



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**AL/ORANGE G/P-TİPİ Sİ MİS DEVRE ELEMANLARININ
ELEKTRİKSEL VE KONTAK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
GAMA IŞINLARININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet ÜNALAN

Danışman

Prof. Dr.Ömer GÜLLÜ

**MART-2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet ÜNALAN tarafından hazırlanan “AL/ORANGE G/P-TİPİ Sİ MIS DEVRE ELEMANLARININ ELEKTRİKSEL VE KONTAK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE GAMA IŞINLARININ ETKİSİ” adlı tez çalışması .../ 03/ 2022 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. Şehmus ALTUN
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.

Ahmet ÜNALAN

Tarih: 10/03/ 2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AL/ORANGE G/P-TİPİ Sİ MİS DEVRE ELEMANLARININ ELEKTRİKSEL VE KONTAK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE GAMA IŞINLARININ ETKİSİ

Ahmet ÜNALAN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

2022, 71 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Sezai ASUBAY

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

Prof. Dr. Osman PAKMA

Bu çalışmada Orange G (OG) organik ince film kullanılarak üretilen Al/OG/p-Si diyotunun Co-60 gama ışınlamasıyla öncesinde ve sonrasında Cheung ve Norde teknikleriyle ve KEITHLEY 4200-SCS vasıtasıyla elektriksel ve arayüzey özellikleri, oda sıcaklığında, karanlık ortamda akım-gerilim(I-V) ölçümü, kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucundan elde edilen değerler çizelgede gösterilmiş ve grafikleştirilmiştir.

Elde edilen değerler doğrultusunda bariyer yüksekliği (Φ_B), idealite faktörü (n) ve seri direnç (Rs) gibi bazı parametreler Norde fonksiyonundan ve Cheung fonksiyonlarından elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bariyer Yüksekliği, İdealite faktörü, Orange G (OG)

ABSTRACT

MS THESIS

THE INFLUENCE OF GAMMA RAYS ON ELECTRICAL AND CONTACT PROPERTIES OF THE AL/ORANGE G/P-TYPE SI MIS DEVICES.

Ahmet ÜNALAN

**The Postgraduate Education Institute of Batman University
The Degree of Master of Science
In Physics**

Advisor: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

2022, 71 Pages

Jury

Prof. Dr. Sezai ASUBAY

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

Prof. Dr. Osman PAKMA

In this study, electrical and interfacial properties of Al/OG/p-Si diode produced by using Orange G (OG) organic thin film before and after Co-60 gamma irradiation were determined by Cheung and Norde techniques and by KEITHLEY 4200-SCS, at room temperature, in the dark environment. current-voltage (IV) measurement, capacitance-voltage (CV) measurements were made. The values obtained as a result of the measurements made are shown in the table and graphed.

In line with the obtained values, some parameters such as barrier height (Φ_B), ideality factor (n) and series resistance (Rs) were obtained from Norde function and Cheung functions.

Keywords: Barrier Height, Ideality factor, Orange G (OG)

ÖNSÖZ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne Yüksek Lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada Al/Orange G/p-Si diyotunun üzerine düşürülen gama ışınlarıyla elektriksel ve arayüzey özellikleri, oda sıcaklığında ve karanlık ortamda nasıl fonksiyon göstereceği incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının seçilmesi, laboratuvar çalışmaları ve ölçümlerin değerlendirilmesine kadar her aşamada desteklerini esirgemeyen, engin bilgilerinden yararlandığım, beni cesaretlendirerek bana yol gösteren sayın Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ' ye bütün içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

Varlığıyla bana her zaman destek olan, beni her daim gönülden destekleyen anneme ve ailemin diğer tüm fertlerine teşekkürlerimi sunarım.

Üzerimde büyük emeği olan, her zaman için saygıyla ve özlemle andığım, ebediyete uğurladığımız sevgili babam Mehmet ÜNALAN' a gıyaben teşekkürlerimi ve rahmet dileklerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında bana anlayış gösteren, desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli eşim Tuğba ÜNALAN'a ve çocuklarıma şükranlarımı sunarım.

Ahmet ÜNALAN

BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER.....	xi
TABLolar	xii
ÇİZELGELER.....	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatürde Yapılan Araştırmaların Özeti.....	5
2. TEORİK VE KURAMSAL BİLGİLER	14
2.1. Yarıiletken Malzemeler	14
2.2. Katı Halde Organik Yarıiletkenler.....	16
2.2.1 Organik Yarıiletkenlerde Bant Analojisi	16
2.2.2 Katı Hal Organik Sistemlerinde Homojenlik Derecesi.....	17
2.2.3 Organik Katılarda Yük Taşıyıcıların Doğası	18
2.3. Metal-Yarıiletken Arayüzeyler:	20
2.3.1. Schottky Bariyerinin Oluşumu:	20
2.3.1.a. Schottky-Mott Sınırı:	20
2.3.1.b. Bardeen Sınırı:	22
2.3.1.c. Yakın Temas-MIGS ve Kusur Durumları:.....	22
2.3.2. Mevcut Taşıma Mekanizması.....	23
2.3.2.a. Termiyonik Emisyon.....	24
2.3.2.b. Tünel Açma(Alan Emisyonu ve Termiyonik Alan Emisyonu)	25
2.3.2.c. Azınlık Taşıyıcıları(Rekombinasyon ve Enjeksiyon).....	26
2.4. Metal-Oksit-Yarıiletken Cihazların Fiziği	26
2.4.1. MOS Kapasitörler.....	27
2.4.1.1. İdeal MOS Kapasitörler:.....	27
2.4.1.2. Elektrostatik Analiz.....	31
2.4.2. Gerçek MOS Kapasitörler.....	34

2.4.2.1. İş Fonksiyonu Farkı.....	34
2.4.2.2. Oksit Yükleri:.....	35
2.5. Yarıiletken AygıtlarınModifikasyonu İçinRadyasyon TeknolojileriUygulanma..	37
2.5.1. Elektronik Cihazlarda İyonlaştırıcı Radyasyona Bağlı Etkiler.....	38
2.5.2. Radyasyon ve Radyoaktif Bozunma.....	43
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	47
3.1. Orange G Boya Molekülü.....	47
3.2. MIS Kontağın Fabrikasyonu, Işınlanma aşaması ve Ölçümlerin Alınması.....	48
3.3. Al/OG/p-Si Yapının IV Ölçümlerinden Temel Diyot Parametrelerinin Elde Edilmesi	50
3.3.1. Engel yüksekliği ve İdealite faktörü	50
3.3.2. Seri direnç	51
3.3.3. Norde fonksiyonu	51
3.3.4. Cheung fonksiyonu	52
3.3.5 Arayüzey durum yoğunluğu (Nss).....	52
3.4. Yarıiletken kontaklarda Kapasite - Voltaj (C-V) Karakteristikleri	52
4. BULGULAR VE SONUÇLAR.....	54
4.1. MIS Yapının IV Ölçümleri ve Analizi	54
4.2. C-V Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	62
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
5.1 Sonuçlar	67
5.2. Öneriler	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	79

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Diyotun etkin alanı
A^*	: Richardson sabiti
C	: Kapasitans
C_{ox}	: Yalıtkanın Oksit Kapasitansı
d	: Uzay yükü bölgesinin genişliği
E	: Elektrik Alan
E_c	: İletkenlik bandının tabanı
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_v	: Değerlik bandının tavan enerjisi
E_{ss}	: Arayüzey durumlarının enerjisi
E_{00}	: Schottky Bariyerinin Difüzyon Potansiyeli
eV	: Elektron volt
e	: Elektron yükü
$F(V)$	: Norde fonksiyonu
$H(I)$	: Cheung fonksiyonu
ϵ_s	: Geçirgenlik
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
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
I_d	: Düz beslem akımı
I_s	: Doyma akımı
I_t	: Ters beslem akımı
k	: Boltzmann sabiti
K_0	: Oksidin dielektrik sabiti
K_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
M'	: Gerçek elektrik modülü
M''	: Sanal elektrik modülü
m_e	: Elektronun durgun kütlesi
m^*	: Elektronun etkin kütlesi
n	: İdealite faktörü
n_i	: İçsel elektron konsantrasyonu
n_{po}	: Elektron denge yoğunluğu
p_{po}	: Boşlukların denge yoğunluğu
N	: Radyonüklid sayısı
N_0	: Başlangıç radyonüklid sayısı
N_a	: Alıcı (akseptör) konsantrasyonu
N_d	: Verici (Donör) konsantrasyonu
N_{ss}	: Arayüzey durum yoğunluğu
Q_F	: Arayüzey sabit yükleri
Q_{IT}	: Arayüzey tuzak yükleri

Q_{MI}	: Yalıtkandaki mobil iyon yükü
R_s	: Seri direnç
R_{sh}	: Şönt direnci
R_j	: Eklem direnci
T	: Mutlak sıcaklık
V_d	: Difüzyon Potansiyeli
V	: Uygulanan potansiyel
V_{fb}	: Düz bant voltajı
V_F	: İleri Beslem Gerilimi
V_R	: Geri Beslem Gerilimi
W	: Tükenim bölgesinin kalınlığı
ρ	:Yük yoğunluğu
Ω	: Direnç birimi
λ	: Bozunma Olasılığı
γ_N	: Norde yönteminde bir sabit
Z	: Atom numarası
ϕ_{ms}	: Geçit metali ile yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı
ψ	: Potansiyel
ψ_s	: Yüzey Potansiyeli
τ_r	: Tükenim bölgesindeki yaşam süresi
δ	: Arayüzeysel tabakanın kalınlığı

Kısaltmalar

CR	: Congo Red
C- V	: Kapasite- gerilim
C- F	: Kapasite- frekans
G- V	: Kondüktans- gerilim
G- F	: Kondüktans- frekans
I-V	: Akım- gerilim
MS	: Metal- Yarıiletken kontak
MIS	: Metal- Yalıtkan- Yarıiletken kontak
MOS	: Metal-Oksit-Yarıiletken Kontak
MOSFET	: Metal-Oksit-Yarıiletken Alan Etkili Transistör
PMMA	: Polimetil Metakrilat
PTCDA	: Perilentetrakarboksilik Dianhidrit
SBD	: Schottky Bariyer Diyodu
SBM	: Schottky Bariyer Modeli
VLSI	: Çok Büyük Ölçekli Entegrasyon

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Bir parçacığın değerlik ve çekirdek elektronları ile çarpışması sonucu oluşan enerji kayıpları ve çarpışan ile saçılan parçacığın yörüngelerinin gösterimi.....	3
Şekil 1.2. İyonlaştırıcı radyasyonun madde ile etkileşimi.....	7
Şekil 2.1. Bir metal (solda), bir yarı iletken (ortada) ve bir yalıtkan (sağda) için izin verilen enerji bantlarının şematik elektron popülasyonu.....	15
Şekil 2.2. Bir sp^2 melezleştirilmiş etilen tipi tek birimin (solda) basitleştirilmiş moleküler orbital(MO) diyagramı.....	17
Şekil 2.3. Polimer zincirlerinin şematik açıklaması.....	18
Şekil 2.4. Schottky-Mott modelinde Schottky bariyer oluşumu.....	21
Şekil 2.5. Schottky bariyeri boyunca taşıma mekanizmaları.....	23
Şekil 2.6. Tipik bir Metal-Oksit-Yarı İletken kapasitör yapısı.....	27
Şekil 2.7. İdeal bir MOS kapasitörünün enerji bant diyagramı.....	28
Şekil 2.8. MOS kapasitörlerin enerji bant diyagramları.....	29
Şekil 2.9. Farklı öngerilim koşulları altında bir MOS kapasitörünün kapasitansı.....	31
Şekil 2.10. Pozitif öngerilim altındaki bir p-tipi yarı iletkenin enerji bant diyagramı.....	31
Şekil 2.11. Düz bant durumunda gerçek bir MOSkapasitörünün enerjibant diyagramı.....	35
Şekil 2.12. Işınlanmış bir yarı iletken malzemede elektron ve iyon ışınlarının ve gama ışınlarının ve X ışınlarının radyasyon yolları.....	38
Şekil 2.13. Atom yer değiştirmesinin yarattığı kusurlar.....	40
Şekil 2.14. Yalıtkanlar, yarı iletkenler ve iletkenler için enerji bant diyagramları.....	41
Şekil 2.15. Yarı iletken bağlantı yapısı.....	42
Şekil 3.1. Orange G (OG)nin kimyasal yapısı.....	48
Şekil 3.2. KEITHLEY 4200-SCS ölçüm sisteminin fotoğrafı.....	49
Şekil 3.3. Al/OG/p-Si MIS diyotu ve gama ışınlarına maruz bırakma.....	50
Şekil 4.1. Al/OG/p-Si diyotunun gama radyasyonu uygulanmadan önceki (kontrol) ve sonraki durumlara ait $\ln I-V$ grafikleri.....	55
Şekil 4.2. Al/OG/p-Si diyotunun gama radyasyonu uygulanmadan önceki (kontrol) ve sonraki durumlara ait R_j-V grafikleri.....	56
Şekil 4.3. Al/OG/p-Si diyotunun gama radyasyonu uygulanmadan önceki (kontrol) ve sonraki durumlara ait $RR-V$ grafiği.....	57
Şekil 4.4. Al/OG/p-Si diyotunun ışınlanmadan önceki durumuna ait $dV/d(\ln(I)-I)$ ve $H(I)-I$ grafikleri.....	58
Şekil 4.5. Al/OG/p-Si diyotunun ışınlandıktan sonraki duruma ait $dV/d(\ln(I)-I)$ ve $H(I)-I$ grafikleri.....	59
Şekil 4.6. Al/OG/p-Si diyotunun ışınlanmadan önceki (kontrol) ve ışınlanmış durumlara ait $F(V)-V$ grafikleri.....	60
Şekil 4.7. Al/OG/p-Si diyotunun radyasyona tabi tutmadan önceki (kontrol) ve sonraki $N_{ss}-(E_{ss}-E_v)$ grafikleri.....	61
Şekil 4.8. Radyasyon uygulamadan önceki Al/OG/p-Si diyotunun (kontrol) $C-V$ grafikleri.....	63
Şekil 4.9. Al/OG/p-Si diyotunun (ışınlanmış) $C-V$ grafikleri.....	64
Şekil 4.10. Al/OG/p-Si diyotunun radyasyon uygulamadan önceki (kontrol) $C^{-2}-V$ grafikleri.....	65
Şekil 4.11. Al/OG/p-Si diyotunun radyasyon uygulamadan sonraki (ışınlanmış) $C^{-2}-V$ grafikleri.....	65

TABLÖLAR

Tablo 1.1. İyonize Radyasyonun Karşılaştırılması.....	6
--	---

ÇİZELGELER

Çizelge 4.1. Al/OG/p-Si diyetunun kontrol ve radyasyon uygulanmış durumlar için lnI-V, Cheung ve Norde tekniklerinden hesaplanan diyet parametreleri.....	62
---	----

Çizelge 4.2. Radyasyon uygulamadan önceki Al/OG/p-Si diyetunun (kontrol) ve ışınlanmış duruma ait C ⁻² -V grafiklerinden bulunan bazı temel diyet parametreleri.....	63
--	----

1. GİRİŞ

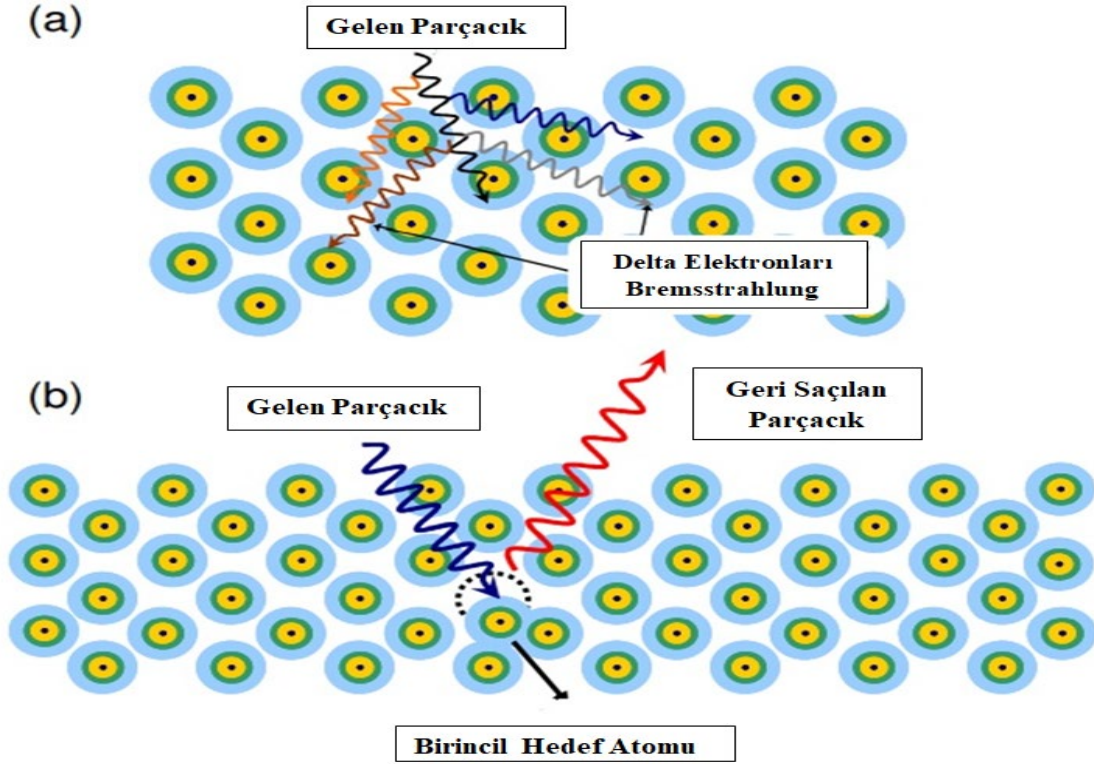
Mikroelektronikğin hızlandırılmış gelişimi, iyileştirilmiş yığın ve yüzey mikro işleme teknikleriyle birleştiğinde, ekonomik olarak uygulanabilir ve son derece işlevsel mikrosistemlerin büyümesini mümkün kılmıştır (Gardner ve ark., 2001). Blanchard ve Fabrycky, bir sistemi "...bir ortak amaç veya amaç doğrultusunda birlikte çalışan birbiriyle ilişkili bileşenler kümesi" olarak tanımlar (Blanchard ve Fabrycky, 1998). Bu nedenle, bir mikrosistem, ortak bir amaç veya amaç doğrultusunda birlikte çalışan, milimetre altı ölçekte bir dizi birbiriyle ilişkili bileşen olarak tanımlanabilir. Bu tür "ortak hedefler", örneğin, bir veya daha fazla optik anahtarın, basınç sensörünün, akışkan valfinin, atalet sensörünün, vb. mikroişlem ve telemetri alt bileşenleriyle birlikte entegre edilmesiyle gerçekleştirilebilir (Gardner ve ark., 2001, Lemmerhirt ve Wise, 2006). Net sonuç, artan işlevsellik ve buna eşlik eden düşük güç tüketimi, kütle ve boyuta sahip entegre bir sistemdir.

Bugüne kadar mikrosistemlere Si elektroniği ve sensörler hakim olmuştur; bununla birlikte, III-V tabanlı bileşenlerin entegrasyonu, mikrosistemlerin faydasını, geniş bir yelpazede optoelektronik tabanlı teknolojilerle birlikte genişleyen yüksek frekanslı iletişim alanlarına potansiyel olarak genişletebilir. Örneğin, GaAs ve InP'deki yüksek elektron hareketliliği ve hız doygunluk sınırı, onları yüksek frekanslı ve yüksek güçlü uydu iletişimi için ideal hale getirmiştir (Streit, 2004, Wang ve ark., 2008). III-V yarı iletkenleri, uzay güç üretim sistemleri için mevcut standart olan gelişmiş çok eklemlili fotovoltaiğin (King ve ark., 2007) temelidir. Ayrıca, III-V yarı iletkenleri kızılötesi algılama, ışık yayan diyot ve lazer uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Shubhrangshu ve ark., 2007). Mikrosistemlerin işlevselliğini artırabilen ek bir malzeme sınıfı nanomalzemelerdir. Bu malzemelerin yeniliği, boyutlarına bağlı optik, elektronik, manyetik vb. özellikleri ve bunları mevcut III-V tabanlı cihazlara işlevsel olarak entegre etme yeteneğidir.

Mikrosistemlerin sunduğu avantajları gerektiren ana uygulamalar genellikle kapsamlı altyapı olmadan verilerin kolayca çıkarılamadığı uzak veya zorlu ortamlarla ilişkilidir. Çöl, okyanus ve dağlık bölgeler dahil olmak üzere uzak konumların tümü, mikro sistemlerin çalışmasını etkileyebilecek sürekli değişen sıcaklık, basınç, nem vb. Uzay uydu uygulamalarında kullanıldığında, uydu tutulmaya girip çıktıkça cihazlar tekrar tekrar termal olarak döngüye alınır. Mikrosistem bileşenlerinin bir kısmının veya tamamının iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldığı birçok karasal ve uzay uygulaması

vardır. Gama ışınları ve yüksek enerji yüklü parçacıklar dahil olmak üzere iyonlaştırıcı radyasyon, hızlı iyonizasyon olayları nedeniyle yarı iletken tabanlı elektronik cihazlarda arızaya neden olabilir veya elektronik cihazların performansında tuzaklanan yüklerden kaynaklanan yavaş ve sürekli bir bozulmaya ve azınlık taşıyıcı yaşam sürelerinde bir azalmaya neden olabilir (Faccio ve Cervelli, 2005, Pease ve ark., 1988).

Şekil 1.1a' daki şema, yüksek enerjili bir parçacığın bir malzemeden geçerken karşılaşılan elektronlarla etkileşimler yoluyla enerji kaybettiği atomik iyonizasyon sürecinin basitleştirilmiş bir tasviridir. Bu enerji kaybı biçimi, yüklü parçacıklar (örneğin, kısmen veya tamamen iyonize atomlar) ve benzer şekilde <0.5 MeV enerjili elektronlar için enerji kaybının $>99\%$ 'unu oluşturur (Krane, 1988- Ziegler ve ark., 1985). Bu birincil çarpışmalar, yarıiletken içinde ileri saçılmış elektronlar yaratır, bunlar daha sonra ikincil çarpışma olaylarına katılır. Bu, harici bir alan tarafından kolayca etkilenebilen yüksek bir uyarılmış elektron konsantrasyonuna yol açar. Yarıiletken devre elamanları söz konusu olduğunda, mevcut geniş alan tehlikeli bir akım artışına neden olabilir potansiyel olarak zararlı bir kısa-devre durumuna yol açar (Pease ve ark., 1988). Ancak, bu süreç her durumda dezavantajlı değildir. Aslında, gaz dolu sayaçlarda ve yarı iletken eklemlerde kararsız element izotoplarından nükleer radyasyonun tespitinde kullanılan temel çalışma mekanizmasıdır; aynı zamanda duman dedektörlerinin yakın çevredeki az miktarda dumanı algılamasını sağlayan mekanizmadır (Krane, 1988, Liu ve ark., 2007). Atomların iyonlaşması ve uyarılmış yük taşıyıcılarının üretilmesi, ışıkla uyarılan bir fotovoltaiik cihazda elektron boşluk çiftleri oluşturmaya benzer. Bu nedenle, uygun şekilde tasarlanmış bir yarı iletken cihaz yapısı ile bu ışık yayan enerji aktarımı biçiminden yararlanmak ve onu güç üretmek için kullanmak mümkündür (Bower ve ark., 2002). İyonlaştırıcı radyasyon ve nanomalzemeler veya III-V cihazları arasındaki etkileşimin daha iyi anlaşılması, günümüz teknolojilerinin algılama veya güç üretim verimliliklerini artırabilecek yeni malzeme ve cihazların geliştirilmesi için kritik olacaktır.



Yarıiletken tabanlı elektronik cihazların performansında gözlemlenen yavaş sürekli bozulmanın birincil nedeni Şekil 1.1(b) 'de şematik olarak gösterilmektedir. Bu şematikte, yüksek enerjili bir parçacık, enerjisinin bir kısmını veya tamamını yarı iletken kafes içindeki bağlı bir atoma aktarır ve yer değiştirmesine neden olur. Çarpışmanın ardından, birincil çarpışan atomu malzemeyi geçerek elektronik ve nükleer çarpışmalar yoluyla enerji kaybeder. Birincil çarpışan atomun yolu boyunca, kafesin periyodikliğini bozan ara yer alanlarını işgal eden bir boşluk sütunu ve yakındaki atomlar vardır. Sonuç olarak, yarı iletken cihazın davranışı, cihaz performansında yavaş bir bozulmanın gözlemlenmesine neden olan üretilen her bir kusur ile çok az da olsa etkilendir. Deneysel verilere dayalı olarak parametrelendirilen karakteristik bozulma denklemleri, artan kusurlarla birlikte cihaz performansındaki değişimi tanımlamak için sıklıkla kullanılır (Walters ve ark., 1998, Möller, 1993). Bu tür denklemlerin, yüksek enerjili foton, elektron, nötron, protonlar ve diğer hafif yüklü parçacıklara maruz kalma altında yarıiletken tabanlı fotovoltaiik cihazlarda varyasyonu yeterince tanımladığı gösterilmiştir. Bununla birlikte, bozunma mekanizmalarını daha iyi anlamak ve hasar

oranını azaltmak için yeni yapılar tasarlamak için daha temel bir araştırma gereklidir. Bu tür bilgiler daha sonra, ister radyoizotop güç üretim cihazlarında olduğu gibi kasıtlı maruz kalma olsun, isterse sistemin içinde bulunduğu ortamın tesadüfi bir sonucu olsun, gövde yarıiletken ve kuantum sınırlı yarı iletkenler kullanan mikrosistemlerin ömrünü uzatmak için kullanılabilir.

Metal/Yarıiletken (MS) ara yüzeylerin yanısıra Metal/Yalıtkan/Yarıiletken (MIS) kontak yapılarındaki yük geçişleri geniş bir araştırma sahasına sahiptir. Bu yapılarda inorganik ara yüzey tabakası kullanıldığı gibi organik moleküler malzemeler de bir çok bilim insanı tarafından tercih edilmiş olup ara yüzey tabakasında kullanılan organik ince filmlerin geleneksel yarıiletken yapıların elektronik ve optik özelliklerini değiştirmek için pek çok çalışmalar yapılmıştır. Burada ana fikir yarıiletken yapılardaki ara yüzeydeki moleküler tabakanın özellikleri sayesinde geleneksel yarıiletken yapıların elektronik özelliklerini kontrol etmektir. Bir yarıiletkeni karakterize eden önemli nicelikler elektron ilgisi (χ_s) ve bant bükülmesi (V_b , built in potansiyeli)dir. Elektron ilgisindeki değişimler, moleküllerin asal dipol momentlerine bağlı olmakla beraber yük transferleriyle ortaya çıkmaları da muhtemeldir. Ara yüzey dipolleri sayesinde yarıiletken yüzey özelliklerini modifiye etmek tek seçenek/yöntem değildir. Yarıiletken yüzeyindeki doymamış bağlar ve kusurları üzerinde organik moleküllerin bağlanmasını kullanarak yarıiletken yüzeylerindeki yüzey kusurlarının yoğunluğunu azaltmak için kullanılmaktadır (Cress, 2008).

MIS kontakların arayüzey tabakası yük durumlarına karşı hassas olduğu için, bu diyot yapıları, radyasyonla ışınlanmaya tabi tutulursa, ışınlanma etkisiyle oluşan negatif yük (elektron)-pozitif boşluk (hol) çiftlerinin bir kısmı, oluştuktan kısa süre sonra yeniden birleşmesiyle birbirinden ayrılma ihtimali kaybolmaktadır. Genel anlamda MIS kontakların elektronik özellikleri ışınlamadan fazlaca etkilenmekte olup, yarıiletken aygıtlarda, ışınlamadan dolayı aşağıda sayılan "durumlardan" bazıları gözlemlenebilir:

- iletkenlikte meydana gelen değişme olayı,
- sızıntı akımında meydana gelen değişme,
- kırılma gerilimindeki değişme,
- gürültü parametresindeki değişme,
- yüzey hareketliliğindeki değişme,
- yüzey rekombinasyonu hızındaki değişme.
- çıkış gerilimindeki değişme,
- maksimum çıkış akımındaki değişme,

- yayılım gecikme zamanındaki değişme (Barbottin ve Vapaille, 1999- Salari, 2018).

Bu tezin organizasyonu aşağıdaki gibidir, Bölüm 1 tezin önemi hakkında giriş bilgilerini ve temel iyonlaştırıcı radyasyon-madde etkileşimleri ve organik arayüzey tabakalı MIS kontakların tarihsel bir incelemesini içerir. Bölüm 2 radyasyon-madde etkileşimleri ve organik arayüzey tabakalı MIS yapılar hakkında teorik bilgileri barındırır. Bölüm 3 Orange G (OG) organik ince moleküler tabakası damlatma tekniğiyle p-Si yarıiletken alttaş üzerinde biriktirilerek, Al/OG/p-Si MIS diyotlarının oluşturulması ve Gama ışınlarına tabi tutulması prosedürlerini içerir. İyonlaştırıcı radyasyonun MIS yapılar üzerindeki etkilerini anlama hedefine ulaşmak için bir dizi deneysel araştırma yapılmıştır. Bu araştırma için ana deneysel "araç", ~ 1.25 MeV gama ışınları yayan ^{60}Co radyoizotop kaynağıdır. Bu tür parçacıklar yüksek oranda iyonlaştırıcı enerji kaybına sahiptir ve kafes dislokasyonlarına neden olacak kadar enerjilidir. Bir gama ışını kaynağından yayılan gama ışını akışının, bir malzemeye/cihaza hem iyonlaştırıcı hem de iyonlaştırıcı olmayan (boşluk üreten) enerjiyi uzamsal olarak nasıl biriktirdiğini anlamak gerekli deneysel bulgular Bölüm 4'te irdelenmiştir. Bölüm 4 Al/OG/p-Si MIS kontaklarının elektronik ve arayüzey karakteristiklerinin, akım-voltaj (IV) kapasitans-voltaj (CV) ölçümleri vasıtasıyla analizini kapsar. Bu bölümde ayrıca gama radyasyonuna tabi tutulmayan kontrol numunesi ile gama radyasyonuna tabi tutulan diyota ait idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) gibi temel diyot parametreleri, $\ln(I)$ -V değişiminden, Norde fonksiyonundan ve Cheung fonksiyonlarından hesaplanmıştır. Çalışmada 10kHz-1 MHz frekans aralığındaki Al/OG/p-Si MIS diyotunun CV ölçümlerinden ise C^{-2} -V grafikleri çizilerek kontrol ve ışınlanmış diyot için bazı diyot parametreleri hesaplanmıştır. Bölüm 5, bu tezi, temel bulguların bir özeti ve bunların yarıiletken aygıtlar alanındaki ilerlemeyle nasıl ilişkili olduğu ile sonlandırmaktadır.

