



**SİLİSYUM NİTRAT ARAYÜZEY YALITKAN TABAKALI MIS YAPININ
ELEKTRİK VE DİELEKTRİK PARAMETRELERİ ÜZERİNE GAMA
RADYASYONUNUN ETKİLERİ**

Raziye ERTUĞRUL UYAR

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2016

Raziye ERTUĞRUL UYAR tarafından hazırlanan “SİLİSYUM NİTRAT ARAYÜZEY YALITKAN TABAKALI MIS YAPININ ELEKTRİK VE DİELEKTRİK PARAMETRELERİ ÜZERİNE GAMA RADYASYONUNUN ETKİLERİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Adem TATAROĞLU

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Sema BİLGE OCAK

Elektrik ve Enerji Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Abdullah YILDIZ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Dilber Esra YILDIZ

Fizik Anabilim Dalı, Hitit Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 26/01/2016

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

.....

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Raziye ERTUĞRUL UYAR

26/01/2016

SİLİSYUM NİTRAT ARAYÜZEY YALITKAN TABAKALI MIS YAPININ
ELEKTRİK VE DİELEKTRİK PARAMETRELERİ ÜZERİNE GAMA
RADYASYONUNUN ETKİLERİ

(Doktora Tezi)

Raziye ERTUĞRUL UYAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2016

ÖZET

Bu çalışmada, RF (radyo frekans) püskürtme metodu ile hazırlanan Si_3N_4 ince filmlili metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapının elektrik ve dielektrik parametreleri üzerine gama radyasyonun etkileri araştırıldı. Au/ Si_3N_4 /n-Si/Au (MIS) yapı, doz hızı 0,69 kGy/saat olan gama radyasyon kaynağı kullanılarak ışınlandı. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri 0-100 kGy toplam doz aralığında beş farklı frekans (1, 10, 100, 500 and 1000 kHz) için gerçekleştirildi. Elektrik ve dielektrik parametreler radyasyondan önce ve sonra bu ölçümler kullanılarak belirlendi. C ve G/ω değeri radyasyon kaynaklı kusurlar nedeniyle artan radyasyon dozu ile azalmaktadır. Ayrıca, C ve G/ω değeri artan frekans ile azalmaktadır. C ve G/ω 'nın frekans bağımlılığı metal-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumlarının varlığını göstermektedir. Hesaplanan arayüzey durumların (N_{ss}) değeri artan radyasyon dozu ile azalırken seri direnç (R_s) değeri artmaktadır. N_{ss} 'deki bu azalma yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde rekombinasyon merkezlerinin sayısındaki azalmadan kaynaklanmaktadır. Dielektrik sabiti (ϵ') ve kaybın (ϵ'') hesaplanan değeri radyasyon dozu ve frekanstaki artma ile azalmaktadır. AC iletkenlik, artan radyasyon dozu ile azalırken artan frekans ile artmaktadır. Elde edilen sonuçlar, MIS yapının hem elektrik hemde dielektrik parametrelerinin frekans ve radyasyona oldukça bağlı olduğunu göstermiştir.

Bilim Kodu : 202.1.147

Anahtar Kelimeler : MIS yapı, C-V ve G/ω ölçümleri, Elektrik ve dielektrik parametreler, Frekans bağımlılığı, Gama radyasyonunun etkileri

Sayfa Adedi : 112

Danışman : Doç. Dr. Adem TATAROĞLU

THE EFFECTS OF GAMMA RADIATION ON THE ELECTRICAL AND
DIELECTRIC PARAMETERS OF MIS STRUCTURE WITH SILICON NITRATE
INTERFACIAL INSULATOR LAYER

(Ph. D. Thesis)

Raziye ERTUĞRUL UYAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2016

ABSTRACT

In this study, the effects of gamma radiation on the electrical and dielectric parameters of metal-insulator-semiconductor (MIS) structure with Si_3N_4 thin film prepared by RF magnetron sputtering method were investigated. The Au/ Si_3N_4 /n-Si/Au (MIS) structure was irradiated using gamma-radiation source at a dose rate of 0,69 kGy/h. The capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω -V) measurements were carried out at a total dose range of 0-100 kGy for five different frequencies (1, 10, 100, 500 and 1000 kHz). The electrical and dielectric parameters were determined from these measurements before and after irradiation. The value C and G/ω decreases with the increasing radiation dose due to the irradiation-induced defects. Also, the value of C and G/ω decreases with the increasing frequency. The frequency dependence of C and G/ω indicates the existence of interface states at metal-semiconductor interface. The calculated value of series resistance (R_s) increases while the interface states (N_{ss}) value decreases with the increasing radiation dose. This decrease in N_{ss} is due to the reduction in the number of recombination centers at insulator/semiconductor interface. The calculated value of the dielectric constant (ϵ') and dielectric loss (ϵ'') decreases with the increase of radiation dose and frequency. While the value of ac conductivity (σ_{ac}) decreases with the increasing radiation dose, it increases with the increasing frequency. The obtained results showed that the electrical and dielectric parameters of the MIS structure considerably depend on both frequency and radiation.

Science Code : 202.1.147

Key Words : MIS structure, C-V and G/ω measurements, Electrical and dielectric parameters, Dependence of frequency, Effects of gamma radiation

Page Number : 112

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Adem TATAROĞLU

TEŞEKKÜR

“Hayatta en hakiki mürşit ilimdir, fendir.” sözünü beynimize kazıdığımız ve kurduğu Cumhuriyetin teminatı okullarında eğitim alarak bugünlere gelmiş olmanın gururunu yaşarken, Gazi M.Kemal ATATÜRK’ü büyük saygı ve minnetle anıyorum.

Tez çalışmam boyunca kıymetli bilgi ve engin tecrübesi ile bana yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen, özverisini ve iş disiplinini her zaman örnek alacağım değerli hocam, danışmanım Sn. Doç. Dr. Adem TATAROĞLU’na tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca gösterdikleri anlayış ve destekten dolayı, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğündeki yöneticilerime teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde çok büyük emeği olan, her zaman yanımda olup bana destek veren değerli aileme ve sevgili eşim Kemal UYAR’a teşekkür ederim.

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 KONTAKLAR.....	5
2.1. Metal/n-tipi Yarıiletken Omik Kontak	5
2.2. Metal/n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak.....	7
3. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPISI	11
3.1. İdeal MIS Yapı.....	11
3.1.1. Yığılım	15
3.1.2. Tükenim	15
3.1.3. Tersinim	16
3.2. Gerçek MIS Yapı	17
3.2.1. Arayüzey durumları	18
3.2.2. Sabit oksit yükleri	19
3.2.3. Hareketli iyonik yük.....	21
3.2.4. Yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yük	21
3.3. Arayüzey Durumlarının Etkisi	22

	Sayfa
3.4. İletkenlik Metodu ile Arayüzey Durum Yoğunluğunun Belirlenmesi.....	26
4. RADYASYON ETKİLERİ.....	27
4.1. Radyasyonun Sınıflandırılması.....	27
4.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi.....	28
4.2.1. İyonizasyon etkileri.....	29
4.2.2. Yerdeğiştirme etkisi.....	30
4.2.3. Elektriksel etkiler.....	31
4.3. Yarıiletken Yapılarda Radyasyon Etkileri.....	32
4.4. Radyasyon Doz Birimleri.....	33
5. DİELEKTRİKLER.....	35
5.1. Dielektrik Kutuplanma (Polarizasyon).....	35
5.2. Kutuplanma Mekanizmaları.....	38
5.2.1. Elektronik kutuplanma.....	40
5.2.2. Atomik (İyonik) kutuplanma.....	40
5.2.3. Yönelimli kutuplanma.....	41
5.2.4. Arayüzey (uzay) yük kutuplanması.....	41
5.3. Dielektrik Durulma (Relaksasyon).....	41
5.4. Kompleks Dielektrik Sabiti.....	42
5.5. Dielektrik Parametrelerin Belirlenmesi.....	44
5.6. Dielektrik Denklemleri.....	46
5.6.1. Debye denklemi.....	46
5.6.2. Cole-Cole denklemi.....	49
5.7. Dielektrik Malzemelerin Sınıflandırılması.....	51
6. DENEYSEL YÖNTEM.....	53

	Sayfa
6.1. Silisyum Nitrat (Si_3N_4) Kristal Yapısı	53
6.2. Au/ Si_3N_4 /n-Si (MIS) Yapıların Hazırlanması	54
6.2.1. Kristal temizleme	54
6.2.2. Yalıtkan silisyum nitrat (Si_3N_4) tabakasının RF püskürtme yöntemiyle oluşturulması	55
6.2.3. Omik kontakın oluşturulması	57
6.2.4. Doğrultucu kontakın oluşturulması	59
6.3. Kullanılan Ölçüm Düzenegi	60
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	61
7.1. Radyasyondan Önce MIS Yapının Frekansa Bağlı Elektriksel ve Dielektrik Karakteristikleri	61
7.1.1. Elektriksel Karakteristikler	61
7.1.2. Dielektrik Karakteristikler	70
7.2. Radyasyondan Sonra MIS Yapının Frekansa Bağlı Elektriksel ve Dielektrik Karakteristikleri	76
7.2.1. Elektriksel Karakteristikler	76
7.2.2. Dielektrik Karakteristikler	89
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	111

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.1. Hesaplanan arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) ve arayüzey durum zaman sabiti (τ) değerleri	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Omik kontakta nce metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı	5
Şekil 2.2. Omik kontakta sonra metal/n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı	6
Şekil 2.3. Yarıiletkene gerilim uygulandığında metal/n-tipi yarıiletken omik kontak için enerji bant diyagramı. a) negatif b) pozitif.....	7
Şekil 2.4. Doğrultucu kontakta nce metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı.....	8
Şekil 2.5. Doğrultucu kontakta sonra metal/n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı.....	8
Şekil 2.6. Yarıiletkene gerilim uygulandığında metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için enerji bant diyagramı. a) negatif b) pozitif.....	10
Şekil 3.1. Bir MIS yapının şematik gösterimi.....	11
Şekil 3.2. $V=0$ durumunda n-tipi yarıiletkenli ideal MIS yapının enerji-bant diyagramı.....	12
Şekil 3.3. Bir MIS yapının eşdeğer devre diyagramı	13
Şekil 3.4. $V \neq 0$ durumunda n-tipi yarıiletkenli ideal MIS yapının enerji-band diyagramı a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim.....	14
Şekil 3.5. Yığılım durumda metal ve yarıiletken üzerindeki yük dağılımları	15
Şekil 3.6. Tükenim durumda metal ve yarıiletken üzerindeki yük dağılımları.....	16
Şekil 3.7. Tersinim durumda metal ve yarıiletken üzerindeki yük dağılımları.....	17
Şekil 3.8. İdeal MIS yapının C-V eğrisi.	17
Şekil 3.9. Gerçek MIS yapıda ortaya çıkan durumlar ve yükler.....	18
Şekil 3.10. MIS yapısının eşdeğer devresi.....	19
Şekil 3.11. Gerçek MIS yapının C-V eğrisi.....	20
Şekil 3.12. Histeresis etkisi.....	22
Şekil 3.13. Arayüzey durumlarının etkisini içeren eşdeğer devre	23
Şekil 3.14. MIS yapının eşdeğer devresi	24

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Radyasyonun enerjisine göre sınıflandırılması	27
Şekil 4.2. Radyasyonun türüne göre sınıflandırılması.	28
Şekil 4.3. Madde ile foton etkileşim mekanizmaları: a) Fotoelektrik olay b) Compton olayı c) Çift oluşumu.....	30
Şekil 4.4. Elektriksel etkiler	31
Şekil 4.5. Yarıiletken yapılarda iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumlar	32
Şekil 5.1. Elektrik alan içerisinde dipollerin yönelimi.....	36
Şekil 5.2. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu	36
Şekil 5.3. Dielektrik kutuplanma mekanizmalarının frekans ile değişimi	39
Şekil 5.4. Uygulanan dış elektrik alan altında dielektrik kutuplanmanın zamana bağlı değişimi	40
Şekil 5.5. Kompleks dielektrik sabitinin gerçel (ϵ') ve sanal (ϵ'') bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi.....	44
Şekil 5.6. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör devresi	45
Şekil 5.7. Dielektrik sabiti (ϵ'), kayıp (ϵ'') ve kayıp tanjantın ($\tan \delta$) açısal frekans (ω) ile değişim eğrileri.....	48
Şekil 5.8. Tek durulma zamanlı dielektrik sistemler için Arc diyagramı	49
Şekil 5.9. Çoklu durulma zamanlı dielektrik malzemelerde Cole-Cole eğrisi.	50
Şekil 6.1. α - Si_3N_4 ve β - Si_3N_4 kristal yapılarının gösterimi.....	53
Şekil 6.2. Si_3N_4 'de a) AB ve b) CD şeklindeki Si-N tabakaları	54
Şekil 6.3. Si_3N_4 yapısı	54
Şekil 6.4. (a) Ar^+ iyonlarının hedeften molekül sökmesi, (b) sökülen molekülün alttaşa yerleşmesi.....	56
Şekil 6.5. Omik kontak için kullanılan bakır maske	58
Şekil 6.6. Doğrultucu kontak için kullanılan bakır maske	59
Şekil 6.7. Oluşturulan Au/ Si_3N_4 /n-Si (MIS) yapının şematik gösterimi	59

Şekil	Sayfa
Şekil 7.1. MIS yapının uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak (a) 1-30 kHz (b) 50-1000 kHz frekans aralığındaki C_m -V eğrileri.....	62
Şekil 7.2. MIS yapının uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak (a) 1-30 kHz (b) 50-1000 kHz frekans aralığındaki G_m/ω -V eğrileri.....	63
Şekil 7.3. MIS yapının uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak (a) 1-30 kHz (b) 50-1000 kHz frekans aralığındaki R_s -V eğrileri	65
Şekil 7.4. MIS yapının farklı doğru beslem gerilimleri için C_m -logf eğrileri	66
Şekil 7.5. MIS yapının farklı doğru beslem gerilimleri için G_m/ω -logf eğrileri	66
Şekil 7.6. MIS yapının farklı doğru beslem gerilimleri için R_s -logf eğrileri	67
Şekil 7.7. MIS yapının farklı doğru beslem gerilimleri için G_p/ω -logf eğrileri.....	69
Şekil 7.8. MIS yapının frekansa bağlı a) ϵ' -logf b) ϵ'' -logf ve c) $\tan\delta$ -logf eğrileri	72
Şekil 7.9. Oda sıcaklığında a.c. iletkenliğin (σ_{ac}) frekansla değişim eğrisi	73
Şekil 7.10. Kompleks modülüsün gerçel ve sanal kısımlarının frekansla değişim eğrisi a) M' -logf b) M'' -logf.....	75
Şekil 7.11. MIS yapının 1 kHz, 100 kHz ve 1 MHz frekansları için C-V eğrileri	77
Şekil 7.12. MIS yapının 1 kHz, 100 kHz ve 1 MHz frekansları için G/ω -V eğrileri	78
Şekil 7.13. MIS yapının 0, 10 ve 100 kGy dozları için C-V eğrileri	79
Şekil 7.14. MIS yapının 0, 10 ve 100 kGy dozları için G/ω -V eğrileri	80
Şekil 7.15. MIS yapının 1 kHz ve 1 MHz frekansları için R_s -V eğrileri	82
Şekil 7.16. MIS yapının 0, 10 ve 100 kGy dozları için R_s -V eğrileri	83
Şekil 7.17. MIS yapının 1 MHz'de 0, 10 ve 100 kGy dozları için C-V ve C_c -V eğrileri	85
Şekil 7.18. MIS yapının 1 MHz'de 0, 10 ve 100 kGy dozları için G/ω -V ve G_c/ω -V eğrileri	86
Şekil 7.19. MIS yapının radyasyondan önce ve sonra G_p/ω -logf eğrileri	87
Şekil 7.20. MIS yapının arayüzey durum yoğunluğunu (N_{ss}) radyasyon dozu ile değişimi	88

Şekil	Sayfa
Şekil 7.21. MIS yapının arayüzey durum zaman sabitinin (τ) radyasyon dozu ile değişimi	88
Şekil 7.22. MIS yapının farklı radyasyon dozları için frekansa bağlı a) ϵ' -logf b) ϵ'' -logf ve c) $\tan\delta$ -logf eğrileri	90
Şekil 7.23. MIS yapının farklı radyasyon dozları için frekansa bağlı σ_{ac} -logf eğrileri...	92
Şekil 7.24. MIS yapının farklı radyasyon dozları için frekansa bağlı a) M' -logf b) M'' -logf eğrileri	93

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Bestec marka püskürtme sistemi	56
Resim 6.2. Püskürtme sisteminin yükleme odası ve yükleme rafları	57
Resim 6.3. BESTEC marka yüksek vakum termal buharlaştırma sistemi.....	58
Resim 6.4. HP 4192 A LF empedans analizmetre	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
C	Kapasitans
G	İletkenlik
C_{ox}	Oksit tabakanın kapasitansı
C_{sc}	Uzay yükü kapasitansı
V_{ox}	Oksit tabaka üzerine düşen gerilim
A_{ox}	Oksit tabakanın alanı
d_{ox}	Oksit tabaka kalınlığı
ε_{ox}	Oksit tabakanın dielektrik sabiti
E_v	Valans bant kenarı enerjisi
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_f	Fermi enerjisi
E_{fm}	Metalin Fermi enerjisi
E_{fs}	Yarıiletkenin Fermi enerjisi
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
Φ_B	Potansiyel engel yüksekliği
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_{ms}	Metal ile yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu
V_G	Giriş gerilimi
χ^s	Elektron yakınlığı
Ψ_s	Yüzey potansiyeli
Ψ_B	Engel potansiyeli
W_D	Tüketim tabakasının kalınlığı
ε₀	Boşluğun elektrik geçirgenliği
Q₀	Kapasitörde depolanan yük miktarı
Q_{sc}	Uzay yükü
Q_{ss}	Arayüzey durum yük yoğunluğu

Simgeler**Açıklamalar** C_0

Boş kapasitans değeri

 Ω

Ohm

 D

Dielektrik yokken elektrik yerdeğiştirme

 μ

Dipol moment

 χ

Dielektriğin elektrik alınğanlığı

 P

Dielektriğin polarizasyonu

 α

Kutuplanabilirlik

 ϵ^*

Kompleks dielektrik sabiti

 ϵ'

Dielektrik sabiti

 ϵ''

Dielektrik kayıp

 ϵ_s

Boşluğun elektrik geçirgenliği

 ϵ_∞

Boşluğun elektrik geçirgenliği

 $\tan \delta$

Kayıp açı tanjantı

 N_{ss}

Arayüzey durum yoğunluğu

 T

Arayüzey durum zaman sabiti

 R_s

Seri direnç

 R_p

Paralel direnç

 R_{ss}

Arayüzey direnci

 C_p

Paralel kondüktans

 G_p

Paralel iletkenlik

 Ω

Açısal frekans

 Y

Admitans

 Z

Empedans

 M

Elektrik Modülüs

 M'

Elektrik modülüsün reel kısmı

 M''

Elektrik modülüsün sanal kısmı

 M^*

Kompleks elektrik modülüs

 ΔV_{FB}

Düz bant gerilim kayması

 C_i

Yalıtkan arayüzey tabakanın kapasitansı

 C_D

Yarıiletken tükenim tabakasının kapasitansı

Kısaltmalar**Açıklamalar****a.c.**

Alternatif akım

d.c.

Doğru akım

C-V

Kapasitans-gerilim

G/ ω -V

İletkenlik-gerilim

MS

Metal/Yarıiletken

MIS

Metal/Yalıtkan/Yarıiletken

MOS

Metal/Oksit/Yarıiletken

MESFET

Metal-yarıiletken alan etkili transistör

MOSFET

Metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör

RF

Radyo frekansı

Si₃N₄

Silisyum Nitrat

1. GİRİŞ

Yoğun madde fiziği, konu zenginliği açısından günümüz fiziğinin en büyük fizik dalı olarak kabul edilir. Yoğun madde fiziğinin temel amacı, yoğun maddeyi kuantum mekaniği, klasik mekanik, istatistiksel mekanik, elektromanyetik teori, alan teorisi gibi fizik yasaları yardımıyla anlamaktır. Bu fiziğin ilgi gören araştırma dallarından biri malzeme teknolojisidir. Malzeme teknolojisi, yarıiletken malzemelerin üretimini ve bu malzemelerin elektronik devrelerde kullanılmasına ve geliştirilmesine imkân sağlamıştır. Yarıiletken malzeme teknolojisi, yarıiletken malzemelerin elektronikte yaygın olarak kullanılmasıyla büyük bir sanayi endüstrisi oluşmuş ve yarıiletken teknolojisi gelişmiştir. Silisyum (Si), germanyum (Ge), indiyum fosfat (InP) , galyum arsenik (GaAs), galyum nitrür (GaN), GaAsP, InGaN ve InGaAlAs gibi yarıiletkenler diyot, kapasitör, transistör, güneş pili, lazer, dedektör gibi elektronik ve opto-elektronik cihazların üretiminde temel alttaş olarak kullanılmışlardır.

Günümüzde yarıiletken teknolojisinin gelişmesinde metal/yarıiletken kontakların katkısı oldukça fazladır. Metal ve yarıiletken malzemelerin kullanılmasıyla oluşan Schottky diyotlar, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS)/metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitörler ve metal-yarıiletken (MESFET)/metal-oksit-yarıiletken (MOSFET) alan etkili transistörler gibi yapılar günümüzde birçok elektronik devre elemanları teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1-4]. Katıların elektriksel özelliklerinin incelenmesi ve elektronik devrelerde kullanılması hakkındaki ilk araştırmalar 18. yüzyılın sonlarına doğru metal-yarıiletken yapılar üzerinde gerçekleştirilmiştir. 1938 yılında Schottky ve Mott MS kontaklarının doğrultma özellikleri ve metal ile yarıiletken arayüzeyinde oluşan potansiyel engeli üzerine araştırmalar yapmıştır [5,6]. Schottky ve Mott tarafından önerilen modelde, kontakların doğrultma işleminde elektronlar potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon yoluyla geçmektedir. Ayrıca, Mott'a göre, metalin iş fonksiyonu ve yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki farktan dolayı metal ile yarı iletken arasında bir potansiyel engeli (BH) ortaya çıkmaktadır.

Metal ile yarıiletken arasına doğal ya da yapay olarak oluşturulan yalıtkan oksit tabakadan (SiO_2 , SnO_2 , TiO_2 ve Si_3N_4 gibi) dolaylı MS yapı MIS/MOS yapıya dönüşür. Bu arayüzey yalıtkan tabaka metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder ve metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. MIS/MOS yapılar yalıtkan tabakanın dielektrik

özelliğinden dolayı paralel plakalı kapasitör yapısına benzemektedir. İlk olarak 1959 yılında J.L. Moll tarafından önerilen yalıtkan oksit tabakalı MOS yapı, termal olarak oksitlenmiş yarıiletken silisyum kristali üzerinde bir alüminyum metal elektrottan oluşmuştur [7]. Daha sonra Terman, MOS yapının oksit-silisyum arayüzeyinde bağ durumlarının özelliklerini incelemiş ve MOS yapıya dc gerilim uygulayarak kapasitansın frekansa bağlılığını ölçmüştür [8]. Bu yapıların elektrik ve dielektrik karakteristikleri oksit ve oksit-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir [9]. Gerçek bir MIS yapı ideal MIS yapıdan farklı olarak, yarıiletken-yalıtkan arayüzeyi birçok örgü kusuru, tuzaklar, safsızlık ve arayüzey durumları içerir. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumları adı verilen yasak bant aralığı içinde çok sayıda izinli enerji seviyesinin ortaya çıkmasına neden olur.

Dielektrik malzemeler veya elektriksel olarak yalıtkan malzemeler, atomik yapısında serbest yük bulundurmeyen ve dışardan bir elektrik alan uygulandığı zaman enerji depolama yeteneğine sahip malzemelerdir. Bu malzemeler çok yüksek özdirence ve 4 eV'dan daha büyük bir yasak enerji aralığına sahiptir. Aynı zamanda, bu malzemeler elektrik devresinde yük transferini engellemek için yalıtkan olarak kondansatör yapımında kullanılırlar. Dielektrikler elektriği iletmezler ancak uygulanan dış elektrik alandan etkilenirler. Elektrik alan etkisi ile dielektriğin pozitif ve negatif yükleri zıt yönlerde sonsuz küçük yerdeğiştirirler. Bunun sonucunda, elektrik yük merkezleri kayar ve elektriksel kutuplanma yani polarizasyon oluşur. Polarizasyon, dış elektrik alan uygulandığı zaman malzeme içindeki yüklerin ayrışmasıdır. Bütün dielektrikler elektrik alan etkisi altında kutuplanma özelliğine sahiptirler. Dielektrik bu özelliği ile elektrik dipol momenti kazanır ve oluşan dipoller malzeme yüzeyinde elektriksel yük birikimi sağlar. Bir malzemenin yük depolama özelliği, dielektrik sabiti veya geçirgenlik olarak tanımlanan parametreyi belirler. Ayrıca, dielektrik sabiti iki elektrik yük arasındaki elektrostatik kuvveti azaltan bir miktardır. Dielektrik malzemeler, çoğunlukla katı olup bazı sıvı ve gazlar da iyi bir dielektrik olarak kullanılabilir. Malzemelerin dielektrik özelliklerini açıklamak için farklı teorik modeller geliştirilmiştir. Deneysel olarak dielektrik ölçümler, ilk önce 1-10⁷ Hz frekans aralığında, 1940'larda mikrodalga frekans bölgesinde (10⁸-10¹¹ Hz) ve 1970 yılında ise kızılötesi frekans aralığında (10¹¹-10¹² Hz) gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin dielektrik özellikleri dielektrik sabiti (ϵ'), kayıp (ϵ''), kayıp tanjantı ($\tan\delta$), elektriksel iletkenlik (σ) ve elektrik modülü (M) gibi parametrelerden oluşur [9-13].

Radyasyon, enerji paketlerinden ya da kütleli, yüklü veya yüksüz taneciklerden oluşur. Radyasyon, enerjisine göre düşük-yüksek enerjili, türüne göre de parçacık ve elektromanyetik radyasyonu olarak sınıflandırılmaktadır. Radyasyonun parçacık kısmı nötronlar, protonlar, elektronlar ve alfa parçacıklarından, enerji paketleri kısmı ise elektromanyetik dalga spektrumunun yüksek enerjili X ve gama ışınlarından oluşur. Ayrıca, radyasyon madde ile etkileşiminde maddeyi iyonize edip etmemesine göre, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak da adlandırılır. Radyasyonun madde ile etkileşimi maddenin türüne, kinetik enerjisine, kütesine ve gelen parçacığın yüküne, kütesine, atom numarasına bağlı olarak değişir. Aynı zamanda radyasyona bağlı hasarlar meydana gelir. MIS/MOS yapı radyasyona maruz bırakıldığında, yalıtkan oksit tabaka içinde bulunan tuzaklar iyonize olur ve elektron-deşik çiftleri meydana gelir. Oluşan elektron-deşik çiftlerinin sayısı yarıiletken malzemenin ve soğurulan radyasyonun özelliklerine bağlıdır. Ayrıca, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde radyasyon etkisiyle oksit yükleri ve arayüzey durumları oluşur [14-16].

Radyo Frekansı (RF) Magnetron Püskürtme yöntemi, bir plazma sayesinde püskürtülen hedef malzeme atom ya da moleküllerinin yarıiletken üzerine biriktirilerek ince film oluşturulmasını sağlayan bir tekniktir. Bu tez çalışmasında, RF püskürtme metodu ile büyütülen silisyum nitrat (Si_3N_4) arayüzey yalıtkan tabakalı Au/ Si_3N_4 /n-Si (MIS) yapının, kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri oda sıcaklığında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında gerçekleştirildi. Daha sonra MIS yapı, ışınlama dozu 0,69 kGy/h olan ^{60}Co gama-ışın kaynağıyla ışınladı. Işınlanan yapının kapasitans ve iletkenlik ölçümleri her ışınlama dozundan sonra (2, 5, 10, 20, 50 ve 100 kGy) beş farklı frekans değerinde (1, 10, 100, 500 ve 1000 kHz) gerçekleştirildi. Bu ölçümlerde empedans analizmetre (HP 4192A LF) kullanıldı. Radyasyondan önce ve sonra ölçüm sonuçları kullanılarak MIS yapının elektrik ve dielektrik parametreleri elde edildi.

Bu tez çalışması sekiz bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, yarıiletken aygıtların tarihsel gelişimi ve çalışmanın içeriği hakkında bilgi verildi. İkinci bölümde, metal-yarıiletken (MS) kontaklar yapılar hakkında bilgi verildi. Üçüncü bölümde, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapı hakkında temel bilgiler verildi. Dördüncü bölüm radyasyon ve beşinci bölüm ise dielektrik hakkında teorik bilgi içermektedir. Altıncı bölümde, kullanılan yarıiletkenin kimyasal olarak temizlenmesi, RF püskürtme metodu ile silisyum nitrat (Si_3N_4) arayüzey yalıtkan tabakanın büyütülmesi, omik ve doğrultucu kontakın

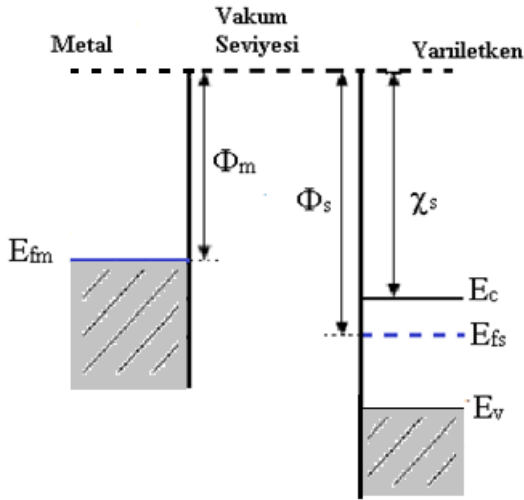
oluşturulması ile deneysel ölçüm yöntemleri hakkında gerekli bilgi verildi. Yedinci bölüm, deneysel ölçüm verilerinden hesaplanan elektriksel ve dielektrik parametreler ile frekansa ve radyasyona bağlı çizilen grafiklerin literatür ile kıyaslanmasını içermektedir. Sekizinci bölüm, deneysel sonuçların tartışmasını ve önerileri içermektedir.

2. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR

Bir metal ile yarıiletken malzeme kontak durumuna getirildiğinde oluşan yapı metal-yarıiletken kontak olarak adlandırılır. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna (Φ_s) bağlı olarak bu kontaklar, doğrultucu (Schottky kontak) ve omik olmak üzere ikiye ayrılır.

2.1. Metal/n-Tipi Yarıiletken Omik Kontak ($\Phi_m < \Phi_s$)

Ohm kanununa uyan ve her iki doğrultuda akım geçirebilen kontaklara omik kontak adı verilmektedir. Metalin iş fonksiyonunun, yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olması durumunda yani $\Phi_m < \Phi_s$ ise omik kontak oluşur. Şekil 2.1’de omik kontakta önce metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı gösterilmektedir [3,17,18]. Bu durumda, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır.



Şekil 2.1. Omik kontakta önce metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı

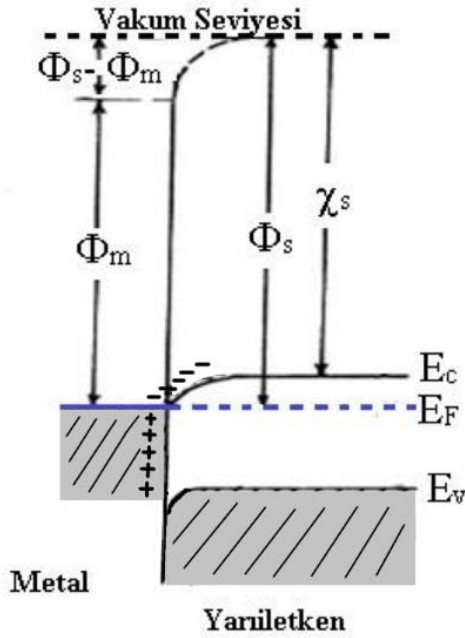
Şekil 2.1’de gösterilen,

- Φ_m , metalin iş fonksiyonudur ve bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan minimum enerji miktarı olarak
- Φ_s , yarıiletkenin iş fonksiyonudur ve bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için ihtiyaç duyulan enerji veya yarıiletkenin Fermi seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkını

- χ_s , yarıiletkenin elektron yakınlığıdır ve iletkenlik bandının en üst seviyesindeki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarını
- Vakum seviyesi, bir metalin hemen dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya yüzeyden bir elektron koparmak için gerekli olan minimum enerji miktarını
- E_{fm} ve E_{fs} , metalin ve yarıiletkenin Fermi enerjisi seviyesini
- E_c ve E_v , iletkenlik ve valans bandı enerjisini

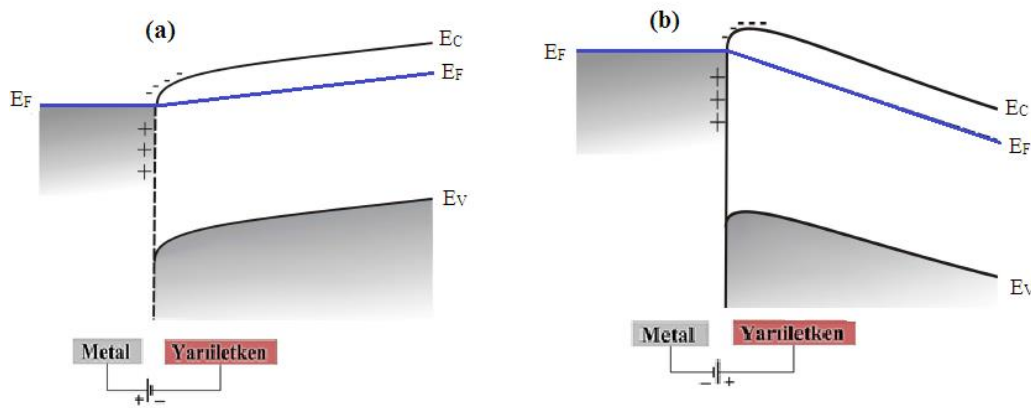
tanımlamaktadır.

Şekil 2.2’de omik kontakta sonra metal/n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı gösterilmektedir. Omik kontakta sonra, her iki Fermi seviyesi aynı seviyeye ulaşmaya kadar metalden yarıiletkene doğru geçen elektronlar arkalarında pozitif bir yüzey yükü yani boşluklar bırakır. Bunun sonucunda, metalin ön yüzeyi pozitif yarıiletkenin ön yüzeyi negatif yüklerle yüklenir. Termal denge durumunda, yarıiletkenin Fermi seviyesi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükselir ve yarıiletken tarafında iletkenlik ve valans bantları aynı oranda yukarı doğru bükülür.



Şekil 2.2. Omik kontakta sonra metal/n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı

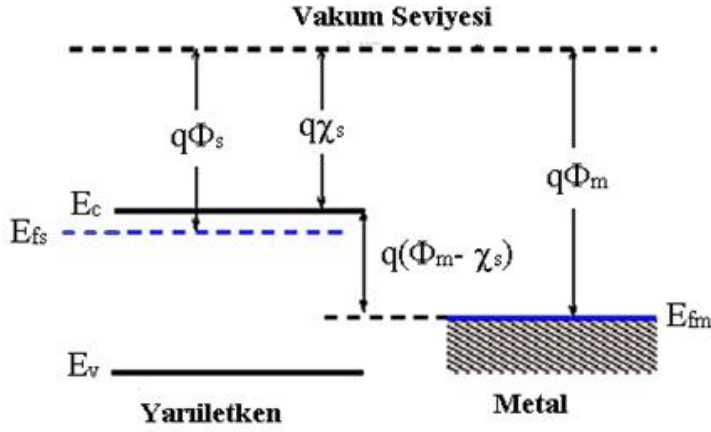
Şekil 2.3’de omik kontakta sonra, yarıiletkene negatif ve pozitif gerilim uygulandığında kontağın enerji bant diyagramı gösterilmektedir. Şekil 2.3.a’da görüldüğü gibi, metal kısmına pozitif yarıiletken kısmına negatif bir gerilim uygulandığında yarıiletkenden metale doğru geçen elektronlar hiçbir engel ile karşılaşmaz ve elektronlar bu yönde kolay bir şekilde hareket edebilirler. Şekil 2.3.b’de görüldüğü gibi, yarıiletken kısmına pozitif metal kısmına negatif bir gerilim uygulandığında ise metaldeki elektronlar engel ile karşılaşmadan yarıiletkene doğru kolay bir şekilde geçebilirler. Sonuç olarak, doğrultucu olmayan yani akımı iki yönlü ileten bu kontaklar, omik kontak olarak adlandırılır [17].



