



**ÇİFT KATMANLI NANO YAPILARIN RADYASYON SENSÖRÜ OLARAK
İNCELENMESİ**

Zeynep ALTIN

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2024

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.

Zeynep ALTIN

29/08/2024

ÇİFT KATMANLI NANO YAPILARIN RADYASYON SENSÖRÜ OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Zeynep ALTIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2024

ÖZET

Bu tez çalışmasında, radyasyon sensörü oluşturmak için çift arayüzey katmanı kullanılmıştır. Literatürde olmayan p tipi Silisyum yarıiletken üzerine püskürtme ve termal evedaporasyon yöntemleri kullanılarak PbO/SnO₂ çift ara yüzey tabakalı yapının diyot parametrelerini incelemek için, akım-gerilim (I-V) ölçümleri oda sıcaklığında -4V ve +3V aralığında alınmıştır. Nano yapıların Gama ışınlarının yarı iletken diyotlar üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla, diyotların akım-gerilim (I-V) karakteristikleri radyasyon öncesi ve 30 kGy dozunda gama ışınlamasına maruz bırakıldıktan sonra ölçülmüştür. Elde edilen I-V verileri, ln(I)-V grafiği çizilerek analiz edilmiş ve sıfır-besleme bariyer yüksekliği (Φ_b), idealite faktörü (n) ve ters doyma akımı (I_0) gibi temel diyot parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca, I-V verilerinden seri direnç (R_s), şönt direnç (R_{sh}) ve doğrultma oranı (RR) gibi diğer önemli parametreler de hesaplanmıştır. Bu parametrelerin radyasyon etkisiyle nasıl değiştiği, Cheung ve Norde fonksiyonları gibi farklı yöntemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırarak daha detaylı incelenmiştir. ⁶⁰Co gama (γ) ışını Al/PbO/SnO₂/p-Si yapısı üzerinde R_s ve Φ_b parametrelerini artırıcı yönde etki ederken ideallik faktörünü (n) azaltıcı yönde etkide bulunmuştur. Sonuçlar incelendiğinde Al/PbO/SnO₂/p-Si yapısının ⁶⁰Co gamma (γ) ışınına karşı duyarlı olduğu ve yapının radyasyon sensörü olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 20226
Anahtar Kelimeler : Gama radyasyonu, PbO/SnO₂, I-V karakteristikleri
Sayfa Adedi : 69
Danışman : Prof. Dr. Sema Bilge OCA

INVESTIGATION OF DOUBLE -LAYER NANOSTRUCTURES AS RADIATION SENSORS

(M. Sc. Thesis)

Zeynep ALTIN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2024

ABSTRACT

In this thesis, a double interface layer was utilized to fabricate a radiation sensor. To investigate the diode parameters of the PbO/SnO₂ double interface layered structure, which is not found in the literature, deposited on a p-type Silicon semiconductor using spraying and thermal evaporation methods, current-voltage (I-V) measurements were taken at room temperature in the range of -4V to +3V. In order to understand the effects of gamma radiation on semiconductor diodes in nanostructures, the current-voltage (I-V) characteristics of the diodes were measured before and after exposure to 30 kGy of gamma irradiation. The obtained I-V data were analyzed by plotting the ln(I)-V graph, and fundamental diode parameters such as zero-bias barrier height (Φ_b), ideality factor (n), and reverse saturation current (I_0) were determined. Additionally, other important parameters such as series resistance (R_s), shunt resistance (R_{sh}), and rectification ratio (RR) were also calculated from the I-V data. The changes in these parameters due to the radiation effect were examined in more detail by comparing the results obtained through different methods such as the Cheung and Norde functions. The ⁶⁰Co gamma (γ) radiation was found to increase the R_s and Φ_b parameters in the Al/PbO/SnO₂/p-Si structure, while decreasing the ideality factor (n). Upon examining the results, it was concluded that the Al/PbO/SnO₂/p-Si structure is sensitive to ⁶⁰Co gamma (γ) radiation and that the structure can be used as a radiation sensor.

Science Code	: 20226
Key Words	: Gamma radiation, PbO/SnO ₂ , I-V characteristics
Page Number	: 69
Supervisor	: Prof. Dr. Sema Bilge OCAK

TEŞEKKÜR

Bu tez, birçok kişinin emeği ve desteği olmadan tamamlanamazdı. Aşağıda bahsedeceğim kişilere, destekleri dolayısıyla akademik dil çerçevesinde mümkün olan en samimi şekilde teşekkür etmek istiyorum.

Öncelikle, öğrencisi olduğum için kendimi şanslı hissettiğim Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK'a teşekkürlerimi sunarım. Kendisinden ilham aldığım bir idol olduğu ve bu yolculukta bana rehberlik ettiği için minnettarım.

Yüksek Lisans eğitimim süresince zorlandığım her anda bana yardım elini uzatan ve beni bu yolda kararlılıkla yürümeye sevk eden Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Müdürü Prof. Dr. Uğur GÖKMEN'e teşekkür ederim.

Destekleri ve anlayışı için Doç. Dr. Defne AKAY ile tekrarlayan hatalarım karşısında gösterdiği hoş görüşle bana inanarak katkıda bulunan Özlem ABAY'a şükranlarımı sunuyorum.

Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Bilimler Ana Bilim Dalı öğretim üyeleri ve araştırma görevlilerine, bana gelişme fırsatı sundukları için teşekkür ederim. Bana inanan bu ailenin bir parçası olmaktan gurur duyuyorum.

Son olarak, katkıları nedeniyle aileme de önemli bir bölüm ayırmayı gerekli görüyorum.

Sevgili annem Hatice Altın, bu süreçte tüm zorlukları aşabileceğime inanarak her seferinde beni yeniden ayağa kaldırdı ve devam etmem için destek oldu. Babam Medeni, hayatı boyunca bana önemli değerler öğretti ve her zaman güvenerek bana güç verdi. Biricik abim Akın, çalışmamı tamamlarken eğlenceli ve moral dolu sohbetleriyle yükümü hafifletti ve her zaman yanımda yer aldı.

Sizlerin varlığı, bu çalışmayı tamamlamamda en büyük ilham kaynağım oldu. Hepinize en içten şekilde teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	7
2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontak Teorisi.....	7
2.2. Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) Yapısı	11
2.2.1. İdeal MOS yapısı	12
2.2.2. Yığılım bölgesi.....	16
2.2.3. Tüketim bölgesi.....	17
2.2.4. Tersinim bölgesi.....	18
2.2.5. Gerçek MOS yapısı.....	19
3. RADYASYONUN MADDE İLE ETKİLEŞİMİ	21
3.1. Parçacık Etkileşimleri	23
3.2. Gama Işınlarnının Madde İle Etkileşimi	25
3.2.1. Fotoelektrik olay	26
3.2.2. Compton saçılması.....	27
3.2.3. Çift oluşum	28

	Sayfa
3.3. Radyasyonun MOS Yapıları Üzerindeki Etkileri.....	31
4. RADYASYON DEDEKTÖRLERİ.....	33
5. MATERYAL VE DENEYSEL SONUÇLAR	37
6. DENEYSEL YÖNTEM.....	41
7. ARAŞTIRMA BULGULARI	43
7.1. Akıma Bağlı Parametrelerde Radyasyon Etkileri	43
8. SONUÇ	55
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Farklı dielektrik sabitesine sahip malzemeler.....	3
Çizelge 2.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontakların oluşumu.....	9
Çizelge 5.1. <i>PbO</i> ve <i>SnO₂</i> Özellikleri.....	40
Çizelge 7.1. Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip Al/PbO/SnO ₂ /p-Si SD'lar için radyasyonsuz ve 30kGy gama radyasyonundan sonra elde edilen temel diyot parametreleri.....	47
Çizelge 7.2. TE, Norde ve Cheung yöntemleri ile elde edilen diyot parametreleri	52

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. MOS, MIS ve Web of Science veri tabanında indekslenen, Türkiye'de gerçekleştirilen Schottky bariyer diyotları üzerine yapılan akademik çalışmaların kronolojik dağılımı	2
Şekil 2.1. Metal/p tipi yarıiletken omik kontağının a) Kontak oluşmadan önce metal ve yarıiletken enerji-bant diyagramı b) Kontak oluşuktan sonraki termal denge durumu.....	10
Şekil 2.2. Metal/p tipi yarıiletken doğrultucu kontağının a) Kontak oluşmadan önce metal ve yarıiletken enerji-bant diyagramı b) Kontak oluşuktan sonraki denge durumu	11
Şekil 2.3. Bir MOS yapısının şematik gösterimi	12
Şekil 2.4. Denge durumunda ($V=0$) (a) n tipi (b) p tipi yarıiletken için MOS yapının enerji bant diyagramı	13
Şekil 2.5. MOS yapının eşdeğer devresi	14
Şekil 2.6. (a) n-tipi ve (b) p-tipi MOS yapıların C-V eğrilerinin üç bölgeye ayrılması .	15
Şekil 2.7. İdeal MOS yapıların a) p-tipi b) n-tipi eklemlerin yığılım durumunda bant diyagramları	16
Şekil 2.8. İdeal MOS yapıların a) p-tipi b) n-tipi eklemlerin tükenim durumunda bant diyagramları	17
Şekil 2.9. a) p-tipi ve n-tipi (Si) yük dağılımı b) İdeal MOS yapıların p-tipi ve n-tipi eklemlerin tersinim durumunda bant diyagramları	18
Şekil 2.10. İdeal olmayan MOS yapısında ara yüzey durumları ve yüklerin Sınıflandırılması.....	19
Şekil 3.1. Radyasyon türlerinin sınıflandırılmasının şematik görünümü	21
Şekil 3.2. Elektromanyetik radyasyon spektrumu	21
Şekil 3.3. Işınlanmış bir yarı iletken malzemede elektron, iyon ışınlarının ve gama ışınlarının radyasyon yolları	23
Şekil 3.4. Elektromanyetik radyasyonun sonrasında meydana gelen a. Uyarılma b. Uyarının sonradan azalması veya ortadan kaldırılması	24

Şekil	Sayfa
Şekil 3.5. İyonlaşma ve delta ışınlarının üretimi	24
Şekil 3.6. Fotonların maddeyle etkileşimi	25
Şekil 3.7. Fotoelektrik etki.....	26
Şekil 3.8. Compton saçılması.....	28
Şekil 3.9. Çift oluşum	29
Şekil 3.10. Radyasyonun MOS yapısı üzerindeki etkisi.....	31
Şekil 5.1. PbO kristal yapısı	38
Şekil 5.2. SnO_2 'nin kristal yapısı.....	39
Şekil 6.1. $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ tipi Schottky diyotların temsili kesit görüntüsü	42
Şekil 7.1. Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ SD'lerin radyasyondan önce ve 30kGy gama radyasyonundan sonra I-V grafiği.....	43
Şekil 7.2. Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ SD'lerin radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra $\ln(I)$ -V grafiği .	44
Şekil 7.3. Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ SD'ların radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra $\ln(I)$ -V grafiğinin lineer bölgesi.....	45
Şekil 7.4. Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ SD'ların radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra R_s -V grafiği	49
Şekil 7.5. Radyasyondan önce (0 kGy) $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ SD'ler için $H(I)$ -I ve $dV/d(\ln(I))$ -I grafikleri.....	51
Şekil 7.6. Gama radyasyonundan sonra (30kGy) $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ SD'ler için $H(I)$ - I ile $dV/d(\ln(I))$ – I grafikleri	51
Şekil 7.7. Radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonu sonrasında $F(V)$ -V grafiği.....	52
Şekil 7.8. Radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra N_{ss} -(E_{ss} - E_v) grafiği	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Diyotun kontak alanı
$\text{\AA}$	Angstrom
A^*	Richardson sabiti
C_{ox}	Arayüzey tabakanın kapasitansı
C_i	Yalıtıkana ait kapasitans değeri
C_s	Yarıiletkenine ait kapasitans değeri
d_{ox}	Yarıiletken tabakasının kalınlık değeri
E_e	Serbest haldeki elektronun kinetik enerji
E_v	Valans bant kenarı enerjisi
E_c	İletim bandı enerji seviyesi
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
E_0	Boşluğun elektrik geçirgenliği
E_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
h	Planck sabiti
Hz	Frekans birimi
k	Boltzmann sabiti
K	Kelvin cinsinden sıcaklık
I	Akım (A)
I_0	Doyma akımı
λ	Dalga Boyu (m)
n	İdealite faktörü
N_A	Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu
N_D	Verici katkı atomlarının yoğunluğu
N_A	Arayüzey durum yoğunluğu

Simgeler**Açıklamalar**

m^*	Taşıyıcı etkin kütlesi
q	Elektrik yük
qm	Metaldeki yük
R_s	Seri direnç
Si	Silisyum
V	Voltaj
V_D	Difüzyon potansiyeli
V_F	İleri beslem gerilimi
V_R	Ters beslem gerilimi
W_D	Tüketim tabakasının genişliği
Φ_b	Potansiyel bariyer yüksekliği
δ	Oksit tabaka kalınlığına
E_F	Fermi enerji seviyesi
r	Fotoelektrik olay tesir kesiti
E_e	Fotoelektronun kinetik enerjisi
E_γ	Foton enerjisi
ψ_{Bn}	E_F ile E_i arasındaki potansiyel fark (n-tipi için)
ψ_{Bp}	E_F ile E_i arasındaki potansiyel fark (p-tipi için)
ϕ_n	E_F ile iletim bant kenarı arasındaki potansiyel fark
ϕ_p	E_F ile valans bant kenarı arasındaki potansiyel fark
m_e	Elektron kütlesi
ϕ_{ms}	Metal ile yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı
ϕ_m	Metal iş fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletken iş fonksiyonu
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
χ	Yarıiletkenin elektron alınganlığı
PbO	Kurşun Oksit
SnO	Silisyum Oksit
SD	Schottky Diyot

Simgeler	Açıklamalar
SiO₂	Silisyum Dioksit
Si	Silisyum
Si₃N₄	Silisyum Nitrür
TiO₂	Titanyum Dioksit
⁶⁰Co	Kobalt-60
AC	Alternatif Akım
Al	Alüminyum
As	Arsenik
Au	Altın
DC	Doğru akım
Ge	Germanyum
keV	Kilo Elektron Volt
kGy	Kilo Gray
kHz	Kilo Hertz
MeV	Mega Elektron Volt

Kısaltmalar	Açıklamalar
I-V	Akım-Gerilim
MIS	Metal-Yalıtkan- Yarıiletken
MOS	Metal- Oksit-Yarıiletken
MPS	Metal-Polimer-Yarıiletken
MS	Metal- Yarıiletken
NP	Nanoparçacık

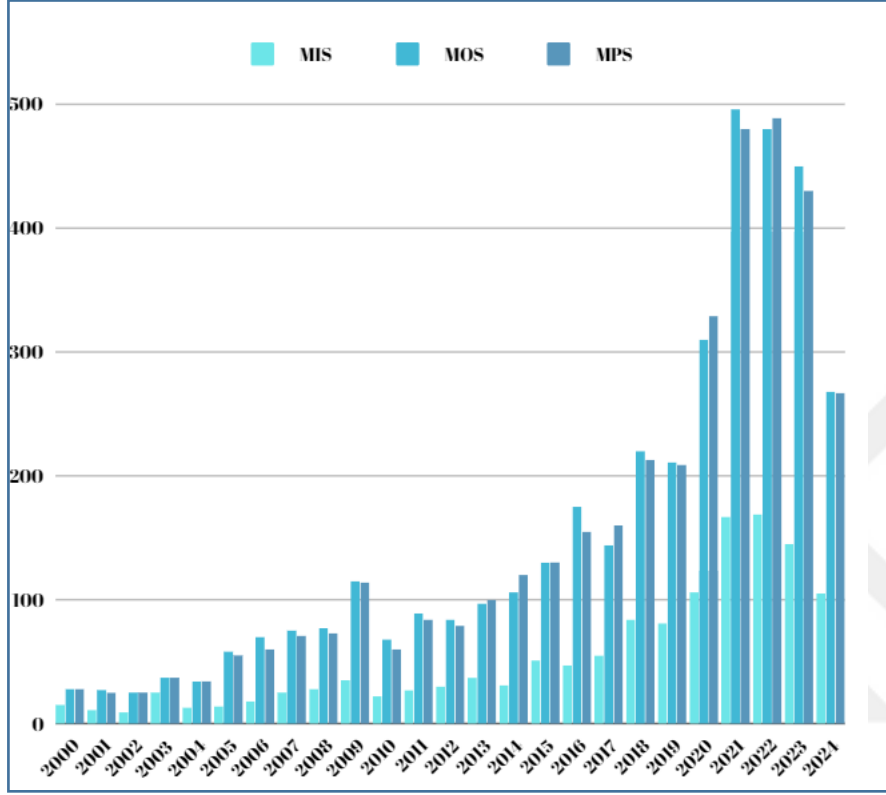
1. GİRİŞ

Son yıllarda elektronik teknolojisinde meydana gelen gelişmeler, yenilikçi malzemelerin ve cihazların keşfi ile sonuçlanmış ve bu durum, çeşitli alanlarda önemli ilerlemelere kapı açmıştır. Bu bağlamda, düşük ileri yön voltajlarında çalışabilen ve yüksek anahtarlama hızına sahip Schottky bariyer diyotlarının geliştirilmesi, öne çıkan bir yenilik olarak değerlendirilmektedir. Schottky bariyer diyotları, metal ile yarıiletkenin sıkı bir şekilde kontak kurduğu yapılardan oluşur ve bu yapılar, yüksek frekanslarda çalışma yetenekleri sayesinde iletkenlik ile yalıtkanlık durumları arasındaki geçişlere hızlı tepki verme kapasitesine sahiptir. Bu özellikler, Schottky bariyer diyotlarını yarıiletken endüstrisinde vazgeçilmez bir bileşen haline getirmiştir ve bu yapıların üretim ve kullanım alanlarının hızla genişlemesine katkıda bulunmuştur [1]. Schottky diyotlara olan ilgi ve araştırma faaliyetleri 19. yüzyıla kadar uzanmaktadır. 1874 yılında metal-yarıiletken kontak üzerine ilk çalışmalar yapılmış olsa da, MOS Schottky diyotların temelleri 1931 yılında Wilson'un band modeli formülünü metal yarıiletken yapısına uygulamasıyla atılmıştır. 1938 yılında ise Schottky, Störmer ve Waibel, metal-yarıiletken kantağına ait doğrultma mekanizması üzerine çalışmalar yaparak sistemin çalışma prensiplerini ortaya koymuştur [2].

