



**NANOYAPILARIN RADYASYONA KARŞI DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL VE SİMÜLASYON PROGRAMIYLA İNCELENMESİ**

Hüseyin SÖNMEZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
NÜKLEER BİLİMLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

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

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

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

Hüseyin SÖNMEZ

16/06/2025

NANOYAPILARIN RADYASYONA KARŞI DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SİMÜLASYON PROGRAMIYLA İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hüseyin SÖNMEZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Bu çalışmada; çift arayüzey katmanlı (PbO/SnO₂) yapısı p tipi silisyum alttaş üzerine büyütülerek Al/(PbO/SnO₂)/p-Si yapısı üretilmiştir. Elde edilen yapının radyasyon sensörü olarak kullanılması araştırılmıştır. Yapının radyasyon sensörü olarak kullanılması deneysel olarak incelenmiş ve ⁶⁰Co radyasyon kaynağı kullanılarak iyonize edici radyasyona maruz bırakılmasından önce ve sonra kapasitans-voltaj (C-V), iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri 1 MHz frekans değerinde, -2V ≤ V ≤ 3V aralığında alınmıştır. Bu ölçümler kullanılarak Al/(PbO/SnO₂)/p-Si MOS yapısı için difüzyon potansiyeli (V_D), verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_A), Fermi enerjisi (E_F), maksimum elektrik alan (E_m), bariyer yüksekliği (Φ_B), seri direnç (R_s) ve tüketim tabakası kalınlığı (W_D) gibi elektriksel parametreler gama radyasyonundan önce ve sonra (30 kGy ve 60 kGy) hesaplanmıştır. Malzemede yapısal değişimleri modellemek amacıyla SRIM/TRIM simülasyon programı kullanılarak 1,25 MeV enerjiye sahip kobalt iyonları yapının üzerine bombardıman edilmiştir. Böylece çift katmanlı (PbO/SnO₂)/p-Si yapısı ile 1,25 MeV enerjili kobalt iyonlarının etkileşimi sonucu malzemede oluşan hasar mekanizmaları atomik dağılım, iyon dağılımı, hedef iyonlar ve hasar etkileri teorik olarak incelenmiştir.

Bilim Kodu : 91704

Anahtar : Yarıiletken nano malzemeler, iyonize edici radyasyon, arayüzey
Kelimeler durumları, C-V ve G/ω-V karakteristikleri, Monte Carlo simülasyonu

Sayfa Adedi : 59

Danışman : Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK

EXAMINATION OF THE BEHAVIOR OF NANOSTRUCTURES AGAINST
RADIATION BY EXPERIMENTAL AND SIMULATION PROGRAM

(M. Sc. Thesis)

Hüseyin SÖNMEZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

In this study; double interface layer (PbO/SnO₂) structure was grown on p-type silicon substrate to produce Al/(PbO/SnO₂)/p-Si structure. The use of the obtained structure as a radiation sensor was investigated. The use of the structure as a radiation sensor was investigated experimentally and capacitance-voltage (C-V), conductivity-voltage (G/ω-V) measurements were taken at 1 MHz frequency value, $-2V \leq V \leq 3V$ range before and after exposure to ionizing radiation using ⁶⁰Co radiation source. Using these measurements, electrical parameters such as diffusion potential (V_D), density of donor doping atoms (N_A), Fermi energy (E_F), maximum electric field (E_m), barrier height (Φ_B), series resistance (R_s) and depletion layer thickness (W_D) for Al/(PbO/SnO₂)/p-Si MOS structure were calculated before and after gamma radiation (30 kGy and 60 kGy). In order to model the structural changes in the material, cobalt ions with 1.25 MeV energy were bombarded into the structure using the SRIM/TRIM simulation program. Thus, the damage mechanisms that occur in the material as a result of the interaction of the double-layer (PbO/SnO₂)/p-Si structure with the 1.25 MeV energy cobalt ions were theoretically investigated, including atomic distribution, ion distribution, target ions and damage effects.

Science Code : 91704

Key Words : Semiconductor nanomaterials, ionizing radiation, interface defects,
C-V ve G/ω-V characteristics, Monte Carlo simulations

Page Number : 59

Supervisor : Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca kıymetli bilgi ve engin tecrübesi ile bana yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen, özverisini ve iş disiplini her zaman örnek alacağım değerli hocam, danışmanım Sn. Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK' a tüm içtenliğimle teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca gösterdikleri anlayış ve destekten dolayı, Sn. Prof. Dr. Uğur GÖKMEN' e, Doç. Dr. Defne AKAY' a ve Yüksek Fizikçi Özlem ABAY' a teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. İdeal Metal Oksit Yarıiletken (MOS) Yapılar.....	5
2.1.1. Yığılım.....	7
2.1.2. Tüketim	7
2.1.3. Tersinim	8
2.2. Gerçek Metal Oksit Yarıiletken (MOS) Yapılar.....	9
2.2.1. Arayüzey tuzak yükleri.....	10
2.2.2. Sabit oksit yükleri	11
2.2.3. Yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yük.....	12
2.2.4. Hareketli iyonik yük	12
2.3. Arayüzey Durumlarının Etkisi	13
3. RADYASYON VE ETKİLERİ.....	17
3.1. Gama Radyasyonu.....	17
3.2. Yarıiletkenlerde Radyasyon Etkisi.....	18

Sayfa

4. SRIM/TRIM SİMÜLASYONU	21
4.1. SRIM Teorisi	21
4.1.1. Atom başına yer değiştirme (DPA)	22
4.1.2. İyonize edici radyasyonun elektronik malzemelere etkileri	23
4.1.3. Radyasyon hasar modeli	23
4.2. TRIM Simülasyonu	23
5. DENEYSEL YÖNTEM	27
5.1. Al / (PbO/SnO ₂) / p-Si (MOS) Yapısı Hakkında Genel Bilgi	27
5.1.1. PbO yapısı ve özellikleri	27
5.1.2. SnO ₂ yapısı ve özellikleri	28
5.1.3. N-tipi ve p-tipi silisyum yarıiletkenler	29
5.2. Al / (PbO/SnO ₂) / p-Si (MOS) Yapısının Hazırlanması	30
5.2.1. Kristal temizleme	30
5.2.2. Omik kontakın oluşturulması	30
5.2.3. PbO/SnO ₂ Arayüzey tabakanın oluşturulması	31
5.2.4. Doğrultucu kontakın oluşturulması	31
5.3. Deneysel Ölçüm Sistemi	32
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	35
6.1. Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) Karakteristiklerinde Radyasyon Etkileri	35
6.2. TRIM Simülasyonunun Uygulanması	41
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. C^2 -V grafiğinden elde edilen elektriksel parametreler	40



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) yapısı	5
Şekil 2.2. İdeal MOS yapısının eşdeğer devresi	6
Şekil 2.3. MOS yapısının yığılma durumunun enerji bant diyagramı	7
Şekil 2.4. MOS yapısının tüketim durumunun enerji bant diyagramı	8
Şekil 2.5. MOS yapısının tersinim durumunun enerji bant diyagramı	9
Şekil 2.6. Metal/Oksit tabaka bölgesinde oluşan arayüzey tabakalar	9
Şekil 2.7. MOS yapısının eşdeğer devresi	11
Şekil 2.8. Arayüzey durumları etkili eşdeğer devre	13
Şekil 2.9. Arayüzey durumları etkili MOS eşdeğer devresi	15
Şekil 3.1. Radyasyon türleri	17
Şekil 3.2. MOS kapasitörde iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumların şematik gösterimi	19
Şekil 5.1. Metal buharlaştırma sisteminin şematik diyagramı	31
Şekil 5.2. Al / (PbO/SnO ₂) / p-Si (MOS) yapısının şematik diyagramı	32
Şekil 6.1. Al / (PbO/SnO ₂) / p-Si (MOS) yapısının gama radyasyonundan önce ve sonra C-V grafiği	36
Şekil 6.2. Al / (PbO/SnO ₂) / p-Si (MOS) yapısının gama radyasyonundan önce ve sonra G/ω-V grafiği	37
Şekil 6.3. Al/(PbO/SnO ₂)/p-Si (MOS) yapısının gama radyasyonundan önce ve sonra (a) C ⁻² -V ve (b) lineer bölge grafikleri	38
Şekil 6.4. Al/(PbO/SnO ₂)/p-Si MOS yapısının gama radyasyonundan önce ve sonra Rs-V grafiği	41
Şekil 6.5. TRIM simülasyonu kurulum penceresi	42
Şekil 6.6. TRIM fonon grafiği	44
Şekil 6.7. TRIM toplam yer değiştirme grafiği	45

Şekil	Sayfa
Şekil 6.8. TRİM hedef malzeme yer değiştirme grafiği	46
Şekil 6.9. TRİM iyonizasyon grafiği	47



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. HP 4192 LF empedans analizörü ve IEEE – 488 AC/DC dönüştürücü seti	33



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

A_{ox}	Oksit tabakanın alanı
C	Kapasitans
C_0	Boş kapasitans değeri
C_{ox}	Oksit tabakanın kapasitansı
C_D	Yarıiletken tükenim tabakasının kapasitansı
C_i	Yalıtkan arayüzey tabakanın kapasitansı
C_{sc}	Uzay yükü kapasitansı
d_{ox}	Oksit tabaka kalınlığı
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_f	Fermi enerjisi
E_{fm}	Metalin fermi enerjisi
E_{fs}	Yarıiletkenin fermi enerjisi
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
E_v	Valans bant kenarı enerjisi
G	İletkenlik
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
Q_0	Kapasitörde depolanan yük miktarı
Q_{sc}	Uzay yükü
R_s	Seri direnç
$\tan \delta$	Kayıp açısı tanjantı
V_{ox}	Oksit tabaka üzerine düşen gerilim
W_D	Tüketim tabakasının kalınlığı
Y	Admitans
Z	Empedans

Simgeler**Açıklamalar** ΔV_{FB}

Düz bant gerilim kayması

 Φ_B

Potansiyel engel yüksekliği

 Φ_m

Metalin iş fonksiyonu

 Φ_{ms}

Metal ile yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu

 Φ_s

Yarıiletkenin iş fonksiyonu



Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif akım
C-V	Doğru akım
DPA	Atom başına yer değiştirme
eV	Elektronvolt
G/ω-V	İletkenlik-Voltaj
LET	Lineer enerji transferi
MeV	Mega elektronvolt
MOS	Metal oksit yarıiletken
NIEL	İyonlaştırıcı olmayan enerji kaybı
n Si	n tipi Silisyum
p Si	p tipi Silisyum
PKA	Birincil vuruntu atomu
PbO	Kurşun oksit
Si	Silisyum
Se	Elektronik durdurma gücü
Sn	Nükleer durdurma gücü
SnO₂	Kalay oksit
SRIM	İyonların maddede durdurulması ve dizilimi
TRIM	İyonların maddede taşınması

1. GİRİŞ

Teknolojik alanlarda ihtiyaçlarımızın belirlenmesinde kullanılan yarıiletken aygıtların çalışma koşulları ve dayanıklılığı; elde edilen verilerin doğru ve kayda değer olması için önem arz etmektedir. Bu sebeple nükleer sanayi, uydu teknolojileri, nükleer tıp gibi çalışılan alanlarda kullanılan cihazlar iyonize edici radyasyon altında çalıştırıldığı için maruz kalınan radyasyona uygun hale getirilmeli ya da dedeksiyon için kullanılan cihazların radyasyonu algılayıcı özelliklerinin hassas olması beklenmektedir. Bu sebeple radyasyon algılamada gelişen teknoloji ile yarıiletken dedeksiyon sistemleri kullanılmaktadır. İyonize edici radyasyon altında çalışan yarıiletken devre elemanlarında da radyasyona karşı dayanıklı olması beklenmekte ve kullanım alanına göre radyasyonu algılama bakımından hassas malzemeler seçilmektedir. Kullanılan yarı iletken aygıtlar transistörler, kapasitörler, Schottky diyotlar, yarıiletken esaslı dozimetreler, fotodiyotlar şeklinde sıralanabilir. Yarıiletken aygıtların radyasyonu algılayıp elektriksel sinyale dönüştürme kaliteleri bakımından oluşum yapıları itibariyle katmanları önem arz eder. Son yüzyıl içerisinde yarı iletken cihazların katmansal yapılarında geçirdiği değişim, teknolojide büyük devrimlerin önünü açmıştır. Bu konuda üzerinde durulması gereken yarı iletken malzemenin fiziksel özellikleridir. Farklı malzeme özelliklerinden faydalanılarak oluşturulan yarıiletken yapılar foton, elektron ve boşlukların etkileşimine olanak tanıyan elektriksel taşıma özelliklerini içerir. Çoğu çalışma, metal yarı iletken yapıların modern elektronik bileşenlerin başlangıcı olduğunu doğrulamaktadır. Keşiflerinden itibaren bu aygıtlar üretimde düşük ekonomik maliyetleri, radyasyonu algılamada yüksek hassasiyetleri ve oluşum bakımında basit yapıda olmaları nedeniyle elektrik sinyallerini izleme ve araştırmalarda büyük ilgi gördü. Metal/yarıiletken (MS) kontaklarının geniş bant yapısı ve uygulama özellikleri önemlidir. Yarı iletkenin metalle teması omik kontak ve doğrultucu kontak olmak üzere iki şekildedir. Omik kontakta akım (I), uygulanan gerilimle (V) doğrusal olarak değişir ve Ohm yasası ile açıklanır. İyi omik kontak ve yüksek hızlı yarı iletken cihazlar için düşük kontak direnci gerekmektedir. İdeal bir Schottky bağlantısı ise yüksek akımın yalnızca ileri yönde aktığı ve çok yüksek ters dirence sebep olduğu ideal bir diyot gibi davranır. Bu çalışmada, iyonlaştırıcı radyasyona karşı duyarlı bir Schottky diyot yapısı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapısı, metal ile yarıiletken arasına yalıtkan (oksit) tabakanın yerleştirilmesiyle elde edilir. Bu oksit ara katman, iyonlaştırıcı radyasyonun neden olabileceği yer değiştirme ve difüzyon hasarlarını

sınırlayarak metal atomlarının yarıiletken içerisine geçişini engeller ve elektrik alanının dağılımını kontrol altına alır [1,2]. Böylece cihazın performansı, kararlılığı ve uzun ömürlülüğü artırılır. Arayüzey katmanları, özellikle uzay uygulamaları gibi yüksek radyasyon ve sıcaklık içeren zorlu çevresel koşullarda cihazların işlevselliğini sürdürebilmesi açısından kritik bir rol oynar [3]. MOS yapıları; güneş pilleri, metal oksit alan etkili transistörler (MOSFET), ve Schottky diyotlar gibi pek çok elektronik aygıtın temel bileşeni olarak kabul edilmektedir [4,5]. Bu nedenle yarıiletken aygıtların radyasyon altındaki davranışlarının araştırılması büyük önem taşımaktadır. MOSFET aygıtlarında iyonlaştırıcı radyasyon, oksit tabakasında tuzak seviyelerinin oluşmasına ve elektriksel özelliklerin bozulmasına neden olur [6]. Benzer şekilde, radyasyon etkisiyle PbO/SnO₂ arayüzey katmanında yeni yük tuzakları ve yapısal kusurların oluşması beklenir. Bu kusurlar, özellikle taşıyıcıların ömrünü kısaltarak cihazın elektriksel özelliklerini zayıflatırabilir [7,8]. Çalışmada kalay oksit (SnO₂) kullanımının tercih edilmesinin temel nedeni; yüksek elektron mobilitesine sahip olması, geniş bant aralığı (~3,6 eV) ve iyonlaştırıcı radyasyon altında kararlı elektriksel tepkiler vermesidir [9,10]. SnO₂, ayrıca şeffaf iletken oksitler (TCO) arasında yer almakta olup, radyasyon dedeksiyonu açısından umut vadeden bir malzeme olarak öne çıkmaktadır [11]. Diğer yandan kurşun oksit (PbO), yaklaşık 2,59 eV'luk bant aralığına sahip olup, gaz sensörleri, pigmentler, optoelektronik aygıtlar ve özellikle Schottky tipi yarıiletken aygıtlarda fotoaktif tabaka olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [12–15]. PbO'nun ters çevrilmiş polimer güneş pillerinde yüzey modifikasyon katmanı olarak işlev gördüğü ve farklı kristal fazlarda değişken optik özellikler sergilediği literatürde rapor edilmiştir [7-16, 20-24]. Bu bağlamda PbO/SnO₂ çift katmanlı MOS yapısı, hem radyasyonla oluşan yapısal kusurların etkisini gözlemlemek hem de dedektör malzemesi olarak potansiyelini değerlendirmek açısından uygun bir model sistem sunmaktadır. SnO₂ malzemesi çeşitli MOS yapıları araştırma uygulamaları için popüler bir oksit malzemesi olmuştur. n tipi Silisyum alttaşın, geniş bant aralıklı (3,6 eV) bir yarı iletken oksit malzemedir [5, 6]. SnO₂'nin şeffaflığı ve iletkenliğinin aynı anda ortaya çıkması, periyodik tablonun IV. Grup elemanları arasında benzersiz bir özelliktir. Uzay boşluğu ortamı iyonize edici radyasyon enerjisine sahip protonları, elektronları, nötronları, gama ışınlarını ve ağır yüklü parçacıkları içerir. Radyasyonla dayanıklılaştırma konusu ve radyasyonun şiddetine karşı tepki hem yarıiletken fiziği hem de malzeme bilminde araştırılması gereken mühim konulardandır. İyonlaştırıcı radyasyon, hedef malzemenin elektronlarını bulundukları atomik yapıdan uzaklaştırmaya yetecek yüksek enerjiye sahip elektromanyetik ya da parçacık radyasyondur. Negatif yüklü serbest

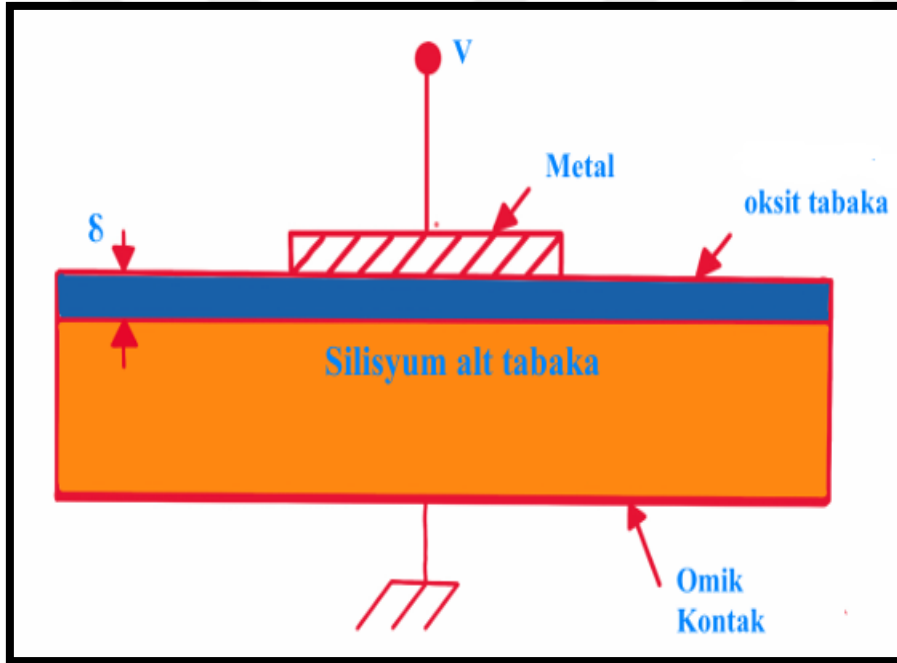
elektronların ve pozitif yüklü iyonize atomların üretilmesiyle iyonlaşma denilen olay meydana gelmiş olur. İyonlaştırıcı radyasyon genellikle üç ana grupta sınıflandırılır: Elektromanyetik radyasyon (fotonlar): X ışınları ve gama ışınları, Yüklü parçacık radyasyonu: Alfa parçacıkları (He^{2+}), beta parçacıkları (elektronlar ve pozitronlar), protonlar ve ağır iyonlar, Yüksüz parçacık radyasyonu: Nötronlar, doğrudan iyonlaştırıcı değildir ancak atom çekirdekleriyle etkileşerek dolaylı iyonlaştırıcı etki oluştururlar. Gelişen araştırma yöntemleri neticesinde radyasyon tespitinde metal oksit tabanlı yapılar kullanılmaya başlanmıştır. MOS yapıların yüksek enerjili iyonlaştırıcı radyasyonla ışınlanması sonucu boşluklar, kusur kümeleri, yer değiştirme hasarları ve elektron-boşluk (frenkel çifti) şeklinde kafes kusurlarının oluşması gözlenir [25-27]. Oksit tabakada oluşan bu oluşumlar bant aralığı içinde, taşıyıcılar için yakalama ve rekombinasyon merkezlerinin oluşumuna yol açan enerji seviyelerini oluşturur. Bu, diyot parametrelerini ve dolayısıyla MOS Schottky diyotları, cihazlarının performansları üzerinde etkilidir [25-27]. Malzeme içinde oluşan hasarlar malzemede elektriksel özelliklerde değişikliklere neden olan arayüzey tuzakları görevi görmektedir. Radyasyonun algılanmasına yönelik aygıtların sorunsuz tasarımı için tasarımı yapılan cihaz malzemelerinin radyasyondan önce ve radyasyon altında çalışmasından sonraki fiziksel özelliklerinin araştırılıp incelenmesi ve belirlenmesi derinlemesine anlaşılması gereklidir. Gamma ışını radyasyonunun MOS tipi yarıiletken yapıların özellikleri üzerindeki etkisi hakkında çalışmalar yapılmıştır [28-30]. Bu araştırmalar sonucunda gamma radyasyonun, malzemenin kristal yapısında değişikliklere neden olan yapısal kusurlara neden olduğu ve bunun da malzemenin radyasyonu algılama özelliklerini ölçülebilir şekilde değiştirdiği bulunmuştur [31, 32]. Bu yapısal kusurlar oksitlerdeki geçici yer değiştirme boşluklarıdır. Doğal olarak her oksitte bu boşluklar Schottky veya frenkel kusurları şeklinde bulunmaktadır ve malzeme içindeki yoğunlukları çeşitli yollarla artırılabilir veya azaltılabilir [33]. Oluşan hasarın türü ve konsantrasyonu: atom kütlesi, malzemenin sıcaklığı ile gelen radyasyon türünün enerjisine, atom kütlesine, yüküne ve radyasyonun akısı gibi malzemenin ve radyasyonun çeşitli parametrelerine bağlıdır. MOS yapılar içerisinde bulundurdıkları oksit tabaka sebebiyle iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmalarıyla birlikte bozulmaya karşı hassas davranış gösterirler. Cihazın aldığı zarar radyasyon dozuna bağlıdır. MOS yapılarıdaki iyonlaştırıcı radyasyona bağlı arayüz tuzaklarının ışınlanmaya karşı davranışı üzerine araştırmalar [13-17] gerçekleştirilmiştir. Radyasyonun MOSFET yapıları üzerindeki etkileri; elektron-boşluk çifti oluşumu ki bu etkiler geçici etkiler olarak sınıflandırılır ve diğer etki ise radyasyon hasarından kaynaklanan kalıcı etki olan kristal kafeste oluşan değişikliklerdir.