Şekil 2.3. Yarıiletkene gerilim uygulandığında metal/n-tipi yarıiletken omik kontak için enerji bant diyagramı. a) negatif b) pozitif

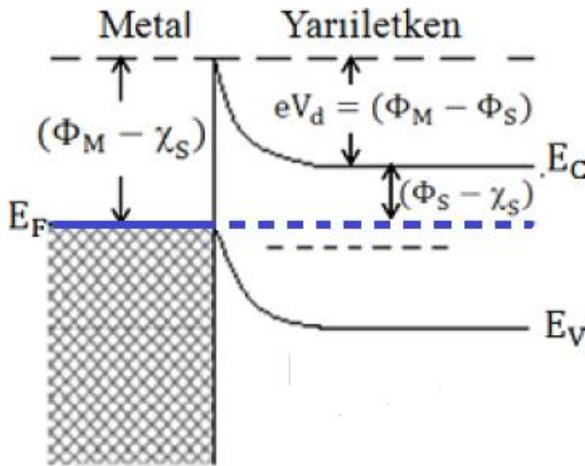
2.2. Metal/n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak ($\Phi_m > \Phi_s$)

Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olması durumunda yani $\Phi_m > \Phi_s$ ise oluşan bu kontağa doğrultucu kontak veya Schottky kontağı denir. Metal ile yarıiletken doğrultucu kontak yapıldığında, metal yarıiletken arayüzeyinde yüklerin ayrışması sebebiyle bir potansiyel engeli oluşur. Yarıiletkendeki elektronlar difüzyon yoluyla metalin ön yüzeyine geçerken arkalarında boşluklar bırakarak yarıiletkende elektron yoğunluğunun azalmasına neden olurlar. Bu geçiş sonucunda, metal ile yarıiletken arasında hareketli yüklerden arınmış yüksek dirençli tüketim tabakası oluşur ve bu tabakaya Schottky tabakası veya engeli denir [3,4]. Şekil 2.4, doğrultucu kontakta önce metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramını göstermektedir [3,4,17,18]. Şekilden görüldüğü gibi, yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır.



Şekil 2.4. Doğrultucu kontakta önce metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı

Şekil 2.5, metal/n-tipi yarıiletkenin doğrultucu kontak yapıldıktan sonraki enerji-bant diyagramını göstermektedir. Bu durumda, metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olan yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesine eşit olana kadar yarıiletkenden metale doğru geçerler. Bunun sonucunda, yarıiletkenin sınıra yakın bölgesinde serbest elektron yoğunluğu azalır ve yarıiletkendeki Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasına doğru kaymaya başlar. Termal denge durumunda, Fermi enerji seviyesi tamamen sabit kaldığı için iletkenlik ve valans bantları Şekil 2.5 'deki gibi bükülürler [19,20].



Şekil 2.5. Doğrultucu kontakta sonra metal/n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı

Ayrıca, elektron yakınlığı kontak ile değişmediği için, yarıiletkenin vakum seviyesi de bantlarla orantılı bir şekilde bükülür. Bant bükülme miktarı, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir. Bu fark;

$$eV_d = (\Phi_m - \Phi_s) \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, V_d difüzyon potansiyeli, eV_d yarıiletkenden metale geçecek olan elektronun sahip olması gereken enerji, başka bir ifadeyle engel yüksekliğidir. Potansiyel engelin metal tarafındaki yüksekliği ise;

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

şeklinde ifade edilir [4,19].

$$\Phi_s = \chi_s + \Phi_n \quad (2.3)$$

$$\Phi_m = qV_d + \Phi_s \quad (2.4)$$

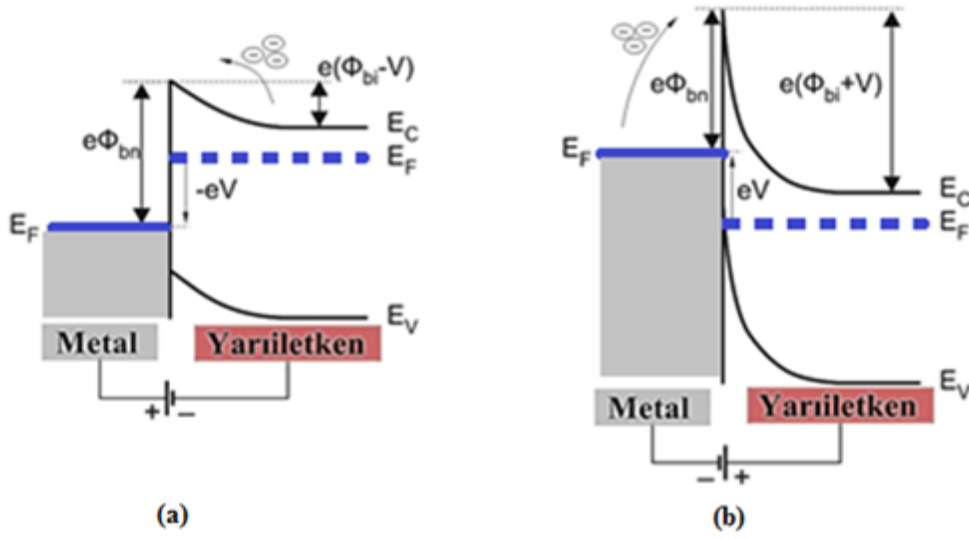
eşitlikleri Eş. 2.2'de yerlerine yazılırsa,

$$\Phi_B = (qV_d + \Phi_n) \quad (2.5)$$

eşitliği elde edilir. Ayrıca, Φ_n , iletim bandı enerji seviyesi ile Fermi enerji seviyesi arasındaki fark olup $\Phi_n = (E_c - E_F)$ şeklinde ifade edilir.

Şekil 2.6, doğrultucu kontakta sonra, yarıiletkene negatif ve pozitif gerilim uygulandığında kontakın enerji bant diyagramını göstermektedir. Şekil 2.6.a'da görüldüğü gibi, doğrultucu kontakın metal kısmına pozitif yarıiletken kısmına negatif bir gerilim uygulandığında tükenim bölgesinin genişliği azalır. Ayrıca, termal dengedeki potansiyel engel yüksekliği de eV kadar azalmaktadır. Bu durumda, yarıiletkenden metale geçecek elektronlar, azalmış bir engel ile karşılaşır ve yarıiletkenden metale doğru olan elektron akımı termal denge değerine göre artar. Metalde ise herhangi bir gerilim düşmesi meydana

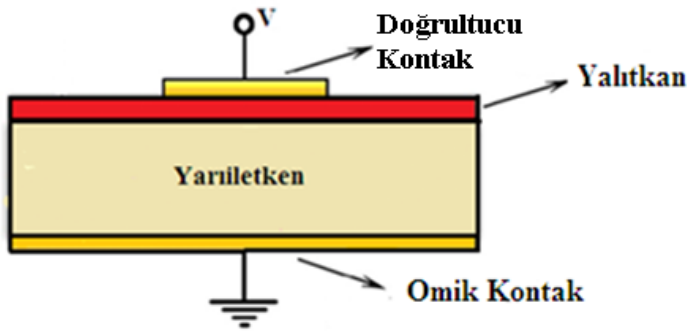
gelmez ve potansiyel engel yüksekliği, Φ_B , uygulanan gerilimden etkilenmediği için, metalden yarıiletkene doğru olan elektron akımı termal denge değerine göre değişmez. Sonuç olarak, yarıiletken tarafı negatif metal tarafı pozitif olacak şekilde kontakta bir potansiyel uygulandığı zaman, yarıiletkenden metale net bir akım oluşur ve doğru beslem akımı uygulanan gerilim ile üstel olarak artacaktır [3,4]. Şekil 2.6.b’de gösterildiği gibi, yarıiletken kısmına pozitif metal kısmına negatif bir gerilim uygulandığında ise tükenim bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği eV kadar artar ve yarıiletkenden metal doğru geçen elektron akımı termal denge durumuna göre azalır [19,20].



Şekil 2.6. Yarıiletkene gerilim uygulandığında metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için enerji bant diyagramı. a) negatif b) pozitif

3. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR

Şekil 3.1, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapısını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, bu yapı, yarıiletken üzerine büyütülen SiO_2 , SnO_2 , TiO_2 , Si_3N_4 gibi yalıtkan tabaka ve omik-doğrultucu kontaklardan oluşmaktadır. Ayrıca bu yapılar MIS tipi Schottky diyot olarak da adlandırılır [2,3].



Şekil 3.1. Bir MIS yapının şematik gösterimi

3.1. İdeal MIS Yapı

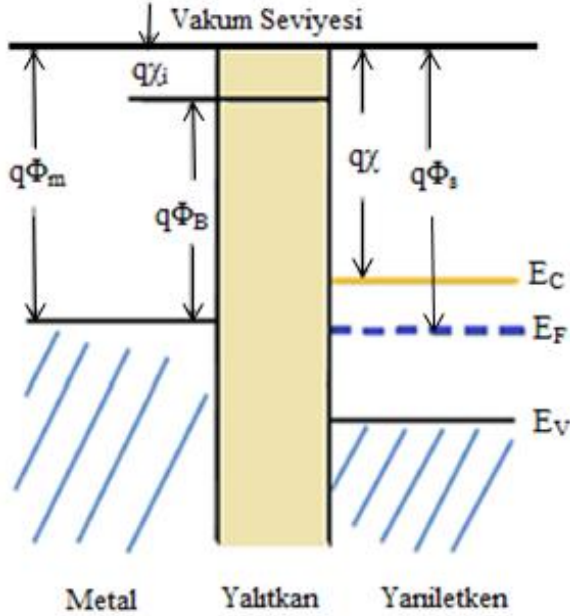
İdeal bir MIS yapıda;

- Metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumları ve yükleri, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz.
- MIS yapıya gerilim uygulandığında metal yüzeyindeki yükler ile yarıiletkendeki yükler eşit miktarda fakat zıt işaretlidirler.
- Herhangi bir gerilim altında yalıtkan içerisinde yük iletimi olmaz ve yalıtkanın özdirenci sonsuzdur.

$V=0$ durumunda, ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir. İdeal MIS yapı denge durumunda iken, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki fark sıfır olmalıdır. Bu durum, n-tipi yarıiletken için,

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

eşitliği ile ifade edilir. Burada, E_g yarıiletkenin yasak enerji aralığı ve ψ_B ise fermi potansiyelleri olup Fermi enerji seviyesi ile saf enerji seviyesi arasındaki enerji farkıdır [21,22].



Şekil 3.2. $V=0$ durumunda n-tipi yarıiletkenli ideal MIS yapının enerji-bant diyagramı

İdeal bir MIS yapıya gerilim uygulandığında, yarıiletkende yük kaymaları meydana gelir. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metale göre yoğunluğu daha az ve uygulanan gerilime bağlıdır. Ayrıca, yarıiletkendeki serbest olmayan yükler ya uzay yükü bölgesinde ya da arayüzey bölgesindeki yığılmaları oluşturur. Yarıiletkenin arayüzey bölgesinde oluşan uzay yükü, bantların bükülmesine neden olur. Termal denge durumunda arayüzey bölgesindeki uzay yükü potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yapıya uygulanan V_G geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da yalıtkan üzerine düşer ve aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir.

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

Burada, V_{ox} oksit üzerine düşen gerilim, ψ_s arayüzeydeki bant gerilimidir. MIS yapıya gerilim uygulandığında, metal yüzeyindeki yük miktarı yarıiletkendeki yük miktarına eşittir.

$$Q_m = Q_s$$

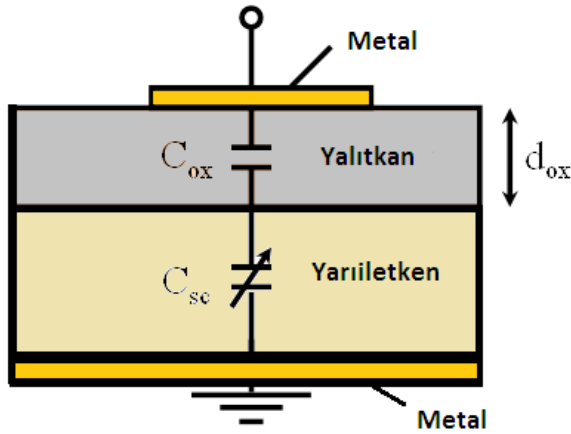
$$Q_m + Q_{sc} = 0 \quad (3.3)$$

Burada, Q_s yarıiletkendeki toplam yük, Q_m metal yüzeyindeki toplam yük ve Q_{sc} ise uzay yükü bölgesinde biriken yükür. Bu yüklere bağılı olarak MIS yapının kapasitansı (C), yalıtkan oksit tabakanın kapasitansı (C_{ox}) ve uzay yükü kapasitansı (C_{sc}) aşağıda verilen denklemler ile verilir. Bu kapasitansların eşdeğer kapasitansı MIS kapasitansına eşit olur.

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

Burada, A MIS yapının veya doğrultucu kontağın alanıdır.

MIS yapılar, paralel plakalı kondansatöre benzer ve metal ile yarıiletken arasında oluşan kapasitans MIS kapasitans olarak tanımlanır. MIS kapasitansının eşdeğer devresi Şekil 3.3'de verilmiştir.



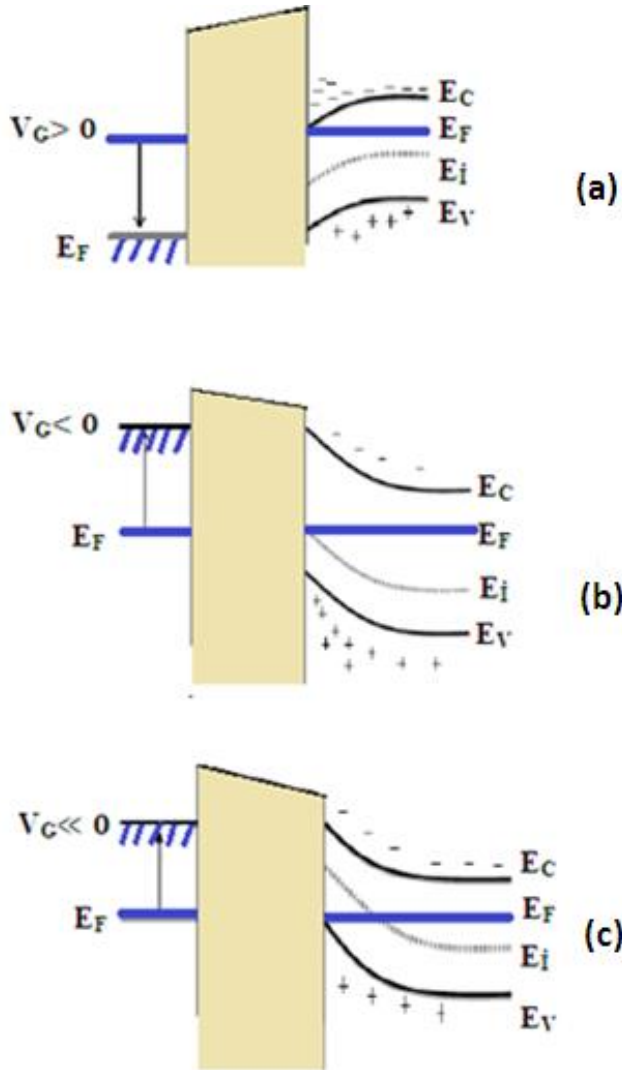
Şekil 3.3. Bir MIS yapının eşdeğer devre diyagramı

MIS kapasitansı, şekilde verilen eşdeğer devrenin çözümünden elde edilir. Seri bağılı C_{sc} ve C_{ox} kapasitanslarının eşdeğer kapasitansı [23],

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A \quad (3.5)$$

eşitliği ile verilir. Burada, ϵ_{ox} yalıtkan oksit tabakanın dielektrik sabiti, d_{ox} arayüzey yalıtkan tabakanın kalınlığıdır. C_{ox} , uygulanan gerilimden bağımsız ve MIS yapısının kapasitansındaki değişimi sadece uzay yükü kapasitansı belirler.

Uygulanan gerilime bağlı olarak n-tipi yarıiletkenli MIS yapıda meydana gelen durumların enerji bant diyagramları Şekil 3.4'de gösterilmiştir [9,21-25].

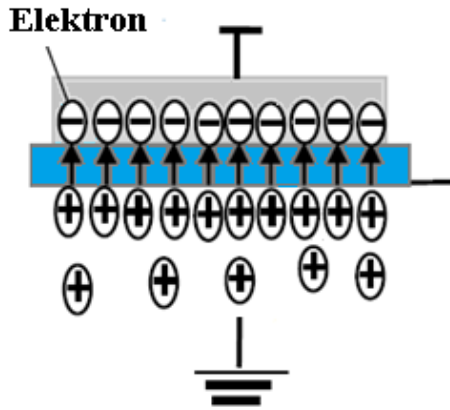


Şekil 3.4. $V \neq 0$ durumunda n-tipi yarıiletkenli ideal MIS yapının enerji-bant diyagramı

a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim

3.1.1. Yığılım

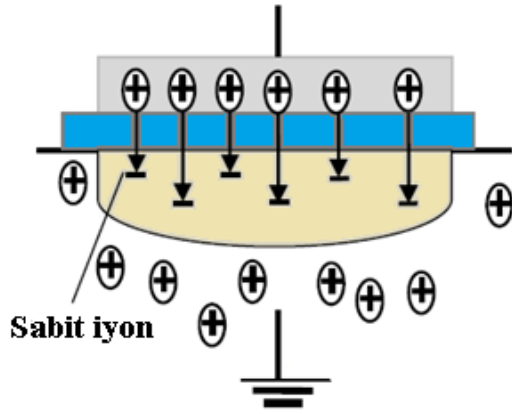
Metal plakaya küçük bir pozitif gerilim ($V_G > 0$) uygulandığı zaman, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronları yarıiletken arayüzeyine doğru hareket ettirecektir. Valans bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı ve iletkenlik bandının da aşağı doğru büküldüğü bu duruma “yığılım” adı verilir (Şekil 3.4.a). Bu durumda arayüzeyde biriken yükün uzay yükü olması nedeniyle uzay yük kapasitansı $C_{sc} \rightarrow \infty$ ve MIS kapasitansı da $C \rightarrow C_{ox}$ olur. Şekil 3.5’de yığılım durumunda metal ve yarıiletken üzerindeki yük dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Yığılım durumunda metal ve yarıiletken üzerindeki yük dağılımları

3.1.2. Tükenim

Metal plakaya küçük bir negatif gerilim ($V_G < 0$) uygulandığı zaman, arayüzey tabaka içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindeki elektronları yüzeyden uzaklaştırır ve arayüzey bölgesinde deşikler oluşur. Bu durumda, yarıiletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki elektron yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve iletkenlik ve valans bandı yukarı doğru bükülür. Yarıiletken yüzeyinde uygulanan gerilim ile elektronların azaldığı bir bölge oluşur. Bu bölgeye tükenim bölgesi veya uzay yük bölgesi adı verilir (Şekil 3.4.b). Tükenim durumunda metal ve yarıiletken üzerindeki yük dağılımları Şekil 3.6’de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Tükenim durumda metal ve yarıiletken üzerindeki yük dağılımları

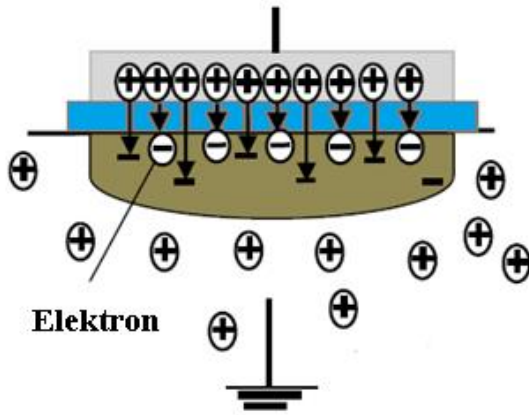
Tükenim bölgesinin kalınlığı,

$$W_D = \epsilon_s A \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (3.6)$$

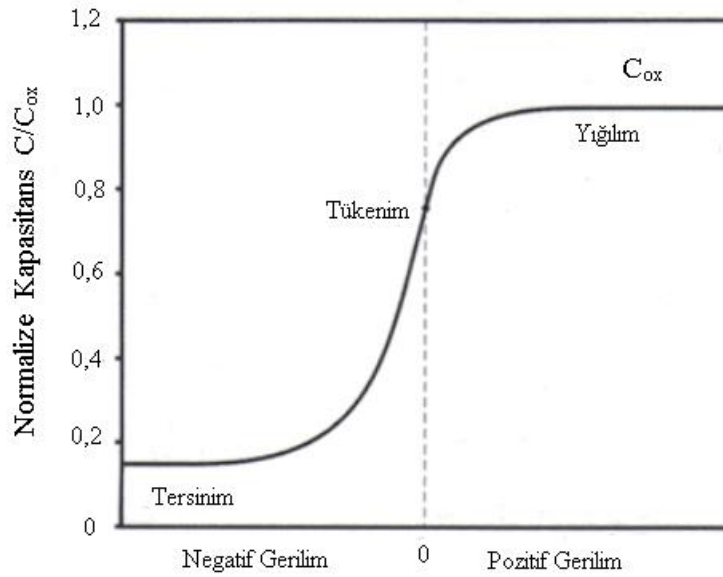
eşitliği ile verilir. Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. Bu bölgede, MIS kapasitansının büyüklüğünü uzay yük ve oksit kapasitansı belirler [9].

3.1.3. Tersinim

Metale daha büyük bir negatif gerilim ($V_G \ll 0$) uygulandığı zaman, bantlar yukarı doğru daha fazla bükülür ve iletkenlik bandı Fermi enerji seviyesine gittikçe yaklaşır. Ayrıca saf enerji seviyesi (E_i), Fermi enerji seviyesinin altına geçer. Yarıiletken arayüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan deşiklerin yoğunluğu artmaya başlar ve n-tipi yarıiletken yüzeyi p-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak adlandırılır (Şekil 3.4.c). Tersinim durumu için, metal ve yarıiletken üzerindeki yük dağılımları Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Bu durumda, MIS kapasitansının büyüklüğünü, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Küçük frekanslarda elektron yoğunluğu a.c. sinyalini takip edebilir ve MIS kapasitansı artan gerilimle C_{ox} değerine ulaşır. Yüksek frekanslarda ise elektron yoğunluğu a.c. sinyalini takip edemez ve MIS kapasitansı C_{min} değerini alır. Şekil 3.8’de ideal MIS yapının C-V eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.7. Tersinim durumda metal ve yarıiletken üzerindeki yük dağılımları



Şekil 3.8. İdeal MIS yapının C-V eğrisi.

3.2. Gerçek MIS Yapı

Gerçek MIS yapı, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki tuzaklanmış yüklerden ve oksidasyon sırasında yonteme bağlı olarak ortaya çıkan hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ve arayüzey yüklerinden dolayı ideal MIS yapı davranışı göstermez. Gerçek MIS yapının ideal MIS yapıdan sapmasına neden olan durumlar ve yükler Şekil 3.9'de gösterilmiştir [2,3,26].



Şekil 3.9. Gerçek MIS yapıda ortaya çıkan durumlar ve yükler

3.2.1. Arayüzey durumları

Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içinde girilebilir enerji seviyeleri arayüzey durumları olarak adlandırılır. Bu durumlar, alıcı veya verici özelliğe sahip olabilirler. Verici arayüzey tuzağı dolu ise bu tuzak nötr durumdadır ve bir elektron vererek pozitif yüklü hale gelir. Alıcı arayüzey tuzağı boş ise bu tuzak nötr durumdadır ve bir elektron alarak negatif yüklü hale gelir. MIS yapıya bir gerilim uygulandığında, arayüzey tuzak seviyeleri valans ve iletkenlik bantları ile aşağı ve yukarı hareket ederler. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, arayüzey tuzaklarının iletkenlik ve valans bandı ile yük alışverişi yapmasıyla meydana gelir. Tuzaklardaki bu yükün değişimi, MIS kapasitansına katkıda bulunarak ideal MIS kapasitans-gerilim (C-V) eğrisinin değişmesine neden olur. Yani, arayüzey durumları C-V eğrisinin ideal C-V eğrisine göre kaymasına neden olur.

Arayüzey durumları uzay yükü kapasitansına (C_{sc}) paralel kapasitans ve seri direnç etkisi yapar. Arayüzey durumlarının etkisini içeren eşdeğer devre Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu Q_{ss} , yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlığından etkilenmez. Şekil 3.10'da verilen devredeki arayüzey kapasitansı C_{ss} ,

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_{ss}} A_{ox} \quad (3.7)$$

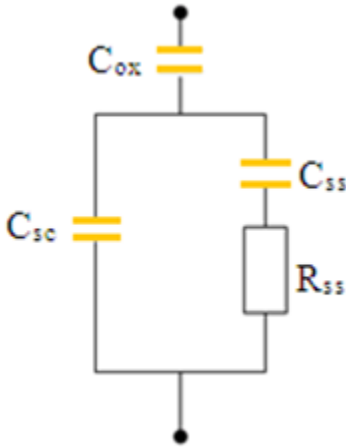
eşitliği ile verilir. Şekilde verilen R_{ss} arayüzey direncini tanımlamaktadır. C_{ss} ile R_{ss} seri bağlı olduğu için durulma zamanı $\tau = R_{ss} \cdot C_{ss}$ ile verilir. Arayüzey durumlarının birim enerji başına durum yoğunluğu,

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (3.8)$$

eşitliği ile verilir. Burada, $E = q\psi_s'$ dir. Buna göre Eş. 3.8 tekrar düzenlenirse durum yoğunluğu,

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \frac{\partial \Psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \quad (3.9)$$

elde edilir [27].

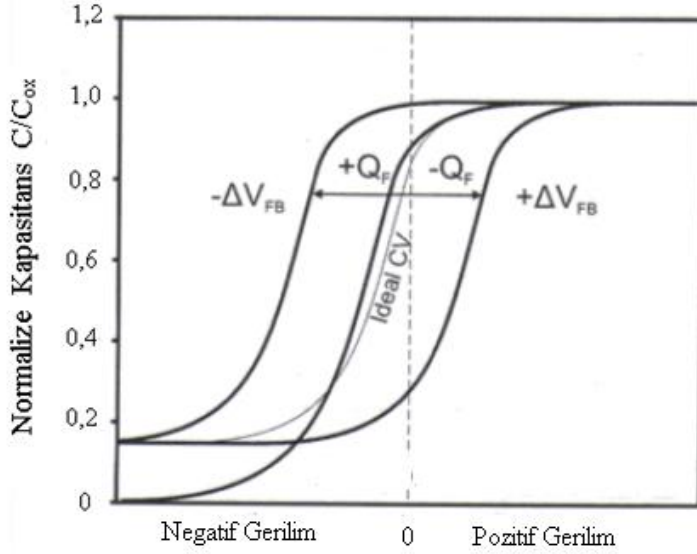


Şekil 3.10. MIS yapısının eşdeğer devresi

3.2.2. Sabit oksit yükleri

Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tabaka halinde lokalize olan sabit oksit yükleri, oksidasyona, tavlama şartlarına ve silisyumun yönelimine bağlı olarak ortaya çıkarlar. Sabit oksit yükleri pozitif veya negatif yüklü olabilir. Bu yükler, MIS yapının yüksek frekans C-V eğrisinin değişmesine neden olurlar. Pozitif sabit oksit yükleri, $(+Q_F)$, gerçek C-V eğrisinin ideal C-V eğrisine göre uygulanan geriliminin negatif değerlerine doğru kaymasına, negatif sabit oksit yükleri $(-Q_F)$ ise ideal C-V eğrisinin ileri pozitif uygulama

gerilimine doğru kaymasına sebep olurlar [2]. Bu kaymaları içeren gerçek MIS yapının C-V eğrisi Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Gerçek MIS yapının C-V eğrisi.

MIS kapasitans eğrisinde sabit yükün etkisi, gerilim eksenini boyunca C-V eğrisinin paralel kaymasıdır ve ΔV kayma miktarı,

$$\Delta V = \frac{Q_{fc}}{C_{ox}} = \frac{\Delta Q_{ox}}{C_{ox}} q \quad (3.10)$$

eşitliği ile verilir. Gerçek C-V eğrisi ile ideal C-V eğrisi arasındaki kaymadan yararlanarak oksit içindeki sabit oksit yük yoğunluğu, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu ve arayüzey durum yük yoğunluğu bulunabilir. Bu yük yoğunlukları sırasıyla aşağıdaki,

$$\Delta Q_{ox} = \frac{\Delta V_{MG} C_{ox}}{q} \quad (3.11)$$

$$\Delta Q_{eff} = \frac{\Delta V_{FB} C_{ox}}{q} \quad (3.12)$$

$$\Delta Q_{ss} = \Delta Q_{eff} - \Delta Q_{ox} \quad (3.13)$$

eşitlikler ile verilir. Burada, ΔV_{MG} gerçek ve ideal C-V eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kayması, ΔV_{FB} ise düz bant gerilim kaymasıdır. Düz bant gerilim kaymasına, oksit içine enjekte olmuş yükler veya oksit içindeki hareketli yükler sebep olabilir.

3.2.3. Hareketli iyonik yük

Metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde lokalize olan hareketli iyonik yükler, elektrik alanda hareket ederek C-V eğrisinin kaymasına neden olurlar. Hareketli iyonlar çoğunlukla Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ gibi iyonları içerir. Genellikle bu yükler yapının fabrikasyonu sırasında kimyasal temizleme için kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları ihtiva etmesi ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar gibi nedenlerden dolayı ortaya çıkarlar. Hareketli iyonik yükler, ideal C-V eğrisindeki düz bant kaymasından yararlanarak,

$$Q_m = -\Delta V_{FB} C_{ox} \quad (3.14)$$

eşitliği ile hesaplanır [26].

3.2.4. Yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yük

Yalıtkan oksit içerisinde bulunan tuzaklar yani tuzaklanmış yükler kimyasal yapı bozukluklarından ve radyasyondan kaynaklanır. 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 [9,20]. Oksitte tuzaklanmış yük(Q_{ot}),

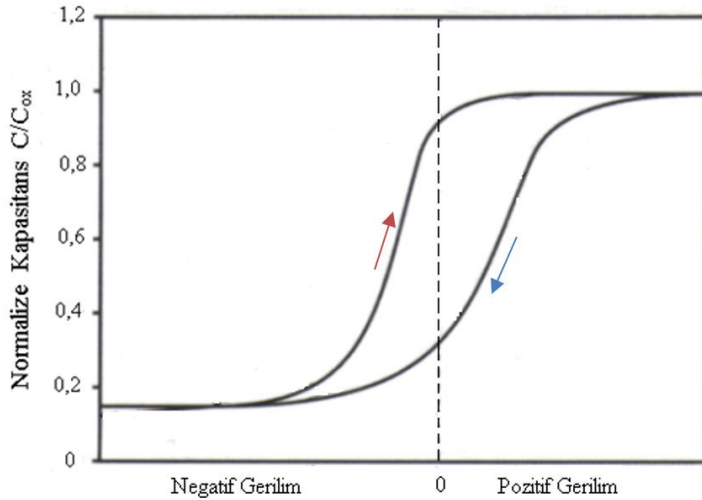
$$Q_{ot} = -\Delta V_{FB} C_{ox} \quad (3.15)$$

eşitliği ile verilir. İyonlaşmış tuzaklar, negatif gerilimden pozitif gerilimlere doğru ölçülen kapasitans değerleri ile pozitiften negatif gerilimlere doğru ölçülen kapasitans değerleri arasındaki farklılıklardan dolayı C-V eğrisinde histeresis etkisi meydana getirir [9,28].

Negatif gerilim yeterince uzun süre uygulanırsa oksit içindeki tuzaklar elektronların deşikler tarafından yakalanmasıyla boşalır. Pozitif gerilim uygulanırsa, Fermi düzeyi iletim bandına doğru kayacak ve oksit tuzakları dolmaya başlayacaktır. Eğer uygulanan gerilim azalırsa Fermi düzeyi tekrar valans bandına kayacak ve tuzaklardaki elektronlar deşikler tarafından yakalanıp tuzaklar tekrar boşalacaktır. Dolum-boşalım sırasında tuzaklarda bulunan elektron sayıları arasındaki fark, C-V eğrisinin kaymasına sebep olan histeresis yüküdür. Kapasitans-voltaj eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı oksit içindeki tuzakların miktarını verir. Dolayısıyla histeresis yük yoğunluğu,

$$\Delta Q_{His} = \frac{\Delta V_{HisFB} C_{ox}}{q} \text{ (cm}^{-2}\text{)} \quad (3.16)$$

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

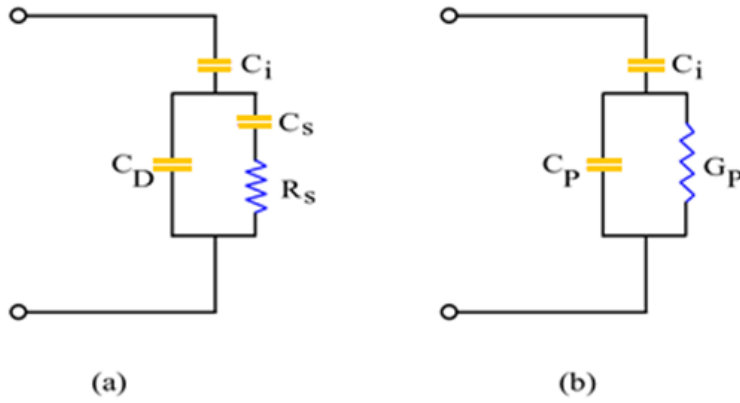


Şekil 3.12. Histeresis etkisi.

3.3. Arayüzey Durumlarının Etkisi

Arayüzey durumların varlığı, ideal MIS karakteristiklerini ve yapının performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Tuzaklanmış arayüzey yükleri, yarıiletkenin yasak enerji aralığındaki enerji durumlarına sahip ve kısa bir sürede yarıiletkenindeki iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alış verişi yapabilmelerinden dolayı bu yüzey durumlarına yeniden

birleşme (rekombinasyon) merkezleri de denilmektedir. Bu yüzey durumları yavaş ve hızlı olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Yavaş yüzey durumları arayüzeyin metal tarafında yer alırlar ve termal oksidasyon yöntemi ile çoğunlukla giderilebilirler ve MIS yapının kapasitansını hemen hemen hiç etkilemezler. Hızlı yüzey durumları ise arayüzey takabası ile yarıiletken yüzeyi yakınında bulunurlar ve yasak enerji aralığının ortasına yakın enerjiye sahiptirler. Şekil 3.13'de arayüzey durumlarının etkisini içeren eşdeğer devre gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Arayüzey durumlarının etkisini içeren eşdeğer devre

Şekil 3.13'deki C_i ve C_D , yalıtkan arayüzey tabakanın ve yarıiletken tüketim tabakasının kapasitansıdır. Şekil 3.13.a'nın paralel kolu, Şekil 3.13.b'de verilen paralel bağlı kapasitans (C_p) ve iletkenlik (G_p) şeklinde yazılabilir. Buna göre, Şekil 3.13.b'de verilen paralel koldaki admitans

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

şeklinde ifade edilir. Eşitlikte verilen G_p ve C_p değerleri ise,

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{C_s \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3.18)$$

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

ile ifade edilir. Eşdeğer devrenin toplam empedansı Z ,

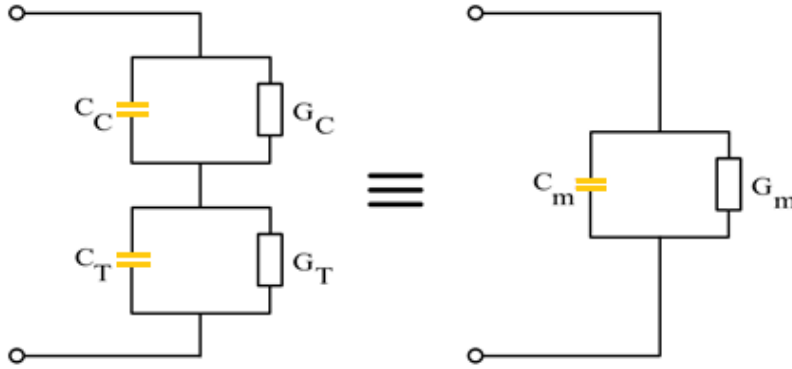
$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_p + j\omega C_p} = -j\left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}\right) + \frac{G_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \quad (3.20)$$

eşitliği ile verilir. Buradan, toplam admitans, Y,

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

elde edilir [29,30].

$C_s R_s$ çarpanı, arayüzey tuzaklarının ömrü (τ) olup arayüzey tuzaklarının davranışını etkileyen faktörlerden biridir. Burada R_s seri dirençtir. Eğer R_s varsa ve büyükse, ölçülen iletkenlik (G_m) ve kapasitans (C_m) gerçek değerler değildir. Bu durumda düzeltilmiş kapasitans ve iletkenlik C_c ve G_c ile ifade edilir. Bu durumu gösteren eşdeğer devre Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. MIS yapının eşdeğer devresi

Şekil 3.14'de gösterilen devre için empedans ifadeleri,

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

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

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

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

eşitlikleri elde edilir. Eş. 3.24'ün paydası eşleniği ile çarpılıp G_T yerine $1/R_s$ alınır ve C_T değeri ihmal edilirse 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 Şekil 3.14'deki devrenin empedansının reel kısmı olup yüksek frekansta ve kuvvetli yığılım bölgesindeki C_m ve G_m değerlerinden hesaplanır [2].

