



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**AL/CONGO RED/P-TİPİ Sİ YARIİLETKEN
DİYOTLARININ ELEKTRONİK VE
ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE GAMA
IŞINLAMASININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Celal ALTUNIŞIK

Danışman

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

ARALIK-2021
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Celal ALTUNIŞIK tarafından hazırlanan “AL/CONGO RED/P-TİPİ Sİ YARIİLETKEN DİYOTLARININ ELEKTRONİK VE ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE GAMA IŞINLAMASININ ETKİSİ” adlı tez çalışması 09/ 12/ 2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr. Sezai ASUBAY

.....

Danışman

Prof. Dr.Ömer GÜLLÜ

.....

Üye

Prof. Dr. Osman PAKMA

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Tarık ARAL
LEE Müdürü V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Celal ALTUNIŞIK

Tarih: 09/ 12 / 2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AL/CONGO RED/P-TİPİ Sİ YARIİLETKEN DİYOTLARININ ELEKTRONİK VE ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE GAMA IŞINLAMASININ ETKİSİ

Celal ALTUNIŞIK

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

2021, 63 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Sezai ASUBAY

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

Prof. Dr. Osman PAKMA

Bu çalışmada katıhal devre elemanları ve malzemeler üzerindeki ışınlama etkilerinin araştırılması, pek çok bilim insanı ve farklı ülkelerin uzay ajansları konuyla ilgili çalıştıkları için ilgi çekmektedir. Bir foton veya parçacık radyasyonu katıhal devre elemanlarına ve malzemelere uygulanırsa, sert bir bozulma ortaya çıkacaktır. Bu ışınlama prosedürü aşamasında, yarıiletken aygıtlar üzerinde kalıcı veya geçici bozulma durumu oluşabilecektir. Bu tez çalışmasında, MIS diyotun fabrikasyonu için p-tipi Silisyum yarıiletken alttaşlar kullanılmıştır. Kimyasal temizlik aşamasından sonra, Al/Congo Red (CR)/p-Si MIS diyot yapısı omik arka kontak ve Al üst kontağın metalizasyonu ile üretilmiştir. Si alttaşlar üzerinde organik CR ince filmi %0.2 lik etanol çözeltisi içeren congo red çözeltisinin kaplanmasıyla yapılmıştır. Al/CR/p-Si MIS kontak üzerinde ışınlama etkisini araştırmak için, Co-60 γ -ışınlamasından önce ve sonra Akım-Voltaj (IV) ve Kapasite-Gerilim (CV) ölçümleri alındı. I-V verilerinden geleneksel $\ln I$ -V karakteristikleri, Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonları kullanılarak, idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) hesaplandı. Ayrıca, Al/CR/p-Si MIS kontağın arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) da hesaplandı. Aygıtın C-V ölçümlerinden difüzyon potansiyeli (V_d), engel yüksekliği (Φ_b) ve akseptör yük konsantrasyonu (N_a) değerleri hesaplandı.

Anahtar Kelimeler: Silisyum, MIS diyot, Congo Red, Arayüzey hal yoğunluğu

ABSTRACT

MSc THESIS

THE EFFECT OF GAMMA IRRADIATION ON ELECTRONIC AND INTERFACIAL PROPERTIES OF THE AL/CONGO RED/P-TYPE SI SEMICONDUCTOR DIODES

Celal ALTUNIŞIK

**THE POSTGRADUATE EDUCATION INSTITUTE OF BATMAN
UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN PHYSICS**

Advisor: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

2021, 63 Pages

**Jury
Prof. Dr. Sezai ASUBAY
Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ
Prof. Dr. Osman PAKMA**

The investigation of irradiation effects on solid state circuits and materials has attracted as many scientists and space agencies of the different countries are worked in the relevant topic. If the photon or particles radiation applies to the solid state circuits and materials, they will experience hard degradation. The permanent or transient degradation on the semiconductor devices may occur in this irradiation procedure. In this thesis, the p- type silicon semiconductor substrates were used for fabrication of MIS diode. After chemical cleaning procedure, Al/Congo Red (CR)/p-Si MIS diode structure was produced by metalization of ohmic back contact and Al top contact. Organic CR thin film on the Si wafers was made from covering of the congo red dye solution (0.2% in ethanol). To investigate the irradiation effect on the Al/CR/p-Si MIS contact, Current–Voltage (IV) and Capacitance-Voltage (CV) measurements were performed after and before Co-60 γ - irradiation. The ideality factor (n), the barrier height (Φ_b) and series resistance (R_s) from the I-V data were obtained from traditional $\ln I$ -V characteristics, Cheung functions and Norde function. Interface state density (N_{ss}) of the Al/CR/p-Si MIS contact was also calculated. The diffusion potential (V_d), the barrier height (Φ_b) and acceptor charge concentration (N_a) from the C-V data of the device were calculated.

Keywords: Silicon, MIS diode, Congo Red, Interfacial state density

ÖNSÖZ

Katıhal devre elemanları ve malzemeler üzerindeki ışınlama etkilerinin araştırılması, pek çok bilim insanı ve farklı ülkelerin uzay ajansları konuyla ilgili çalıştıkları için ilgi çekmektedir. Bir foton veya parçacık radyasyonu katıhal devre elemanlarına ve malzemelere uygulanırsa, sert bir bozulma ortaya çıkacaktır. Bu ışınlama prosedürü aşamasında, yarıiletken aygıtlar üzerinde kalıcı veya geçici bozulma durumu oluşabilecektir. Radyasyon ortamında yarıiletken aygıtların davranışları ilginç özelliklere sahip olacağından dolayı, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne Yüksek Lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, Al/Congo Red (CR)/p-Si MIS diyot yapısı üzerinde gama ışınlamasının etkileri, IV ve CV yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasının her adımında bana sabırla ve samimiyetle katkılar sunan tez danışmanım ve Fizik Bölümü Bölüm Başkanı olan Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ hocama teşekkürlerimi borç biliyor ve minnetlerimi sunuyorum.

Çalışmalarım esnasında cesaret veren ve samimiyetle destek sunan değerli hocam Prof. Dr. Osman PAKMA hocama teşekkür ediyorum.

Son olarak, bu tez çalışması sürecinde bana anlayış gösteren eşime ve aileme şükranlarımı sunarım.

Celal ALTUNIŞIK

BATMAN-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
ÖNSÖZ	xiv
İÇİNDEKİLER	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
ŞEKİLLER	xx
TABLolar	xxi
ÇİZELGELER	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatürde Yapılan Araştırmaların Özeti	4
2. TEORİK VE KURAMSAL BİLGİLER.....	11
2.1. Yüzey Özellikleri ve MIS Yapılar	11
2.2. MOS Kapasitör Yapısı.....	15
2.3. Farklı Önbesleme konfigürasyonları Altında İdeal MOS Kapasitör	16
2.3.1 Sıfır besleme koşulu (Düz bant koşulu).....	16
2.3.2 Biriktirme (Akümülayon) bölgesi:	16
2.3.3 Tükenim Bölgesi.....	19
2.3.4. Zayıf inversiyon bölgesi	21
2.3.5. Güçlü inversiyon Bölgesi.....	21
2.4. MOS Sisteminde Kusurların Farklı Kaynakları:	23
2.4.1. Arayüzey sabit yükleri (Q_F):	23
2.4.2. Arayüzey tuzak yükleri (Q_{it}):.....	24
2.4.3 Hareketli Oksit yükleri (Q_M):.....	24
2.4.4. Oksit tuzak yükleri (Q_{ot}):	25
2.5. Radyasyonun Yarıiletken Elektronik Devre Elemanları Üzerindeki Etkisi	25
2.6. Gama Işını Hasarı Etkileri	27
2.7. Nötron Hasar Etkileri.....	30
2.8. Tek Olay Etkileri (Single Event Effects, SEEs)	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32

3.1. Tezde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	32
3.1.1. Silisyum Kristalinin özellikleri (Si).....	32
3.1.2. Alüminyum (Al)	33
3.1.3. Congo Red özellikleri	34
3.2. Yarıiletken MIS diyotun üretimi, ısınlanması ve ölçümler	35
3.3. Al/CR/p-Si MIS kontakların Akım-Gerilim (I-V) Özellikleri ve Temel diyot parametreleri	37
3.3.1. Engel yüksekliği ve İdealite faktörü	37
3.3.2. Seri direnç	38
3.3.3. Norde fonksiyonu	39
3.3.4. Cheung fonksiyonu	40
3.3.5 Arayüzey durum yoğunluğu (Nss).....	41
3.4. Yarıiletken kontaklarda Kapasite - Voltaj (C-V) Karakteristikleri	41
4. BULGULAR VE SONUÇLAR.....	43
4.1. I-V Karakteristiklerinin Analizi	43
4.2. C-V Karakteristiklerinin analizi.....	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
5.1 Sonuçlar	55
5.2. Öneriler	59
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Diyotun etkin alanı
A^*	: Richardson sabiti
C	: Kapasite
d	: Uzay yükü bölgesinin genişliği
E_c	: İletkenlik bandının tabanı
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_m	: Maksimum elektrik alanı
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_v	: Enerjisi valans bandı
E_i	: Saf (Asal) Enerji Seviyesi
E_{ss}	: Arayüzey seviyelerinin enerjisi
eV	: Elektron volt
e	: Elektron yükü
ϵ_i	: Dielektrik geçirgenliği
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϕ_b	: Schottky engel yüksekliği
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu
ϕ_{mn}	: n-Tipi yarıiletken iş fonksiyonu
ϕ_{ms}	: Metalin-Yarıiletken iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
I_0	: Ters beslem akımı
I_{sc}	: Kısa devre akımı
k	: Boltzmann sabiti
m_e	: Elektronun durgun kütlesi
n	: İdealite faktörü
ρ	: Kütle yoğunluğu
N_e	: Malzeme içindeki elektron konsantrasyonu
N_a	: Alıcı yük taşıyıcı yoğunluğu

N_c	: Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki durum yoğunluğu
N_d	: Verici (donor) konsantrasyonu
N_{ss}	: Arayüzey hal yoğunluğu
Q_F	: Arayüzey sabit yükleri
Q_{it}	: Arayüzey tuzak yükleri
Q_m	: Hareketli oksit yükleri
Q_{ot}	: Oksit tuzak yükleri
R_s	: Seri direnç
T	: Mutlak sıcaklık
v	: İyon hızı
V_n	: Yarıiletkenin iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki fark
V_T	: Eşik gerilimi
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
V	: Uygulanan potansiyel
V_d	: Difüzyon potansiyeli
V_{yi}	: Yarıiletken Gerilimi
V_y	: Yalıtkan Gerilimi
V_F	: İleri Beslem Gerilimi
V_R	: Geri Beslem Gerilimi
W_D	: Tüketim tabakası genişliği
Ω	: Direnç birimi
γ_N	: Norde yönteminde bir sabit
Z	: İyon yükü sayısı
δ	: Arayüzey tabakasının kalınlığını

Kısaltmalar

CR	: Congo Red
C- V	: Kapasite- gerilim
C- F	: Kapasite- frekans
G- V	: Kondüktans- gerilim
G- F	: Kondüktans- frekans
I-V	: Akım- gerilim
LET	: Doğrusal enerji transferi
MnHA	: Metanolde çözünmüş Mn hexaamide
MS	: Metal- Yarıiletken kontak
MIS	: Metal- Yalıtkan- Yarıiletken kontak
MOS	: Metal-Oksit-Yarıiletken Kontak
OMC	: Organometalik kompleks
PPy	: Polipirol
PMMA	: Polimetil Metakrilat
SE	: Spektroskopik elipsometri
SEE	: Tek olay etkisi

ŞEKİLLER

Şekil 2.1 Bir yarıiletken kristalin yüzeyindeki doymamış bağların gösterimi.....	11
Şekil 2.2 Kristal yüzeyinde meydana gelen bulaşma ve yüzeyin yeniden oluşumu.....	12
Şekil 2.3 Pasivasyon işlemi sonrasında kristal yüzeyindeki bağların durumu.....	13
Şekil 2.4 Geçirgenlikleri ve bant aralıkları farklı dielektrik malzemelerin listesi.....	14
Şekil 2.5 MOS yapısının şematik diyagramı.....	15
Şekil 2.6 Sıfır beslem altında bir MOS kapasitörünün enerji bandı diyagramı.....	16
Şekil 2.7 Birikim durumunda MOS kapasitör.....	17
Şekil 2.8 Birikim bölgesinde taşıyıcı dağılımı.....	18
Şekil 2.9 Birikim bölgesinde enerji band diyagramı.....	18
Şekil 2.10 Tükenim durumunda MOS kapasitör.....	20
Şekil 2.11 MOS yapının tükenim bölgesinde enerji band diyagramı.....	20
Şekil 2.12 Tükenim bölgesinde taşıyıcı dağılımı	21
Şekil 2.13 İnversiyon durumunda MOS kapasitör.....	22
Şekil 2.14 Zayıf ve güçlü inversiyon durumunda taşıyıcı dağılımı.....	22
Şekil 2.15 İnversiyon durumunda MOS kapasitörün enerji band diyagramı.....	23
Şekil 2.16 SiO ₄ 'ün tetrahedral birimleri.....	24
Şekil 2.17 Arayüzey sabit yükleri.....	24
Şekil 2.18 MOS sisteminde bulunan dört tür kusurun şematik diyagramı.....	25
Şekil 2.19 Silikon dioksit ve SiO ₂ /Si arayüzeyinde yük oluşturma süreci ve elektrik alanın değişimi.....	29
Şekil 2.20 Örgüde atomik yerdeğiştirmeden dolayı oluşan çeşitli kusurlar.....	31
Şekil 3. 1 Si yarıiletkeninin kristal yapısının şematik şekli.....	32
Şekil 3. 2 Congo Red (CR) molekül yapısı.....	35
Şekil 3. 3 KEITHLEY 4200-SCS cihazının görünümü.....	36
Şekil 3. 4 Al/CR/p-Si MIS kontağının şematik yapısı ve gama ışınlaması.....	37
Şekil 3. 7 Seri direncin I-V ölçümlerinde gösterdiği etki.....	39
Şekil 4.1 Al/CR/p-Si MIS yapının kontrol ve ışınlanmış durumlara ait lnI-V karakteristikleri.....	44
Şekil 4. 2 Al/CR/p-Si MIS yapının kontrol ve ışınlanmış durumlara ait dV/d(ln(I) - I grafikleri.....	45
Şekil 4. 3 Al/CR/p-Si MIS yapının kontrol ve ışınlanmış durumlara ait H(I)-I grafikleri.....	46

Şekil 4. 4 Al/CR/p-Si MIS yapının kontrol ve ışınlanmış durumlara ait F(V)-V Grafiği.....	47
Şekil 4. 5 Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $N_{ss}-(E_{ss}-E_v)$ grafikleri.....	49
Şekil 4. 6 Gama ışınlamasından önce Al/CR/p-Si MIS yapısının (kontrol) C-V grafikleri.....	50
Şekil 4. 7 Al/CR/p-Si MIS yapısının (ışınlanmış) C-V grafikleri.....	52
Şekil 4. 8 Al/CR/p-Si MIS yapısının (kontrol) C^{-2} -V grafikleri.....	52
Şekil 4. 9 Al/CR/p-Si MIS yapısının (ışınlanmış) C^{-2} -V grafikleri.....	53

TABLolar

Tablo 2.1 Silisyum yapılar üzerinde nötron ve gama radyasyonunun etkileri.....	26
Tablo 2.2 Silisyum ve silikon dioksit için iyonlaşma enerjisi ve iyonlaşma hızı.....	28
Tablo 0.1 Silisyumun bazı özellikleri.....	33
Tablo 0.2 Alüminyumun bazı temel parametreleri.....	34

ÇİZELGELER

Çizelge 4. 1 Al/CR/p-Si MIS yapısına ait kontrol ve ışınlamadan sonraki durumlar için $\ln I$ -V grafiği, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri....	49
Çizelge 4. 2 Kontrol ve ışınlanmış Al/CR/p-Si MIS yapıya ait C^{-2} -V grafiklerinden hesaplanan bazı diyot parametreleri.....	51

1. GİRİŞ

Malzemeler üzerinde radyasyon etkisi modern bilimlerde oldukça kapsamlı ve geniş bir araştırma alanına sahiptir. Sıradan bir hayat, bilimsel veya askeri amaçlar için çeşitli elektronik aygıtlar olmaksızın bir dünya hayal edilemeyeceği için, elektronik devre bileşenleri üzerinde radyasyon etkisinin incelenmesi söz konusu bilim kolunun çok önemli bir bölümünü içine alır. Bununla beraber silisyum tabanlı yarıiletken teknolojisinin radyasyona oldukça duyarlı olduğu kanıtlanmıştır (Belousov, 2014).

Elektronik devre elemanları üzerinde radyasyonun etkileri ilk kez 1954 yılındaki yer yüzeyinde yapılan nükleer bomba testleri sürecinde gözlemlenmiştir (Glasstone ve Dolan, 1977). Testler yapılırken ölçüm ekipmanlarında sahte/yalancı sinyaller ve arızalar meydana geldiği rapor edilmiştir. Nükleer patlama boyunca enerjinin çoğu, nötron, gama ışınları, alfa parçacıkları ve elektronlar şeklinde ortaya çıkar. Elektronik cihazlardaki geçici hatalar veya tek olay etkisi olarak açıklanan olaylara esas olarak nötronların sebep olduğu, gama ışınlarının ise elektronik devre elemanlarının karakteristiklerinin değişimi gibi kalıcı etkilere sebep olduğu ortaya çıkmıştır (Kopp, 1996). Benzer anormallikler 1958'den günümüze kadar uzay çalışmalarında da kayda girmiştir. Örneğin kozmik ışınlardan gelen ağır iyonlar Explorer 1'in iletim modüllerinin çalışmasını olumsuz etkilediği rapor edilmiştir.

Radyasyon kaynaklarının diğer bir tipi de parçacık hızlandırıcılarıdır. Brookhaven, Dubna, CERN, DESY ve Fermi laboratuvarında yüksek enerjili hızlandırıcıların ilk kullanılmaya başlanmasıyla bu tür hızlandırıcıların radyasyon ortamının, elektronik devre elemanları için oldukça hasar verici olduğu açığa çıkmıştır. Işın tanımlama ve makine kontrol elemanlarının farklı bileşenleri, ışın yolunun en yakınındaki ortamda yerleşmektedir. Ana rotadan sapan veya deney planına göre yoğun bir malzemeye çarpan yüksek enerjili parçacıklar bir radyasyon alanı üretir. Dolayısıyla elektronik bileşenleri hızlandırıcı ortamında bir radyasyona sık sık maruz kalır.

Elektronik devre elemanları üzerinde radyasyonun etkisi konusundaki çalışmalar aşağıdaki gruplara ayrılabilir:

1. Askeri amaçlar: Nükleer silahlar ve elektromanyetik puls (atma) silahlarından ortaya çıkan radyasyonun yıkıcı etkileri
2. Uzay ve havacılık araştırmaları: Uzay, atmosfer ve yeryüzündeki ekipmanlar üzerine kozmik ışınların etkileri.

3. Parçacık hızlandırıcıları ve lazerle bağlantılı çalışmalar: Çeşitli ekipmanlar üzerindeki ışın etkileşimleri veya doğrudan ışınlama etkileri ile üretilen ikincil radyasyonun etkileri (Belousov, 2014).

Çeşitli sayıda hızlandırıcılar ve ekipman parçaları, hızlı gelişme ve yoğunluğun artması ve bu yüzden radyasyon düzeylerini modern bilimde son grubu özellikle ilişkili ve güncel yapmaktadır.

Farklı hızlandırıcılar farklı belirli özellikler sergileyen radyasyon ortamlarına sahip olabilir. Bu da her bir durumda elektronik devre elemanları üzerinde radyasyon etkisi ile ilgili bireysel çalışma yapmanın sebebini ortaya koymaktadır.

Metal-yarı iletken (MS), metal-ara tabaka-yarı iletken (MIS) şeklinde yapıya sahip eklem kontaklar yarıiletken teknolojisinde oldukça sık araştırma yapılan elektronik bileşen grubunu teşkil eder. Bununla beraber organik elektronik malzemeler, son yıllarda iletken özelliğe sahip polimerlerin keşfi ve elektronik alanında geniş bir uygulama alanı bulmasıyla beraber çok önem kazanmıştır. Bununla beraber, son yıllarda gerçekleştirilen araştırmalar, elektronik teknolojisi alanında organik yarıiletkenlerin fotoelektrik, elektronik, elektriksel, optik ve manyetik özellikleri bakımından değişik özellikler sergilediklerini ortaya koymuştur. Bu malzemelerin pahalı olmaması, üretimindeki kolaylıklar, bükülebilir özellik göstermeleri gibi avantaj sağlayan özelliklerinin olmasından ötürü alan etkili transistörler (FET'ler), fotovoltaiik yapılar, algılayıcılar, plastik piller, organik elektrolüminesans aygıtları, anahtarlama aygıtları gibi pek çok sahada kullanım alanı bulmuştur. Organik yarıiletkenler, yapısal olarak içindeki atom veya atom gruplarının iyonik veya kovalent bağ etkileşmeleriyle meydana gelir, birbirinden bağımsız atom veya atom gruplarına dayanır ve çok güçlü olmayan atom veya atom grupları arasındaki elektriksel etkileşimlerle karakterizasyonu yapılır. Organik yarıiletkenler elektriksel ve elektro-optik aygıtlarda ince tabakalar şeklinde üretilirler. Bu tür ince tabakalar, vakum ortamında ısısal buharlaştırma yöntemi ile biriktirme, dönel (spin) yöntemle biriktirme, elektrokimya yöntemiyle biriktirme gibi yöntemler kullanılarak üretilirler (Yasuhiko 2000, Aydoğan 2004).

Son yıllarda, organik malzemeler esas alınarak, MS ve MIS kontak diyotlar üretilmektedir ve bu yapıların elektriksel özellikleri karakterize edilmektedir. Organik malzemeler, yarıiletken teknolojisinde kullanılan elektronik aygıtlarda aktif bir eleman olarak tercih edilebilir ve bu özellik, organik yarıiletkenlerin inorganik materyallerin yerine kullanımı için imkan verir.

MIS kontak yapıları, yüzey ve arayüzey durumlarını esas alan aygıt özelliğine sahip olduğundan dolayı yüklerle ilgili iyonlaşma etkisine (yük birikmesine) oldukça hassastırlar. Bir MIS kontak diyot, radyasyon ile ışınlanmaya maruz bırakılırsa, ışınlama etkisiyle ortaya çıkan negatif yük (elektron)-pozitif boşluk (hol) çiftlerinin bir bölümü, ortaya çıktıktan kısa zaman sonra tekrar birleşmesinden dolayı birbirinden ayrılma olasılığı bulunmamaktadır. MIS aygıtlarının elektronik karakteristikleri uygulanan radyasyonlardan oldukça etkilenmektedir. Elektronik devre elemanlarında, radyasyona maruz bıraktıktan sonra çoğunlukla aşağıdaki "durumlardan" bir kısmı gözlenebilir:

- iletkenliğin değişimi
- sızıntı akımlarında değişim,
- kırılma voltajında değişim,
- Gürültüde değişim,
- yüzey hareketliliğinde değişim,
- yüzey rekombinasyon hızında değişim.
- çıkış geriliminde değişim,
- maksimum çıkış akımında değişim,
- yayılım gecikme zamanında değişim (Barbottin ve Vapaille1999, Salari 2018).

Yukarıda anlatılan durumlardan da anlaşılacağı üzere, sahip oldukları bazı özelliklerinin getirdiği avantajlarından dolayı, organik yarıiletkenlerin yeni bir araştırma sahası oluşturması, organik malzemelerle MIS kontak üreterek elektriksel karakterizasyonunun gerçekleştirilmesi bizi bu konularda araştırmaya sevk etmiştir.

Bu tez çalışmasında Congo Red (CR) organik boya ince filmlerinin damlatma yöntemiyle inorganik yarıiletken (p-Si) tabakasının üzerine büyütülerek, oluşturulacak olan Al/CR/p-Si Yarıiletken diyot yapılarının Gama ışınlamasına maruz bırakıldıktan sonra arayüzey durumları ve elektronik parametrelerinin araştırılması öngörülmektedir.

Al/CR/p-Si MIS yapının elektronik ve arayüzey karakteristikleri, 300 K'de akım-gerilim (I-V) ölçümleri alınarak incelenmiştir. Gama ışınlamasına maruz bırakılmayan (kontrol) numunesi ile gama ışınlamasına maruz bırakılan kontağa ait idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) gibi bazı parametreler, $\ln(I)$ -V grafiğinden, modifiye Norde fonksiyonundan ve Cheung fonksiyonlarından elde edilmiştir. Diyotun kontrol ve ışınlanmış durumları için arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) da hesaplanmıştır. Çalışmada 50-500 kHz frekans aralığında Al/CR/p-Si MIS kontağının kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri alınmıştır. C^{-2} -V grafikleri kullanılarak kontrol ve

ışınlanmış durum için bariyer yüksekliği, difüzyon potansiyeli, fermi enerjisi ve serbest taşıyıcı konsantrasyonu parametreleri hesaplanmıştır.

1.1. Literatürde Yapılan Araştırmaların Özeti

Son yıllarda organik arayüzey tabakalı Silisyum MIS diyotlar üzerine araştırmalar artmakla birlikte, elektronik teknolojisi ve yarıiletken MIS aygıtların elektrik ve optik karakterizasyonları ve bu yapılar üzerine yapılan farklı ışınlamaların etkisi ile ilgili incelemeler sürmektedir. Bu kapsamda literatürde taranan araştırmalara ait değerlendirmelerin bir bölümü aşağıda anlatılmıştır.