Metal-yarıiletken (MS) ve arayüzey tabakalı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar temel alınarak, farklı arayüzey malzemeleri kullanılarak yeni Schottky yapı türleri geliştirilmektedir. Bu malzemeler arasında polimerler, ferroelektrikler ve oksitler yer alır.

Metal-polimer-yarıiletken (MPS) ve metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılar, sırasıyla polimerik ve inorganik dielektrik malzemelerin metal ile yarıiletken arasında bir arayüzey tabakası olarak kullanılmasıyla elde edilir. Bu arayüzey tabakaları, metal ile yarıiletken arasındaki elektron transferini modüle ederek elektriksel izolasyon sağlar ve aynı zamanda yük taşıyıcılarının tünelleme etkisi veya termiyonik emisyon gibi mekanizmalar aracılığıyla kontrollü bir geçiş yapmasına olanak tanır. Arayüzey tabakasının türü, kalınlığı ve özellikleri, Schottky yapının engel yüksekliği, akım-gerilim karakteristikleri ve anahtarlama hızı gibi özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Farklı arayüzey malzemelerinin kullanıldığı Schottky yapılar, yüksek frekanslı elektronik, optoelektronik, güç elektroniği ve biyomedikal sensörler gibi birçok farklı alanda uygulama potansiyeline sahiptir.

MS ve MIS yapıların yaygın uygulamaları, bu sistemlerin temel fiziksel mekanizmaları ve elektriksel özellikleri üzerine kapsamlı teorik ve deneysel çalışmaların yürütülmesine yol açmıştır [3-12].



Şekil 1.1. MOS, MIS ve MPS Web of Science veri tabanında indekslenen, Türkiye'de gerçekleştirilen Schottky bariyer diyotları üzerine yapılan akademik çalışmaların kronolojik dağılımı

Schottky diyotları, elektronik cihazlarda önemli bir rol oynayan ve son yıllarda artan bir araştırma konusu haline gelen temel bir diyot türüdür. Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi, Schottky diyotları ile ilgili araştırmalar, Türkiye'de gerçekleştirilen akademik çalışmalar incelendiğinde, MOS yapılarına kıyasla MPS ve MOS yapıları üzerine yapılan çalışmaların sayısında belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Ancak, genel olarak MOS yapıları üzerine odaklanan çalışmaların sayısı, MPS yapılarına yönelik çalışmalardan daha yüksek bir oranda seyretmektedir [1]. Bu artan ilginin temel sebebi, MOS Schottky diyotların klasik Schottky diyotlara kıyasla birçok avantaja sahip olmasıdır. Bu avantajlar arasında daha yüksek bariyer yüksekliği, daha düşük seri direnç ve daha iyi idealite faktörü yer alır. Bunlara ek olarak, MOS Schottky diyotların LED' ler, güneş pilleri, fotodetektörler, gaz sensörleri ve transistörler gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilmesi de bu alandaki ilgiyi artıran önemli

bir faktördür. Schottky bariyer diyotların performansı ve maliyeti, kullanılan metal, yarıiletken ve arayüzey tabakaları gibi faktörlere bağlıdır. Metal tabaka olarak yüksek saflıkta Alüminyum (*Al*), Altın (*Au*) ve Gümüş (*Ag*) gibi metaller tercih edilirken, yarıiletken tabaka olarak genelde Silisyum (*Si*) veya Germanyum (*Ge*) kullanılır. Metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenlemek ve performansı artırmak için metal ve yarıiletken arasına organik tabakalar veya yalıtkan bir tabaka büyütülür. Organik tabakalar olarak genellikle polianilin ve polivinil alkol (PVA), yalıtkan tabakalar ise sızıntı akımını azaltmak ve yüksek dielektrik sabiti sağlayarak doğrultucu özelliğini optimize etmek için *PbO*, *SiO₂*, *Si₃N₄*, *TiO₂* ve *SnO₂* gibi yapılar kullanılır. Ara yüzey tabakalarının seçiminde sızıntı akımının en aza indirilmesi, yüksek dielektrik sabiti ve doğrultucu özellik gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Organik materyaller, üretim maliyetinin düşük, spin kaplama gibi kolay yöntem ile üretilmesi gibi nedenlerden dolayı tercih edilmektedir [13,14].

Çizelge 1.1. Farklı dielektrik sabitesine sahip malzemeler

Dielektrik Malzeme	Dielektrik Sabiti (k)	Bant Aralığı E_G (eV)	Kristal Yapısı (100-1050 °C)
<i>SiO₂</i>	3.9	8.9-9.0	 Amorf
<i>Si₃N₄</i>	7	4.8-5.3	 Amorf
<i>SnO₂</i>	8.5-9.0	3.6	 Tetragonal
<i>TiO₂</i>	80	3.05-3.3	 Tetragonal (rutil, anataz)

Son zamanlarda, kurşun oksit (*PbO*) ve kalay (Sn) özellikle gaz sensörlerindeki yaygın uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmüştür. *PbO₂* nanomateryalinin elektriksel yapısı rapor edilmiş ve nispeten düşük dolaylı bant aralığına (0.2 eV) sahip n-tipi bir yarı iletken olarak tanımlanmıştır [15]. Birçok araştırmaya göre, *PbO*' lar oldukça etkili fotovoltaiik malzemelerdir [16]. Kurşun (*Pb*), gama ışını uygulamaları için uygun bir malzeme olarak bilinmektedir [17]. Yüksek atom numarası (*Z*) değerine sahip diğer yoğun malzemelere

benzer şekilde, *Pb* gama ışınlarına karşı oldukça zayıflatıcıdır; ayrıca, düşük maliyetle daha kolay bulunabilen bir malzemedir.

Bir katkı malzemesi olarak *SnO₂*'nin de gama radyasyonuna karşı dirençli olduğu rapor edilmiştir [18,19]. Araştırmacılar çalışmalarında, *SnO₂* ilavesinin cam malzemelerin optik özelliklerini geliştirdiğini keşfetmişlerdir. Katkı ile değiştirilebilen doğrudan enerji bandı aralığına sahip n-tipi bir yarı iletken olan *SnO₂* aynı zamanda bir metal oksit yarı iletkendir [20]. Yüksek dozda ışınlamaya maruz kalma, ince filmlerin nanoyapısal özelliklerini değiştirebilir [21]. Gama radyasyonu yüksek enerjiye sahiptir ve deneysel olarak genelde ⁶⁰Co ve ¹³⁷Cs' den elde edilir [22]. Gama radyasyonu, nüfuz etme kabiliyeti nedeniyle yüksek dozlarda uygulandığında kalıcı etkilere neden olur. Bu nedenle, özellikle sensör uygulamaları için kullanılanlar olmak üzere nanokompozit cihazların yapımında kullanılabilecek uygun malzeme yelpazesi sınırlıdır. Bunun nedeni, gama ışını ışınlamalarının etkilerinin MOS tabanlı sensörlerin optik özelliklerini değiştirmesidir. Abhirami ve arkadaşları *SnO* ince filmleri sentezlemek için termal buharlaştırma tekniğini kullanmışlardır [23,24]. Ardından, 10 ila 200 kGy arasındaki farklı gama radyasyon dozlarının ince filmleri nasıl etkilediğini değerlendirmişlerdir. Bu araştırma ayrıca *SnO* ince filmlerin dozimetrik uygulamalarda kullanılmasını önermiştir. Bu nedenle, γ -radyasyonunun etkisiyle yapıda meydana gelen değişikliklerin bilimsel önemi büyük ilgi çekmektedir [25-27]. Birçok çalışma γ -ışını ışınlamasının yarı iletken üzerindeki etkisini rapor etmiştir. Ayrıca, Kaya ve arkadaşları (2019) *n-SnO₂/p-Si* yarıiletken yapısının düşük doz (1 kGy) ve yüksek doz (4 kGy) ⁶⁰Co gama ışınlamaları altında incelemiştir. Elektriksel özellikler ve yüzey morfolojisi, radyasyon dozundaki artışla birlikte n-Sn/p-Si diyotların baskın iletkenlik mekanizmasının değiştiğini ve kusur yoğunlukları nedeniyle bariyer potansiyelinin azaldığını ortaya koymuştur. Işınlama işlemi polimer yapısında hasara neden olabilir ve bu da kafes içinde noktasal kusurlar olarak kendini gösterir. *Al/C₂₄H₁₂/p-Si* yapısının I-V özellikleri, 0 ila 90 kGy arasında gama ışınlama dozlarına maruz bırakılmadan önce ve sonra incelenmiştir [28,29]. Sonuçlar, arayüzey durum yoğunluğu, idealite faktörü, seri direnç, kaçak akım ve bariyer yüksekliği gibi çeşitli özelliklerin cihazların elektriksel ve elektronik özelliklerini değiştirebileceğini doğrulamıştır. Yakın zamanda, bir diğer önemli yapı olan *PbO/ SnO₂* incelenmiştir. *PbO/ SnO₂* çift katman üzerinde yoğunluk fonksiyonel teorisi

hesaplamaları üzerine yapılan çalışma, farklı bir bant yapısı sergilediğini ortaya koymuştur [30]. Bant yapısındaki bu farklılık, ince film formunda yığın formuna kıyasla artan bir bant aralığı olarak gözlemlenmiştir. Böylece SnO_2/PbO ince filmlerin iletkenlik özellikleri geliştirilerek yeni uygulamalar için daha uygun hale getirilmiştir.

Bu tez çalışmada geleneksel oksit arayüzey tabakasına sahip yapılar yerine çift arayüzey tabakalı $\text{Al}/\text{PbO}/\text{SnO}_2/ p\text{-Si}$ tipi Schottky diyotlarının (SDs) radyasyon öncesi ve 30 kGy ^{60}Co gama radyasyonu sonrasında akım-voltaj (I-V) ölçümleri oda sıcaklığında alınmıştır.

Radyasyon ortamlarında çalışan yarıiletken diyotların (SD) temel parametreleri, farklı hesaplama yöntemleri kullanılarak deneysel verilerden elde edilmiştir. Bu parametreler, çift arayüzey katmanına sahip SD'lerin radyasyon etkisi altındaki davranışlarının daha iyi anlaşılması ve modellenmesi amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, radyasyonun bu tip cihazlar üzerindeki etkilerini daha doğru bir şekilde açıklamayı hedeflemektedir.

Yaptığımız literatür çalışması sonucunda, PbO/SnO_2 çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip bir yarıiletken yapısının ^{60}Co gama radyasyonunun bağlı olarak diyot parametrelerinin incelenmediği tespit edilmiştir. Bu çalışmada, ^{60}Co gama radyasyonunun üretilen $\text{Al}/\text{PbO}/\text{SnO}_2/p\text{-Si}$ yapısı üzerindeki yarıiletken diyotların radyasyon etkisi altındaki davranışlarını incelemek amacıyla, $\ln(I)$ -V karakteristiklerinden, idealite faktörü (n), sıfır besleme bariyer yüksekliği (Φ_b) ve ters doyum akımı (I_0) gibi temel diyot parametreleri radyasyon öncesi ve 30 kGy gama radyasyonu sonrası için hesaplanmıştır. Ayrıca, I-V ölçümleri kullanılarak seri direnç (R_s), şönt direnç (R_{sh}) ve doğrultma oranı (RR) gibi diğer önemli parametreler de belirlenmiştir. Elde edilen veriler, Cheung ve Norde fonksiyonları gibi farklı modelleme yöntemleri ile de analiz edilerek, parametrelerin radyasyon etkisi altındaki değişimleri daha detaylı incelenmiştir. Bu çok yönlü yaklaşım, diyotların radyasyon hasarına karşı dayanıklılığının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Ayrıca gama radyasyonun etkilerinin tam olarak anlaşılabilmesi için bant aralığında gama radyasyonunun neden olduğu arayüzey durumlarının (N_{ss}) enerjiye ($E_{ss}-E_v$) bağlı dağılımı elde edilmiştir.

Tez sekiz bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde Schottky bariyer diyetlerinin tarihsel gelişiminden günümüz uygulamalarına kadar kapsamlı bir inceleme sunmaktadır. İkinci, üçüncü ve dördüncü bölümde radyasyon madde etkileşimi ve radyasyon dedektörleri üzerine derinlemesine teorik bir bakış kapsamlı bir şekilde anlatılmıştır. Teorik altyapının ardından, Schottky bariyer diyetlerinin üretimi için kullanılan materyaller ve deneysel yöntemler detaylı bir şekilde beşinci ve altıncı bölümde açıklanmıştır. Son olarak yedinci bölümde deneysel bulgulara yer verilmiştir ve deney sonuçları analiz edilerek sonuç kısmında açıklanmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1 Metal-Yarıiletken (MS) Kontak Teorisi

Bir metal (Al, Pt, Ag, Au, In gibi) ile bir yarıiletken (Ge, Si, SiC, GaAs, InP gibi) yüksek sıcaklık ($T \geq 400-600$ °C) ve düşük vakum ($P < 10^{-6}$ Torr) altında termal buharlaştırma veya püskürtme yöntemiyle kontak edildiğinde veya üst-üste büyütüldüğünde, yarıiletken ile metal ara yüzeyinde bir potansiyel farkı veya potansiyel engeli (Φ_B) oluşur. Bu engelin büyüklüğü, genelde kullanılan metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlıdır.

MS kontaklar, elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılan önemli bir yapı elemanıdır. Bu kontaklar, metal ve yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulur ve yarıiletkenin iletkenliğini kontrol etme işlevini görürler. Doğrultucu MS kontaklar, bu türdeki en tercih edilen kontak türlerinden biridir ve yarıiletken ile metalin en az direnç değerinde birbiriyle temas ettirilmesiyle elde edilir [31,32].

Doğrultucu MS kontaklarda, Fermi enerji seviyelerinin eşitlenmesi sonucunda yarıiletkenin yüzeyinde bir potansiyel bariyeri oluşur. Bu bariyer, elektronların metalden yarıiletkene geçişini zorlaştırır ve akımın tek yönde olmasına neden olur. Bu durum, doğrultucu etkiyi yaratır ve MS kontakları elektronik cihazlarda transistörler, diyotlar ve güneş pilleri gibi birçok farklı bileşenin temelini oluşturur [33,34].

MS kontakların çalışma prensipleri ve özellikleri, elektronik cihazların işleyişini ve tasarımını kavramak için önemlidir. Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının karşılaştırılmasıyla omik ve doğrultucu olmak üzere iki tür MS kontak oluşur. Omik MS kontaklarda potansiyel bariyeri düşüktür ve akım her iki yönde de kolayca akar, doğrultucu MS kontaklarda potansiyel bariyeri yüksektir ve akım tek yönde akar [35-38].

Metal malzeme ile yarıiletken malzeme temas edildiğinde, metal ile yarıiletkenin Fermi seviyeleri arasındaki farkın dengelenebilmesi için bantlarda bir miktar bükülme meydana gelir.

Metalden yarıiletken, yarıiletkenden metale elektron geçişi (difüzyon); metal ile yarıiletkenin Fermi enerji düzeylerinin eşit olduğu termal denge durumuna kadar devam eder. Böylece metal-yarıiletken arayüzeyinde yüklerin ayrılmasıyla yeni bir yük dağılımı sonucunda bir potansiyel engeli oluşur. Arayüzey bölgesi, yarıiletken tarafında oluşan ve hareketli yüklerin olmadığı yüksek dirençli bir bölgedir. Elektronların metal-yarıiletken eklem boyunca akışı, p-n eklemlerde meydana gelen yük transferine benzerdir. Bu tipteki eklemler, metal kontak olarak adlandırılırlar. MS kontaklarda, metal ile yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engel oluştuğunu ilk olarak Schottky, ekleme oluşan bu potansiyelin metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığını ise Mott açıklamıştır. Schottky-Mott teorisine göre potansiyel engeli, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle oluşmaktadır. MS kontak yapıldığında, malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontaklar doğrultucu kontak veya omik kontak olmak üzere ikiye ayrılır. İş fonksiyonu bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerjidir. Daha basit bir tanımla, vakum seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Metal için iş fonksiyonu Φ_m (eV) ile verilir ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna $\Phi_s = q(\chi_s + \Phi_n)$ eşittir. Yarıiletkenin Fermi seviyesi katkı miktarına göre değiştiği için, Φ_s değişken bir niceliktir. $q\chi_s$ terimi elektron ilgisidir ve iletkenlik bandının tabanındaki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarı olarak tanımlanır. Vakum seviyesi ise, metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi ya da başka bir söyleyişle katının dışında durgun olan bir elektronun enerjisini temsil eden uzay seviyesidir ve referans seviyesi olarak kabul edilir. $q\Phi_n$ ise iletkenlik bandı kenarı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Şekil 2.1a'da metal ve yarıiletken malzemeler kontak edilmeden önceki enerji-bant diyagramları gösterilmiştir.

Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s 'de yarıiletkenin iş fonksiyonu olarak düşünülürse, Çizelge 2.1'de metal ve yarıiletken malzemeler kontak edildiklerinde, bu malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontakların yapısı özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontaktların oluşumu

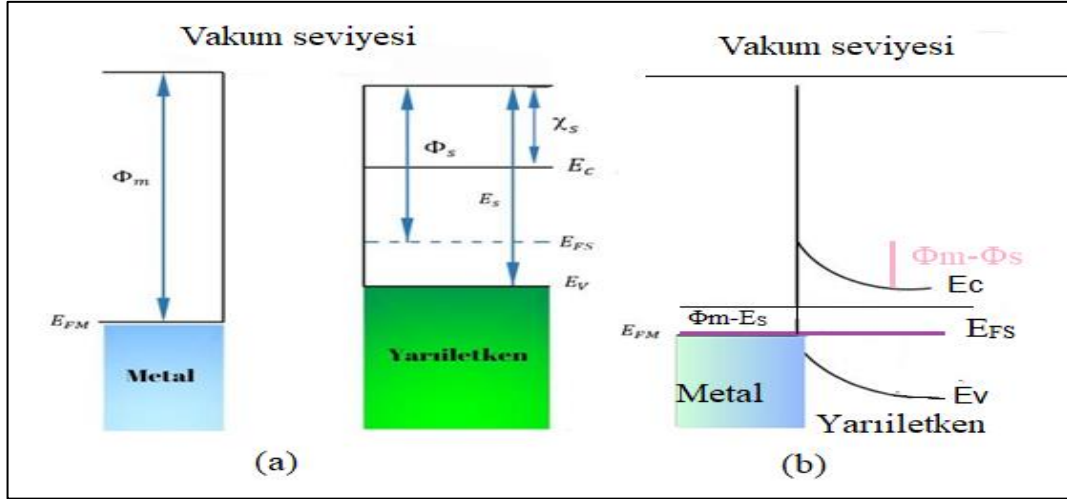
İş Fonksiyonlar	Yarıiletken Türü	Kontak Türü
$\Phi_m < \Phi_s$	p-tipi	Schottky (Doğrultucu)
$\Phi_m > \Phi_s$		Omik
$\Phi_m < \Phi_s$	n-tipi	Omik
$\Phi_m > \Phi_s$		Schottky (Doğrultucu)

Yalıtkan ve yarıiletken kristallerin elektriksel özelliklerinin incelenebilmesinin bir yolu da kristale uygun kontaktların yapılmasıdır. Oluşturulan kontakın ideal olması için, kontak yapılacak iki maddenin minimum dirençle temas etmesi ve kontak malzemelerinin yüzeylerinin yeterli derecede temiz ve pürüzsüz olması gerekmektedir.

MS kontak yapıldığında her iki malzemeye ait Fermi seviyelerinin dengelenebilmesi için bantlarda bir miktar bükülme meydana gelir ve elektron akışının yönü metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka bağlıdır.

Metal/p-tipi yarıiletken omik kontak ($\Phi_m > \Phi_s$)

Metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu durumu ($\Phi_m > \Phi_s$) ele alacak olursak; kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. (Şekil 2.1a) Kontakta sonra yarıiletkendeki elektronlar arkalarında pozitif yükleri bırakarak metal tarafına geçerler ve metal tarafında negatif yüzey yükü oluşmasına sebep olurlar. Bunun sonucunda yarıiletkenin Fermi seviyesi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar alçalır (Şekil 2.1b) [36]. Yarı iletkendeki hol yoğunluğunun artmasıyla yarıiletkenin ön yüzeyi daha fazla p-tipi olur. Elektronlar yarıiletkenin izinli durumlarına kolayca geçerler. Metal tarafına doğru akan holler de nötralize olurlar. Ters belsem uygulanmasıyla hem metalden yarıiletkene hem de yarıiletkenden metale yük akışı kolaylıkla olacağından oluşan kontak omik kontak olacaktır [37, 38].

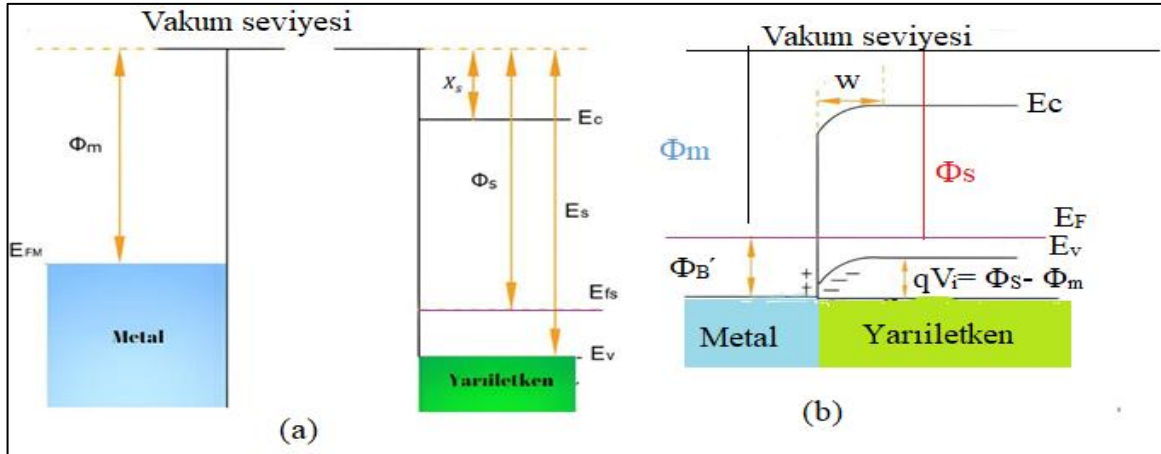


Şekil 2.1. Metal p tipi yarıiletken omik kontağının a) Kontakt oluşmadan önce metal ve yarıiletken enerji-bant diyagramı (b) Kontakt oluşuktan sonraki termal denge durumu

Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ($\Phi_s > \Phi_m$)

Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır ve akımdeşikler tarafından sağlanır. Metal/p-tipi MS kontak yapıldığında, termal denge kuruluncaya, her iki malzemenin Fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar, metalden yarıiletkene bir elektron akısı olur. Yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesi ile dengelenmek için metalden yarıiletkene elektron akışından dolayı $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yükselir.

Yasak bant aralığı (E_g) kontak sebebiyle değişmediği için E_v valans bant kenarı E_c iletkenlik bant kenarına paralel olarak yukarıya doğru kayacaktır. Yarıiletkenin elektron ilgisi de kontak sebebiyle değişmediği için yarıiletkenin vakum seviyesi de E_v valans bant kenarı ve E_c iletkenlik bant kenarına paralel olarak kayacaktır. Böylece termal dengedeki MS sistemde, engel yüksekliğini belirlemek için önemli bir nokta olan geçiş bölgesinde vakum seviyesinin sürekli olması sağlanmış olur. Metal ve yarıiletken malzemelerin Fermi seviyelerinin aynı hizada olmasından ve tüketim bölgesinin ortaya çıkmasından dolayı bantlarda aşağıya doğru bir bükülme meydana gelir (Şekil 2.2b). Yarıiletkene geçen elektronlar, metal-yarıiletken arayüzeyinde metal tarafında pozitif yüklü bir tabaka oluştururlar ve yarıiletkenin metale bakan sınırındadeşiklerle birleşirler.

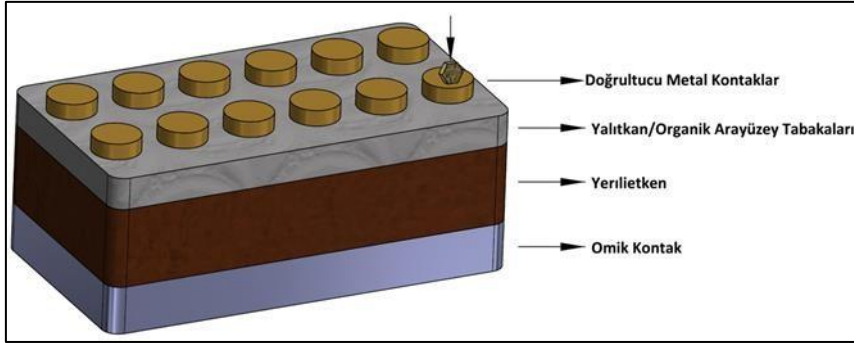


Şekil 2.2. Metal/p tipi yarıiletken doğrultucu kontağının a) Kontak oluşmadan önce metal ve yarıiletken enerji-bant diyagramı (b) Kontak oluşuktan sonraki termal denge durumu.

Elektronlarındeşiklerle birleşmesi sonucunda, yarıiletkende alıcıların bir uzay yük tabakası oluşur. Yarıiletkende bulunan uzay yükü tabakasındakideşik konsantrasyonu, elektron konsantrasyonuna göre oldukça az olduğu için, uzay yük bölgesi negatif yüklü alıcı (akseptör) atomlarının konsantrasyonuna bağlı W genişlikli bir tüketim tabakası içerir ve bir potansiyel engeli meydana gelir. Deşikler için, oluşan bu potansiyel engel yüksekliği: $\Phi_B' = E_g + \chi_s - \Phi_m$ ile verilir. Burada $E_g (= \Phi_B + \Phi_B')$ yarıiletkenin yasak bant aralığı, χ_s yarıiletkenin elektron ilgisi ve Φ_m ise metalin iş fonksiyonudur [37,39].

2.2. Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) Yapısı

Metal ve yarıiletken malzemeler arasında doğal veya yapay yöntemlerle yalıtkan, oksit veya polimer bir arayüzey tabakası eklenmesi sonucunda MIS, MOS ve MPS yapılara dönüşür. MS arasına büyütülen yalıtkan tabakanın kalınlığı 100 Å 'dan küçük ise MIS yapısı, 100 Å 'dan büyük olduğunda ise MOS yapısı oluşur. Şekil 2.3'de bir MOS yapı gösterilmektedir. Bu yapıda metal ile yarıiletken arasında bulunan yalıtkan oksit tabakanın varlığı metal ile yarıiletken izole ederek yüzeyler arasındaki yük geçişini kontrol eder [5, 40]. Şekil 2.3'de gösterilen MOS yapısına uygulanan gerilim, seri direncin gerilimi ile diyot gerilimi değerlerinin toplamına eşittir.



Şekil 2.3. Bir MOS yapısının şematik gösterimi

Yarıiletken yapı, elektron ve deşik gibi yük taşıyıcıları barındırabilir. Yarıiletken ile metal arasında bir bariyer oluşur. MOS yapılarının performansı, bariyerin kalınlığına bağlıdır. Bariyer kalınlığı arttıkça, ters ön beslem bölgesindeki sızıntı akımları azalır. Bu, MOS yapılarının güvenilirliğini artırır. Ancak, bariyer kalınlığı çok arttığında, metal ile yarıiletken arasındaki etkileşim azalır. Bu da MOS yapılarının performansını düşürür.

2.2.1. İdeal MOS yapısı

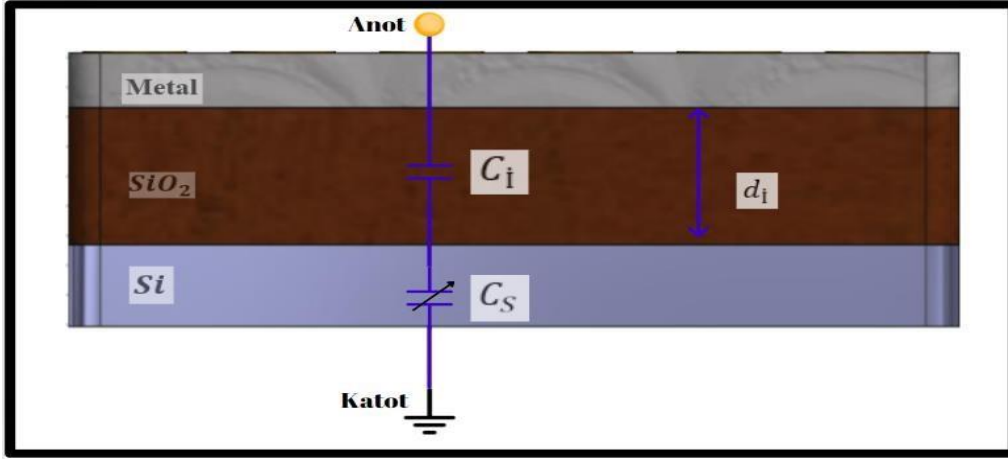
İdeal bir MOS yapısı, aşağıdaki koşulları sağlamalıdır.

- i. İdeal bir MOS yapısında, yalıtkan tabaka (oksit) üzerinden herhangi bir doğrudan akım (dc) sızıntısı bulunmaz. Bu durum, yalıtkanın mükemmel bir dielektrik olduğu ve yük taşıyıcılarının (elektron veya deşik) bu tabaka içerisinde hareket edemediği anlamına gelir. Diğer bir deyişle, yalıtkanın iletkenliği sıfır veya öz direnci sonsuzdur.
- ii. Dışarıdan herhangi bir elektriksel alan uygulanmayan termodinamik denge koşullarında, yarıiletken ile metal arasındaki iş fonksiyonları farkı (Φ_{ms}) sıfırdır. Bu durum, yarıiletken yüzeyinde elektriksel olarak nötr bir durumun olduğunu ve band eğilmesinin olmadığını ifade eder.

n-tipi için;

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \Phi_m - (\chi + \Phi_n) = 0 \quad (2.1)$$

tabaka arayüzeyde bulunması durumunda, metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans meydana gelir. Bu kapasitansa MIS kapasitansı denir [40,41]. Şekil 2.5' te gösterildiği gibi, bir MOS yapısının elektriksel davranışı bu eşdeğer devre modeli ile analiz edilebilir.



Şekil 2.5. MOS yapının eşdeğer devresi

Uygulanan gerilimin küçük sinyal koşullarında, bir MIS yapısının toplam kapasitansı iki ana bileşenden oluşur: yalıtkan tabakanın kapasitansı (C_i) ve yarıiletken-yalıtkan arayüzündeki uzay yük bölgesi kapasitansı (C_{sc}). Bu iki kapasitansın seri bağlantısı, yapının toplam kapasitansını belirler.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_{sc}} \quad (2.3)$$

Bu sonuca göre seri bağlı C_{sc} ve C_i kapasitansları bir MIS yapının eşdeğer devresine ait kapasitansı oluşturur. C_i aşağıdaki gibi verilir.

$$C_i = \frac{A \cdot \epsilon_{ox}}{d_i} \quad (2.4)$$

Burada,

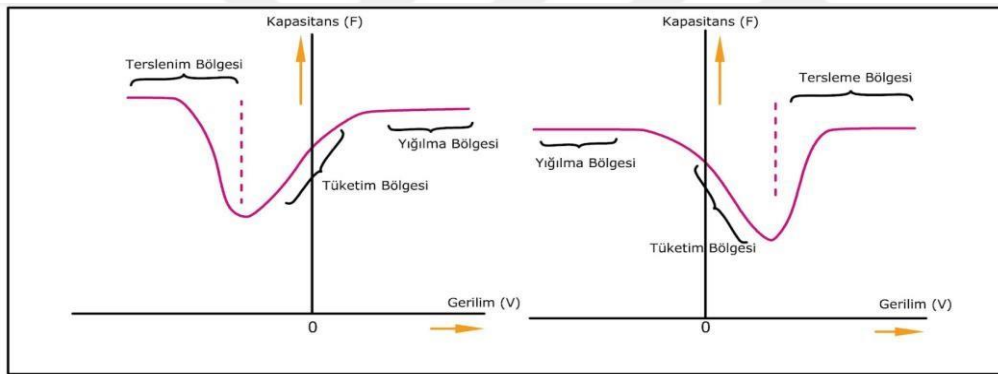
C_{OX} : Yalıtkan tabaka, yarı iletken ve diğer malzemelerin dielektrik sabitleri, boşluğun dielektrik sabiti ($\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ F/m) cinsinden ifade edilir.

A : doğrultucu kontak alanı,

d_i : arayüzey tabakasının kalınlığıdır.

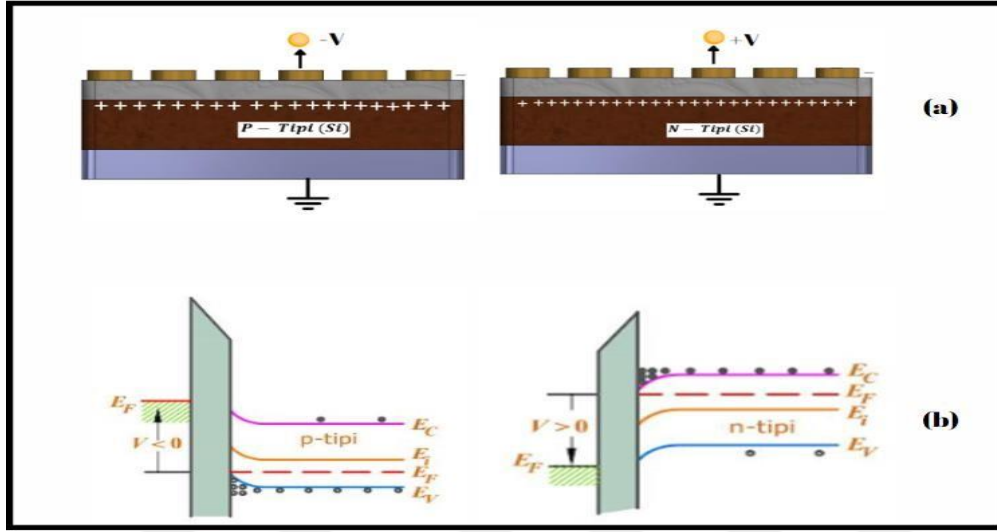
MOS yapının kapasitansı, yüzey yükü (Q_{sc}) tarafından belirlenir ve uygulanan gerilimle değişir. Kapasitans-gerilim eğrisi, yığılma, tüketim ve terslenme bölgelerine ayrılır.

Şekil 2.6 (a) ve (b)' de sırasıyla n-tipi ve p-tipi MOS yapıların C-V eğrilerinin yığılma, tüketim ve tersinim olmak üzere üç bölgeye ayrıldığı gösterilmektedir.