1.1. Literatürde Yapılan Araştırmaların Özeti

Neredeyse 50 yıl önce, ilk uydu; Van Allen kuşaklarında bulunan yüksek enerjili parçacıkların neden olduğu ciddi sorunlarla karşılaştığında, radyasyonun yarı iletken cihazlar üzerindeki etkileri gözlemlendi. O zamandan beri, uzay ve askeri topluluklar yarı iletkenler üzerinde bu etkileri incelemeye çaba harcamışlardır. Günümüzde, radyasyon ortamında çalışabilen devreleri araştırmaya olan ilgi, tüm uzay görevleri,

uydular, gelişmiş silahlar, nükleer santrallerin enstrümantasyonu ve yüksek enerji fiziği deneyleri gibi bu tür teknolojinin olası uygulamalarından dolayı artmaktadır. Çok büyük ölçekli entegrasyon (VLSI) teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, bir transistörün minimum özellik boyutu giderek küçülmektedir; aynı zamanda, bilim adamları, esas olarak nötronların neden olduğu radyasyon etkilerinin, VLSI cihazlarında temel seviyede bile artık göz ardı edilemeyeceğinin farkına vardılar. Bu radyasyon ortamları ikinci bölümde tartışılacaktır.

Özel olarak tasarlanmış radyasyona dayanıklı ve sert teknolojiler, bu sorunlarla uzun yıllardır uğraşan ve dökümhane odaklı çözümler sunan uzay ve askeri topluluklar tarafından geliştirilmiştir. Bu çözümlerin dezavantajları, mevcut ticari teknolojilere göre pahalı olması, erişim zorluğu ve normalde birkaç nesil geriden gelmesidir (Chen, 2004).

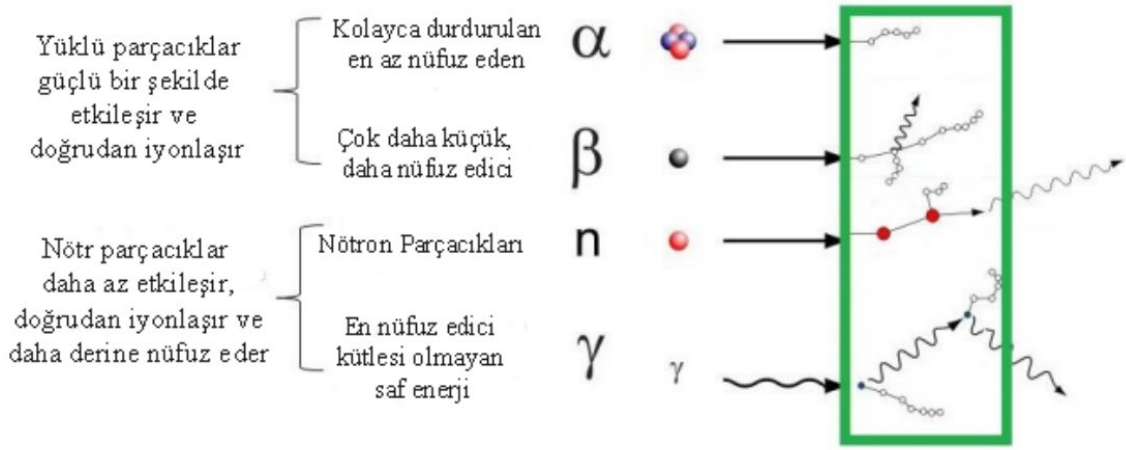
Farklı radyasyon kaynakları ve parçacıklar, madde ile etkileşime girdiklerinde etkiler üretebilir. Gelen parçacığa, enerjiye ve hedef malzemeye bağlı olarak etkiler farklı olacaktır. Parçacıklar, madde ile etkileşimine göre iki gruba ayrılabilir: yüklü parçacık ve nötr parçacık. Yüklü parçacıklar alfa parçacıkları, beta parçacıkları, ağır iyonlar ve protonlardır. Nötral parçacıklar nötronlar ve fotonlar (gama ve x -ışınları)dır. Radyasyon etkileri parçacığın türüne göre değişir: yüklü parçacıklar ve nötr veya yüklü olmayan parçacıklar. Bir yandan elektronlar gibi yüklü parçacıklar (beta parçacıkları), nötr parçacıklar, nötronlar ve protonlar, alfalar ve fisyon fragmanı iyonları gibi yüklü parçacıklar maddenin içinden geçerek doğrudan iyonizasyona neden olur. Öte yandan, fotonlar (gama ve X ışınları) ve nötronlar gibi nötr radyasyon, dolaylı olarak iyonlaşmaya neden olur. Tablo I, parçacık yükü ve iyonizasyon mekanizması dahil olmak üzere bazı radyasyon özelliklerini karşılaştırır.

Tablo I : İyonize Radyasyonun Karşılaştırılması

Karakteristik	Alfa (α)	Proton (p)	Beta (β) Elektron (e)	Foton (γ veya X -ışın)	Nötron (n)
Sembol	${}^4_2\alpha$ or He^{2+}	1_1p or H^{1+}	${}^{-1}_0e$ or β	${}^0_0\gamma$	1_0n
Yük	+2	+1	-1	Nötr	Nötr
İyonlaşma	Doğrudan	Doğrudan	Doğrudan	Dolaylı	Dolaylı

İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon arasında ayırım yapmak da önemlidir, iyonlaştırıcı radyasyonlar moleküller arasındaki bağları kırmak ve atomları

iyonize etmek için yeterli enerjiyi taşıyan radyasyonlar ve bu nedenle bunlar atomlardan elektronları uzaklaştırma ve dönüştürme yeteneğine sahiptir. Onları yüklü parçacıklara (negatif yüklü elektronlar ve pozitif yüklü iyonlar) dönüştürür. Bu etkiyi üretmek için gereken enerji, örneğin iyonlaşma enerjisinin 3,6 eV olduğu silikonda olduğu gibi tipik olarak birkaç eV'dir (Garg ve Khatri, 2009 – García ve ark., 2014). Diğer radyasyon türü, iyonlaştırıcı olmayan parçacıklar, elektronları atomlardan uzaklaştırmak için yeterli enerjiye sahip olmayanlardır. Benzer enerjiler için, daha ağır parçacıklar daha yavaştır ve maddenin içinde daha kolay durdurulurlar, bu nedenle tüm enerjilerini daha kısa bir mesafeye bırakırlar, bkz. Şekil 1.2. (Perianez, 2018)



Şekil 1.2. İyonlaştırıcı radyasyonun madde ile etkileşimi.

Geçen 30 seneyi aşkın süre içerisinde, organik ince film içeren Silisyum MIS kontaklar üzerinde yapılan çalışmalar artmakla beraber, yarıiletken teknolojisi ve MIS yapıların elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi ve bu diyotlar üzerinde gerçekleştirilen değişik radyasyon etkilerinin üzerinde araştırmalar devam etmektedir. Bu konularla ilgili olarak literatürde taranmış çalışmalara ait analizlerin ve bulguların bir kısmı aşağıda sunulmuştur.

Nahass ve ark.(2011); organik yarı iletken olan ve termal olarak buharlaştırılmış 5,10,15,20-tetrafenil-21H, 23H-porfin demir (III) klorür (FeTPPCL) ve inorganik yarı iletken olan p-Si bazlı hibrit hetero-bağlantı hücrelerini incelemiştir. Bu cihazın diyot gibi doğrultma davranışı gösterdiği rapor edildi. İletim mekanizmaları ve diyot parametreleri, sıcaklık aralığında (298-373K) akım-gerilim (I-V) özellikleri ve oda

sıcaklığında kapasitans-gerilim (C-V) özellikleri kullanılarak incelenmiştir. Bu hücrenin 2,8 mA kısa devre akımı (I_{sc}), 0,475 V açık devre voltajı (V_{oc}) ve doldurma faktörü $FF = \%32$ ile fotovoltaik özellikler sergilediğini gösterdiler.

Duman ve ark.(2014); Au/Pyronine-G/p-Si diyot yapısını çözelti işleme yöntemiyle ürettir. Diyotun akım-gerilim ve kapasitans-gerilim karakteristikleri oda sıcaklığında ölçülmüştür. Akım-voltaj karakteristiğinden doğrultucu bir davranışın ve ters yöndeki akımın beyaz ışıkla aydınlatılmasıyla arttığı görüldü. Cihazın bariyer yüksekliği, idealite faktörü ve arayüzey durum yoğunluğu gibi karakteristik parametreleri akım-gerilim ölçümlerinden belirlendi. Ayrıca akım-gerilim özelliklerini değerlendirmek için Norde yöntemi kullanıldı. Karanlık akım-voltaj karakteristiklerinden cihazın idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerleri sırasıyla 1.36 ve 0.78 eV olarak hesaplanmıştır. Au/Pyronine-G/p-Si diyot için hesaplanan bu bariyer yüksekliği değerinin, oda sıcaklığında geleneksel Au/p-Si Schottky diyotların değerinden önemli ölçüde büyük olduğu görüldü. Akım-Voltaj özelliklerinden belirlenen arayüzey durum yoğunluğunun enerji dağılımının, $1.05 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (0.74-eV) eV ile $1.19 \times 10^{12} (0.49\text{-}E_V) \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ aralığında olduğu görüldü. Au/Pyronine-G/p-Si diyot için bariyer yüksekliği ve alıcı taşıyıcı konsantrasyon değerleri 1 MHz'de kapasitans-voltaj özelliklerinin lineer bölgesinden sırasıyla 0.92 eV ve $9.35 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak çıkarılmıştır.

Yakuphanoglu ve ark.(2011); Al/p-Si/P3HT/Ag organik-inorganik diyotun elektriksel karakterizasyonu akım-gerilim, kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim yöntemleriyle yaptılar. Diyotun idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerleri akım-voltaj özelliklerinden belirlenmiş ve sırasıyla 2.32 ve 0.77 eV olarak bulunmuştur. Bu değerler ayrıca diyotun ideal olmayan davranışından dolayı Cheung fonksiyonları ve Norde metodundan da belirlenmiştir. Çeşitli yöntemlerden elde edilen elektronik parametreler, birbirleriyle iyi bir tutarlılık gösterir. Al/p-Si/P3HT/Ag organik-inorganik diyot için arayüzey durumlarının yoğunluğunun $7.64 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ olduğu bulundu. Al/p-Si/P3HT/Ag organik-on-inorganik diyotun elde edilen elektrik parametreleri geleneksel Ag/p-Si Schottky diyotlarından daha yüksektir. Bu, silikon Schottky diyotlarının elektriksel özelliklerinin organik ara yüzey katmanı kullanılarak kontrol edilebileceğini gösterir.

Çaldıran ve ark.(2015); organik moleküllerin silikon yüzeylere bağlanmasının, nano ölçekli organik-inorganik hibrit malzemelerin geliştirilmesi için çok önemli

olduğunu gösterdiler. Yaptıkları çalışmada, moleküllerin H-pasifleştirilmiş silikon (100) yüzeyine kovalent olarak bağlanması için diazonyum tuzlarının elektrogreftlemesi kullanılmıştır. Silikon elektrotların kinolin molekülleri ile modifikasyonu, yerinde üretilen diazonyum tuzlarının 6-aminokinolin'den elektrokimyasal indirgenmesi yoluyla gerçekleştirildi ve böylece bir Au/kinolin/p-Si cihazı üretildi. Biriktirilmiş cihazdan ölçülen sonuçlar, elektrokimyasal biriktirme sırasında metal/organik bir arayüzde bir arayüzey dipol oluşumu nedeniyle oda sıcaklığında daha yüksek bir bariyer yüksekliği sergiledi. Artan sıcaklıkla bariyer yüksekliği değerinin arttığı gösterilmiştir. Ek olarak, sıcaklığa bağlı idealite faktörünün iki farklı davranışı görülmüştür ve bu, kinolin'in 160 K'nin altındaki ve üzerindeki sıcaklığa tepkisine bağlanmıştır, bu nedenle arayüzeyde faz değişiminin gerçekleşmesi muhtemeldir. Bariyer yüksekliğinin bu tür bir sıcaklığa bağımlılığı, kinolin film/p-tipi silikon arayüzündeki bariyer yüksekliği homojensizliklerinden dolayı bariyer yüksekliklerinin Gauss dağılımı ile açıklanmıştır. Ortalama engel yüksekliği ve standart sapma σ değerleri sırasıyla 0.87 eV ve 0.0989 V olarak belirlendi. Ayrıca, bariyer yüksekliğinin sıcaklığa bağlı olarak belirlenmesinde Norde modeli de kullanılmış ve geleneksel $\ln(I)-V$ modeli ile Norde modeli arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Güllü ve ark.(2009); organik bir filmin p-Si yarı iletken alttaş üzerine kaplanmasıyla oluşturulmuş bir Metal(Al)/Organic ara katman (Kongo kırmızısı=CR)/Inorganik yarı iletken (p-Si) (MIS) Schottky cihazını hazırladılar. Al/CR/p-Si MIS cihazının iyi bir doğrultma davranışı gösterdiğini gördüler. Doğru beslem I-V karakteristikleri kullanılarak Al/CR/p-Si MIS cihazı için idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) sonuçları sırasıyla 1.68 ve 0.77 eV şeklinde elde edilmiştir. Al/CR/p-Si MIS cihazı için hesaplanan 0,77 eV F_b değerinin, bilinen Al/p-Si Schottky diyotların 0,50 eV'dan önemli ölçüde yüksek olduğu görüldü. Al/p-Si diyotun arayüzey potansiyel bariyerinin modifikasyonu, CR organik materyalin ince bir ara katmanı kullanılarak sağlandı. Bu, CR organik ara tabakasının Si'nin uzay yükü bölgesini etkileyerek etkin bariyer yüksekliğini arttırdığı gerçeğine bağlandı. MIS diyotunun arayüzey-durum yoğunluğunun 1.24×10^{13} ila $2.44 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ aralığında olduğunu rapor ettiler.

Özden ve ark.(2018); spin kaplama yöntemiyle üretilen organik Au/mTPP/p-Si cihazının oda sıcaklığındaki elektriksel özelliklerini I-V ve C-V ölçümleri ile araştırdılar. Cihazın doğrultma katsayısının yüksek olduğu ve akım taşınımına termiyonik emisyonun hakim olduğu belirlenmiştir. Seri direnç değeri iki farklı

yaklaşım 92 ohm olarak hesaplanmıştır. Seri direnç etkilerinin de C–V ve G–V ölçümlerinde etkili olduğu bulundu. I–V ve C–V ölçümlerinden elde edilen farklı bariyer yüksekliklerinin, olası arayüzey ve tuzak durumlarını veya bariyer homojensizliklerini gösterdiğine işaret etmişlerdir.

Güllü ve Türüt (2010); p-Si altlık üzerine organik bir film kaplayarak metal/ara katman/yarı iletken (MIS) diyotları hazırladılar. Metal(Al)/ara katman(Orange G=OG)/yarıiletken(p-Si) MIS yapısının iyi bir doğrultma davranışına sahip olduğunu gördüler. Düz beslem I–V karakteristikleri kullanılarak Al/OG/p-Si MIS diyotu için idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (BH) değerleri sırasıyla 1.73 ve 0.77 eV olarak elde edilmiştir. Al/OG/p-Si MIS diyot için hesaplanan 0,77 eV BH değerinin, bilinen Al/p-Si Schottky diyotların 0,50 eV sonucundan önemli ölçüde büyük olduğu görüldü. Al/p-Si diyotun potansiyel bariyerinin modifikasyonu, OG organik materyalinin ince ara katmanı kullanılarak sağlandı. Bu durum, OG organik ara tabakasının Si'nin uzay yükü bölgesini etkileyerek etkili bariyer yüksekliğini arttırdığı gerçeğine bağlandı. MIS diyotunun arayüzey durum yoğunluğunun 2.79×10^{13} ila $5.80 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ aralığında değiştiği görülmüştür.

Özaydın ve ark.(2013); bir bakır(II) organik kompleksinin geleneksel Au/n-Si metal-yarı iletken (MS) kontaklarının elektriksel özelliklerini kontrol edebileceğini gösterdiler. Bu çalışmada bir Cu(II) kompleksi/n-Si heteroeklem diyotunun elektronik ve fotovoltajik özellikleri araştırıldı. Diyotun idealite faktörü n ve engel yüksekliği Φ_b sırasıyla 2.22 ve 0.736 eV olarak hesaplandı. Birden büyük bir idealite faktörünün, diyotun ideal olmayan akım–voltaj davranışı sergilediğini gösterdiği rapor edilmiştir. Bu davranış, seri direncin etkisinden ve bir ara yüzey tabakasının varlığından kaynaklanır. Norde yöntemi kullanılarak seri direnç ve bariyer yüksekliği sırasıyla 6.7 k Ω ve 0.77 eV belirlendi. Cihazın, maksimum 0,24 V açık devre voltajı ve 8 mW/cm² ışık altında 1,7 μA kısa devre akımı ile fotovoltajik davranış gösterdiği bildirilmiştir.

Uslu ve ark.(2011); ⁶⁰Co (γ -ışını) ışınlamının Au/Polivinil Alkol (Ni,Zn-katkılı)/n-Si Schottky bariyer diyotlarının (SBD'ler) elektriksel ve dielektrik özelliklerine etkisi kapasitans-voltaj (CV) kullanılarak araştırılmış ve oda sıcaklığında ve 1 MHz'de iletkenlik-voltaj (Go-V) ölçümleri analiz edilmiştir. Ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m) değerlerinde seri direnç (R_s) etkisi düzeltme yoluyla elimine edilerek gerçek kapasitans ve iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp tanjant ($\tan\delta$), ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ve elektrik modülünün gerçek (M') ve sanal (M'') kısımlarının deneysel değerlerinin güçlü olduğu bulundu.

Ek olarak, ışınlama öncesi ve sonrası için yüksek-düşük frekans kapasitans ($C_{HF}-C_{LF}$) yöntemi kullanılarak arayüzey durumları (N_{ss}) profilinin yoğunluk dağılımı elde edildi. N_{ss} -V grafikleri, her iki durum için, yani radyasyon öncesi ve radyasyon sonrası olmak üzere iki farklı tepe noktası verir ve bu tepe noktaları, M/S arayüzeyinde iki farklı lokalize arayüzey durumu bölgesine karşılık gelir. Tükenme ve birikim bölgelerindeki dielektrik özelliklerdeki değişiklikler, özellikle arayüzey durumlarındaki yüklerin yeniden yapılandırılması ve yeniden düzenlenmesinden ve yüzey polarizasyonundan kaynaklanırken, birikim bölgesindekilere seri direnç etkisine neden olduğu görülmüştür.

Güllü ve ark.(2008); yaptıkları çalışmada, yüksek enerjili elektron ışınlamının bir Rhodamine-101(Rh101)/p-Si Schottky yapısının elektriksel özellikleri üzerindeki etkileri araştırmıştır. Bariyer yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi bazı kontak parametreleri akım-gerilim (I-V) özelliklerinden hesaplanmıştır. Elektron ışıması ile bu üç parametrenin arttığı görüldü. Elektron ışınlaması sonrasında ayrıca taşıyıcı konsantrasyonunun, ters beslem akımının ve cihazın kapasitansının azaldığı görülmüştür.

Karadeniz ve ark. (2021); yaptıkları çalışmada iyonize radyasyonunun organik arayüzeyli Schottky' nin biçimine nasıl bir etkisinin olduğunu incelenmiştir. Hazır edilen metal/koronen/n-Si Schottky biçimler, farklı miktarda gama radyasyonuna terk edilmiş ve bu biçimlerin ışınlamadan önceki ve sonraki durumlarının değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Malzeme olarak(Organik arayüzey tabaka olarak) koronen kullanılmıştır. Çevirme ve kaplama yöntemi ile arayüzey malzemesi, farklı kimyasal metotlarla arındırılmış olan n-tipi silisyum tabanlar üstüne ince film gibi kaplanmıştır. Biçimlerin radyasyondan önceki ve sonraki elektriksel yapılarındaki farklılıklar ışısız mekanda ve oda sıcaklığında I-V, C-V ve G-V ölçüm teknikleri ile incelenmiştir.

Güllü ve ark. (2008); bir Al/metil violet/p-Si Schottky cihazının elektrik parametrelerini, akım-gerilim ve kapasitans-gerilim-frekans ölçümlerini oda sıcaklığında γ ışıması altında kullanarak incelemiştir. Deneysel sonuçlar, γ radyasyonunun bariyer yüksekliğinde, idealite faktöründe ve arayüzey durum yoğunluğunda artışa neden olurken, uygulanan radyasyon ile seri direnç azaldığını göstermiştir.

Şahin (2014); yaptığı bu çalışmasında 50 gray ve 75 gray miktardaki X-ışını radyasyonu altında Au/Antrakınon/p-Si/Al ve Au/Piridin/p-Si/Al doğrultucu bağlantılarının I-V (Akım-Gerilim) yapıları araştırıldı. Radyasyon yayınlanmadan önceki ve sonraki I-V değerleri hesaplandı. Grafikler aracılığıyla bağlantıların idealite

faktörü, engel yüksekliği gibi değerleri bulundu. Cheung fonksiyonları sayesinde idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri bulundu. Radyasyon yayınlanmadan önce oda sıcaklığında Au/Antrakinin/p-Si/Al diyodunun idealite faktörü 1,10, engel yüksekliği 0,75 eV, 75 gray Radyasyon yayınlandıktan sonra idealite faktörü 1,33, engel yüksekliği ise 0,87 eV olarak bulundu. Benzer şekilde oda sıcaklığında Au/Piridin/p-Si/Al diyodunun idealite faktörü 1,53, engel yüksekliği 0,72 eV, 75 gray Radyasyon yayınlandıktan sonra idealite faktörü 1,70, engel yüksekliği 0,73 eV olarak bulundu. Yayılan radyasyondan dolayı engel yüksekliğinde ve idealite faktöründe fazlalaşma görüldü. Yayılan radyasyonun miktarının fazlalaşmasıyla idealite faktöründeki fazlalaşma diyotların akım iletim düzeneğinin termoiyonik emisyon kuramından yön değiştirmesiyle açıklık kazandı. Fazlalaşan radyasyon miktarıyla seri direnç değerinde de fazlalaşma görüldü. Seri dirençteki bu fazlalaşmanın nedeni mobilite ve serbest taşıyıcı derişmesinin eksilmesine yorumlandı. Fazla miktarda radyasyonun diyotlarda meydana getirdiği hasarlardan dolayı diyotların doğallığının farklılaştığı görüldü. Yani radyasyonun diyodun biçimini bozduğunu yorumlayabiliriz.

Güllü ve ark. (2007); oda sıcaklığında γ -ışınlaması altında akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-gerilim (C-V) ölçümlerini kullanarak Sn/p-Si Schottky bariyer diyotlarının (SBD'ler) elektriksel parametrelerini incelemiştir. 0.25 kGy/saat doz hızıyla γ -ışınlaması sırasında cihazlar sıfır gerilim altında tutuldu ve toplam doz aralığı 0-45 kGy idi. Işınlama sonuçları, bu cihazların düşük enerjili γ radyasyonunu tespit etmek için radyasyon sensörleri olarak uygulamalara sahip olabileceğini göstermiştir.

Aydemir (2019); bu çalışmasında ışınlama maruz kalmış PTCDA arayüzey tabakası kullanılarak Au/n-Si Schottky diyotların (SDs) aygıt formunun modern bir yaklaşımla iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bundan dolayı önce PTCDA tozları 30kGy, 60kGy ve 100kGy farklı elektron demet (E-Demet) miktarlarda ışınlanmış ve ortaya çıkan sonuçlar FTIR yöntemi ile incelenmiştir. Işınlanmış ve ışınlanmamış PTCDA tozları n-Si taban malzemesinin üstüne organik buharlaştırma yöntemi ile kaplanmıştır. Farklı miktarlarda E-Demet ile ışınlanmış ve ışınlanmamış PTCDA arayüzey tabakalı Au/PTCDA/n-Si SD'ların Akım-Gerilim (I-V) yapıları $\pm 3V$ değişkenlikle oda sıcaklığında yapılmıştır. Araçların idealite faktörü(n), Schottky engel yüksekliği (Φ_B), doğrultma oranı (DO), seri direnç (R_s) ve Şönt direnci (R_{sh}) değerleri I-V sonuçlarından faydalanarak bulunmuştur. 30 kGy ışınlanmış PTCDA arayüzey tabakalı Au/PTCDA/n-Si SD araç formunun ışınlanmamış PTCDA arayüzey tabakalı Au/PTCDA/n-Si SD'a

oranla deneyle iyi olduğu farkedilmiştir. Au/PTCDA/n-Si SD'un I-V yapılarının ışınlama ile gereğince etki ettiği ve yeterli ışınlama ile araç formunun yükseltilebileceği görölmüştür.

ınar ve ark. (2014); Ti/GaTe/p-Si kontağa 18 MeV enerjiye sahip elektron radyasyonuna maruz bırakarak bu yapının I-V karakteristiklerini kullanarak ışınlamadan önce ve sonra olmak üzere idealite faktörü değerlerini sırasıyla 1.27 ve 1.53 ve bariyer yüksekliği değerlerini ise sırasıyla 0.739 ve 0.706 eV şeklinde bildirmiştir. İdelaite faktörü ve engel yüksekliğindeki değişim elektron ışınlamasına bağlı olarak diyot arayüzeyinde meydana gelen kusurlara atfedilmiştir.

Güneş (2019); Polimetil Metakrilat (PMMA) /PbO diyot yapısı üzerinde gama radyasyonunun etkisini incelemiştir. Gama radyasyonu uygulandıktan sonra kontakların idealite faktörünün azaldığını, seri direnç değerinin ise arttığını rapor etmiştir. Bu değişmeyi gama ışınlamasının seri direnç üzerindeki etkisine ve arayüzeyde alıcı (akseptör) tipi tuzakların ortaya çıkmasına atfetti.

2. TEORİK VE KURAMSAL BİLGİLER

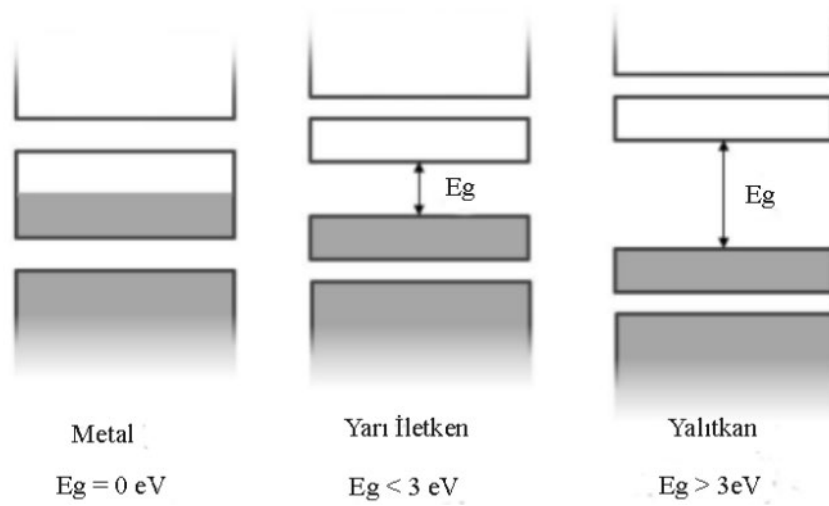
Bu bölümde, sonraki bölümlerde sunulan bulguları ve sonuçları anlamak için gerekli olacak en temel fikirlerden bazılarını gözden geçireceğiz. İlk kısımda yarıiletken ve organik malzemelerin bazı temel özellikleri anlatılacaktır. Sonraki kısımda bir metal ve bir yarıiletkenin arayüzey yapısı ile arayüzey tabakası içeren MIS/MOS yapıların elektriksel özellikleri incelenecektir. Daha sonra radyasyon ortamları ve radyasyonun madde ile etkileşmesi süreçleri anlatılacaktır.

2.1.Yarıiletken Malzemeler

Elektronik işlemlere dayalı teknolojiler, şu veya bu şekilde elektronların iletimine dayanır. Elektronik olarak aktif malzemeyi oluşturan atomların doğasına bağlı olarak, elektriksel iletkenliğin kapsamı büyük ölçüde değişir. İletkenliğe dahil olan elektronlar, aktif maddenin atomlarının en dış kabuğunda veya değerlik elektronlarında bulunur, çünkü bunlar atomların iyonik çekirdeğine en az sıkı bağlı olanlardır. Metaller en yüksek iletkenliğe sahiptir, çünkü değerlik elektronlarının belirli bir atom etrafında lokalize olmadığı, ancak kafes etrafında serbestçe hareket edebildikleri malzemeler sınıfını oluştururlar. Metaller sıkı paketlenmiş yapılarda kristalleşme eğilimindedir ve değerlik elektronları tarafından oluşturulan bağlar nispeten zayıftır, öyle ki ikincisi iletim elektronları haline gelebilir. Bir metal kristal modeli bazen içinde atomların paketlenildiği belirli kristal kafese göre pozitif yüklü iyonların düzenlendiği bir serbest elektron denizi olarak tanımlanır(Kittel, 1976).

Kuantum teorisi formalizminde, bir elektron, Schrödinger denkleminin bir çözümü olan bir dalga fonksiyonu ile tanımlanır. Bir elektronun enerjisi daha sonra kuantize edilir, dolayısıyla elektronların işgal edebileceği enerji seviyelerinin dağılımıdır. Basit serbest elektron modelinde, enerji seviyelerinin dağılımı sıfırdan sonsuza kadar süreklidir. Daha az yaklaşık bir model, kristal kafesin durumların dağılımı üzerindeki etkisini hesaba katar. Kristal kafeslerin önemli bir özelliği, içerideki dalgaların yayılmasının Bragg yansımalarından etkilenmesidir. Bu, durumların sürekli dağılımını bozar, çünkü kristaldeki elektron dalgalarının Bragg yansımaları, Schrödinger denkleminin dalga benzeri çözümlerinin mevcut olmadığı enerji bölgeleriyle sonuçlanır. Bu, 21 enerji seviyesini izin verilen dağılımdan kaldırır ve izin

verilen enerji bantlarının yasak enerji aralıkları veya bant boşlukları ile ayrılmasına neden olur(Kittel, 1976). Bu modele göre bir kristalde, bant boşluklarının en yüksek nüfuslu enerji seviyesine göre konumu elektrik iletimini belirler.



Şekil 2.1. Bir metal (solda), bir yarı iletken (ortada) ve bir yalıtkan (sağda) için izin verilen enerji bantlarının şematik elektron popülasyonu. Koyu gri bölgeler izin verilen bantlar içindeki dolu durumları temsil eder.

Katıhal fiziği, Şekil 2.1. 'de gösterildiği gibi, bant boşluklarına göre elektronik enerji seviyelerinin popülasyonuna bağlı olarak tarihsel nedenlerle tipik olarak inorganik olan malzemeleri birkaç sınıfa ayırır. Bir metalin iletkenliği yüksek çünkü izin verilen bir enerji bandı kısmen doldurulur ve bu nedenle elektronlar uygulanan bir elektrik alanına kolayca tepki verir. Aksine, bir yalıtkan için en yüksek işgal edilen enerji seviyesi, elektronların iletim bandına erişmesi için çok yüksek enerjili bir bant aralığının başlangıcına karşılık gelir. Yarı iletken kavramı, yalıtkan olan ancak yasak enerji aralığının yeterince küçük olduğu ve böylece dış uyarım elektronları değerlik bandından iletkenlik bandına ilerletebileceği ve elektriksel yönü çevirerek olan malzemelerde ortaya çıkar(Kittel, 1976).