İyonize edici radyasyon sonucu oluşan boşluklar oksit tabaka içinde yayılabilir ancak elektronlardan daha az hareketlidirler; sabit tuzaklar da bulunur. Oksit/yarıiletken arayüzünde ışınlama dozu nedeniyle çok sayıda elektron-boşluk çifti üretilir. Araştırmalara bakıldığında düşük dozlarda SnO_2 üzerinde gamma radyasyonu gönderildiğinde; optik ve elektriksel özelliklerde hafif bir iyileşme bildirmiştir. SnO_2 'nin iyonize edici radyasyona verdiği cevap bakımından kararlılığı ve ölçümlerdeki tepkisi onu gamma radyasyon algılaması için umut verici bir nanoyapı haline getiriyor. Diğer bir taraftan iyonlaştırıcı radyasyon MOSFET yapısında oksit tuzak yüklerine, arayüzey tuzaklarına ve kusurlara neden olabileceğini söylemiştik. MOS yapıların ve bu yapılarda malzemelerin radyasyona karşı tepkilerini bilmek bu yapıların dedektörlerde daha etkili kullanılmasını sağlar. Bununla birlikte, her malzemenin iyonlaştırıcı radyasyona verdiği tepki aynı değildir; aynı elektriksel özelliğe sahip malzemeler dahi radyasyondan farklı düzeylerde etkilenebilir. Nitekim bazı çalışmalarda, iyonlaştırıcı ışınlamaya maruz kalan koronen bazlı malzemelerde, serbest taşıyıcı yoğunluğunun ve taşıyıcı hareketliliğinin arttığı rapor edilmiştir [34–36]. Radyasyon, maddeyle etkileştiğinde onu iyonlaştırarak kusurlu yapılar oluşturur. Radyasyonun türü ve enerjisi, maddenin yapısını nasıl etkilediğini belirler. Bu çalışmada, gamma radyasyonun $\text{Al}/(\text{PbO}/\text{SnO}_2)/\text{p-Si}$ (MOS) yapısına etkisi SRIM-TRIM Monte Carlo Kodu ile modellendi. Bu kod, gerçekçi simülasyonlar yaparak, düşük maliyetli ve güvenli çalışmalar yapmamızı sağlar. Simülasyon sistemleri, farklı seçenekleri test etmemize ve en iyi sonucu bulmamıza yardımcı olur. Bu kodun avantajlarından biri de, uzun zaman alacak sistemleri kısa sürede çözebilmesi ve tekrar kullanılabilir olmasıdır. Bu sistemler, deneyleri istediğimiz zaman durdurup başlatabilmemize ve deney üzerinde tam kontrol sahibi olmamıza imkân sağlar. p tipi Si alttaş üzerine büyütülen PbO/SnO_2 oksit tabakasının farklı dozlarda γ radyasyonu üzerine yapısal ve elektriksel özellikleri ile malzemenin dedektör cihaz olarak kullanılma olasılığını araştırmaktadır ve 200 μm kalınlığında p tipi Silisyum alttaş üzerine PbO/SnO_2 çift katmanlı yapının 1,25 MeV enerjili kobalt iyonuna tepkisi SRIM-TRIM Monte Carlo kodu ile incelenip yorumlanmıştır. $(\text{PbO}/\text{SnO}_2)/\text{p-Si}$ arasındaki etkileşimlerde atomik dağılım, iyon dağılımı, hedef iyonlar, fononlar ve hasar etkileri gibi parametreler analiz edilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

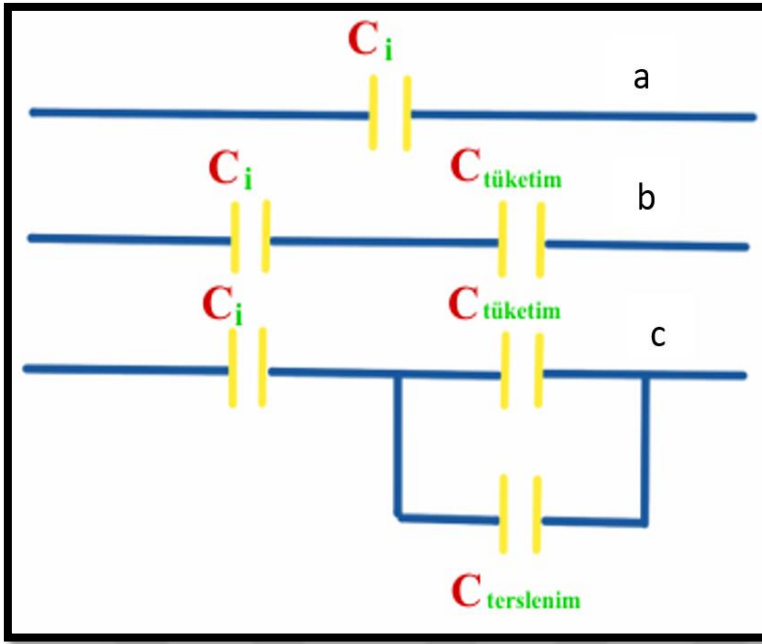
2.1. İdeal Metal- Oksit-Yarıiletken (MOS) Yapılar

Metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapıları, metal ve yarıiletken arasında yalıtkan bir tabakanın oluşturulması ile elde edilir. Bu yapılar, özellikle yarıiletken yüzey durumlarını analiz etmek için uygun olan MOS yapıları olarak adlandırılır. MOS yapıları genellikle Silisyumdan (Si) oluşan bir alt tabaka, bu alt tabakanın mat yüzeyine yerleştirilmiş metal bir arka omik kontak ve bir oksit/yalıtkan tabakası üzerinde bulunan bir metal kontak yapıdan meydana gelir. Şekil 2.1’de MOS yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapısı

MOS yapılarında, metal-oksit ara yüzeyi ve oksit-yarıiletken ara yüzeyi olmak üzere iki farklı bölgede ara yüzey incelemesi yapılabilir. İdeal bir durumda, yükler, yarıiletkenin ve yalıtkan bölgeye yakın metal yüzeyinde bulunur. DC gerilim uygulandığında, yalıtkan üzerinden akım geçişi gerçekleşmez. Şekil 2.2' de gösterildiği gibi, ideal bir MOS diyot üç farklı eşdeğer devreden oluşur: yığılma (accumulation), tükenim (depletion) ve tersinim (inversion). Ancak, gerçek durumda MOS diyotlarda, yarıiletken-oksit ara yüzeyinde ideal durumdan farklılıklarla karşılaşılır. Bu durumda, MOS diyotlarda, oksit tabakası üzerinden akım geçişi bazı durumlarda gözlemlenebilir.



Şekil 2.2. İdeal MOS yapının eşdeğer devresi (a) yığılım (b) tükenim (c) tersinim

Aşağıdaki özelliklere sahip olan yapı, ideal bir MOS yapısı olarak nitelendirilir: Metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki fark denge durumunda sıfırdır ($\Phi_{ms} = 0$) ve Eşitlik 2.1 ve Eşitlik 2.2 ile ifade edilir:

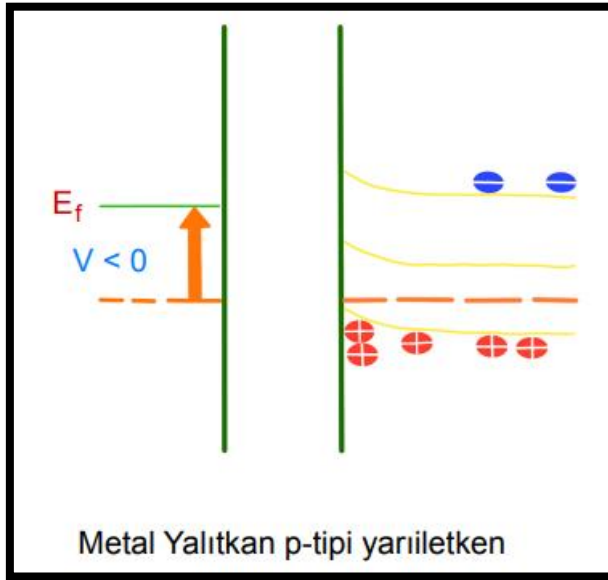
$$\Phi_{ms} = \Phi_m - (\chi + E_g/2q - \Phi_B) = 0 \text{ (n - tipi)} \quad (2.1)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - (\chi + E_g/2q + \Phi_B) = 0 \text{ (p - tipi)} \quad (2.2)$$

Fermi seviyesi ile saf yarıiletkenin fermi enerji seviyesi arasındaki enerji farkı (Φ_B) olarak adlandırılır. Metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapısındaki oksit tabakasının geniş bant aralığına sahip olması, ideal bir dielektrik yapı gibi davranmasına olanak tanır. İdeal bir MOS yapısında yalıtkan içinde ve oksit/yarıiletken ara yüzeyinde tuzaklar ve sabit/hareketli yükler bulunmaz. Ayrıca, oksit-yarıiletken ara yüzeyinde ara yüzey durumları ve yükler de mevcut değildir. Oksit tabakanın büyük bant aralığı, iletkenlik bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğunun ihmal edilebilecek kadar küçük olmasına neden olur. DC gerilimi uygulandığında, yalıtkan içinde yük aktarımı gerçekleşmez ve bu durum, sonsuz bir öz direnç davranışını oluşturur.

2.1.1. Yığılma

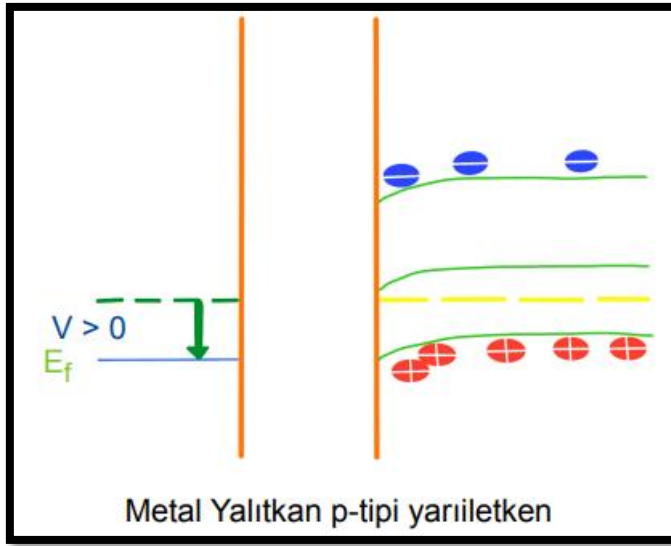
Negatif gerilim ($V < 0$) MOS yapısının metal elektrotuna verildiğinde, elektrik alan yarı iletkenin boşluk adı verilen çoğunluk yük taşıyıcılarını ara yüzeye doğru iter. Yarı iletken fermi enerji seviyesi ideal diyotlarda yük akışı yokken değişmez. Bu yüzden, taşıyıcı yoğunluğu enerji farkı ($E_F - E_V$) ile üstel olarak ilişkili olduğundan, yarı iletkenin yüzeyine yakın bölgede bant bükülmesi meydana gelir. Bu bant bükülmesi, çoğunluk yük taşıyıcılarının (boşlukların) ara yüzeyde toplanmasına yol açar. Bu olaya “yığılma” (accumulation) denir. Enerji bantlarındaki bükülme Şekil 2.3 ’te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. MOS yapısının yığılma durumunun enerji-bant diyagramı

2.1.2. Tüketim

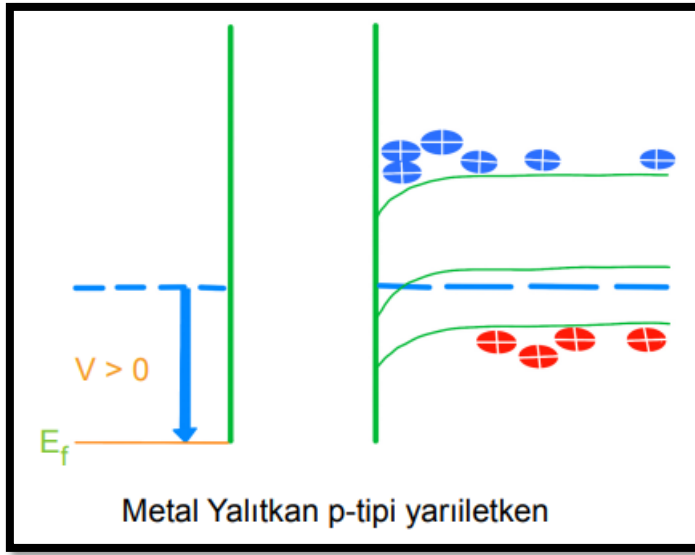
Yalıtkanın içinde elektrik alan varken, MOS yapısının metal elektrotuna düşük pozitif gerilim ($V > 0$) verilir. Bu elektrik alan, yarı iletken ara yüzeyindeki boşlukları yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarı iletken yüzeyindeki boşluk yoğunluğu, yarı iletkenin derinliklerindeki boşluk yoğunluğundan daha az olur. Bantlar aşağıya doğru eğilir ve yarı iletken yüzeyine yakın iletkenlik bandında, elektronlar toplanır. Yarı iletken yüzeyinde, uygulanan gerilime bağlı olarak genişliği değişen bir alan oluşur. Bu alanda, boşluklar azalır. Bu alana tüketim bölgesi, bu duruma da “tüketim” (depletion) denir. Bu durum enerji bantlarının Şekil 2.4 ’de gösterildiği gibi aşağı tarafa doğru yönelmesine neden olur.



Şekil 2.4. MOS yapısının tüketim durumunun enerji-bant diyagramı

2.1.3. Tersinim

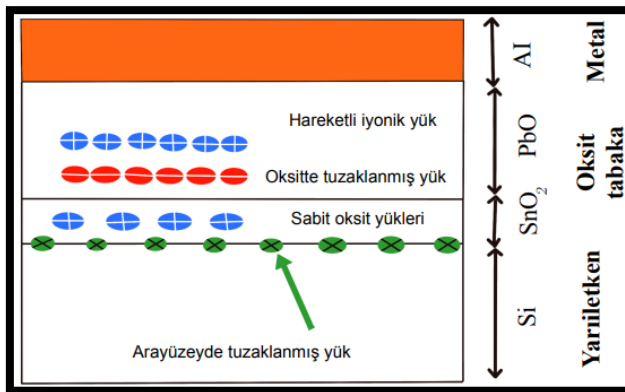
Büyük pozitif gerilim ($V \gg 0$) MOS yapısının metal elektrotuna verilirken, bantlar aşağıya doğru eğilir. Bu durumda, enerji seviyesi (E_i) normalde olduğundan daha aşağıdadır, fermi enerji seviyesinin altındadır. Yarı iletken yüzeyinde, azınlık taşıyıcıları olan elektronların sayısı artar ve boşluklardan daha yoğun olur. P-tipi yarı iletken yüzeyi, n-tipi yarı iletken gibi davranır. Bu duruma yarı iletken yüzeyinin tersinimi (inversion) adı verilir. MOS kapasitesi, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin AC sinyaline uyum sağlama kapasitesine göre belirlenir. Düşük frekanslarda uyum sağlayabilir ve gerilim yükseldikçe yalıtkan kapasitesine yaklaşır. Orta frekanslarda daha yavaş, yüksek frekanslarda ise uyum sağlayamaz. Sabit yük, uzay yükü gibi davranır ve kapasite C_{min} 'de sabit kalır. Yüksek frekanslarda gerilim aniden değişirse, azınlık taşıyıcılarının tekrar birleşmesi gecikir ve tersinim yükü daha yavaş toplanır. Bu da eğrinin C_{min} 'in altına düşmesine sebep olur. Bu durumu Şekil 2.5' deki gibi gösterebiliriz.



Şekil 2.5. MOS yapısının tersinim durumunun enerji-bant diyagramı

2.2. Gerçek Metal- Oksit-Yarıiletken (MOS) Yapılar

MOS yapısında, ara yüzey tuzakları ve oksit yükleri ideal elektriksel ifadelerin değerlerini değiştirir. Yüzey durumları iki türe ayrılır: yavaş ve hızlı. Yavaş yüzey durumları, yalıtkanın metal yüzeyinde meydana gelir ve oksit yapısındaki sabit yüklerle birlikte ısıyla uyarılan ve elektrik alanla hareket eden iyonlardan oluşur. Bu durumlar, yapının kapasitesini etkilemez. Hızlı yüzey durumları, oksit tabaka\yarı iletken ara yüzeyine yakın yerlerde bulunur ve yarı iletkenin yasak enerji bölgesinin merkezine yakın enerjilere sahiptir. Şekil 2.6’ da gösterildiği gibi arayüzey durumları dört farklı grupta sınıflandırılabilir. Bunlar arayüzey tuzak yükler, sabit oksit yükler, yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yükler ve hareketli iyonik yüklerdir.



Şekil 2.6. Metal/oksit tabaka bölgesinde oluşan arayüzey tabakalar

2.2.1. Arayüzey tuzak yükleri

Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde, yasak bant aralığında bulunan enerji seviyelerine arayüzey durumları denir. Bu durumlar, elektron alıp verebilen alıcı veya verici tuzaklar olarak işlev görürler. Verici tuzak, dolu olduğunda nötrdür ve elektron bırakarak pozitif yüklenir. Alıcı tuzak, boş olduğunda nötrdür ve elektron çekerek negatif yüklenir. MOS yapıda gerilim değiştiğinde, arayüzey durumları valans ve iletkenlik bantlarıyla birlikte yukarı veya aşağı doğru kayarlar. Arayüzey durumlarının yükü, valans ve iletkenlik bantlarıyla elektron alışverişi yaparak değişir. Bu yük değişimi, MOS kapasitansını etkileyerek ideal MOS C-V eğrisinden sapmasına sebep olur. Yani, arayüzey durumları ideal C-V eğrisinin kaymasına yol açar. Arayüzey durumları, uzay yükü kapasitansı (C_{ss}) ile paralel bir kapasitans ve seri bir direnç oluşturur. Arayüzey durumlarının rolünü gösteren eşdeğer devre Şekil 2.7’de verilmiştir. Arayüzey durumlarının taşıdığı yük miktarı Q_{ss} , yarıiletkenin katkı seviyesi ve oksit tabakanın kalınlığından bağımsızdır. Şekil 2.7’deki devrede, arayüzey durumlarının kapasitansı C_{ss} olarak gösterilmiştir.

