



**Au/TiO₂/n-Si (MIS) KONDANSATÖRÜN ELEKTRİK VE DİELEKTRİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE İYONLAŞTIRICI RADYASYON ETKİLERİ**

Mehmet İZDEŞ

**YÜKSEK LİSANS
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

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.

Mehmet İZDEŞ

24/01/2023

Au/TiO₂/n-Si (MIS) KONDANSATÖRÜN ELEKTRİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE İYONLAŞTIRICI RADYASYON ETKİLERİ

Mehmet İZDEŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Bu tez, Au/TiO₂/n-Si (MIS) kondansatörün elektrik ve dielektrik özellikleri üzerindeki iyonlaştırıcı radyasyon etkilerini sunmaktadır. Titanyum dioksit (TiO₂) filmi Si alttaş üzerine RF magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak biriktirildi. MIS kondansatör, 100 kGy doza kadar ⁶⁰Co gama-ışını ile ışınlanmıştır. Işınlama öncesi ve sonrası, admitans ($Y=G+i\omega C$) ölçümleri 1 kHz - 1 MHz frekans aralığında gerçekleştirildi. Elektrik ve dielektrik özellikler, kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. Gama radyasyon dozunun artması ile C ve G değeri azalırken seri direnç (R_s) değeri artmaktadır. Bu durum, TiO₂/n-Si arayüzeyinde iyonlaştırıcı radyasyonun neden olduğu kusurlardan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, MIS kondansatörün verici katkı yoğunluğu (N_D), engel yüksekliği (Φ_B) ve arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) gibi parametreleri C⁻²-V karakteristiklerinden belirlendi. Φ_B ve N_{ss} değeri artan radyasyon ile artarken N_D değeri azalmaktadır. Elektriksel parametrelere ek olarak, dielektrik sabiti (ε'), kayıp (ε''), kayıp tanjantı (tanδ), iletkenlik (σ_{ac}), modülüs (M) ve empedans (Z) gibi dielektrik parametreleri ölçülen C ve G değerlerinden hesaplandı. Deneysel sonuçlar, MIS kondansatörün elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin ışınlama dozuna ve frekansa bağlı olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, hazırlanan bu yapının MIS/MOS kondansatör tabanlı radyasyon sensörü olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : MIS kondansatör, Frekans, Radyasyon hasarı, Admitans, Dielektrik

Sayfa Adedi : 77

Danışman : Prof. Dr. Adem TATAROĞLU

EFFECTS OF IONIZING RADIATION ON ELECTRIC AND DIELECTRIC
PROPERTIES OF Au/TiO₂/n-Si (MIS) CAPACITOR

Mehmet İZDEŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

This thesis presents the effects of ionizing radiation on electric and dielectric properties measurements of Au/TiO₂/n-Si (MIS) capacitor. Titanium dioxide (TiO₂) film was deposited on Si substrate using RF magnetron sputtering method. The MIS capacitor was irradiated by ⁶⁰Co gamma-ray up to a dose of 100 kGy. Before and after irradiation, admittance ($Y=G+i\omega C$) measurements were performed in the 1 kHz – 1 MHz frequency range. Electric and dielectric characteristics were investigated using capacitance–voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω-V) measurements. As gamma radiation dose increases, the C and G value decrease, while the series resistance (R_s) value increases. This case is due to defects caused by ionizing radiation at the TiO₂/n-Si interface. Besides, electrical parameters such as donor doping density (N_D), barrier height (Φ_B) and interfacial state density (N_{ss}) of the MIS capacitor were determined from the C⁻²-V characteristics. While the Φ_B and N_{ss} values increase with increasing radiation, the N_D value decreases. In addition to the electrical parameters, dielectric parameters like dielectric constant (ε'), loss (ε''), loss tangent (tanδ), conductivity (σ_{ac}), modulus (M) and impedance (Z) were calculated from the measured C and G values. Experimental results indicated that the electric and dielectric properties of the MIS capacitor depend on the irradiation dose and frequency. As a result, it has been evaluated that this structure may be utilized as a MIS/MOS capacitor-based radiation sensor.

Science Code : 20227

Key Words : MIS capacitor, frequency, radiation damage, admittance, dielectric

Page Number : 77

Supervisor : Prof. Dr. Adem TATAROĞLU

TEŞEKKÜR

Bu çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve katkıları ile benden desteğini esirgemeyen, çalışmamla ilgili her türlü aşamanın planlanması, gerçekleştirilmesi ve sonuçlandırılması konularında yardımlarıyla daima beni destekleyen, yönlendiren tutumu ve anlayışından dolayı Kıymetli Hocam Prof. Dr. Adem TATAROĞLU'na teşekkür ederim.

Bu günlere ulaşmamda gerek maddi ve gerekse manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen kıymetli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince bana sabır ve anlayışıyla yaklaşan sevgili eşim Gamze Gül İZDEŞ'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR	5
2.1. İdeal bir MIS Yapı	5
2.1.1. Yığılım	8
2.1.2. Tükenim	9
2.1.3. Tersinim	10
2.2. Gerçek MIS Yapı	11
2.2.1. Arayüzey durumları	12
2.2.2. Sabit oksit yükleri	12
2.2.3. Oksitte tuzaklanmış yükler.....	12
2.2.4. Hareketli iyonik yük.....	13
2.3. Arayüzey Tuzak Yoğunluğunun Belirlenmesi.....	13
2.3.1. Yüksek-düşük frekans kapasitans ($C_{HF}-C_{LF}$) yöntemi	13
2.3.2. İletkenlik metodu	14
3. RADYASYON	15
3.1. Yer Değiştirme Hasarı	16

Sayfa

3.2. İyonlaşma Hasarı	16
3.3. Fotonların Madde İle Etkileşimleri	17
3.4. MOS Yapılar Üzerindeki Radyasyon Etkileri.....	18
3.5. Radyasyon Birimleri	19
4. DİELEKTRİKLER	21
4.1. Dielektrik Kutuplanma (Polarizasyon)	21
4.2. Kutuplanma Mekanizmaları	24
4.2.1. Elektronik kutuplanma	25
4.2.2. İyonik (atomik) kutuplanma.....	25
4.2.3. Yönelimli (dipolar) kutuplanma.....	26
4.2.4. Arayüzey (uzay yük) kutuplanması	26
4.3. Dielektrik Parametreler	26
4.4. Dielektrik Parametrelerin Belirlenmesi	28
5. DENEYSEL YÖNTEM	29
5.1. Titanyum Dioksitin (TiO_2) Özellikleri	29
5.2. MIS Kapasitörün Fabrikasyonu	30
5.2.1. Ultrasonik ve kimyasal temizleme	30
5.2.2. Omik kontakın oluşturulması	30
5.2.3. Si altaş üzerine TiO_2 'nin kaplanması	31
5.2.4. Doğrultucu kontakın oluşturulması	32
5.3. Admitans Ölçüm Sistemi	33
6. DENEYSEL SONUÇLAR	35
6.1. Elektrik karakteristikler.....	35
6.2. Dielektrik karakteristikler	55
7. SONUÇ VE TARTIŞMA	65

Sayfa

KAYNAKLAR 69

ÖZGEÇMİŞ 77



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. Işınlama dozuna bağlı olarak 1 kHz için C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan elektriksel parametreler.....	53
Çizelge 6.2. Işınlama dozuna bağlı olarak 10 kHz için hesaplanan elektriksel parametreler	54
Çizelge 6.3. Işınlama dozuna bağlı olarak 100 kHz için hesaplanan elektriksel parametreler	54
Çizelge 6.4. Işınlama dozuna bağlı olarak 500 kHz için hesaplanan elektriksel parametreler	54
Çizelge 6.5. Işınlama dozuna bağlı olarak 1 MHz için hesaplanan elektriksel parametreler	54

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. MIS yapının şeması	5
Şekil 2.2. $V=0$ 'da ideal MIS yapının enerji bant diyagramı	6
Şekil 2.3. MIS yapının eşdeğer devre diyagramı	7
Şekil 2.4. $V \neq 0$ için ideal MIS yapının enerji-bant diyagramları a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim koşulları	8
Şekil 2.5. Yığılım durumunda yük dağılımları	9
Şekil 2.6. Tükenim durumunda yük dağılımları	10
Şekil 2.7. Tersinim durumunda yük dağılımları	10
Şekil 2.8. İdeal MIS yapının C-V eğrisi	11
Şekil 2.9. Gerçek MIS yapıdaki yükler	11
Şekil 3.1. MOS yapıdaki radyasyon etki süreçleri	19
Şekil 4.1. Elektrik alanda dipollerin yönelimi	22
Şekil 4.2. Dielektrik malzemeli kondansatördeki yükler	23
Şekil 4.3. Kutuplanma türlerinin zaman ile değişimi	25
Şekil 4.4. Dielektrik sabiti ve dielektrik kaybın açısıl frekans ile değişimi	27
Şekil 5.1. TiO_2 'nin kristal yapıları	30
Şekil 5.2. Omik kontak için kullanılan maske	31
Şekil 5.3. Doğrultucu kontak için kullanılan maske	32
Şekil 5.4. $\text{Au/TiO}_2/\text{n-Si}$ (MIS) kondansatörün şematik gösterimi	33
Şekil 6.1. MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için C-V eğrileri	37
Şekil 6.2. MIS kondansatörün a) Radyasyondan önce (0 kGy) ve b) 100 kGy için frekansa bağlı C-V eğrileri	40
Şekil 6.3. MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için G/ω -V eğrileri	41

Şekil	Sayfa
Şekil 6.4. MIS kondansatörün a) Radyasyondan önce (0 kGy) ve b) 100 kGy için frekansa bağlı G/ω -V eğrileri.	44
Şekil 6.5. MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için R_s -V eğrileri.....	46
Şekil 6.6. C-2-V karakteristikleri a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz, e) 1 MHz.....	50
Şekil 6.7. MIS kondansatörün frekansın fonksiyonu olarak farklı radyasyon dozları için a) ϵ' -logf b) ϵ'' -logf ve c) $\tan\delta$ -logf eğrileri	58
Şekil 6.8. Farklı radyasyon dozları için frekansın fonksiyonu olarak çizilen σ_{ac} -logf eğrileri	60
Şekil 6.9. Farklı radyasyon dozları için frekansın fonksiyonu olarak çizilen a) M' -logf b) M'' -logf eğrileri	61
Şekil 6.10. Farklı radyasyon dozları için frekansın fonksiyonu olarak çizilen a) Z' -logf b) Z'' -logf eğrileri	62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. BESTEC marka buharlaştırma cihazı.....	31
Resim 5.2. Bestec marka püskürtme sistemi.....	32
Resim 5.3. HP 4192 A LF empedans analizmetre	33



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\text{\AA}$	Angstrom
C	Kapasitans
C_{ox}	Oksit kapasitansı
C_{sc}	Uzay yük kapasitansı
D_{it}	Arayüzey durum yoğunluğu
d_{ox}	Oksit tabaka kalınlığı
$\Delta\Phi_B$	Engel düşmesi
E_0	İç elektrik alan
E_c	İletkenlik bant enerjisi
E_f	Fermi enerjisi
E_i	Saf durumdaki enerji seviyesi
E_v	Valans bant enerjisi
ϵ_0	Boşluğun dielektrik geçirgenliği
ϵ_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_{ox}	Oksit tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ^*	Kompleks dielektrik sabiti
ϵ'	Dielektrik sabiti
ϵ''	Dielektrik kayıp
Φ_B	Potansiyel engel yüksekliği
G	İletkenlik
Gy	Gray
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
μ	Dipol moment
N_D	Verici katkı atomlarının yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durumları

Simgeler**Açıklamalar**

ω	Açısal frekans
Ω	Ohm
Q_{sc}	Uzay yükü
P	Dielektrik malzemenin polarizasyonu
ψ_s	Yüzey potansiyeli
R_s	Seri direnç
σ_{ac}	a.c. iletkenlik
σ_p	Kutuplanma yük yoğunluğu
$\tan\delta$	Kayıp açı tanjantı
τ	Durulma zamanı
V	Uygulanan Gerilim
V_D	Difüzyon potansiyeli
V_G	Giriş gerilimi
V_{ox}	Oksit üzerine düşen gerilim
W_D	Tükenim tabakasının genişliği
Y	Admitans
Z	Empedans

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif Akım
ANAEM	Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
Ar	Argon
Au	Altın
BESTEC	Yüksek Vakumlu Metal Buharlaştırma Cihazı
DC	Doğru Akım
HCl	Hidrojen klorür
HF	Hidroflorik asit
MS	Metal Yarıiletken
MIS	Metal Yalıtkan Yarıiletken
MOS	Metal Oksit Yarıiletken
N₂	Azot

Kısaltmalar**Açıklamalar****O₂**

Oksijen

P

Fosfor

RF

Radyo frekansı

Ti

Titanyum

TiO₂

Titanyum Oksit



1. GİRİŞ

Yoğun madde fiziği, maddenin makroskopik ve mikroskopik fiziksel özellikleriyle ilgilenen fiziğin en büyük dalıdır. Yoğun madde fiziği ile katıhal fiziği arasındaki temel fark, yoğun madde fiziğinin hem katı hem de sıvı sistemleri incelemesi, katıhal fiziğinin ise kristaller gibi katı yapıların özelliklerini incelemesidir. Yoğun madde fiziği, katıların ve sıvıların yapısal, termal, elastik, elektronik, manyetik ve optik özelliklerini inceleyen fizik alanıdır [1,2]. Yoğun madde fiziğinin ilgi gören araştırma dallarından biri de yarıiletken malzemelerin üretimi, elektronik devrelerde kullanımı ve geliştirilmesidir. Yarıiletken malzemelerin elektronikte yaygın olarak kullanılmasıyla yarıiletken teknolojisi gelişmiştir. Yarıiletkenler ve yarıiletken fiziği üzerine temel araştırmalar yarıiletken teknolojisinin gelişimine büyük ölçüde katkıda bulunmuştur.

Bununla beraber yarıiletken teknolojisinin gelişmesinde bir metal ve bir yarıiletken malzemenin bir araya gelmesiyle oluşan metal-yarıiletken (MS) kontakların katkısı da oldukça fazladır. MS kontakların temel teorisi, 1938'de Schottky tarafından Mott'un ilgili çalışmasıyla birlikte geliştirildi [3,4]. MS kontağı, çoğu yarıiletken aygıtın performansında önemli bir bileşendir. Temel olarak, yarıiletken cihazlarda yaygın olarak kullanılan doğrultucu/Schottky ve omik olmak üzere iki tip MS kontağı vardır [5-7]. Farklı tip MS kontaklar, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farklılıktan dolayı metal ve yarıiletken malzeme arasındaki Fermi enerjisinin uyumsuzluğundan meydana gelir. Ayrıca, metal-yarıiletken arasındaki bağlantı Schottky diyot veya Schottky bariyer diyot olarak da adlandırılmaktadır. Metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey yalıtkan/oksit tabakanın varlığı MS yapıyı, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapıya dönüştürür. MOS yapı tabanlı cihazlar, elektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [6-10]. MIS/MOS yapılar, paralel plakalı kondansatör yapıya benzemektedirler. MOS yapıda metal ve yarıiletken, paralel plakalı kapasitörün iki plakasını oluşturur ve bu nedenle bu yapıya genellikle MOS kondansatörü de denir. Paralel plakalı bir kondansatörün kapasitansı, yalıtkanın yapısının geometrisi ve dielektrik özelliği ile belirlenir. Termal dengede, MOS kapasitör metal ve yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki farka karşılık gelen bir voltaj ile yüklenir. MOS kondansatöre uygulanan voltaj, oksit ve yarıiletken yüzeyine yakın uzay yükü bölgesi arasında paylaşılır. MOS yapının elektriksel karakterizasyonunda, oksit içindeki ve oksit-yarıiletken arayüzeyindeki yükün etkisi dikkate alınmalıdır. MOS yapısı büyük ölçekli entegrasyon teknolojilerinde kullanılan en önemli

cihaz yapısıdır. MIS/MOS alan etkili transistörler (MISFET/MOSFET) paralel plakalı bir kondansatör olarak modellenebilir. SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 , ZrO_2 ve HfO_2 gibi dielektrik malzemeler MIS/MOS transistörlerde kapı dielektrikleri olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber MOS yapısı, yalıtılmış kapılı alan etkili transistörler ve şarj bağlantılı cihazlar gibi birkaç önemli entegre devre aktif bileşeni için temel bir yapı taşıdır [11].

Metal ve yarıiletken arasına yalıtkan/oksit bir tabakanın yani dielektrik malzemenin eklenmesi, iletkenliği ortadan kaldırır ve kapasitansın herhangi bir gerilim altında tam olarak çalışılabileceği ve kullanılabileceği bir kapasitöre yol açar. Bir kapasitörün dielektrik malzemesi, voltaj uygulandığında yani dış bir elektrik alanına yerleştirdiğinde polarize olur [12-14]. Polarize olan dielektrik molekülleri elektrik dipol momenti kazanır. Bu işlem elektrik alanını azaltır ve negatif yüklü elektronların hafifçe pozitif plakaya doğru kaymasına neden olur. Voltaj kaynağı ortadan kaldırıldığında, dielektrik malzeme polarizasyonunu kaybeder ve net dipol moment sıfır olur. Bununla birlikte, dielektrik malzeme zayıf moleküler bağlara sahipse, voltaj kaynağı kaldırıldığında bile polarize durumda kalabilir. Kapasitör, voltaj uygulandığında elektrik alanında enerji depolar. Kapasitörün enerji depolama kapasitesi, dielektrik malzemenin türüne ve voltaj uygulandığında meydana gelen polarizasyon miktarına göre değişir. Dielektrik sabitleri yüksek olan malzemeler, düşük dielektrik sabitli malzemelere kıyasla daha fazla enerji depolayabilir. Dielektrik sabiti, bir kapasitör için bir dielektrik malzeme seçerken dikkate alınması gereken temel parametrelerden biridir. Dielektrik spektroskopisi tekniği, frekansın bir fonksiyonu olarak kompleks empedans, kompleks dielektrik geçirgenlik, ac iletkenlik, elektrik modülü ve dielektrik durulma gibi önemli parametreleri ölçmek için kullanılmaktadır. Dielektrik özelliklerin ölçümü, malzemelerin kompleks dielektrik geçirgenliğini içerir. Bu ise reel/gerçek ve sanal/imaşiner kısımdan oluşur. Dielektrik sabiti olarak da bilinen reel kısım, malzemedeki depolanan dış bir elektrik alanından ileri gelen enerji miktarının bir ölçüsüdür. Dielektrik kayıp olarak da bilinen sanal kısım ise dış bir elektrik alanı nedeniyle malzemedeki kayıp enerji miktarının bir ölçüsüdür.

Radyasyon, hem yarıiletken aygıtların hem de farklı alanlarda kullanılan elektronik devrelerin özelliklerini değiştirebilmektedir. Elektrik ve elektronik sistemler radyasyondan etkilendiği için elektronik endüstrisi radyasyona dayanıklı elektronik devre elemanları geliştirmektedir. Yarıiletken aygıtlarda iyonlaştırıcı radyasyon ile ilişkili olan radyasyon hasarı iki aşamalı bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Birincisi, soğurma ve saçılma etkileri

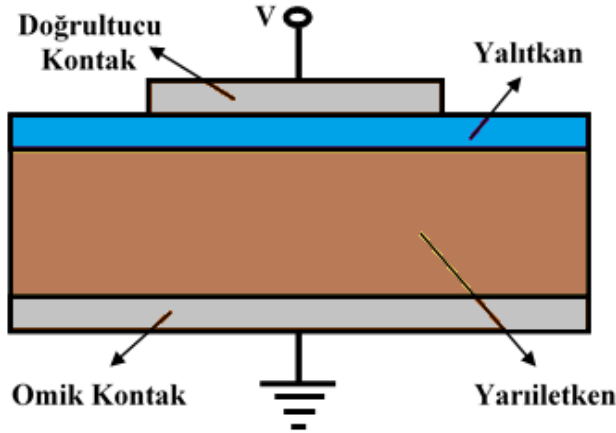
ile açıklanan radyasyon ve madde arasındaki etkileşimdir. İkincisi, kristal örgünün bozulmuş bölgelerinin yeniden düzenlenmesini ve yeni kusurların oluşmasını kapsar [15]. Bununla beraber, iyonize radyasyonun madde ile etkileşimi maddede bazı değişikliklere neden olur. Radyasyonla bir malzemeye verilen kalıcı hasar, iki temel bileşenle karakterize edilir: yer değiştirme hasarı ve iyonlaşma hasarı. Radyasyondan gelen yüksek enerjili parçacıklar ile malzemedeki elektronlar etkileşirse iyonlaşma meydana gelir. Yüksek enerjili parçacıklar ve çekirdekler arasında elastik bir etkileşim varsa, atomik yer değiştirme meydana gelir. İyonlaştırıcı radyasyon için ya elektromanyetik radyasyon (X-ışınları) ya da parçacık radyasyonu (yüksek enerjili elektronlar; α , β , γ parçacıkları; nötronlar; protonlar) kullanılmaktadır [15-18].

Bu tez çalışmasında, Au/TiO₂/n-Si (MIS) kapasitör elektrik ve dielektrik özellikleri frekans ve radyasyona bağlı olarak incelendi. Birinci bölüm, yarıiletken aygıtlar, dielektrik, radyasyonun etkisi hakkında bilgileri içermektedir. İkinci bölümde, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapı hakkında temel bilgiler verildi. Üçüncü bölümde radyasyon, dördüncü bölümde dielektrik hakkında bilgi verildi. Beşinci bölümde, Au/TiO₂/n-Si (MIS) kapasitörün hazırlanması ve deneysel yöntem hakkında bilgi verildi. Altıncı bölümde, frekansa ve radyasyona bağlı deneysel ölçümler ve elde edilen sonuçlarla ilgili grafikler ve hesaplamalar hakkında bilgi verildi. Yedinci bölümde ise, deneysel sonuçlar tartışılmış ve radyasyonun elektrik ve dielektrik özellikler üzerindeki etkileri açıklanmıştır.



2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR

Şekil 2.1 de metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Bu şematik gösterim aynı zamanda metal ve yarıiletkeni ayırmak için oksit bir yalıtkan kullanıldığı metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapısını da temsil etmektedir. Bununla beraber MIS yapı, iki metal plaka arasına yalıtkan tabakanın yerleştirilmesiyle oluşan paralel plakalı kondansatöre de benzemektedir [5-8]. MIS yapının paralel plakalı kondansatörden farklı özelliği, kapıya uygulanan voltajın yarıiletkendeki uzay yük dağılımını ve dolayısıyla bir MIS yapısının kapasitansını değiştirmesidir. Bu yapı, yarıiletken üzerine biriktirilen ve metal ile yarıiletkeni birbirinden ayıran SiO_2 , TiO_2 , Si_3N_4 gibi yalıtkan/oksit arayüzey tabaka ile omik ve doğrultucu kontaklardan meydana gelmektedir. Yalıtkan arayüzeyin homojen ve yüksek kalitede olması, MIS yapının önemli özelliklerinden biridir. MIS ve MOS yapıların kapasitansı, yalıtkan/oksit tabakanın dielektrik özelliği ile belirlenir. Bu yalıtkanlar kimyasal buhar biriktirme (CVD), moleküler demet epitaksi (MBE), magnetron püskürtme, atomik tabaka biriktirme (ALD) gibi teknikler kullanılarak kaplanmaktadır. Bu çalışmada, arayüzey yalıtkan tabaka olarak magnetron püskürtme yöntemi ile büyütülen titanyum dioksit (TiO_2) kullanılmıştır [19].



Şekil 2.1. MIS yapının şeması

2.1. İdeal Bir MIS Yapı

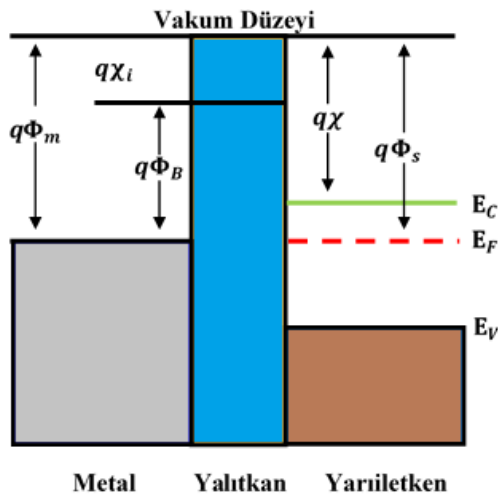
İdeal bir MIS yapı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- $V=0$ 'da, metal ve yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki fark sıfır olmalıdır.

$$q\phi_{ms} \equiv q\phi_m - q\phi_s = 0 \text{ (düz bant koşulu)}$$

- Yalıtkan içinde ve hem yarıiletken hem de metale olan arayüzeylerinde hiçbir yük yoktur.
- Gerilim altında metal ile yarıiletkendeki yükler eşit ancak zıt işaretlidir.
- DC öngerilimi altında yalıtkan boyunca hiçbir yük iletimi yoktur. Yalıtkindan hiçbir akımın geçmemesi yani kaçak akımın olmaması, yalıtkanın ideal olduğunu gösterir.

$V=0$ için, Şekil 2.2 de MIS yapının enerji bant diyagramı gösterilmiştir [6,8,20,21].



Şekil 2.2. $V=0$ 'da ideal MIS yapının enerji bant diyagramı.