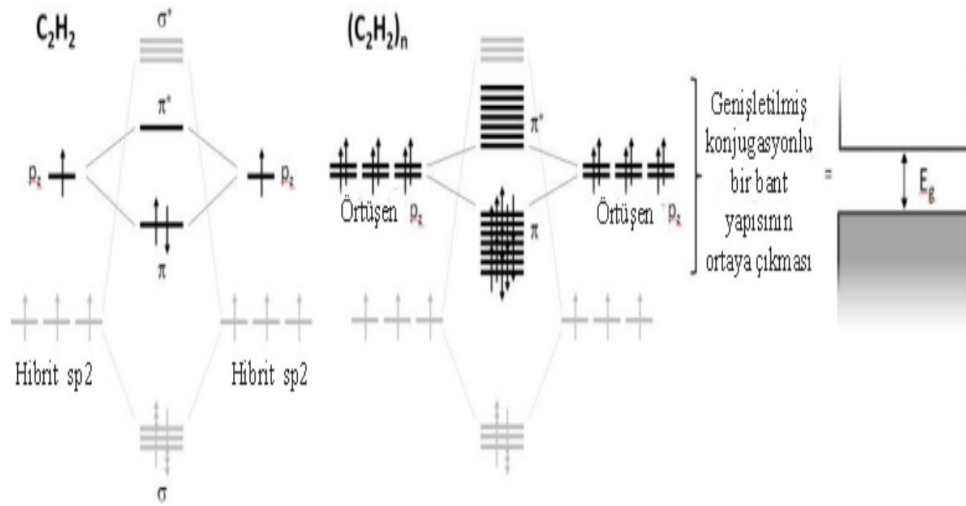
Kullanılan malzeme ne olursa olsun, yarı iletkenlerin iletkenliği, yüksek iletkenliğe sahip metallerin iletkenliğini geçmeyecektir. Bunun yerine, yarı iletkenlerin gücü, elektronun valanstan iletim bantlarına uyarılmasının fiili olayında bulunur. 298 K civarındaki sıcaklıklarda çeşitli dış uyarımlar üzerine geliş, çok çeşitli özel

uygulamalara olanak sağlamıştır. Yarıiletkenlerin formalizminin tarihsel olarak geliştirildiği ve yukarıda kısaca sunulduğu inorganik malzemelerin aksine, buradaki aktif malzeme organiktir. Organik ve inorganik malzemelerin yük taşıma özelliği arasında önemli farklar vardır ve bu nedenle bir sonraki bölüm organik yarı iletkenlerin temel farklılıklarına işaret eder. Bu, bu tez ile ilgili uygulamalarda kullanılan cihazların önemli özelliklerinin tanımlanmasına yol açacaktır. Son olarak, organik kimyagerin cihaz performansını iyileştirmek için düzenleyebileceği temel parametreler vurgulanmıştır (Stalder, 2012).

2.2.Katı Halde Organik Yarıiletkenler

2.2.1. Organik Yarıiletkenlerde Bant Analojisi

Organik yarı iletkenler esasen karbon bazlı bileşiklerdir. Karbonun 2s ve 2p orbitallerini üç farklı şekilde hibritleştirme olasılığı vardır, bu da sp , sp^2 ve sp^3 hibridizasyonu ile sonuçlanır. Bir sp^3 hibritleştirilmiş C'deki dört hibrit orbital, diğer atomlara, elektronların yüksek oranda örtüşen σ bağlarına o kadar sıkı bağlandığı ve ilgili hibrit orbitallerinin dışında serbestçe hareket edemeyecekleri bir moleküler yapıya kovalent olarak bağlanacaktır. Bir karbon sp^2 hibritlendiğinde, bir p_z orbitali değişmeden kalır, geri kalanı hibritleşir. Etilende olduğu gibi iki sp^2 karbonu bir araya getirilirse, bağlanma orbitallerindeki elektronlar, Şekil 2.2. 'de gösterildiği gibi, diğer atomlarla hala yüksek oranda örtüşen kovalent bağlar oluştururken, p_z orbitalleri, Şekil 2.2. 'de gösterildiği gibi, daha az güçlü örtüşen π bağları üretir. Etilen için (solda), en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ve en düşük boş moleküler orbital (LUMO), π orbitallerinin bağlanmasına ve karşıt bağlanmasına karşılık gelir (Stalder, 2012).



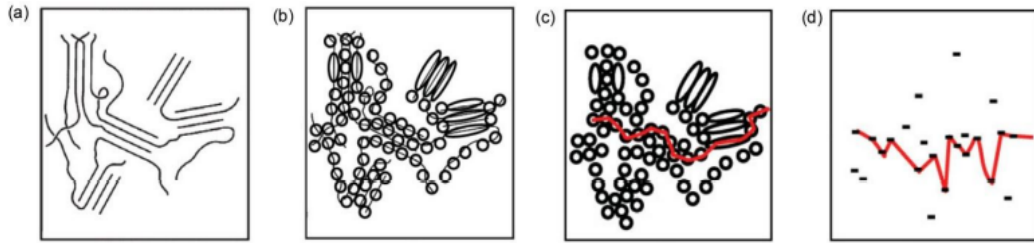
Şekil 2.2. Bir sp^2 melezleştirilmiş etilen tipi tek birimin (solda) basitleştirilmiş moleküler orbital (MO) diyagramı ve bir etilen tipi birim için bir MO diyagramının temsili (ortada) olanlar: hibritleşmemiş p_z önemli sayıda konjuge birim ile örtüşebilir, bu da konjugat polimer zincirinin enerji bandının oluşmasına yol açar.

Gittikçe daha fazla sp^2 karbonu kovalent olarak birbirine bağlandığından ve her bir p_z orbitalinin komşularıyla yeterince örtüşmesi koşuluyla, π bağları delokalize olur. Başka bir deyişle, ve Şekil 2.2. 'de (ortada) gösterildiği gibi, sp^2 karbonlardan oluşan tam bir konjuge zincirinde, hibritleştirilmiş orbitallerdeki elektronlar sonlu sayıda elektronla örtüşür, esasen sadece oluşturdukları σ bağındaki doğrudan komşuları ile, p_z orbitallerindeki elektronlar, genişletilmiş π sistemdeki diğer p_z orbitallerinin ardışıklığı üzerinde delokalize olabilir. Konjugasyon uzunluğu arttıkça, HOMO ve LUMO arasındaki enerji boşluğu elektron delokalizasyonunun bir sonucu olarak azalır. Bu, önemli bant genişliklerine sahip tek boyutlu bantlara ve HOMO ile LUMO arasında hala ayarlanmış bir bant aralığına yol açar (Şekil 2.2., sağ). Bant aralığı yeterince küçükse, tam konjuge sistem bir yarı iletkenin elektronik özelliğini sunar (Bao ve Locklin, 2007).

2.2.2. Katı Hal Organik Sistemlerinde Homojenlik Derecesi

İnorganik kristallere benzer şekilde, sp^2 hibritlenmiş karbonların σ bağları yoluyla kovalent bağlanması, π elektronlarının delokalize olması için bir iskele oluşturan sıkıca bağlı atomların düzenlenmesiyle sonuçlanır. Yine de inorganik kristallerin aksine, organik moleküller nanometre ölçeğinde sonlu boyutlardadır. Ardından, ardışık moleküller arasındaki orbital örtüşme, makroskobik ölçekte yük

taşıma derecesini belirler (Bao ve Locklin, 2007). Bu, bu tezde incelenen organik yarı iletkenler ile inorganik muadilleri arasındaki kritik bir farktır. Bu, organik malzemeler için, inorganik yarı iletkenlerle olan analojinin, yığında daha düşük bir düzen düzeyine sahip olduğu anlamına gelir. Organik katılarda yük hareketini hesaba katan farklı modeller, inorganik kristallere göre daha zor bir yük taşınmasının altını çizer. Organik ince filmlerde, genellikle bir atlama mekanizması aracılığıyla yer aldığı düşünülür: yük bir birleşik birimden sonrakine atlar (Tessler ve ark., 2009). Organik materyalin doğasına, saflığına ve morfolojisine bağlı olarak, Şekil 2.3. 'de şematik olarak gösterildiği gibi, bitişik moleküller, bitişik polimer zincirleri veya aynı polimer zincirinin parçaları arasında atlama işlemi meydana gelebilir (Tessler ve ark., 2009).



Şekil 2.3. Polimer zincirlerinin şematik açıklaması (a), konjugasyon birimlerinin yığın içindeki dağılımının gösterimi (b) ve taşınmanın hem uzayda (c) hem de enerjide (d) nasıl dağıldığının şematik tasviri. [Tessler, N. ve çalışma arkadaşları Adv. Anne. 2009, 21, 2741-2761]

Atlama, daha düzgün ve düzenli malzemelerde daha iyi yük taşınmasını gerektiren, enerji bakımından yakın olan malzemelerin durumları arasında tercih edilir. Organik yarı iletkenler, inorganik kristallere göre düzensiz ortamlar olarak kabul edilir, bu nedenle inorganik muadilleri kadar elektronik olarak homojen değildir (Şekil 2.3.d), makroskobik düzeyde enerji durumlarının geniş bir dağılımı ile sonuçlanır (Tessler ve ark., 2009). Bant aralığı kenarlarından uzaktaki enerji durumları, organik yarı iletkenlerin yük taşıma özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi olan tuzak durumları olarak kabul edilebilir (Stalder, 2012).

2.2.3 Organik Katılarda Yük Taşıyıcıların Doğası

Organik yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcıların özellikleri de inorganik yarıiletkenlerde bulunanlardan farklıdır. Yüklü türler (elektron veya boşluk) eğer yeterli enerji sağlanırsa organik yarı iletkende oluşturulur, böylece π elektronları bu enerjiyi elde edebilir ve böylece HOMO' dan LUMO' ya geçebilir. Ancak organik yarı

iletkenlerin dielektrik sabiti düşük olduğu için (Hill ve ark., 2000) üretilen elektron ve delik, elektrostatik çekim altında elektriksel olarak nötr bir çifte, eksitona bağlı kalır. Konjuge organiklerde eksiton, 0,5 eV civarında bağlanma enerjileri ile Frenkel tipindedir. Oluştugu polimer zincirinin molekülü veya segmenti üzerinde lokalizedir ve rekombinasyona duyarlı olduğundan, organik materyallerde 5 ila 10 nm' lik küçük difüzyon uzunlukları tipiktir (Shaw ve ark., 2008). Bir elektrik alanı altında yük hareketinin meydana gelmesi için, elektriksel olarak nötr eksitonun pozitif ve negatif yük taşıyıcılarına daha fazla ayrılması gerekir.

Katı inorganik kristal kafeste, yüklü bir türün oluşumu çevresini etkilemez. “Daha yumuşak” organik katılarda, üretilen yükü çevreleyen π elektron bulutlarının polarizasyonu, yükün elektronik ortamında yerel bir bozulmadan sorumludur (Silinsh ve Capek, 1994). Polaron terimi, yarattığı yerel bozulmanın eşlik ettiği yüklü bir türü belirtmek için kullanılır. Elektron-elektron korelasyonu olarak da adlandırılan elektronik polarizasyon, kafes distorsiyonunun elektron-kafes korelasyonu olarak bilinen çekirdekleri içeren bir distorsiyonun tamamlayıcısıdır (Bredas ve Street, 1985). Elektronik ve kafes evrimi arasındaki bağlantı, π elektron yoğunluğu dağılımını bütadienin üç bağının uzunluğundaki evrimle karşılaştırarak basitçe bütadien üzerinde gösterildi (Brédas ve ark., 1996). Benzer şekilde, poliaromatik konjuge zincirler, π sisteminde yük türlerinin üretilmesi üzerine temel durumdaki bükülmüş benzenoid benzeri yapılarından daha düzlemsel bir kinoit yapıya sapacaktır. Yüksek yük konsantrasyonlarında, iki polaron, bir (artan) yerel bozulma ile ilişkili bir çift aynı yük olarak tanımlanan bir bipolaron oluşturmak üzere birleşir (Bredas ve Street, 1985). Kimyasal olarak, polaronlar (bir yarının dönüşü) ve bipolaronlar (spinsiz) sırasıyla radikal katyonlara ve dikasyonlara asimile edilebilirler, ancak o zaman yerel kafes distorsiyonu kavramı kaybolur. Organik katılardaki yüklü taşıyıcıların polaronik doğası, yerel distorsiyonun yük ile birlikte hareket etmesi gerektiğinden, hareketlerinin daha fazla ataletle sahip olduğunu ima eder. Niteliksel olarak, bu inorganik eşdeğerlere kıyasla organik yarı iletkenlerde verimli yük taşınmasını engeller.

Bu dezavantaj, organik malzemelerin endüstriyel uygulamaların tasarlandığı elektronik teknolojiler alanına sunabileceği birçok avantajla iyi dengelenmiştir (Nielsen ve ark., 2010). Anorganik yarıiletkenlere kıyasla hafifliği ve mekanik dayanıklılıkları acil ancak kritiktir. Düşük maliyetli elektronik cihazların üretimi, organik yarı iletkenleri sentezlemek için gereken düşük enerji miktarı ve bunların oda sıcaklığında

çözücü kullanılarak işlenmesi sayesinde de öngörülmüştür. Yarı-boysa kaplama (Krebs ve ark., 2009), sprey döküm (Krebs ve ark., 2009- Dyer ve ark., 2011), serigrafi (Krebs ve ark., 2009) veya mürekkep püskürtmeli baskı gibi kolaylıkla temin edilebilen endüstriyel teknikler (Baeg ve ark., 2011). Daha da önemlisi, mevcut tez çerçevesinde, organik bileşiklerin özelliklerini ayarlamak için kimyagerler için güçlü sentetik araçlar mevcuttur.

2.3 Metal-Yarı İletken Arayüzeyler

Bu kısımda metal-yarı iletken arayüzeylerinin mikron altı ölçekte elektriksel özellikleri ile ilgileniyoruz. Metal/Yarıiletken arayüzeyi, tünelleme ve transport etkilerini elde etmek için kullanılan iki arayüzeyden biridir. Diğer arayüzey, kullanılan karakterizasyon aracına bağılı olarak vakum veya ortamdır. Bu nedenle, bu arayüzeyi sağlam bir şekilde anlamak gerekir. Metal-yarı iletken arayüzeyinin oluşumu (denge durumu), ön besleme gerilim altındaki davranışı (denge dışı veya yarı denge) ve standart teoriler anlatılacaktır. (Oh, 2001)

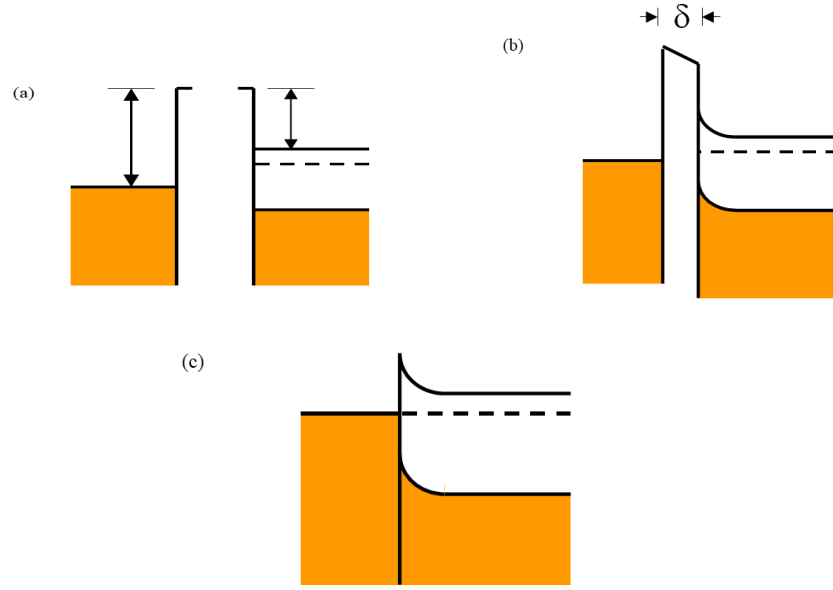
2.3.1 Schottky Bariyerinin Oluşumu

Braun'un bir metal-kontak ile bir yarıiletken arasında var olan elektriksel iletimin asimetrik yapısını ilk kez gözlemlemesi bir asırdan fazla zaman önceydi (Braun, 1874). Sonra 1931'de metal-yarı iletken arayüzünün anlaşılmasına yönelik ilk adım temasta bir tür potansiyel engel olduğunu gösteren Schottky ve iş arkadaşları tarafından çekildi. Ancak, bu arayüzün tam doğası bu tarihe kadar hala tam olarak anlaşılmamıştır.

Bir metal-yarı iletken arayüzünde Schottky bariyerinin oluşumunu tanımlarken dikkate alınması gereken iki uç durum vardır: Schottky-Mott sınırı ve Bardeen sınırı. Bu durumlardaki temel fark, yüzey durumlarının veya arayüz durumlarının rolüdür.

2.3.1.a Schottky-Mott sınırı

Schottky-Mott süreci Şekil 2.4. 'de gösterilmektedir. Her biri nötr ve birbirinden ayrılmış bir metal ve bir yarı iletkenle başlıyoruz. Metalin iş fonksiyonunun n-tipi yarı iletkenin daha büyük olduğu varsayılır. Ayrıca yarıiletkenin yüzeyinin herhangi bir yüzey durumundan arınmış olduğu, dolayısıyla bantların yüzeye kadar düz olduğu varsayılır.



Şekil 2.4. Schottky-Mott modelinde Schottky bariyer oluşumu (a) metal ve yarı iletken birbirinden izole edilmiştir, (b) dengede ve yaklaşmaktadır, (c) yakın temas.

Bir metal film bir yarı iletken yüzeyi ile yakın bir temas oluşturduğunda, yük nötrlüğü, metal ve yarı iletkenin Fermi seviyelerini hizalamak için yarı iletken metalde elektron transferini gerektirir. Sonuç olarak, metal negatif olarak yüklenir ve yarı iletken pozitif bir yük elde eder. Metal üzerindeki negatif yük, arayüzden Thomas-Fermi ekran uzunluğu ($\sim 0,5\text{\AA}$) içinde birikir. Yarıiletkenin katkı yoğunluğu metaldeki elektronların konsantrasyonundan çok daha az olduğundan, kompanse edilmemiş donörler metalden gelen negatif yükleri kompanse etmek için yarıiletkenin daha derinlerine uzanırlar ve böylece bir tükenme bölgesi oluştururlar. Bu nedenle, yarı iletkenin iletkenlik ve değerlik bantları yukarı doğru bükülür ve tarafından verilen elektronlar için bir bariyer oluşturur.

$$\Phi_B = \Phi_M - \chi_S$$

Bir p-tipi yarı iletkene metal bir temas için, tarafından verilen delik iletimi bariyerini elde etmek için benzer analizi uygulayabiliriz.

$$\Phi_B = (E_g + \chi_S) - \Phi_M$$

2.3.1.b Bardeen sınırı

Deneysel olarak ölçülen Schottky engelleri tipik olarak basit Schottky-Mott teorisini izlemez. Bazı durumlarda, SBH esasen metal iş işlevinden bağımsızdır. Bardeen'in Schottky bariyer oluşumuna yaklaşımında, yarı iletkenin bazı yüzey durumlarına sahip olduğu varsayılır. Bu yüzey durumları, malzemelere bağlı olarak bant aralığının içinde veya bant aralığının dışında bulunabilir. Bant aralığının dışında bulunan yüzey durumları bant bükülmesini etkilemez. Bant aralığı içindeki yüzey durumları iki kategoriye ayrılır. Bu kategorizasyonun yapılabilmesi için yük tarafsızlık seviyesinin (CNL) bir tanımı gereklidir.

CNL, Φ_o , bu seviyeye kadar doldurulduğunda yüzey durum bandının yükünün olmayacağı seviye olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle, eğer $\Phi_o > E_f$ ise, yüzey durumları yükleri pozitifdir ve bunun tersi de geçerlidir. Bu nedenle, Φ_o 'nun altındaki yüzey durumları donör benzeri durumlar ve Φ_o üzerindeki alıcı benzeri durumlar olarak adlandırılır. Yüzey durumları büyük durum yoğunluğuna sahipse, $\Phi_o \sim E_f$ ve yüzey Fermi seviyesi (FL) 'sabitlenmiş' olarak adlandırılır. FL sabitleme meydana geldiğinde, SBH, esasen metal işleme fonksiyonundan bağımsızdır.

2.3.1.c Yakın temas- MIGS ve Kusur durumları

Bardeen'in önceki bölümde sunulan Schottky bariyeri modeli SB oluşumunu açıklamak için arayüz durumlarını kullanır. Bununla birlikte, birçok durumda, UHV hazırlanmış metal-yarıiletken arayüzleri 'samimi'dir ve metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir katmana sahip değildir. Yakın temas oluştuğunda, metal ve yarı iletken, bir yalıtkan tabaka durumunda olduğu gibi artık birbirinden yalıtılmaz. Bu durumda aşağıdaki gibi birkaç faktör göz önünde bulundurulmalıdır:

- 1) metal ve yarı iletkenin bağ yapılarının değişmesi,
- 2) arayüzün keskinliği,
- 3) metal ve yarı iletkenin arayüzeydeki reaksiyonu,
- 4) elektron dalga fonksiyonlarının yarı iletkene uzantısı: MIGS.

Bu nedenle, bir metal-yarı iletken arayüzünün elektronik durumlarını tanımlarken tüm bu etkileri göz önünde bulundurmak gerekir. Bugün pek çok ara birimin ayrıntılı bir açıklaması elde edilmemiştir. Jellyum tabanlı model hesaplaması (Louie ve ark., 1976),

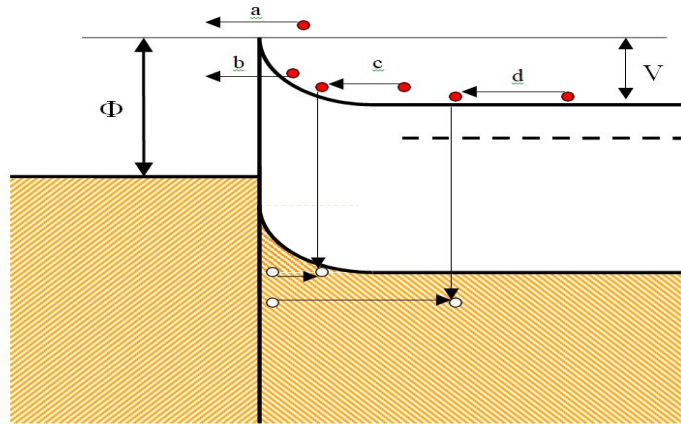
yarı iletkenin bant aralığında metal indüklenmiş boşluk durumlarının (MIGS) varlığını göstermiştir. MIGS dikkate alınarak malzeme sistemleri için SBH değerlendirildi (Louie ve ark., 1977). Si ve GaAs gibi kovalent yarı iletkenler için SBH'nin Φ_m 'ye daha az bağımlı olduğu bulundu. Hesaplama, MIGS yoğunluğunun FL sabitlemesine neden olmak için yeterince yüksek olduğunu gösterdi.

Spicer (Spicer ve ark., 1980), adımlar ve boşluklar gibi kusurların, MIGS' nin FL sabitlemesine neden olmasıyla aynı şekilde hareket edebileceğini belirterek 'Birleşik kusur modeli'ni önerdi. Ancak metal temas boyutu nanometre ölçeğine yaklaştığında kusur modelinin önemli bir etkisi olmayabilir.

2.3.2 Mevcut Taşıma Mekanizması

Schottky bariyerini araştırmak için bir yöntem olarak akım-voltaj (I-V) ölçümleri deneyini ele alıyoruz. Schottky bariyerinin oluşum sürecinden bağımsız olarak, bu ölçümden SBH ile ilgili bilgileri çıkarabiliriz.

Metal-yarıiletken ara yüzeyinde akım taşınmasında yer alan birçok taşıyıcı mekanizma vardır. Mekanizmalardan bazıları Şekil 2.5. 'de gösterilmektedir. Pratik makroskopik Schottky diyotlarında en olası süreç (a) termiyonik emisyon olarak adlandırılan bariyeri üzerinden iletimdir. Bu, SBH'nin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan standart modeldir ve biz de bu modeli bu çalışmada TiSi_2 yapılarımızın SBH'sini belirlemek için kullandık. Tünel açma gibi diğer mekanizmalar bariyer, tükenme bölgesinde rekombinasyon ve nötr bölgede rekombinasyon ayrıca gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Schottky bariyeri boyunca taşıma mekanizmaları; (a) termiyonik emisyon, (b) tünelleme, (c) tükenme bölgesinde rekombinasyon ve (d) nötr bölgede rekombinasyon ayrıca gösterilmiştir.

2.3.2.a. Termiyonik emisyon

İlk termiyonik emisyonu ele alıyoruz. Orta derecede katkılı bir yarı iletken için, bu işlem yük taşımacılığına en önemli katkıyı sağlar. Arayüzünün polarizasyonu üzerine, metal ve yarı iletkendeki Fermi seviyeleri artık hizalanmayacak ve termal olarak uyarılmış elektronlar bariyerin her iki tarafından da geçecektir. Bariyer yüksekliği yarı iletkendeki elektronlar için önyargıya göre değişir. İleri sapma için, elektronlar için bariyer azalır, böylece yarı iletkenden metale giden akım artar. Ters önyargıda, bariyer artar ve yarı iletkenden metale giden akım azalır. Bununla birlikte, metaldeki elektronlar için bariyer, her iki önyargıda da önemli ölçüde değişmez. Metalden yarı iletkene akım akışı, öngerilim voltajının polaritesinden bağımsız olarak aynı kalır. Yukarıda belirtilen mevcut akış mekanizmaları ilk olarak Bethe (Bethe, 1942) tarafından önerilmiş ve Crowell ve Sze (Crowell ve Sze, 1966) tarafından daha da rafine edilmiştir. Bu akım aşağıdaki gibi yazılır;

$$I(V)=I_s e^{\frac{qV}{nkT}} \left[1 - e^{\frac{qV}{kT}} \right] \quad (2.1)$$

burada q elektronik yüküdür, k Boltzmann sabitidir, T mutlak sıcaklıktır, V uygulanan sapmadır ve n idealite faktörüdür. Yukarıdaki denklemde I_s ile verilen doyma akımıdır.

$$I_s = A^* A T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.2)$$

burada A^* Richardson sabitidir, A diyotun alanıdır ve Φ_B bağlantının Schottky bariyer yüksekliğidir (SBH). $V > 3kT/q$ için, Denk. 2.1 olarak yeniden yazılabilir.

$$I = I_s \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (2.3)$$

ve burada incelenen yapılar için SBH ve idealite faktörünü belirlemek için bu ifadeyi kullanacağız. Ölçülen ileri I-V eğrisi, yarı logaritmik çizimde çizilir. Bu, bir sonraki doğrusal bölge eğimi ve y-kesişimini elde etmek için uygundur. İdealite faktörü ve SBH, sırasıyla lineer bölgenin eğiminden ve doyma akımından bulunur, yani;

$$\frac{1}{n} = \frac{kT}{q} \frac{d(\ln I)}{dV} \quad (2.4)$$

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A^* AT^2}{I_s}\right) \quad (2.5)$$

Bununla birlikte, yukarıdaki denklemin geçerliliği, tek tip bir SBH ile homojen bir arayüz varsayımına dayanmaktadır. (Oh, 2001)

2.3.2.b Tünel Açma (Alan emisyonu ve Termiyonik alan emisyonu)

Metal-yarı iletken akım taşınımındaki diğer önemli süreç tünellemedir. Metal-vakum tünelleme gibi, bir metal-yarıiletken arayüzünde, elektronlar, bariyer genişliği kalın olmadığında bariyerin tepesine ulaşmadan Schottky bariyerinden tünel yapabilir. Bu problem WKB yaklaşımı (Duke , 1969) kullanılarak çözülebilir. Potansiyel bariyeri tanımlamak için çoğunlukla üçgen bir bariyer düşünülür.

Elektronların Schottky bariyerinden tünellemesi Padovani (Padovani, 1971) tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Bulgularına göre, bariyerden elektronların tünellenmesi, yarıiletkenin Fermi seviyesinden metale elektronların doğrudan tünellenmesiyle (alan emisyonu) veya termal yardımla akıma katkıda bulunabilir. Öyle bir enerji elektronlar daha yüksek enerjiye uyarılacak ve daha az üçgen bariyerden (termiyonik alan emisyonu) tünel açacak. Alan emisyonu veya doğrudan tünellemenin, Fermi seviyesi iletkenlik bandı minimumunun üzerinde olacak şekilde yarı iletken yoğun katkılı olduğunda gözlemlenmesi daha olasıdır. Bu nedenle, burada ağırlıklı olarak termiyonik alan emisyonuna odaklanacağız.