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

eşitliğinden R_s ,

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

elde edilir. Eş. 3.24'in imajiner kısmı ise,

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

eşitliği ile tanımlanan düzeltilmiş kapasitansı verir. Eş. 3.25 ve Eş. 3.28 eşitliklerindeki $G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2)R_s$ ifadesi a ile temsil edilirse düzeltilmiş C_c ve G_c değerleri,

$$C_c = \frac{[G_m^2 + (\omega^2 C_m^2)]C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (3.29)$$

$$G_c = \frac{[G_m^2 + (\omega^2 C_m^2)]a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (3.30)$$

şeklinde ifade edilir. $R_s=0$ olması durumunda $C_c=C_m$ ve $G_c=G_m$ olur.

3.4. İletkenlik Metodu ile Arayüzey Durum Yoğunluğunun Belirlenmesi

İlk olarak Nicollian ve Goetzberger tarafından geliştirilen bu metot, arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) belirlemek için kullanılan yöntemlerden biridir [2,31]. Bu metotta, paralel iletkenlik, yapının tükenim bölgesine karşılık gelen d.c. gerilim değerlerinde frekansın fonksiyonu olarak ölçülür ve aşağıdaki eşitlik ile

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qD_{it}}{2\omega\tau} \ln(1 + \omega^2 \tau_{it}^2) \quad (3.31)$$

ifade edilir [31-34]. Burada D_{it} arayüzey tuzak yoğunluğu (yani arayüzey durumların yoğunluğu), ω açılal frekans ve τ_{it} arayüzey durumların zaman sabitidir. İletkenlik metodu, tuzak yük değişiminden kaynaklanan kaybın analizine dayanmaktadır. Empedans ölçümlerinde eşdeğer paralel iletkenlik (G_p),

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega G_m C_{ox}^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{ox} - C_m)^2} \quad (3.32)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Hesaplanan G_p/ω değerleri frekansın fonksiyonu olarak logaritmik ölçekte çizilir ve elde edilen $G_p/\omega-\omega$ eğrileri $\omega\tau=1$ durumunda bir maksimumdan geçer. Eğrinin maksimumundan yararlanarak arayüzey durum yoğunluğu,

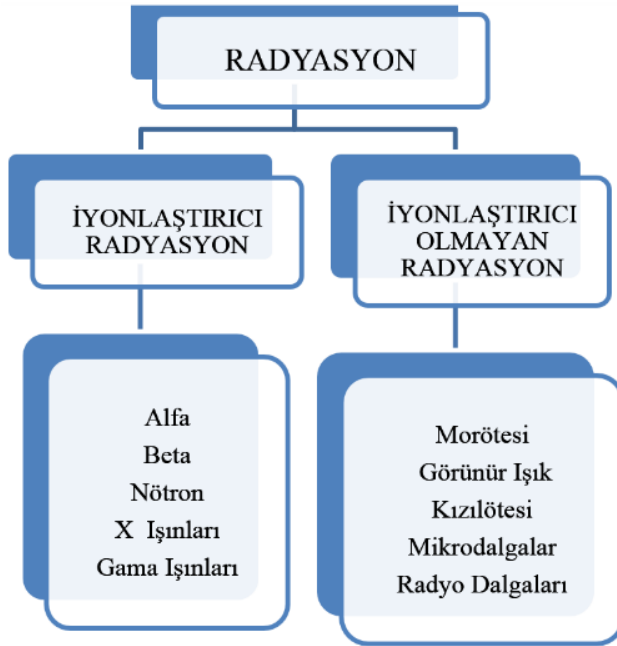
$$N_{ss} = \frac{(G_p / \omega)_{\max}}{0.402qA} \quad (3.33)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır.

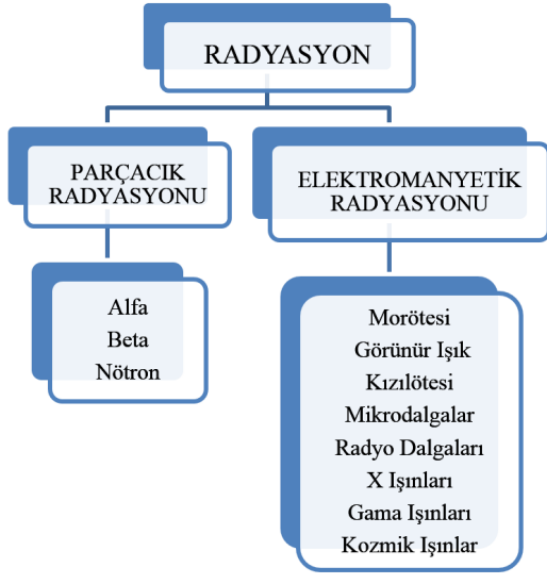
4. RADYASYON ETKİLERİ

4.1. Radyasyonun Sınıflandırılması

Radyasyon, enerjisine göre düşük-yüksek enerjili, türüne göre de parçacık ve elektromanyetik radyasyonu olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca, radyasyon madde ile etkileşiminde maddeyi iyonize edip etmemesine göre, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak da adlandırılır. Atomdan elektron kopararak iyonizasyona neden olan yüksek enerjili radyasyon iyonlaştırıcı radyasyon olarak da tanımlanır. Düşük enerjili radyasyon etkileştiği maddenin atomlarını iyonize edemediğinden, bu radyasyon iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak da adlandırılır [35]. Radyasyonun enerjisine ve türüne göre sınıflandırılması Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Radyasyonun enerjisine göre sınıflandırılması



Şekil 4.2. Radyasyonun türüne göre sınıflandırılması

Belli bir kütle ve enerjiye sahip olan alfa, beta ve nötronlar parçacık radyasyonunu oluşturmaktadır. Alfa ve beta parçacıklarının madde ile etkileşimi, sahip oldukları elektrik yükleri nedeniyle maddenin elektronları ile Coulomb etkileşimi sonucunda meydana gelir. Nötronlar ise yükleri olmadığından madde ile etkileşimlerinde Coulomb etkisi gözlenmez. Yüksüz ve kütsüz parçacık olan fotonların (X ve gama ışınları) madde ile etkileşimlerinde elektrik yükleri bulunmadığı için Coulomb etkisi meydana gelmez. Gama ışınları, iyonlaştırıcı ve elektromanyetik radyasyon içerisinde yüksek giriciliğe sahip olan ışınlardır. Ayrıca, gama ışınları, radyo dalgaları, mikrodalga, kızıl ötesi radyasyon, görünür ışık, mor ötesi radyasyon ve x-ışınları ile aynı spektrum içinde yer almaktadır.

4.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Herhangi bir radyasyon ortamında bulunan maddeler, yüksek enerjili parçacıklara ve fotonlara maruz kalırlar. Maddenin radyasyon ile etkileşimi sonucunda, radyasyona bağlı hasarlar meydana gelir. Oluşan hasarlar yani radyasyon etkileri,

- Elektron-deşik çiftleri oluşumundan dolayı iyonizasyon etkisi.
- Yüksek enerjili parçacıklardan dolayı yerdeğiştirme etkisi.

şeklinde sınıflandırılır. Bu etkiler, hedef maddenin performansını azaltır ve kalıcı olan hasarlar ortaya çıkarırlar. Ayrıca, radyasyonun madde ile etkileşimi maddenin türüne, kinetik enerjisine, kütesine ve gelen parçacığın yüküne, kütesine, atom numarasına bağlı olarak değişir.

4.2.1. İyonizasyon etkileri

Yüklü parçacık etkisi

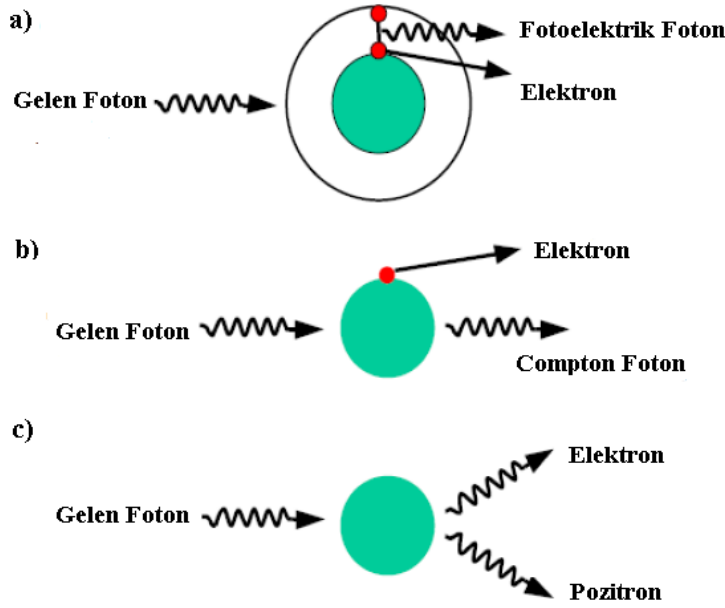
İyonizasyon yani iyonlaşma, hedef yapının atomlarına bağlı elektronlarla yüklü parçacıkların çarpışması sonucu elektron-deşik çiftlerinin oluşmasıdır. Bu çarpışmalarda, valans bandındaki deşiklere karşılık gelen elektronların iletim bandına çıkarabilecek yeterli enerjiye sahip olması gerekir. İyonizasyon etkisi veya kusurları, çarpışma sırasında parçacığın enerji kaybıdır ve oluşan elektron-deşik çiftlerinin sayısı bu enerji kaybı ile orantılıdır. Silisyum ve silisyum dioksit (Si ve SiO₂)’de elektron-delik çifti oluşturmak için gerekli minimum enerji, E_p, sırasıyla 3,6 ve 17eV’dir. Çarpan parçacığın enerjisi E_p’den büyükse, elektron-deşik çifti oluşumu devam eder. Bundan dolayı, yüksek enerjili tek bir proton veya elektron binlerce veya milyonlarca elektron-deşik çifti oluşumuna neden olabilir. Ağır iyonlar ve fotonlar da MIS/MOS yapıyı iyonize edebilir [36,37].

Foton etkisi

Fotonlar, içinden geçtikleri maddenin atomları ile etkileşimleri sonucunda ortama enerji bırakarak madde tarafından soğrulabileceği gibi saçılmaya da uğrayabilirler. Fotonlar (X ve gama ışınları) madde içerisinden geçerken madde ile üç farklı şekilde etkileşme gerçekleştirmektedirler. Bu etkileşim mekanizmaları [14],

- Fotoelektrik olay
- Compton saçılması
- Çift oluşumu

olarak tanımlanır ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Madde ile foton etkileşim mekanizmaları: a) Fotoelektrik olay b) Compton olayı c) Çift oluşumu

- *Fotoelektrik olay:* 70 keV'in altındaki enerjiye sahip fotonlar fotoelektrik etkiye sahiptir. Hedef atom gelen fotonu soğurur bu foton atomun yörünge elektronlarından birinin fotoelektron olarak yayınlanmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda, bir elektron ve bir pozitif iyon yani elektron deşik çiftleri oluşur.
- *Compton olayı:* 70 keV ile 20 MeV enerji aralığındaki fotonlar için, baskın olan mekanizma Compton saçılması olarak adlandırılır. Bu saçılma olayında, gelen foton tamamen soğrulmaz. Enerjisinin bir kısmını hedef atomdan ayrılan yani etkileştiği elektrona aktarır saçılıma uğrar. Atomdan ayrılan bu elektron, Compton elektronu olarak adlandırılmaktadır. Böylece düşük enerjili Compton fotonu ile birlikte elektron-deşik çiftleri oluşur.
- *Çift oluşumu:* Bu olayın gerçekleşmesi için gelen fotonun enerjisi 1,02 MeV'den büyük olması gerekmektedir. Çarpışma sırasında, gelen foton tamamen yok olarak zıt elektrik yüklü parçacıklar olan elektron-pozitron çiftinin oluşumuna neden olur.

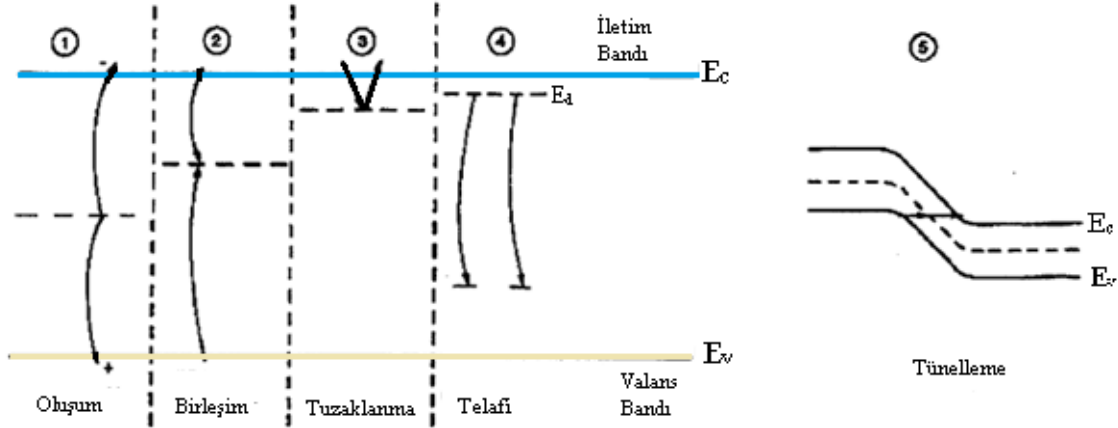
4.2.2. Yerdeğiştirme etkisi

Parçacıklar ve fotonlar yerdeğiştirme etkisi veya kusurları olarak adlandırılan başka bir etkiye neden olabilirler. Minimum yer değiştirme eşik enerjisine sahip bir atom ile çarpışan parçacıklar kristal örgüden bir atom sökerek boşluk oluşturabilir. Sökülen atom boşluğun

yakınlarına yerleşir. Bu durum, kristalde örgü uyumunu bozduğu için “örgü kusuru” olarak tanımlanır. Yerdeğiştirme kusurları, iyonizasyona göre nadir ortaya çıkmasına rağmen kristalde örgü yapısında kalıcı hasar oluşturabilir. İyonizasyon parçacık türüne değil sadece parçacık enerjisine bağlı iken, yerdeğiştirme çoğunlukla parçacığın türüne bağlıdır [2,38].

4.2.3. Elektriksel etkiler

Radyasyon kaynaklı kusurlar iletim ve değerlik bandı arasında yer alan enerji seviyeleriyle ilişkilidir. Bu kusur enerji durumları yarıiletken aygıtların elektrik özelliklerini etkiler. Oluşabilecek beş elektriksel etki Şekil 4.4'de gösterilmiştir [36,37,39].

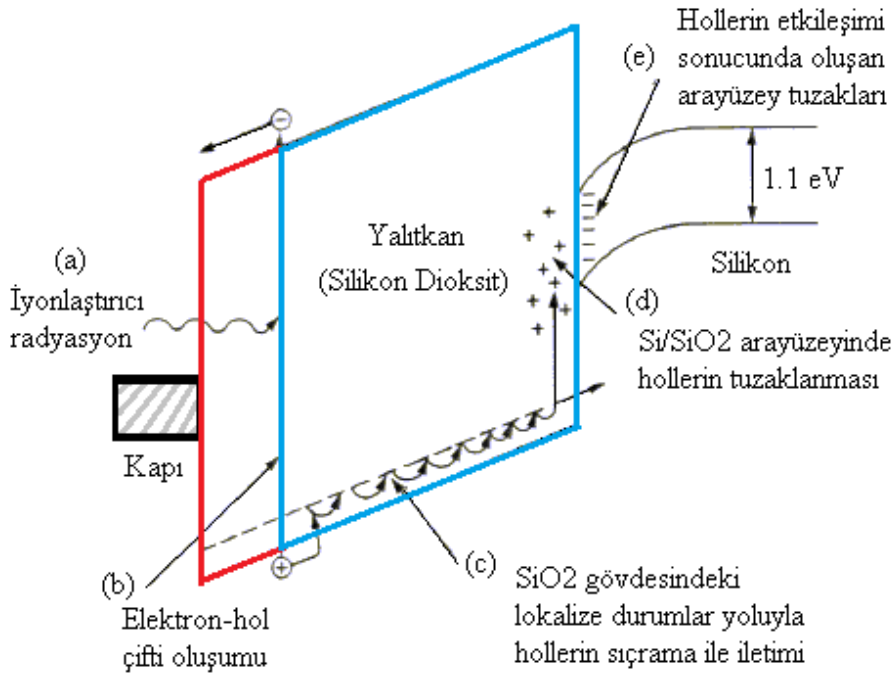


Şekil 4.4. Elektriksel etkiler

Birincisi, radyasyon sonucu oluşan kusurlar tarafından elektron-deşik çiftlerinin oluşumudur ve bu durum kusur enerji seviyeleri iletim ve valans bandlarının tam ortasındaysa mümkündür. Bir valans elektronu kusur merkezine bağlıdır ve bu elektron uyarılarak iletkenlik bandına çıkar ve elektron-deşik çiftleri oluşur. Çift oluşumu, kusur enerji seviyeleri orta seviyeden iletkenlik bandına doğru yaklaştıkça üstel olarak azalır. İkinci etki, radyasyon sonucu oluşan tuzak merkezleri tarafından elektron-deşik çiftlerinin rekombinasyonudur. Üçüncü etki, enerji bandının sığ seviyelerdeki taşıyıcıların tuzaklanmasıdır. Yani, bir deşik valans bandı yakınında tuzaklanabilirken, bir elektron iletkenlik bandının yakınında tuzaklanabilir. Dördüncü etki, verici (donor) ve alıcı (akseptör) telafisidir. Bu durumda, mevcut elektronların bazıları radyasyondan kaynaklanan deşikler tarafından telafi edilir. Bundan dolayı denge çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonu azalır. Son etki, taşıyıcıların tünellenmesidir.

4.3. Yarıiletken Yapılarda Radyasyon Etkileri

Yarıiletken yapılarda (MIS/MOS) yalıtkan oksit tabaka, iyonlaştırıcı radyasyona en duyarlı kısımdır. Şekil 4.5’de Yarıiletken yapılarda iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumlar gösterilmiştir [15,16,39]. Yapıya iyonlaştırıcı bir parçacık geldiğinde elektron-deşik çiftleri oluşur (durum:a). Yarıiletken küçük dirençli olduğunda girişteki (metal) elektron-deşik çiftleri hızlı bir şekilde kaybolur. Yalıtkan oksit içerisinde tamamen farklı büyüklükteki mobiliteye sahip olan elektronlar ve deşikler farklı davranışlara sahiptirler [40]. Radyasyon etkisi ile oluşan elektron-deşik çiftlerinin bir bölümü oluşuktan hemen sonra yeniden birleşirler. Birleşmeyen elektron-deşik çiftleri ise yalıtkan oksit içerisindeki elektrik alan etkisiyle birbirinden ayrılırlar (durum:b). Sonra, elektronlar girişe doğru, deşikler ise SiO₂-Si arayüzeyine doğru hareket ederler (durum:c). Arayüze yakın fakat hala yalıtkan oksit içerisinde sabit pozitif yük verebilen deşiklerin bir kısmı da burada tuzaklanabilir (durum:d). İyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle SiO₂-Si arayüzeyinde, arayüzey tuzakları oluşur (durum:e).



Şekil 4.5. Yarıiletken yapılarda iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumlar.

4.4. Radyasyon Doz Birimleri

İyonizasyon için kullanılan enerji iyonize edici doz ve aygıt tarafından soğurulan enerji ise toplam iyonize dozu olarak adlandırılır. Radyasyon doz birimleri;

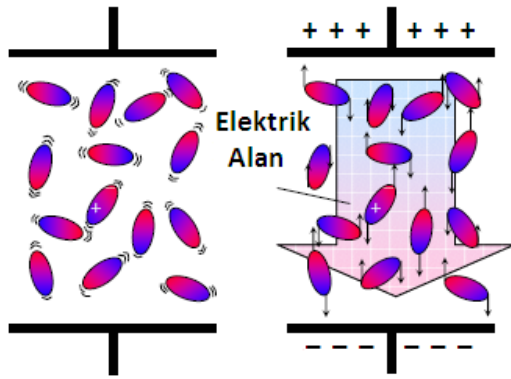
- *Rad*: Işınlanan maddenin 1 kg'ına 10^{-4} joule'lük enerji veren radyasyon miktarı olarak tanımlanır.
- *Gray (Gy)*: Işınlanan maddenin 1 kg'ına 1 joule'lük enerji veren radyasyon miktarına denir. $1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rad}$ 'dır.
- *Curie (Ci)*: Radyoaktivite miktarını yani bir çekirdeğin bir başka çekirdeğe bozunmasını birim zaman başına ölçmektedir. 1 saniyede $3,7 \times 10^{10}$ çözünme (dizentegrasyon) gösteren radyoaktivite birimi 1 Curie (Ci) olarak tanımlanır. Curie SI'de Becquerel cinsinden ifade edilir.
- *Becquerel (Bq)*: 1 saniyede 1 dizentegrasyon gösteren aktivite birimine 1 Becquerel (Bq) denir. Curie'nin mili ve mikro gibi alt birimleri, Becquerel'in mega ve giga gibi üst birimleri bulunmaktadır. $1 \text{ miliCurie (mCi)} = 37 \text{ megaBecquerel (MBq)}$ 'dir.

5. DİELEKTRİKLER

Dielektrikler yani elektriksel olarak yalıtkan malzemeler, elektriksel iletkenliği sağlayacak kadar serbest taşıyıcıya sahip değildirler. Yani yapılarında serbest elektron bulunmaz. Bu malzemeler çok yüksek özdirence sahip ve yasak enerji aralıkları 4 eV'dan daha büyüktür. Dielektrik malzemelerde tüm yükler belirli atom ve moleküllere sıkı bağlı olup yük hareketleri molekül içinde sınırlıdır. Uygulanan bir alternatif elektrik alan, dielektriğin pozitif ve negatif yüklerinin zıt yönlerde sonsuz küçük yerdeğiştirmelerine neden olur. Böylece elektrik yük merkezleri kayar ve elektriksel kutuplanma meydana gelir. Bunun sonucunda elektrik dipol momentleri oluşur. Tüm dielektrik malzemeler, elektrik alan etkisi altında kutuplanma yani polarizasyon özelliğine sahiptirler. Kutuplanma sonucunda oluşan elektriksel dipoller dielektrik malzeme yüzeyinde elektriksel yük birikimi meydana getirdiği için, dielektrik malzemeler özellikle kondansatör yapımında kullanılırlar. Elektrik dipollerin alan ile etkileşmesi dielektrik malzemeye elektriksel enerji depolama özelliği kazandırır. Ayrıca, bu malzemeler elektrik devresinde yük transferini engellemek için yalıtkan olarak kullanılırlar [12,41,42].

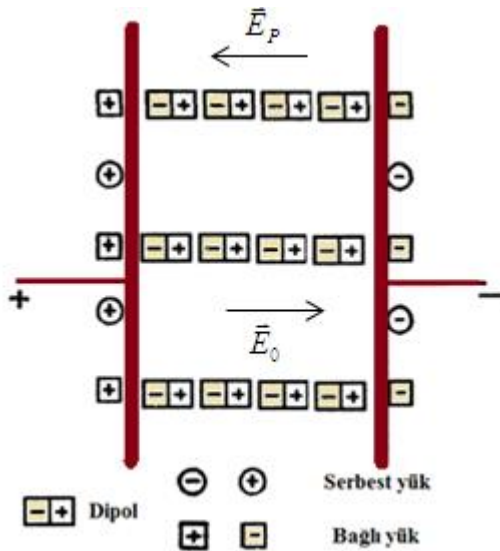
5.1. Dielektrik Kutuplanma (Polarizasyon)

Dielektrik madde elektrik alan içine konulduğunda bu alan etkisiyle her bir atom ve molekül alan yönünde dipol momentini kazanır. Yani, dielektrik içinde polarizasyon meydana gelir. Elektrik alan ortadan kaldırılırsa, yükler yani molekül eski haline döner ve net dipol moment sıfır olur. Kutuplanma olayını açıklayabilmek için, bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik madde konulduğunda, dielektrik yük bakımından nötr olmakla birlikte polarize olur ve dipollerin pozitif kısmı alan yönünde, negatif kısmı da alana zıt yönde yönelir. Elektrik alan içerisinde dipollerin yönelimi Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Elektrik alan içerisinde dipollerin yönelimi

Elektrik alanın etkisi sonucu, dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde negatif ve pozitif kutuplanma yükleri meydana gelir ve negatif yükler sol yüzeyde, pozitif yükler sağ yüzeyde birikirler. Dielektriğin tamamıyla nötr kalmasından dolayı, negatif yüzeyde oluşan yük miktarı pozitif yüzeyde oluşan yük miktarına eşit olmaktadır. Bu durum Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Bu kutuplanma yükleri son derece ince bir tabaka halinde ve yakın atomların etkisi altındadır. Dielektriğin yüzeyine dokundurulan iletken bir levha ile bu yüzeylerden hiçbir yük kaldırılamadığı için, bunlara bağlı yükler denilmektedir. Bir iletken serbest yük bulunduğu halde, polarize bir yalıtkanda meydana gelen yükler bağlıdır [25,43].



Şekil 5.2. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu

Elektrik alana paralel olacak şekilde yönelen dipoller, dış alana karşı koyan zıt yönlü bir iç elektrik alan oluştururlar. Bu durum dış elektrik alanın bir miktar azalmasına neden olur. E_o plakalar arasında dielektrik malzeme yokken alan şiddetini yani dış alanı ve E_p ise polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği alan şiddeti olmak üzere ve dielektrik içindeki bileşke alan bu alanların vektörel toplamına eşit olur.

$$\vec{E} = \vec{E}_o + \vec{E}_p \quad (5.1)$$

E_o polarize eden alan ile, polarize yüklerden ileri gelen E_p alanı zıt yönlü olduğundan Eş. 5.1,

$$\vec{E} = \vec{E}_o - \vec{E}_p \quad (5.2)$$

şeklinde yazılır. E_p kutuplanmayı önlemeye çalışan alandır ve bileşke alan E_o yönündedir.

Bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik yerleştirildiği zaman plakalar arasındaki potansiyelin azalmasıyla elektrik alan şiddeti de azalır. Elektrik alan şiddetinin azalmasıyla birim yüzeydeki net yük azalır. Kondansatör üzerindeki yük değişmediğinden kondansatörün kapasitesi birimsiz ϵ' çarpanı kadar artar. Potansiyel fark ve elektrik alan şiddeti $1/\epsilon'$ çarpanı kadar azalır. Bu ϵ' çarpanına malzemenin dielektrik sabiti veya dielektrik geçirgenlik denir. Bu sabit her zaman boşluğun geçirgenlik sabiti (ϵ_o) cinsinden ifade edilir ve birden büyük bir sayıdır. Ayrıca, dielektrik geçirgenlik yerine bağlı dielektrik geçirgenlik ifadesi de kullanılmaktadır. Bu ifade malzemenin dielektrik geçirgenliğinin boşluğun dielektrik sabitine oranı şeklinde ifade edilir ($\epsilon_r = \epsilon'/\epsilon_o$).

Dielektrik malzemenin her noktasında P kutuplanma, bileşke E alanı ile aynı yönde ve doğru orantılıdır. P kutuplanma,

$$\vec{P} = \epsilon_o \chi \vec{E} \quad (5.3)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada χ , dielektriğin elektrik alınganlığıdır. Dielektriğin elektrik alınganlığı (χ),

$$\chi = (\varepsilon' - 1) \quad (5.4)$$

eşitliği ile ifade edilir. Polarize dielektrikler için, elektrik yerdeğiştirme veya elektrik akı yoğunluğu, D, dielektrik içindeki E alanı ile orantılıdır ve

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (5.5)$$

olarak ifade edilir ve Eş. 5.3, Eş. 5.5'de yerine konulursa,

$$D = \varepsilon_0 (1 + \chi) E = \varepsilon_0 \varepsilon' E \quad (5.6)$$

eşitliği elde edilir [12,41,43].

Bir dipolün elektriksel dipol momentinin dielektrik içindeki elektrik alan ile bağıntısı,

$$\vec{p} = \alpha \vec{E} \quad (5.7)$$

eşitliği ile verilir. Burada α dipolün kutuplanabilirliği olup birim alan başına düşen ortalama dipol momentidir. Dielektrik malzemede N tane dipol olduğu varsayılırsa toplam kutuplanma,

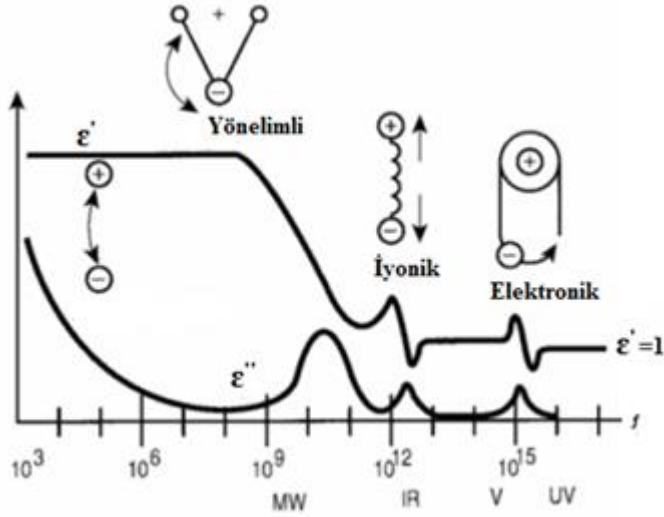
$$\vec{P} = N \alpha \vec{E} = (\varepsilon' - 1) \varepsilon_0 \vec{E} \quad (5.8)$$

olarak ifade edilir.

5.2. Kutuplanma Mekanizmaları

Genel olarak dielektrik malzemelerde dört tip kutuplanma mekanizması meydana gelir. Bunlar elektronik, atomik (iyonik), yönelimli ve arayüzey (uzay) yük kutuplanmalarıdır. Herbir dielektrik mekanizma karakteristik bir rezonans ve durulma frekansına sahiptir. Uygulanan alternatif alanın frekansı dipolün dönme frekansına eşit olduğunda rezonans gerçekleşir. Eğer dipol sürtünmeli bir ortamda bulunuyorsa dönmesinde sönüm meydana

gelir yani dipolün dönme frekansı uygulanan alanın frekansının gerisinde kalır. Bu durumda durulma gerçekleşir. Rezonans etkisi genellikle elektronik veya atomik kutuplanmada görülürken, durulma yani relaksasyon yönelimli kutuplanmada görülür. Dielektrik kutuplanma mekanizmalarının uygulanan alternatif elektrik alan frekansına bağlı değişimi Şekil 5.3’de gösterilmiştir [10,44].

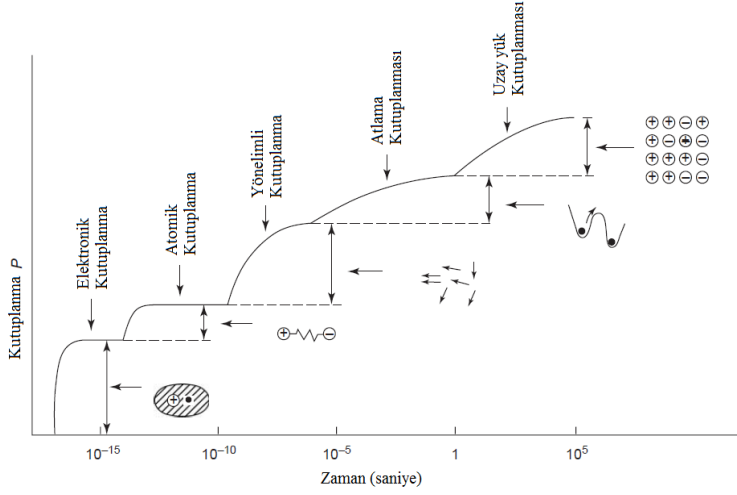


Şekil 5.3. Dielektrik kutuplanma mekanizmalarının frekans ile değişimi

Bir dielektrik malzemenin toplam kutuplanabilirliği α ile gösterilir ve dört farklı kutuplanmanın kutuplanabilirliklerinin toplamına eşittir [45] ve

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_o + \alpha_d \quad (5.9)$$

ile ifade edilir. Burada, α_e , α_i , α_o ve α_d sırasıyla elektronik, atomik, yönelimli ve arayüzey (uzay) yük kutuplanmasının kutuplanabilirliğini göstermektedir. Uygulanan dış elektrik alan altında dielektrik kutuplanmanın zamana bağlı değişimi Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4. Uygulanan dış elektrik alan altında dielektrik kutuplanmanın zamana bağlı değişimi

5.2.1. Elektronik kutuplanma

Bir dış elektrik alan uygulanmasıyla, atomda bir dipol momenti oluşacak şekilde elektronlar yörüngelerini değiştirirler. Yani, elektronların oluşturduğu negatif yük dağılımının merkezi çekirdeğin yük merkezine göre dış alanın etkisiyle atomik ölçekte kayar. Bunun sonucunda atomun simetrisi bozulur ve dielektrik içinde elektronik kutuplanma oluşur. Bu kutuplanma türü yüksek frekanslarda yani morötesi ve görünür bölge frekanslarında (10^{15} Hz) meydana gelir. Bu kutuplanma etkisi küçük ve geçicidir. Elektronik kutuplanma bütün atom veya iyonlarda oluşur ve bütün dielektriklerde gözlenir.

5.2.2. Atomik (İyonik) kutuplanma

Elektrik alana yerleştirilen iyonik bağlı bir malzemenin birbirine yakın pozitif ve negatif iyonları alan etkisiyle zıt yönlerde hareket ederek aralarındaki bağlar gerilir. Bunun sonucunda kutup çifti yani etkileşmeli çift-kutup moment meydana gelir. Elektronik ve iyonik kutuplanmanın ortak yönü, her iki kutuplanma yüklerin alan yönünde birbirlerine göre konum değiştirmesinden oluşmaktadır. Atomik kutuplanma kırmızı ötesi veya ona yakın frekans bölgelerinde ($\sim 10^{12}$ - 10^{13} Hz) gerçekleşir.

5.2.3. Yönelimli kutuplanma

Yönelimli kutuplanma, dış elektrik alan yokken rasgele yönelmiş net ve kalıcı dipol momente sahip yani elektrik çift-kutup momentleri içeren polar dielektrik maddelerde oluşur. Elektrik alan dipol momentlerine bir tork uygulayarak dipollerin alan yönünde yönelmeye zorlar. Yani, dipoller alan yönünde yönelecek biçimde döner. Bu kutuplanma mekanizması dipolar kutuplanma olarak da tanımlanır. Yönelimli kutuplanma radyo frekans bölgesinde ($\sim 10^3$ - 10^9 Hz) gerçekleşir.

5.2.4. Arayüzey (uzay) yük kutuplanması

Homojen maddelerde gözlenen elektronik, atomik ve yönelimli kutuplanma türleri atoma veya moleküle yerel olarak bağlı olan yüklerin hareketi ile gerçekleşir. Arayüzey yada uzay yük kutuplanması heterojen maddelerde, amorf veya polikristal katılarda veya tuzaklar içeren malzemelerde ortaya çıkar. Düşük frekanslı bir elektrik alan uygulandığında bu yük taşıyıcıları malzeme içerisinde belli bir uzaklığa kadar yerdeğiştirebilir. Malzemenin arayüzeyinde yerdeğiştiren bu yük taşıyıcıları (elektronlar, deşikler veya iyonlar) tuzaklanabilir. Ayrıca, bu yük taşıyıcıları kontaklarda serbest deşarj olamadığından veya yerdeğiştiremediğinden hareketleri engellenir ve bu durumda uzay yükleri oluşur. Yüklerin arayüzeyde birikmesinden dolayı oluşan bu kutuplanmaya arayüzey yük veya uzay yük kutuplanması denir.

5.3. Dielektrik Durulma (Relaksasyon)

Dielektrik durulma, moleküllerin içyapılarına ve moleküler düzenine bağlı olarak yönelimli kutuplanma ile ilişkilidir. Net ve kalıcı dipol momente sahip bir malzeme elektrik alan içerisine konulduğunda elektrik yerdeğiştirme (D) ve elektrik alan (E) zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Elektrik yerdeğiştirme vektörünün zamana bağlılığı dipol-durulma olayı olarak tanımlanır ve daimi dipollere sahip numunelerde görülür [46].

Durulma zamanı, dielektrikte bulunan moleküllerin hareketliliğinin bir ölçüsüdür ve dielektrik polarizasyonun orijinal değerinin $1/e$ değerine eşit olması için geçen süredir. Polarizasyon $P(t)$, zamanın fonksiyonu olarak,

$$P(t) = P_0 e^{-k_0 t} \quad (5.10)$$

ile ifade edilir Burada P_0 , $t=0$ anındaki yönelimli polarizasyonu; k_0 ise dipollerin hareketleri için oran sabitidir. Buna göre, $k_0 t=1$ olduğu durumda $P(t)$, P_0/e değerine eşit olur. t 'nin bu değeri, durulma değeridir ve durulma zaman sabiti $\tau = 1/k_0$ olarak ifade edilir.