Öngerilim uygulandığında, yarıiletkende yük kaymaları sonucunda yarıiletkendeki yükler ya uzay yük bölgesinde ya da arayüzey bölgesinde yığılır. Oluşan uzay yükü, yarıiletkenin iletkenlik ve valans bantlarının bükülmesine neden olur. Uygulanan V_G gerilimi, yalıtkan ve yarıiletken uzay yük bölgesi boyunca düşer. Arayüzeydeki ve oksitteki uzay yükü genellikle çok düşük olduğu için MIS yapısı neredeyse idealdir. İdeal yapıda, uzay yükü sadece metal arayüzeyde ve yarıiletkende meydana gelir. Uygulanan V_G gerilimi,

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (2.1)$$

eşitliği ile verilir. Burada, V_{ox} yalıtkan/oksit üzerindeki voltajı, ψ_s ise bant gerilimini ifade etmektedir. Bu durumda, metal yüzeyindeki ve yarıiletkendeki yük miktarları eşit olur.

$$Q_m = Q_s$$

$$Q_m + Q_{sc} = 0 \quad (2.2)$$

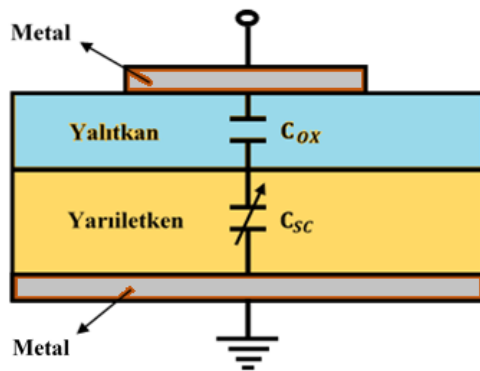
Burada sırasıyla Q_s , Q_m ve Q_{sc} yarıiletkendeki yükü, metaldeki yükü ve uzay yük bölgesinde biriken yükü temsil etmektedir. MIS yapının kapasitansı (C), metal ile yığılım tabakası arasında paralel plakalı bir kapasitörünunki gibidir. Oksidin her iki tarafında depolanan yükten kaynaklanan kapasitans, oksit kapasitansı (C_{ox}) olarak bilinir. Uzay yük kapasitansının (C_{sc}) değeri, yapıya uygulanan voltajın bir fonksiyonu olan yarıiletkendeki uzay-yük bölgesinin kalınlığı ile belirlenir. Sırasıyla C , C_{ox} ve C_{sc} aşağıdaki eşitlikler ile verilir.

$$C = \frac{dQ_m}{dV_G} A, C_{ox} = \frac{dQ_m}{dV_{ox}} A \text{ ve } C_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{d\psi_s} A \quad (2.3)$$

MIS yapının sığasının eşdeğer devre diyagramı Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Eşdeğer devreye göre, C_{ox} ve C_{sc} seri bağlı kapasitanslar olup bunların eşdeğer kapasitansı MIS yapının toplam kapasitansına eşit olacaktır [22]. MIS yapının kapasitansı,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{sc}} \quad (2.4)$$

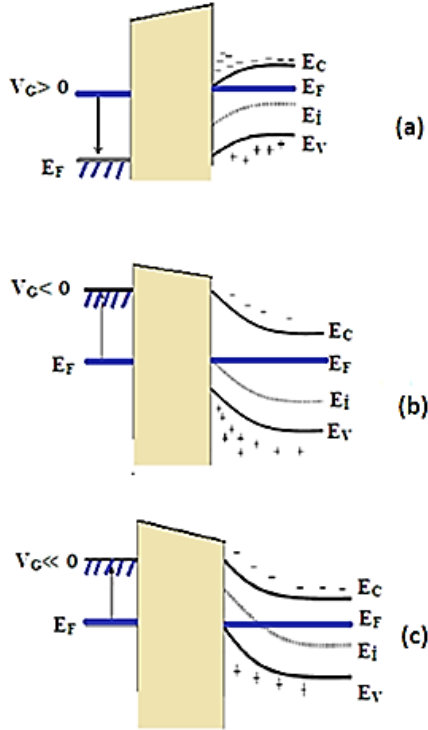
eşitliği ile verilir.



Şekil 2.3. MIS yapının eşdeğer devre diyagramı.

Uygulanan kapı voltajının (V_G) büyüklüğüne ve polaritesine bağlı olarak, kapasitans-voltaj (C - V) eğrisi yığılım, tükenim ve tersinim olmak üzere üç farklı bölge gösterir: $V_G \neq 0$ için,

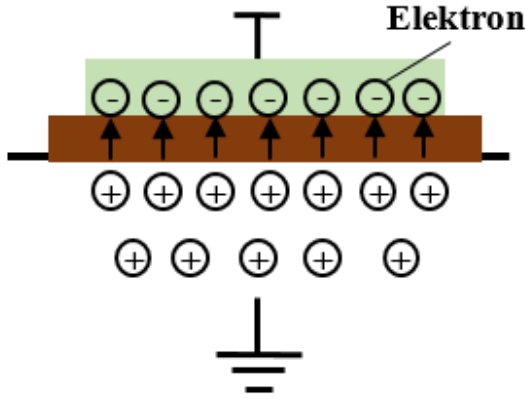
n-tipi MIS yapıda oluşan durumları içeren bant diyagramları Şekil 2.4’de verilmiştir [6,8]. Bu durumlar aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.4. $V \neq 0$ için ideal MIS yapının enerji-bant diyagramları a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim koşulları.

2.1.1. Yığılım

Metal plakaya $V_G > 0$ olacak şekilde pozitif bir öngerilim uygulandığında, oluşan elektrik alan etkisiyle yarıiletkende çoğunluk yük taşıyıcıları olan elektronlar yalıtkan-yarıiletken arayüzeyine çekilir. Uygulanan öngerilim, metalin Fermi seviyesini yarıiletkenin Fermi seviyesinin altına düşürür. Yarıiletkenin iletkenlik ve valans bandı aşağı doğru bükülür. Çoğunluk taşıyıcılar olan elektronlar yalıtkan-yarıiletken arasındaki arayüzeyde tuzaklanır. Yığılım olarak adlandırılan bu durum da (Şekil 2.4.a), arayüzeyde biriken yükün uzay yükü olması nedeniyle uzay yük kapasitansı $C_{sc} \rightarrow \infty$ olur. Böylece MIS yapının toplam kapasitansı, yalıtkan tabakanın kapasitansı ile tanımlanır, $C \rightarrow C_{ox}$. Yığılım koşulunda metal ve yarıiletkendeki yükler Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5. Yığılım durumda yük dağılımları.

2.1.2. Tükenim

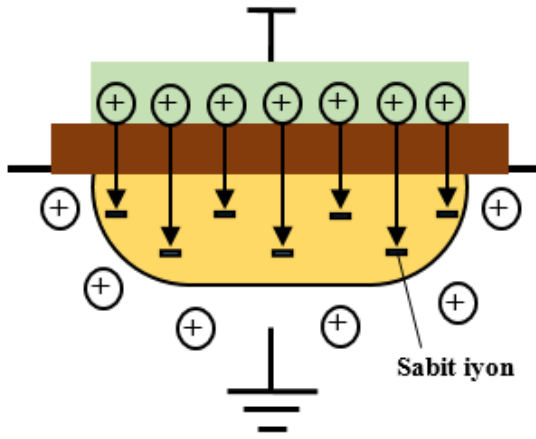
Metal plakaya $V_G < 0$ olacak şekilde uygulanan negatif gerilim, yarıiletken üzerindeki elektronları arayüzeyden uzaklaştırır. Uygulanan öngerilim metalin Fermi seviyesini yarıiletkenin Fermi seviyesinden daha yükseğe çıkarır. Yarıiletkenin iletkenlik ve valans bantlarında yukarı yönde bükülme meydana gelir. Sonuç olarak, yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde hareketli taşıyıcıların yani elektronların tükendiği bir bölge oluşur. Bu bölge, tükenim veya uzay yük bölgesi olarak adlandırılır (Şekil 2.4.b). Tükenim bölgesinin genişliği (W_d) uygulanan gerilime, katkı konsantrasyonuna, dielektrik sabitine ve yalıtkan kalınlığına bağlıdır.

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \psi_s}{qN_d}} \quad (2.5)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, N_d yarıiletken katkı yoğunluğu ve ψ_s ise toplam bant bükülmesidir. Öngerilim arttıkça, ψ_s 'de artar, bu da W_d 'de bir artışa yol açar. N_d 'deki bir artış, W_d 'de bir azalmaya neden olur [23]. Tükenim durumunda MIS yapının toplam kapasitansı, yalıtkan ve tükenim kapasitansı ile belirlenir.

$$C = \frac{C_{ox}}{1 + \left(\frac{\epsilon_i W_d}{\epsilon_s d_{ox}}\right)} \quad (2.6)$$

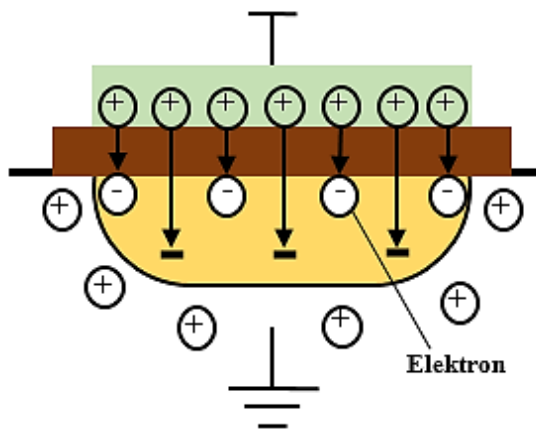
burada ϵ_i yalıtkanın dielektrik sabiti, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, d_{ox} ise yalıtkan kalınlığıdır. Uygulanan voltajın artması, W_d 'nin artmasına ve toplam kapasitansın azalmasına neden olur. Tükenim durumu Şekil 2.6'de verilmiştir.



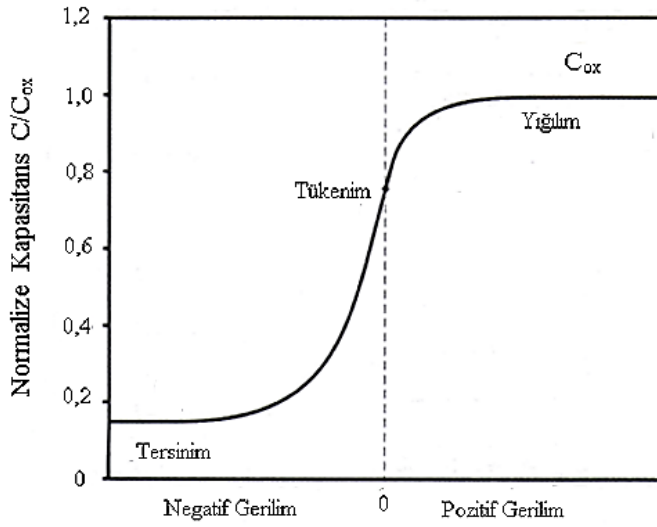
Şekil 2.6. Tükenim durumda yük dağılımları.

2.1.3. Tersinim

Metal plakaya $V_G \ll 0$ olacak şekilde daha büyük bir negatif gerilim uygulandığında, yarıiletkenin saf enerji seviyesi (E_i) Fermi seviyesinin altına iner. Yarıiletkenin enerji bantları gittikçe daha fazla bükülür (Şekil 2.4.c). Yarıiletken arayüzeyinde elektron yoğunluğu azaldıkça yüzeydeki deşik yoğunluğu artar. N-tipi yarıiletkenin p-tipi yarıiletken gibi davranmaya başladığı bu durum, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak açıklanmaktadır. Tersinim durumu Şekil 2.7’de verilmiştir. N-tipi MIS yapıda meydana gelen bu durumları içeren C-V eğrisi Şekil 2.8’de verilmiştir.



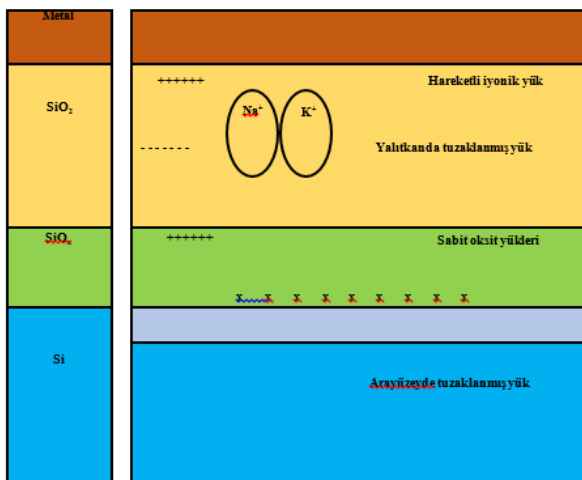
Şekil 2.7. Tersinim durumda yük dağılımları.



Şekil 2.8. İdeal MIS yapının C-V eğrisi.

2.2. Gerçek MIS Yapı

İdeal bir MIS yapı için iş fonksiyonu farkı ϕ_{ms} sıfırdır. Ancak gerçek MIS yapı için ϕ_{ms} , alttaş katkı yoğunluğu, kapı elektrotu ve sıcaklığa bağlı olarak sıfır değildir. Ayrıca, oksidasyon kaynaklı yapısal kusurlar ve arayüzeydeki kopmuş bağlar nedeniyle oluşan arayüzey yükü, oksitte iyonik safsızlıklar nedeniyle hareketli iyonik yük, oksitte tuzaklanmış yük, yapısal kusurlardan dolayı sabit oksit yükü MIS yapının ideal durumdan sapmasına neden olurlar. Şekil 2.9'da gösterilen yalıtkan/yarıiletken sistemde sabit oksit yükü, hareketli oksit yükü, oksit tuzak yükü ve arayüzey tuzak yükü olmak üzere dört genel yük türü vardır [8,24,25].



Şekil 2.9. Gerçek MIS yapıdaki yükler.

2.2.1. Arayüzey durumları

Arayüzey durumları yani tuzakları, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde bulunur ve sabit yüklerin aksine, güçlü bir alan bağımlılığına sahiptir. Arayüzeyde tuzaklanmış yükler yapısal kusurlar, oksidasyon kaynaklı kusurlar, metal safsızlıkları/kirlilikleri veya radyasyonun neden olduğu kusurlardan kaynaklanan pozitif veya negatif yüklerdir. Sabit yük veya tuzaklanmış yükten farklı olarak, arayüzeyde tuzaklanmış yük, yarıiletken ile elektriksel iletişim halindedir. Arayüzey tuzakları, yüzey potansiyeline bağlı olarak şarj veyadeşarj olabilir. Bu tuzaklanmış yük, yüzey durumları, hızlı durumlar ve arayüzey durumlar olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca, iletim bandındaki elektronlar ve valans bandındakideşikler olmak üzere bu serbest yüklerin çok küçük bir kısmı, yapısal kusurların (atomik boşluklar gibi) veya atomik safsızlıkların varlığından kaynaklanan izin verilen enerji seviyelerini işgal edebilir. Bu enerji seviyeleri genellikle "tuzaklar" olarak bilinir ve elektronları veyadeşikleri yakaladıklarında yarı kararlı durumlar oluştururlar. Bir başka deyişle, bu tuzaklar valans ve iletim bandı arasında yani yarıiletkenin yasak bant aralığı içinde yer alan enerji seviyeleridir ve yarıiletken ile yük alışverişi yapabilir. Bu yük alışverişi arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimine neden olur. Bu değişim, MIS yapının ideal C-V eğrisinde kaymaya neden olur.

2.2.2. Sabit oksit yükleri

Sabit oksit yükleri, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyine yakın bir pozitif yüküdür. Oksidasyon süreciyle ilgili olan yük yoğunluğu, oksidasyon ortamına ve sıcaklığına, soğutma koşullarına ve yarıiletkenin yönelimine bağlıdır. Sabit oksit yükü, yarıiletken ile elektriksel iletişimde değildir. Sabit oksit yükü, Q_F , oksidasyon sıcaklığına bağlıdır. Oksidasyon sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, Q_F o kadar düşük olur. Oksidasyondan sonra nitrojen veya argon ortamında tavlایarak Q_F 'yi düşürmek mümkündür.

2.2.3. Oksitte tuzaklanmış yükler

Bu pozitif veya negatif yük, oksit içinde hapsolmuşdeşiklerden veya elektronlardan kaynaklanıyor olabilir. Bu yükler kimyasal yapı bozukluklarından, iyonlaştırıcı radyasyondan, Fowler-Nordheim tüneli veya diğer mekanizmalardan kaynaklanabilir. Sabit yükün aksine, oksitte tuzaklanmış yük bazen düşük sıcaklık ($<500^\circ\text{C}$) işlemleriyle tavlınır, ancak nötr tuzaklar kalabilir. Radyasyon oksitte elektron-boşluk çiftleri meydana getirir ve

bu elektronların ve/veya deşiklerin bazıları daha sonra oksit içinde tuzaklanabilirler. Bununla beraber tünelleme ile elektron ve deşik enjekte edildiğinde bunlar yalıtkan içerisinde de tuzaklanabilirler [25,26].

2.2.4. Hareketli iyonik yük

Hareketli iyonik veya oksit yüklere Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ gibi iyonik safsızlıklar neden olur. Negatif iyonlar ve ağır metaller bu yüke katkıda bulunabilir. Bu yükler, kimyasal temizleme aşamasında faydalanan kimyasalların bu iyonları içermesi ve oksitleme gazındaki safsızlıklar gibi sebeplerden ileri gelmektedir. Ayrıca bu yükler, C-V eğrisinin kaymaya sebep olurlar

2.3. Arayüzey Tuzak Yoğunluğunun Belirlenmesi

Arayüzey tuzakları veya durumları olarak da bilinen arayüzeyde tuzaklanmış yük, yarıiletken/yalıtkan arayüzeyindeki kırık bağlara atfedilir. Verici arayüzey tuzağı dolu ise yani E_F 'nin altındaki verici arayüzey tuzakları elektronlar tarafından işgal edilirse nötr olan bu tuzak elektron vererek pozitif yüklü olur. Eğer alıcı tuzak boş ise tuzak nötr durumdadır ve bir elektron alarak negatif yüklü olur. Arayüzey durumları, MIS yapının elektriksel karakteristiklerini olumsuz yönde etkilemektedir. MIS/MOS yapıdaki arayüzey tuzakları belirlemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır.

2.3.1. Yüksek-düşük frekans kapasitans (C_{HF} - C_{LF}) yöntemi

Yüksek-düşük C-V tekniğinde, C_{LF} ve C_{HF} kapasitansları iki frekansta (ω_{LF} ve ω_{HF}) kapı voltajının bir fonksiyonu olarak ölçülür. Arayüzey tuzakları a.c. frekansını takip edemezse, kapasitansa katkıda bulunmazlar. Bununla birlikte, arayüzey tuzakları, yavaş değişen d.c. öngerilimi takip edebilir. Ölçülen LF ve HF, C-V verileri kullanılarak arayüzey tuzak yoğunluğu (D_{it}) şu şekilde verilir:

$$D_{it} = \frac{C_{ox}}{q^2} \left(\frac{C_{lf}/C_{ox}}{1-C_{lf}/C_{ox}} - \frac{C_{hf}/C_{ox}}{1-C_{hf}/C_{ox}} \right) \quad (2.7)$$

Burada C_{ox} oksit kapasitansıdır.

2.3.2. İletkenlik metodu

Nicollian ve Goetzberger tarafından önerilen iletkenlik yöntemi, D_{it} 'i belirlemek için kullanılan en hassas yöntemlerden biridir [27]. Bu yöntem, d.c. öngerilim ve frekansın bir fonksiyonu olarak bir MIS yapının eşdeğer paralel iletkenliğinin, G_p , ölçülmesine dayanır. Paralel iletkenlik aşağıdaki eşitlik ile

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega G_m C_{ox}^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{ox} + C_m)^2} \quad (2.8)$$

hesaplanır. Elde edilen G_p/ω değerlerinin frekans ile değişim eğrisi $\omega\tau=1$ durumunda bir maksimum verir. Bu maksimuma karşılık gelen G_p/ω değeri kullanılarak arayüzey durum yoğunluğunun (D_{it} veya N_{ss}) büyüklüğü,

$$N_{ss} = \frac{(G_p/\omega)_{max}}{0.402qA} \quad (2.9)$$

eşitliği ile hesaplanır.

3. RADYASYON

Bir elektronu atomdan koparmak için yeterli enerjinin verildiği süreç iyonlaşma olarak tanımlanır. İyonlaştırıcı radyasyon, madde tarafından radyasyon soğurulduğunda bir atomdan bir yörünge elektronunun koparılmasına neden olan doğal veya yapay kaynaklardan üretilen enerjidir. İyonlaştırıcı radyasyon iyonlaştırıcı olmayan radyasyondan daha fazla enerjiye sahiptir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon ise ultraviyole (UV), görünür ışık, kızılötesi (IR), mikrodalga (MW) ve radyo frekansı (RF) spektrumunu içerir. İyonlaştırıcı radyasyon, alfa ve beta parçacıkları, gama ışınları ve X-ışınları olarak gruplandırılır. Alfa ve beta parçacıkları elektromanyetik spektrumunda yer almaz, ancak yüksek enerjili parçacıklardır. X ve gama ışınları çok yüksek frekanslara ve çok kısa dalga boylarına sahiptir.

İyonizasyon (iyonlaşma), maddenin elektronları ile yüklü parçacıkların çarpışması neticesinde elektron-deşik çiftlerinin oluşmasını ifade eder. Bu çarpışma sonucunda valans elektronlarının iletkenlik bandına geçebilecek kadar yeteri kadar enerjiye sahip olmalıdır. İyonizasyon etkisi ile çarpışan parçacıklar enerji kaybeder ve bu enerji kaybı meydana gelen elektron-deşik çiftlerinin sayısı ile orantılıdır [28,29].

Herhangi bir madde radyasyon ışınına yani yüksek enerjili fotonlara maruz kaldığında, radyasyonun bir kısmı tamamen soğurulabilir, bir kısmı saçılabilir ve bir kısmı da hiçbir etkileşim olmadan doğrudan geçebilir. Radyasyon demetindeki parçacıklar malzemedeki parçacıklara çarpar veya dururlar ya da saçılırlar. Madde içinde hareket eden bir parçacığın enerji kaybedebileceği iki süreç vardır. Birinci süreçte, parçacığın malzeme ile birçok etkileşimi sonucunda parçacık neredeyse sürekli enerji kaybeder. İkinci süreçte, parçacık, tek bir çarpışmada tüm enerjisini kaybedene kadar, hiçbir etkileşim olmaksızın malzeme içinde hareket eder.

Radyasyon ile maddenin etkileşimi neticesinde, radyasyona bağlı oluşan hasarlar yer değiştirme hasarı ve iyonlaşma hasarı olarak tanımlanır [15]. Yüksek enerjili parçacıklar ile malzemedeki elektronlar arasında bir etkileşim olursa, iyonlaşma meydana gelir. Parçacıklar ve çekirdekler arasında elastik bir etkileşim olursa, enerji bu çekirdeklere iletilir ve atomik yer değiştirme meydana gelir. Her iki etkileşim türü de kusurlar üretebilir. Atomik yer değiştirme şeklindeki kusurlar, çekirdeğe iletilen enerji yeterince büyük olduğunda

doğrudan ortaya çıkar. Yalıtkan malzemelerde iyonlaşma hasarı meydana geldiğinde kusurlar üretilir. Yarıiletken malzemeler için, radyasyon kaynaklı birincil kusurlar, boşlukları ve arayerleri yani noktasal kusurları içerir. Bir boşluk (veya iyonik bir katıdaki boşluk çifti) bazen Schottky kusuru olarak adlandırılır. Arayer kusurları, genellikle bir atomun bulunmadığı kristal yapıda bir yeri işgal eden atomlardır [15,30].

3.1. Yer Değiştirme Hasarı

Atomların orijinal konumlarından yer değiştirmesi, elektriksel olarak aktif kusurların oluşumuna neden olur. Bu kusurlar, boşluklar, arayer atomları, Frenkel kusurları (boşluk ile arayer atomunun meydana getirdiği kusur) veya kusur kümeleri gibi nokta kusurları olabilir. Yerdeğiştirme kusurları kristalin örgü yapısında kalıcı hasarlara neden olabilir. Atomik yer değiştirmenin oluşması yani bir atomu bulunduğu konumundan çıkarmak ve bir arayer bölgesine yerleştirmek için, gelen parçacıktan iletilen enerjinin eşik enerjisi olarak tanımlanan enerjiden yani minimum değerden daha büyük olması gerekir. Bu eşik enerjisi, yer değiştirme atomlarını komşularına bağlayan bağları kırmak için gereken enerjidir. Madde ile etkileşen parçacıklar örgüden bir atom sökerek boşluk oluşturabilir. Bu durum, kristalde örgü uyumunu bozduğu için “örgü kusuru” olarak ifade edilir [8,30,31]. Yer değiştirme hasarının neden olduğu kusurlar, taşıyıcı ömrünü, serbest taşıyıcıların yoğunluğunu ve taşıyıcı hareketliliğini etkiler. Sonuç olarak, yer değiştirme hasarından kaynaklanan kusurlar, maddenin elektronik özelliklerini etkileyebilir.

3.2. İyonlaşma Hasarı

İyonlaştırıcı radyasyon atomik bağları kırar ve elektron-deşik çiftleri oluşturur. Radyasyon, enerjileri ışınlanan malzemenin bant aralığı enerjisinden daha büyük olan fotonlar veya elektronlar, protonlar veya atomik iyonlar gibi parçacıklardır. İyonlaştırıcı radyasyon tarafından oluşturulan yaygın kusurlar, örgü kusurları ve Frenkel kusurlarıdır [17]. İyonizasyondan elektron-deşik çiftlerinin oluşturulması, sırayla, Frenkel çiftlerinin (yani boşluk-arayer çiftlerinin) oluşturulmasını tetikleyebilir. Bu durum, gelen radyasyondan malzemeye iletilen enerji atomları yer değiştirdiğinde meydana gelir, böylece Frenkel kusurları oluşur. Yarıiletkenlerde iyonlaşma geçici bir süreçtir, çünkü ışınlama sona erdiğinde elektron-deşik çiftlerinin oluşumu durur. Işınlama sırasında, yarıiletken içinde üretim ve rekombinasyon süreçleri arasında sabit bir denge kurulur. Bir elektrik alanı varsa, doz hızı ile orantılı ilave bir fotoakım ölçülebilir. Yalıtkanlarda, iyonlaştırıcı radyasyon önce

bir elektron-deşik çiftinin oluşmasına neden olur. Fotojenerasyon deşikler, yalıtıkta iyonlaşma hasarına neden olacak şekilde tuzaklanabilir [17]. Deşik tuzaklama, yalıtıkta elektron hareketliliği ile deşik hareketliliği arasındaki büyük fark, tuzaklama bölgelerindeki farklılıklar ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde her iki taşıyıcı için potansiyel engellerdeki farklılıklar gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanmaktadır. Deşik tuzaklama, yalıtkan içinde tuzaklanmış yüklere ve arayüzeyde arayüzey yüklerine veya tuzaklarına yol açar. Yalıtıkta yük birikmesi şeklindeki iyonlaşma hasarı toplam doz etkisi olarak adlandırılır. Yalıtkan tabakadaki bu yük birikimi, MOS teknolojisindeki en önemli hasar mekanizmalarından yani cihaz performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Üretilen elektron-deşik çiftlerinin sayısı, aygıt malzemesi tarafından soğurulan enerji miktarı ile doğru orantılı olduğundan, toplam hasar, cihaz tarafından alınan radyasyonun toplam dozu ile orantılıdır. Toplam doz arttıkça oksitte tuzaklanmış yüklerin miktarı ve arayüzey tuzaklarının sayısı artar.