Ziel (1968); Schottky MS yapıların elektriksel ve arayüzeyssel davranışlarının teorisini kapsamlı bir şekilde kitabında değerlendirmeleri yapmıştır. MS yapıların I-V karakteristiklerinde meydana gelen ve ideal yapıdan sapmaya yol açacak etkilerin, arayüzeyin mevcut olması ve diyot yapısında nötral bölgenin direncine karşılık gelen seri direnç olduğunu bildirmiştir.

Norde (1979); MS kontakların akım-gerilim (I-V) ölçümlerini kullanarak $F(V)$ fonksiyonunu tanımlayarak seri direnç ve engel yüksekliğinin hesaplanmasına imkan veren bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde diyot için $F(V)$ fonksiyonunun V gerilimine karşılık grafiği çizilerek, bu fonksiyonun minimum noktasına karşılık gelen değerler kullanılarak engel yüksekliği ve seri direnç değeri hesaplanmaktadır.

Cheung ve Cheung (1986); pozitif besleme durumuna karşılık gelen gerilim bölgesinde I-V karakteristiklerini kullanarak $dV/d\ln I$ ile $H(I)$ şeklinde iki fonksiyon tanımlamıştır. Bu fonksiyonlara ait grafikleri kullanarak MS ve MIS yapıların idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi elektriksel parametrelerinin hesaplanabileceği başka bir metot bulmuşlardır.

Güllü ve ark. (2010), Congo Red (CR) organik ince filmi ile ürettikleri Al/CR/p-Si MIS kontağın doğrultucu özellik sergilediğini rapor etmiştir. Referans Al/p-Si kontağının engel yüksekliği 0.5 eV, Al/CR/p-Si yapının engel yüksekliği ise 0.75 eV olarak bulunmuştur. Engel yüksekliğindeki bu artma, CR organik arayüzey tabakasının Silisyumun uzay yükü bölgesi üzerindeki etkisine atfedilmiştir.

El-Nahass ve ark. (2005), NiPc/p-Si kontak yapısını üretmiş ve bu diyotun elektrik ve fotoelektrik karakteristiklerini araştırmıştır. NiPc/p-Si diyotunun doğrultma özelliği gösterdiğini ve doğrultma oranı değerinin 1750, seri direnç değerinin 750Ω ve paralel direnç değerinin $1,7 M\Omega$ olduğunu bildirmiştir. NiPc/p-Si diyotunun fotoelektrik özelliği 6 mW/cm^2 gücüne sahip ışık kullanılarak incelenmiş ve açık devre geriliminin

0,32 V, kısa devre akımı değerinin 186 μ A ve verim değerinin %1,11 olduğu bulunmuştur.

El-Nahass ve ark. (2005), karanlık ortamda Au/p-ZnPc/p-Si MIS yapısının 302 K den 364 K'e kadar olan sıcaklık bölgesinde I-V ölçümlerini almıştır. Au/p-ZnPc/p-Si diyotunun doğrultucu özelliğe sahip olduğu görülmüştür. Küçük doğru beslem gerilim bölgesinde akım yoğunluğunun boşlukların termoiyonik emisyonları tarafından sınırlandırıldığı rapor edilmiştir.

Güllü ve ark. (2008), aynı şartlar altında hazırlanan 27 adet *aniline green*/p-Si elektronik devre elemanının I-V ve C-V karakteristiklerini oda sıcaklığında istatistiksel olarak incelemiştir. *Aniline green*/p-Si yapılarının çok iyi doğrultucu özellik gösterdiklerini bildirmiştir. I-V hesaplamalarından elde edilen, ortalama engel yüksekliği ve idealite faktörü değerlerinin sırasıyla 0,582eV ve 2,999 olarak rapor etmiştir. C-V hesaplamalarından elde edilen ortalama engel yüksekliği ve donör konsantrasyonu değerlerini sırasıyla 0,61 eV ve $5,54 \times 10^{-14} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulmuştur.

Özaydın ve ark. (2016), organometalik kompleks (OMC) filmleri spin kaplama yöntemini kullanarak cam ve silisyum alttaşlar üzerine kaplamıştır ve bu diyotların fotovoltaiik uygulamasını araştırmıştır. OMC filminin optik özellikleri ve filmin kalınlığı spektroskopik elipsometri(SE) tekniği ile bulunmuştur. Ayrıca transmitans spektrumu da UV-Vis spektrometresi ile ölçülmüştür. Bununla beraber OMC ince filmi n-Si üzerinde kaplanarak Au/OMC/n-Si MIS diyot yapısı elde edilmiştir. MIS diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 2,89 ve 0,79 eV olarak hesaplanmıştır. Yine MIS yapının 300W ışık altındaki ölçümlerinde fotovoltaiik karakteristik gösterdiği, Voc ve Isc değerlerinin sırasıyla 396 mV ve 33,8 μ A olduğu rapor edilmiştir.

Güllü ve ark. (2008), Al/*new fuchsin*/p-Si Schottky devre elemanının I-V ve C-V karakteristikleri ayrıntılı şekilde incelemiştir. I-V karakteristiklerinden engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 0,75 eV ve 1,47 olarak bulmuştur. Engel yüksekliğini C-V karakteristiğinden 0,78 eV olarak hesaplamıştır. I-V ve C-V ölçümlerinden bulunan engel yüksekliği değerlerinin birbirinden farklı çıkmasını, arayüzey durumlarına ve ölçüm esaslarının tamamen farklı olmasına atfetmiştir. Ayrıca elde edilen 0,75 eV luk büyük engel yüksekliğini, *new fuchsin* organik ara tabakasının, Al/p-Si yapının potansiyel engelinin yüksek oranda iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur.

Ocak ve ark. (2010), metanolde çözülmüş Mn hexaamide (MnHA) çözeltisinden faydalanarak ürettikleri MnHA/n-Si organik-inorganik yapılar üzerine Au, Ag, Al, Cu, Cr, Ga, Pb, Sn gibi metalleri buharlaştırarak metal/MnHA/n-Si MIS diyotlarını elde

etmiştir. Akım-Gerilim ölçümleri kullanılarak bu diyotların akım doğrultma özelliğine sahip olduklarını görmüştür. Üretilen yapıların fotoelektrik özelliklerini araştırmak için solar simülatör kullanılarak beyaz ışık altında I-V ölçümlerini de almıştır.

Güllü (2017), DNA biyolojik malzemesini p-tipi Silisyum kristali üzerinde damlatma yöntemi ile büyüterek Metal/Aratabaka/Yarıiletken (Metal/Interlayer/Semiconductor) MIS diyot yapısını elde etmiştir. Bu çalışmada MIS diyot üretimindeki metal buharlaştırma işlemleri, Termal Vakum Buharlaştırma Sistemi kullanılarak yüksek vakum ortamında yaklaşık 10^{-5} - 10^{-6} mbar basınç altında gerçekleştirilmiştir. Üretilen Al/DNA/p-Si MIS diyotlarının elektriksel ve arayüzey özellikleri, akım-gerilim (I-V) ve kapasite-gerilim-frekans (C-V-f) ölçümleri kullanılarak karanlıkta ve ışık altında ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Al/DNA/p-Si MIS diyotunun 10 kHz, 100 kHz, 500 kHz, 1 Mhz ve 2 Mhz frekans altında kapasite-gerilim ölçümlerinden faydalanarak elde edilen $1/C^2$ -V grafiklerinin analizinden, MIS diyota ait difüzyon potansiyeli, engel yüksekliği ve taşıyıcı konsantrasyonu parametrelerini karanlıkta ve 3000 lüx ışık altında hesaplamıştır. Frekans arttıkça difüzyon potansiyeli ve engel yüksekliğinin azaldığını, taşıyıcı konsantrasyonunun ise arttığını rapor etmiştir. Bu durumu Metal ile Yarıiletken arasındaki arayüzey tabakasının varlığına ve arayüzey doğal oksit+DNA tabakasının varlığına atfetmiştir. Işık uygulandığında MIS diyotun taşıyıcı konsantrasyonunun artması, ışığın etkisiyle diyot arayüzey tabakasında oluşan elektron-boşluk çiftlerinin varlığıyla açıklanmıştır. Bu durum da Al/DNA/p-Si MIS diyotunun fotokapasitif tepkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca ışık altında C-V ölçümlerinde yaklaşık -0.1 Volt civarında pikler gözlenmiştir. Bu piklerin pozisyonu frekans arttıkça hafifçe pozitif gerilim tarafına kaydığı bildirilmiştir. Bu piklerin ortaya çıkması ve kayması MIS diyot arayüzey tabakasındaki elektriksel olarak aktif tuzaklara atfedilmiştir.

Cobalt-60 kaynağı kullanılarak üretilen γ -radyasyonu ile yarıiletken aygıtların ışınlaması, yapıda elektron hol üretimine ve MS arayüzeyinde örgü kusurlarının ortaya çıkmasına neden olur ve bu ışınlama diyota ait elektriksel karakteristiklerde değişiklikler sergiler. Gama ışınlaması diyot arayüzeyinde kusurlara bağlı olarak yeni tuzak seviyelerinin ortaya çıkmasına ve bu tuzak seviyelerinin rekombinasyon merkezi olarak davranmasına sebep olur. Bu yüzden MS arayüzeyi radyasyon sebebiyle ortaya çıkan hasarın araştırılması bakımından oldukça önemli bir yere sahiptir. Bazı araştırmacılar MS ve MIS yapıların elektriksel karakteristikleri üzerinde gama ışınlamasının etkilerini detaylı olarak incelemiştir (Ashok ve ark. 1978, Singh ve ark. 2001, Chin ve Ma 1983, Jayavel ve ark.1999, Karatas ve ark. 2009, Jayavel ve ark. 2000).

Zhang ve ark (2012), 12 keV luk foton tarafından silisyum atomlarına transfer edilen enerji 0.011 eV olup bu değer Silisyum için hasar eşik değeri olan 21 eV değerinin oldukça aşağısında olduğunu rapor etmiştir (Akkerman et al., 2001). Bununla beraber 12 keV enerjili fotonlar için hiçbir hasar beklenmemektedir. Bu durum Si-O bağı kırma için gerekli olan enerji, yasak enerji aralığına karşılık gelen ve yasak enerji aralığı 8,8 eV olan SiO₂ gibi yalıtkanlar için farklıdır (Nicollian & Brews, 1982). Elektron-boşluk çifti oluşturmak için gerekli ortalama enerji 18 eV tur (Ausman & McLean, 1975; Benedetto & Boesch, 1986). 12 keV enerjili fotonlar tarafından üretilen yük taşıyıcılarının bir kısmı yeniden birleşir. Geriye kalan yük taşıyıcıları ya oksit tabakasının üstündeki Al metaline ya da Si-SiO₂ arayüzeyine ulaşır. Pozitif boşluklar, Si-SiO₂ arayüzeyi yakınına gelmez, bunların belli bir oranı arayüzeyin yakınındaki oksit içerisinde tuzaklanır ve böylece radyasyon nedeni pozitif sabit oksit yükleri üretilir (Nicollian & Brews, 1982). Rekombinasyon olmaktan kaçan elektron-hol çiftlerinin oranı, fotonların enerjisine ve ışınlama boyunca oksitteki alana bağlıdır. Ayrıca, silisyumun bant aralığı boyunca dağılım sergileyen enerji seviyelerine sahip olan ara yüzey tuzakları üretilir. İkinci bir yalıtkan tabakanın varlığında örneğin SiO₂ nin üzerinde Si₃N₄ yukarıdaki modeli, iki yalıtkan tabakanın arayüzeyinde de pozitif veya negatif yüklerin oluştuğu ilave bir yük tabakasının olduğu duruma genişletmek gerekir (Holmes-Siedle & Adams, 2002).

Kaymaz (2020), Al/(ZnO-PVA)/p-Si diyotları üretmiş ve bu diyotların üzerinde gama-ışınlama etkisini incelemiştir. Gama ışınlama etkisini, I - V , kapasitans-gerilim (C - V) ve kondüktans-gerilim (G/ω - V) ölçümlerini kullanarak, radyasyon yokken ve farklı ışınlama dozlarından sonra incelemiştir. Böylece, $\ln(I)$ - V , Cheung ve Norde yöntemlerini kullanarak engel yüksekliği, idealite faktörü ve ters doyma akımı gibi ana diyot parametrelerini, radyasyon yokken ve radyasyondan sonra hesaplamıştır. Bu şekilde üç teknikte hesaplanan değerler karşılaştırılarak yorumlanması yapılmıştır. Bununla beraber, $f=500$ kHz frekans değerindeki C - V ve G/ω - V karakteristiklerinden elde edilen difüzyon potansiyeli (V_d), alıcı katkı atomları yoğunluğu (N_A), Fermi enerji seviyesi (E_F), maksimum elektrik alanı (E_m), tüketim tabakası genişliği (W_D) ve bariyer yüksekliği (Φ_b) gibi bazı diyot parametrelerinin, gama-radyasyonundan etkilendiğini rapor etmiştir.

Güloğlu (2011), Al/p-Si MS kontağı oda sıcaklığında Cobalt-60 kaynağı kullanılarak gama-ışın radyasyonu altında ışınlamıştır. Elde edilen kontağın temel diyot parametrelerini I - V ölçümleri ışınlama öncesinde ve sonrasında hesaplamıştır. Gama-ışın radyasyonunun, Al/p-Si diyotunun karakteristikleri üzerinde bir düzeltme etkisi gösterdiği ve idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi elektriksel parametreleri üzerinde

önemli bir etkiye sahip olduğunu bildirmiştir. Al/p-Si diyot yapısındaki arayüzey hal yoğunluğu gama radyasyonu ile ışınlanmadan sonra arttığı görülmüştür.

Feteha ve ark. (2002) MIS p-Si güneş pilini değişik ışınlama dozlarında (500 Mrad'a kadar) gama radyasyona tabi tutmuştur. Işınlama dozunun I-V ve C-V karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar güneş pilinin tüm çıkış parametrelerinin ışınlama sonrasında oldukça bozulmuş olduğu rapor edilmiştir. İdealite faktörünün ve seri direncin ışınlama dozuna bağlı olarak arttığı, verimin, I_{sc} ve V_{oc} değerlerinin ise azaldığı görülmüştür.

Güllü ve ark. (2008), Rhodamine-101/p-Si organik-inorganik yapının elektriksel özellikleri üzerine yüksek enerjili elektron ışınlamının etkisi oda sıcaklığında ele almıştır. Engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç hesabı I-V karakteristiği kullanılarak yapılmıştır. Üç parametrenin de radyasyondan sonra arttığı görülmüştür. Ayrıca elektron radyasyonu uygulanmasından sonra taşıyıcı konsantrasyonu, ters beslem akımı ve kapasitenin azaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar elektron radyasyonunun rhodamine-101/p-Si arayüzeyindeki etkisine atfedilmiştir.

Taşcıoğlu (2008), Co-60 gama ışınlarının Al/SiO₂/p-Si MIS diyotlarının üzerindeki etkisini oda sıcaklığında I-V, C-V ve G/w-V karakteristiklerini kullanarak incelemiştir. İdealite faktörünün (n), ışınlama etkisiyle ortaya çıkan N_{ss} 'den dolayı artan radyasyonla arttığı görülmüştür. Enerjiye ($E_{ss}-E_v$) bağlı N_{ss} dağılım grafiğini, etkin engel yüksekliği değeri dikkate alınarak düz beslem voltajlarındaki I-V verilerinden hesaplamıştır. Al/SiO₂/p-Si MIS diyotunun C-V ve G/w-V karakteristiklerinin de gama radyasyonuna bağlı olarak değiştiğini rapor etmiştir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen deneysel veriler, metal ve yarıiletken arasında bulunan SiO₂ arayüzey tabakasının ve gama-radyasyonunun idealite faktörü, engel yüksekliği ve arayüzey durumları (N_{ss}) gibi diyot parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Karataş ve ark. (2005), Au/n-GaAs Schottky engel diyotlarını 0-500 kGy doz aralığında Kobalt-60 kaynağını kullanarak gama ışınlarına tabi tutmuştur. Deneysel I-V ve C-V karakteristiklerinin analizi, gama ışınlamasından sonra ekstra rekombinasyon merkezlerinin ortaya çıkmasını desteklediği rapor edilmiştir. Ayrıca idealite faktörü ve donör taşıyıcı konsantrasyonunun artan doz oranıyla azaldığı görülmüştür. Engel yüksekliğinin ise fazla etkilenmediği rapor edilmiştir. N_{ss} arayüzey hal yoğunluğunun artan doz ile azaldığı, 250 kGy yukarısında ise hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür.

Güllü ve ark. (2008), oda sıcaklığında Sn/p-Si Schottky kontakların elektriksel karakteristikleri üzerine gama radyasyonunun etkisini incelemiştir. Elektriksel ölçümleri belli doz alan diyot için ex-situ olarak almışlardır. Işınlama işlemleri sonucunda, Sn/p-Si devre elemanının düşük enerjili gama radyasyonlarını dedekte edebileceğini rapor etmiştir.

Rao ve ark (2009), Au/n-Si Schottky diyotların elektriksel karakteristikleri üzerine 8 MeV enerjili electron radyasyonunun etkisini araştırmıştır. Diyot parametrelerini I-V ve C-V ölçümlerini kullanarak hesaplamış ve hem düz beslem akımının hem de ters beslem akımının ışınlamadan sonra arttığını görmüştür. Elektron ışınlama dozu arttıkça engel yüksekliğinin azaldığı, idealite faktörünün arttığını rapor etmiştir. C-V ölçümlerinin elektron ışınlamasından dolayı taşıyıcı konsantrasyonunda hafif bir azalmaya yol açtığı görülmüştür.

Ocak (2010), oda sıcaklığında Sn/ZnOA/n-Si/Au diyot yapısını Co-60 kaynağı ile gama ışınmasına tabi tutmuştur. Diyotun karakteristik parametreleri I-V ve C-V ölçümleri kullanılarak ışınlamadan önce ve sonra hesaplanmıştır. Gama ışınlamasının I-V ve C-V karakteristikleri üzerinde belirgin etkiye sahip olduğu rapor edilmiştir. Sn/ZnOA/n-Si/Au diyotuna ait uygulanan radyasyondan sonra engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerlerinin azaldığı, ters beslem doyma akımının arttığı rapor edilmiştir.

Güneş (2019), Polimetil Metakrilat (PMMA) / Kurşunoksit (PbO) MIS diyotların 30kGy'lik gama ışınlamasına bağlı olarak elektriksel parametrelerdeki değişimleri araştırmıştır. Elektriksel ölçümler kullanılarak bulunan diyot parametreleri değişik yöntemler vasıtasıyla irdelenmiştir. Gama ışınlamasının PMMA/PbO MIS yapıların elektriksel özellikleri üzerinde etkisini ortaya çıkarmak amacıyla Standart LnI-V, Cheung teknikleri kullanılmıştır. PMMA/PbO MIS diyotunun ışınlama öncesi ve sonrası I-V eğrileri Schottky tipi davranış sergilemiştir. Gama ışınlaması sonrasında diyotların idealite faktöründe azalma, seri direnç değerinde ise artış ortaya çıkmıştır. Bu değişim gama radyasyonunun sebep olduğu seri direnç etkisine ve alıcı (akseptör) tipi arayüzey tuzaklarının oluşmasına atfedilmiştir.

Çınar ve ark. (2014), Ti/GaTe/p-Si diyot yapısı üzerine 18 MeV enerjili elektron ışınlamasının etkisini incelemiştir. Ti/GaTe/p-Si/Al yapısının I-V ölçümlerini kullanarak radyasyondan önce ve sonra olmak üzere idealite faktörü değerlerini sırasıyla 1.27 ve 1.53 ve engel yüksekliği değerlerini ise sırasıyla 0.739 ve 0.706 eV olarak hesaplamıştır. Diyot parametrelerindeki değişim elektron ışınlamasından dolayı arayüzeyde oluşan kusur formasyonu ile yorumlanmıştır.

Güllü ve ark. (2008), Al/methyl violet/p-Si Schottky yapının I-V ve C-V-f karakteristikleri üzerine gama radyasyonunun etkilerini incelemiştir. Gama radyasyonu sonucunda devre elemanının engel yüksekliğinin, idealite faktörünün ve arayüzey durum yoğunluğunun arttığını, seri direncin ise azaldığını bulmuştur.

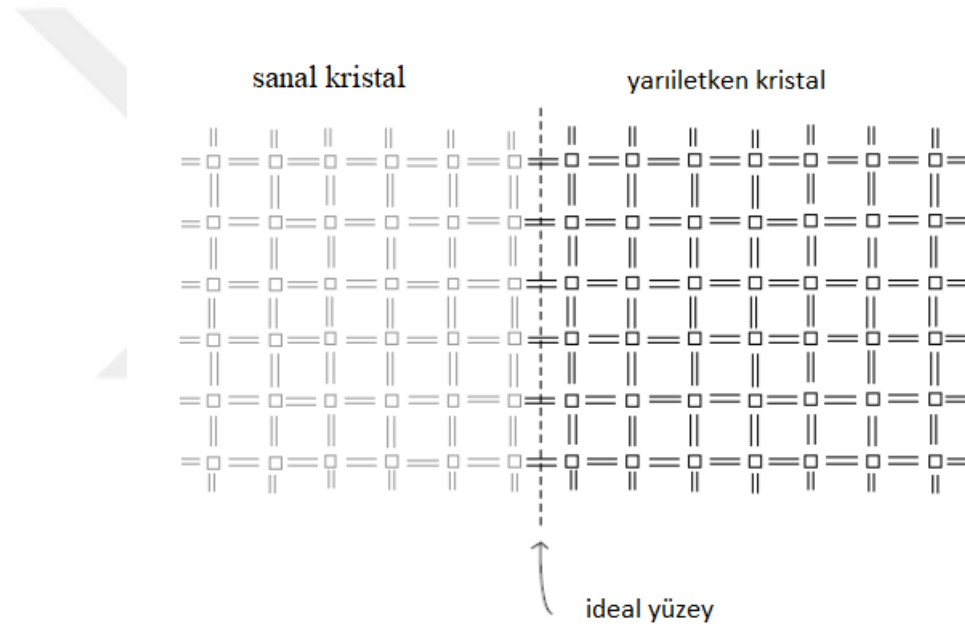
Yılmaz ve ark. (2007), p ve n tipi Silisyum MOS diyotlarının SiO₂ arayüzey tabaka kalınlığına bağlı olarak ve gama radyasyonu etkisine bağlı olarak incelemiştir. MOS diyotların 256 Gray gama ışınlamasına karşı tepkileri araştırılmıştır. MOS yapılar üzerinde radyasyon etkisi, oksit kalınlığı, alttaş tipi (n ve p) ve tavlama işlemlerinin etkisi detaylıca analiz edilmiştir. MOS yapılarda radyasyon sebebiyle ortaya çıkan yükün, oksit kalınlığının güçlü bir fonksiyonu olduğu rapor edilmiştir. Düz bant voltajındaki kaymanın, p-tipi MOS kapasitörlerde n-tipi olanlara kıyasla daha duyarlı olduğu görülmüştür.

Salari (2018), Zn/ZnO/n-Si kontak yapısına 25, 50 ve 75 Gray dozlarındaki elektron radyasyonu, baryum, amerisyum ve kobalt gibi farklı gama radyasyonu kaynakları kullanarak, gama radyasyonu tatbik etmiştir. Elektron ve gama ışınlamalarından sonra Zn/ZnO/n-Si kontakların I-V ve C-V ölçümleri alınmıştır. Elektron ve gama ışınlarının tatbikinden önce ve sonra alınan I-V ve C-V ölçümleri kullanılarak Zn/ZnO/n-Si kontakların idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri dirençleri gibi temel diyot parametreleri farklı metodlarla hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Tatbik edilen ışınlamalarla idealite faktörleri artarken, diyotların engel yüksekliklerinin azaldığı rapor edilmiştir.

2. TEORİK VE KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Yüzey Özellikleri ve MIS Yapılar

Katı yüzeyler ve malzemeler arasındaki arayüzeyler, yarı iletken cihazlar, korozyon ve kimyasal reaksiyonların oluşumu gibi çok çeşitli konu başlıklarında önemli rol oynarlar. Malzemelerin yüzey özelliklerinin incelenmesi, büyük bir ekonomik etkiye sahip olması yanında bilimsel öneminden dolayı çok gereklidir. Burada, bu geniş alanın çok dar bir kısmına, yarı iletken cihazın yüzey özelliklerine ve önemine odaklanılacaktır.