Alan emisyonu ve termiyonik alan emisyonu için akım (Padovani ve Stratton, 1966) aşağıdaki gibi verilir.

$$I = I_s e^{\left(\frac{V}{E_0}\right)} \left[1 - e^{\frac{-qV}{kT}} \right] \quad (2.6)$$

burada $E_0 = E_{00} \coth(qE_{00}/kT)$ ve E_{00} şu şekilde verilir:

$$E_{00} = \frac{\hbar}{2} \left[\frac{N_D}{m^* \epsilon_s} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

burada m^* yarı iletkendeki elektronların etkin kütlesidir, ϵ_s geçirgenliktir ve N_D donör konsantrasyonudur. kT/qE_{00} oranı, termiyonik emisyon ve tünellemenin göreceli öneminin bir ölçüsüdür. E_{00} , bir Schottky bariyerinin difüzyon potansiyelidir, öyle ki enerjisi tüketim bölgesinin kenarındaki iletim bandının alt kısmı ile çakışan bir elektron için

iletim olasılığı e^{-1} e eşittir . Sırasıyla $kT \ll qE_{00}$ ise alan emisyonu, $kT \sim qE_{00}$ ise termiyonik alan emisyonu ve $kT \gg qE_{00}$ ise termiyonik emisyon bekleyebiliriz. Silikon için, $kT \sim qE_{00}$ kriteri, yani termiyonik alan emisyonu, $N_D \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ e karşılık gelir. Bu nedenle, orta derecede katkılı ($N_D \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) deneylerimizde, ne alan emisyonu ne de termiyonik alan emisyonu toplam akıma önemli bir katkı sağlamamalıdır. (Oh, 2001)

2.3.2.c Azınlık taşıyıcıları (Rekombinasyon ve Enjeksiyon)

Elektron deliği rekombinasyonu normalde yerleştirilmiş durumlar aracılığıyla gerçekleşir ve en etkili rekombinasyon merkezleri, enerjileri yasak aralığının merkezine yakın olanlardır. Schottky diyotlarındaki bu tür rekombinasyon merkezlerinden kaynaklanan akım teorisi, pn bağlantılarına benzerdir ve akım şu şekilde verilir:

$$I_r = I_{r0} \exp(qv/2kT) [1 - \exp(-qv/kT)] \quad (2.8)$$

burada $J_{r0} = qn_i w / 2\tau_r$. Burada n_i , $\exp(-qE_g/2kT)$ ile orantılı olan içsel elektron konsantrasyonudur, w , tükenme bölgesinin kalınlığıdır ve τ_r , tüketme bölgesindeki yaşam süresidir. O halde toplam akım, termiyonik akım ve rekombinasyon akımının toplamıdır. Bu ikisinin oranı doğru orantılıdır.

$$T^2 \tau_r \exp[q(E_g + V - 2\phi_B)/2kT] \quad (2.9)$$

Bu nedenle, rekombinasyon bileşenin yüksek bariyerlerde daha önemli olması muhtemeldir, düşük kullanım ömrüne sahip, düşük sıcaklıklarda ve düşük ileri sapma voltajı olan malzemeler. (Oh, 2001)

2.4. Metal-Oksit-Yarıiletken Cihazların Fiziği

Metal-oksit-yarıiletken veya MOS yapısı, modern mikroelettronikte (Pierret, 1990) en önemli ve en yaygın olarak kullanılan yapıdır. Daha genel bir tanım, MIS veya metal-yalıtkan-yarı iletkenidir. Cihazlarda ve entegre devrelerde yaygın olarak kullanıldığından, MOS yapısı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Sze ve Ng, 2007). MOS kavramı 1926'da Lilienfeld'in patentinde önerilmiş olmasına rağmen (Lilienfeld, 1930), çalışan ilk gerçek MOS cihazı 1959'da Atalla ve Kahng tarafından gösterildi (Atalla, 1959 – Kahng, 1963). Günümüzde en başarılı, ideal ve pratik MOS

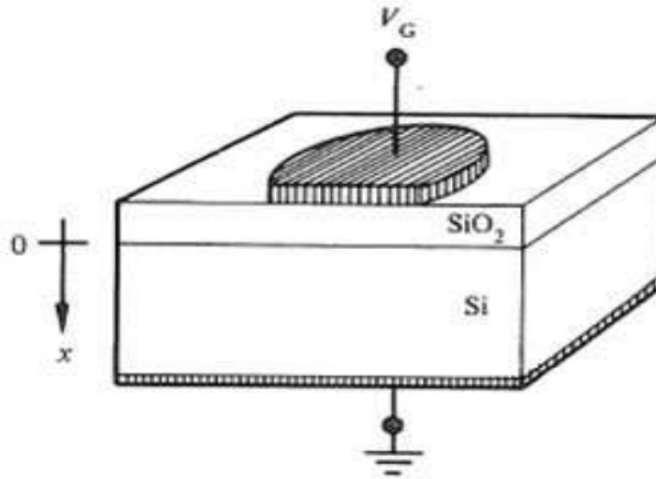
yapısı Metal-Si-SiO₂ sistemidir. Bu bölümde iki önemli MOS cihazı, MOS-Kapasitör ve MOSFET tartışılacaktır. Öncelikle ideal cihazlar ele alınacak ve gerçek cihazların elektronik özellikleri de gözden geçirilecektir (Chen, 2009).

2.4.1. MOS-Kapasitörler

MOS kapasitör, cihaz güvenilirliği ve kararlılığı için önemli olan oksit-yarı iletken yüzey çalışmasında en kullanışlı cihaz olmuştur (Sze ve Ng, 2007).

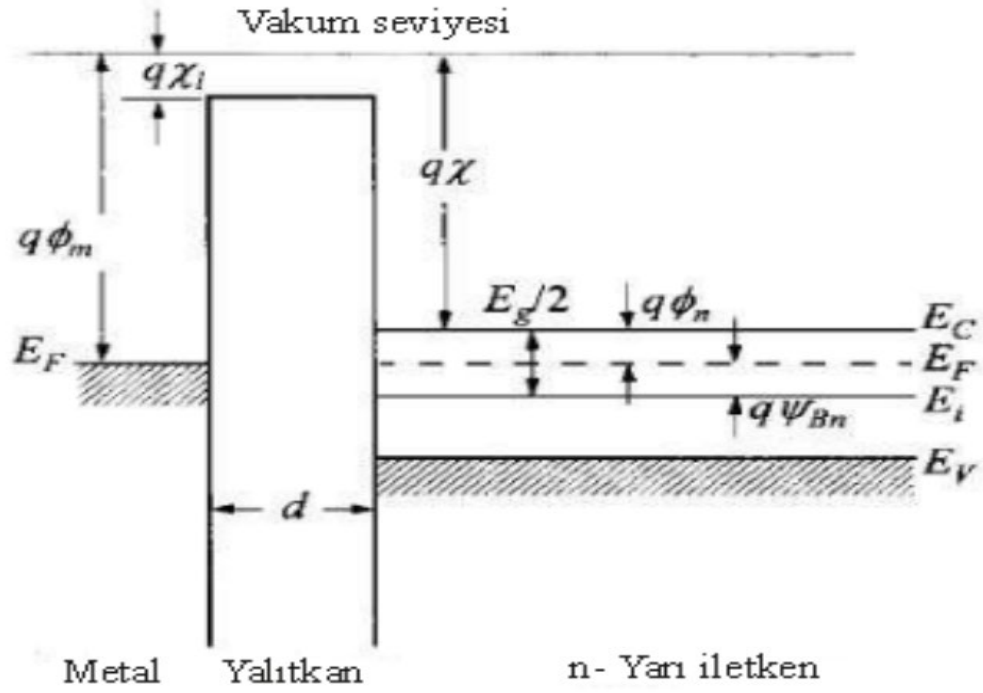
2.4.1.1. İdeal MOS Kapasitörler

MOS kapasitörler, metal bir tabaka ve bir yarı iletken tabaka ile sıkıştırılmış oksit tabakasına sahip cihazları ifade eder. Bir MOS kondansatörünün yapısı Şekil 2.6. 'da gösterilmiştir. Genellikle topraklanmış başka bir metal tabaka, düşük dirençli ohmik kontak olarak tavlancak yarı iletken malzemenin arkasına konur.



Şekil 2.6. Tipik bir Metal-Oksit-Yarı İletken kapasitör yapısı (Pierret, 1990).

İdeal bir MOS kondansatöründe oksit tabakası mükemmel bir yalıtkandır ve içinde hareketli iyonlar yoktur. Kapı metal tabakası, eş potansiyel bir yüzey olacak kadar kalın olmalıdır.

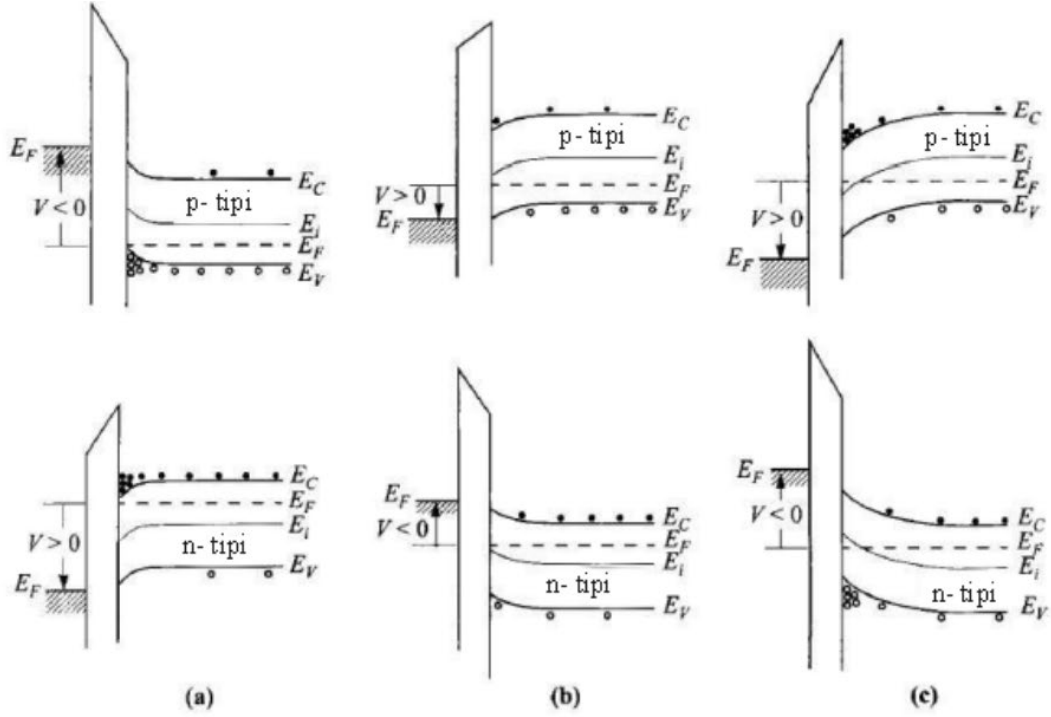


Şekil 2.7. İdeal bir MOS kapasitörünün enerji bant diyagramı

Geçit voltajı uygulanmadan, V_G , ideal bir MOS-kapasitörünün enerji bant diyagramı Şekil 2.7. 'de gösterilmiştir. Cihazın dengede olması gerektiğinden, metal tabakanın ve yarı iletkenin Fermi enerji seviyeleri hizalanmalıdır. $V_G \neq 0$ ise, iki tarafın Fermi enerji seviyeleri arasındaki ilişkiyi açıklamak için Denklem 2.10 kullanılabilir,

$$E_{F(\text{metal})} - E_{F(\text{yarıiletken})} = -qV_G \quad (2.10)$$

Denklem 2.10' dan, eğer $V_G > 0$ ise, metal tabakanın Fermi enerji seviyesi, yarıiletkeninkinden daha düşük olacaktır; $V_G < 0$ ise, metal tabakanın Fermi enerji seviyesi yarı iletkenin Fermi seviyesinden daha yüksek olacaktır. N-tipi yarı iletken malzeme için, $V_G > 0$ olduğunda, MOS-kapasitör birikim durumunda kalacak ve $V_G < 0$ olduğunda MOS-kapasitör tükenecektir. V_G belirli bir değerden düşükse, yarı iletken oksit arayüzünde delikler görünecektir. Bu duruma inversiyon durumu denir. P tipi yarı iletken malzeme için durum tam tersi olacaktır. Hem p-tipi hem de n-tipi malzemeler için üç durumun enerji bant diyagramları Şekil 2.8 'de gösterilmiştir (Chen, 2009).



Şekil 2.8. (a) Birikim, (b) tükenme ve (c) ters çevirme bölgelerindeki MOS-kapasitörlerin enerji bant diyagramları. üst sıra p tipi malzemedir ve alt sıra n tipi malzemedir (Sze ve Ng, 2007).

MOS-kapasitörlerin ayrıntılı özelliklerini anlamak için kapasitans-gerilim özellikleri elde edilir ve analiz edilir. Bir MOS kapasitörünün kapasitansı, uygulanan geçit voltajına göre değişecektir. DC geçit voltajına eklenen bir AC ölçülen voltajının frekansı, ölçülen kapasitansı da etkiler. İlk olarak, uygulanan geçit voltajının büyüklüğünü ele alıyoruz. V_G pozitif olduğunda, cihaz birikim halinde kalır, bu da elektronların oksit-yarı iletken ara yüzeyinde yarı iletkende yığıldığı anlamına gelir. Elektronlar, n-tipi bir yarı iletken çöğünluk taşıyıcıları olduklarından, gerilim değişimine hızlı tepki verebilirler. Bu nedenle, uygulanan tüm ölçülen frekanslar için elektronlar her zaman değişen AC voltajını takip edebilir. Dolayısıyla, MOS kapasitörünün birikimdeki kapasitansı, paralel plakalı bir kapasitöre eşdeğer olacaktır. Denklem 2.11 kapasitans ifadesini verir,

$$C_0 = \frac{K_0 \epsilon_0 A}{t} \quad (2.11)$$

burada K_0 oksidin dielektrik sabiti, ϵ_0 boş alanın geçirgenliği, A geçit alanı ve oksidin t kalınlığıdır. Tükenme koşulları altında $V_G < 0$, elektronlar O-S arayüzünün yakınındaki yarı iletkenin yüzey bölgesinden kaybolur. Bu bölge, genişliği ne kadar geçit voltajının uygulandığına bağlı olan, genellikle tükenme katmanı olarak adlandırılır. Tüketim katmanının karşı ucunda, elektronlar değişen geçit voltajını takip edecektir. Durum daha sonra seri bağlı iki paralel plakalı kapasitör gibi olacaktır. Paralel plakalı kapasitörlerden biri oksit tabakası, diğeri ise tükenme tabakasıdır. Denklem 2.11, oksit tabakası kapasitansı için hala geçerlidir ve tükenme tabakası kapasitansı, denklem 2.12 olarak tanımlanabilir,

$$C_s = \frac{K_s \epsilon_0 A}{W} \quad (2.12)$$

burada K_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir ve W , tükenme tabakasının genişliğidir. Cihazın toplam kapasitansı (Chen, 2009);

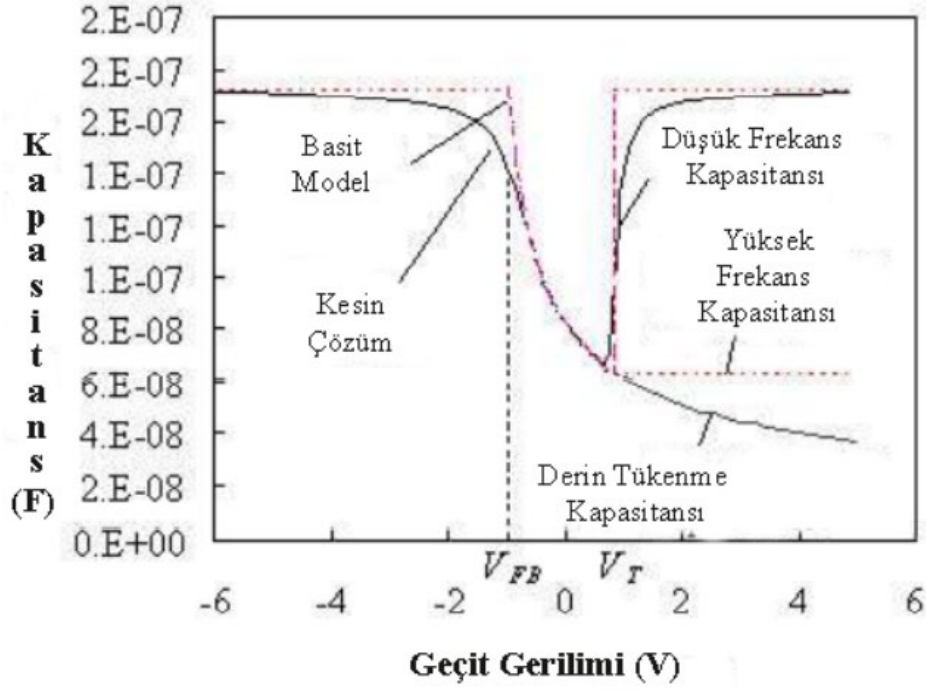
$$C = \frac{C_s C_o}{C_s + C_o} = \frac{C_o}{1 + \frac{K_0 W}{K_s t}} \quad (2.13)$$

C' nin tükenme katmanının genişliğinin bir fonksiyonu olduğunu bulmak kolaydır.

Bir n-MOS-kapasitör daha olumsuz bir şekilde önyargılı olduğunda, inversiyon durumu elde edilebilir. Bu durumda, O-S arayüzünde azınlık taşıyıcıları görünebilir. AC geçit voltajı probunun frekansı, daha sonra cihazın ölçülen kapasitansını etkileyebilir. Azınlık taşıyıcılarının yavaş tepkisi (n-tipi için delikler) nedeniyle, yüksek frekanslı geçit voltajı yalnızca tükenme katmanındaki elektronları harekete geçirirken, düşük frekanslı geçit voltajı deliklerin yanıt vermesini sağlar. Cihazın kapasitansı aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$C = \begin{cases} C_0 & , \quad w \rightarrow 0 \\ \frac{C_0}{1 + \frac{K_0 W}{K_s t}} & , \quad w \rightarrow \infty \end{cases} \quad (2.14)$$

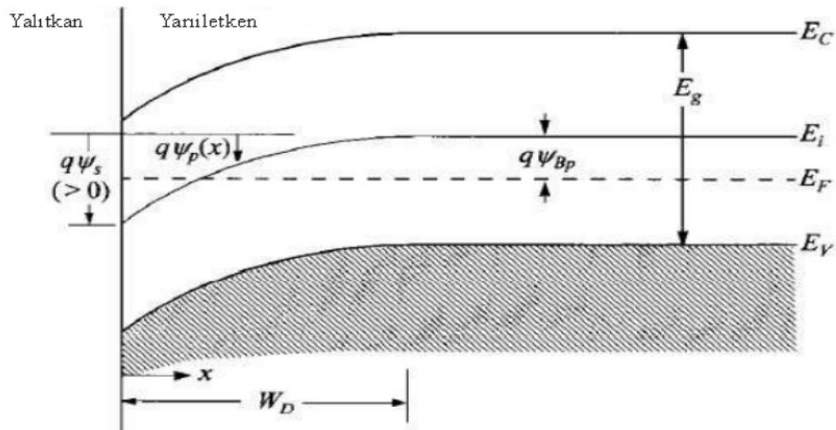
MOS kapasitörünün farklı bölgelerdeki kapasitansını açıklamak için şekil 2.9' u kullanıyoruz.



Şekil 2.9. Farklı öngerilim koşulları altında bir MOS kapasitörünün kapasitansı.

2.4.1.2. Elektrostatik Analiz

Kapı voltajlarının uygulanmasıyla enerji bantlarının nasıl büküldüğü bilgisi ile, potansiyel dağılım, yük yoğunluğu ve yarı iletken içindeki elektrik alanı arasındaki ilişkileri türetmek gerekir.



Şekil 2.10. Pozitif ön gerilim altındaki bir p-tipi yarı iletkenin enerji bant diyagramı (Sze ve Ng, 2007).

Şekil 2.10, pozitif ön gerilim altında bir p-tipi yarı iletkenin enerji bant diyagramını göstermektedir. Potansiyel ψ , x mesafesinin bir fonksiyonudur. Arayüzden uzaktaki yarı iletken yığında, $\psi = 0$. Ayrıca, 'düz bant durumunda', yüzey potansiyeli, $\psi_s = \psi(x=0) = 0$. ψ , elektronların ve deliklerin konsantrasyonları aşağıdaki denklemler olarak yazılabilir.

$$n_p = n_{p0} \exp(q\psi/kT) = n_{p0} \exp(\beta\psi) \quad (2.15)$$

$$p_p = p_{p0} \exp(-q\psi/kT) = p_{p0} \exp(-\beta\psi) \quad (2.16)$$

Bu denklemlerde, n_{p0} ve p_{p0} yığın içindeki elektronların ve deliklerin denge yoğunluklarını ve $\beta \equiv q/kT$ yi temsil eder.

Poisson denklemi yardımıyla ψ ile yük yoğunluğu arasındaki ilişkiyi tanımlayabiliriz.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = - \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \quad (2.17)$$

Yukarıdaki denklemde ϵ_s yarı iletken malzemenin geçirgenliği ve $\rho(x)$ olarak verilen yük yoğunluğudur.

$$\rho(x) = q(N_D^+ - N_A^- + p_p - n_p) \quad (2.18)$$

burada N_D^+ ve N_A^- iyonize vericilerin ve alıcıların yoğunluklarıdır. Sınır koşulları $\rho(x = \infty) = 0$ ve $\psi(x = \infty) = 0$ dir. Bu nedenle, $x = \infty$ olduğunda,

$$N_D^+ - N_A^- = n_{p0} - p_{p0} \quad (2.19)$$

Genel olarak,

$$p_p - n_p = p_{p0} \exp(-\beta\psi) - n_{p0} \exp(\beta\psi) \quad (2.20)$$

Poisson denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = - \frac{q}{\epsilon_s} [p_{p0}(e^{-\beta\psi} - 1) - n_{p0}(e^{\beta\psi} - 1)] \quad (2.21)$$

Yukarıdaki denklemi entegre edersek,

$$\int_0^{\partial\psi/\partial x} \left(\frac{\partial\psi}{\partial x} \right) d\left(\frac{\partial\psi}{\partial x} \right) = - \frac{q}{\epsilon_s} \int_0^{\psi} [p_{p0}(e^{-\beta\psi} - 1) - n_{p0}(e^{\beta\psi} - 1)] d\psi \quad (2.22)$$

elektrik alanı ile potansiyel arasındaki ilişkiyi buluruz,

$$E^2 - \left(\frac{2kT}{q}\right)^2 \left(\frac{qp_{po}\beta}{2\varepsilon_s}\right) [(e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1) + \frac{n_{po}}{p_{po}}(e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1)] \quad (2.23)$$

burada $E = \partial\psi/\partial x$. İki yeni değişken tanımlarsak:

$$L_D \equiv \sqrt{\frac{kT\varepsilon_s}{p_{po}q}} \quad (2.24)$$

ve

$$F(\beta\psi, \frac{n_{po}}{p_{po}}) \equiv [(e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1) + \frac{n_{po}}{p_{po}}(e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1)]^{1/2} \quad (2.25)$$

elektrik alan şöyle olacak:

$$E = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F(\beta\psi, \frac{n_{po}}{p_{po}}) \quad (2.26)$$

ψ işaretine bağlı olarak, E pozitif veya negatif olacaktır. Yarı iletkenin yüzeyinde, $\psi = \psi_s$, elektrik alan,

$$E_s = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F(\beta\psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}) \quad (2.27)$$

Yüzey yük yoğunluğu aşağıdaki denklem kullanılarak da elde edilebilir,

$$Q_s = -\varepsilon_s E_s = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F(\beta\psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}) \quad (2.28)$$

Elektrik alanını ve yüzey yük yoğunluğunu bilerek, yarı iletken kapasitansının ifadesini alabiliriz.

$$C_D \equiv \frac{\partial Q_s}{\partial \psi} = \frac{\psi_s}{\sqrt{2}L_D} \frac{[1 - e^{-\beta\psi_s} + \left(\frac{n_{po}}{p_{po}}\right)(e^{\beta\psi} - 1)]}{F(\beta\psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}})} \quad (2.29)$$

İlginç bir sonuç, yarı iletken düz bant durumundayken, $\psi_s = 0$, kapasitans

$$C_D = \epsilon_s / L_D \quad (2.30)$$

Yukarıdaki analizde MOS kapasitörlerinin silikon alt tabakalar üzerinde olduğu varsayımında bulunduk. SiC üzerinde üretilen MOS-kapasitörler için, silikon ile karşılaştırıldığında SiC' nin daha geniş bant aralığı nedeniyle durum biraz farklı olacaktır. SiC tabanlı MOS kapasitörlerini tanımlayan ayrıntılar bir sonraki bölümde tartışılacaktır.

2.4.2 Gerçek MOS Kapasitörler

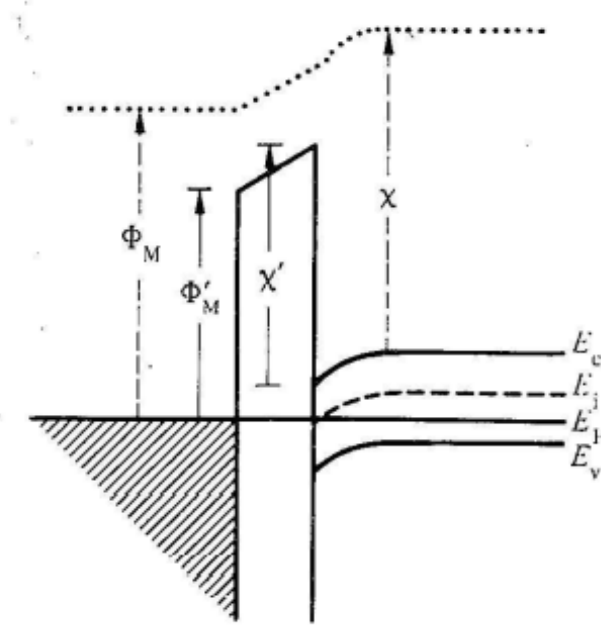
Gerçek MOS kapasitörler ile uğraşırken, yarı iletkendeki kusurlardan, O-S'deki tuzaklardan, yalıtıkandaki mobil iyonlardan ve kapı metalinin etkilerinden kaçınamayız.

2.4.2.1. İş Fonksiyonu Farkı

C-V özellikleri, ideal MOS-Kapasitörlerin elektriksel özelliklerini tanımlamak için kullanıldığından, gerçek MOS Kapasitörlerinin daha iyi anlaşılması için bu yöntem kullanılacaktır. CV ölçümlerinde, düz bant voltajı önemli bir miktardır; bu, OS arayüzündeki elektrik potansiyelini toplu yarı iletkeninkine eşit kılmak için uygulanan geçit voltajını ifade eder. Diğer bir deyişle, düz bant gerilim uygulandığında, bir bant diyagramında iletim ve değerlik bantları yataydır. Teorik olarak, düz bant gerilimi aşağıdaki denklemlerle basitçe ifade edilebilir.

$$V_{fb} = \phi_{ms} - \frac{1}{C_{ox}} [Q_F + \gamma_m Q_{MI} + Q_{IT}] \quad (2.31)$$

burada V_{fb} düz bant voltajıdır, ϕ_{ms} geçit metali ile yarıiletken arasındaki iş-fonksiyonu farkıdır, C_{ox} yalıtkanın oksit kapasitansı, Q_F yalıtkan tarafında işletim sistemi arabiriminin yanında bulunan pozitif sabit yük, Q_{MI} yalıtıkandaki mobil iyon yükü, M-O ve O-S arayüzlerinde MIS için sırasıyla 0 ile 1 arasında değişen γ_m saf sayı ve Q_{IT} arayüz tuzaklarında bulunan yükler.



Şekil 2.11. Düz bant durumunda gerçek bir MOS kapasitörünün enerji bant diyagramı (Pierret, 1990).

İdeal cihazlar için yalıtkan tabakası temiz, arayüz kalitesi mükemmel ve geçit metali ile yarı iletkenin çalışma fonksiyonları aynıdır. Bu nedenle düz bant voltajı 0' a eşit olacaktır. Ancak gerçek MOS-Kapasitörler için durum farklı olacaktır. Öncelikle, $\phi_{ms} \neq 0$, çünkü Fermi seviyelerinin yarı iletken ve metal dengede bir cihazda hizalanmalıdır. Yarı iletkenin Fermi seviyesi dopinge bağlıdır ve metal ile aynı seviyede olması pek olası değildir. Bu, metalin Fermi seviyesinin kaymasına ve yarı iletkenin enerji bandı bükülmesine yol açacaktır. Şekil 2.11, gerçek MOS-Kapasitörlerdeki çalışma fonksiyonu farkını açıklar (Chen, 2009).

2.4.2.2. Oksit Yükleri

Cihazda bulunan yükleri dikkate almazsak, düz bant durumunda geçit voltajı ϕ_{ms} eşit olacaktır. Ancak yükler gerçek cihazlarda en önemli konulardır. Örneğin, mobil iyonlar, yarı iletken aygıtların imalatında sıklıkla kullanılır. En sık görülen mobil iyonlar, operatörlerin veya imalat sürecinde kullanılan malzemelerin ellerinden verilen sodyum iyonlarıdır. Mobil iyonlar tarafından üretilen ciddi bir sorun, düz bant voltajının yüksek sıcaklıkta elektriksel sapma altında önemli ölçüde kaymasıdır. Düz bant voltajının kayması ve oksit kapasitansı biliniyorsa, denklem 2.15 'den hareketli iyon konsantrasyonu hesaplanabilir. Çoğu yarı iletken cihazın 150°C' ye kadar yüksek

sıcaklıklarda çalışması gerekir ve yalıtıkta bulunan mobil iyonlar, bir cihazın çalışma voltajını değiştirir ve bu da kararsız çalışmaya yol açar. Mobil iyon problemini çözmek için birçok yöntem vardır. Fosfor stabilizasyon yönteminde (Kerr ve ark., 1964) oksit tabakasının yüzeyi infüze edilmiş fosfordur. Yüksek sıcaklıkta ısıtılan oksitteki hareketli iyonlar her yere hareket edecektir. Fosfor tabakasına girdikten sonra sıkışıp kalırlar ve hareketsiz hale gelirler. Benzer bir yaklaşım, koruyucu katmanlar olarak ince alümina katmanları ve ince MoS₂ filmleri kullanan Miremedi (Miremedi ve ark., 1996) tarafından da kullanıldı.

Başka bir yöntem, klor nötralizasyonu (Kriegler ve ark., 1972) olarak adlandırılan oksit büyüme odasına HCl, Cl₂ veya TCE biçiminde az miktarda klor verilmesidir. O-S arayüzünde yeni bir malzeme klorosiloksan üretilecektir. Oksit tabakasındaki hareketli iyonlar yeni malzemeye doğru hareket edecek ve hapsolacaktır. Klorosioksanın MOS cihazlarının elektriksel özellikleri üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı rapor edilmiştir.

Hareketli iyonların yanı sıra başka tür oksit yükleri de mevcuttur. Hareketli iyonların aksine, bu yükler önyargı ve sıcaklıkla hareket etmezler, bunun yerine O-S arayüzüne çok yakın dururlar. Bu kararlılık özelliğinden dolayı genellikle sabit oksit yükleri olarak adlandırılırlar. Deneysel olarak bulunmuştur, sabit oksit yüklerinin fabrikasyon ortamının iyileştirilmesi ile kaybolmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca sabit oksit yükleri, yarı iletken yüzey yönüne ve kullanılan sıcaklık ve gaz gibi oksit koşullarına bağlıdır ancak oksitin kalınlığına, yarı iletken katkı konsantrasyonuna veya katkı tipine (Pierret, 1990) değil. Genel olarak konuşursak, sabit oksit yükleri silikon bazlı oksitte pozitifdir ve oksitlenmemiş silikon atomlarından kaynaklandığına inanılır. Bu bilgilere dayanarak, insanlar sabit oksit yükü konsantrasyonunu azaltmak için oksidasyon sonrası tavlamaı kullandılar. Denklem 2.31, düz bant gerilimini etkileyen bir terime daha sahiptir, bu da arayüz tuzağı yükü, Q_{IT} . Bununla birlikte, arayüz tuzak yoğunluğu, insanların yarı iletken ve oksidin ara yüzünün kalitesini tanımlamak için daha sık kullandıkları bir terimdir. Bir MOS cihazının kendine özgü bir özelliği olarak, arabirim tuzak yoğunluğu, tüm cihazın çalışma verimliliğinde çok önemli bir rol oynar. Sonuç olarak, çok geniş çapta çalışılmış, arayüz tuzak yoğunluğunu azaltarak arayüz kalitesini (Lu ve ark., 2003 – Lai ve ark., 2005) iyileştirmek için birçok yaklaşım önerilmiştir. Şu anda, Si/SiO₂ için arayüz tuzak yoğunluğu $10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ civarındayken, 4H-SiC/SiO₂ için yoğunluk en iyi ihtimalle $10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ dir.