3.3. Fotonların Madde İle Etkileşimleri

Gama ışınları, x ışınları ve ışık farklı enerjilere sahip fotonlardır. Fotonlar, atomik yer değiştirmeye ve iyonlaşmaya neden olacak şekilde madde ile etkileşime girebilir ve bunun gerçekleşmesi enerjileri tarafından belirlenir. Bir fotonun enerjisi frekans (ν) veya dalga boyuna (λ) bağlıdır ve $E=h\nu=hc/\lambda$ ile verilir, burada h ($=6.62 \times 10^{-34}$ J.s) Planck sabitidir ve c , ışığın boşluktaki hızıdır. Fotonlar enerjilerine ve malzemenin doğasına bağlı olarak madde ile çeşitli şekillerde etkileşirler. Fotonların madde ile etkileşime girdiği üç mekanizma, fotoelektrik etki (veya fotoelektrik absorpsiyon), Compton saçılması ve çift üretilimidir [30]. Foton enerjisine bağlı olarak, fotonlar üç mekanizmadan biriyle malzemede iyonlaşmaya neden olabilir.

Birinci tür etkileşim fotoelektrik etkidir. Bu etki, $h\nu$ enerjili gelen bir foton malzeme tarafından tamamen soğurulduğunda meydana gelir. Gelen foton daha sonra madde ile etkileşime girer. Enerjisini bir yörünge elektronuna aktarır ve atomdan bir elektron koparır.

Düşük enerjili fotonlar ($h\nu < 0,1$ MeV), elektron-deşik çiftleri oluşturmak için fotoelektrik etki yoluyla etkileşime girer. Foton enerjisi artarsa veya atom numarası azalır, fotoelektrik etkileşim olasılığı azalır.

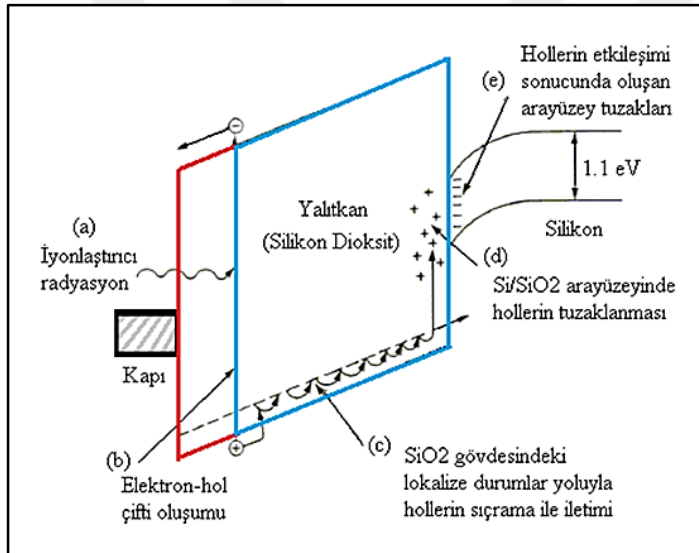
İkinci tür etkileşim, Compton saçılmasıdır. Bu, bir fotonun bir elektronla çarpışmasından kaynaklanır ve 100 keV ile 10 MeV arasında enerjiye sahip fotonlar için temel soğurma mekanizmasıdır. Burada, gelen foton enerjisi, valans elektronunun bağlanma enerjisinden daha büyüktür. Etkileşen fotondan gelen enerji, bir atomdan bir elektronun fırlatılmasına neden olur. Böylece, daha düşük enerjili yeni bir foton yayınlanır. Bu yeni foton daha sonra malzeme ile fotoelektrik olarak etkileşebilir. Sonuç olarak, foton enerjisi kısmen saçılır ve kısmen soğurur. Foton enerjisi arttıkça Compton saçılması olasılığı azalır ve soğurucu malzemenin atom numarasından nispeten bağımsızdır.

Üçüncü etkileşim türü, çift üretimidir. Gelen fotonların enerjisi 1,02 MeV'den fazla olmalıdır. Çift üretimi, gelen bir fotonun yok olmasına ve bir elektron-pozitron çiftinin oluşmasına neden olur. Bir pozitron, pozitif yüklü bir elektrondur ve çok kısa bir ömre sahiptir. Elektron-pozitron çiftinin toplam enerjisi $h\nu$ 'ye eşittir. Derin ultraviyole (300 nm'nin altındaki dalga boyu bölgesi) fotonları için, fotoelektrik etki ve iyonlaşma hasarı baskın radyasyon etkileridir. Oksitte tuzaklanmış yükler ve arayüzey tuzakları gibi iyonizasyon hasarının neden olduğu kusurlar, cihaz performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

3.4. MOS Yapılar Üzerindeki Radyasyon Etkileri

İyonlaştırıcı radyasyonun elektronik cihazlar üzerinde iki ana etkisi vardır. Bunlar, yalıtkan tabakalardaki kusurların oluşması ve yalıtkan tabakalarda tuzaklanmış yük oluşumudur. Radyasyon yalıtkan tabakada yük birikimine ve oksit/yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumların artmasına sebep olur. Yalıtkan oksit tabakası, ışınlamadan sonra net bir pozitif yük kazanır. Ancak, ışınlamadan sonra arayüzey durumlarının yük durumu, cihaza uygulanan gerilime bağlıdır. Çünkü arayüzey durumları yarıiletken ile yüklerini serbestçe değiş tokuş edebilir. Radyasyon kaynaklı bu değişiklikler, cihazın elektriksel parametrelerini etkiler. MOS yapılar üzerindeki iyonlaştırıcı radyasyon etkileri, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, ışınlamadan sonra meydana gelen dört aşamadan oluşmaktadır [17,31,32]. İlk aşamada, iyonlaştırıcı radyasyon elektron-deşik çiftlerinin oluşması için yalıtkan ile etkileşime girer. Radyasyonun türüne ve uygulanan elektrik alanının büyüklüğüne bağlı olarak, bu taşıyıcılar oksit içinde yeniden birleşebilir veya ayrılırlar ve oksitten farklı hızlarda taşınırlar. İkinci aşamada, hareketli elektronlar, uygulanan alan tarafından oksitten dışarı doğru itilir. Buna karşılık, deşikler çok düşük bir hareketliliğe sahiptir ve tuzak atlama işlemi yoluyla oksit-

yarıiletken arayüzeyine doğru taşınır. Bu deşik taşıma işlemidir. Üçüncü aşama, deşik yakalama işlemi olarak tanımlanır. Deşiklerden bazıları oksit içinde kolayca tuzaklanır ve bu da radyasyonun neden olduğu oksit yüklerinin birikmesine yol açar. Diğer deşikler elektronları yakaladıkları ve arayüzey tuzakları oluşturdukları oksit-yarıiletken arayüzeyine doğru sürüklenir. Arayüzeye yakın fakat halen oksitte bir sabit pozitif yük verebilen deşiklerin bir kısmı da tuzak oluşturabilir Dördüncü aşama, radyasyon kaynaklı yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumlarının yani tuzaklarının oluşmadır. Radyasyon kaynaklı oksitte tuzaklanmış yükler ve arayüzey durumları, bir MOS cihazının kapasitans-voltaj (C-V) karakteristiklerinde bozulmalara neden olur. Oksitte tuzaklanmış yükler C-V eğrisini negatif yönde kaydırır ve arayüzey tuzakları C-V eğrisini uzatır veya genişletir.



Şekil 3.1. MOS yapıdaki radyasyon etki süreçleri.

3.5. Radyasyon Birimleri

Soğrulan doz, radyasyon ile etkileşen bir maddenin birim miktarının soğurduğu enerjidir. Bir başka ifadeyle, toplam iyonlaştırıcı doz, hedef malzemede iyonlaşma sürecinde depolanan enerji miktarıdır. En sık kullanılan radyasyon birimleri rad ve gray (Gy)'dir. 1 rad, radyasyon tarafından bir gram malzemede biriken 100 erg enerjiye karşılık gelir.

1 Gy = 1 J/kg'dır. Buna göre, bir rad, 100 Gy'ye karşılık gelir.



4. DİELEKTRİKLER

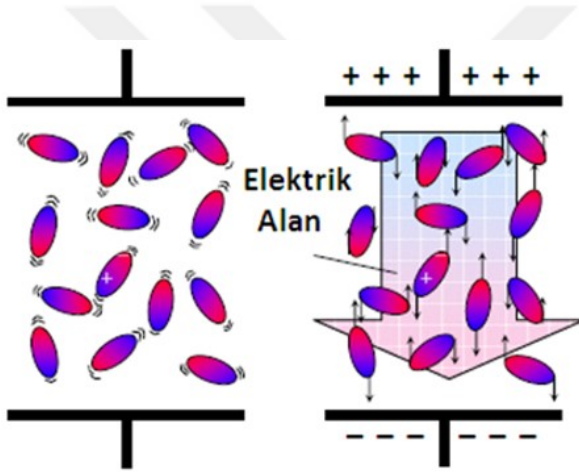
Dielektrik malzemeler, basit elektrik yalıtımından sensörlere ve devre bileşenlerine kadar birçok uygulamada kullanılmaktadır. Dielektrikler, elektriksel iletkenliği çok düşük enerji bant aralığı büyük olan malzemelerdir. Dielektrik, taşıyıcıların hepsinin kristal atomlarına çok sıkı bağlı olduğu yani serbestçe hareket edemediği bir malzemedir. Dielektrikler yük depolama özelliğine sahiptir [12-14]. Yalıtkan ise, elektrik iletimi için serbest yük taşıyıcıya yani elektronlara sahip olmayan yani sıfır iletkenliğe sahip bir malzemedir. Genel olarak, yalıtkanların enerji bant aralığı değeri 3 eV'den büyüktür. 0 K'da değerlik bandı tamamen doludur ve iletim bandı tamamen boştur. Yarıiletkenler ise, sınırlı sayıda elektronun iletim bandına uyarılmasına izin veren, yaklaşık 3 eV'dan daha küçük bir bant aralığına sahip malzemelerdir.

Tüm dielektrikler yalıtkandır, ancak bu durum yalnızca statik elektrik alanı koşulları yani sıfır frekans veya dc elektrik alanı altında geçerlidir. Yüksek frekanslı ac elektrik alan altında, bir dielektrik yüksek frekanslarda dielektriklerde baskın olan bir iletim türü olan polarizasyon yoluyla iletme katkıda bulunabilir. Başka ifadeyle, dielektrik malzeme bir elektrik alana maruz kaldığında, polarize olan ve iletkenliğe neden olan bazı serbest yük taşıyıcılarına sahiptir [33,34]. Dielektriklerdeki elektrik yükleri, uygulanan bir elektrik alanına tepki verir. Ancak, bir yalıtkan bu özelliğe sahip değildir. Bu nedenle, tüm yalıtkanlar dielektrik değildir.

4.1. Dielektrik Kutuplanma (Polarizasyon)

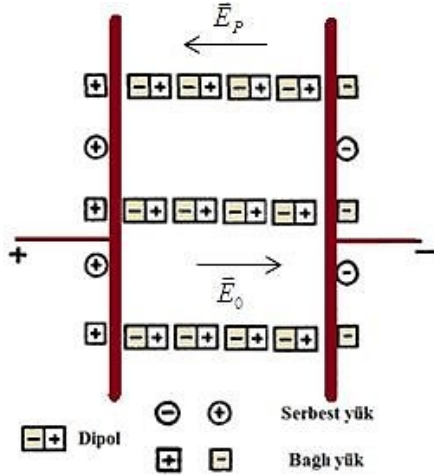
Dipoller birçok malzemenin elektrik yapısının temel öğeleridir. Bir dipol iki şekilde düşünülebilir. Biri, zıt yüklere sahip iki ayrı yüklü parçacık birbirinden belirli bir mesafeyle ayrılırsa, bir dipol moment (μ) ortaya çıkar. Diğer, belirli bir bölgedeki pozitif yükün merkezi ile negatif yükün merkezi aynı konumda değilse, bir dipol moment ortaya çıkar. Dipol moment, vektörel bir nicelik ve $\mu = qr$ ile tanımlanır. Bir dipol momentinin yönü, iki yükü birbirine bağlayan çizgi boyunca uzanır ve negatif yükten pozitif yüke doğrudur. Bir malzemenin polarizasyonu, birim hacim için toplam dipol momentidir ve $P = \Sigma \mu V$ ile tanımlanır. $\Sigma \mu$ bir vektör toplam olduğundan, bir malzeme herhangi bir net polarizasyona sahip olmadan dipoller içerebilir.

Dielektrik kutuplanma yani polarizasyon, uygulanan bir dış elektrik alan nedeniyle bir malzemede bir dipol momenti oluştuğunda meydana gelir. Dielektriğin pozitif ve negatif yükleri uygulanan alternatif elektrik alan etkisiyle zıt yönlerde sonsuz küçük yer değiştirir. Bu yer değiştirme yük merkezlerinin kaymasına neden olur. Böylece elektriksel polarizasyon meydana gelir. Başka ifade ile, uygulanan dış elektrik alan, dielektrik yük bakımından nötr olmasına rağmen dielektriği polarize olur. Polarizasyon sonucunda elektrik dipol momentleri oluşur. Polarizasyon ile oluşan dipoller, malzeme yüzeyinde yük birikimi meydana getirdiği için, dielektrik malzemeler özellikle kondansatör gibi önemli devre elemanının yapımında kullanılmaktadırlar. Elektrik alanda dipollerin yönelimi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Elektrik alanda dipollerin yönelimi

İki iletken paralel plakalı kondansatörün plakaları arasına bir dielektrik malzeme konularak polarizasyon olayı açıklanabilir. Kondansatörlerde dielektrikler iletken plakaların temas etmesini önlemek, yüksek kapasitans sağlamak, elektrik alan şiddetini azaltarak etkin kapasitansı artırmak ve yüksek voltajda çalışma sırasında kıvılcım nedeniyle kısa devre olasılığını azaltmak için kullanılır. Dielektrik malzemeli paralel plakalı kondansatördeki yükler Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Dielektrik malzemeli kondansatördeki yükler

Malzemedeki yükler, plakaların neden olduğu elektrik alana bir tepki verecektir. Dielektrik polarize edildiğinde, pozitif yükler alan yönünde negatif yükler ise alana zıt yönde yönelirler. Bu durumda dipol momentleri oluşur ve elektrik alana paralel olacak şekilde yönelirler. Ayrıca bu yer değiştirme dielektrik içinde dış alanı (E_0) azaltan bir iç elektrik alanı (E_p) oluşturur. Dielektrik içindeki net elektrik alan bu iki alanın vektörel toplamına eşit olacaktır.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}_p \quad (4.1)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_0} \quad (4.2)$$

burada, σ plakalar üzerindeki serbest yüzey yük yoğunluğu ve σ_p kutuplanma yük yoğunluğudur. Aynı zamanda bileşke alan,

$$E = \frac{E_0}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_0} \quad (4.3)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, ϵ' dielektrik malzemenin dielektrik sabitini/geçirgenliğini ve ϵ_0 ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m) ise boşluğun dielektrik geçirgenlik katsayısını temsil etmektedir. ϵ' , her zaman 1'den büyük bir sabittir. Eş. 4.2 ve Eş. 4.3 kullanılarak kutuplanma yük yoğunluğu,

$$\sigma_p = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon'}\right) \quad (4.4)$$

olarak elde edilir. Kutuplanma yük yoğunluğu yüzey yük yoğunluğundan küçüktür. Dielektrik madde yoksa $\epsilon' = 1$ ve böylece $\sigma_p = 0$ olur. Dış elektrik alan altında bir dielektrik malzemenin polarizasyonu (P),

$$\vec{P} = \epsilon_0 \vec{E} \chi_e \quad (4.5)$$

ile ifade edilir. Burada, $\chi_e (= \epsilon' - 1)$ elektriksel duygunluktur. Bu parametre, malzemenin elektriksel geçirgenliğini belirler. Bir elektrik alan ile etkileşime giren bir malzemenin elektrik yer değiştirmesi (D),

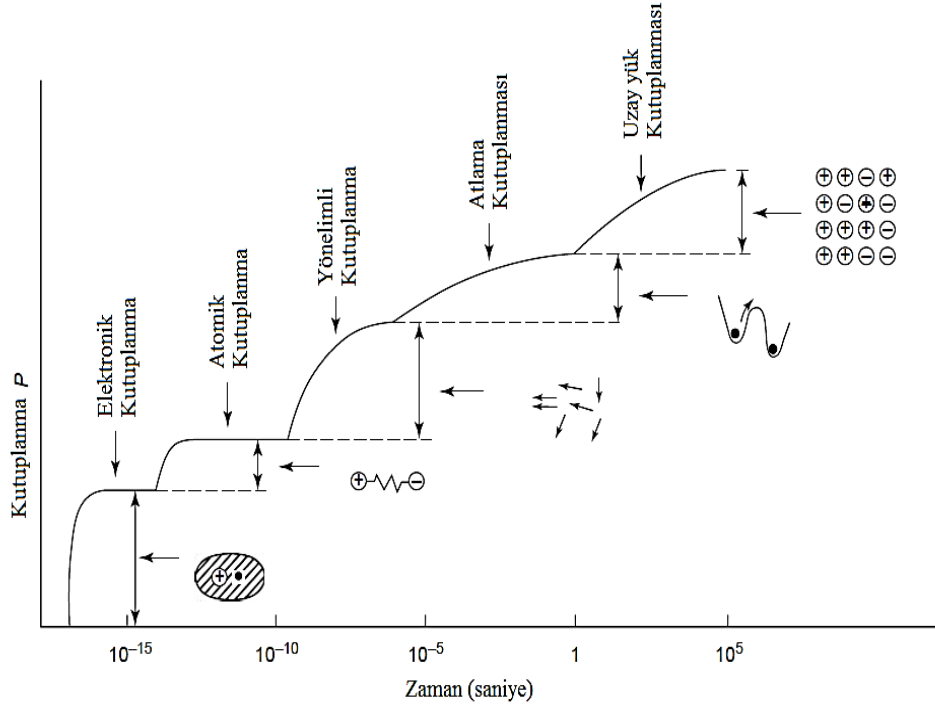
$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \epsilon' \vec{E} \quad (4.6)$$

ile ifade edilir. Burada, $\epsilon_0 E$ dielektrik yokken elektrik yer değiştirmeyi temsil etmektedir. Dielektrik kayıplar, E, D'nin bir fonksiyonu olmadığında meydana gelir.

Polarizasyon sonucunda, dielektriğin kondansatör plakalarına bakan yüzeylerinde indüklenmiş yüzey yükleri yani bağlı yükler olarak adlandırılan zıt işaretli yükler meydana gelir. Dielektrik nötr olduğu için, her iki yüzeyde oluşan yük miktarları eşit olacaktır. Bir iletken de serbest yükler bağlı değil ancak polarize olmuş bir dielektrikteki yükler bağlıdır. Dielektrik polarizasyon sırasında üretilen elektrik alan, frekansa bağlıdır ve bu da dört dielektrik polarizasyon mekanizmasına yol açar. Bunlar, elektronik polarizasyon, atomik (iyonik) polarizasyon, yönelimli (dipolar) polarizasyon ve arayüzey (uzak yük) polarizasyonudur [35,36].

4.2. Kutuplanma Mekanizmaları

Her bir dielektrik kutuplanma mekanizması rezonans ve durulma frekans karakteristiğine sahiptir. Elektrik alanın frekansı dipolün dönme frekansına eşit ise rezonans durumu gözlenir. Ancak dipolün dönme frekansı alan frekansının gerisinde kalıyorsa bu durumda durulma olayı meydana gelir. Rezonans durumu elektronik veya atomik kutuplanma mekanizmalarında, durulma (relaksasyon) etkisi ise yönelimli kutuplanmada görülmektedir. Kutuplanma türlerinin zaman ile değişimi Şekil 4.3'de verilmiştir [14].



Şekil 4.3. Kutuplanma türlerinin zaman ile değişimi

4.2.1. Elektronik kutuplanma

Bu mekanizma, elektrik alanın moleküldeki elektronlarla etkileşiminin neden olduğu dipol momentinden kaynaklanır. Atoma bir dış alan uygulandığında, dipol momenti oluşacak şekilde elektronlar yörüngelerini değiştirirler. Dış elektrik alanın etkisiyle çekirdeğin merkezi ile elektron bulutunun merkezi birbirinden ayrıldığı süreçtir. Elektronların atom çekirdeğine göre yer değiştirmesi nedeniyle oluşan elektronik polarizasyon, morötesi ve görünür bölge frekanslarında yani $\sim 10^{15}$ Hz gibi yüksek frekanslarda baskındır. Aynı zamanda bu süreç, 10^{-15} s gibi çok kısa bir sürede meydana gelir ve geçicidir.

4.2.2. İyonik (atomik) kutuplanma

İyonik kutuplanma, bir malzemenin dielektrik geçirgenliğine katkıda bulunan bir mekanizmadır. Bu polarizasyon tipik olarak NaCl ve KCl gibi iyonik kristal elementlerde oluşur. Negatif iyonların dipol momentleri pozitif iyonlar tarafından sıfırlandığı için, dış bir elektrik alanın yokluğunda bu malzemelerin içinde net polarizasyon yoktur. Bununla birlikte, bir dış alan uygulandığında, iyonlar yer değiştirir ve bu da indüklenmiş bir polarizasyona yol açar. Elektrik alan nedeniyle iyonlar yer değiştirir. Bu durumda, birbirine yakın pozitif ve negatif iyonlar zıt yönlerde hareket ederek aralarındaki bağlar gerilir. Atomik polarizasyon, kızılötesi veya ona yakın bölge frekanslarında baskındır.

4.2.3. Yönelimli (dipolar) kutuplanma

Yönelimli kutuplanma, dış elektrik alan yokluğunda malzemede kalıcı bir dipol momenti olduğunda ortaya çıkar. Bu malzemeler polar dielektrik olarak adlandırılır ve asimetrik moleküllerden oluşur. HCl ve H₂O gibi moleküllerin yük dağılımları çakışık değildir ve bu da molekülün dipolar olmasına neden olacaktır. Elektrik alan, rasgele yönelmiş dipol momentleri alan yönünde yönelmeye zorlayacaktır. Dipolar olarak da adlandırılan bu kutuplanma, radyo frekans bölgesinde gerçekleşir.

4.2.4. Arayüzey (uzay yük) kutuplanması

Elektronik, atomik ve dipolar polarizasyon, yükler atomlarda veya moleküllerde yerel olarak bağlandığında meydana gelir. Arayüzey veya uzay yük polarizasyonu, iki malzeme arasındaki bir arayüzeyde veya bir malzeme içindeki iki bölge arasında bir dış alan nedeniyle bir yük birikimi neticesinde meydana gelir. Bu, bir bileşik dielektrik olduğunda veya bir dielektrik malzemeye bağlı iki elektrot olduğunda meydana gelebilir. Arayüzey polarizasyon genellikle amorf veya polikristal katılarda gözlenir. Uygulanan elektrik alan, dielektrik malzemenin yalıtkan özelliklerinden dolayı bir yük dengesizliğine neden olacaktır. Bununla birlikte, dielektrikteki hareketli yükler, yük nötrlüğünü korumak için hareket edecektir. Uygulanan düşük frekanslı alternatif alan, yük taşıyıcılarının malzeme boyunca belli bir uzaklığa kadar yer değiştirmesine neden olur. Malzeme arayüzeyleri boyunca hareket eden yüklerin hareketi engellendiği zaman bu yükler malzemenin arayüzeyinde tuzaklanabilir. Bu da arayüzey polarizasyonuna neden olur.

4.3. Dielektrik Parametreler

Dielektrik özelliklerin ölçümü, reel ve sanal/imaşiner kısımdan oluşan kompleks dielektrik geçirgenliğin ölçümlerini içerir. Kompleks dielektrik geçirgenlik veya sabiti aşağıdaki gibi verilir.

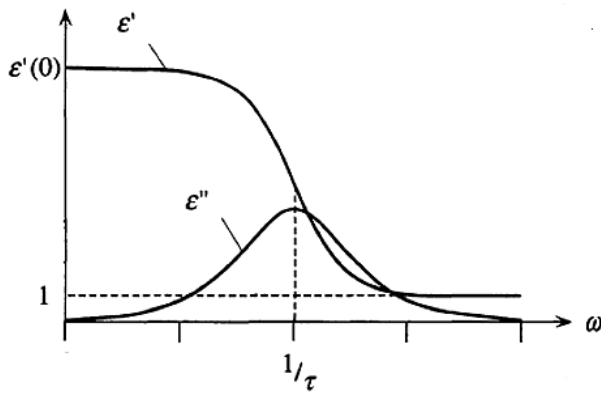
$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (4.7)$$

Burada ε' ve ε'' frekansa bağlıdır. Sırasıyla ε' ve ε'' , kompleks dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısmı olup dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp olarak adlandırılmaktadır. Dielektrik sabiti, malzemede depolanan dış bir elektrik alanından kaynaklanan enerji miktarının bir

ölçüsüdür. Kayıpsız malzemeler için sanal kısım sıfırdır ve kayıp faktörü olarak da bilinir. Dielektrik kayıp, dış bir elektrik alan nedeniyle malzemeden kaybedilen enerji miktarının bir ölçüsüdür. Dielektrik kayıplar frekansa ve dielektrik malzemeye bağlıdır. Ayrıca, Dielektrik kayıp tanjant (kayıp faktörü) olarak adlandırılan terim kompleks geçirgenliğin sanal kısmının reel kısmına oranına eşittir [33,34,37,38] ve aşağıdaki gibi verilir.