Şekil 2.6. (a) n-tipi ve (b) p-tipi MOS yapıların C-V eğrilerinin üç bölgeye ayrılması

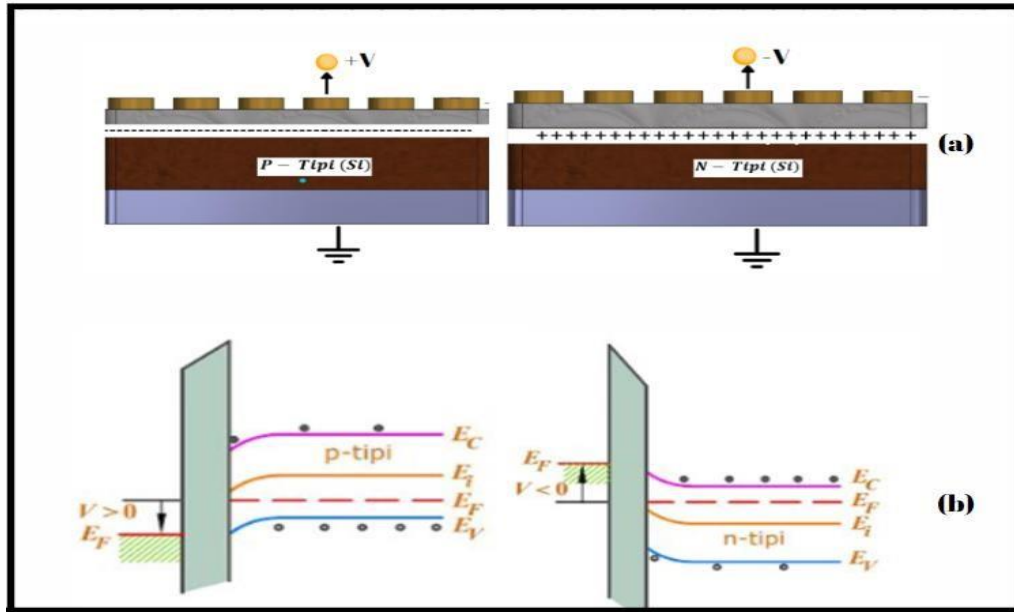
2.2.2 .Yığılma bölgesi



Şekil 2.7. İdeal MOS yapıların a) p-tipi ve b) n-tipi eklemlerin yığılma durumunda bant diyagramları

P-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklar(holler), n-tipi yarıiletkenlerde ise elektronlardır. Yarıiletkenin yüzeyinde doğal bir oksit tabakası oluşması sonucu, yüzeyde bir potansiyel bariyeri oluşur. Şekil 2.7a da görüldüğü gibi P-tipi yarıiletken MOS yapılarında metal kontak üzerinden negatif bir gerilim uygulandığında, boşluklar metal kontak tarafından çekilir yarıiletkene doğru harekete geçer ve ara yüzeyde birikmeye başlar. Bu birikim, enerji bantlarında aşağı doğru bir bükülme ve Fermi seviyesinin yükselmesine neden olur. Şekil 2.7b de görüldüğü gibi n tipinde ise metal kontak üzerine Pozitif bir gerilim uygulandığında, elektronlar metal kontak tarafından çekilir ve yüzeyde birikmeye başlar. Bu birikim, enerji bantlarında yukarı doğru bir bükülme ve Fermi seviyesinin yükselmesine neden olur. Oluşan durumlara, "yığılma" (accumulation) bölgesi olarak adlandırılır.

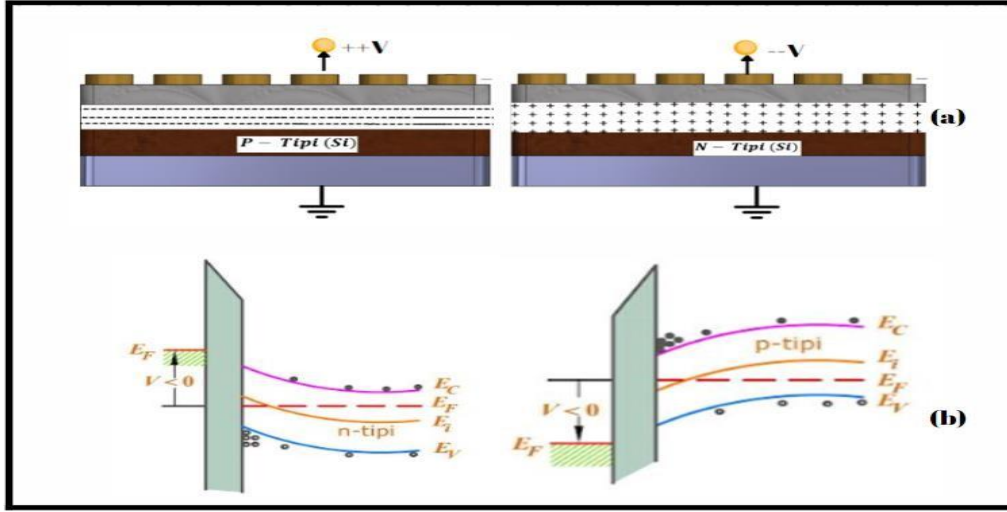
2.2.3. Tükenim bölgesi



Şekil 2.8. İdeal MOS yapıların a) p-tipi ve b) n-tipi eklemlerin tükenim durumunda bant diyagramları

p-tipi yarıiletken MOS yapısının metal kontak üzerine düşük seviyede pozitif bir gerilim uygulandığında, çoğunluk yük taşıyıcıları olan boşluklar metal kontak tarafından içe doğru çekilir ve yarıiletken arayüzeyinde şekil 2.8a da görüldüğü gibi hollerin yoğunluğu azalır. n-tipi yarıiletken MOS yapısının metal kontak üzerine düşük seviyede negatif bir gerilim uygulandığında ise elektronlar metal kontak tarafından içe doğru çekilir ve yarıiletken arayüzeyinde elektron yoğunluğu azalır. Bu durum, enerji bantlarının aşağı doğru bükülmesine ve tüketimin (depletion) artmasına neden olur. Yarıiletken arayüzeyinde hollerin yoğunluğunun azaldığı alan, tüketim bölgesi olarak adlandırılır.

2.2.4. Tersinim bölgesi



Şekil 2.9. a) p-tipi ve n-tipi (Si) yük dağılımı b) İdeal MOS yapıların p-tipi ve n-tipi eklemlerin tersinim durumunda bant diyagramları

p tipi yarıiletkenlere sahip MOS yapılarında, metal kontak üzerine yüksek seviyede pozitif voltaj uygulandığında yarıiletken arayüzündeki çoğunluk yük taşıyıcısı olan hol yoğunluğu, yapıdaki elektron yoğunluğuna kıyasla daha azdır. Tükenim durumunda, çoğunluk taşıyıcıları olan holler itilirken, azınlık taşıyıcıları olan elektronlar çekilir. Tersinim bölgesinde, yüzeydeki azınlık taşıyıcıların (elektronların) sayısı nihayetinde çoğunluk taşıyıcıların (hollerin) sayısından büyük hale gelir. Yüzeydeki elektron yoğunluğu enerji bantlarının yukarı doğru bükülmesine sebep olur. Fermi enerji seviyesi, Şekil 2.9'daki gibi iletkenlik enerji seviyesinin (E_i) altına geçer. Bu durum ile p tipi yarıiletken yüzeyi, tersi davranış sergileyerek n tipi yarıiletken özelliği gösterir. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak adlandırılır.

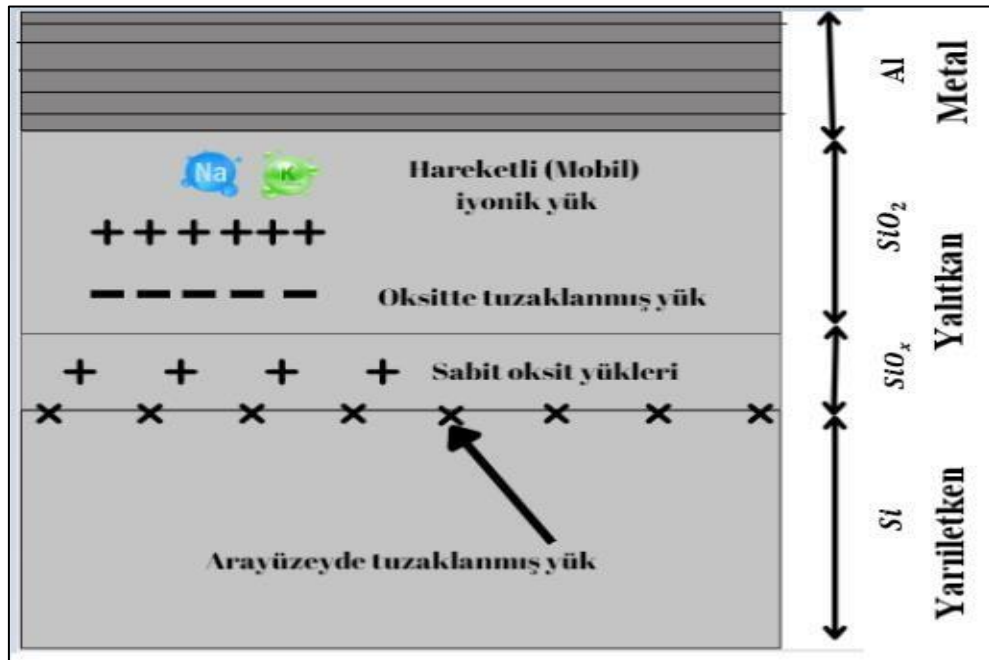
Tersinim oluşmadan önce maksimum tükenim tabakası genişliği W_{dmax} Eşitlik 2.5' de verilmiştir.

$$W_{dmax} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0\Psi_s}{qN_A}} \quad (2.5)$$

Burada, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, qN_A tükenim bölgesindeki yük yoğunluğu, Ψ_s yüzey potansiyelidir.

2.2.5. Gerçek MOS Yapısı

İdeal bir MOS yapıda, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları eşitlenerek Fermi seviyelerinin çakışması sağlanır. Ayrıca, ideal MOS yapıda yalıtkan oksit içinde ve oksit-yarıiletken arayüzeyinde herhangi bir enerji seviyesi (arayüzey durumu) veya hareketli yük taşıyıcısı (iyon, elektron, delik) bulunmaz. Ancak gerçek MOS yapılarda, oksit-yarıiletken arayüzeyinde enerji seviyelerinde lokalize olmuş yüklü kusurlar (arayüzey durumları) ve üretim süreçlerinde oluşan hareketli iyonlar gibi istenmeyen yükler bulunması, MOS yapısının elektriksel özelliklerini ideal değerlerden saptırır [2-3,42-44].



Şekil 2.10. İdeal olmayan MOS yapısında ara yüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

Şekil 2.10'da ideal olmayan bir MOS yapıda, yarıiletken/oksit arayüzeyinde lokalize olmuş enerji seviyeleri (arayüzey durumları) elektron veya deliklerle dolup boşalarak yüklü hale gelir. Bu yüklü arayüzey durumları, MOS kapasitörünün eşdeğer devresindeki paralel birkapasitans bileşeni oluşturur ve aynı zamanda uzay yükü bölgesinin genişliği üzerinde etkili olarak seri bir direnç etkisi gösterir.

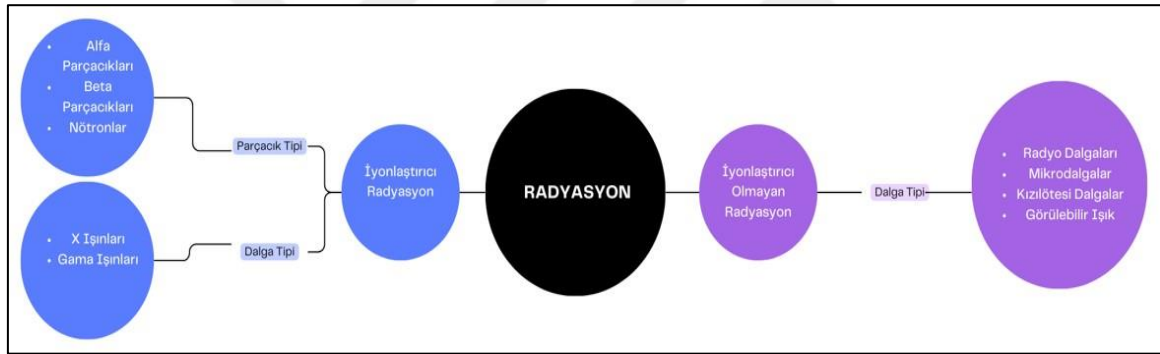
Sabit oksit yükleri, oksit/yarıiletken arayüzeyinde lokalize olurken, hareketli iyonik yükler metal/oksit veya yarıiletken/oksit arayüzlerinde bulunabilir. Bu iyonlar genellikle Na⁺, H⁺, H₃O⁺, K⁺ ve Li⁺ gibi alkaliler ve hidrojen iyonlarından oluşur. MOS yapılarında hareketli

iyon kirliliği, üretim süreçlerinde kullanılan kimyasalların kalitesi, mekanik işleme sırasında yüzey kontaminasyonu, oksidasyon işlemlerindeki termal büzölme etkileri, fırın ortamındaki partiköl kirliliği ve oksitleyici gazların safsızlıkları gibi faktörlerden kaynaklanır. Bu hareketli iyonlar, uygulanan elektrik alan altında elektriksel alanda taşınan bu iyonlar MOS yapısının elektriksel özelliklerinde kalıcı veya geçici bozulmalara neden olur.

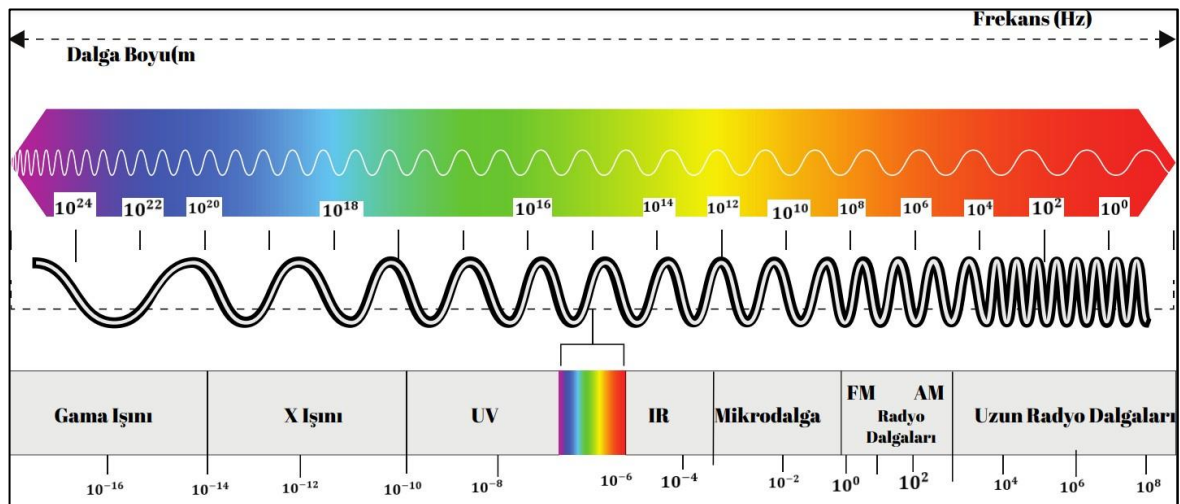


3. RADYASYONUN MADDE İLE ETKİLEŞMESİ

Radyasyon, kararsız atom çekirdeklerinin yaydığı enerjidir. Bu kararsızlık, çekirdeklerindeki proton ve nötron sayılarının eşit olmamasından veya fazla sayıda proton veya nötron içermelerinden kaynaklanır. Radyasyon yayan atomlara radyoaktif atom, yaydıkları ışınımlara ise radyasyon adı verilir. Alfa, beta, nötron, x-ışınları ve gama olarak adlandırılan radyasyon türleri vardır. Radyasyon doğal ve yapay kaynaklardan oluşabilir ve doza bağlı olarak hem zararlı hem de faydalı etkileri olabilir. Radyoaktif atomlar da zamanla radyoaktif bozunma yoluyla kararlı atomlara dönüşen, çekirdeklerinde kararsızlık gösteren atomlardır. Radyoaktif izotoplar ise aynı elementin farklı atom kütle numaralarına sahip atomlarıdır. Tıbbi teşhis ve tedavide, sanayide ve tarımda kullanılır. Radyasyondan korunmak için zaman, mesafe ve zırhlama gibi önlemler alınabilir.



Şekil 3.1. Radyasyon türlerinin sınıflandırılmasının şematik görünümü



Şekil 3.2. Elektromanyetik radyasyon spektrumu

Alfa radyasyonu, bir atom çekirdeğinin alfa parçacığı adı verilen iki proton ve iki nötron içeren bir parçacık yayması ile oluşur. Bu parçacıklar büyük kütleli, pozitif yüklü ve kısa menzillidir. Hava veya birkaç santimetre kalınlığındaki hafif materyaller alfa radyasyonunu durdurabilir. Cilt ile temas halinde ise hasara neden olabilir. Alfa radyasyonu, iyonizasyon yoluyla madde ile etkileşime girer, bu da madde içindeki atomların elektronlarının kopmasına neden olur [45,46].

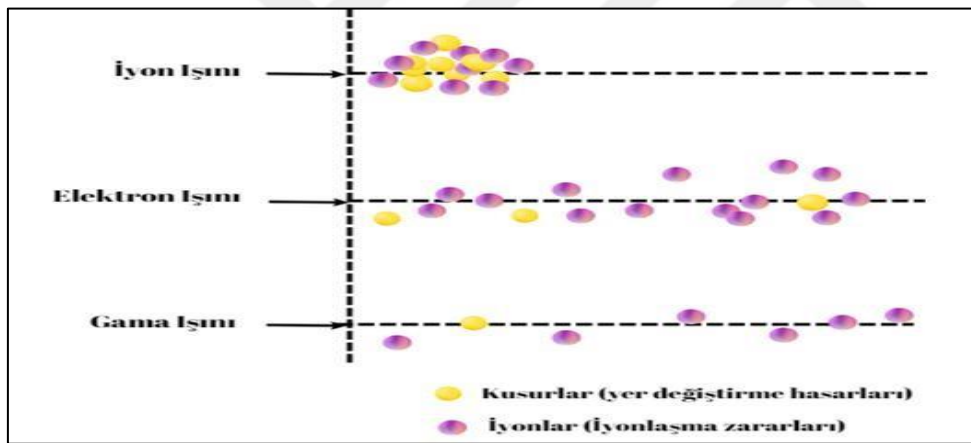
Beta radyasyonu, bir atom çekirdeğinde bir nötronun bir protona dönüşmesi veya bir protonun bir nötron oluşturması sonucu beta parçacığı adı verilen bir parçacığın yayılmasıyla oluşur. Bu parçacıklar, alfa parçacıklarına göre daha küçük, daha hızlı ve daha derinlemesine giriciliğe sahiptir. Elektrik yüklü olduklarından madde ile etkileşime girerek iyonizasyona neden olabilirler. Beta parçacıkları, orta yoğunluktaki maddelerde birkaç milimetreye kadar menzile sahiptir. Kalın materyaller, örneğin plastik veya alüminyum gibi, beta radyasyonunu durdurabilir [45-47].