Elektrik alan uygulandığında sınırlı hareket edebilen moleküllerin bu hareketi iç sürtünmeye yol açar. Moleküllerin alan etkisiyle yönelmeleri esnasında meydana gelen iç çarpışmalar durulma zamanının üstel olarak azalmasına neden olur. Elektrik alanda moleküller yavaş yavaş döner ve eksponansiyel olarak durulma zaman sabiti sonunda yönelimli polarizasyonun son durumuna yaklaşır. Alan kaldırıldığında ise, süreç ters döner ve sistem aynı zaman sabiti ile başlangıçtaki durumuna geri döner. Ayrıca, durulma zamanı, elektrik alanın bir periyot içinde değişim yapması sonucunda, o periyot içinde dipolün yönelme yapması için geçen süre olarak da tanımlanabilir. Durulma frekansı, durulma zamanının tersi ile orantılıdır ($f_{\text{relax}}=1/2\pi\tau$). Elektrik alanın frekansı, relaksasyon frekansından küçük olduğu zaman kutuplanma kolaylıkla oluşur ve elektrik alanı izler. bu durumda dielektrik kayıplar, ihmal edilecek kadar azdır. Frekans artarak relaksasyon bölgesine ulaşıncaya, kutuplanma alana uymakta zorlanır ve faz farkı artar. Bu durumda kayıplarda maksimum olur. Dielektrik kaybın maksimum olduğu frekans durulma frekansı olarak tanımlanır. Frekans artmaya devam ederse, kutuplanma meydana gelmez ve dielektrik sabiti hızla azalır.

5.4. Kompleks Dielektrik Sabiti

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

$$E = E_1 e^{i\omega t} \quad (5.11)$$

ile verilir. Elektrik yerdeğiştirme vektörü D , elektrik alana uymaya çalışır. Bu durum aralarındaki muhtemel bir faz kayması ile tarif edilir. Sonuç olarak, dielektrik geçirgenlik sabitinin aynı fazda ve farklı fazda olan iki bileşeni bulunur. Bu durum kompleks gösterimle tarif edilebilir,

$$D = \varepsilon^* E \quad (5.12)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (5.13)$$

Burada, ε' ve ε'' , kompleks dielektrik geçirgenlik sabitinin gerçel ve sanal(imajiner) bileşenleri olup dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp olarak da tanımlanır. Kompleks geçirgenliğin reel kısmı malzeme içinde depolanan enerjiyi ve sanal kısım ise malzeme içinde ısıya dönüşerek harcanan enerjiyi gösterir. Kompleks dielektrik sabiti,

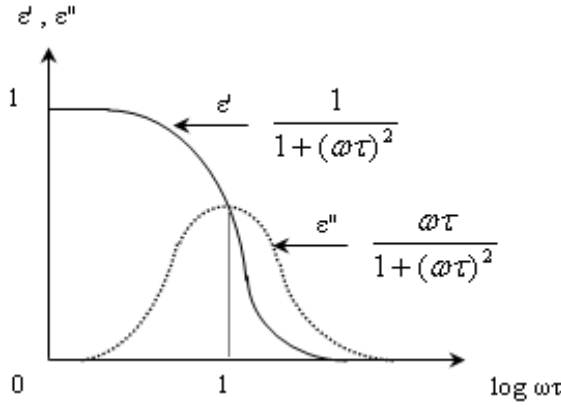
$$\varepsilon^* = \left[\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] + j \left[\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \right] \quad (5.14)$$

olarak ifade edilebilir. yazılabilir. Burada, ε_s statik dielektrik geçirgenlik sabiti ve ε_∞ ise D ve E'deki ani bir değişime karşılık gelen geçirgenlik değeridir. Eş. 5.15'de verilen ilk terim gerçel terimdir. E ile çarpıldığı zaman, E ile aynı fazda olan D bileşeni elde edilir. İkinci terim, sanal terimdir. E ile çarpıldığında, D'nin E ile aynı fazda olmayan ya da aralarındaki faz farkı 90° olan bileşenini verir. Kompleks dielektrik geçirgenlik sabitinin aynı faz ile farklı faz bileşenleri,

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (5.15)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \quad (5.16)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, τ numuneye özgü bir nicelik olup sıcaklığın bir fonksiyonudur ve ω ise sıcaklıktan bağımsızdır [47].



Şekil 5.5. Kompleks dielektrik sabitinin gerçel (ϵ') ve sanal (ϵ'') bileşenlerinin frekans bağı değişimi

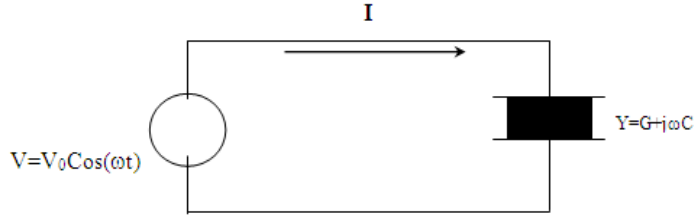
Eş. 5.14'in sağ tarafı frekans sıfırla sonsuz arasında değiştiğinde sıfıra yaklaşır. Bu terim Şekil 5.5'da dolu çizgi ile verilmiş olan $\log \omega\tau$ 'nın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Çok düşük frekanslarda ($\omega \ll 1/\tau$), dielektrik sabitin gerçel bileşeni, statik dielektrik sabitine yaklaşır. Yüksek frekanslarda ($\omega \gg 1/\tau$) ise, gerçel bileşen ϵ_∞ değerine yaklaşır. Yüksek ve alçak frekans arasında kalan bölgede ise düzgün geçişler (iki faz bölgesi arasında) olur. Dielektrik sabitin sanal bileşeni ile ilgili eğri yine Şekil 5.5'da (kesik çizgili olan) verilmektedir. Bu eğrinin ara frekanslarda $\omega=1/\tau$ olduğu noktada belirli bir maksimum verdiği görülmektedir. Dielektrik kaybın maksimumuna karşılık gelen frekans değeri durulma frekansını verir. Dielektrik kayıp açısı veya tanjantı, $\tan \delta$, sıgasal olarak malzemede depolanan enerjinin bir periyot kayıp miktarıdır ve

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{\epsilon_s + \epsilon_\infty \omega^2 \tau^2} \omega\tau \quad (5.17)$$

ile verilir.

5.5. Dielektrik Parametrelerin Belirlenmesi

Dielektrik maddelerin, dışardan uygulanan elektrik alana duyarlı olması onların elektriksel özelliklerini araştırmada önemli bir faktör olarak görülmektedir. Bundan dolayı bir dielektrik madde, dielektrikli bir paralel plakalı kondansatör yapısı bir elektriksel devre ile ödeştirilir ve admittans (Y) ile karakterize edilebilir. Şekil 5.6'de dielektrikli paralel plakalı kondansatör devresi verilmiştir.



Şekil 5.6. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör devresi

Şekilde görüldüğü gibi admitans,

$$Y = G + j\omega C \quad (5.18)$$

ile ifade edilir. Burada, G iletkenlik, ω uygulanan alternatif gerilimin açısal frekansı, C ise toplam kapasitedir. Bu ifade, kompleks dielektrik geçirgenlik sabitine ($\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$) bağlı olarak,

$$Y = G + j\omega(C_0\varepsilon^*) \quad (5.19)$$

$$Y = (G + \varepsilon''C_0) + j\varepsilon'C_0\omega \quad (5.20)$$

şeklinde yazılabilir [12,48,49]. Bu ifadeden, admitansın reel ve sanal bileşenleri,

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad \text{ve} \quad \varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega RC_0} \quad (5.21)$$

olarak elde edilir. Burada, ε' dielektrik sabitini, ε'' dielektrik kaybı göstermektedir.

Bir dielektrik malzemeye alternatif gerilim uygulanırsa, kompleks elektriksel iletkenlik,

$$\sigma^* = \sigma' + j\sigma'' = \omega\varepsilon_0\varepsilon'' + j\omega\varepsilon_0\varepsilon' \quad (5.22)$$

eşitliği ile verilir. Buradan, alternatif akım (a.c.) elektriksel iletkenlik,

$$\sigma_{ac} = \omega \epsilon_0 \epsilon'' \quad (5.23)$$

ile ifade edilir.

Düşük frekanslarda, dielektrik sabitinin çok yüksek ve kutuplanma etkilerinin ihmal edilebilir olması durumunda dielektrik durulmanın analizinde elektrik modülüs tanımı kullanılmaktadır. Kompleks elektrik modülüs (M^*),

$$M^*(\omega) = M' + iM'' \quad (5.24)$$

$$M^*(\omega) = \frac{\epsilon'}{\epsilon'(\omega)^2 + \epsilon''(\omega)^2} + i \frac{\epsilon''}{\epsilon'(\omega)^2 + \epsilon''(\omega)^2} \quad (5.25)$$

eşitliği ile ifade edilir ve bu eşitlikten elektrik modülüsün reel ve sanal kısımları,

$$M'(\omega) = \frac{\epsilon'}{\epsilon'(\omega)^2 + \epsilon''(\omega)^2} \quad (5.26)$$

$$M''(\omega) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'(\omega)^2 + \epsilon''(\omega)^2} \quad (5.27)$$

elde edilir.

5.6. Dielektrik Denklemleri

5.6.1. Debye denklemi

Tek durulma zamanlı homojen sistemlerin dielektrik parametrelerinin frekans bağımlılığını tanımlayan model Debye tarafından geliştirilmiştir [13,25,50-53]. Debye modeline göre, tek durulma zamanlı dielektrik için kompleks dielektrik geçirgenlik,

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_0} \quad (5.28)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlikten kompleks dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımları, ve kayıp tanjantı aşağıdaki eşitliklerle verilir.

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (5.29)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (5.30)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \omega^2 \tau^2} \quad (5.31)$$

Bu eşitliklerde, $\omega \rightarrow 0$ iken ε_s ve $\omega \rightarrow \infty$ iken ε_∞ değerleri reel geçirgenliğin limit değerini vermektedir. Şekil 5.7'de dielektrik sabiti, kayıp ve kayıp tanjantın açısal frekans ile değişim eğrileri gösterilmiştir. Dielektrik kaybın maksimum değeri $\omega \tau_0 = 1$ durumunda oluşur. Bu maksimuma karşılık gelen frekans durulma frekansı olup τ_0 ile gösterilir. $\omega = \omega_0$ durumunda ε' , ε'' ve $\tan \delta$,

$$\varepsilon' \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} \quad (5.32)$$

$$\varepsilon'' \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \quad (5.33)$$

$$\tan \delta \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty} \quad (5.34)$$

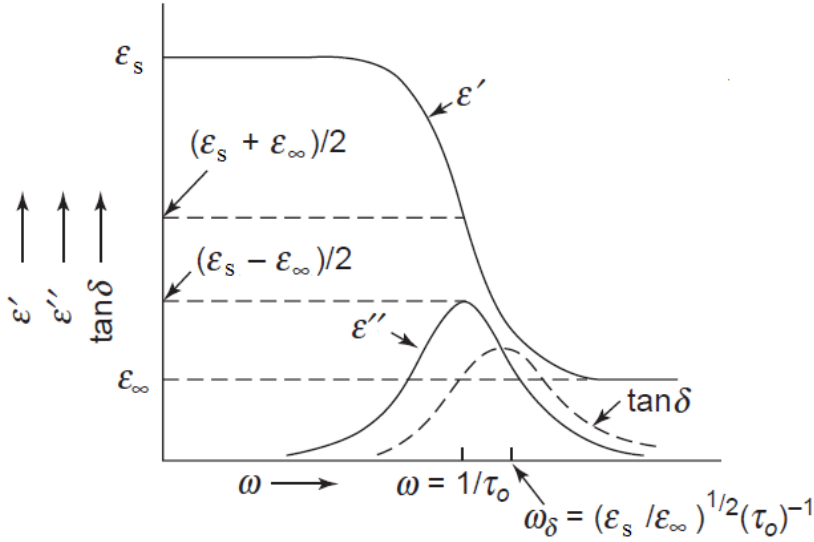
eşitlikleri ile verilir. Fakat, $\tan \delta$ 'nın ω_0 'daki değeri maksimum değer değilse bu durumda $\tan \delta$ maksimum değerini ω_s 'de alır.

$$\omega_s \tau_0 = \sqrt{\varepsilon_s / \varepsilon_\infty} > 1 \quad (5.35)$$

Bu frekans değerindeki $\tan \delta$,

$$\tan \delta \Big|_{\omega=\omega_s} = \tan \delta(\max) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2\sqrt{\epsilon_s \epsilon_\infty}} \quad (5.36)$$

eşitliği ile verilir.

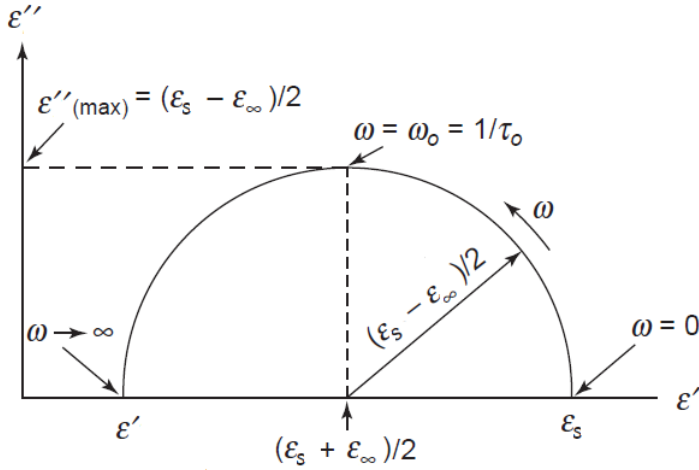


Şekil 5.7. Dielektrik sabiti (ϵ'), kayıp (ϵ'') ve kayıp tanjantın ($\tan \delta$) açısal frekans (ω) ile değişim eğrileri

Eş. 5.25 ve Eş. 5.26 eşitliklerinden, $\omega\tau_0$ ihmal edilerek kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları arasında elde edilen,

$$\left(\epsilon' - \frac{\epsilon_s + \epsilon_\infty}{2} \right)^2 + \epsilon''^2 = \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2} \right)^2 \quad (5.37)$$

bu denklem merkezi $\epsilon' = (\epsilon_s + \epsilon_\infty)/2$ ve yarıçapı $\epsilon'' = (\epsilon_s - \epsilon_\infty)/2$ olan bir yarı daire denklemdir ve Debye yarı dairesi olarak tanımlanır. $\omega = \omega_0 = 1/\tau_0$ durumu için ve $\epsilon'' = (\epsilon_s - \epsilon_\infty)/2$ değerinde dielektrik kayıp maksimum olmaktadır. Tek durulma zamanlı dielektriklerde ϵ' ile ϵ'' arasındaki ilişki Şekil 5.8'da verilmiştir.



Şekil 5.8. Tek durulma zamanlı dielektrik sistemler için Arc diyagramı

5.6.2. Cole-Cole denklemi

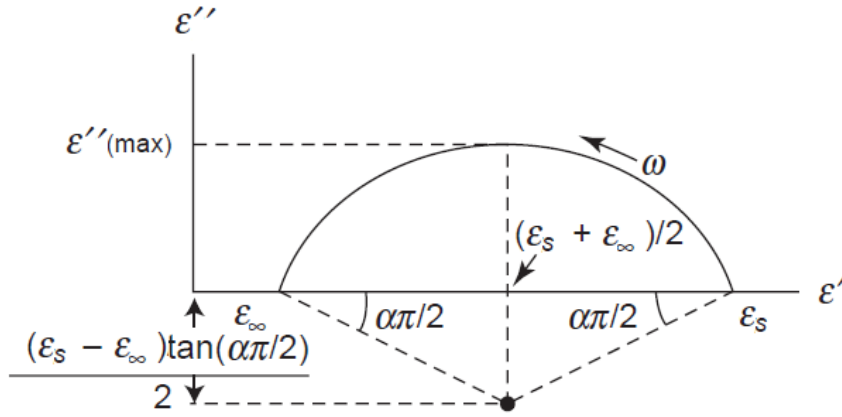
Debye modeli tek durulma zamanlı dielektrikler için kullanılmaktadır. Cole-Cole modeli ise, Debye eşitliklerinden türetilen ve çoklu durulma zamanına sahip polimer gibi uzun zincirli yapıların dielektrik özelliklerinin incelenmesinde kullanılan bir modeldir. Debye modelinde, merkezi $\epsilon''=0$ eksenini üzerinde olan bir yarı daire oluşur. Cole-Cole modelinde ise merkezi $\epsilon''=0$ eksenini altında kalan bir yarı daire veya bir yay meydana gelir. Tek durulma zamanlı bir dielektrikte, Cole-Cole çizimi tam bir yarı daire şeklindedir [13,25, 50,54]. Bu yarı daire,

$$\left(\epsilon'(\omega) - \frac{\epsilon_s + \epsilon_\infty}{2} \right)^2 + (\epsilon''(\omega))^2 = \frac{1}{4} (\epsilon_s - \epsilon_\infty)^2 \quad (5.38)$$

denklemi ile verilir. Çoklu durulma zamanlı dielektrikte kompleks geçirgenlik,

$$\epsilon^* - \epsilon_\infty = \epsilon' - \epsilon_\infty - j\epsilon'' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_0)^{1-\alpha}} \quad (5.39)$$

Cole-Cole eşitliği ile verilir. Burada, α , Cole-Cole parametresi olup $0 < \alpha < 1$ arasında değişen değerler almaktadır. Çoklu durulma zamanlı dielektrik malzemelerde Cole-Cole eğrisi Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Çoklu durulma zamanlı dielektrik malzemelerde Cole-Cole eğrisi.

Cole-Cole eşitliği kullanılarak kompleks dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımları,

$$\frac{\epsilon' - \epsilon_{\infty}}{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}} = \frac{1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin \alpha\pi/2}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin \alpha\pi/2 + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}} \quad (5.40)$$

$$\frac{\epsilon''}{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}} = \frac{(\omega\tau)^{1-\alpha} \cos \alpha\pi/2}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin \alpha\pi/2 + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}} \quad (5.41)$$

eşitliği ile ifade edilir. $\alpha=0$ durumunda, Eş. 5.40 ve Eş. 5.41 Debye eşitliklerine eşit olur. $\alpha > 0$ durumunda ise dağılım eğrisi tek durulma zamanı için daha geniştir, fakat $\omega\tau=1$ için simetriktir. $d\epsilon''/d\omega=0$ ve $\omega\tau=1$ durumunda maksimum dielektrik kayıp elde edilebilir. $\omega\tau$ terimi yukarıdaki eşitliklerden kaldırıldığında,

$$\left[\epsilon' - \frac{(\epsilon_s + \epsilon_{\infty})}{2} \right]^2 + \left[\epsilon'' - \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty})}{2} \tan \frac{\alpha\pi}{2} \right]^2 = \left[\frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{2} \sec \frac{\alpha\pi}{2} \right]^2 \quad (5.42)$$

eşitliği elde edilir. Eş. 5.42 merkezi $\frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{2} - \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty})}{2} \tan \frac{\alpha\pi}{2}$ olan ve çapı

$\frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{2} \sec \frac{\alpha\pi}{2}$ olan bir çemberi temsil etmektedir.

5.7. Dielektrik Malzemelerin Sınıflandırılması

Dielektrik malzemeler kutuplanma mekanizmalarına göre polar, apolar ve dipolar olmak üzere sınıflandırılabilir [13,25,55].

Apolar(Polar olmayan) Dielektrikler: Dış elektrik alan yokken, dielektrik malzeme net ve kalıcı elektrik dipol momentine sahip değilse bu tür dielektrikler apolar yani polar olmayan dielektrikler olarak adlandırılır. Apolar dielektrikler simetri içeren moleküllerden oluşur ve bu moleküllerin pozitif ve negatif yük merkezleri çakışıktır. Bu tür malzemeler, silikon (Si), elmas (C), sıvı, gaz veya katı fazdaki asal elementler gibi tek tip atomdan oluşur. Ayrıca, bu tür dielektriklerde, elektrik alan yokken, elektrik polarizasyon vektörü ve toplam dipol moment sıfıra eşittir. Apolar bir molekül kutuplandığı zaman, yerdeğiştiren yükleri geri çağıran kuvvet etki eder. Dış elektrik alan tarafından yüklere etkiyen kuvvet, geri çağırıcı kuvvetlere eşit oluncaya kadar yükler birbirlerinden ayrılırlar. Geri çağırıcı kuvvetler molekülden moleküle göre değişir ve bu nedenle yüklerin yer değiştirmesi de farklı olur. Moleküllere uygulanan elektrik alan arttıkça, yönelme derecesi artar. Dielektriğin molekülleri daimi dipol momentine sahip değilse, dış elektrik alan bir miktar yük ayrışmasına sebep olur ve bu da dış elektrik alanın bir miktar azalmasına neden olur.

Ayrıca, apolar dielektriklerde, uygulanan dış elektrik alan başlıca valans elektron bulutunun esnek yerdeğiştirmesine neden olabilir. Bundan dolayı, apolar malzemelerde sadece elektronik kutuplanma oluşur. Apolar malzemelerde, soğurma rezonans frekansında oluşur. Görünür bölgeden morötesi bölgesine kadar olan frekans aralığında rezonans olayı meydana gelir. Rezonans frekansından daha düşük frekanslar için, dielektrik sabiti frekanstan bağımsız ve statik dielektrik sabitine eşit olur. Bu tür dielektriklerde toplam kutuplanabilirlik, $\alpha = \alpha_0$ ile verilir.

Polar dielektrikler: Dış elektrik alan yokken rastgele yönelmiş net ve kalıcı elektrik dipol momentine sahip olan moleküllere polar molekül, böyle asimetric yani hiçbir simetri elemanı içermeyen moleküllerden oluşmuş dielektriklere de (N_2O ve H_2O gibi) polar dielektrikler denir. Böyle dielektrik malzemenin moleküllerinin pozitif ve negatif yük merkezleri çakışık değildir. Bu tür dielektriklerde, elektrik alan iyonların göreceli konumlarının esnek yerdeğişmesinde olduğu gibi valans elektron bulutlarının esnek

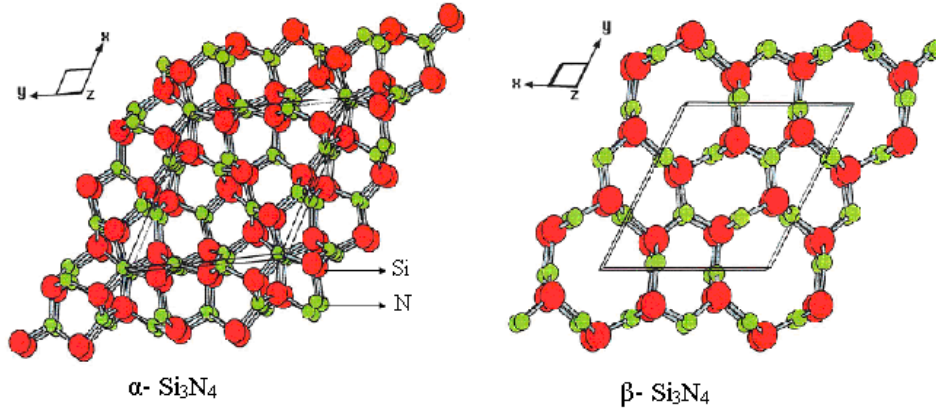
yerdeğiştirmesine neden olacaktır. Yani, elektrik alan etkisi ile iyonlar birbirine göre konumlarını değiştirir. Bundan dolayı, bu dielektriklerde hem elektronik hem de iyonik kutuplanma meydana gelir. İyonik kristaller, bazı oksitler, parafinler, benzen ve karbon tetraklorür gibi yapılar bu tür malzemelere örnek olarak verilebilir. Ayrıca, bu malzemelerde soğurma iki rezonans frekansında oluşur. Bunlardan biri optik frekans diğeri daha düşük rezonans frekanslarda yani kızılötesi bölgesidir. Optik frekans bölgesinde elektronik kızılötesi bölgesi ise iyonik polarizasyon meydana gelir. Bu durumda toplam kutuplanabilirlik, $\alpha = \alpha_e + \alpha_i$ ile verilir.

Dipolar Dielektrikler: Dipolar malzemeler kalıcı dipol momentine sahip moleküllerden oluşur. Bu malzemelerde, yönelimli kutuplanma sonucunda dış elektrik alan kalıcı dipollerin uzaysal yönelimine sebep olur. Bu yönelme işlemi, sıvılarda, gazlarda ve belirli bir sıcaklık aralığında bazı katılarda (katı hidroklorik ve sülfürik asit gibi) meydana gelir. Dipolar malzemelerde, üç temel kutuplanma (elektronik, iyonik ve yönelimli) mekanizması ortaya çıkar ve toplam kutuplanabilirlik, $\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_0$ ile verilir.

6. DENEYSEL YÖNTEM

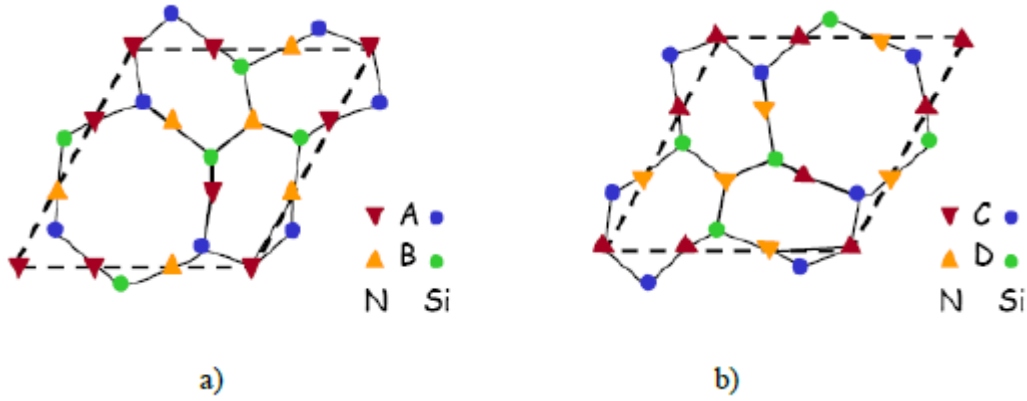
6.1. Silisyum Nitrat (Si_3N_4) Kristal Yapısı

Silisyum nitrat (Si_3N_4) silisyum ve nitrojen elementlerinden oluşan bir kimyasal bileşiktir. Silisyum nitrat α , β ve c olmak üzere üç farklı kristal yapısına sahip, iyonik-kovalent (%70 kovalent) bağlı bir malzemedir. α - Si_3N_4 ve β - Si_3N_4 normal azot basıncı altında elde edilebilirken, c - Si_3N_4 yapısı çok yüksek basınç ve sıcaklık altında elde edilebilmektedir. Son yıllarda bulunmuş olan c - Si_3N_4 yapısı α ve β yapıları kadar yaygın değildir. Ayrıca, α ve β - Si_3N_4 hekzagonal kristal yapıya sahipken, c - Si_3N_4 kübik spinel yapıdadır. α - Si_3N_4 ve β - Si_3N_4 kristal yapıları Şekil 6.1’de gösterilmiştir [4,55,56].



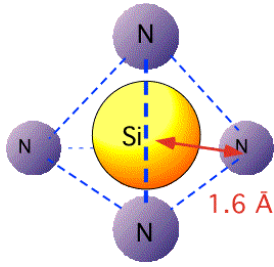
Şekil 6.1. α - Si_3N_4 ve β - Si_3N_4 kristal yapılarının gösterimi

Tetrahedral yapıların bağ yapısı, 4 Si ve 4 N atomunun oluşturduğu küçük halka yapısının ve 6 Si ve 6 N atomunun oluşturduğu büyük halka yapısının oluşmasını sağlamaktadır. Bu halkalar birleşerek ABAB... (β - Si_3N_4) ya da ABCD... (α - Si_3N_4) şeklinde dizilime sahip tabakaları oluşturur. Si_3N_4 'de AB ve CD şeklindeki Si-N tabakaları Şekil 6.2’de gösterilmektedir. β - Si_3N_4 yapısı, bu tabakaların ABAB... şeklinde diziliminden oluşur ve örgü parametreleri $a=7,608\text{\AA}$ ve $c=2,911\text{\AA}$ 'dir. Ayrıca, bu yapıda c yönüne paralel yönde sürekli kanallar bulunmaktadır. α - Si_3N_4 yapısı ise, bu tabakaların ABCDABCD... şeklinde diziliminden oluşur ve örgü parametreleri $a=7,748\text{\AA}$ ve $c=5,617\text{\AA}$ 'dir. Bu dizilim, üstteki AB tabakasının yapıdan çıkıp 180 derece dönüp tekrar üst tabaka olarak yerleşmesi şeklindedir. AB tabakasının, CD tabakasından kayarak yerleşmesiyle kanallar kapanır [4,55,56].



Şekil 6.2. Si_3N_4 'de a) AB ve b) CD şeklindeki Si-N tabakaları

Ayrıca, Si_3N_4 daha önce belirtildiği gibi sert, yoğun bir refraktör malzemesidir. Yapısı silisyum dioksitten oldukça farklıdır. Esnek, şekil verilebilir Si-O-Si köprü bağlarının yerine, Si-N-Si yapısı iki bağdan ziyade üç bağ oluşturan nitrojenin gerekliliği ile sertlik verilir. Nitrojen atomları silisyum etrafında, silisyum dioksitte olduğu gibi tetrahedral biçimde kabaca düzenlenir. Şekil 6.3'de Si_3N_4 yapısı verilmiştir.



Şekil 6.3. Si_3N_4 yapısı

6.2. Au/ Si_3N_4 /n-Si (MIS) Yapıların Hazırlanması

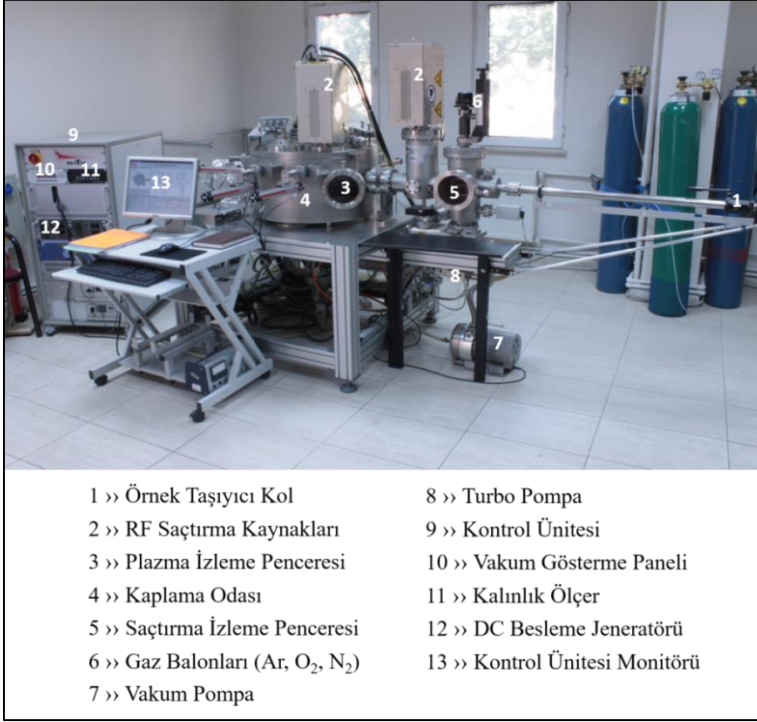
6.2.1. Kristal temizleme

Bu çalışmada, RF püskürtme yöntemi kullanılarak büyütülen silisyum nitrat (Si_3N_4) arayüzey yalıtkan tabakalı Au/ Si_3N_4 /n-Si (MIS) yapıları oluşturmak için, (100) yüzey yönelimli, 0,5 $\Omega\cdot\text{cm}$ öz dirençli, 300 μm kalınlıklı, 2" çapında bir yüzeyi parlatılmış fosfor katkılı (n-tipi) Si yarıiletkeni kullanıldı. Metal ile yarıiletken arasına doğal ya da yapay olarak büyütülen bir yalıtkan tabaka, MIS yapının hem elektriksel hem de dielektrik özelliklerini oldukça etkilemektedir. Bu nedenle, Si alttaş üzerine homojen bir silisyum nitrat (Si_3N_4) ince filmin büyütülmesi en önemli fabrikasyon adımlarından biridir. İnce film büyütülecek yarıiletken yüzeyi üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini gidermek ve

yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için farklı kimyasal temizleme metotları kullanılır. Önce n- tipi Si yarıiletken kristal aseton ve RO&UP Water Purification System'de hazırlanan yüksek dirençli (~16-18 M Ω) deiyonize su karışımında ultrasonik banyoda yıkandı. Sonra, yarıiletken kristal değişik oranlarda farklı kimyasal bileşikler (trikloretilen (C₂HCl₃), aseton (CH₃COCH₃), metil alkol (CH₃OH), sülfürik asit (H₂SO₄) ve hidrojen peroksit (H₂O₂) gibi) içinde ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda ultrasonik olarak yıkandı. Daha sonra, hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımında ultrasonik olarak yıkanarak kristal yüzeyinin oksitlenmemesi için azot (N₂) gazı ile kurulandı.

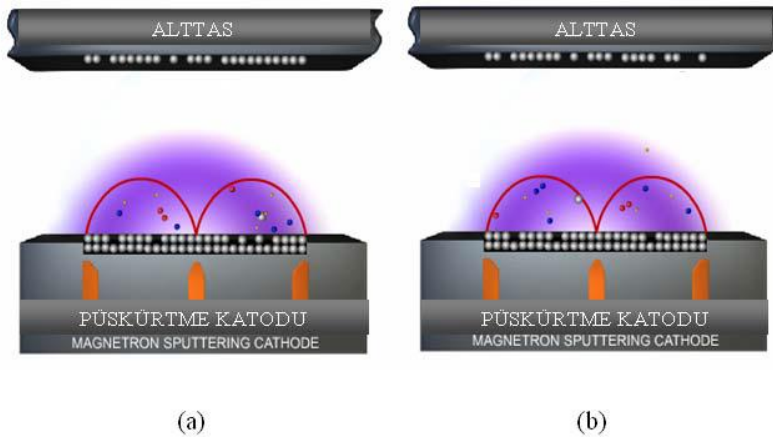
6.2.2. Yalıtkan silisyum nitrat (Si₃N₄) tabakasının RF püskürtme yöntemiyle oluşturulması

Püskürtme tekniği, oluşturulan bir plazma sayesinde püskürtülen hedef malzeme atom ya da moleküllerinin yarıiletken tek kristal yüzeyi üzerine biriktirilerek ince film oluşturulmasını sağlayan bir tekniktir [57,58]. Püskürtme sisteminde plazma genellikle bir Argon (Ar) işlem gazı kullanılarak elde edilir. Püskürtme yönteminde vakumlanan ortamda yüksek elektrik alan oluşur. Bu elektrik alan etkisi ile iyonlar hızlanarak target olarak adlandırılan hedef malzemeye çarpmak suretiyle hedef malzemeden ilgili moleküllerin sökülerek alltaş üzerine ince filmin büyütülmesini sağlar. Bu sistemin en büyük avantajlarından biri düşük sıcaklıklarda biriktirme işlemi yapılabilmesidir. Püskürtme sistemi iletken, yarıiletken ve metal oksit gibi geniş bir ince film üretme çeşitliliğine sahiptir. İletken olan malzemeler DC Magnetron Püskürtme, yalıtkan olan malzemeler ise (Radyo Frekans) RF Magnetron Püskürtme yöntemiyle biriktirilir. 2 RF kaynağı ve 3 tane DC güç kaynağından oluşan püskürtme sistemi Resim 6.1'de verilmiştir.



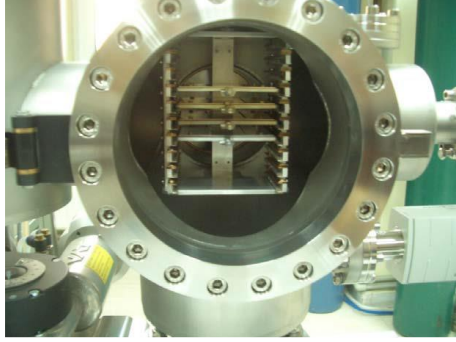
Resim 6.1. Bestec marka püskürtme sistemi

Şekil 6.4'de Ar^+ iyonlarının hedeften molekül sökmesi ve sökülen molekülün alttaşa yerleşmesi gösterilmiştir. Şekilde mor renkle gösterilen Ar^+ iyonlarından oluşturulan plazma ortamıdır. Turuncu renklerle gösterilen mıknatıslar ise elektronları manyetik alanda tutar ve Ar^+ iyonlarının hedef malzemeyi bombardıman etmesine yardımcı olur. Ayrıca, Şekil 6.4.'de Ar^+ iyonlarının hedef malzemeden bir molekül sökmesi ve bu sökülen molekülün alttaşa yüzeyine yerleşmesi gösterilmiştir.