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4.8)$$

Frekansa bağlı dielektrik sabiti $\epsilon'(\omega)$ ve dielektrik kayıp $\epsilon''(\omega)$, frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülebilir. Dielektrik sabiti ve dielektrik kaybın açısal frekans ($\omega=2\pi f$) ile değişimi Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Dielektrik sabiti ve dielektrik kaybın açısal frekans ile değişimi

Düşük frekanslarda, $\epsilon'(\omega)$ statik dielektrik sabiti $\epsilon'(0)$ 'a eşittir ve $\epsilon''(\omega)$ sıfırdır. Frekans arttıkça, $\epsilon'(\omega)$ ilk başta oldukça yavaş sonra hızlı bir şekilde azalmaktadır. Dielektrik kayıp, ilk önce frekans arttıkça artmakta, sonra $\omega\tau=1$ veya $\omega=1/\tau$ durumunda bir maksimum değere ulaşmakta ve daha sonra frekans arttıkça azalmaktadır. Dielektrik kaybın göstermiş olduğu bu pik, aynı zamanda durulma (relaksasyon) piki olarak adlandırılır. Bu kayıp piki dipol durulmalarının maksimum olduğu noktayı göstermektedir. Bu kayıp pikine karşılık gelen frekans değeri dielektrik durulma frekansı (f) olarak tanımlanır. Durulma frekansı, durulma süresi ile ters orantılıdır. Dielektrik durulma zamanı ise $\tau=1/2\pi f$ ile verilir. Durulma süresi, bir malzemede bulunan dipollerin hareketliliğinin bir ölçüsüdür. Dielektrik durulma, bir dielektrik ortamda değişen bir elektrik alanına göre moleküler polarizasyondaki gecikmeden kaynaklanır. Elektrik alan altındaki dipollerin hareketi, çarpışmalara ve dolayısıyla iç

sürtünmeye neden olur. Böylece moleküller, bu durulma süresi sabiti ile polarizasyonun son durumuna ulaşana kadar yavaşça döner. Elektrik alan kaldırıldığında dipoller aynı zaman sabiti ile eski haline döner. Durulma frekansının üzerinde, elektrik alan dipol dönüşünü etkilemek için çok hızlı olduğundan ve yönelimli polarizasyon kaybolduğundan hem ϵ' hemde ϵ'' azalır.

4.4. Dielektrik Parametrelerin Belirlenmesi

Dielektrikteki dipol yönelimi, paralel plakalı bir kondansatöre alternatif (ac) bir $V = V_0 e^{i\omega t}$ gerilimi uygulandığında meydana gelir. Dielektrikli bir kondansatörün admitansı (Y) aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Y = G + i\omega C = G + i\omega(C_0 \epsilon^*) \quad (4.9)$$

Burada, $G (=1/R)$ ölçülen Kondüktans yani iletkenlik, $C (=C_0 \epsilon^*)$ dielektrikli kondansatörün ölçülen kapasitansı, $C_0 (= \epsilon_0 A/d)$ dielektriksiz kondansatörün hesaplanan kapasitansı ve ω ise uygulanan ac gerilimin açısal frekansıdır. Ayrıca, d numune kalınlığı, ϵ_0 , boş uzayın geçirgenliği ve A ise elektrot alanıdır. Eş. 4.7'de verilen ϵ^* ifadesi Eş. 4.9'da yerine yazılırsa,

$$Y = (G + \epsilon'' C_0) + i\epsilon' C_0 \omega \quad (4.10)$$

elde edilir. Admitansın reel ve sanal bileşenleri kullanılarak kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları ϵ' ve ϵ'' aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (4.11)$$

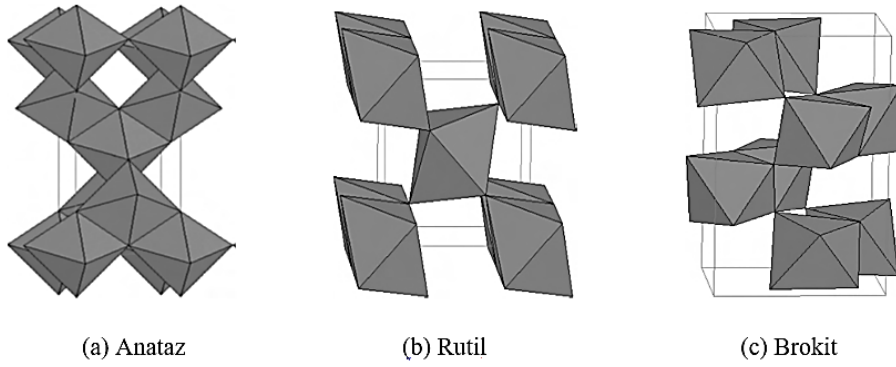
$$\epsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega R C_0} \quad (4.12)$$

5. DENEYSEL YÖNTEM

5.1. Titanyum Dioksitin (TiO_2) Özellikleri

Titanyum dioksit, TiO_2 kimyasal formülüne sahip kimyasal inorganik bir bileşiktir. Titanyum bir geçiş metali ve oksijen ise bir ametaldir. Çalışmalar, Ti-O bağının hem iyonik hem de kovalent karaktere sahip olduğunu göstermiştir. Titanyum, en yaygın metallerden biridir. Titanyum dioksit, titanyumun havadaki oksijenle reaksiyona girdiğinde oluşan doğal bir bileşiktir. Titanyum (IV) oksit veya titanya olarak da bilinen titanyum dioksit, doğal olarak oluşan titanyum oksittir. TiO_2 , suda çözünmeyen ancak konsantre asitlerde (hidroflorik asit, sülfürik asit, nitrik asit, klorik asit vb.) çözünen beyaz renkli ve parlak bir katıdır. 1.843 °C gibi son derece yüksek bir erime noktasına ve 2.972 °C kaynama noktasına sahiptir ve bu nedenle doğada katı halde bulunur. TiO_2 'nin UV ışığını soğurması nedeniyle saf beyaz olarak görünür. Ayrıca, tatsız, kokusuz ve toksit olmayan bir bileşiktir. Titanyum dioksit, yüksek bir dielektrik sabitine, yüksek bir geçirgenlik değerine, ayrıca elmadan bile daha yüksek bir kırılma indisine sahiptir. TiO_2 aynı zamanda bir yalıtıcıdır. Ayrıca, TiO_2 , benzersiz optoelektronik özelliklere ve yüksek kimyasal stabiliteye sahip bir yarıiletkenidir.

Titanyum dioksit, farklı kristal örgü yapılarına ve dolayısıyla değişen fiziksel özelliklere sahip üç modifikasyonda bulunur. Bunlar rutil, anataz ve brokit'tir. Fiziksel özellikleri bakımından birbirlerinden farklı olan rutil ve anatazdır [19]. Rutil ve anatazın kristal yapıları, oksijen atomlarının aralıklarına göre tanımlanabilir. Rutil oksijen atomlarının altıgen şeklinde dizildiği yani yerleştiği, anataz ise oksijen atomlarının kübik şeklinde dizildiği yapıdır. Anataz tetragonal, rutil tetragonal, brokit ortorombik kristal yapı halindedir [39-41]. TiO_2 'nin kristal yapıları Şekil 5.1'de verilmiştir. Oda sıcaklığında anataz rutil ve brokitin yasak enerji aralıkları sırasıyla 3,20; 3,02 ve 2,96 eV'dur. Düşük sıcaklıklar da kararlı olan anataz, yüksek sıcaklıklar da brokit fazına dönüşür. Brokit en kararsız yapıdır ve çok düşük sıcaklıklar da rutil faza dönüşür. Rutil faz, termodinamik olarak en kararlı formdur. Direkt bant aralığına sahip olan rutil formun dielektrik sabiti 89'dur. TiO_2 'in üç farklı fazından en yaygın kullanılanı rutil fazdır [42].



Şekil 5.1. TiO_2 'nin kristal yapıları

5.2. MIS Kapasitörün Fabrikasyonu

5.2.1. Ultrasonik ve kimyasal temizleme

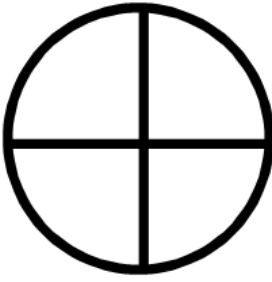
MIS kapasitörün fabrikasyonunda yarıiletken olarak 2 inç çapında, bir yüzeyi parlatılmış, (111) yüzey yönelimli, 280 μm kalınlıklı ve 4,45 $\Omega\cdot\text{cm}$ öz dirençli fosfor (P) katkılı n-tipi Si kullanıldı. İlk önce organik ve metalik kirlere arındırmak için silisyum, sülfürik asit (H_2SO_4), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve nitrik asit (HNO_3) gibi çeşitli kimyasallar içerisinde konularak ultrasonik olarak kimyasal temizleme işlemine tabi tutuldu. Daha sonra Si alttaşı, hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su ($\sim 16\text{-}18\text{ M}\Omega$ dirençli) karışımında ultrasonik olarak durulandı ve azot (N_2) gazı ile kurulandı [19].

5.2.2. Omik kontağın oluşturulması

Termal buharlaştırma işlemi, metal malzemelerin 10^{-7} mbar altındaki bir vakum odasında termal ısıtıcı yardımıyla ısıtılarak buharlaştırılmasını ve buharlaşan parçacıkların bir alttaşı üzerinde biriktirilmesini içerir. Termal buharlaştırma işlemine geleneksel olarak vakumlu biriktirme denir. Kimyasal olarak temizlenen p-Si alttaşı, Resim 5.1'de gösterilen BESTEC marka yüksek vakumlu metal buharlaştırma cihazına yerleştirildi. Silisyumun arka mat yüzeyi, Şekil 5.2'da gösterilen 50 mm çaplı ve ≈ 300 mm kalınlıklı bakır maske kullanılarak termal buharlaştırma yoluyla ~ 200 nm ($\sim 2000\text{ Å}$) kalınlığında %99.999 saflıkta altın (Au) ile kaplandı. Bu kaplama işlemi $400\text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve $\sim 10^{-7}$ mbar vakum altında gerçekleştirildi. Kaplama işleminden sonra altın metalinin silisyum içerisine çöktürülmesi için alttaşı $375\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 7 dakika tavlandı. Böylece elektriksel ölçümler için gerekli omik kontak oluşturuldu.



Resim 5.1. BESTEC marka buharlaştırma cihazı



Şekil 5.2. Omik kontak için kullanılan maske

5.2.3. Si alttaş üzerine TiO_2 'nin kaplanması

Magnetron püskürtme, gaz halindeki bir plazmayı içeren bir biriktirme teknolojisidir. Bu sistemde plazma için argon (Ar) gazı kullanılmaktadır. Hedef malzemenin yüzeyi, plazma içindeki yüksek enerjili iyonlar tarafından bombardıman edilir ve hedef malzemeden atomlar sökülür. Serbest kalan atomlar, vakum ortamında hareket eder ve ince bir film oluşturmak için bir alttaş üzerinde birikirler. Radyo frekansı (RF) magnetron püskürtme ile yalıtkan, DC magnetron püskürtme yöntemiyle ise iletken malzemeler biriktirilir. Bu püskürtme sistemi Resim 5.2'de verilmiştir.

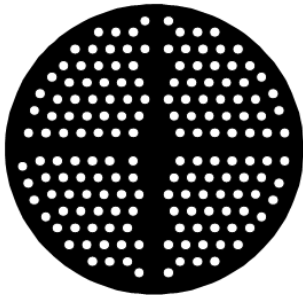


Resim 5.2. Bestec marka püskürtme sistemi

İlk önce Si alttaş magnetron püskürtme sisteminin yükleme odasına yerleştirilirdi. Yükleme odasına alınan alttaş basınç 10^{-8} mbar'a ulaştığında püskürtme odasına transfer edildi. TiO_2 filminin oluşabilmesi için oksijen akış miktarları $\text{Ar}/\text{O}_2=90/10$ sccm ve alttaş sıcaklığı 200°C olacak şekilde ayarlandı. Sonra, alttaş üzerine yüksek saflıkta (%99,999) titanyum (Ti) gönderildi ve böylece 200°C 'de ve 3×10^{-2} mbar basınç altında Si alttaşın parlak yüzeyi üzeri titanyum dioksit (TiO_2) ile kaplandı.

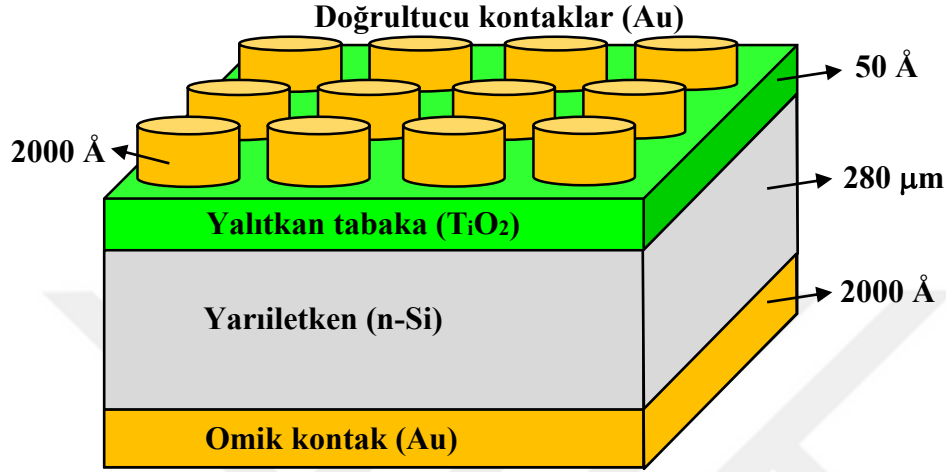
5.2.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Şekil 5.3'de gösterilen 2 mm çaplı bakır maskeler kullanılarak TiO_2 üzerine doğrultucu kontak oluşturuldu. Resim 5.1'de gösterilen BESTEC marka termal buharlaştırma sistemi ile $\sim 10^{-7}$ mbar basınç ve 50°C sıcaklık altında TiO_2 filmin üzeri $\sim 2000 \text{ Å}$ kalınlığında %99,999'luk saflıkta altın ile kaplandı.



Şekil 5.3. Doğrultucu kontak için kullanılan maske

Doğrultucu kontağın alınması ile Au/TiO₂/n-Si metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) kondansatörün fabrikasyonu tamamlandı. Daha sonra, MIS yapının elektriksel ölçümleri için gümüş pasta yardımıyla ön ve arka yüzeylerden elektriksel kontaklar alındı. MIS kondansatörün şematik gösterimi Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Au/TiO₂/n-Si (MIS) kondansatörün şematik gösterimi

5.3. Admitans Ölçüm Sistemi

Hazırlanan MIS kondansatörün, 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 farklı radyasyon dozlarına tabi tutuldu. Frekansa bağlı admitans ölçümleri ($Y=G+i\omega C$) Hewlett Packard 4192A empedans analizmetre (Resim 5.3) ile gerçekleştirildi.



Resim 5.3. HP 4192 A LF empedans analizmetre



6. DENEYSEL SONUÇLAR

Au/TiO₂/n-Si (MIS) kondansatörün elektriksel ve dielektrik karakteristikleri üzerinde gama ışınlamasının etkileri detaylı olarak incelemiştir. Işınlamadan önce MIS kapasitörün, kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri oda sıcaklığında 1 kHz - 1 MHz frekans aralığında gerçekleştirildi. Daha sonra, ⁶⁰Co kaynağı kullanılarak MIS kapasitör gama ışınlamaya maruz bırakılmıştır. Her 0 (radyasyondan önce), 5, 10, 50 ve 100 kGy ışınlama dozundan sonra oda sıcaklığında 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde C-V ve G/ω-V ölçümleri tekrarlandı. MIS kapasitörün radyasyon dozuna ve frekansa bağlı elektriksel ve dielektrik karakteristikleri aşağıda verilmiştir.

6.1. Elektriksel Karakteristikler

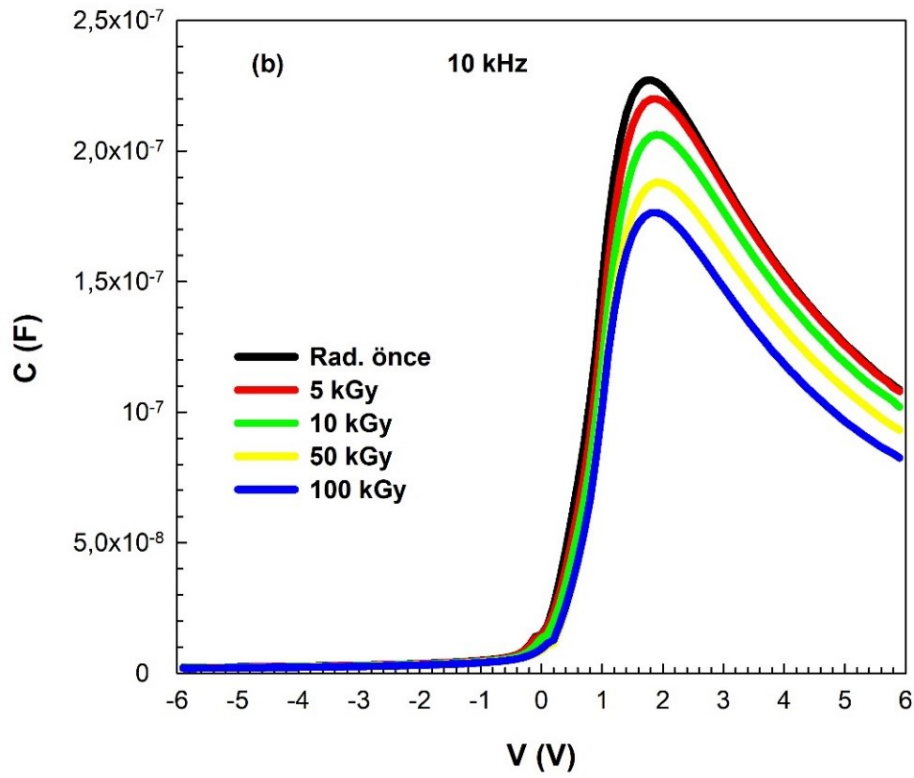
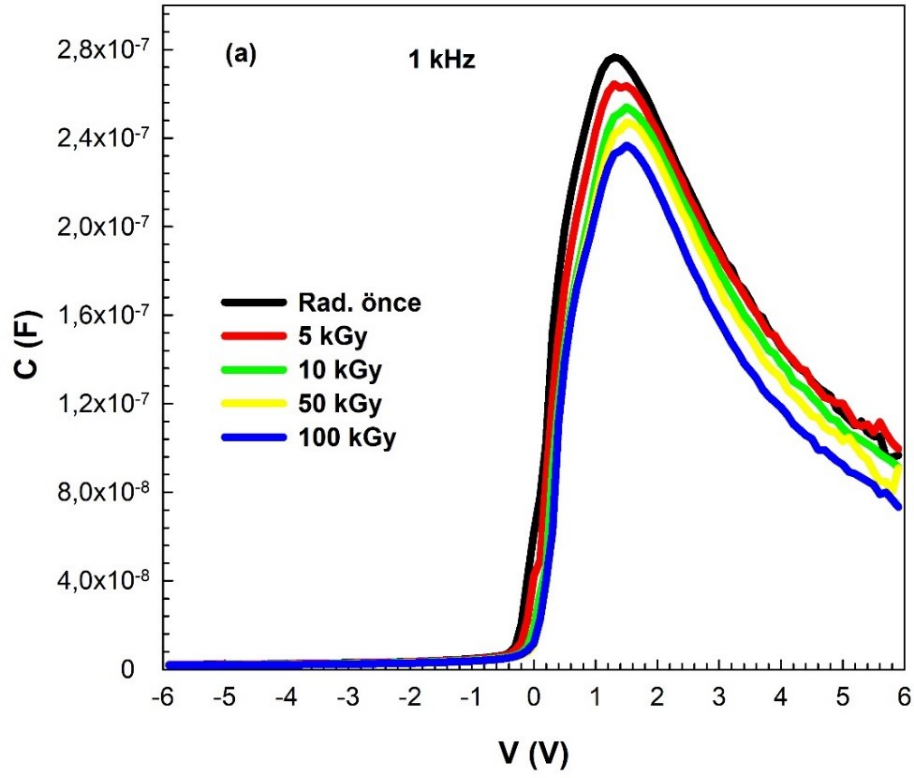
Au/TiO₂/n-Si (MIS) kondansatör gama ışınları ile kademeli olarak 100 kGy toplam doza ışınladı. Işınlanan kondansatörün kapasitans (C) ve iletkenlik (G) ölçümleri oda sıcaklığında, karanlık ortamda, -6 V ile +6 V geniş bir voltaj aralığında ve 1 kHz-1 MHz frekans aralığında 5 farklı frekans değerinde gerçekleştirilmiştir. MIS kondansatörün radyasyondan yani ışınlamadan önce ve sonra her bir frekans için çizilen C-V eğrileri sırasıyla Şekil 6.1 (a-e)'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, MIS kondansatör, tüm C-V ölçümlerinde yığılma, tükenim ve tersinim olmak üzere üç farklı bölge ile metal-oksit-yarıiletken (MOS) tipi davranış sergilemektedir [6,8]. Ölçülen kapasitans değerleri artan radyasyon dozu ile tükenim ve yığılma bölgelerinde azalırken tersinim bölgesinde değişmemektedir. Bu sonuç, MIS yapının yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde iyonlaştırıcı radyasyondan dolayı oluşan arayüzey tuzaklarına atfedilebilir [43-50]. kapasitans ışınlama doz ile azaldıkça, malzeme içindeki dipollerin sayısı soğurulan doz ile azalır. Dipol sayısının azalmasının nedeni, malzeme içinde bulunan bazı dipolleri nötralize eden yük taşıyıcıların yeniden birleşmesi ile açıklanabilir. Ayrıca kapasitansın azalması, tükenim bölgesindeki serbest yük taşıyıcı enjeksiyonunun azaldığını gösterir.

MIS/MOS kondansatörlerde iyonlaştırıcı radyasyona en duyarlı kısım metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey yalıtkan/oksit tabakadır. Bu yapılar yüksek enerjili iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldığında, yalıtkan/oksitte elektron-deşik çiftleri oluşur [17,32,51]. Yalıtkan/oksitte elektron-deşik çifti oluşumu, neredeyse tüm toplam doz etkilerine yol açar. Ayrıca, iyonlaştırıcı radyasyon, yalıtkanlarda önemli miktarda yük birikimine neden olur.

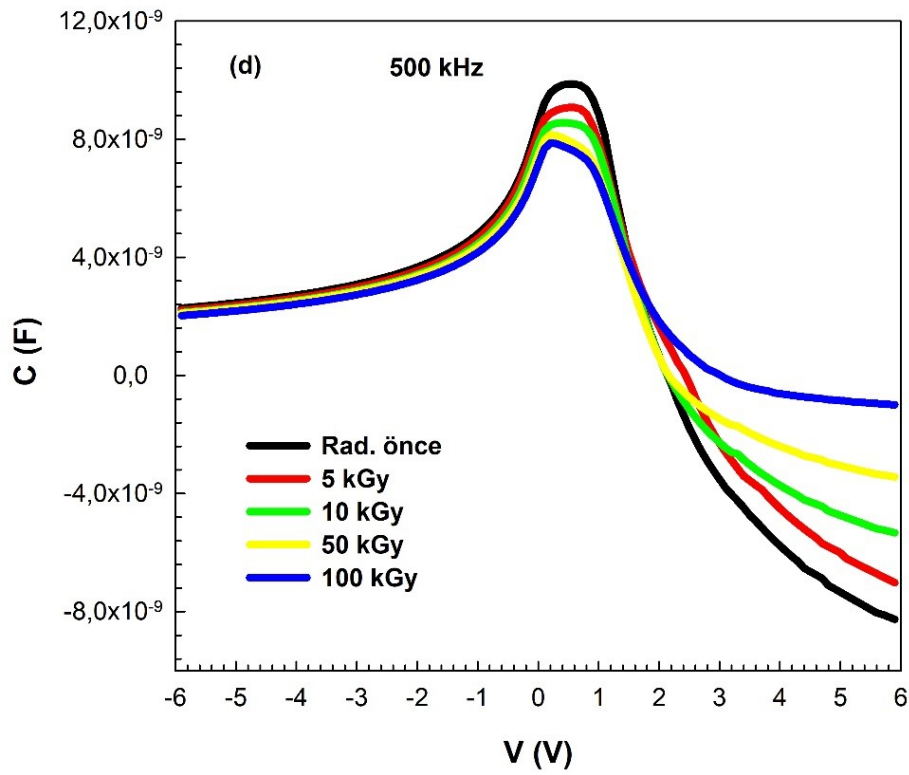
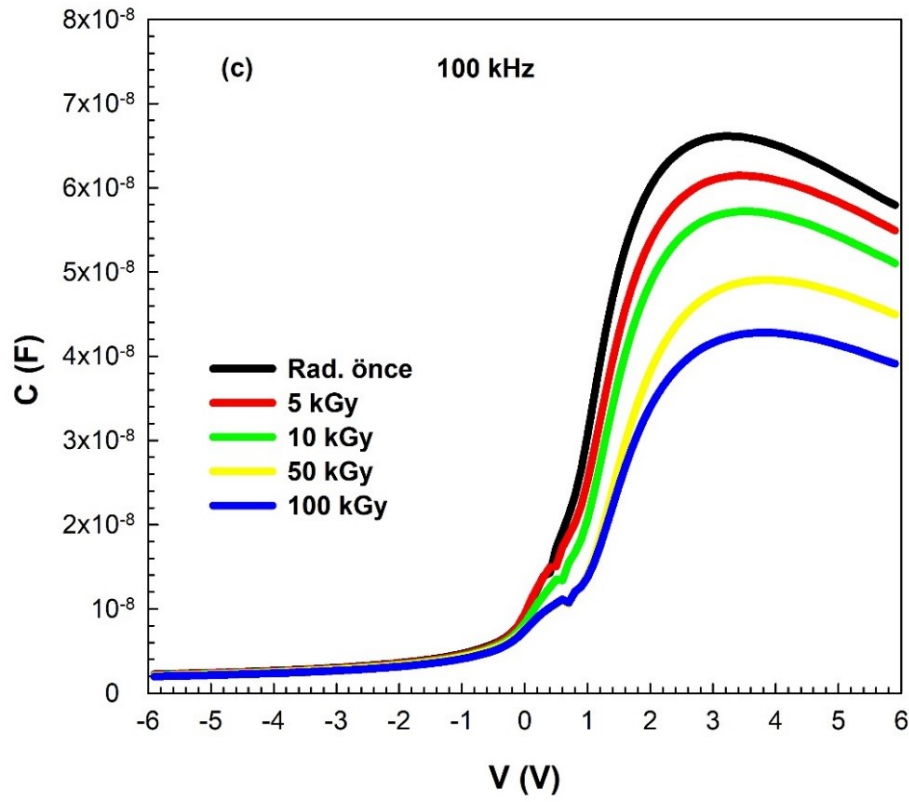
Üretilen taşıyıcılar, cihazın bozulmasına neden olabilir. Elektron-deşik çiftleri oluşturulduktan hemen sonra, elektronların çoğu hızla kapıya doğru sürüklenecek ve deşikler yalıtkan/yarıiletken arayüzeyine doğru sürüklenecektir. Bununla birlikte, elektronlar yalıtkindan ayrılmadan önce bile, bazı elektronlar deşiklerle yeniden birleşir. Birleşmeyen deşikler, yalıtkan içindeki lokalize durumlardan atlayarak yalıtkan boyunca yalıtkan/yarıiletken arayüzeyine doğru taşınacaktır. Deşikler arayüzeye yaklaştıkça, bir kısmı tuzaklanacak ve pozitif bir oksit tuzak yükü oluşturacaktır. Diğerleri ise, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde arayüzey tuzakların oluşumuna neden olacaktır.