İyonlaştırıcı radyasyonlar grubundaki ışınlar, madde yapısında değişikliğe sebep olur [46]. Gama ışınları, yüksek enerjileri ve kısa dalga boyları nedeniyle çift katmanlı nano yapılarda (atomik ve moleküler seviyede) değişikliklere yol açabilir. Gama ışınları elektromanyetik dalgalar olduğu için, enerji seviyelerine bağlı olarak maddeyle etkileşirler. Gama ışınları madde içinden geçerken absorbe olabilirler. Etkileşimleri Compton saçılması, fotoelektrik etki ve çift oluşturma gibi olayları içerir. Gama radyasyonunu durdurmak için kurşun gibi yoğun materyaller kullanılır. Genellikle nükleer reaksiyonlar veya radyoaktif bozunma süreçleri sonucunda ortaya çıkarlar [48-49].

Gama radyasyonunun tespiti ve ölçümü, birçok uygulama alanında temel bir ihtiyaçtır. Bu bağlamda yarıiletkenlerin kullanımı özellikle çift arayüzeye katmanlı yarıiletkenlerin radyasyon dedektörleri olarak önemini artırmıştır. Gama ışınları, malzeme içinde enerji transferine yol açarak, özellikle yüksek enerjili iyonizasyon olaylarına neden olabilir ve bu durum atomik yer değiştirmelere sebep olabilir.

Gama radyasyonu yarıiletken malzemelerle etkileşime girdiğinde bu etkileşim sonucu yarıiletkenin içinde elektron-hol çiftleri oluşturur. Bu çiftler elektriksel sinyalleri üretir ve bu sinyaller dedektör tarafından algılanır. Çift arayüzey katmanlı yarıiletkenler, gama

Radyasyonunun etkili bir şekilde tespiti ve ölçümü için tasarlanmıştır. Bu katmanlar arasındaki arayüzeler, gama ışınlarının yarıiletken içinde daha fazla etkileşime girmesini sağlar. Bu, gama radyasyonunun daha verimli bir şekilde yakalanmasını ve dedektörün hassasiyetinin artırılmasını sağlar. Aynı zamanda, çift arayüzey katmanlı yarıiletkenlerin bu etkileşimleri yüksek enerjili parçacıkların algılanması için tasarlanmıştır. Bu tür dedektörler gama radyasyonunun tespiti gereken birçok kritik uygulama alanında büyük öneme sahiptir. Özellikle nükleer enerji santrallerinin izlenmesi, medikal alanda bulunan nükleer tıp ve radyoterapi tedavilerinde, nükleer fizik araştırmaları ve çevresel radyasyon seviyelerinin izlenmesi gibi alanlarda bu dedektörlerin kullanımı yaygındır. Çift arayüzey katmanlı yarıiletkenlerin kullanımı, yüksek enerjili gama radyasyonunun hassas bir şekilde tespiti için önemli bir yol açmıştır. Bu dedektörlerin yüksek enerjiye dayanıklılıkları, hızlı tepki süreleri ve yüksek çözünürlükleri, gama radyasyonunun etkili bir şekilde ölçülmesini mümkün kılmaktadır [48].

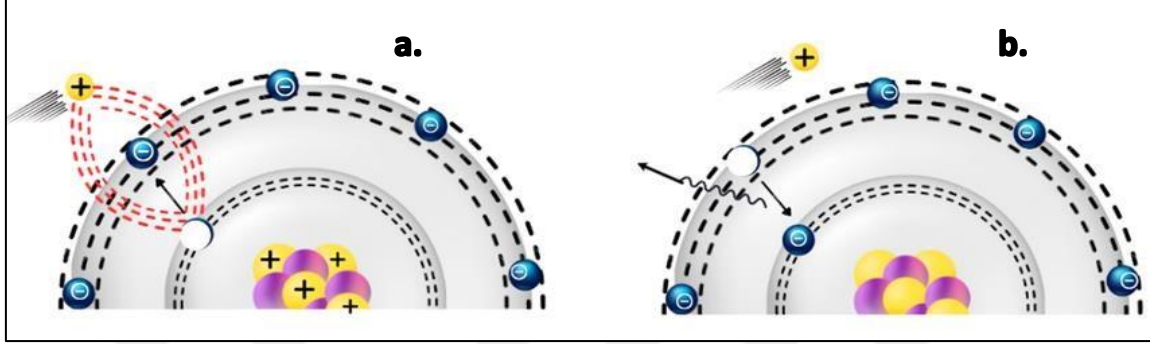


Şekil 3.3. Işınlanmış bir yarı iletken malzemede elektron, iyon ve gama ışınlarının radyasyon yolları

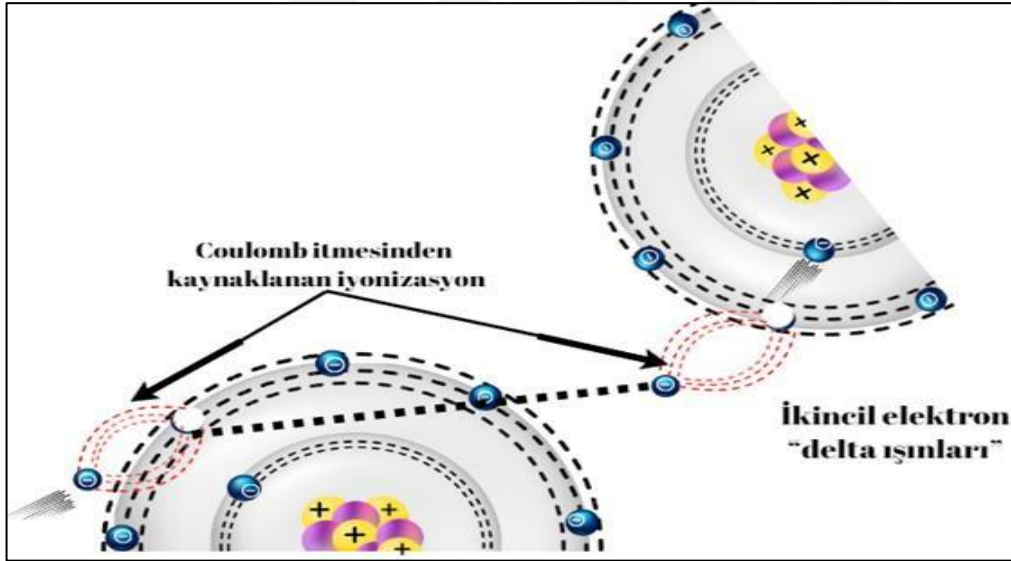
3.1. Parçacık Etkileşimleri

İyonlaştırıcı radyasyonun parçacıkları arasında alfa parçacıkları (α^{+2}), protonlar (p^{+}), beta parçacıkları (β^{-}), pozitronlar (β^{+}) ve enerjik çekirdek dışı elektronlar (e^{-}) gibi yüklü parçacıklar ve yüksüz parçacıklar bulunur. Ağır yüklü parçacıkların (örneğin, alfa parçacıkları ve protonlar) davranışı, elektronlar ve pozitronlar gibi daha hafif yüklü parçacıkların davranışından farklıdır.

Yüklü parçacıklar, α parçacıkları, protonlar, ve β -parçacıkları (elektronlar), absorban atomlarıyla etkileşime girerler. Bu etkileşim genellikle atomların orbital elektronlarıyla gerçekleşir ve nadiren çekirdekleri de içerir. Bu etkileşim sırasında iyonlaşma, uyarılma ve hatta molekül parçalanması gibi olaylar meydana gelebilir.



Şekil 3.4. Elektromanyetik radyasyonun sonrasındaki uyarılma b. Uyarılmanın sonradan azalması veya ortadan kaldırılması

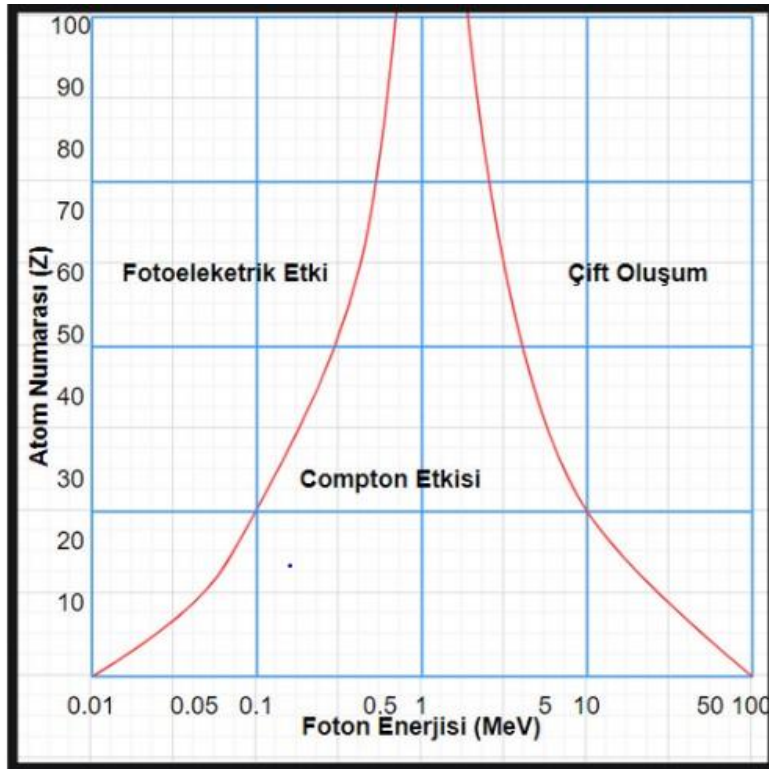


Şekil 3.5. İyonlaşma ve delta ışınlarının üretimi

Şekil 3.4' de görüldüğü gibi uyarılmada, yüklü parçacık enerjisinin tamamını veya bir kısmını orbital elektronlara aktararak onları daha yüksek enerji seviyelerine çıkarır. İyonlaşmada ise enerji transferi, orbital elektronların bağlanma enerjisini aşacak kadar olabilir ve sonunda onları atomdan koparabilir. Bu etkileşim sonucunda, atomlardan koparılan elektronlara 'birincil elektronlar' denir. Bu birincil elektronlar, daha fazla uyarılma veya iyonlaşma yaratabilecek yeterli kinetik enerjiye sahip olabilir. Şekil 3.5 de görüldüğü gibi ikincil iyonlaşmalardan kaynaklanan yüksek enerjili ikincil elektronlara "delta ışınları"

denir. Uyarılma ve iyonlaşma süreci parçacığının ve tüm elektronların enerjisi bitene kadar devam eder. İyonlaşma sürecinde, atomdan bir iyon çifti oluşturmak için ortalama bir enerjiye (W) ihtiyaç vardır ve atomun cinsine bağlı olarak değişebilir. W 'nin değeri hava için yaklaşık 35 eV'dir ve oksijen ile ksenon gazları için daha düşüktür, ancak çoğu gaz için 25-45 eV aralığındadır. İyon çiftlerinin oluşumu yani iyonlaşma süreci iyon odalarında ve Geiger Müller sayıcılarında yüklü parçacıkların tespiti için bir yöntem olarak sıkça kullanılır.

3.2. Gama ışınlarının Madde ile Etkileşimi

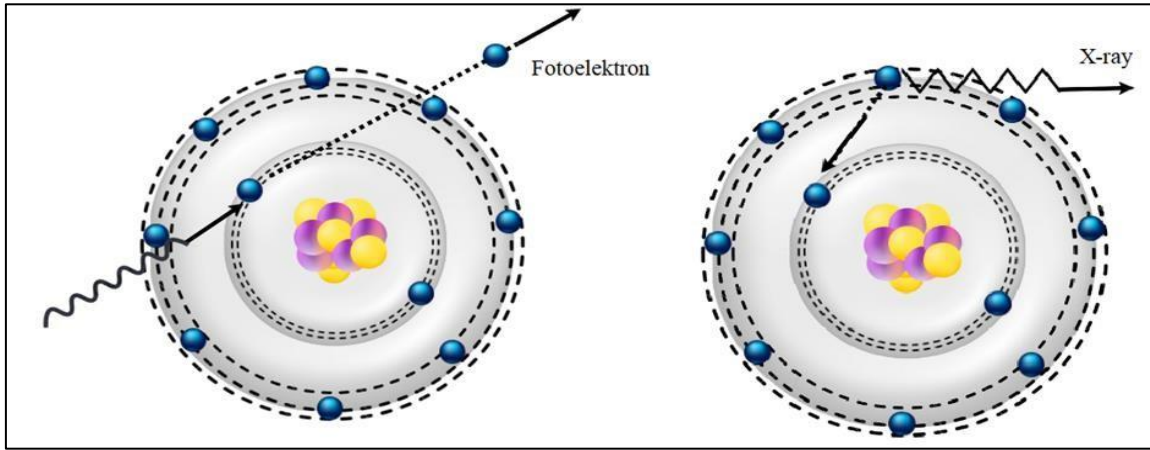


Şekil 3.6. Fotonların maddeyle etkileşimi

Fotonlar, şekil3.6 da görüldüğü gibi materyallerle etkileşime girdiğinde foton enerjisi ve materyalin atom numarasına (Z) bağlı olarak farklı olaylar meydana gelir [49-51]. Düşük enerjili fotonlar fotoelektrik etkiye yol açarken, orta enerjili fotonlar Compton saçılmasına ve yüksek enerjili fotonlar çift oluşuma neden olur [52]. Atom numarası arttıkça, Compton saçılması bölgesi daralır ve çift üretimi daha yaygın hale gelir [53]. Bu olaylar, fotonların farklı enerjilerde materyallerle nasıl etkileşime girdiğini anlamak için önemlidir.

3.2.1. Fotoelektrik olay

Fotoelektrik olay, ışığın bir yüzeye çarpması sonucu meydana gelen önemli bir fiziksel olaydır. Fotoelektrik olayın gerçekleşmesi için gelen fotonun enerjisinin atomdaki elektronun bağlanma enerjisinden büyük veya ona eşit olması gerekir. Bu etki, Albert Einstein tarafından 1905 yılında öne sürülen ve ışığın foton adı verilen enerji paketlerinden oluştuğu teorisini temel alır. Fotoelektrik olay bir malzemenin yüzeyine çarpan fotonların malzeme içindeki elektronları serbest bırakma yeteneğiyle bilinir. Metal tabaka yüzeyindeki atoma bağlı elektronun enerjisi gelen fotonun enerjisinden küçük olduğunda soğurma olayı gerçekleşir ve belli kinetik enerjiye sahip bir elektronun yayılımı olur [54]. Şekil 3.6 da görüldüğü gibi, fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden büyük olduğu zaman elektronu orbitalden koparır ve elektron serbest hale geçer. Elektron serbest hale geldikten sonra, ortamda kinetik enerji kazanır ve bu enerji elektronun hareketine dönüşmesine sebep olur. Atomun iç tabakalarından bir elektronun yayınlanması durumunda, dış tabakalardaki bir elektron daha düşük enerji seviyesini doldurmak için bu boşluğu hareket eder ve bu süreç sonucunda bir X-ışını yayınlanır. Gelen fotonun enerjisi, sökülen elektronun bağlanma enerjisinden büyük olduğunda atomdan sökülen elektron kinetik enerjisi ile yoluna devam eder [55].



Şekil 3.7. Fotoelektrik etki

Fotoelektrik etki, bağlanma enerjisi yüksek olan yüksek atom numaralı elementlerde daha fazladır. Madde ile etkileşime giren fotonun enerjisi 0.001 MeV ile 0.5 MeV aralığında ise fotoelektrik olay daha fazladır. Bu olayın gerçekleşmesi Einstein fotoelektrik eşitliği ile

ifade edilir [50,56]. Sökülen elektronun bağlanma enerjisi, elektronun kinetik enerjisi Eşitlik 3.2’de verilmiştir.

$$E_e = h\nu - \phi \quad (3.1)$$

$$\phi = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.2)$$

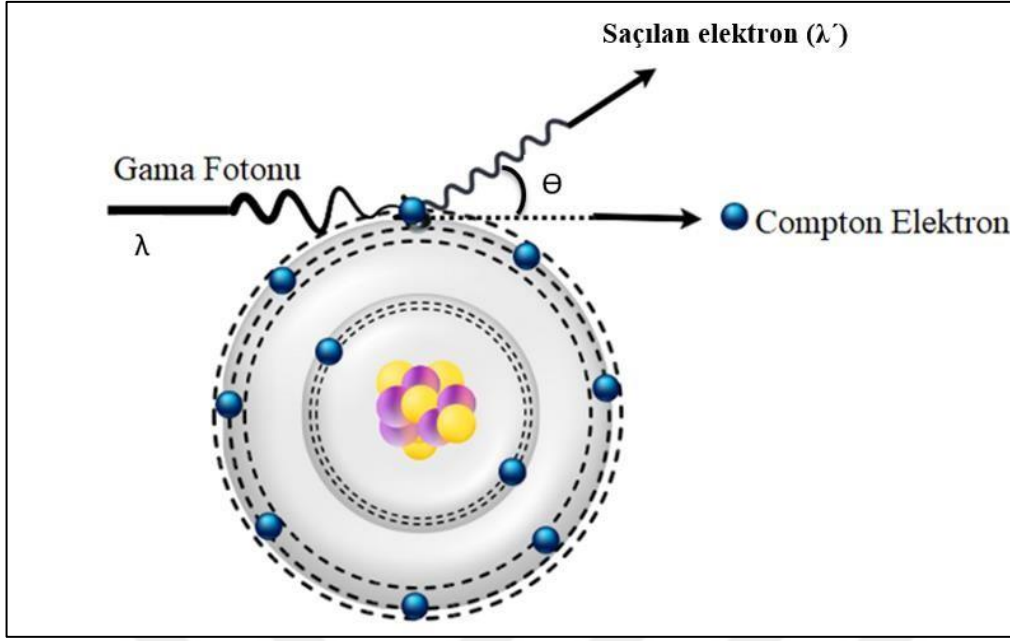
Burada serbest hale geçen elektronun kinetik enerjisi (E_e), sökülen elektronun bağlanma enerjisi de (ϕ), gelen fonun enerjisi ($h\nu$) olarak tanımlanır. Buradaki h Planck sabiti olup değeri $6.63 \cdot 10^{-34}$ j.s dir.