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_{ss}} \times A_{ox} \quad (2.3)$$

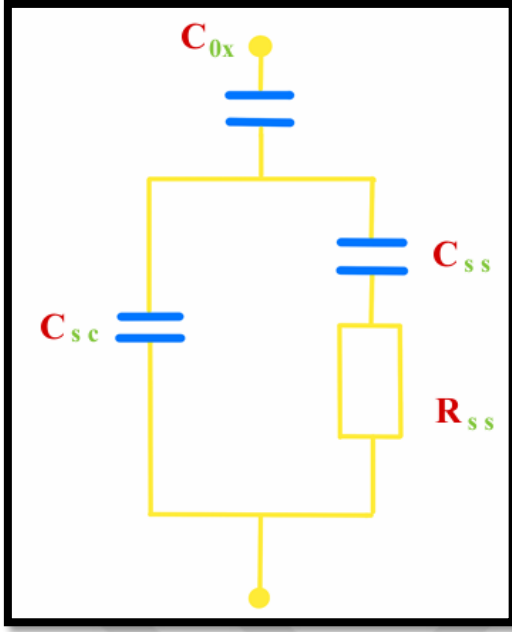
Arayüzey direnci R_{ss} , şekilde gösterilmiştir. R_{ss} ve C_{ss} seri olarak bağlandığından, durulma süresi $\tau = R_{ss} \cdot C_{ss}$ formülüyle hesaplanır. Arayüzey durumlarının enerji başına sahip olduğu durum sayısı,

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.4)$$

$E = q\psi_s$ olarak ifade edilir. Buna göre tekrar düzenlenirse:

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \frac{\partial \psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \quad (2.5)$$

olur.



Şekil 2.7. MOS yapının eşdeğer devresi

2.2.2. Sabit oksit yükleri

Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde, oksidasyon, tavlama ve silisyum yönelimi gibi faktörlere bağlı olarak sabit oksit yükleri oluşur. Bu yükler, tabakalı bir şekilde arayüzeyde yer alır ve pozitif ya da negatif olabilir. Sabit oksit yükleri, MOS yapının yüksek frekanslı C-V eğrisini etkiler. Pozitif sabit oksit yükleri ($+Q_F$), ideal C-V eğrisine göre gerçek C-V eğrisinin negatif gerilim yönüne doğru kaydırır. Negatif sabit oksit yükleri ($-Q_F$) ise, ideal C-V eğrisine göre gerçek C-V eğrisinin pozitif gerilim yönüne doğru kaydırır [37-39].

C-V eğrisi, MOS kapasitans eğrisidir ve sabit yükün etkisiyle gerilim ekseni yönünde paralel olarak kayar. Bu kaymanın büyüklüğü ΔV ile gösterilir.

$$\Delta V = \frac{Q_{fc}}{C_{ox}} = \frac{\Delta Q_{ox}}{C_{ox}} \times q \quad (2.6)$$

C-V eğrisinin ideal durumdan sapması oksit içi, arayüzey ve arayüzey durum yük yoğunluklarını hesaplamak için kullanılabilir. Bu yük yoğunlukları, gerçek ve ideal C-V eğrileri arasındaki kayma miktarıyla ilişkilidir. Yük yoğunlukları şöyledir:

$$\Delta Q_{ox} = \frac{\Delta V_{MG} C_{ox}}{q} \quad (2.7)$$

$$\Delta Q_{eff} = \frac{\Delta V_{FB} C_{ox}}{q} \quad (2.8)$$

$$\Delta Q_{ss} = \Delta Q_{eff} - \Delta Q_{ox} \quad (2.9)$$

Bant ortasındaki gerilim kaymasını ΔV_{MG} , düz bant gerilim kaymasını ise ΔV_{FB} ile gösteririz. ΔV_{FB} , oksit içindeki sabit veya hareketli yüklerden kaynaklanır. Bu yükler, gerçek ve ideal C-V eğrileri arasındaki farkı oluşturur.

2.2.3. Yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yük

Kimyasal bozukluklar ve radyasyon, yalıtkan oksit içinde yüklerin tuzaklanmasına neden olur. Bu tuzaklar, yarıiletken ile etkileşime girerek yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeylerinde yük artışına yol açar. Yalıtkan oksitte radyasyonun oluşturduğu elektron-boşluk çiftlerinin bir bölümü, yalıtkan içinde tuzak oluşturabilir. Bunun yanı sıra, tünelleme ile yalıtkan oksite elektron ve boşluk girdiğinde, bunlardan bazıları da tuzaklanabilir [37-39]. Oksitte tuzaklanmış yük (Q_{ot}) Eşitlik 2.10 ile verilir,

$$Q_{ot} = -\Delta V_{FB} C_{OX} \quad (2.10)$$

C-V eğrisinde histeresis oluşmasının sebebi, oksit içindeki tuzakların dolum-boşalım davranışdır. Bu davranış, uygulanan gerilimin yönüne ve süresine göre değişir. Negatif gerilim uzun süre verildiğinde, oksit tuzakları elektronları boşluklara bırakarak boşalır. Pozitif gerilim verildiğinde, fermi düzeyi iletim bandına yaklaşır ve oksit tuzakları elektron alır. Gerilim azaltıldığında, fermi düzeyi valans bandına geri döner ve oksit tuzakları elektronları boşluklara verir. Tuzakların dolum-boşalım sırasında, tuzaklardaki elektron sayısındaki değişim, C-V eğrisinin kaymasına neden olan histeresis yükünü oluşturur. C-V eğrisinin iki yönde ölçülen değerleri arasındaki kayma, oksit içindeki tuzak yoğunluğunu gösterir [37-39].

2.2.4. Hareketli iyonik yük

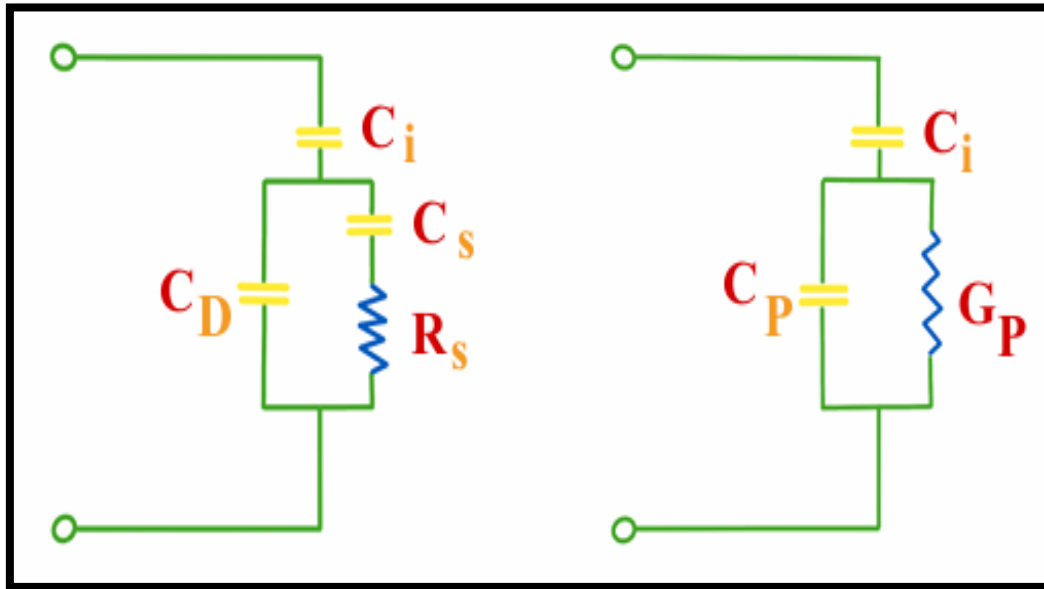
Metal-yalıtkan veya yarıiletken-yalıtkan arayüzeylerde bulunan hareketli iyonik yükler, elektrik alanına tepkisiyle C-V eğrisini kaydırır. Bu yükler iyonlardan oluşur ve genellikle yapım aşamasında kimyasal maddelerden veya oksitlenme gazlarındaki kirleticilerden

kaynaklanır [37-39]. İdeal C-V eğrisindeki düz bant kaymasından faydalanılarak, hareketli iyonik yükler Eşitlik 2.11 ile hesaplanır:

$$Q_m = -\Delta V_{FB} C_{ox} \quad (2.11)$$

2.3. Arayüzey Durumlarının Etkisi

MOS yapısının istenen karakteristiklerini ve işlevini kötü etkileyen arayüzey durumları vardır. Bu durumlar, yarıiletkenin yasak enerji aralığındaki enerji seviyelerine sahiptir ve yarıiletkenin iletim veya valans bandı ile hızlı bir şekilde yük değiştirebilirler. Bu nedenle, bu arayüzey durumlarına rekombinasyon merkezleri de denir. Bu arayüzey durumları ikiye ayrılır: yavaş ve hızlı. Yavaş arayüzey durumları oksit içinde veya oksit-yarıiletken arayüzeyine yakın bölgelerde yer alır ve termal oksidasyon ile çoğunlukla ortadan kaldırılabilirler. MOS yapısının kapasitansına neredeyse hiç etki etmezler. Hızlı arayüzey durumları ise arayüzey takabası ile yarıiletken yüzeyi arasında yer alır ve yasak enerji aralığının ortasına yakın enerjiye sahiptirler. Arayüzey durumlarının etkisini içeren eşdeğer devre Şekil 2.8. ile gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Arayüzey durumları etkili eşdeğer devre

C_i yalıtkan arayüzey tabakasının kapasitansını, C_D ise yarıiletkenin tükenim tabakasının kapasitansını temsil eder. Şekil 2.8' de gösterilen paralel kolun, paralel bağlanmış

kapasitans (C_p) ve iletkenlik (G_p) olarak gösterilen eşdeğer devre elemanları vardır. Admitans ifadesi Eşitlik 2.12 ile verilir;

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_S} + R_S} = G_p + j\omega C_p \quad (2.12)$$

buradaki G_p ve C_p değerleri sırasıyla Eşitlik 2.13 ve Eşitlik 2.14 ile verilir,

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{C_S \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.13)$$

$$C_p = C_D + \frac{C_S}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.14)$$

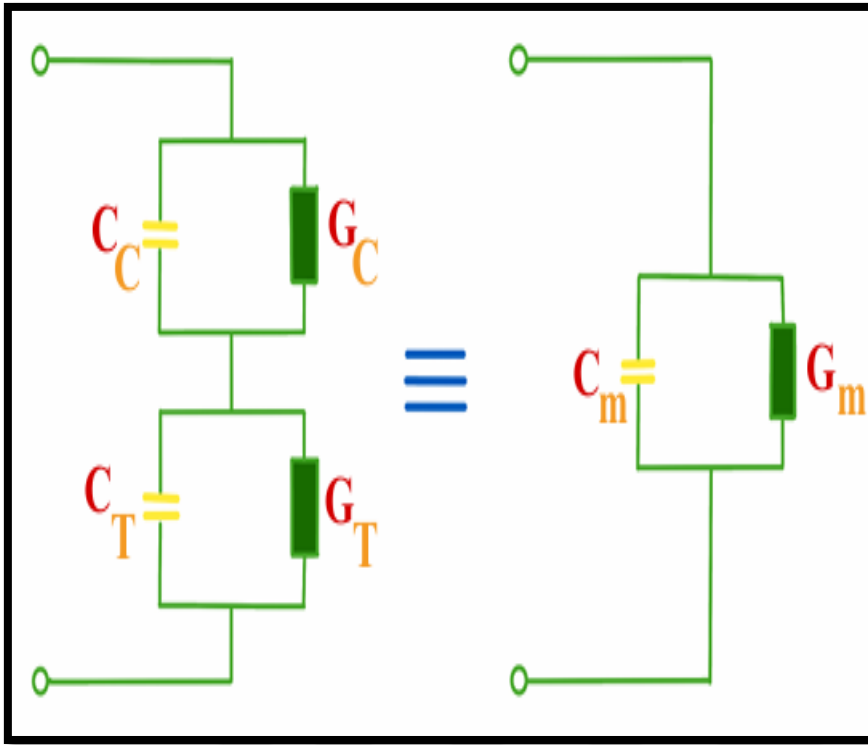
Eşdeğer devrenin toplam empedansı Z ise:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_p + j\omega C_p} = -j \left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \right) + \frac{G_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \quad (2.15)$$

toplam admitans, Y :

$$Y = \left(\frac{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}{G_p} \right) + j\omega \left(\frac{(G_p^2 + \omega^2 C_p^2) C_i}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2 + \omega C_p} \right) = G_m + j\omega C_m \quad (2.16)$$

Arayüzey tuzaklarının davranışını belirleyen faktörlerden biri, arayüzey tuzaklarının ömrü (τ) olan $C_S R_S$ çarpanıdır. Seri direnç (R_S) varsa ve büyükse, gerçek iletkenlik (G_m) ve kapasitans (C_m) değerleri farklı olur. Bu yüzden, düzeltilmiş iletkenlik (G_c) ve kapasitans (C_c) değerleri kullanılır [37-39].



Şekil 2.9. Arayüzey durumları etkili MOS eşdeğer devresi

MOS eşdeğer devresine arayüzey durumlarının etkisi Şekil 2.9’ da verilmiştir.

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_C + G_C}, Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T}, Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \quad (2.17)$$

Empedans ifadeleri şekildeki gibi olur. $Z = Z_1 + Z_2$ ’den $Z_1 = Z - Z_2$ yazılırsa:

$$\frac{1}{Z_1} = j\omega C_C + G_C = \left(\frac{1}{j\omega C_m + G_m} - \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \right)^{-1} \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T G_m) + j(C_T C_m)} \quad (2.19)$$

Şekil 2.19’ un paydası eşleniği ile çarpılıp G_T yerine $1/R_s$ alınır ve C_T değeri ihmal edilip düzenlenirse iletkenlik ifadesi şu şekilde olur:

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.20)$$

Seri direnç R_s değeri Eşitlik 2.21' deki empedans eşitliğinin reel kısmı olup yüksek frekansta ve kuvvetli yığılım bölgesindeki ölçülen C_m ve G_m değerlerinden hesaplanır:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.21)$$

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.22)$$

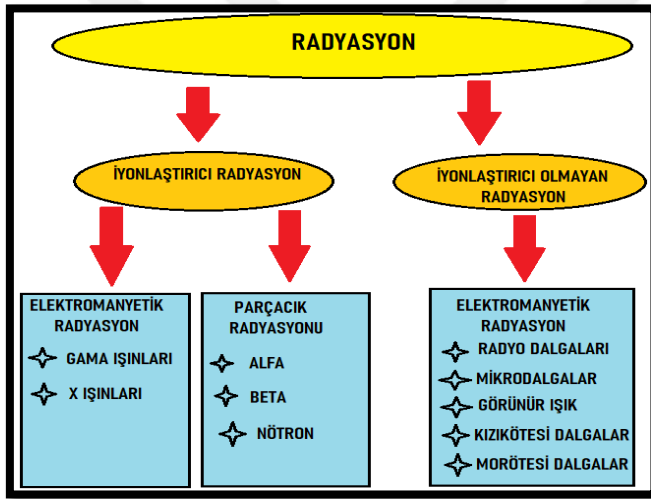
Eşitlik 2.21' nin imajiner kısmı ise:

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.23)$$

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

3. RADYASYON VE ETKİLERİ

Radyasyon, enerji düzeyine göre madde ile etkileşime girer; şekline göre parçacık radyasyonu ve elektromanyetik radyasyon olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Radyasyonun maddeyle etkileşimi göz önünde bulundurulduğunda, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak da ikiye ayrılmaktadır. Atomlardan elektron kopararak iyonlaşmaya neden olan yüksek enerjili radyasyonlar, iyonlaştırıcı olarak tanımlanırken; düşük enerjili olanlar, atomları iyonlaştırma kapasitesine sahip olmadıklarından iyonlaştırıcı olmayan radyasyon sınıfına girmektedir [40]. Radyasyonun türlerine göre sınıflandırılması Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1. Radyasyonun türlerine göre sınıflandırılması

3.1. Gama Radyasyonu

Gama ışınları, elektromanyetik tayfin bir parçası olarak ortaya çıkan radyasyon türüdür. Bir radyoaktif elementte alfa veya beta bozunumu sonucunda çekirdek uyarılmış bir duruma geçtiğinde, bu uyarımın boşalması sırasında enerji seviyesinden temel duruma inen çekirdek, gama fotonu şeklinde enerji yayımlar. Bu yayılan fotonlar, çekirdeğin içindeki geçiş sırasında ortaya çıkan enerji salınımına bağlı olup, alfa veya beta parçacıklarına göre çok daha derinlere nüfuz etme özelliğine sahiptir. Ayrıca, kütsüz ve yüksüz oluşları sebebiyle elektrik ve manyetik alanların etkisiyle yoldan sapmazlar; yüksek enerjilerinin etkisiyle madde içerisinde ışık hızında ilerlerler [37]. Fotonlar, etkileştikleri maddedeki atomlarla temasa geçtiklerinde enerjilerini çevrelerine aktarır; bu durum onların madde

tarafından soğrulmasına veya saçılmasına yol açabilir. Özellikle X ve gama ışınları gibi fotonlar, madde içerisindeki yolculukları sırasında üç temel etkileşim mekanizması sergilerler. Bu mekanizmalar şöyle açıklanır [37, 39].

Fotoelektrik Olay: 70 keV altında enerjiye sahip fotonlar, fotoelektrik etki prensibine uyar. Bu olayda, hedef atom fotonu emer ve atomun çevresinde dolanan elektronlardan biri, enerjinin kazanılması sonucu serbest bir fotoelektron olarak dışarı atılır. Böylece, atomda kalan elektron açığına bağlı olarak pozitif yüklü bir iyon ile serbest elektron yani elektron-boşluk çifti ortaya çıkar.

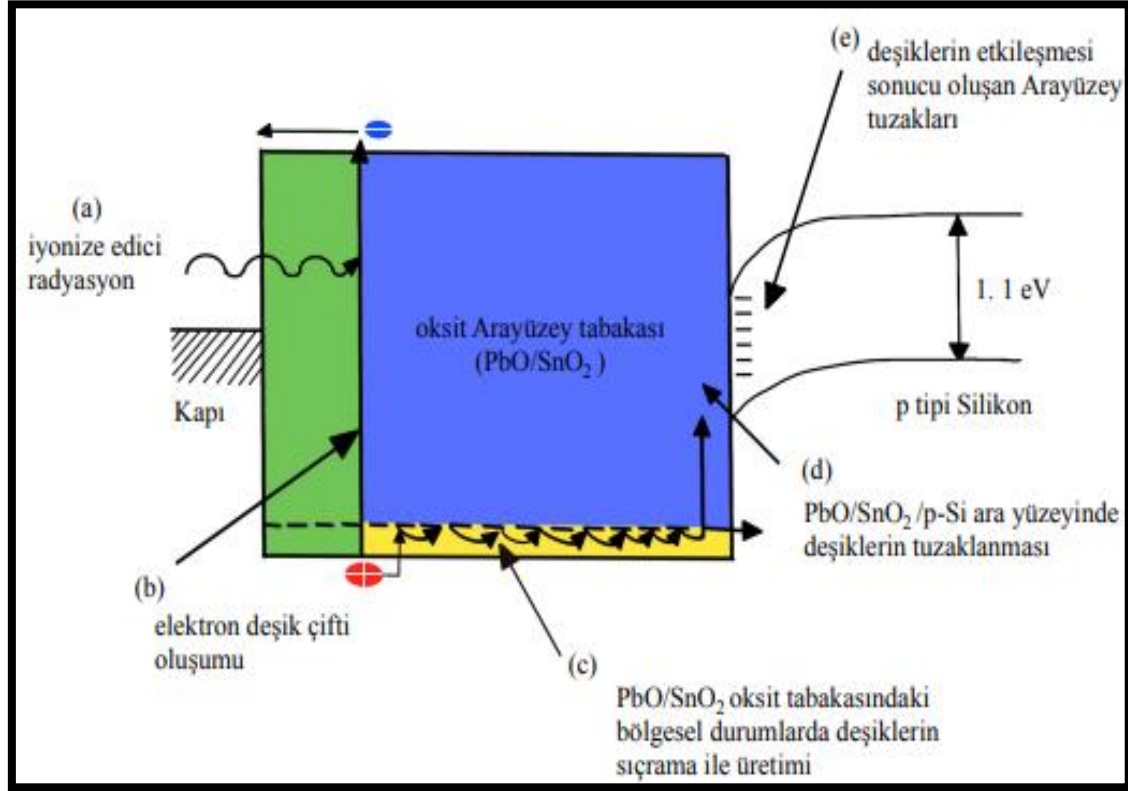
Compton Olayı: 70 keV ile 20 MeV arasındaki fotonlar için egemen etkileşim biçimi, Compton saçılmasıdır. Bu mekanizmada, fotonun tamamı atom tarafından soğrulmaz; aksine, enerjisinin belirli bir kısmını atomdaki bir elektrona aktararak yön değiştirir ve saçılır. Bu etkileşim sonucu atomdan koparılan elektron, Compton elektronu adını alır; bu durum, düşük enerjili Compton fotonuyla birlikte elektron-boşluk çiftlerinin oluşumuna yol açar.