Ayrıca, şekillerden de görüldüğü üzere C-V eğrileri tükenim bölgesinde bir pik vermektedir. Bu durum, pikin meydana geldiği bölgede arayüzey tuzaklarının daha yoğun olduğunu göstermektedir. Bununla beraber, ışınlamadan sonra C-V eğrileri ileri pozitif voltajlara doğru kaymaktadır. Bu durum, MIS kondansatörde ışınlamanın neden olduğu arayüzeyde tuzaklanmış yükler ve özellikle oksitte tuzaklanmış yükler gibi tuzaklanmış yük yoğunluklarının artmasına atfedilebilir.

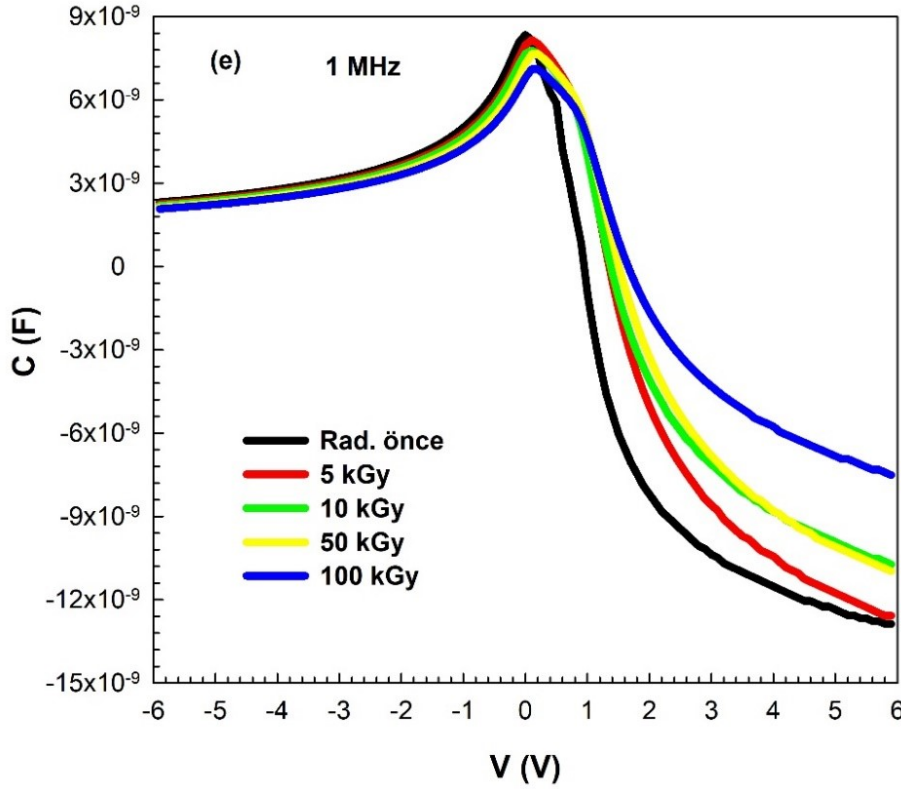
Ayrıca, Şekil 6.1 (d) ve (e)'de görüldüğü gibi özellikle yüksek frekans (500 kHz ve 1 MHz) ölçümlerinde pozitif voltaj bölgesinde C-V eğrileri anormal bir davranış göstermektedir, yani kapasitans değeri negatif olmaktadır. C-V eğrilerinin negatif kapasitans (NC) davranışı, Fermi enerji seviyesinin altındaki işgal edilmiş durumlarda arayüzey yüklerinin kaybı dikkate alınarak açıklanabilir. Negatif kapasitans davranışı esas olarak kontak enjeksiyonuna, arayüzey durumlarına veya azınlık taşıyıcı enjeksiyon etkilerine atfedilmiştir. Negatif kapasitans, yükteki bir değişiklik, bir malzeme üzerindeki net voltajın ters yönde değişmesine neden olduğunda meydana gelir [52-55].



Şekil 6.1. MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için C-V eğrileri

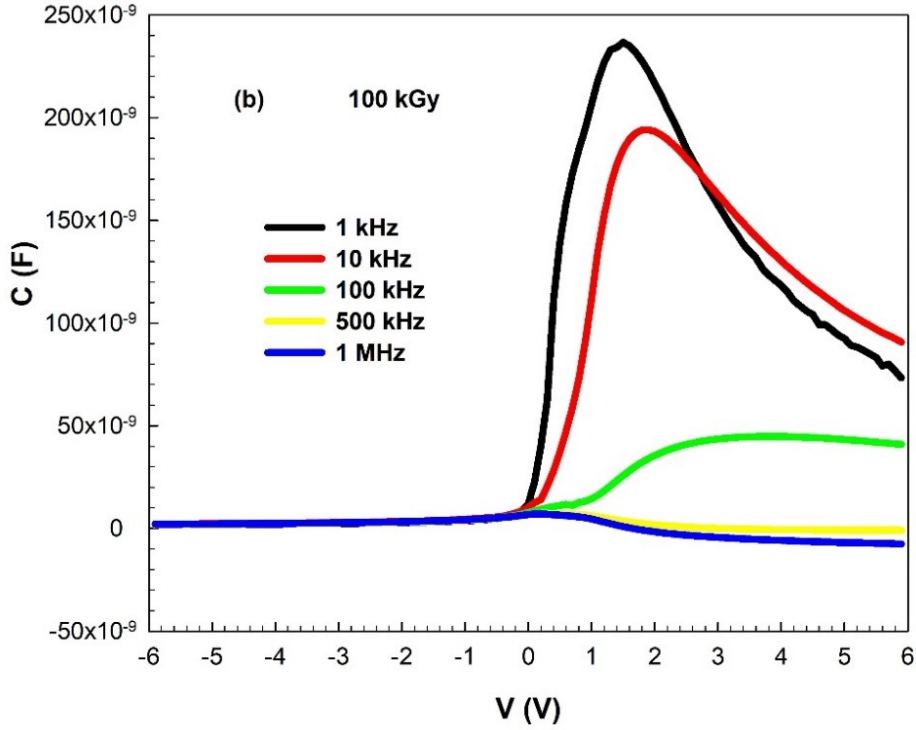
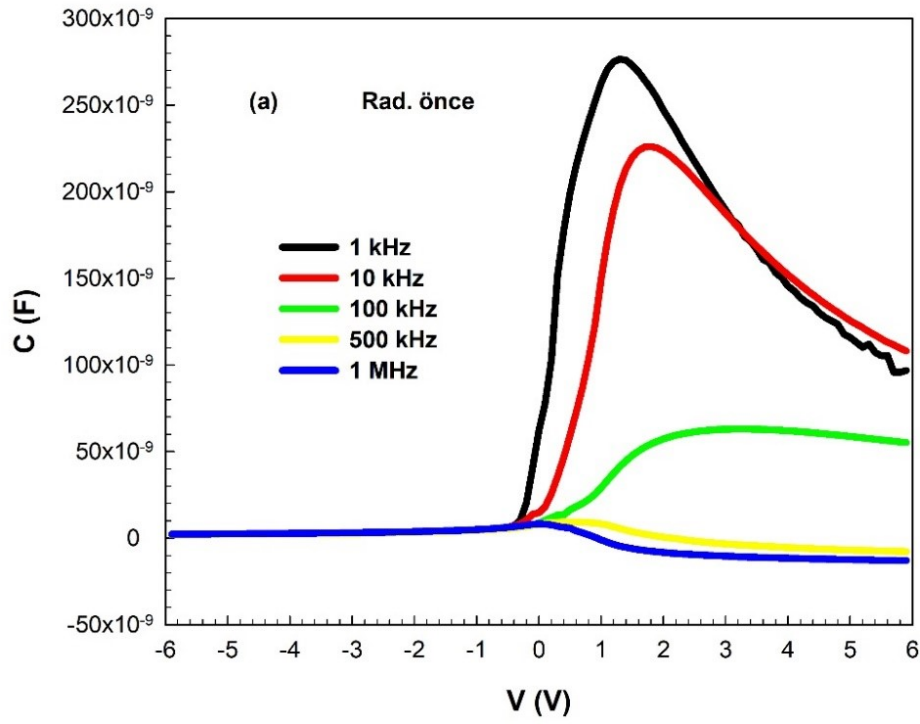


Şekil 6.1. (devam) MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için C-V eğrileri



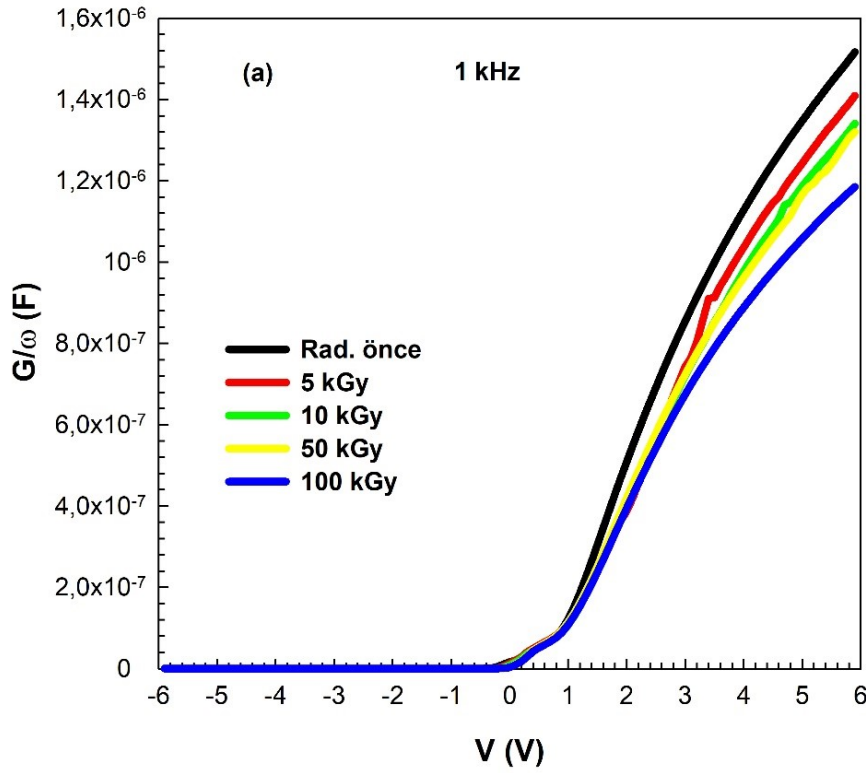
Şekil 6.1. (devam) MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için C-V eğrileri

Şekil 6.2 (a) ve (b)'de radyasyondan önce ve 100 kGy için C-V eğrilerinin frekansa bağlı değişim eğrileri verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, kapasitans değerinin artan frekans azalması arayüzey durumları, yük taşıyıcıların gevşeme süresi ve uygulanan frekansın büyüklüğü gibi faktörlerle ilgilidir. Arayüzey tuzaklarının etkisinden kaçınmak için genellikle C-V ölçümleri mümkün olduğu kadar yüksek bir frekansta gerçekleştirilmelidir. Yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz), arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcıların yaşam süresi (τ) $1/2\pi f$ 'den daha büyük olduğu için arayüzey durumları uygulanan a.c. voltaj sinyali takip edemez ve bu durumda toplam kapasitansta katkıları ihmal edilebilecek kadar küçük olur [6,8,56-61]. Düşük frekanslarda ise, arayüzey durumları uygulanan a.c. voltaj sinyali takip edebilir. Böylece kapasitansa ek katkıda bulunurlar ve bu nedenle kapasitans düşük frekanslarda önemli ölçüde yüksektir. Ayrıca, düşük frekanslarda C-V eğrileri tükenim bölgesinde bir pik vermekte ve bu pik ileri pozitif voltajlara doğru kaymaktadır. Bu pik, seri direnç ve arayüzey durumlardaki yükün değişimden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, kapasitansın pik değerinin frekansla birlikte azaldığı görülmektedir. Bu durum, arayüzey durumlarından ileri gelmektedir.

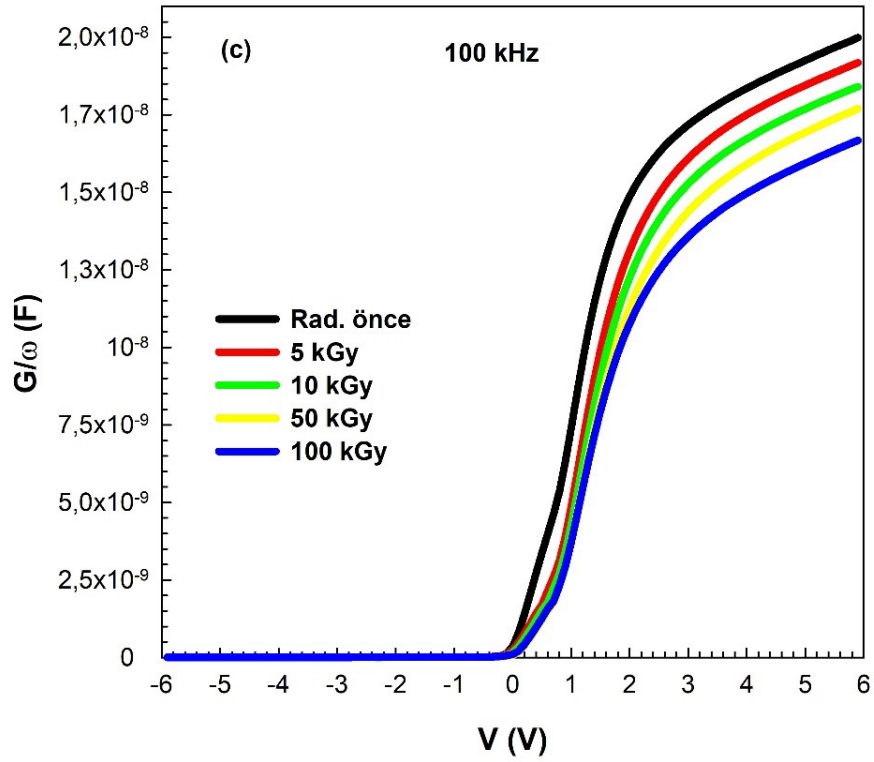
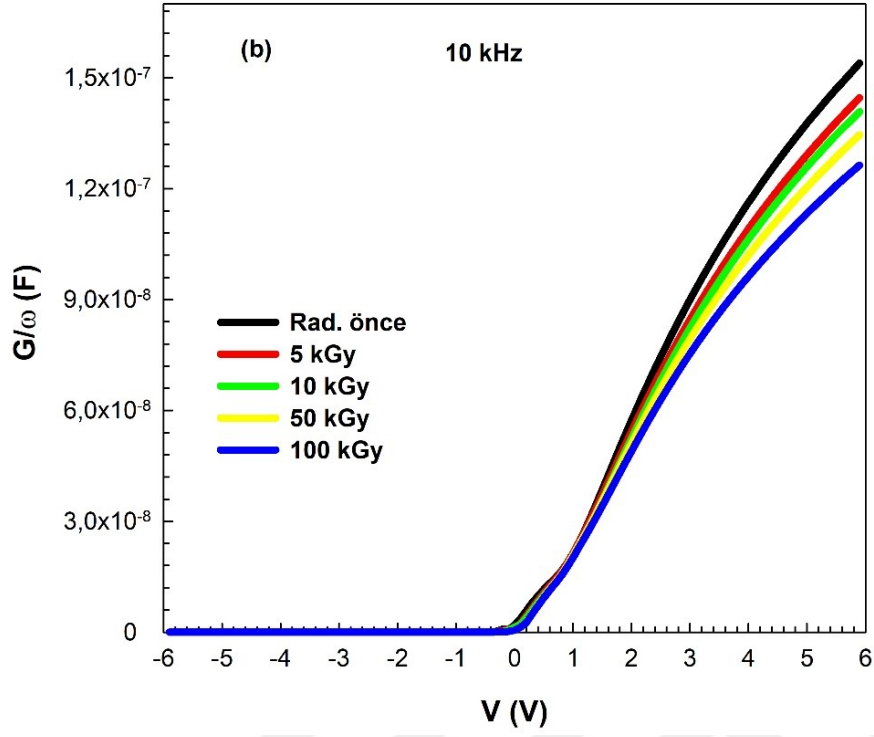


Şekil 6.2. MIS kondansatörün a) Radyasyondan önce (0 kGy) ve b) 100 kGy için frekansa bağlı C-V eğrileri.

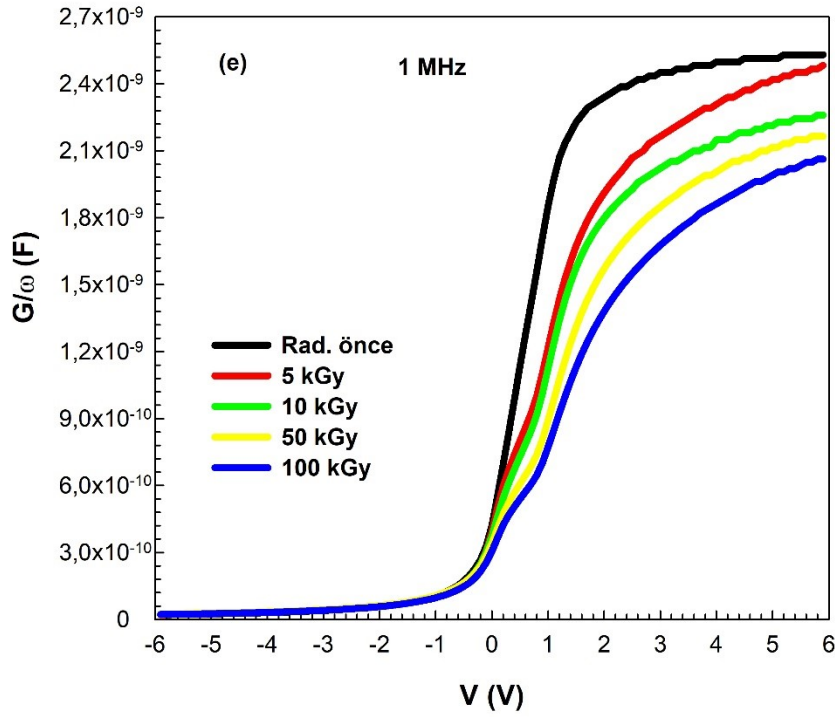
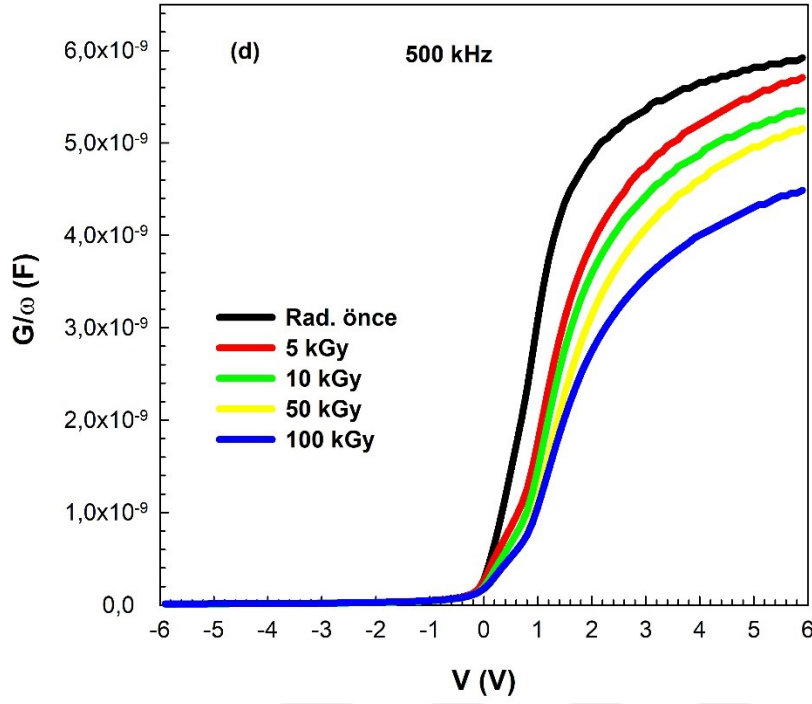
MIS kondansatörün radyasyondan önce ve sonra beş farklı frekans için -6 V ile +6 V voltaj aralığında çizilen iletkenlik-voltaj (G/ω -V) eğrileri sırasıyla Şekil 6.3 (a-e)'de gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere, ölçülen iletkenlik değerleri artan radyasyon dozu ile tükenim ve yığılım bölgelerinde azalırken tersinim bölgesinde değişmemektedir [61-64]. İletkenliğin azalması, ışınlama dozunun artması nedeniyle arayüzey yakınında boşluklar ve dislokasyon gibi örgü kusurlarının üretilmesine atfedilir.



Şekil 6.3. MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için G/ω -V eğrileri

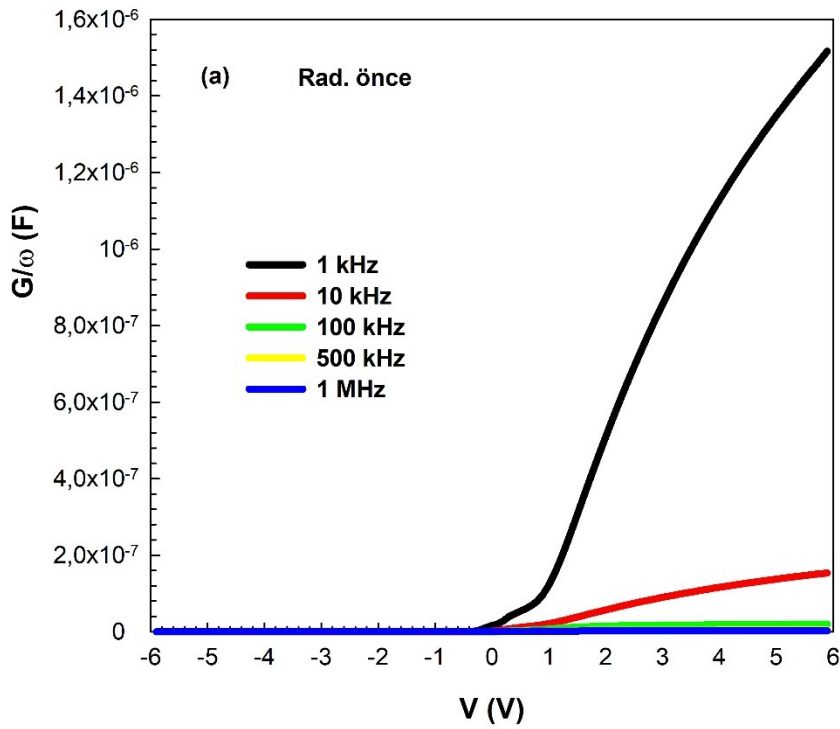


Şekil 6.3. (devam) MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için G/ω - V eğrileri

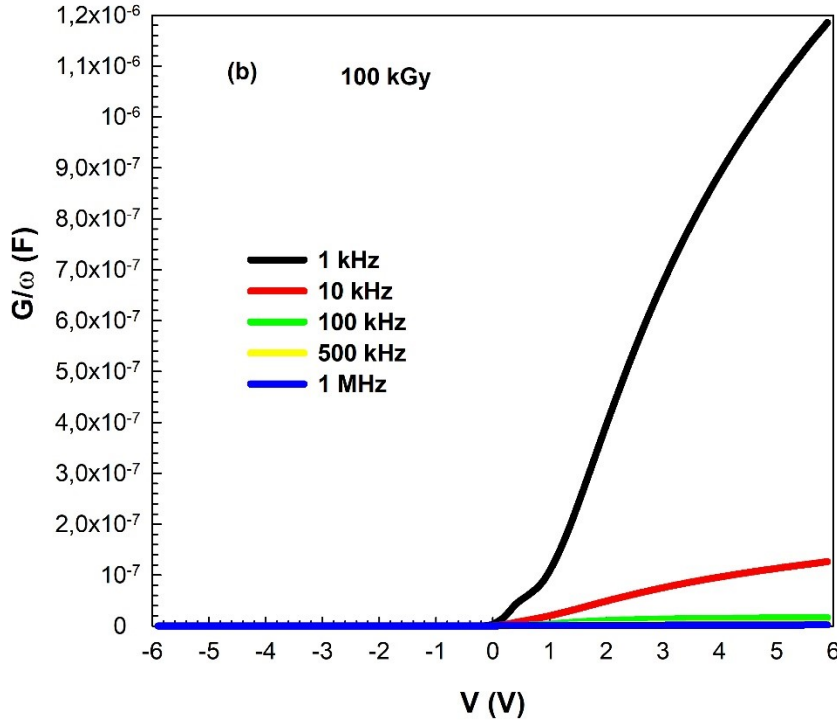


Şekil 6.3. (devam) MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için G/ω - V eğrileri

Şekil 6.4 (a) ve (b)'de radyasyondan önce ve 100 kGy için G/ω -V eğrilerinin frekans ile değişim eğrileri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, iletkenlik değeri pozitif voltaj bölgesinde artan frekans ile azalırken negatif voltaj bölgesinde değeri hemen hemen değişmemektedir. G/ω -V eğrileri, C-V eğrilerine benzeyen bir davranış göstermektedir. Yani, iletkenlik, arayüzey tuzak yoğunluğu ve seri direnç gibi çeşitli parametreler nedeniyle artan frekansla azalmaktadır [65-69]. Ayrıca pozitif bölgede, artan voltaj ile iletkenlik değeri keskin bir şekilde artmaktadır.



