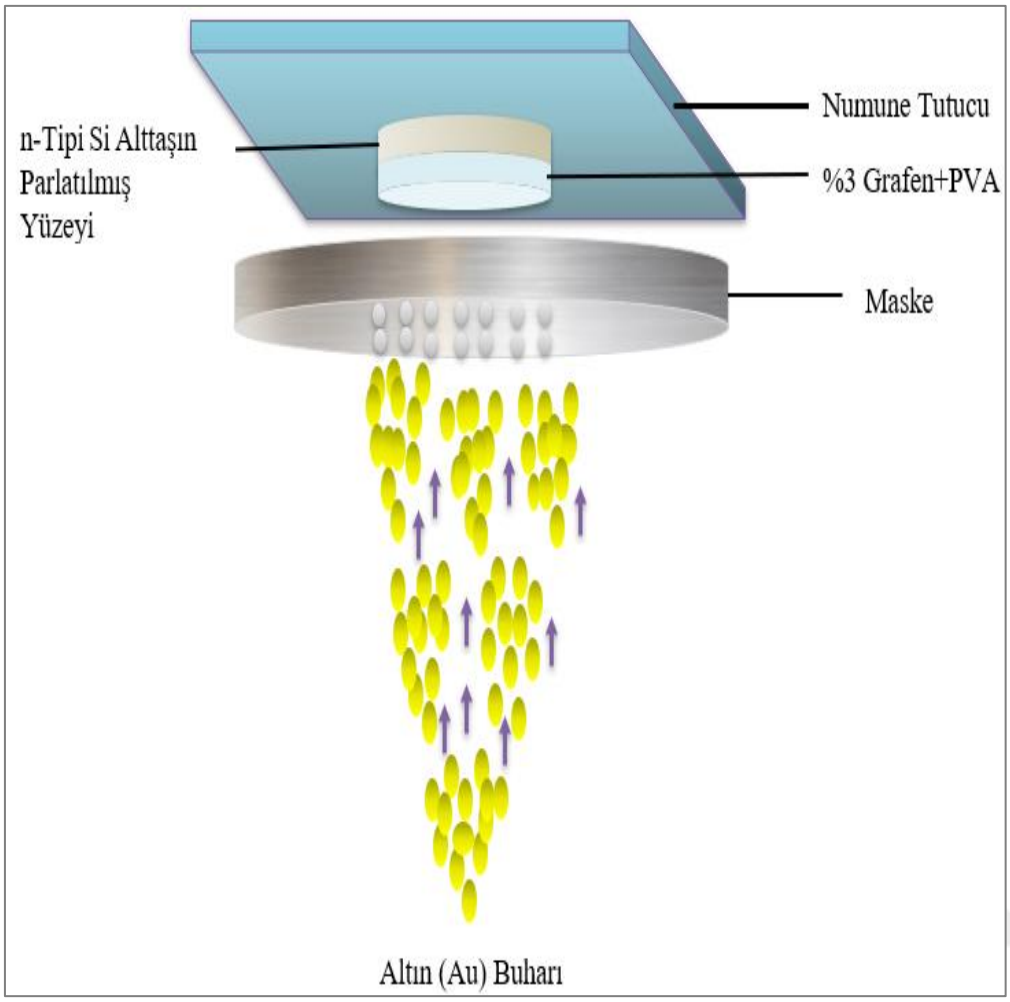
Bu yöntemde polimer çözeltisi uygun çözücü içerisinde çözünerek veya polimer ısı ile eritilerek şırıngaya çekilir. Şırıngaya çekilen polimer şırınganın ucunda bulunan metalik iğneye doğru şırınga pompası yardımı ile sabit oranda itilir. Polimer solüsyonu yüksek voltaj altında püskürtme nozülündeki asılı damlası statik olarak yüklenir ve yüzeye eşit olarak dağıtılan indüklenen yükler sıvı jeli oluşturur. Oluşan sıvı jel den uzun, ipliksi ince lifli bir yapı meydana gelir. Bu uzama işlemi devam ederken, çözücünün buharlaşması ile birlikte polimerler fiber halinde büyütülmüş olur [117, 118]. Elektro eğirme sisteminin şematik gösterimi Şekil 6.6' da verilmektedir.



Şekil 6.6. Elektrospinning (elektro eğirme) yönteminin şematik gösterimi

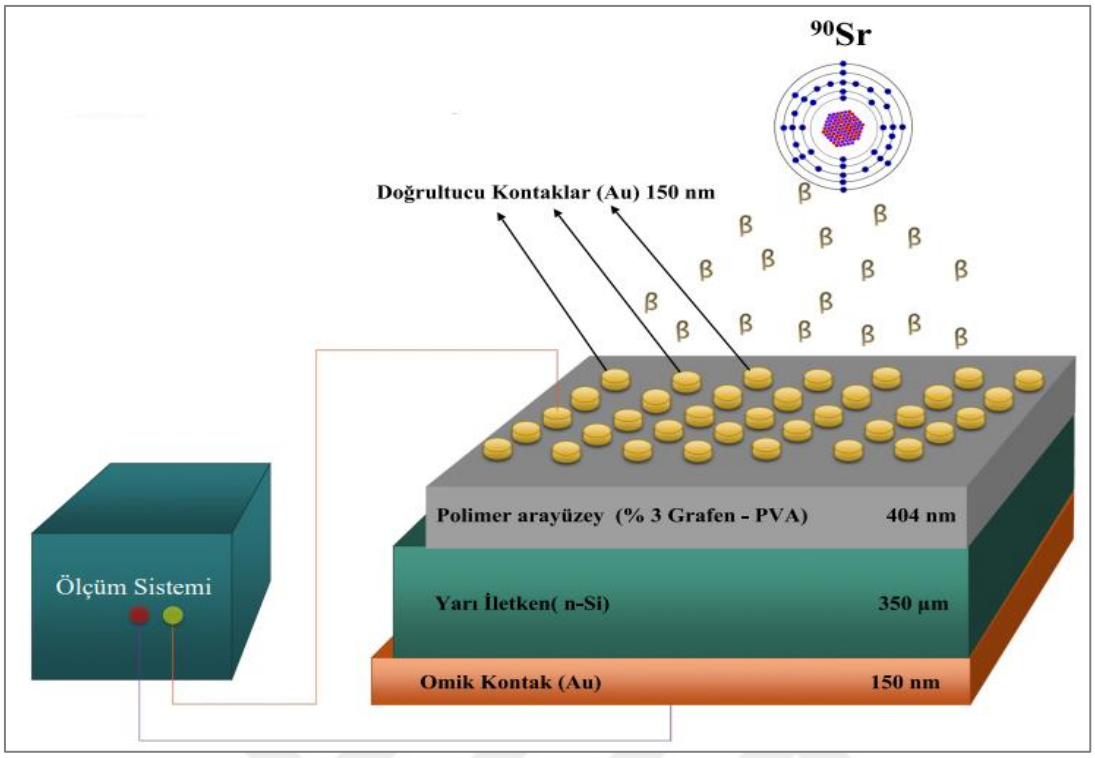
6.2.4. Doğrultucu kontakların oluşturulması

Son adım olan doğrultucu kontakların oluşturulması için, n-Si kristal alttaşın parlak ön yüzeyi üzerine 0,03Gr: PVA tabakasının elektro eğirme yöntemi ile oluşturulduktan sonra, yine aynı termal buharlaştırma sistemine yerleştirilir. Şekil 6.7'de, alttaş malzemesinin arayüzey tabakası kaplanmış tarafı aşağı bakacak şekilde yerleştirilmiş ve önüne 1 mm çapında çok sayıda delik bulunan maske kullanılarak termal buharlaştırma ünitesindeki numune tutucusuna sabitlenir. Ortamda bulunan gazların olası kirliliğe yol açmaması için işlem yaklaşık $1x10^{-6}$ Torr basınç altında gerçekleşmiş ve bu koşullar altında doğrultucu kontaklar oluşturulmuştur.

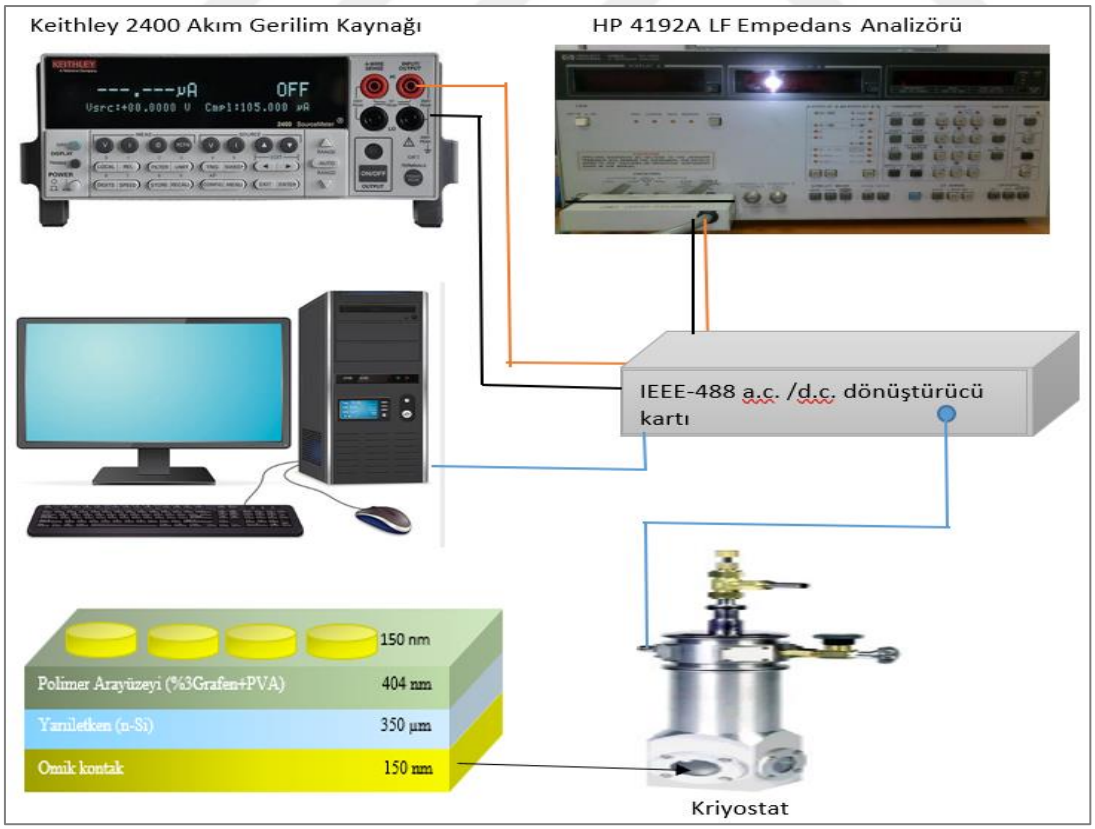


Şekil 6.7. Termal buharlaştırma sisteminde Au doğrultucu kontakların hazırlanması

Böylece yukarda verilen basamaklar ile Au/(0,03Gr:PVA/n-Si (MPS) Schottky diyotların üretimi sağlanmış oldu. Hazırlanmış olan MPS yapısının şematik gösterimi ile deneysel ölçüm sistemi sırasıyla Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’ da verildi.



Şekil 6.8. Hazırlanan Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si tipi (MPS) yapıların şematik gösterimi



Şekil 6.9. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısının ölçümünde kullanılan deneysel ölçüm sistemi

6.3. Deneysel Ölçümlerde Kullanılan Ölçüm Cihazları

6.3.1. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı

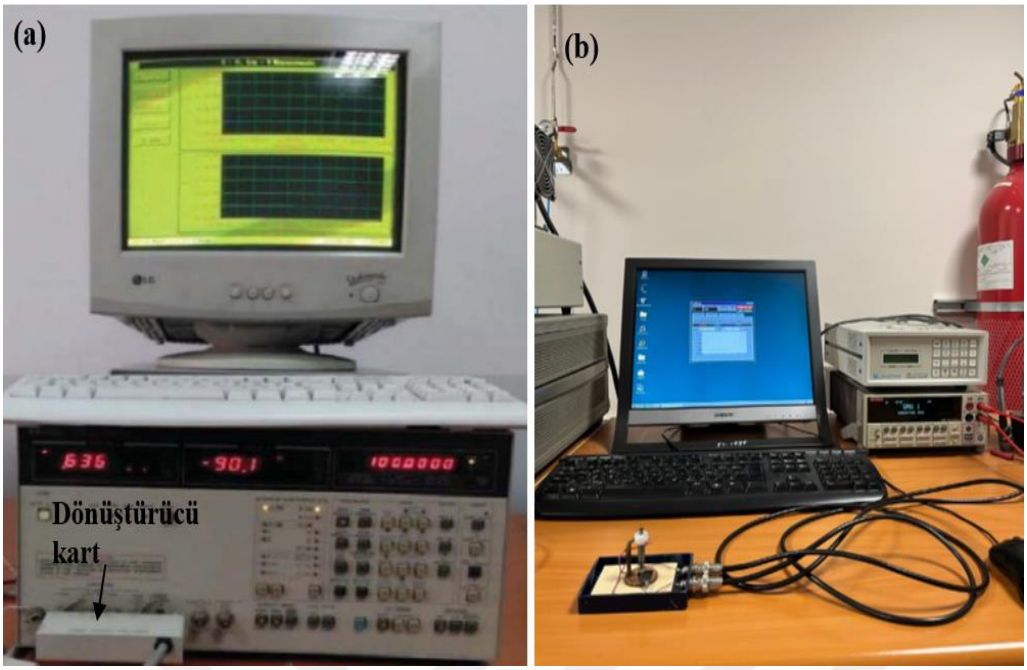
Ters beslem voltajından doğru beslem voltajına doğru akım-voltaj (I-V) ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde Resim 6.2'de gösterilen Keithley 2400 ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, akım kaynaklı gerilim ölçümü yapabilmenin yanı sıra gerilim kaynaklı akım ölçümü de gerçekleştirebilmektedir. Keithley 2400 cihazı ile dc gerilimi ±1 μV den ± 200 V aralığında, dc akımı ise ±10 pA'den ±1 A aralığında ölçüm özelliğine ve (±) %0,15 hassasiyetle ölçüm alınabilmektedir.



Resim 6.2. Keithley 2400 akım- gerilim cihazı

6.3.2. Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörü

Au/(0,03 Gr: PVA/n-Si (MPS) yapıların radyasyon ve voltaja bağlı kapasitans (C-V-R) ve iletkenlik (G/ω-V-R) ölçümleri Hewlett Packard 4192A LF empedans analizör cihazı ile IEEE-488 ac/dc dönüştürücü kart yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu sistemin salınım genliği 5 mV-1 V aralığındadır. Frekans aralığı ise 5 Hz' den 13 MHz' e kadar değişmektedir.



Resim 6.3. (a) Hewlett Packard 4192A LF empedans analizör ile IEEE-488 ac/dc dönüştürücü kart takılı bilgisayar ve (b) ölçüm düzeneği

Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si tipi (MPS) Schottky diyotların çeşitli dozlardaki beta radyasyonu altında davranışını incelemek için radyasyondan önce ve çeşitli radyasyon dozlarından (2, 6, 10, 14, 18 ve 22 kGy) sonra I-V ile C-G/ω-V ölçümleri 1 MHz frekansında, oda sıcaklığında, geniş voltaj aralığındaki (-4 V $\leq$V$\leq$ 3 V) I-V ölçümlerini için Keithley 2400 akım kaynağı, C-V ve G/ω-V ölçümleri için ise Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

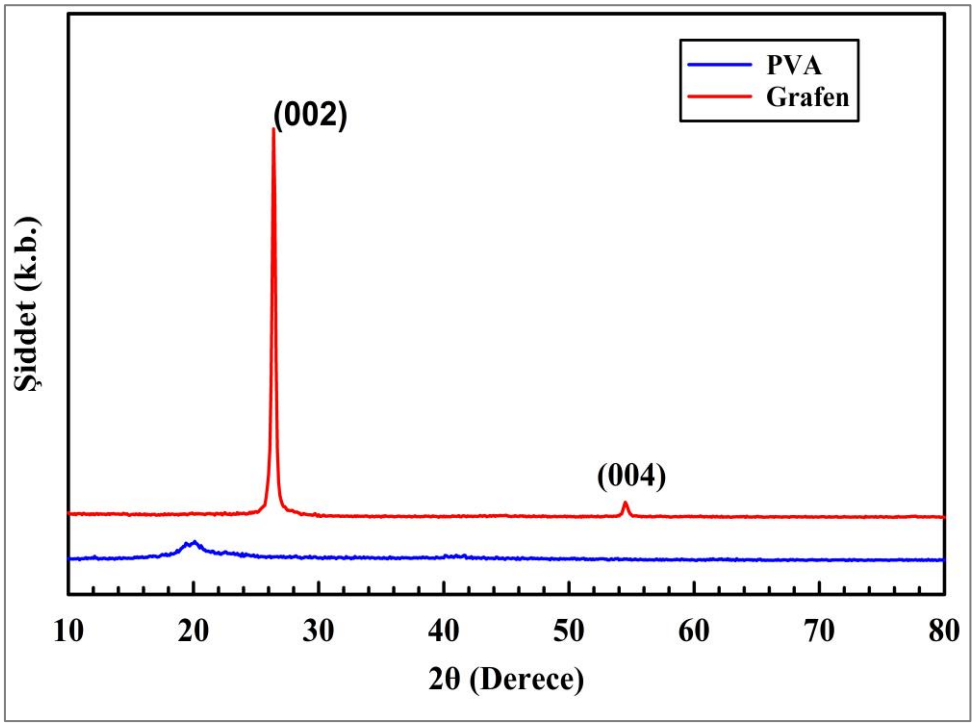
Ölçüm frekansının seçimi radyasyonun etkisinin doğru olarak değerlendirilebilmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, MPS yapısının üretim sürecinden kaynaklanabilecek arayüzey durumlarının etkisini en aza indirmek amacıyla I-V, C-V ve G/ω-V ölçümleri 1 MHz frekansında gerçekleştirilmiştir. Araştırmacıların frekansa bağlı yapılan çalışmalarında [99, 119, 120] üretimden kaynaklanan arayüzey durumlarının etkilerinin yeterince yüksek frekanslarda (f $\geq$ 500 kHz) ortadan kalktığını ortaya koymuştur. Bunun nedeni de yükler ve arayüzey durumları düşük frekanslarda ac sinyalini takip edebilmesi ve bunun sonucunda akım, kapasitans ile kondüktans değerlerinde değişikliklere yol açabilmesidir.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARIŞMA

7.1. Yapısal Analiz

7.1.1. X-ışını kırınım (XRD) analizi

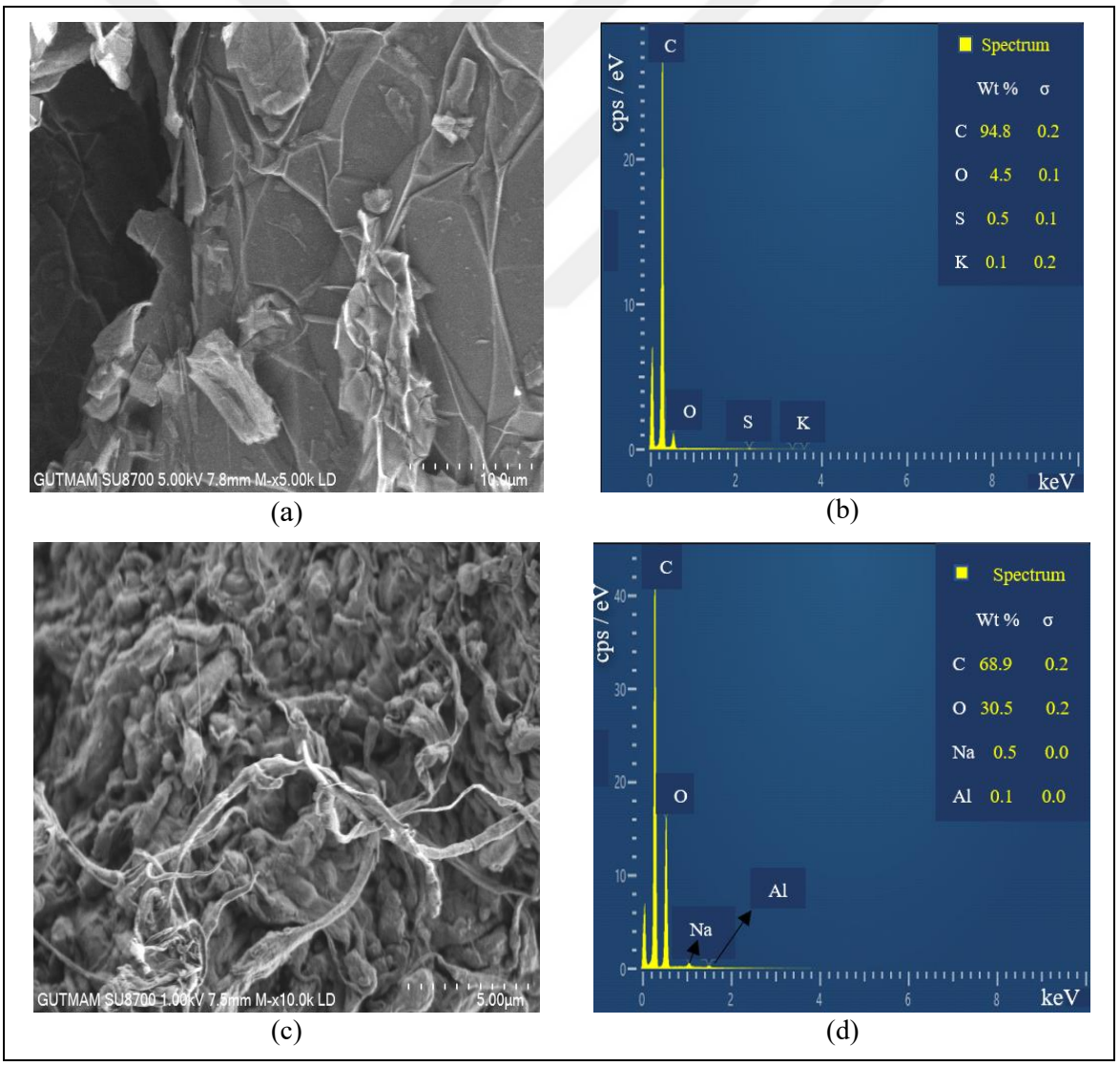
Arayüzey malzemesi olarak kullanılan grafen ve PVA tozlarının faz analizini incelemek için X-ışını kırınım (XRD) yöntemi kullanılmıştır. Şekil 7.1'de, grafene ait XRD kırınım pikleri gösterilmektedir. Elde edilen kırınım pikleri, grafene ait JCPDS Kart Numarası: 00 008 0415' te bilirtilen standart verilerle tutarlı hekzagonal kristal yapıya ve P63/mmc (194) fazına sahiptir. Bu veri kartına göre 2θ açısı 26,40 ° ve 54,20 °'lerde sırasıyla (200) ve (004) düzlemlerinden gelen verilerdir. Ayrıca PVA'ya ait XRD kırınım deseni de Şekil 7.1'de gösterilmektedir. PVA için 2θ açısı 20,10 °'de (101) düzleminden saçılma açısı ile gelen ana piki vererek tozun yarı kristalin doğasını göstermektedir. Bu pik hem moleküller arası hem de molekül içi olarak PVA zincirleri arasındaki güçlü hidrojen bağından kaynaklanmaktadır. Elde edilen bu pikler grafen ve PVA' nın faz yapısını bozacak herhangi bir fazın oluşmadığını göstermektedir.



Şekil 7.1. Grafen ve PVA tozlarının XRD kırınım pikleri

7.1.2. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ve Enerji Dağıtıcı Spektrometri (EDS) analizi

Grafen tozunun yüzey morfolojisini belirlemek için Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM, Hitachi marka SU8700 model) görüntüleri ve element analizi için Enerji Dağıtıcı Spektrometri (EDS) görüntüleri sırasıyla Şekil 7.2.a ve Şekil 7.2.b'de verilmiştir. Şekil 7.2.a'da elektriksel olarak iyi bir iletken olan grafenin FE-SEM görüntüsü tıpkı metallerde olduğu gibi aydınlık görünmektedir. Şekil 7.2.b'de, grafen tozunun ağırlıkça yüzdesi sırasıyla %94,8 Karbon, %4,5 Oksijen, %0,5 Kükürt ve %0,1 Potasyum atomları içerdiği tespit edilmiştir. Grafen tozu Oksijen, Kükürt ve Potasyum dahil olmak üzere %5,1 oranında safsızlık atomları içermektedir.

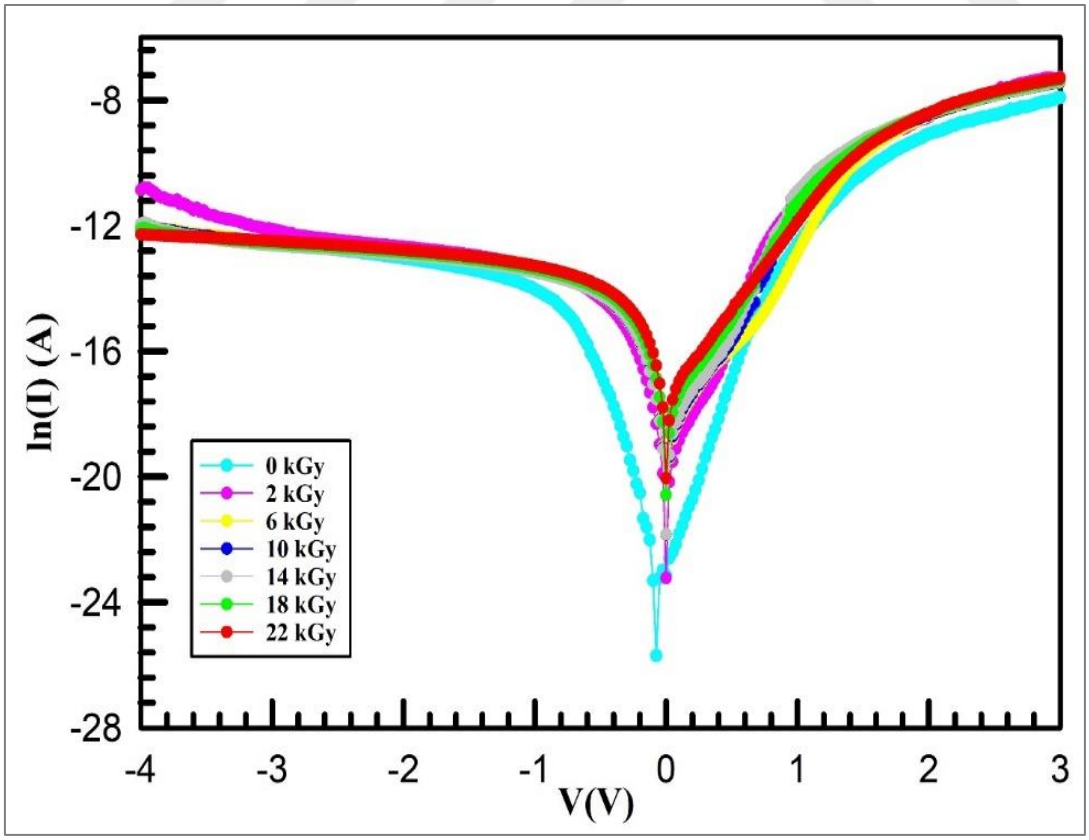


Şekil 7.2. (a) Grafen tozunun FESEM, (b) Grafen tozunun EDS (c) PVA tozunun FESEM ve (d) PVA tozunun EDS görüntüleri

PVA tozuna ait FE-SEM ve EDS görüntüleri ise Şekil 7.2.c ve Şekil 7.2.d'de verilmiştir. PVA tozunun Şekil 7.2.c'deki FE-SEM görüntüsünde yapının lifli bir yapıya sahip olduğu ve Şekil 7.2.d'de ise PVA tozunun ağırlıkça yüzdesi sırasıyla %68,9 Karbon, %30,5 Oksijen, %0,5 Sodyum ve %0,1 Alüminyum atomlarından oluştuğunu göstermektedir. PVA tozunda toplam % 0,6 oranında Sodyum ve Alüminyum olmak üzere safsızlık atomları içermektedir.

7.2. Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiklerinde Beta Radyasyon Etkisi

Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısı üzerine radyasyon etkisinin doğru olarak değerlendirilebilmesi için beta radyasyonundan önce ve sonra ölçümler alınarak analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada radyasyon kaynağı olarak saatteki doz hızı 22 mGy olan ^{90}Sr (Stronsyum-90) beta (β) kaynağı kullanıldı. Radyasyondan önce ve 2, 6, 10, 14, 18, 22 kGy beta radyasyonundan sonra, oda sıcaklığında (300 K), 1 MHz frekansında ve geniş bir voltaj aralığında ($-4\ V \leq V \leq 3\ V$) MPS yapısına ait I-V ölçümleri alınmış. Şekil 7.3' de akım-voltaj (I-V) grafiğine akımdaki ölçüm sonuçları logaritmik ölçek olarak gösterilmiştir.