Şekil 6.4. (a) Ar^+ iyonlarının hedeften molekül sökmesi, (b) sökülen molekülün alttaşa yerleşmesi

Resim 6.2’de görüldüğü gibi yükleme raflarına 10 adet numune yerleştirilebilmekte ve asansör sistemi ve taşıyıcı kol yardımıyla istenilen numune biriktirme odasına taşınabilmektedir.



Resim 6.2. Püskürtme sisteminin yükleme odası ve yükleme rafları

Si_3N_4 ince film hazırlamak için kimyasal temizlenen n-Si alttaşı ilk olarak yükleme odasına alındı ve ardından püskürtme odasına transfer edildi. Hedef ile alttaşı arasındaki mesafe yaklaşık 35 mm olacak şekilde sabitlendi. Püskürtme odasının taban basıncı 1×10^{-8} mbar iken Si alttaşı sıcaklığı $400 \text{ }^\circ\text{C}$ olacak şekilde ısıtıldı. Püskürtme esnasında püskürtme basıncı 3×10^{-3} mbar iken Si alttaşı $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılarak ve ortama 4/1 oranında Ar/ O_2 gaz karışımı verilerek % 99,999 yüksek saflıkta silisyum nitrat (Si_3N_4) hedeften Si alttaşı üzerine Si_3N_4 ince film büyütüldü.

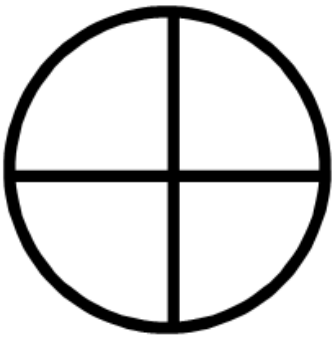
6.2.3. Omik kontakın oluşturulması

İnce film büyütme işleminden sonra Au/ Si_3N_4 /n-Si (MIS) yapıların hazırlanması için gerekli altın (Au) metal omik ve doğrultucu kontaklar, BESTEC marka yüksek vakumlu metal buharlaştırma sistemi kullanılarak gerçekleştirildi. Bu sistem Resim 6.3’da gösterilmiştir.



Resim 6.3. BESTEC marka yüksek vakum termal buharlaştırma sistemi

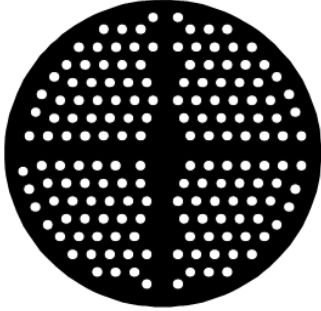
Omik ve doğrultucu kontakların oluşturulmasında kullanılacak malzemeler ultrasonik banyoda kimyasal olarak iyice temizlenip durulandıktan sonra kuru nitrojen (N_2) gazı ile kurulandı. Omik kontağı oluşturmak için, kimyasal olarak temizlenen yarıiletkenin mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirilerek hemen vakum ortamına alındı. Omik kontaklar için Şekil 6.5’de gösterilen 50 mm çaplı ve ≈ 300 m kalınlıklı bakır maske kullanıldı. Vakum $\sim 10^{-7}$ mbar’a ulaştığında, flamanların biri üzerinden akım geçirilerek %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş altın buharlaştırıldı. Buharlaşmanın başlamasından bir süre sonra kesici kapak (metal perde) yan tarafa açılarak, 450 °C’ye kadar ısıtılmış Si alttaşın mat yüzeyi üzerine ~ 2000 Å kalınlığında Au kaplandı. Daha sonra, numune 400 °C’de tavlanarak buharlaştırılan altın silisyum içerisine çöktürüldü.



Şekil 6.5. Omik kontak için kullanılan bakır maske

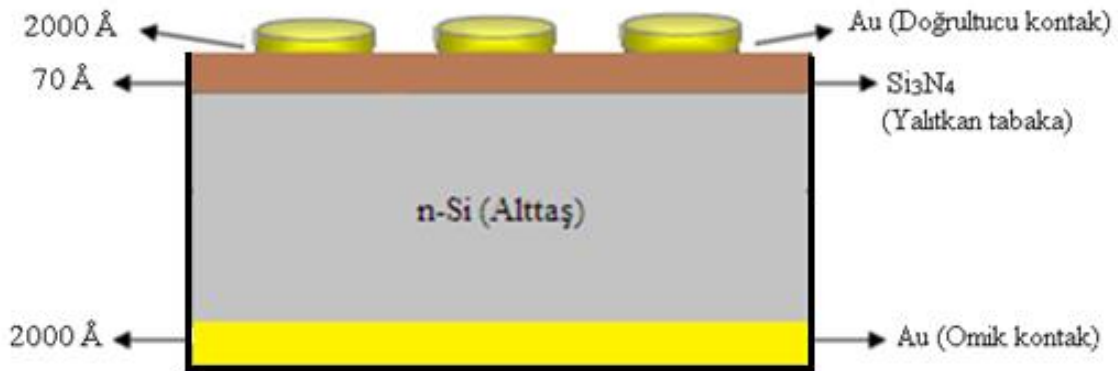
6.2.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Si_3N_4 ince film ile kaplanmış yarıiletkenin parlak yüzeyi aşağı gelecek şekilde Şekil 6.6'da gösterilen 2 mm çaplı delikler açılmış bakır maske üzerine yerleştirildi. Sonra, flaman üzerine konulan altın metal parçası $\sim 10^{-7}$ mbar vakumda buharlaştırılarak, 50°C 'de yarıiletkenin parlak yüzeyi üzerine ~ 2000 Å kalınlığında altın doğrultucu kontaklar oluşturuldu.



Şekil 6.6. Doğrultucu kontak için kullanılan bakır maske

Doğrultucu kontağın oluşturulması ile $\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n-Si}$ metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar hazırlandı. Daha sonra doğrultucu kontaklar üzerine iletken teller gümüş pasta ile tutturularak hazırlanan MIS yapının elektriksel ölçümleri gerçekleştirildi. Oluşturulan $\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n-Si}$ (MIS) yapının şematik gösterimi Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7. Oluşturulan $\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n-Si}$ (MIS) yapının şematik gösterimi

6.3. Kullanılan Ölçüm Düzenegi

MIS yapının tüm deneysel ölçümleri, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirildi. Frekansa bağlı kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümlerinde Hewlett Packard 4192A Düşük Frekans (LF) Empedans Analizmetre kullanıldı. Resim 6.4' de gösterilen empedans analizmetre, -35 V ile 35 V arasında d.c. gerilim, 1 mV ile 1.1 V a.c. tetikleme gerilimi üretme özeliğine sahip ve 5 Hz ile 13 MHz frekans ölçüm aralığına sahiptir. Ayrıca, tüm ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE-488 a.c./d.c. çevirici kart ve yazılım programı yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi.



Resim 6.4. HP 4192 A LF empedans analizmetre

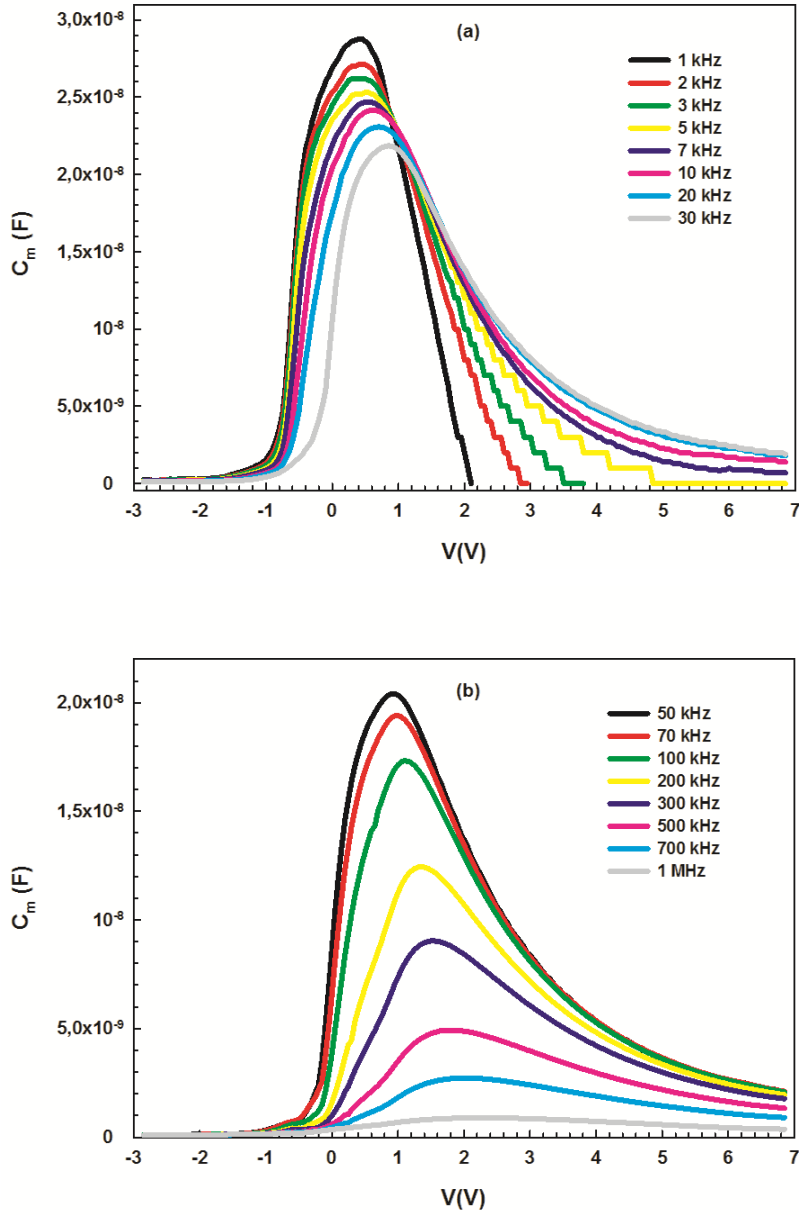
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Hazırlanan Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) yapının, kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri ışınlamadan önce oda sıcaklığında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında gerçekleştirildi. Daha sonra, MIS yapı ışınlama dozu 0,69 kGy/h olan ⁶⁰Co gama-ışın kaynağıyla ışınlandı. Işınlanan MIS yapının kapasitans ve iletkenlik ölçümleri her ışınlama dozundan sonra (2, 5, 10, 20, 50 ve 100 kGy) beş farklı frekans değerinde (1, 10, 100, 500 ve 1000 kHz) gerçekleştirildi. Bütün ölçümlerde HP 4192A LF empedans analizmetre kullanıldı. Frekansa ve radyasyona bağlı elde edilen ölçüm verileri kullanılarak MIS yapının elektriksel ve dielektrik karakteristikleri incelendi ve deneysel sonuçlar sırası ile aşağıda verilmiştir.

7.1. Radyasyondan Önce MIS Yapının Frekansa Bağlı Elektriksel ve Dielektrik Karakteristikleri

7.1.1. Elektriksel Karakteristikler

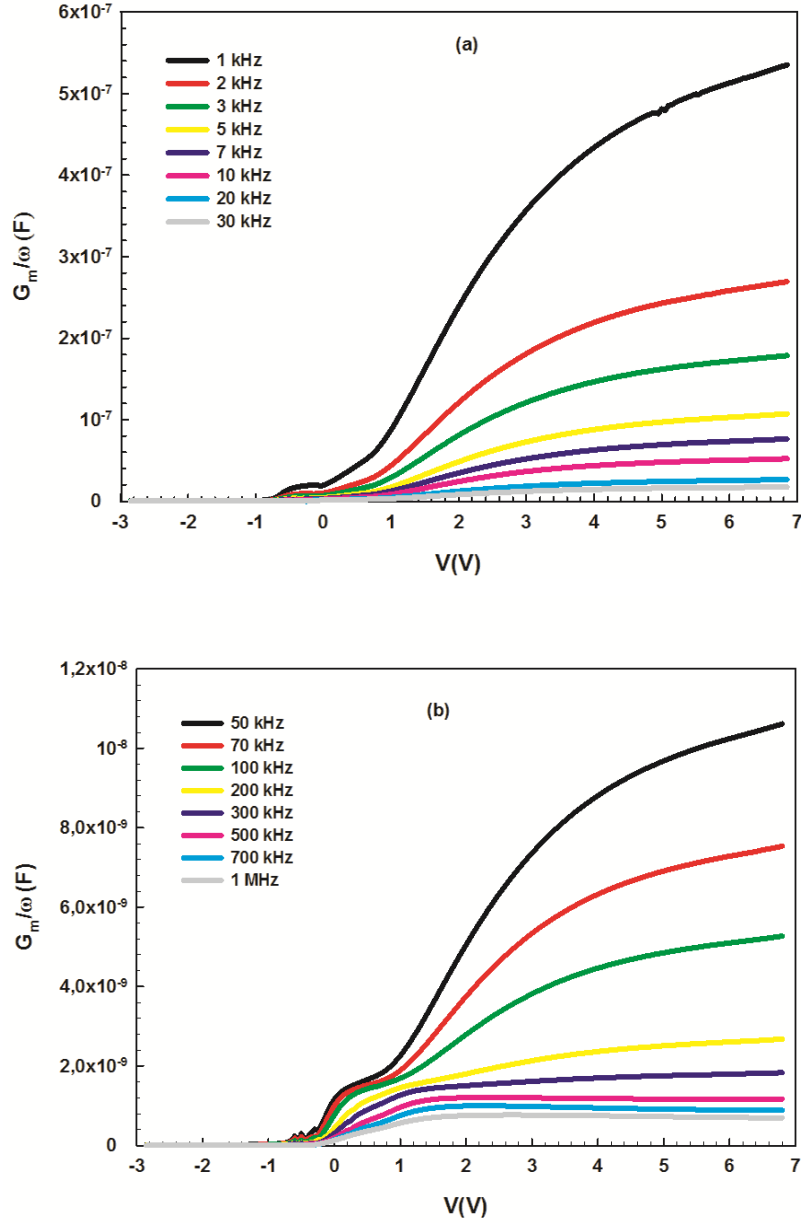
Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) yapının, radyasyona maruz bırakılmadan önce kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri oda sıcaklığında 1 kHz-1 MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. MIS yapının 1-30 kHz ve 50-1000 kHz frekans aralığında uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak çizilen C_m-V eğrileri sırasıyla Şekil 7.1.a ve Şekil 7.1.b'de gösterilmiştir. MIS yapının yığılım, tersinim ve tükenim bölgeleri C-V eğrilerinde görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, ölçülen kapasitans değeri artan frekans ile azalmaktadır. Kapasitansın frekans bağımlılığı arayüzey durumların (N_{ss}) varlığına atfedilmektedir. Düşük frekanslarda, arayüzey durumları uygulanan a.c. sinyali takip edebilmekte ve bundan dolayı kapasitansa katkı gelmektedir. Yüksek frekanslarda ise, arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcıların yaşam süresi (τ) 1/2πf den daha büyüktür. Bu nedenle arayüzey durumları uygulanan a.c. sinyali takip edemez ve toplam kapasitansta katkıları ihmal edilebilecek kadar küçüktür [2,3,59-63]. Ayrıca, bu eğrilerden arayüzey durumlarının tükenim bölgesinde etkili olduğu görülmektedir. C-V eğrileri her frekansta tükenim bölgesinde bir pik vermektedir. Piklerin pozisyonu artan frekansla pozitif gerilimlere doğru kaymaktadır. Bu piklerin varlığı, seri dirence, eklem bölgesinde tuzaklanan taşıyıcılara ve arayüzey durumlardaki değişime atfedilmektedir.



Şekil 7.1. MIS yapının uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak (a) 1-30 kHz (b) 50-1000 kHz frekans aralığındaki C_m -V eğrileri

MIS yapının 1-30 kHz ve 50-1000 kHz frekans aralığında uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak çizilen G_m/ω -V eğrileri sırasıyla Şekil 7.2.a ve Şekil 7.2.b'de gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, G_m/ω -V eğrileri C-V eğrilerine benzer davranış sergilemektedir. Ölçülen iletkenlik değeri artan frekans ile azalmaktadır. Bu sonuç, arayüzey durumların (N_{ss}) varlığına atfedilmektedir [3,64,65]. Ayrıca, G_m/ω -V eğrileri tüketim bölgesinde 0 volt civarında yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarından dolayı pik vermektedir. Bu pikin büyüklüğü artan frekansla azalmakta ve

özellikle yüksek frekanslara gidildikçe kaybolmaktadır [66-69]. C-V ve G/ω -V ölçümlerinde; arayüzey durumları (N_{ss}) tersinim ve tükenim bölgesinde seri direnç (R_s) ise yığılım bölgesinde etkili olmaktadır [2].



Şekil 7.2. MIS yapının uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak (a) 1-30 kHz (b) 50-1000 kHz frekans aralığındaki G_m/ω -V eğrileri

MIS yapının C-V ve G/ω -V ölçümlerinden seri direnç (R_s) değerlerini elde etmek için literatürde birkaç metot önerilmektedir [2,66,67]. Bu çalışmada, R_s hesaplamalarında Nicollian ve Goetzberger tarafından geliştirilen metot kullanılmıştır. [31]. MIS yapının R_s değerleri, yeterince yüksek frekanslarda kuvvetli yığılım bölgesinde kapasitans (C_{ma}) ve

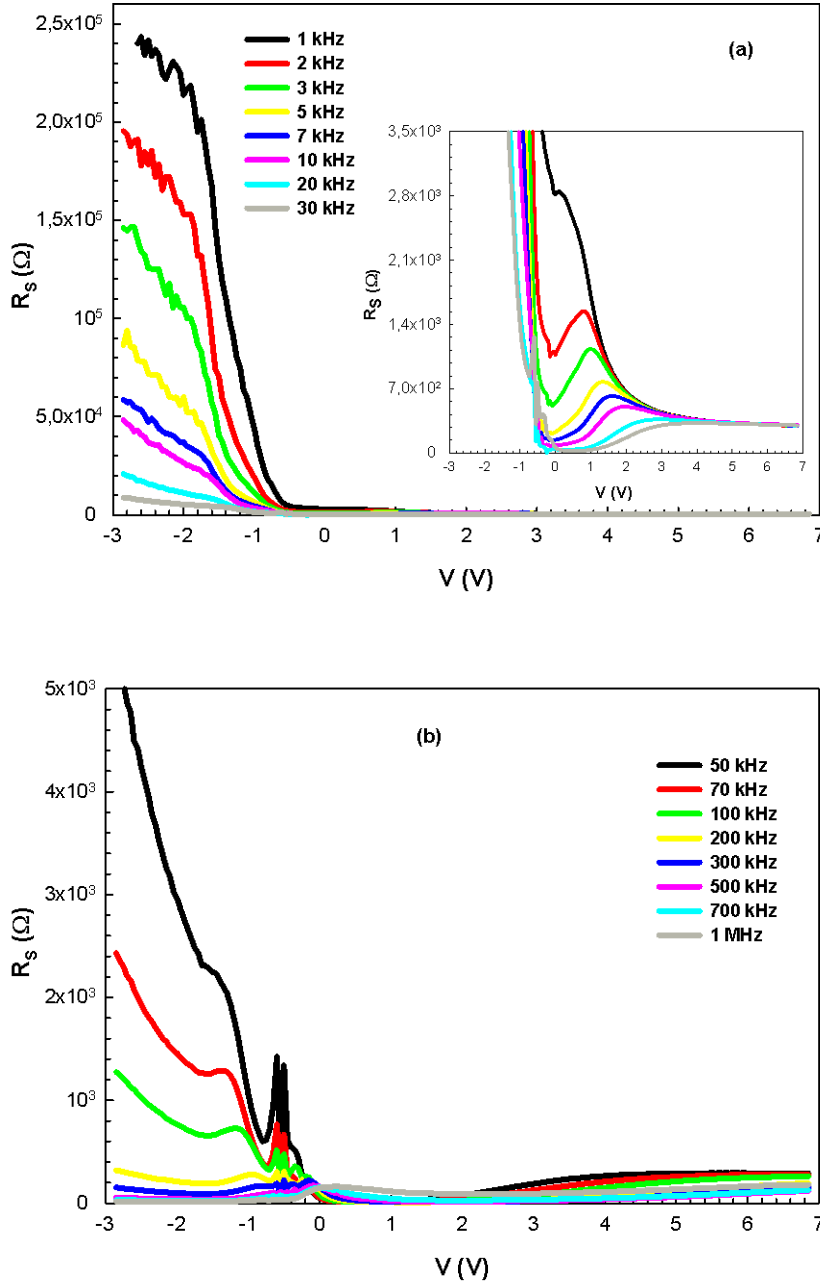
iletkenlik (G_{ma}) ölçümlerinden hesaplanmıştır. Çünkü, yüksek frekanslarda arayüzey durumları uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edemez ve C ve G/ω değerlerine bir katkı gelmez. Paralel RC devresi kullanarak MIS yapının ölçülen admitansı (Y_{ma}) [2,3,68],

$$Y_{ma} = 1/Z_{ma} = G_{ma} + j\omega C_{ma} \quad (7.1)$$

eşitliği ile verilir. Admittansın gerçel ve sanal kısımları karşılaştırıldığında, seri direnç (R_s),

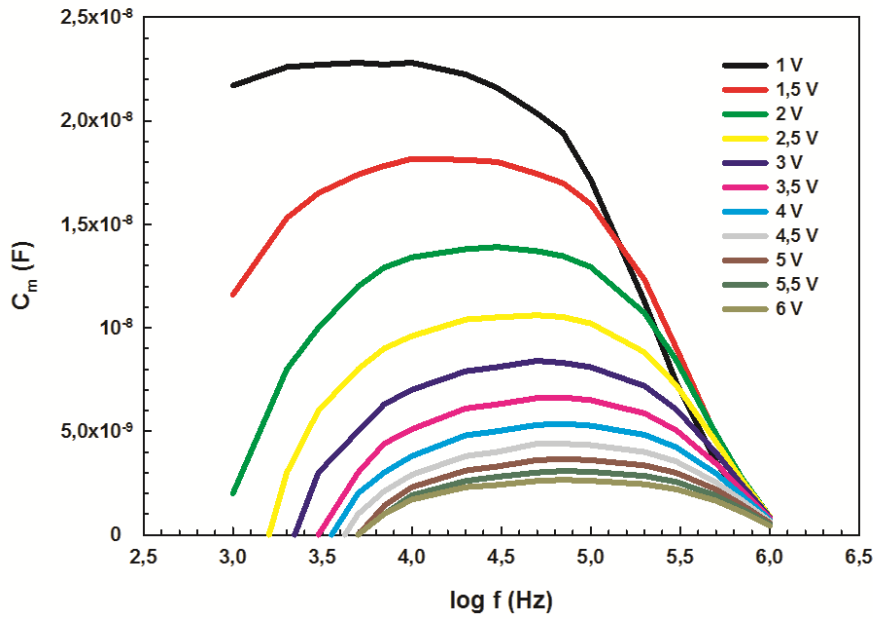
$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (7.2)$$

eşitliği ile ifade edilir [2,3,31]. Burada, C_{ma} and G_{ma} sırasıyla kuvvetli yığılım bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir ve ω ise açıl frekanstır. Eş. 7.2 kullanılarak hesaplanan R_s değerlerinin uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak farklı frekanslarda çizilen R_s -V eğrileri sırasıyla Şekil 7.3.a ve Şekil 7.3.b'de gösterilmiştir. Şekil 7.3.a ve Şekil 7.3.b'den görüldüğü gibi, R_s değeri artan frekansla azalmaktadır. Seri direncin bu davranışı, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarına atfedilmektedir [2,31,62,69,70]. Ayrıca, R_s -V eğrileri her frekans değerinde bir pik vermekte ve piklerin pozisyonu artan frekansla pozitif gerilimlere doğru kaymaktadır. Daha yüksek frekanslara gidildikçe bu pik kaybolmaktadır. Piklerin meydana geldiği bölgede arayüzey durumlarının daha yoğun yerleşmiş olduğu söylenebilir.



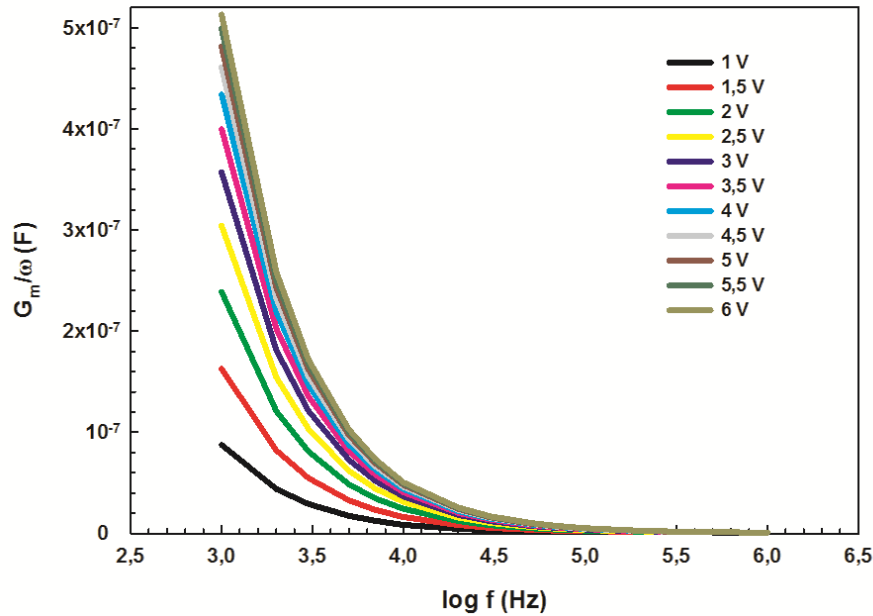
Şekil 7.3. MIS yapının uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak (a) 1-30 kHz (b) 50-1000 kHz frekans aralığındaki R_s -V eğrileri

MIS yapının farklı doğru beslem gerilimleri için frekansa bağlı C_m -logf eğrileri Şekil 7.4, verilmiştir. Şekil 7.4'de görüldüğü gibi, ölçülen kapasitans değeri artan gerilimle azalmaktadır. Ayrıca, tüm gerilimler için kapasitans frekansla değişmektedir. Düşük frekansta, ölçülen kapasitans tükenim kapasitansından yüksek frekanslarda ise, sadece uzay yük kapasitansından meydana gelmektedir. Bu davranış, arayüzey durumların sürekli bir dağılımına atfedilmektedir [40,71-73].



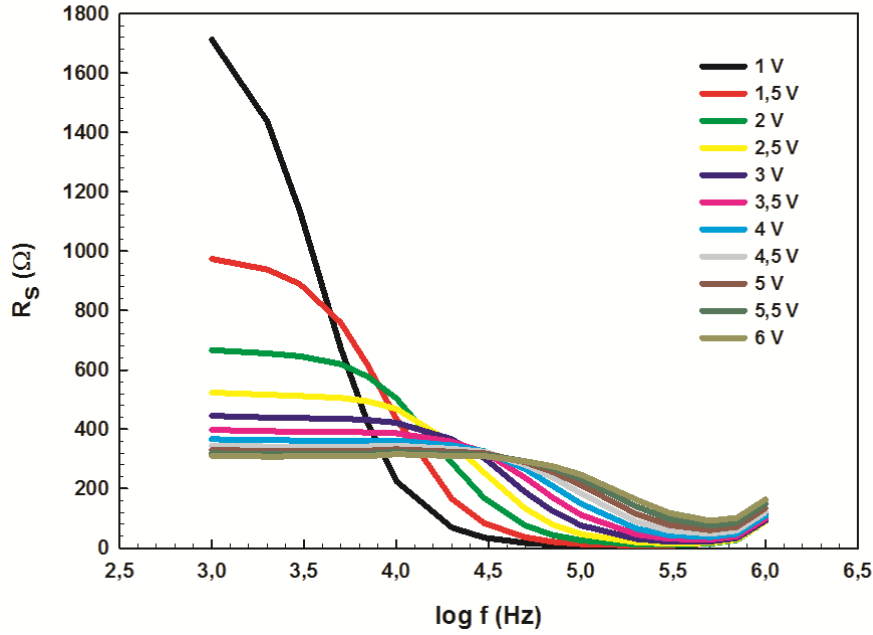
Şekil 7.4. MIS yapının farklı doğru beslem gerilimleri için C_m -logf eğrileri

Şekil 7.5 farklı doğru beslem gerilimleri için frekansa bağlı G_m/ω -logf eğrilerini göstermektedir. Ölçülen iletkenlik değeri, artan frekansla azalırken, artan gerilimle artmaktadır. Ayrıca, yaklaşık 100 kHz'den sonra iletkenlik değerlerinin uygulanan gerilimden bağımsız olduğu ve sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 7.5. MIS yapının farklı doğru beslem gerilimleri için G_m/ω -logf eğrileri

MIS yapının farklı doğru beslem gerilimleri için R_s -logf eğrileri Şekil 7.6'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, R_s 'nin değeri 50 kHz'e kadar artan gerilimle azalırken daha sonra artan gerilimle artmaktadır. Ayrıca, R_s değeri artan frekansla azalmaktadır. Hem R_s hem de N_{ss} , MIS yapının elektriksel karakteristiklerinin ideal durumdan sapmasına neden olan en önemli parametrelerden biridir.



Şekil 7.6. MIS yapının farklı doğru beslem gerilimleri için R_s -logf eğrileri

Arayüzey durumları, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak enerji aralığında izinli enerji seviyeleridir. Bant bükülmesi yani yüzey potansiyelinin değişmesi sonucunda bu arayüzey durumları Fermi seviyesine göre aşağı yukarı hareket ederek iletkenlik ve değerlik bandı ile ani yük alışverişi yaparlar. Bunun sonucunda, arayüzey tuzaklarındaki yükün değişmesi C-V eğrisinin değişmesine neden olur [2,3]. Bu çalışmada, MIS yapının arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) belirlemek için iletkenlik metodu kullanıldı.

İlk olarak Nicollian ve Goetzberger tarafından geliştirilen iletkenlik metodu, zayıf tersinim ve tükenim bölgelerinde arayüzey durum yoğunluğunu, çoğunluk taşıyıcılarının zaman sabitini ve yüzey potansiyelindeki dalgalanmaları belirlemek için kullanılan en hassas yöntemlerden biridir [2,31]. İletkenlik metoduna göre, yapının tükenim bölgesinde eşdeğer paralel iletkenlik değerleri frekans ve ön gerilimin fonksiyonu olarak elde edilir ve paralel iletkenlik,

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qN_{ss}}{2\omega\tau} \ln(1 + \omega^2\tau_{it}^2) \quad (7.3)$$

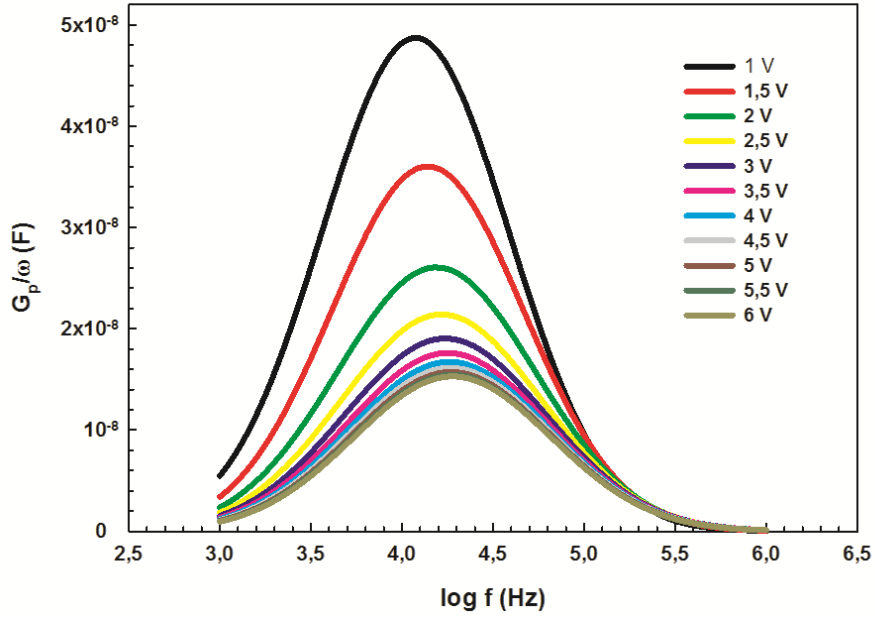
eşitliği ile verilir [31-34]. Burada, burada N_{ss} arayüzey tuzak yoğunluğu (yani arayüzey durumların yoğunluğu), ω açılal frekans ve τ_{it} arayüzey durum zaman sabitidir. Uygulamada, farklı arayüzey tuzaklar farklı zaman sabitine yani kayıp pik frekansına sahiptir. Eşdeğer paralel kondüktans (G_p) [2,31],

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega G_m C_{ox}^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{ox} - C_m)^2} \quad (7.4)$$

eşitliği ile verilir. Eş. 7.4 kullanılarak G_p/ω değerleri elde edilmiştir. Farklı doğru beslem gerilimlerinde frekansın fonksiyonu olarak çizilen G_p/ω -logf eğrileri Şekil 7.7'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, G_p/ω eğrileri her gerilim değerinde bir pik vermektedir. Piklerin pozisyonu artan gerilimle yüksek frekanslara doğru kaymaktadır. Bu durum arayüzey tuzak modeli ile açıklanabilir. Uygulanan gerilimin a.c. sinyali bu zaman sabitine karşılık geldiğinde, arayüzey tuzak seviyesiyle ilişkili kayıp pik ortaya çıkacaktır [72, 74-76]. Fermi seviyesinin yakınındaki arayüzey tuzaklar uygulanan a.c. sinyaliyle rezonans durumundayken maksimum kayıp pik oluşmaktadır. Bu pik $[\partial(G_p/\omega)]/\partial(\omega\tau)=0$ 'da maksimum olmakta ve bu maksimum durum $\omega\tau=1.98$ vermektedir. Burada ω , pikin maksimumuna karşılık gelen frekanstır. Arayüzey durum zaman sabiti ise $\tau=1.98/\omega$ 'dan hesaplanmıştır. Arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) değerleri, pikin maksimumuna karşılık gelen paralel iletkenlik değeri kullanılarak aşağıdaki denklemden hesaplanmıştır.

$$N_{ss} = \frac{(G_p / \omega)_{\max}}{0.402qA} \quad (7.5)$$

MIS yapının hesaplanan arayüzey durum yoğunluğu ve arayüzey durum zaman sabiti değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir. Çizelge 7.1'de görüldüğü gibi, hem N_{ss} hem de τ değerleri artan doğru beslem gerilimi ile azalmaktadır. N_{ss} 'nin değerinin $2,49 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ - $7,57 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ aralığında, τ 'nun değeri ise $2,67 \times 10^{-5} \text{ s}$ - $1,67 \times 10^{-5} \text{ s}$ aralığında değişmektedir.



Şekil 7.7. MIS yapının farklı doğru beslem gerilimleri için G_p/ω - $\log f$ eğrileri.