Şekil 6.4. MIS kondansatörün a) Radyasyondan önce (0 kGy) ve b) 100 kGy için frekansa bağlı G/ω -V eğrileri.



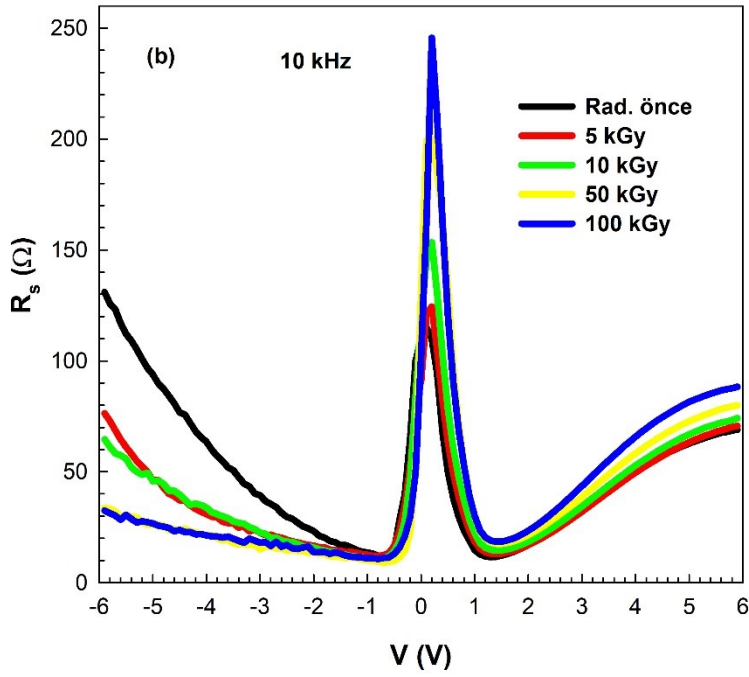
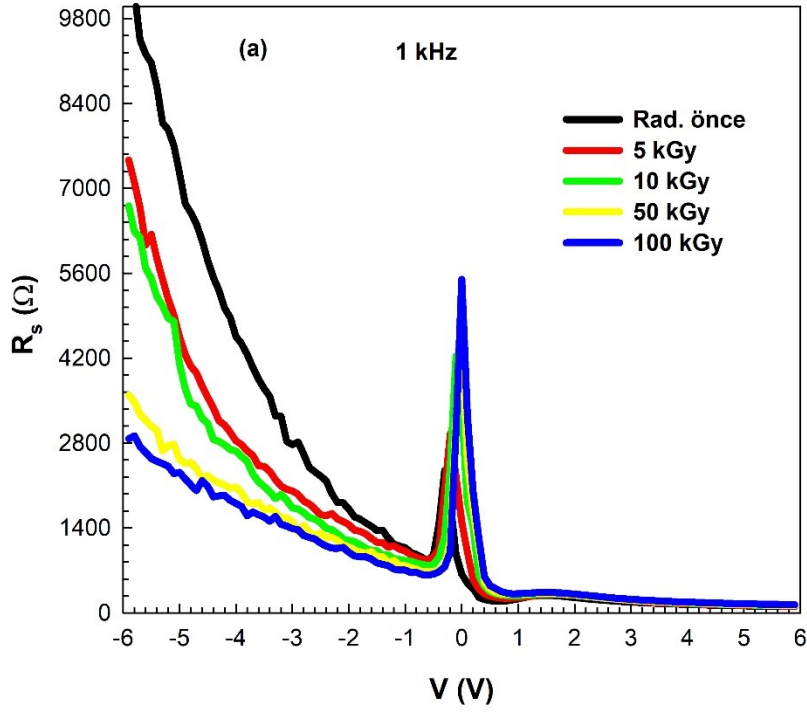
Şekil 6.4. (devam) MIS kondansatörün a) Radyasyondan önce (0 kGy) ve b) 100 kGy için frekansa bağlı G/ω -V eğrileri.

Seri direnç (R_s), yarıiletken aygıtların performansını ve elektriksel yani ideal C-V ve G/ω -V karakteristiklerini etkileyen önemli parametrelerden biridir. MIS kondansatörün seri direnç, ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri Eş. 6.1’de kullanılarak hesaplandı [6,8].

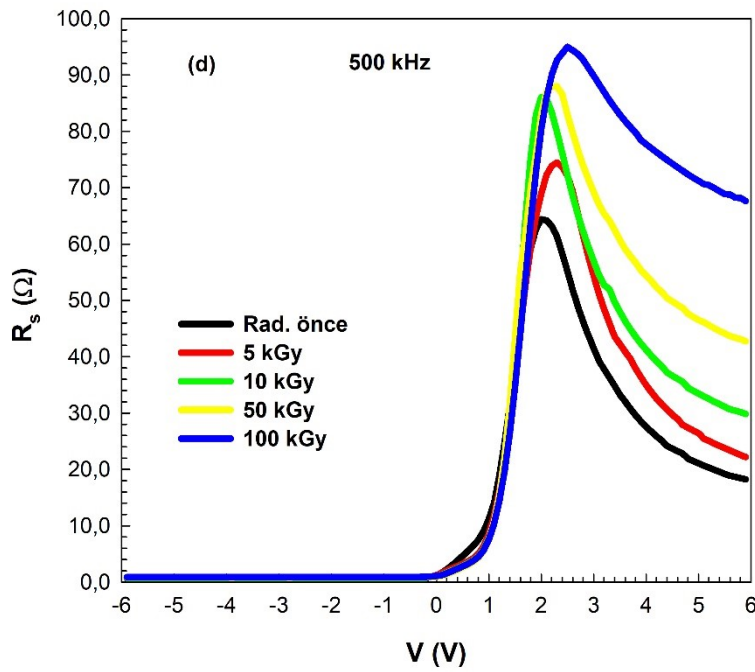
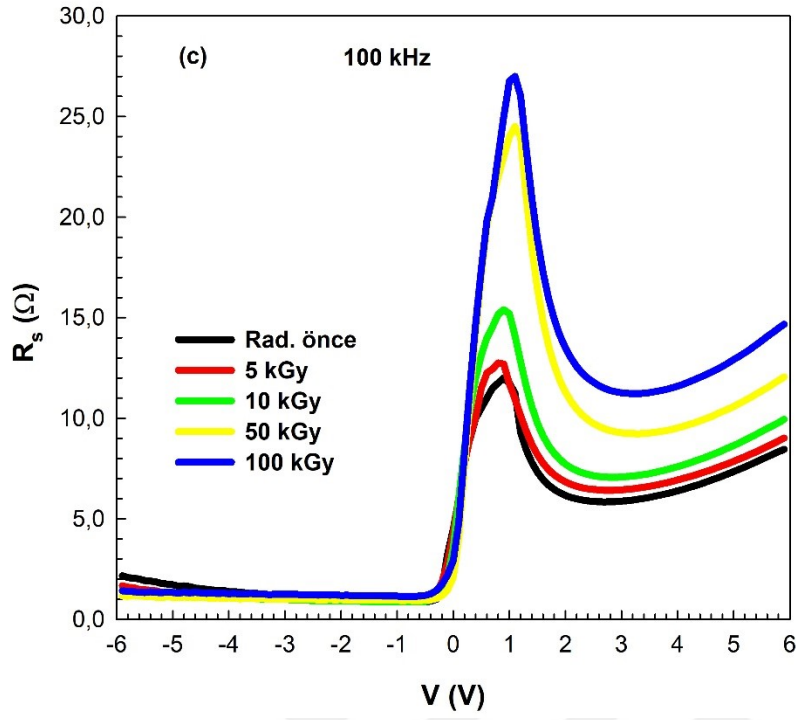
$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (6.1)$$

MIS kondansatörün farklı ışınlama dozları ve farklı frekanslar çizilen seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri sırasıyla Şekil 6.5 (a-e)’de gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere, hesaplanan seri direnç değerleri artan radyasyon dozu ile tükenim bölgesinde artmaktadır [43,50,70-72]. R_s değerlerindeki bu değişim ışınlama altında kusurların yeniden düzenlenmesi ve yapılandırılması ile ilgili olabilir. Ayrıca, ışınlama dozu ile R_s değerlerinin artması, kusur yoğunluğunun arttığını göstermektedir. Bununla beraber, şekillerde R_s -V eğrilerinin pozitif voltaj bölgesinde bir pik verdiği görülmektedir. Bu pik arayüzey durumların özel bir dağılımından yani bir bölgede yoğunlaşmasından ileri gelmektedir. Ayrıca bu pik artan frekansla daha yüksek pozitif gerilimlere doğru kaymaktadır. Bu pikin

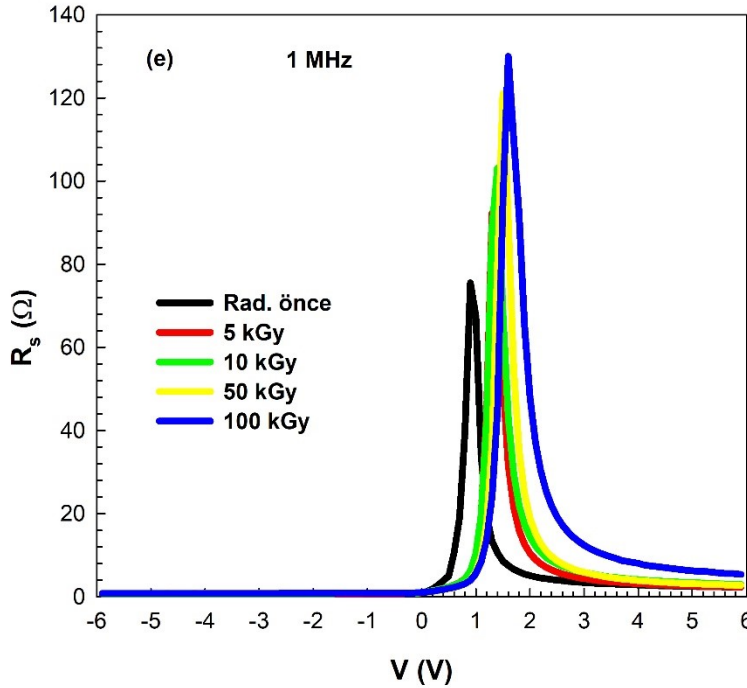
artan frekansla kayması, arayüzey yüklerinin uygulanan voltajın frekansını takip etmesi anlamına gelmektedir.



Şekil 6.5. MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için R_s - V eğrileri



Şekil 6.5. (devam) MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için R_s -V eğrileri



Şekil 6.5. (devam) MIS kondansatörün a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz ve e) 1 MHz frekansları için R_s -V eğrileri

C^{-2} -V eğrilerinin lineer değişimleri, Şekil 6.1'de verilen MIS kondansatörün C-V özelliklerinden elde edildi. C^{-2} -V eğrileri, difüzyon potansiyeli (V_D), verici katkı atomları yoğunluğu (N_D), Fermi enerji seviyesi (E_F), engel yüksekliği (Φ_B), tükenim tabakası genişliği (W_D) ve arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) gibi bazı elektrik parametreleri C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplandı. Bunun için C^{-2} -V eğrisinin lineer bir davranış sergilemesi gerekmektedir. Böylece bu parametreler C^{-2} -V eğrisinin lineer bölgesinin eğiminden faydalanılarak aşağıda verilen bağıntılardan belirlendi. Tükenim bölgesinin kapasitansı [6,62,73-77] aşağıda tanımlanmıştır.

$$C^{-2} = \frac{2(V_{bi}+V)}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_D} \quad (6.2)$$

Burada, V uygulanan voltaj, N_D verici konsantrasyonu, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti (Si için $\epsilon_s=11,9$), ϵ_0 ($=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm) boşluğun dielektrik geçirgenliği, q elektron yükü ve A ($=3,14 \times 10^{-2}$ cm²) kondansatör alanıdır. V_{bi} , C-2-V eğrilerinin lineer çizgilerin voltaj eksenine ile kesişmesinden elde edilir. V_D , voltaj eksenine boyunca kesişme ile belirlenen sıfır öngerilimdeki difüzyon potansiyelidir ve şu şekilde ifade edilir.

$$V_D = V_{bi} + \frac{kT}{q} \quad (6.3)$$

Burada T mutlak sıcaklık ve k_B Boltzmann sabitidir. Fermi enerjisi (E_F),

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_D} \right) \quad (6.4)$$

olarak verilir. Burada N_c , yarıiletkenin (Si) iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur. Engel veya bariyer yüksekliği (Φ_B) aşağıda verilen bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$\Phi_B = V_D + E_F - \Delta\Phi_B = V_D + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_D} \right) - \Delta\Phi_B \quad (6.5)$$

Burada $\Delta\Phi_B$ görüntü kuvveti engel alçalması veya Schottky engel yüksekliği alçalması olup aşağıdaki gibi verilir.

$$\Delta\Phi_B = \left(\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (6.6)$$

Burada E_m maksimum elektrik alan olup,

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_D}{\epsilon_s\epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (6.7)$$

ile verilir.

Tükenim veya uzay yük tabakası genişliği (W_D),

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0 V_D}{qN_D}} \quad (6.8)$$

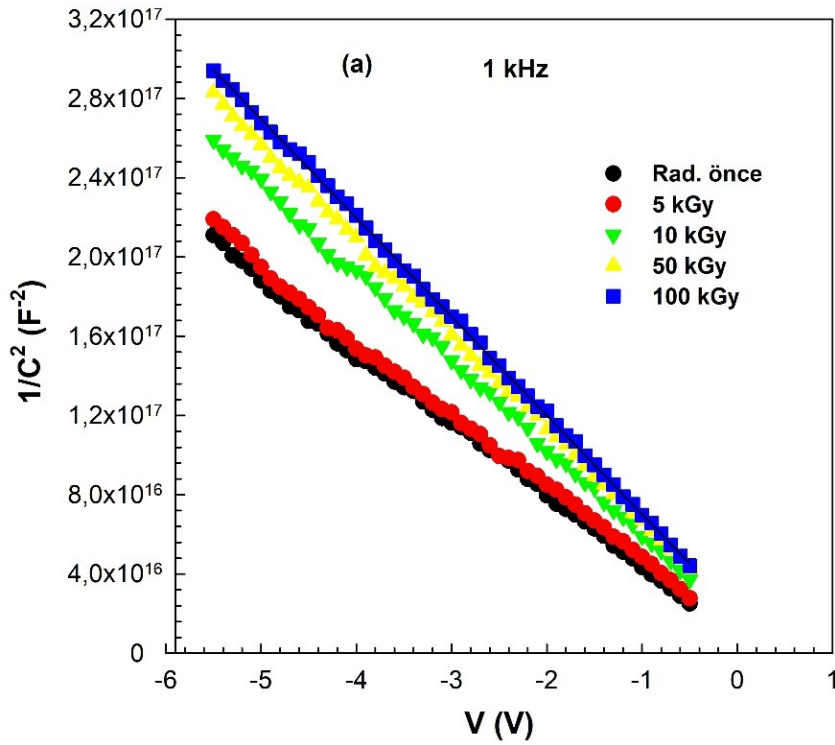
olarak verilir.

Arayüzey durumları, seri direnç gibi yarıiletken aygıtların elektriksel karakteristiklerini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [76,77].

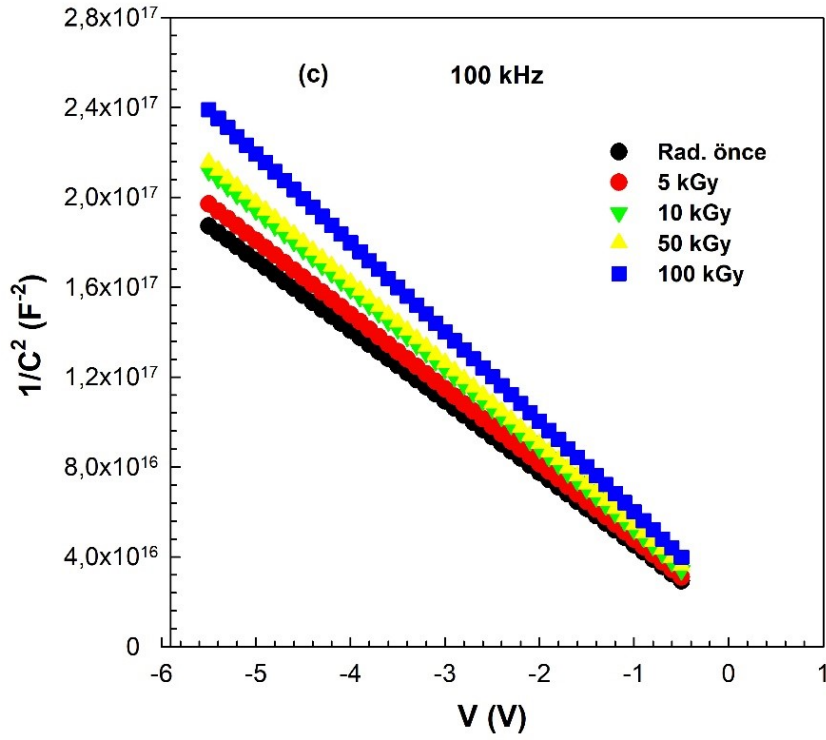
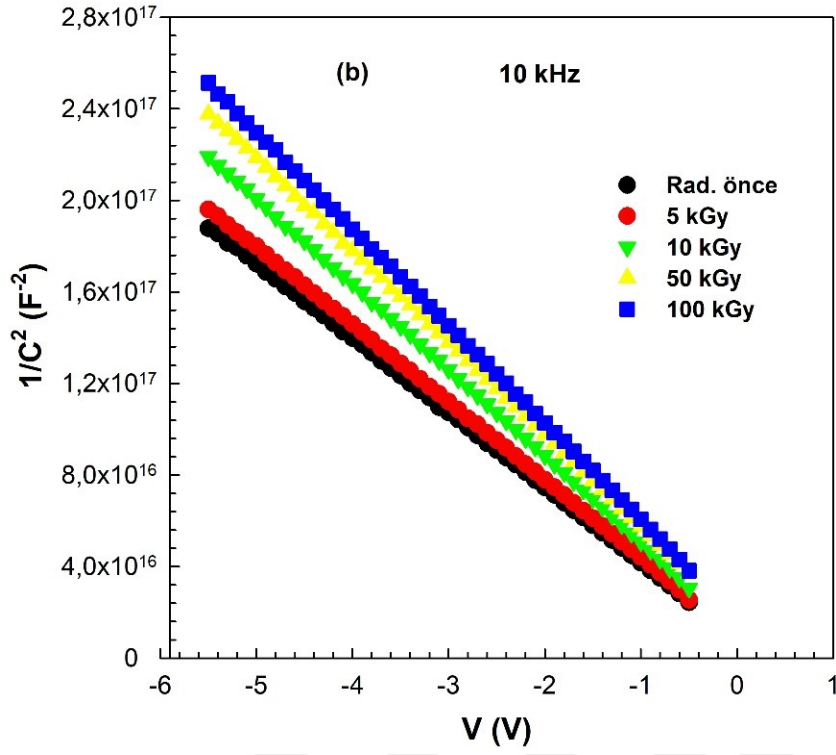
$$C_2 \cong \frac{N_D(\text{deneysel})}{N_D(\text{teorik})} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + q\delta N_{ss}} \quad (6.9)$$

Burada δ ($=50 \text{ \AA}$) arayüzey yalıtkan tabaka kalınlığı ve $\epsilon_i(\text{TiO}_2)$ ($=48\epsilon_0$) yalıtkan tabakanın dielektrik sabitidir.

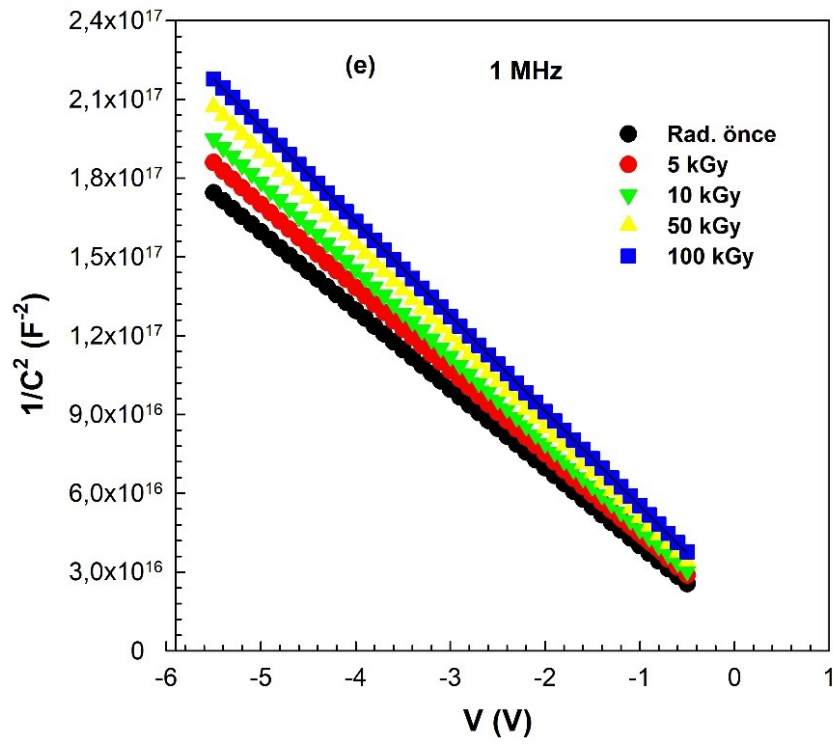
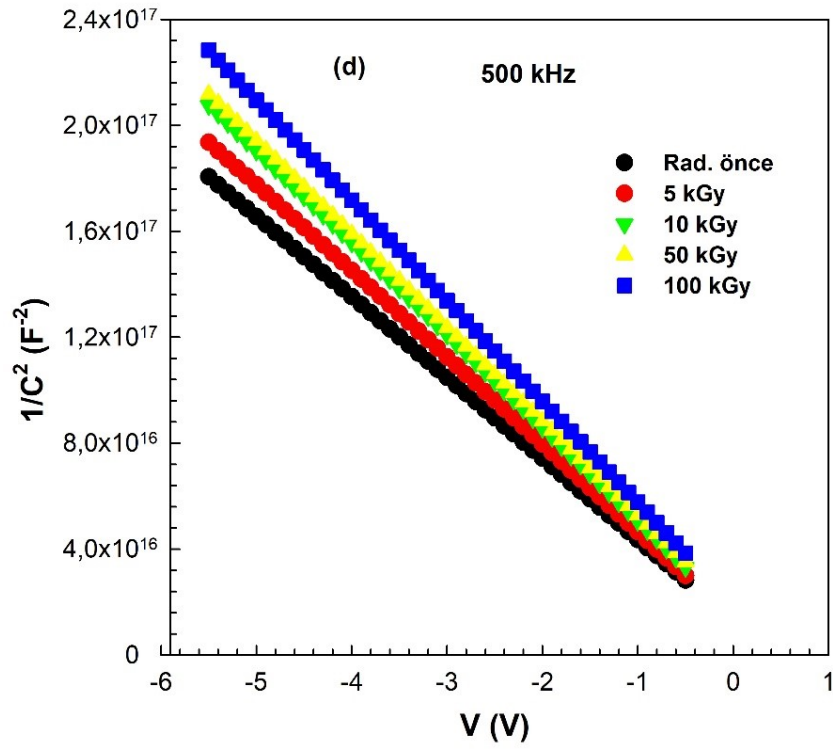
MIS kondansatörün farklı ışınlama dozları ve farklı frekanslar (1, 10, 100, 500 kHz ve 1 MHz) için çizilen C^{-2} -V karakteristikleri sırasıyla Şekil 6.6 (a-e)'de verilmiştir. Şekillerde görüldüğü, gibi geniş bir voltaj aralığında C^{-2} -V eğrileri lineer bir davranış göstermektedir.



Şekil 6.6. C^{-2} -V karakteristikleri a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz, e) 1 MHz



Şekil 6.6. (devam) C^{-2} -V karakteristikleri a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz, e) 1 MHz



Şekil 6.6. (devam) C^{-2} - V karakteristikleri a) 1 kHz, b) 10 kHz, c) 100 kHz, d) 500 kHz, e) 1 MHz

Işınlama dozuna bağlı olarak farklı frekanslar (1, 10, 100, 500 kHz ve 1 MHz) için C^{-2} -V karakteristiklerinden elde edilen MIS kondansatörün elektriksel parametreleri sırasıyla Çizelge 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 ve 6.5’de verilmiştir. Bu çizelgelerden görüldüğü gibi bütün parametreler radyasyon dozuna bağlı olarak değişmektedir. Engel yüksekliği (Φ_B), tükenim tabakası genişliği (W_D) ve arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) artan ışınlama dozu ile artarken verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_D) azalmaktadır. Işınlama ile N_{ss} değerinin artması, radyasyon kaynaklı arayüzey kusurlarının ortaya çıkmasından kaynaklanıyor olabilir. Ayrıca, tuzakların yoğunluğu, frekansla bir azalma göstermektedir. Bu davranış, düşük frekanslarda a.c. sinyali takip edebilen arayüzey tuzaklarına atfedilir. Verici katkı yoğunluğundaki bu azalma, malzemedeki radyasyonun neden olduğu kusurlara atfedilir [75]. Kusurlar, malzemedeki hareketli yük taşıyıcı yoğunluğunun azalmasına neden olurlar. Hareketli yük taşıyıcıların tuzaklanması nedeniyle ışınlamadan sonra malzemenin direnci artar. Artan gama ışınlama dozu ile engel/bariyer yükseklikleri artmıştır. Elde edilen engel yüksekliği değerleri, silisyum yarıiletkenin yasak enerji aralığı ($E_g=1,12$ eV) içindedir. Bariyer yüksekliğindeki bu artış, ışınlamadan sonra yapısal (built-in) voltajdaki yani difüzyon potansiyelindeki artıştan kaynaklanmaktadır. Yapısal voltajdaki artış, radyasyon kaynaklı kusurlarla ilişkili tuzakların ve rekombinasyon merkezlerinin oluşumu yoluyla malzemenin tükenim bölgesindeki serbest taşıyıcı yoğunluğunun azalmasına atfedilebilir [44,75,78].