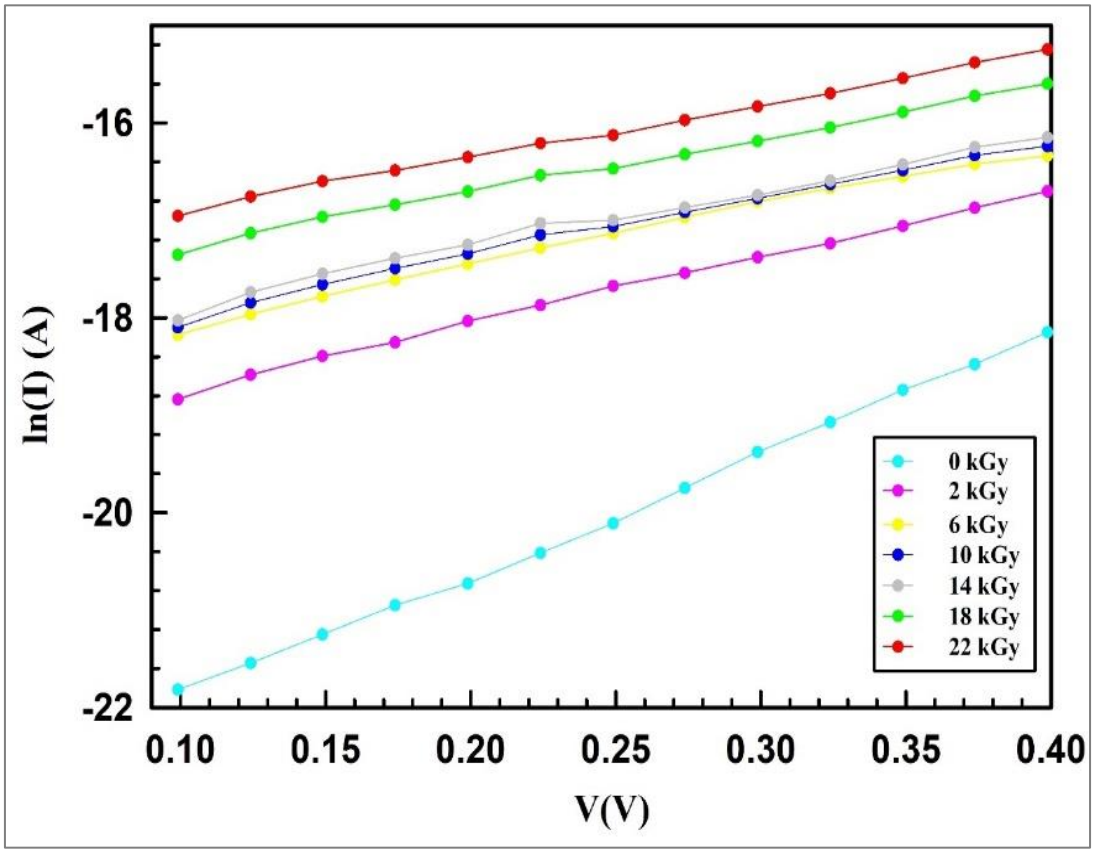
Şekil 7.3. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra yarı logaritmik I-V grafiği

Şekil 7.3'de radyasyon dozlarına bağlı olarak ölçülen akım değerlerinde değişim meydana gelmektedir. Radyasyon etkisiyle doğru ön gerilim I-V karakteristiklerinde çok belirgin bir değişim olmaz iken, ters beslem gerilimde radyasyon dozu arttıkça sızıntı akımında artış meydana gelmektedir. Radyasyon uygulandıktan sonra ters beslem gerilimde, akımda (sızıntı akımında) gözlenen bu artış, radyasyon etkisiyle oluşan kusurların artmasına bağlı olarak yapıda bozucu veya olumsuz bir etki oluşturduğu sonucuna bağlanabilir [22, 50, 121-123]. Ayrıca radyasyon nedeniyle oluşan örgü kusurlarının tükenim bölgesinde taşıyıcıların oluşmasına neden olur buda sızıntı akımında artışa sebebi olabilmektedir. [122]. Arayüzey tuzak oluşumunun (0,03 Gr: PVA) /Si arayüzeyinde meydana geldiği ve yalıtkan tabakasında (0,03 Gr:PVA) oksitte tuzaklanmış yüklerin oluştuğu yargısına da varılabilir. Ayrıca sızıntı akımındaki artışın sebebi, tersinim bölgesinde meydana gelen elektronların tuzaklanıp boşalması nedeniyle de meydana gelebilmektedir. Bu tuzaklanmalar, polimer tabakada (0,03 Gr:PVA) ve (0,03Gr: PVA)/Si arayüzeyinde var olan oksijen boşluklarından kaynaklanmaktadır [125, 126].

Ayrıca doğru beslem geriliminde düşük voltajlarda akımda lineer bir değişim olmakta ve bu lineerlik belirli bir voltaj değerinden sonra doğru beslem akımının lineerlikten saparak bükülmeye başladığı görülmektedir. Bu durum arayüzey durumlarından ve seri dirençten kaynaklanmaktadır. MPS yapısında gerilim yükseldikçe seri direnç ve arayüzey durumlarından dolayı lineer durumdan uzaklaştığı gözlenmektedir. Bunun sonucu olarak idealite faktörü (n) 1'den daha büyük değer almaktadır. Bu değerin 1'den büyük olması diyotların ideal şartlardan uzaklaştığı anlamına gelir [16]. Seri direncin etkisi ile birlikte arayüzey durumları ve arada bulunan yalıtkan tabaka da ideal şartlardan uzaklaşmasının önemli sebepleri arasındadır [12].

Ters beslem akımında meydana gelen artış, yeni yük taşıyıcılarının ve yarıiletken yakınında kusurların oluşmasına atfedilebilir [127]. Oluşan bu kusurlar yük taşıyıcıları için yollar sağlaması, yarıiletken yakınındaki rekombinasyon merkezleri ve metal tarafından görülen bariyer yüksekliğindeki azalma bu artışın nedenleri arasındadır [128]. Oluşan artış ve azalışların nelerden kaynaklandığını belirlenmesi ters doyum akımı (I_0), idealite faktörü (n) ve sıfır beslem bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) gibi diğer diyot parametrelerinin hesaplanması ile mümkündür. İleri beslem ln(I)-V grafiklerinin lineer bölgesinden söz konusu parametreleri hesaplamak mümkündür.

MPS yapısına ait ileri beslem ln(I)-V grafiklerinin lineer bölgesi 0,1 V ≤ V ≤ 0,4 V aralığında elde edilmiş ve Şekil 7.4'de gösterilmiştir.



Şekil 7.4. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra ln(I)-V grafiğinin lineer bölgesi

MPS yapısında idealite faktörü birden büyükse ve seri dirence sahipse, akım ve voltaj arasındaki ilişki termoiyonik emisyon (TE) teorisine göre Eş. 7.1 ile verilir [12, 10, 22, 129, 130].

$$I(V) = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1\right] \tag{7.1}$$

burada k Boltzmann sabiti ($1{,}38\text{x}10^{-23}$ J/K), V uygulanan voltaj, T sıcaklık (300 K) ve IR_s seri dirençte oluşan voltajdır. IR_s terimi, düşük ve orta gerilim bölgesinde diyota uygulanan gerilimin yanında küçük bir terim oluğu için ihmal edilir. I_o ters doyum akımı;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp(\frac{-q\Phi_{B0}}{kT}) \tag{7.2}$$

eşitliği ile verilir. Burada $\Phi_{B0,}$ metal ile yarıiletken arasında oluşan sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği, A diyotun doğrultucu kontak alanı ($7{,}85x10^{-3}$ cm^2), A* Richardson sabiti olup değeri n-tipi Si için 112 A/cm^2K^2 dir.

Eş. 7.1 ve Eş. 7.2 kullanılarak, n ve Φ_{B0} parametrelerine ait formüller sırasıyla Eş. 7.3 ve Eş. 7.4' teki gibi elde edilir.

$$n = \frac{q}{kT}\left[\frac{d(V)}{d(\ln I)}\right] \tag{7.3}$$

$$\Phi_{B0} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \tag{7.4}$$

Eşitliklerden anlaşılacağı üzere, Şekil 7.3' de pozitif gerilim bölgesindeki ln(I)-V eğrisinin lineer bölge uzantısının akım eksenini kestiği noktadan ters doyum akımı (I_0) ile lineer bölgenin eğimden de n değeri bulunur. Bulunan I_0 akımı Eş. 7.4'e konularak Φ_{B0} bariyer yüksekliği değerleri olan diyot parametreleri elde edilir. Ayrıca önemli diyot parametrelerden birisi de kısa devre direnci (R_{sh}) ve seri direnç (R_s) değerleri Ohm yasasından elde edilir. Diyot kalitesininin anlaşılmasında önemli parametrelerden biri olan doğrultma oranı ($RR=I_F/I_R$) ise, ileri beslem akımının (I_F), ters beslem akımına (I_R) oranından bulunur. Verilen bu denklemler ve Şekil 7.4'deki ln(I)-V grafiğinin lineer bölgesinden elde edilen veriler kullanılarak MPS yapısına ait olan temel diyot parametreleri beta radyasyondan önce ve belirli beta radyasyon dozlarından sonra elde edilmiş ve bu değerler Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1'de ters doyum akımı (I_o) değerleri beta (β) radyasyonunun artması ile birlikte artış (0,098 nA$\leq I_0 \leq$ 26,2 nA) göstermektedir. Buradan, beta radyasyonunun serbest taşıyıcıların oluşumunu azalttığı ve bunu da I-V karakteristikler üzerinde önemli rol oynadığı söylenebilir. I_0 değerindeki herhangi bir artış veya azalma, derin seviye tuzaklarının bir rekombinasyon merkezi olarak hareket etmesiyle ilişkilendirilmektedir [131]. Ayrıca, bariyer yüksekliğindeki azalmalar da ters doyum akımlarında artışa neden olabilir [132].

Çizelge 7.1. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısına ait diyot parametrelerinin beta radyasyonuna bağlı değişimi

Beta Radyasyonu (kGy)	Diyot Parametreleri							
	n	I_0 (A)	Φ_{B0} (eV)	R_s (kΩ) (+3V)	R_{sh} (kΩ) (-4V)	I_F (A) (+3V)	I_R (A) (-3V)	RR ±3 V
0	3,21	$9,86x10^{-11}$	0,888	7,71	755	$3,12x10^{-4}$	$3,55x10^{-6}$	88
2	5,60	$3,59x10^{-9}$	0,795	6,64	207	$6,56x10^{-4}$	$5,65x10^{-6}$	116
6	6,26	$7,56x10^{-9}$	0.782	6,59	613	$5,30x10^{-4}$	$3,65x10^{-6}$	145
10	6,42	$8,55x10^{-9}$	0,773	6,52	611	$5,36x10^{-4}$	$3,49x10^{-6}$	153
14	6,57	$9,56x10^{-9}$	0,770	6,45	610	$5,41x10^{-4}$	$3,34x10^{-6}$	162
18	6,89	$1,79x10^{-8}$	0.768	6,11	711	$5,74x10^{-4}$	$3,57x10^{-6}$	160
22	7,03	$2,62x10^{-8}$	0,744	5,81	854	$6,07x10^{-4}$	$3,80x10^{-6}$	159

Eş. 7.3 kullanılarak ln(I)-V grafiğinin lineer bölgesinin eğiminden elde edilen idealite faktörü (n) beta radyasyondan önce ve sonra sırasıyla Çizelge 7.1' de gösterildiği gibi n=1'den büyük olarak elde edilmiştir. Bunun sebebi termiyonik emisyon (TE) teorisi ile birlikte difüzyon, rekombinasyon, yüzey durumlarından dolayı oluşan tünelleme ve bariyer yüksekliğindeki Gaussien dağılımı gibi akım/iletim mekanizmalarının varlığından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak radyasyondan önce ve sonra elde edilen yüksek n değerleri, standart TE teorisinden sapmanın bir göstergesidir. Gaussien dağılım teorisine göre, bariyeri aşmak için yeterli enerjiye sahip olmayan yük taşıyıcıları, ortalama engel yüksekliğine yakın bölgelerde bulunan çok sayıda engel veya patikalardan geçebilir. Bu durum, akımlarda ve idealite faktöründe artışların meydana gelmesine neden olmaktadır. MPS yapısına beta radyasyonu uygulanması ile arayüzeyde oluşan kusurlar, tuzak ve rekombinasyon merkezleri olarak davranmaktadır. Radyasyon dozunun artması ile birlikte bu kusurların yoğunluğunun artması, arayüzeyde homojensizliğe yol açarak idealite faktörünün artması ile sonuçlanır. İdealite faktöründe gözlenen bu artış; imaj kuvveti etkisi, rekombinasyon ve tünelleme gibi mekanizmalara atfedilir [124].

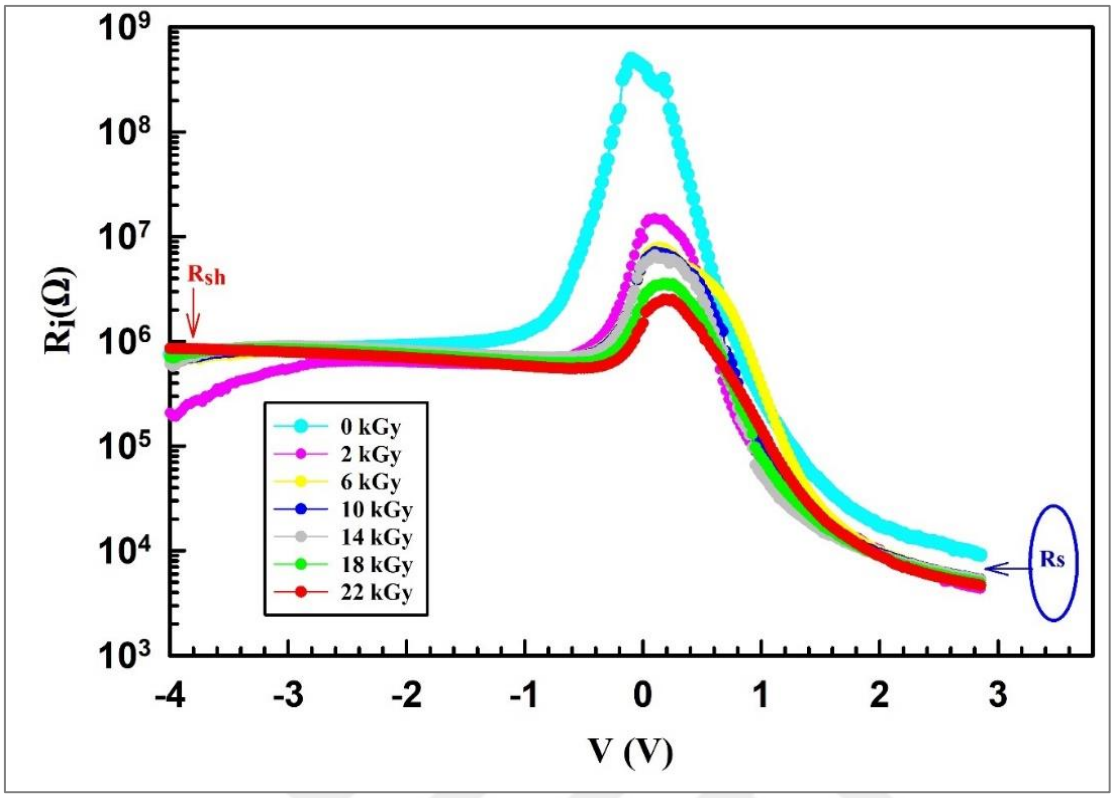
Çizelge 7.1' de Φ_{Bo} değerleri artan beta radyasyon dozu ile birlikte azalmaktadır. Bu durum araştırmacılar tarafından, beta radyasyonu yarıiletkenin yüzeyinde yasak bant aralığında kusurların oluşumuna sebep olur ve bu da serbest taşıyıcı yoğunluğunu etkiler. Bu nedenle, bariyer yüksekliğinde radyasyon uygulanması ile artışa veya azalmaya sebep olduğuna atfedilebilir [133, 134]. Bariyer yüksekliğinde radyasyona nedeniyle oluşan azalma

literatürde daha çok Poole Frenkel etkisi olarak bilinmektedir ve bu etki taşıyıcıların üretimine atfedilir [72].

MPS yapısının I-V karakteristiğine etki eden R_s ve R_{sh} dirençleri, ölçümlerin değerlendirilmesinde göz önüne alınması gereken parametrelerdendir. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısına ait beta radyasyonundan önce ve sonra R_s'nin etkisi Şekil 7.3' de ileri beslem voltaj bölgesinde ln(I)-V eğrilerinin bükülmesine neden olmaktadır. R_s değerini hesaplamak amacıyla literatürde birçok yöntem önerilmiştir. Bunlar arasında Ohm yasası işlem kolaylığı açısından en pratiğidir. Ölçülen I-V değerlerinden, Ohm yasasını ($R_i=d(V_i)/d(I_i)$) kullanarak direncin-voltaja (R_i-V) bağlı değişimi elde edilir. R_{sh} ve R_s değişimlerinin beraber değerlendirilebilmesi için grafikte R_i değerleri yarı logaritmik olarak verilmiş ve R_i'nin V'e göre değişimi şekil 7.5' te gösterilmiştir.

Şekil 7.5'de, R_s değeri +3V'a ve R_{sh} değeri ise -4 V'a karşılık gelen direnç değerleridir. MPS yapısına ait R_s ve R_{sh} değerleri Şekil 7.5'ten beta radyasyonundan önce ve sonrası için hesaplanarak Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1'de, beta radyasyon dozunun artmasıyla R_s değerinde azalma ve R_{sh} değerlerinde ise artma meydana gelmiştir. Beta radyasonu etkisiyle R_{sh} değeri R_s değerlerine kıyasla daha belirgin bir değişim gözlenmiştir. Bu durum, ters beslem akımlarının düşük değerlere sahip olması nedeniyle ileri beslem akımlarına göre radyasyondan daha fazla etkilenmesiyle doğrudan ilişkilidir. Sonuç olarak R_s değerlerinin azalması, R_{sh} değerlerinin de artması malzemede iyileşmenin bir göstergesidir ki bu durum, çeşitli beta radyasyon dozlarında diyotun doğrultma oranının (RR) artması, bu sonucu kanıtlar nitelikte olduğuna atfedilmiştir [135].

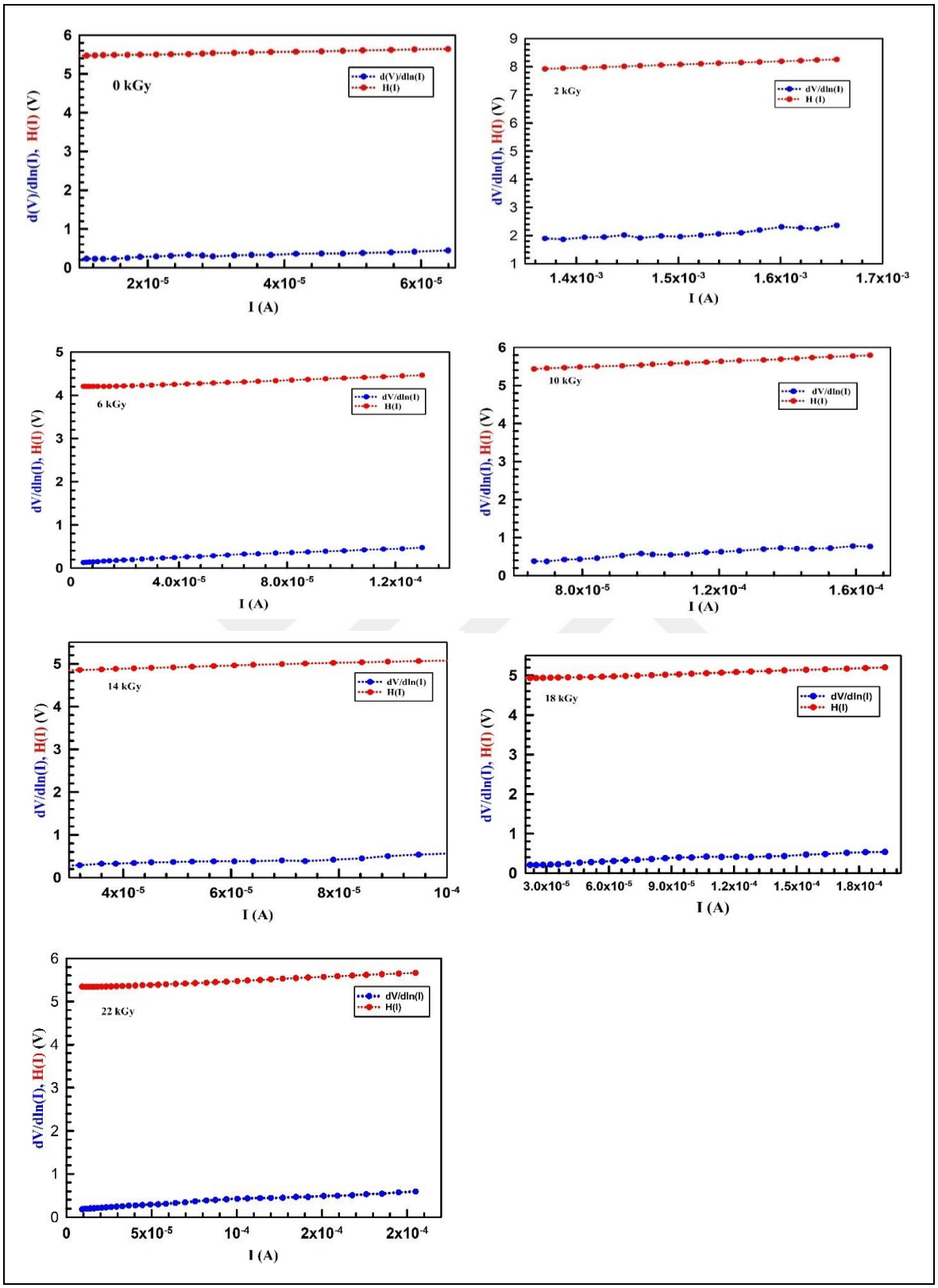


Şekil 7.5. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra R_i-V grafiği

Radyasyonun etkisinin doğru olarak değerlendirilebilmesi için farklı voltaj aralığında bazı diyot parametrelerinin (n, Φ_{B0} ve R_s) farklı metotlarla hesaplanması olukça önemlidir. Literatürde diyot parametrelerini hesaplamak için kullanılan yöntemlerden bir diğeri ve en yağın olanı Cheung fonksiyonları (Cheung-1 ve Cheung-2 fonksiyonları) yöntemidir. Bu çalışmada Cheung fonksiyonları (Cheung-1 ve Cheung-2) kullanılarak n, Φ_{B0} ve R_s diyot parametreleri ikici bir yöntem olarak elde edilmiştir. R_s değerlerini de içeren pozitif beslem voltaj akımlarının ölçüm değerleri Eş. 7.1'den faydalanılarak Cheung fonksiyonları Eş. 7.5 ve Eş. 7.6'dan elde edilir [136];

$$\frac{dV}{dln(I)} = \frac{nk\,T}{q} + IR_s \tag{7.5}$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q}\left[\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right)\right] = n\Phi_{B0} + IR_s \tag{7.6}$$



Şekil 7.6. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra dV/d(lnI)-I ve H(I)-I grafikleri

Yarı logaritmik ln(I)-V karakteristiğinin doğru beslem bölgesinde doğrusallıktan saptığı kısımın verileri için düz bir çizgi verir. d(V)/d(lnI)-I (Cheung-1 fonksiyonları) grafiklerinin lineer bölgesinin; y eksenini kestiği noktasından n ve grafiğin eğiminden de R_s değerleri bulunur. H(I)-I grafiğinin (Cheung-2 fonksiyonları) lineer bölgesinden; y eksenini kestiği noktadan Φ_{B0} ve eğimden R_s değerleri belirlenir. Eş. 7.5 ve Eş. 7.6 denklemleri kullanılarak elde edilen Cheung-1 ve Cheung-2 fonksiyonlarından elde edilen d(V)/dln(I)-I ve H(I)-I grafiklerini (Şekil 7.6) kullanılarak n, Φ_{B0} ve R_s diyot parametrelerine ait değerler Çizelge 7.2' de verilmiştir.

R_s ve Φ_{B0} değerlerini belirlemek için üçüncü bir yöntem olarak Norde yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde diyot üzerindeki voltajın 3kT/q'dan büyük olduğu durumları dikkate alarak Norde fonksiyonu tanımlamıştır. Norde fonksiyonu Eş. 7.7'de verilmiştir [137].

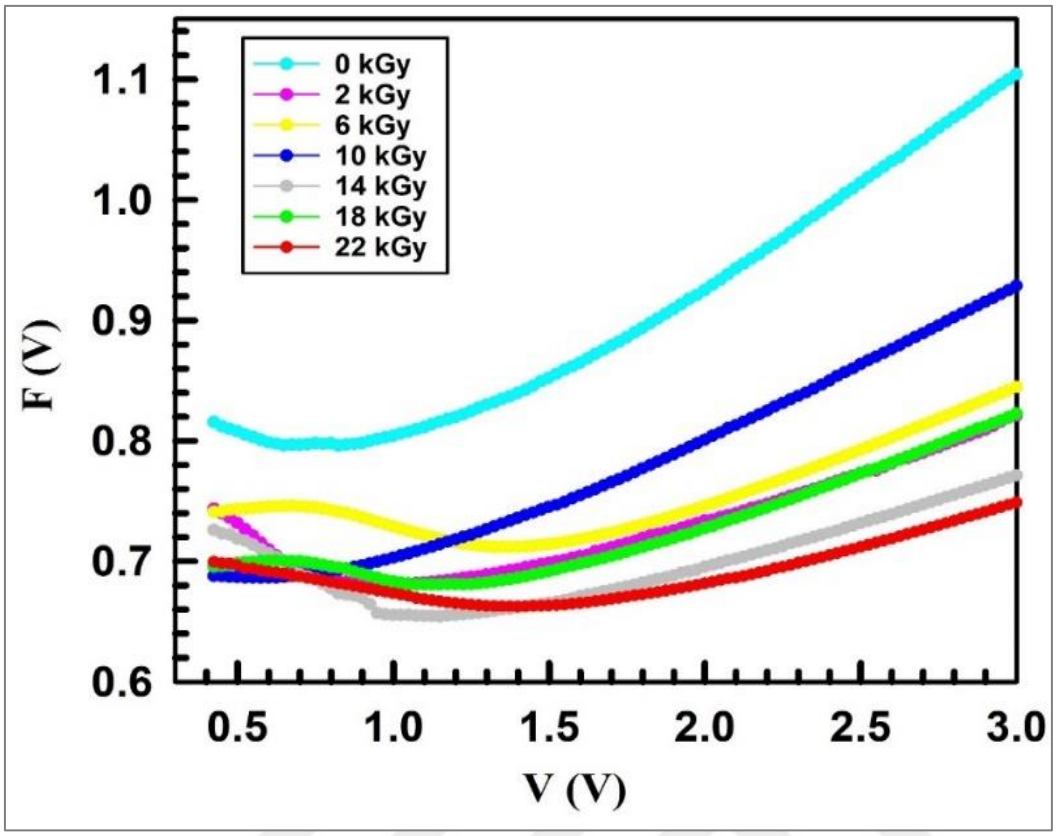
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q}\left[\ln\left(\frac{I(V)}{A^{*}AT^{2}}\right)\right] \tag{7.7}$$

Burada γ, I-V ölçümlerinden bulunan n değerinden büyük olan (1<n <γ) bir tamsayıdır. Bu çalışmada γ değeri 1,5n olarak alınmıştır. Eş. 7.8 ve Eş. 7.9'dan Φ_{B0} ve R_s değerlerini hesaplamak için kullanılmaktadır.

$$\Phi_{B0} = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \tag{7.8}$$

$$R_s = \left(\frac{kT}{q}\right)\left(\frac{\gamma - n}{I_{min}}\right) \tag{7.9}$$

burada $F(V_{min})$, F(V)-V grafiğindeki minimum noktası, I_{min} ve V_{min} değerleri sırasıyla minimum noktaya karşılık gelen akım ve voltaj değerleridir.



Şekil 7.7. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra F(V)-V grafiği

Eş. 7.7 kullanılarak elde edilen F(V)-V grafiklerinden (Şekil 7.7) elde edilen Φ_{B0} ve R_s diyot parametrelerine ait elde edilen değerler Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2' de ln(I)-V ile elde edilen değerler ile Cheung fonksiyonları kullanılarak bulunan değerler karşılaştırıldığında, aralarında bazı farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar, hesaplamaların farklı voltaj bölgelerinden hesaplanmasıdan kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, temel elektriksel parametrelerin belirlenmesinde yalnızca kullanılan ölçüm veya hesaplama yönteminin değil, aynı zamanda seçilen voltaj bölgesinin de önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, hesaplamalarda voltaj bölgesi mutlaka dikkate alınmalıdır; aksi takdirde, farklı koşullar nedeniyle elde edilen veriler arasında farklılıklar ortaya çıkabilir. Örneğin, Cheung fonksiyonu ile hesaplanan n değerleri, ln(I)-V karakteristiklerinden hesaplanan n değerlerinden daha büyük ve R_s değerlerinden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar hem n hem de R_s değerlerinin voltaja bağlı değişmekte olduğunu göstermektedir [98, 102].

Çizelge 7.2. Termoiyonik emisyon (TE), Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonundan elde edilen n, Φ_{B0} ve R_s diyot parametreleri

Beta Radyasyonu (kGy)	ln(I)-V (TE)			Cheung-I		Cheung-II		Norde	
	n	Φ_{B0} (eV)	R_s (kΩ)	n	R_s (kΩ)	Φ_{B0} (eV)	R_s (kΩ)	Φ_{B0} (eV)	R_s (kΩ)
0	3,21	0,888	7,71	5,22	5,97	0,773	6,22	0,905	8,92
2	5,60	0,795	6,64	6,42	3,72	0,756	3,86	0,774	8,87
6	6,26	0.782	6,59	6.52	3.64	0.748	3,79	0.759	8,74
10	6,42	0,773	6,52	6,91	3,58	0,740	3,66	0,748	8,64
14	6,57	0,770	6,45	6,98	3,51	0,733	3,54	0,745	8,56
18	6,89	0.768	6,11	7,02	3.12	0.721	3,32	0.792	8,49
22	7,03	0,744	5,81	7,52	2,04	0,711	2,76	0,769	8,23

Ayrıca Norde yöntemi ile elde edilen R_s değeri Cheung fonksiyonlarından daha büyüktür. Bunun nedeni, Cheung fonksiyonları ileri beslem akım grafiğinin bükülmeye başladığı noktadan itibaren hesaplanırken, Norde fonksiyonu tüm ileri beslem akım değerleri göz önünde bulundurularak hesaplanması ile açıklanabilir [98, 67].