2.5. Yarıiletken Aygıtların Modifikasyonu İçin Radyasyon Teknolojilerinin Uygulanması

Radyasyon, hem yeryüzünde hem de uzayda farklı alanlarda kullanılan yarıiletken cihazların ve elektronik devrelerin özelliklerini değiştirebilir. Bunun nedeni, bir radyasyon ortamının, nükleer santrallerde kullanıldığı gibi elektronik bileşenlerin, tıpta, bilimde ve endüstride kullanılan nükleer teknolojiye dayalı parçacık hızlandırıcılardan ve diğer ekipmanlardan belirli parametreler üzerindeki belirli etkileri olabilir. Doğal olarak oluşan radyoaktif elementlerin ve kozmik ışınların varlığı nedeniyle karasal bir radyasyon ortamı mevcuttur. Elektronik cihazlar bir radyasyon ortamına maruz kaldıktan sonra akım kaçağı artabilir veya eşik voltajı değişebilir. Genel olarak, elektronik cihazların yarı iletkenleri ve yalıtım malzemeleri belirli maruz kalma koşulları altında bozulabilir veya hatta zarar görebilir. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan yarı iletken cihazların güvenilirliği önemli ölçüde etkilenebilir. Bu artık daha önemli çünkü elektronik cihazlar artık çok daha küçük ve daha karmaşık (Zimek, 2017).

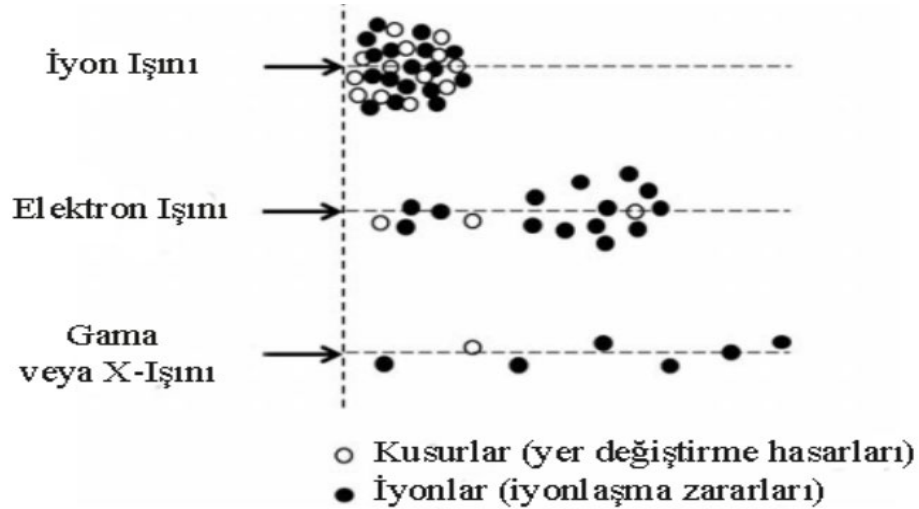
Işınlamanın elektronik malzemeler üzerindeki başlıca sonucu, bu malzemelerden yapılan elektronik cihazların işleyişini bozabilecek malzemelerin radyasyon kaynaklı etkileridir (hasarlar). Bu etkiler hem ışınlanan malzemenin özellikleri hem de ışınlamanın türü ile ilgilidir. Araştırmalar, elektronik cihazların sertleştirilmesi ve radyasyon ortamlarında operasyonlarının iyileştirilmesi ile ilgili yeni yöntemlerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Radyasyon kaynaklı etkiler, yarı iletken malzemelerin amaçlanan modifikasyonu ve nihai ürünün özellikleri için elektronik cihazların üretiminde de kullanılabilir. (Zimek, 2017)

İyonlaştırıcı radyasyon için farklı kaynaklar vardır. Bazıları doğada, bazıları ise insan yapımıdır. İyonlaştırıcı radyasyon, fotonlar (gama ışınlarının ve X ışınlarının elektromanyetik kuantumları) veya parçacık ışınları (elektron, iyon veya nötron ışınları) olabilir. Hızlandırılmış elektronlar ve iyonlar, X-ışını ışınları ve termal nötronlar, farklı ekipman türleri tarafından üretilir ve endüstriyel ölçekte yarı iletken malzeme özelliklerinin değiştirilmesi için kullanılır. Dünya çapındaki yarı iletken pazarının 147 milyar ABD Doları olduğu tahmin edilmektedir ve bunun yaklaşık %45'i ABD ve Japonya tarafından paylaşılmaktadır (Tagawa ve ark., 2002).

2.5.1. Elektronik Cihazlarda İyonlaştırıcı Radyasyona Bağlı Etkiler

Hızlandırılmış elektronlar, iyon ışınları, X-ışınları, kozmik ışınlar ve gama ışınları, daha sonra emici malzemedeki diğer atomları iyonize edebilen atomik elektronları çıkararak enerjilerini aktarır. Radyasyon kaynaklı etkiler, öncelikle soğurulan doza ve yarı iletken malzeme tipine bağlıdır ve radyasyon tipine daha az bağlıdır. Silikon kristallerinin yüksek enerjili parçacıklar veya gama ışınları veya X-ışını ile ışınlanması, elektron deliği çiftlerinin (geçici bir hasar olarak kabul edilebilecek iyonizasyon) ve kristal kafeste çeşitli kusurların (yer değiştirme hasarı) oluşmasıyla sonuçlanır ve kalıcı olarak kabul edilebilir (Zimek, 2017).

Şekil 2.12. ışınlanmış bir yarı iletken malzemedeki elektron, iyon ve foton ışınları için radyasyon yollarını göstermektedir. Ağır yüklü parçacıklar (iyon ışınları) küçük adımlarla enerji kaybeder. İyi tanımlanmış kısa giriş aralığı iyon enerjisine ve hedef malzeme özelliklerine bağlıdır. İyon ışınları sık sık atomik yer değiştirmelere neden olabilir, oysa elektronlar sadece bir kısmını üretebilir.



Şekil 2.12. Işınlanmış bir yarı iletken malzemede elektron ve iyon ışınlarının ve gama ışınlarının ve X ışınlarının radyasyon yolları.

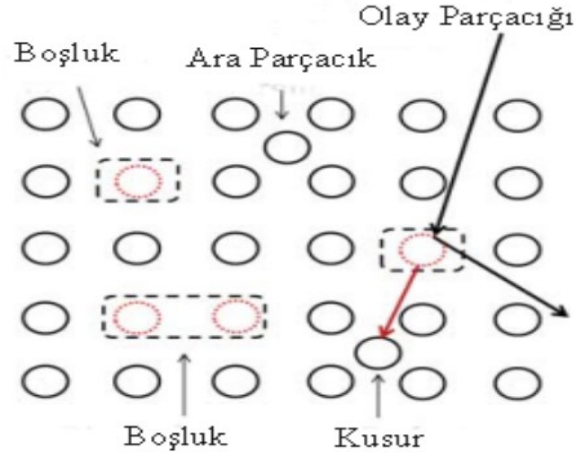
Gama ışınları ve X ışınları, Compton etkisi yoluyla nadir atom yer değiştirmeleri üretebilir. İyon ışınları, belirli elektronik cihazlar için ışınlanmış yarı iletken malzemeye yabancı maddelerin katılması ve ayrıca son teknoloji entegre devre üretimi için alt tabakalara katkı maddelerinin katılması için de kullanılabilir. İyon implantasyonunun

başlıca avantajları şunlardır: düşük sıcaklıkta bir işlem, hassas doz, giriş derinliği kontrolü, ince yalıtım katmanları yoluyla olası implantasyon ve kısa işlem süresi.

Yarı iletken ışınlamanın kümülatif etkileri, cihazın tüm ömrü boyunca maruz kalması sırasında meydana gelebilir veya ışınlama, üretim sürecinde amaçlanan bir adım olabilir. İlk durumda, radyasyon seviyesi tolerans sınırlarına ulaştıysa, ışınlama yarı iletken cihazın hasar görmesine neden olabilir. Bu tür bir arızanın hassasiyeti aynı zamanda yarı iletken cihazın tipine ve yapısına da bağlıdır. Birkaç başka parametre de önemlidir: sıcaklık, doz hızı, cihaz polaritesi, yüzey dopingi ve radyasyon tipi. Bazı özel durumlarda, tek bir parçacığın enerji depolamasının neden olduğu tek bir olay, cihazın çalışmasında feci şekilde başarısızlığa da yol açabilir. Doz etkileri, ışınlanmış malzemede (doz seviyesi) biriken enerji ile ilişkili olarak değerlendirilebilir. Işınlanmış bir malzemede soğurulan enerji kapana kısıldıkları bir yere yayılan veya sürüklenen yük taşıyıcılarını serbest bırakır. Genel olarak, bu istenmeyen yük konsantrasyonlarına yol açar ve sonuç olarak parazitik elektronik alanlar oluşturur (Zimek, 2017).

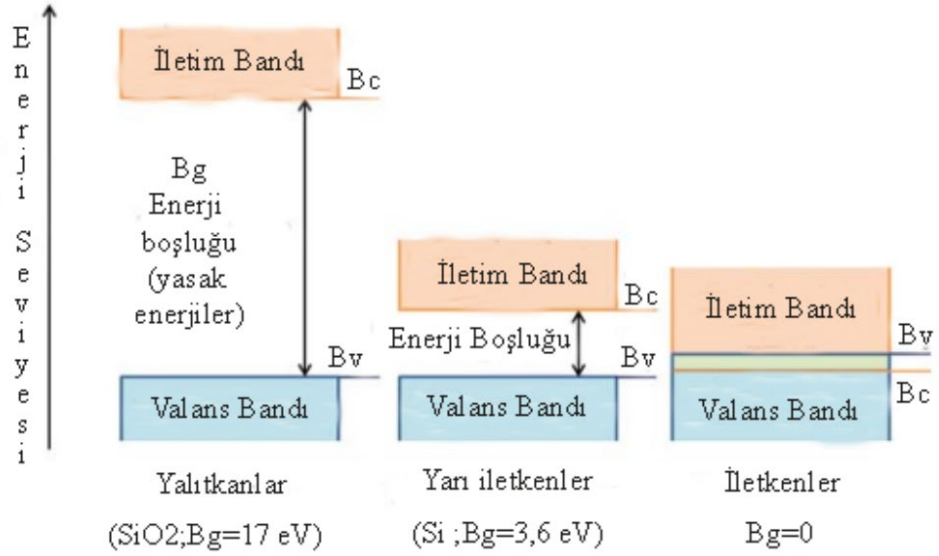
Yer değiştirme hasarları genellikle parçacık akışı (parçacıklar/cm²) cinsinden tanımlanır. Bir atomun normal kafes konumundan çıkarılmasından esnek bir çarpışma sorumlu olabilir. Yer değiştirme hasarları, kafes atomlarına aktarılan enerjiye bağlıdır. Yer değiştirmeler, parçacıkların türlerine ve parçacığın kinetik enerjisine özeldir. Birincil vuruntu atomu, durmadan önce bir dizi atomik yer değiştirmeye neden olabilir. Yarıiletken kafes kuvvetlerinin üstesinden gelmek ve atomun orijinal konumundan bir atomik mesafeden daha fazla hareket etmesine izin vermek için belirli seviyelerde yer değiştirme enerjisine ihtiyaç vardır. Yarı iletkenlerde bir atom yer değiştirmesi için eşik enerjisi : Ge için 27.5 eV ve Si için 25 eV' dir.

Yarı iletken bir malzemenin kristal yapısı, ışınlama işlemi sırasında meydana gelebilecek esnek olmayan ve elastik çarpışmalarla değiştirilebilir. Şekil 2.13, orijinal kristal konumlarından olası atom yer değiştirmelerini göstermektedir. Yer değiştirmiş bir atom bir geçiş reklamı olur, bu nedenle önceki konumuna boşluk denir. Yer değiştirmiş atomlar (ara reklam) ve boşluklara Frenkel çifti denir. Boşluklar ve geçiş reklamları yeterince yüksek sıcaklıklarda hareketlidir ve yeniden birleştirme ile tavlanabilir. Hasarlar, yük taşıyıcı donörler ve tuzaklar olarak hizmet edebilir. Yer değiştirme kusurları, yarı iletken bağlantılarda iletim ve iletim olmayan durumlar arasındaki geçiş için gereken zaman aralığının azaltılmasında önemli bir rol oynar. Bir yarı iletken malzemede yer değiştirme etkilerinin varlığı, taşıyıcı ömrünün azalmasıyla ilgilidir (Zimek, 2017).



Şekil 2.13. Atom yer değiştirmesinin yarattığı kusurlar.

Yer değiştirme hasarları, elektronların valanstan iletim bandına geçişine yardımcı olan tuzak seviyeleri yaratır. Bu, ters taraflı akımın artmasına neden olur. İleri yönlü akım durumunda, tuzak seviyesi, akımı azaltan elektronların ve deliklerin rekombinasyonuna yardımcı olur. Valans veya iletken banda yakın olan tuzaklar, yükleri (elektronlar ve delikler) yakalayabilir ve belirli bir süre sonra serbest bırakabilir. Bu, vericilerin ve alıcıların yoğunluk farklılıklarına yol açar. İyonizasyon, nötr bir atomdan bir elektron çıkararak veya bir elektron ekleyerek iyon üretimine yol açan bir süreçtir. İyonizasyonun temel sonucu, ışınlanmış bir malzeme içinde elektron deliği çiftlerinin oluşmasıdır. Enerji seviyelerinin özel konfigürasyonu nedeniyle, metallerde, yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda radyasyonun neden olduğu etkiler, Şekil 2.14 'te gösterildiği gibi oldukça farklıdır.



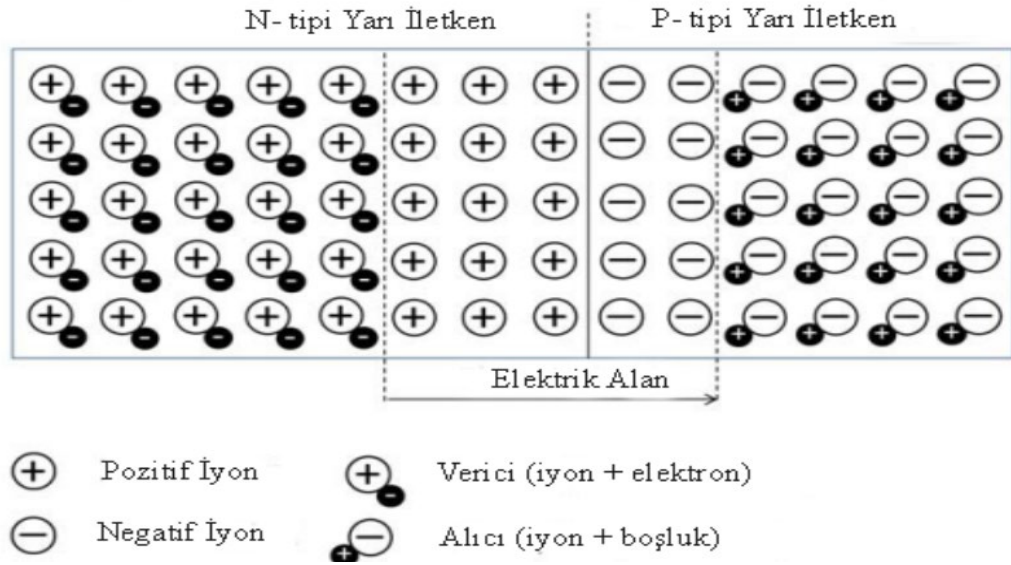
Şekil 2.14. Yalıtkanlar, yarı iletkenler ve iletkenler için enerji bant diyagramları.

Işınlanmış yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda oldukça farklı bir durum gözlemlenebilir. Yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda değerlik bandı elektronlarla doldurulur, iletken bant ise boştur. Değerlik bandından çok sayıda elektron, ışınlama nedeniyle iletim bandına uyarılabilir. Değerlik bandında zaman boşlukları üretilir. Işınlama elektron deliği çiftleri oluşturur. Elektron deliği çifti üretim enerjisi, Ge için 2,8 eV ve Si yarı iletkenler için 3,6 eV' dir. İletim bandından elektronların değerlik bandındaki boşluklarla doğrudan rekombinasyonu gerçekleşmeyeceğinden, elektronlar ışınlanmış malzeme boyunca sürüklenmekte serbesttirler. İletim bandına aktarılan elektronlar, yarı iletkenin elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde artırabilir. Bu nedenle iyonlaştırıcı radyasyon, yarı iletken cihazların belirli elektrik parametrelerini değiştirebilir, ancak aynı zamanda aşırı durumda performanslarını bozabilir ve sonunda bileşenin veya bir sistemin bozulmasına yol açabilir (Zimek, 2017).

Bazı yarı iletken cihazlar radyasyonun neden olduğu iyonizasyon etkilerine karşı daha hassastır; bazıları baskın radyasyon yer değiştirme hasarından etkilenir. Kalıcı radyasyon hasarı, MOSFET (metal-oksit-yarı iletken alan etkili transistör) cihazlarındaki geçit oksit izolasyonu gibi sadece dielektrik katmanlarda gözlemlenebilir. Yarı iletken malzemede bir elektrik alanı mevcut olduğunda, kusur çiftlerinin bir kısmı yeniden birleşmez. Hem elektronlar hem de delikler elektrik alanında sürüklenmeye başlar. Delikler, malzemenin içindeki kusur merkezlerinde sıkışabilirken, çok daha yüksek hareketliliğe sahip elektronlar malzemeyi kolayca terk edebilir. Aşırı

durumlarda, şarj oluşumu ve arızalı aktivasyon elektronik cihazın bozulmasına neden olabilir. Elektrik alanı yoksa, yeniden birleştirme nedeniyle dengesiz yükler ortadan kalkar. Yeniden birleştirme işlemi, taşıyıcı ömrüne bağlıdır ve malzeme bozulmasına yol açmaz. n-tipi yarı iletkenler, elektronların hareketiyle yapılan elektrik iletimi ile karakterize edilir; p-tipi yarı iletkenlerde ise elektrik iletimi esas olarak pozitif deliklerin hareketinden kaynaklanır. n-tipi yarı iletkenlerde taşıyıcıların çoğu elektronlardır. P tipi yarı iletkenlerde taşıyıcılar pozitif yüklü deliklerdir. Taşıyıcıların azınlığı, akımın daha az kısmını bir yarı iletkende taşımaktan sorumludur. Bir pn bağlantısı durumunda, elektrik alanı elektronları ve delikleri ayırır. Bu, geçici şarja yol açar (Zimek, 2017).

Yarı iletken kontaklar, diyotların ve transistörlerin ve entegre devreler gibi daha karmaşık cihazların temel bileşenleridir. Şekil 2.15' te gösterildiği gibi, taşıyıcıların çoğunluğunun delikler olduğu p-tipi yarı iletkenlerden ve taşıyıcıların çoğunluğunun elektron olduğu n-tipi yarı iletkenlerden anlaşılmaktadır. Yük taşıyıcıların kontakların bir tarafından diğerine difüzyonuna izin veren p ve n tipi yarı iletkenler arasındaki doğrudan temas ile bir yarı iletken bağlantı oluşturulur.



Şekil 2.15. Yarı iletken bağlantı yapısı

Bu şekilde, elektronların bir kısmı n- tipi yarı iletkenlerden p tipi yarı iletkenlere aktarılır; oysa n-tipi yarı iletkenlerdeki delikler bağlantının aynı tarafında yer alır. Böylece, dahili bir elektrostatik elektrik alanının görünümünü gösteren dar pozitif ve negatif yük bariyerleri oluşur. Pilin polaritesi, elektronların diyottan akmasına izin

verecek şekilde olduğunda, diyotun ileri yönlü olduğu söylenir. Tersine, pil "geri" olduğunda ve diyot akımı engellediğinde, diyotun ters taraflı olduğu söylenir. Bir diyot, bir anahtar gibi düşünülebilir: ileri yönlü olduğunda "kapalı" ve ters yönlü olduğunda "açık" (Zimek, 2017).

2.5.2. Radyasyon ve radyoaktif bozunma

Radyoaktif izotoplar veya kısaca radyoizotoplar, nötron eksikliği veya fazlalığı nedeniyle çekirdekleri kararsız olan temel izotoplardır. Bu kararsızlık, beta parçacıkları, alfa parçacıkları veya gama ışınları şeklinde olabilen kendiliğinden nükleer bozunmalarla sonuçlanır. Bu bozunmalar, karasal uygulamalarda kullanılan elektronik cihazlar için radyasyona maruz kalmanın birincil kaynağıdır. Bir radyoizotopun bozunma hızı, mevcut radyonüklid sayısı, N ve bozunma olasılığı, λ ile orantılıdır:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.32)$$

Aktiviteyi kullanarak, $A_0 \equiv N_0 \lambda$, burada N_0 başlangıç radyonüklid sayısıdır, bir radyoizotop örneğinin aktivitesi zamanın bir fonksiyonu olarak şu şekilde verilir:

$$A = A_0 \exp(-\lambda t) \quad (2.33)$$

Yaygın olarak kullanılan bir aktivite birimi, saniyede 37 milyar bozunmaya eşit olan Curie' dir (Ci). Bir radyoizotopun yaşam süresini karakterize etmek için kullanılan parametre, yarı ömrüdür, $t_{1/2} = \ln(2)/\lambda$, verilen bir örneğin yarısının bozunması için geçen süreye karşılık gelir.

Beta parçacığı, nötron bozunması anında oluşturulan ve radyoizotopun çekirdeğinden yayılan yüksek enerjili bir elektrondur. Nötron bozunmasında kaybedilen enerjinin bir kısmı, antinötrino adı verilen ikinci bir atom altı parçacığa da aktarılabilir. Antinötrinolar, madde ile zayıf etkileşime giren nötr parçacıklardır ve bu nedenle madde üzerindeki etkileri genellikle göz ardı edilir. İki parçacık arasındaki enerjinin bölünmesi, neredeyse sıfırdan radyonüklide özgü bir maksimum enerjiye kadar sürekli bir dağılım üzerinde değişen enerjilerle beta parçacıklarının yayılmasına neden olur. Tek bir beta parçacığı emisyonunun maksimum enerjisi, ana ve yavru atom arasındaki durgun enerjilerdeki farka eşittir ($E_{\beta, \max} = m_p c^2 - m_d c^2 - m_e c^2$). Momentumu korumak için, kütlesi çekirdeğinkinden çok daha küçük olduğu için bu enerjinin çoğu beta parçacığına aktarılır. Elektrik yükünün korunumu yasasına uyarak, daha önce nötr olan nötron pozitif bir yük alır ve böylece evlat atomu ana atomdan bir daha büyük bir atom

numarasıyla bırakan bir proton oluşturur. Bazı radyoizotoplar için, yayılan beta parçacığının maksimum enerjisi 1 MeV' yi aşabilir, ancak çoğu maksimum enerji emisyonu <500 keV' dir (Cress, 2008).

Alfa parçacığı, bir radyoizotopun çekirdeğinden yayılan yüksek enerjili bir parçacıktır ve iki proton ve iki nötrondan (çift iyonize helyum atomu) oluşur. Emisyonun enerjisi yaklaşık olarak ana atomun durgun enerjisinden çıkarılırsa hem yavru atomun hem de alfa parçacığının kalan enerjilerine eşittir. Yine, bu enerjinin çoğu, kütlelerdeki eşitsizlik nedeniyle alfa parçacığına aktarılır. Sonuç olarak, belirli bir radyoizotop için alfa parçacığı bozunması başına enerji neredeyse sabittir; ancak yayılan parçacığın açısal momentumuna bağlı olarak farklı emisyon enerjileri ortaya çıkabilir. Kalan enerji, yavru atomun çekirdeğini uyarılmış bir enerji durumunda bırakarak korunur. Alfa bozunması, atom numarası iki, atom ağırlığı dört azaltılmış bir yavru atomla sonuçlanır. En yaygın alfa parçacık emisyon enerjileri 3 MeV ile 7,5 MeV arasında değişir.

Gama ışınları, yüksek enerjili fotonların nükleer emisyonlarıdır. Bu emisyonlar, orijinal atom çekirdeğinin dönüşümüyle sonuçlanmaz (sıfır kütleye sahiptirler) ve kendiliğinden veya beta ve alfa radyasyonu ile birlikte meydana gelebilir. Gama ışınları, bir radyoaktif bozunmadan sonra veya başka bir parçacıkla şiddetli bir çarpışmanın sonucu olarak uyarılmış durumda bırakılan çekirdeklerin enerjik geçişlerinden kaynaklanır. Birkaç keV ile yüzlerce MeV arasında değişebilen son derece enerjik elektromanyetik radyasyon emisyonlarından oluşurlar (Cress, 2008).

Her biri güç üretimi için düşünüldüğünde, farklı radyoaktif bozunma türleri için madde ile etkileşimin bir analizi gereklidir. Alfa ve beta parçacıklarının her ikisi de yük taşır ve bu nedenle içinden geçilen malzemenin elektronları ve çekirdekleri ile kulombik olarak etkileşir. Bir atomun çapı 10^{-10} m, nükleer çap ise 10^{-15} m civarındadır. Elektronlar tarafından 10^{15} kat daha fazla hacim işgal edildiğinden, alfa ve beta parçacıkları ile elastik ve esnek olmayan elektronik çarpışmalar çok daha olasıdır ve bunu birincil enerji kaybı şekli yapar. Beta parçacıkları ayrıca, çekirdeğin elektrik alanındaki elektronların hızlanmasından dolayı ışık yayılımı olan Bremsstrahlung radyasyonu şeklinde enerjiyi yayabilir. Beta parçacığının maddeyi geçerken toplam enerji kaybı oranı, Coulomb ve ısıma kayıplarının toplamıdır (Bower ve ark., 2002):

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) = \left(\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} \quad (2.34)$$

Göreceli hızları hesaba katarak, Coulomb ve ışımsal enerji kaybı kısımları (Krane, 1988) ile modellenilebilir:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_c = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{2\pi ZN}{mc^2\beta^2} \left[\ln\left(\frac{T(T+mc^2)^2\beta^2}{2I^2mc^2}\right) + (1-\beta^2) - (2\sqrt{1-\beta^2}-1+\beta^2)\ln 2 + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \quad (2.35)$$

ve

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{Z^2 N(T+mc^2)}{137mc^4} \left[4\ln\left(\frac{2(T+mc^2)}{mc^2}\right) - \frac{4}{3} \right] \quad (2.36)$$

burada e elektronik yük, Z soğurucunun atom numarası, N soğurucunun atomik yoğunluğu, m elektron durgun kütlesi, $v=\beta c$ parçacığın hızıdır, c ışık hızıdır, T parçacığın kinetik enerjisidir, I atomik elektronların ortalama uyarılma enerjisidir ve ϵ_0 boş uzayın geçirgenliğidir. Denklem (2.35), Coulomb etkileşimlerinden kaynaklanan enerji kaybı oranının azalan parçacık hızı ile arttığını gösterir. Daha yüksek yoğunluklu malzemelerde de daha fazladır. İki terimin göreceli katkıları, yaklaşık olarak oranlarıyla bulunabilir (Cress, 2008):

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_c} = \frac{T+mc^2}{mc^2} \frac{Z}{1600} \quad (2.37)$$

Bu oran, ışıma teriminin sadece yüksek enerjide ve ağır malzemelerde anlamlı olduğunu göstermektedir. Çoğu yarı iletken diyotta (örneğin, InGaP₂ için $Z \sim 28$), ışıma katkısı $T < 100$ keV için %2'den azdır. Coulomb etkileşimleri nedeniyle birim uzunluk başına alfa parçacıklarının enerji kaybının büyüklüğünü vermek için (2.35)'e benzer bir ifade kullanılabilir:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_c = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{4\pi z^2 ZN}{mc^2\beta^2} \left[\ln\left(\frac{2mc^2\beta^2}{I}\right) + \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right] \quad (2.38)$$

burada z , alfa parçacığı üzerindeki yüküdür. Yine, enerji kaybı oranı, azalan parçacık hızı ile ve daha yüksek yoğunluklu malzemeler için artar. Son iki terim göreceli hızları açıklar ve < 10 MeV enerjili alfa parçacıkları için göz ardı edilebilir. Alfa parçacıkları için, parçacığın aralığı, parçacığın enerjisine göre enerji kaybı oranının tersinin integrali

alınarak bulunabilir ve buna benzer sonuçlar sağladığı gösterilmiştir. Deneysel olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, beta parçacıkları için büyük derecede saçılma, madde içindeki aralıklarını belirlerken ampirik bir ilişkinin kullanılmasını gerektirir (Krane, 1988).

Gama ışınları madde ile öncelikle üç süreç aracılığıyla etkileşir: fotoelektrik absorpsiyon, Compton saçılması ve elektron-pozitron çifti üretimi. Fotoelektrik etkide, bir atom gama ışını soğurur ve bir atom elektronu (fotoelektron) salınır. Yayılan fotoelektronun enerjisi, gama ışınının kinetik enerjisinden elektronun bağlanma enerjisinin çıkarılmasına eşittir. Fotoelektrik absorpsiyon olasılığı yalnızca düşük enerjili fotonlar (<100 keV) için önemlidir ve daha yüksek atom numaralı malzemeler için artar (Krane, 1988). Compton saçılması, bir fotonun hemen hemen serbest bir elektrondan saçılması işlemidir, bunun sonucunda daha az enerjili bir foton ve foton tarafından kaybedilen enerjiyi taşıyan saçılmış bir elektron oluşur. Bu işlem, daha düşük enerjili fotonlar için ve daha büyük serbest elektron yoğunluğuna sahip malzemelerde (örneğin, Pb) daha olasıdır. Bir elektron-pozitron çifti üretim sürecinde, foton, tüm enerjisinin iki parçacığa verilmesine neden olacak şekilde yok edilir ve 5 MeV' yi aşan enerjilere sahip gama ışınları için olasılığı önemlidir. Toplam lineer zayıflama katsayısı, μ , belirli bir malzeme kalınlığı için foton (gama ışını) uzaklaştırma oranını tanımlamak için kullanılır. Doğrusal zayıflama katsayısı, basitçe fotoelektron absorpsiyonu, Compton saçılımı ve çift üretimi olasılıklarının toplamıdır (Cress, 2008).

Böylece, t kalınlığında ve başlangıç şiddeti I_0 olan bir soğurucudan geçtikten sonra gama ışınlarının yoğunluğu:

$$I = I_0 \exp(-\mu t) \quad (2.39)$$

bu denklem, alfa- veya beta-parçacık bozunmasıyla ilişkili istenmeyen gama ışınlarını yeterince hafifletmek için gerekli korumayı belirlerken faydalıdır. Doğrusal zayıflama faktörleri, Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı tarafından neredeyse tüm radyonüklidler için spesifik gama ışını doz sabitlerini belirlemek için kullanılmıştır (Unger ve Trubey, 1982).