Çizelge 6.1. Işınlama dozuna bağlı olarak 1 kHz için C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan elektriksel parametreler

Rad. Dozu (kGy)	V_o (V)	V_D (eV)	$N_D \times (10^{17})$ (cm^{-3})	E_F (eV)	$\Delta\Phi_B$ (eV)	Φ_B (eV)	$W_D \times (10^{-6})$ (cm)	N_{ss} ($cm^{-2}eV^{-1}$)
0	0,217	0,242	3,335	0,115	0,044	0,314	3,094	$1,55.10^{13}$
5	0,288	0,314	3,276	0,115	0,046	0,383	3,551	$1,68.10^{13}$
10	0,349	0,375	2,725	0,120	0,046	0,449	4,256	$3,09.10^{13}$
50	0,395	0,421	2,535	0,122	0,047	0,496	4,673	$3,72.10^{13}$
100	0,406	0,432	2,415	0,123	0,046	0,509	4,854	$4,17.10^{13}$

Çizelge 6.2. Işınlama dozuna bağlı olarak 10 kHz için hesaplanan elektriksel parametreler

Rad. Dozu (kGy)	V_o (V)	V_D (eV)	$N_{DX}(10^{17})$ (cm^{-3})	E_F (eV)	$\Delta\Phi_B$ (eV)	Φ_B (eV)	$W_{DX}(10^{-6})$ (cm)	N_{SS} ($cm^{-2}eV^{-1}$)
0	0,276	0,302	3,685	0,112	0,047	0,367	3,286	$9,01.10^{12}$
5	0,298	0,324	3,549	0,113	0,048	0,389	3,467	$1,14.10^{13}$
10	0,356	0,382	3,210	0,116	0,048	0,449	3,956	$1,82.10^{13}$
50	0,427	0,453	2,994	0,117	0,050	0,521	4,463	$2,33.10^{13}$
100	0,432	0,458	2,842	0,119	0,049	0,528	4,606	$2,74.10^{13}$

Çizelge 6.3. Işınlama dozuna bağlı olarak 100 kHz için hesaplanan elektriksel parametreler

Rad. Dozu (kGy)	V_o (V)	V_D (eV)	$N_{DX}(10^{17})$ (cm^{-3})	E_F (eV)	$\Delta\Phi_B$ (eV)	Φ_B (eV)	$W_{DX}(10^{-6})$ (cm)	N_{SS} ($cm^{-2}eV^{-1}$)
0	0,448	0,474	3,809	0,111	0,053	0,532	4,047	$6,99.10^{12}$
5	0,449	0,474	3,624	0,112	0,053	0,534	4,152	$1,01.10^{13}$
10	0,473	0,499	3,391	0,114	0,052	0,561	4,402	$1,44.10^{13}$
50	0,516	0,542	3,354	0,114	0,053	0,603	4,611	$1,51.10^{13}$
100	0,516	0,542	3,026	0,117	0,052	0,607	4,855	$2,25.10^{13}$

Çizelge 6.4. Işınlama dozuna bağlı olarak 500 kHz için hesaplanan elektriksel parametreler

Rad. Dozu (kGy)	V_o (V)	V_D (eV)	$N_{DX}(10^{17})$ (cm^{-3})	E_F (eV)	$\Delta\Phi_B$ (eV)	Φ_B (eV)	$W_{DX}(10^{-6})$ (cm)	N_{SS} ($cm^{-2}eV^{-1}$)
0	0,429	0,455	3,948	0,110	0,053	0,512	3,896	$4,86.10^{12}$
5	0,434	0,460	3,676	0,112	0,052	0,520	4,060	$9,16.10^{12}$
10	0,451	0,477	3,446	0,114	0,052	0,539	4,268	$1,33.10^{13}$
50	0,501	0,526	3,408	0,114	0,053	0,587	4,510	$1,41.10^{13}$
100	0,519	0,545	3,168	0,116	0,053	0,609	4,760	$1,91.10^{13}$

Çizelge 6.5. Işınlama dozuna bağlı olarak 1 MHz için hesaplanan elektriksel parametreler

Rad. Dozu (kGy)	V_o (V)	V_D (eV)	$N_{DX}(10^{17})$ (cm^{-3})	E_F (eV)	$\Delta\Phi_B$ (eV)	Φ_B (eV)	$W_{DX}(10^{-6})$ (cm)	N_{SS} ($cm^{-2}eV^{-1}$)
0	0,340	0,366	4,032	0,110	0,051	0,425	3,456	$3,66.10^{12}$
5	0,393	0,419	3,822	0,111	0,052	0,478	3,798	$6,78.10^{12}$
10	0,401	0,427	3,647	0,112	0,051	0,488	3,927	$9,66.10^{12}$
50	0,456	0,482	3,467	0,114	0,052	0,543	4,278	$1,29.10^{13}$
100	0,529	0,555	3,334	0,115	0,054	0,616	4,681	$1,55.10^{13}$

6.2. Dielektrik Karakteristikler

MIS kondansatörün ışınlamadan önce ve sonra ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m) değerleri kullanılarak dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp tanjantı veya faktörü ($\tan\delta$), a.c. elektriksel iletkenlik (σ_{ac}), kompleks elektrik modülüsün (M^*) gerçel (M') ve sanal (M'') kısımları ile kompleks empedansın (Z^*) reel (Z') ve sanal (Z'') kısımları gibi dielektrik parametreleri hesaplandı. Bu hesaplamalarda aşağıda verilen bağıntılar kullanılmıştır.

Yalıtkan oksit kapasitansı C_{ox} aşağıdaki gibi verilir [6,8].

$$C_{ox} = C_{ma} \left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_{ox}} \quad (6.1)$$

Burada d_{ox} arayüzey yalıtkan/oksit tabaka kalınlığı ve A MIS kondansatör alanıdır. Kompleks dielektrik geçirgenlik ϵ^* aşağıdaki gibi tanımlanır [12-14,37,72,79-81].

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (6.2)$$

Burada ϵ' ve ϵ'' , sırasıyla kompleks geçirgenliğin reel ve sanal kısımları dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp olarak adlandırılır. Bağıntıda verilen i ise $i^2 = -1$ özelliğine sahip standart sanal birimdir. ϵ' ve ϵ'' sırasıyla aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$\epsilon' = \frac{C_m}{C_0} \quad (6.3)$$

$$\epsilon'' = \frac{G_m}{C_0 \omega} \quad (6.4)$$

Burada $C_0 = \epsilon_0 (A/d_{ox})$ plakaları arası boş yani dielektriksiz kondansatörün kapasitansı ve ω ($=2\pi f$) ise açısal frekanstır.

Dielektrik kayıp tanjantı $\tan\delta$, dielektrik kaybın dielektrik sabitine oranına eşittir.

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (6.5)$$

Dielektrik malzemenin a.c. elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan \delta (d_{ox}/A) = \varepsilon'' \omega \varepsilon_0 \quad (6.6)$$

Kompleks elektrik modülüs (M^*), kompleks dielektrik geğerrenliğin tersi olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = M' + iM'' \quad (6.7)$$

Burada M' ve M'' sırasıyla kompleks elektrik modülüsün reel ve sanal kısımlarıdır. Reel ve sanal kısımlar;

$$M' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (6.8)$$

$$M'' = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (6.9)$$

Kompleks empedans (Z^*), kompleks dielektrik geğerrenliğin tersi olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Z^* = \frac{1}{i\omega C_0 \varepsilon^*} = Z' + iZ'' \quad (6.10)$$

Burada Z' ve Z'' sırasıyla kompleks empedansın reel ve sanal kısımlarıdır. Reel ve sanal kısımlar;

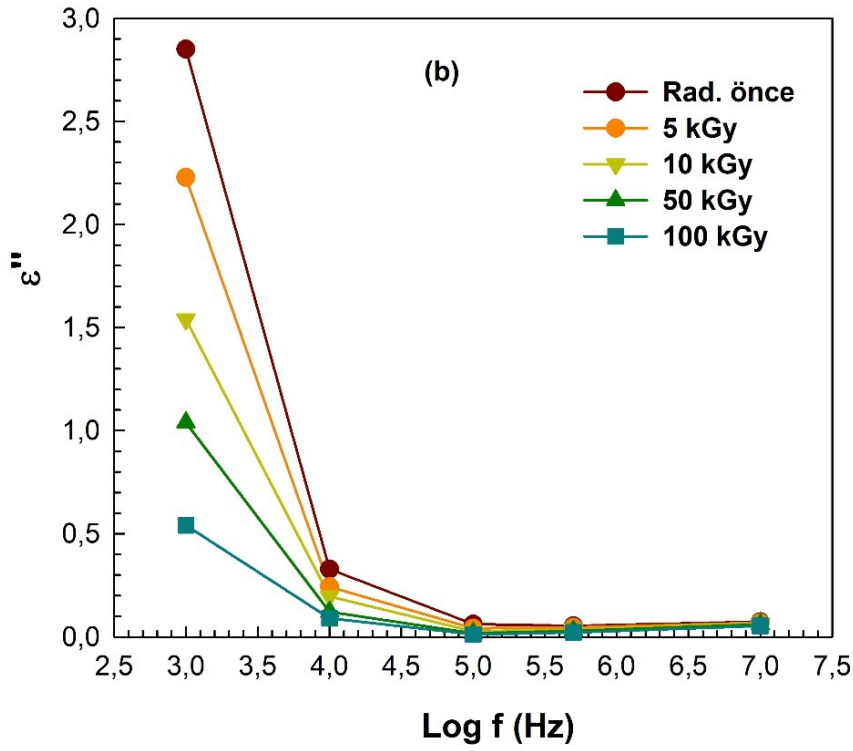
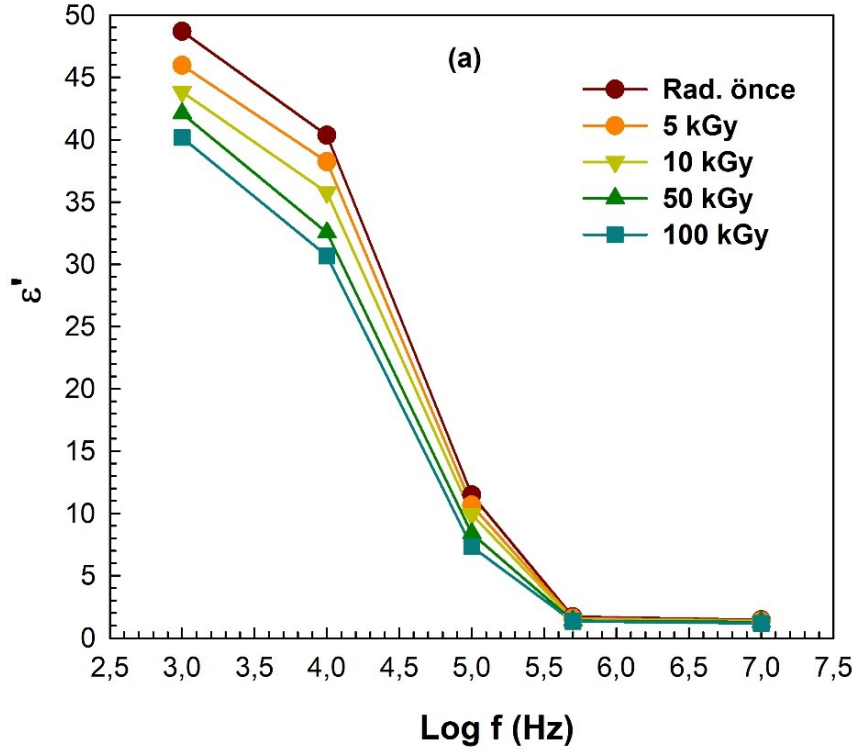
$$Z' = \frac{1}{\omega C_0 \varepsilon''} \quad (6.11)$$

$$Z'' = \frac{1}{\omega C_0 \varepsilon'} \quad (6.12)$$

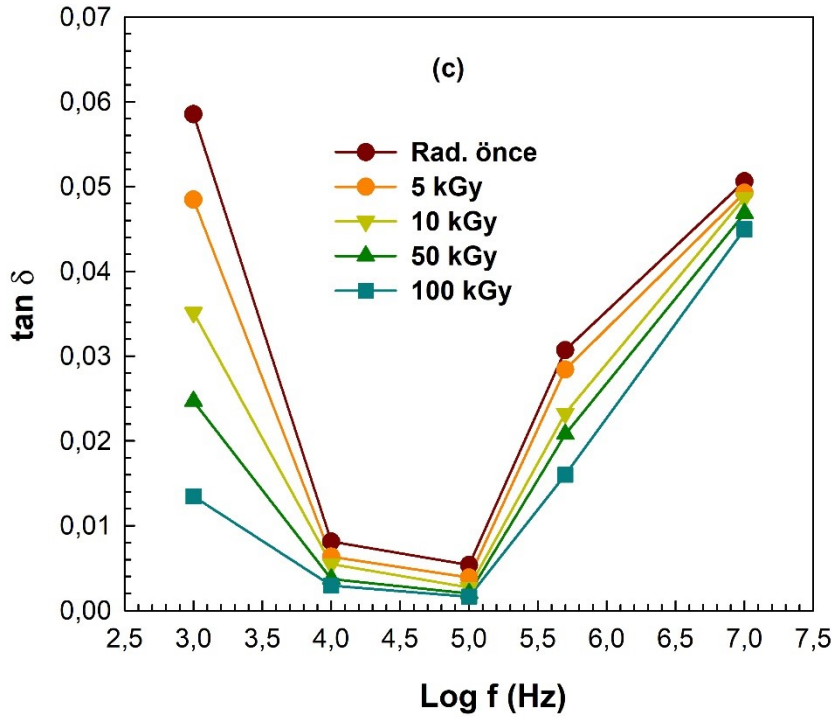
Oda sıcaklığında frekansın bir fonksiyonu olarak ε' , ε'' ve $\tan \delta$ 'nın radyasyon dozuna bağlı değişim eğrileri sırasıyla Şekil 6.7 (a-c)'de gösterilmiştir. Şekil 6.7.a ve b'de görüldüğü gibi, hem ε' hem de ε'' değeri her frekansta artan gama radyasyon dozu ile azalmaktadır. Ancak yüksek frekanslarda bu değişim daha az olmaktadır. Dielektrik sabitindeki azalma, ışınlamanın neden olduğu yer değiştirme hasarı ile açıklanabilir. Aynı zamanda kapasitans

artan gama radyasyon dozu ile azalmaktadır. Ayrıca ϵ' değeriindeki bu azalmanın nedeni, atomik yer değiştirmelerin ve farklı tipte örgü kusurlarının meydana gelmesi ve bunların gama ışınlamından sonra yeniden düzenlenmesi olabilir. Bununla beraber, radyasyon ile uyarılan yük taşıyıcıları yasak enerji aralığında bazı kusurlar arasında geçiş yapabilir. Bu durum artan doz ile ϵ' değerinin azalmasına neden olabilir [47,62,79,81-87]. Dielektrik sabiti ve kaybın frekans bağımlılığı, kapasitans ve iletkenliğin frekans bağımlılığından ileri gelmektedir. Yani Şekil 6.7.a ve b'de, ϵ' ve ϵ'' değerinin elektrik alan frekansının artmasıyla azaldığı ve yüksek frekanslarda değerlerinin hemen hemen değişmediği görülmektedir. Dielektrik sabitinin frekans bağımlılığı, arayüzey veya uzay yük polarizasyon etkisine atfedilir. Daha düşük frekanslarda, uzay yüklerinden kaynaklanabilecek örgü kusurları nedeniyle ϵ' ve ϵ'' değeri büyük olmaktadır. Çünkü düşük frekanslarda uzay yüklerinin polarizasyonu daha baskındır. Dipoller, düşük frekanslarda uygulanan alana uyarılır. Frekans arttıkça, malzemenin net polarizasyonu azalır ve böylece dielektrik sabitinin değeri azalır. Dielektrik kaybı ne kadar düşükse, bir dielektrik malzeme o kadar verimli olur.

Şekil 6.7.c'de görüldüğü gibi, $\tan\delta$ radyasyon dozunun bir fonksiyonudur. $\tan\delta$ değeri ise her frekansta artan ışınlama dozu ile azalmaktadır. Ancak her ışınlama dozunda ilk önce 100 kHz frekans değerine kadar artan frekansla azalırken daha sonra artan frekansla artmaktadır.

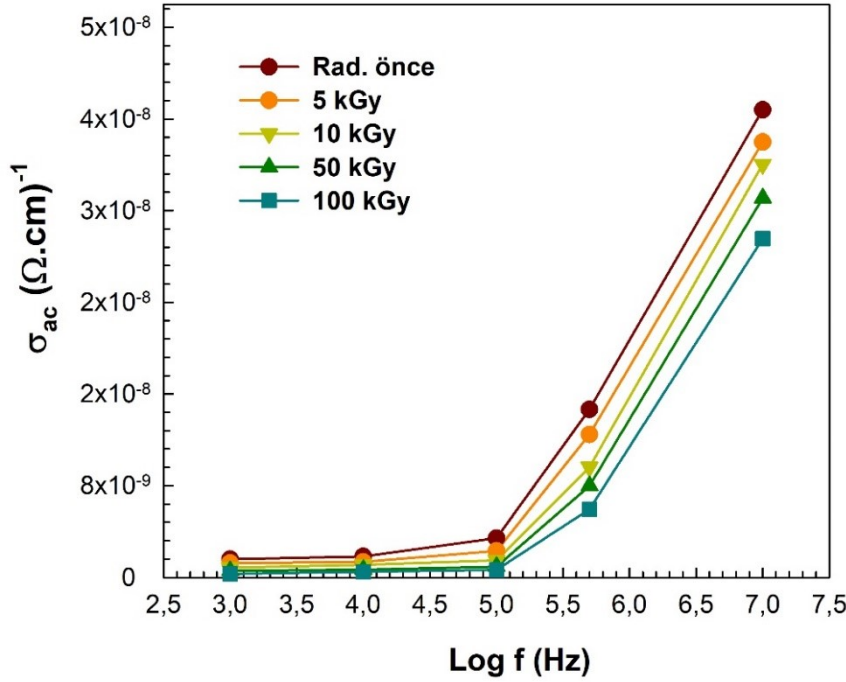


Şekil 6.7. MIS kondansatörün frekansın fonksiyonu olarak farklı radyasyon dozları için
a) ϵ' -logf b) ϵ'' -logf ve c) $\tan\delta$ -logf eğrileri



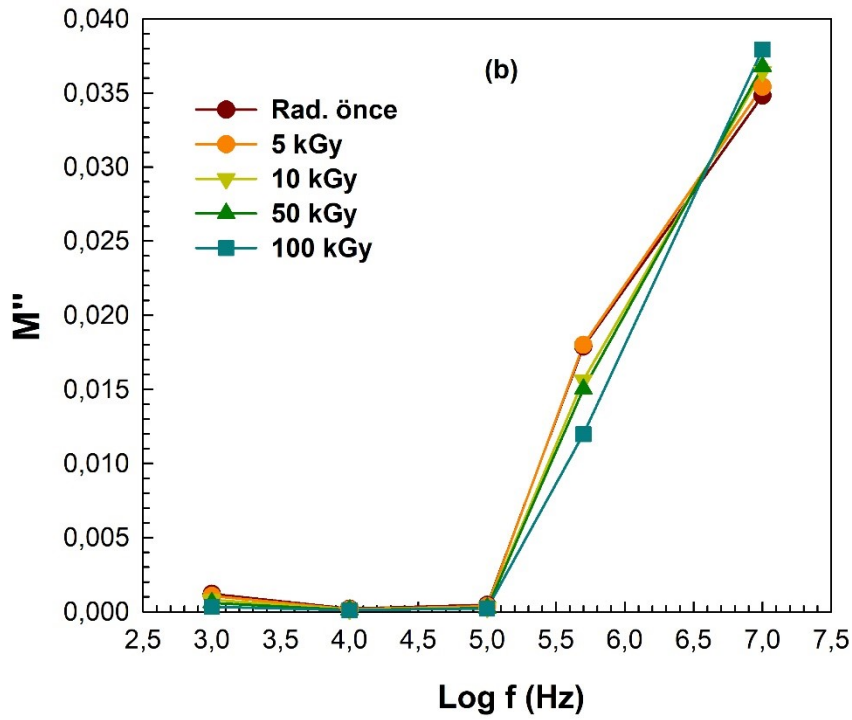
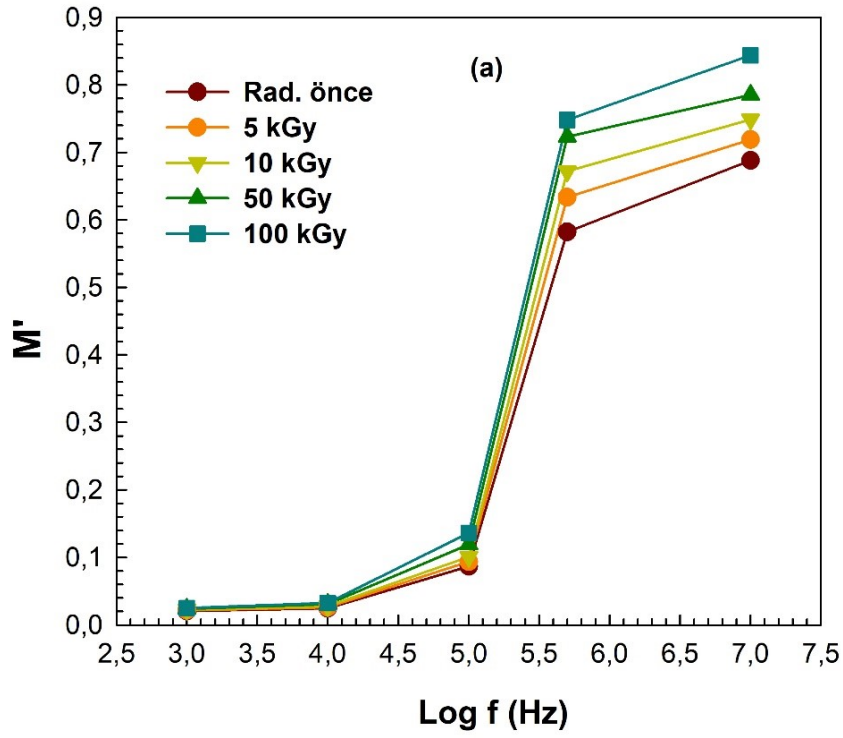
Şekil 6.7. (devam) MIS kondansatörün frekansın fonksiyonu olarak farklı radyasyon dozları için a) ϵ' -logf b) ϵ'' -logf ve c) $\tan\delta$ -logf eğrileri

Elektriksel iletkenliğin farklı radyasyon dozlarında frekansın bir fonksiyonu olarak çizilen σ_{ac} -logf eğrileri Şekil 6.8'de verilmiştir. Şekilde, σ_{ac} değeri her frekansta artan gama radyasyon dozu ile azalırken, her ışınlama dozunda ise artan frekansla lineer olarak arttığı görülmektedir. Işınlama dozu arttıkça iletkenliğin azalması, akım iletimindeki azalmaya atfedilebilir [74,79,88-91]. Öte yandan, σ_{ac} 'nin frekans bağımlılığı incelendiğinde düşük frekanslarda σ_{ac} değeri frekanstan bağımsız iken yüksek frekanslarda frekansa bağlı olduğu açıktır. Hareketli yük taşıyıcıları ve uzay yükü taşıyıcılarının oluşumu, frekansın artmasıyla birlikte σ_{ac} 'in yükselmesine neden olan faktörlerdir [91,92]. Ayrıca, artan frekans dipol polarizasyonunu dolayısıyla ac iletimi arttırır.



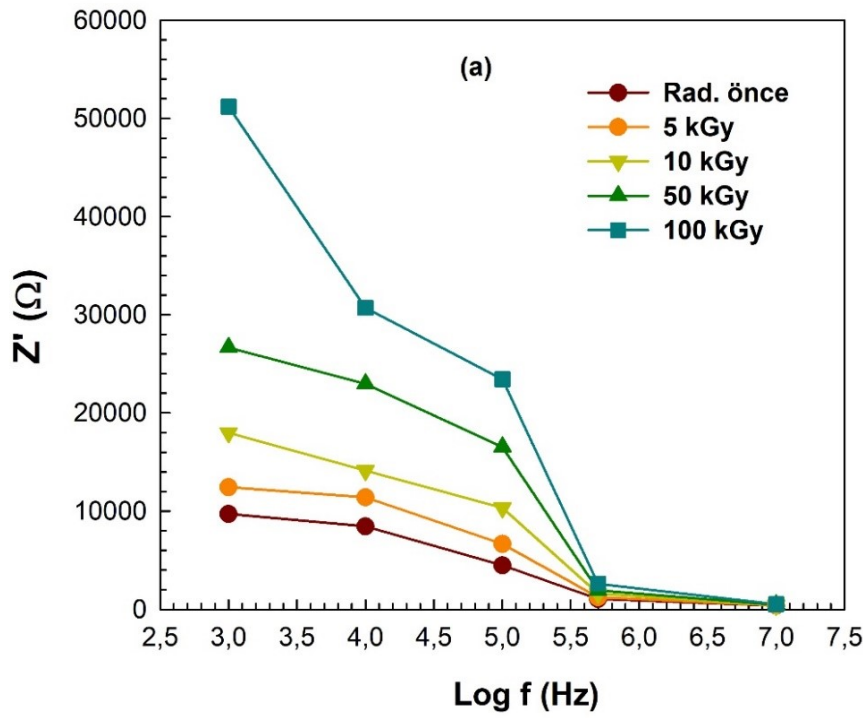
Şekil 6.8. Farklı radyasyon dozları için frekansın fonksiyonu olarak çizilen σ_{ac} -logf eğrileri

Şekil 6.9.a ve b’de, kompleks elektrik modülüsün (M^*) sırasıyla reel (M') ve sanal (M'') kısımlarının farklı radyasyon dozları için frekansın fonksiyonu olarak çizilen M' -logf ve M'' -logf eğrileri gösterilmiştir. Şekil 6.9.a’da görüldüğü gibi, M' değeri her bir frekansta artan radyasyon dozu ile artmaktadır. Işınlamadan sonra elektrik modülüs parametrelerindeki değişim, arayüzey durumlarının pasifleştirildiğini göstermektedir. Aynı zamanda M' değeri her radyasyon dozunda artan frekans ile artmaktadır. 100 kHz’e kadar M'' ’nın değeri artan frekansla hemen hemen değişmemekte ve daha sonra uzay yük polarizasyonunun etkisi nedeniyle hızlı bir şekilde değeri artmaktadır.