Üç farklı yöntem kullanılarak hesaplanan Φ_{B0} yaklaşık aynı radyasyon bağımlılığını göstermektedir ve birbiriyle uyum içindedir. Bununla birlikte, Cheung fonksiyonlarından hesaplanan Φ_{B0} değerleri, I-V ve Norde yöntemleri kullanılarak elde edilenlerden daha küçüktür. Bunun sebebi kullanılan hesaplama yönteminin niteliği ile açıklanır.

Sonuç olarak bu üç yöntemin sonuçları karşılaştırıldığında uyumsuz gibi görünse de hesaplama yöntemleri ve bu parametrelerin voltaj bağımlılığı göz önüne alındığında parametrelerin tüm değerleri birbiriyle kısmi uyum içinde olduğu sonucuna varılabilir.

Bu çalışmada üretilen Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si MPS yapısı üzerinde radyasyon etkilerinin anlaşılabilmesi için incelenmesi gereken bir diğer parametre de arayüzey durumlarıdır (N_{ss}). MIS/MPS yapılarda, doğal ya da yapay yollarla oluşturulan yalıtkan tabaka ile yarıiletken arasında, enerjileri yasak enerji bant aralığına karşılık gelen çok sayıda istenmeyen arayüzey durumları (N_{ss}) oluşur. Oluşan arayüzey durumları, yapının elektriksel özelliklerinde değişimlere yol açar. N_{ss}'in enerjiye bağlı dağılımının belirlenmesi ise, aygıtın güvenilir elektriksel karakteristiklerinin elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Pozitif voltaj bölgesinde ln(I)–V grafiğinin lineer bölgesinin eğiminden hesaplanan n ve Φ_{B0}

değerleri uygulanan voltajdan bağımsızdır. Çünkü bu lineer bölgede eğim sabit olduğundan n ve Φ_{B0} değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmez. Ancak lineer bölge sonrasında, uygulanan voltajın artmasıyla birlikte n ve Φ_{B0} değerleri voltaja bağlı olarak değişmektedir ln(I)–V grafiğinde yüksek voltaj değerlerinde eğrinin bükülmeye başladığı bölgede seri direnç R_s etkisi baskın iken, düşük ve orta beslem voltajlarında ise N_{ss} daha baskın bir etki göstermektedir. Arayüzey tabakası ile yarıiletkenin temas ettiği bölgede N_{ss}'in enerjiye bağlı dağişimi yasak enerji bant aralığı boyunca konuma göre farklılık göstermektedir. N_{ss}'in bu enerji dağılımı, voltaja bağlı idealite faktörü (n(V)) ve etkin bariyer yüksekliği (Φ_e) dikkate alınarak elde edilebilir [138].

$$n(V) = \frac{q}{kT}\left(\frac{V}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}\right) = 1 + \frac{d_i}{\varepsilon_i}\left[\frac{\varepsilon_s}{W_D} + qN_{ss}\right] \tag{7.10}$$

$$\Phi_{\mathrm{e}}(\mathrm{V}) = \Phi_{\mathrm{B0}} + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right)V \tag{7.11}$$

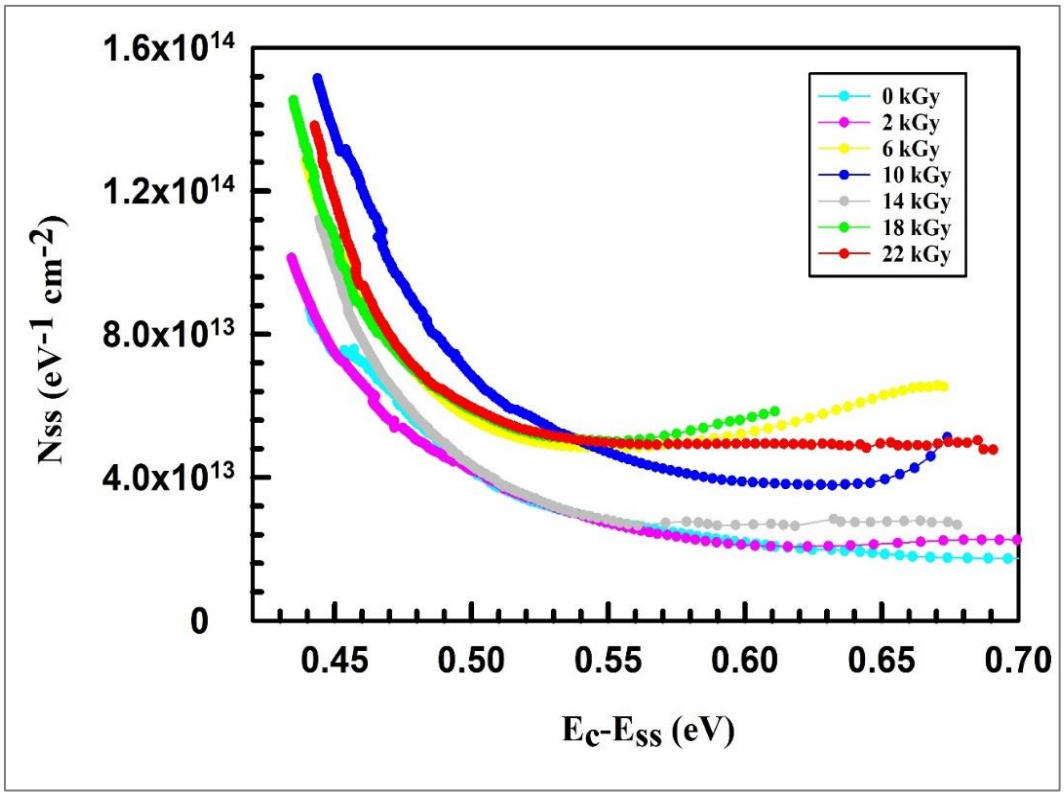
Eş. 7.10'da W_D tükenim tabakası genişliği (Bu çalışmada C^{-2}-V eğrisinden elde edilen W_D değerleri Çizelge 7.3'de verilen değerlerdir.), d_i arayüzey tabakası kalınlığı, ε_s ve ε_i ise sırasıyla yarıiletken malzemenin ve arayüzey tabakanın dielektrik sabitleridir. n-Si yarıiletken Schottky diyotlar için; yarıiletkenin yasak enerji bant aralığının ortasından (E_{ss}), iletkenlik bandının alt kenarına (Ec) kadar olan enerji Eş. 7.12 ile ifade edilir [138]:

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_{\mathrm{e}} - V) \tag{7.12}$$

MIS veya MPS tipi yapılarında arayüzey tabaka kalınlığı 30 Å'dan büyük olduğunda, arayüzey durumları yarıiletken ile dengededir. Yani arayüzeydeki elektronlar yarıiletken ile yük alışverişinde bulunurlar. Arayüzey tabakası kalınlığı 30 Å'dan küçük olduğunda ise, arayüzeydeki elektronlar metal ile yük alışverişinde bulunurlar. Arayüzey durumlarının varlığı her iki durum için n'in 1'den büyük çıkmasına sebep olur. Card tarafından N_{ss}'in enerjiye (E_c-E_{ss}) bağlı değişimi, n ve engel yüksekliğinin voltaja bağlı değiştiğini kabul ederek aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [138]:

$$N_{ss}\,(V) = \frac{1}{q}\left[\frac{\varepsilon_i}{d_i}(n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D}\right] \tag{7.13}$$

İleri beslem ln(I)-V verilerinden Eş. 7.10 ve Eş. 7.13 kullanılarak Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si MPS yapısı için N_{ss}' in enerjiye (E_c-E_{ss}) bağlı değişimi hesaplandı. Bu hesaplamalarda, n-Si için dielektrik sabiti ε_s =11,8ε_0 ve arayüzey tabaka kalınlığı di=404 nm olarak alınmıştır. Polimer arayüzey tabakasının dielektrik sabiti ε_i =408ε_0 (Şekil 7.27' den), ε_0 (=8,5x10^{-14} F/cm) boş uzayın dielektrik sabiti ve W_D tükenim tabakası genişliğidir (Çizelge 7.3' den). Dolayısıyla Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısı beta radyasyonundan önce ve belirli beta radyasyon dozlarından sonrası için N_{ss}–(E_c-E_{ss}) grafikleri Eş. 7.12 ve Eş. 7.13 kullanılarak Şekil 7.8' de verilmiştir.



Şekil 7.8. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra N_{ss}-(E_c-E_{ss}) grafiği

Şekil 7.8' de elde edilen N_{ss}, yarıiletkenin yasak enerji bant aralığının ortasından (E_{ss}), iletkenlik bandının (E_c) alt kenarına doğru artmakta olduğunu ifade eder. Sonuç olarak yarıiletkenin yasak enerji bant aralığında arayüzey durumları oluşmakta ve oluşan bu arayüzey durumlarının yoğunluğunun arttığını göstermektedir. Beta radyasyonundan sonrası MPS yapısında arayüzey durumlarının konsantrasyonunun ~10^{13} $eV^{-1}cm^{-2}$ mertebesinden ~10^{14} $eV^{-1}cm^{-2}$ mertebesine yükselmiş olup bir yarıiletken aygıt için bu uygun bir değerdir [162]. Sonuç olarak, (0,03 Gr: PVA) arayüzey tabakasının kullanılması, N_{ss}'in yarıiletkenler

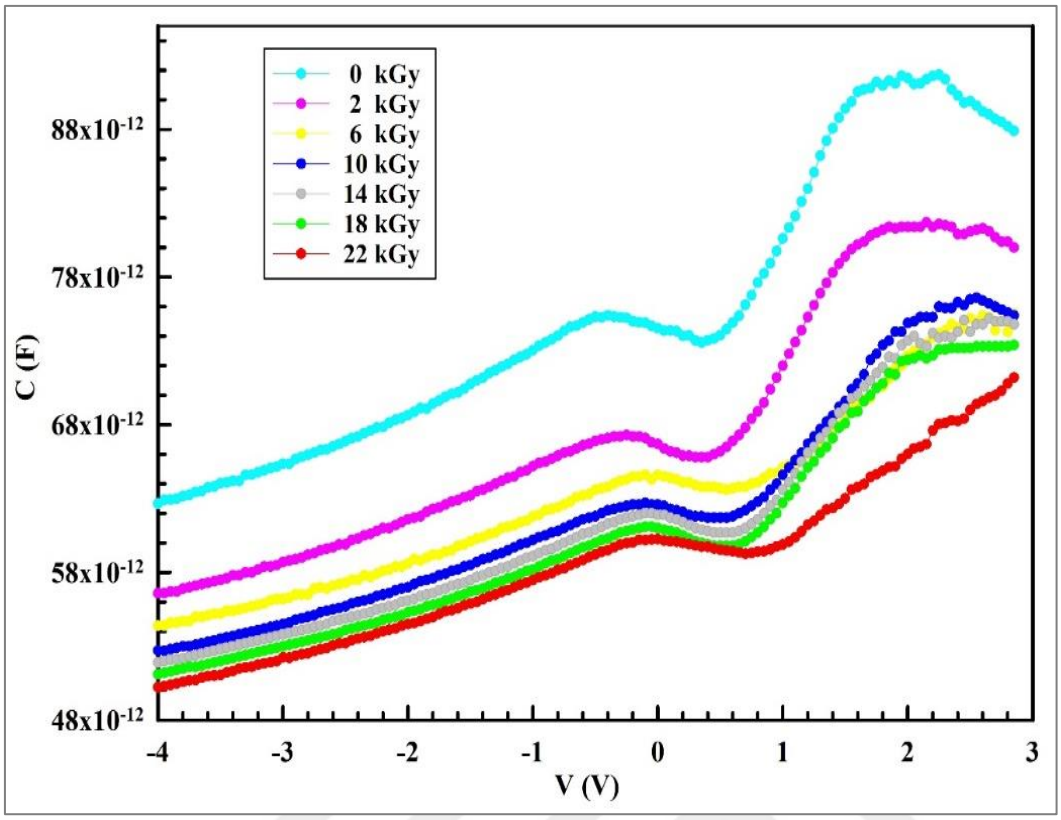
için uygun mertebede elde edilmesi ve doğrultma oranı (RR) ile R_{sh} değerlerinin artışı bakımından yapının performansının arttırdığını da ortaya koymaktadır.

7.3. Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) Karakteristiklerinde Beta Radyasyonu Etkisi

Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısı üzerine radyasyonun etkisinin doğru olarak değerlendirilebilmesi için yapılan ölçümlerden bir diğeri de kapasitans-voltaj (C-V), kondüktans-voltaj (G/ω- V) ölçümleridir. Kapasitans özellikleri, yarıiletken cihazların yapısal ve fiziksel parametrelerinin değerlendirilmesi için gereklidir ve yarıiletken cihazların modellenmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Voltaja bağlı yapılan ölçümlerde 1MHz frekansında, 50 mV_{rms}'lik bir osilasyon voltajı ile uyarıldı. Daha sonra dc voltajı -4V ≤ V ≤3V aralığında gerilim değerine kadar 30 mV'luk adımlarla değiştirilerek tersinim bölgesinden yığılım bölgesine kadar C-V ve G/ω- V ölçümleri elde edildi. Deneysel olarak beta radyasyonundan önce ve belirli beta radyasyon dozlarından sonra C-V ve G/ω-V ölçüm sonuçları kullanılarak çizilen grafikler ve yapılan hesaplamalar sonucu difüzyon potansiyeli (V_D), verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_D), engel yüksekliği (Φ_B), verici katkı atomların sayısı (N_D), tüketim tabakası kalınlığı (W_D), Fermi enerji seviyesi (E_F), maksimum elektrik alanı (E_m), arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) ve seri direnç (R_s) değerleri gibi temel elektriksel parametreler elde edilmiş ve literatürle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Bu çalışmada, uzun zaman sabitine sahip arayüzey durumları yapıya uygulanan düşük frekanslı harici ac sinyalini takip edip ölçülen kapasitansa katkıda bulunabilir. Elde edilen bu katkılı verilerden MPS yapıya ait temel diyot parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan ve yapıya uygulanan taşıyıcı yoğunluğu gerçek değeri yansıtmayacaktır. Bu yüzden harici sinyalin frekansı yeterince yüksek (1MHz) tutulmuştur. Böylece arayüzey durumlarının kapasitans eğrilerine olası katkısı ve aygıt parametrelerine etkisi ihmal edilebilecektir [62].

MPS yapısına ait 1MHz frekansında, karanlık ortamda, oda sıcaklığında (300 K), beta radyasyondan önce ve sonra ölçülen C-V ve G/ω-V eğrileri Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da verilmiştir.



Şekil 7.9. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra C-V grafiği

Şekil 7.9'da C-V eğrilerinde radyasyondan önce ve sonra üç farklı bölgenin oluşmaktadır. Bu bölgeler tersinim (-4V ≤V < -1,5V), tükenim (-1,5 V <V <1,5 V) ve yığılım (1,5 V <V ≤ 3 V) bölgelerdir [58]. Radyasyon uygulandıktan sonra n-Si'de baskın olan elektronlar, geride deşikler (holler) bırakarak metal yüzeyin önünden difüze olur/geçer, böylece metal ve n-Si yüzeylerinin önü ters çevrilir. Bu nedenle, diyot ideal durumda maksimum kapasitansa (C=Q/V) sahiptir, ancak yüksek frekansta seri direnç nedeniyle içbükey bir eğrilik verebilir. C değeri genellikle yığılım bölgesine kadar artan voltajla artar, ancak bazı bölgelerde pik adı verilen bazı tepeler oluşturabilir. Bu pikler, özellikle arayüzey tabakası ile yarıiletken arasında bulunan düşük frekanslarda arayüzey tuzaklarının özel bir dağılımı nedeniyle tersinim ve tükenme bölgelerinde meydana gelebilir, ancak daha yüksek frekanslardaki yığılım bölgesinde seri direnç nedeniyle pik oluşur.

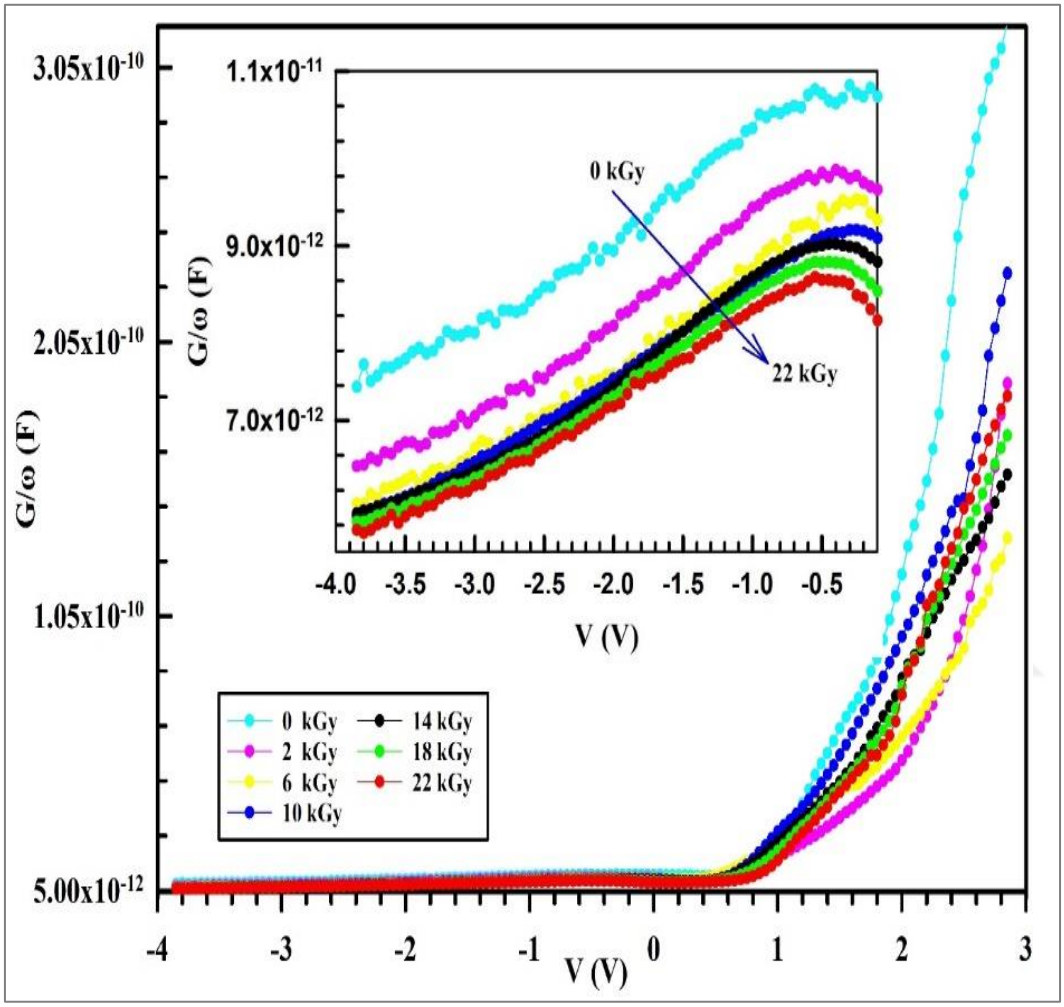
Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da, artan radyasyon dozu ile kapasitans ve iletkenlik eğrileri radyasyondan önceki değeri ile karşılaştırıldığında azalmaktadır. Bu azalışın nedeni yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde radyasyondan dolayı oluşan arayüzey tuzak yüklerinin azalmış olmasından kaynaklanmaktadır [139-145]. Radyasyondan kaynaklanan kusurlardan

biriside arayüzey tuzaklarıdır ve oluşan bu kusurun miktarı yapı tarafından soğurulan radyasyon dozuna bağlıdır. Arayüzey tuzaklarının oluşumu, MPS yapısı radyasyona maruz kaldığında yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde radyasyon etkisi ile elektron-deşik çifti meydana gelir. Uygulanan elektrik alan etkisi altında elektron-deşik çiftleri birbirinden ayrılır. Elektronlar girişe (metale) hareket ederken deşiklerde bir kısmı yalıtkan içerisinde tuzaklanırken bir kısmı da yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde arayüzey tuzakların oluşumasına neden olur [144-148]. Bu arayüzey tuzakları rekombinasyon merkezleri olarak işlev gördüğünden, gevşemelerine veya ömürlerine bağlı olarak radyasyon ve elektrik alan etkisi altında çok sayıda elektron yakalayabilir veya yayabilir. Beta radyasyonundan sonra kapasitans değerindeki gözlemlenen azalmalar, kristal kusurları ve net katkı konsantrasyonu nedeniyle yük taşıyıcılarının sayısının azalmasına da atfedilebilir. Işınlamadan sonra uygulanan tüm öngerilim voltajındaki kapasitans değerindeki azalmanın diğer önemli nedeni, arayüzey kusur yoğunluğundaki artmasına atfedilebilir. Çünkü ışınlamadan sonra kapasitansta meydana gelen azalma, n-Si alttaş içindeki alıcı veya verici tipi katkı atomlarının deaktivasyonunun sonucudur. Başka bir deyişle, verici tipi yüzey durumları (N_{ss}), elektriksel özellikler üzerinde alıcı tipi olanlardan daha etkilidir. Bazı araştırmacılara göre kapasitans değerlerindeki azalmanın nedeni, radyasyon ile üretilen elektron-deşik çifti oluşumu ile sızıntı akımının artmasından kaynaklanıyor olabilir [76, 141, 146].

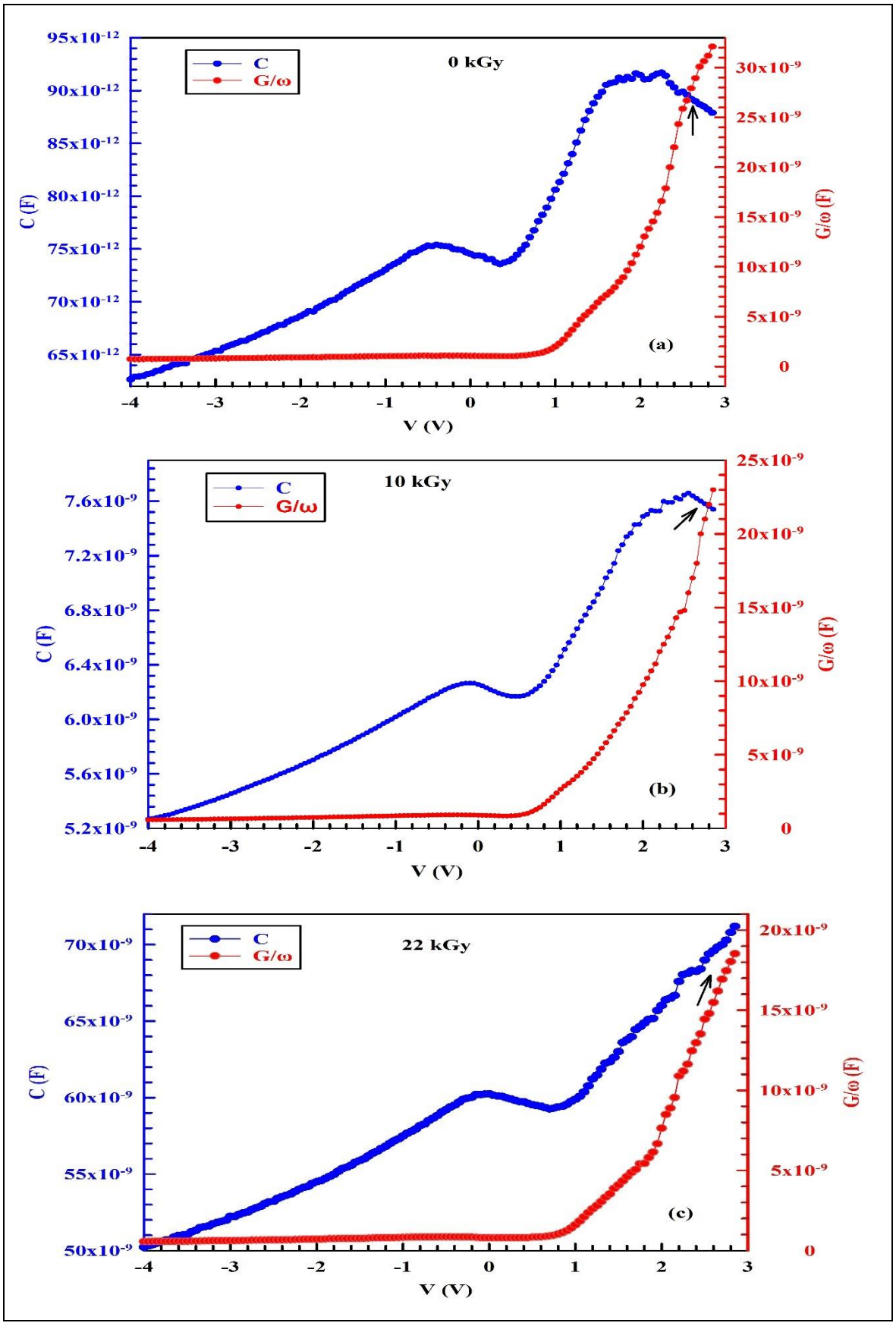
Şekil 7.9'da C-V grafiğinde tükenim bölgesinde -0,8 V <V <0,1 V aralığında pik verdiği görülmektedir. Bu pikin büyüklüğü radyasyon dozu arttıkça azalmakta ve pozitif voltajlara doğru kaymaktadır. C-V eğrilerinde görülen bu pik (0,03 Gr:PVA)/n-Si arayüzeyinde oluşan arayüzey durumlarının (bu bölgede lokalize olduğunun) özel bir dağılımına ve seri direnç etkisinin bir sonucudur. Pozitif ön gerilime doğru oluşan bu kayma arayüzey polimer tabakasında tuzaklanan negatif sabit oksit yüklerden kaynaklanabilir [77, 149, 150].

Şekil 7.10'da MPS yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra kondüktans-voltaj (G/ω-V) eğrisi verildi. Şekil 7.10'da görüldüğü gibi G/ω-V değerlerinin C değerleri gibi radyasyon dozuna bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, G/ω-V eğrilerinde farklı radyasyon dozları altında tükenim ve yığılım bölgesinde C-V eğrilerine benzer davranış sergilemektedir. Bu davranış, tükenim bölgesinde oluşan arayüzey durumları ile yığılım bölgesinde oluşan seri dirence atfedilebilir. Yapının kondüktans eğrileri artan radyasyon dozu ile azalmaktadır. Kondüktans değerlerindeki azalma, tüketim tabakası genişliğinin

(W_D) artması ile radyasyon sonucu oluşan kusurlara bağlı olabilir. Bu kusurlar, arayüzeyin silisyum yakınında oluşturdukları kafes boşlukları üretiminden dolayı kondüktans değerlerinde azalmasına sebep olabilir. Ayrıca bazı araştırmacılar bu azalışı katkı konsantrasyonuna atfetmişlerdir [132, 151].