Çift Oluşumu: Fotonun enerjisinin 1,02 MeV'nin üzerinde olması durumunda gerçekleşen bu olayda, foton çarpışma anında tamamen kaybolur. Enerji dönüşümü neticesinde, zıt yüklü özelliklere sahip elektron ve pozitron adlı parçacıklar ortaya çıkar.

3.2. Yarıiletkenlerde Radyasyon Etkisi

MOS yapıların iyonlaştırıcı radyasyona en duyarlı kısmı yalıtkan tabakadır. MOS yapıda radyasyon etkisiyle oluşan durumlar Şekil 3.2'de gösterilmiştir. MOS kapasitöre iyonlaştırıcı bir parçacık geldiğinde elektron-boşluk çiftleri oluşur (durum: a). Malzeme küçük dirençli olduğunda kapıdaki (metal veya polisilikon) elektron-boşluk çiftleri hızlı bir şekilde kaybolur. Oksit içindeki tamamen farklı büyüklükteki mobilitelere sahip olan elektronlar ve boşluklar farklı davranışlar gösterirler. Radyasyon etkisi ile oluşan elektron-boşluk çiftlerinin bir kısmı oluştuktan sonra tekrar birleşirler. Birleşmeyen elektron-boşluk çiftleri oksit içindeki elektrik alan etkisiyle birbirinden ayrılırlar (durum: b). Örneğin girişe uygulanan bir pozitif gerilim durumunda elektronlar çok kısa bir sürede (10^{-12} sn) girişe ulaşmalarına rağmen boşluklar oksit/Si arayüzüne doğru hareket ederler (durum: c). Arayüzeye yakın fakat halen oksitte bir sabit pozitif yük verebilen boşlukların bir kısmı da

tuzaklanabilir (durum: d). İyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde, arayüzey tuzakları oluşur (durum: e).



Şekil 3.2. MOS kapasitörde iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumlar



4. SRIM/TRIM SİMÜLASYONU

4.1. SRIM Teorisi

İyon: Z_1 atom numaralı, M_1 kütleli, E enerjili olup E_i/M_1 hızına sahip bir atomdur. Bu atom yüklü de olabilir, nötr de olabilir. Bu hız, bağıl hız karşılaştırması yapmak için kullanılır ve karesi genelde önemsenmez. Atom; Z_2 atom numaralı, M_2 kütleli bir hedef atomdur. Durdurma gücü; iyonun hedefteki birim uzunluktaki (x) enerji kaybı oranıdır ve dE/dx şeklinde ifade edilir. Yüklü parçacıkların madde içinde enerji kaybetme oranına durdurma gücü adı verilir. Malzemeyle etkileşen iyonun yavaşlamasının teorisi hem iyonun hem de hedefin tanımlanması zor olduğu için geliştirilmesi güçtür. İyon hedefle etkileştiğinde, elektronların bir kısmını kaybeder ve yük durumu hedefe bağlı olarak değişir. Hedef, iyonun yaklaştığını algılar ve elektronlarını iyonun etrafında polarize eder. İyonun yük durumu, hedefin polarizasyonu ile etkilenen sonraki hedef etkileşimleriyle değişir. Tüm bu etkiler, iyonun hızının değişimiyle ilişkilidir. Lindhard, Scharff ve Schiott tarafından 1963 yılında geliştirilen ve LSS-teorisi olarak bilinen durdurma ve dizilim teorisi ilk kez tek bir model içinde durdurma ve dizilim dağılımlarını hesaplayabilen bütünlük bir yaklaşımdır. Bu teori, Lindhard ve arkadaşlarının 10 yıldan fazla süren çalışmalarının ürünüdür ve istatistiksel atom tabanlı durdurma ve dizilim teorisinin en gelişmiş halidir. Bu teori sayesinde, katılarda iyonların oranı iki çarpanla tahmin edilebilir ve çok çeşitli atomik sistemlerde maksimum durdurma gücünün üzerinde uygulanabilir. Bu teori, Thomas-Fermi atomlarına dayandığı için, yalınlanmış veya nötr olmayan çok elektronlu atomlar için geçerli değildir. Ayrıca, teori bombardıman etkisini göz önüne almaz [41]. 1960 ve 1970'lerde, sayısal yöntemlerin geleneksel teorik yöntemlerle birleştirilmesi yeni ilerlemelere yol açtı. Bilgisayarların kullanılması, teoride çok daha gerçekçi Hartree-Fock atomlarının kullanılmasına olanak sağladı ve önemli gelişmeler elde edildi. Bu önemli adımlar, elektronik durdurmada Rousseau, Chu ve Powers tarafından ve nükleer durdurmada Wilson, Haggmark ve Biersack tarafından atıldı [41-43]. Bu teorik adımların bir sonucu olarak, durdurma gücünün hesaplanmasındaki doğruluğun arttığı görüldü. 1930'larda Bethe-Block'un çalışmasından sonra [44], yüksek hızlı protonların durdurulması yaklaşık %20'lik bir doğrulukla hesaplanabiliyordu. 1950'lerin sonuna kadar, protondan daha ağır olan herhangi bir şeyin durdurulmasını hesaplayabilecek bir yöntem yoktu. Bu durum, 1963'te LSS teorisinin ortaya çıkmasıyla birden değişti. Bu teoriyle, çoğu durdurma gücü iki veya üç çarpanla hesaplanabiliyordu ve elementel

hedeflerdeki iyonların oranı iki çarpanla hesaplanabiliyordu. LSS teorisi, atom-atom çarpışmalarının istatistiksel modellemeye dayalı kapsamlı teorilerinin son örneğidir. Sonraki 20 yılda, durdurma ve dizilim hesaplamalarındaki gelişmeler, sayısal tekniklerin kullanılması ve Bohr, Firsov ve Lindhard tarafından kullanılan bazı yaklaşımların gözden geçirilmesiyle gerçekleştirildi [45]. Yeni bir teorik bakış açısı, Brandt ve Kitagawa tarafından sunuldu [46] ve onlar, katılarda hareket eden iyonların iyonizasyon derecesiyle ilgili önerilerini revize ettiler. Bohr'a göre, iyonun anlık hızı yörünge hızından daha küçük olan iyon elektronları, iyonun yüksek hızlı iç elektronlarından ayrılarak yalın hale gelirdi [47]. Brandt ve Kitagawa'ya göre, bu yalınlaşma (soyulma) kriteri, katının fermi hızına yakın olan iyonların elektron hızını da hesaba katmak için değiştirilmesi gerekiyordu [46]. Onlar daha sonra, bu yeni kavramın tam değerlendirilmesini sağlayacak bir formülasyon geliştirmek için çalıştılar. 2003 yılında, durdurma gücü ağır iyonlar için %5-%6, yüksek hızlı hafif iyonlar için %2'den daha iyi bir doğrulukla hesaplanabiliyordu. Amorf elementel hedefler için dizilim dağılımı da neredeyse aynı doğrulukta idi [42].

4.1.1. Atom başına yer değiştirme (DPA)

DPA, radyasyonun türünü, dozunu ve malzemenin özelliklerini içeren ve hesaplanan bir radyasyon hasarı ölçüsüdür. Radyasyonun etkisi altındaki bir malzemenin hasar enerjisi, ısıtılan parçacıkların malzemenin örgü konumundan durgun arayer konumuna kaç atomun geçebileceği olasılığını temsil eder. Her radyasyon hasarı olayı, ana zincir atomundan enerji transferi yaparak komşu atomlarda bir olay üretir. Çarpışma sonucunda, etkilenen bölgedeki birçok atom kendi örgü konumundan kayar, ancak birkaç pikosaniye içinde bu atomların çoğu tekrar eski yerlerine yerleşir ve böylece oluşan hasarın birçoğu geri döner. Hasarın kalıcı kısmı, olay bölgesi sakinleştikten sonra yer değiştiren atomların sayısıdır ve başlangıçta değişen atom sayısının küçük bir kısmını temsil eder. Bu küçük oran, kısmen hesaplanan DPA değerine göre ortaya çıkan hasarın etkinliği olarak bilinir ve malzeme, radyasyon kaynağı ve şartlarına bağlı olarak değişir. Genellikle, radyasyon altındaki yarıiletken yapı uygulamaları için, gerçek hasar ısıtılmış malzemede hesaplanan DPA ile ölçeklenir.

4.1.2. İyonize edici radyasyonun elektronik malzemelere etkileri

Yoğun bir radyasyon kaynağı olan yüksek enerjili iyonlar gibi, kendi örgü pozisyonundan ayrılarak boşluk oluşturan ve uzak bir arayer pozisyonuna yerleşen bir örgü atomu, PKA olarak adlandırılır. Bu süreç, frenkel çiftlerinin oluşmasına neden olur. Yeterli enerjiye sahip bir iyon, yer değiştirme olaylarına neden olan çarpışmaları başlatan bu PKA' ları üretir. PKA tarafından yer değiştiren atomlar ikincil çarpışan atomlar olarak bilinir. Bu şekilde, yüksek enerjili bir iyon, birçok PKA' nın oluşturduğu ve çok sayıda atomik yer değişikliği ile sonuçlanan bir dizi ikincil çarpışmaya yol açabilir. Amacımız, basit modeller kullanarak atom başına yer değiştirmeyi (DPA) hesaplamaktır. Böylece, değerlendirilen DPA' nın malzemelerin mekanik, fiziksel, termal, elektriksel vb. makroskobik özelliklerinde nasıl değişikliklere yol açabileceğini göstermektir. Çoğu atomik yer değişikliği, iyon-kafes etkileşimleri nedeniyle gerçekleşir. Ancak radyasyon sırasında çukurlara yakınlığından dolayı, kendi yerinden ayrılan kusurların büyük bir kısmının tavlandığı için, sadece küçük bir kısmının geride kalabileceğine dikkat etmek gerekir.

4.1.3. Radyasyon hasar modeli

Yüksek enerjili bir iyonun (kütlesi m) ve örgü atomunun (kütlesi M) arasındaki çarpışmayı ele almadan önce, Kinchin ve Pease modelini inceleyelim. Bu model, atomik yer değişikliklerini hesaplamak için basit bir yaklaşımdır. Çarpışma sırasında, iyonun enerjisi E_i ve örgü atomu, iyon tarafından aktarılan enerji T ile savrulur. Ancak, yer değiştirme için bir eşik enerjisi E_d bulunmaktadır ve atom, sadece $T \gg E_d$ olduğunda PKA haline gelir (E_d 'nin değeri oldukça küçük ve genellikle 25 eV'dir). Eğer saçılma işlemi sırasında harcanan enerji önemsiz kabul edilirse, iyon artık $(E_i - T)$ enerjisine sahip olacaktır. $(E_i - T)$ enerjisine sahip bir iyon ve T enerjisine sahip bir PKA, diğer çarpışan atomları meydana getirir.

4.2. TRIM Simülasyonu

Yüksek enerjili bir iyon, hedef atomların ve iyonun kendisinin uyarılması ve iyonizasyonu yoluyla elektronlara elastik olmayan enerji transferi, çekirdeklere elastik enerji transferi (geri tepme) ve yüksek enerjili etkiler (örneğin nükleer reaksiyonlar ve frenleme radyasyonu) [44] yoluyla enerji kaybeder. Birim yol uzunluğu başına enerji kaybı oranına (dE/dx) durdurma gücü veya durdurma kuvveti denir [13]. Basitçe ifade etmek gerekirse,

iyon enerjisi kaybı (1) iyonizasyonla sonuçlanan hedef elektronlara enerji transferi (elektronik durdurma gücü, dE/dx_e) ve (2) eşik yer değiştirme enerjisinin (E_d) üstünde veya altında enerji transferi için atomik yer değiştirmeler veya fonon enerji dağılımıdır. Sonuç, hedef çekirdeklere enerji transferi (nükleer durdurma gücü, dE/dx_n) olarak ikiye ayrılır. Düşük enerjilerde dE/dx_e için en eski teorilerden biri olan LSS teorisi, Lindhard, Scharff ve Schiøtt [14] tarafından geliştirilmiş olup hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, dE/dx_e 'nin doğru bir şekilde belirlenmesi, önemli ölçüde dikkat çeken hem deneysel, hem de teorik [44-51] çalışmalar gerektirmektedir. Lindhard ve diğerleri [50], Thomas-Fermi potansiyeli için dE/dx_n 'yi hesaplamak için kullanılan basit bir ölçekleme fonksiyonuna dayalı, korumalı Coulomb potansiyelleri için evrensel bir saçılma formülü önermiştir. Winterbon ve diğerleri [54], bu ölçekleme fonksiyonu için analitik bir formalizm geliştirdiler ve bunun diğer korumalı Coulomb potansiyellerini tanımlayabileceğini gösterdiler [52, 53]. Prensiplerden hesaplanan 14 farklı diatomik etkileşim için atomlar arası potansiyelleri kullanan Wilson ve diğerleri [54], Moliere benzeri bir potansiyelin düşük enerjilerde dE/dx_n 'yi daha iyi açıkladığını gösterdiler ve bu potansiyel Madde İçinde İyonların Taşınması (TRIM) kodunun [55] ilk versiyonunda kullanıldı. Ziegler, Biersack ve Littmark [56], Wilson ve diğerlerinin [54] çalışmasını 104 atomlar arası etkileşime genişlettiler ve nükleer saçılmayı tanımlamak ve geniş bir enerji aralığında dE/dx_n 'yi belirlemek için Madde İçinde İyonların Yerleşimi ve Aralığı (SRIM) kodunda [56, 57] evrensel bir çözüm kullandılar. Bir saçılma potansiyeli (yani ZBL potansiyeli) geliştirdiler. Radyasyonun MOSFET yapıları üzerindeki etkileri iki türdür: elektron-boşluk çiftlerinin geçici oluşumu ve kristal kafeste kalıcı değişim. İyonlaştırıcı radyasyon oksit tabakasında boşluklar oluşturur, ancak bu boşluklar elektronlardan daha az hareket eder; sabit tuzaklar da mevcuttur. Oksit/yarıiletken arayüzünde, radyasyon dozunun etkisi altında çok sayıda elektron-boşluk çifti oluşur. Bu çalışma, 1,25 MeV enerjili Co iyonları kullanılarak hedef malzeme üzerindeki hasarı incelemiştir. Ortaya çıkan Co iyon implantasyonu, ışık hızında hareket eden elektromanyetik radyasyonun yüksüz, kütsüz fotonlarından oluşur. 1,25 MeV enerjili Co iyonları-madde etkileşimi ve gama ışını/madde etkileşiminin TRIM programında kullanılan iyonlaşma enerjisi bu çalışmada da benzerdir çünkü Gama ışınları elektriksel nötrlükleri nedeniyle etkileşime girdikleri malzemenin elektronlarıyla etkileşime girmezler ve bu sayede uzun mesafeler kat edebilir ve derinlere nüfuz edebilirler. Parçacık veya ışının hedef malzeme üzerindeki etkinliğini gözlemlemek için toplam doz, enerji ve akı dikkate alınmalıdır. Bu açıdan hedef malzeme üzerine gönderilen iyon ve hedef malzeme arasındaki etkileşim incelenmelidir. Hedef

malzemedeki atomu kafes yapısından çıkarmak için gereken enerjiye yer değiştirme enerjisi (E_d) denir. Gelen iyonların enerjisi yer değiştirme enerjisini yenmek için yeterli değilse, hedef malzemenin atomu sadece titreşerek kafes pozisyonunda kalacaktır. Olay iyonunun enerjisi hedef malzemenin kafes yapısını aşarsa, kusur oluşumu mekanizması aktive olur ve hasar meydana gelir.





5. DENEYSEL YÖNTEM

5.1. Al/(PbO/SnO₂)/p-Si (MOS) Yapısı Hakkında Genel Bilgi

Al/PbO/SnO₂/p-Si (MOS) tipi Schottky diyotların (SDs) hazırlanmasında omik ve doğrultucu kontak olarak Alüminyum (Al), arayüzey malzemesi olarak PbO ve SnO₂, yarıiletken olarak p tipi Si kullanılmıştır. Aşağıda bu malzemelerin özelliklerinden bahsedilmektedir.

5.1.1. PbO yapısı ve özellikleri

Kurşun monoksit veya kurşun oksit yapısı inorganik bileşiktir. PbO'nun hem tetragonal hem de ortorombik formları, X-ışını kristalografisi ile piramidal dört koordinatlı Pb merkezi olduğu bilinmektedir. Dört köşeli yapıda dört Pb-O bağ uzunluğu eşittir, fakat ortorombik formda iki kısa ve iki uzun bağ vardır. Piramidal şekil, stereo-kimyasal olarak aktif olan yalnız çift elektronun varlığına işaret eder [8]. PbO tetragonal kafes yapısında ise litarge, ortorombik kafes yapısında ise massicot olarak adlandırılır. PbO, ısıtma ve soğutma ile massicot'tan litarge'ye veya tersi yönde dönüştürülebilir. Tetragonal form genelde kırmızı veya turuncu renkli iken, ortorombik form sarı veya turuncu renklidir; ancak renk, yapının kesin bir belirteci değildir. PbO, cam yapımında sıklıkla kullanılan kurşun türüdür. PbO'nun cam içerisindeki katkısı, camın özelliklerini şu şekilde iyileştirir: camın kırılma oranını yükseltir, akışkanlığını azaltır, elektriksel direncini artırır ve X ışınlarını soğurmasını sağlar. PbO, endüstriyel seramiklere eklendiğinde, malzemelerin manyetik ve elektriksel özelliklerini değiştirir ve bu amaçla tercih edilir. Tarihte PbO, ev seramiklerinde seramik sırlarının bir bileşeni olarak yaygın olarak kullanılmıştır ve hala kullanılmaktadır. Ancak bu kullanım alanı çok popüler değildir. Diğer az bilinen uygulamalar arasında, kauçuk vulkanizasyonu ve bazı pigmentlerin ve boyaların yapımı vardır. PbO, katot ışınlı tüp camlarında, X ışınlarının yayılmasını önlemek için, sadece boyun ve huni kısmında kullanılır. Çünkü ön kaplamada kullanıldığında renk bozulmasına yol açabilir. PbO'nun üretimi ve tüketimi, otomobil sayısı ile bağlantılıdır, çünkü otomotiv kurşun asitli piller PbO'nun ana kullanım alanıdır. PbO için modern uygulamalar ise çoğunlukla kurşun bazlı endüstriyel camlar ve endüstriyel seramiklerdeki bileşenlerdir [39].