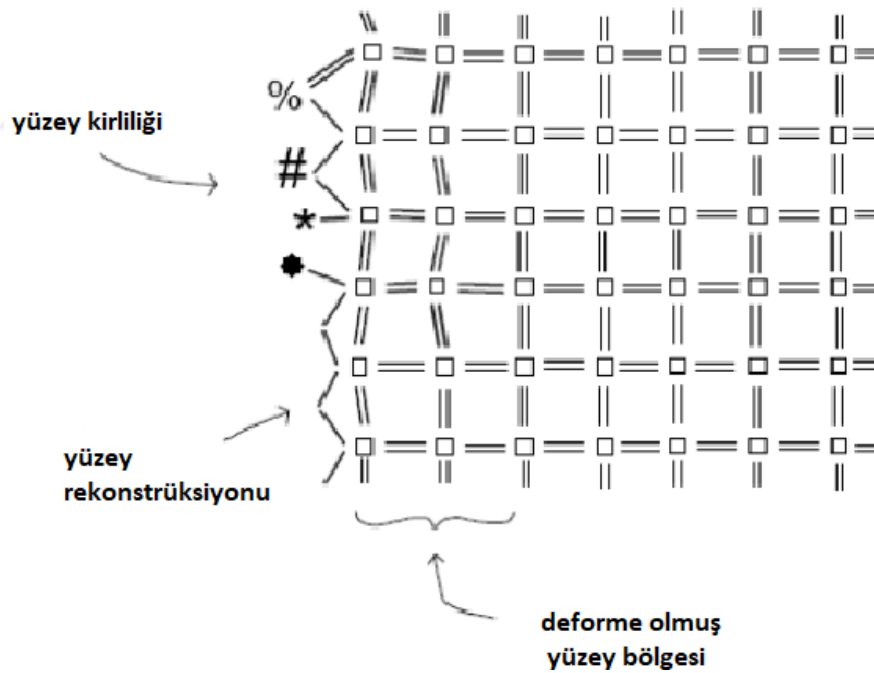
Şekil 2.1 Bir yarıiletken kristalin yüzeyindeki doymamış bağların gösterimi

Yarıiletken yüzeyinin özellikleri gövde (bulk) özelliklerinden tamamen farklıdır ve bu nedenle yarı iletken fiziğinin dallarından biri olarak kabul edilebilmektedir. Şimdi birkaç noktada yarıiletkenin yüzey özelliklerinin incelenmesinin neden bu kadar çok önemli olduğu açıklanacaktır (Mukherjee ve Kumari 2014):

1. Yarıiletken yüzey özelliklerinin incelenmesi, yarı iletkenin gövde özelliklerinin anlaşılmasına bağlıdır. Bu nedenle, öncelikle gövde özelliklerin incelenmesi ve anlaşılması gerekir.
2. Atomların sonsuz tekdüze (uniform) periyodik yapısı olarak kabul edilebilen gövdenin (bulk) aksine, yüzey kristal yapısının ani bir şekilde

sonlanmasını ve periyodikliğin kaybolmasını ifade eder (Şekil 2.1). Sonuç olarak, teorik analiz çok daha karmaşık hale gelir.

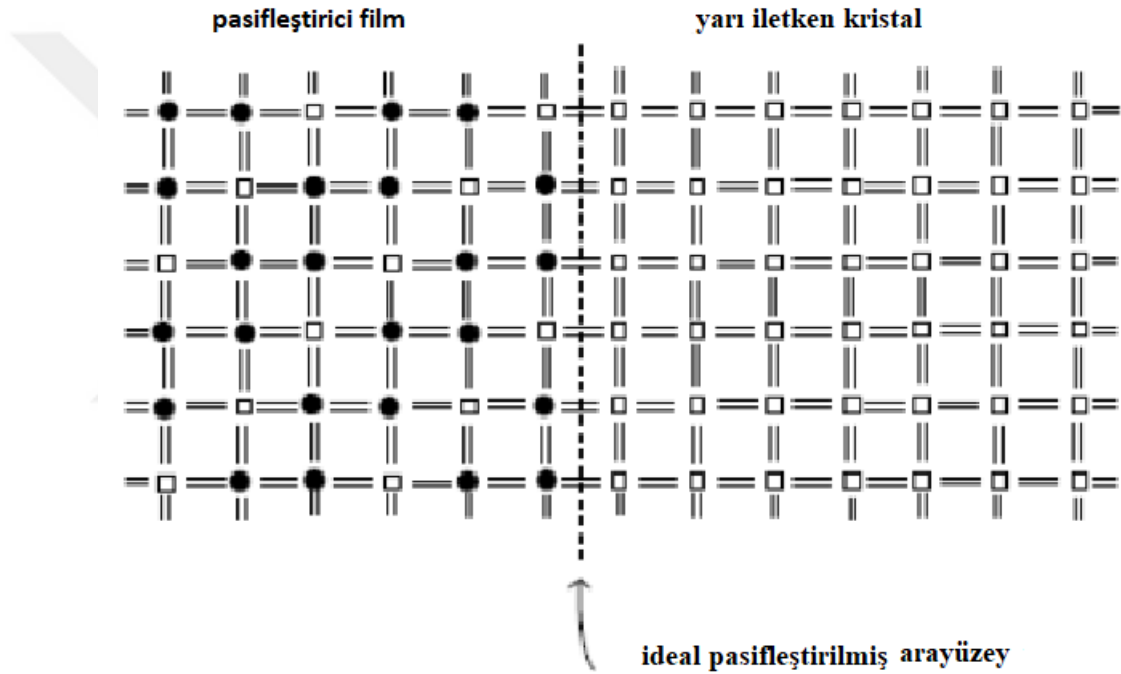
3. Yarıiletken yüzeyindeki atomlar, gövdedeki durumun aksine kristalin diğer atomları tarafından tamamen çevrelenmemektedir. Sonuç olarak, yüzey atomlarının tüm valans elektronları doyuma ulaşmaz. Bu nedenle, doymamış bağlar yarıiletken yüzeyinin kimyasal olarak daha reaktif olmasına sebep olur. Genellikle, yarıiletken yüzeyinin bir veya daha fazla yabancı atom tabakası ile kaplı olduğu bulunmuştur. Bu yüzden, iyi karakterize edilmiş deneysel bir yüzey, son derece dikkatli bir hazırlık gerektirir.
4. Bir yüzey, bir numune üzerinde sadece atomlardan meydana gelen tek tabaka oluşturur, böylece ölçüm sinyalleri, gövde deneyleriyle kıyaslandığında yüzey deneylerindeki çok az atomdan kaynaklanır. Bu nedenle yüzey/hacim oranı önemli temel konulardan biridir.



Şekil 2.2 Kristal yüzeyinde meydana gelen bulaşma ve yüzeyin yeniden oluşumu.

Özet olarak, yüzey ölçümü ile ilgili teori ve deneyler, gövde çalışmalarının hesaba katılmadığı durumlarda çeşitli zorluklarla karşı karşıya kalır.

Yüzey özellikleri cihaz performansı ve kararlılığı üzerinde baskın bir etkiye sahiptir. Yüzeyin baskın karakteristiklere sahip olduğu devre elemanları, genellikle gövdenin baskın karakteristiklere sahip olanlardan daha düşük performans ve kararlılığa sahiptir. İşlemler ve kullanım sırasında ortamdan (çevreden) alınan küçük miktarda bir bulaşma (kirlenme) (Şekil 2.2), cihaz performansı ve kararlılığı açısından da etkilidir. Örneğin, yarı iletken bir cihaz üzerinde tek katmandaki 0.0001'lik bir bulaşma oranı, cihazın elektriksel özelliklerinde baskın olabilir (Nicollian ve Brews 1982). Bulaşanlara karşı bu aşırı hassasiyet nedeniyle, yarıiletken cihaz karakteristikleri kontrolsüz bir şekilde zamanla değişebilir.



Şekil 2.3 Pasivasyon işlemi sonrasında kristal yüzeyindeki bağların durumu.

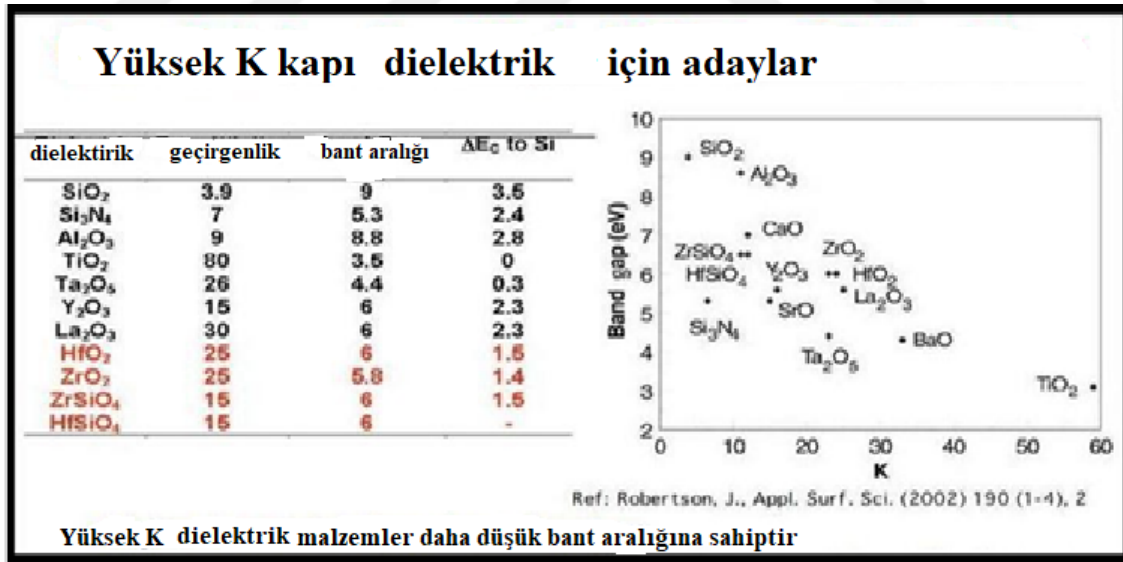
Bu sorunu çözmek için yarıiletken yüzeyinde ince bir yalıtkan tabakası oluşturularak pasivasyon işlemi gerçekleştirilir (Şekil 2.3). Pasivasyon işlemi, cihazın yüzeydeki elektriksel aktivitesini en aza indirir. Pasivasyon tabakası ayrıca yüzeyi çevresel kirlenmeye karşı da korur. Böylece, pasivasyon işlemi, cihazdan cihaza karakteristiklerin kararlılığında ve tekdüzeliğinde (uniform) ve cihaz performansında dikkate değer bir iyileşme sağlar. En başarılı şekilde pasifleştirilmiş yarıiletken, termal olarak büyütülen silisyum dioksit tabakasına sahip silisyumdur.

Pasivasyon özelliklerinin yanı sıra, SiO_2 'nin 3 özelliği daha vardır: (1) Oksit tabakası, Silisyuma safsızlıkların difüzyon olmasına karşı bir bariyer görevi görür, (2) Oksit tabakası iki bitişik cihazı izole edebilir, (3) Oksit tabakası, alan etkili devre elemanlarında yaygın teknik olan silisyumdan kapı (gate) elektrodunu yalıtırmak için kullanılır (Nicollian ve Brews1982).

Metal-oksit-yarı iletken (MOS) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) kapasitörler, yarıiletken yüzeylerinin incelenmesinde en kullanışlı cihazlardır. MOS veya MIS kapasitörlerin yardımıyla yüzey fiziğinin anlaşılması, cihaz operasyonları için büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde herhangi bir MOS veya MIS kapasitörün çalışmasını açıklanacaktır.

Herhangi bir MOS cihazının kanalının iletkenliğinin iyileştirilmesi de önemli bir konudur ve kapı (gate) yalıtkanı olarak yüksek K (dielektrik sabiti) dielektrik malzeme seçilerek geliştirilebilir. Ancak buradaki temel problem, yüksek K dielektrik malzemelerdeki yasak enerji aralığının düşürülmesidir.

Aşağıda, K değerlerine sahip farklı dielektrik malzemelerin bant aralığı içeren bir tablo Şekil 2.4'te verilmiştir.



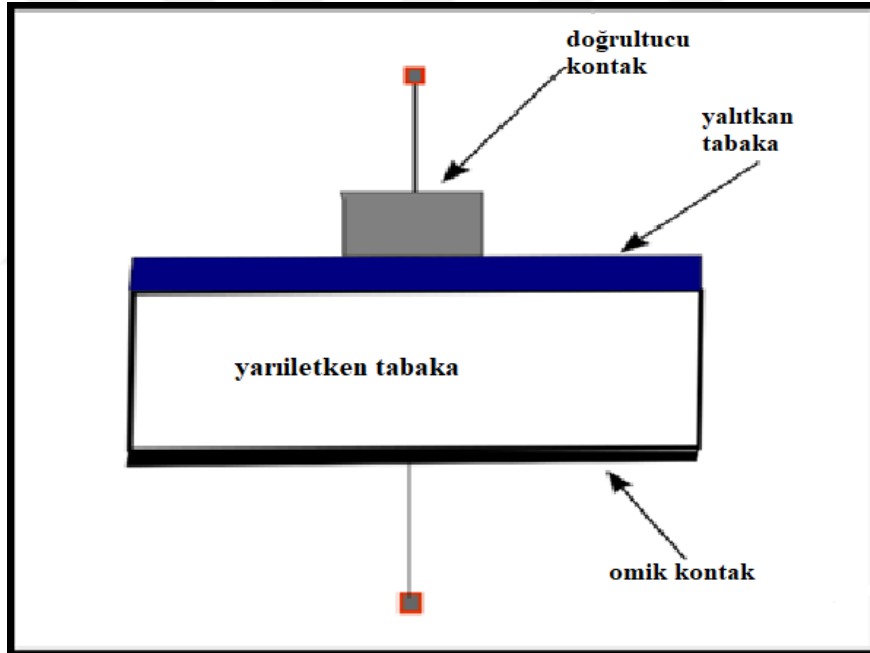
Şekil 2.4 Geçirgenlikleri ve bant aralıkları farklı dielektrik malzemelerin listesi (Robertson 2002).

Bir diğer önemli faktör termal streştir, çünkü oksitlerin çoğu yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde çok fazla stres üreten yüksek termal genleşme katsayısına sahiptir. Bu yüzden, bir kapı dielektrik olarak malzemenin uygun şekilde seçilmesi çok önemlidir. Bu kategori için; 1) geçirgenliği 7 olan ve neredeyse SiO_2 nin iki katı geçirgenliğe sahip ve

bant aralığı 5.3 eV olan Si_3N_4 , 2) geçirgenliği 25 olan ve neredeyse SiO_2 nin 6 katı geçirgenliğe sahip HfO_2 gibi 2 aday ön plana çıkmaktadır. Deneylerde kapı dielektrikleri olarak SiO_2 ve Si_3N_4 kullanılmıştır. SiO_2 termal oksidasyon işlemi ile büyütüldü ve Si_3N_4 RF-püskürtme yöntemi ile büyütülmektedir.

2.2. MOS Kapasitör Yapısı

Temel bir MOS kapasitör yapısının şematik diyagramı aşağıdaki şekilde (Şekil.2.5) verilmiştir. Bu yapı, bir silikon alttaşa ve onun üzerinde biriktirilen veya büyütülen bir yalıtkan tabakasına ve yalıtkan tabakasının üzerinde kapı olarak adlandırılan Al metalinden oluşmaktadır. Ayrıca diyagramda gösterilen omik temas için bir back (geri) metalizasyonu da yapılmıştır. Fabrikasyon süreçlerinin ayrıntıları Bölüm 3'de açıklanmıştır.



Şekil 2.5 MOS yapısının şematik diyagramı.

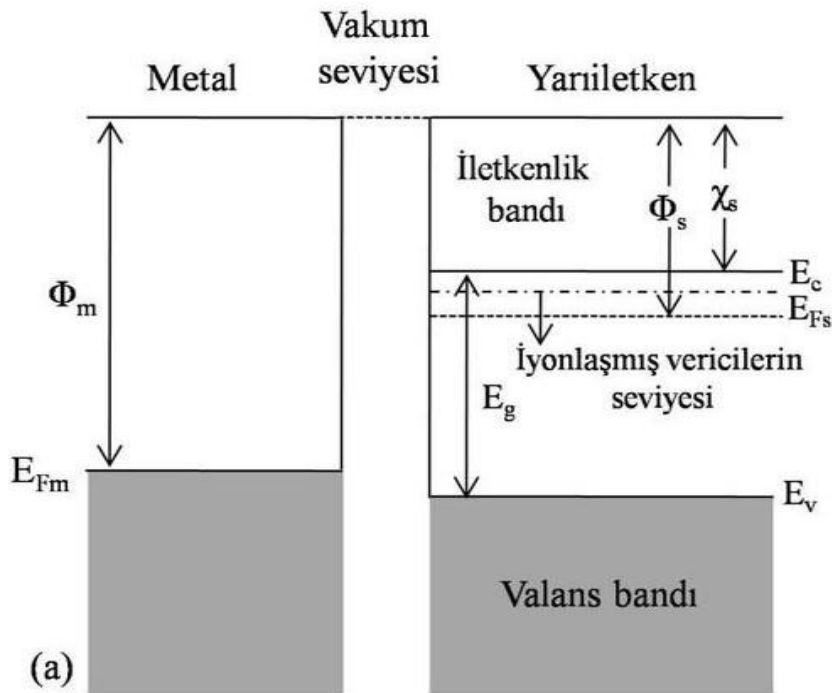
Herhangi bir MOS yapısında dört çeşit kusur veya düzensizlik bulunduğu kabul edilmektedir. Bunlar: (a) Arayüzey sabit yükleri (Q_F), (b) Arayüzey tuzak yükleri (Q_{it}), (c) hareketli oksit yükleri (Q_m) ve (d) Oksit tuzak yükleri (Q_{ot}) (Plummer et al 2000). Bu kusur yüklerinin kaynağı ve cihaz uygulamaları üzerindeki etkileri bölüm 2.4'te açıklanmıştır. Burada bu kusurlardan tamamen arınmış olduğunu kabul edilirse, ideal bir

yaklaşım ile bu tür MOS kapasitör, ideal MOS kapasitör olarak adlandırılır. Aşağıda ideal MOS kapasitörünün farklı gerilim beslemesi altındaki çalışması izah edilmektedir.

2.3. Farklı Önbesleme Konfigürasyonları Altında İdeal MOS Kapasitör

2.3.1 Sıfır besleme koşulu (Düz bant koşulu)

Alttaşa göre kapı metaline bir gerilim uygulanmadığı zaman, alttaşa boyunca taşıyıcı konsantrasyonu (akseptörler ve donörler) sabit olacaktır ve yarıiletken tamamen nötral durumdadır. Devre elemanı ideal olarak ele alındığı için, cihazda herhangi bir kusur olmayacaktır (Şekil 2.6). Bu koşullarda devre elemanının tamamı yük olarak nötürdür, bu da tüm enerji seviyelerinin alttaşa boyunca düz olduğu anlamına gelir. Buna ideal MOS kapasitörünün düz bant durumu denir. Ancak herhangi bir gerçek durumda, MOS kapasitörde kusurların varlığı nedeniyle 0V geriliminde düz bant koşulu oluşmaz.

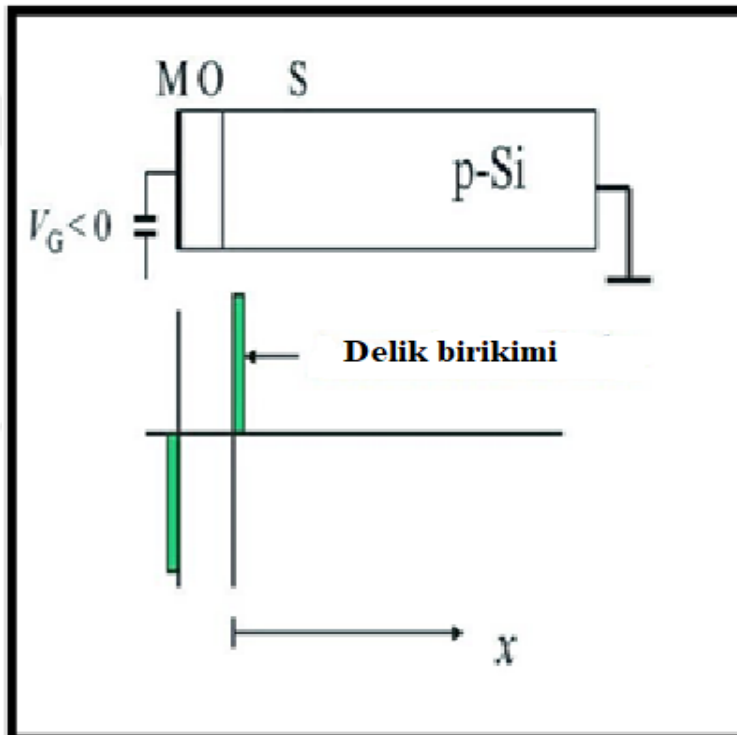


Şekil 2.6 Sıfır beslem altında bir MOS kapasitörünün enerji bandı diyagramı.

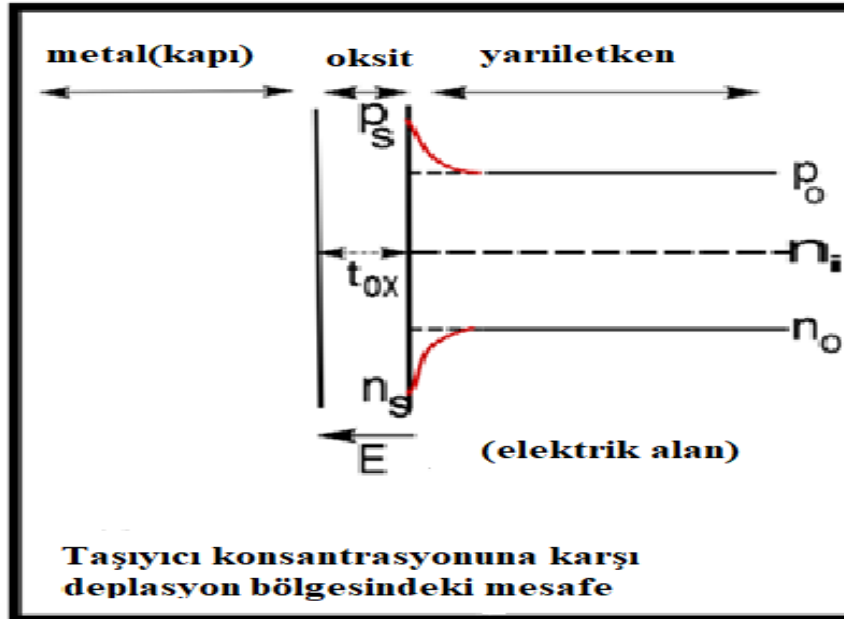
2.3.2 Biriktirme (Akümülayon) bölgesi:

Yarıiletken alttaşa olarak p tipi malzeme ve negatif bir kapı gerilimi uygulandığını varsayalım (Şekil 2.7). Bu durumda elektrik alanının yönü alttaştan kapıya doğru olacaktır ve dolayısıyla çoğunluk taşıyıcılar olan boşluklar, arayüzeyde birikir ve

çoğunluk taşıyıcılarındaki bu birikim artan negatif kapı voltajı ile artar. Bir süre sonra, yüksek negatif kapı voltajında birikme doygunluğu (satürasyon) meydana gelir. Bu yüksek negatif voltaj değeri, farklı devre elemanları için farklı olacaktır. Herhangi bir MOS sisteminin bu çalışma bölgesine biriktirme (akümülyasyon) bölgesi denir (Şekil 2.8). Burada, çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonu, gövde konsantrasyonuna kıyasla artar ve azınlık taşıyıcısı durumunda konsantrasyonu ise bu durumun tam tersi durumu sergiler. Diğer bir deyişle, $P_s > P_0$ ve $N_s < N_0$ dır. Burada, P_s ve N_s yüzeydeki boşluklar ve elektronların konsantrasyonu, P_0 ve N_0 ise gövdedeki boşluk/delik ve elektronların konsantrasyonudur.



Şekil 2.7 Birikim durumunda MOS kapasitör



Şekil 2.8 Birikim bölgesinde taşıyıcı dağılımı.

Taşıyıcı konsantrasyonunun tekdüze (uniform) olmaması nedeniyle tüm enerji bantları (E_c , E_v , E_i), uygulanan negatif kapı gerilimi ile yukarı doğru bükülmektedir. Ancak Fermi seviyesi devre elemanı boyunca sabit kalmalıdır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Birikim bölgesinde enerji band diyagramı

2.3.3 Tükenim Bölgesi

Kapı besleme geriliminin polaritesi tersine çevrilirse, elektrik alanının yönü tersine döner ve bu besleme konfigürasyonunda çoğunluk taşıyıcısı yani boşluklar arayüzeyden itilir ve azınlık taşıyıcısı yani elektronlar arayüzeye çekilir (Şekil 2.10). Boşlukların bu şekilde itilmesi nedeniyle arayüzeyin bitişiğinde bir tükenim (deplasyon) bölgesi ortaya çıkar ve bu pozitif kapı gerilimi ile arayüzeyin genişliği artar. Azınlık taşıyıcı elektronları arayüzeyde birikmiş olsa da, konsantrasyonları arayüzeydeki çoğunluk taşıyıcılarına kıyasla çok daha azdır.