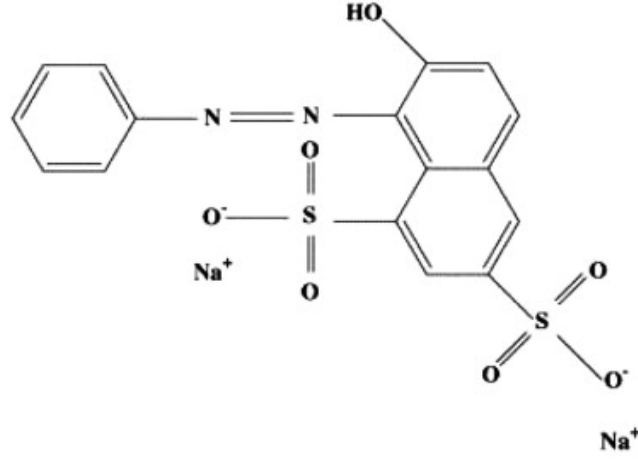
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Orange G boya molekülü

Antrakinonik, azo ve heterosiklik boyalar, çeşitli endüstrilerde en çok kullanılan ve doğal su kütlelerinde bulunan boyalardır. Özellikle azo boyalar, olağan tekstil boyaları endüstrilerinin %60-70'ini temsil eder (Alinsafı ve ark., 2007). Bu sektör, yaklaşık $7,0 \times 10^5$ ton (Shanker ve ark. 2017) ve yaklaşık $2,8 \times 10^5$ ton olduğu tahmin edilen yıllık üretimin %70' inden fazlasını tüketir ve tekstil atık suları yoluyla çevreye deşarj edilir (Eren, 2012). Orange G, keratini boyamak için renk belirteci, pH göstergesi olarak kullanılan ve ayrıca gıda, tekstil (Divya ve ark. 2009) ve tabakhane endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan bir asit azo boyasıdır. Orange G'nin özel toksik etkiler olarak bazı kromozomal hasar ve klastojenik aktivite gösterdiği bildirilmektedir (Verma ve Kumar 2018).

Azo boyasının tipik bir sembolü olan ve tekstil kumaşlarının boyanmasında yaygın olarak kullanılan Orange G (OG) incelemelere konu olmuştur. Çoğunlukla, adsorpsiyon, sonoliz, biyotransformasyon, UV/TiO₂ ve Fenton süreçleri gibi geleneksel teknikler kullanılarak OG' nin bozunması bildirilmiştir (Cai ve ark.,2016).

Çeşitli alanlarda boya maddesi olarak kullanılan OG, 7-Hydroxy-8-phenylazo-1,3-naphthalene disülfonik asidin disodyum tuzudur. OG suda çözünbilmektedir fakat etanol gibi organik çözücülerde daha iyi çözünmektedir. OG' nin moleküler formülü C₁₆H₁₀N₂Na₂O₇S₂ şeklinde olup kimyasal yapısı ise Şekil 3.1 de gösterilmiştir. OG' nin kimyasal yapısındaki konjüge sistemi meydana getiren benzen ve azo gruplarında bulunan elektronların yerleşmemesinden dolayı bir iletim durumu oluşmaktadır. Bu iletkenlik durumundan dolayı yarıiletken elektroniği alanında kullanım imkanı bulmuştur. Güllü ve ark. 2008 yılında MIS kontak araştırmasında OG molekülünü arayüzey tabakası şeklinde kullanmıştır. MIS kontağın elektrik ve arayüzeysele karakteristikler üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde rapor edilmiştir. (Güllü ve Türüt, 2010)



Şekil 3.1. Orange G (OG)nin kimyasal yapısı (Güllü ve Türit, 2010).

Bu tez çalışmasında OG kullanımının bazı avantajları arasında;

- Fiyatının uygun olması,
- Molekülün kullanışlılığının/işlenebilirliğinin olması,
- Kimyasal yapıdaki Pi bağlarının olması,
- Laboratuvar şartlarında çalışmanın kolaylığı,

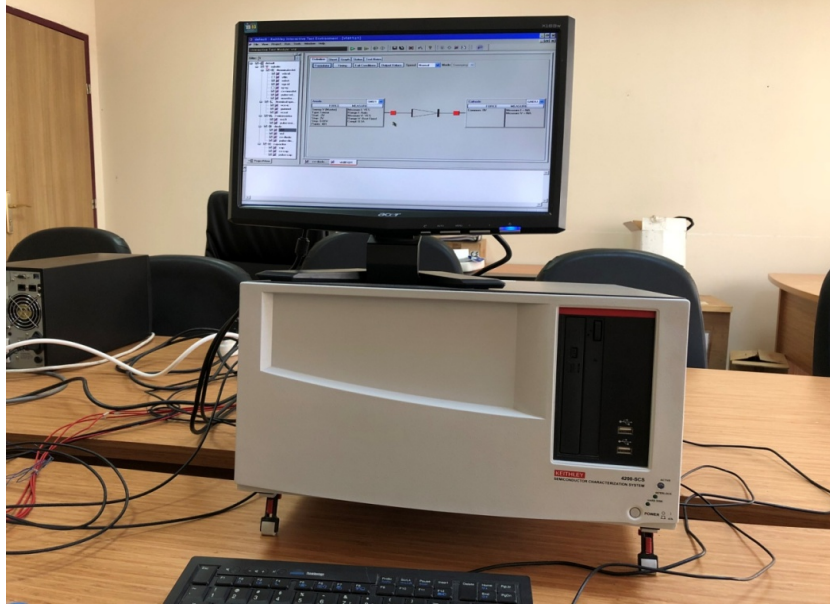
gibi özellikler sayılabilir.

3.2. MIS kontağın fabrikasyonu, ısınlanma aşaması ve ölçümlerin alınması

Bu tez çalışması doğrultusunda kristal yönelime sahip ve tek yüzeyi parlatılmış p-tipi Si alttaş kullanıldı. P-Si kristali geleneksel RCA yöntemiyle kimyasal olarak temizlendikten sonra 18 MΩ' luk ultra saf su ile 30 sn. süre yıkanıp N₂ gazı ile kurutuldu ve sonrasında p-Si kristalinin mat bölgesine saf alüminyumun vakum ortamında ısıt yöntemiyle omik kontağı yapıldı. Alttaşın parlak tarafına ise 7 µL %0.2' lik OG etanol çözeltisi ile ince film oluşturularak OG tabakasının üzerine de yine Al metali ile kontak yapıldı.

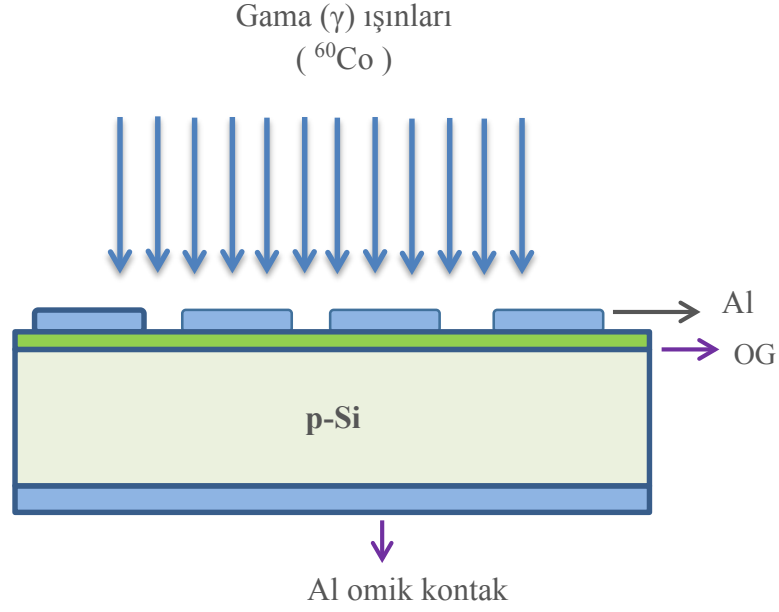
Bu aşamadan sonra Al/OG/p-Si MIS kontağının CV karakteristikleri Batman Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarındaki KEITHLEY 4200-SCS ölçüm sistemi kullanılarak bulundu (Şekil 3.2). CV ölçümleri 10kHz-1MHz frekans bölgesinde ve (-2V)-(+2V) voltaj aralığında 0.05V adımlarla alındı. Bu şekilde alınan ölçümler hesaplamalarda ve grafiklerde “kontrol” şeklinde verildi.

Al/OG/p-Si MIS kontağının IV karakteristikleri de benzer şekilde KEITHLEY 4200-SCS ölçüm sistemi kullanılarak (-2V)- (+2V) voltaj aralığında ve 0.02V adımlarla alındı (Şekil 3.2). Bu şekilde alınan ölçümler hesaplamalarda ve grafiklerde “kontrol” şeklinde değerlendirildi.



Şekil 3.2. KEITHLEY 4200-SCS ölçüm sisteminin fotoğrafı.

Bu aşamanın ertesinde Al/OG/p-Si MIS yapısı, 8,5 Curie aktiviteli ve 1,25 MeV enerjili Cobalt-60 kaynağından gelen gama ışınlarına 30 dakika maruz bırakıldı. Bu ışınlama sürecini müteakip benzer şekilde IV ve CV karakteristikleri tekrar ölçülerek gama ışınlarının MIS kontağın elektronik özellikleri ve diyot parametreleri üzerindeki etkisi incelendi. Fabrikasyonu yapılan Al/OG/p-Si MIS diyeti Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Al/OG/p-Si MIS diyotu ve gama ışınlarına maruz bırakma.

3.3. Al/OG/p-Si Yapının IV Ölçümlerinden Temel diyot parametrelerinin elde edilmesi

3.3.1. Engel yüksekliği ve İdealite faktörü

Termoiyonik emisyon teorisine göre (Ziel, 1968), bir diyottan geçen akım ifadesinden istifade edilerek diyotun idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_B),

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (3.1)$$

$$\Phi_B = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (3.2)$$

ifadelerinden hesaplanabilir. Bu denklemlerde A diyotun yüzey alanı; A^* yarıiletkenin Richardson sabiti' dir (p-Si için $A^* = 32 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$).

3.3.2. Seri direnç

Metal/Yarıiletken diyet yapılarında, tükenim bölgesinin dışarısında yarıiletken gövde kısmının akım akışına karşı sergilediği direnç, seri direnç (R_s) olarak adlandırılır ve Norde fonksiyonu ile Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanabilir (Sze ve Kwok, 2007). Termoyonik emisyon teorisine göre akım ifadesine seri direnç etkisi dahil edilirse;

$$I = I_0 \exp \left(\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (3.3)$$

şeklinde bir eşitlik ortaya çıkar.

3.3.3. Norde fonksiyonu

Norde (1979) tarafından geliştirilen yöntemde (Norde 1979) diyetlerin seri direnci ve engel yüksekliğini hesaplamak için kullanılan modifiye Norde fonksiyonu $F(V)$:

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (3.4)$$

olarak verilir. Bu eşitlikte verilen γ niceliği boyutsuz olup n değerinin bir fazlası olan ilk tamsayı değeri olarak hesaplamalarda kullanılır. $\beta = 1/kT$ dir. $F(V)$ - V grafiğinden engel yüksekliği ve seri direnç değerleri sırasıyla;

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (3.5)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{eI_{min}} \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikteki $F(V_0)$ değeri $F(V)$ grafiğindeki minimum nokta ve V_0 ise ilgili noktanın gerilim değeri olarak alınır. I_{min} ise V_0 gerilimine karşılık gelen akım değeridir.

3.3.4. Cheung fonksiyonu

Cheung(1986)' a göre iki fonksiyon geliştirilmiş olup bunlar $dV/d\ln I$ ve $H(I)$ şeklinde temsil edilir ve;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + I.R_s \quad (3.7)$$

$$H(I) = n\phi_b + I.R_s \quad (3.8)$$

olarak verilir. Bu fonksiyonlara ait grafiklerin doğrusal kısımlarının eğimleri ve y eksenini kestiği noktalar tespit edilerek diyotun engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerleri hesaplanır.

3.3.5 Arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss})

Arayüzey tabakalı MIS kontakların arayüzey durumlarının enerjisi (E_{ss}), yarıiletkenin valans bandının (E_v) üst noktasına göre;

$$E_{ss} - E_v = q\Phi_b - qV \quad (3.9)$$

olarak ifade edilir. Arayüzey hallerinin konsantrasyonu ise;

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{w} \right] \quad (3.10)$$

şeklinde verilir (Cowley ve Sze 1965, Card ve Rhoderick 1971). Bu eşitlikteki ϵ_i ve ϵ_s sırasıyla arayüzey tabakanın ve yarıiletken maddenin dielektrik katsayısını, δ arayüzey tabakanın kalınlığını, $n(V) = \frac{V}{(kT/q)\ln(I/I_0)}$ gerilimin fonksiyonu olarak idealite faktörünü temsil etmektedir.

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

MIS yapıların sığa değeri, Poisson denkleminden faydalanılarak gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde;

$$C = \left[\frac{e \epsilon_s \epsilon_0 N_a A^2}{2(V_d \pm V)} \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

olarak elde edilir (Rhoderick 1988, Ziel 1968, Wilmsen, 1985). Eşitlikteki N_a ; yarıiletkenin katkı konsantrasyonunu ve V_d built-in (difüzyon) potansiyelini temsil etmektedir. Bu eşitlikten faydalanarak C^{-2} değeri;

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d \pm V)}{e \epsilon_s \epsilon_0 N_a A^2} \quad (3.12)$$

olarak yeniden düzenlenebilir. Bu ifadeye göre $1/C^2 - V$ grafiğinin şekli doğrusal olacağı görülecektir. Bu doğrunun eğiminden N_a değeri;

$$N_a = \frac{2}{A^2 e \epsilon_s \epsilon_0} \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (3.13)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. Aynı grafiğin uzantısından V_d değeri hesaplanacaktır. V_d değerinden faydalanarak diyotun engel yüksekliği parametresi;

$$\Phi_b(C - V) = \frac{V_d}{n} + E_f \quad (3.14)$$

eşitliği kullanılarak elde edilebilir.

4. BULGULAR VE SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında yapısında π bağları bulunduran Orange G (OG) organik ince film kullanılarak üretilen Al/OG/p-Si MIS kontakların elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Elde edilen yapının elektriksel karakterizasyonu bu yapılara ait akım-gerilim (IV) ve kapasite-gerilim (CV) ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber, diyot yapısı üzerinde gama radyasyonunun etkisi araştırılmıştır

4.1. MIS Yapının IV Ölçümleri ve Analizi

Araştırma laboratuvarında üretilmiş olan Al/OG/p-Si diyotunun IV ölçümleri KEITHLEY 4200-SCS sistemi vasıtasıyla oda sıcaklığında ve karanlıkta (-2V)-(+2V) aralığında 0.05V' luk adımlarla gerçekleştirildi.

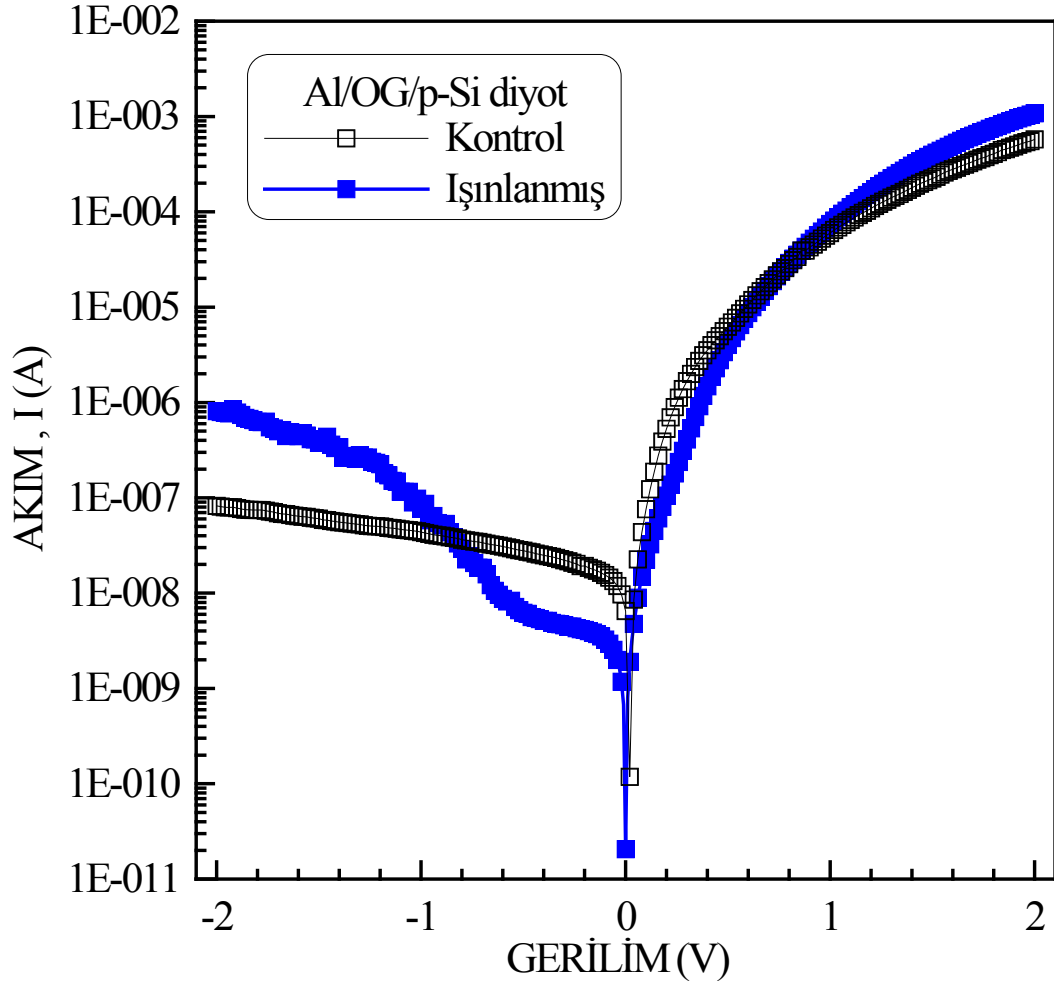
Al/OG/p-Si diyotunun diyot parametreleri, bölüm 3.3.1' de gösterilen(denklem 3.1 ve denklem 3.2) aşağıdaki denklemler sayesinde hesaplandı.

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (\text{İdealite faktörü}) \quad (4.1)$$

$$\Phi_B = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (\text{Engel Yüksekliği}) \quad (4.2)$$

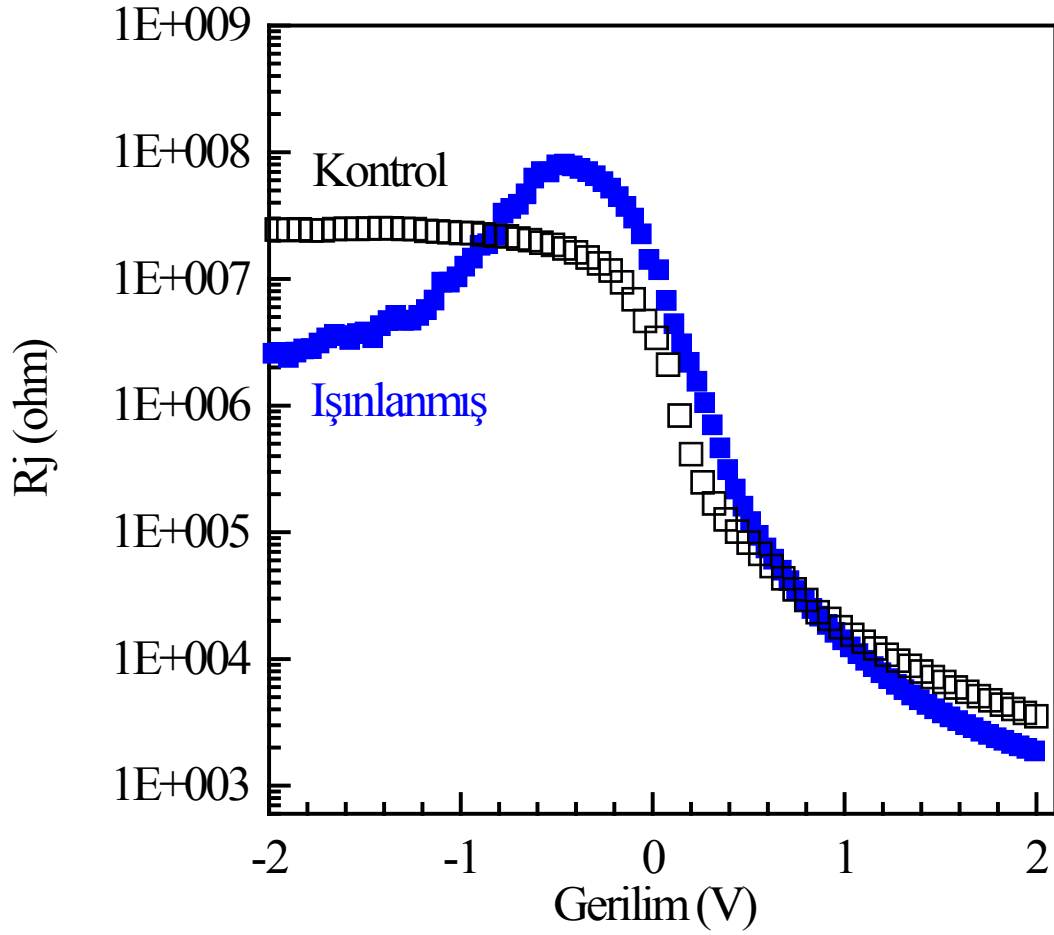
Al/OG/p-Si diyotunun gama ışınlamasından önce (kontrol) ve sonraki $\ln I$ -V grafikleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Radyasyon uygulandıktan sonra diyotun akım-gerilim karakteristiğinde ters beslem akımının önemli ölçüde arttığı ve doğrultma özelliğinin kötüleştiği ve düz beslem bölgesinde de grafiğin eğiminin azaldığı ve idealite faktörünün arttığı görülmektedir. Bu etkiler gama radyasyonunun diyotun arayüzey bölgesinde yeni yükler ile ilgili seviyeler ve elektron-delik çifti meydana getirmesine atfedilir. Gama radyasyonu uygulanmayan durumdaki Al/OG/p-Si kontrol MIS kontak için hesaplanan idealite faktörü değeri $n=1.556$ ve engel yüksekliği $\phi_b=0.750$ eV şeklinde hesaplandı. Radyasyon uygulandıktan sonra ise Al/OG/p-Si kontak için $n=2.649$ ve engel yüksekliği değeri $\phi_b=0.754$ eV şeklinde elde edildi. Hesaplanan diyot parametreleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Radyasyon uygulandıktan sonra diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliğindeki ortaya çıkan artış, Al/OG/p-Si

diyot yapısındaki arayüzey tabakasında arayüzey ve kusur seviyeleri ile elektron-delik çiftlerinin oluşumuyla izah edilebilir. Bu tarz sonuçlar ve izahlar şimdiye kadar diğer bilim insanları tarafından da bildirilmiştir.



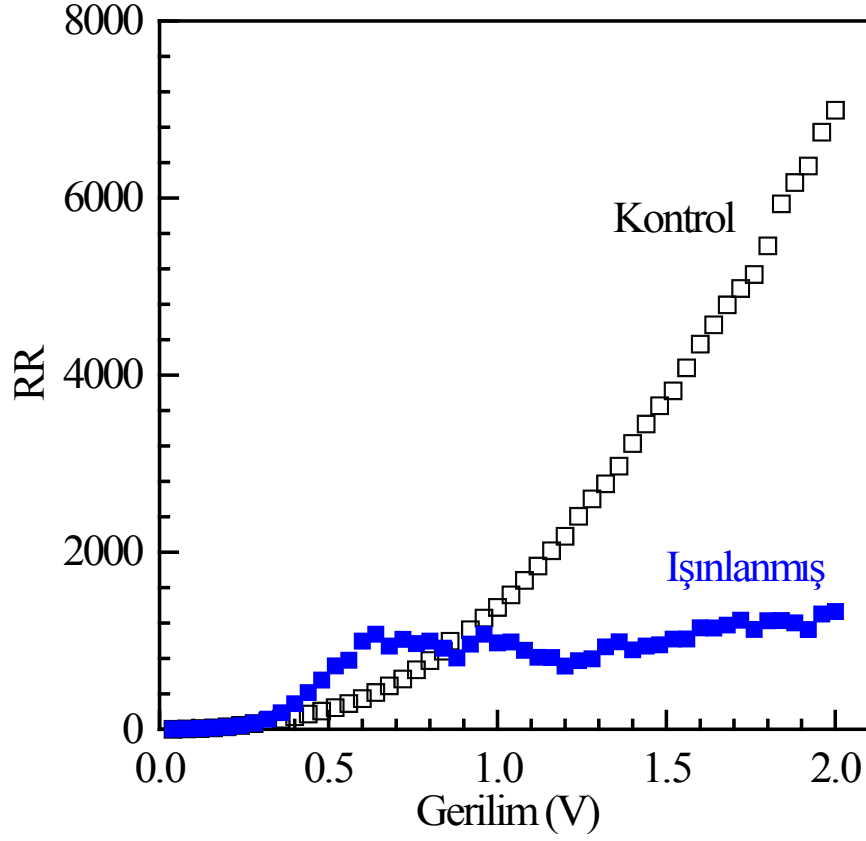
Şekil 4.1. Al/OG/p-Si diyotunun gama radyasyonu uygulanmadan önceki (kontrol) ve sonraki durumlara ait $\ln I$ -V grafikleri.

Al/OG/p-Si diyotunun gama ışınlamasından önce (kontrol) ve sonraki eklem direnci (R_j) nin gerilime bağlı değişimleri olan R_j -V grafiği Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Bu grafik I-V ölçümleri kullanılarak $R_j = dV/dI$ eşitliği kullanılarak elde edildi. Radyasyon uygulandıktan sonra diyotun R_j -V karakteristiğinin hem ters beslem bölgesinde hem de düz beslem bölgesinde değiştiği görülmektedir. Bu etkiler gama radyasyonunun diyotun arayüzey bölgesinde yeni yükler ile ilgili seviyeler ve elektron-delik çifti meydana getirmesine atfedilir.



Şekil 4.2. Al/OG/p-Si diyotunun gama radyasyonu uygulanmadan önceki (kontrol) ve sonraki durumlara ait R_j -V grafikleri.

Al/OG/p-Si diyotunun gama ışınlamasından önce (kontrol) ve sonraki doğrultma oranı (RR) nın gerilime bağlı değişimleri olan RR-V grafiği Şekil 4.3’de gösterilmektedir. I-V ölçümleri kullanılarak mutlak olarak aynı olan gerilim değerindeki düz beslem akımının (I_d) ve ters beslem akımına (I_t) oranı kullanılarak $RR = I_d/I_t$ eşitliğinden elde edildi. Radyasyon uygulandıktan sonra diyotun doğrultma oranının özellikle büyük gerilim bölgesinde azaldığı görülmektedir. Bu azalma gama radyasyonunun diyotun arayüzey bölgesinde yeni yükler ile ilgili tuzak ve kusur seviyeleri meydana getirmesiyle izah edilir.



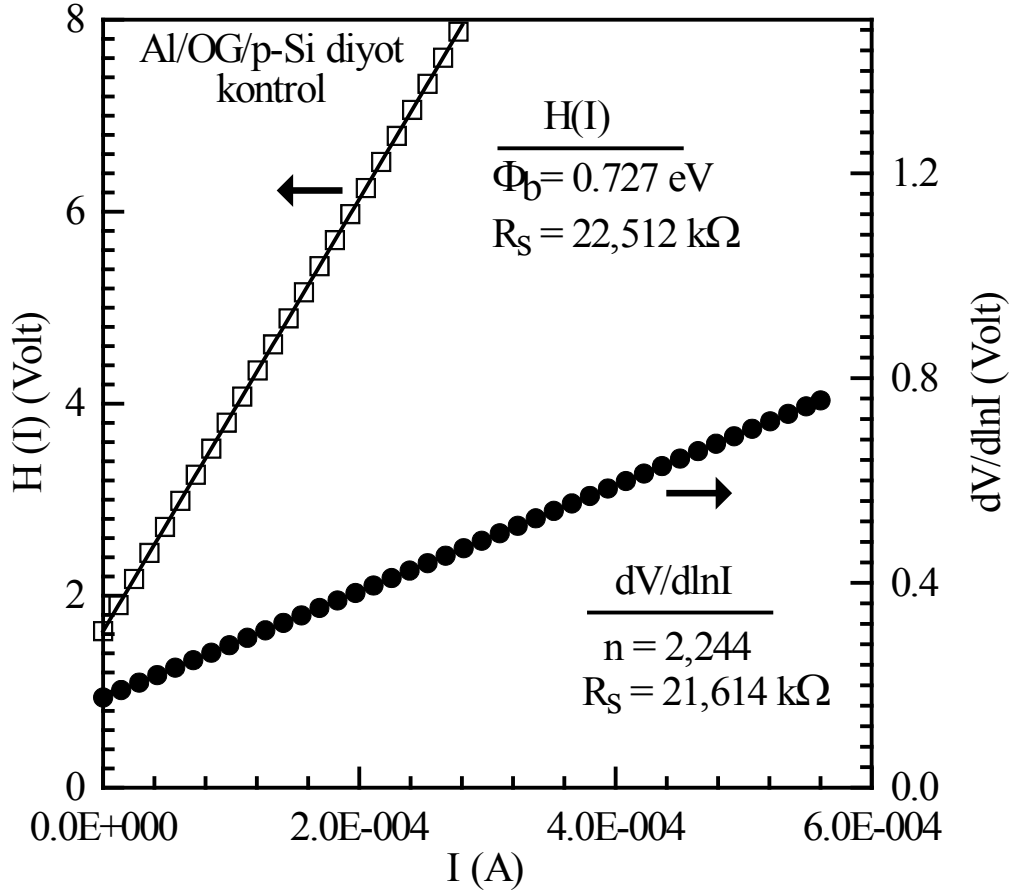
Şekil 4.3. Al/OG/p-Si diyotunun gama radyasyonu uygulanmadan önceki (kontrol) ve sonraki durumlara ait RR-V grafiği.