Şekil 7.10. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra G/ω-V grafiği



Şekil 7.11. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısının ait (a) 0 kGy, (b) 10 kGy ve (c) 22 kGy radyasyon dozlarında C-G/ω -V grafikleri

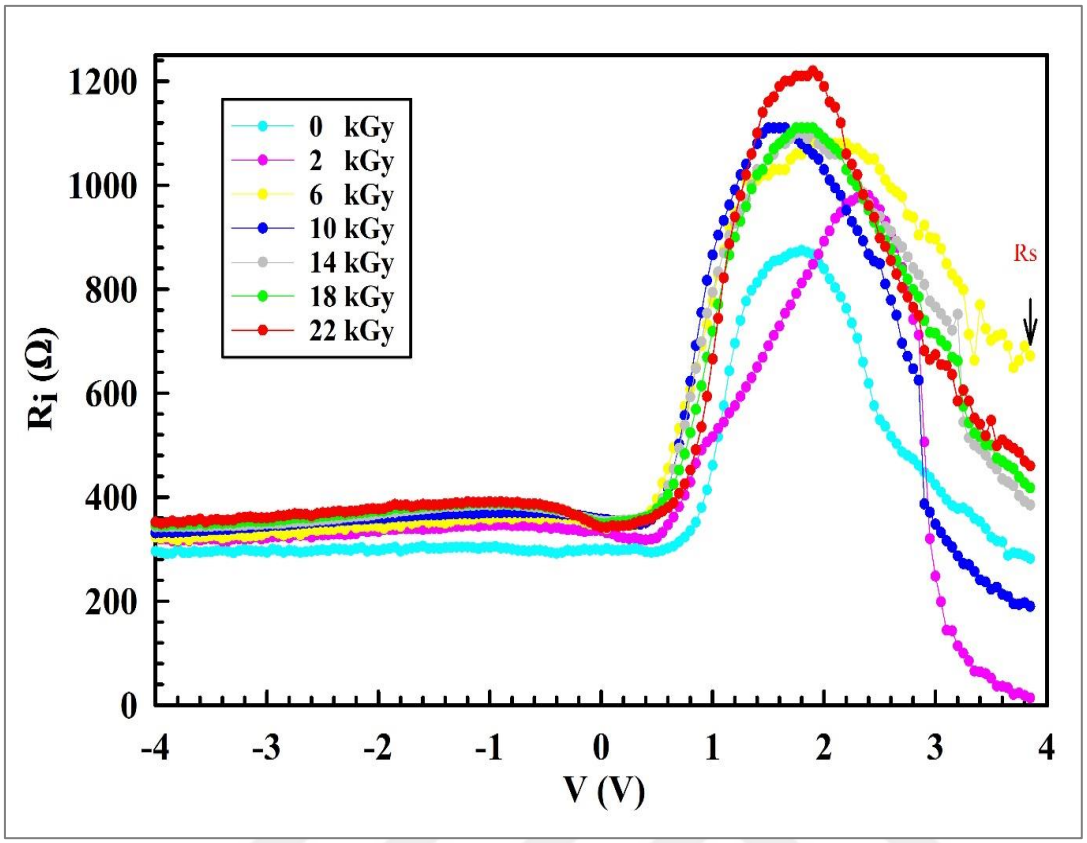
Ayrıca MPS yapısına ait Şekil 7.9'daki C-V ve Şekil 7.10'daki G/ω-V grafikleri incelendiğinde yığılım bölgesinde radyasyon yokken ve 10 kGy'e kadar beta radyasyonu uygulandıktan sonra indüktive davranış sergilediği görülmektedir. Bu durumu daha detaylı incelemek için Şekil 7.11.a'da yığılım bölgesinde radyasyon olmadığında kapasitans değerinin azaldığını, kondüktans değerinin ise arttığını göstermektedir. Şekil 7.11.b'de, 10 kGy beta radyasyonu MPS yapısına uygulandığında kapasitans ve kondüktans değerlerinin eşitlendiği görülmektedir. Şekil 7.11.c'de ise, MPS yapısı 22 kGy beta radyasyonu uygulandığında kapasitans özelliğinin artarken kondüktans değerinin azaldığı göstermektedir. Hem Şekil 7.11.a-c'de hem de Şekil 7.9 ve Şekil 7.10 ile karşılaştırıldığında açıkça görüldüğü gibi, C-V eğrileri yığılım bölgesinde, radyasyondan önce ve daha düşük radyasyon dozlar için belirgin bir tepeye sahipken, G/ω değeri aynı bölgede hızla artmaktadır. Bu davranış literatürde indüktive davranış olarak bilinir [152, 153]. Yani, numune yeterince yüksek pozitif öngerilim bölgelerinde kapasitör ($Y=1/Z=G+j\omega C$) yerine bir iletken gibi davranır, ancak bu davranış Şekil 7.11.c'de 22 kGy için ortadan kalkar. Çünkü artan dozla birlikte, iletim bandına uyarılan elektron sayısı azalır, bu nedenle G/ω'deki artış hızı azalır ve C değeri de artmaya başlar.

MS veya MPS tipi yapılar için diğer önemli parametrelerden biri özellikle yığılım bölgesinde oluşan seri direnç (R_S) değeridir. MPS yapısına ait seri direnci hesaplamak için birçok yöntem vardır. Bu çalışmada C-V ölçümleri kullanılarak elde edilen R_s değerleri, Nicollian ve Brews tarafından geliştirilen admitans metodu kullanılarak, 1 MHz frekansında beta radyasyonundan önce ve sonra Eş. 7.14'den elde edilmiştir [28].

Bu yönteme göre, yüksek frekansta R_i, R_s'nin gerçek değeri olarak kabul edilir. Bu nedenle, R_s'nin gerçek değeri, kuvvetli yığılım bölgesine karşılık gelen kapasitans ile iletkenlik (C_m ile G_m) değerleri ile hesaplanır. R_s değeri, Eş. 7.14 kullanılarak uygulanan ön gerilim için C_m ve G_m verilerinden hesaplanmaktadır [154].

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \tag{7.14}$$

Bu formül voltaja bağlı R_s değerlerini elde etmek içinde kullanılır ve bu yapının iletim mekanizmaları hakkında da bize önemli bilgiler verir. Şekil 7.12'de görüldüğü gibi R_s değerleri hem radyasyon dozlarına hem de uygulanan gerilime bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 7.12. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra ln(R_i)-V grafiği

Şekil 7.12'de özellikle yığılım bölgesinde eğrinin aşağı doğru büküldüğü görülmektedir. ln(R_i)-V grafiği hem radyasyonsuz hem de artan radyasyon dozu için yaklaşık 2V civarında pik vermekte ve bu pik değerleri artan radyasyon dozu ile artarak konumu pozitif voltaj bölgesine doğru kaymaktadır. Bu piklerin meydana geldiği gerilim bölgelerinde arayüzey durumlarının daha yoğun şekilde yerleşmiş olduğuna atfedilebilir [155-160].

Piklerin genliği artan ışınlama dozları ile artma eğilimi göstermektedir. Bu artış tuzaklanmış yüklerden kaynaklanmaktadır [42, 161]. Söz konusu etkiler, kapasitans eğrileri üzerinde de ortaya çıkmaktadır. Ayrıca radyasyon dozu arttığında elde edilen büyük R_s değeri, kirlilik atomlarının varlığına ve radyasyon nedeniyle oluşan bölgesel tuzaklanmış yüklerin varlığına atfedilebilir. Bu bağlamda, yarıiletken güçlü yığılım bölgesinde veya yeterince yüksek ileri ön gerilim altındayken R_i değeri, R_s'nin gerçek değerine karşılık gelir. Şekil 7.12'de, radyasyon dozu arttıkça R_i değerinin yükseldiği görülür. R_s değerlerinin, başta kondüktans karakteristikleri olmak üzere birçok parametre üzerinde, özellikle de yığılım bölgesinde etkili olduğu görülmüştür. Bu durum, R_s'nin hesaplamalarda dikkate alınmasının ne kadar

önemli olduğunu göstermektedir. Her radyasyon dozu için kuvvetli yığılım bölgesinde (3V) elde edilen deneysel R_s değerleri Çizelge 7.3'de verilmiştir.

MPS yapısının elektriksel karakteristikleri polimer (0,03 Gr: PVA) ve yarıiletken arasındaki arayüzey kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Bu durumu belirten en önemli faktör, N_{ss} olarak adlandırılan arayüzey durum yoğunluğudur. Düşük arayüzey kalitesi daha büyük N_{ss} değerine neden olur. Arayüzey durumları, arayüzeyin yasak bant aralığı içinde 0,1 eV ile 1 eV'luk bir enerji aralığında dağılabilir ve böylece birim enerji başına arayüzey durum yoğunluğu 10^{15} $eV^{-1}cm^{-2}$ değerine kadar yükselebilir. N_{ss} böyle yüksek bir değere sahip olduğunda, bu durum aygıtların performansının düşmesine ve hatta bozulmasına neden olabilir [162]. Arayüzey durum yoğunluğunu belirlemek için; iletkenlik, yüksek frekans (HF)- düşük frekans (LF) kapasitans (C_{HF}-C_{LF}) ve Hill-Coleman gibi bazı yöntemler kullanılmaktadır [56, 163, 164]. İlk iki yöntem, N_{ss}' i hesaplamak için kapasitans voltaj ölçüleri ile hesaplanır.

Bu çalışmada MPS yapısına beta radyasyonu uygulanmadan önceki (0 kGy), N_{ss} dağılımı yüksek-düşük frekans (C_{HF}-C_{LF}) kapasitans yöntemi kullanılarak hesaplandı. Hesaplamadaki arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), C-V eğrisine arayüzeyin kapasitans katkısından elde edilir [160]. C_{HF}-C_{LF} yönteminden $N_{ss'in}$ hesaplanması için Eş. 7.15 kullanıldı,

$$N_{SS} = \frac{1}{qA}\left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i}\right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i}\right)^{-1}\right] \tag{7.15}$$

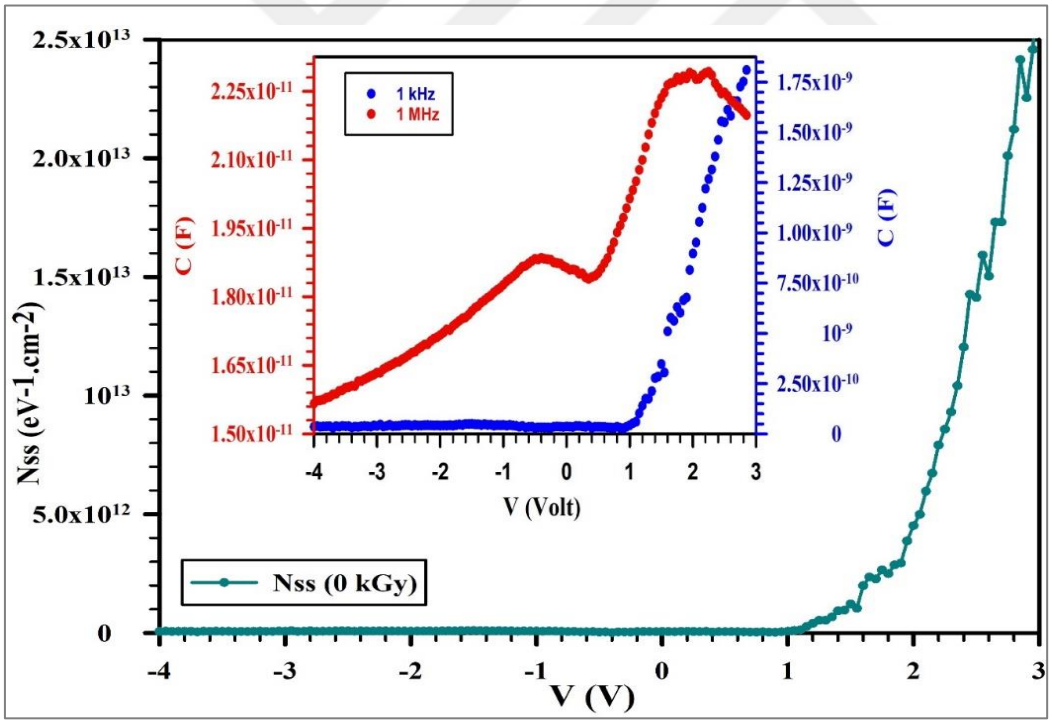
burada C_i arayüzey tabakasının kapasitansıdır. MPS yapısının kuvvetli yığılma bölgesindeki maksimum kapasitansı arayüzey tabakasının kapasitansını verir. Dolayısıyla, bu yalıtkan tabakanın kapasitansı (C_i) ise;

$$C_i = C_{ma}\left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega\, C_{ma}}\right)^2\right] = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0 A}{d_i} \tag{7.16}$$

eşitliğinden C_i =9,5 nF olarak elde edilmiştir. Eş. 7.16'daki A (=7,85x10^{-3} cm^2) MPS yapısının doğrultucu kontak alanı, ε_i (=408ε_0) arayüzey tabakasının dielektrik sabiti ve ε_0=8,85x10^{-14} F/cm boşluğun dielektrik sabitidir. Bu değerler kullanılarak Eş. 7.16'dan metal

ile yarıiletken arasına büyütülen polimer (0,03 Gr: PVA) tabakasının kalınlığı d_i = 404 nm olarak elde edilmiştir.

MPS yapısına beta radyasyonundan önce (0 kGy) uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak arayüzey durumlarının dağılım grafiği Şekil 7.13'de verilmiştir. Hesaplamada, düşük ve yüksek frekans olarak sırasıyla 1kHz ve 1MHz'de ölçülen kapasitansın voltaja bağlı değişim değerleri kullanılmıştır. Şekil 7.13'de, MPS yapısına ait beta radyasyonundan önce (0 kGy) arayüzey durumlarının maksimum yoğunluğu ~3V civarında 2,5x10^{13} $eV^{-1}cm^{-2}$ olarak elde edildi. Polimer (0,03 Gr: PVA) ile yarıiletken arasındaki arayüzey durumlarının bu bölgede yoğun olduğunu göstermektedir [165-168]. İdeal yarıiletken yapılar için N_{ss} değeri yaklaşık olarak ~10^{12} $eV^{-1}cm^{-2}$ dir. Bu sonuç, MPS yapısının beta radyasyonundan önce (0 kGy), (0,03 Gr: PVA)/n-Si arayüzeyinde oluşan arayüzey durumların MPS yapının ideal özelliklerinden biraz sapmasına neden olduğunu göstermektedir.

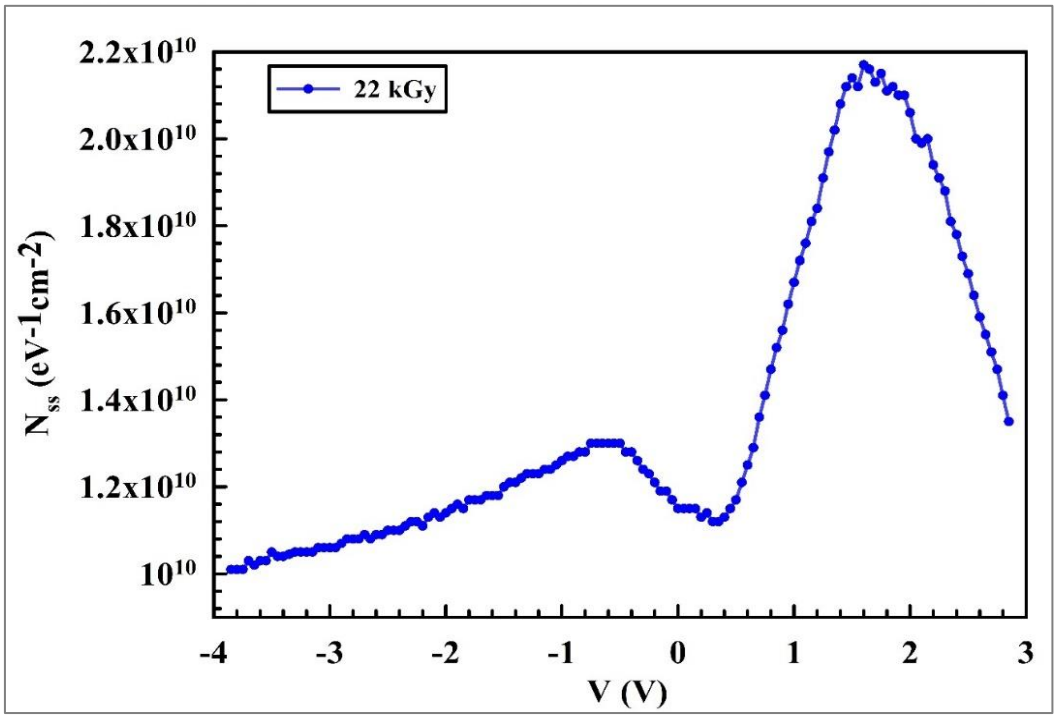


Şekil 7.13. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısına beta radyasyonundan önce (0 kGy) N_{ss}-V grafiği (Ek: 1 kHz ve 1 MHz frekanslarında 0 kGy'de Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısının C-V grafiği)

Ayrıca Eş. 7.17 kullanılarak radyasyondan önce (0 kGy) ve beta radyasyonundan sonra (22 kGy) oluşan arayüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı dağişim grafiği elde edilerek Şekil 7.14'de verilmiştir.

$$N_{ss} = \frac{1}{qA}\left[\left(\frac{1}{C_{Befor}} - \frac{1}{C_i}\right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{After}} - \frac{1}{C_i}\right)^{-1}\right] \quad (7.17)$$

Şekil 7.14' de radyasyondan önce ve 22 kGy beta radyasyon dozundan sonra elde edilen N_{ss} grafiğinde sırasıyla -0,5 V ve 1,5 V' ta iki tane pik vermektedir. Radyasyon etkisi altında ikinci tepe noktasının büyüklüğü artar ve tepe değeri ~1,5V civarında N_{ss} değeri yaklaşık $2{,}2x10^{10}$ $eV^{-1}cm^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu N_{ss} değeri yapının performansını bozmayacak düzeyde uygun bir değer olarak elde edilmiştir. Radyasyon altında (22 kGy) elde edilen bu değer 0,03 Gr:PVA arayüzey tabakasına sahip MPS yapısının radyasyona karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.14. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısına 22 kGy beta radyasyonu uygulandıktan sonra N_{ss} -V grafiği

Şekil 7.13 ve Şekil 7.14 karşılaştırıldığında MPS yapısının radyasyonsuz (0 kGy) ve 22 kGy beta radyasyonundan sonra elde edilen arayüzey durum yoğunluğu sırasıyla $\sim 10^{13}$ ve $\sim 10^{10}$ mertebesinde elde edilmiştir. Radyasyon sonrasında arayüzey durumundaki azalma, beta radyasyonundan dolayı yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yüklerin yeniden düzenlenip yapılanmasına ve rekombinasyon merkezlerinin sayısındaki azalmaya atfedilmektedir [145, 150, 169-174].

Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si MPS yapısının yüksek frekansta (1MHz), ters beslem voltajı (V_R) ile ilişkili olan tükenim bölgesi kapasitansı aşağıdaki Eş. 7.18 ile ifade edilir.

$$C^{-2} = \frac{2}{q\varepsilon_s\varepsilon_0 A^2 N_D}(V_D + V_R) \tag{7.18}$$

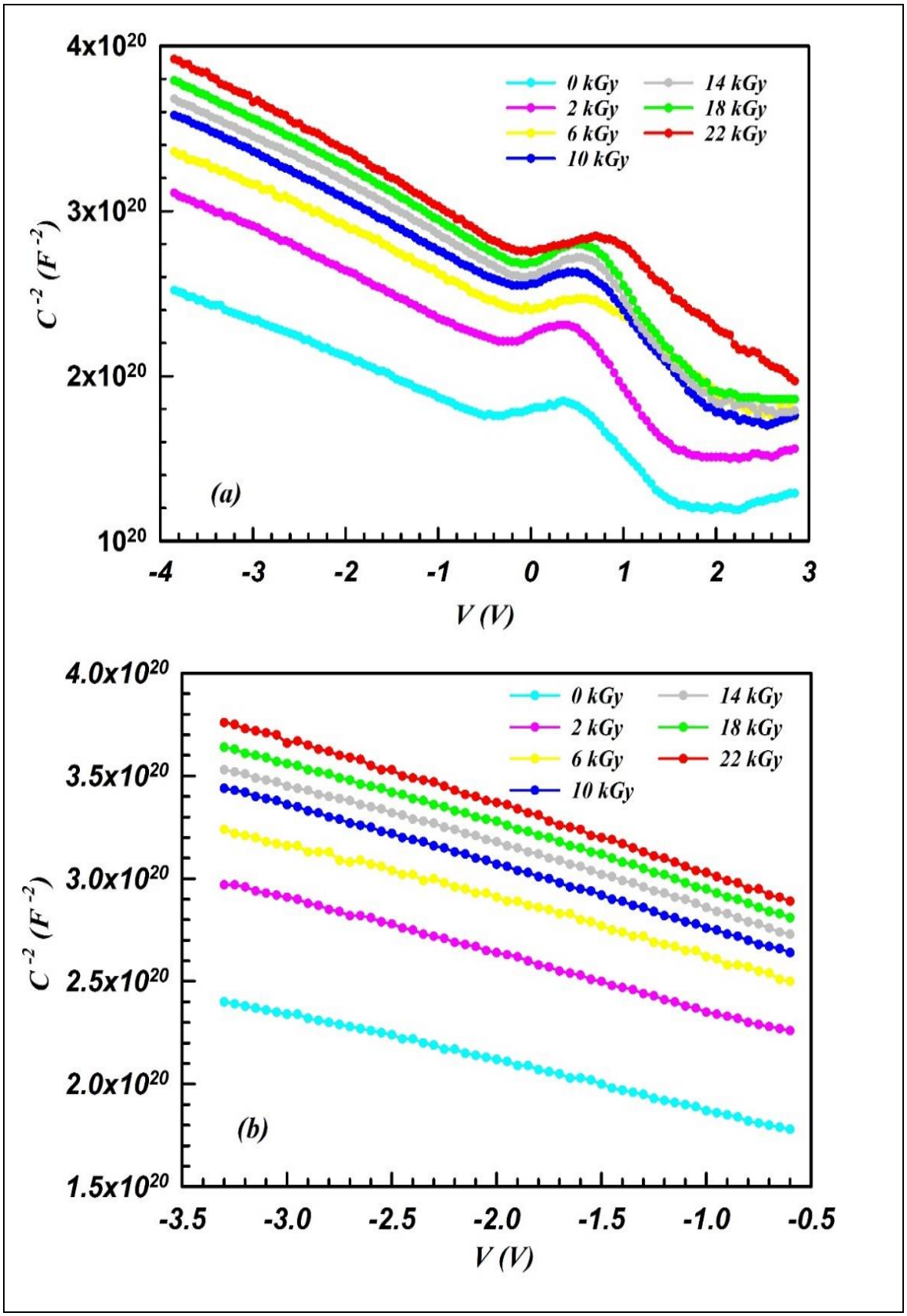
Beta radyasyonundan önce ve sonra C^{-2}-V eğrileri Şekil 7.15.a'da verilmiştir. C^{-2}-V eğrileri -3,5 V<V < -0,5 V aralığında lineer davranış (Şekil 7.15.b) göstermektedir. Şekil 7.15.b'deki bu lineer davranış arayüzey durumlarının yüksek frekanslarda ac sinyalini takip edemediğini ve verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_D)'nun her yerde eşit dağılımına atfedilebilir.

MPS yapısında oluşan bariyer yüksekliği (Φ_B), Fermi enerji seviyesi (E_F), difüzyon potansiyeli (V_D), maksimum elektrik alan (E_m), tükenim tabakası genişliği (W_D) ve verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_D) gibi elektriksel parametrelerin beta radyasyonuna bağlı değişiminin hesaplanması gerekmektedir. Negatif voltaj bölgesinde C^{-2}-V grafiğinin lineer bölgesi (Şekil 7.15.b) kullanılarak beta radyasyonundan önce ve sonrası için elektriksel parametreler hesaplanabilir. Şekil 7.15.b'deki lineer bölgenin kesişme voltajı (V_0) kullanılarak difüzyon potansiyeli (V_D) ifadesi Eş. 7.19 ile bulunabilir.

$$V_D = V_0 + \frac{kT}{q} \tag{7.19}$$

Hesaplamalar yapılırken dikkat edilmesi gereken; kesişme gerilimi (V_0) yarıiletkenin yasak enerji bant aralığından büyük olduğunda formüllere düzeltme faktörünün (c_2) eklenmesi gerekir [175]. Aşağıda verilecek olan formüllerde V_0 değeri yerine c_2V_0 kullanılmalıdır [12]. Eş. 7.20 kullanılarak düzeltme faktörü (c_2), verici katkı atomlarının yoğunluğunun teorik (N_{Dteo}=8,62x10^{16} cm^{-3}) ve deneysel (N_{Dexp}) değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$c_2 = \frac{N_{Dexp}}{N_{Dteo}} \tag{7.20}$$



Şekil 7.15. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra (a) $1/C^2$-V ve (b) $1/C^2$-V' nin lineer bölgesine ait grafikleri

Çizelge 7.3. C-V ve G/ω-V ölçümlerinden elde edilen elektriksel parametreler

Beta Radyasyonu (kGy)	ELEKTRİKSEL PARAMETRELER								
	c_2	Vo (eV)	V_D (eV)	N_D (x10^{15} cm^{-3})	E_F (eV)	W_D (x10^{-5} cm)	E_m (x10^4 V/cm)	Φ_B (eV)	R_s (3V) (Ω)
0	0,096	0,729	0,754	8,27	0,203	3,39	4,30	0,957	281
2	0,087	0,753	0,778	7,46	0,206	3,63	4,15	0,984	140
6	0,083	0,715	0,740	7,14	0,207	3,62	3,95	0,947	272
10	0,078	0,670	0,695	6,70	0,208	3,61	3,71	0,903	190
14	0,075	0,645	0,670	6,51	0.209	3,60	3,59	0,879	385
18	0,073	0,623	0,648	6,13	0,210	3,59	3,47	0,858	418
22	0,069	0,580	0,605	5,96	0,211	3,56	3,26	0,816	459

C^{-2}-V grafiğinin lineer bölgesinin eğimi (tanθ) Eş. 7.21 kullanılarak deneysel verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_D) hesaplanır [176]. Ayrıca, Fermi enerji seviyesi (E_F), maksimum elektrik alan (E_m), tüketim tabakası kalınlığı (W_D) ve bariyer yüksekliği (Φ_B) değerleri sırasıyla Eş. 7.22-7.25'de verilen denklemler kullanılarak hesaplanıldı [12, 68, 177, 178].

$$N_D = \frac{2}{q\ \varepsilon_s\ \varepsilon_0\ A^2\ tan\theta} \tag{7.21}$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \tag{7.22}$$

Buradaki E_F ifadesi, N_D'nin deneysel değerinden ve N_C (n-Si için =2,8x10^{19} cm^{-3}) iletkenlik bandındaki izinli durumlarının yoğunluğunun teorik değerleri kullanılarak Eş. 7.22'den elde edildi.

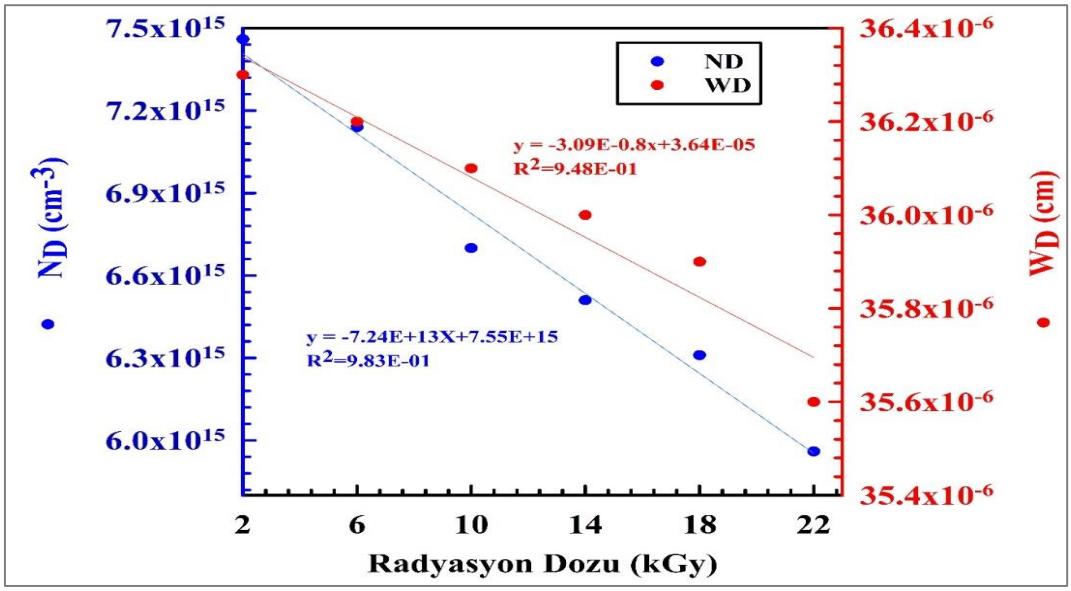
$$E_m = \left(\frac{2qN_DV_0}{\varepsilon_s\varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{7.23}$$

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S\varepsilon_0V_0}{qN_D}} \tag{7.24}$$

$$\Phi_B = V_0 + \frac{kT}{q} + E_F = V_D + E_F \quad (7.25)$$

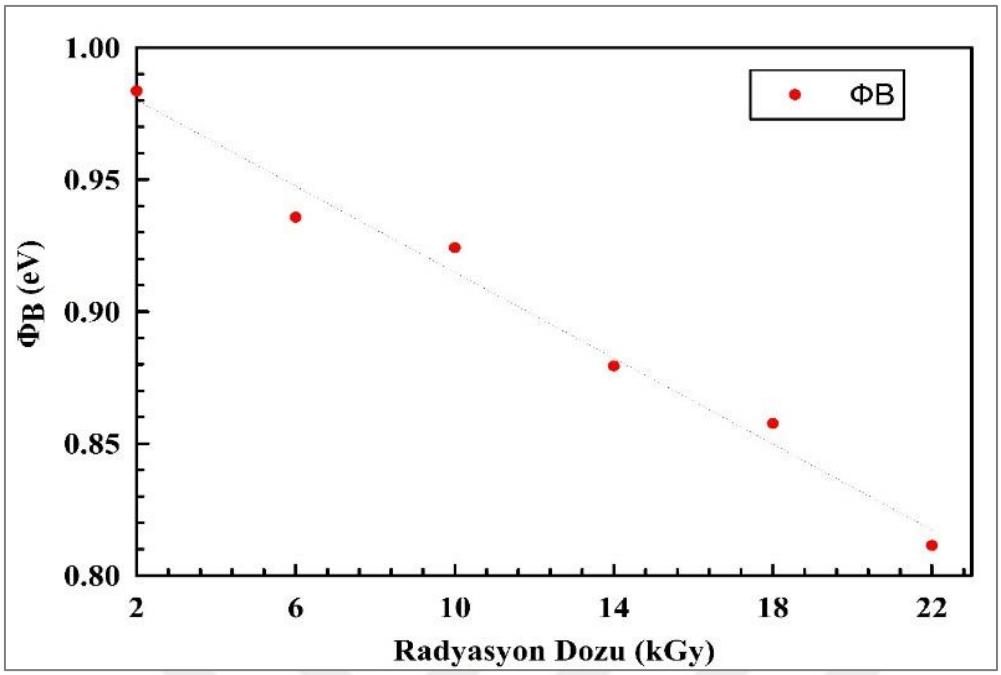
Yukardaki eşitlikler kullanılarak Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısı için beta radyasyonundan önce ve sonra elektriksel parametreler hesaplanılmış ve hesaplanan değerler Çizelge 7.3' de verilmektedir.

Şekil 7.16'da hem N_D hem de W_D radyasyon dozlarına bağlı olarak neredeyse doğrusal olarak değişmektedir. Bu, yapının radyasyona karşı tepki davranışının güçlü bir kanıtıdır.