Çizelge 7.1. Hesaplanan arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) ve arayüzey durum zaman sabiti (τ) değerleri

V (V)	N_{ss} ($eV^{-1}.cm^{-2}$)	τ (s)
1,0	$2,49 \times 10^{13}$	$2,67 \times 10^{-5}$
1,5	$1,89 \times 10^{13}$	$2,27 \times 10^{-5}$
2,0	$1,44 \times 10^{13}$	$2,06 \times 10^{-5}$
2,5	$1,18 \times 10^{13}$	$1,93 \times 10^{-5}$
3,0	$1,04 \times 10^{13}$	$1,84 \times 10^{-5}$
3,5	$9,57 \times 10^{12}$	$1,79 \times 10^{-5}$
4,0	$9,06 \times 10^{12}$	$1,75 \times 10^{-5}$
4,5	$8,70 \times 10^{12}$	$1,72 \times 10^{-5}$
5,0	$8,47 \times 10^{12}$	$1,71 \times 10^{-5}$
5,5	$7,64 \times 10^{12}$	$1,68 \times 10^{-5}$
6,0	$7,57 \times 10^{12}$	$1,67 \times 10^{-5}$

7.1.2. Dielektrik Karakteristikler

Silisyum nitrat (Si_3N_4) arayüzey yalıtkan tabakalı Au/ Si_3N_4 /n-Si (MIS) yapının dielektrik sabiti ϵ' , dielektrik kayıp ϵ'' , kayıp açısı $\tan\delta$, a.c. elektriksel iletkenliği σ_{ac} ve elektrik modülüs M gibi dielektrik karakteristikleri oda sıcaklığında ve geniş bir gerilim aralığında frekansa bağlı olarak ölçülen kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinden hesaplandı. Kompleks dielektrik geçirgenlik sabitinin ($\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$) gerçel ve sanal bileşenleri ϵ' ve ϵ'' olup sırasıyla dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp olarak tanımlanır. ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ 'ın değerleri aşağıda verilen formüllerden hesaplanmıştır [10-13].

$$\epsilon' = \frac{C_m}{C_0} \quad (7.6)$$

$$\epsilon'' = \frac{G_m}{C_0\omega} = \frac{d_{ox}}{A\epsilon_0} \frac{G_m}{\omega} \quad (7.7)$$

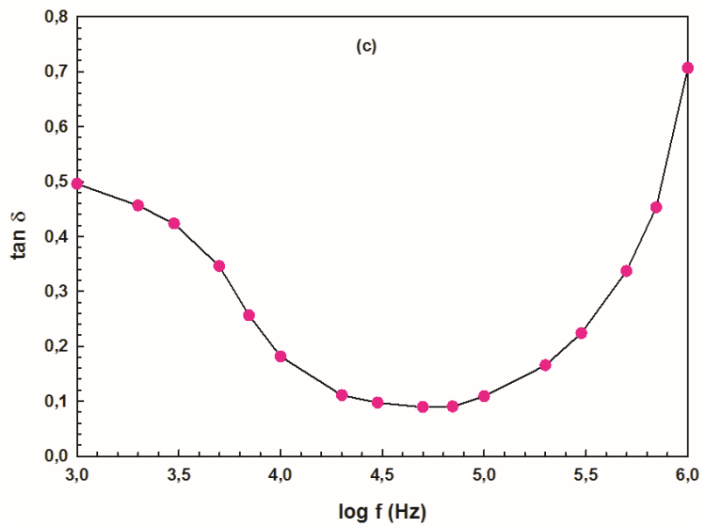
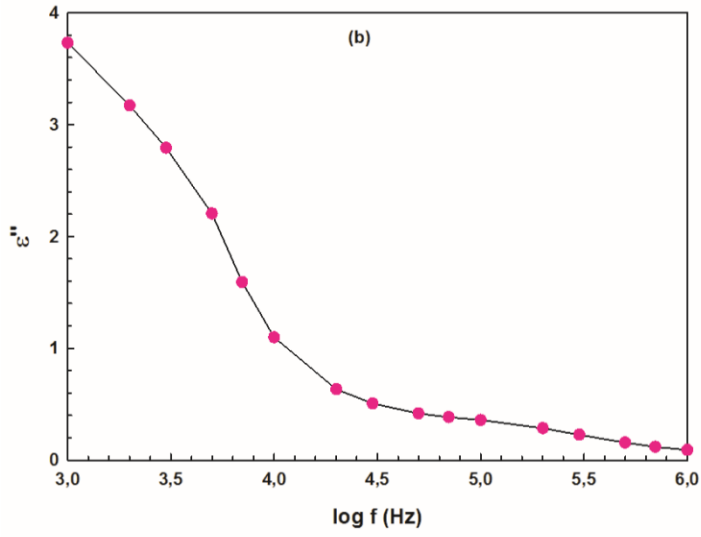
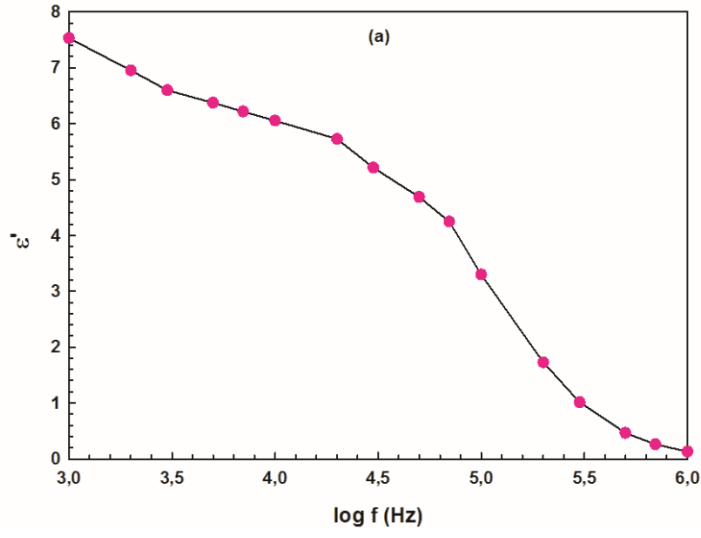
$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (7.8)$$

Burada, $C_0 = \epsilon_0(A/d_{ox})$ metal ile yarıiletken arası boş durum için kapasitörün kapasitansı, A MIS yapının doğrultucu kontak alanı, d_{ox} arayüzey yalıtkan tabaka kalınlığı ve ϵ_0 boşluğun dielektrik geçirgenlik sabitidir ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm). Ayrıca, C_{ox} yalıtkan oksit kapasitansı,

$$C_{ox} = C_{ma} \left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_{ox}} \quad (7.9)$$

eşitliğinden 3×10^{-8} F olarak elde edilmiştir. $\epsilon_i = \epsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 7,5\epsilon_0$ [3] ve $A = 3,14 \cdot 10^{-2}$ cm² değerleri kullanılarak d_{ox} yaklaşık 70 Å olarak hesaplanmıştır.

MIS yapının hesaplanan dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') ve kayıp açısı ($\tan\delta$) parametrelerinin oda sıcaklığında 0,5 V için frekansla değişim eğrileri sırasıyla Şekil 7.8.a, b ve c'de verilmiştir. Şekil 7.8.a ve b'de görüldüğü gibi, ϵ' ve ϵ'' değerleri azalan frekansla artmaktadır. Düşük frekanslarda ϵ' ve ϵ'' 'nin yüksek değeri, numunede oluşan uzay yüklerinin elektrotlardaki görüntü yüklerini etkilemesi sonucu oluşan arayüzey yük kutuplanma mekanizmasından kaynaklanmaktadır [77-85]. Arayüzey veya uzay yük kutuplanmasında, uygulanan alternatif elektrik alan etkisi ile numune boyunca hareket eden uzay yükleri kusurlar tarafından tuzaklanır ve arayüzeyde yük birikimi oluşur. Bu durumda, dipol momentler alternatif alan değişimlerini takip edebilir. Dış elektrik alan yokken, farklı konumlarda veya durumlarda bulunan taşıyıcı yükler farklı dipol yönelimlerine sahiptirler. Bir elektron alternatif alanın etkisi ile iki merkez arasında atlama yapabilir ve bu durum elektrik dipolünün yeniden yönelimine neden olur. Bu durum, dielektrik sabitinin değişmesine sebep olur. Bu nedenle azalan frekans ile dielektrik sabitinin artması dipollerin etkisine atfedilebilir. Yüksek frekanslarda ise, elektrik dipolü alternatif alanı takip edemez ve hem ϵ' hem de ϵ'' sabit bir değere yaklaşır. Yani, yüksek frekanslarda yönelimli (dipolar) kutuplanma mekanizması daha baskın olduğundan ϵ' ve ϵ'' frekanstan bağımsız hale gelmektedir [77-82]. Ayrıca, yüksek frekanslarda arayüzey durumları uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edemez ve arayüzey durumlarından dolayı C, G, ϵ' ve ϵ'' 'ye ilave bir katkı gelmemektedir. Şekil 7.8.c'de görüldüğü gibi, dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$) yaklaşık 50 kHz'e kadar artan frekans ile azalmakta ve daha sonra artmaktadır. Bu durum, düşük frekans bölgesinde arayüzey yük kutuplanmanın daha baskın olduğunu göstermektedir [11,45,79-82].



Şekil 7.8. MIS yapının frekansa bağlı a) ϵ'' -logf b) ϵ'' -logf ve c) $\tan\delta$ -logf eğrileri

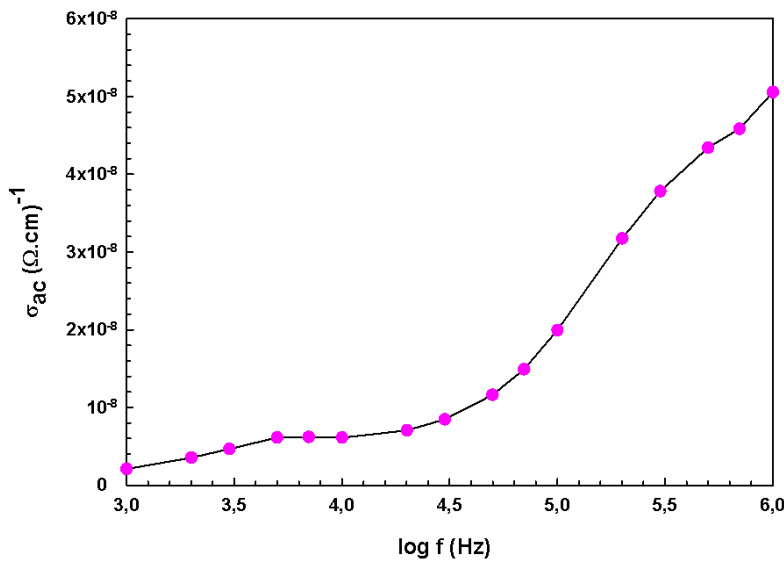
Bir dielektrik malzemeye alternatif gerilim uygulanırsa, kompleks elektriksel iletkenlik,

$$\sigma^* = \sigma' + j\sigma'' = \omega\varepsilon_0\varepsilon'' + j\omega\varepsilon_0\varepsilon' \quad (7.10)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitliğe göre, dielektrik malzemenin a.c. elektriksel iletkenliği (σ_{ac})

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan \delta(d_{0,x} / A) = \varepsilon'' \omega \varepsilon_0 \quad (7.11)$$

denklemleri ile verilir. Bu eşitlik kullanılarak hesaplanan a.c. iletkenliğin frekansla değişim eğrisi Şekil 7.9'da verilmiştir. Şekil 7.9'da görüldüğü gibi, a.c. iletkenlik yaklaşık 10 kHz'e artan frekansla yavaş artmakta ve bu değerden sonra artan frekansla hızlı bir değişim göstererek artmaktadır. İletkenliğin frekans bağımlılığı hareketli yük taşıyıcılarından kaynaklanan durulma olayına atfedilmektedir. Elektriksel iletkenliğin frekans bağımlılığından elektriksel iletim mekanizmaları belirlenebilir. Artan frekans ile a.c. iletkenliğin bu artışı boşlukların potansiyel kuyusu içinde kısa mesafeli sıçrama ve kuyular arası uzun mesafeli sıçrama mekanizmasından kaynaklanmaktadır [86-92]. Düşük frekanslarda kuyular arası sıçrama toplam iletkenliğin d.c. kısmına katkıda bulunurken, yüksek frekanslarda kuyu içi sıçrama toplam iletkenliğin a.c. kısmına katkıda bulunmaktadır.



Şekil 7.9. Oda sıcaklığında a.c. iletkenliğin (σ_{ac}) frekansla değişim eğrisi

Düşük frekanslarda, dielektrik sabitinin çok yüksek ve kutuplanma etkilerinin ihmal edilebilir olması durumunda dielektrik durulmanın analizinde elektrik modülüs tanımı kullanılmaktadır. Ayrıca, elektrik modülüs, elektrik yer değiştirme sabit kaldığı zaman malzeme içinde elektrik alanının durulmasına karşılık gelmektedir. Kompleks elektrik modülüs (M^*), kompleks dielektrik geçirgenliğin tersi olup aşağıdaki gibi ifade edilir [93-99] ,

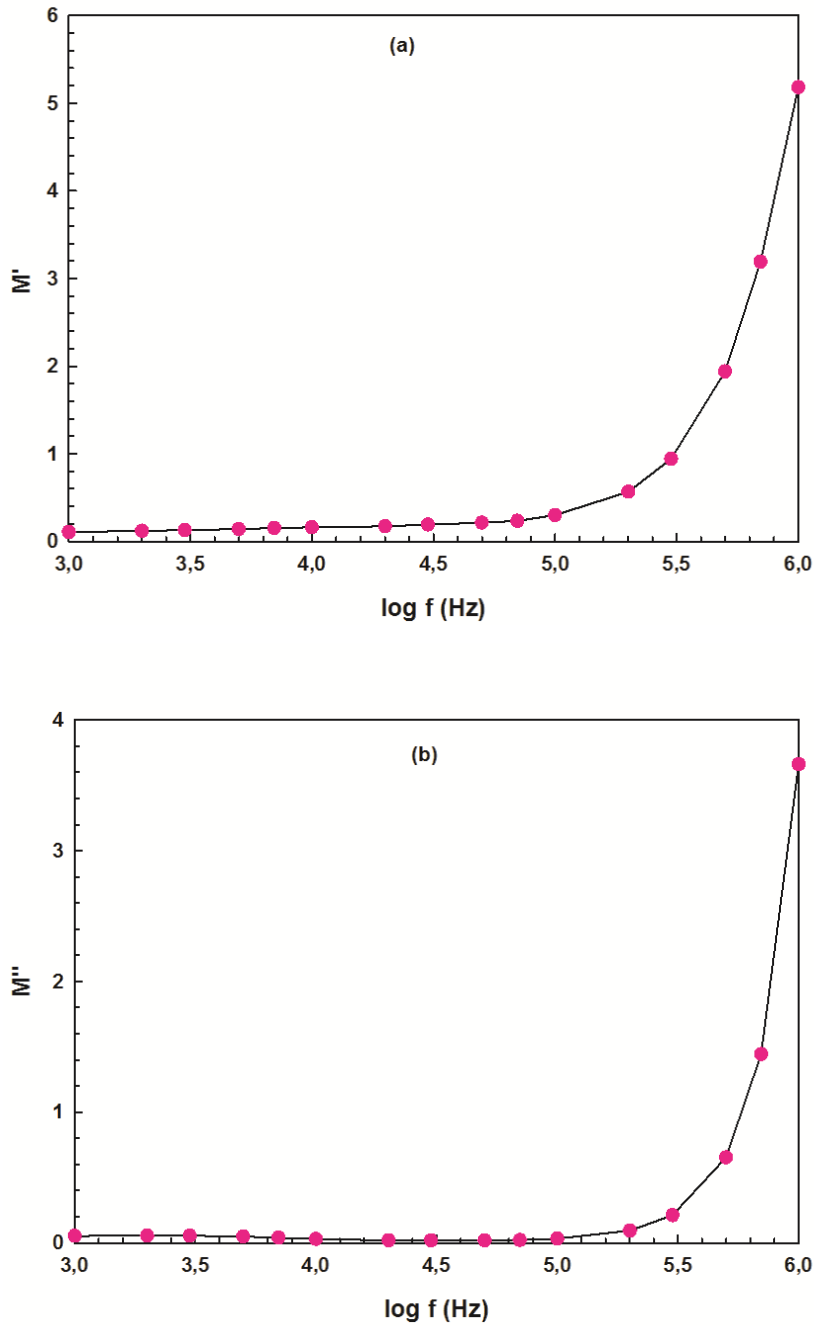
$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = M' + iM'' \quad (7.12)$$

Burada M' ve M'' sırasıyla kompleks elektrik modülüsün gerçel ve sanal kısımlarıdır. Gerçel ve sanal kısımlar;

$$M' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (7.13)$$

$$M'' = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (7.14)$$

şeklinde ifade edilir. Hesaplanan M' ve M'' değerlerinin frekansla değişim eğrisi sırasıyla Şekil 7.10.a ve b'de gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, hem M' hem de M'' değeri yaklaşık 100 kHz'e kadar artan frekansla sabit kalmakta ve bu frekans değerinden sonra artmaktadır. Bu artış, indüklenmiş elektrik alan etkisi altında yük taşıyıcıların hareketliliğindeki artma nedeniyle olabilir.



Şekil 7.10. Kompleks modülüsün gerçel ve sanal kısımlarının frekansla değişim eğrisi

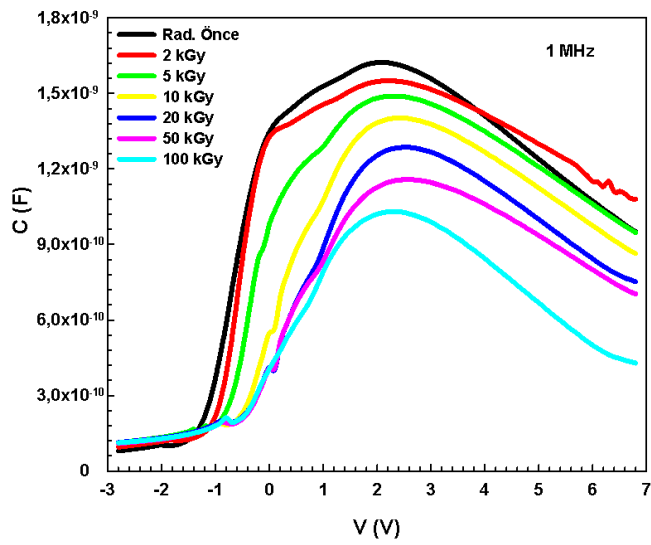
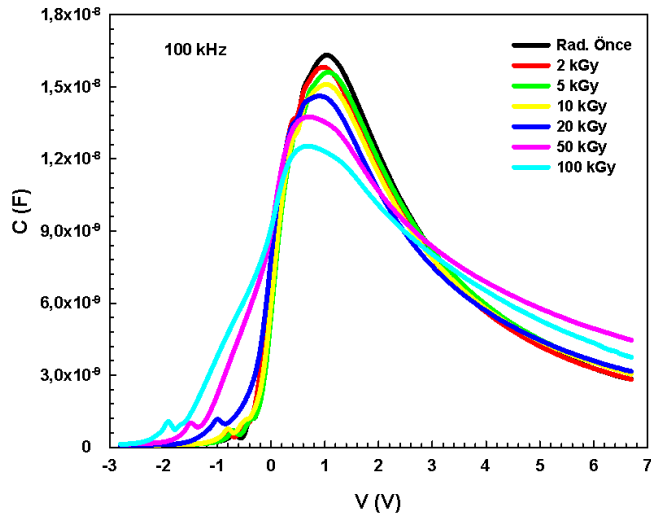
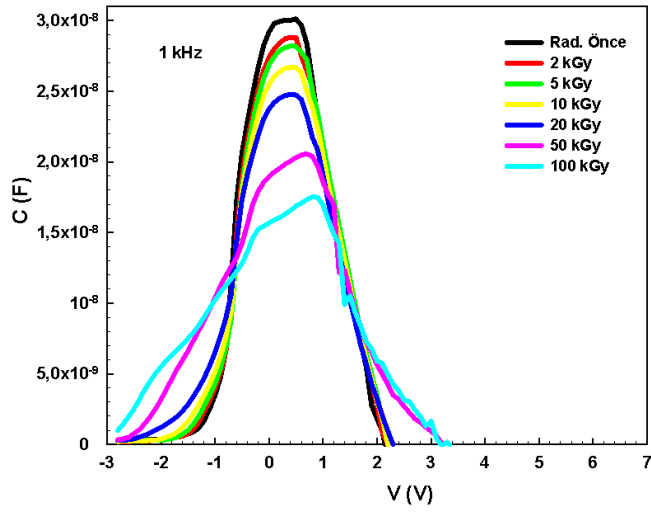
a) M' -logf b) M'' -logf

7.2. Radyasyondan Sonra MIS Yapının Frekansa Bağlı Elektriksel ve Dielektrik Karakteristikleri

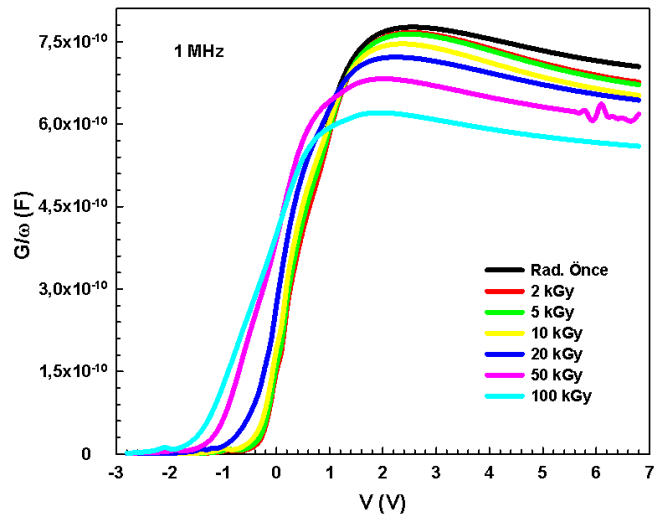
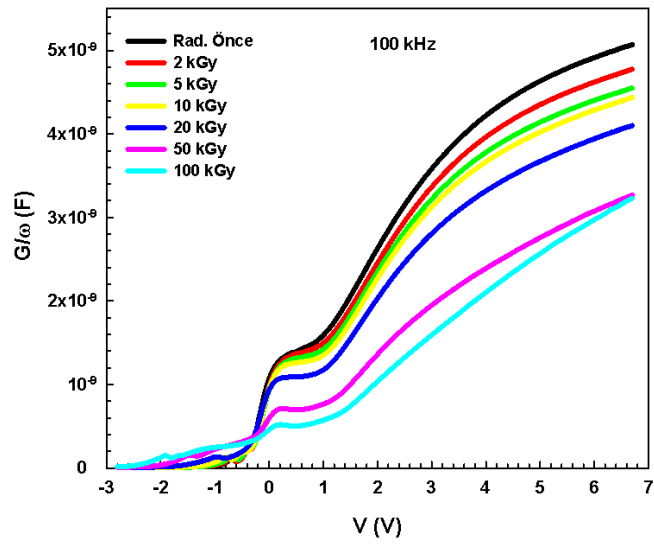
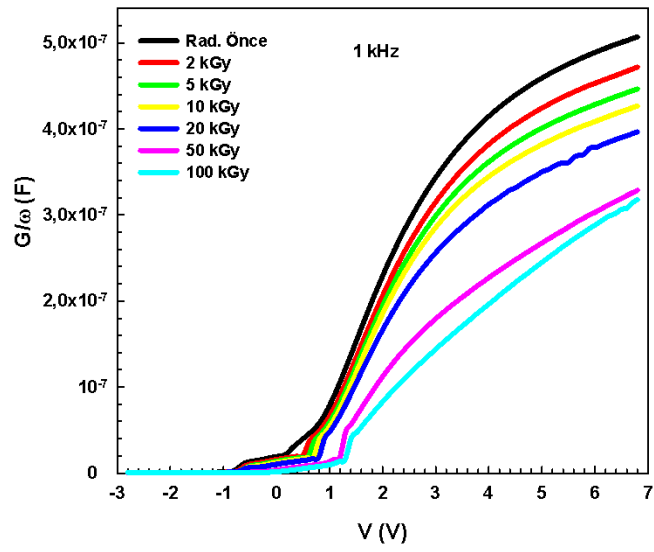
Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) yapının, radyasyondan önce elektriksel ve dielektrik özellikleri oda sıcaklığında ve geniş bir frekans aralığında incelendikten sonra, MIS yapı Türkiye Atom Enerji Kurumuna (TAEK) bağlı Sarayköy'deki Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezinde (ANAEM) bulunan ışınlama doz hızı 0,69 kGy/h olan ⁶⁰Co gama-ışın kaynağında 2, 5, 10, 20, 50 ve 100 kGy olmak üzere altı farklı dozda ışınlanmıştır. Işınlanan yapının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri, her ışınlama dozunda beş farklı frekanslar için (1, 10, 100, 500 ve 1000 kHz) empedans analizmetre (HP 4192A LF) kullanılarak gerçekleştirildi.

7.2.1. Elektrik Karakteristikler

MIS yapının oda sıcaklığında radyasyondan önce ve sonra beş farklı frekansta elde edilen kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinden 1 kHz, 100 kHz ve 1 MHz için 0-100 kGy toplam ışınlama doz aralığında çizilen C-V ve G/ω-V eğrileri sırasıyla Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, kapasitans ve iletkenlik değerleri tükenim ve yığılım bölgelerinde artan gama radyasyon dozu ile azalmaktadır. Bu durum, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde radyasyonun meydana getirdiği arayüzey tuzak yüklerinin azalmasına atfedilmektedir [100-106]. Arayüzey tuzaklar iyonlaştırıcı radyasyondan kaynaklanan kusurlardır. Radyasyon etkisiyle oluşan kusurlar, yapı tarafından soğurulan radyasyon dozu ile doğrudan ilişkilidir. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapının iyonlaştırıcı radyasyona en duyarlı kısmı yalıtkan tabakadır. Işınlamadan sonra, MIS yapının yalıtkan tabaka içerisinde, yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyinde elektron-deşik çiftleri oluşur. Elektrik alan etkisiyle, elektron-deşik çiftleri yalıtkan içerisinde birbirinden ayrılabilir. Bu durumda, elektronlar girişe doğru hareket eder. Yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyine doğru hareket eden deşiklerin bir kısmı yalıtkan içerisinde tuzaklanabilir. Diğerleri ise, yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyinde arayüzey tuzakların oluşumuna neden olurlar [15,107-110]. Ayrıca, C-V eğrileri tükenim bölgesinde bir pik vermektedir. Bu durum, pikin meydana geldiği bölgede arayüzey durumlarının daha yoğun yerleşmiş olduğuna atfedilmektedir.

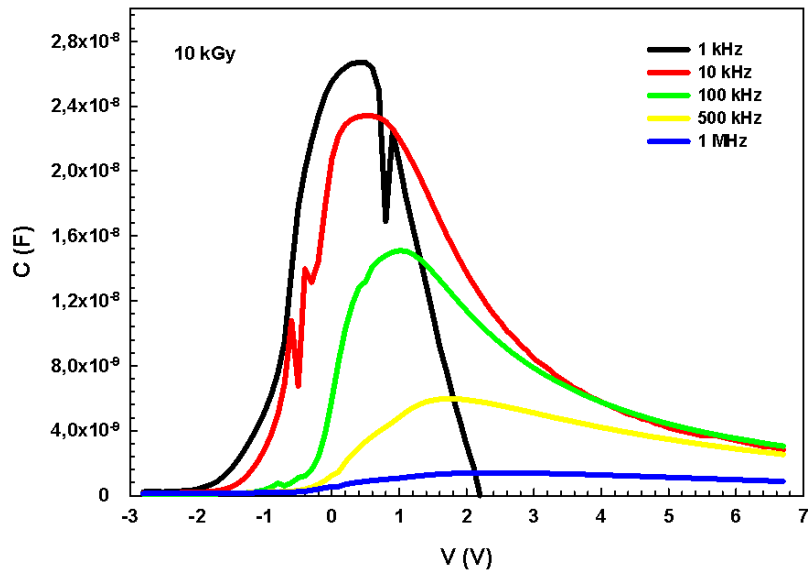
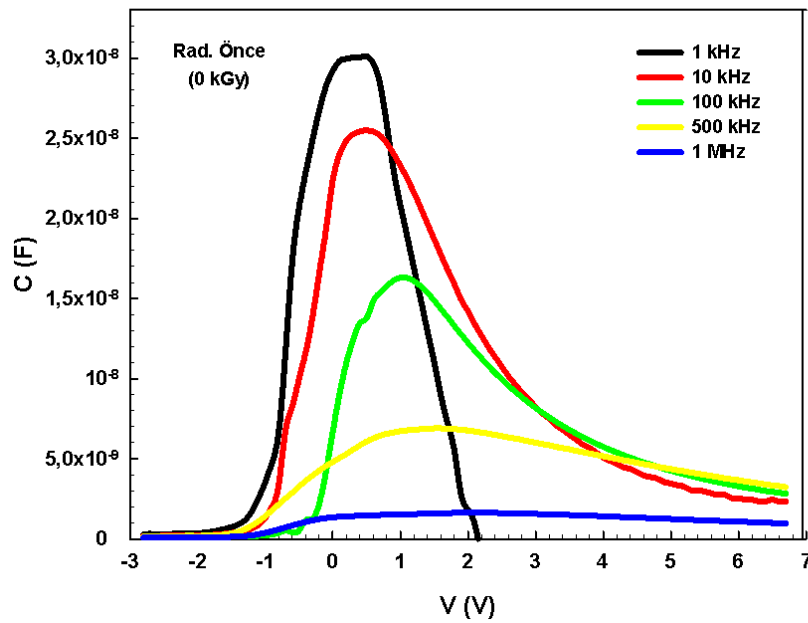


Şekil 7.11. MIS yapının 1 kHz, 100 kHz ve 1 MHz frekansları için C-V eğrileri

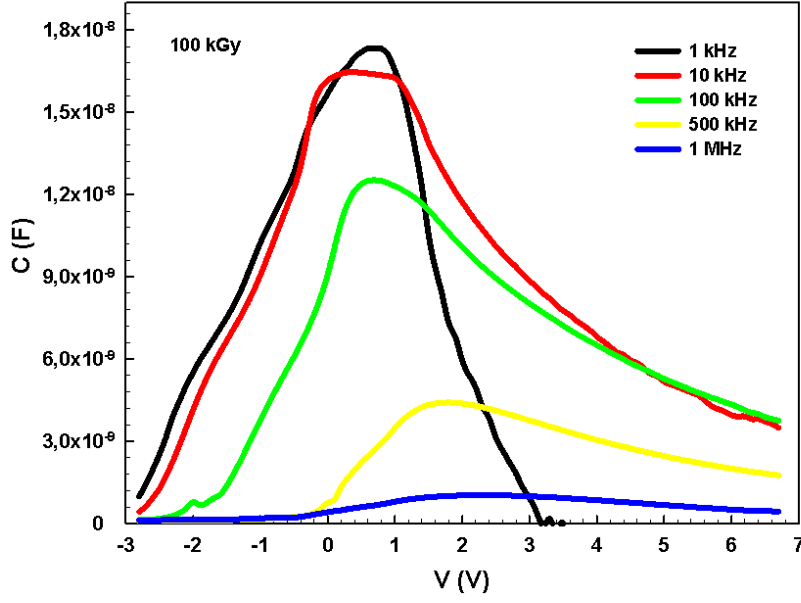


Şekil 7.12. MIS yapının 1 kHz, 100 kHz ve 1 MHz frekansları için G/ω -V eğrileri

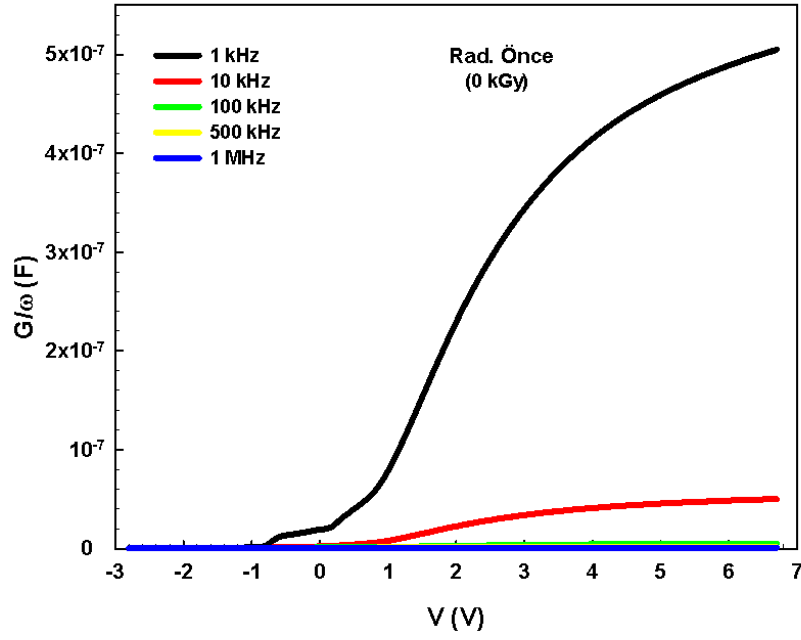
MIS yapının radyasyondan önce (0 kGy), 10 kGy ve 100 kGy radyasyon dozları için 1-1000 kHz frekans aralığında çizilen C-V ve G/ ω -V eğrileri sırasıyla Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, kapasitans ve iletkenlik değerleri artan frekansla azalmaktadır. Bu davranış, MIS yapının arayüzeyinde arayüzey durumlarının sürekli bir dağılımına atfedilebilir [2,3,111-115]. Ayrıca, C-V eğrileri tükenim bölgesinde bir pik vermektedir. Bu pikin pozisyonu artan frekansla ileri pozitif gerilimlere doğru kaymakta ve pikin şiddeti azalmaktadır. Yeterince yüksek frekanslarda arayüzey durumlarının a.c. sinyali takip edememesinden dolayı kapasitansa bir katkı gelmez.



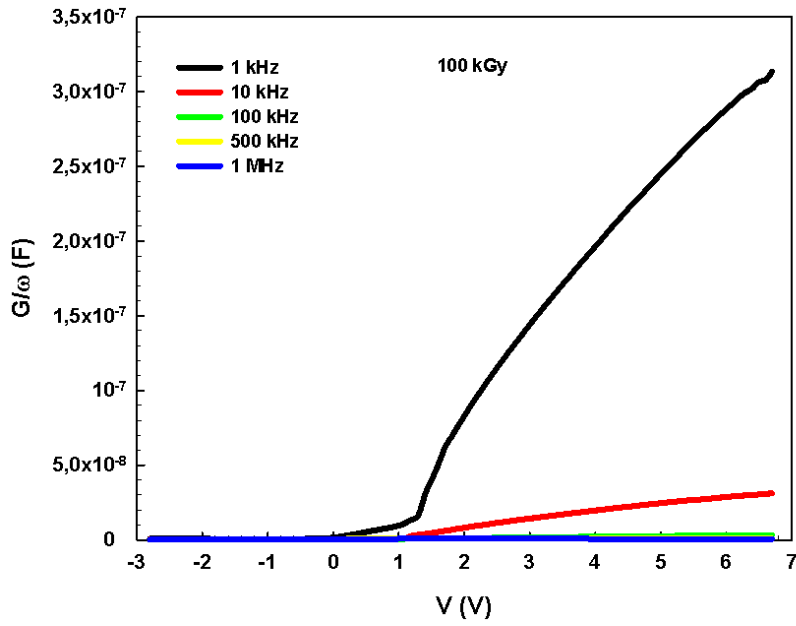
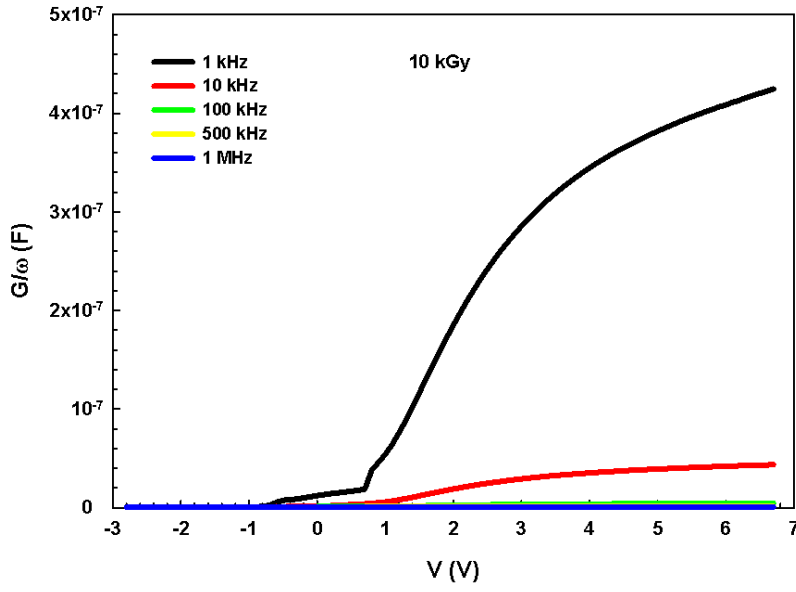
Şekil 7.13. MIS yapının 0, 10 ve 100 kGy dozları için C-V eğrileri



Şekil 7.13.(devam) MIS yapının 0, 10 ve 100 kGy dozları için C-V eğrileri



Şekil 7.14. MIS yapının 0, 10 ve 100 kGy dozları için G/ω -V eğrileri

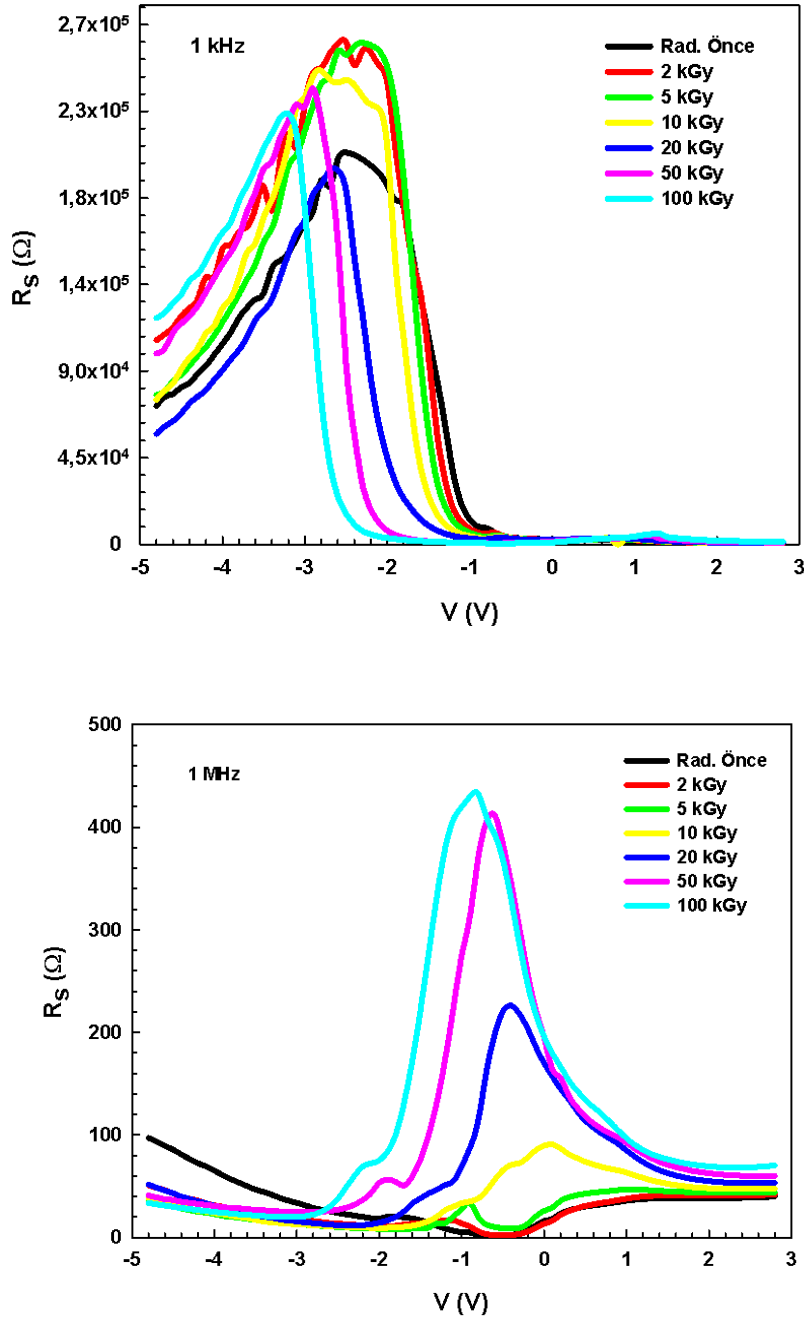


Şekil 7.14.(devam) MIS yapının 0, 10 ve 100 kGy dozları için G/ω -V eğrileri

Seri direnç (R_s) üzerine radyasyon etkisini açıklamak için, ışınlanan MIS yapının seri direnci radyasyondan sonra kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinden Eş. 7.2. kullanılarak hesaplandı.