5.1.2. SnO₂ yapısı ve özellikleri

SnO₂ formülüyle gösterilen kalay dioksit, inorganik bir bileşik olarak tanımlanır. Bu materyal, yüksek kimyasal ve mekanik dayanıklılık gösteren saydam bir yarıiletken özelliğindedir. Kalay ve oksijen elementlerinin bir araya gelmesiyle SnO₂ meydana gelir. Kalay oksit, büyük mobilité, yüksek donör konsantrasyonu ve geniş enerji aralığına ($E_g=3,6$ eV) sahip bir materyaldir. Kalay dioksit, metal oksitler ailesinin bir üyesidir ve rutil ya da kastirit adı verilen tetragonal bir kristal yapıda atomlar dizilir. Bu kristal yapı, kalay ve oksijen atomlarını içerir ve n tipi bant aralıklı bir yarıiletken olarak davranır. Stokiyometrik SnO₂ filmler, oda sıcaklığında yalıtkan özellik gösterirler. Ancak stokiyometrik olmayan kalay oksit, kafes yapısının bozuk olması ve oksijen boşlukları nedeniyle iletkenlik kazanır. Oksijen boşlukları, SnO₂'yi iletken kılar. Kalay oksit, oksijen eksikliği durumunda, oksijen boşlukları donör olarak işlev görür ve serbest yük taşıyıcıları üretir. SnO₂, metal oksit alaşımı olarak tanınır. Metal oksitler, elektronik ve kimyasal özellikler açısından çok çeşitli oldukları için temel araştırmalar ve teknolojik uygulamalar açısından çok ilgi çekici bir materyaldir. Oksitler, süper iletkenlik ve metallerde bulunmayan geniş bant aralıkları sayesinde elektriksel özelliklerin geniş bir yelpazesini sunar. Kalay dioksit, bu materyallerin bir grubuna dahildir ve optiksel geçirgenliği sayesinde optoelektronik uygulamalar için de kritik bir bileşen haline gelir. Kalay oksit, oksit materyaller arasında çok önemli bir materyaldir. Bunun nedeni, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde yüksek optik geçirgenlik göstermesi (3,5-4,2 eV gibi geniş bir bant aralığına sahip olduğu için) ve düşük elektriksel özdirenç sergilemesidir. Ayrıca kalay oksit, saydam iletken oksitler içinde düşük maliyetli ve atmosferik koşullara uyumlu olmasıyla tercih sebebidir. SnO₂, birçok kullanım alanına sahip bir materyaldir, çünkü pek çok özelliği bir arada taşır. Bu kullanım alanlarından biri de gaz sensörü uygulamasıdır. Metal oksit (genelde SnO₂) ile yapılan gaz sensörleri, hava ortamında elektrik direncinin değişmesine bağlı olarak oksitleyici veya yanıcı gazları tespit eder. Nano boyutlu SnO₂ kullanarak yapılan sensörler, daha düşük çalışma sıcaklıklarında daha duyarlı gaz algılama uygulamaları sunarak sensörleri daha da mükemmelleştirmiştir. Gaz kaçağı alarmı, yangın alarmı, araçlar için otomatik ayarlayıcı, hava kalite kontrolü, alkol tespit edici, koku algılayıcı, ozon tespit edici vb. gibi yerlerde çeşitli uygulama alanları vardır. SnO₂, güneş pili yapımında da çok önemli bir konuma sahiptir [39].

5.1.3. N-tipi ve p-tipi silisyum yarıiletkenler

Yarıiletkenler, iletkenlik bandında ve valans bandında az sayıda elektron ve boşluk içerdikleri için akımı zayıf iletirler. Bu yüzden asal silisyum (veya germanyum) gibi yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliklerini yükseltmek ve elektronik cihazlarda işe yarar hale getirmek için serbest elektron ve boşluk miktarını çoğaltmak gerekir. Bu, asal yarıiletkene safsızlık atomlarının katılmasıyla sağlanır. Bu şekilde oluşturulan yarıiletkenlere katkılı yarıiletkenler denir ve n-tipi ve p-tipi olmak üzere iki çeşidi vardır. Bu yarıiletkenler birçok elektronik aygıtın temelini oluşturur. Yarıiletkenlerin iletkenlikleri genel olarak düşük olduğu için, asal yarıiletkene safsızlık atomlarının kontrollü bir şekilde katılmasıyla iletkenlikleri iyileştirilebilir. Bu işleme katkılama denir ve bu sayede akım taşıyıcılarının sayısı arttırılabilir [58]. Asal silisyumdaki iletkenlik bandı elektronlarının sayısını çoğaltmak için beş valans elektronlu safsızlık atomları katılır. Bunlar arsenik (As), fosfor (P), bismut (Bi) ve antimon (Sb) gibi atomlardır. Beş valans elektronlu bir atom (antimon gibi) dört silisyum atomu ile kovalent bağ kurar. Antimon atomunun 4 valans elektronu silisyum atomları ile kovalent bağ oluşturmak için kullanılır ve bir elektron serbest kalır. Bu fazla elektron bağa dahil olmadığı için iletkenlik elektronu haline gelir. Beş valans elektronlu atom yarıiletkene bir elektron verdiği için donör atomu olarak adlandırılır. İletkenlik elektronlarının sayısı, silisyuma katılan safsızlık atomlarının sayısı ile dikkatli bir şekilde ayarlanabilir. Bu katılama işlemi ile üretilen iletkenlik elektronu, valans bandını tamamladığı için valans bandında bir boşluk bırakmaz. Akım taşıyıcılarının büyük bölümü elektronlar olduğu için, beş valans elektronlu atomlarla katılanmış silisyum (veya germanyum) n-tipi bir yarıiletken olarak isimlendirilir. n-tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılar elektronlardır. n-tipi yarıiletkende akım taşıyıcılarının büyük bölümü elektron olsa da termal olarak elektron-boşluk çiftleri oluşacağı için boşluklarda bulunur. Bu boşluklar beş valans elektronlu safsızlık atomlarının katılmasıyla oluşmaz. n-tipi bir malzemedeki boşluklara azınlık taşıyıcıları denir. Asal yarıiletkende boşluk sayısını çoğaltmak için üç valans elektronlu safsızlık atomları katılır. Bunlar bor (B), indiyum (In) ve galyum (Ga) gibi atomlardır. Şekilde görüldüğü gibi üç valans elektronlu bir atom (bor gibi) komşu dört silisyum atomu ile kovalent bağ oluşturur. Bor atomunun 3 valans elektronu kovalent bağ yapmak için kullanılır ve kovalent bağ yapısını tamamlamak için 4 elektron gerektiğinden her bor atomu katıldığında bir boşluk oluşur. Üç valans elektronlu atom bir elektron alabildiği için akseptör atomu olarak adlandırılır. Boşlukların sayısı, silisyuma katılan üç valans elektronlu safsızlık atomlarının sayısı ile dikkatli bir şekilde

ayarlanabilir. Bu katkılama işlemi ile oluşan boşluk, bir iletkenlik elektronu ile eşleşmez. Akım taşıyıcılarının büyük bölümü boşluklar olduğu için, üç valans elektronlu atomlarla katkılanmış silisyum (veya germanyum) p-tipi bir yarıiletken olarak isimlendirilir. p-tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılar boşluklardır. p-tipi yarıiletkendeki akım taşıyıcılarının büyük bölümü boşluklar olsa da termal olarak elektron-boşluk çiftleri oluşacağı için iletkenlik bandında elektronlar da vardır. Bu iletkenlik bandı elektronları üç valans elektronlu safsızlık atomlarının ilavesiyle oluşmaz. p-tipi yarıiletkendeki azınlık taşıyıcılar elektronlardır [59].

5.2. Al/(PbO/SnO₂)/p-Si Yapısının Hazırlanması

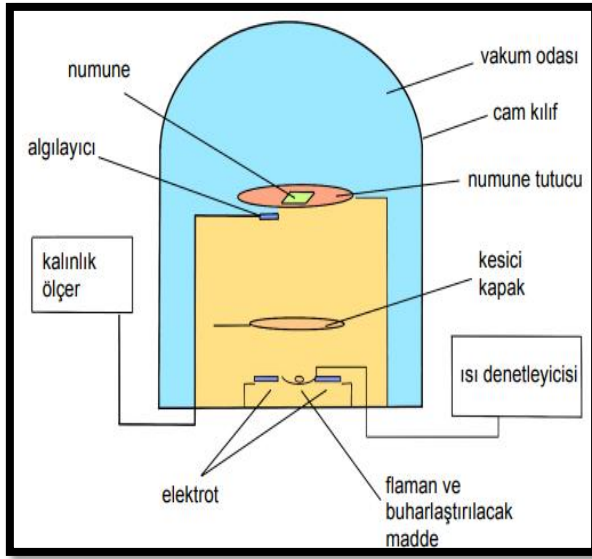
Al/(PbO/SnO₂)/p-Si (MOS) Schottky diyotun üretimi; kristal temizleme işlemi, omik kontak oluşturulması, arayüzey tabakasının üretimi ve p tipi Si alttaşı üzerine büyütülmesi ile doğrultucu kontak oluşturulması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Kristal temizleme

Schottky diyotların üretiminde aygıtların verimli çalışabilmesi için yarıiletken yüzeyi çok temiz olmalıdır. İyi temizlenmemiş bir yarıiletkende laboratuvar ortamında bazı organik kirlilikler veya kontak oluşturma sırasında çok sayıda safsızlıklar oluşabilir. Bu yarıiletkenler kimyasal olarak iyi temizlenerek çok sayıda yüzey kusuru ve organik kirlilikler önlenabilir. Bu tür kirler ultrasonik banyo kullanılarak minimum seviyeye indirgenebilir. Al/PbO/SnO₂/p-Si (MOS) Schottky diyotu oluşturulurken (100) yönelimli, 200 µm kalınlıklı, 2" (inç) çaplı ve Bor katkılı p-Si tek kristal alttaşı kullanıldı.

5.2.2. Omik kantağın oluşturulması

Omik ve doğrultucu kontak oluşturmak için Şekil 5.1'deki metal buharlaştırma sistem verilmektedir.



Şekil 5.1. Metal buharlaştırma sisteminin şematik diyagramı

Omik kontak oluşturmak için, kimyasal olarak temizlenen p-Si arka mat yüzeyine ($\sim 99,999\%$) saflıkta alüminyum (Al) kaplamak için yarıiletken metal buharlaştırma sistemine alındı. Yaklaşık $2,3 \times 10^{-6}$ Torr basınç altında üzerinden akım geçirilen molibden pota yardımı ile metal buharlaştırıldı. Düşük dirençli bir omik kontak elde etmek için yaklaşık olarak $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de N_2 ortamında 10 dakika tavlanarak Al metalinin yarıiletken içine çöktürülmesi sağlandı ve yaklaşık 124 nm kalınlığında Al omik kontak elde edildi.

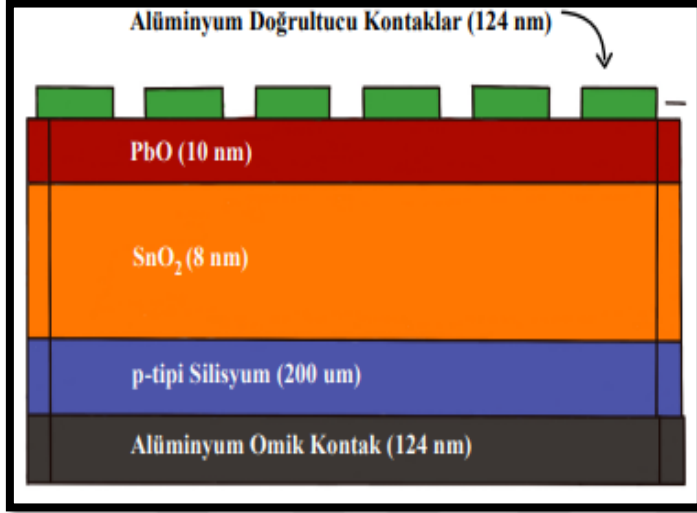
5.2.3. PbO/SnO₂ arayüzey tabakanın oluşturulması

Püskürtme tekniği kullanılarak p-Si alttaşın parlak yüzeyi üzerine 8 nm kalınlığında SnO₂ alttaş üzerine kaplanmıştır. Daha sonra oluşturulan SnO₂ yapısı üzerine yine püskürtme yöntemi kullanılarak 10 nm kalınlığında PbO büyütüldü.

5.2.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Doğrultucu kontak oluşturmak için, hazırlanan arayüzey (PbO/SnO₂) tabakalı yarıiletken, metal buharlaştırma sistemine alındı. Burada arayüzey yalıtkan tabaka üzerine, 1 mm çapında maske yardımıyla 124 nm kalınlığında yine yüksek saflıkta ($\sim 99,999\%$) Al dairesel doğrultucu (Schottky) kontaklar aynı yüksek vakum metal buharlaştırma sisteminde $2,33 \times 10^{-6}$ Torr basınçta doğrultucu kontaklar oluşturuldu. Böylece Al/(PbO/SnO₂)/p-Si (MOS) Schottky Diyot yapıların fabrikasyonu tamamlanmış oldu.

Yapımı tamamlanan Al/(PbO/SnO₂)/p-Si (MOS) yapıların şematik diyagramı Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Al/(PbO/SnO₂)/p-Si (MOS) yapının şematik diyagramı

5.3. DeneySEL Ölçüm Sistemi

Gama radyasyonuna ve frekansa bağlı kapasitans -voltaj (C-V) ve iletkenlik – voltaj (G/ω -V) ölçümlerinde, Hewlett Packard 4192A marka empedans metre kullanıldı. Bu cihaz, -35 V ile 35 V arasında DC gerilim ve 1 mV ile 1.1 V AC tetikleme gerilimi sağlayabilmektedir. Ayrıca, 5 Hz ile 13 MHz arasındaki frekanslarda ölçüm yapabilme kapasitesine sahiptir. Tüm ölçümler, bilgisayara bağlı bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart ve yazılım programı ile kontrol edilerek yapıldı. Al/(PbO/SnO₂)/p-Si yapısı, ⁶⁰Co gama radyasyon kaynağı ile 30 ve 60 kGy dozlarında ışınlandı. Tüm ölçümler geniş bir voltaj ($-2V \leq V \leq 3V$) aralığında, oda sıcaklığında (300 K) ve karanlık ortamda gerçekleştirildi. C-V ve G/ω -V ölçümlerinin yapıldığı empedans analizörü Resim 5.1’de gösterilmiştir.



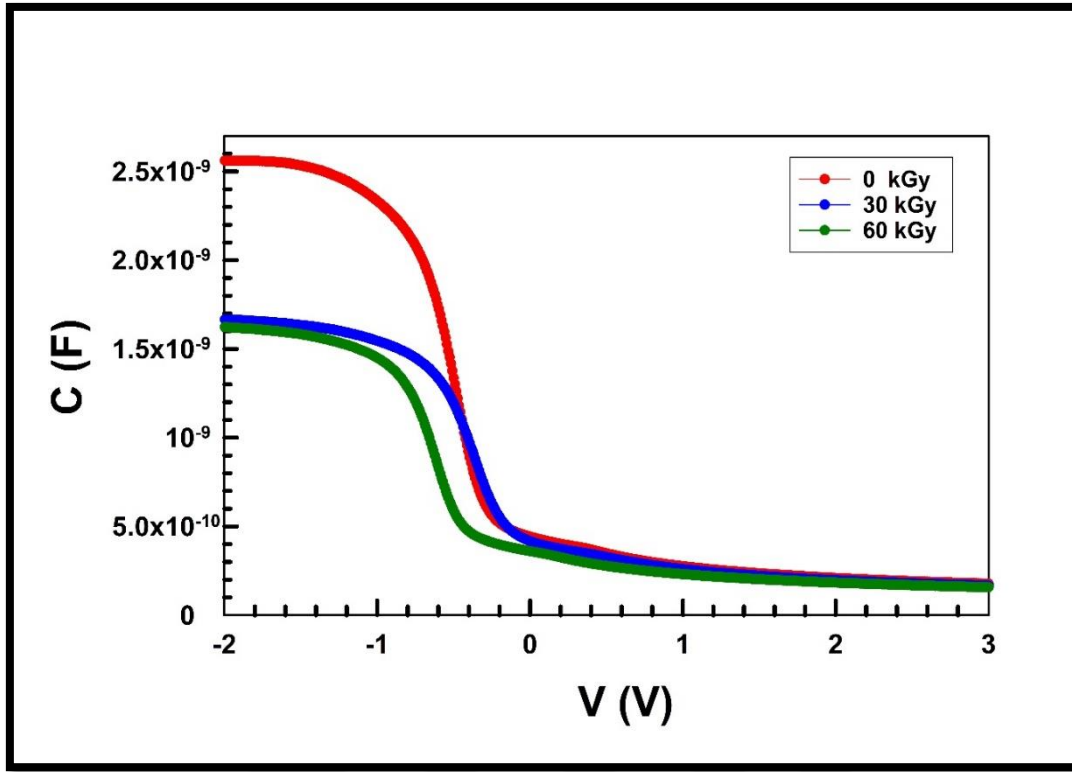
Resim 5.1. HP 4192 LF empedans analizörü ve IEEE-488 AC/DC dönüştürücü seti



6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) Karakteristiklerinde Radyasyona Etkileri

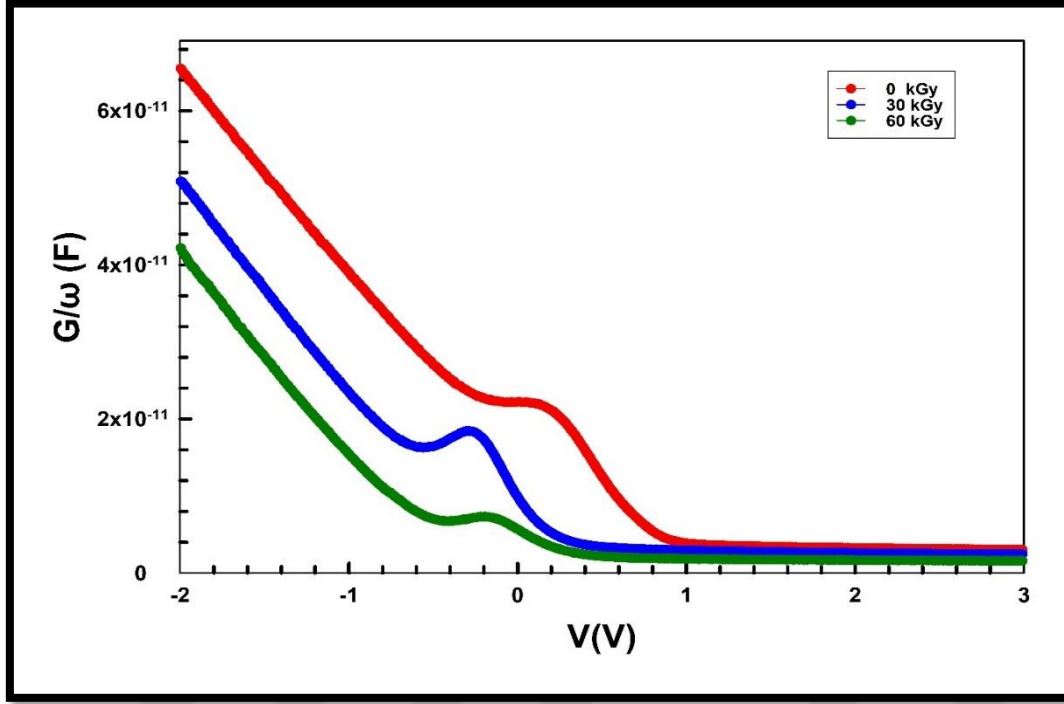
Al/(PbO/SnO₂)/p-Si (MOS) yapısı hazırlandıktan sonra, oda sıcaklığında (300 K), karanlık ortamda 1 MHz frekansında kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri $-2V \leq V \leq 3V$ aralığında alındı. Gama radyasyonunun Al/(PbO/SnO₂)/p-Si (MOS) yapısı üzerine etkisini incelemek için, gama kaynağı olarak saatteki doz hızı 0,30 kGy olan ⁶⁰Co (Kobalt-60) radyasyon kaynağı ile sırasıyla 30 kGy ve 60 kGy dozlarında ışınladı. Ölçüm verileri, radyasyon etkisine göre MOS yapısının elektriksel özelliklerini belirlemek için kullanıldı. Deneysel bulgular aşağıdaki gibidir. Ters beslemeli diyotlarda tersine difüzyon kapasitansı ve C-V değerlerinin bulunması, Schottky diyotlarda sıkça kullanılan bir elektriksel ölçüm tekniğidir. Bu teknik, şekillerde görülen Al/(PbO/SnO₂)/p-Si yapısının C-V ve G/ω -V ölçümlerini düşük ve yüksek frekanslarda sunar. Bu ölçümler, oksit tabakanın kalınlığı, seri direnç ve arayüzey enerji dağılımına göre birikim, tüketim ve tersinim olmak üzere üç bölgeye ayrılır. Yeterince yüksek frekanslarda, arayüzey durumlarının yoğunluğunun rolü önemsizdir, zira arayüzey ve yarıiletken dengeli durumdadır [60, 61]. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de 1 MHz frekansında, radyasyondan önce ve sonra C-V ile G_m/ω -V ölçümlerinden elde edilen grafik verilmektedir. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de ters besleme bölgesinden pozitif voltajlara doğru gidildikçe kapasitans ve iletkenlik değerinde azalma meydana gelmekte. İleri pozitif voltaj bölgelerinde ise artan voltajla birlikte kapasitans ve iletkenlik değerleri neredeyse sabit kalmakta yani kapasitans ve iletkenlik değeri voltajdan bağımsız hale geldiği görülmektedir. Genel olarak bakıldığında kapasitans ve iletkenlik değerleri voltaja bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Böylece; Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de MOS yapısında C- G_m/ω -V değişiminden yığılım (-2V/1V), tüketim (1V/0 V) ve tersinim (0 V/3 V) bölgelerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6.1. Al/(PbO/SnO₂)/p-Si (MOS) yapısının C-V grafiği

Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.' de görüldüğü gibi, artan gama radyasyon dozu ile kapasitans ve iletkenlik değerlerinin tükenim ve yığılma bölgelerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, (PbO/SnO₂)/p-Si (oksit tabaka/yarıiletken) arayüzeyinde gama radyasyonunun meydana getirdiği arayüzey tuzak yüklerinin azalmasına atfedilmektedir [62,63]. İyonlaştırıcı radyasyondan kaynaklanan arayüzey tuzaklar kusurları oluşturmaktadır. Radyasyon etkisiyle oluşan bu kusurlar, yapı tarafından soğurulan radyasyon dozuyla orantılıdır. MOS yapısında radyasyona en duyarlı kısmı yalıtkan tabakadır. Radyasyon uygulandıktan sonra, MOS yapının oksit tabaka içerisinde, yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyinde elektron-boşluk çiftleri oluşur. Elektrik alan etkisiyle, elektron-boşluk çiftleri yalıtkan içerisinde birbirinden ayrılabilir. Bu durumda, elektronlar girişe doğru hareket eder. Oksit ve yarıiletken arayüzeyine doğru hareket eden boşlukların bir kısmı oksit içerisinde tuzaklanabilir. Diğer tuzaklanmayan boşluklar ise, oksit ve yarıiletken arayüzeyinde arayüzey tuzakların oluşumuna neden olurlar [64-66]. Gama radyasyondan önce ve sonra elde edilen Şekil 6.2' de verilen $G/\omega-V$ eğrileri yaklaşık sıfır volt civarında bir pik vermektedir. Bu pikler artan radyasyon dozu ile negatif voltaja doğru kaymaktadır. Bu sonuçlar, yapı radyasyona tabi tutulduktan sonra arayüzeyde radyasyondan kaynaklanan arayüzey durumlarının oluştuğunu ve bunların radyasyon dozuna bağlı

konum değiştirdiğini göstermektedir. Radyasyon dozu arttıkça G/ω değerindeki azalma radyasyon etkisiyle oksit tabaka/Si arayüzeyindeki boşluklar, kusur kümeleri ve dislokasyonların içindeki örgü kusurlarının oluşumuna atfedilebilir [89, 90].