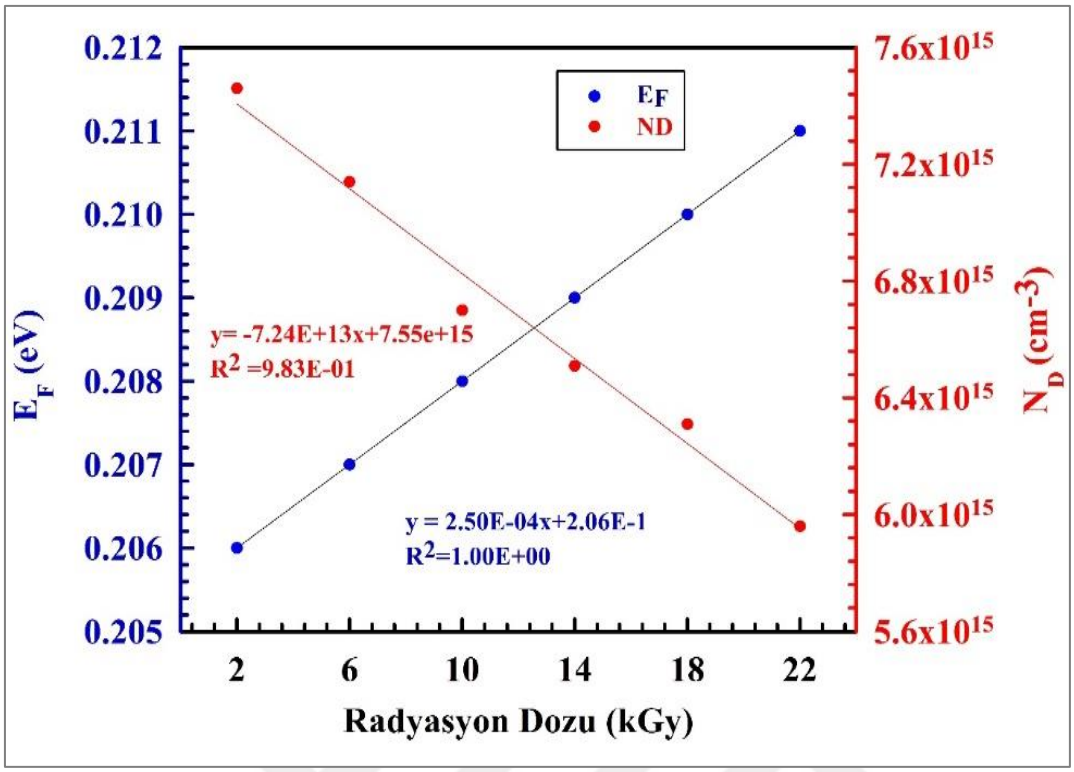
Şekil 7.16. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının N_D ve W_D parametrelerinin beta radyasyon dozlarına bağlı değişim grafiği

Şekil 7.17'de, V_0 değerindeki azalma nedeniyle Φ_B değeri 0,984 eV'dan 0,816 eV'a düşmüştür. Artan radyasyon dozuyla bariyer yüksekliğinde gözlenen azalma (tükenim tabakasındaki azalma) oluşan yüzey durumlarındaki artışın sonucudur. Bu nedenle C^{-2}-V grafiğinin kesme voltajında (V_0) bir azalmaya yol açar [145, 179].



Şekil 7.17. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının Φ_B' nin beta radyasyon dozlarına bağlı değişim grafiği

Şekil 7.18'de, verici katkı atomu yoğunluğundaki artışın Fermi enerji (E_F) seviyesinde azalmaya neden olduğunu göstermektedir. C^{-2}-V grafiğinin doğrusal kısmın eğimi artan radyasyon dozuyla birlikte artar, bu nedenle verici katkı atomlarının yoğunluğunda (N_D) bir azalma meydana gelir. Arayüzey durumları nedeniyle, düşük eğim değerlerini açıklayan ekstra kapasitans mevcuttur. Ancak, eğimdeki bu değişime arayüzde sıkışan ve tuzaktan kurtulmaları çok uzun zaman alan yükler de neden olabilir. Verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_D) radyasyon etkisinden dolayı $7{,}46x10^{15}$ cm^{-3}'ten $5{,}96x10^{15}$ cm^{-3} 'e düşmüştür. N_D değerindeki bu azalma, (0,03 Gr:PVA)/n-Si arayüzey tuzaklarının rekombinasyonu merkezi olarak davranmasının bir sonucudur. Son yıllarda literatürde MS ve MIS tipi Schottky diyotların karşılaştırılması ve bunların elektrik ve dielektrik parametrelerine ilişkin benzer sonuçlar bildirilmiştir [180-182].



Şekil 7.18. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının E_F ve N_D' nin beta radyasyon dozlarına bağlı değişim grafiği

7.4. Dielektrik Karakteristiklerinde Beta Radyasyon Etkisi

Bu çalışmada kullanılan 0,03Gr: PVA arayüzey polimer tabakasına sahip Au/(0,03Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısı karanlık ortamda, 1MHz frekansında ve geniş voltaj (5 mV adımla -4 V≤ V≤ 3 V) aralığında dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε"), kayıp tanjant (tanδ), ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}), kompleks elektrik modülüs (M*), kompleks empedans (Z*) ve faz açısı (θ) gibi dielektrik parametreleri beta radyasyonundan önce ve çeşitli beta radyasyon dozlarından sonra ölçülen kapasitans (C) ve iletkenlik (G/ω) değerlerinden elde edildi.

Kompleks dielektrik sabitinin (ε*=ε'-jε"), gerçel (ε′) ve sanal (ε″) bileşenleri sırasıyla dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp olarak adlandırılır. Elektriksel polarizasyon yoluyla malzemede bulunan yükün ölçümü dielektrik sabiti (ε′), bir dış elektrik alan sonucu dielektrik malzemede kaybedilen enerji miktarı dielektrik kayıp (ε″) ve numunede depolanan enerjinin bir periyotta meydana gelen kayıp miktarı kayıp tanjant (tanδ) olarak tanımlanır. Sırasıyla ε′, ε″ ve tanδ'ın değerleri Eş. 7.26- Eş. 7.28' deki formüller kullanılarak hesaplanır [80, 86, 183];

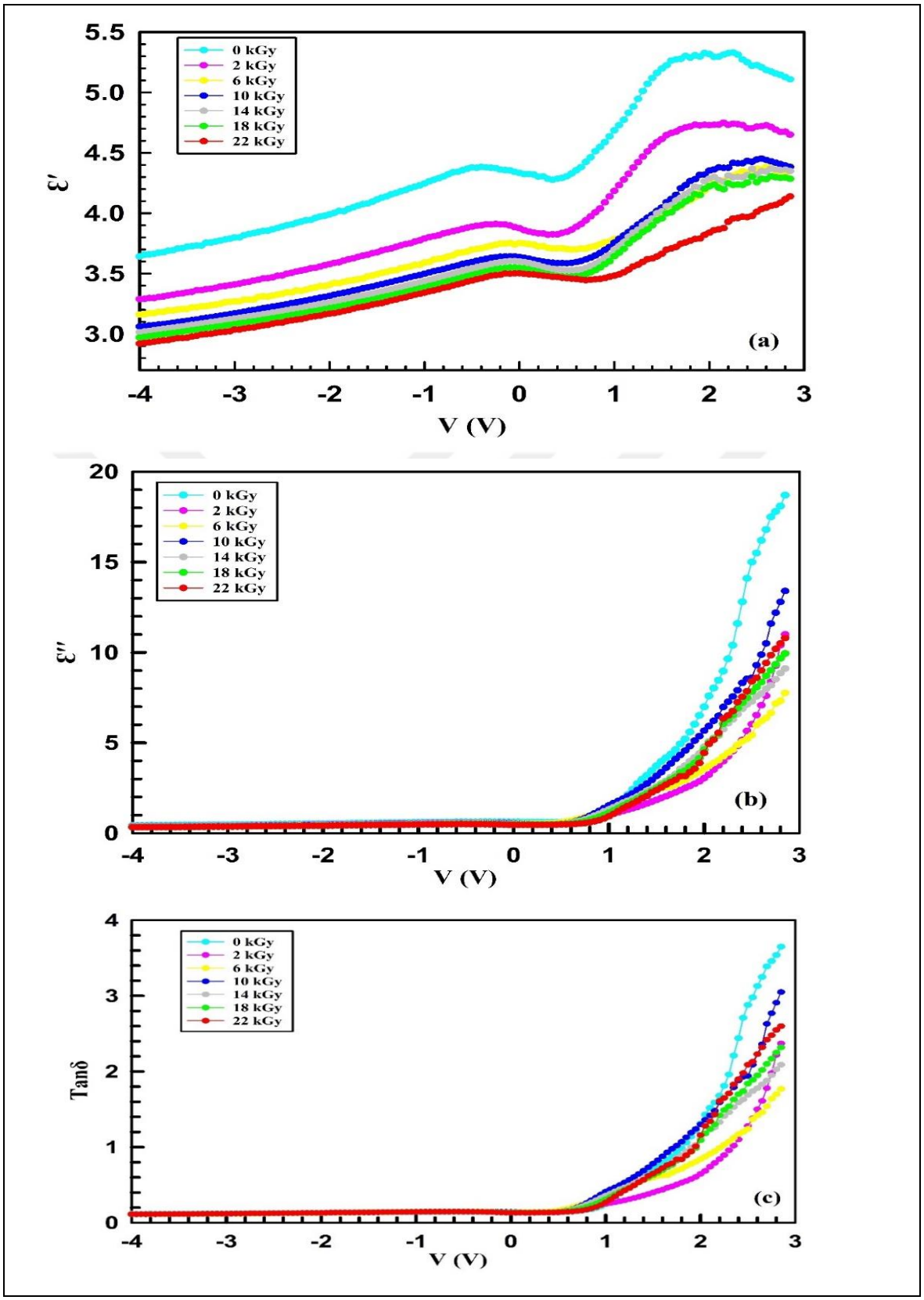
$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} = \frac{C\ d_i}{\varepsilon_0 A} \tag{7.26}$$

$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{G\ d_i}{\varepsilon_0 \omega A} \tag{7.27}$$

$$tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{7.28}$$

Burada, j ve ω nicelikleri sırasıyla sanal birimi ($= \sqrt{-1}$) ve açısal frekansı (=2πf) temsil eder. C_o ise metal ile yarıiletken arasında yalıtkan tabaka yokken kapasitans olup $C_o=\varepsilon_o(A/d_i)$ ile gösterilir. Eş. 7.26 ve Eş. 7.27 kullanılarak elde edilen ε′, ε″ ve tanδ grafikleri Şekil 7.19. a–c 'de verilmiştir.

Şekil 7.19.a ve Şekil 7.19.b'de, ε′ ve ε″ değerleri uygulanan beta radyasyon dozlarına ve voltaja bağlı olarak değişmektedir. Aynı zamanda ε′-V ve ε″ -V grafikleri tersinim (-4,0 V<V<-1,5V), tükenim (-1,5V<V<1,5V) ve yığılım (1,5V<V<3,0V) bölgelerine sahiptir. ε′ ve ε″ değerleri 1 MHz frekansta artan beta radyasyon dozuları ile birlikte azalmaktadır. MPS yapısına beta radyasyonu uygulandığında yasak enerji aralığında bulunan kusurlar arasında uyarılan yük taşıyıcıları geçiş yapabilir [184-186]. Dielektrik sabitindeki azalma, radyasyon ile yük taşıyıcılarının lokalize durumlar arasında kesikli atlama hareketini belirleyen taşıyıcı polarizasyonunun azalmasına atfedilebilir [184, 185, 187-191]. Ayrıca, dielektrik sabiti dipollerin sayısı ile doğru orantılıdır. Dielektrik sabitinin (kapasitansın) azalması beta radyasyon dozunun artması ile dipollerin sayısındaki azalmadan kaynaklanabilir. Dipollerin sayısındaki azalma ise malzeme içindeki lokalize yük taşıyıcılarının rekombinasyonu ile açıklanabilir.



Şekil 7.19. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra a) ε′−V, b) ε″−V ve c) tanδ−V grafikleri

ε′ değeri yaklaşık -0,5 V’ da (tükenim bölgesinde) bir pik vermektedir. Bu pikin oluşumu (0,03 Gr:PVA)/n-Si ara yüzeyinde lokalize olmuş arayüzey tuzaklarının özel dağılımı ve MS arasındaki arayüzey tabakasının varlığı ile seri dirençten kaynaklanmaktadır. Beta radyasyon dozunun artmasıyla birlikte pikin tepe noktasının büyüklüğü azalmakta ve pikin konumu pozitif voltaja doğru kaymaktadır. Bu durum radyasyon ve dış elektrik alan (voltaj) altında arayüzey durumlarının yeniden yapılanması veya yeniden düzenlenmesi ile açıklanır [192]. Sonuç olarak, yasak enerji bölgesinde oluşan yeni izinli durumlar, ışınlamadan sonra arayüzey tabakasında meydana gelen nokta ve yer değiştirme gibi kafes kusurları ile polarizasyondaki değişimden dolayı tükenim bölgesinde pik oluşmuştur.

ε′ değerleri güçlü yığılım bölgesinde dielektrik özelliklerin en doğru şekilde ölçüldüğü bölgedir. Şekil 7.19.a’da yüksek ileri voltajın sağlandığı yığılım bölgesinde, tüm radyasyon dozları için yaklaşık 1,8 V'da bir tepe oluşturarak azalmaktadır. Yüksek voltaj bölgelerinde, arayüzey tuzaklarının potansiyel bariyerini geçen taşıyıcılar tarafından doldurulduğu ve bunun da polarizasyonda bir değişikliğe neden olduğu da söylenebilir [193]. Ayrıca, ileri voltaj bölgesinde seri direnç güçlü bir etkiye sahiptir [194, 195].

MPS yapısının polaritesi değiştikçe, yük taşıyıcılarının dielektrik malzeme boyunca yer değiştirme yönünde bir değişiklik olur [196]. Bu yön değişikliği nedeniyle, yük taşıyıcıları direnci yener ve malzemeyi ısıtarak dielektrik kayıp (ε″) adı verilen enerji kaybı oluşur [154, 197]. Şekil 7.19.b’de ε″ değeri tersinim bölgesinde uygulanan voltajın artmasıyla tüm radyasyon dozları için neredeyse sabit bir davranış gösterirken. İleri pozitif voltaj bölgesine doğru, tüm ışınlama dozları için ε″ değerinde bir artış meydana gelmiştir. Bunun, arayüzey durumları ile çoğunluk taşıyıcıları arasındaki etkileşimden kaynaklandığı söylenebilir. Bu davranış aynı zamanda uygulanan beta radyasyonunun MPS yapısının yalıtkan arayüzey tabakasında yeni uzay ve tuzak yükleri (Q_{sc} ve Q_{it}) oluşturmasından da kaynaklanmaktadır [198]. Özetle bu değişimler, arayüzey tabakasında izin verilen yeni durumlar ve polarizasyondaki değişimden kaynaklandığı söylenebilir. Yığılım bölgesinde ise artışın devam ettiği ve uygulanan ışınlama dozunun artmasıyla dielektrik kaybın arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar beta radyasyonu ve polarizasyon değişimi sonrası oluşan kusurlardan dolayı yeni düzenleme/rekombinasyon merkezlerinin oluşmasıyla açıklanabilir [199].

Şekil 7.19.c'de tanδ değeri, tersinim bölgesindeki değişen ışınlama dozlarına ve voltaja rağmen sabit kalmakta, ileri pozitif voltajlara doğru gidildikçe artış meydana gelmektedir. Kuvvetli yığılım bölgesinde (2,85 V) tanδ değeri; beta radyasyonundan öncesi (0 kGy) 3,65, 2 kGy için 2,37, 6 kGy için 1,77, 10 kGy için 3,05, 14 kGy için 2,09, 18 kGy için 2.32 ve 22 kGy için 2,60 değerine sahiptir. MPS yapısına radyasyon uygulanmadan önce tanδ değeri, radyasyon uygulandıktan sonraki değerlere göre daha fazladır. 6 kGy, 18 kGy ve 22 kGy beta radyasyonu uyguladığımızda kayıp tanjant (tanδ) değerinde artış olduğu görülmektedir. Bu durum araştırmacılar tarafından da tespit edilmiştir [198, 199]. Yüksek frekanslarda dielektrik malzemedeki moleküllerin kutuplanmaya yeterince cevap verememesinden dolayı malzeme verilen elektrik enerjisinin bir kısmını soğurması ile ısınma meydana gelir. Bu durum moleküllerin birbirine sürtünmesi şeklinde ifade edilir. MPS yapısına beta radyasyonu uyguladığımızda kutuplanma sırasında moleküllerin birbirine sürtünmesi dolayı açığa çıkan ısının azalması nedeniyle tanδ değerinde azalma meydana gelmektedir.

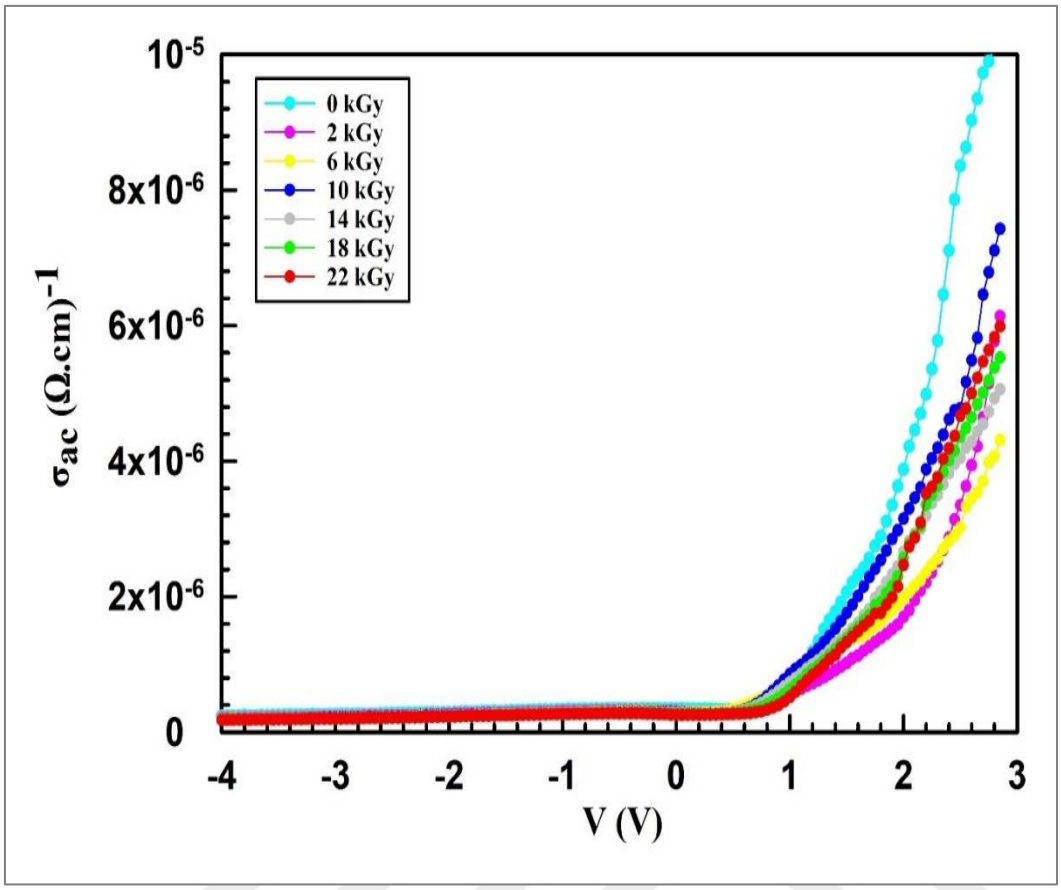
ac iletkenlik (σac) ise, tanδ veya ε" verileri kullanılarak Eş. 7.29' dan hesaplanılır **[**87, 200, 201];

$$\sigma_{ac} = \left(\frac{d_i}{A}\right) \omega\, C\, \tan\delta = \varepsilon'' \,\omega\, \varepsilon_0 \qquad (7.29)$$

Beta radyasyonunun σ_{ac} üzerindeki etkisini incelemek için, Eş. 7.29 kullanılarak elde edilen beta radyasyonundan önce ve sonra σ_{ac}-V grafikleri Şekil 7.20'de verilmiştir.

Elde edilen σ_{ac} değerleri ε″-V grafiğine oldukça benzer davranış göstermektedir. σ_{ac} değerleri hem radyasyona hem de voltaja oldukça bağlıdır. Bu değişimler, tükenim bölgesinde ara yüzey durumlarının/tuzakların varlığına ve radyasyona bağlı olmasına atfedilirken yığılma bölgesindeki ise seri direnç (R_s) ve polimer ara yüzey tabakanın varlığına atfedildi.

Beta radyasyon dozu arttıkça σ_{ac} değerlerinde azalma meydana gelmiştir σ_{ac}'deki bu azalış, hareketli yük taşıyıcılarından kaynaklanan gevşeme sürecinin sonucudur. MIS/MPS Schottky diyot'a yeterince yüksek frekanslı bir ac alanı uygulandığında, alanla faz dışı olan net bir polarizasyona neden olabilir. Bu, tuzakların doldurulduğu veya boşaltıldığı frekanstan daha yüksek frekansta görünen ac iletkenliğiyle ilgilidir [190].



Şekil 7.20. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra σ_{ac}-V grafiği

Kuvvetli yığılım bölgesinde (2,85V), MPS yapısına radyasyon uygulanmadan önce σ_{ac} iletkenlik değeri, radyasyon uygulandıktan sonraki değerlere göre daha fazladır. Ayrıca bu bölgede, σ_{ac} iletkenlik değeri artan beta radyasyonu (2, 6, 10, 14, 18 ve 22 kGy) ile artmaktadır. MPS yapısının σ_{ac}, yığılım bölgesinde radyasyon dozlarına bağlı olarak güçlü bir şekilde etkilendiğini göstermektedir. σ_{ac} değerindeki bu üstel artış seri direnç değerindeki azalmaya atfedilebilir [202-204].

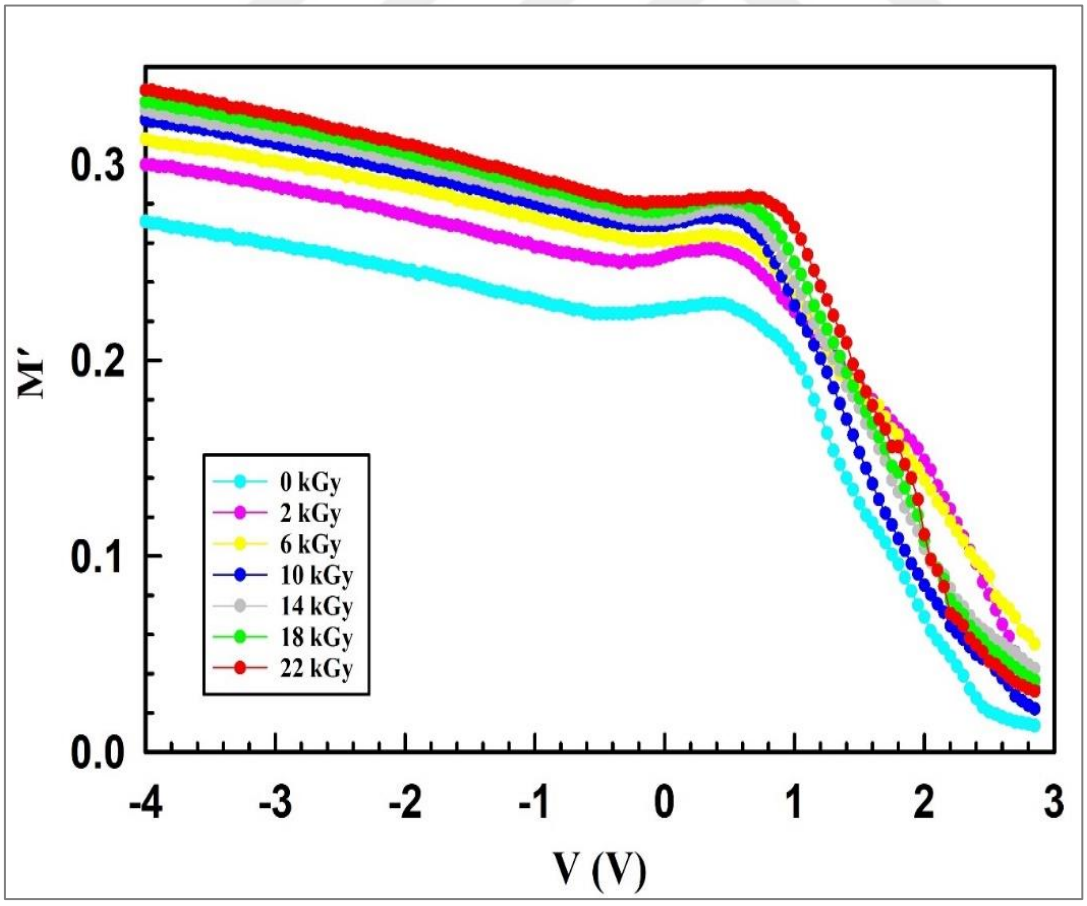
Kompleks dielektrik (ε*)'in ε′ ve ε″ bileşenlerinde meydana gelen değişimler, kompleks elektrik modülü (M*), için benzer değişimlere yol açmaktadır [87, 200]. Macedo'ya göre kompleks elektrik modülü (M*), kompleks dielektriğin (ε*) tersidir ve dielektrik gevşeme sürecine karşılık gelir ve aşağıdaki formüller ile ifade edilir [87]. Gevşeme (relaxation) mekanizması iletim mekanizmasında elektronların hareketi, izinli bir enerji seviyesinden diğerine geçmesi/atlaması yoluyla gerçekleşmesidir [205-207].

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = j\omega C_0 Z^* = M' + jM'' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (7.30)$$

$$M' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (7.31)$$

$$M'' = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (7.32)$$

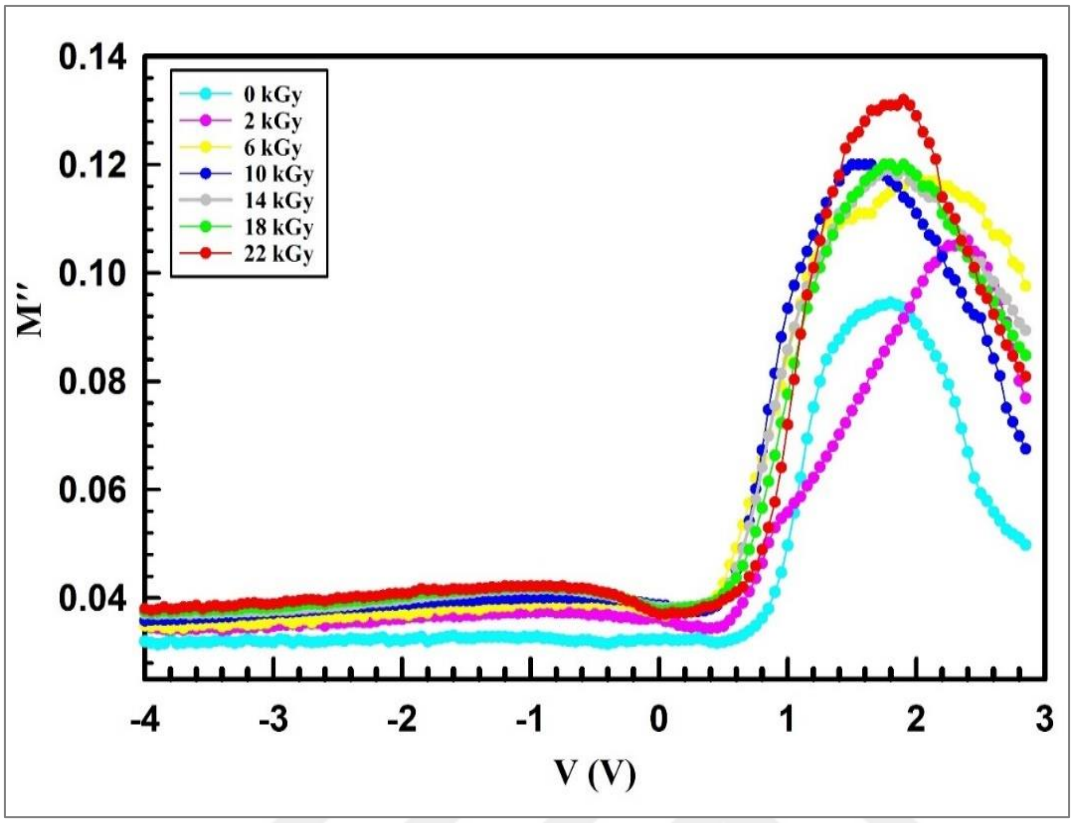
Genel olarak elektrik modülü, MS arayüzeyinde bulunan ince bir arayüzey katmanında meydana gelen elektrik alanının gevşemesini açıklar. Kompleks dielektrik sabiti (ε*) ile kompleks elektrik modülü (M*) arasındaki ilişki Eş. 7.30'da verilmiştir. Au/(0,03 Gr: PVP)/n-Si (MPS) yapısının, 1 MHz frekansında, 0-22 kGy beta radyasyon dozu aralığında elde edilen ε′ ve ε″ değerleri Eş. 7.31 ve Eş. 7.32'de kullanılarak kompleks elektrik modülüsün gerçel (M′) ve sanal (M″) birleşenleri elde edilir.