Şekil 4.1 de ki gibi diyot akım-gerilim grafiklerinin büyük gerilim bölgesinde lineerlikten uzaklaşma durumunun sebebi seri direnç etkisi olarak tanımlanır. Seri direnç değerinin bulunması için önerilen tekniklerden birisi, Cheung yöntemi'dir. Bu teknikte 2 tane fonksiyon kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlar $dV/d(\ln I)$ ve $H(I)$ olup kontağın idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç değeri (R_s);

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (4.3)$$

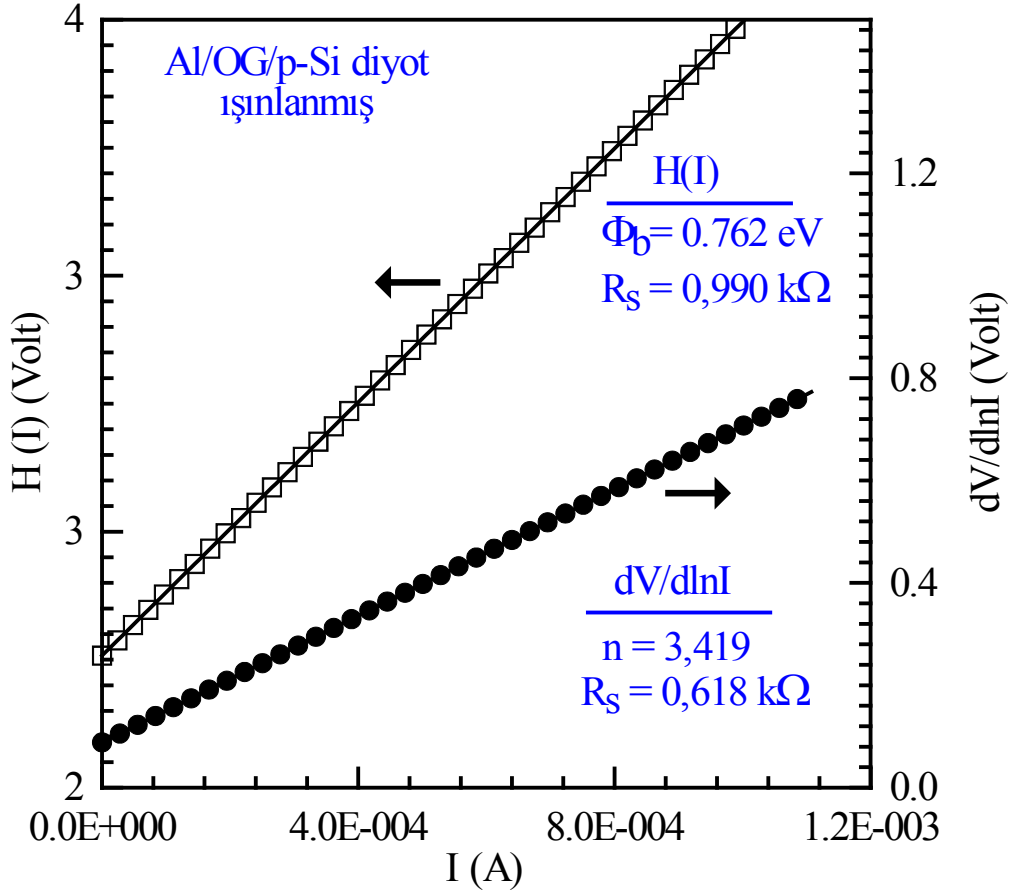
$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (4.4)$$

ifadeleri kullanılarak bulundu.



Şekil 4.4. Al/OG/p-Si diyotunun ışınlanmadan önceki durumuna ait $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de Al/OG/p-Si diyotunun gama radyasyonu ile ışınlama yapmadan önceki (kontrol) ve sonraki $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I değişimleri görülmektedir. $dV/d(\ln I)$ grafiklerinin doğrusal kısmının eğiminden Al/OG/p-Si diyota ait seri direnç değerleri ışınlama öncesi (kontrol) ve radyasyondan sonraki durum için sırasıyla $R_s=21,614 \text{ k}\Omega$ ve $R_s=0,618 \text{ k}\Omega$ şeklinde bulunur. Bu grafiklere ait doğrusal kısmının y-eksenini kestiği noktadan idealite faktörü parametreleri ışınlama öncesi (kontrol) ve ışınlamadan sonraki durum için sırasıyla $n=2,244$ ve $n=3,419$ şeklinde bulunmuştur. Yine benzer şekilde $H(I)$ -I grafiklerinin doğrusal kısmının eğimlerinden, Al/OG/p-Si kontağının seri direnç değerleri kontrol ve ışınlamadan sonraki durum için sırasıyla $R_s=22,512 \text{ k}\Omega$ ve $R_s=0,990 \text{ k}\Omega$ ve düşey $H(I)$ eksenlerini kestiği noktalardan engel yüksekliği değerleri ışınlamadan önce (kontrol) ve ışınlamadan sonraki durum için sırasıyla $\phi_b=0,727 \text{ eV}$ ve $\phi_b=0,762 \text{ eV}$ şeklinde bulundu. Hesaplanan değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Al/OG/p-Si diyotunun ışılandıktan sonraki duruma ait $dV/d(\ln I)$ – I ve $H(I)$ – I grafikleri.

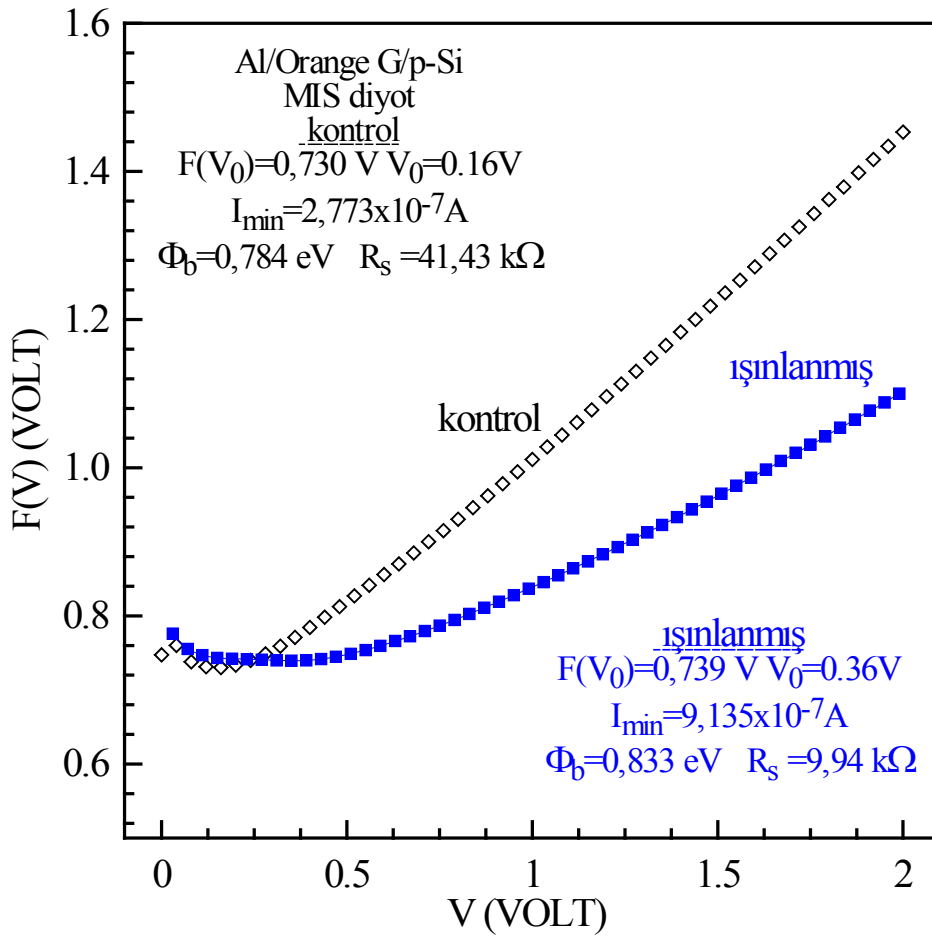
Al/OG/p-Si diyotunun ışınlamadan önce (kontrol) ve ışınlama sonrası durumlara ait $H(I)$ yöntemiyle bulunan R_s değerlerinin, $dV/d(\ln I)$ yöntemiyle elde edilen R_s değerleriyle kıyaslanabilir olduğu görülmektedir. Radyasyon uygulamasından sonra MIS kontağın seri direncinin önemli ölçüde küçüldüğü görülmüştür. Bu küçülme durumu radyasyonun diyot yapısında elektron-delik çiftlerinin oluşmasıyla izah edilmektedir (Harris ve Frasca 2006).

Kontaklara ait seri direnç ve engel yüksekliği gibi niceliklerin elde edilmesi için kullanılmakta olan diğer yöntem ise Norde tekniğidir. Bu diyot değerleri bölüm 3.3.3’ de anlatılmış olup aşağıda gösterilen,

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{e} \quad (\text{Engel Yüksekliği}) \quad (4.5)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma - \eta)}{eI_{min}} \quad (\text{Seri Direnç}) \quad (4.6)$$

eşitlikleriyle hesaplandı.



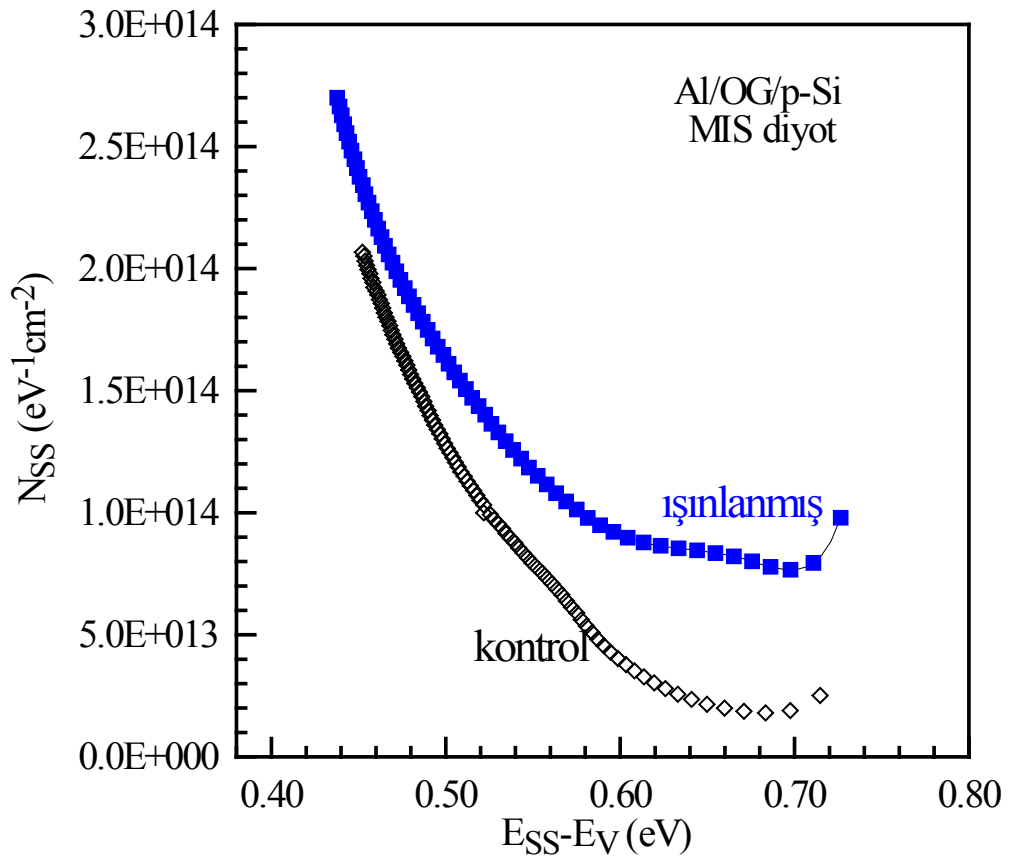
Şekil 4.6. Al/OG/p-Si diyotunun ışınlamadan önceki (kontrol) ve ışınlanmış durumlara ait $F(V)$ - V grafikleri

Şekil 4.6’da Al/OG/p-Si diyotunun gama radyasyonuna tabi tutmadan önceki (kontrol) ve radyasyona tabi tuttuktan sonraki $F(V)$ - V grafikleri gösterilmektedir. Norde tekniği kullanılarak hesaplanan $F(V)$ - V değişiminden, engel yüksekliği değerleri radyasyondan önce (kontrol) ve sonra sırasıyla $\Phi_b = 0,784 \text{ eV}$ ve $\Phi_b = 0,833 \text{ eV}$ şeklinde, R_s değerleri de sırasıyla $R_s = 41,430 \text{ k}\Omega$ ve $R_s = 9,940 \text{ k}\Omega$ şeklinde hesaplandı. Bu şekilde hesaplanan nicelikler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Bu yöntem kullanılarak hesaplanan ve radyasyondan sonra meydana gelen engel yüksekliğindeki artış ve R_s ’deki azalış hali, önceki tekniklerde bildirilen şekilde benzer değişim göstermiştir.

Cheung yöntemi kullanılarak bulunan idealite faktörünün $\ln I$ - V yönteminden bulunan idealite faktöründen büyük olması seri direnç ve ara yüzey seviyelerinin etkisi ile açıklanır. Bununla beraber Norde yöntemi kullanılarak bulunan seri direnç değerinin

Cheung yöntemi kullanılarak bulunan seri direnç değerinden büyük olması Norde yönteminin tüm düz beslem gerilim bölgesinden hesaplanırken, Cheung yönteminde ise sadece seri direnç kısmından hesaplanmasından kaynaklanır (Güllü ve Türüt, 2010).

Metal/Yarıiletken diyetlerin ideal durumdan uzaklaşmalarının temel sebeplerinden olan arayüzey durumları ile ilgili teori, Rhoderick ve Card (1971) tarafından geliştirilmiştir ve bölüm 3.3.5’ te anlatılmıştır. Al/OG/p-Si diyetunun radyasyona tabi tutulmadan önceki (kontrol) ve radyasyondan sonraki $N_{ss}-(E_{ss}-E_V)$ grafikleri Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Radyasyon uygulamasından sonra diyetun arayüzey durum yoğunluğunda bir artış görülmektedir. Işınlamadan sonra N_{ss} ’ deki artış diyetun arayüzey tabakasındaki kusurların artmasıyla açıklanmaktadır. Al/OG/p-Si diyet için bulunan N_{ss} değerlerinin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Al/OG/p-Si diyetunun radyasyona tabi tutmadan önceki (kontrol) ve sonraki $N_{ss}-(E_{ss}-E_V)$ grafikleri

Çizelge 4.1. Al/OG/p-Si diyotunun kontrol ve radyasyon uygulanmış durumlar için lnI-V, Cheung ve Norde tekniklerinden hesaplanan diyot parametreleri.

	Cheung Tekniği				lnI-V		Norde tekniği	
	dV/d(lnI)-I		H(I)-I				F(V)-V	
	R _s (kΩ)	n	R _s (kΩ)	Φ _B (eV)	n	Φ _B (eV)	R _s (kΩ)	Φ _B (eV)
Kontrol	21,614	2,244	22,512	0,727	1,556	0,750	41,43	0,784
Işınlanmış	0,618	3,419	0,990	0,762	2,649	0,754	9,940	0,833

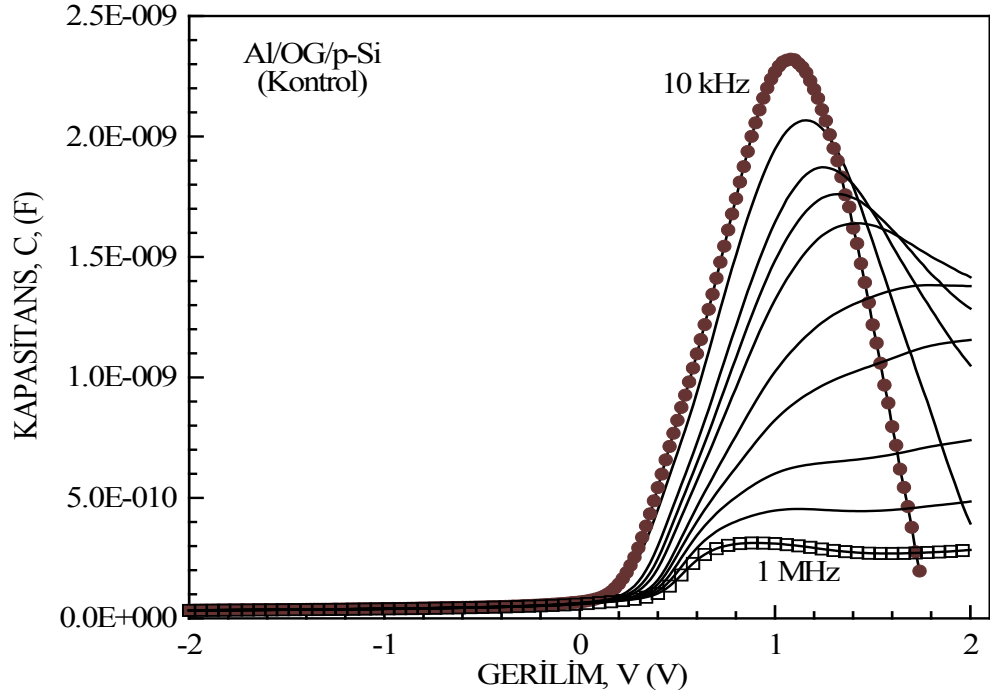
4.2. C-V analizlerinin değerlendirilmesi

Al/OG/p-Si diyotunun radyasyon uygulamasından önceki (kontrol) ve sonraki C-V ölçümleri kullanılarak hesaplanan yarıiletkenin alıcı (akseptör) yük taşıyıcı yoğunluğu ve engel yüksekliği gibi diyot niceliklerine ait ifadeler aşağıda gösterilmektedir. Bu parametrelerin hesaplanması, bölüm 3.4’ de verilen eşitliklerden ve C-V değişimlerinden faydalanarak yapıldı.

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 q A^2 N_a} \quad (4.7)$$

$$\Phi_b(C - V) = V_d/n + E_f \quad (4.8)$$

$$N_a = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 q A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.9)$$

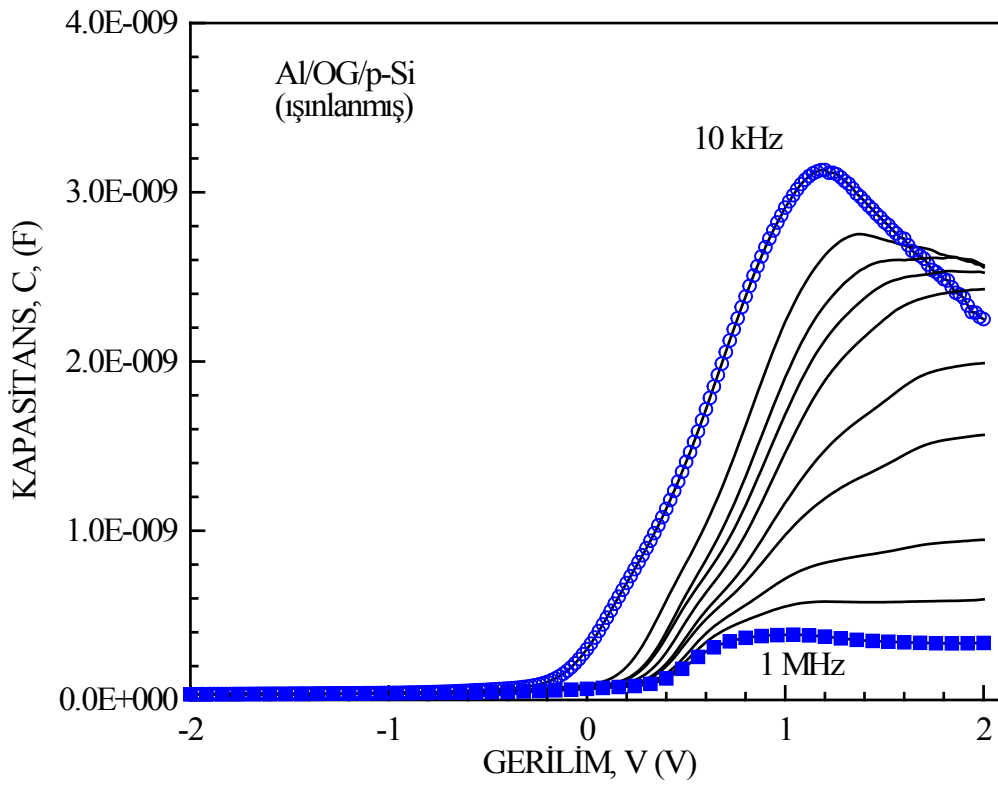


Şekil 4.8. Radyasyon uygulamadan önceki Al/OG/p-Si diyotunun (kontrol) C-V grafikleri

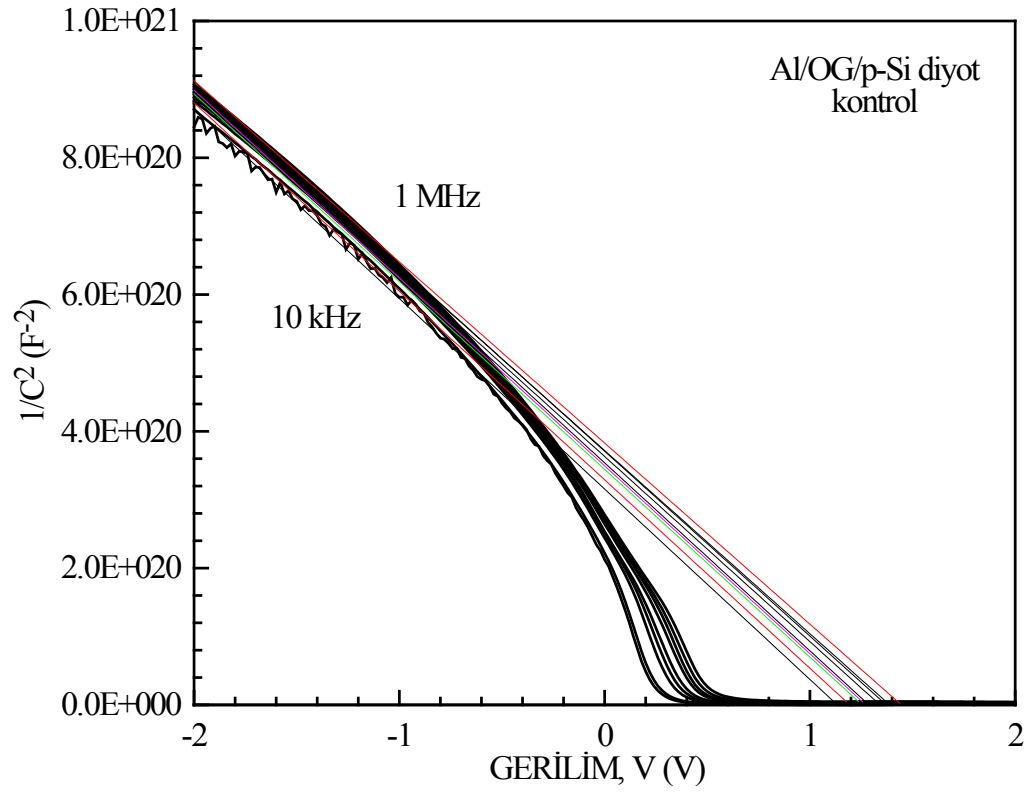
Çizelge 4.2. Radyasyon uygulamadan önceki Al/OG/p-Si diyotunun (kontrol) ve ışınlanmış duruma ait C^2 -V grafiklerinden bulunan bazı temel diyot parametreleri.

Frekans (kHz)	KONTROL DİYOT			IŞINLANMIŞ DİYOT		
	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)
10	1,134	6,903	0,977	0,982	6,712	0,881
30	1,194	6,973	1,016	1,148	6,687	0,987
50	1,255	7,000	1,055	1,233	6,798	1,042
70	1,273	6,998	1,066	1,255	6,806	1,056
100	1,288	6,992	1,076	1,286	6,826	1,076
200	1,341	7,097	1,110	1,327	6,895	1,102
500	1,372	7,109	1,130	1,400	6,990	1,149
700	1,389	7,175	1,140	1,438	7,051	1,172
1000	1,446	7,256	1,177	1,479	7,118	1,199

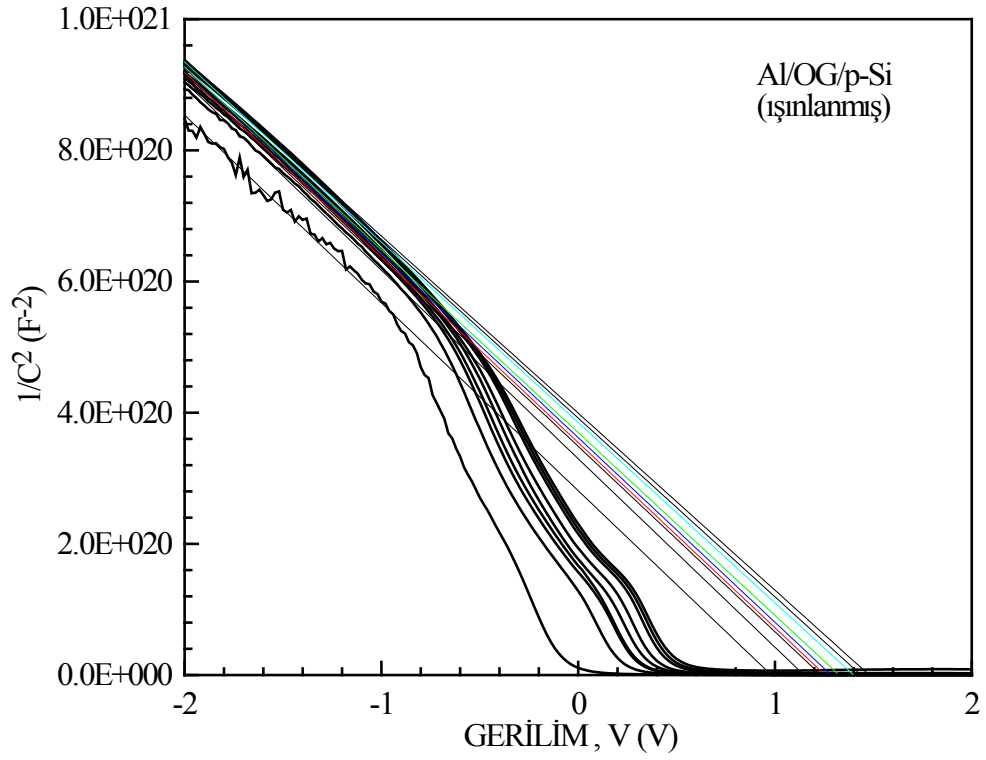
Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da Al/OG/p-Si diyotunun sırasıyla radyasyondan önceki (kontrol) ve radyasyondan sonraki durumlara ait 10kHz-1MHz frekans aralığında gerçekleştirilen ölçümlerden hesaplanan C-V değişimleri gösterilmektedir. Verilen şekildeki grafikler incelendiğinde düz beslem kısmında artan frekansla sığa değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca bu grafikler dikkatli bir şekilde incelenirse, radyasyondan sonra Al/OG/p-Si diyotunun kapasitans değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Radyasyondan sonra kapasitans değerindeki artma, Al/OG/p-Si diyot yapısında ışınlama etkisiyle elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasından kaynaklanır (Çınar ve ark. 2014).



Şekil 4.9. Al/OG/p-Si diyotunun (ışınlanmış) C-V grafikleri.



Şekil 4.10. Al/OG/p-Si diyotunun radyasyon uygulamadan önceki (kontrol) C^2 -V grafikleri.



Şekil 4.11. Al/OG/p-Si diyotunun radyasyon uygulamadan sonraki (ışınlanmış) C^2 -V grafikleri.

Al/OG/p-Si kontakların radyasyondan önceki (kontrol) ve radyasyona tabi tutulan (ışınlanmış) durumlar için 10kHz-1 MHz frekans aralığında alınan CV ölçümlerinden bulunan C^{-2} -V değişimleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’ de verilmektedir. Radyasyondan önce ve sonraki durum için Al/OG/p-Si kontaklara ait grafiklerin doğrusal kısımlarının gerilim eksenine kesiştiği noktadan built-in (difüzyon) potansiyeli V_d değerleri ve bu değerlerin kullanılmasıyla engel yüksekliği elde edildi. Bu nicelikler Çizelge 4.2 de verilmektedir. Radyasyon uygulanmadan önceki (kontrol) durum için Al/OG/p-Si diyotu için V_d değerinin 10 kHz için 1,134 V’tan 1 MHz için 1.446 V’a yükseldiği, radyasyon uygulamasından sonrası için 10 kHz için 0,982 V’tan 1 MHz için 1.479 V’a yükseldiği görünmektedir. Radyasyon uygulanmadan önceki (kontrol) durum için Al/OG/p-Si diyotu için Φ_b değerinin 10 kHz için 0,977 eV’tan 1 MHz için 1.177 eV’a yükseldiği, radyasyon uygulamasından sonrası için 10 kHz için 0,881 eV’tan 1 MHz için 1.199 eV’a yükseldiği görülmektedir. Radyasyondan önceki ve sonraki durum için Al/OG/p-Si kontaklara ait C^{-2} -V grafiklerinin doğrusal kısımlarının eğiminden (4.11) eşitliğine göre N_a parametresi bulunmuştur. Hesaplanan N_a değerleri Çizelge 4.2 de gösterilmektedir. Radyasyon uygulanmadan önceki (kontrol) durum için Al/OG/p-Si diyotu için N_a değerinin 10 kHz için $6,903 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ’ten 1 MHz için $7,256 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ’e yükseldiği, radyasyon uygulamasından sonrası için 10 kHz için $6,712 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ’ten 1 MHz için $7,118 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ’e yükseldiği görünmektedir. V_d , N_a ve Φ_b parametrelerindeki değişim, Al/OG/p-Si diyotunda radyasyonun MIS arayüzeyiyle ve yarıiletken gövdeyle etkileşimine bağlı olarak elektron-delik çifti, tuzak ve kusur seviyeleri oluşumuyla açıklanmaktadır (Çınar ve ark. 2014).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu araştırma tezinde yapısında π bağları bulunduran Orange G (OG) organik ince film kullanılarak üretilen Al/OG/p-Si MIS kontakların elektriksel karakterizasyonu yapıldı. Co-60 radyoaktif kaynaktan çıkan γ radyasyonunun Al/OG/p-Si kontaklarının elektronik ve arayüzey parametreleri üzerinde gerçekleştirdiği etkiler incelendi. Al/OG/p-Si kontağının akım-voltaj (IV) ve kapasite-gerilim (CV) değişimleri KEITHLEY 4200-SCS vasıtasıyla ölçüldü. Söz konusu ölçümler yardımıyla radyasyondan önceki (kontrol) ve radyasyondan sonraki diyot değerleri farklı yöntemlerle ve ölçümlerle hesaplandı ve Çizelge 4.1 ile Çizelge 4.2’de verildi.

Al/OG/p-Si diyotunun gama ışınlamasından önce (kontrol) ve sonraki InI-V grafikleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Radyasyon uygulandıktan sonra diyotun akım-gerilim karakteristiğinde ters beslem akımının önemli ölçüde arttığı ve doğrultma özelliğinin kötüleştiği ve düz beslem bölgesinde de grafiğin eğiminin azaldığı ve idealite faktörünün arttığı görülmektedir. Bu etkiler gama radyasyonunun diyotun arayüzey bölgesinde yeni yükler ile ilgili seviyeler ve elektron-delik çifti meydana getirmesine atfedilir. Gama radyasyonu uygulanmayan durumdaki Al/OG/p-Si kontrol MIS kontak için hesaplanan idealite faktörü değeri $n=1.556$ ve engel yüksekliği $\phi_b=0.750$ eV şeklinde hesaplandı. Radyasyon uygulandıktan sonra ise Al/OG/p-Si kontak için $n=2.649$ ve engel yüksekliği değeri $\phi_b=0.754$ eV şeklinde elde edildi. Hesaplanan diyot parametreleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Radyasyon uygulandıktan sonra diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliğindeki ortaya çıkan artış, Al/OG/p-Si diyot yapısındaki arayüzey tabakasında arayüzey ve kusur seviyeleri ile elektron-delik çiftlerinin oluşumuyla izah edilebilir. Bu tarz sonuçlar ve izahlar şimdiye kadar diğer bilim insanları tarafından da bildirilmiştir.