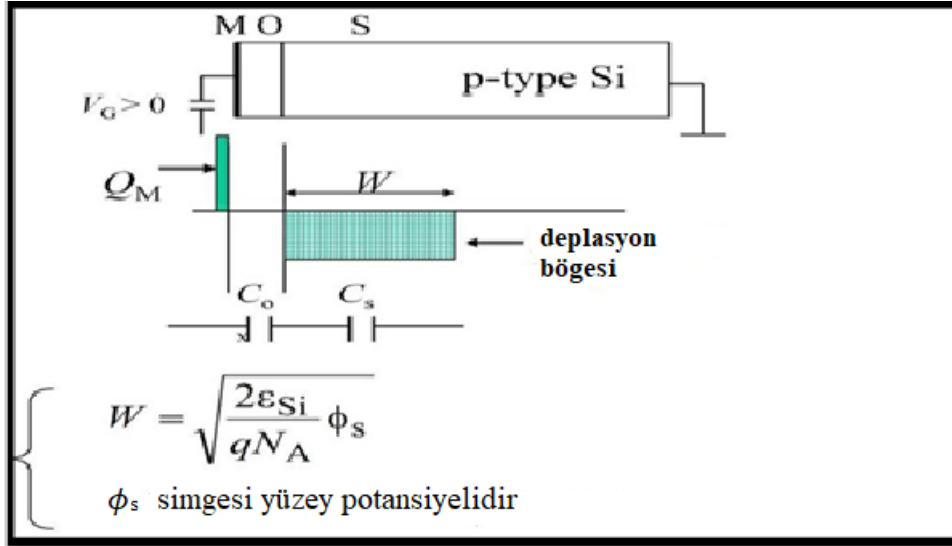
Tükenim bölgesinin genişliği, yarıiletkenin yüzey potansiyeline bağlıdır (ϕ_s) bu, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde bant bükülmesinden başka bir şey değildir ve maksimum bant bükülmesi $\phi_s=2\phi_F$ durumunda meydana gelecektir (Sze ve Kwok 2002). Bu ifadede ϕ_F terimi

$$\phi_F = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_a}{N_i} \quad (2.1)$$

şeklinde verilir ve bu terim, Fermi seviyesi ile yarıiletken gövdedeki asal seviye arasındaki farktan başka bir şey değildir. Bu nedenle, maksimum bant bükülmesine karşılık gelen tükenim bölgesinin genişliğinin maksimum değeri (Nicollian ve Brews 1982),

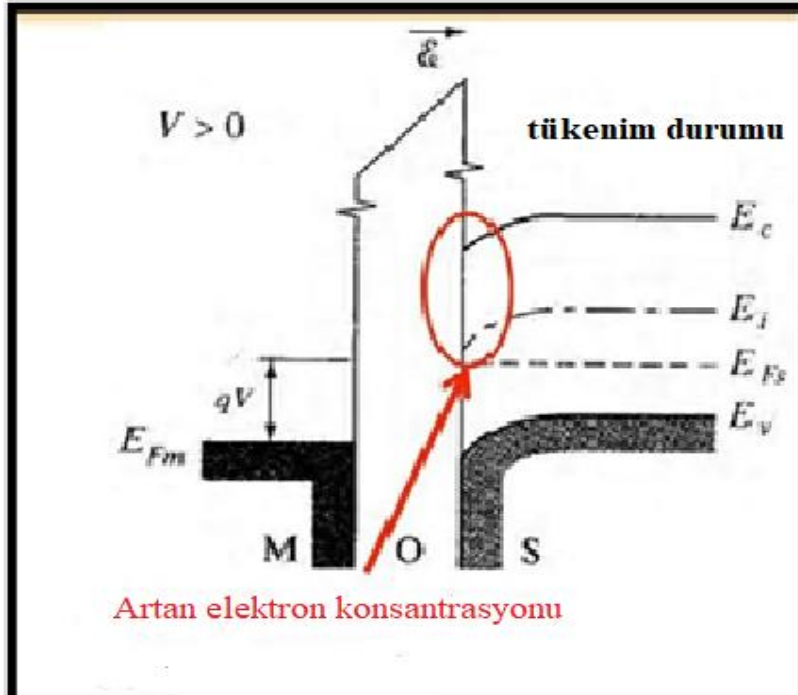
$$W_{DM} = \sqrt{\frac{4\epsilon_0\epsilon_{Si}\phi_F}{qN_a}} \quad (2.2)$$

ile verilir.

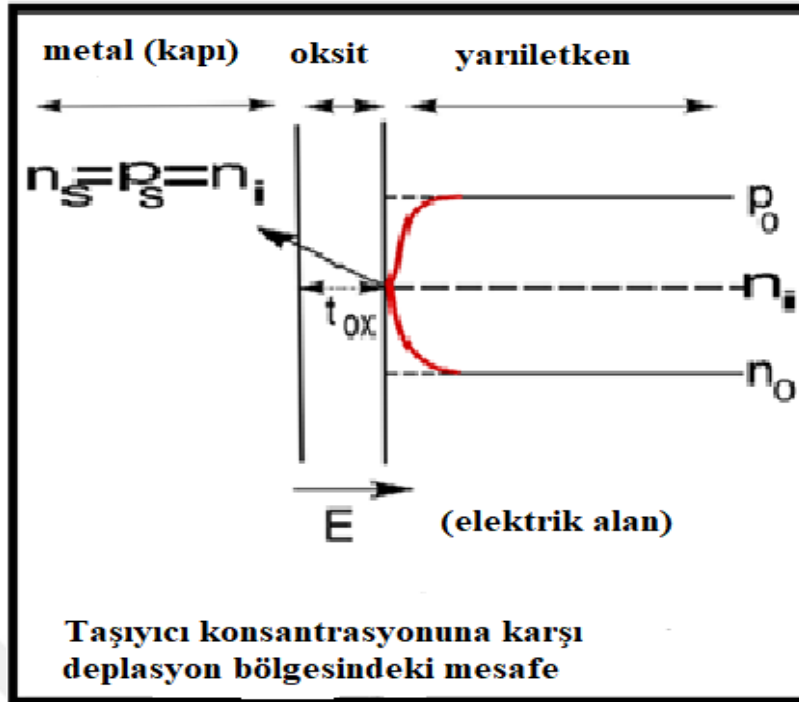


Şekil 2.10 Tükenim durumunda MOS kapasitör.

Altaş boyunca taşıyıcı konsantrasyonunun uniform olmaması nedeniyle, tüm bant aşağı doğru bükülür. Herhangi bir ekstra pozitif kapı gerilimi, ekstra tükenim bölgesi üretir ve bant aşağı yönde daha fazla bükülür (Şekil 2.11). Kapı geriliminin sürekli artmasıyla, çoğunluk ve azınlık taşıyıcısının yüzey konsantrasyonunun, Silisyumun asal konsantrasyonuna eşit olduğunda bir durum ortaya çıkacaktır. Bu durumda $P_S = N_S = n_i$ olur (Şekil 2.12).



Şekil 2.11 MOS yapının tükenim bölgesinde enerji band diyagramı:



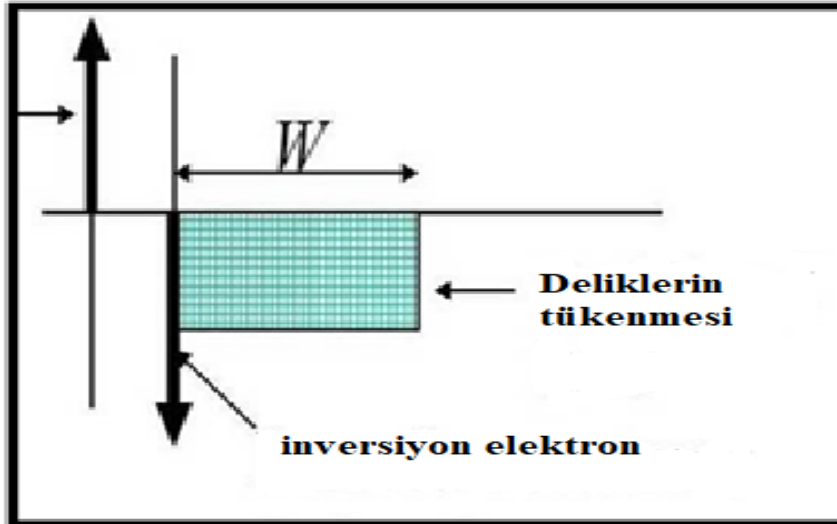
Şekil 2.12 Tükenim bölgesinde taşıyıcı dağılımı

2.3.4. Zayıf inversiyon bölgesi

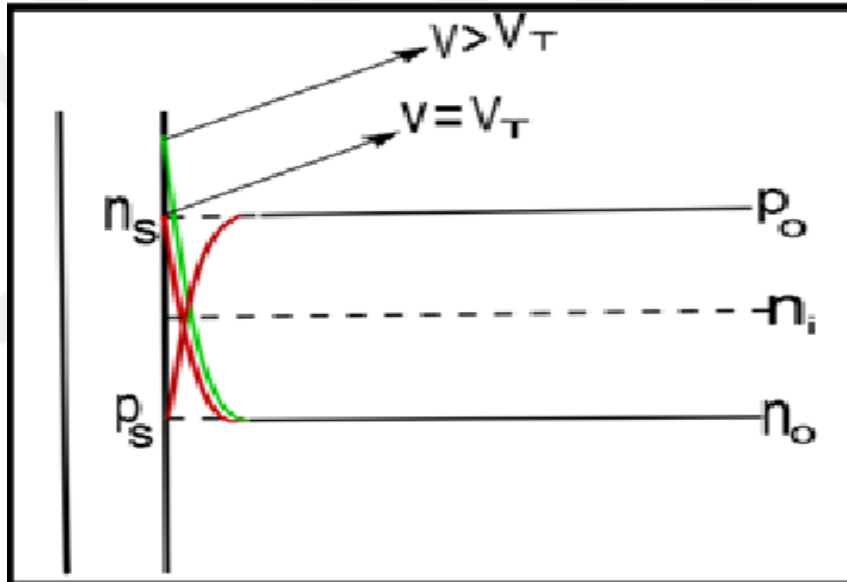
Yukarıda belirtilen durumun ötesinde kapı voltajının daha da artması, azınlık taşıyıcıları arayüzeyde çoğunluk taşıyıcı üzerinde daha baskın hale gelecektir, ancak yine de çoğunluk taşıyıcısının gövde konsantrasyonunun altındadır. Yarı iletkenin özelliğinin ara yüzeyde ters çevrildiği durum ortaya çıkar. Herhangi bir MOS kapasitörün bu çalışma bölgesine zayıf inversiyon durumu denir (Şekil 2.13).

2.3.5. Güçlü inversiyon Bölgesi

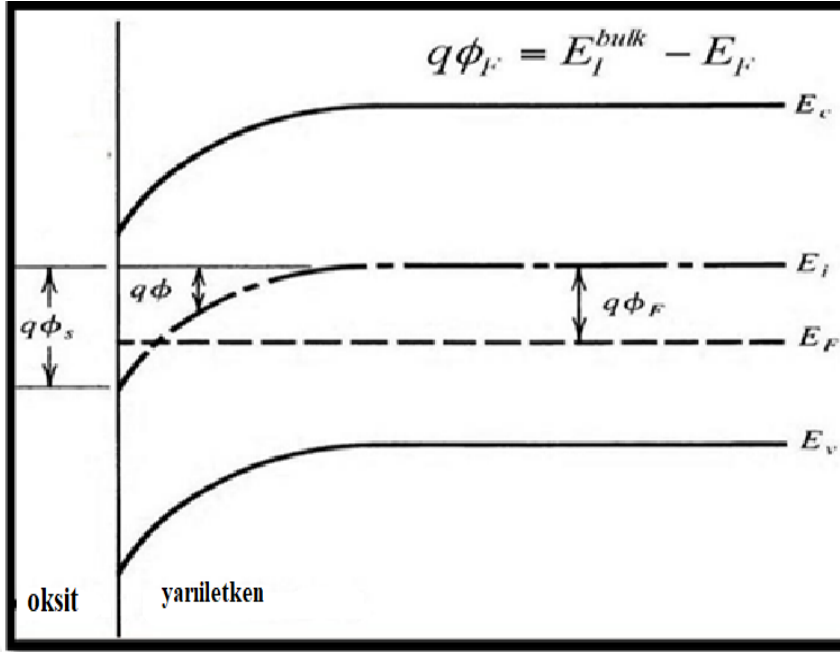
Azınlık taşıyıcısının yüzey konsantrasyonu, çoğunluk taşıyıcısının gövde konsantrasyonuna eşit olduğunda, ($N_s = P_0$) bu duruma cihazın eşik durumu denir ve bu duruma karşılık gelen kapı gerilimine eşik gerilimi (V_T) denir. Kapı voltajının daha da artması durumunda azınlık taşıyıcısı, tüm alttaş boyunca çoğunluk taşıyıcısı üzerinde baskın bir rol oynayacaktır, yani yarı iletkenin özelliği arayüzeyde tamamen ters olur. Bu nedenle $N_s > P_0$ olduğunda, devre elemanının bu çalışma bölgesi güçlü inversiyon bölgesi olarak adlandırılır (Şekil 2.14). Bu koşulda tükenim bölgesinin genişliği doyuma ulaşır ve arayüzeyde azınlık taşıyıcılarının ince bir tabakası oluşur (Şekil 2.15).



Şekil 2.13 İnceleme durumunda MOS kapasitör



Şekil 2.14 Zayıf ve güçlü inversiyon durumunda taşıyıcı dağılımı



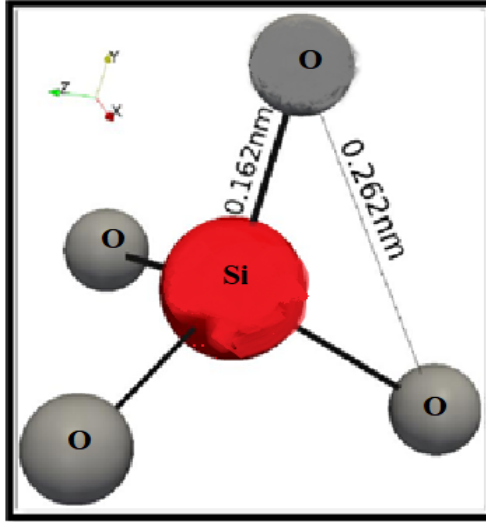
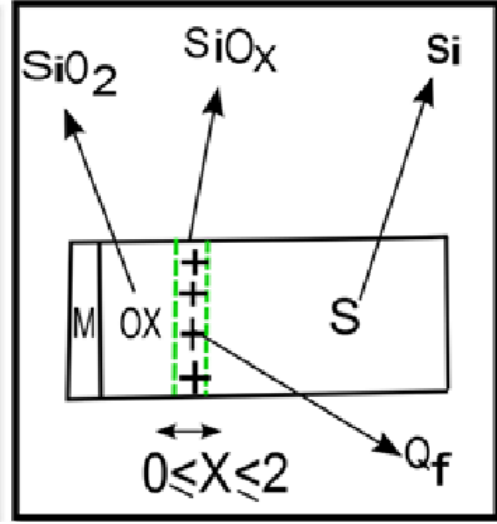
Şekil 2.15 İnversiyon durumunda MOS kapasitörün enerji band diyagramı.

2.4. MOS Sisteminde Kusurların Farklı Kaynakları:

Herhangi bir MOS sisteminde her zaman dört tür kusur bulunur. Bunlar (a) Arayüzey sabit yükleri (Q_F), (b) Arayüzey tuzak yükleri (Q_{it}), (c) hareketli oksit yükleri (Q_m) ve (d) Oksit tuzak yükleri (Q_{ot}) (Plummer ve ark. 2000). Bu kusurların kaynağı bu kısımda açıklanmıştır.

2.4.1. Arayüzey sabit yükleri (Q_F):

Si-SiO₂ arayüzeyinde bir pozitif sabit yük tabakası oluşur. Bu yükler Si'dan SiO₂'ye geçiş ile ilişkilidir. Biz, SiO₄ tetrahedral yapıların SiO₂ yi oluşturan temel hücreler olduğunu biliyoruz (Plummer ve ark. 2000) (Şekil 2.16) ve Si'dan SiO₂'ye geçiş ani değildir. Birkaç malzeme katmanı arayüzeyde SiO_x gibi davranır, burada $0 < X < 2$; tamamlanmamış oksitlenmiş Si atomlarının varlığını ima etmektedir (Şekil.2.17)

Şekil 2.16 SiO₄'ün tetrahedral birimleri

Şekil 2.17 Arayüzey sabit yükleri

Bu doymamış Si atomları net pozitif yüke (Q_F) sahiptir ve yük durumları normal cihaz çalışma koşullarında değişmez. Bu yükler pozitifdir ve normal şartlar altında değişmez. Bunlara arayüzey sabit yükleri denir (Q_F).

2.4.2. Arayüzey tuzak yükleri (Q_{it}):

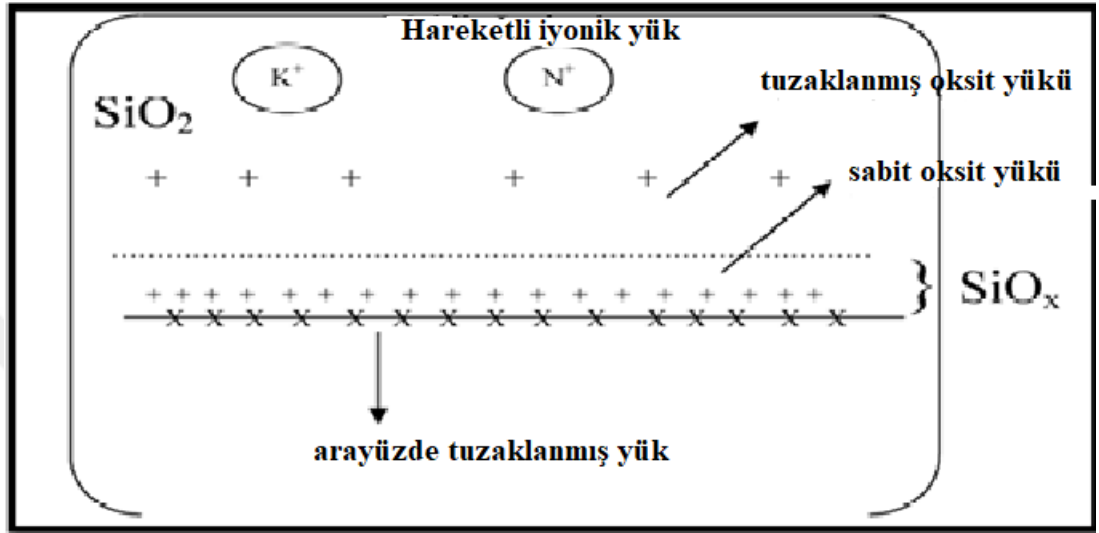
Arayüzeyde bulunan ikinci kusur türü, arayüzey tuzak yükü olan Q_{it} 'dir. Q_{it} 'in fiziksel orijini, oksitte bulunan doymamış veya boş bağlara sahip eksik oksitlenmiş Si atomundan dolayı, arayüzey sabit yüküne oldukça benzerdir. Ancak Q_F ve Q_{it} arasında önemli bir fark vardır. İlgili Q_{it} yükü normal cihaz çalışması altında pozitif, negatif veya nötr olabilir, çünkü deliklerin ve elektronların yakalanmasıyla ilişkilidir. Bu arayüzey tuzak yükleri gövdede bulunan derin seviye veya tuzak merkezlerinden farklıdır. Bu arayüzey tuzak merkezleri, Si'un bant aralığı boyunca dağılırlar ve normalde bant aralığının ortasından ziyade, iletkenlik bandı kenarında ve valans bandı kenarında bulunurlar (Plummer ve ark. 2000).

2.4.3 Hareketli Oksit yükleri (Q_M):

Oksit gövdesinde, herhangi bir MOS sisteminin eşik voltajının kararlılığını etkileyen az sayıda hareketli iyon bulunur. Bunlar esas olarak Na^+ ve K^+ iyonlarıdır. Onlar hareketli oksit yükleri (Q_M) olarak adlandırılır (Plummer ve ark. 2000). MOS devre elemanında Q_F ve Q_{it} ile karşılaştırıldığında çok az yoğunlukta mevcut olmalarına rağmen, alttaşın uygun temizleme işlemi ve uygun oksit kalınlığı seçimi ile azaltılabilirler.

2.4.4. Oksit tuzak yükleri (Q_{ot}):

Bu kusur, oksit gövdesindeki kırık Si-O bağlarından kaynaklanmaktadır. Bunlar, aynı zamanda tuzak merkezleri gibi davranırlar. İyonlaştırıcı radyasyon, plazma dağlama işlemi veya iyon implantasyon sürecinden kaynaklanırlar. Cihazda çok düşük yoğunluklarda bulunurlar (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 MOS sisteminde bulunan dört tür kusurun şematik diyagramı.

2.5. Radyasyonun Yarıiletken Elektronik Devre Elemanları Üzerindeki Etkisi

Silikon devre elemanları üzerindeki radyasyon etkileri iki kategoriye ayrılabilir: iyonlaşma etkileri ve yer değiştirme hasarı. Yarı iletken devre elemanları, radyasyon nedeniyle elektronik özelliklerini değiştirir. İyonize parçacıklar, cihazın hassas alanlarında elektrik yükleri oluşturur. Genel olarak, radyasyon etkileri sonunda elektronik sistemlerde arızalara ve hatta geri dönüşü olmayan yıkıcı etkilere yol açacaktır. Nötronlar ve gama ışınları genellikle hızlandırıcı ortamında radyasyon hasarı etkilerine ana katkıda bulunurlar. Tablo 2.1 radyasyon hasarı tipinin önemi ve ilgili etkileşim tipini göstermektedir (Barbottin ve Vapaille 1999, Jorio ve ark 1999).

Tablo 2.1 Silisyum yapılar üzerinde nötron ve gama radyasyonunun etkileri.

Radyasyon tipi	Enerji Aralığı	Ana etkileşim türü	Si ve SiO ₂ 'de birincil etkiler	Si ve SiO ₂ 'de ikincil etkiler
Fotonlar	Düşük enerji	Fotoelektrik Etkisi	İyonlaştırıcı etki	Yer değiştirme hasarı
	Orta Enerji	Compton Etkisi		
	Yüksek Enerji	Çift (e-h) oluşum		
Nötronlar	Düşük enerji	Yakalama ve Nükleer reaksiyon	Yer değiştirme hasarı	İyonlaştırıcı etki
	Yüksek enerji	Elastik saçılma		

Yüksek enerjili parçacıklar ile madde arasındaki etkileşimler aşağıdaki etkilerle açıklanabilir:

1. Kabuk elektronları ile etkileşim yoluyla malzemenin iyonlaşması
2. Hedef materyal atomlarının yer değiştirmesi
3. Hedef çekirdekle nükleer reaksiyon

Yukarıdaki süreçlerin tümü bir arada ortaya çıkabilir veya hatta bazı durumlarda bir gelen parçacık tarafından tetiklenebilir. Örneğin, bir nötron önce çekirdek ile etkileşime girer, malzemeyi iyonlaştıracak yeterli enerjiye sahipse ikincil yük taşıyıcıları üretmek yerine, yer değiştirme hasarı oluşturur. Olay durumunda, gelen yüksek enerji yüküne sahip parçacıklar iyonlaştırıcı doz etkisine hakimdir (Barbottin ve Vapaille 1999). Yerdeğiştirme hasarı için sadece enerjilerinin küçük bir oranı kullanılır. Yer değiştirme hasarından veya yer değiştirme aşamalarından, esas olarak nötr parçacıklar sorumludur. Yoğunluğun homojen olduğu bir malzeme içindeki bir yol boyunca parçacığın enerji kaybının oranına durdurma gücü denir ve $= \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$, ρ hedef malzemenin kütle yoğunluğu, dE/dx , x yolu boyunca dE enerji kaybının oranıdır.

Maddedeki bağlı elektronlarla esnek olmayan çarpışmalar nedeniyle bir gelen iyonunun yavaşlamasına elektronik durdurma denir. Bu durumda mesafe başına enerji kaybı Bethe-Bloch denklemi ile tanımlanır (Barbottin ve Vapaille 1999, Makino ve ark.2003, Hahn ve Zagel 1999).

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} N_e \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right], \quad (2.3)$$

Bu denklemde z iyon yükü sayısıdır, e elektron yüküdür, m_e elektronun durgun kütlesi, N_e malzeme içindeki elektron konsantrasyonudur, v iyon hızıdır, β v 'nin c ışık hızına oranı, I iyonlaştırıcı potansiyeldir.

Giden iyon ile numunedeki atomlar arasındaki esnek çarpışmalara, nükleer durdurma denir (Barbottin ve Vapaille 1999). Nükleer durdurma iyon kütlesi ile artar. 0,01 MeV altında düşük enerjilerde, nükleer durdurma genellikle elektronik durdurmadan daha büyüktür.

2.6. Gama Işını Hasarı Etkileri

Gama ışınları, yarı iletken cihazlarda enerjiyi temel olarak iyonlaştırma etkisiyle aktarır (Messenger ve Ash 1986). İyonlaştırıcı etki, X-ışınları, ultraviyole radyasyon veya dolaylı olarak ikincil geri tepme parçacıkları yoluyla da ortaya çıkabilir (Adams ve Holmes-Siedle 2004, Devine 1994). Gövdesel (hacimsel) malzemelerde iyonlaşma, fazla yük taşıyıcıların üretilmesi yoluyla elektriksel iletkenliğin artmasına, tuzaklanmış yüklere, elektrik ve manyetik alanın değişimine ve kimyasal etkilere yol açar (Messenger ve Ash 1986). Fotonlar, enerjilerine bağlı olarak madde ile dört şekilde etkileşirler (Wrobel 2005):

1. Fotoelektrik etki
2. Compton etkisi
3. Elektron-boşluk çiftleri üretimi
4. Nükleer fotoabsorpsiyon

Düşük enerjili fotonlar için, fotoelektrik etki baskındır, Compton etkisi ve çift oluşumu olayı, hedef malzemenin Z numarasına bağlı olarak 0,1-1 MeV'den daha büyük enerjilere sahip gama ışınları için baskındır. Nükleer fotoabsorpsiyon, hedef malzemenin Z sayısına bağlı olarak 10-30 MeV civarında bir tesir kesitinde maksimuma sahiptir.