Şekil 7.21. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra M′-V grafiği

Şekil 7.21'de çeşitli beta radyasyon dozları için voltaja bağlı elektrik modülüsün reel (M′) bileşeninin değişim grafiği verilmektedir. Şekil 7.21'de beta radyasyonundan önce ve sonra, M′ değeri tersinim bölgesinden çok küçük sayısal farklılıklarla değişim göstermesine rağmen tüm ışınlama dozları için sabit davranış gösterirken, artan pozitif voltajlara doğru keskin bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum yasak enerji aralığındaki arayüzey tuzaklarında bulunan kısa mesafeli elektron-deşik hareketliliğinden kaynaklanan iletim sürecine atfedilebilir [68]. Bu sonuç, elektriksel iletkenliğin sabit olmadığını; değişken kapasitanstan kaynaklanan elektrik alan gevşemesinin (polarizasyonun) azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir [152]. Elektrik modülüsündeki bu davranış, yavaş bir gevşeme süreci olan Maxwell-Wagner gevşeme sürecini temsil ettiğinin bir göstergesi olarak düşünülebilir [152]. Ayrıca M′ değeri artan beta radyasyon dozu ile artmaktadır. Bu durum yeni arayüzey durumları nedeniyle oluşan kafes kusurları ve değişken polarizasyon ile açıklanabilir.

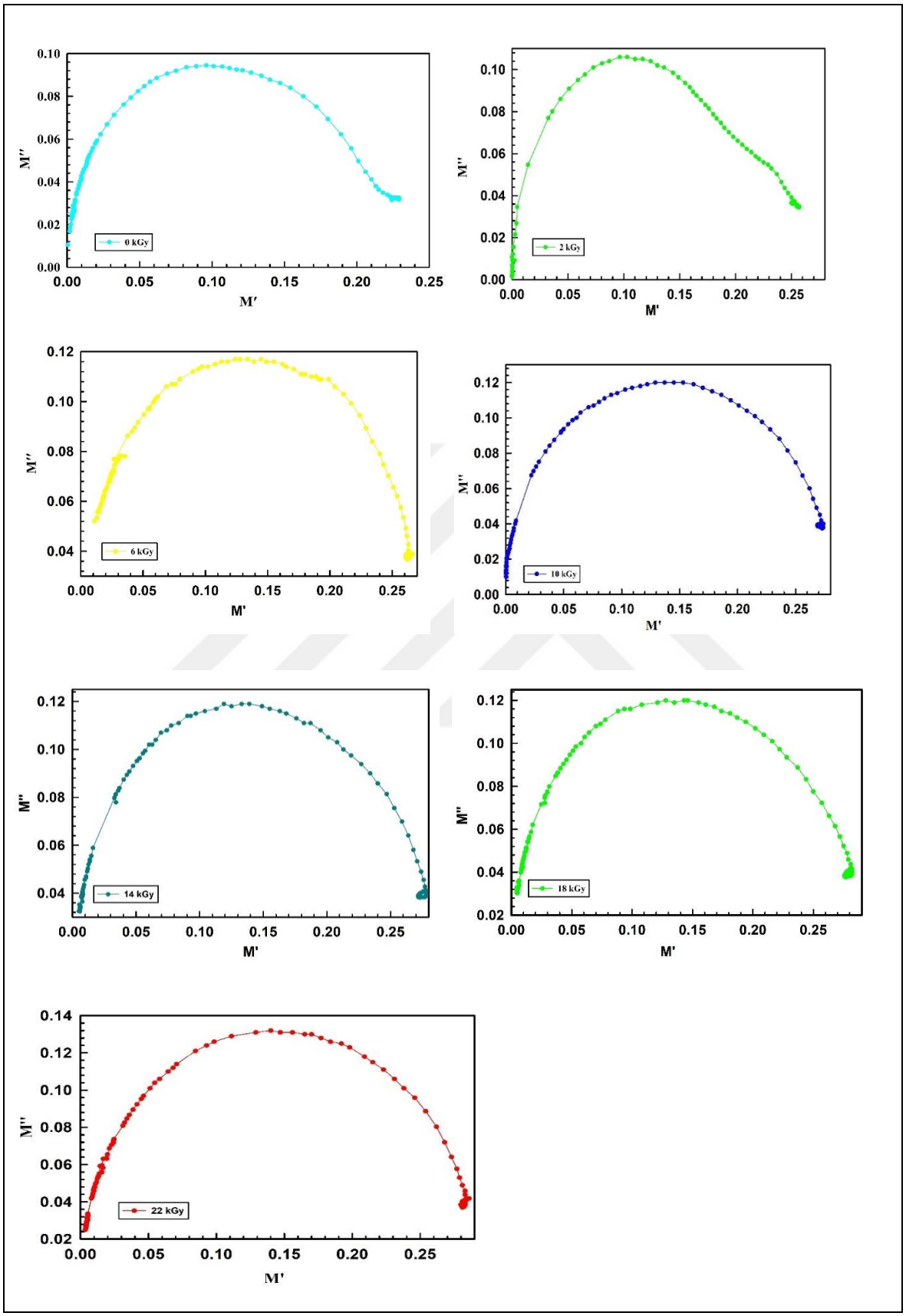
Şekil 7.22'de, tüm radyasyon dozlarının voltaja bağlı elektrik modülüs parametresinin sanal (M″) bileşeninin değişim grafiği verilmektedir. Tüm radyasyon dozları için tersinim bölgesinde M″ değeri artan voltajla neredeyse sabit olarak değişmekte iken 0,8 V' tan sonra tükenim bölgesinde bir tepe ile ani bir artış ile yaklaşık 1,2 V'tan sonra M″ değerinde azalma meydana gelmiştir. M″-V grafikleri, dielektrik gevşeme süreçlerine (Maxwell-Wagner tipi polarizasyon) karşılık gelen, çeşitli radyasyon dozu için 0,8 V ile 1,2 V aralığında belirgin bir tepeye sahiptir. Ayrıca, hem M′ hem de M″ parametrelerinin yığılım bölgelerindeki kararlı davranışı arayüzey durumlarının yaşam süresinin (τ), uygulanan periyottan (T=1/f) büyük olması ve arayüzey durumlarının ac sinyalini takip edememesi ile açıklanır. Bu nedenle, elektrik modülü $M_\infty = 1/\varepsilon'_\infty$' a karşılık gelen maksimum değere ulaşır ve gevşeme süreci nedeniyle minimum değere düşer [192]. $M''-V$ grafiğinde gözlenen tepe (~1,85V), gevşeme süreçlerine bağlı olan kendine özgü yoğunluk dağılımından kaynaklı olduğuna atfedilebilir [208].



Şekil 7.22. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra M″-V grafiği

Sonuç olarak hem M' hem de M" değerlerinin radyasyona ve voltaja bağlı değişim grafikleri malzemelerin elektriksel iletkenliğinde sıçrama mekanizmasının ve yüzey yükü polarizasyonunun varlığını doğrular [209, 210].

Cole-Cole grafikleri, farklı kapasitif bileşenlerin bir sonucu olarak farklı gevşeme süreçlerini ayırt etmek için kullanılır. Cole-Cole eğrisi olarak bilinen ve birincil polarizasyon sürecini temsil eden bir yarım daire oluşturur. Şekil 7.23'de, 1 MHz frekansında beta radyasyonundan önce ve sonrası için 0,5 V ile 3 V aralığında MPS yapısının M″-M′ grafiği verilmiştir. Şekil 7.23'de M″-M′ grafiğinde beta radyasyonundan önce ve sonrası için ardışık bir yarım dairesel ark oluşmaktadır. Bu yarım dairesel arkın varlığı, arayüzey katmanındaki polarizasyon mekanizmasının tane sınırlarından ziyade tanelerin etkisinden kaynaklandığını göstermektedir. Ayrıca azalan radyasyon ile azalan yarım daire yayların tane sınırının iletim mekanizmasına katkısının kademeli olarak azaldığını göstermektedir [211].

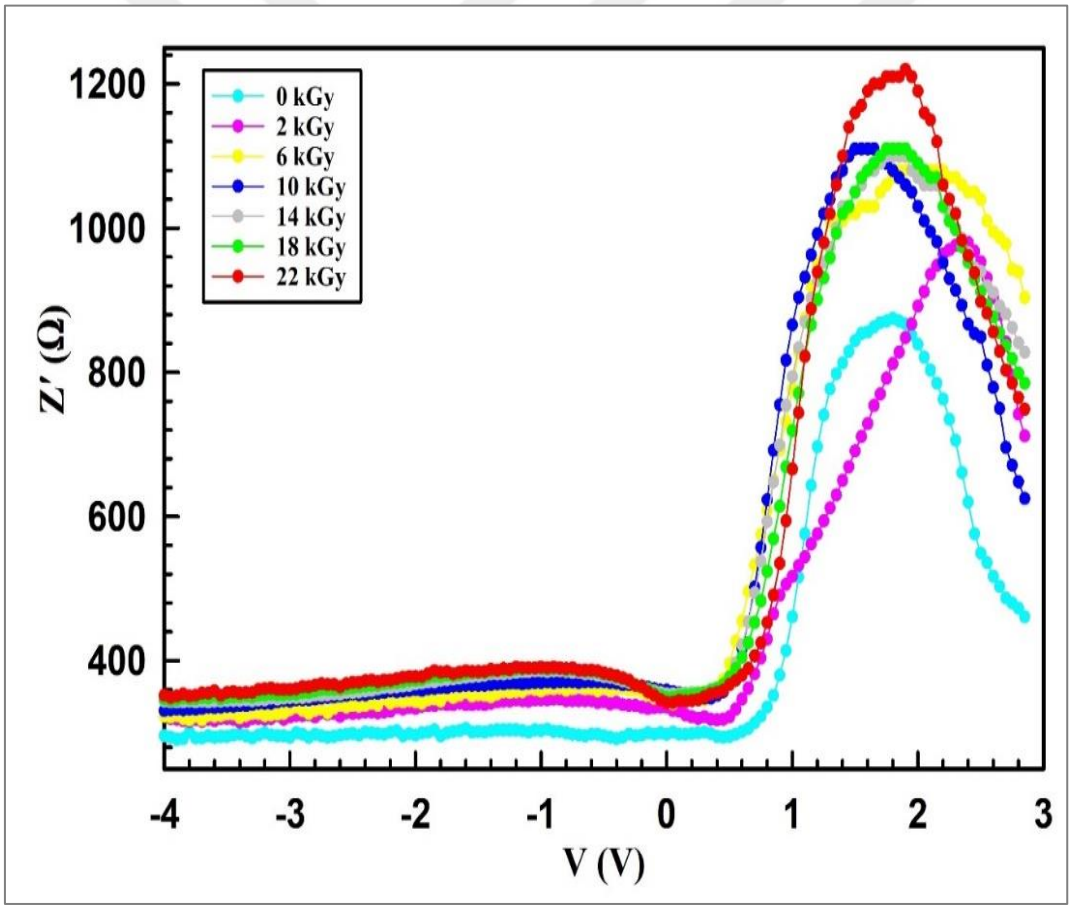


Şekil 7.23. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra M″-M″ (Cole-Cole) grafiği

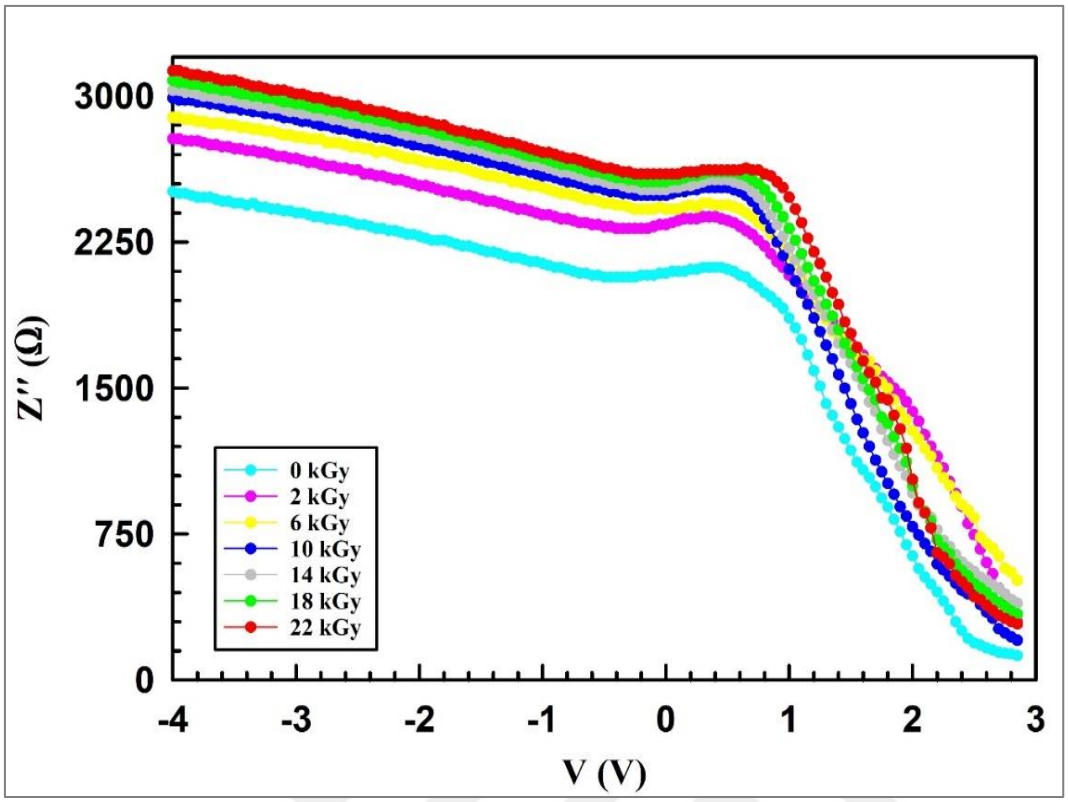
Kompleks empedans ölçümleri malzemenin dielektrik ve elektrik davranışlarını araştırmada kullanılır. Kompleks empedans (Z*), elektriksel modülün yanı sıra direncin katkısını tanımamızı sağlar [201].

$$Z^* = Z' - jZ'' = \frac{1}{j\omega C_0 \varepsilon^*} = \frac{\varepsilon''}{\omega C_0[\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2]} - j\frac{\varepsilon'}{\omega C_0[\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2]} \quad (7.33)$$

Şekil 7.24 ve Şekil 7.25'de beta radyasyonundan önce ve sonra sırasıyla Z′ ve Z″ değerlerinin voltaja bağlı değişimi gösterilmiştir. Z′-V ve Z″ -V grafiklerine göre 0,8 V<V < 2,0 V voltaj aralığında, Z' kararlı yükler ve arayüzey durumları (N_{ss}) nedeniyle tüm ölçüm değerlerin için bir tepe gösterirken, Z″ değerleri aynı voltajlarda keskin bir düşüş göstermektedir.



Şekil 7.24. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra Z′-V grafiği

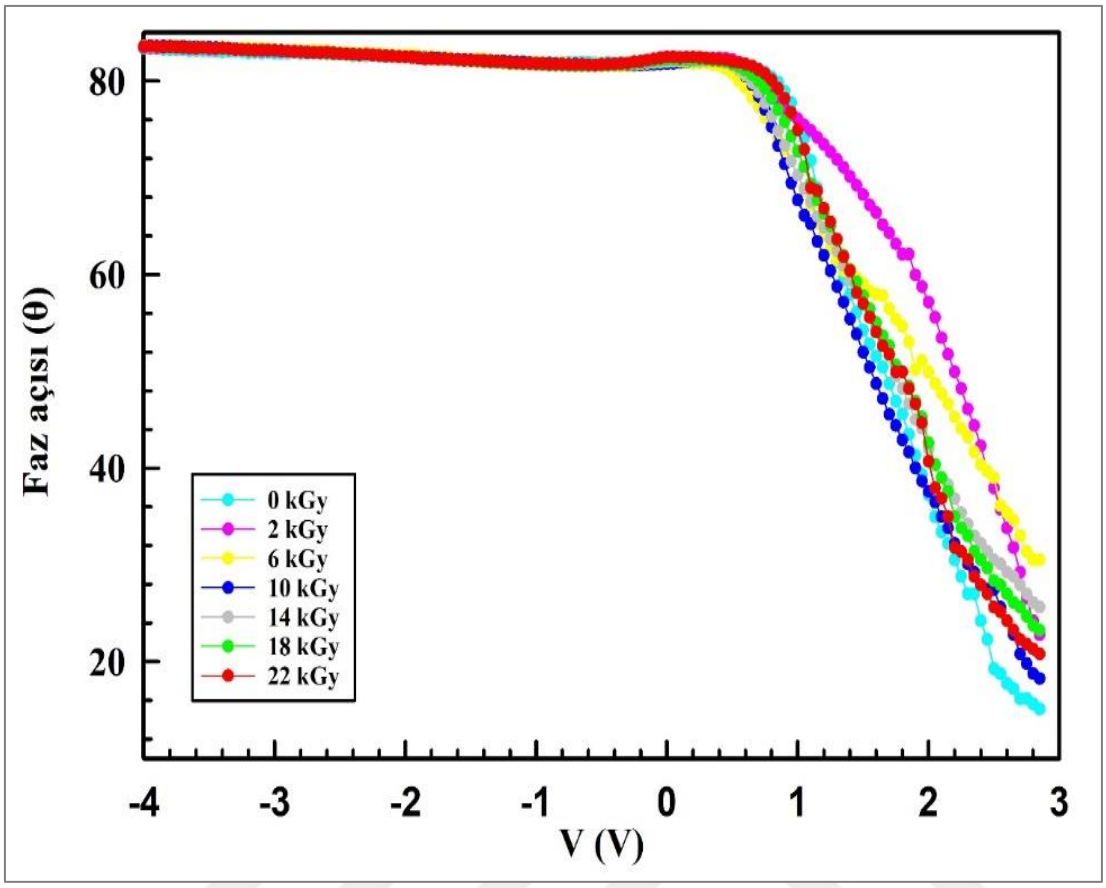


Şekil 7.25. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra Z″-V grafiği

Direnç akımı ve kapasitif akım arasında bulunan faz açısı (θ) empedans ölçümleri değerlerinden Eş. 7.34 ifadesi kullanılarak hesaplanabilir [212-214];

$$\theta = tan^{-1}(\frac{Z''}{Z'}) \tag{7.34}$$

Beta radyasyonundan önce ve sonrası için elde edilen faz açısının (θ) voltaja bağlı değişim grafiği Şekil 7.26'da verilmiştir.

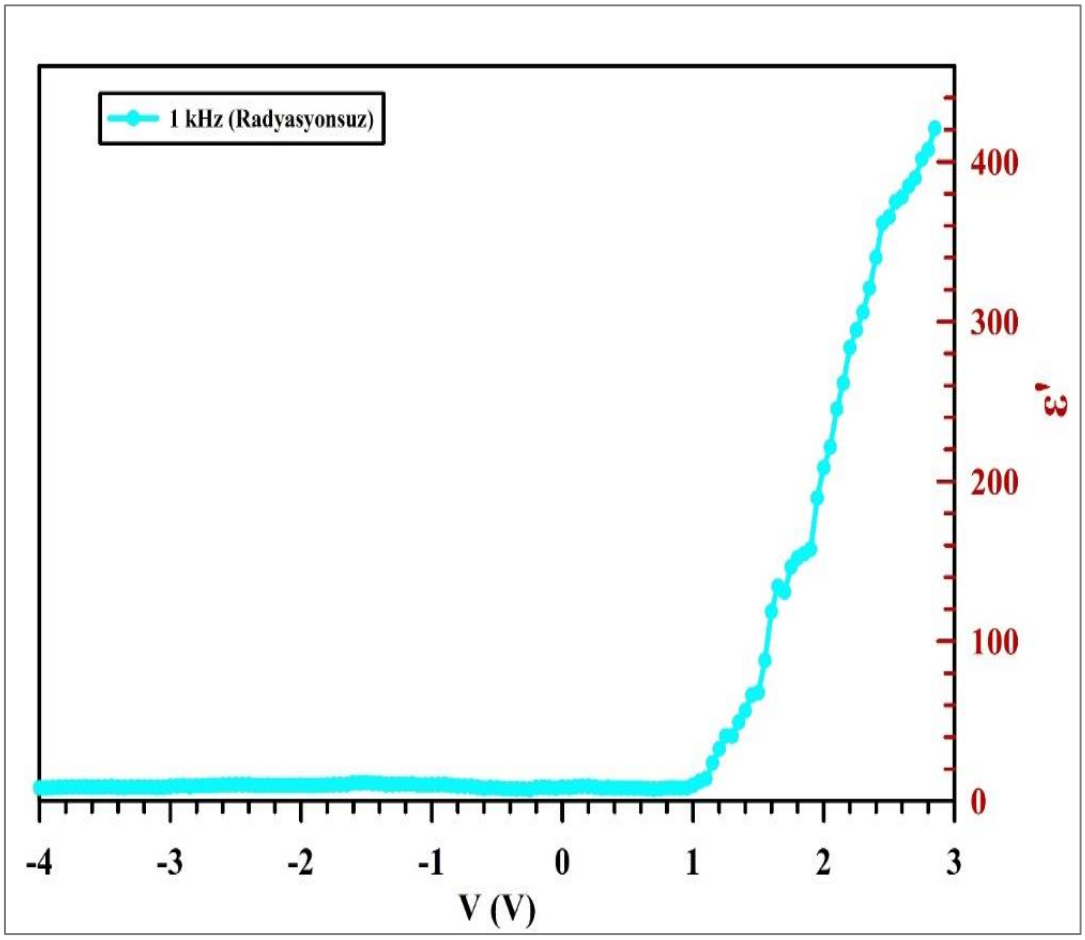


Şekil 7.26. Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si (MPS) yapısının beta radyasyonundan önce ve sonra faz açısı(θ)-V grafiği

Şekil 7.26' da negatif voltaj bölgesinde faz açısı(θ)'nın yaklaşık 85°'de sabit kaldığı görülmektedir. Negatif voltaj bölgesi için faz açısı(θ)'nın 85°'e yakın bu sabit değerleri, yapının bu voltaj bölgesi için saf kapasitif davranışını göstermektedir. Gerilim 0 V'a ulaşıldığında, faz açısı(θ) değeri radyasyonsuz ve çeşitli beta radyasyon dozları için hızlı bir düşüş gösterir ve ardından minimum değerini alır.

Ayrıca Eş. 7.26 kullanılarak MPS yapısına radyasyon uygulanmadığında (0 kGy), 1 kHz frekansında C-V ölçümlerinden elde edilen ε′-V grafiği Şekil 7.27'de verilmiştir. Bu grafikten kuvvetli yığılım bölgesine (3 V) karşılık gelen dielektrik sabiti (ε′) değeri 407,56 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değer 0,03 Gr:PVA arayüzey tabakasının dielektrik sabiti ($\varepsilon'_{(0,03\ Gr:\ PVA)}$) değeri olup, sırasıyla geleneksel SiO_2'den (ε'_{SiO2} =3,8) 110 kat ve yüksek dielektrikli TiO_2'den ($\varepsilon'_{(TiO2)}$ = 95) yaklaşık 4,4 kat daha büyük yük depolama kapasitesine sahiptir. Bu durum geleneksel yalıtkan katmanların yerine, yüksek dielektrik sabitine sahip 0,03 Gr:PVA polimer arayüzey tabakasının rahatlıkla kullanılabileceği anlamına gelir. Bu nedenle, üretilen Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapıların ultra veya

süper kapasitör gibi büyük miktarda elektronik yükü depolama enerjisine sahip olduğu tespit edildi.



Şekil 7.27. Au/(0,03 Gr:PVA)/n-Si (MPS) yapısı için 1 kHz frekansında radyasyonsuz (0 kGy) ε′-V grafiği

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doktora tez çalışmasında, metal (Au) ile yarıiletken (n-Si) arasına yüksek dielektrik özelliğine sahip, polimer (%3 grafen katkılı PVA) malzeme büyütülerek Au/(%3 Gr: PVA)/n-Si (MPS) Schottky diyotları üretildi. Üretilen bu diyotların ^{90}Sr beta radyasyonu altında davranışı incelenmiştir. Beta radyasyonunun Schottky diyotlar üzerindeki etkisini kapsamlı ve doğru bir şekilde araştırılabilmesi için beta radyasyonundan önce ve sonra (2, 6, 10, 14, 18, 22 kGy) sırasıyla I-V, C-V ve G/ω-V ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçümlerden, temel elektrik ve dielektrik parametreler çeşitli hesaplama yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve performans özellikleri literatür ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Yapılan ölçümler sonucunda, C–G/ω–V karakteristiklerinin radyasyona bağlı olarak belirgin değişimler gösterdiği, I–V ölçümlerinde ise özellikle negatif voltaj bölgesinden elde edilen parametrelerin radyasyondan daha çok etkilendiği, buna karşın pozitif voltaj bölgelerinde radyasyona bağlı değişimlerin daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, I–V ve C–G/ω–V ölçümlerinden elde edilen ortak parametrelerin radyasyon etkisine karşı tutarlı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu durum, yapılan ölçüm ve hesaplamaların doğruluğunu destekler niteliktedir.

Elde edilen ölçüm ve hesaplama sonuçları özetle aşağıda verilmiştir:

Akıma bağlı parametrelerden elde edilen sonuçlar:

1. MPS yapısına beta radyasyonu uygulandığında, radyasyon dozlarının artmasıyla birlikte ters doyum akımında artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi, derin seviye tuzaklarının rekombinasyon merkezi olarak davranmasından kaynaklanmaktadır,

2. İdealite faktörünün (n) değeri radyasyon yokken 1'den büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu davranış diğer akım/iletim mekanizmalarının varlığının bir sonucu olarak ortaya çıktığı vurgulanmıştır. Radyasyondan önce ve sonra elde edilen yüksek n değerleri, standart TE teorisinden sapmanın bir göstergesidir. Ayrıca Gaussian dağılım teorisi, bariyeri geçmek için yeterli enerjiye sahip olmayan taşıyıcıların, ortalama engelin yakınında bulunan çok sayıda engel veya patikalardan geçebileceğini söyler. Bu durum ise akımlarda ve idealite

faktöründe artışların meydana gelmesine neden olmaktadır. MPS yapısına beta radyasyonu uygulanması ile arayüzeyde oluşan kusurlar; tuzak ve rekombinasyon merkezleri olarak davranır bu da idealite faktörünün artmasına neden olur.

3. Beta radyasyonu, yarıiletkenin birleşme noktasındaki yasak enerji bant aralığında kusurlar oluşumuna sebep olur ve buda serbest taşıyıcı yoğunluğunu etkiler. Bu nedenle, bariyer yüksekliği radyasyon uygulanması ile artışa veya azalmaya neden olur. Bu etkinin bir sonucu olarak Au/0,03 Gr: PVA/n-Si MPS yapısının Φ_{Bo} değerleri, artan ışınlama dozlarına bağlı olarak azalma meydana gelmiştir. Bariyer yüksekliğinde radyasyona bağlı olarak oluşan azalma literatürde daha çok Poole-Frenkel etkisi olarak bilinir ve bu etki yine taşıyıcıların üretimi neticesinde ortaya çıkar.

4. Beta radyasyon dozunun artması ile R_s değerinde azalma ve R_{sh} değerlerinde ise artma meydana gelmiştir. Beta radyasonu ile R_{sh} değeri R_s değerlerine göre daha büyük oranda değişim göstermiştir. Bu durum, ters beslem akımlarının küçük değerlerde olması sebebiyle ileri beslem akımlarından daha fazla etkilenmesiyle doğrudan ilişkilidir. R_s değerlerindeki azalma ve R_{sh} değerlerindeki artma eğilimi malzemede iyileşmenin bir göstergesidir ki bu durum, çeşitli beta radyasyon dozlarında diyotun doğrultma oranının (RR) artmaya başlaması, bu sonucu kanıtlar niteliktedir.

5. Beta radyasyon dozuna bağlı olarak N_{ss}- (E_c-E_{ss}) grafiğinden, arayüzey durumlarının, yarıiletkenin orta-bant boşluğundan (E_{ss}) iletkenlik bandının alt kenarına doğru üstel bir şekilde artığı görülmüştür. Beta rayasyonundan sonrası MPS yapısında arayüzey durumlarının konsantrasyonunun $\sim 10^{13}$ $eV^{-1}cm^{-2}$ mertebesinden $\sim 10^{14}$ $eV^{-1}cm^{-2}$ mertebesine yükselmiş olup bir yarıiletken aygıt için bu uygun bir değer olduğu diğer araştırmacılar tarafından da tespit edilmiştir.

Kapasitans ve kondüktansa bağlı parametrelerden elde edilen sonuçlar:

1. Kapasitans ve kondüktans karakteristikleri, artan beta radyasyon dozlarına bağlı olarak azalma eğilimi göstermektedir. C-V eğrisindeki azalma, yarıiletken yasak enerji aralığındaki boşluğunda radyasyona bağlı bazı kusurların yanı sıra arayüzey durumlarının özel dağılımına ve bunların elektrik alanı altında yeniden yapılandırılmasına/düzenlenmesine atfedilmiştir. Öte yandan, kondüktans

karakteristikleri üzerindeki diğer etkilerin yanı sıra bu karakteristiklerdeki değişimlere neden olan ana parametrelerin R_s ve N_{ss} olduğu da tespit edilmiştir.

2. Kapasitans ve kondüktans karakteristikleri yığılım bölgesindeki, radyasyon yokken ve 10 kGy ile 22 kGy beta radyasyonundan sonra indüktive davranış sergilediği görülmektedir. Radyasyon yokken yığılım bölgesinde kapasitans değerinin azaldığı kondüktans değerinin ise arttığı, 10 kGy beta uygulandığımızda kapasitans ve kondüktans değerlerinin eşitlendiği ve 22 kGy beta radyasyonu uygulandığında ise kapasitans değeri artarken kondüktans değerinin azalmaktadır. Yeterince yüksek pozitif voltaj bölgelerinde 10 kGy radyasyon değerlerine kadar MPS yapısı iletken gibi davranırken, 10 kGy'den büyük radyasyon değerleri için bu durum ortadan kalkarak kapasitör gibi davranmaya başlamıştr. Çünkü artan dozla birlikte, iletim bandına uyarılan elektron sayısı azalır, bu nedenle G/ω 'deki artış hızı azalır ve C değeri de artmaya başlar.