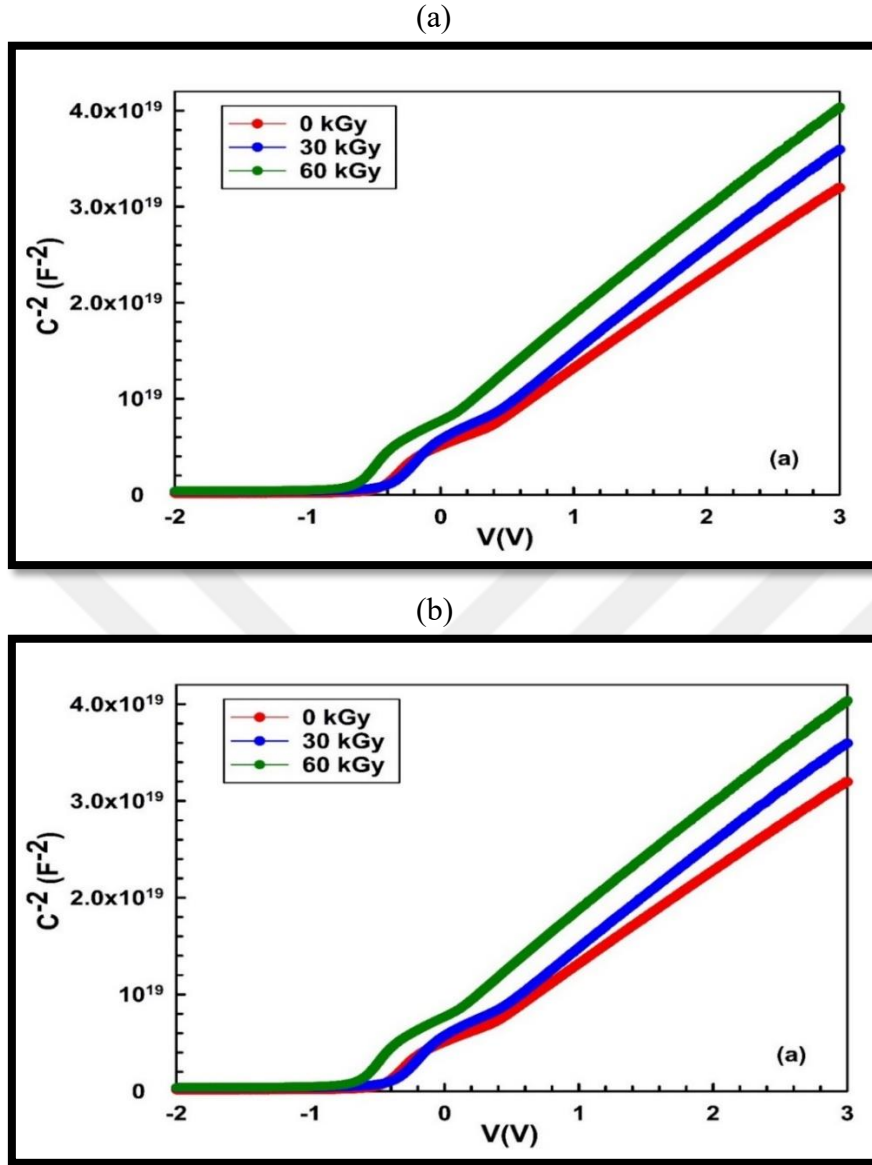
şekil 6.2. Al/(PbO/SnO2)/p-Si (MOS) yapısının G/ω -V grafiği

MOS yapısının 1 MHz frekansında, ters besleme voltajı (V_R) ile ilişkili olan tükenim bölgesi kapasitansı Eşitlik 6.1 ile verilmektedir.

$$C^{-2} = \left(\frac{2}{A^2 q N_A \epsilon_s} \right) (V_D + V_R) \quad (6.1)$$

V_R ifadesi; ters besleme gerilimi Fermi seviyesi ile yarı iletkenin değerlik bandı arasındaki oluşan farklılığı tanımlar.

C^{-2} -V grafikleri, p-tipi yarı iletken katkı konsantrasyonunun tüketim bölgesine etkisini göstermek için Schottky-Mott standardı ile çizilir. Bu grafikler, şekil 6.3' de 500 kHz ve 1MHz frekansında gama radyasyonundan önce ve sonrası için verilmiştir. Bu grafikler, doğrusal bir ilişki sergiler ve doğrunun eğimi, katkı konsantrasyonuna bağlıdır [60, 67].



Şekil 6.3. Al/(PbO/SnO₂)/p-Si (MOS) yapısının (a) C-2-V ve (b) lineer bölge grafikleri

Şekil 6.3’ deki lineer bölgenin kesişme voltajı (V_0) kullanılarak difüzyon potansiyeli ifadesi eşitlik 6.2 ile bulunur.

$$V_D = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (6.2)$$

C⁻²-V eğrisinin lineer bölgenin eğimi ($\tan\theta$) eşitlik 6.3 kullanılarak deneysel verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_A) hesaplanır.

$$N_A = \frac{2}{q \epsilon_s \epsilon_0 A^2 \tan\theta} \quad (6.3)$$

Burada, doğrultucu kontak alanı A, yarı iletken geçirgenliği ϵ_s ($\epsilon_s = 11.8 \epsilon_0$) ve vakum geçirgenliği ϵ_0 ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F / m}$) ile verilir. Bariyer yüksekliği ise eşitlik 6.4 ile elde edilmektedir.

$$\phi_b(C - V) = V_0 + E_F + \frac{kT}{q} \quad (6.4)$$

Ayrıca, maksimum elektrik alan (E_m);

$$E_m = \frac{2qV_{bi}N_A}{\epsilon_s\epsilon_0} \quad (6.5)$$

E_F Fermi enerjisi seviyesi:

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) \quad (6.6)$$

Burada N_v iletim bandındaki izinli enerji durumlarının yoğunluğudur ve Eşitlik 6.7 ile ifade edilir.

$$N_v = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_h^*}{m_0}\right)^{3/2} \quad (6.7)$$

Tükenim tabakası W_D genişliği ise,

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{qN_A}} \quad (6.8)$$

Yukardaki formüller kullanılarak Al/(PbO/SnO₂)/p-Si MOS yapısı için V_D , N_A , E_F , E_m , Φ_B ve W_D elektriksel parametreler hesaplanmış ve Çizelge 6.1’de hesaplanan değerler verilmektedir.

Çizelge 6.1. C^{-2} - V grafiğinden elde edilen elektriksel parametreler

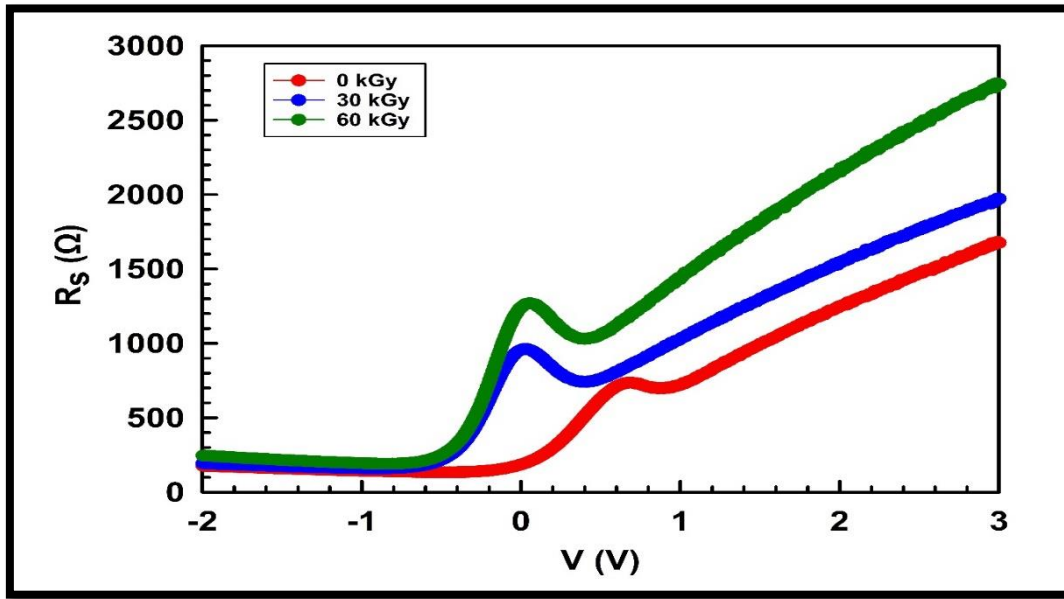
Radyasyon dozu (kGy)	V_0 (V)	V_D (V)	N_A (cm^{-3})	E_F (eV)	W_D (cm)	E_m (V/cm)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
0	0,339	0,364	$6,90 \times 10^{15}$	0,190	$2,53 \times 10^{-5}$	$2,68 \times 10^4$	0,554	177,45
30	0,366	0,391	$6,30 \times 10^{15}$	0,193	$2,75 \times 10^{-5}$	$2,66 \times 10^4$	0,584	193,51
60	0,616	0,641	$5,83 \times 10^{15}$	0,195	$3,71 \times 10^{-5}$	$3,332 \times 10^4$	0,836	246,08

Çizelge 6.1’den elde edilen elektriksel parametrelere göre radyasyon etkisiyle V_0 , V_D , E_F , E_m , Φ_B ve W_D değerleri artarken N_A değeri azalmıştır. Taşıyıcı konsantrasyonu (N_A) radyasyon etkisiyle $6,90 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ değerinden $5,83 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ değerine düşmüştür. Alıcı katkı atomları yoğunluğundaki bu azalma (PbO/SnO₂)/p-Si arayüzeyindeki tuzaklarda yeniden birleşme ve oluşumun sonucudur. Radyasyon etkisiyle Φ_B değeri, kesme noktası potansiyeli V_0 değerinin artışından dolayı 0,554 eV değerinden 0,836 eV değerine yükselmiştir. Φ_B değerindeki radyasyona bağlı artış, literatürde yaygın bir davranış olarak görülmüştür [68-70] ve bu davranış C^{-2} - V grafiklerinin kaymasından kaynaklı olarak V_D değerlerindeki artışla açıklanmıştır. Ayrıca, bariyer yüksekliği değerleri arasındaki farklılıklar, yarıiletken içindeki tuzaklanmış yükler ve arayüzeyin varlığı ile ilişkilendirilebilir. MOS yapısının seri direncine (R_s) radyasyonun etkisini görmek için, C - V ve G/ω - V ölçümlerinden R_s değerlerini bulmak gerekmektedir. Literatürde bu amaçla çeşitli metotlar mevcuttur [62-66, 71-80]. Bu çalışmada, Nicollian ve Goetzberger’in geliştirdiği metot kullanılmıştır [81]. Bu metoda göre, MOS yapısının R_s değerleri, yüksek frekanslarda güçlü yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans, (C_{ma}) ve iletkenlik (G_{ma}) değerlerinden hesaplanmaktadır. Çünkü, yüksek frekanslarda arayüzey durumları (N_{ss}) uygulanan gerilimin AC sinyaline uyum sağlayamaz ve C ve G/ω değerlerini etkilemez. MOS yapısının ölçülen admitansı (Y_{ma}) [62-66, 71-80] paralel RC devresi ile:

$$Y_{ma} = \frac{1}{Z_{ma}} = G_{ma} + j\omega C_{ma} \quad (6.9)$$

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (6.10)$$

Şekil 6.4'den görüldüğü gibi R_s değeri tersinim bölgesinde uygulanan voltajdan etkilenmemiş ancak birikim bölgesinde radyasyon sonrası bir artış gözlenmiştir. Seri direncin bu voltaj bağımlılığı, arayüzey tuzak yükleri, oksit yükleri ve (PbO/SnO₂)/p-Si arayüzey sınırında oluşan parçacıkların bir sonucudur [89]. Artan radyasyon dozu ile iletkenliğin azalması nedeniyle seri direnç artmaktadır [71, 81-84].



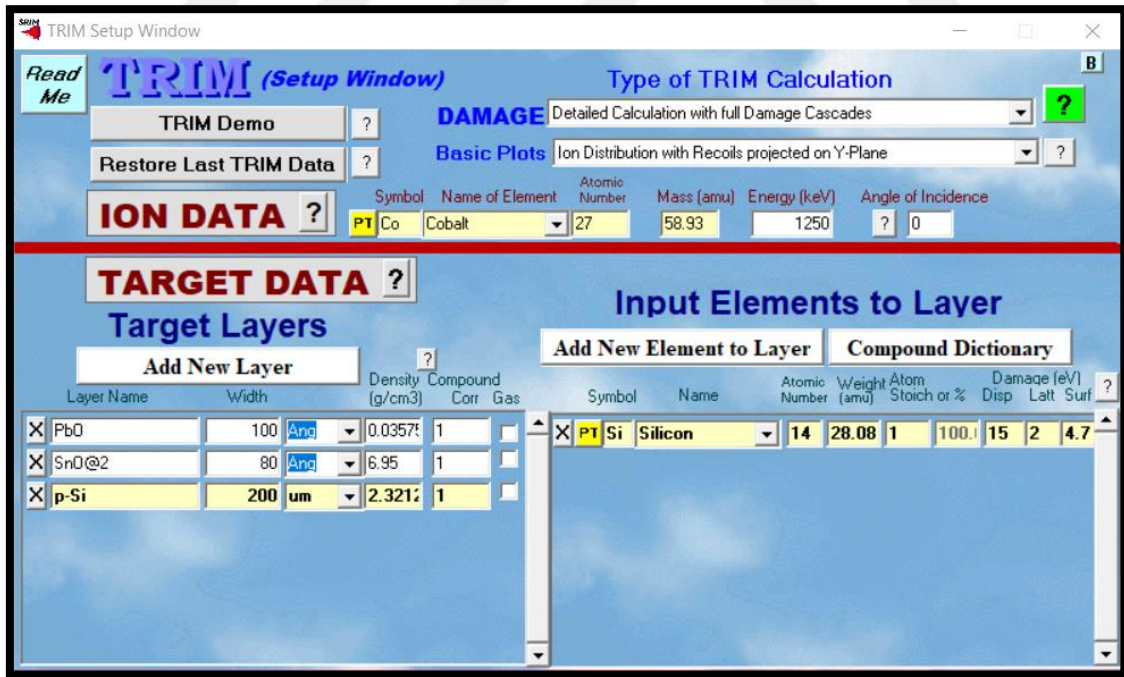
Şekil 6.4. Al/(PbO/SnO₂)/p-Si MOS yapısının R_s -V grafiği

Radyasyondan önce ve sonra seri direnç eğrileri tükenim bölgesinde bir pik vermekte ve bu pikin pozisyonu artan radyasyonla ileri negatif gerilimlere doğru kaymaktadır. Bu durum, pik bölgesindeki arayüzey durumlarının yeniden yapılanıp düzenlenmesine atfedilir [34-36].

6.2. TRIM Simülasyonunun Uygulanması

Atom başına yer değiştirmenin (dpa) hesaplanması, iyon-madde etkileşimlerinden kaynaklanan kusur üretimini ve malzemelerdeki hasarı belirlemenin temelidir. İyon kaynaklı hasar profillerini hesaplamak için SRIM kodu [64, 76, 77] iki yöntem sunar: (1) hızlı TRIM hesaplaması (iyon dağılımı ve hızlı hasar hesaplaması) veya (2) tam kademeli TRIM hesaplaması (tam hasar kademeleri ile ayrıntılı hesaplama). Bu çalışmada tam kademeli TRIM hesaplaması yöntemi seçilmiştir. Tam kademeli simülasyon, yer

değiştirme olayları dahil olmak üzere tüm enerji transferi olaylarını ve yer değiştirmiş atomların sayısını ve konumlarını kaydeder ve sayar. Yer değiştirmiş atomların toplam sayısı, gelen bir iyon tarafından oluşturulan tüm boşluklar ve yer değiştirmeler ve PKA'nın yolu boyunca oluşturduğu adımlar dikkate alınarak hesaplanır. Çok sayıda olay iyonunun istatistiksel analizi, her derinlik artışında ve toplamda TRIM'deki boşluklar ve yedek atomlar dahil olmak üzere yer değiştirmiş atomların ortalama sayısını sağlar [56,57]. Bu çalışmada, atom başına yer değiştirmeyi hesaplamak için SRIM-2013 yazılımının (tam hasar kademeli (full damage cascades) TRIM seçeneği kullanıldı. Hasar hesaplamaları, SRIM yazılımını oluşturmak için kullanılan Kinchin-Pease modelinden zamanla evrimleşen Norgett-Robinson-Torrens (NRT) modeli kullanılarak gerçekleştirildi. SRIM yazılımı, nükleer ve elektronik durdurma güçlerini hesaplamak ve ayrıca NIEL (iyonlaştırıcı olmayan enerji kaybı) ve LET' i (doğrusal enerji transferi) belirlemek için kullanıldı. Bu bilgiler, malzemedeki boşluk ve hasar üretim mekanizmalarını anlamamızı ve değerlendirmemizi sağlar. SRIM yazılımı, 2B (iki boyutlu) hasar profillerini de sağlayabilen TRIM modülünü içerir.