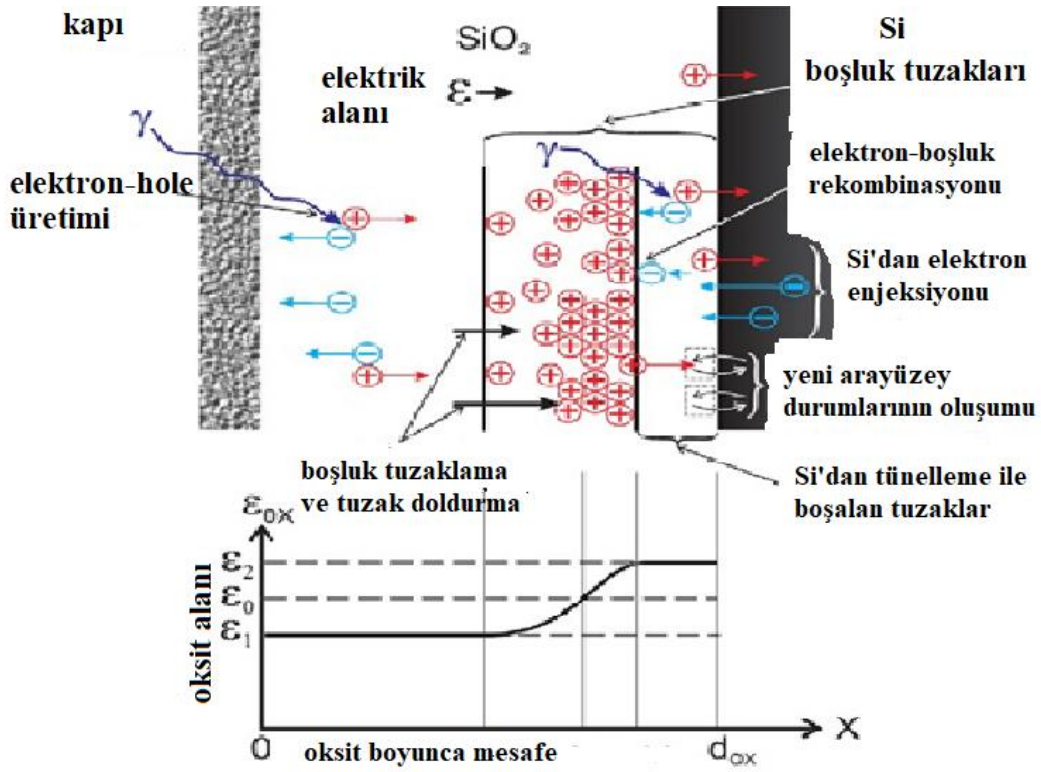
İyonizasyon işlemi boyunca üretilen serbest elektronlar, yasak enerji aralığında yerleşir ve yeterli enerjiye sahiplerse elektron-boşluk çiftleri oluşur. Bu durum, gövdesel malzemenin iletkenliğini geçici olarak artırır. SiO₂ gibi yalıtkan bir malzemede üretilen elektron-boşluk çiftleri, örneğin tranzistör veya diyot gibi bazı yarıiletken devre elemanlarının elektronik özelliklerini değiştirmede bile önemli bir rol oynayabilir. Elektron-boşluk çiftlerinin üretimi, bir çift oluşturmak için gereken enerji ve oluşum hızı şeklinde iki parametreye bağlıdır. Tablo 2.2, silikon ve silikon oksit için bu

parametrelerin değerlerini içerir (Barbottin ve Vapaille 1999). Üretim hızı, Verilen malzeme için birim hacim başına iyonlaşma kapasitesini ifade eder.

Tablo 2.2 Silisyum ve silikon dioksit için iyonlaşma enerjisi ve iyonlaşma hızı.

Malzeme	$E_{ion}[eV]$	$g_0[elektron - boşluk çiftleri * Gy^{-1} * cm^{-3}]$
Silikon , (Si)	3.6	4×10^{15}
Silikon dioksit (SiO ₂)	18	8.2×10^{14}

Hedef materyalde oluşturulan elektron-boşluk çiftleri ortamdaki elektrik alanına bağlı olarak yeniden birleşebilir veya difüzyon uğrayabilir. Silisyumda biriken yük, tek olay etkilerini (SEE'yi) tetikleyebilir, SiO₂'de tuzaklanan yük, yarıiletken devre elemanlarının karakteristiklerinin değişmesine yol açar. Şekil 2.19, gama radyasyonu nedeniyle SiO₂/Si ara yüzeyinde bir yük üretim sürecini göstermektedir.



Şekil 2.19 Silikon dioksit ve SiO_2/Si arayüzeyinde yük oluşturma süreci ve elektrik alanının değişimi (Adams ve Holmes-Siedle 2004).

Gelen gama ışınları, SiO_2 'de elektron boşluk çiftleri oluşturur. Oluşan çiftlerin bir kısmı hızlı bir şekilde bir yeniden birleşir. Bununla birlikte, elektronların hareketliliği çok daha yüksektir ve normal devre elemanı işleminin bir parçası olarak elektrik alan varlığından dolayı elektronlar anında SiO_2 den ayrılır. Yalıtıkanda (SiO_2) kalan pozitif boşluklar, SiO_2 içinde biriken yüke neden olur. Bu yükün miktarı ışınlama sırasında oksit boyunca oluşan elektrik alanına bağlıdır. Pozitif tuzakların bazıları tünelleme etkisi nedeniyle yeniden birleşebilir, diğerleri elektriksel olarak aktif kusurlar olarak tuzaklanmış olarak kalır. SiO_2/Si arayüzeyinde atomik bağların yeniden düzenlenmesiyle yeni arayüzey durumları oluşturulabilir (Adams ve Holmes-Siedle 2004). Tuzaklanan yükün, elektronik cihazların elektriksel özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. SiO_2/Si arayüzeyinin en yakın kısmında lokalize olan oluşturulan tuzaklardan bazıları, sınır tuzakları veya yavaş arayüzey durumları gibi davranabilir. Bu etki bir SiO_2 kalınlığı 5-6 nm den daha az olduğunda mikron altı teknolojiler için önemli bir rol oynar (Fleetwood 2005).

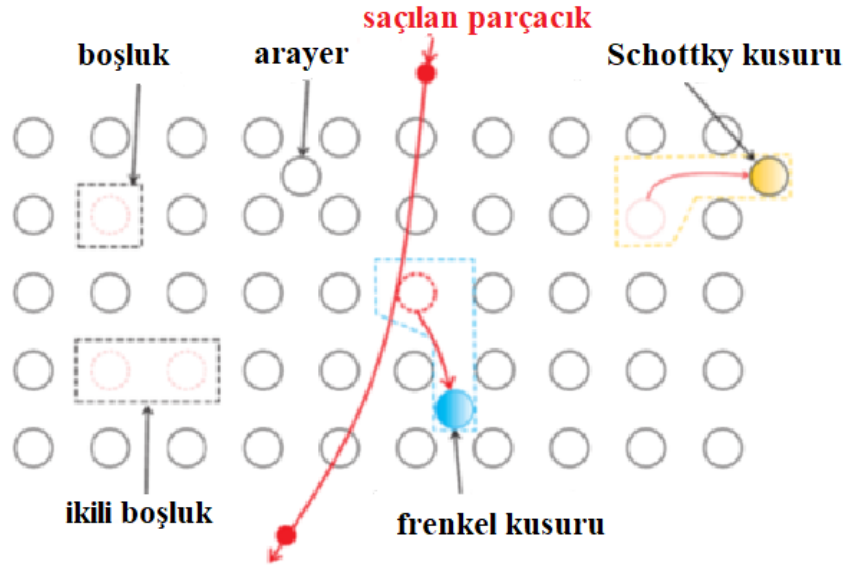
2.7. Nötron Hasar Etkileri

Nötronlar madde ile birkaç farklı şekilde etkileşirler:

- Esnek saçılma
- Esnek olmayan saçılma
- yakalama işlemi
- nükleer reaksiyonlar

Saçılma işlemleri ve nükleer reaksiyonlar hızlı nötronlar ($E > 1 \text{ MeV}$) için baskındır ve yakalama etkisi yavaş nötronlar için daha muhtemeldir (Barbottin ve Vapaille 1999). Hedef malzeme bir örgü yapısına sahip olduğu zamanki durumda nötron bombardımanından dolayı örgü hasarında atomik yerdeğiştirme gerçekleşir. Bu etki iki top arasındaki klasik çarpışmayla kıyaslanabilir. Transfer edilen enerji E_d yerdeğiştirme enerjisinden daha yüksekse, örgü atomu orijinal pozisyonundan hareket edecektir. Bir kusur oluşacaktır. Geri tepen atom diğer atomları yerinden ayırabilir ve enerjiye bağlı olarak elektron-boşluk çiftleri oluşturacaktır. Silisyum örgüsündeki bozulma durumu, oldukça yüksek enerjili parçacıklarda gözlenir.

Şekil 2.20 yerdeğiştirme etkilerinin farklı türlerini göstermektedir: boşluk, ikili boşluk, arayer yerdeğiştirmesi, Schotky ve Frenkel kusurları. Boşluklar, Frenkel kusurları ve arayer yerdeğiştirmesi çok daha muhtemel görünmektedir (Barbottin ve Vapaille 1999). Birincil etkiler oda sıcaklığında ya da yüksek sıcaklıklarda genellikle kararlı değildir. Bu etkiler genellikle daha fazla karmaşık ikincil etkilere dönüşür, yok eder ya da oluşturur. Yarıiletken içindeki kirlilikler ve katkı atomları oda sıcaklığında kalıcı küme etkileri için bir temel teşkil eder (Gilard ve Quadri 2005). Kalıcı kusur kümeleri yük tuzaklama merkezleri olarak davranır ve malzemenin direncini artırır (Messenger ve Ash 1986). Hareketli boşluklar azınlık taşıyıcılar için rekombinasyon noktası rolü oynarlar ve onların yaşam süresini azaltırlar. Boşluk tuzakları gibi davranan kusurlar H kusurları olarak adlandırılır ve elektron tuzaklamadan sorumlu olan kusurlar ise E kusurları olarak adlandırılır (Barbottin ve Vapaille 1999). Yerdeğiştirme hasarı yarıiletken altlıkların yapısını değiştirerek elektronik devre elemanlarının elektriksel karakteristiklerini etkilerler.



Şekil 2.20 Örgüde atomik yerdeğiştirmeden dolayı oluşan çeşitli kusurlar (Barbottin ve Vapaille 1999).

2.8. Tek Olay Etkileri (Single Event Effects, SEEs)

Elektronik devre elemanlarının duyarlı bölgelerindeki iyonlaşma tek olay etkisi (SEE) olarak tanımlanır. İyonlaştırıcı türlerden malzemeye transfer edilen dE/dx enerjisine, doğrusal enerji transferi (LET) denir. Bu değer, soğuran malzeme spesifik kütleye normalize edildiği zaman $\text{MeV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ or $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ biriminde verilir. LET parametresi, gelen parçacık türüne, enerjisine ve soğurucu malzemeye bağlıdır ve Bethe-Bloch denklemi kullanılarak hesaplanabilir (Barbottin ve Vapaille 1999, Makino ve ark, Hahn ve Zagel 1999). Kritik LET veya LET_{th} (LET eşik değeri) SEE nin gözlemlendiği elektronik aygıtta biriken minimum LET değeridir. Elektronik devre elemanındaki SEE yi oluşturmak için gerekli olan yük, kritik yük olarak tanımlanır (Detcheverry ve ark.1997). Bu yükün değeri elektronik aygıtın boyutuna güçlü bir şekilde bağlıdır.

SEE ler iki gruba ayrılır:

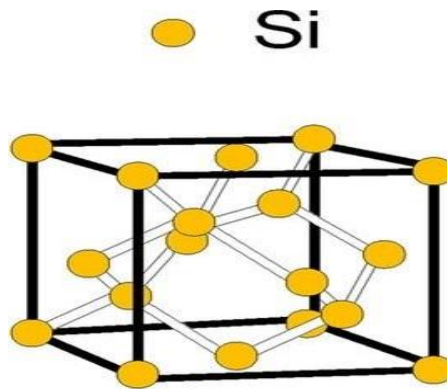
- i) Hasar vermeyen (non-destructive) olaylar, devre elemanı hatası, sistem yeniden başlatılınca veya etkilenen verilerin yeniden işletilmesi ile düzelir.
- ii) Hasar veren veya sert hata olayları, hata devre elemanı veya sistemdeki kalıcı hasara yol açar.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tezde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Silisyum Kristalinin özellikleri (Si)

Silisyum yer kabuğunun yaklaşık %28 lik bölümünü meydana getirir. Oksijen elementinden sonra dünyamızda bolluk bakımından ikinci sırada bulunur. Yer kabuğunda kaya, kum, kil ve toprakların yapısında bulunmaktadır. Bununla beraber doğada silisyum dioksit şeklinde isimlendirilen silika ile O ve Al, Mg, Ca, Na, K, Fe ile bileşik biçiminde de bulunabilir. İsmi Latince “silex” olarak bilinen çakmak taşına atfedilir. Şekilsiz bir element olan Si tarihte ilk kez İsveçli kimyager J.J. Berzelius tarafından 1824 tarihinde izole edilerek tanımlanması yapılmıştır. Kristal element olarak 1854 tarihine kadar üretilmemiştir. Kaya kristali şeklinde olan biçimi, Eski Mısır yönetimleri öncesinde boncuk ve vazo üretiminde kullanmışlardır. Si yeryüzünde silikat ve tuzları şeklinde bulunur. Si yarıiletken kristal yapısının şematik şekli Şekil 3. 1’de gösterilmiştir. Silisyum saflaştırılmış biçimi ile B, P ve As gibi elementlerle katkılama yapılmış ve yarıiletken teknolojisinin beynini oluşturan bilgisayar çipleri, tranzistörler, diyotlar, güneş pilleri, sıvı kristal yapılar ile çeşitli elektrik, elektronik ve anahtarlama devre elemanlarında kullanılması için tercih edilen temel elementtir. Silisyumun bazı temel fiziksel ve kimyasal özellikleri ve parametreleri Tablo 3.1’ de görülmektedir.



Şekil 3. 2 Si yarıiletkeninin kristal yapısının şematik şekli

Tablo 0.1 Silisyumun Bazı Özellikleri

Özellikler	Si
Atom yoğunluğu (cm ³)	5.0 x 10 ²²
Atom ağırlığı	28.09
Kristal yapısı	Elmas
Yoğunluğu (g/cm ³)	2.328
Dielektrik sabiti	11.9
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu N _c (cm ⁻³)	2.8 x 10 ¹⁹
Valans bandındaki durumların yoğunluğu N _v (cm ⁻³)	1.04 x 10 ¹⁹
Saf taşıyıcı yoğunluğu n _i (cm ⁻³)	1.45 x 10 ¹⁰
Saf öz direnci (Ω.cm)	2.3x10 ⁵
Örgü sabiti (Å)	5.43095
Elektronların etkin kütlesi, m [*] /m _o	m ₁ [*] =0.98, m _t [*] =0.19
Deşiklerin etkin kütlesi, m [*] /m _o	m _{lh} [*] =0.16, m _{hh} [*] =0.49
Elektron yakınlığı, χ (eV)	4.05
Yasak enerji aralığı (eV)	1.12
Mobilitesi elektron – hole (cm ² /V.s)	1.450-500
Erime sıcaklığı (°C)	1414
Termal iletkenliği	1.56
İş fonksiyonu (eV)	4.60-4.85
Kırılma alanı(V/cm)	3x10 ⁵
Kaynama sıcaklığı(°C)	2900
Molar hacmi (ml/mol)	12,06
Mineral sertliği	6,5

3.1.2. Alüminyum (Al)

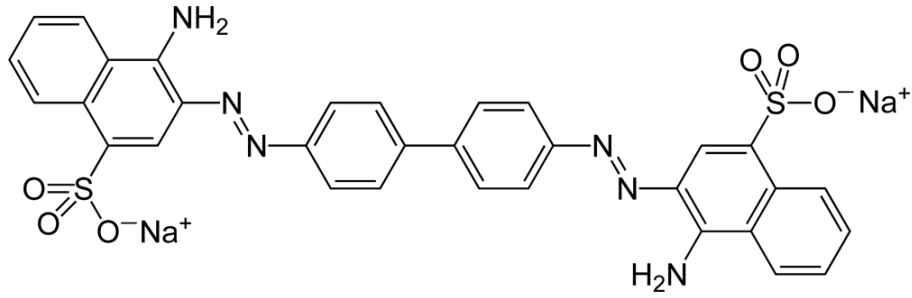
Alüminyumun üretilmesinden resmi kayıtlarda ilk kez 1824 tarihinde bahsedilmektedir. Yeryüzünde bulunan en yaygın formu Alüminyum sülfatlardır. Alüminyum sülfatlar suyun temizlenmesi işleminde, tıp alanında, kozmetik endüstrisinde, kimya sanayiinde ve birçok alanda kullanım sahasına sahiptir. İsmini, Latince “alumen” olarak isimlendirilen alüminyum sülfat bileşiğinden almıştır. Alüminyumun en önemli özelliğinden birisi de doğadaki en hafif metallerden birisi olmasıdır. Demir elementinden hemen hemen 3 kat daha hafiftir buna karşın aynı zamanda çok güçlü, esnek ve korozyona karşı dayanımı çok fazladır. Gümüş renginde olup yumuşak bir malzeme olup işlenmesi kolaydır. Alüminyum metali hem sıcak ortamda hem de soğuk ortamda basınç kullanılarak kolaylıkla işlenebilmektedir. Atom numarası 13, simgesi Al'dir. Alüminyumun oda sıcaklığındaki bazı temel parametreleri Tablo 0.2’de gösterilmiştir.

Tablo 0.2 Alüminyumun Bazı temel parametreleri

Özellikler	Al
Yoğunluk (g/cm ³)	2.7
Erime noktası (°C)	≈660
Kaynama noktası (°C)	2519
Termal iletkenliği (W/cm.K)	237
Mineral sertliği	2.75
Elektriksel iletkenliği (Ω ⁻¹ cm ⁻¹)	3.77x10 ⁵
İş Fonksiyonu (eV)	4.08

3.1.3. Congo Red özellikleri

Boya maddesi olarak kullanılan Congo Red (CR), benzidindiazo-bis-1-naftilamin-4-sülfonik asit denilen asidin sodyum tuzudur. İkincil diazo (R-N=N-R bağı) boyasıdır. CR suda çözünebilir ancak etanol gibi organik çözücülerde daha iyi çözünür. Güçlü ve sert yapısı nedeniyle selüloz lifleri ile benzerliği vardır. Renal amiloidosis'in tanısında kullanılan boyalardan biridir. Ayrıca Congo Red biyokimya ve histolojide mikroskopik ortamları boyamada kullanılır. Özellikle sitoplazmayı ve alyuvarları boyar. Molekül formülü C₃₂H₂₂N₆Na₂O₆S₂ şeklinde ifade edilmektedir. Congo Red'in molekül yapısı ise Şekil 3.2 de gösterilmektedir. Congo Red'in moleküler yapısında konjüge sistemi oluşturan benzen ve azo gruplarındaki elektronların lokalize olmamasından ötürü bir iletkenlik durumu ortaya çıkmaktadır. Bu özelliğinden dolayı yarıiletken teknolojisinde kullanımı da mevcuttur. Güllü ve ark. 2008 yılında MIS diyet çalışmasında Congo Red malzemesini arayüzey olarak kullandılar. Yapının elektronik özelliklere etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir (Güllü ve ark. 2008).



Şekil 3. 2 Congo Red (CR) molekül yapısı

Mevcut çalışmada CR kullanılması başlıca nedenleri arasında

- Maliyetinin uygunluğu
- Malzemenin kullanışlılığı/işlenebilirliği
- Moleküler yapısındaki π bağ sistemi
- Laboratuvar sıcaklığında çalışmaya imkan vermesi

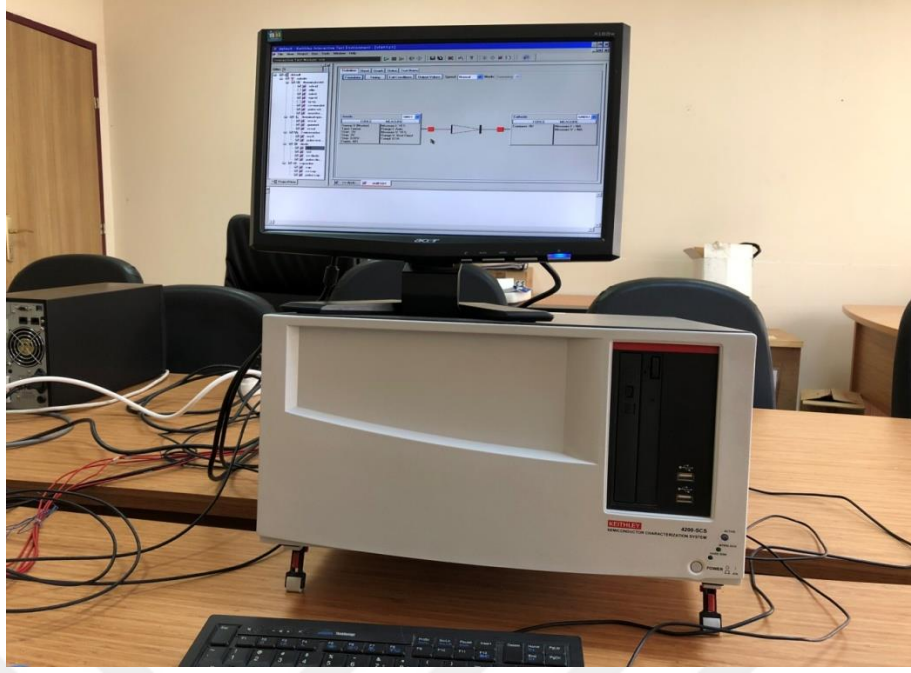
gibi avantajlar sayılabilir.

3.2. Yarıiletken MIS diyotun üretimi, ışınlanması ve ölçümler

Bu araştırmada (100) doğrultulu ve tek yüzeyi parlak p-Si yarıiletkeni kullanıldı. Silisyum için tercih edilen geleneksel kimyasal temizleme aşamalarından sonra deiyonize su (DI) ile 30 sn. yıkanarak azot gazı ortamında kurutuldu ve hemen ardından Si kristalin mat tarafına Al metalinin termal buharlaştırma sistemi kullanılarak omik kontak yapıldı. Diğer yüzüne ise 8 μ L CR boyası etanol çözeltisi (%0.2' lik) ile kaplanarak daha sonra CR filmin de üst tarafına Al üst kontak yapıldı.

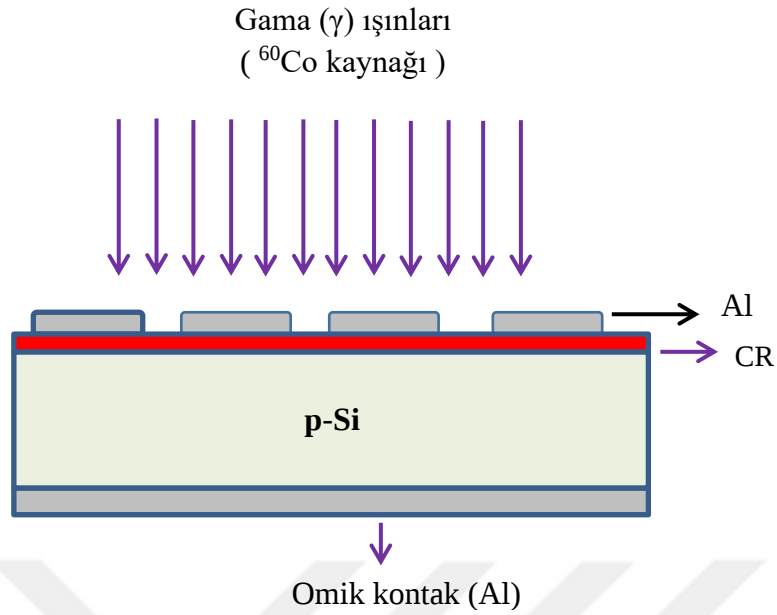
Üretimi tamamlanan Al/CR/p-Si MIS yapısının, kapasite-voltaj (C-V) ölçümleri Batman Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarında bulunan KEITHLEY 4200-SCS cihazı ile oda sıcaklığında alındı (Şekil 3.3). Ölçümler 50-500 kHz frekans aralığında ve (-2V)-(+2V) gerilim bölgesinde 0.05V aralıklarla alındı. Bu ölçümler hesaplamalarda kontrol olarak değerlendirildi.

Al/CR/p-Si MIS yapısının akım-gerilim (I-V) ölçümleri de KEITHLEY 4200-SCS cihazı ile oda sıcaklığında karanlık ortamda (-2V)- (+2V) bölgesinde 0.02V aralıklarla alındı (Şekil 3.3). Bu ölçümler hesaplamalarda kontrol olarak değerlendirildi.



Şekil 3. 3. KEITHLEY 4200-SCS cihazının görünümü

Daha sonra 8,5 Curie aktiviteye ve 1,25 MeV enerjiye sahip Cobalt-60 kaynağı kullanılarak Al/CR/p-Si MIS yapısı üzerine 30 dakika süre ile ışınlamaya maruz bırakılmıştır. Bu ışınlamadan sonra yukarıda belirtilen I-V ve C-V ölçümleri tekrar alınarak gama ışınlamasının MIS diyotun elektriksel karakteristikleri ve parametreleri üzerine etkileri araştırıldı. Hazırlanan Al/CR/p-Si MIS kontanın şematik yapısı Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 4 Al/CR/p-Si MIS kontağının şematik yapısı ve gama ışınlaması.