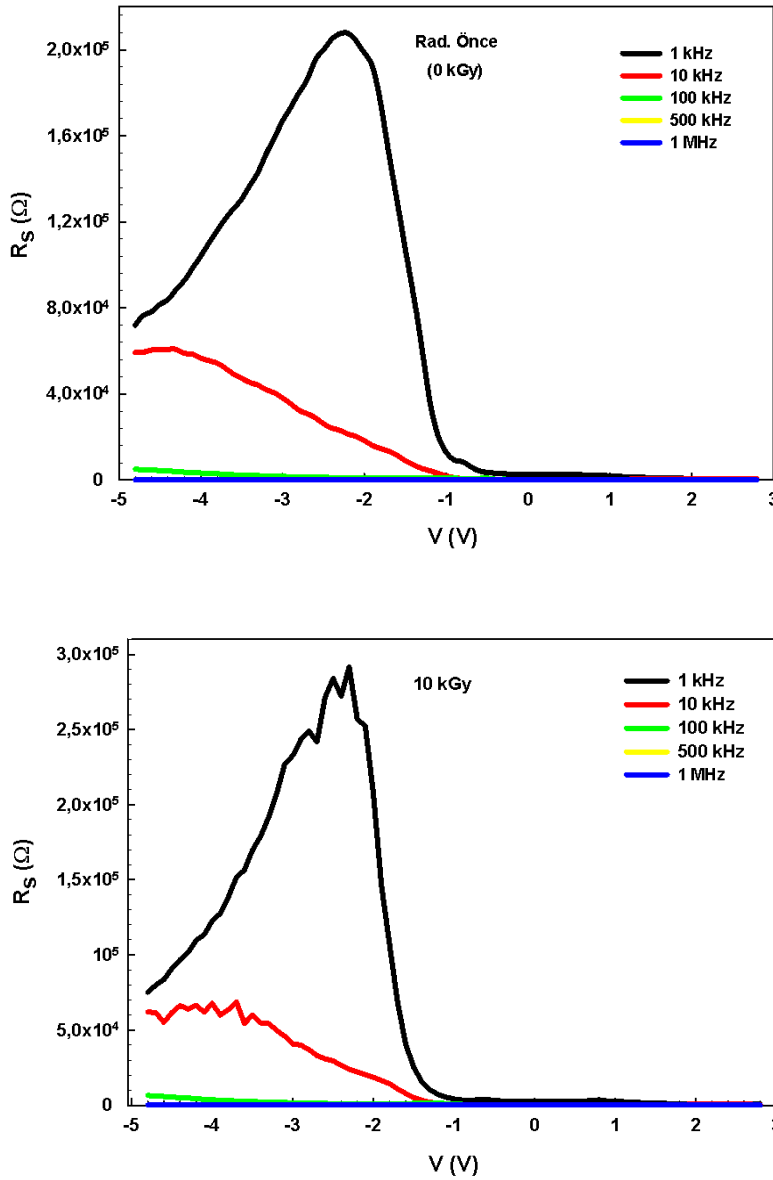
Şekil 7.15’de MIS yapının uygulanan gerilimin fonksiyonu 1 kHz ve 1 MHz frekansları için 0-100 kGy toplam doz aralığında çizilen R_s -V eğrileri gösterilmiştir. Şekil 7.15’de görüldüğü gibi, 1 kHz’de R_s değeri 5 kGy’ye kadar önce artan radyasyon dozuyla artarken

sonra azalmaktadır. 1 MHz'de ise R_s değeri artan radyasyon dozuyla artmaktadır. R_s 'nin bu davranışı, metal/yarıiletken arayüzeyinde lokalize olan tuzaklardan kaçmak için yeterli enerjiye sahip arayüzey tuzak yüklerine atfedilebilir [115-119]. Ayrıca, her radyasyon dozunda R_s -V eğrileri bir pik vermekte ve bu pikin pozisyonu artan radyasyonla ileri negatif gerilimlere doğru kaymaktadır.

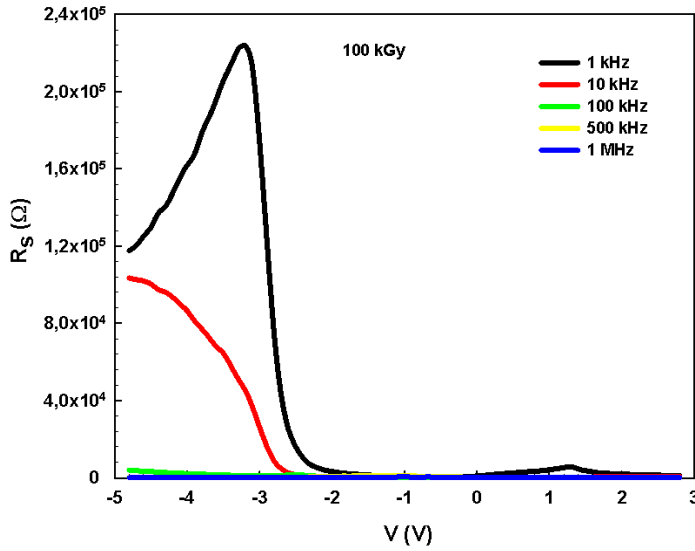


Şekil 7.15. MIS yapının 1 kHz ve 1 MHz frekansları için R_s -V eğrileri

Şekil 7.16'da MIS yapının radyasyondan önce (0 kGy), 10 kGy ve 100 kGy radyasyon dozları için 1-1000 kHz frekans aralığında çizilen R_s -V eğrileri gösterilmiştir. Şekil 7.16'da görüldüğü gibi, R_s değeri artan frekansla azalmaktadır. R_s 'nin bu frekans bağımlılığı arayüzey yükleri, sabit oksit yükleri, oksitte tuzaklanan yükler ve hareketli oksit yükler gibi frekansa bağımlı yüklerin bir sonucudur. Şekil 7.16'da görüldüğü gibi, her radyasyon dozunda R_s değeri artan frekansla azalmaktadır. R_s 'nin bu frekans bağımlılığı arayüzey yükleri, sabit oksit yükleri, oksitte tuzaklanan yükler ve hareketli oksit yükler gibi frekansa bağımlı yüklerin bir sonucudur. Ayrıca, R_s -V eğrileri 1 kHz frekans değerinde pik vermekte ve bu pik artan frekansla kaybolmaktadır.



Şekil 7.16. MIS yapının 0, 10 ve 100 kGy dozları için R_s -V eğrileri



Şekil 7.16.(devam) MIS yapının 0, 10 ve 100 kGy dozları için R_s -V eğrileri

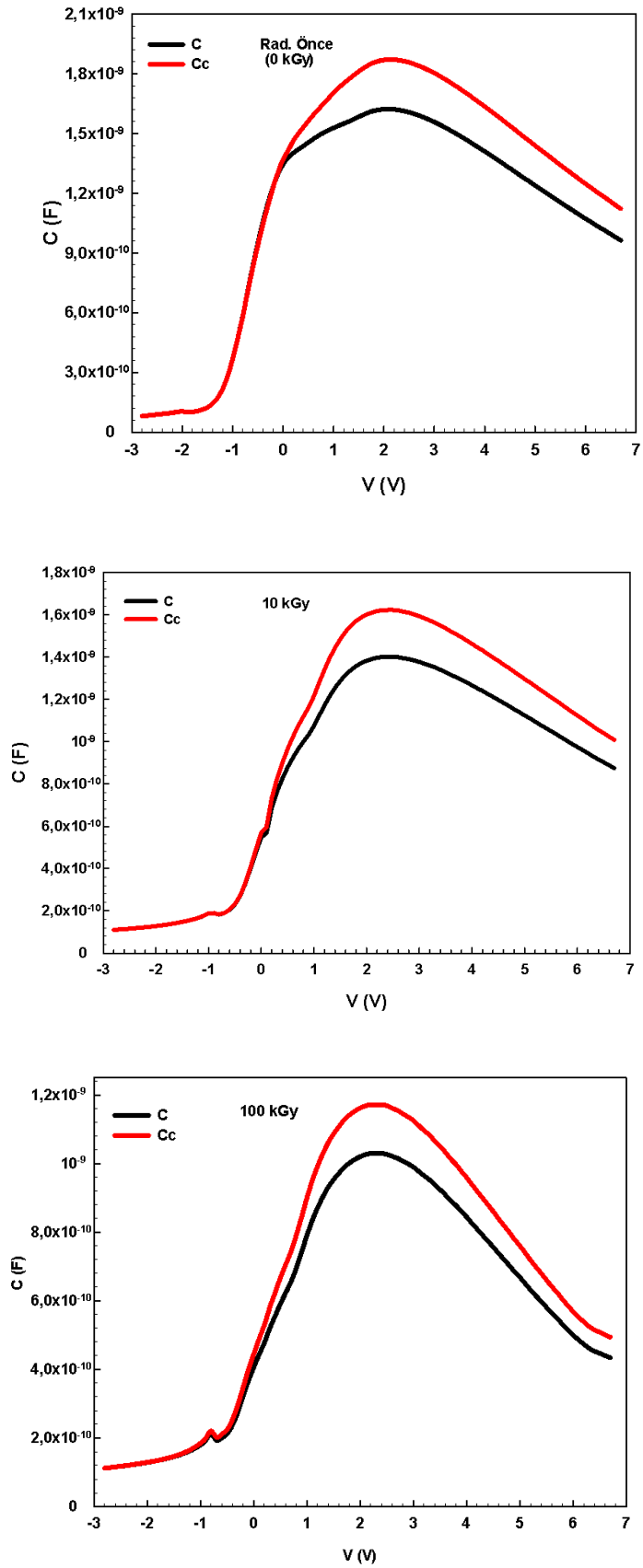
Eğer yarıiletken aygıtta seri direnç varsa ve büyükse, ölçülen iletkenlik ve kapasitans gerçek değerler değildir. Seri direnç etkisini ihmal etmek için aşağıdaki eşitlikler kullanılarak MIS yapının düzeltilmiş kapasitans ve iletkenlik değerleri [2,31,62,120-124].

$$C_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (7.15)$$

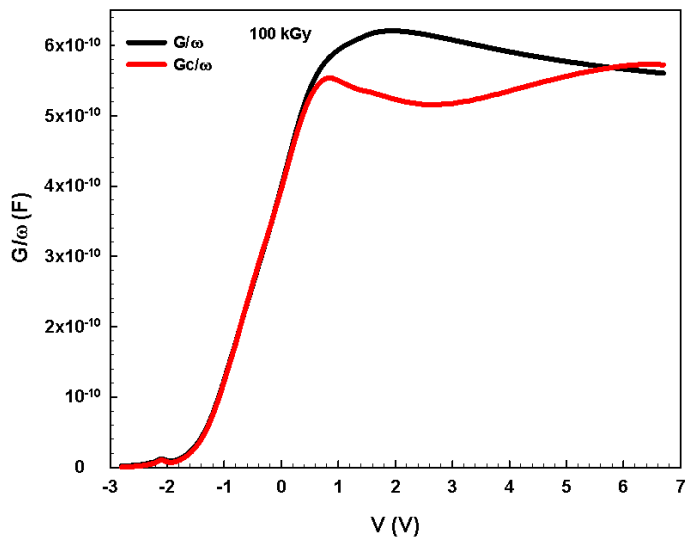
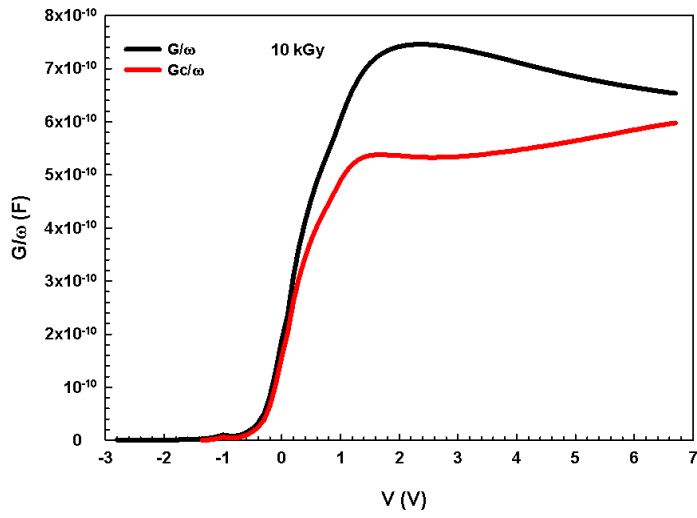
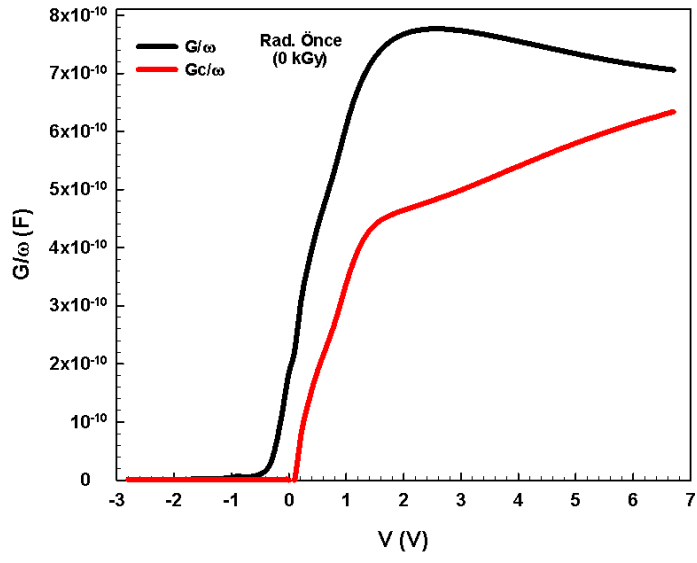
$$G_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (7.16)$$

Burada $a = G_m - [G_m^2 + (\omega C_m)^2] R_s$ 'dir.

Şekil 7.17'de MIS yapının 1 MHz'de radyasyondan önce (0 kGy), 10 kGy ve 100 kGy radyasyon dozları için çizilen kapasitans-voltaj (C-V) ve düzeltilmiş kapasitans-voltaj (C_c -V) eğrileri gösterilmiştir. Şekil 7.17'de görüldüğü gibi, her doz için düzeltilmiş kapasitans değeri tükenim ve yığılım bölgelerinde artmaktadır. Şekil 7.18'de ise ölçülen iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ve düzeltilmiş iletkenlik-voltaj (G_c/ω -V) eğrileri gösterilmiştir. Şekil 7.18'de görüldüğü gibi, düzeltilmiş iletkenlik değeri tükenim ve yığılım bölgelerinde azalmaktadır. Elde edilen sonuçlar, seri direncin MIS yapının C-V ve G/ω -V karakteristiklerinin değişimine neden olan önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

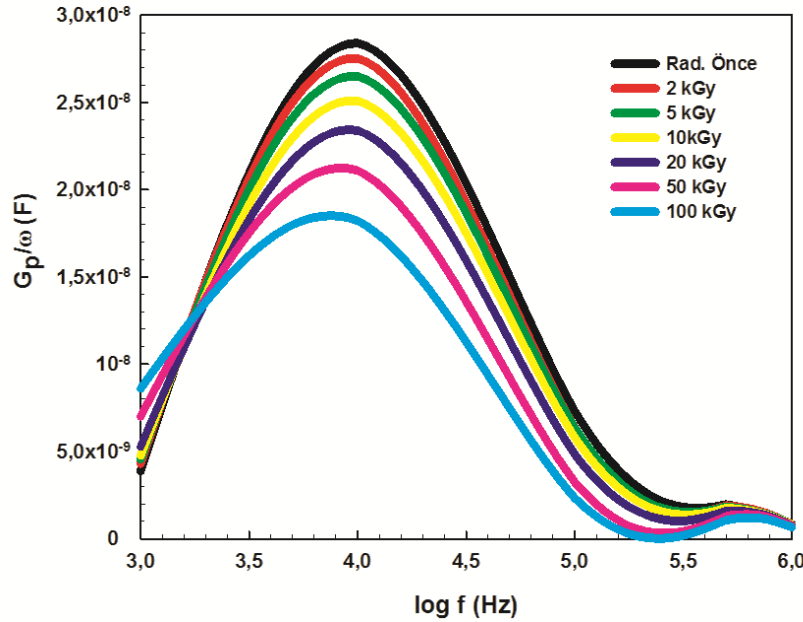


Şekil 7.17. MIS yapının 1 MHz’de 0, 10 ve 100 kGy dozları için C-V ve C_c -V eğrileri



Şekil 7.18. MIS yapının 1 MHz’de 0, 10 ve 100 kGy dozları için G/ω -V ve G_c/ω -V eğrileri

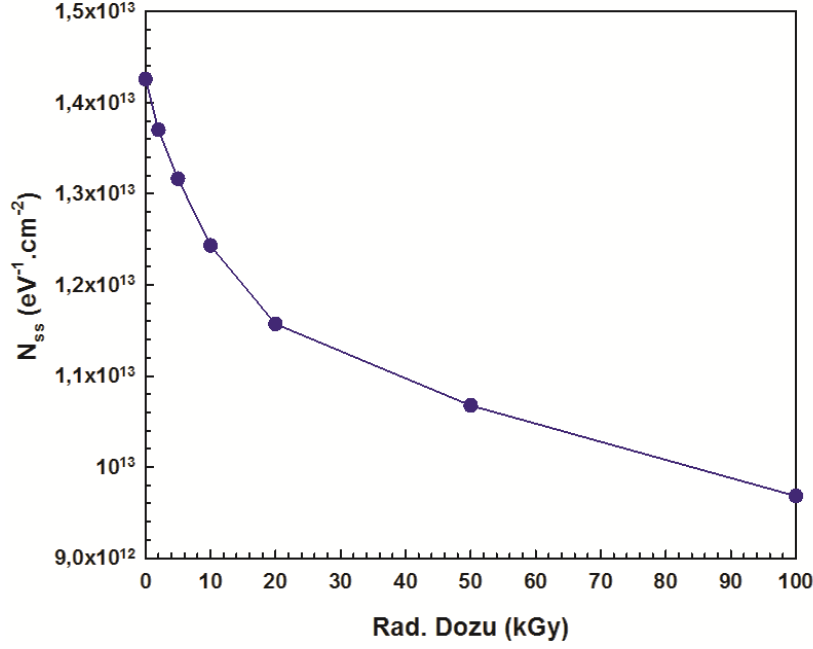
MIS yapının radyasyondan sonra arayüzey durum yoğunluğunu (N_{ss}) belirlemek için Nicollian ve Goetzberger tarafından önerilen iletkenlik metodu kullanıldı [31]. Paralel iletkenlik, frekansın fonksiyonu olarak Eş.7.4 kullanılarak hesaplandı. MIS yapının radyasyondan önce ve sonra hesaplanan paralel iletkenliğin frekansın fonksiyonu olarak çizilen G_p/ω -logf eğrileri Şekil 7.19’da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, G_p/ω eğrileri her bir radyasyon dozu için bir pik vermektedir. Bu pik, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey yüklerinin varlığından kaynaklanmaktadır [59,74-76,100]. G_p/ω eğrileri bir pik vermekte ve pikin pozisyonu artan radyasyon dozuyula düşük frekanslara doğru kaymaktadır.



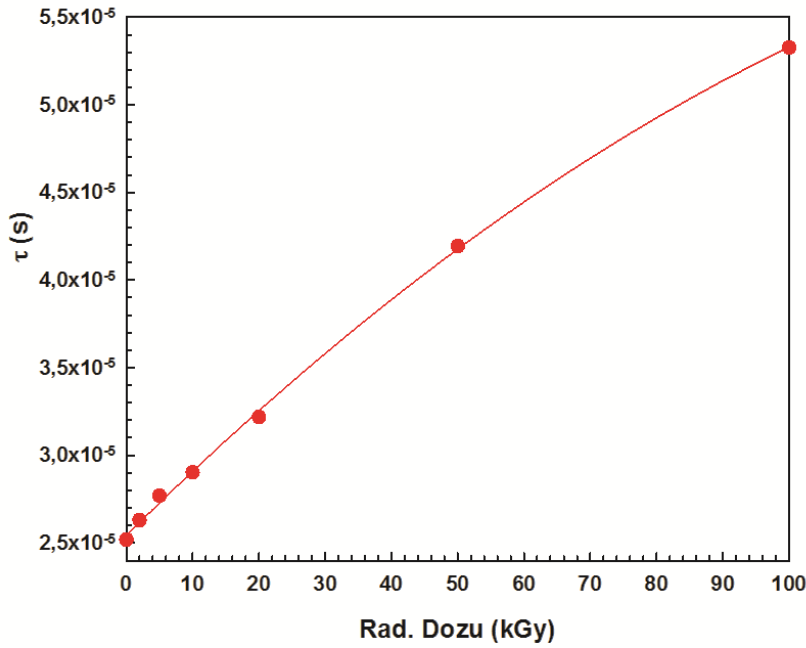
Şekil 7.19. MIS yapının radyasyondan önce ve sonra G_p/ω -logf eğrileri

Arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) değerleri, pikin maksimumuna karşılık gelen paralel iletkenlik değeri kullanılarak Eş.7.5’den ve arayüzey durum zaman sabiti ise $\tau = 1.98/\omega_p$ ’dan hesaplanmıştır. Hesaplanan N_{ss} ve τ değerlerinin radyasyona bağlı değişim eğrileri sırasıyla Şekil 7.20 ve Şekil 7.21’de verilmiştir. Şekil 7.20’de görüldüğü gibi, N_{ss} değeri artan radyasyon dozuyula azalmaktadır. Radyasyondan önce ve sonra, N_{ss} değerleri $1,43 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ile $9,68 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında değişmektedir. Şekil 7.21’de görüldüğü gibi, τ değeri artan radyasyon dozuyula artmaktadır. Radyasyondan önce ve sonra, τ değerleri $2,52 \times 10^{-5} \text{ s}$ ile $5,33 \times 10^{-5} \text{ s}$ arasında değişmektedir. Arayüzey durum yoğunundaki bu azalma, gama radyasyonundan dolayı yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yüklerin yeniden

düzenlenip yapılanmasına ve rekombinasyon merkezlerinin sayısındaki azalmaya atfedilmektedir [100,116-119,125-127].



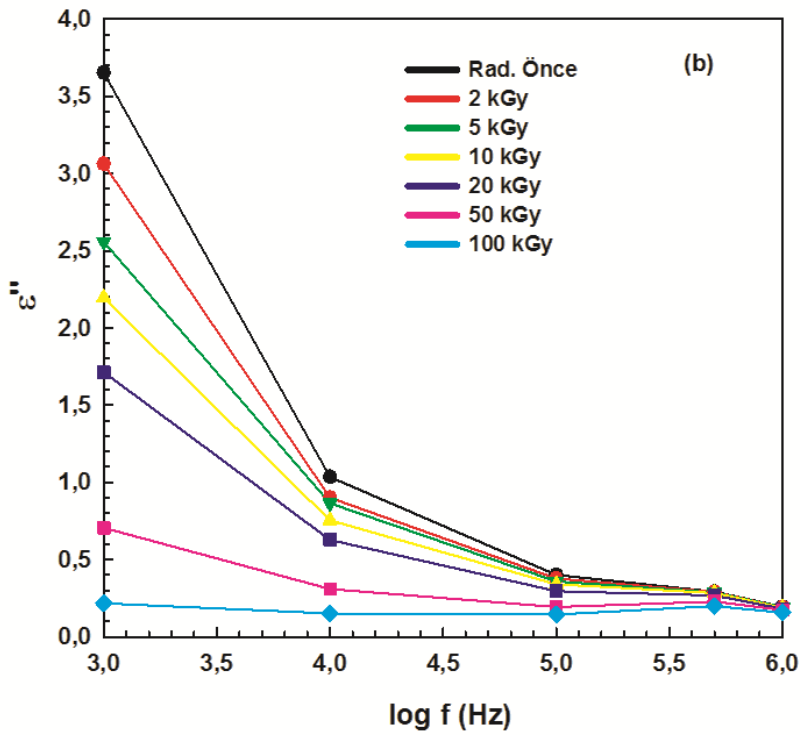
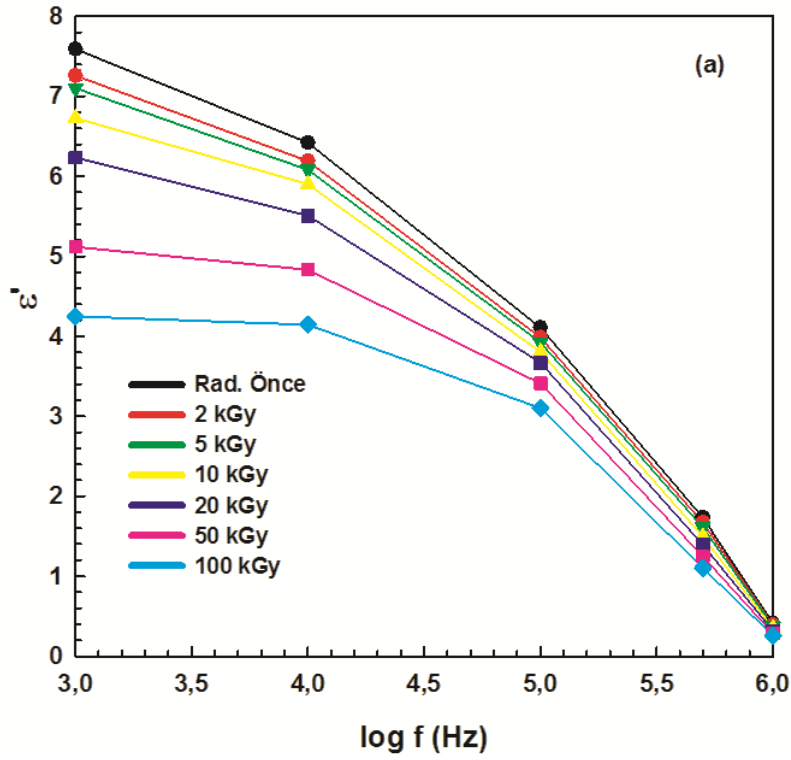
Şekil 7.20. MIS yapının arayüzey durum yoğunluğunu (N_{ss}) radyasyon dozu ile değişimi



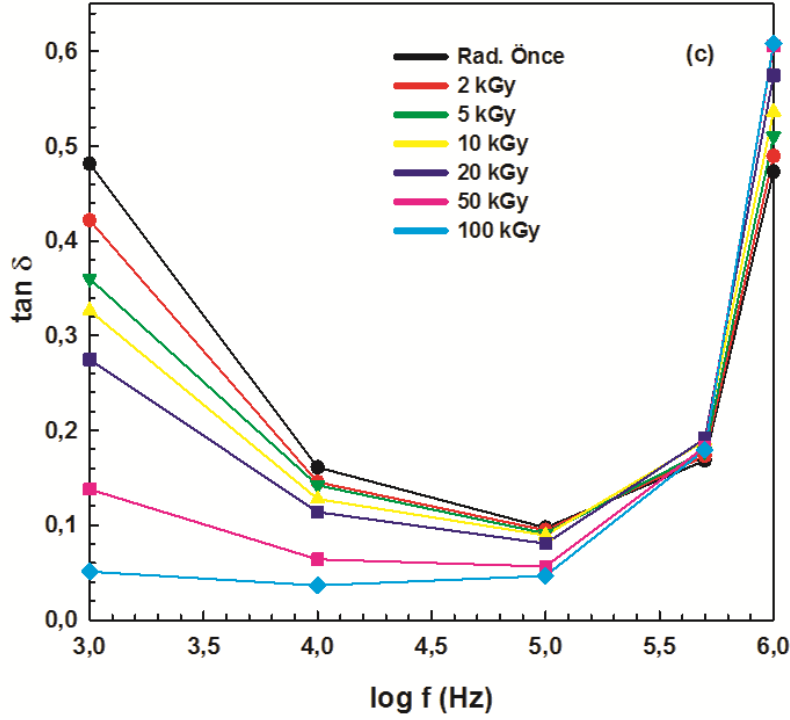
Şekil 7.21. MIS yapının arayüzey durum zaman sabitinin (τ) radyasyon dozu ile değişimi

7.2.2. Dielektrik Karakteristikler

MIS yapının radyasyona bağılı kapasitans (C) ve iletkenlik (G) ölçümlerinden dielektrik sabiti (ϵ'), kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), a.c. elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ve kompleks elektrik modülüsün (M^*) gerçel (M') ve sanal (M'') kısımları gibi dielektrik parametreleri sırasıyla Eş. 7.6, Eş. 7.7, Eş. 7.8, Eş. 7.11, Eş. 7.13 ve Eş.7.14 eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ parametrelerinin 0,5 V için oda sıcaklığında ve farklı radyasyon dozlarında frekansa bağılı değişim eğrileri sırasıyla Şekil 7.22.a, b ve c'de verilmiştir. Şekil 7.22.a ve b'de görüldüğü gibi, hem ϵ' hem de ϵ'' değeri her frekansta artan gama radyasyon dozu ile azalmaktadır. Radyasyon esnasında uyarılan yük taşıyıcıları yasak enerji aralığında bazı kusurlar arasında geçiş yapabilir [103,132,133]. Dielektrik sabitinde ki bu azalma, radyasyon dozu ile yük taşıyıcılarının lokalize durumlar arasında kesikli atlama hareketini belirleyen taşıyıcı polarizasyonun azalmasına atfedilebilir [101,103,128-132]. Ayrıca, dielektrik sabiti dipollerin sayısı ile doğru orantılıdır. Dielektrik sabiti ve kapasitansın azalması radyasyon dozu ile dipollerin sayısındaki azalmadan kaynaklanabilir. Dipollerin sayısındaki azalma malzeme içindeki lokalize yük taşıyıcılarının rekombinasyonu ile açıklanabilir. Şekil 7.22.c'de görüldüğü gibi, kayıp açısı ($\tan\delta$) değeri 100 kHz'e kadar artan frekans ve radyasyon dozuyla azalırken, bu frekans değerinden sonra artan frekans ve doz ile artmaktadır. Kayıp açısındaki bu azalma, arayüzey ve atomik yer değiştirmelerdeki yüklerin sürekli dağılımına atfedilebilir.

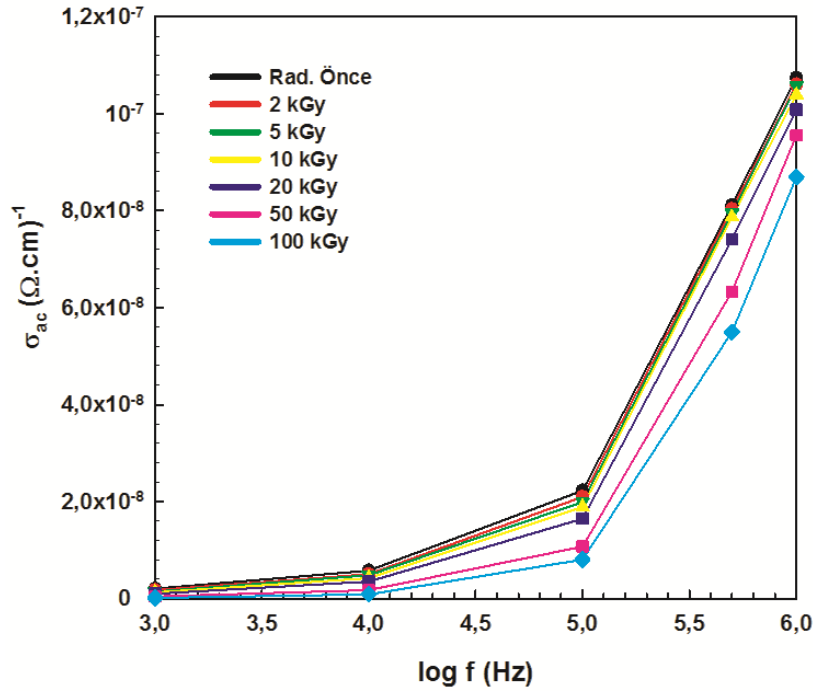


Şekil 7.22. MIS yapının farklı radyasyon dozları için frekansa bağlı a) ϵ' -logf b) ϵ'' -logf ve c) $\tan\delta$ -logf eğrileri



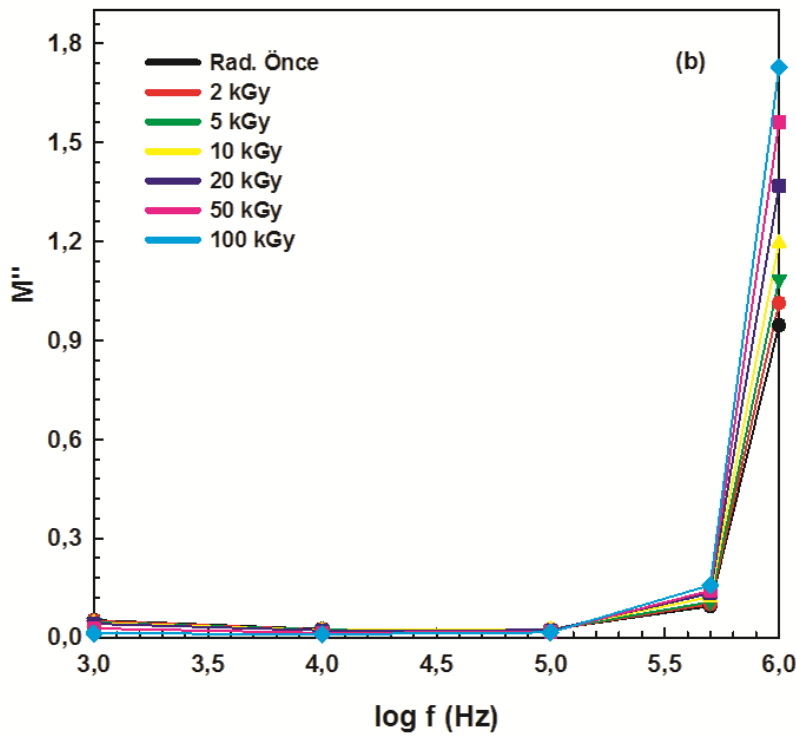
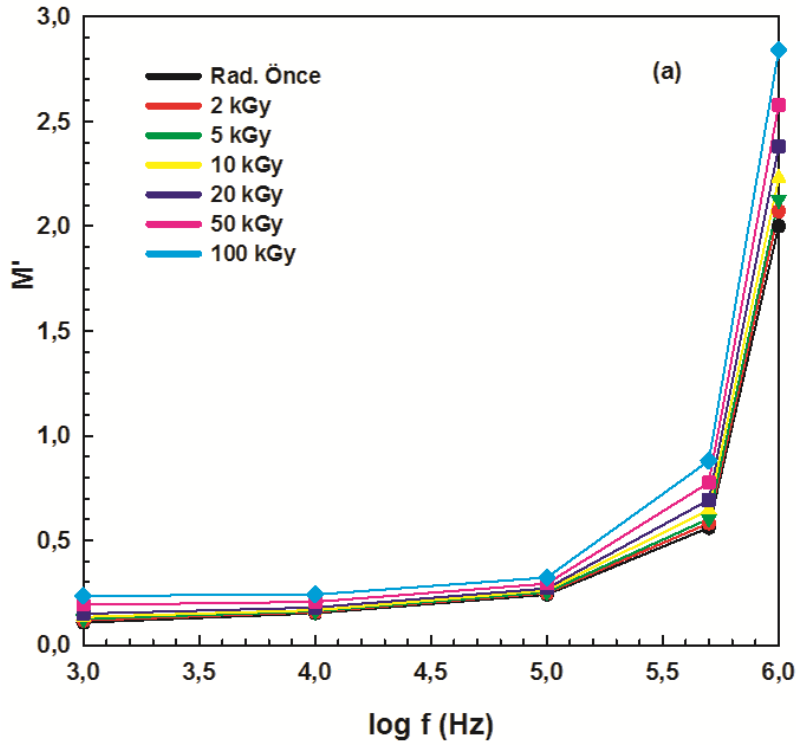
Şekil 7.22.(devam) MIS yapının farklı radyasyon dozları için frekansa bağlı a) ϵ' -logf
b) ϵ'' -logf ve c) $\tan\delta$ -logf eğrileri

Şekil 7.23'de radyasyondan önce ve sonra frekansın bir fonksiyonu olarak a.c. elektriksel iletkenliğin σ_{ac} -logf eğrileri gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, σ_{ac} değeri artan radyasyon dozu ile azalırken artan frekansla artmaktadır. Radyasyonun sonucu olarak a.c. iletkenlikteki bu azalma örgü bantlarının kırılması nedeniyle meydana gelen yük merkezlerine ve akım iletimindeki azalmaya atfedilebilir [101,103,134-139].