3.2.2. Compton saçılması

Compton saçılması, gama ışınlarının serbest elektronlarla (atomun dış yörüngesindeki elektron) etkileşime girerek enerji ve momentumlarını kaybettiği temel fizik olayıdır. Arthur H. Compton tarafından 1923 yılında yapılan çalışmalarla keşfedilmiştir.

Compton saçılması, gama ışınının serbest bir elektron ile çarpıştığında ortaya çıkar. Elektronlar genellikle bir madde içinde bağlı durumdadır. Ancak bir fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden daha yüksekse, bağlanma enerjisi göz ardı edilir ve elektron serbest hale gelir. Eğer gelen fotonun enerjisi, elektronun bağlanma enerjisinden (genellikle 100 keV altı), bu olay gerçekleşmez. Etkileşim sırasında gama fotonu, elektrona enerjisini ve momentumunun bir kısmını transfer eder. Bu enerji ve momentum transferi sonucunda, gama ışını saçılır ve yeni bir enerji düzeyinde devam eder. Elektron ise gama fotonu tarafından saçılır ve bu olay, Compton saçılması olarak adlandırılır. Fotoelektrik olay K ve L tabakalarındaki elektronlarıyla ilgili iken compton saçımı daha çok dış yörünge elektronları ile ilgilidir [57].

Compton saçılması, enerji ve momentum korunumu yasalarına tabidir. Enerji transferi, gama fotonunun enerjisinin bir kısmının elektron tarafından absorbe edilmesi ve saçılma sonrasında yeni bir enerji düzeyinde yeniden yayılması şeklinde gerçekleşir. Bu süreç, gama ışınının dalga boyu değişimine ve saçılma açısının belirlenmesine neden olur [57].



Şekil 3.8. Compton saçılması

Serbest bir elektrona çarpan $h\nu$ enerjili ve $h\nu/c$ momentumlu bir foton, θ açısı altında daha düşük frekansla saçılırken, p momentumuna sahip olan elektron θ açısında çevresine dağılım göstermektedir (Şekil 3.7). Saçılan fotonun saçılma açısı, fotondan elektrona aktarılan enerji miktarına bağlı olarak değişmektedir. Compton etkileşimini enerji ve momentum korunumu ilkelerine dayanarak analiz ettiğimizde, saçılan fotonun ve yayılan elektronun enerjileri arasındaki ilişkileri ifade edebiliriz.

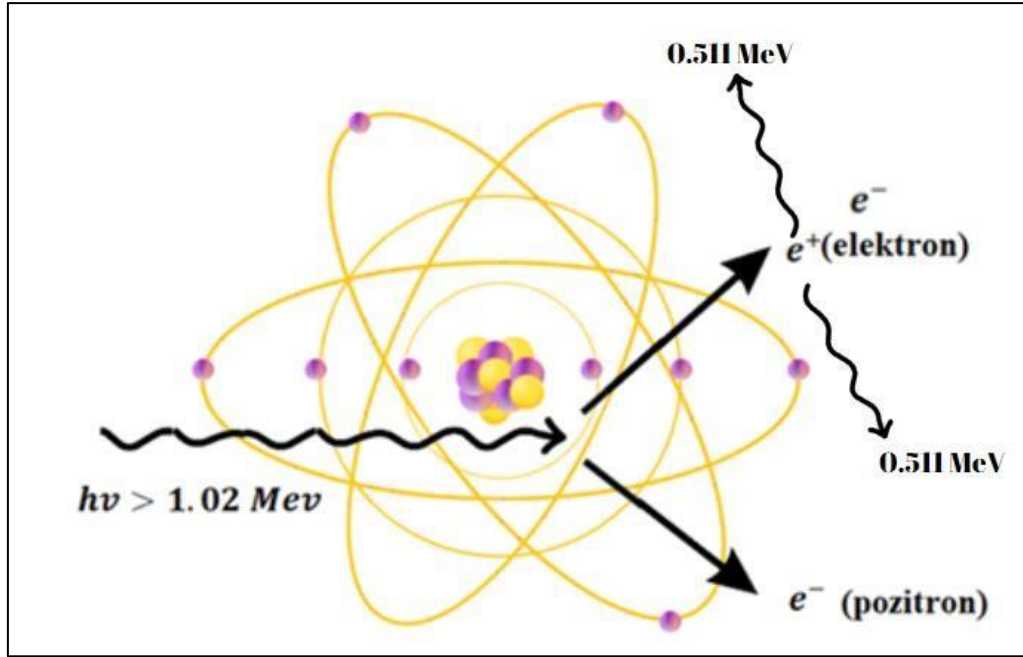
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta)) \quad (3.3)$$

Bu formülde; λ' saçılan elektronun dalga boyu, λ gelen fotonun dalga boyu, h Planck sabiti ($6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$), m_e elektronun durgun kütlesi ($9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$), c ışık hızı ($2.997 \times 10^8 \text{ m/s}$) ve θ saçılma açısını ifade eder. Eşitlik 3.3 Compton saçılmasının enerji ve açısal dağılımını tanımlar.

3.2.3. Çift oluşum

Çift oluşum yüksek enerjili gama ışınlarının yoğun elektrik alanlarında veya atom çekirdekleriyle etkileşime girmesi sonucu ortaya çıkan önemli bir olaydır. Bu olay, şekil 3.8 de görüldüğü gibi gama ışınlarının enerjisi maddeyle etkileşime girerek elektron-pozitron

çifti oluşturacak kadar yüksek olduğunda gerçekleşir. Çift oluşum olayının gerçekleşebilmesi için gelen fotonun enerjisi 1.02 MeV'den büyük olmalıdır. Çekirdek etrafında gerçekleşen bu olay korunum ilkeleri kapsamında gerçekleşir. 1.02 MeV'den büyük enerjili fotonun çekirdekle etkileşimi ile oluşan çift oluşumu sonrası toplam yük, toplam enerji ve çizgisel momentum korunur [50].



Şekil 3.9. Çift oluşum

Enerji ve momentumun korunumu ilkesi, çift oluşum sürecinin temelini oluşturur. Gama ışınının enerjisi (E_{gama}), oluşan elektron (E_{e^-}) ve pozitron (E_{e^+}) ile geri tepme enerjisi (E_{recoil}) toplamı olarak ifade edilebilir:

$$E_{\text{gama}} = E_{e^-} + E_{e^+} + E_{\text{recoil}} \quad (3.4)$$

Çift oluşum için minimum enerji seviyesi, eşik enerji $E_{\text{threshold}}$ olarak adlandırılır. Bu enerji elektron ve pozitron çiftinin oluşabilmesi için gerekli minimum enerji seviyesini tanımlar (Eşitlik 3.5)

$$E_{\text{threshold}} = 2m_e c^2 \quad (3.5)$$

Burada m_e , elektronun kütlesi ve c , ışık hızıdır.

Çift oluşum tesir kesiti (σ_{pair}), gama ışınının etkileşime girdiği ortamın atom numarası (Z) ile bağlantılı olarak değişir. Çift oluşum tesir kesit ifadesi Eşitlik 3.6 ile verilmiştir.

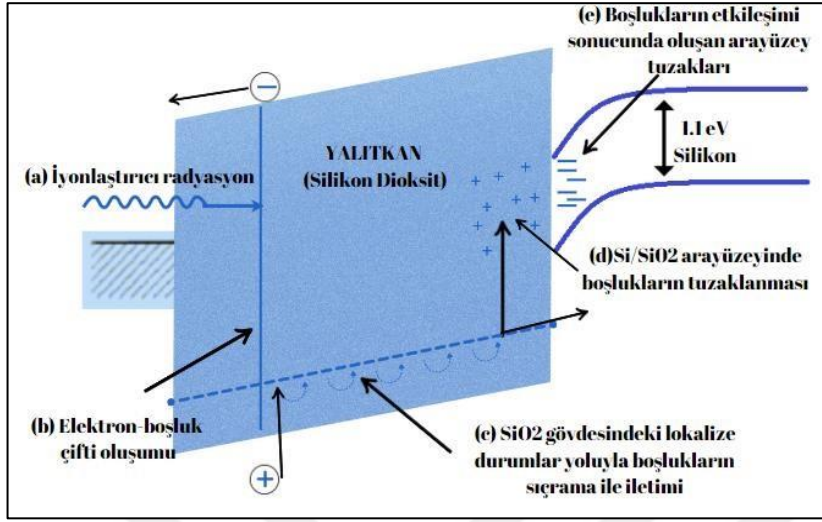
$$\sigma_{pair} \propto Z^2 \ln \left(\frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (3.6)$$

Çift oluşum nükleer fizik, astrofizik ve tıbbi görüntüleme gibi birçok alanda önemli bir rol oynar. Radyasyonun malzemeler üzerindeki etkileri malzemenin türüne, radyasyon türüne ve dozuna bağlı olarak değişir. Kalıcı hasarlar, malzemenin kullanım ömrünü ve performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, radyasyona maruz kalacak malzemelerin seçimi son derece önemlidir. Malzemeler, radyasyona maruz kaldıklarında kalıcı ve geçici etki meydana gelir [57-59].

Geçici Etkiler (Elektron-hol çiftlerinin oluşumu ve rekombinasyonu): Radyasyon, atomlardan elektronları kopararak elektron-hol çiftleri oluşmasına neden olur. Bu çiftler, malzemenin elektriksel iletkenliğini geçici olarak etkileyebilir. Fakat radyasyon kaynağı kesildiğinde, elektronlar tekrar atomlara bağlanarak bu çiftler kaybolur ve malzemenin iletkenliği eski haline döner.

Kalıcı Etkiler (Kristal yapı bozukluğu/değişikliği): Radyasyon, malzemenin atomik yapısını bozarak kalıcı hasara neden olabilir. Bu hasar kristal kusurları, arayüzey tuzakları ve sarkan bağlar gibi çeşitli şekillerde kendini gösterebilir. Bu tür kalıcı değişiklikler malzemenin mekanik dayanıklılığını, iletkenliğini, optik özelliklerini ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir.

3.3. Radyasyonun MOS Yapıları Üzerindeki Etkileri



Şekil 3.10. Radyasyonun MOS yapısı üzerindeki etkisi

Şekil 3.10 da görüldüğü gibi metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapıdaki kapasitörlerde iyonlaştırıcı radyasyon etkilerinin en belirgin olduğu bölge, dielektrik olarak kullanılan oksit tabakasıdır [60,61]. MOS kapasitöre iyonlaştırıcı bir parçacık geldiğinde elektron-hol çiftleri oluşur. Yüksek iletkenliğe sahip metal elektrotlarda elektron-hol çiftleri hızlı bir şekilde kaybolur. Oksit içindeki farklı taşıyıcı hareketliliklerine sahip olan elektronlar ve holler farklı taşıma mekanizmaları sergilerler [62]. Holler oksit (yalıtkan) tabaka içerisinde tuzaklanabilir veya oksit/yarıiletken arayüzüne doğru hareket ederek arayüz tuzaklarının oluşmasına sebep olabilirler. İyonlaştırıcı radyasyon sonucu oluşan elektron-hol çiftlerinin bir kısmı, radyasyon hasarı süreci içerisinde rekombinasyon yoluyla yok olurken, geriye kalanlar ise oksit tabakasındaki yerleşik elektrik alan etkisiyle ayrılarak serbest taşıyıcı olarak hareket ederler. İyonlaştırıcı radyasyon, yarıiletkenin tükenim bölgesinde elektron-hol çiftleri oluşturarak da etkisini gösterir. Elektronlar arayüzeye, deşikler ise tükenim bölgesine doğru ilerlerler. Arayüzeyde biriken fazla elektronlar, arayüz potansiyelinde azalmaya neden olur [63].

Radyasyon ayrıca yarıiletken/oksit arayüzündeki arayüz tuzaklarının ve oksit içerisinde tuzaklanmış yüklerin sayısında artışa yol açar. Elektronik cihazlarda iki tür radyasyon etkisi gözlemlenir: iyonlaştırıcı etki ve yer değiştirme hasarı. Yüksek enerjili parçacıklar maddeyle etkileştiğinde enerjinin bir kısmı iyonlaşmaya, diğer kısmı ise yer değiştirme hasarına

dönüşür. Bu nedenle Radyasyon etkisi, elektronik aygıtların elektriksel parametrelerinde ve karakteristiklerinde kalıcı veya geçici bozulmalara neden olabilir [61,63].



4. RADYASYON DEDEKTÖRLERİ

Radyoaktivite, 1896 yılında ilk kez Fransız fizikçi Henri Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Becquerel, Uranyum cevherinden gelen görünmez ışınların, radyasyona duyarlı cam levhaları kararttığını gözlemlemiştir [10]. Bu keşif, yeni bir enerji türünün varlığını ortaya koymuştur.

Radyoaktif kaynakların görüntülenmesinde kullanılan radyasyona duyarlı cam levhaların yerini günümüzde daha pratik ve yüksek çözünürlüklü olan ışığa duyarlı filmler almıştır. Bu filmler, radyasyonun varlığını ve yoğunluğunu tespit etmek için kullanılır. Radyasyon dedektörleri olarak adlandırılan bu filmler, hastanelerde röntgen çekiminde ve parçacık hızlandırıcı laboratuvarlarında hala kullanılmaktadır.

Radyasyon dedektörleri, radyoaktif kaynakların sayısal olarak ne kadar radyasyona sahip olduğunu belirlemede de önemli rol oynar. Radyasyonun türüne, enerji seviyesine ve ölçüm amacına göre çeşitli radyasyon dedektörleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu dedektörler, farklı fiziksel prensipleri temel alarak çalışmaktadır. Bunlar gazlı dedektörler, sintilasyon dedektörleri, termoluminesans dedektörleri, fotografik film dedektörler ve katı hal/yarı iletken dedektörler olarak sıralanabilir [39,40,64].

Gazlı dedektörler, iyonlaştırıcı radyasyonun gaz ortamda oluşturduğu iyon çiftlerinin elektriksel sinyallere dönüştürülmesi prensibine dayanır. Bu dedektörlerde, radyasyonun enerjisi gaz atomlarını iyonize ederek elektron-iyon çiftleri oluşturur. Oluşan bu yük taşıyıcılar, elektrotlar arasında potansiyel fark etkisiyle hareket ederek bir iyonizasyon akımı oluşturur. Radyasyon ölçümünde kullanılan gazlı dedektörler, çalışma voltajları ve sinyal oluşum mekanizmalarına göre iyon odası, orantılı sayaç ve Geiger-Müller tüpü olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. İyon odası, genellikle hava ile dolu bir kap içerisindeki elektrotlar arasına uygulanan bir elektrik alanından oluşur. Radyasyon bu kaptan geçerken, gaz moleküllerini iyonlaştırarak pozitif ve negatif yüklü parçacıklar oluşturur. Bu yüklü parçacıklar, elektrotlar arasında hareket ederek bir elektrik akımı oluşturur. Oluşan bu akımın şiddeti, radyasyonun enerjisiyle doğru orantılıdır ve dolayısıyla radyasyon dozunun belirlenmesini sağlar. Orantılı sayaçlar ise, iyon odasına göre daha duyarlıdır ve farklı türdeki (Alfa ve beta) radyasyonları ayırt edebilme özelliğine sahiptir. İyon odasına göre

daha yüksek voltaj altında çalışır. Gieger-Müller ise Orantılı sayaçlara göre daha basit yapılıdır ve daha yüksek sayma verimliliğine sahiptir. Ancak, sadece radyasyonun varlığını tespit eder, türü ve enerjisi hakkında detaylı bilgi vermez. Düşük enerjili X ve gama ışınları ile iyonlaşma enerjisi az olan yüklü parçacıkların tespitinde kullanılır [65-67].

Sintilasyon dedektörleri, radyasyon enerjisinin ışığa dönüştürülmesi prensibine dayanır. Radyasyon, sintilatör adı verilen bir malzeme ile etkileşime girdiğinde, malzemenin elektronları uyarılır ve temel hale dönerken foton (ışık parçacığı) yayarlar. Işık yayan malzemeler katı veya sıvı halde bulunabilir. Yayılan fotonların sayısı ve enerjisi, gelen radyasyonun enerjisiyle orantılıdır. Bu fotonlar, foto katotlu bir foto çoğaltıcı tüp (PMT) ile elektrik sinyaline dönüştürülür ve elektronik devreler yardımıyla işlenir. Işık yayan malzeme katı ise, yüksek enerjili parçacıklar (alfa, beta, gama) için kullanılırken, Işık yayan malzeme sıvı ise beta ve gama ışınlarının ölçümünde tercih edilir [68].

Termolüminesans dedektörler, radyasyon etkisiyle enerji depolayan özel bir kristal malzemeye dayanır. Bu kristal, radyasyona maruz kaldığında elektronları uyarır ve bu uyarılmış durum bir süre devam eder. Kristal ısıtıldığında, uyarılmış elektronlar eski durumlarına dönerken ışık yayarlar. Yayılan ışığın şiddeti, kristalin maruz kaldığı radyasyon dozuyla doğru orantılıdır. Bu ışık, foto çoğaltıcı tüpler aracılığıyla elektrik sinyaline dönüştürülür ve bu sayede radyasyon dozu ölçülür. Termolüminesans dedektörlerin en önemli özelliği, radyasyon dozunu bir süre hafızada tutmasıdır. Bu nedenle, radyasyon çalışanları ve radyoaktif kaynakların bulunduğu yerlerde sıkça kullanılırlar [49].