Al/OG/p-Si diyotunun gama ışınlamasından önce (kontrol) ve sonraki eklem direnci (R_j) nin gerilime bağlı değişimleri olan R_j -V grafiği Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Bu grafik I-V ölçümleri kullanılarak $R_j=dV/dI$ eşitliği kullanılarak elde edildi. Radyasyon uygulandıktan sonra diyotun R_j -V karakteristiğinin hem ters beslem bölgesinde hem de düz beslem bölgesinde değiştiği görülmektedir. Bu etkiler gama radyasyonunun diyotun arayüzey bölgesinde yeni yükler ile ilgili seviyeler ve elektron-delik çifti meydana getirmesine atfedilir.

Al/OG/p-Si diyotunun gama ışınlamasından önce (kontrol) ve sonraki doğrultma oranı (RR) nın gerilime bağlı değişimleri olan RR-V grafiği Şekil 4.3’de gösterilmektedir. I-V ölçümleri kullanılarak mutlak olarak aynı olan gerilim değerindeki düz beslem akımının (I_d) ve ters beslem akımına (I_t) oranı kullanılarak $RR=I_d/I_t$ eşitliğinden elde edildi. Radyasyon uygulandıktan sonra diyotun doğrultma oranının özellikle büyük gerilim bölgesinde azaldığı görülmektedir. Bu azalma gama radyasyonunun diyotun arayüzey bölgesinde yeni yükler ile ilgili tuzak ve kusur seviyeleri meydana getirmesiyle izah edilir.

Diyot akım-gerilim grafiklerinin büyük gerilim bölgesinde lineerlikten uzaklaşma durumunun sebebi seri direnç etkisi olarak tanımlanır. Seri direnç değerinin bulunması için önerilen tekniklerden birisi, Cheung yöntemidir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’ de Al/OG/p-Si diyotunun gama radyasyonu ile ışınlama yapmadan önceki (kontrol) ve sonraki $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I değişimleri görülmektedir. $dV/d(\ln I)$ grafiklerinin doğrusal kısmının eğiminden Al/OG/p-Si diyota ait seri direnç değerleri ışınlama öncesi (kontrol) ve radyasyondan sonraki durum için sırasıyla $R_s=21,614 \text{ k}\Omega$ ve $R_s=0,618 \text{ k}\Omega$ şeklinde bulunur. Bu grafiklere ait doğrusal kısmının y-eksenini kestiği noktadan idealite faktörü parametreleri ışınlama öncesi (kontrol) ve ışınlamadan sonraki durum için sırasıyla $n=2,244$ ve $n=3,419$ şeklinde bulunmuştur. Yine benzer şekilde $H(I)$ -(I) grafiklerinin doğrusal kısmının eğimlerinden, Al/OG/p-Si kontaklarının seri direnç değerleri kontrol ve ışınlamadan sonraki durum için sırasıyla $R_s=22,512 \text{ k}\Omega$ ve $R_s=0,990 \text{ k}\Omega$ ve düşey $H(I)$ eksenlerini kestiği noktalardan engel yüksekliği değerleri ışınlamadan önce (kontrol) ve ışınlamadan sonraki durum için sırasıyla $\phi_b=0,727 \text{ eV}$ ve $\phi_b=0,762 \text{ eV}$ şeklinde bulundu. Hesaplanan değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Al/OG/p-Si diyotunun ışınlamadan önce (kontrol) ve ışınlama sonrası durumlara ait $H(I)$ yöntemiyle bulunan R_s değerlerinin, $dV/d(\ln I)$ yöntemiyle elde edilen R_s değerleriyle kıyaslanabilir olduğu görülmektedir. Radyasyon uygulamasından sonra MIS kontakların seri direncinin önemli ölçüde küçüldüğü görülmüştür. Bu küçülme durumu radyasyonun diyot yapısında elektron-delik çiftlerinin oluşmasıyla izah edilmektedir (Harris ve Frasca 2006).

Kontaklara ait seri direnç ve engel yüksekliği gibi niceliklerin elde edilmesi için kullanılmakta olan diğer yöntem ise Norde tekniğidir. Şekil 4.6’da Al/OG/p-Si diyotunun gama radyasyonuna tabi tutmadan önceki (kontrol) ve radyasyona tabi tutuktan sonraki $F(V)$ -V grafikleri gösterilmektedir. Norde tekniği kullanılarak hesaplanan $F(V)$ -V değişiminden, engel yüksekliği değerleri radyasyondan önce

(kontrol) ve sonra sırasıyla $\phi_b = 0,784$ eV ve $\phi_b = 0,833$ eV şeklinde, R_s değerleri de sırasıyla $R_s = 41,430$ k Ω ve $R_s = 9,940$ k Ω şeklinde hesaplandı. Bu şekilde hesaplanan nicelikler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Bu yöntem kullanılarak hesaplanan ve radyasyondan sonra meydana gelen engel yüksekliğindeki artış ve R_s ’deki azalış hali, önceki tekniklerde bildirilen şekilde benzer değişim göstermiştir.

Cheung yöntemi kullanılarak bulunan idealite faktörünün lnI-V yönteminden bulunan idealite faktöründen büyük olması seri direnç ve ara yüzey seviyelerinin etkisi ile açıklanır. Bununla beraber Norde yöntemi kullanılarak bulunan seri direnç değerinin Cheung yöntemi kullanılarak bulunan seri direnç değerinden büyük olması Norde yönteminin tüm düz beslem gerilim bölgesinden hesaplanırken, Cheung yönteminde ise sadece seri direnç kısmından hesaplanmasından kaynaklanır (Güllü ve Türüt, 2010).

Metal/Yarıiletken diyotların ideal durumdan uzaklaşmalarının temel sebeplerinden olan arayüzey durumları ile ilgili teori, Rhoderick ve Card (1971) tarafından geliştirilmiştir ve bölüm 3.3.5 te anlatılmıştır. Al/OG/p-Si diyotunun radyasyona tabi tutulmadan önceki (kontrol) ve radyasyondan sonraki $N_{ss}-(E_{ss}-E_V)$ grafikleri Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Radyasyon uygulamasından sonra diyotun arayüzey durum yoğunluğunda bir artış görülmektedir. Işınlamadan sonra N_{ss} ’deki artış diyotun arayüzey tabakasındaki kusurların artmasıyla açıklanmaktadır. Al/OG/p-Si diyot için bulunan N_{ss} değerlerinin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

Al/OG/p-Si diyotunun radyasyon uygulamasından önceki (kontrol) ve sonraki C-V ölçümleri kullanılarak hesaplanan yarıiletkenin alıcı (akseptör) yük taşıyıcı yoğunluğu ve engel yüksekliği gibi diyot nicelikleri analiz edilmiştir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da Al/OG/p-Si diyotunun sırasıyla radyasyondan önceki (kontrol) ve radyasyondan sonraki durumlara ait 10kHz-1MHZ frekans aralığında gerçekleştirilen ölçümlerden hesaplanan C-V değişimleri gösterilmektedir. Verilen şekildeki grafikler incelendiğinde düz beslem kısmında artan frekansla sığa değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca bu grafikler dikkatli bir şekilde incelenirse, radyasyondan sonra Al/OG/p-Si diyotunun kapasitans değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Radyasyondan sonra kapasitans değerindeki artma, Al/OG/p-Si diyot yapısında ışınlama etkisiyle elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasından kaynaklanır (Çınar ve ark. 2014).

Al/OG/p-Si kontakların radyasyondan önceki (kontrol) ve radyasyona tabi tutulan (ışınlanmış) durumlar için 10kHz-1 MHz frekans aralığında alınan CV ölçümlerinden bulunan C^{-2} -V değişimleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’ de verilmektedir.

Radyasyondan önce ve sonraki durum için Al/OG/p-Si kontaklara ait grafiklerin doğrusal kısımlarının gerilim eksenine kesiştiği noktadan built-in (difüzyon) potansiyeli V_d değerleri ve bu değerlerin kullanılmasıyla engel yüksekliği elde edildi. Bu nicelikler Çizelge 4.2’ de verilmektedir. Radyasyon uygulanmadan önceki (kontrol) durum için Al/OG/p-Si diyotu için V_d değerinin 10 kHz için 1,134 V’tan 1 MHz için 1.446 V’a yükseldiği, radyasyon uygulamasından sonrası için 10 kHz için 0,982 V’tan 1 MHz için 1.479 V’a yükseldiği görülmektedir. Radyasyon uygulanmadan önceki (kontrol) durum için Al/OG/p-Si diyotu için Φ_b değerinin 10 kHz için 0,977 eV’tan 1 MHz için 1.177 eV’a yükseldiği, radyasyon uygulamasından sonrası için 10 kHz için 0,881 eV’tan 1 MHz için 1.199 eV’a yükseldiği görülmektedir. Radyasyondan önceki ve sonraki durum için Al/OG/p-Si kontaklara ait C^{-2} -V grafiklerinin doğrusal kısımlarının eğiminden (4.11) eşitliğine göre N_a parametresi bulunmuştur. Hesaplanan N_a değerleri Çizelge 4.2 de gösterilmektedir. Radyasyon uygulanmadan önceki (kontrol) durum için Al/OG/p-Si diyotu için N_a değerinin 10 kHz için $6,903 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ’ten 1 MHz için $7,256 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ’e yükseldiği, radyasyon uygulamasından sonrası için 10 kHz için $6,712 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ’ten 1 MHz için $7,118 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ’e yükseldiği görülmektedir. V_d , N_a ve Φ_b parametrelerindeki değişim, Al/OG/p-Si diyotunda radyasyonun MIS arayüzeyiyle ve yarıiletken gövdeyle etkileşimine bağlı olarak elektron-delik çifti, tuzak ve kusur seviyeleri oluşumuyla açıklanmaktadır (Çınar ve ark. 2014).

Al/OG/p-Si kontaklarının elektriksel özellikleri üzerinde gama radyasyonunun önemli bir etkide bulunduğu görülmektedir ve MIS yapıdaki diyot yapılarının radyasyon ortamında bilimsel ve teknolojik araştırma sahasında kullanıma sahip olacağı görülmüştür.

5.2. Öneriler

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen verilere dayanarak, gelecekte yapılabilecek yeni çalışmalar için aşağıda belirtilen öneriler sunulmuştur.

- Bu çalışmada Al/OG/p-Si diyotunun elektriksel ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Sıcaklığa bağlı ölçümler de alınabilir.
- Söz konusu çalışmada, radyasyonun etkisi tek doz altında incelendi. Değişik dozlarda radyasyonun etkisi de incelenerek detaylı çalışmalar yapılabilir.

- Söz konusu araştırmada, Co-60 ile ışınlama yapılmıştır. Değişik radyoaktif kaynaklarının ve ışınlama türünün uygulanması ile daha farklı araştırmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Alinsafi A, Evenou F, Abdulkarim EM, Pons MN, Zahraa O, Benhammou A, Yaacoubi A, Nejmeddine A (2007) Treatment of textile industry wastewater by supported photocatalysis. *Dye Pigment* 74:439-445
- Altshuler, B.L., Lee, P.A., and Webb, R.A., eds. *Mesoscopic Phenomena in Solids*. 1991, North Holland: New York.
- Arulkumar M., P. Sathishkumar, T. Palvannan, Optimization of Orange Thespesia populnea baklalarının aktif karbon ile G boya adsorpsiyonu yanıt yüzeyi metodolojisi, *J. Hazard. Anne*. 186 (2010) 827-834 .
- Atalla e. a. M.M., *AT&T Tech. J.* 38, 749 (1959).
- Aydemir U. 2019 “Elektron Demet ile Işınlanmış PTCDA Arayüzey Tabakalı Au/PTCDA/n-Si Diyotların Elektriksel Özellikleri” Araştırma Makalesi, *Politeknik Dergisi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Uludağ Üniversitesi, Türkiye*.
- Baeg, K.-J.; Khim, D.; Kim, D.-Y.; Jung, S.-W.; Koo, J. B.; You, I.-K.; Yan, H.; Facchetti, A.; Noh, Y.-Y. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* 2011, 49, 62-67.
- Bao, Z.; Locklin, J. J. *Organic field-effect transistors* CRC Press: Boca Raton, 2007.
- Barbottin, G., and Vapaille, A., 1999, “Instabilities In Silicon Devices New Insulators, Devices and Radiation Effects”, volume 3 north, Holland, Elsevier, Amsterdam.
- Blanchard B. S. and W. J. Fabrycky, *Systems engineering and analysis*. Third edition. United States: Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ (United States), 1998, pp. 752.
- Bower K. E., Barbanel Y. A., Shreter Y. G., and Bohnert G. W., "Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries," vol. 1. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- Bredas, J. L.; Street, G. B. *Acc. Chem. Res.* 1985, 18, 309-315.
- Brédas, J.-L.; Cornil, J.; Heeger, A. J. *Adv. Mater.* 1996, 8, 447-452.
- Cai M. , Jie Su, Yizu Zhu, Xiaoqing Wei, Micong Jin, Haojie Zhang, Chunying Dong, Zongsu Wei, “Decolorization of azo dyes Orange G using hydrodynamic cavitation coupled with heterogeneous Fenton process” ,*Ultrasonics Sonochemistry* article, January 2016.
- Card HC, Rhoderick EH, 1971. E. H. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *J. Phys. D: Appl. Phys* 4:1589–1601.
- Chen Li. 2004 “ Radiation Tolerant Design with 0.18-micron CMOS Technology” Master Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Alberta, Canada.
- Chen Zengjun. 2009 “Electrical properties of MOS devices fabricated on 4H Carbon-face SiC” Thesis, Auburn University.
- Cheung, F.M. (1986). Development of gender stereotype. *Educational Research Journal*, 1.
- Chonenberger, C., Vanhouten, H., Kerkhof, J.M., and Donkersloot, H.C., Single Electron tunneling in Double-Barrier Junctions By Scanning-Tunneling Microscopy. *Applied Surface Science* 67, 222-227 (1993)

- Cowley, A. M., Sze, S. M., 1965. Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36, 3212.
- Cress, Cory, "Effects of ionizing radiation on nanomaterials and III-V semiconductor devices." (2008) pages 1-12.
- Çaldıran Z., Ş. Aydoğan, A. Yesildag, D. Ekinçi, S.V. Kurudirek, A. Türüt 2015 "Temperature dependent current–voltage measurements of Au/C9H7N/p-Si: Characterization of a metal–organic-semiconductor device" Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Atatürk, 25240 Erzurum, Turkey, pages 58-64.
- 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.
- Devoret, M.H., Esteve, D., Grabert, H., Ingold, G.L., Pothier, H., and Urbina, C., On the Observability of Coulomb Blockade and Single-Electron Tunneling. *Ultramicroscopy* 42, 22-32 (1992)
- Divya, K.C. and Qstergaard, J (2009). Battery energy storage technology for power systems-an overview. *Electric Power System Research*, 79(4):511-520.
- Duman S., F.S. Ozcelik , B. Gurbulak , D. Korucu , O. Baris , G. Turgut 2014 "Fabrication and electrical characterization of Au/Pyronine-G/p-Si diode" *Fizik Bölümü, KK Eğitim Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, 25240 Erzurum, Türkiye*, pages 20-25.
- Dyer, A. L.; Thompson, E. J.; Reynolds, J. R. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2011, 3, 1787-1795.
- Eren Z. 2012, "Ultrasound as a basic and auxiliary process for dye remediation: a review. *Journal of environmental management, Materials Science, Medicine*.
- Faccio F. and Cervelli G., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 52(6), pp. 2413-2420, 2005.
- García R.A. , Frédéric Saigné , Frédéric Wrobel, Markus Brugger , "Radiation Fields in High Energy Accelerators and their impact on Single Event Effects". Montpellier University. "CERN-THESIS-2014-305", 15 Dec 2014.
- Gardner J. W., Varadan V. K., and Awadelkarim O. O., *Microsensors MEMS and Smart Devices*. Chichester: John Wiley & Sons, LTD, 2001, pp. 503.
- Gardner, D. G., & Pierce, J. L. (2001). Organization-based self-esteem, generalized self-efficacy and affective reactions to the workplace: An empirical re-examination. *Journal of Management Systems*, 13(4), 31-48.
- Garg, R.; Khatri, S. P. *Analysis and Design of Resilient VLSI Circuits: Mitigating Soft Errors and Process Variations*, Auburn: Springer Publishing Company, 2009.
- Güllü, Ö., Demir, F., Cimilli, F. E., and Biber, M., 2007, "Gamma Irradiation-Induced Changes At The Electrical Characteristics of Sn/P-Si Schottky Contacts", *Vacuum*, 82 789–793.
- 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., Aydoğan, S., Serifoglu K., 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. , A. Türüt 2010 "Electrical analysis of organic dye-based MIS Schottky contacts" Batman University, Faculty of Sciences and Arts, Department of Physics, Batman, Turkey, 2482-2487 pages.
- Güllü Ö., Kilicoglu T., Turut A., 2009, "Electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device" *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 71, 351–356.
- Güneş G. 2019 "Gama Radyasyonun Pmma/Pbo Yapısı Üzerine Etkisinin İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Hanna, A.E. and Tinkham, M., Variation of the Coulomb Staircase in a 2- Junction System By Fractional Electron Charge. *Physical Review B-Condensed Matter* 44, 5919-5922 (1991)
- Harris, RD , Frasca, AJ. Proton Irradiation of Silicon Schottky Barrier Power Diodes, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, August, 2006.
- Hill, I. G.; Kahn, A.; Soos, Z. G.; Pascal, J. R. A. *Chem. Phys. Lett.* 2000, 327, 181-188.
- Kahng D., Electric field controlled semiconductor device (1963).
- Karadeniz S., Behzad Barış, Hande Karadeniz , Sema Bilge Ocak, A.Birkan Selçuk 2021 "Güneş Pilleri Uygulamalarında Kullanılan Organik Tabanlı Schottky Diyotlarında İyonize Radyasyonun Aygıt Parametrelerine Etkisi" Araştırma Makalesi, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi 11, Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Giresun, Türkiye, sayfa 222-238.
- Kerr D., J. Logan, P. Burkhardt, and W. Pliskin, *IBM J. Res. Dev.* 8, 376 (1964).
- King, I.F., Tsai, L., Pflanz, R., Jäckle, H., Heberlein, U. (2007). A mutation in a putative Ste20 family gene eliminates ethanol-induced hyperactivity. *A. Dros. Res. Conf.* 48 : 632B.
- King R. R., D. C. Law, K. M. Edmondson, C. M. Fetzer, G. S. Kinsey, H. Yoon, R. A. Sherif, and N. H. Karam, *Applied Physics Letters*, vol. 90(18), pp. 183516, 2007.
- Kittel, C. *Introduction to Solid State Physics*, Fifth Edition; Wiley: New York, 1976.
- Krane K. S., *Introductory Nuclear Physics*. New York: John Wiley & Sons, 1988, pp. 845.
- Krebs, F. C.; Gevorgyan, S. A.; Alstrup, J. J. *Mater. Chem* 2009, 19, 5442-5451.
- Krebs, F. C. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2009, 93, 394-412.
- Kriegler R., Y. Cheng, and D. Colton, *Journal Electrochemistry Society* 119, 388 (1972).
- Lachheb H., Puzenat E., Houas A., Ksibi M., Elaloui E., Guillard C., Herrmann JM, Çeşitli boya türlerinin (Alizarin S, Crocein Orange G, Metil Kırmızısı, Kongo Kırmızısı, Metilen Mavisi) UV ile suda ışınlanmış titanya, *Appl. Catal. B: Çevre.* 39 (2002) 75-90.
- Lemmerhirt D. F. and K. D. Wise, "Chip-Scale Integration of Data-Gathering Microsystems," *Proceedings of the IEEE*, 2006, 22.

- Likharev, K.K., Single-electron devices and their applications. Proceedings of the IEEE 87, 606-632 (1999)
- Lilienfeld J. E., Method and apparatus for controlling electric currents (1930).
- Liu B., D. Alvarez-Ossa, N. P. Kherani, S. Zukotynski, and K. P. Chen, Sensors Journal, IEEE, vol. 7(6), pp. 917, 2007.
- Madhavan J., F. Grieser, M. Ashokkumar, Orange-G'nin ileri düzeyde bozulması Oksidasyon Süreçleri Ultrason. Sonochem. 17 (2009) 338–343 .
- Mall ID, Srivastava VC, Agarwal NK, Orange-G ve metil menekşenin Kaldırılması küspe uçucu kül üzerine adsorpsiyon yoluyla boyalar – kinetik çalışma ve denge izoterm analizleri, Boyalar Pigm. 69 210-223.
- Meirav, U. and Foxman, E.B., Single-electron phenomena in semiconductors. Semiconductor Science and Technology 11, 255-284 (1996)
- Meiqiang Cai, Jie Su, YizuZhu, XiaoqingWei, MicongJin, HaojieZhang, ChunyingDong, ZongsuWei. 2015 “Intensification of ultrasound-assisted process for the preparation of spindle-shape sodium zinc molybdate nanoparticles” Ultrasonics Sonochemistry, Chemical Engineering Department, Laxminarayan Institute of Technology, Rashtrasant Tukadoji Maharaj Nagpur University, Nagpur 440033, MS, India
- Miremadi B., S. Morrison, and K. Colbow, Appl. Phys. A 62, 39 (1996).
- Möller H. J., Semiconductors for Solar Cells. Boston: Artech House, Inc., 1993.
- Nahass M.M., H.S. Metwally, H.E.A. El-Sayed, A.M. Hassanien 2011 “Electrical and photovoltaic properties of FeTPPCl/p-Si heterojunction” Physics Department, Faculty of Education, Ain Shams University, Roxy 11757, Cairo, Egypt 2253-2258.
- Nielsen, T. D.; Cruickshank, C.; Foged, S.; Thorsen, J.; Krebs, F. C. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2010, 94, 1553-1571.
- Norde H., A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance, Journal of Applied Physics, 50, 5052, 1979.
- Oh Jaehwan. 2001 “Electrical Characterization of TiSi_2 Nanoscale Islands by Scanning Probe Microscopy” Master's Thesis, North Carolina State University, 5-13.
- Özaydın C., K. Akkılıç, S. İlhan, Ş. Rüzgar, Ö. Güllü, H. Temel 2013 “Characterization of an Au/n-Si photovoltaic structure with an organic thin film” Materials Science in Semiconductor Processing, Department of Physics, Faculty of Science and Art, University of Batman, Batman, Turkey, 1125-1130 pages.
- Özden S., Ömer Güllü and Osman Pakma 2018 “Room temperature I–V and C–V characteristics of Au/mTPP/ p-Si organic MIS devices” Faculty of Sciences, Mugla Sıtkı Koçman University, 48000 Mugla, Turkey.
- Pease R. L., A. H. Johnston, and J. L. Azarewicz, "Radiation Testing of Semiconductor Devices for Space Electronics," Proceedings of IEEE, 1988, 1510-1526.
- Pereira L., AV Coelho, CA Viegas, MMC dos Santos, MP Robalo, LO Martins, Sudan Orange G ile azo boyasının enzimatik biyotransformasyonu bakteriyel CotA-lakkaz, J. Biotechnol. 139 (2009)68-77.

- Periáñez Daniel Malagón. 2018 “A Contribution To The Characterization Of Radiation-Induced Soft Errors In Sigma-Delta Modulators and Sram Memories” Doctoral Programme of Electronic Engineering, University of the Balearic Islands, Spain
- Pierret R. F., Field Effect Devices (Addison-wesley publishing company, 1990), 2nd ed.
- Raffaëlle R. P., C. D. Cress, D. M. Wilt, and S. G. Bailey, "Radiation Degradation of Nanomaterials," Proceedings of Fall 2005 MRS Research Symposium, 2006, 147-157.
- Ralph, D.C., Black, C.T., and Tinkham, M., Nano-particle transistors and energy-level spectroscopy in metals. Superlattices and Microstructures 20, 389- 394 (1996)
- Rhoderick E. H. and Williams R. H., “Metal Semiconductor Contacts”, 2nd ed., Oxford Press, 0198593368, USA, (1988).
- Rubén García Alía , Frédéric Saigné , Frédéric Wrobel, Markus Brugger , “Radiation Fields in High Energy Accelerators and their impact on Single Event Effects”. Montpellier University. “CERN-THESIS-2014-305”, 15 Dec 2014.
- 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.
- Shanker, R., Bhanugopan, R., Van der Heijden, B. I., & Farrell, M. (2017). Organizational climate for innovation and organizational performance: The mediating effect of innovative work behavior. Journal of vocational behavior, 100, 67-77.
- Shaw, P. E.; Ruseckas, A.; Samuel, I. D. W. Adv. Mater. 2008, 20, 3516-3520.
- Shubhrangshu M., Koushik B., Siddhartha G., Elena P., Jean Baptiste R., Sanjay K., and G. Christoph, Applied Physics Letters, vol. 91(24), pp. 241111, 2007.
- Silinsh, E.; Capek, V. Organic molecular crystals : interaction, localization, and transport phenomena; American Institute of Physics: New York, 1994.
- Stalder R. 2012 “Organic Semiconducting Molecules and Polymers For Solution Processed Organic Electronics” Master's Thesis , University Of Florida, ABD.
- Streit D., III-Vs Review, vol. 17(8), pp. 22, 2004.
- Sun JH, LP Qiao, SP Sun, GL Wang, Orange G'nin fotokatalitik bozunması nitrojen katkılı TiO₂ görünür Işık ve güneş ışığı ışıması altında katalizörler, J. Tehlike. Anne. 155 (2008) 312–319 .
- Sun SP, CJ Li, JH Sun, SH Shi, MH Fan, Q. Zhou, Azo'nun Renksizleştirilmesi Fenton oksidasyon işlemi ile sulu çözeltide Turuncu G boya: etkisi sistem parametreleri ve kinetik çalışması , J. Hazard.Anne. 161 (2009) 1052–1057 .
- Sze S. and K. Ng, Physics of Semiconductor Devices (John Wiley and Sons, 2007), 3rd ed.
- Şahin Y. 2014 “X-ışını Radyasyonunun Metal/Organik/ Yarıiletken Doğrultucu Kontakların I-V (Akım-Gerilim) Karakteristikleri Üzerine Etkileri” Yüksek Lisans Tezi, Fizik Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Tagawa, S., Kashiwagi, M., Kamad, T., Sekiguchi, M., Hosobuchi, K., Tominaga, H., Ooka, N., & Makuchi, K. (2002). Economic scale of utilization of radiation (I): Industry. Nucl. Sci. Tech., 39, 9, 1002-1007.

- Tarkwa J.B. , J.B Tarkwa, Nihal Oturan, Elie Acayanka, Samuel Laminsi, Mehmet A. Oturan
Photo- Fenton oxidation of Orange G azo dye: process optimization and mineralization mechanism” *Environmental Chemistry Letters* (2019) 17:473–479
- Tessler, N.; Preezant, Y.; Rappaport, N.; Roichman, Y. *Adv. Mater.* 2009, 21, 2741-2761.
- Thornton, T.J., *Mesoscopic Devices. Reports On Progress in Physics* 58, 311-364 (1995)
- Unger L. M. and Trubey D. K., "Specific Gamma-Ray Dose Constants for Nuclides Important to Dosimetry and Radiological Assessment," U. S. D. O. Energy, Ed.: Oak Ridge National Laboratory, 1982.
- Uslu H., Mert Yıldırım, Semsettin Altındal, Perihan Durmus 2012 “The effect of gamma irradiation on electrical and dielectric properties of organic-based Schottky barrier diodes (SBDs) at room temperature” *Radiation Physics and Chemistry*, Department of Electric and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Karabuk University, 78050, Karabuk, Turkey, 362-369.
- Vanhouten, H., Coulomb Blockade Oscillations in Semiconductor Nanostructures. *Surface Science* 263, 442-445 (1992)
- Verma Priyanshu, Kumar Samanta Sujoy, 2018, Microwave-enhanced oxidation processes for the degradation of dyes in water. *Environmental Science, Environmental Chemistry Letters*.
- Walters R. J., M. A. Xapsos, H. L. Cotal, S. R. Messenger, G. P. Summers, P. R. Sharps, and M. L. Timmons, *Solid-State Electron.*, vol. 42(9), pp. 1747-1756, 1998.
- Walters R. J., G. P. Summers, and S. R. Messenger, 28th PVSC, pp. 1092 - 1097, 2000.
- Walters R. J., S. R. Messenger, G. P. Summers, M. J. Romero, M. M. Al-Jassim, D. Araujo, and R. Garcia, *J. Appl. Phys.*, vol. 90(7), pp. 3558-3565, 2001.
- Walters R. J., S. R. Messenger, H. L. Cotal, and G. P. Summers, *J. Appl. Phys.*, vol. 80(8), pp. 4315-4321, 1996.
- Wang C., Huang S.-C., Huang W.-K, and. Hsin Y.-m, *Solid-State Electron.*, vol. 52, pp. 49-52, 2008.
- Wang, M. Q. ; Xu, Z. R. ; Sun, J. Y. ; Kim, B. G., 2008. Effects of enzyme supplementation on growth, intestinal content viscosity, and digestive enzyme activities in growing pigs fed rough rice-based diet. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 21 (2): 270-276
- Wilmsen, C. W., 1985, *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces*. Plenum Press, New York.
- Yakuphanoglu F. , M. Shahb and W. Aslam Farooq. 2011 “Electrical and Interfacial Properties of p-Si/P3HT Organic-on-Inorganic Junction Barrier” *Yüksek Lisans Tezi*, hysics Department, Faculty of Science, Firat University, Elazig, Turkey, pages 558-562.
- Ziegler J. F., Biersack J. P., and Littmark U., *The Stopping and Range of Ions in Solids*, vol. 1. New York: Pergamon Press, 1985.
- Ziel A.V., *Solid State Physical Electronics* Prentice-Hall, New-Jersey, p. 245 (1968).

Zimek Z. 2017 “Application Of Radiation Technologies For The Modification Of Electronic Devices” Chapter 21 pp. 485-499 in Applications of Ionizing Radiation in Materials Processing edited by Sun Y.X. and Chmielewski G., Warsaw.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet ÜNALAN
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Hacı Sani Konukoğlu, Şehitkamil, Gaziantep	2005
Üniversite	: İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fizik	2010
Yüksek Lisans	: Batman Üniversitesi Fizik ABD	2022

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2011-2012	Milli Eğitim Bakanlığı	Öğretmen
2012-2013	Şahinbey Belediyesi	Öğretmen
2013-...	Emniyet Genel Müdürlüğü	Polis Memuru