3. R_i-V profillerinde, artan radyasyon dozları ile genlikleri değişen ve yığılım bölgesine doğru kayan pikler görülmüştür. Piklerin genliği artan ışınlama dozları ile artma eğilimi göstermekte ve meydana gelen bu artış bant boşluğunda meydana gelen tuzak yüklerine ve bunların radyasyon ile voltaja bağlı dağılımına atfedilmiştir. Bu davranışların etkileri aynı zamanda, kapasitans karakteristikleri üzerinde de net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Ayrıca radyasyon dozu arttığında elde edilen daha büyük R_s değerlerinin, kirlilik atomlarının varlığını ve radyasyon kusurlarının neden olduğu lokalize tuzaklanmış yükleri göstermektedir. Radyasyon dozu arttıkça R_s değerlerinde artış gösterdiği görülmüştür. R_s değerlerinin, başta kondüktans karakteristikleri olmak üzere birçok parametre üzerinde, özellikle de yığılım bölgesinde etkili olduğu bu durum, R_s'nin hesaplamalarda dikkate alınmasının ne kadar önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır.

4. Beta radyasyonu uygulanmadan önceki (0 kGy), N_{ss} dağılımı yüksek-düşük frekans (C_{HF}-C_{LF}) kapasitans yöntemi kullanılarak ~3V civarında $2{,}5x10^{13}$ $eV^{-1}cm^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, ideal yarıiletken aygıtlar için N_{ss} değeri yaklaşık olarak ~10^{12} $eV^{-1}cm^{-2}$ olması gerekirken ~10^{13} $eV^{-1}cm^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Bu durum yapının ideal özelliklerinden biraz sapmasına neden olduğunu göstermektedir. Radyasyondan önce (0 kGy) ve beta radyasyonu dozundan sonra (22 kGy) oluşan arayüzey durum yoğunluğunun önce-sonra kapasitans (C_{after}-C_{befor}) yöntemi kullanılarak 22 kGy beta radyasyon dozu için ~1,5V civarında $2{,}2x10^{10}$ $eV^{-1}cm^{-2}$ olarak bulundu. Bulunan bu değeri yapının

performansını düşürmüyecek düzeyde olduğunu ve yapının radyasyona karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak 0-22 kGy beta radyasyonuna maruz kalan Au/(0,03 Gr: PVA)/n-Si MPS yapısında uygulanan radyasyon aralığında çok etkilenmediği anlamına gelmektedir.

5. C^{-2}-V eğrisinin lineer bölgesinden bariyer yüksekliği (Φ_B), Fermi enerji seviyesi (E_F), difüzyon potansiyeli (V_D), maksimum elektrik alan (E_m), tükenim tabakası genişliği (W_D) ve verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_D) gibi diğer önemli elektriksel parametreler hesaplanmıştır. N_D, W_D ve Φ_B değerleri uygulanan radyasyon dozu arttıkça neredeyse üstel bir şekilde azalmakta ve E_F değeri ise artmaktadır. MPS yapısının N_D, W_D, Φ_B ve E_F değerleri artan radyasyon dozu ile sırasıyla $8,27x10^{15}$ cm^{-3}- $5,96x10^{15}$ cm^{-3}; $3,39x10^{-5}$ cm- $3,56x10^{-5}$ cm; 0,957 eV- 0,816 eV ve 0,203 eV-0,211 eV aralıklarında değişim göstermektedir.

Dielektrik parametrelerden elde edilen sonuçlar:

1. Dielektrik sabiti (ε′) ve dielektrik kayıp (ε″) karakteristikleri, artan beta rayasyon dozlarına bağlı olarak azalma eğilimi göstermektedir. Dielektrik sabitinde ki bu azalma, radyasyon dozu ile yük taşıyıcılarının var olan durumlar arasında kesikli atlama hareketini belirleyen taşıyıcı polarizasyonun azalmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, dielektrik sabiti dipollerin sayısı ile doğru orantılıdır. Dielektrik sabitinin (kapasitansın) azalması beta radyasyon dozunun artması ile dipollerin sayısındaki azalmadan kaynaklanadığı düşünülmektedir. Dipollerin sayısındaki azalma ise malzeme içindeki lokalize yük taşıyıcılarının rekombinasyonu ile açıklanabilir.

2. Kayıp tanjant (tanδ) profilindeki değişim ise radyasyon dozu arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Kuvvetli yığılım bölgesinde (2,85 V) tanδ değeri; beta radyasyonundan öncesi (0 kGy) 3,65, 2 kGy için 2,37, 6 kGy için 1,77, 10 kGy için 3,05, 14 kGy için 2,09, 18 kGy için 2.32 ve 22 kGy için 2,60 değerine sahiptir.

3. ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) profili ise ε″-V grafiğine oldukça benzer davranış sergilemektedir. Bu değişimler, tükenim bölgesinde ara yüzey durumlarının/tuzakların varlığına ve radyasyona bağlı olmasına atfedilirken yığılma bölgesindeki ise seri direnç (R_s) ve polimer ara yüzey tabakanın varlığından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Beta

radyasyon dozu arttıkça σ_{ac} değerlerinde azalma meydana gelmiştir σ_{ac}'deki bu azalış, hareketli yük taşıyıcılarından kaynaklanan gevşeme sürecinin varlığı nedeniyle ortaya çıkmıştır. σ_{ac}, yığılım bölgesinde radyasyon dozları arttıkça artma eğlimi göstermiştir buda radyasyon dozlarına bağlı olarak yapının güçlü bir şekilde etkilendiğini göstermektedir. σ_{ac} değerindeki bu üstel artış seri direnç değerindeki azalmaya ile açıklanılmıştır.

4. Elektrik modülüsün reel (M′) kısmın tersinim bölgesinden çok küçük sayısal farklılıklara rağmen tüm ışınlama dozları için sabit davranış gösterirken, artan pozitif voltajlarda keskin bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum yasak enerji aralığındaki arayüzey tuzaklarında bulunan kısa mesafeli elektron-deşik hareketliliğinden kaynaklanan iletim sürecine bağlı olması elektriksel iletkenliğin sabit olmadığını; değişken kapasitörlerden kaynaklanan elektrik alan gevşemesinin (polarizasyonun) azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Elektrik modülündeki bu davranış, yavaş bir gevşeme süreci olan Maxwell-Wagner gevşeme sürecini temsil etmektedir. Ayrıca M′ değeri artan radyasyon ile artmaktadır. M′ değerinin beta radyasyonu kaynaklı değişim ise yeni arayüzey durumları nedeniyle oluşan kafes kusurları ve değişken polarizasyon ile açıklanabilir.

5. Elektrik modülüs parametresinin sanal (M″) bileşeninin değişim ise dielektrik gevşeme süreçlerine (Maxwell-Wagner tipi polarizasyon) karşılık gelen, çeşitli radyasyon dozu için 0,8 V ile 1,2 V aralığında belirgin bir tepeye sahiptir. Oluşan bu tepe (~1,85V), gevşeme süreçlerine bağlı olan kendine özgü yoğunluk dağılımından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

6. Beta radyasyonundan önce ve sonrası için 0,5 V ile 3 V aralığında M″-M′ grafiğinden elde edilen Cole-Cole grafikleri ardışık bir yarım dairesel ark oluşmaktadır. Bu yarım dairesel arkın varlığı, arayüzey katmanındaki polarizasyon mekanizmasının tane sınırlarından ziyade tanelerin etkisinden kaynaklandığını göstermektedir. Ayrıca azalan radyasyon ile azalan yarın daire yayların tane sınırının iletim mekanizmasına katkısının kademeli olarak azalması ile açıklanmıştır.

7. Karmaşık empedans (Z^*)'ın reel ve sanal kısımlarından elde edilen faz açısı (θ) değeri negatif voltaj bölgesinde yaklaşık 85° de sabit kaldığı görülmektedir. Negatif voltaj

bölgesi için faz açısı(θ)'nın 85°'e yakın bu sabit değerleri, yapı bu voltaj bölgesinde saf kapasitif davranış göstermiştir.

8. MPS yapısına radyasyon yokken (0 kGy), 1 kHz frekansında C-V ölçümlerinden elde edilen ε′-V grafiğinden kuvvetli yığılım bölgesinde dielektrik sabiti (ε′) değeri 407,56 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değer geleneksel yalıtkan malzemelere göre daha fazla yük ve enerji depolama özelliğine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Bu durum geleneksel ara katmanların yerine, yüksek dielektrik sabitine sahip 0,03 Gr: PVA polimer arayüzey tabakasının rahatlıkla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, 0-22 kGy beta radyasyon doz aralığında, bu Au/ (0,03 Gr: PVA) / n-Si MPS tipi yapının çalışmasını önleyecek önemli bir kusur veya bozulmanın ortaya çıkmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuç radyasyon dedektörleri, güneş pilleri, diyotlar, kapasitörler ve transistörler gibi elektronik bileşenlerin radyasyona dayanıklı biçimde üretilmesi açısından önem taşımaktadır. Çünkü tıbbi, endüstriyel ve nükleer gibi alanda kullanılmak üzere radyasyona dayanıklı elektronik malzeme birleşenlerinin üretilmesi, bu sistemlerin çalışma güvenirliğinin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca uzay ortamı doğal olarak elektrik veya manyetik alanlar, yüklü parçacıklar ile güneş ve galaktik radyasyondan oluştuğu göz önüne alındığında, uydu ve uçak sistemlerinde kullanılmak üzere radyasyona dayanıklı elektronik malzeme bileşenlerinin üretilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, bu tür dayanıklı elektronik bileşenlere duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu açıdan bakıldığında yapılan tez çalışmasının, ilgi çekici olacağı ve literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, 0,03 Grafen katkılı-PVA için elde edilen ε′ (~408) değeri, geleneksel SiO_2 için bilinen 3,8 değerinden 110 kat daha fazladır. Bu sonuç, MS arasında yüksek dielektrik sabitli malzemenin kullanılması MIS, MOS ve MPS tipi bir yapının sığasını (kapasitansını) oldukça artırılabilir ve dolayısıyla daha çok yük veya enerji depolanabilir süper kapasiörler elde edilebilir. Ayrıca, üretilen MPS yapısının beta radyasyonu altında belirgin bir radyasyon tepkisi göstermesine karşın bozulma eğilimi sergilememesi, bu yapının MIS/MOS tipi dedektörler yerine MPS tipi bir radyasyon dedektörü olarak başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bunun nedeni, organik/polimer tabakaların geleneksel yalıtkan veya oksit tabakalara kıyasla daha az enerji tüketimi sağlamalarının yanı sıra esnek, hafif, düşük maliyetli ve molekül başına daha küçük kütleye sahip olmalarıdır. Fabrikasyon açısından değerlendirildiğinde ise, elektrospinning ve sol-jel gibi daha basit üretim yöntemleriyle elde edilebilmeleri, organik/polimer tabakalara

ek bir avantaj kazandırmaktadır. Bu nedenlerle, söz konusu tabakalar son yıllarda geleneksel arayüzey tabakaların yerine giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda, ileride bu ve benzeri konular üzerinde çalışılacak araştırmacılara yol gösterici olabilecek ve çalışmanın kapsamını artırmaya katkı sağlayacak bazı tavsiye ve öneriler aşağıda sıralanmıştır;

1. Üretilen yapıların performansını iyileştirmek amacıyla, düşük dirençli omik kontak oluşturulmasına ve MS arayüzeyinde büyütülen tabakanın homojen yapıda ve yüksek dielektrik sabitli olmasına özen gösterilmelidir.

2. Ölçümlerin doğruluğunu artırmak ve gürültü ile ölçüm hatalarını azaltmak için, deneyler dış etkilerden izole edilmiş ve vakum altında tutulmuş bir kriyostat içerisinde yapılmalıdır.

3. Üretilen yapıların yarıiletkenin yasak enerji bant aralığının birleşim bölgesinde oluşabilecek istenmeyen arayüzey durumlarını minimize edebilmesi için fabrikasyon işlemleri son derece dikkatli ve temiz bir ortamda gerçekleştirilmelidir.

4. Arayüzey tabaka kalınlığının radyasyona bağlı etkisini değerlendirebilmek için farklı kalınlıktaki polimer (grafen+PVA) arayüzey tabakasına sahip malzemeler üretilerek aynı radyasyon dozları altında karşılaştırılabillir.

5. Arayüzey malzemesi olarak kullanılan %3 Grafen katkılı PVA' da bulunan grafen yüzde miktarı değiştirilerek aynı ışınlamalar altında elektriksel ve dielektrik karakteristikleri karşılaştırışmalı olarak incelenebilir.

6. Arayüzey tabakalı MIS ve MPS tipi yarıiletken yapıların hazırlanması sırasında, performans karşılaştırması yapmak amacıyla arayüzey tabakası olmayan MS tipi yapılar da üretilerek test edilmelidir.

7. Çalışılan bu malzemenin daha yüksek dozlardaki davranışı incelenebilir.

8. Radyasyon uygulandıktan sonra, belirli zaman aralıklarıyla ölçüm alınarak radyasyon etkisinin zamana bağlı değişimi incelenebilir.

9. Katkılı bir arayüzey tabakası hazırlanacaksa, katkı oranı performansı doğrudan etkilediğinden, farklı katkılama oranları kullanılarak üretilen yapılar incelenmeli ve bu incelemeler sonucunda optimum katkı oranı belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

1. Bhatnagar M., ve Baliga, B. J. (1993). Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for power devices. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Electron Devices*, 40(3), 645-655.

2. Cooper, J.A., Melloch, M. R., Singh, R., Agarwal, A., ve Palmour, J.W. (2002). Status and prospects for SiC power MOSFETs. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Electron Devices*, 49(4), 658-664.

3. Davydov, D. V., Lebedev, A. A., Kozlovski, V. V., Savkina, N. S., ve Strel'chuk, A. M. (2001). DLTS study of defects in 6H- and 4H-SiC created by proton irradiation. *Physica B: Condensed Matter*, 308-310(1-2), 641-644.

4. Suchodolskis, A., Hallén, A., Linnarsson, M. K., Österman, J., ve Karlsson, U.O. (2006). Ion implantation damage annealing in 4H-SiC monitored by scanning spreading resistance microscopy, *Thin Solid Films*, 515(2), 611-614.

5. Hallén, A., Janson, M. S., Yu. Kuznetsov, A., Åberg, D., Linnarsson, M. K., Svensson, B. G., Persson, P. O., Carlsson, F. H. C., Storasta, L., Bergman, J. P., Sridhara, S. G., ve Zhang. Y. (2002). Ion implantation of silicon carbide. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, *186*(1-4), 186-194.

6. Luo, Z., Chen, T., Ahyi, A. C., Sutton, A. K., Haugerud, B. M., Cressler, J. D., Sheridan, D. C., Williams, J. R., Marshall, P. W., ve Reed, R. A. (2004). Proton radiation effects in 4H-SiC diodes and MOS capacitors. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science*, 51(6), 3748-3752.

7. Luo, Z., Chen, T., Cressler, J. D., Sheridan, D. C., Williams, J. R., Reed, R. A., ve Marshall, P. W. (2003). Impact of proton irradiation on the static and dynamic characteristics of high-voltage 4H-SiC JBS switching diodes. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science,* 50(6), 1821-1826.

8. Brisset, C., Noblanc, O., Picard, C., Joffre, F., ve Brylinski, C. (2000). 4H-SiC MESFETs behavior after high dose irradiation. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science*, 47(3), 598-603.

9. Moscatelli, F., Scorzoni, A., Poggi, A., Bruzzi, M., Sciortino, S., Lagomarsino, S., Wagner, G., Mandic, I., Nipoti, R. (2006). Radiation hardness after very high neutron irradiation of minimum ionizing particle detectors based on 4H-SiC p+n junctions. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science*, *53*(3), 1557-1563.

10. Rhoderick, E. H., ve Williams, R. H. (1988). *Metal semiconductor contacts*. (2nd ed.). Oxford: Oxford Press, 257-267.

11. Sharma, B. L. (1984). *Metal-semiconductor schottky barrier junctions and their applications*. (1st ed.). New York and London: Plenum Press, 1-148.

12. Sze, S. M., ve Kwok, K. N. (2007). *Physics of semiconductor devices*. (3rd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, 154-300.

13. Lipkin, L. A., ve Palmour, J. W. (1999). Insulator investigation on SiC for improved Reliability. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Electron Devices*, 46(3), 525-532.

14. Kao, K. C. (2004). *Dielectric phenomena in solids*. (1st ed.). Amsterdam: Elsevier Academic Press, 40-110.

15. Sönmezoğlu, S., Şenkul, S., Taş, R., Çankaya, G. ve Can, M. (2010). Electrical and interface state density properties of polyaniline-poly-3-methy triophene blend/p-Si Schottky barrier diode. *Solid State Sciences*, 12(5), 706-711.

16. Güllü Ö., Kiliçoğlu T. ve Türüt A. (2010). Electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71(3), 351–356.

17. Güllü, O. ve Türüt, A. (2009). Electrical analysis of organic interlayer based metal/interlayer/semiconductor diode structures. *Journal of Applied Physics*, 106(10), 103717(1-6).

18. Çakar, M., Türüt, A. ve Onganer, Y. (2002). The conductance and capacitance frequency characteristics of the rectifying junctions formed by sublimation of organic pyronine-B on p-type silicon. *Journal of Solid State Chemistry,* 168(1), 169-174.

19. Altındal, Ş., Sarı, B., Ünal, H. I. ve Yavaş, N. (2009). Electrical characteristics of Al/Polyindole Schottky barrier diodes temperature dependence. *Journal of Applied Polymer Science,* 113(5), 2955-2961.

20. Vural, Ö., Şafak, Y., Altındal, Ş. ve Türüt, A. (2010). Current-voltage characteristics of Al/Rhodamine-101/n-GaAs structures in the wide temperature range. *Current Applied Physics*, 10(3), 761-765.

21. Uslu, H., Altındal, Ş. ve Dökme, İ. (2010). Illumination effect on electrical characteristics of organic-based Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Physics*, 108(10), 104501(1-6).

22. Taşçıoğlu, İ., Uslu, H., Altındal, Ş., Durmuş, P., Dökme, İ. ve Tunç, T. (2010). The effect of gamma irradiation on electrical characteristics of Au/polyvinyl alcohol (Co, Zn-doped/n-Si Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Polymer Science*, 118(1), 596-603.

23. Dökme, İ., Altındal, Ş., Tunç, T. ve Uslu, İ. (2009). Temperature dependent electrical and dielectric properties of Au/polyvinyl alcohol (Ni, Zn-doped)/n-Si Schottky diodes. *Microelectron Reliability*, 50(19), 39-44.

24. Bülbül, M. M., Bengi, S., Dökme, İ., Altındal, Ş. ve Tunç, T. (2010). Temperature dependent capacitance and conductance-voltage characteristics of Au/Polyvinyl alcohol (Co, Zn)/n-Si Schottky diodes. *Journal of Applied Physics*, 108(3), 034517(1-6).

25. Taşçıoğlu, İ., Aydemir, U. ve Altındal, S. (2010). The explanation of barrier height inhomogeneities in Au/n-Si Schottky barrier diodes with organic thin interfacial layer. *Journal of Applied Physics,* 108(6), 064506(1-7).

26. Uslu, I., Başer, B., Yaylı, A. ve Aksu, M. L. (2007). Preparation and characterization of PVA/Zinc Acetate/Boron composite fibers. *e-Polymers*, 7(1), 145(1-6).

27. Uslu, I., Daştan, H., Altaş, A, Atakol, O. ve Aksu, M. L. (2007). Preparation and characterization of PVA/Boron polymer produced by an electrospinning technique. *e-Polymers*, 7(1), 133 (1-6).

28. Abd El-Kader, F. H., Hamza, S. S. ve Attia, G. (1993). Electrical and optical studies on γ irradiated pure and chromium-chloride-doped polyvinyl alcohol. *Journal of Materials Science*, 28, 6719-6723.

29. Bhajantri, R. F., Ravindrachary, V., Harisha, A., Ranganathaiah, C., ve Kumaraswamy, G. N. (2007). Effect of barium chloride doping on PVA microstructure: positron annihilation study. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 87(4), 797-805.

30. Salama, A. H., Dawy, M., ve Nada, A. M. A, (2004). Studies on dielectric properties and ac conductivity of cellulose polyvinyl alcohol blend. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 43(4), 1067-1083.

31. Bhargav, P. B., Mohan, V. M., Sharma, A. K., ve Rao, V. V. R. N. (2007). Structural and electrical properties of pure and NaBr doped poly(vinyl alcohol) (PVA) polymer electrolyte film for solid-state battery applications. *Ionics*, 13(6), 441- 446.

32. Pawde, S. M., Deshmukh, K., ve Parab, S. (2008). Preparation and characterization of poly(vinyl alcohol) and gelatin blend films. *Journal of Applied Polymer Science*, 109(2), 1328-1337.

33. Joshi, G., ve Pawde, S. M. (2006). Effect of molecular weight on dielectric properties of polyvinyl alcohol films. *Journal of Applied Polymer Science*, 102(2), 1014-1016.

34. Mosaad, M. M. (1990). Dielectric constant study in copper-poly(vinyl alcohol) mixtures. *Journal of Materials Science Letters*, 9, 32-33.

35. Ahmed, M. A., ve Abo-Ellil, M. S. (1998). Effect of dopant concentration on the electrical properties of polyvinyl alcohol (PVA). *Journal of Materials Science Letters*, 9(5), 391- 395.

36. Hyon, S. H., Cha, W. I., ve Ikada, Y. (1989). Preparation of transparent poly(vinyl alcohol) hydrogel. *Polymer Bulletin*, 22, 119-122.

37. Hemeda, O. M., Hemeda, D. M., ve Said, M. Z. (2003). Some physical properties of pure and doped polyvinyl alcohol under applied stress. *Mechanics of Time-Dependent Materials,* 7(3), 251-268.

38. Bouropolous, N., Psarras, G. C., Moustakas, N., Chrissanthopoulos, A., ve Baskoutas, S. (2008). Optical and dielectric properties of ZnO-PVA nanocomposites. *Physica Status Solidi*, 205(8), 2033-2037.

39. Chandar Shekar, B., Veeravazhuthi, V., Sakthivel, S., Mangalaraj, D., ve Narayandass, S. K. (1999). Growth, structure, dielectric and ac conduction properties of solution grown PVA films. *Thin Solid Films*, 348(1-2), 122-129.

40. Tunç, T., Altındal, Ş., Dökme, İ. ve Uslu, H. (2011). Anomalous peak in the forward bias C-V plot and temperature-dependent behavior of Au/PVA (Ni, Zn-doped)/n-Si (111) structures. *Journal of Electronic Materials*, 40(2), 157-164.

41. Demirezen, S. (2013). Frequency and voltage dependent dielectric properties and electrical conductivity of Au/PVA (Bi-doped)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature. *Applied Physics A*, 112(4), 827-833.

42. Kaya, A., Yücedağ, İ., Tecimer, H. ve Altındal, Ş. (2014). Comparative electric and dielectric properties of Al/p-Si structures with undoped and Co-doped interfacial PVA layer. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28, 26-30.

43. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., ve Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666-669.

44. An, Y., Behnam, A., Pop, E., Bosman, G., ve Ural, A. (2015). Forward-bias diode parameters, electronic noise, and photoresponse of graphene/silicon Schottky junctions with an interfacial native oxide layer. *Journal of Applied Physics*, 118(11), 114307.

45. Di Bartolomeo, A. (2016). Graphene Schottky diodes, An experimental review of the rectifying graphene/semiconductor heterojunction. *Physics Reports*, 606, 1-58.

46. Luongo, G., Di Bartolomeo, A., Giubileo, F., Chavarin, C. A., ve Wenger, C. (2018). Electronic properties of graphene/p-silicon Schottky junction. *Journal of Physics D, Applied Physics*, 51(25), 255305.

47. Min, B. K., Kim, S. K., Kim, S. J., Kim, S. H., Kang, M. A., Park, C.Y., Song, W., Myung, S., Lim, J., ve An, K. S. (2015). Electrical double layer capacitance in a Graphene embedded Al_2O_3 gate dielectric. *Scientific Reports*, 5(1), 16001(1-7).

48. Xu, Y., Bi, J., Xi, K., ve Liu, M. (2019). The effects of γ-ray irradiation on graphene/n-Si Schottky diodes. *Applied Physics Express*, 12(6), 061004.

49. Feteha, M. Y., Soliman, M., Gomaa, N. G., ve Ashry, M. (2002). Metal-insulator-semiconductor solar cell under gamma irradiation. *Renewable Energy*, 26(1), 113–120.

50. Umana-Membreno, G. A., Dell, J. M., Parish, G., Nener, B. D., Faraone, L., ve Mishra, U. K. (2003). ^{60}Co Gamma irradiation effects on n-GaN Schottky diodes, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Electron Devices*, 50(12), 2326–2334.

51. Ashry, M., ve Fayek, S. A. (2011). Radiation effects on fabricated Cu_2S/CdS heterojunction photovoltaic cells. *Renewable Energy*, 23(3–4), 441–450.

52. Srour, J. R., ve Palko, J. W. (2013). Displacement damage effects in irradiated semiconductor devices. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science*, 60(3), 1740–1766.

53. Ziel, A. (1968). *Solid-state physical electronics*. (2nd ed.). New Jersey: Prentice-Hall, 119-124.

54. Yacobi, B. G. (2003). *Semiconductor materials an introduction to basic principles*. (1st ed.). New York: Kluwer Academic Publishers, 116-117.

55. Tataroğlu, A. (2004). *MOS yapılarda temel fiziksel parametrelerin frekans ve radyasyon miktarına bağlı incelenmesi.* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-77.

56. Schroder, D. K. (1998). *Semiconductor material and device characterization*. (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 337-379.

57. Neamen, D. A. (1997). *Semiconductor physics and devices*. (2nd ed.). New York: Mc Graw-Hill, 420-523.

58. Grove, A. S. (1967). *Physics and technology of semiconductor devices*. (1st ed.). New York: John Wiley & Sons, 388.

59. Chu J., ve Sher A. (2010). *Device physics of narrow gap semiconductors*. (1st ed.). California: Springer, 203-209.

60. Altındal, Ş. (1993). *Al-SiO_x-pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri.* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 52-74.

61. Büyükbaş, A. (2015). *AuGe/SiO_2/p-Si/AuGe (MOS) kapasitörün elektrik ve dielektrik özelliklerinin incelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-35.

62. Nicollian, E. H., Brews J. R. (1982). *MOS (Metal oxide semiconductor) physics and technology*. (1st ed.). New York: John Wiley & Sons, 40-439.

63. Ghandhi, S. K. (1994). *VLSI (Very Large Scale Integration) fabrication principles*. (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 401-405.

64. Goetzberger, A., Klausmann, E., ve Schulz, M. J. (1976). Interface states on semiconductor/insulator surfaces. *Cemical Rubber Company Critical Reviews in Solid State Sciences*, 6(1), 1-43.

65. Hofstein, S. R., ve Warfield, G. (1965). Physical limitations on the frequency response of a semiconductor surface inversion layer. *Solid-State Electronics*, 8(3), 321-341.

66. Çevikbaş, G. (2014). *Alüminyum Titanat/Spinel'in radyasyon karşısındaki davranışının incelenmesi ve değerlendirilmesi.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 5-10.

67. Güllü, Ö., Çankaya, M., Biber, M. ve Türüt, A. (2008). Gamma irradiation-induced changes at the electrical characteristics of organic-based Schottky structures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(13), 135103.

68. Badila, M., Godignon, P., Millan, J., Berberich, S., ve Brezeanu, G. (2001). The electron irradiation effects on silicon gate dioxide used for power MOS devices. *Microelectronics Reliability*, 41(7), 1015–1018.

69. García, H., Dueñas, S., Castán, H., Gómez, A., Bailón, L., Barquero, R., Kukli, K., Ritala, M., Leskelä, M. (2009). Irradiation effect on dielectric properties of hafnium and gadolinium oxide gate dielectrics. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 27(1), 416-420.

70. Chandra, R. (2011). *Nuclear medicine physics: The basics*. (7th ed.). Philadelphia: Lippincott Williams &Wilkins, 208.

71. Barbottin, G., ve Vapaille, G. (1999). *Instabilities in silicon devices: New insulators, devices and radiation effects*. (3rd ed.). North-Holland: Elsevier Science Besloten Vennootschap, 639-722.

72. Srour, J. R., Marshall, C. J., ve Marshall, P. W. (2003). Review of displacement damage effects in silicon devices. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science*, 50(3), 653–670.

73. Stuart, M. A. (2007). *IN-SITU Measurement of total dose radiation effects on parallel plate MOS capacitors using the NPS linear accelerator*. California: Naval Postgraduate School, 47-56.

74. Schwank, J. R. (1994). *Basic mechanisms of radiation effects in the natural space radiation environment.* New Mexico: Sandia National Laboratories, 11-43.

75. Srour, J. R., ve McGarrity, J. M. (1988). Radiation effects on microelectronics in space. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers,* 76(11), 1446-1451.

76. Ma, T. P., ve Dressendorfer P.V. (1989). *Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits*. (1st ed.). New York: John Wiley & Sons, 87-231.

77. Benedetto, J. M., ve Boesch Jr, H. E. (1984). MOSFET and MOS capacitor responses to ionizing radiation. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science*, 31(6), 1461-1466.