Fotoğrafik filmler, radyasyona duyarlı bir tabaka sayesinde radyasyonu tespit eden eski bir dedektör türüdür. Radyasyon, filmdeki gümüş bromür kristallerinin yapısını bozarak, bu kristaller üzerinde kalıcı izler bırakır. Bu izler, film banyo edildiğinde kararma olarak ortaya çıkar. Kararan bölgeler, radyasyonun filmdeki etkileşim noktalarını gösterir. Bu sayede, film üzerindeki kararma yoğunluğunu inceleyerek radyasyonun türü ve şiddeti hakkında bilgi edinilebilir. Fotoğrafik filmler genellikle alfa ve beta parçacıklarının yanı sıra gama ışınlarını da tespit etmek için kullanılır [56].

Katı hal veya yarı iletken tipi radyasyon dedektörleri, radyasyona duyarlı bölgesinin yarı iletken malzemeden oluşması nedeniyle bu adla anılır. Bu dedektörlerde genellikle silisyum veya germanyum gibi yarı iletken malzemeler kullanılır. Radyasyon, bu malzemeye

çarptığında elektron-delik çiftleri adı verilen elektriksel yük taşıyıcıları oluşturur. Oluşan bu çiftlerin sayısı, gelen radyasyonun enerjisiyle doğru orantılıdır. Bu elektriksel yük taşıyıcılar, dedektörde bir elektrik akımı oluşturur. Bu akımın şiddeti, radyasyonun şiddetini doğrudan yansıtır. Böylece, dedektörde oluşan elektrik akımını ölçerek, maruz kalınan radyasyonun türü ve şiddeti hakkında bilgi elde edilir [69,70].

Nanoteknoloji, radyasyon dedektörlerinin performansını artırmada önemli bir potansiyel sunmaktadır. Radyasyon dedektörlerinde kullanılan radyasyona duyarlı bölümler, gelişen nanoteknoloji sayesinde daha hassas ve verimli hale getirilmektedir. Nanoteknolojik yöntemlerle üretilen sensörler, daha yüksek çözünürlüğe ve daha iyi algılama performansına sahip olmaktadır. Bu durum, dedektörlerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik ortamlarda daha etkili bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ancak, nanoboyutlu malzemelerin çevre, canlı ve insan sağlığı üzerindeki etkileri henüz tam olarak anlaşılmadığı için bu alanda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır [69].



5. MATERYAL VE DENEYSEL SONUÇLAR

PbO Özellikleri

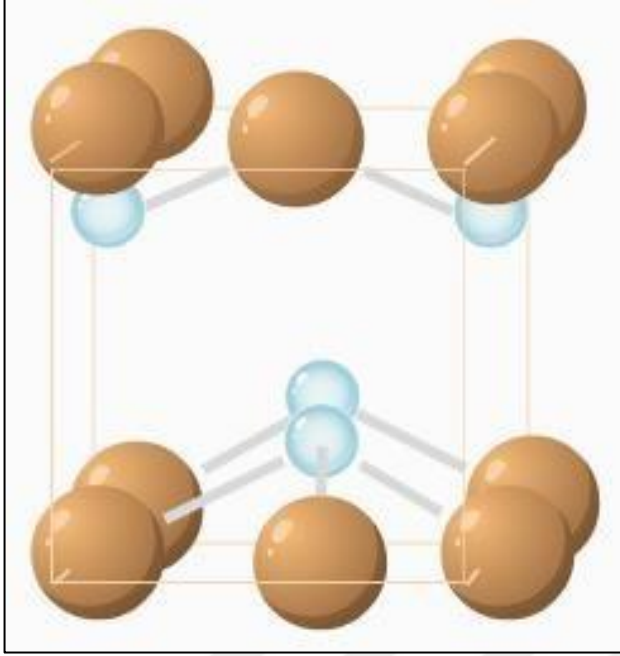
PbO veya kurşun(II) oksit kimyasal formülü *PbO* olan bir inorganik bileşiktir ve özgün bir kristal yapıya sahiptir. Temel yapı birimi, bir kurşun (*Pb*) atomunun bir oksijen (*O*) atomu ile birleşmesinden oluşur. *PbO*' nun kristal yapısı, düzenli bir şekilde sıralanan ve bir araya gelen birçok *PbO* molekülünden meydana gelen bir kristal kafes yapısı ile tanımlanır. Bu kristal yapının öne çıkan özelliği kurşun ve oksijen atomlarının sıkıca bağlı olmasıdır. Kurşun atomları, oksijen atomlarına kovalent bağlar kurarak molekülleri birbirine sıkı bir şekilde bağlanması nedeniyle güçlü kimyasal bağların oluşmasına neden olur.

Dört köşeli formda dört *Pb – O* bağının uzunluğu aynıdır ve ortorombikte kristal yapıya sahiptir [70,71]. *PbO* tetragonal kafes yapısında oluştuğunda bu yapıya litarjie denir, *PbO* ortorombik kafes yapısına sahip olduğunda ise bu yapıya da massicot denilmektedir. *PbO* kontrollü bir şekilde ısıtma ve soğutma ile massicot'tan litarji'ye veya tam tersi bir şekilde değiştirilebilir [72].

Tetragonal form genellikle kırmızı veya turuncu renklidir; ortorombik ise genellikle sarı veya turuncu renktedir [32,46]. *PbO*' nun bu düzenli kristal yapısı, bileşiğin sağlam ve yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olmasını sağlar. Ayrıca *PbO* kristallerinin birim hücresi, her kurşun atomunun yaklaşık olarak altı oksijen atomu ile çevrili olduğu bir düzenlemeyi içerir. Bu düzenli yapı, bileşiğin sabit bir kimyasal bileşimde kalmasını sağlar ve farklı kristal izomerler arasında değişiklik yapmayı zorlaştırır. Kristal izomerler, aynı elementlerin aynı oranlarda birleşmesiyle fakat farklı kristal yapılarına sahip olan yapısal varyasyonlardır. Sonuç olarak *PbO*'nun kristal yapısında kurşun ve oksijen atomları arasında oluşan sıkı ve düzenli kimyasal bağları içerir. Bu özellik bileşiğin dayanıklılığını artırır ve yüksek sıcaklıklara karşı direncini güçlendirir.

Ayrıca endüstriyel seramikler üzerindeki *PbO* ilavesi, malzemelerin nispeten daha manyetik ve elektriksel olarak etkisiz hale gelmesini sağlar. Ayrıca, radyasyona duyarlılıklarını artırır.

Son zamanlarda, bazı araştırmalar ^{60}Co gama ışınının polimer alaşımlarının yapısal ve elektronik özellikleri üzerinde bazı etkileri olduğunu göstermektedir [73-75]. PbO nano yapıları çeşitli yöntemler kullanılarak sentezlenmektedir [71,76].

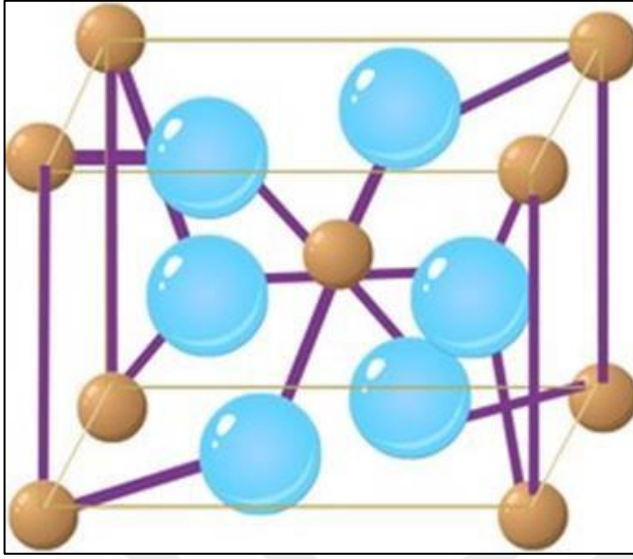


Şekil 5.1. PbO kristal yapısı

PbO , doğadaki kurşun minerallerinin yan ürünü olarak ortaya çıkar. Ayrıca yoğunluğu oldukça yüksektir ve suda çözünmez. Çizelge 5.1’de PbO ve SnO_2 özellikleri gösterilmiştir.

SnO_2 Özellikleri

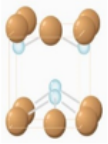
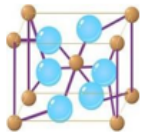
Kimyasal formülü SnO_2 (Kalay dioksit) olan bir inorganik bileşik olarak bilinir. Kristal yapısı, düzenli bir şekilde sıralanmış kalay (Sn) ve oksijen (O) atomlarından oluşan SnO_2 ’nin istikrarını ve yarıiletken özelliklerini sağlar. Kalay atomları oksijen atomları ile güçlü kimyasal bağlar kurarak bu düzenli kristal yapısını sürdürür. Kalay dioksit’de (SnO_2), çinko oksit (ZnO) gibi geniş bant aralığına sahip (3.27- 3.90 eV) n-tipi yarı iletken bir metal oksit malzemedir [77,78]. Kalay dioksit (SnO_2) kristalleri, tetragonal yapıya sahip olup, cassiterite rutil grubuna aittir [79]. Şekil 5.2’de kalay oksit’in kristal yapısı gösterilmiştir. Kafes parametreleri $a=0.474$ nm, $b=0.319$ nm şeklindedir. Ayrıca SnO_2 ’nin yüksek termal kararlılığı bileşiğin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında dahi istikrarını koruyabilmesini sağlar, bu da farklı endüstrilerde birçok uygulama için ideal bir özelliktir.



Şekil 5.2. SnO_2 'nin kristal yapısı (kahverengi küreler kalayı, mavi küreler oksijeni temsil etmektedir)

SnO_2 (kalay dioksit), yüksek kimyasal ve termal kararlılık gibi özelliklere sahip olması nedeniyle özellikle gaz sensörü uygulamalarında tercih edilen bir metal oksittir [80]. Üretim maliyeti düşüklüğü, geniş bant aralığı, yüksek elektrik iletkenliği, optik özellikler, toksik olmaması ve fotokorozyona karşı dirençli olması gibi avantajları sayesinde SnO_2 , sadece gaz sensörlerinde değil; şeffaf elektrotlar, lityum-iyon piller, güneş hücreleri, antistatik kaplamalar, kızılötesi aynalar, optik dedektörler ve fotokatalizörler gibi birçok alanda da kullanılmaktadır. Ancak, neme karşı duyarlılığı SnO_2 'nin en önemli dezavantajlarından biridir. Nanometre boyutunda parçacık, lif gibi farklı morfolojilere sahip olabilen SnO_2 , fotokatalizör olarak da kullanılmaktadır [78,81,82]. Bu kullanımın temel nedeni, fotokorozyona uğramaması ve böylece ikincil bir kirlilik oluşturmamasıdır [96]. Aynı zamanda, yüksek oksidasyon özelliği sayesinde çeşitli yüzeylerdeki kirleticilerin giderilmesinde de etkin bir rol oynar [78-83].

Çizelge 5.1 PbO ve SnO₂ özellikleri

	<i>PbO</i> ve <i>SnO₂</i> Özellikleri					
Moleküler	Erime	Kaynama	Yoğunluk	Elektriksel	Bant	
Ağırlık	Noktası	Noktası		Direnç	Aralığı	
	223.2 g/mol	886 °C	1.474 °C	9.53 g/cm ³	Genellikle Yüksektir	2.2-2.7 eV
<i>PbO</i>						
	150.7 g/mol	1.723 °C	1.474 °C	6.95 g/cm ³	Yarıiletken Özelliklere Sahiptir	3.2-3.7 eV
<i>SnO₂</i>						

6. DENEYSEL YÖNTEM

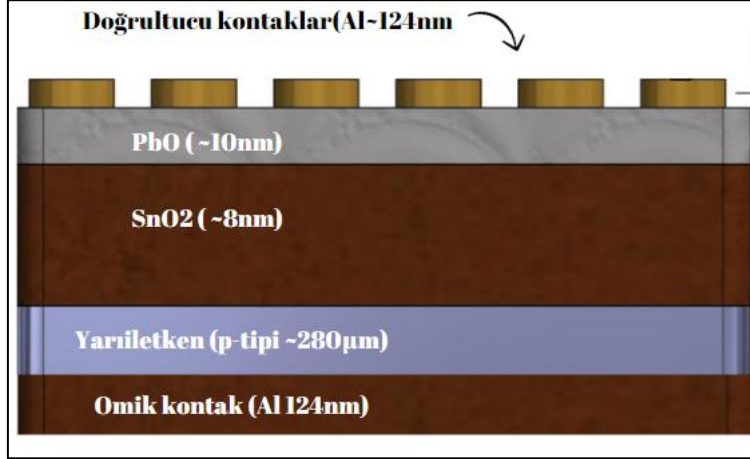
Al/PbO/SnO₂/p-Si Al/PbO/SnO₂/p-Si yapısının hazırlanması, beş ana aşamada tamamlanmıştır. Bu aşamalar şunlardır

- i. Silisyum tabakanın kimyasal temizleme işlemleri Silisyum yarıiletken tabakanın yüzeyindeki doğal oksitlenmeyi ve organik kirleri ortadan kaldırmak amacıyla kimyasal temizleme uygulanmıştır. Üretim sürecinin ilk adımı olan p-tipi (100) Silikon levhasına RCA yöntemi kullanılarak kimyasal temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik banyo yöntemiyle ağır metaller ve organik kirler yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Levha önce 50°C sıcaklıkta 10 dakika süreyle aseton da bekletilmiş, ardından deiyonize suyla yıkanarak metanol çözeltisine 2 dakika süreyle daldırılmıştır. Sonrasında, levha deiyonize suyla tekrar yıkanıp, 70°C sıcaklıkta $NOH_4 : H_2O : H_2O_2$ karışımında 15 dakika tutulmuştur. Yüzeydeki serbest oksijenin uzaklaştırılması için levha %2 HF çözeltisinde 2 dakika bekletilmiş ve nihayetinde deiyonize su ile durulama yapılarak kimyasal temizleme tamamlanmıştır.
- ii. Silisyum tabakaya omik kontak uygulanması Temizlik süreci tamamlanan Silisyum tabakasına omik kontak uygulanmıştır. Bu işlemde, vakum altında buharlaştırma yöntemi tercih edilmiş ve 2.66×10^{-6} Torr Torr basınç altında %99,999 saflıktaki Al büyütülerek uygulanmıştır. Son aşamada levha, 500°C'de vakum altında 10 dakika tavllanmış ve omik kontaklar oluşturulmuştur.
- iii. SnO₂ ve PbO nano yapıların tabakaya eklenmesi. Püskürtme tekniği kullanılarak 8 nm kalınlığında SnO₂ nano yapısı ile altta üzerine kaplanmıştır. Püskürtme hızına, alt tabaka sıcaklık koşuluna, vakum ve püskürtme yönteminde kullanılan solüsyon içeriğine ilişkin bilgiler önceki çalışmalarda belirtilmiştir [84].

P-Si/SnO₂ yapısı üzerine termal buharlaştırma yöntemiyle yüksek vakum altında (2.66×10^{-6} Torr) 10 nm kalınlığında PbO kaplanmıştır. Nano yapıların üzerine yerleştirilen bir maske sayesinde belirli bir alana alüminyum (Al) metal buharlaştırılmıştır. Bu işlem, termal metal buharlaştırma sistemi kullanılarak yüksek saflıkta Al'ın buharlaştırılması ve maskenin açıkta bıraktığı bölgelere çöktürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, doğrultucu kontağı oluşturmak için gerekli olan metalik yapı elde edilmiştir. Böylece MOS

tipi $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ SD'ların üretim aşamaları tamamlanarak birçok diyot elde edilmiştir. Hazırlanmış olan diyotların temsili kesit görüntüsü Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

ıv. Numune hazırlanması tamamlanarak ölçüme hazırlanması



Şekil 6.1. $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ tipi Schottky diyotların temsili kesit görüntüsü

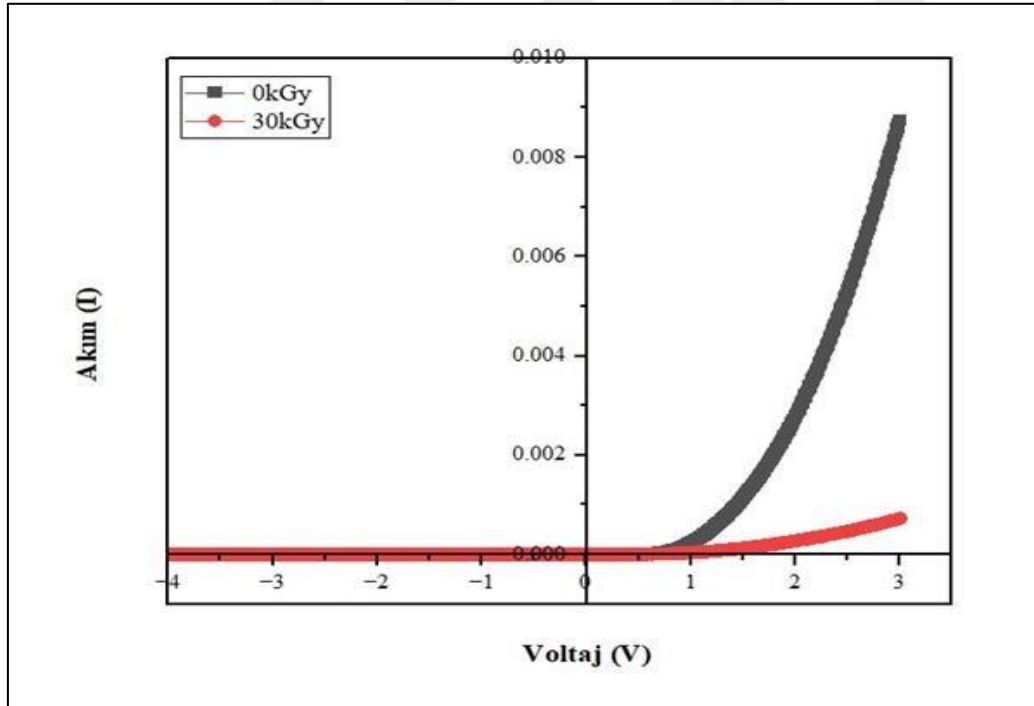
Yapının elektriksel özellikleri oda sıcaklığında (300 K) Keithley 2400 Kaynak Metre kullanılarak akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapılarak ölçülmüştür. Üretilen $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ tipi numunesinin iyonize radyasyonuna karşı duyarlılığı incelemek için ^{60}Co gamma ışınlaması TENMAK'a bağlı NÜKEN Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Numune oda sıcaklığında, karanlık ortamda 0,69 kGy/sa şiddetine sahip 30 kGy KGy radyasyona maruz bırakılmıştır.