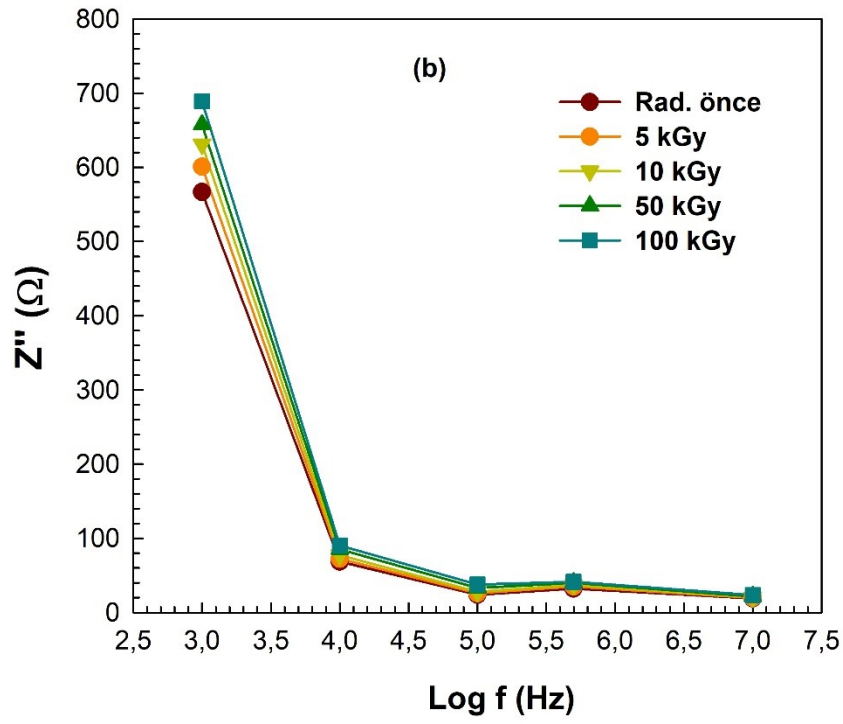


Şekil 6.9. Farklı radyasyon dozları için frekansın fonksiyonu olarak çizilen a) M' -logf b) M'' -logf eğrileri

Empedans ($Z=1/Y=1/(G+i\omega C)$), frekansın bir fonksiyonu olarak kapasitans ve iletkenlikten oluşur. Şekil 6.10.a ve b'de, kompleks empedansın (Z^*) sırasıyla reel (Z') ve sanal (Z'') kısımlarının farklı radyasyon dozları için frekansın fonksiyonu olarak çizilen Z' -logf ve Z'' -logf eğrileri gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, hem Z' hem de Z'' değeri her bir frekansta artan gama radyasyon dozu ile artmaktadır. Ayrıca, Z' ve Z'' değeri artan frekans ile azalmaktadır. Radyasyon kaynaklı kusurlar, malzemedeki hareketli yük taşıyıcı yoğunluğunun azalmasına neden olurlar [93]. Hareketli yük taşıyıcıların tuzaklanması ile malzemenin empedansı artar.



Şekil 6.10. Farklı radyasyon dozları için frekansın fonksiyonu olarak çizilen a) Z' -logf b) Z'' -logf eğrileri



Şekil 6.10. (devam) Farklı radyasyon dozları için frekansın fonksiyonu olarak çizilen
a) Z' -logf b) Z'' -logf eğrileri



7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, gama radyasyonun titanyum dioksit (TiO_2) arayüzey yalıtkan tabakalı $\text{Au/TiO}_2/\text{n-Si}$ (MIS) kondansatörün elektrik ve dielektrik karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. MIS kondansatör ışınlama dozu $0,69 \text{ kGy/h}$ olan ^{60}Co gama-ışın kaynağı ile $0-100 \text{ kGy}$ radyasyon doz aralığında ışınladı. Her ışınlama dozundan sonra MIS kondansatörün kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri, beş farklı frekansta gerçekleştirildi. Radyasyondan önce ve sonra elde edilen ölçüm verileri MIS kondansatörün elektriksel ve dielektrik parametrelerin hesaplanmasında kullanıldı.

C-V ve G/ω -V ölçümleri yarıiletken aygıtların elektrik ve dielektrik özelliklerinin incelenmesi için kullanılan temel karakteristiklerdir. MIS kondansatörün radyasyon tepkisi, gama ışınlaması ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, radyasyonun özellikle yığılma ve tükenim bölgelerinde, kondansatörün C-V ve G/ω -V özellikleri üzerinde bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. MIS kondansatörün ışınlamadan sonra ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri artan radyasyon dozu ile azalmaktadır. Bu azalma, gama ışınlamasının neden olduğu radyasyon kaynaklı kusurlara yani yalıtkan/yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey tuzaklarına atfedildi. Radyasyonun neden olduğu kusurlar ayrıca tuzak görevi görebilir. Ayrıca, dielektrik sabiti, dipol sayısı ile kapasitans ise dielektrik sabiti ile doğru orantılıdır. Kapasitans ışınlama doz ile azaldıkça, malzeme içindeki dipollerin sayısı soğurulan dozla azalır. Dipol sayısının azalmasının nedeni, malzeme içinde bulunan bazı dipolleri nötralize eden yük taşıyıcıların yeniden birleşmesi ile açıklanabilir. Gama ışınlaması işlemi sırasında, uyarılmış yük taşıyıcıları yasak banttaki bazı kusurlara geçebilir. Bu işlem kapasitansı azaltarak bir miktar sabit yükü nötralize eder. MIS/MOS aygıtların iyonlaştırıcı radyasyona karşı en hassas kısmı, iyonlaştırıcı radyasyon tarafından elektron-boşluk çiftlerinin üretildiği yalıtkan oksit tabakasıdır.

MIS kondansatörün $1 \text{ kHz}-1 \text{ MHz}$ frekans aralığında gerçekleştirilen C-V ve G/ω -V ölçümlerinden, kapasitans ve iletkenlik değerlerinin artan frekansla birlikte azaldığı görülmektedir. Kapasitans ve iletkenliğin frekans ile değişimi, MIS yapının arayüzeyinde arayüzey durumlarının sürekli dağılımı ile açıklanabilir. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarındaki yükler ac sinyali takip edebilir ve böylece kapasitansa katkıda bulunurlar. Bu nedenle düşük frekanslarda kapasitans değeri daha yüksektir. Yüksek frekanslarda yükler ac sinyali takip edemez ve toplam kapasitansa katkıları ihmal edilebilir.

Işınlamadan sonra seri direnç (R_s) değeri artan radyasyon dozu ile artmaktadır. Bu artma, arayüzey tuzak yüklerinin metal-yarıiletken arayüzeyinde bulunan tuzaklardan kaçmak için yeterli enerjiye sahip olmasına atfedilebilir. Ayrıca, R_s -V eğrilerinde gözlenen pik arayüzey durumları ile ilişkilidir. Bu pik, yük taşıyıcının yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki dağılımına bağlıdır. Ek olarak, R_s 'nin bu frekans bağımlılığı, arayüzey yükü, sabit oksit yükü, oksitle tuzaklanmış yük gibi frekansa bağlı yüklerin sonucudur.

MIS kondansatörün C^{-2} -V karakteristikleri yardımıyla yapının difüzyon potansiyeli (V_D), katkı atomları yoğunluğu (N_D), engel yüksekliği (Φ_B), tükenim tabakası genişliği (W_D) ve arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) gibi temel elektriksel parametreleri ışınlamadan önce ve sonra hesaplandı. Artan radyasyon dozu ile Φ_B , W_D ve N_{ss} parametrelerin değeri artarken N_D parametresinin değerinin azaldığı gözlemlendi. Arayüzey durumlarının gama ışınlamasından sonra artması, radyasyon kaynaklı arayüzey kusurlarının ortaya çıkmasına atfedilmektedir. Bir başka ifadeyle, ışınlama daha fazla arayüzey durumuna neden olmaktadır.

Işınlamadan önce ve sonra ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri kullanılarak MIS kondansatörün dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$), ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}), elektrik modülü (M^*) ve empedans gibi dielektrik parametreleri hesaplandı. Artan doz ile dielektrik sabitinin azalması, ışınlamanın neden olduğu yer değiştirme hasarı ile açıklanabilir. Radyasyon dozuna bağlı olarak ϵ' ve ϵ'' değerlerinin azalması, hareketli yük taşıyıcıların oluşması veya elektrik yükünü iletebilen dipolar moleküllerin kolaylıkla yönlendirilmesi ile açıklanabilir. Radyasyon nedeniyle yalıtkan oksitte meydana gelen yapısal değişiklikler, bu yük taşıyıcıların ve dipolar moleküllerin oluşumuna neden olur. Ayrıca ϵ' ve ϵ'' parametreleri frekans ile değişmektedir. Artan frekansla birlikte ϵ' ve ϵ'' değeri azalmaktadır. Düşük frekans bölgesindeki ϵ' ve ϵ'' değerinin yüksek olması, arayüzey polarizasyonuna atfedilmektedir. Ayrıca, düşük frekanslarda, elektrik dipollerinin değişen ac alan ile hizalanmak için yeterli zamanı vardır. Bu nedenle dielektrik sabiti yüksektir. Ancak yüksek frekanslarda dipollerin hizalanması ve polarizasyon etkileri için daha kısa süre bulunması nedeniyle dielektrik sabitinin değeri düşer. Bununla beraber, düşük frekanslarda yani $f \ll (2\pi\tau)^{-1}$ için, arayüzey dipolleri, uygulanan ac alanını takip edebilir. Bununla birlikte, daha yüksek frekanslarda yani $f \gg (2\pi\tau)^{-1}$ için, dipoller uygulanan ac alanını takip edemez ve dolayısıyla ϵ' ve ϵ'' frekanstan bağımsız olarak sabit bir değere ulaşır. Burada τ , dipollerin durulma süresini temsil etmektedir. Artan radyasyon dozu ile ac iletkenliği azalması, akım iletimindeki azalmadan

kaynaklanmaktadır. Kompleks empedansın reel Z' ve sanal Z'' değerleri artan frekans ile azalmakta ama her bir frekansta artan gama radyasyon dozu ile artmaktadır. Bu davranış radyasyon kaynaklı kusurların malzemedeki hareketli yük taşıyıcı yoğunluğunun azalmasına neden olmasından ileri gelmektedir.

Geniş bir frekans ve radyasyon aralığında geręekleřtirilen deneysel ölçüm sonuçları, hazırlanan MIS kondansatörün hem elektrik hem de dielektrik özelliklerinin hem frekans hemde radyasyon ile önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. C-V ve G/ω -V karakteristiklerinin ayrıntılı analizi, gama radyasyonunun arayüzey tuzakları ve elektron-deşik çiftleri oluşturduğunu gösterdi. Bununla beraber, yüksek enerjili parçacıkların meydana getirdiği hasar, esas olarak enerji bant aralığında girilebilir enerji seviyelere sahip kusurların ortaya çıkmasına neden olur. Deneysel sonuçlar, MIS kondansatörün elektrik ve dielektrik parametrelerinin frekans ve radyasyon bağımlılığı yanı sıra seri dirence, arayüzey durumlarına, yalıtkan/yarıiletken arayüzey kalitesine ve yalıtkan tabakanın homojenliğine bağlı olduğunu da göstermiştir. Sonuç olarak bu çalışmada hazırlanan Au/TiO₂/n-Si (MIS) kondansatörün MOS-tabanlı radyasyon sensörü/dozimetresi olarak kullanımının uygun olduğunu söyleyebiliriz.



KAYNAKLAR

1. Cohen, M.L. Louie, S.G. (2016). *Fundamentals of Condensed Matter Physics*, (First Edition). Cambridge, Description: Cambridge University Press, 159-177.
2. Michael P. Marder, (2010). *Condensed Matter Physics*, (Second Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, 638-639.
3. Schottky, W. (1939). *Halbleiterteorie der Sperrschicht*. Naturwissenschaften: Z. Physics. 113, 367-414.
4. Mott, N. F. (1938). *Note on contact between a metal and an insulator or semiconductor*. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 34, 568-572.
5. Rhoderick, E. H., Williams, R. H. (1988). *Metal Semiconductor Contacts*. (First Edition). Oxford: Oxford Press, 1-47.
6. Sze, S. M., Kwok, K. N. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*. (Third edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 154-300.
7. Boylestad, R., Nashelsky, L. (2000). *Electronic Devices and Circuit Theory*. New York: Prentice-Hall, 3-25.
8. Nicollian, E. H., Brews J. R. (1982). *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons, 40-439.
9. Papadopoulos, C. (2014). *Solid State Electronic Devices*, New York: Springer-Verlag, 95-117.
10. Neamen, D. A. (1997). *Semiconductor Physics and Devices*. (Second Edition). New York: Mc Graw-Hill, 420-523.
11. Li, S.S. (2006). *Semiconductor Physical Electronics*, (Second Edition). New York: Springer.
12. Chelkowski, A. (1980). *Dielectric Physics*. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub, 1-128.
13. Raju, G. G. (2003). *Dielectrics in Electric Fields*. New York: Marcel Dekker Inc, 35-195.
14. Kao, K. C. (2004). *Dielectric Phenomena in Solids*. Amsterdam: Elsevier, 40-110.
15. Li, F.M. Nathan, A. (2005). *CCD Image Sensors in Deep-Ultraviolet: Degradation Behavior and Damage Mechanisms (Microtechnology and MEMS)*, New York: Springer.
16. Knoll, G. F. (2000). *Radiation Detection and Measurement*. Newyork: Wiley, 507 -508.
17. Ma, T. P., Dressendorfer, P. V. (1989). *Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits*. New York: John Wiley & Sons, 87-231.

18. Chauhan, R. K., Chakrabarti, P. (2002). Effect of Ionizing Radiation on MOS Capacitors. *Microelectronic Journal*, 33, 197-203.
19. Hakan Tanrikulu, (2017). *Au/TiO₂/n-Si (MIS) Yapının Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 16-33.
20. Ertuğrul Uyar, Raziye. (2016). *Silisyum Nitrat Arayüzey Yalıtkan Tabakalı MIS Yapının Elektrik ve Dielektrik Parametreleri Üzerine Gama Radyasyonunun Etkileri*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
21. Grove, A. S. (1967). *Physics and Technology of Semiconductor Devices*. New York: John Wiley & Sons, 91-357.
22. Chu J., Sher A. (2010). *Device Physics of Narrow Gap Semiconductors*. California: Springer, 203-209.
23. Colinge, J.P. Colinge, C.A. (2002). *Physics of Semiconductor Devices*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.
24. Ghandhi, S. K. (1983). *VLSI Fabrication Principles*. New York: John Wiley & Sons, 401-405.
25. Dieter K. Schroder, (2006). *Semiconductor Material and Device Characterization*, (Third Edition). New Jersey. Ionizing Radiation Effects in Electronics, 79-94.
26. Tataroğlu, A. (2004). *MOS Yapılarda Temel Fiziksel Parametrelerin Frekans ve Radyasyon Miktarına Bağlı İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-77.
27. Nicollian, E. H., Goetzberger, A. (1967). The Si-SiO₂ Interface - Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique. *Bell System Technical Journal*, 46, 1055-1133.
28. Stuart, M. A. (2007). *IN-SITU Measurement of Total Dose Radiation Effects on Parallel Plate MOS Capacitors Using the NPS Linear Accelerator*, California, Naval Postgraduate School, 47-56.
29. Schwank, J. R. (1994). *Basic Mechanisms of Radiation Effects in the Natural Space Radiation Environment*. New Mexico: Sandia National Laboratories, 11-43.
30. Barbottin, G. Vapaille, A. (1999). *Instabilities in Silicon Devices: New Insulators, Devices and Radiation Effects*, Amsterdam: Elsevier.
31. Srour, J. R., McGarrity, J. M. (1988). Radiation Effects on Microelectronics in Space. *Proceedings of the IEEE*, 76, 1446- 1451.
32. Bagatin, M. Gerardin, S. (2016). *Ionizing Radiation Effects in Electronics: From Memories to Imagers*, Boca Raton: CRC press.
33. Fröhlich, H. (1958). *Theory of Dielectrics*. Oxford: Clarendon Press, 1-78.

34. Tareev, B. (1979). *Physics of Dielectric Materials*. Moscow: Mir Publishers, 67-156.
35. 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.
36. Acar, F. Z. (2022). *Au/ZnO/p-InP (MOS) Kapasitörün Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Frekans ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
37. Symth, C. P. (1955). *Dielectric Behavior and Structure*. New York: McGraw-Hill.
38. Harrop, P. J. (1972). *Dielectrics*. London: Butterworths.
39. Parrino, F. Palmisano, L. (2020). *Titanium Dioxide (TiO₂) and Its Applications*, Amsterdam: Elsevier.
40. Khataee, A. Mansoori, G.A. (2011). *Nanostructured Titanium Dioxide Materials: Properties, Preparation and Applications*, World Scientific Publishing Company.
41. Winkler, J. (2013). *Titanium Dioxide Production, Properties and Effective Usage*, Hannover, Vincentz Network.
42. Diebold, U. (2003). Structure and Properties of TiO₂ Surfaces: a Brief Review. *Applied Physics A*. 76 (5), 681-687.
43. 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.
44. 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.
45. Senthil Srinivasan 1, V.S. Pandya, A. (2011). Dosimetry aspects of hafnium oxide metal-oxide-semiconductor (MOS) capacitor. *Thin Solid Films*, 520, 574–577.
46. Muthuseenu, K. Barnaby, H.J. Patadia, A. Holbert, K. Privat, A. (2020). Ionizing radiation tolerance of stacked Si₃N₄-SiO₂ gate insulators for power MOSFETs. *Microelectronics Reliability*, 104, 113554.
47. 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.
48. 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.

49. Taşcıoğlu, 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.
50. Akay, D. Gokmen, U. Ocak, S.B. (2015). Radiation-induced changes on poly (methylmethacrylate) (PMMA)/lead oxide (PbO) composite nanostructure. *Physica Scripta*, 94, 115302.
51. Oldham, T. R. (1999). *Ionizing Radiation Effects in MOS Oxides*. Singapore: World Scientific Publishing, 1-65.
52. Aydin, H. Tataroglu, A. Ahmed A. Al-Ghamdi, Yakuphanoglu, F. Farid El-Tantawy, 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.
53. Arslan, E. Safak, Y. Altındal, S. Kelekci, Ö. Özbay, E. (2010). Temperature dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGaN/AlN/GaN heterostructures. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356, 1006-1011.
54. Rahman, A. Sanyal, M.K. (2009). Negative capacitance in Wigner crystal forming polymer nanowires. *Applied Physics Letters*, 94, 242102.
55. Tanrikulu, E.E. Akin, B. (2022). On the Negative Capacitance of the Au/ZnO/n-GaAs Structures in the Capacitance–Voltage Plots at the Accumulation Zone for High Frequencies. *Journal of Electronic Materials*, 51, 4437–4445
56. Nisika, Anupam Ghosh, Damanpreet Kaur, Kulwinder Kaur, Manoj K. Yadav, Ankush Bag, Mukesh Kumar, (2022). Interface Engineering of CZTS/TiO₂ Heterojunction Using Wide-Bandgap Ga₂O₃ Passivation Interlayer for Efficient Charge Extraction. *Phys. Status Solidi A*, 219, 2200001.
57. Ata, D. Yeriskin, S.A. Tataroglu, A. Balbasi, M. (2022). Analysis of admittance measurements of Al/Gr-PVA/p-Si (MPS) structure. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 169, 110861.
58. Âdem Tataroglu, Semsettin Altındal, Yashar Azizian-Kalandaragh, (2021). Electrical characterization of Au/n-Si (MS) diode with and without graphene-polyvinylpyrrolidone (Gr-PVP) interface layer. *Journal of Materials Science: Mater, Electron*, 32, 3451–3459.
59. Ashery, A. Farag, A.A.M. Moussa, M.A. Turkey, G.M. (2021). Electrical performance of nanocrystalline graphene oxide/SiO₂-based hybrid heterojunction device. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 121, 105415.
60. Manas, S.H. Chinnamuthu, P. (2021). Investigation on the effect of interface state density and series resistance in Ag/Ge-NW/Si (MS) device synthesized by glancing angle deposition technique. *Materials Letters*, 300, 130183.
61. Esra Efil Kutluoglu, Elif Oz Orhan, Ozkan Bayram, Sema Bilge Ocak, (2021). Gamma-ray irradiation effects on capacitance and conductance of graphene-based Schottky diode. *Physica B*, 621, 413306.

62. Shiwakoti, N. Bobby, A. Asokan, K. Antony, B. (2017). The role of electronic energy loss in SHI irradiated Ni/oxide/n-GaP Schottky diode. *Microelectronics Reliability*, 69, 40–46.
63. A. Birkan Selcuk, S. Bilge Ocak, O. Faruk Yuksel, (2008). Effects of gamma irradiation on dielectric characteristics of SnO₂ thin films. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 594, 395–399.
64. A. Teffahi, D. Hamri, A. Mostefa, A. Saidane, N. Al Saqri, J.F. Felix, M. Henini, (2016). Effect of ⁶⁰Co γ -ray irradiation on electrical properties of Ti/Au/GaAs_{1-x}N_x Schottky diodes. *Current Applied Physics*, 16, 850-858.
65. Savita Maurya, (2016). Effect of zero bias Gamma ray irradiation on HfO₂ thin films, *Journal of Materials: Mater, Electron*, 27, 12796–12802.
66. A. Baltakesmez, B. Güzeldir, M. Saglam, M. Biber, (2021). Interpretation of the I–V, C–V and G/ ω -V characteristics of the Au/ZnS/n-GaAs/In structure depending on annealing temperature. *Physica B*, 611, 412801.
67. Omar Rejaiba, Alejandro F. Braña de Cal, Adel Matoussi, (2019). A comprehensive study on the interface states in the ECR-PECVD SiO₂/p-Si MOS structures analyzed by different method. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 109, 84–92.
68. Rajshree Rajkumari, Chitralkha Ngangbam, Naorem Khelchand, (2021). Singh Presence of capacitive memory in GLAD-synthesized WO₃ nanowire. *Journal of Materials: Mater. Electron*. 32, 3191–3200.
69. Mehmet Okan Erdal, Adem Kocyigit, Murat Yıldırım. (2020). The C-V characteristics of TiO₂/p-Si/Ag, GNR doped TiO₂/p-Si/Ag and MWCNT doped TiO₂/p-Si/Ag heterojunction Devices. *Chinese Journal of Physics*, 64, 163–173.
70. Ahmet Kaymaz, Esra Evcin Baydilli, Habibe Uslu Tecimer, Semsettin Altındal, , Yashar Azizian-Kalandaragh. (2021). Evaluation of gamma-irradiation effects on the electrical properties of Al/(ZnO-PVA)/p-Si type Schottky diodes using current-voltage measurements. *Radiation Physics and Chemistry*, 183, 109430.
71. Yilmaz, E. Kaya, Ş. (2016). A Detailed Study on Zero-Bias Irradiation Responses of La₂O₃ MOS Capacitors. *Institute of Electrical and Electronics Engineers: Transactions on Nuclear Science*, 63, 1301-1305.
72. Shiwakoti, N. Bobby, A. Asokan, K. Antony, B. (2017). Effect of Au⁸⁺ irradiation on Ni/n-GaP Schottky diode: Its influence on interface state density and relaxation time. *Physica B*, 504, 133–138.
73. Salari, M. A. Şenarslan, E. Güzeldir, B. Sağlam, M. (2016). Effects Of the γ - radiation on the electrical characteristics of the Au/n-Si/Au-Sb Schottky diode. *Journal of Physics: Conference Series*, 707, 012018.
74. Lok, R. Budak, E. Yılmaz, E. (2020). Radiation response of zirconium silicate P-MOS capacitor. *Microelectronics Reliability*, 109, 113663.

75. Oeba, D.A. Bodunrin, J.O. Moloi, S.J. (2021). Electric properties of 3 MeV proton irradiated silicon Schottky diodes. *Physica B*, 610, 412786.
76. Akkal, B., Benamara, A., Gruzza, B., Bideux, L. (2000). Characterization of interface states at Au/InSb/InP(100) Schottky barrier diodes as a function of frequency. *Vacuum*, 57, 219-228.
77. Tataroglu, A. Altındal, S. (2008). Characterization of interface states at Au/SnO₂/n-Si (MOS) structures. *Vacuum*, 82 1203–1207.
78. Gullu, O. Demir, F. Cimilli, F.E. Biber, M. (2008) γ -Irradiation-induced changes at the electrical characteristics of Sn/p–Si Schottky contacts. *Vacuum*, 82, 789–793.
79. 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.
80. Uslu, H. Yıldırım, M. Altındal, Ş. Durmus, P. (2012). The effect of gamma irradiation on electrical and dielectric properties of organic-based Schottky barrier diodes (SBDs) at room temperature. *Radiation Physics and Chemistry*, 81, 362–369.
81. 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.
82. Modi, K. B., Sharma, P. U. (2014). On the effect of SHI irradiation on dielectric properties of Y_{3+x}Fe_{5-x}O₁₂ (x = 0.0–0.6) system. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 169, 723-739.
83. Al-Karmi A. M. (2006). Impedance spectroscopy of gamma irradiated PM-355. *Radiation Measurements*, 41, 209.
84. 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.
85. Noha G. Madian, Mona El-Hossainy, W.A. Khalil, (2018). Improvement of the physical properties of chitosan by γ -ray degradation for wound healing. *Results in Physics*, 11, 951–955.
86. Ahmed G. El-Shamy, Wahib M. Attia, Kamal M. Abd El Kader, (2017). Enhancement of the conductivity and dielectric properties of PVA/Ag nanocomposite films using γ irradiation. *Materials Chemistry and Physics*, 191, 225-229.
87. 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.
88. 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

89. 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 CrCl_3 . *Egyptian Journal of Solids*, 26, 83-91.
90. 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.
91. 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.
92. P.R. Deepthi, Anu Sukhdev, P. Mohan Kumar, J. Shanthi, B. C. Hemaraju, (2020). Growth and impedance analysis of pure TGAc and dye doped TGAc crystals-enhanced dielectric permittivity for energy-storage devices, *SN Applied Sciences*, 2, 1493.
93. Jorlandio F. Felix, Diego L. da Cunha, Mohsin Aziz, Eronides F. da Silva Jr. David Taylor, Mohamed Henini, Walter M. de Azevedo, (2014). Effect of gamma radiation on the electrical properties of Polyaniline/silicon carbide heterojunctions, *Radiation Measurements*, 71, 402-406.





Gazili olmak ayrıcalıktır