78. Fröhlich. H. (1949). *Theory of dielectric constant and dielectric loss*. (2nd ed.). London: Oxford University Press, 1-30.

79. Smyth, C. P. (1955). *Dielectric behavior and structure*. (1st ed.). New York: McGraw-Hill, 1-3.

80. Raju, G. G. (2003). *Dielectrics in electric fields*. (1st ed.). New York: Marcel Dekker Inc, 35-195.

81. Popescu, M., ve Bunget, I. (1984). *Physics of solid dielectrics*. (1st ed.). Amsterdam: Elsevier, 443.

82. Kwan, C. K. (2004). *Dielectric phenomena in solids: With emphasis on physical concepts of electronic processes*. (1st ed.). Amsterdam: Elsevier Academic Press, 78-80.

83. Kumar, A., ve Chand, P. (2017). *Ferroelectrics: Principles and applications*. (1st ed.). New York: John Wiley & Sons, 1-18.

84. Wert, C. A., ve Thomson, R. M. (1970). *Physics of solids*. (2nd ed.). New York: McGraw-Hill Education, 388-421.

85. Chelkowski, A. (1980). *Dielectric physics*. (1st ed.). Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 396.

86. Kasap S. O. (2018). *Principles of electronic materials and devices*. (4th ed.). New York: McGraw- Hill Education, 874.

87. Macedo, P. B., Moynihan, C. T., ve Bose, R. (1972). Dielectric modulus: experiment, application and interpretation. *Physics and Chemistry of Glasses*, 13(6), 171–179.

88. Riley, F. L. (2000). Silicon nitride and related materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(2), 245-265.

89. Demirezen, S., Sönmez, Z., Aydemir, U. ve Altındal, Ş. (2012). Effect of series resistance and interface states on the I–V, C–V and G/ω–V characteristics in Au/Bidoped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature. *Current Applied Physics*, 12(1), 266-272.

90. Kaya, A., Vural, Ö., Tecimer, H., Demirezen, S. ve Altındal, Ş. (2014). Frequency and voltage dependence of dielectric properties and electric modulus in Au/PVC+ TCNQ/p-Si structure at room temperature, *Current Applied Physics*, 14(1), 322-330.

91. Dökme, İ., Tunç, T., Uslu, İ. ve Altındal, Ş. (2011). The Au/Polyvinyl Alcohol (Co, Zn-doped)/n-type silicon Schottky barrier Devices. *Synthetic Metals*, 161(5-6), 474-480.

92. Shuyin, S., Guilling, S., Xiangyu, C., Linna, Z., ve Fanggao, C. (2014). AC and DC behavior of finger-sensing metal/polymer composites at various pressures. *Composites Science and Technology*, 97, 115-120.

93. Barış, B. (2013). Frequency dependent dielectric properties in Schottky diodes based on rubrene organic semiconductor. *Physica E: Low-Demensional Systems and Nanostructures*, 54(1), 171-176.

94. Lee, J. S., Choi, K. H., Ghim, H. D., Kim, S. S., Chun, D. H., Kim, H. Y., ve Lyoo, W. S. (2004). Role of molecular weight of atactic poly (vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning. *Journal of Applied Polymer Science*, 93(4), 1638-1646.

95. Aslam, M., Kalyar, M. A., ve Raza, Z. A. (2018). Polyvinyl alcohol: A review of research status and use of polyvinyl alcohol base nanocomposites. *Polymer Engineering and Science*, 58(12), 2119-2124.

96. Marten, F. L. (2000). *Vinyl alcohol polymers*. New York: John Wiley & Sons, 85-99.

97. Koosha, M., ve Mirzadeh, H. (2015). Electrospinning, mechanical properties, and cell behavior study of chitosan/PVA nanofibers. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 103(9), 3081–3093.

98. Lapa, H. E. (2018). *Au/(Zn-Katkılı PVA)/n-4HSiC (MPS) yapıların elektrik ve dielektrik özelliklerinin oda sıcaklığında arayüzey tabakasının kalınlığına bağlı incelenmesi*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 1-15.

99. Büyükbaş-Uluşan, A., Altındal-Yerişkin, S., Tataroğlu, A., Balbaşı, M. ve Kalandaragh, Y. A. (2018). Electrical and impedance properties of MPS structure based on (Cu_2O–CuO–PVA) interfacial layer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(10), 8234–8243.

100. Bilkan, Ç., Badali, Y., Fotouhi-Shablou, S., Azizian-Kalandaragh, Y. ve Altındal, Ş. (2017). On the temperature dependent current transport mechanisms and barrier inhomogeneity in Au/SnO_2-PVA/n-Si Schottky barrier diodes. *Applied Physics A: Material Science & Processing*, 123(8), 560-570.

101. Gökçen, M. ve Tunç, T. (2013). Enhancement of dielectric characteristics of polyvinyl alcohol (PVA) interfacial layer in Au/PVA/n-Si structures by Bi_2O_3 disperse. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 10, 64-69.

102. Özmen, Ö. T. (2014). Effects of PCBM concentration on the electrical properties of the Au/P_3HT: PCBM/n-Si (MPS) Schottky barrier diodes. *Microelectronics Reliability*, 54(12), 2766–2774.

103. Slonczewski, J. C., ve Weiss, P. R. (1958). Band structure of graphite. *Physical Review*, 109(2), 272-279.

104. Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S.I., ve Seal, S. (2012). Graphene based materials: Past, present, and future. *Progress in Materials Science*, *56(8),* 1178–1271.

105. Tan, S. O. (2017). Comparison of graphene and zinc dopant materials for organic polymer interfacial layer between metal semiconductor structures. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions Electron Devices*, 64(12), 5121-5127.

106. Çiçek, O., Tan, S. O., Tecimer, H. ve Altındal, S. (2018). Role of graphene-doped organic/polymer nanocomposites on the electronic properties of Schottky junction structures for photocell applications. *Journal of Electronic Materials*, 47(12), 7134-7142.

107. Altındal-Yerişkin, S., Balbaşı, M. ve Orak, İ. (2017). The effects of (graphene doped-PVA) interlayer on the determinative electrical parameters of the Au/n-Si (MS) structures at room temperature. *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 28(18), 14040–14048.

108. Novoselov, K. S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T. J., Khotkevich, V. V., Morozov, S. V., ve Geim A. K. (2005). Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), 10451-10453.

109. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S.V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva-Irina V., Dubonos, S.V., ve Firsov, A. (2005). Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 438(7065), 197–200.

110. Zhang, Y., Tan, Y., Stormer, H. L., ve Kim, P. (2005). Experimental observation of the quantum Hall Effect and Berry's phase in graphene. *Nature*, 438(7065), 201–204.

111. Galpaya, D., Wang, M., Liu, M., Motta, N., Waclawik, E., ve Yan, C. (2012). Recent advances in fabrication and characterization of graphene-polymer nanocomposites. *Graphene*, 1(02), 30–49.

112. Kuilla, T., Bhadra, S., Yao, D., Kim, N. H., Bose, S., ve Lee, J. H. (2010). Recent advances in graphene based polymer composites. *Progress in Polymer Science*, 35(11), 1350–1375.

113. Çiçek, O. (2016). *Polivinil alkol arayüzey tabakalı schottky engel diyotların hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi.* Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 45-47.

114. Qin, X. H., ve Wang, S. Y. (2006). Filtration properties of electrospinning nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 102(2), 1285–1290.

115. Pan, H., Li, L., Hu, L., ve Cui, X. (2006). Continuous aligned polymer fibers produced by a modified electrospinning method. *Polymer*, 47(14), 4901–4904.

116. Bosworth, L. A., ve Downes, S. (2011). *Electrospinning for tissue regeneration*. (1st ed.). United States of America: Woodhead Publishing, 5-7.

117. Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W. E., Lim, T. C., ve Ma, Z. (2005). *An introduction to electrospinning and nanofibers*. (1st ed.). Singapore: World Scientific, 1-48.

118. Wu, C. M., Chiou, H. G., Lin, S. L., ve Lin, J. M. (2012). Effects of electrostatic polarity and the types of electrical charging on electrospinning behavior. *Journal of Applied Polymer Science*, 126(S2), 89-97.

119. Taşçıoğlu, İ., Tüzün Özmen, Ö., Şağban, H. M., Yağlıoğlu, E., ve Altındal, Ş. (2017). Frequency dependent electrical and dielectric properties of Au/P_3HT: PCBM: F_4-TCNQ/n-Si Schottky barrier diode. *Journal of Electronic Materials*, 46(4), 2379–2386.

120. Nezhadesm-Kohardafchahi, S., Farjami-Shayesteh, S., Badali, Y., Altındal, Ş., Jamshidi-Ghozlu, M. A., ve Azizian-Kalandaragh, Y. (2018). Formation of ZnO nanopowders by the simple ultrasound-assisted method: Exploring the dielectric and electric properties of the Au/(ZnO-PVA)/n-Si structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 86, 173–180.

121. Ocak, Y. S., Kiliçoğlu, T., Topal, G. ve Başkan, M. H. (2010). ^{60}Co γ-irradiation effects on electrical properties of a rectifying diode based on a novel macrocyclic Zn octaamide complex. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment,* 612(2), 360-366.

122. Miao, B., Mahapatra, R., Jenkins, R., Silvie, J., Wright, N. G., ve Horsfall, A. B. (2009). Radiation induced change in defect density in HfO_2-based MIM capacitors. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Sciences*, 56(5), 2916-2924.

123. Akbay, A., Korkut, H., Ejderha, K., Korkut, T. ve Türüt, A. (2011). Responses of Pt/n-InP Schottky diode to electron irradiation in different temperature conditions. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 289, 145-148.

124. Krishnan, S., Sanjeev, G., ve Pattabi, M. (2008). Electron irradiation effects on the Schottky diode characteristics of p-Si. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interaction with Materials and Atoms*, 266(4), 621-624.

125. Torii, K., Shiraishi, K., Miyazaki, S., Yamabe, Y., Boero, M., Chikyow, T., Yamada, K., Kitajima, H., ve Arikado, T. (2004). Physical model of BTI, TDDB and SILC in HfO_2-based high-k dielectrics. *International Electron Devices Meeting Technical Digest*, 129-132.

126. Bersuker, G., Sim, J. H., Park, C. S., Young, C. D., Nadkarni, S. V., Choi, R., ve Lee, B. H. (2007). Mechanism of electron trapping and characteristics of traps in HfO_2 gate stacks. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Device and Materials Reliability*, 7(1), 138-145.

127. Dixit, S. K., Zhou, X. J., Schrimpf, R. D., Fleetwood, D. M., Pantelides, S. T., Choi, R., Bersuker, G., ve Feldman, L. C. (2007). Radiation induced charge trapping in ultrathin HfO_2-based MOSFETs. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science*, 54(6), 1883–1890.

128. Dökme, İ., Durmuş, P. ve Altındal, Ş. (2008). Effects of γ-ray irradiation on the C-V and G/ω-V characteristics of Al/SiO_2/p-Si (MIS) structures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(5), 791–796.

129. Çınar, K., Yıldırım, N., Coşkun, C. ve Türüt, A. (2009). Temperature dependence of current-voltage characteristics in highly doped Ag/p-GaN/In Schottky diodes. *Journal of Applied Physics*, 106(7), 073717(1-5).

130. Reddy, V. R., Reddy, M. S. P, Kumar, A. A., ve Choi, C. J. (2012). Effect of annealing temperature on electrical properties of Au/polyvinyl alcohol/n-InP Schottky barrier structure. *Thin Solid Film*, 520(17), 5715-5721.

131. Mamor, M., Sellai, A., Bouziane, K., Al Harthi, S. H., Al Busaidi, M., ve Gard, F. S. (2007). Influence of He-ion irradiation on the characteristics of Pd/n-$Si_{0.90}Ge_{0.10}$/Si Schottky contacts. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(5), 1351–1356.

132. Teffahi, A., Hamri, D., Mostefa, A., Saidane, A., Al Saqri, N., Felix, J.F., ve Henini, M. (2016). Effect of ^{60}Co γ-ray irradiation on electrical properties of Ti/Au/GaAs1-xNx Schottky diodes. *Current Applied Physics*, 16(8), 850–858,

133. Fonash, S. J., Ashok, S., ve Singh, R. (1981). Effect of ion-beam sputter damage on Schottky barrier formation in silicon. *Applied Physics Letters*, 39(5), 423–425.

134. Grusell, E., Berg, S., ve Andersson, L. P. (1980). Electrical defects in silicon introduced by sputtering and sputter-etching. *Journal of the Electrochemical Society*, 127(7), 1573-1576.

135. Güllü, Ö., Demir, F., Cimilli, F. E., ve Biber, M. (2008). γ- irradiation induced changes in the electrical characteristics of Sn/p-Si Schottky contacts. *Vacuum*, 82(8), 789–793.

136. Cheung, S. K., ve Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85–87.

137. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052–5053

138. Card, H. C., ve Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1589-1598.

139. Larin, F. (1968). *Radiation effects in semiconductor devices*. (1st ed.). New York: John Wiley & Sons, 8-16.

140. De Vasconcelos, E. A., Da Silva Jr, E. F., Khoury, H., ve Freire, V. N. (2000). Effect of aging on x-ray induced dopant passivation in MOS capacitors. *Semiconductor Science and Technology*, 15(8), 794-798.

141. Tataroğlu, A. ve Altındal, Ş. (2009). Gamma-ray irradiation effects on the interface states of MIS structures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 151(2), 168-172,

142. Candelori, A., Paccagnella, A., Cammarata, M., Ghidini, G., ve Ceschia, M., (1999). Electron irradiation effect on thin MOS capacitors. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 245(1-3), 238-244,

143. Senthil Srinivasan V. S., ve Pandya, A. (2011). Dosimetry aspects of hafnium oxide metal-oxide-semiconductor (MOS) capacitor. *Thin Solid Films*, *520*(1) 574-577,

144. Moloi, S. J., ve McPherson, M. (2013). Capacitance–voltage behavior of Schottky diodes fabricated on p-type silicon for radiation-hard detectors. *Radiation Physics and Chemistry*, 85, 73-82,

145. Zeyrek, S., Turan, A. ve Bülbül, M. M. (2013). The C-V and G-V Electrical Characteristics of ^{60}Co γ-Ray Irradiated Al/Si_3N_4/p-Si (MIS) Structures. *Chinese Physics Letters*, 30(7), 077306 (1-5).

146. Oldham, T. R. (1999). *Ionizing radiation effects in MOS oxides*. Singapore: World Scientific Publishing, 117-130.

147. Fleetwood, D. M. (1992). Border traps in MOS devices. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science*, 39, 269-271.

148. Ma, T. P. (1989). Interface trap transformation in radiation or hot-electron damaged MOS structures. *Semiconductor Science and Technology*, 4(12), 1061-1079.

149. Chauhan, R. K., ve Chakrabarti, P. (2002). Effect of ionizing radiation on MOS capacitors. *Microelectronic Journal*, 33(3), 197-203.

150. Gökçen, M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş. ve Bülbül, M. M. (2008). The effect of ^{60}Co (γ-ray) irradiation on the electrical characteristics of Au/SnO2/n-Si (MIS) structures. *Radiation Physics and Chemistry,* 77(1), 74-78.

151. Tuğluoğlu, N., Karadeniz, S., Yüksel, F., Şafak, H. ve Kuş, M. (2015). ^{60}Co gamma irradiation effects on the capacitance and conductance characteristics of Au/PMI/n-Si Schottky diodes. *Indian Journal of Physics*, 89(8), 803–810

152. Al-Dharob, M. H., Kökce, A., Aldemir, D. A., Özdemir, A. F. ve Altındal, Ş. (2020). The origin of anomalous peak and negative capacitance on dielectric behavior in the accumulation region in Au/(0.07 Zn-doped polyvinyl alcohol)/n-4H–SiC metal-polymer semiconductor structures/diodes studied by temperature-dependent impedance measurements. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 144, 109523.

153. Bilkan, Ç., Gümüş, A. ve Altındal, Ş. (2015). The source of negative capacitance and anomalous peak in the forward bias capacitance-voltage in Cr/p-si Schottky barrier diodes (SBDs). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 39, 484-491.

154. Arslan, E., Şafak, Y., Altındal, Ş., Kelekçi, Ö., ve Özbay, E. (2010). Temperature-dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGaN/AlN/GaN heterostructures. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(20-22), 1006-1011.

155. Hung, K. K., ve Cheng, Y.C. (1987). Determination of Si-SiO_2 interface trap properties of p-MOS structures with very thin oxides by conductance measurement. *Applied Surface Science,* 30(1), 114-119.

156. Singh, R. J., ve Srivastava, R. S. (1982). Investigations of interface-state density in Si MOS structures. *Solid-State Electronics*, 25(3) 227-232.

157. Berglund, C. N. (1966). Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science,* 13(10), 701-705.

158. Nicollian, E. H., Goetzberger, A., ve Lopez, A.D. (1969). Expedient method of obtaining interface state properties from MIS conductance measurements. *Solid-State Electronics*, 12(12) 937-944.

159. Kelberlau, U., ve Kassing, R. (1979). Theory of nonequilibrium properties of MIS capacitors including charge exchange of interface states with both bands. *Solid-State Electronics*, 22(1), 37-45.

160. Nicollian, E. H., ve Goetzberger, A. (1967). The Si-SiO_2 interface -electrical properties as determined by the metal-insulator-silicon sonductance technique. *Bell System Technical Journal*, 46(6), 1055-1133.

161. Selçuk, A. B. ve Bilge Ocak, S. (2007). ^{60}Co γ-ray irradiation effects on the capacitance and conductance characteristics of tin oxide films on Si. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 577(3), 719–723.

162. Ibach, H., ve Luth, H. (2003). *Solid-state physics: An introduction to principles of materials science*. (3rd ed.). Berlin, Heidelberg: Springer, 428-430.

163. Nicollian, E. H., ve Goetzberger, A. (1965). MOS conductance technique for measuring surface state parameters. *Applied Physics Letters*, 7(8), 216-219.

164. Cooke, M. J. (1990). *Semiconductor devices*. (1st ed.). New Jersey: Prentice Hall, 294-308.

165. Nikravan, A., Badali, Y., Altındal, Ş., Uslu, İ. ve Orak, İ. (2017). On the frequency and voltage-dependent profiles of the surface states and series resistance of Au/ZnO/n-Si structures in a wide range of frequency and voltage. *Journal of Electronic Materials*, 46(10), 5728-5736.

166. Castagne, R., ve Vapaille, A. (1971). Description of the SiO_2-Si interface properties using very low-frequency MOS capacitance measurements. *Surface Science*, 28(1), 157-193.

167. Zhu, Z. F., Zhang, H. Q., Liang, H. W., Peng, X. C., Zou, J. J., Tang, B., ve Du, G. T. (2017). Characterization of interface state density of Ni/p-GaN structures by capacitance/conductance-voltage-frequency measurements. *Chinese Physics Letters*, 34(9), 097301(1-5).

168. Altındal, Ş., Kanbur, H., Yücedağ, İ. ve Tataroğlu, A. (2008) On the energy distribution of interface states and their relaxation time and capture cross-section profiles in Al/SiO2/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 85(7), 1495-1501.

169. Ertuğrul, R. ve Tataroğlu, A. (2014). Effects of gamma irradiation on electrical parameters of metal-insulator-semiconductor structure with silicon nitride interfacial insulator layer. *Radiation Effects & Defects in Solids*, 169(9), 791-799.

170. Karataş, Ş., Türüt, A. ve Altındal, Ş. (2005). Effects of ^{60}Co γ-ray irradiation on the electrical characteristics of Au/n-GaAs (MS) structures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 555, 260-265.

171. Singh, A. (1985). Characterization of interface states at Ni/nCdF_2 Schottky barrier type diodes and the effect of CdF_2 surface preparation. *Solid State Electronics*, 28(3), 223-232.

172. Boesch, H. E. (1982). Interface-state generation in thick SiO_2 layers. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Nuclear Science*, 29(6), 1445-1451.

173. Ma, T. P. (1993). Generation and transformation of interface traps in MOS structures. *Microelectronic Engineering*, 22(1-4), 197-200.

174. Tataroğlu, A., ve Altındal, Ş. (2007). Analysis of interface states and series resistance at MIS structure irradiated under ^{60}Co γ-rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 580(3), 1588-1593.

175. García, H., González, M. B., Mallol, M. M., Castán, H., Dueñas, S., Campabadal, F., Acero, M. C. Sambuco Salomone, L., ve Faigón, A. (2018). Electrical Characterization of Defects Created by γ-Radiation in HfO_2-Based MIS Structures for RRAM Applications. *Journal of Electronic Materials*, 47, 5013-5018.

176. Reddy, V. R. (2004). Electrical properties of Au/polyvinylidene fluoride/n-InP Schottky diode with polymer interlayer. *Thin Solid Films*, 556(1), 300-306.

177. Keskin, M., Akkaya, A., Ayyıldız, E., Uygun Öksüz, A. ve Özbay Karakuş, M. (2019). Investigation of the temperature-dependent electrical properties of Au/PEDOT: WO_3/p-Si hybrid device. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* 30(17), 16676–16686.

178. Alptekin, S. ve Altındal, Ş. (2019) Comparative study on current/capacitance: voltage characteristics of Au/n-Si (MS) structures with and without PVP interlayer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* 30(7), 6491–6499.

179. Tataroğlu, A. ve Altındal, Ş. (2006). Electrical characteristics of ^{60}Co γ-ray irradiated MIS Schottky diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 252(2), 257-262,

180. Baltakesmez, A., Bilkan, Ç. ve Güzeldir, B. (2020). Investigation of electrical and admittance analysis of Au/Thiophene/n-Si structure at room temperature. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 594, 412356.

181. Baltakesmez, A., Güzeldir, B., Sağlam, M. ve Biber, M. (2021). Interpretation of the I–V, C–V and G/ω-V characteristics of the Au/ZnS/n-GaAs/In structure depending on annealing temperature. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 611, 412801.

182. Sağlam, M., Baltakesmez, A. ve Güzeldir, B. (2019). Effect of electron radiation on electrical parameters of Zn/n-Si/Au–Sb and Zn/ZnO/n-Si/Au–Sb diodes. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 319(3), 667-378.

183. Von Hippel, A. R. (1954). *Dielectric and waves*. (1st ed.). New York: John Wiley & Sons, 3-178.

184. Ferreira, E. S., Gonc-Alves, K. A., Mitani, J., Yee, M., ve Tatumi, S. H. (2014). Gamma radiation effects in the capacitance of alpha alumina doped with rare earths. *Radiation Physics and Chemistry*, 95, 385-388.

185. Dökme, İ. ve Altındal, Ş. (2012). The effect of gamma irradiation on electrical and dielectric properties of Al-TiW-Pd_2Si/n-Si Schottky diode at room temperature. *Current Applied Physics*, 12(3), 860-864.

186. Ciuprina, F., Zaharescu, T., ve Plesa, I. (2013). Effects of γ-radiation on dielectric properties of LDPE–Al_2O_3 nanocomposites. *Radiation Physics and Chemistry*, 84, 145-150.

187. Tataroğlu, A., Yıldırım, M. ve Baran, H. M. (2014). Dielectric characteristics of gamma irradiated Au/SnO_2/n-Si/Au (MOS) capacitor. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28, 89-93.

188. Roy, M. S., Kumar, M., Jaiswal, P., ve Sharma, G. D. (2004). Investigation of iron (II) phthalocyanine-based Schottky device as gamma radiation sensor. *Radiation Measurements*, 38(2), 205-209.

189. Modi, K. B., ve Sharma, P. U. (2014). On the effect of SHI irradiation on dielectric properties of $Y_{3+x}Fe_{5-x}O_{12}$(x = 0.0–0.6) system. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 169(8), 723-739.

190. Tataroğlu, A., Altındal, Ş. (2007). The effects of frequency and γ-irradiation on the dielectric properties of MIS type Schottky diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms,* 254(1), 113-117.

191. Al-Karmi A. M. (2006). Impedance spectroscopy of gamma irradiated PM-355. *Radiation Measurements*, 41(2), 209-212.

192. Baydilli E. E. (2023). Investigation of the dielectric properties of Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$-SiO_2/n-Si (MFIS) type structures depending on gamma-irradiation. *Microelectronics Reliability*, 140, 114868-114876.

193. Altındal, Ş., Barkhordari, A., Azizian-Kalandaragh, Y., Çevrimli, B. S., ve Mashayekhi, H. R. (2022). Dielectric properties and negative-capacitance/dielectric in Au/n-Si structures with PVC and (PVC: Sm_2O_3) interlayer. *Materials Science in Semiconductor Processing,* 147, 106754.

194. Barkhordari, A., Altındal, Ş., Pirgholi-Givi, G., Mashayekhi, H., Özçelik, S., ve Azizian- Kalandaragh, Y. (2023). The influence of PVC and (PVC: SnS) interfacial polymer layers on the electric and dielectric properties of Au/n-Si structure. *Silicon*, 15(2), 855–865.

195. Tataroğlu, A., Al-Ghamdi, A. A., El-Tantawy, F., Farooq, W. A. ve Yakuphanoğlu, F. (2016). Analysis of interface states of FeO-Al_2O_3 spinel composite film/p-Si diode by conductance technique. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 122(3), 1–6.

196. Acar, F. Z., Uyar, R. E. ve Tataroğlu, A. (2023). Dielectric, conductivity, and modulus properties of Au/ZnO/p-InP (MOS) capacitor. *The Electrochemical Society Journal of Solid State Science and Technology*, 12(3), 033009.

197. Erbilen Tanrıkulu, E. ve Altındal Yerişkin, S., (2021). On the changes in the dielectric, electric modulus, and ac electrical-conductivity in the Al/($C_{29}H_{32}O_{17}$)/p-Si (MPS) structures in a wide range of frequency and voltage. *Physica B Condensed Matter*, 623, 413345(1-7).

198. Tuğluoğlu, N., Altındal, Ş., Tataroğlu, A. ve Karadeniz, S. (2004). Dielectric properties in Au/SnO_2/n-Si (MOS) structures irradiated under ^{60}Co-γ rays. *Microelectronics Journal*, 35(9), 731–738.

199. Baydilli, E. E., Kaymaz, A. ve Altındal, Ş. (2024). Over the irradiation-dependent behavior of the negative dielectric properties of GaAs-based MIS devices. *Radiation Physics and Chemistry*, 222, 111877.

200. Williams, G. (1986). Physics of solid dielectrics. *Journal of Electrostatics*, *18*(3), 345–346.

201. Lewis, T. J. (1981). Dielectric physics. *Physics Bulletin*, 32(7), 217.

202. Marıl, E., Tan, S. O., Altındal, Ş. ve Uslu, I. (2018). Evaluation of electric and dielectric properties of metal-semiconductor structures with 2% GC-doped-($Ca_3Co_4Ga_{0.001}O_x$) interlayer. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Electron Devices*, 65(9), 3901–3908.

203. Lapa, H. E., Kökçe, A., Özdemir, A. F., Uslu, İ. ve Altındal, Ş. (2018). A comparative study on dielectric behaviors 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(1-6).

204. Baraz, N., Yücedağ, İ., Azizian-Kalandaragh, Y. ve 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.

205. Anantha, P. S., ve Hariharan, K. (2005). Ac Conductivity analysis and dielectric relaxation behavior of nano $NaNO_3$-Al_2O_3 composites. *Materials Science and Engineering B-Solid*, 121(1), 12–19.

206. Badapanda, T., Harichandan, R. K., Nayak, S. S., Mishra, A., ve Anwar, S. (2014). Frequency and temperature dependence behavior of impedance, modulus, and conductivity of $BaBi_4Ti_4O_{15}$ Aurivillius ceramic. *Processing and Application of Ceramics*, 8(3), 145–153.

207. Ram, M., ve Chakrabart, S. (2008). Dielectric and modulus studies on $LiFe_{1/2}Co_{1/2}VO_4$. *Journal of Alloy Compounds*, 462(1-2), 214–219.

208. Chakrabarti, A., Bera, J., ve Sinha, T.P. (2009). Dielectric properties of $BaBi_4Ti_4O_{15}$ ceramics produced by cost-effective chemical method. *Physica B: Condensed Matter*, 404(8-11), 1498–1502.

209. Uslu, H., Dökme, İ., Afadiyeva, I. M. ve Altındal, Ş. (2010). Interface state density analyzing of Au/TiO_2 (rutile)/n–Si Schottky barrier diode. *Surface and Interface Analysis*, 42(6-7), 1257-1260.

210. Pakma, O., Serin, N., Serin, T. ve Altındal, Ş. (2009). The effects of preparation temperature on the main electrical parameters of Al/TiO_2/p-Si (MIS) structures by using the sol-gel method. *The Journal of Sol-Gel Science and Technology,* 50*,* 28-34.

211. Bengi, S., Altındal, Ş., ve Zeyrek, S. (2024). Determining the dielectric characteristics of the Au/$C_{20}H_{12}$/n-Si (MPS) structure over a wide temperature and voltage. *Indian Journal of Physics,* 98(6). 2039–2046.

212. Demirezen, S., ve Altındal Yerişkin, S. (2021). Frequency and voltage-dependent dielectric spectroscopy characterization of Al/(Coumarin-PVA)/p-Si structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(20), 25339-25349.

213. Akbaş, A. M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., ve Azizian Kalandaragh, Y. (2021). Frequency dependence of the dielectric properties of Au/(NG: PVP)/n-Si structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(6), 7657-7670.

214. Şafak Asar, Y., Sevgili, Ö. ve Altındal, Ş. (2023). Investigation of dielectric relaxation and ac conductivity in Au/(carbon nanosheet-PVP composite)/n-Si capacitors using impedance measurements. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(10), 893.



Gazili olmak ayrıcalıktır