3.3. Al/CR/p-Si MIS kontakların Akım-Gerilim (I-V) Özellikleri ve Temel diyot parametreleri

3.3.1. Engel yüksekliği ve İdealite faktörü

MS diyotların özelliklerinden en önemlisi, metal ile yarıiletken arasında oluşan engel yüksekliği olarak tanımlanan bir potansiyel engelin meydana gelmesidir. Bu potansiyel engeli, metal/yarıiletken arasında yük geçişlerinde birinci derecede etkili olup MS yapılar için çok önemli bir parametre özelliğine sahiptir.

Benzer olarak MIS yapıların kontak özellikleri de metal ile yarıiletken arasında olan arayüzey tabakadan oldukça etkilenmektedir. MIS yapıların arayüzey tabakası, engel yüksekliğini, idealite faktörünü, I-V ve C-V karakteristiklerini önemli oranda etkiler.

Bir diyota V gerilimi uygulandığı zaman yapı üzerinden geçen akım,

$$I = I_0 \exp \left(\left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (3.1)$$

ile verilir (Ziel, 1968). 3.1 ifadesi $eV \gg nkT$ şartı için (3.1) eşitliğindeki 1 sayısı, ihmal edilebilir. Bu şartlar altında eşitlik,

$$I = I_0 \exp\left(\left(\frac{eV}{nkT}\right)\right) \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadeden idealite faktörü (n),

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (3.3)$$

olarak hesaplanacaktır.

Kontak yapıları için $dV/d \ln I$ eğim ile beraber diğer parametreler de kullanılarak (3.3) ifadesi vasıtasıyla n değerleri hesaplanmaktadır. Yukarıda verilen I_0 sızıntı akımı,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \quad (3.4)$$

olarak yazılır. Bu ifade kullanılarak engel yüksekliği değeri Φ_B ,

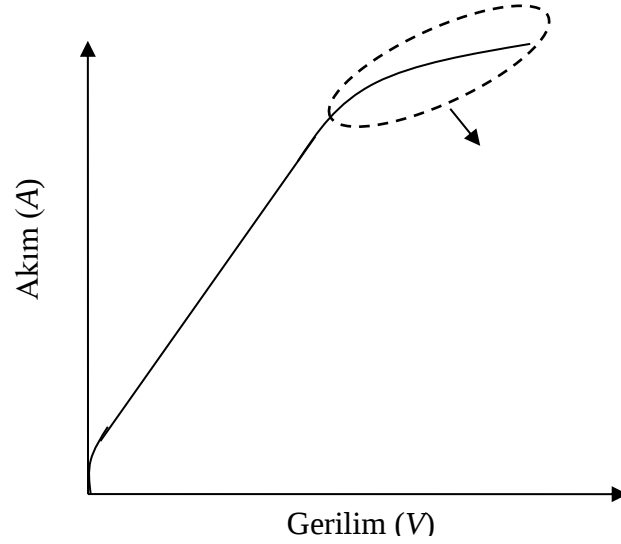
$$\Phi_B = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (3.5)$$

olarak hesaplanabilir.

Bu ifadede A yüzey alanı; A^* Richardson sabiti dir (p-Si için $A^* = 32 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$). $\ln I$ -V grafiğinin $V=0$ için kestiği nokta tespit edilerek önce I_0 ve (3.5) ifadesinden faydalanarak ϕ_b engel yüksekliği değeri hesaplanabilir.

3.3.2. Seri direnç

MS kontaklarında, deplasyon bölgesinin dışında yarıiletken tarafında bulunan bölgenin akıma karşı gösterdiği dirence, seri direnç (R_s) denir. Seri direnç etkisinin büyük voltaj bölgesinde baskın olduğu görülmektedir. Bu direnç etkisi diyottaki akımın düşmesine yol açar ve bunun sonucunda Şekil 3.7’de görüldüğü gibi yukarı voltaj bölgesinde I-V grafiğinde doğrusallıktan sapmaya sebep olmaktadır (Sze ve Kwok, 2002).



Şekil 3. 3 Seri direncin I-V ölçümlerinde gösterdiği etki.

Kontaklar için (3.1) eşitliği ile verilen akım ifadesi seri direnç (R_s) etkisi dahil edildiğinde;

$$I = I_0 \exp \left(\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (3.6)$$

olarak ifade edilebilir.

3.3.3. Norde fonksiyonu

Metal/Yarıiletken Schottky kontakların seri direnç ve engel yüksekliği parametrelerinin elde edilmesi için kullanılan tekniklerden biri de Norde (1979) tarafından öne sürülmüştür (Norde 1979). Bu yöntemde kullanılacak olan modifiye Norde fonksiyonu $F(V)$:

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I(V)}{A A^* T^2} \right) \quad (3.7)$$

Şeklinde tanımlanmaktadır. Bu ifadede γ boyutsuz bir nicelik olup idealite faktörü değerinden büyük olan ilk tamsayı değeridir. $\beta = 1/kT$ olup sıcaklığa bağlı bir katsayıdır. $F(V)$ - V grafiği çizildiğinde, engel yüksekliği değeri;

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (3.8)$$

ile verilir. Burada $F(V_0)$ değeri $F(V)$ fonksiyonunun minimum değeridir ve V_0 parametresi de bu değere karşılık gelen gerilim değeridir. Norde fonksiyonu kullanılarak, metal/yarıiletken diyot için seri direncin değeri,

$$R_s = \frac{kT (\gamma - n)}{eI_{min}} \quad (3.9)$$

şeklinde verilen ifade yardımıyla hesaplanabilir.

3.3.4. Cheung fonksiyonu

Cheung yaklaşımına göre seri direnç etkisi dahil edildiğinde (Cheung ve Cheung 1986), metal-yarıiletken kontaklardan geçen akım ifadesi;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_b}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right)\right) \quad (3.10)$$

şeklinde yazılır.

Bu eşitlikten faydalanarak V gerilimi;

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\phi_{Bn} + I.R_s \quad (3.11)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadenin $\ln I$ 'ya göre türevi alınarak,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + I.R_s \quad (3.12)$$

İfadesine dönüşür. Bu eşitlikten, $dV/d(\ln I)$ - I grafiğinin doğrusal olacağı anlaşılmaktadır. Bu doğrusal çizginin eğimini bularak seri direnç R_s değeri, düşey eksen kestiği noktadan ise idealite faktörü n hesaplanabilir.

Cheung metoduna göre, ϕ_b engel yüksekliğini hesaplamak için, (3.10) denklemi kullanılarak $H(I)$ fonksiyonu;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (3.13)$$

olarak tanımlanabilir. Bu aşamada engel yüksekliğini elde etmek için (3.11) ve (3.12) denklemleri kullanılarak

$$H(I) = n\phi_b + I \cdot R_s \quad (3.14)$$

ifadesi elde edilir.

$H(I)$ - I grafiği doğrusal şekilde olacaktır. Bu doğrunun eğimi, seri direnç değeri (R_s), doğrusal çizginin $H(I)$ eksenini kestiği noktadan ise ϕ_b değeri hesaplanacaktır.

3.3.5 Arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss})

MIS yapılarında metal ile yarıiletken arasındaki tabakada bulunan arayüzey seviyelerinin çok önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Arayüzey seviyelerinin enerjisi (E_{ss}) de çok önemli bir özelliğe sahip parametre olarak düşünülür. Metal/p-tipi yarıiletkenin arayüzey seviyelerinin enerjisi valans bandı (E_v) tepe değerine göre;

$$E_{ss} - E_v = q\Phi_b - qV \quad (3.15)$$

şeklinde yazılır. Arayüzey durumlarının yoğunluğu ise;

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{w} \right] \quad (3.16)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanabilir (Cowley ve Sze 1965, Card ve Rhoderick 1971). Bu ifadede ϵ_i arayüzey tabakasının dielektrik geçirgenliğini, δ arayüzey tabakasının

kalınlığını, $n(V) = \frac{V}{(kT/q) \ln(I/I_0)}$ gerilime bağlı idealite faktörünü göstermektedir.

3.4. Yarıiletken kontaklarda Kapasite - Voltaj (C-V) Karakteristikleri

Metal/Yarıiletken kontaklarda oluşan deplasyon bölgesindeki pozitif ve negatif yüklerden tabakalarından dolayı bir kondansatör yapısı sergilemektedir. Kontakta bir gerilim uygulandığında yük dağılımındaki değişimden dolayı kondansatörün sığası da değişecektir. Metal-Yarıiletken kontakların kapasite değeri, Poisson denklemi kullanılarak yapılan matematiksel işlemler sonucunda;

$$C = \left[\frac{e \epsilon_s \epsilon_0 N_a A^2}{2(V_d \pm V)} \right]^{1/2} \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilir (Rhoderick 1988, Ziel 1968, Wilmsen, 1985). Eşitlikteki ϵ_s yarıiletken maddenin dielektrik katsayısını, ϵ_0 ise boş uzay bölgesinin dielektrik katsayısını, N_a ; yarıiletken tarafındaki iyonize olan alıcı yük taşıyıcı yoğunluğunu, V uygulanan gerilimi, V_d built-in (difüzyon) gerilimini tanımlamaktadır. Bu ifade vasıtasıyla $1/C^2$ değeri;

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d \pm V)}{e \epsilon_s \epsilon_0 N_a A^2} \quad (3.18)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Bu eşitlik esas alınır $1/C^2 - V$ grafiği lineer olacaktır. Bu grafikteki doğrunun eğiminden N_a taşıyıcı konsantrasyonu;

$$N_a = \frac{2}{A^2 e \epsilon_s \epsilon_0} \frac{dV}{d(1/C^2)} \quad (3.19)$$

şeklinde yazılabilir. Çizilen grafiğin lineer kısmının yatak eksenini kestiği nokta vasıtasıyla V_d difüzyon potansiyeli bulunacaktır. Difüzyon potansiyeli değeri kullanılarak engel yüksekliği

$$\Phi_b(C - V) = \frac{V_d}{n} + E_f \quad (3.20)$$

olarak hesaplanabilir.

4. BULGULAR VE SONUÇLAR

4.1. I-V Karakteristiklerinin Analizi

Laboratuvarda fabrikasyonu yapılan Al/CR/p-Si MIS kontağın I-V karakteristikleri KEITHLEY 4200-SCS cihazı kullanılarak 300 K’de karanlık şartlar altında ölçüldü. I-V karakteristikleri, karanlık şartlarda (-2V)-(+2V) aralığında 0.05V’ luk adımlarla ölçüldü.

MIS yapının akım-gerilim karakteristikleri, bölüm 3.3.1’de ifade edilen eşitliklerin son ifadelerinden yararlanılarak elde edildi.

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (\text{akım ifadesi}) \quad (4.1)$$

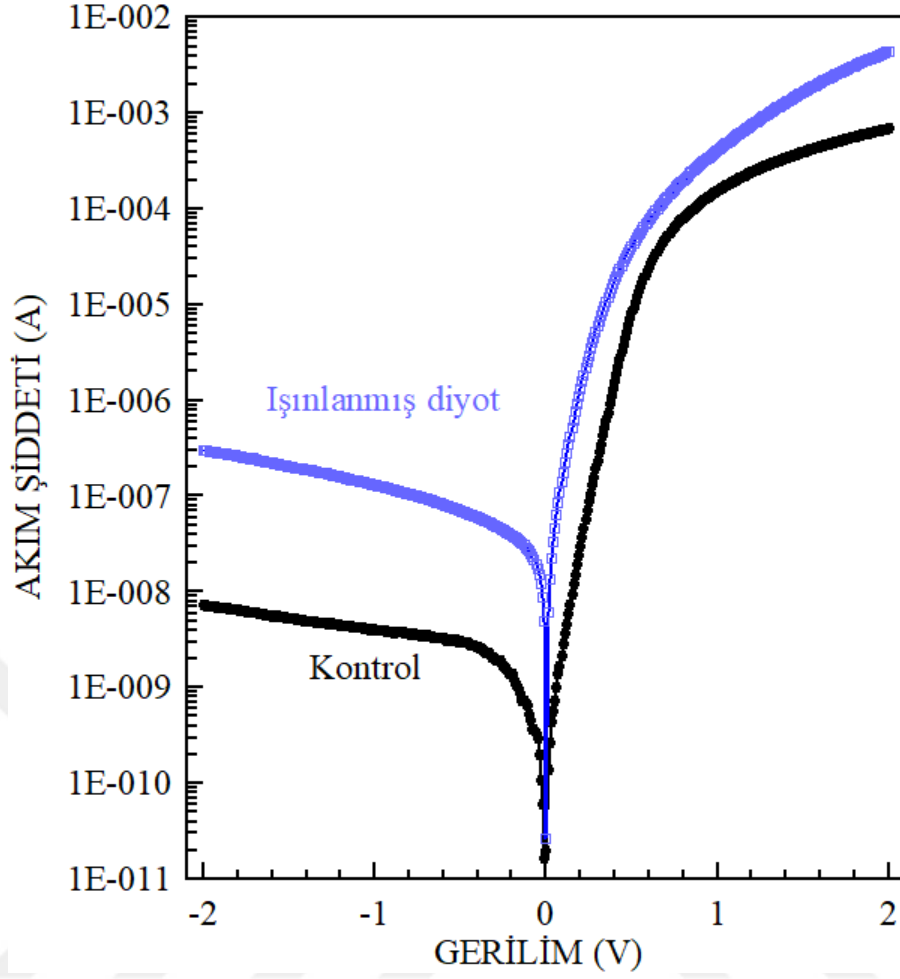
$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (\text{İdealite faktörü}) \quad (4.2)$$

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \quad (\text{ters beslem sızıntı akımı}) \quad (4.3)$$

$$\Phi_B = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right) \quad (\text{Engel Yüksekliği}) \quad (4.4)$$

Schottky diyot yapılarında $\ln I$ değerinin gerilime bağlı grafiğinde düz beslem gerilim bölümünde lineer bir değişim olmaktadır. Rapor edilen araştırmalarda gerilim parametresi yükseldikçe seri direnç ve arayüzey hallerinden dolayı lineer durumdan uzaklaştığı gözlenmektedir. Bu durumlarda idealite faktörünün 1’den daha büyük bir matematiksel değer aldığı görülmektedir. Bu değer 1’den büyük olması diyotların ideal şartlardan uzaklaştığını belirtmektedir (Güllü, 2010).

Seri direncin etkisi ile beraber arayüzey seviyeleri ve arada bulunan yalıtkan tabaka ideal şartlardan uzak olmanın önemli sebepleri arasındadır (Sze, 1981).



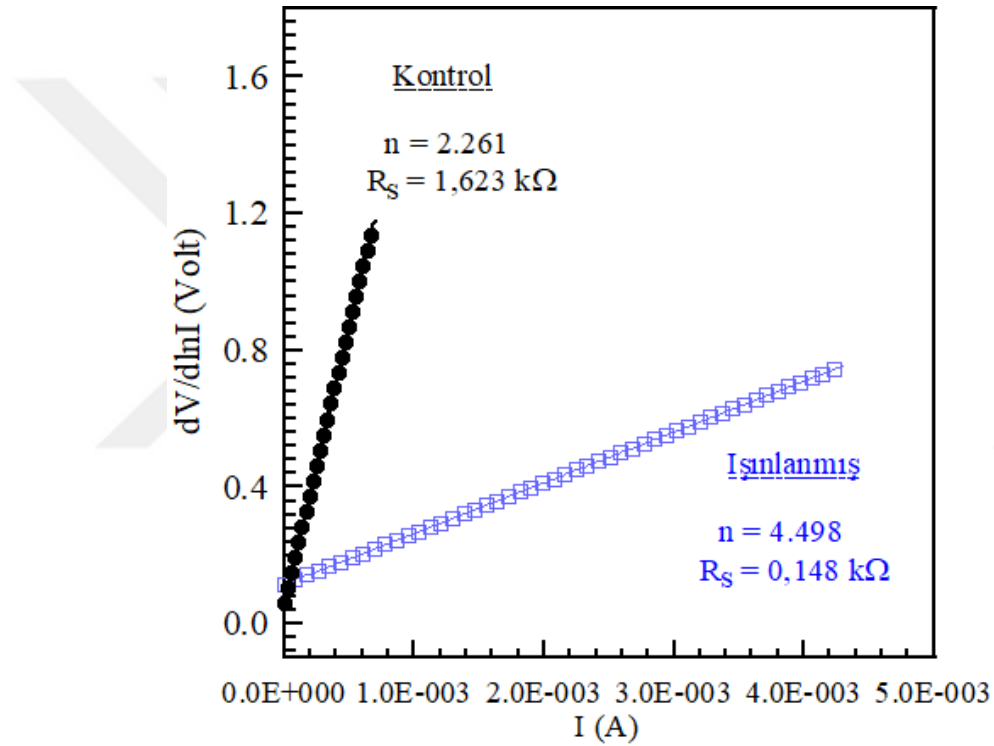
Şekil 4. 1 Al/CR/p-Si MIS yapının kontrol ve ışınlanmış durumlara ait $\ln I-V$ karakteristikleri

Şekil 4.1’ de Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $\ln I-V$ değişimleri görülmektedir. Kontrol Al/CR/p-Si diyot için bulunan n idealite faktörü $n=1.787$ ve engel yüksekliği $\phi_b=0.823$ eV olarak ölçüldü. Gama ışınlamasından sonra ise Al/CR/p-Si diyot için $n=1.99$ ve engel yüksekliği $\phi_b=0.712$ eV olarak hesaplandı. Bu değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Gama ışınlamasından sonra MIS yapıya ait I-V karakteristiklerinde hem düz beslem bölgesinde hem de ters beslem bölgesinde akım değerlerinde artmalar gözlenmiştir. Bu durum gama ışınlarının MIS yapının arayüzeyinde, yeni arayüzey yüklerine ait seviyeler ile elektron-boşluk çifti oluşturmaya bağlı olarak izah edilebilir. Gama ışınlamasından sonra idealite faktörünün artması ve engel yüksekliğindeki azalma MIS yapıdaki arayüzey tabakasındaki arayüzey durumlarının ve kusurlarının ve elektron-boşluk çiftlerinin oluşumuna atfedilir. Benzer değişimler ve yorumlar literatürde başka araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir.

Diyotların seri direnç parametresinin bulunması için geliştirilen yöntemlerden birisi, Cheung tarafından türetilen Cheung fonksiyonlarıdır. İki tane Cheung fonksiyonu vardır. Bu fonksiyonlardan birincisi olan $dV/d(\ln I)$ fonksiyonu ile diyotun idealite faktörü n ve seri direnç parametresi R_s ;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (4.5)$$

eşitliği vasıtasıyla hesaplandı.



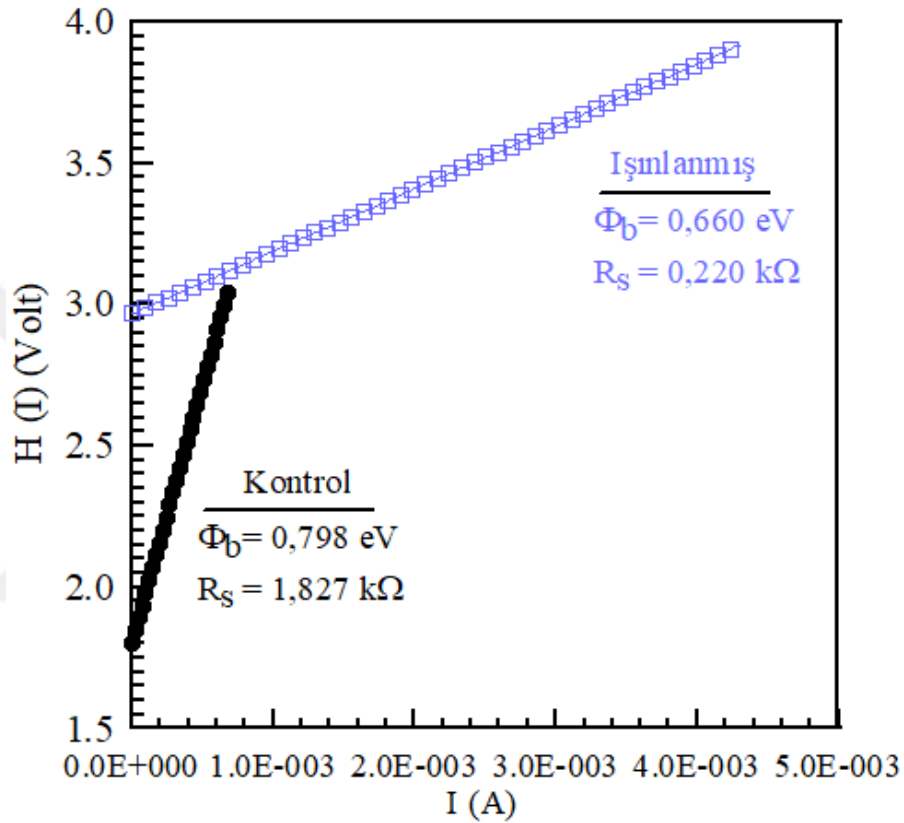
Şekil 4. 2 Al/CR/p-Si MIS yapının kontrol ve ışınlanmış durumlara ait $dV/d(\ln I)$ - I grafikleri.

Şekil 4.2' de Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $dV/d(\ln I)(V)$ - I değişimleri görülmektedir. Grafiklere ait lineer doğrunun eğiminden Al/CR/p-Si diyota ait seri direnç değerleri kontrol ve ışınlamadan sonra sırasıyla $R_s=1,623 \text{ k}\Omega$ ve $R_s=0,148 \text{ k}\Omega$ olarak hesaplandı. Cheung fonksiyonuna göre grafiklere ait lineer doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörü değerleri kontrol ve ışınlamadan sonra sırasıyla $n=2,261$ ve $n=4,498$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen parametreler Çizelge 4.1de verilmiştir.

Cheung yönteminde kullanılan ikinci fonksiyon olan $H(I)$ fonksiyonu;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (4.6)$$

ile verilir ve bu fonksiyon kullanılarak engel yüksekliği parametresi ϕ_B ve seri direnç R_s hesaplandı.



Şekil 4. 3 Al/CR/p-Si MIS yapının kontrol ve ışınlanmış durumlara ait $H(I)$ - I grafikleri.

Şekil 4.3' te Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $H(I)$ - I değişimleri görülmektedir. Şekil 4.3' te verilen $H(I)$ - I grafiklerinin lineer kısımlarının eğimlerinden, Al/CR/p-Si MIS diyotunun seri direnç değerleri kontrol ve ışınlamadan sonra sırasıyla $R_s=1,827$ k Ω ve $R_s=0,220$ k Ω ve grafiklerin lineer doğrusunun düşey $H(I)$ eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği değerleri kontrol ve ışınlamadan sonra sırasıyla $\phi_b=0,798$ eV ve $\phi_b=0,660$ eV olarak hesaplanmıştır. Elde edilen parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

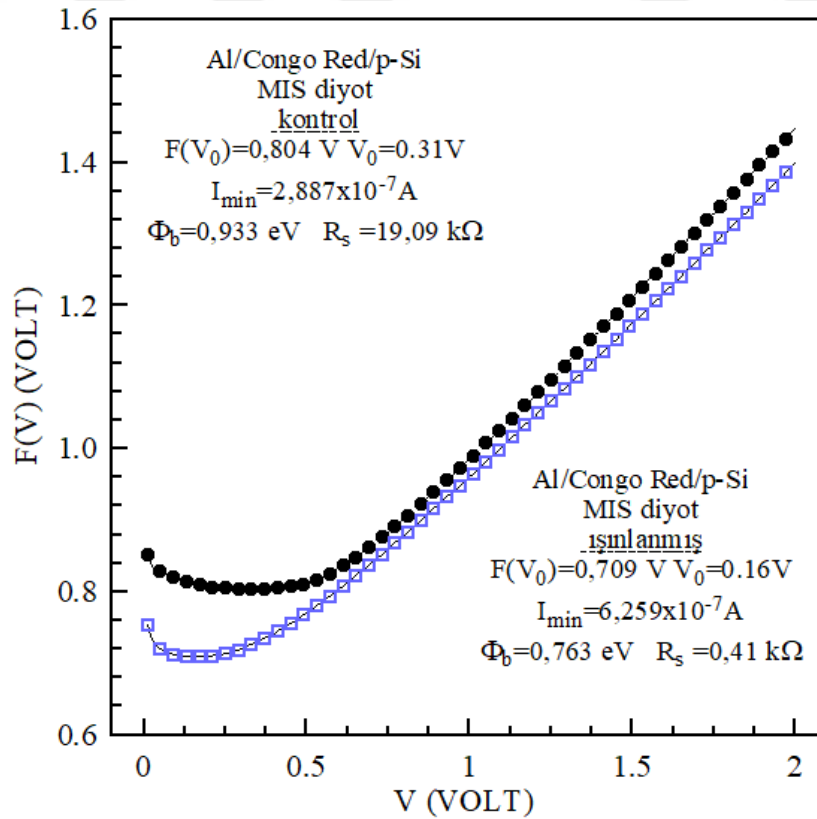
Al/CR/p-Si MIS yapısının kontrol ve ışınlamadan sonra durumlar için çizilen $H(I)-(I)$ grafiklerinin eğiminden hesaplanan seri direnç değerlerinin, $dV/d(\ln I)(V) - I$ grafiklerinden bulunan seri direnç değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Gama ışınlamasından sonra diyotların seri direnç değerinin önemli oranda azaldığı görülmektedir. Bu azalma gama ışınlarının Silisyum kristaliyle etkileşerek elektron-boşluk çiftlerinin oluşumuyla ve/veya kristaldeki iyonize olmuş katkı atomlarının artmasıyla açıklanabilir (Harris ve Frasca 2006). Bu durum C-V ölçümlerinden hesaplanan N_a değerlerinin ışınlamadan sonra artması da desteklemektedir.