Şekil 7.23. MIS yapının farklı radyasyon dozları için frekansa bağlı σ_{ac} -logf eğrileri

Şekil 7.24.a ve b'de radyasyondan önce ve sonra frekansın bir fonksiyonu olarak kompleks elektrik modülüsün (M^*) sırasıyla gerçel (M') ve sanal (M'') kısımlarının M' -logf ve M'' -logf eğrileri gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, M' ve M'' değeri her bir frekansta artan radyasyon dozuyla artmaktadır. Bu sonuç, radyasyon ile serbest yük taşıyıcılarının azalmasına atfedilebilir [129,140-142].



Şekil 7.24. MIS yapının farklı radyasyon dozları için frekansa bağlı a) M' -logf b) M'' -logf eğrileri

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, gama radyasyonun Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) yapının elektrik ve dielektrik karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. RF püskürtme metodu ile hazırlanan silisyum nitrat (Si₃N₄) arayüzey yalıtkan tabakalı MIS yapının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri radyasyondan önce geniş bir frekans aralığında gerçekleştirildi. Daha sonra, MIS yapı ışınlama dozu 0,69 kGy/h olan ⁶⁰Co gama-ışın kaynağı ile geniş bir radyasyon doz aralığında ışınlanmaya maruz bırakıldı. Her ışınlama dozundan sonra MIS yapının kapasitans ve iletkenlik ölçümleri beş farklı frekansta gerçekleştirildi. Radyasyondan önce ve sonra deneysel ölçüm verileri kullanılarak MIS yapının elektriksel ve dielektrik parametreleri hesaplandı.

Frekansa bağlı ölçümlerde, kapasitans ve iletkenlik değerlerinin artan frekansla azaldığı gözlemlendi ve bu sonuç literatür ile uyum içindedir. Kapasitans ve iletkenliğin frekans bağımlılığı arayüzey durumlarına (N_{ss}) atfedildi. Arayüzey durumları düşük frekanslarda uygulanan a.c. sinyali takip edebilmekte yüksek frekanslarda ise a.c. sinyali takip edememektedir. Bu nedenle yüksek frekanslarda arayüzey durumlarının toplam kapasitansta katkıları ihmal edilebilecek kadar küçüktür. C_m-V ve G_m/ω-V eğrileri yaklaşık 0 volt civarında bir pik vermektedir. Tüketim bölgesinde meydana gelen bu pikin büyüklüğü artan frekansla azalmakta ve yüksek frekanslara gidildikçe kaybolmaktadır.

Seri direnç (R_s) ve arayüzey durumları (N_{ss}) yarıiletken aygıtların elektriksel karakteristiklerini ve performansını etkileyen önemli parametrelerdir. Tüm frekanslar için, kuvvetli yığılım bölgesinde kapasitans ve iletkenlik verilerinden hesaplanan seri direnç değerlerinin artan frekansa azaldığı gözlemlendi. Ayrıca, R_s-V eğrilerinde gözlenen pik yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarının özel bir dağılıma atfedildi.

Arayüzey durum yoğunluğunu (N_{ss}) ve zaman sabitini (τ) belirlemek için iletkenlik metodu kullanıldı. Bu metoda göre, ilk önce farklı doğru beslem gerilimleri için paralel iletkenlik değerleri hesaplandı ve frekansın fonksiyonu olarak G_p/ω-logf eğrileri elde edildi. Bu eğrilerin maksimumuna karşılık gelen paralel iletkenlik ve frekans değeri kullanılarak

arayüzey durum yoğunlukları ve zaman sabitleri hesaplandı. Hesaplanan N_{ss} ve τ değerlerinin artan doğru beslem gerilimi ile azaldığı bulundu.

MIS yapının radyasyondan önce frekansa bağlı dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), a.c. elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) ve elektrik modülüs (M) gibi dielektrik karakteristikleri kapasitans ve iletkenlik ölçüm verileri kullanılarak hesaplandı. ϵ' ve ϵ'' değerleri artan frekansla azalmakta ve yüksek frekanslarda fazla değişmemektedir. $\tan\delta$ değerinin ise yaklaşık 50 kHz'e kadar artan frekansla azaldığı ve daha sonra arttığı gözlemlendi. Düşük frekanslarda, dielektrik sabitinin yüksek değeri elektrik alan etkisi ile uzay yükü bölgesinin oluşumu sonucu meydana gelen arayüzey yük kutuplanmasına atfedildi. Bu kutuplanmadan dolayı düşük frekanslara gidildikçe yapının kapasitansı da artar. Elektrik dipolü alternatif alanı yüksek frekanslarda takip edemez ve ϵ' sabit bir değere ulaşır. Elektriksel iletkenlik değeri artan frekansla artmaktadır. İletkenliğin bu davranışı, boşlukların potansiyel kuyu içinde kısa mesafeli sıçrama ve kuyular arası uzun mesafeli sıçrama mekanizmasına atfedildi. Artan frekansla M' ve M'' değerlerinin artması indüklenmiş elektrik alan etkisi altında yük taşıyıcıların hareketliliğindeki artmasından kaynaklanmaktadır.

Işınlanan MIS yapının radyasyona bağlı elektriksel ölçüm sonuçları, kapasitans ve iletkenlik değerlerinin artan gama radyasyon dozu ile azaldığını gösterdi. Bu durum, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde iyonlaştırıcı radyasyondan kaynaklanan kusur olan arayüzey tuzak yüklerinin azalmasına atfedildi. Yarıiletken aygıtlarda radyasyon kusurları tarafından elektron-deşik çiftlerinin oluşumu, tuzak merkezleri tarafından elektron-deşik çiftlerinin rekombinasyonu, taşıyıcıların tuzaklanması ve taşıyıcıların tünellenmesi gibi elektriksel etkilere neden olmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde, arayüzey tuzakları oluşur.

Radyasyona bağlı kapasitans ve iletkenlik verilerinden hesaplanan R_s değerinin, 1 kHz'de önce artan radyasyon dozuyla arttığı sonra azaldığı ve 1 MHz'de artan doz ile arttığı gözlemlendi. Bu sonuç, metal-yarıiletken arayüzeyinde lokalize olan tuzaklardan kaçmak için yeterli enerjiye sahip arayüzey tuzak yüklerine atfedildi. Ayrıca, artan doz ile seri direncin artması mobilite ve serbest taşıyıcı yoğunluğundaki azalmayı ifade eder. Radyasyonla indüklenmiş kusur (tuzak) merkezlerinin yoğunluğu artar. Dolayısıyla, kristal örgüdeki serbest taşıyıcılar kusur (tuzak) merkezleri tarafından yakalanır ve bu da taşıyıcı

yoğunluğunun azalmasına neden olur. Her radyasyon dozunda R_s - V eğrileri pik vermektedir. Bu pik o bölgede yerleşik olan arayüzey durumlarından kaynaklanmakta ve pik pozisyonu artan radyasyonla ileri negatif gerilimlere doğru kaymaktadır.

Radyasyondan sonra MIS yapının arayüzey durum yoğunluğunu (N_{ss}) ve zaman sabitini (τ) belirlemek için her radyasyon dozunda frekansın fonksiyonu olarak G_p/ω eğrileri çizildi. G_p/ω eğrileri her dozda pik verdi ve pikin pozisyonunun artan radyasyon dozuyla düşük frekanslara doğru kaydığı gözlemlendi. Bu piklerin maksimumuna karşılık gelen paralel iletkenlik ve frekans değeri kullanılarak arayüzey durum yoğunlukları ve zaman sabitleri hesaplandı. N_{ss} değerinin artan radyasyon dozu ile azalması yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde rekombinasyon merkezleri sayısının azalmasına atfedildi.

MIS yapı ışıladıktan sonra hesaplanan dielektrik parametrelerin radyasyona oldukça duyarlı olduğu gözlemlendi. Dielektrik sabiti, dielektrik kayıp ve elektriksel iletkenlik değerleri artan radyasyon dozu ile azalmaktadır. İletkenlikteki bu azalma örgü bantlarının kırılması nedeniyle meydana gelen yük merkezlerine ve akım iletimindeki azalmaya atfedildi. Ancak, elektrik modülüs değerleri artan radyasyon dozuyla artmaktadır. Bu artma, radyasyon ile serbest yük taşıyıcılarının azalmasına atfedildi.

Geniş bir frekans ve radyasyon aralığında gerçekleştirilen deneysel ölçüm sonuçları, hazırlanan MIS yapının hem elektriksel hem de dielektrik karakteristiklerinin frekans ve radyasyonla önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Ayrıca, ölçümlerde MIS yapının ideal özelliklerinden sapmasına neden olan arayüzey durumlarının etkisi de görülmüştür. Bu nedenle, yapılan ölçümlerde ve hesaplamalarda arayüzey durumları ve seri direnç mutlaka dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak, radyasyon elektronik uygulamalarda kullanılan yarıiletken aygıtların elektronik özellikleri ve performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir.

KAYNAKLAR

1. Boylestad, R., Nashelsky, L. (2000). *Electronic Devices and Circuit Theory*. New York: Prentice-Hall, Inc., 3-25.
2. Nicollian, E. H., Brews J. R. (1982). *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons, 40-439.
3. Sze, S. M., Kwok, K. N. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*. (Third edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 154-300.
4. Rhoderick, E. H., Williams, R. H. (1988). *Metal Semiconductor Contacts*. Oxford: Oxford Press, 1-47, 257-267.
5. Schottky, W. (1938). The development of silicon crystal rectifiers for microwaveradar receivers, *Zeitschrift für Physik*, 113, 367-414.
6. Mott, N. F. (1938). Note on the contact between a metal and an insulator on semiconductor. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34, 568-572.
7. Moll, J. L. (1959). Variable capacitance with large capacitance. *IRE Wescon Convention Record*, 3, 32-36.
8. Terman, L. M. (1962). An investigation of surface states at a silicon-silicon dioxide interface employing metal-oxide-silicon diodes. *Solid-State Electronics*, 5, 259-285.
9. Tataroğlu, A. (2004). *MOS Yapılarda Temel Fiziksel Parametrelerin Frekans ve Radyasyon Miktarına Bağlı İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-77.
10. Raju, G. G. (2003). *Dielectrics in Electric Fields*. New York: Marcel Dekker Inc, 35-195.
11. Chelkowski, A. (1980). *Dielectric Physics*. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub, 1-128.
12. Von Hippel, A. R. (1954). *Dielectric and Waves*. New York: Chapman & Hall, Ltd., 3-178.
13. Kao, K. C. (2004). *Dielectric Phenomena in Solids*. Amsterdam: Elsevier, 40-110.
14. Knoll, G. F. (2000). *Radiation Detection and Measurement*. Newyork: Wiley, 507 - 508.
15. Ma, T. P., Dressendorfer, P. V. (1989). *Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits*. New York: John Wiley & Sons, 87-231.
16. Chauhan, R. K., Chakrabarti, P. (2002). Effect of Ionizing Radiation on MOS Capacitors. *Microelectronic Journal*, 33, 197-203.

17. Ziel, A. (1968). *Solid-State Physical Electronics*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 7, 119-124.
18. Yacobi, B. G. (2003). *Applications of Semiconductors, Semiconductor Materials An Introduction to Basic Principle*. New York: Kluwer Academic Publishers, 116-117.
19. Sharma, B. L. (1984). *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications*. New York and London: Plenum Press, 1-56.
20. Schroder, D. K. (1998). *Semiconductor Material and Device Characterizatio*. (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 337-379.
21. Neamen, D. A. (1997). *Semiconductor Physics and Devices*. (2nd ed.). New York: Mc Graw-Hill, 420-523.
22. Grove, A. S. (1967). *Physics and Technology of Semiconductor Devices*. New York: John Wiley & Sons, 91-357.
23. Chu J., Sher A. (2010). *Device Physics of Narrow Gap Semiconductors*. California: Springer, 203-209.
24. Altındal, Ş. (1993). *Al-SiO_x-pSi Aygıtların ve Güneş Pillerinin Elektriksel Karakteristikleri*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 52-74.
25. Büyükbaş, A. (2015). *AuGe/SiO₂/p-Si/AuGe (MOS) Kapasitörün Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-35.
26. Ghandhi, S. K. (1983). *VLSI Fabrication Principles*. New York: John Wiley & Sons, 401-405.
27. Goetzberger, A., Klausmann, E., Schulz, M. J. (1976). Interface States on Semiconductor/İnsulator Surfaces. *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, 6, 226-233.
28. Hofstein, S. R., Warfield, G. (1965). Physical Limitations on The Frequency Response of a Semiconductor Surface İnsulation Layer. *Solid-State Electronics*, 8, 321-341.
29. Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*. (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 362-390.
30. Ulrich, B., Kuchar, F. (1989). Capacitance-Voltage Measurements on a p-type InSb Metal/İnsulator/Semiconductor Structure with Si₃N₄ as The İnsulator. *Thin Solid Films*, 168, 157-168.
31. Nicollian, E. H., Goetzberger, A. (1967). The Si-SiO₂ Interface - Electrical Properties as Determined by the Metal-İnsulator-Silicon Conductance Technique. *Bell System Technical Journal*, 46, 1055-1133.

32. Yang, H., Son, Y., Choi, S., Hwang, H. (2005). Improved Conductance Method for Determining Interface Trap Density of Metal-Oxide-Semiconductor Device with High Series Resistance. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44, 1460- 1462.
33. Engel-Herbert, R., Hwang, Y., Stemmer, S. (2010). Comparison of methods to quantify interface trap densities at dielectric/III-V semiconductor interfaces. *Journal of Applied Physics*, 124101,108.
34. Taşçıoğlu, I., Soylu, M., Altındal, Ş., Al-Ghamdi, A. A., Yakuphanoglu, F. (2012). Effects of interface states and series resistance on electrical properties of Al/nanostructure CdO/p GaAs diode. *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 462-467.
35. Çevikbaş, G. (2014). *Alüminyum Titanat/Spinel'in Radyasyon Karşısındaki Davranışının İncelenmesi ve Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 5-10.
36. Stuart, M. A. (2007). *IN-SITU Measurement of Total Dose Radiation Effects on Pafullel Plate MOS Capacitors Using the NPS Linear Accelerator*, Naval Postgraduate School, California, 47-56.
37. Schwank, J. R. (1994). *Basic Mechanisms of Radiation Effects in the Natural Space Radiation Environment*. New Mexico: Sandia National Laboratories, 11-43.
38. Barbottin, G., Vapaille, G. (1999). Instabilite in Silicon Devices: New Insulators, Devices and Radiation Effects, North-Holland, 3, 639-722.
39. Srour, J. R., McGarrity, J. M. (1988). Radiation Effects on Microelectronics in Space. *Proceedings of the IEEE*, 76,1446- 1451.
40. Tataroğlu, A., Altındal, S. (2008). Characterization of interface states at Au/SnO₂/n-Si (MOS) structures. *Vacuum*, 82, 1203-2021.
41. Fröhlich, H. (1958). *Theory of Dielectrics*. Oxford: Clarendon Press, 1-78.
42. Tareev, B. (1979). *Physics of Dielectric Materials*. Moscow: Mir Publishers, 67-156.
43. Oral, M., (1983). *Elektrostatik*. İzmir: Ege Üniversitesi Matbaası, 221-252.
44. Popescu, M., Bunget, I., (1984). *Physics of Solid Dielectrics*. Amsterdam: Elsevier, 206-245, 282-291.
45. Kwan, C. K. (2004). *Dielectric Phenomena in Solids: with Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes*. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 78-80.
46. İyibakanlar, G., (2003). *Polimerlerin Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansla Değişimlerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 49-63.
47. Wert, C.A., Thomson, R.M. (1970). *Physics of Solids*. USA: McGraw-Hill.

48. Ataseven, T. (2011). *Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) Yapıların Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-33.
49. Symth, C.P. (1955). *Dielectric Behavior and Structure*. New York: McGraw-Hill, 52-215.
50. Daniel, Vera V. (1967). *Dielectric Relaxation*. London: Academic Press, 1-87.
51. Debye, P. (1929). *Polar Molecules*. Germany: Dover Publications Inc., Reinhold Publishing Corporation.
52. Debye, P., Ramm, W. (1937). Hochfrequenzverluste und quasikristalline Struktur von Flüssigkeiten. *In: Annalen der Physik.*, 5, 28-34.
53. Debye, P. (1954). The Collected Papers of Peter J.W. Debye. *Wiley Interscience*, New York.
54. Martinez-Vega, J. (2007) *Dielectric Materials for Electrical Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 4-8.
55. Riley, F. L. (2000). Silicon Nitride and Related Materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 83,245-265.
56. Uludağ, A. (2010). *α/β -SiAlON Seramiklerinin Sürünme Davranışlarının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 8-10.
57. Akın, N. (2015). *ZnO Tabanlı UV Dedektör Geliştirilmesi ve Prototip Üretimi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 31-27.
58. Sezgin, Ş. (2011). *Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) Yapıların Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ ω -V) Karakteristiklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 28-37.
59. Baran, H. M., Tataroğlu, A. (2013). Determination of interface states and their time constant for Au/SnO₂/n-Si (MOS) capacitors using admittance measurements. *Chinese Physics B*, 22(047303), 1-5.
60. Kim, H., Kim, H., Kim, D. W. (2014). Effect of oxygen plasma treatment on the electrical properties in Ag/bulk ZnO Schottky diodes. *Vacuum*, 101, 92-97.
61. Pratap Reddy, M. S., Lee, J. H., Jang, J. S. (2013). Frequency dependent series resistance and interface states in Au/bio-organic/n-GaN Schottky structures based on DNA biopolymer. *Synthetic Metals*, 167, 185-186.
62. Altındal, Ş., Yücedağ, İ., Tataroğlu, A. (2009). Analysis of surface states and series resistance in Au/n-Si Schottky diodes with insulator layer using current-voltage and admittance-voltage characteristics. *Vacuum*, 84, 363-368.

63. Ertuğrul R., Tataroğlu, A. (2012). Influence of Temperature and Frequency on Dielectric Permittivity and ac Conductivity of Au/SnO₂/n-Si (MOS) Structures. *Chinese Physics Letters*, 29(077304), 1-5.
64. Card, H. C., Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, 1589-1601.
65. Rhoderick, E. H. (1978). *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford: Oxford Press, 121-136.
66. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50, 5052-5053.
67. Cheung, S. K., Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49, 85-87.
68. Chattopadhyay, P., Daw, A. N. (1986). On the current transport mechanism in a metal-insulator-semiconductor (MIS) diode. *Solid State Electron*, 29, 555-560.
69. Depas, M., Van Meirhaeghe, R. L., Lafere, W. H., Cardon, F. (1994). Electrical characteristics of Al/SiO₂/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation. *Solid State Electron*, 37, 433-441.
70. Chatterjee, S., Kuo, Y., Lu, J. (2008). Thermal annealing effect on electrical properties of metal nitride gate electrodes with hafnium oxide gate dielectrics in nano-metric MOS devices. *Microelectronic Engineering*, 85, 202-209.
71. Dökme, İ., Altındal, Ş. (2007). The C–V–f and G/ω–V–f characteristics of Au/SiO₂/n-Si capacitors. *Physica B: Condensed Matter*, 391, 59-64.
72. Padma, R., Lakshmi, B. P., Reddy, V. R. (2013). Capacitance–frequency (C–f) and conductance–frequency (G–f) characteristics of Ir/n-InGaN Schottky diode as a function of temperature Superlattices. *Superlattices and Microstructures*, 60, 358-364.
73. Aydın H., Tataroğlu, A., Al-Ghamdi, A. A., Yakuphanoglu, F., El-Tantawy, F., Farooq, W. A. (2015). A novel type heterojunction photodiodes formed junctions of Au/LiZnSnO and LiZnSnO/p-Si in series. *Journal of Alloys and Compounds*, 625, 18-25.
74. Yun, M., Gangopadhyay, S., Bai, M., Taub, H., Arif, M., Guha, S. (2007). Interface states in polyfluorene-based metal–insulator–semiconductor devices. *Organic Electronics*, 8, 591-600.
75. Bülbül, M. M., Altındal, Ş., Parlaktürk, F., Tataroğlu, A. (2011). The density of interface states and their relaxation times in Au/Bi₄Ti₃O₁₂/SiO₂/n-Si(MFIS) structures. *Surface and Interface Analysis*, 43, 1561-1565.
76. Werner, J., Ploog, K., Queisser, H. J. (1986). Interface-State Measurements at Schottky Contacts: A New Admittance Technique. *Physical Review Letters*, 57, 1080-1083.

77. Tataroğlu A., Altındal Ş., Bülbül, M. M. (2005). Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure. *Microelectronic Engineering*, 81,140-149.
78. Tataroğlu, A. (2006). Electrical and dielectric properties of MIS Schottky diodes at low temperatures. *Microelectronic Engineering*, 83, 2551-2557.
79. Büyükbaş, A., Tataroğlu, A., Balbaşı, M. (2015). Dielectric, conductivity and modulus analysis of AuGe/SiO₂/p-Si/AuGe capacitor. *The Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 17, 1134-1138.
80. Rajasekar, K., Subbarayan, A., Sathyamoorthy, R. (2006). AC and dielectric properties of thermally evaporated p-type (Sb₂Te₃)₇₀ (Bi₂Te₃)₃₀ thin films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 2515-2522.
81. Abdel Kader, M. M., Elzayat, M. Y., Hammad, T. R., Aboud, A. I., Abdelmonem, H. (2011). Dielectric permittivity, ac conductivity and phase transition in hydroxyl Ammonium sulfate. *Physica Scripta*, 83(035705), 12.
82. Rizvi, T. Z., Shakoor, A. (2009). Electrical conductivity and dielectric properties of polypyrrole/Na⁺-montmorillonite (PPy/Na⁺-MMT) clay nanocomposites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(095415), 21.
83. Maity, S., Bhattacharya, D., Ray, S. K. (2011). Structural and impedance spectroscopy of pseudo-co-ablated (SrBi₂Ta₂O₉)(1-x)-(La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃)_x Composites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(095403).
84. Hoque, M. M., Dutta, A. Kumar, S., Sinha, T. P. (2012). The impedance spectroscopic study and dielectric relaxation in A(Ni_{1/3}Ta_{2/3})O₃ [A=Ba, Ca and Sr]. *Physica B: Condensed Matter*, 407, 3740-3748.
85. Yıldız, D. E., Apaydın, D. H., Toppare, L., Cırpan A. (2013). Dielectric and electrical properties of an organic device containing benzotriazole and fluorene bearing copolymer. *Journal of Applied Polymer Science*, 128, 1659-1664.
86. Chaouchi, A., Kennour, S. (2012). Impedance spectroscopy studies on lead free (Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Ti_{0.9}Zr_{0.1})O₃ ceramics. *Processing and Application of Ceramics*, 6, 201-207.
87. El-Gendy, Y.A., Yahia, I.S., Yakuphanoglu, F. (2012). Investigation of nanocrystalline CdS/Si diode using complex impedance spectroscopy. *Materials Research Bulletin*, 47, 3397-3402.
88. Dutta, S., Choudhary, R. N. P., Sinha, P. K. (2007). Impedance spectroscopy studies on Fe³⁺ ion modified PLZT ceramics. *Ceramics International*, 33, 13-20.
89. Cutroni, M., Mandanici, A., Piccolo, A., Fanggao, C., Saunders, G.A., Mustarelli, P., (1996). Frequency and temperature dependence of a.c. conductivity of vitreous silver phosphate electrolytes. *Solid State Electronics*, 90, 167-172.

90. Kurien S., Mathew J., Sebastian S., Potty S. N., George K. C. (2006). Dielectric behavior and AC electrical conductivity of nanocrystalline nickel aluminate. *Materials Chemistry and Physics*, 98, 470-476.
91. Akgül, Ü. (2007). *Fenantrolin Komplekslerinin Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 22-41.
92. Migahed, M. D., Ishra, M., Fahmy, T., Barakat, A. (2004). Electric modulus and AC conductivity studies in conducting PPy composite films at low temperature. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 65, 1121-1125.
93. Jonscher, A.K. (1996). *Universal relaxation law: a sequel to Dielectric relaxation in solids*. London: Chelsea Dielectrics Press, 1-415.
94. Padmasree, K. P., Kanchan, D. K. (2005). Modulus studies of CdI₂-Ag₂O-V₂O₅-B₂O₃ system. *Materials Science and Engineering: B*, 122, 24-28.
95. Mohamed, M. B., Wang, H., Fuess, H. (2010). Dielectric relaxation and magnetic properties of Cr doped GaFeO₃. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43, 455409.
96. Ram, M., Chakrabarti, S. (2008). Dielectric and modulus studies on LiFe_{1/2}Co_{1/2}VO₄. *Journal of Alloys and Compounds*, 462, 214-219.
97. McCrum, N. G., Read, B. E., Williams, G. (1967). *Anelastic and Dielectric Effects in Polymeric Solids*. New York: Wiley, 617.
98. Molak, A., Paluch, M., Pawlus, S., Klimontko J., Ujma, Z., and Gruszka, I. (2005). Electric modulus approach to the analysis of electric relaxation in highly conducting (Na_{0.75}Bi_{0.25})(Mn_{0.25}Nb_{0.75})O₃ ceramics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38, 1450-1460.
99. El-Nahass, M. M., Metwally, H. S., El-Sayed, H. E. A., Hassanien, A. M. (2012). Electrical conductivity and dielectric relaxation of bulk iron (III) chloride tetraphenylporphyrin. *Materials Chemistry and Physics*, 133, 649-654.
100. Ertuğrul, R., 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, 791-799.
101. Tataroğlu, A., Yıldırım, M., Baran, H. M. (2014). Dielectric characteristics of gamma irradiated Au/SnO₂/n-Si/Au(MOS) capacitor. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28, 89-93.
102. Kalisz, M., Mroczynski, R., Beck, R. B. (2011). Improvement of immunity on MeV electron radiation of MOS structures by means of ultra-shallow fluorine implantation. *Microelectronics Reliability*, 51, 1183-1186.

103. Ferreira, E. S., Gonc-alves, K. A., Mitani, J., Yee, M., Tatumi, S. H. (2014). Gamma radiation effects in capacitance of alpha alumina doped with rare earths. *Radiation Physics and Chemistry*, 95, 385-388.
104. Ohyama, H., Takakura, K., Watanabe, T., Nishiyama, K., Shigaki, K., Kudou, T., Nakabayashi, M., Kuboyama, S., Matsuda, S., Kamezawa, C., Simoen, E., Claeys, C. (2005). Radiation damage of SiC Schottky diodes by electron irradiation. *Journal of Materials Science-materials in Electronics*, 16, 455-458.
105. Taşçıoğlu, İ., Tataroğlu, A., Özbay, A., Altındal, Ş. (2010). The role of ^{60}Co γ -ray irradiation on the interface states and series resistance in MIS structures. *Radiation Physics and Chemistry*, 79, 457-461.
106. Kaya, Ş., Aktağ, A., Yılmaz, E. (2014). Effects of gamma-ray irradiation on interface states and series-resistance characteristics of BiFeO₃ MOS capacitors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 319, 44-47.
107. Moloi, S. J., McPherson, M. (2013). Capacitance–voltage behaviour of Schottky diodes fabricated on p-type silicon for radiation-hard detectors. *Radiation Physics and Chemistry*, 85, 73-82.
108. Oldham, T. R. (1999). *Ionizing Radiation Effects in MOS Oxides*. Singapore: World Scientific Publishing.
109. Fleetwood, D. M. (1992). Border traps' in MOS devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 39, 269-271.
110. Ma, T. P. (1989). Interface Trap Transformation in Radiation or Hot-Electron Damaged MOS Structures. *Semiconductor Science and Technology*, 4, 1061.
111. Singh, J. (2001). *Semiconductor Devices Basic Principles*. New York: Wiley.
112. Taşçıoğlu, İ., Farooq, W. A., Turan, R., Altındal, Ş., Yakuphanoglu, F. (2014). Charge transport mechanisms and density of interface traps in MnZnO/p-Si diodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 590, 157-161.
113. Gupta, S. K., Shankar, B., Taube, W. R., Singh, J., Akhtar, J. (2014). Capacitance–conductance spectroscopic investigation of interfacial oxide layer in Ni/4H–SiC (0001) Schottky diode. *Physica B: Condensed Matter*, 434, 44-50.
114. Osvald, J. (2006). Series resistance influence on intersecting behaviour of inhomogeneous Schottky diodes I – V curves. *Solid State Electronics*, 50, 228–231.
115. Baran, H. M., Tataroğlu, A., Ertuğrul, R. (2012). Investigation of the effects of gamma-ray irradiation on electrical characteristics of MOS capacitors. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 14, 304-308.

116. Zeyrek, S. Turan, A., Bülbül, M. M. (2013). The C-V and G-V Electrical Characteristics of ^{60}Co γ -Ray Irradiated Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Structures. *Chinese Physics Letters*, 30(077306), 1-5.
117. Gökçen, M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., 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, 74-78.
118. Karataş, Ş., Türüt, A., 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.
119. Singh, V., Shashank, N., Sharma, S. K., Shekhawat, R. S., Kumar, D., Nahar, R. K. (2011). Frequency dependence studies on the interface trap density and series resistance of HfO₂ gate dielectric deposited on Si substrate: Before and after 50 MeV Li³⁺ ions irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 269, 2765-2770.
120. Cova, P., Singh, A. (1990). Temperature dependence of I-V and C-V characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky barrier type diodes. *Solid State Electronics*, 33, 11-19.
121. Reddy, V. R. (2014). Electrical properties of Au/polyvinylidene fluoride/n-InP Schottky diode with polymer interlayer. *Thin Solid Films*, 556, 300-306.
122. Gupta, R. K., Yakuphanoglu F. (2013). Analysis of device parameters of Al/In₂O₃/p-Si Schottky diode. *Microelectronic Engineering*, 105, 13-17.
123. Kundu, T., Garg, R., Chowdhury, N. A., Misra, D. (2005). Electrical Techniques for the Characterization of Dielectric Films. *The Electrochemical Society Interface*, 14, 17-19.
124. Dakhel, A. A. (2006). Correlated structural and electrical properties of thin manganese oxide films. *Thin Solid Films*, 496, 353-359.
125. Harold, E., Boesch Jr, H. E. (1982). Interface-state generation in thick SiO₂ layers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 29, 1446-1458.
126. Ma, T. P. (1993). Generation and transformation of interface traps in MOS structures. *Microelectronic Engineering*, 22, 197-200.
127. Tataroğlu, A., 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.
128. Roy, M. S., Kumar, M., Jaiswal, P., Sharma, G. D. (2004). Investigation of iron (II) phthalocyanine based schottky device as gamma radiation sensor. *Radiation Measurements*, 38, 205-209.

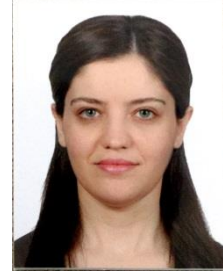
129. Modi, K. B., Sharma, P. U. (2014). On the effect of SHI irradiation on dielectric properties of $Y_{3+x}Fe_{5-x}O_{12}$ ($x = 0.0-0.6$) system. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 169, 723-739.
130. Tataroğlu, A., Altındal, Ş. (2007). The effects of frequency and γ -irradiation on the dielectric properties of MIS type Schottky diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 254(1), 113-117.
131. Al-Karmi A. M. (2006). Impedance spectroscopy of gamma irradiated PM-355. *Radiation Measurements*, 41, 209.
132. Dökme, İ., Altındal, Ş. (2012). The effect of gamma irradiation on electrical and dielectric properties of Al-TiW-Pd₂Si/n-Si Schottky diode at room temperature. *Current Applied Physics*, 12, 860-864.
133. Ciuprina, F., Zaharescu, T., Plesa, I. (2013). Effects of γ -radiation on dielectric properties of LDPE-Al₂O₃ nanocomposites. *Radiation Physics and Chemistry*, 84, 145-150.
134. Gaafar, M. S., El-Wakil, A. A., Barakat, M. A. (2013). Study of the effect of radiation and frequency on the electrical properties and ultrasonic properties of polyethylene. *Archives of Applied Science Research*, 5, 158-166.
135. Kulkarni, S., Nagabhushana, B. M., Parvatikar, N., Shivakumara, C., Damle, R. (2011). Effect of γ -Irradiation on the Dielectric and Conductivity Properties of Nano-Wollastonite. *ISRN Materials Science*, 2011, 1-6.
136. Ghannam, M. M., Mady, M. M. (2012). Effect of gamma irradiation on biophysical and protection properties of melanin. *International Journal of Physical Sciences*, 7, 2952-2959.
137. Fares, S. (2011). Frequency dependence of the electrical conductivity and dielectric constants of polycarbonate (Makrofol-E) film under the effects of γ -radiation, *Natural Science*, 3, 1034-1039.
138. Khaled, M. A., Elwy, A., Hussein A. M., Abdullah, K. (2003). Effect of γ -irradiation on the dielectric loss and A.C. Conductivity of polyvinyl Alcohol Doped with CrCl₃. *Egyptian Journal of Solids*, 26, 83-91.
139. Shah, N., Singh, N. L., Desai, C. F., Singh, K. P. (2003). Microhardness and radiation damage studies of proton irradiated Kapton films. *Radiational Measurements*, 36, 699-702.
140. Sharma, P., Kanchan, D. K., Pant, m., Singh, K. P. (2010). Conductivity Studies in Proton Irradiated AgI-Ag₂O-V₂O₅-TeO₂ Super-Ionic Glass System. *Materials Sciences and Applications*, 1, 59-65.

141. Raghu, S., Kilarkaje, S., Sanjeev, G., Nagaraja, G. K., Devendrappa, H. (2014). Effect of electron beam irradiation on polymer electrolytes: Change in morphology, crystallinity, dielectric constant and AC conductivity with dose. *Radiation Physics and Chemistry*, 98, 124–131.
142. Kaur, N., Singh M., Singh, L., Awasthi, A. M., Lochab, S.P. (2015). Dielectric relaxation of gamma irradiated muscovite mica. *Materials Research Bulletin*, 63, 24–31.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERTUĞRUL UYAR, Raziye
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20.09.1981, Karaman
 Medeni hali : Evli
 e-mail : raziyeertugrul@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Fizik	Devam Ediyor
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	2011
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Eğitim Bilimleri E.	2006
Lisans	Anadolu Üniversitesi /İşletme	2012
Lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	2004
Lise	Karaman Yabancı Dil Ağırlıklı Lise	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-Halen	Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı	İSG Uzman Yrd.
2011-2012	Savunma Sanayii Müsteşarlığı	Proje Asistanı
2010-2011	Sınav Dergisi Dershanesi	Fizik Öğretmenliği
2009-2010	Boğaziçi Dershanesi	Fizik Öğretmenliği
2008-2009	Limit Dershanesi	Fizik Öğretmenliği
2005-2008	Akay Kampüs Dershanesi	Fizik Öğretmenliği
2004-2005	Kavram Dershanesi	Fizik Öğretmenliği

Yabancı Dil

İngilizce (YDS: 77,5)

Yayınlar

- Ertuğrul R., Tataroğlu, A. (2012). Influence of Temperature and Frequency on Dielectric Permittivity and ac Conductivity of Au/SnO₂/n-Si (MOS) Structures. *Chinese Physics Letters*, 29, 077304, 1-5.
- Baran, H. M., Tataroğlu, A., Ertuğrul, R. (2012). Investigation of the effects of gamma-ray irradiation on electrical characteristics of MOS capacitors. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 14, 304-308.
- Ertuğrul, R., 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, 791-799.

Hobiler

Kitap okumak, Sinema, Pilates.



GAZİ GELECEKTİR..