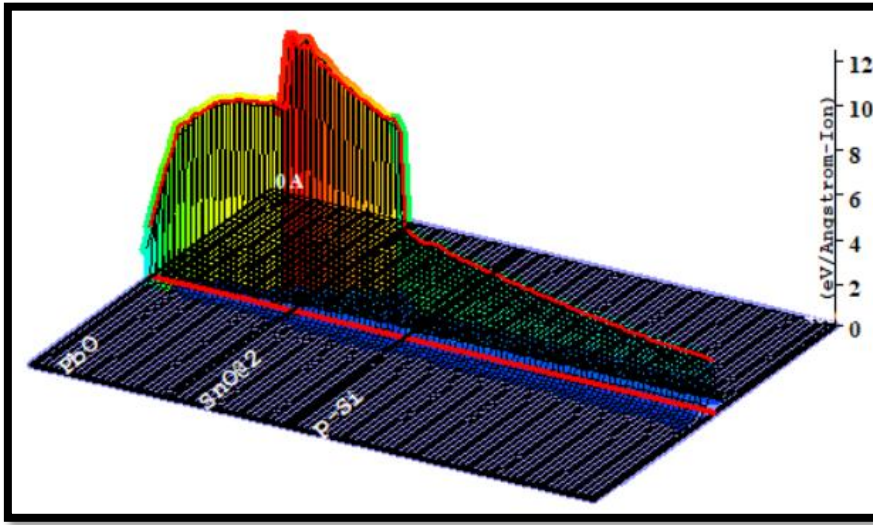


Şekil 6.5. TRIM simülasyon kurulum penceresi

Nükleer ve elektronik durdurma güçlerinden kaynaklanan NIEL ve LET hesaplamalarına dayalı TID (Toplam İyonlaştırıcı Doz) ve D_d (Yer Değiştirme Hasarı) sonuçlarının görselleştirilmesi. TRIM'de hasar ve boşluk hesaplamaları için FC hesaplama yöntemi

kullanıldı. Çalışmada, 1,25 MeV enerjili 99.999 kobalt iyonu ile hedef malzeme arasındaki etkileşim incelendi. Çift arayüz katmanlı MOS Schottky diyot yapısı, 200 μm kalınlığında ve $2,32 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta p tipi Si alttaş üzerine inşa edildi ve sırasıyla 100 Angstrom ile 80 Angstrom kalınlıklarda yoğunlukları $9,53 \text{ g/cm}^3$ ve $6,95 \text{ g/cm}^3$ olan PbO ve SnO₂ çift arayüz katman malzemeleri olarak kullanıldı. Deneysel yöntemde kullanılan nanometre ölçü biriminin SRIM/TRIM simülasyon uygulamasında bulunmaması sebebiyle Angstrom karşılığı olan kalınlık değerleri kullanılmıştır. Işınlama sırasında, Nükleer Durdurma Gücü (S_n) ve Elektronik Durdurma Gücü (S_e) nedeniyle hem nükleer hem de elektronik enerji kayıpları meydana gelir. Nükleer enerji kaybı, olay atomunun iyonları ile hedef malzemenin çekirdekleri arasındaki elastik çarpışmalardan kaynaklanırken, elektronik enerji kaybı hedef malzemenin elektronlarıyla elastik olmayan etkileşimden kaynaklanır. S_n düşük enerjilerde baskınken, S_e yüksek enerjilerde baskındır. Nükleer enerji kaybı boşluklar ve geçiş kusurları gibi hasarlara neden olur. Öte yandan, elektronik enerji kaybı elektron-boşluk çiftleriyle nokta kusurları oluşturur [25-27, 54-57]. Output verileri durdurma gücü hesaplamaları çerçevesinde şekillenir. Olay parçacığı ile hedef malzeme yani olay malzemenin üzerine gönderilen yapının atomları çekirdek ve elektronlar ile etkileşerek birincil iyonizasyon hasarının hesaplanması beklenir. Nitekim SRIM kodları bu hesaplamayı yaparken PKA (primary knock atom) birincil vuruntu atomlarının etkileşimi dikkate alınır. PKA gelen enerjik iyonun malzemede karşılaştığı ilk atomdur. Gelen enerjik iyonun enerjisi; hedef malzemenin atomunu yerinden edecek enerjiye sahip olduğunda (yani yer değiştirme enerjisi gerekli kafes enerjisini yenerse) sahip olduğu enerji ile yerinden fırlatılacak ve malzeme içinde diğer atomları indükleyecektir. Bu durum malzemede kalıcı hasarların oluşma mekanizmasıdır. Ancak PKA; gerekli yer değiştirme enerjisine sahip değilse yer değiştirme enerjisi ile malzemede arayer kusuruna sebep olmaktadır. Hedef malzeme atomları ancak iyonize edici radyasyon kaynağının radyasyon bombardımanı içindeki parçacığın enerjisinin E_d enerjisini aşması durumunda yerlerini değiştirirler [55-57]. Aynı işleyiş; indüklenen PKA 'nın malzeme içinde diğer atomları tetiklemesi için malzeme içinde çarpıştığı sabit atomu yerinden edebilmesi için $2E_d$ enerjisini aşan bir enerjiye sahip olması gerekir ki bu iki atom da çarpışmadan sonra E_d den daha büyük enerjiye sahip olarak iyonizasyona devam edebilsinler. Bu sebeple yalnızca $2E_d$ den daha fazla enerjiye sahip PKA daha fazla hedef malzeme atomunun yerini değiştirebilir. Her çarpışma senaryosunda; yer değiştirmiş hedef malzeme atomları kafeslerinden E_d 'nin 2 veya 3 katı büyüklükteki enerji ile ayrılırlar [56, 57]. Nükleer durdurma gücü yüksek enerjili iyonlar ile hedef malzemenin atom çekirdekleri arasında

oluşan elastik çarpışmalar sonucu meydana gelir. Bu elastik çarpışmalar hedef malzeme üzerinde iyonlaşma meydana getirmez. Burada bahsedilmek istenen şudur: hedef malzeme üzerine gönderilen enerjik iyon; malzemenin atomları ile etkileşime girdiği zaman hedef malzemenin atomlarının kafes yapısı enerjisine karşı kaybediyorsa yani yer değiştirme enerjisi $E_{disp} < E_{latt}$ ise eğer o halde elastik çarpışma meydana gelmiş demektir ve bu iyonize edici olmaz ancak malzeme içerisinde geçici boşluklara yol açtığı bilinmektedir [25-27, 55-57]. Bu enerji NIEL olarak karşımıza çıkar ve TRIM yazılımında fonon grafiği ile ilişkilendirilir.



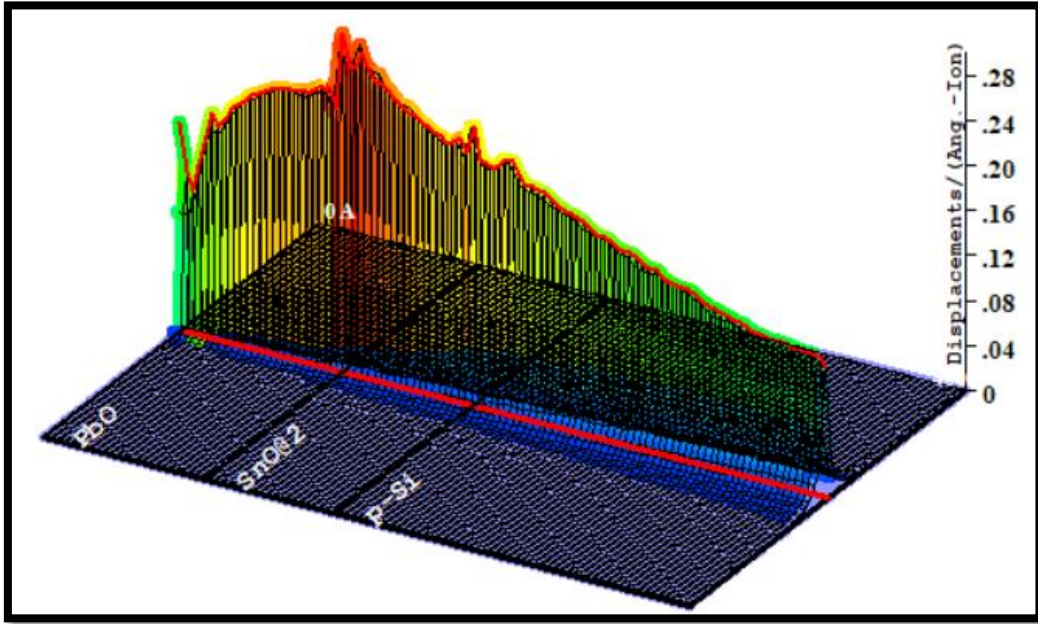
Şekil 6.6. TRIM fonon grafiği

Malzemenin derinliği attıkça durdurma güçlerindeki artış; ancak hedef malzemenin katmanlarının atomları tarafından absorbe edilen enerji ile açıklanabilir. Eşitlik (6.11) ile ifade edilir:

$$NIEL = \frac{N}{A} \int_{\theta_{min}}^{\pi} \left[\frac{d\sigma(\theta, E)}{d\Omega} \right] T(\theta, E) \cdot L(\theta, E) \cdot d\Omega \quad (6.11)$$

Formülde N; avagadro sayısı, A;atom numarası, $T(\theta, E)$; hedef atomlar için ortalama geri tepme enerjisi, $L(\theta, E)$; Linhard bölme fonksiyonu ve θ_{min} ; geri tepme enerjisinin atomik yer değiştirmeler için eşik enerjisine eşit olduğu minimum saçılma açısıdır. Displacement damage kavramı ise NIEL değerine bağlı olarak hesaplanan; malzemede yüksek enerjili iyonların gerçekleştirdiği birincil hasarların niceliği niteliğindedir. Yüksek enerji iyonu, bir hedef malzemenin atomuna çarptığında ve E_{disp} 'ten daha fazla enerji aktarırsa, hedef atomu kristal boşluğundan fırlatılacaktır [56-57]. Displacement Energy, bir hedef atomunu kristal

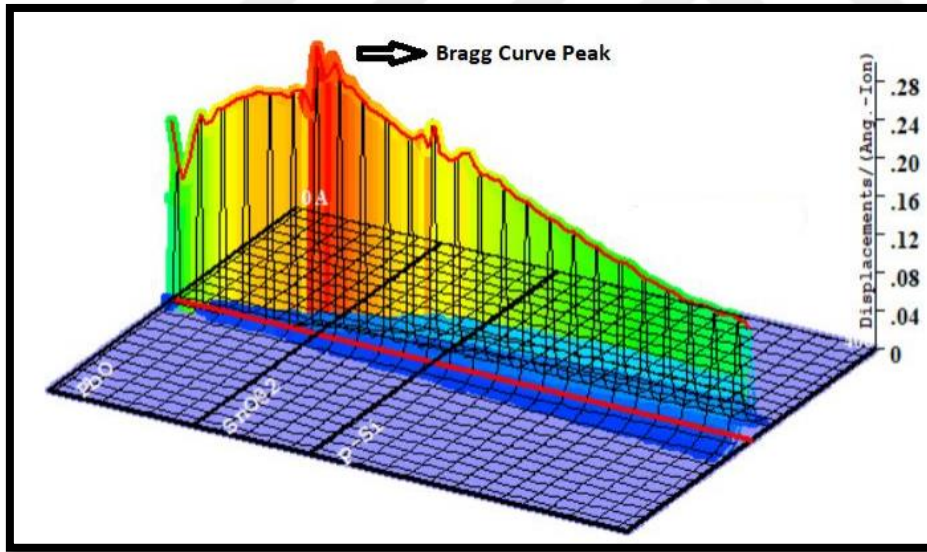
kafesinden yeterince uzaklaştıracak minimum enerjidir, böylece hemen geri dönemez. Bu minimum enerji, bir boşluk ve yakındaki bir aralıklı atomdan oluşan elektron-boşluk çiftini üretir ve foton tarafından neden olunan en temel hasar türüdür. İyon geri tepmesi atomu enerjisi, $E_{\text{recoil}} = E_{\text{disp}} - E_{\text{latt}}$ olarak ifade edilir, E_{latt} enerjisi yani malzemenin kafes yapısı bağ enerjisi yer değiştirme enerjisine karşı kaybedecektir. Hedef geri tepme atomu, enerjisi E_{disp} 'ten daha büyük ise diğer hedef atomlarına çarpıp daha fazla boşluk oluşturduğu bilinmektedir [56,57].



Şekil 6.7. TRIM toplam yer değiştirme grafiği

Malzemenin üzerine gönderilen 1,25 MeV enerjili iyonların, hedef malzeme atomları ile girdiği etkileşim sonucu malzemede oluşan hasar yalnızca yapıdaki yüklü parçacıkların neden olduğu iyonizasyon süreçlerinden değil; aynı zamanda yarıiletken kafes yapısına aktarılan iyonlaştırıcı olmayan enerji nedeniyle oluşan geri tepme atomlarının oluşturduğu yapısal bozulmalardan da kaynaklanmaktadır. Böylece malzemede kalıcı hasarın mekanizması iki temel enerji aktarım süreci ile şekillenmektedir: nükleer durdurma gücü (S_n) ve elektronik durdurma gücü (S_e). Işınlama ile kalıcı hasarın nasıl oluştuğunu açıklayan bir diğer kavram LET (Linear Energy Transfer – Doğrusal Enerji Transferi) kavramıdır. LET, yüklü parçacıkların birim yol uzunluğunda malzemeye aktardıkları enerji miktarını ifade eder. Fotonlar (örneğin gama ışınları) kütsüz ve yüksüz oldukları için doğrudan LET değeri ile tanımlanmazlar. Bununla birlikte, gama fotonlarının madde ile etkileşimi sonucunda oluşan ikincil elektronlar (Compton elektronları) belirli bir LET

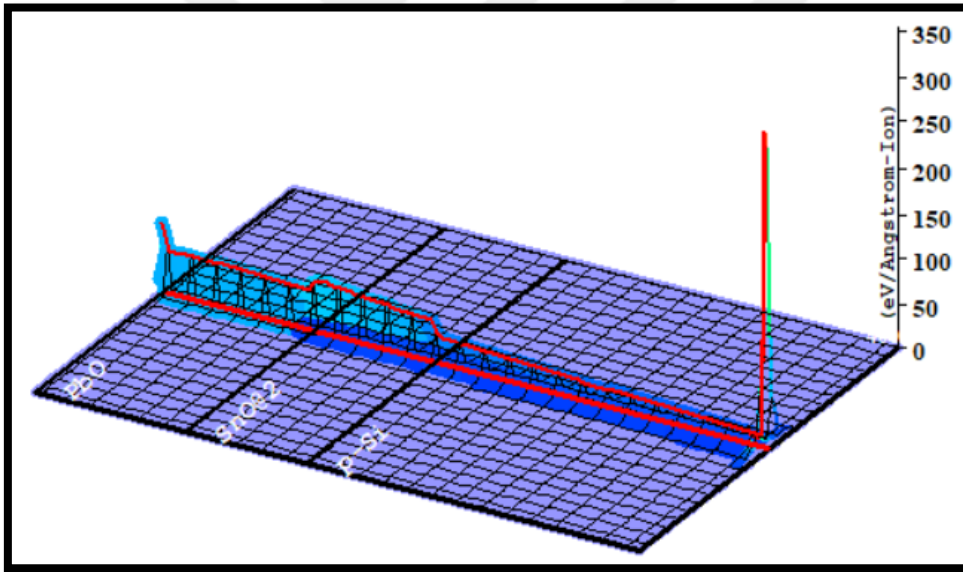
değerine sahiptir ve bu ikincil elektronların LET değeri üzerinden bir ortalama enerji aktarımı değerlendirilebilir. Gama ışınlarının oluşturduğu Compton elektronları malzeme içinde enerji kaybederken yük taşıyan parçacıklar gibi bir enerji transfer profili sergiler; ancak bu süreç Bragg eğrisi (Bragg Curve) kavramıyla ifade edilmez. Bragg eğrisi, yalnızca doğrudan malzemede ilerleyen yüklü parçacıkların (örneğin proton, alfa parçacığı, iyonlar) enerji kaybı profili için geçerlidir ve Compton elektronları için kullanılmaz. TRIM (Transport of Ions in Matter) yazılımı yalnızca iyonların ve diğer yüklü parçacıkların hedef malzeme içindeki elastik ve inelastik çarpışmalarını simüle eder. Fotonlar, örneğin gama ışınları, TRIM veya SRIM yazılımı tarafından doğrudan modellenemez. Dolayısıyla gamma ışınlarının neden olduğu Compton saçılması ve bu saçılmadan doğan ikincil elektronların etkileri TRIM kodu kapsamında hesaplanmaz. Grafikte görüldüğü üzere PbO katmanından giriş yapan kobalt iyonları hedef malzeme ile etkileştikten sonra compton saçılmasına uğrar ve bunun sonucunda compton elektronları oluşur. SnO₂ katmanında compton elektronları Bragg Curve Peak oluşumuna sebep olur.



Şekil 6.8. TRIM hedef malzeme yer değiştirme grafiği

Arayüz tabakasında elektronik durdurma gücü sonucunda hedef malzemede oluşan kalıcı frenkel çiftlerini modellemek için atom başına yer değiştirme (dpa) kavramı kullanılır. Şekil 6.8'de gösterilen grafik, dpa ile hesaplanan yer değiştirmeleri ve bunlarla ilişkili elektron-boşluk çiftlerini göstermektedir. Oksit tabakanın davranışı, arayüz tabakasında oluşan elektron-boşluk çiftlerinin sayısı ile doğru orantılı olarak değişir. Ancak bu sayı sadece elektronların arayüzden uzaklaşmadan önce kaçtıkları boşlukların kesirli sayısına

değil, aynı zamanda elektrik alanına ve arayüzdeki LET (Doğrusal Enerji Transferi) değerine de bağlıdır. Bir elektrik alanı için "elektron-boşluk çiftlerinin ortalama aralığı ne kadar küçükse" veya "LET değeri ne kadar yüksekse" rekombinasyon o kadar fazla olur [85-88]. TID (Toplam İyonlaştırıcı Doz) kavramı LET değeriyle ilişkili olup, malzeme içerisinde enerjik iyonların neden olduğu birikimli iyonlaştırıcı enerjiyi ifade eder ve TRIM yazılımındaki iyonizasyon grafiği ile değerlendirilebilir. Grafikten görüleceği üzere TID değeri malzeme içerisinde derinlik arttıkça artış göstermektedir. Bu durum, enerjik iyonların malzeme içinde ilerlerken ürettikleri ikincil elektronların (Compton saçılmaları yoluyla) sayısının arttığını ve buna bağlı olarak iyonlaştırıcı hasarın derinlikle birlikte yükseldiğini göstermektedir. Bunun sonucunda, özellikle SnO_2 gibi oksit arayüz katmanlarında hem elektron-boşluk çiftleri hem de yüksek enerjili birincil iyonların neden olduğu atomik yer değiştirmeler (dpa) yoluyla kalıcı kusurların yoğunluğu artmaktadır.