Diyota ait temel bazı büyüklüklerin hesap edilmesinde kullanılan başka bir teknik ise Norde yöntemi. Bu yöntem kullanılarak seri direnç ve engel yüksekliği faktörü değerleri bulunabilir. Bu parametreler bölüm 3.3.3’ de ifade edilen ve aşağıda verilen,

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{e} \quad (\text{Engel Yüksekliği}) \quad (4.7)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma - \eta)}{eI_{min}} \quad (\text{Seri Direnç}) \quad (4.8)$$

ifadeleriyle gerekli işlemler gerçekleştirildi.

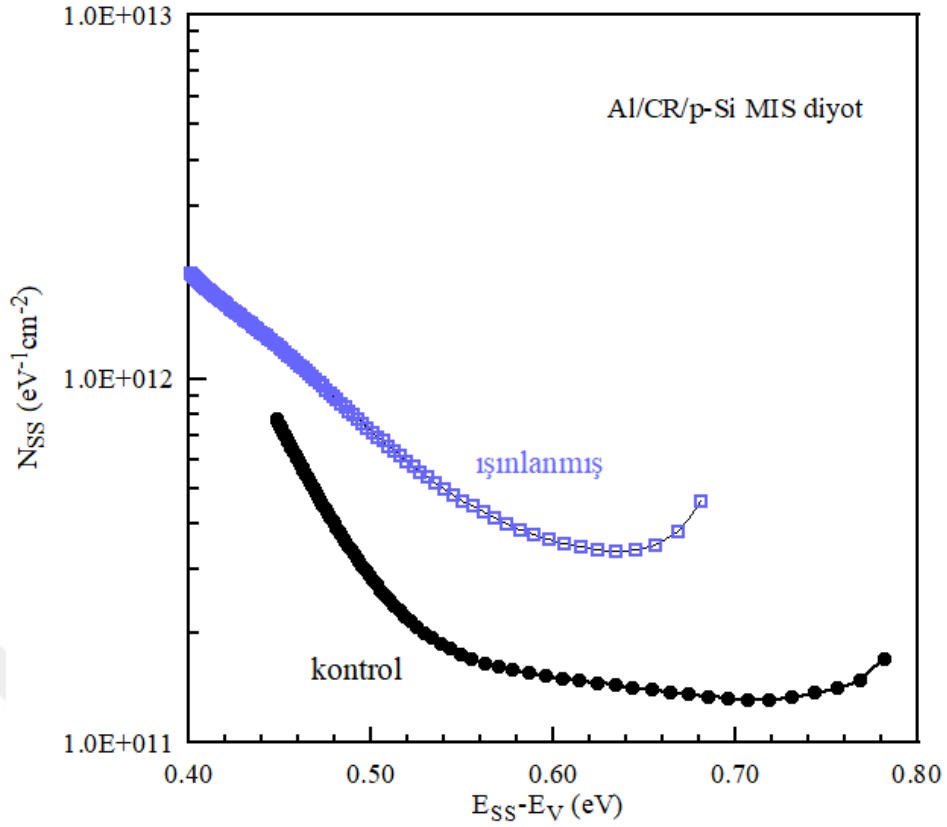


Şekil 4. 4 Al/CR/p-Si MIS yapının kontrol ve ışınlanmış durumlara ait $F(V)$ - V grafiği

Şekil 4.4'te Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $F(V)$ - V değişimleri görülmektedir. Norde fonksiyonlarından elde edilen $F(V)$ - V grafiğinden yapılan ölçümlerde elde edilen engel yükseklik değerleri kontrol ve ışınlamadan sonra sırasıyla $\phi_b = 0,933$ eV ve $\phi_b = 0,763$ eV olarak, seri direnç değerleri de sırasıyla $R_s = 19,09$ k Ω ve $R_s = 0,413$ k Ω olarak ölçüldü. Elde edilen parametreler Çizelge 4.1de verilmiştir. Bu teknikte bulunan ışınlamadan sonraki engel yüksekliğindeki ve seri dirençteki azalma önceki yöntemlerde rapor edilen şekilde benzer değişim sergilemektedir.

lnI-V tekniği, Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonu kullanılarak elde edilen diyot parametreleri arasında farklılık olduğu görülmektedir. Bu farklılığın nedeni, her bir tekniğin diyotun akım-gerilim karakteristiğinin farklı farklı bölgelerinden hesaplanması esasına dayanmaktadır. Örneğin Cheung fonksiyonları seri direnç etkisinin görüldüğü üst gerilim bölgesinden, lnI-V tekniği grafiğin lineer olduğu bölgeden, Norde ise düşük gerilim kısmından lineer bölüme doğru geçiş bölgesinden hesaplanmaktadır.

Al/CR/p-Si MIS yapısındaki arayüzey durum yoğunluğu ile ilgili teori, Rhoderick ve Card (1971) tarafından ifade edilmiştir ve bölüm 3.3.4 te bahsedilmiştir. Şekil 4.5'de Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $N_{ss}-(E_{ss}-E_v)$ değişimleri görülmektedir. Gama ışınlamasından sonra MIS yapıda arayüzey seviyelerinin konsantrasyonunun arttığı görülmektedir. N_{ss} 'de ortaya çıkan bu artma gama radyasyonunun MIS yapının arayüzey tabakasında kusurlardaki artmaya atfedilir. Elde edilen N_{ss} değerleri MIS yapılar için uyumlu olarak yaklaşık 10^{12} eV⁻¹cm⁻² mertebesinde elde edilmiştir.



Şekil 4. 5 Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $N_{ss}-(E_{gs}-E_v)$ grafikleri

Çizelge 4. 3 Al/CR/p-Si MIS yapısına ait kontrol ve ışınlamadan sonraki durumlar için $\ln I-V$ grafiği, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilen diyet parametreleri

	Cheung Fonksiyonu				lnI-V Grafiği		Norde Fonksiyonu	
	dV/d(lnI)-I Grafiği		H(I)-I Grafiği				F(V)-V Grafiği	
	R _s (kΩ)	n	R _s (kΩ)	ϕ _B (eV)	n	ϕ _B (eV)	R _s (kΩ)	ϕ _B (eV)
Kontrol	1,623	2,261	1,827	0,798	1,787	0,823	19,09	0,933
Işınlanmış	0,148	4,498	0,220	0,660	1,990	0,712	0,413	0,763

4.2. C-V karakteristiklerinin analizi

MIS diyotlar için C-V ölçümleri sabit yük taşıyıcı konsantrasyonu ve engel yüksekliği hakkında çok değerli bilgiler sağlamaktadır. Bir gerilim uygulanan MIS diyot içindeki yük değişimi eşdeğer devre modelinde de yer verilen bir kapasite oluşumuna neden olur. Ters beslem gerilimi durumundaki diyotlarda eklem kapasitesi baskındır fakat düz beslem altındaki diyotlarda ise difüzyon kapasitesi baskındır (Chen ve Shih 2006).

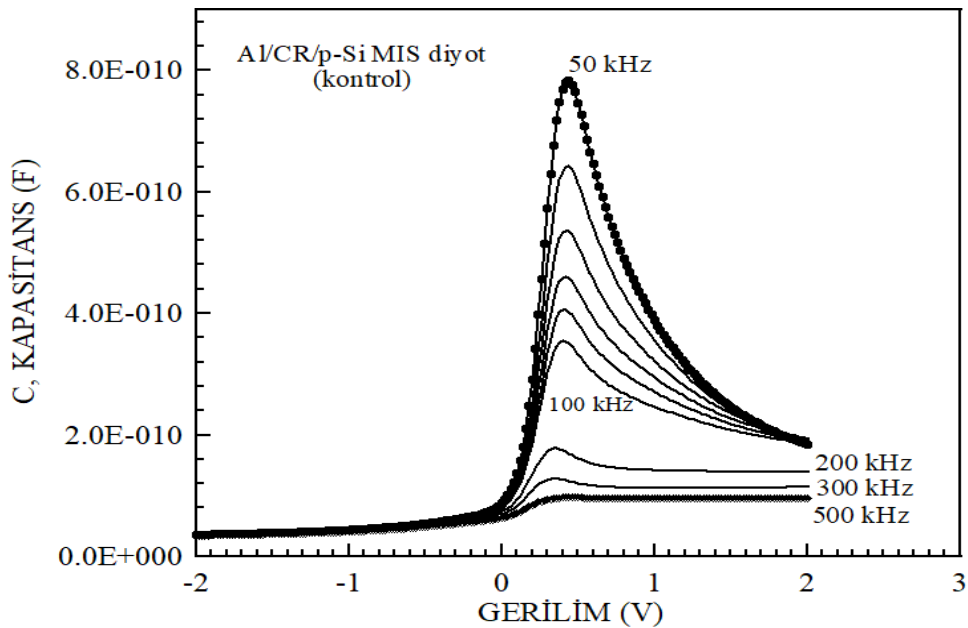
Al/CR/p-Si MIS yapının kontrol ve ışınlamadan sonraki C-V karakteristiklerinden faydalanarak elde edilen bazı diyot parametrelerine ait eşitlikler aşağıda verilmektedir. Hesaplamalar, bölüm 3.4 başlığında verilen ifadelerden ve C-V grafiklerinden yararlanılarak gerçekleştirildi.

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 q A^2 N_a} \quad (\text{Diyot kapasitesi}) \quad (4.9)$$

$$\Phi_b(C - V) = V_d/n + E_f \quad (\text{Engel yüksekliği}) \quad (4.10)$$

$$N_a = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 q A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (\text{Taşıyıcı konsantrasyonu}) \quad (4.11)$$

MIS yapılarda C-V ölçümleri ile hesap edilen parametreler, bu devre elemanlarının yarı iletken sahasındaki kullanılma şekli ve araştırmaların daha ileri aşamalara gidebilmesi amacıyla önemli veriler içerir.

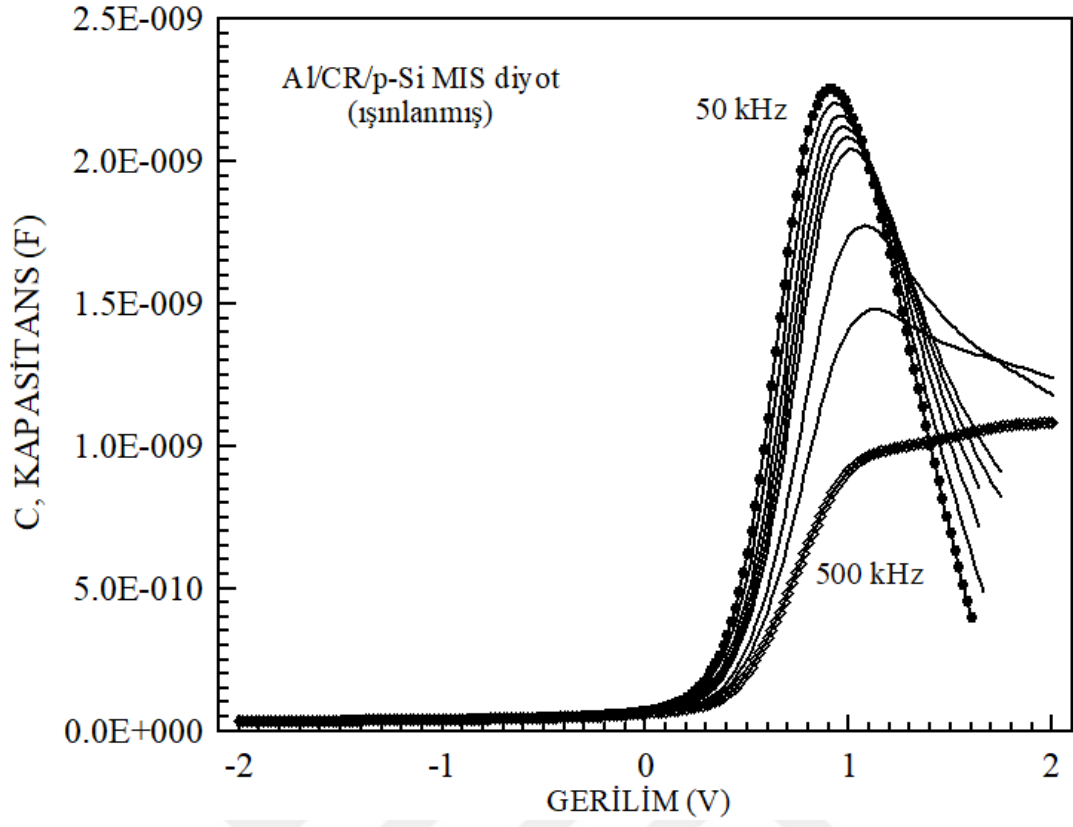


Şekil 4. 6 Gama ışınlamasından önce Al/CR/p-Si MIS yapısının (kontrol) C-V grafikleri

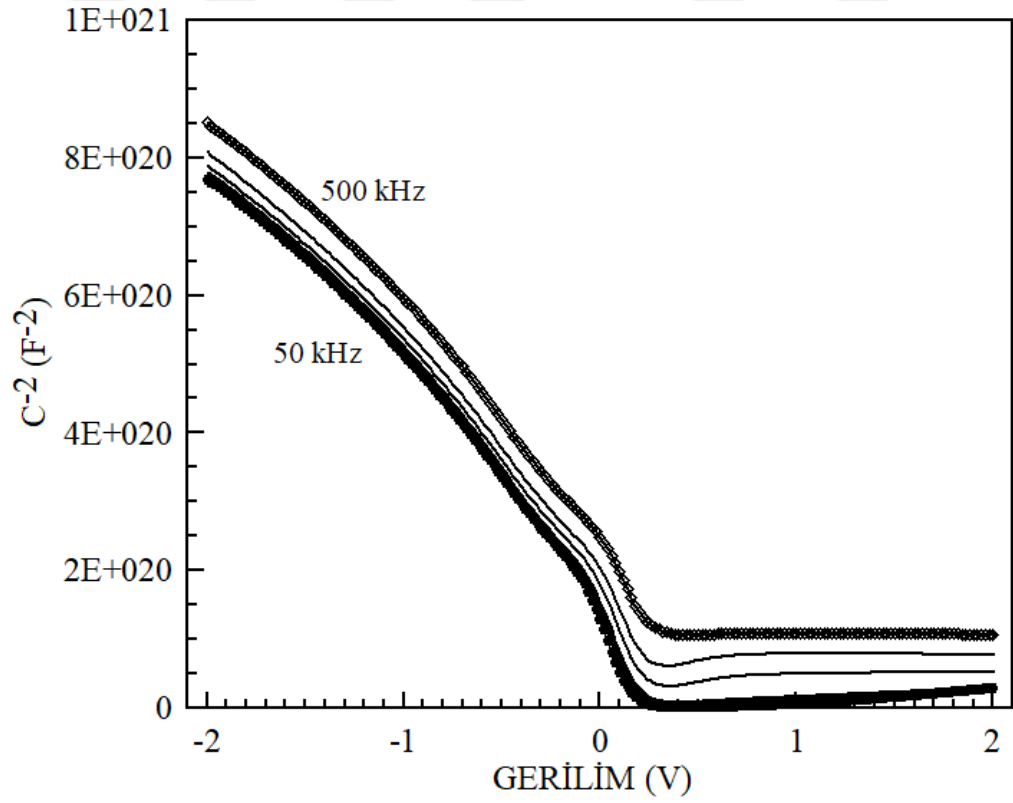
Çizelge 4. 4 Kontrol ve ısıtılmış Al/CR/p-Si MIS yapıya ait C^{-2} -V grafiklerinden hesaplanan bazı diyot parametreleri

Frekans (kHz)	KONTROL			İŞINLANMIŞ		
	V_d (V)	$N_a (\times 10^{14} \text{ cm}^{-3})$	Φ_b (eV)	V_d (V)	$N_a (\times 10^{14} \text{ cm}^{-3})$	Φ_b (eV)
50	0,670	6,430	0,921	1,148	6,920	0,825
60	0,784	6,725	1,034	1,182	6,970	0,842
70	0,797	6,761	1,047	1,194	6,958	0,849
80	0,805	6,759	1,055	1,217	6,993	0,860
90	0,814	6,765	1,064	1,233	7,013	0,868
100	0,826	6,777	1,076	1,239	7,002	0,871
200	0,869	6,813	1,118	1,277	7,089	0,890
300	0,928	6,797	1,177	1,291	7,097	0,897
500	1,107	6,875	1,357	1,343	7,175	0,923

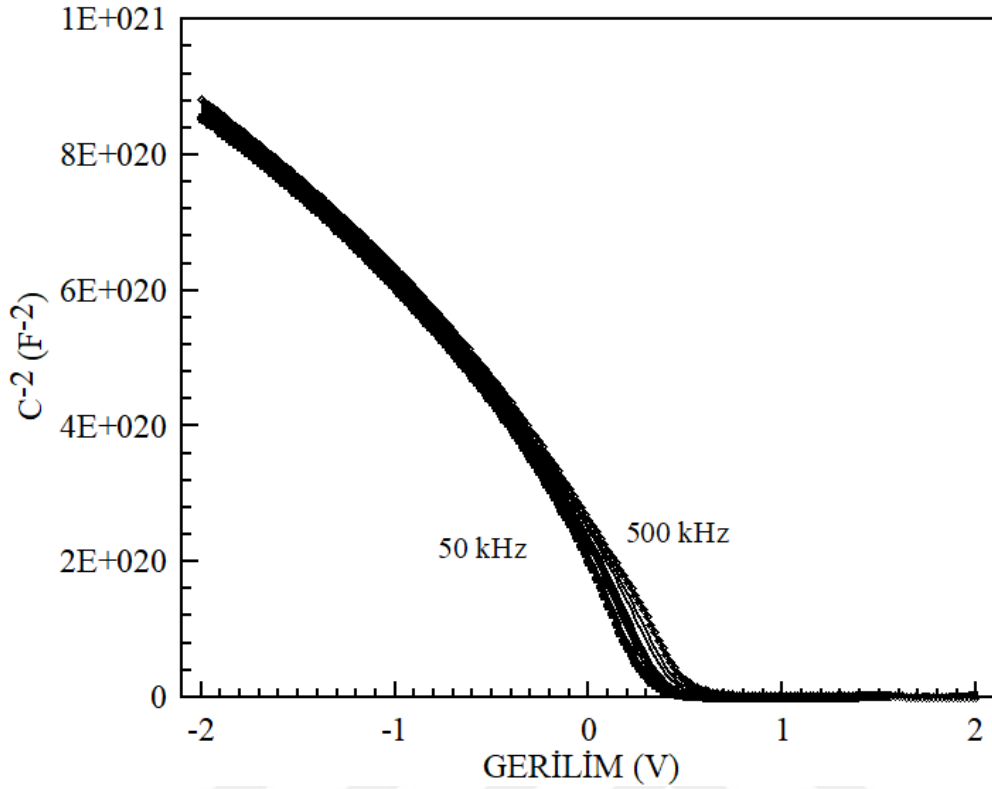
Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de Al/CR/p-Si MIS diyotların sırasıyla kontrol ve ısıtılmış durumda 50-500 kHz frekans aralığındaki ölçümlerden elde edilen C-V grafikleri görülmektedir. Grafiklerde pozitif gerilim bölgesinde frekansın düşmesiyle kapasitans değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Yine bu şekiller incelendiğinde gama ısınlamasından sonra Al/CR/p-Si MIS diyotların sığa değerlerinin arttığı açıkça görülmektedir. Örneğin ısınlama yapmadan önce 50 kHz için alınan C-V ölçümündeki maksimum kapasite değerinin yaklaşık 8×10^{-10} F civarında iken ısınlamadan sonra aynı frekansta alınan C-V ölçümündeki maksimum kapasite değerinin 2.25×10^{-9} F değerine yükseldiği görülmektedir. Gama ısınlamasından sonra sığa değerinin artması, Al/CR/p-Si MIS diyotlarda radyasyon nedeniyle katkı atomlarının iyonize olmasına bağlı olarak artmasına atfedilir (Çınar ve ark. 2014).



Şekil 4. 7 Al/CR/p-Si MIS yapısının (ışınlanmış) C-V grafikleri



Şekil 4. 8 Al/CR/p-Si MIS yapısının (kontrol) C^{-2} -V grafikleri.



Şekil 4. 9 Al/CR/p-Si MIS yapısının (ışınlanmış) C^2 -V grafikleri.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’ da Al/CR/p-Si MIS diyotların sırasıyla kontrol ve ışınlanmış durumda 50-500 kHz frekans aralığındaki ölçümlerden elde edilen C^2 -V grafikleri görülmektedir. Al/CR/p-Si MIS diyotların sırasıyla kontrol ve ışınlanmış durumda C^2 -V grafiklerinin lineer olan kısmının yatay eksenini kestiği noktadan difüzyon potansiyeli V_d değerleri ve bu değerler (4.10) denkleminde kullanılarak Schottky engel yüksekliği değerleri hesaplandı. Bu değerler Çizelge 4.2 de verilmiştir. Işınlamadan önce Al/CR/p-Si MIS diyotları (kontrol) için V_d değerlerinin artan frekansla 50 kHz değerinde 0,670 V değerinden başlayarak 500 kHz değerinde 1.107 V değerine arttığı, ışınlamadan sonraki diyot için V_d değerlerinin artan frekansla 50 kHz değerinde 1,148 V değerinden başlayarak 500 kHz değerinde 1.343 V değerine arttığı görülmektedir. Işınlamadan önce Al/CR/p-Si MIS diyotları (kontrol) için Φ_b değerlerinin artan frekansla 50 kHz değerinde 0,921 eV değerinden başlayarak 500 kHz değerinde 1.357 eV değerine arttığı, ışınlamadan sonraki diyot için Φ_b değerlerinin artan frekansla 50 kHz değerinde 0,825 eV değerinden başlayarak 500 kHz değerinde 0.923 eV değerine arttığı görülmektedir. Al/CR/p-Si MIS diyotların sırasıyla kontrol ve ışınlanmış durumda C^2 -V grafiklerinin lineer olan kısmının eğiminden (4.11) ifadesine göre akseptör taşıyıcı konsantrasyonu N_a

değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 4.2 de verilmiştir. Işınlamadan önce Al/CR/p-Si MIS diyotları (kontrol) için N_a değerlerinin artan frekansla 50 kHz değerinde $6,430 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerinden başlayarak 500 kHz değerinde $6,875 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerine arttığı, ışınlamadan sonraki diyot için N_a değerlerinin artan frekansla 50 kHz için $6,920 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerinden başlayarak 500 kHz için $7,175 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerine arttığı görülmektedir. Engel yüksekliği, akseptör yük taşıyıcı konsantrasyonu ve difüzyon potansiyelindeki değişimler, Al/CR/p-Si MIS yapıda gama ışınlarının arayüzeyle ve kristalle etkileşmesine bağlı olarak katkı atomlarının iyonize olmasıyla izah edilebilir. C-V ölçümleri arayüzey değerlerine bağlı olarak hassaslık göstermektedir. Kullanılan arayüzeyin fiziksel durumu da gama ışınlamasının etkisine bağlı olarak diyot parametrelerini oldukça etkilediği sonucuna varılabilir (Çınar ve ark. 2014).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında Cobalt-60 kaynağından yayınlanan gama ışınlarının Al/CR/p-Si MIS diyotunun elektriksel karakteristikleri ve arayüzey özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. Al/CR/p-Si MIS diyotunun akım-gerilim (I-V) ve kapasite voltaj (C-V) ölçümleri KEITHLEY 4200-SCS ölçüm sistemi yardımıyla alındı. Bu karakteristikler kullanılarak ışınlamadan önce (kontrol) ve ışınlamadan sonra engel yüksekliği, idealite faktörü, seri direnç, arayüzey durum yoğunluğu, difüzyon potansiyeli ve akseptör taşıyıcı konsantrasyonu parametreleri değişik tekniklerle hesaplanmıştır ve Çizelge 4.1 ile Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $\ln I$ -V değişimleri görülmektedir (Şekil 4.1). Kontrol Al/CR/p-Si diyot için bulunan n idealite faktörü $n=1.787$ ve engel yüksekliği $\phi_b=0.823$ eV olarak ölçüldü. Gama ışınlamasından sonra ise Al/CR/p-Si diyot için $n=1.99$ ve engel yüksekliği $\phi_b=0.712$ eV olarak hesaplandı. Gama ışınlamasından sonra MIS yapıya ait I-V karakteristiklerinde hem düz beslem bölgesinde hem de ters beslem bölgesinde akım değerlerinde artmalar gözlenmiştir. Bu durum gama ışınlarının MIS yapının arayüzeyinde yeni arayüzey yüklerine ait seviyeleri ve elektron-boşluk çifti oluşturmaya bağlı olarak izah edilebilir. Gama ışınlamasından sonra idealite faktörünün artması, engel yüksekliğindeki azalma MIS yapıdaki arayüzey tabakasındaki arayüzey durumlarının ve kusurlarının ve elektron-boşluk çiftlerinin oluşumuna atfedilir. Benzer değişimler ve yorumlar literatürde başka araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir. Bu değerler literatüre uygundur.

Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $dV/d(\ln I)(V) - I$ değişimleri görülmektedir (Şekil 4.2). Grafiklere ait lineer doğruların eğimlerinden Al/CR/p-Si diyota ait seri direnç değerleri kontrol ve ışınlamadan sonra sırasıyla $R_s=1,623 \text{ k}\Omega$ ve $R_s=0,148 \text{ k}\Omega$ olarak hesaplandı. Cheung fonksiyonuna göre grafiklere ait lineer doğruların düşey eksen kestiği noktadan idealite faktörü değerleri kontrol ve ışınlamadan sonra sırasıyla $n=2,261$ ve $n=4,498$ olarak hesaplanmıştır.

Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $H(I)-(I)$ değişimleri görülmektedir (Şekil 4.3). Şekil 4.3’te verilen $H(I)-(I)$ grafiklerinin lineer kısımlarının eğimlerinden, Al/CR/p-Si MIS

diyotunun seri direnç değerleri kontrol ve ışınlamadan sonra sırasıyla $R_s=1,827 \text{ k}\Omega$ ve $R_s=0,220 \text{ k}\Omega$ ve grafiklerin lineer doğrusunun düşey $H(I)$ eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği değerleri kontrol ve ışınlamadan sonra sırasıyla $\phi_b=0,798 \text{ eV}$ ve $\phi_b=0,660 \text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır.

Al/CR/p-Si MIS yapısının kontrol ve ışınlamadan sonra durumlar için çizilen $H(I)-(I)$ grafiklerinin eğiminden hesaplanan seri direnç değerlerinin, $dV/d(\ln I)(V) - I$ grafiklerinden bulunan seri direnç değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Gama ışınlamasından sonra diyotların seri direnç değerinin önemli oranda azaldığı görülmektedir. Bu azalma gama ışınlarının Silisyum kristaliyle etkileşerek elektron-boşluk çiftlerinin oluşumuyla ve/veya kristaldeki iyonize olmuş katkı atomlarının artmasıyla açıklanabilir (Harris ve Frasca 2006). Bu durumu C-V ölçümlerinden hesaplanan N_a değerlerinin ışınlamadan sonra artması da desteklemektedir.

Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $F(V)-V$ değişimleri görülmektedir (Şekil 4.4). Norde fonksiyonlarından elde edilen $F(V)-V$ grafiğinden yapılan ölçümlerde elde edilen engel yükseklik değerleri kontrol ve ışınlamadan sonra sırasıyla $\phi_b = 0,933 \text{ eV}$ ve $\phi_b = 0,763 \text{ eV}$ olarak, seri direnç değerleri de sırasıyla $R_s=19,09 \text{ k}\Omega$ ve $R_s=0,413 \text{ k}\Omega$ olarak ölçüldü. Elde edilen parametreler Çizelge 4.1de verilmiştir. Bu teknikte bulunan ışınlamadan sonraki engel yüksekliğindeki ve seri dirençteki azalma önceki yöntemlerde rapor edilen şekilde benzer değişim sergilemektedir.

$\ln I-V$ tekniği, Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonu kullanılarak elde edilen diyot parametreleri arasında farklılık olduğu görülmektedir. Bu farklılığın nedeni, her bir tekniğin diyotun akım-gerilim karakteristiğinin farklı farklı bölgelerinden hesaplanması esasına dayanmaktadır. Örneğin Cheung fonksiyonları seri direnç etkisinin görüldüğü üst gerilim bölgesinden, $\ln I-V$ tekniği grafiğin lineer olduğu bölgeden, Norde ise düşük gerilim kısmından lineer bölüme doğru geçiş bölgesinden hesaplanmaktadır.

Al/CR/p-Si MIS yapısındaki arayüzey durum yoğunluğu ile ilgili olarak, Al/CR/p-Si MIS yapısının gama ışınlamasına maruz bırakmadan önceki (kontrol) ve gama ışınlamasından sonraki $N_{ss}-(E_{ss}-E_V)$ değişimleri görülmektedir (Şekil 4.5). Gama ışınlamasından sonra MIS yapıda arayüzey seviyelerinin konsantrasyonunun arttığı görülmektedir. N_{ss} 'de ortaya çıkan bu artma gama radyasyonunun MIS yapının arayüzey tabakasında kusurlardaki artmaya atfedilir. Elde edilen N_{ss} değerleri MIS yapılar için uyumlu olarak yaklaşık $10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ mertebesinde olduğu elde edilmiştir.

Al/CR/p-Si MIS diyotların sırasıyla kontrol ve ışınlanmış durumda 50-500 kHz frekans aralığındaki ölçümlerden elde edilen C-V grafikleri görülmektedir (Şekil 4.6 ve 4.7). Grafiklerde pozitif gerilim bölgesinde frekansın düşmesiyle kapasitans değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Yine bu şekiller incelendiğinde gama ışınlamasından sonra Al/CR/p-Si MIS diyotların sığa değerlerinin arttığı açıkça görülmektedir. Örneğin ışınlama yapmadan önce 50 kHz için alınan C-V ölçümündeki maksimum kapasite değerinin yaklaşık 8×10^{-10} F civarında iken ışınlamadan sonra aynı frekansta alınan C-V ölçümündeki maksimum kapasite değerinin 2.25×10^{-9} F değerine yükseldiği görülmektedir. Gama ışınlamasından sonra sığa değerinin artması, Al/CR/p-Si MIS diyotlarda radyasyon nedeniyle katkı atomlarının iyonize olmasına bağlı olarak artmasına atfedilir (Çınar ve ark. 2014).

Al/CR/p-Si MIS diyotların sırasıyla kontrol ve ışınlanmış durumda 50-500 kHz frekans aralığındaki ölçümlerden elde edilen C^{-2} -V grafikleri görülmektedir (Şekil 4.8 ve 4.9). Al/CR/p-Si MIS diyotların sırasıyla kontrol ve ışınlanmış durumda C^{-2} -V grafiklerinin lineer olan kısmının yatay eksenini kestiği noktadan difüzyon potansiyeli V_d değerleri ve bu değerler (4.10) denkleminde kullanılarak Schottky engel yüksekliği değerleri hesaplandı. Işınlamadan önce Al/CR/p-Si MIS diyotları (kontrol) için V_d değerlerinin artan frekansla 50 kHz değerinde 0,670 V değerinden başlayarak 500 kHz değerinde 1.107 V değerine arttığı, ışınlamadan sonraki diyot için V_d değerlerinin artan frekansla 50 kHz değerinde 1,148 V değerinden başlayarak 500 kHz değerinde 1.343 V değerine arttığı görülmektedir. Işınlamadan önce Al/CR/p-Si MIS diyotları (kontrol) için Φ_b değerlerinin artan frekansla 50 kHz değerinde 0,921 eV değerinden başlayarak 500 kHz değerinde 1.357 eV değerine arttığı, ışınlamadan sonraki diyot için Φ_b değerlerinin artan frekansla 50 kHz değerinde 0,825 eV değerinden başlayarak 500 kHz değerinde 0.923 eV değerine arttığı görülmektedir. Al/CR/p-Si MIS diyotların sırasıyla kontrol ve ışınlanmış durumda C^{-2} -V grafiklerinin lineer olan kısmının eğiminden (4.11) ifadesine göre akseptör taşıyıcı konsantrasyonu N_a değerleri hesaplanmıştır. Işınlamadan önce Al/CR/p-Si MIS diyotları (kontrol) için N_a değerlerinin artan frekansla 50 kHz değerinde $6,430 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerinden başlayarak 500 kHz değerinde $6,875 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerine arttığı, ışınlamadan sonraki diyot için N_a değerlerinin artan frekansla 50 kHz için $6,920 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerinden başlayarak 500 kHz için $7,175 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değerine arttığı görülmektedir. Engel yüksekliği, akseptör yük taşıyıcı konsantrasyonu ve difüzyon potansiyelindeki değişimler, Al/CR/p-Si MIS yapıda gama ışınlarının arayüzeyle ve kristalle etkileşmesine bağlı olarak katkı atomlarının iyonize olmasıyla izah edilebilir. C-

V ölçümleri arayüzey değerlerine bağlı olarak hassaslık göstermektedir. Kullanılan arayüzeyin fiziksel durumu da gama ışınlamasının etkisine bağlı olarak diyot parametrelerini oldukça etkilediği sonucuna varılabilir (Çınar ve ark. 2014).

Sonuç olarak;

Gama ışınlamasından sonra Al/CR/p-Si MIS yapıya ait I-V karakteristiklerinde hem düz beslem bölgesinde hem de ters beslem bölgesinde akım değerlerinde artmalar gözlenmiştir. Bu durum gama ışınlarının MIS yapının arayüzeyinde yeni arayüzey yüklerine ait seviyeleri ve elektron-boşluk çifti oluşturmaya bağlı olarak izah edilmiştir. Gama ışınlamasından sonra idealite faktörünün artması, engel yüksekliğindeki azalma MIS yapıdaki arayüzey tabakasındaki arayüzey durumlarının ve kusurlarının ve elektron-boşluk çiftlerinin oluşumuna atfedilmiştir. Benzer değişimler ve yorumlar literatürde başka araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir.

Al/CR/p-Si MIS yapısının kontrol ve ışınlamadan sonra durumlar için çizilen $H(I)-(I)$ grafiklerinin eğiminden hesaplanan seri direnç değerlerinin, $dV/d(\ln I)(V) - I$ grafiklerinden bulunan seri direnç değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Gama ışınlamasından sonra diyotların seri direnç değerinin önemli oranda azaldığı görülmektedir. Bu azalma gama ışınlarının Silisyum kristaliyle etkileşerek elektron-boşluk çiftlerinin oluşumuyla ve/veya kristaldeki iyonize olmuş katkı atomlarının artmasıyla açıklanmıştır (Harris ve Frasca 2006). Bu durum C-V ölçümlerinden hesaplanan N_a değerlerinin ışınlamadan sonra artması da desteklemektedir.

lnI-V tekniği, Cheung fonksiyonları ve Norde fonksiyonu kullanılarak elde edilen diyot parametreleri arasında farklılık olduğu görülmüştür. Bu farklılığın nedeni, her bir tekniğin diyotun akım-gerilim karakteristiğinin farklı farklı bölgelerinden hesaplanması esasına dayanmasına atfedilmiştir.

Al/CR/p-Si MIS yapısındaki arayüzey durum yoğunluğu ile ilgili olarak, gama ışınlamasından sonra MIS yapıda arayüzey seviyelerinin konsantrasyonunun arttığı görülmektedir. N_{ss} 'de ortaya çıkan bu artma gama radyasyonunun MIS yapının arayüzey tabakasında kusurlardaki artmaya atfedilmiştir. Elde edilen N_{ss} değerleri MIS yapılar için uyumlu olarak yaklaşık $10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ mertebesinde olduğu elde edilmiştir.

Al/CR/p-Si MIS diyotların sırasıyla kontrol ve ışınlanmış durumda 50-500 kHz frekans aralığındaki ölçümlerden elde edilen C-V grafiklerinde pozitif gerilim bölgesinde frekansın düşmesiyle kapasitans değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Yine bu şekiller incelendiğinde gama ışınlamasından sonra Al/CR/p-Si MIS diyotların sığa değerlerinin arttığı açıkça görülmektedir. Örneğin ışınlama yapmadan önce 50 kHz için alınan C-V

ölçümündeki maksimum kapasite değerinin yaklaşık 8×10^{-10} F civarında iken ışınlamadan sonra aynı frekansta alınan C-V ölçümündeki maksimum kapasite değerinin 2.25×10^{-9} F değerine yükseldiği görülmektedir. Gama ışınlamasından sonra sığa değerinin artması, Al/CR/p-Si MIS diyotlarda radyasyon nedeniyle katkı atomlarının iyonize olmasına bağlı olarak artmasına atfedilir (Çınar ve ark. 2014).

Al/CR/p-Si MIS diyotların sırasıyla kontrol ve ışınlanmış durumda 50-500 kHz frekans aralığındaki ölçümlerden elde edilen C^{-2} -V grafiklerinden engel yüksekliği, akseptör yük taşıyıcı konsantrasyonu ve difüzyon potansiyeli değerleri bulunmuştur. Çizelge 4.2 de verilen parametrelerdeki değişimler, Al/CR/p-Si MIS yapıda gama ışınlarının arayüzeyle ve kristalle etkileşmesine bağlı olarak katkı atomlarının iyonize olmasıyla izah edilebilir. C-V ölçümleri arayüzey değerlerine bağlı olarak hassaslık göstermektedir. Kullanılan arayüzeyin fiziksel durumu da gama ışınlamasının etkisine bağlı olarak diyot parametrelerini oldukça etkilediği sonucuna varılabilir (Çınar ve ark. 2014).

Al/CR/p-Si MIS yapısı üzerinde gama ışınlamasının etkisinin önemli olduğu görülmüştür ve organik arayüzey tabakalı MIS yapıların radyasyon ortamlarındaki bilimsel ve akademik çalışmalarda kullanılabileceği görülmüştür.

5.2. Öneriler

Bu araştırma ile ortaya çıkan verilere dayanarak, günümüzde süren ve planlanacak yeni araştırmalar için aşağıda sunulan önerilerin olması yerinde görülmüştür.

- Mevcut çalışmada Al/CR/p-Si MIS yapısının I-V ve C-V ölçümleri oda sıcaklığında alındı. Bu araştırma sıcaklığa bağlı olarak alınırsa MIS yapının parametrelerine sıcaklığın etkisi de incelenebilir.
- Mevcut çalışmada Cobalt-60 kaynağı kullanılarak tek bir doz uygulanarak gama ışınlamasının etkileri incelenmiştir. Oysa farklı doz da gama ışınlaması uygulanırsa daha kapsamlı ve detaylı araştırmalar yapılabilir.
- Mevcut çalışmada Cobalt-60 kaynağı kullanılarak gama ışınlamasının etkileri incelenmiştir. Farklı kaynaklar ve radyasyon türü uygulanırsa o tür radyasyonların etkileri de ortaya çıkarılabilir.

KAYNAKLAR

- Adams L.ve Holmes-Siedle A. 2004 “ Handbook of Radiation Effects“. Oxford University Press.
- Akkerman, A., Barak, J., Chadwick, M. B., Levinson, J., Murat, M. & Lifshitz, Y. 2001. *Radiat. Phys. Chem.* 62, 301–310.
- Ashok S., Borrego J.M., Guttman R.J., 1978, “Radiation Effects in GaAs MIS Schotky Diodes” IEEE Transactions on Nuclear Science, 25 (6) 1473-1478.
- Ausman, G. A. & McLean, F. B. 1975. “Electron–hole pair creation energy in SiO₂”. *Appl. Phys. Lett.* 26, 173– 175.
- Aydoğan Ş., 2004, “Sn/PPy/n-Si/Au-Sb yapının bazı karakteristik parametrelerinin sıcaklığa bağlı akım-voltaj, kapasite-voltaj ve kapasite-frekans ölçümlerinden tayin edilmesi”, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Barbottin, G., and Vapaille, A., 1999, “Instabilities In Silicon Devices New Insulators, Devices and Radiation Effects”, volume 3 north, Holland, Elsevier,Amsterdam.
- Belousov A., 2014, “Radiation Effects on Semiconductor Devices in High Energy Heavy Ion Accelerators”, Doktora Tezi, Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Almanya. 1-15.
- Benedetto J. M. & Boesch H. E. 1986. “The relationship between ⁶⁰Co and 10-keV X-ray damage in MOS devices, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 33, 1317–1323.
- Card H. C. ve Rhoderick E. H. 1971, Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes, *J. Phys. D* 4, 1589.
- Cheung, S. K. and Cheung, N. W., 1986, Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 49, 85-87.
- Chen C.H., Shih I. 2006, “Hybrid organic on inorganic semiconductor heterojunction” *J. Mater. Sci.: Mater. Electron* 17, 1047.
- Chin M.R., Ma T.P., 1983 “Gate-width dependence of radiation-induced interface traps in metal/SiO₂/Si devices Appl”. *Phys. Lett.* 42 (10) 883.
- Cowley, A. M., Sze, S. M., 1965. Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36, 3212.
- Çınar K., Aydoğan S., Coşkun C. 2014 “Fabrication and electrical characterisation of the Ti/GaTe/p-Si device under 18 MeV electron irradiation” *J Radioanal Nucl Chem* (2014) 300:1113–1120.
- Detcheverry C., Dachs C., Lorfèvre E., Sudre C., Bruguier G., Palau J.M., Gasiot J., ve Ecoffet R.1997. SEU critical charge and sensitive area in a submicron CMOS technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 44(6), pages 2266–2273.
- Devine R.A.B. 1994. The structure of SiO₂, its defects and radiation hardness. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 41(3), pages 452–459.

- El-Nahass, M.M., Abd-El-Rahman, K.F., Farag, A.A.M. and Darwish, A.A.A., 2005, Photovoltaic properties of NiPc/p-Si (organic/inorganic) Heterojunctions, *Organic Electronics*, 6, 129-136.
- El-Nahass, M. M., Zeyada, H.M., Aziz, M.S. and El-Ghamaz, N.A., 2005, "Carrier transport mechanisms and photovoltaic properties of Au/p-ZnPc/p-Si solar cell", *Solid-State Electronics*, 49, 1314-1319.
- Feteha Mohamed Y., Soliman Moataz., Gomaa Naima G., Ashry Moustafa 2002. "Metal-insulator-semiconductor solar cell under gamma irradiation" *Renewable Energy* 26 113–120.
- Fleetwood D. M. 2005 Emerging issues for total ionizing dose effects on microelectronics. *New Challenges for Radiation Tolerance Assessment, Radiation Effects on Components and Systems*, , pages 33–46.
- Glasstone S. and Dolan P. J., 1977, "The Effects of Nuclear Weapons Compiled", Third Edition, Prepared and published by the United States Department of Defense and the Energy Research and Development Administration.
- Gilard O. ve Quadri G. 2005, Radiation effects on electronics: displacement damages. *New Challenges for Radiation Tolerance Assessment, Radiation Effects on Components and Systems*, pages 47–69.
- Güneş G. 2019 "Gama Radyasyonun Pmma/Pbo Yapısı Üzerine Etkisinin İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Güllü, Ö., Çankaya, M., Biber, M., Türüt, A., 2008, "Gamma irradiation-induced changes at the electrical characteristics of organic-based schottky structures", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 135103 (7pp).
- Güllü, Ö., Demir, F., Cimilli, F. E., and Biber, M., 2008, "Gamma Irradiation-Induced Changes At The Electrical Characteristics of Sn/P-Si Schottky Contacts", *Vacuum*, 82 789–793.
- Güllü, Ö., Aydoğan, S. and Türüt, A., 2008, "Electron irradiation effects on the organic-on-inorganic silicon Schottky structure", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 593, 544–549.
- Güllü Ö., 2017, "Analysis of interface states of Al/DNA/p-Si MIS photovoltaic structures with DNA biomolecules using the conductance technique", *Materials Technology: Adv. Perf. Mater*, 32 (8) 505-513.
- Güllü, Ö., Çankaya, M., Biber, M., Türüt, A., 2008, "Fabrication And Electrical Properties of Organic-on-Inorganic Schottky Devices", *J. Phys.: Condens. Matter*, 20 215210 (6pp).
- Güllü Ö., Biber M., and Türüt A., 2008, "Electrical characteristics and inhomogeneous barrier analysis of aniline green/p-Si heterojunctions", *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 19, 986-991.
- Güllü Ö., Kilicoglu T., Turut A., 2010, "Electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device" *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 71, 351–356.

- Güloğlu S., 2011, “Al/P-Si Schottky Bariyer Diyotun γ -Işını Radyasyon Etkisi Üzerinde Elektriksel Parametrelerinin Hesaplanması” Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Hahn A. A. ve Zagel J. R. 1999. Observation of Bethe-Bloch ionization using the booster ion profile monitor. In: Particle Accelerator Conference, volume 1, pages 468–470.
- Harris, R. D. ve Frasca, A. J. 2006 “Proton irradiation of silicon Schottky barrier power diodes”. IEEE Trans Nucl Sci, 53, 1995.
- Holmes-Siedle, A. & Adams, L. 2002. “*Handbook of Radiation Effects*, 2nd ed”, pp. 163–164. Oxford University Press.
- Jayavel P., Udhayasankar M., Kumar J., Asokan K., Kanjilal D. 1999, “Electrical characterisation of high energy 12C irradiated Au/n-GaAs Schottky Barrier Diodes”, Nuc. Instr. and Meth. B 156, 110.
- Jayavel P., Kumar J., Santhakumar K., Magudapathy P., Nair K.G.M., 2000, “Investigations on the effect of alpha particle irradiation-induced defects near Pd/n-GaAs interface”, Vacuum 57, 51
- Jorio A., Zounoubi A., Elachheb Z., Carlone C., ve Khann S. M. 1999 „Displacement damages created by γ particles radiation in n type GaAs. M. J. of Condensed Matter, 2(1).
- Karatas S., Turut A., Altındal S. 2009, “Effects of ^{60}Co γ -ray irradiation on the electrical characteristics of Au/nGaAs (MS) structures”, Radiat.Phys. Chem. 78 130.
- Karatas S., Türüt A., Altındal S. 2005. “Effects of ^{60}Co γ -ray irradiation on the electrical characteristics of Au/n-GaAs (MS) structures” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 555 (2005) 260–265
- Kaymaz A. 2020 “Organik Arayüzey Tabakalı Metal-Yarıiletken Yapıların Elektriksel Özelliklerinin Radyasyona Bağlı İncelenmesi” Doktora tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Kopp, C., 1996, "The Electromagnetic Bomb- A Weapon of Electrical Mass Destruction". USAF CADRE Air Chronicles (U.S. Air Force). DTIC:ADA 332511.
- Makino K., Berz M, Errede D, ve Johnstone C.J. 2003. Nonlinear transfer map treatment of beams through systems with absorbing material. In: Physics and Control, 2003. Proceedings. 2003 International Conference, volume 3.
- Messenger G.ve Ash. M. 1986 The Effects of Radiation on Electronic Systems. Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Mukherjee A. ve Kumari S., 2014, “Fabrication and Characterization of MOS and MIS Capacitors Using Thermally Grown SiO_2 and Sputter Deposited SiN Thin Film as Gate Dielectrics”, Yüksek Lisans Tezi, Indian Institute of Technology, Delhi, India.
- Nicollian, E. H. & Brews, J. R. 1982. “*MOS (Metal Oxide Semiconductor Physics and Technology)* (chapter1, 3, 4, 9&10).”, pp. 492–580. New York: John Wiley and Sons.
- Norde, H. A., 1979. “A Modified Forward I–V Plot for Schottky Diodes with Hig Series Resistance”. J. Appl. Phys. 50: 5052-5053.

- Ocak Y.S, Kılıçoğlu T., Topal G. ve Başkan M.H., “ ^{60}Co γ -irradiation effects on electrical properties of a rectifying diode based on a novel macrocyclic Zn octaamide complex”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 612 (2010) 360–366
- Ocak Y.S., Ebeoglu M. A., Topal G. and Kılıcoglu T., 2010, “Temperature dependent electrical characteristics of an organic–inorganic heterojunction obtained from a novel organometal Mn complex”, Physica B, 405, 2329-2333.
- Özaydin, C., Güllü, Ö., Pakma, O., İlhan, S., Akkilic, K., 2016, “The optical characterization of organometallic complex thin films by spectroscopic ellipsometry and photovoltaic diode application”, Materials Research Bulletin, 77, 115-121.
- Plummer J.D., Deal M.D., Griffin P.B., 2000, “Silicon VLSI Technology”, Prentice Hall.
- Rao A., Krishnan S., Sanjeev G., Siddappa K. 2009 “Effect of 8 MeV Electrons on Au/n-Si Schottky diodes” ISSN 0973-1776 Volume 5, Number 1 (2009), pp. 55–62
- Robertson J., 2002 “Band structures and band offsets of high K dielectrics on Si” Applied surface Science 190 (1-4), 2.
- Salari M. A., 2018, “Zn/n-Si/Au-Sb ve Zn/ZnO/n-Si/Au-Sb Schottky Diyotların Elektriksel Karakteristikleri Üzerine Farklı Enerji Ve Dozlardaki Elektron Ve Gama Radyasyonlarının Etkilerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi”, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Singh, R., Arora, S. K. and Kanjilal, D. 2001. Swift heavy ion irradiation induced modification of electrical characteristics of Au/n-Si Schottky barrier diode. Materials Science In Semiconductor Processing, 4, 425.
- Sze S.M. ve Kwok K.ng, 2002, Physics of Semiconductor Devices, third edition, Wiley publication (chapter4,5&6).
- Taşçıoğlu İ. 2008, “Al/SiO₂/P-Si (Mıs) Yapılarda Temel Fiziksel Parametrelerin Frekans Ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi”, Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Wrobel F. 2005 Fundamentals of Radiation-Matter interaction. New Challenges for Radiation Tolerance Assessment, Radiation Effects on Components and Systems, pages 5–31.
- Yasuhiko S., 2000, Organic materials for electronic and optoelectronic devices, J. Mater. Chem., 10, 1.
- Yilmaz E., Kaleli B., Turan R. 2007 “A systematic study on MOS type radiation sensors” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 264 (2007) 287–292.
- Zhang J., Pintilie I., Fretwurst E., Klanner R., Perreya H. ve Schwandta J. 2012. “Study of radiation damage induced by 12 keV X-rays in MOS structures built on high-resistivity n-type silicon” Journal of Synchrotron Radiation ISSN 0909-0495. Institute. for Experimental Physics, University of Hamburg, Hamburg, Germany, and National Institute of Materials Physics, Romania.
- Ziel, A. V., 1968, Solid State Physical Electronics, (Prentice-Hall New-Jersey).