Şekil 6.9. TRIM iyonizasyon grafiği



7. SONUÇLAR

Püskürtme tekniği (sputtering) kullanılarak p-tipi Si (p-Si) yarıiletken substrat üzerine PbO/SnO₂ çift katmanı büyütülerek Al/(PbO/SnO₂)/p-Si (MOS) yapısı üretilmiştir. Karakterizasyon amacıyla, oda sıcaklığında (300 K) ve karanlık ortam koşullarında, 1 MHz frekansında kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri -2 V ile +3 V gerilim aralığında alınmıştır. Radyasyon deneylerinde, doz hızı 0,30 kGy/saat olan ⁶⁰Co (Cobalt-60) gama kaynağı kullanılarak MOS yapıları sırasıyla 30 kGy ve 60 kGy toplam dozlarına maruz bırakılmıştır. Radyasyon öncesi ve sonrası elektriksel ölçümler karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilmiştir. Gama radyasyonundan önce ve sonra ölçülen C-V ve G/ω -V ölçümleri sonucunda; C-V ile G_m/ω -V ölçümlerinden elde edilen grafiklerden ters besleme bölgesinden pozitif voltajlara doğru gidildikçe kapasitans ve iletkenlik değerinde azalma meydana gelmekte. İleri pozitif voltaj bölgelerinde ise artan voltajla birlikte kapasitans ve iletkenlik değerleri neredeyse sabit kalmakta yani kapasitans ve iletkenlik değerlerinin voltajdan bağımsız hale geldiği görülmektedir. Genel olarak bakıldığında kapasitans ve iletkenlik değerlerinin voltaja bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Artan gama radyasyon dozu ile kapasitans ve iletkenlik değerlerinin tükenim ve yığılım bölgelerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, (PbO/SnO₂)/p-Si (oksit/yarıiletken) arayüzeyinde gama radyasyonunun meydana getirdiği arayüzey tuzak yüklerinin azalmasına atfedildi. Gama radyasyondan önce ve sonra elde edilen G/ω -V eğrileri yaklaşık sıfır volt civarında bir pik vermektedir. Bu pikler artan radyasyon dozu ile negatif voltaja doğru kaymaktadır. Bu sonuçlar, yapı radyasyona tabi tutulduktan sonra arayüzeyde radyasyondan kaynaklanan arayüzey durumlarının oluştuğunu ve bunların radyasyon dozuna bağlı konum değiştirdiğini göstermektedir. Ayrıca radyasyon dozu arttıkça G/ω değerindeki azalma radyasyon etkisiyle oksit tabaka/Si arayüzeyindeki boşluklar, kusur kümeleri ve dislokasyonların içindeki örgü kusurlarının oluşumuna atfedildi. Üretilen MOS yapısı için V_D , N_A , E_F , E_m , Φ_B ve W_D elektriksel parametreler $1/C^2$ -V grafiğinin lineer bölgesinden elde edildi. Elde edilen elektriksel parametrelere göre radyasyon etkisiyle V_0 , V_D , E_F , E_m , Φ_B ve W_D değerleri artarken N_A değeri azalmıştır. Taşıyıcı konsantrasyonu (N_A) radyasyon etkisiyle $6,90 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ değerinden $5,83 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ değerine düşmüştür. Alıcı katkı atomları yoğunluğundaki bu azalma (PbO/SnO₂)/p-Si arayüzeyindeki tuzaklarda yeniden birleşme ve oluşumun sonucudur. Radyasyon etkisiyle Φ_B değeri, kesme noktası potansiyeli V_0 değerinin artışından dolayı 0,554 eV değerinden 0,836 eV değerine yükselmiştir. Deneysel elde edilen sonuçlar ile iyonize edici

radasyunun etkisi ile arayüzey durumları azalmış malzememiz iyonize edici radyasyon algılanmasında kabul edilebilir seviyelerde olduğunu göstermiştir. Böylelikle hasar gören malzemenin iyonize edici radyasyon etkisi ile hasar durumunda iyileşme gösterdiği ve yeniden kullanılabilirliği doğrulanmıştır. Simülasyon ortamında malzememiz Monte Carlo metodu ile test edilmiştir. (PbO/SnO₂)/p-Si yapısına 1,25 MeV enerjili kobalt iyonu implantasyonu yapılmış ve SRIM/TRIM yazılımı ile birincil ve ikincil hasar durumları ile mekanizmaları incelenmiştir. Yüksek enerjili iyonların malzeme içerisinde enerjilerinden dolayı nüfuzu yüksek ve bundan dolayı malzeme katmanlarını ilerledikçe ilk karşılaştığı katmanlarda birincil elektron hasarları, alt katmanlara inildikçe ikincil elektron hasarları meydana geldiği söylenebilir. Buna bağlı olarak malzeme içerisinde radyasyon ile tepkimeye giren üst katmanlarda geçici hasarlar, nokta kusurları meydana gelirken, MOS yapısının derinlerinde ise elektron-boşluk çiftleri ile kalıcı hasar mekanizmalarının olduğu söylenebilir. Elde edilen simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla bilinen arayüzey durumlarının malzeme içerisindeki bilinirliğini modellenmiş ve malzemenin yapısı içerisindeki ilerleyişi açıklanmıştır. Meydana gelen arayüzey durumlarının malzemenin katmanlarında ilerlendikçe arttığı ve belli noktada zirveye ulaşp azaldığı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Braun, K.F. (1874). On the current conduction in metal sulphides. *Physical Chemistry*, 153, 556.
2. Schottky, W. (1938). Raumladungsschwächung beim schroteffekt und funkeleffekt. *Physica*, 4, 175.
3. Bardeen, J. (1947). Surface state and rectification at a metal-semiconductor contact. *Physical Review*, 71, 717-727.
4. Rhoderick, E. H. (1970). The physics of the Schottky barriers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 3, 1153-1167.
5. Rideout, V. L. (1978). A review of the theory, technology and applications of metal semiconductor rectifiers. *Thin Solid Films*, 48, 261-291.
6. Cowley, A. M., Sze, S.M. (1965) Surface states and barrier height of metal semiconductor systems. *Journal of Physics*, 36, 3212-3220.
7. AbdelRehim, A. M. (2006), Mısır galeninin termal ve XRD analizi. *Termal Analiz ve Kalorimetri Dergisi*, 86 (2), 393-401.
8. Wells, A. F. (1984). *Structural Inorganic Chemistry*. (5. baskı). Oxford: Clarendon Press. 35-50.
9. Turova, N., Turevskaya P., Kessler V., Yanovskaya M. (2002). *The Chemistry Of Metal Alkoxides*. (1. Baskı). New York : Springer Science, 37-75.
10. Montgomery J., Evans J., Trickett M. (2004). Human lead exposure in England from approximately 5500 BP to the 16th century AD. *Science of The Environment*, 318(1-3), 45-48.
11. Callister William D., Rethwisch David G. (2015). *Materials Science and Engineering* (8. Baskı). Danvers: Wiley, 18-750.
12. Murawski, L., Chung C. H., Mackenzie, J. D. (1979). Electrical properties of semiconducting oxide glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids* 32, 91-104.
13. Andersen, H. H., Sigmund, P. (2002). Stopping of heavy ions: a topical issue. *Nuclear Instruments and Methods Physics Research Section B*, 195, 1-2.
14. Lindhard, J., Scharff, M., Schiøtt, H. E. (1963). Range concepts and heavy ion ranges (notes on atomic collisions, II). *Matematisk. Fysiske Meddelelser Danske Videnskabernes Selskab*, 33, 14.
15. Berger, M. J., Coursey, J. S., Zucker, M. A., Chang, J. (1999). Stopping-power & range tables for electrons (ESTAR), protons (PSTAR), and helium ions (ASTAR). *NISTIR*, 1, 4999.

16. Berger, M. J., Inokuti, M., Anderson, H. H., Bichsel, H., Dennis, J. A., Powers, D., Seltzer, S. M., Turner, J. E. (1984). Stopping powers for electrons and positrons. *The International Commission on Radiation Units Measurements.*, 19, 2.
17. Berger, M. J., Inokuti, M., Andersen, H. H., Bichsel, H., Powers, D., Seltzer, S. M., Thwaites, D., Watt, D. E. (1993). Stopping power and ranges for protons and alpha particles. *The International Commission on Radiation Units Measurements*, 25, 2.
18. Erdem, E., Güllü, Ö., Okumuş, M. (2025). Study of structural and electro-optical properties of Al/PbO/p-Si thin films produced by CBD and SILAR methods. *Applied Physics A*, 131(4), 287.
19. Deniz, A. R. (2021). The analyzing of I–V performance of PbO₂/n-Si heterojunction in the wide temperature range. *Journal of Alloys and Compounds*, 888, 161-523. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161523>
20. Card, H. C., Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, 1589-1601.
21. Rhoderick, E. H. (1978). *Metal-Semiconductor Contacts*. (1. Baskı). Oxford: Oxford Press, 121-136.
22. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50, 5052-5053.
23. Depas, M., Van Meirhaeghe, R. L., Lafere, W. H., Cardon, F. (1994). Electrical characteristics of Al/SiO₂/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation. *Solid State Electron*, 37(3), 433-441.
24. Aydemir, G. A., Akay, D., Tataroğlu, A., Bilge Ocak, S. (2023). Electrical and optical properties of p-Si based structures with lead oxide interfaces. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 294, 280. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116552>
25. McPherson, M., Jones, B. K., Sloan, T. (1997). Effects of radiation damage in silicon p-i-n photodiodes. *Semiconductor Science and Technology*, 12(10), 1187-1194.
26. McPherson, M. (2005). Infrared photoconduction in radiation-damaged silicon diodes. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 7(6), S325-S330.
27. Hughes, G. W. (1977). Interface-state effects in irradiated MOS structures. *Journal of Applied Physics*, 48, 5357-5359.
28. Zhang, J. D., Fung, S., Lin, L. B., Liao, Z. J. (2002). Ti ion valence variation induced by ionizing radiation at TiO₂/Si interface. *Surface and Coatings Technology*, 158, 238-241. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(02\)00218-9](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(02)00218-9)
29. Arshak, K., Mihov, M., Nakahara, S., Arshak, A., McDonagh, D. (2004). Investigations of the Ga⁺ focused-ion-beam implantation in resist films for nanometer lithography

- applications. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 22, 3016-3020. <https://doi.org/10.1116/1.1813451>
30. Tuğluoğlu, N. (2007). ^{60}Co γ -ray irradiation effects on the interface traps density of tin oxide films of different thicknesses on n-type Si (111) substrates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 254(1), 118-124.
 31. Zhu, R.Y. (1998). Radiation damage in scintillating crystals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 413(2-3), 297-311.
 32. Trefilova, L. N., Kudin, A. M., Kovaleva, L. V., Charkina, T. A., Mitichkin, A. I., Belenko, L. E. (2001). Role of sodium in radiation defect formation in CsI crystals. *Radiation Measurements*, 33, 687-692.
 33. Pacchioni, G. (2000). Ab initio theory of point defects in oxide materials: Structure, properties, chemical reactivity. *Solid State Sciences*, 2(2), 161-179.
 34. Ertuğrul, R., Tataroğlu, A. (2014). Effects of gamma irradiation on electrical parameters of metal-insulator-semiconductor structure with silicon nitride interfacial insulator layer. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 169(9), 791-799.
 35. Akay, D., Gökmen, U., Bilge Ocak, S. (2019). Radiation-induced changes on poly(methyl methacrylate) (PMMA)/lead oxide (PbO) composite nanostructure. *Physica Scripta*, 94(11), 115-801.
 36. Akay, D., Gökmen, U., Ocak, S. B. (2020). Ionizing radiation influence on rubrene-based metal polymer semiconductors: Direct information of intrinsic electrical properties. *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*, 72(6), 2391-2397.
 37. Baran, H. M. (2013). *MOS Kapasitörün Elektriksel Özellikleri Üzerine Gama Radyasyonunun Etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
 38. Uyar, R. E. (2016). *Silisyum Nitrat Arayüzey Yalıtkan Tabakalı MIS Yapının Elektrik Ve Dielektrik Parametreleri Üzerine Gama Radyasyonunun Etkileri*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
 39. Cıbır, İ. (2017). *Kurşunoksit Katkılı Metal-Oksit-Yarı İletken Yapıların Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
 40. Çevikbaş, G. (2014). *Alüminyum Titanat/Spinel'in Radyasyon Karşısındaki Davranışının İncelenmesi ve Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.

41. Ali, Z., Liu, F., Wang, Y., Rasool, H. G., Wang, F., Haseeb, M. (2025). Advancements in primary radiation damage models and SRIM simulations: A review of radiation damage predictions. *Nuclear Engineering and Technology*, 57, 103-570.
42. Karabulut, N. (2016). *SiC altlıklı tek tabaka grafenin 1.8 MeV enerjili proton radyasyonuna maruz bırakılması işleminin SRIM Monte Carlo Kodu kullanılarak modellenmesi ve meydana gelen etkilerin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sinop.
43. Wilson, W. D., Haggmark, L. G., Biersack, J. P. (1977). Calculations of nuclear stopping, ranges, and straggling in the low-energy region. *Physical Review B*, 15, 2458-2474.
44. Bethe, H. (1930). Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie. *Annalen der Physik*, 397, 325-400.
45. Firsov, O. B. (1958). Scattering of ions by atoms. *Soviet Physics Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 7, 347-352.
46. Mathar, R. J. (1997). The Brandt- Kitagawa heavy ion model: Embedding in the homogeneous electron gas. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 132(1), 18-28.
47. Bohr, N., Lindhard, J. (1954). Electron capture and loss by heavy ions penetrating through matter. *Matematisk. Fysiske Meddelelser Danske Videnskabernes Selskab*. 28, 1-31.
48. Mathar, R. J., Posselt, M. (1995). Effective-charge theory for the electronic stopping of heavy ions in solids: stripping criteria and target-electron models. *Physical. Review B*, 51, 107-116. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.107>
49. Sigmund, P., Schinner, A. (2019). Is electronic stopping of ions velocity-proportional in the velocity proportional regime. *Nuclear Instruments and Methods Physics Research Section B*, 440, 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.10.031>
50. Lindhard, J., Nielsen, V., Scharff, M. (1968). Approximation method in classical scattering by screened Coulomb fields. *Matematisk. Fysiske Meddelelser Danske Videnskabernes Selskab*, 36, 10.
51. Winterbon, K. B., Sigmund, P., Sanders, J. B. (1970). Spatial distribution of energy deposited by atomic particles in elastic collision. *Matematisk. Fysiske Meddelelser Danske Videnskabernes Selskab*, 37, 14.
52. Winterbon, K. B. (1972). Heavy-ion range profiles and associated damage distributions. *Radiation Effects*, 13, 215-226.
53. Nastasi, M., Mayer, J. W., Hirvonen, J. K. (1996). *Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications*. (1. Baskı). Cambridge: Cambridge University Press, 83.

54. Mendez, A. M. P., Mitnik, D. M., Montanari, C. C. (2022). Chapter Eight: The electronic stopping power of heavy targets. *Advances in Quantum Chemistry*, 85, 157–175. <https://doi.org/10.1016/bs.aiq.2022.04.005>
55. Biersack, J. P., Haggmark, L. G. (1980). A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets. *Nuclear Instruments Methods*, 174(1), 257-269.
56. Ziegler, J. F., Biersack, J. P., Littmark, U. (1985). *The Stopping and Range of Ions in Matter*. (1. Baskı). New York: Pergamon. 12.
57. Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., Biersack, J. P. (2008). *SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter*. (1. Baskı). Chester MD: SRIM Co. 34.
58. Pierret, R. F. (1996). *Semiconductor device fundamentals*. (1. Baskı). Indiana: Addison Wesley. 200-380.
59. Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*. (3. Baskı). McGraw-Hill, New York. 40-45.
60. Konofaos, N. (2004). Electrical characterisation of SiON/N-Si structures for MOS VLSI electronics. *Microelectronic Journal*. 35(5), 421-425.
61. Dökme İ., Yerişkin S. A., Yıldırım M., Durmuş P. (2020). The origin of anomalous peak and negative capacitance in the forward bias C-V characteristics of Au/n-GaAs contacts at low temperatures ($T \leq 300\text{K}$). *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 109(7), 149-155.
62. Xiao, H., Huang, S. (2010). Frequency and voltage dependency of interface states and series resistance in Al/SiO₂/p-Si MOS structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13(5-6), 395-399.
63. Kaya, Ş., Aktağ, A., Yılmaz, E. (2014). Effects of gamma-ray irradiation on interface states and series-resistance characteristics of BiFeO₃ MOS capacitors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 319, 44-47. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.11.006>
64. Ma, T. P., Dressendorfer, P. V. (1989). *Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits*. (1. Baskı). New York: John Wiley & Sons, 87-231.
65. Moloi, S. J., McPherson, M. (2013). Capacitance–voltage behaviour of Schottky diodes fabricated on p-type silicon for radiation hard detectors. *Radiation Physics and Chemistry*, 85, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.12.002>
66. Ma, T. P. (1989). Interface Trap Transformation in Radiation or Hot Electron Damaged MOS Structures. *Semiconductor Science and Technology*, 4(12), 1061.
67. Zhang, H., Li, R., Huang, Z., Humayun, M., Xu, X., Duan, J., Bououdina, M., Attia, Y. A., Kardas, G., Wang, C. (2024). Constructing core-shell structured Mott–Schottky

- heterojunction towards remarkable hydrogen production from water/seawater splitting. *Journal of Alloys and Compounds*, 1005(6), 175-952.
68. Tüzün, Ö., Altındal, Ş., Oktik, Ş. (2008). Effects of illumination and ^{60}Co γ -ray irradiation on the electrical characteristics of porous silicon solar cells. *Renewable Energy*, 33(2), 286-292.
 69. Ashry, M., Fayek, S. A. (2001). Radiation effects on fabricated $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ heterojunction photovoltaic cells. *Renewable Energy*, 23(3-4), 441-450.
 70. Teffahi, A., Hamri, D., Mostefa, A., Saidane, A., Al Saqri, N., Felix, J. F., Henini, M. (2016). Effect of ^{60}Co γ -ray irradiation on electrical properties of $\text{Ti}/\text{Au}/\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ Schottky diodes. *Current Applied Physics*, 16(8), 850-858.
 71. Nicollian, E. H., Brews J. R. (1982). *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. (1. Baskı). New York: John Wiley & Sons, 40-439.
 72. Sze, S. M., Kwok, K. N. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*. (3. Baskı). New Jersey: John Wiley & Sons, 154-300.
 73. Baran, H. M., Tataroğlu, A. (2013). Determination of interface states and their time constant for $\text{Au}/\text{SnO}_2/\text{n-Si}$ (MOS) capacitors using admittance measurements. *Chinese Physics B*, 22(4), 1-5.
 74. Ertuğrul R., Tataroğlu, A. (2012). Influence of Temperature and Frequency on Dielectric Permittivity and ac Conductivity of $\text{Au}/\text{SnO}_2/\text{n-Si}$ (MOS) Structures. *Chinese Physics Letters*, 29(7), 1-5.
 75. Yüksel Ö. F., Selçuk A. B., Ocak S. B. (2008). Investigation of diode parameters using I-V and C-V characteristics of $\text{In}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ (MIS) Schottky diodes. *Physica B: Condensed Matter*. 403(7), 2690-2697.
 76. Güllü Ö., Türüt A. (2009). Electrical analysis of organic interlayer based metal/interlayer/semiconductor diode structures. *Journal Applied Physics*, 106, 103-717. <https://doi.org/10.1063/1.3261835>
 77. Werner, J. H., Guttler, H. H. (1991). Barrier inhomogeneities at schottky contacts. *Journal Applied Physics*, 69, 1522-1533. <https://doi.org/10.1063/1.347243>
 78. Wang, W. F., Cheng, K.Y., Wu, M. C., Hsieh, K. C. (2018). Analysis of current-voltage characteristics using derivative methodology. *Solid-State Electronics*, 149, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2018.08.002>
 79. Cheung, S. K., Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49, 85-87. <https://doi.org/10.1063/1.97359>
 80. Chattopadhyay, P., Daw, A. N. (1986). On the current transport mechanism in a metal insulator-semiconductor (MIS) diode. *Solid State Electron*, 29(5), 555-560.

81. Nicollian, E. H., Goetzberger, A. (1967). The Si-SiO₂ Interface-Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique. *Bell System Technical Journal*, 46(6), 1055-1133.
82. Altındal, Ş., Yücedağ, İ., Tataroğlu, A. (2009). Analysis of surface states and series resistance in Au/n-Si Schottky diodes with insulator layer using current-voltage and admittance-voltage characteristics. *Vacuum*, 84(3), 363-368.
83. Depas, M., Vermeire, B., Heyns, M. M. (1996). Breakdown and defect generation in ultrathin gate oxide. *Journal of Applied Physics*, 80, 382-387. <https://doi.org/10.1063/1.362794>
84. Chatterjee, S., Kuo, Y., Lu, J. (2008). Thermal annealing effect on electrical properties of metal nitride gate electrodes with hafnium oxide gate dielectrics in nano-metric MOS devices. *Microelectronic Engineering*, 85(1), 202-209.
85. Buchner, S., Kanyogoro, N., McMorow, D., Foster, C. C., O'Neill, P. M., Nguyen, K. V. (2011). Variable depth Bragg peak method for single event effects testing. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 58(6), 2976-2982.
86. Roche, N. J. H., Buchner, S. P., Foster, C. C., King, M. P., Dodds, N. A., Warner, J. H., McMorow, D., Decker, T., O'Neill, P. M., Reddell, B. D., Nguyen, K. V., Samsel, I. K., Hooten, N. C., Bennett, W. G., Reed, R. A. (2014). Validation of the variable depth Bragg peak method for single-event latchup testing using ion beam characterization. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 61(6), 3061-3068.
87. Inguimbart, C., Durand, A., Nuns, T., Lemièrre, K. (2021). Statistical spread on the displacement damage degradation of irradiated semiconductors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 490, 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.01.002>
88. Akkerman, A., Barak, J., Chadwick, M. B., Levinson, J., Murat, M., Lifshitz, Y. (2001). Updated NIEL calculations for estimating the damage induced by particles and γ -rays in Si and GaAs. *Radiation Physics and Chemistry*, 62(4), 301-310.



Gazili olmak ayrıcalıktır