7. ARAŞTIRMA BULGULARI

7.1. Akıma Bağlı Parametrelerde Radyasyon Etkileri

Radyasyonun malzemelerle etkileşiminin tam olarak kavranabilmesi için radyasyondan öncesi ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra Al/PbO/SnO₂/p-Si tipi SD'lerin I-V ölçümleri alınmış ve bu ölçümler sonucunda Termiyonik emisyon, Cheung fonksiyonları ve Norde yöntemi kullanılarak diyot parametreleri analiz edilmiştir.

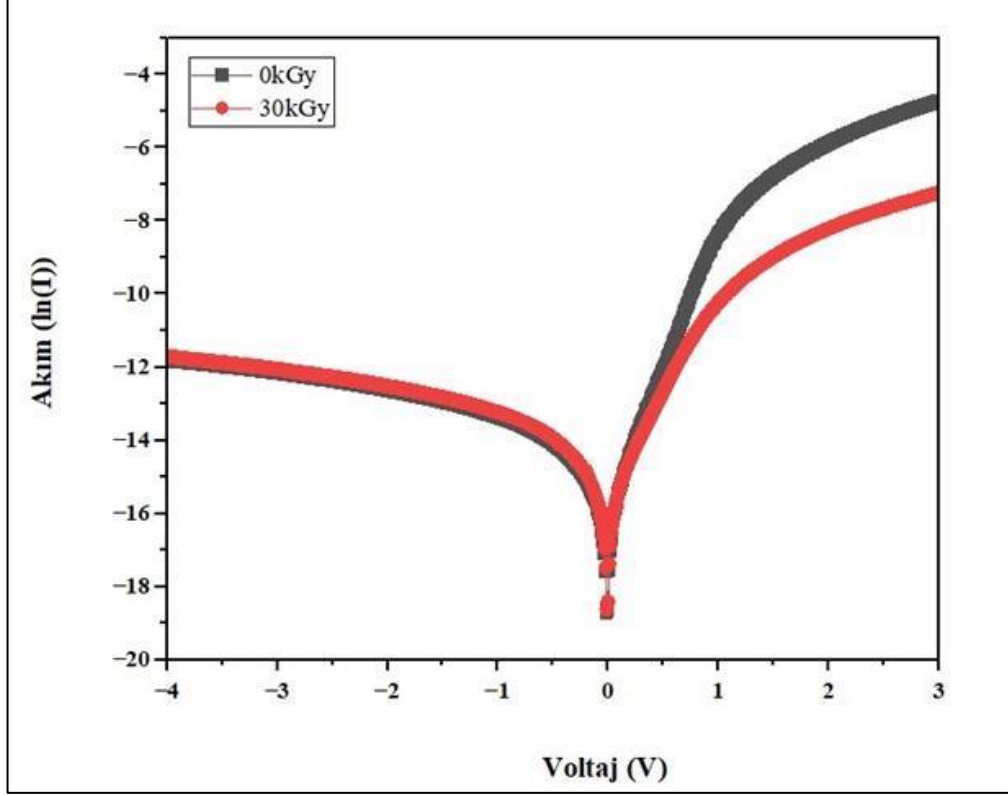
Bir MOS Schottky diyot için termiyonik emisyon (TE) teorisinin uygulanan voltaj ve akım arasındaki ilişkisi Eşitlik 7.1'de verilmiştir. Eşitlik 7.1'de verilen V gerilimi ve Eşitlik 7.2 kullanılarak ters doyum akımı hesaplanmıştır. Şekil 7.1'de çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip Al/PbO/SnO₂/p-Si tipi SD'ların radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonrası oda sıcaklığında ölçülen I-V grafiği gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip Al/PbO/SnO₂/p-Si SD'lerin radyasyondan önce ve 30kGy gama radyasyonundan sonra I-V grafiği

Şekil 7.1'de I-V grafiğinin SD'lara 30 kGy radyasyon uygulandıktan sonra ters beslem voltajlarının değişmediği tespit edilmiştir. Ters beslem voltajlarda bariyer yüksekliğinin

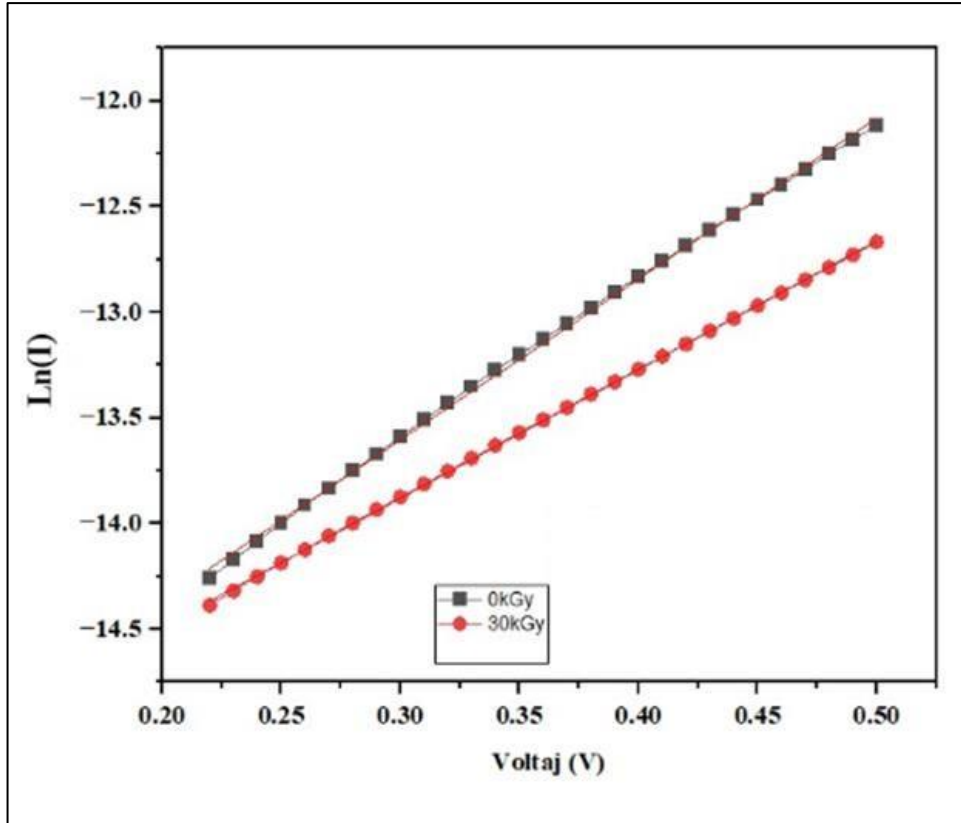
artması nedeniyle ara yüzeyden difüzyon yoluyla geçen yük taşıyıcılarının sayısı azalmaktadır. Yük taşıyıcı sayısında bir artış olmazsa akıma katkıda bulunmaz ve akım potansiyelindeki değişim ile sabit kalır. Ayrıca, pozitif voltajlarda akım değerlerinde artış gözlemlenmiştir.



Şekil 7.2. Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip Al/PbO/SnO₂/p-Si SD'lerin radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra ln(I)-V grafiği

Şekil 7.2'de 30 kGy gama radyasyonu uygulandıktan sonra ters beslem akımında bir artış meydana gelmektedir. Bu artış, yarı iletken malzemenin yapısında yeni yük taşıyıcılarının oluşması ve aynı zamanda malzemede daha fazla kusurun meydana gelmesiyle açıklanabilir. Bu kusurlar, yük taşıyıcılarının hareketini engelleyerek elektriksel özellikleri etkiler [85]. Kusurlar yük taşıyıcıları için yollar sağlayarak akımda artışın ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, metal-yarıiletken arayüzeyindeki enerji bariyerinin düşmesi ve yarı iletken malzemenin içinde yük taşıyıcılarının birleşerek yok olduğu rekombinasyon merkezlerinin sayısındaki artış da gözlemlenen artışa katkıda bulunabilir[86]. Şekil 7.2'de görüldüğü gibi ileri beslem voltajlarında akımında, 30 kGy gama radyasyon dozu uygulandığında azalma meydana gelmiştir.

Akım değerlerindeki değişimlerin nedenlerini tam olarak anlamak için ters doyum akımı (I_0), idealite faktörü (n) ve bariyer yüksekliği (Φ_b) gibi diyotun temel özelliklerini belirten parametreleri bilmek gerekmektedir. Bu parametreler, diyotun ileri yöndeki akım – gerilim (I-V) karakteristiğinin logaritmik ölçekte çizildiğinde doğrusal olan bölgesinden elde edilir [87].



Şekil 7.3. Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip Al/PbO/SnO₂/p-Si SD'ların radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra ln(I)-V grafiğinin lineer bölgesi

Bir gerilim altında SD akımları Eşitlik 7.1 ile verilmektedir [88]. Burada I_0 , diyotun ters yöndeki doyma akımını ifade eder ve değeri Eşitlik 7.2 ile hesaplanır. n ise diyotun ideallikinden sapmasını gösteren bir parametre olup, ideality faktörü olarak adlandırılır. k , Boltzmann sabiti (1.38×10^{-23} J/K) ve T ise mutlak sıcaklığı (Kelvin) göstermektedir. Eşitlik 7.2' deki I_0 teriminde geçen A , doğrultucu kontakın yüzey alanını (7.85×10^{-3} cm²) temsil eder. A^* , etkin Richardson sabitidir (p-Si için, 32 A.cm⁻²K⁻²'dir). Φ_b ise sıfır bias (gerilim) durumunda bariyer yüksekliğini ifade eder.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (7.1)$$

Burada V ($V \geq 3kT/q$),

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left[-\frac{q(\Phi_b)}{kT}\right] \quad (7.2)$$

Bu denklemlerden elde edilen sonuçlar, n ve Φ_b parametrelerinin 7.3 ve 7.4. eşitlikleri ile ifade edilebileceğini göstermektedir.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln(I))} \quad (7.3)$$

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (7.4)$$

İleri yöndeki akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinin logaritmik ölçekte çizilmesiyle elde edilen doğrusal bölgenin akım eksenini kestiği nokta, ters doyma akımını (I_0) verir. Bu doğrunun eğimi ise ideality faktörünü (n) elde etmek için kullanılır. Eşitlik 7.4 yardımı ile de bariyer yüksekliği (Φ_b) hesaplanabilir. Diyotların elektriksel davranışını tam olarak anlamak için, kısa devre direnci (R_{sh}) ve seri direnç (R_s) gibi parametrelerin de bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler, diyotun ters ve ileri yöndeki I-V karakteristikleri kullanılarak Ohm yasası'na dayalı olarak hesaplanmaktadır. Yine diyot kalitesini belirleyen diğer önemli parametrede, ileri beslem akımlarının (I_F) ters beslem akımlarına (I_R) bölünmesiyle elde edilen diyotun doğrultma oranıdır ($RR = I_F/I_R$). Bu denklemler kullanılarak temel diyot parametreleri üretilen MIS yapısı için radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra elde edilerek Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip $Al/PbO/SnO_2/p-Si$ SD'lar için radyasyonsuz ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra elde edilen temel diyot parametreleri.

Ln(I)-V								
Gama radyasyonu (kGy)	$I_F(A)$ (3 V)	$I_R(A)$ (-3 V)	$I_0(A)$	Φ_b (eV)	n	RR	R_s (k Ω) (3 V)	R_{sh} (M Ω) (-3 V)
0	8.87×10^{-03}	5.20×10^{-6}	1.51×10^{-7}	0.666	6.34	1705	0.343	0.547
30	7.24×10^{-04}	5.80×10^{-6}	1.23×10^{-7}	0.671	5.02	124	4.145	0.479

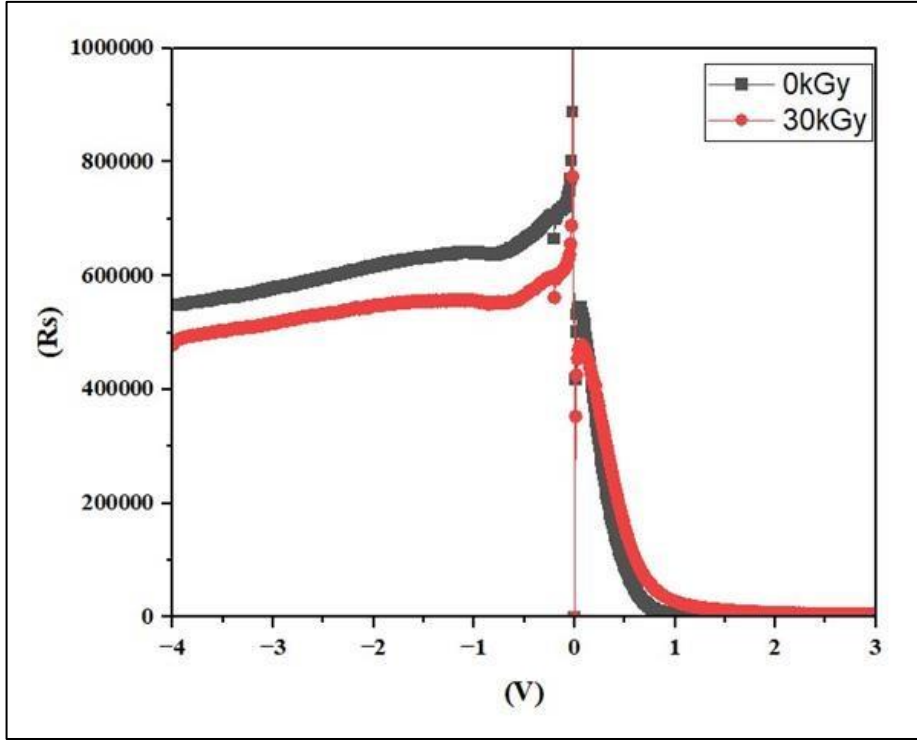
Çizelge 7.1'e göre, Çift arayüzey katman tabakasına sahip (SD'ların ters doyum akım değeri (I_0) radyasyondan önce 1.51×10^{-7} (A) iken 30 kGy gama radyasyonuna maruz bırakılması sonucunda 1.23×10^{-7} (A) kadar azalmıştır. I_0 değerindek, bu azalışı bariyer yüksekliğinin artması nedeniyle, taşıyıcıların enerji bariyerini aşmasını zorlaştırarak ters doyma akımının düşmesine neden olur [89, 90].

İdealite faktörü (n) değeri ise radyasyondan önce 6.34 iken 30 kGy gama radyasyonuna maruz bırakıldıktan sonra 5.02 değerine düşmüştür. Bu idealite faktörü değerleri 1'den oldukça büyük elde edilmiştir. Radyasyonun neden olduğu kusurlar, taşıyıcıların enerji bandı içindeki dağılımını değiştirerek, n artmasına neden olur. Ayrıca, 30 kGy radyasyon dozundan sonra n değerinde bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum radyasyondan sonra kusurların azalması nedeniyle idealite faktörü azalması ile sonuçlanmıştır. Radyasyon uygulandıktan sonra tüketim tabakası (W_D) kalınlığının ve arayüzeyde oluşan kusurların sayısındaki artış, idealite faktöründe küçük bir düşüşe neden olduğu düşünülmektedir. 30 kGy gama radyasyonu uygulandıktan sonra n değerlerinde meydana gelen bu değişiklik, arayüzeydeki enerji seviyelerinin belirli bir dağılım göstermesi ve radyasyon etkisiyle bu dağılımın değişmesiyle açıklanabilir.

Φ_B değeri ise uygulanan gama radyasyonundan sonra azalmıştır. Bazı bilim insanlarına göre, gama ışınlarının yarı iletkenin birleşme bölgesindeki enerji bant yapısında bozukluklara yol açması, serbest taşıyıcıların sayısını etkileyen önemli bir faktördür. Radyasyon etkisiyle bariyer yüksekliğinde gözlemlenen azalma, genellikle Poole-Frenkel etkisi olarak adlandırılır ve bu durum, çoğunlukla taşıyıcıların termal olarak üretilip iletkenliğe katkı

sağlamasına bağlanır [91]. Bariyer yüksekliğindeki düşüşe eşlik eden idealite faktöründeki azalma, radyasyonun termal etkilerinin bu durumdaki baskın rol oynadığı düşünülmektedir.

Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip Al/PbO/SnO₂/p-Si SD'larına ait önemli diyot parametrelerden birisi de seri direnç (R_s) değeridir. Radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra direnç değerlerinin (R_s) voltaja bağlı grafiği elde (Şekil 7.4) edilmiştir. R_{sh} (kısa devre direnci) ve R_s (seri direnç) değerlerindeki değişimlerin beraber incelenebilmesi için R_s -V grafiği yarı-logaritmik olarak alınmıştır. Şekil 7.4'de elde edilen grafiğin +3 V' da ölçülen R_s ve -3 V' da ölçülen R_{sh} gerçek değerleri ifade etmektedir. Çizelge 7.1'den ve grafikten görüldüğü gibi MOS yapısında radyasyonsuz ($R_{sh}=0.547 \text{ M}\Omega$) 30 kGy radyasyon uygulandığında ($R_{sh}=0.479 \text{ M}\Omega$) kısa devre direnci değerlerinde azalma meydana gelmiştir. R_s değerlerinde ise radyasyonsuz ($R_s=0.343 \text{ k}\Omega$), 30 kGy radyasyon uygulandığında ($R_s=4.145 \text{ k}\Omega$) artış meydana gelmiştir. Radyasyon kaynaklı kusurlar ve diğer etkiler, voltaja bağlı direnç eğrilerinde belirgin değişikliklere yol açarak, malzemenin elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Malzeme içerisindeki serbest taşıyıcı yoğunluğundaki değişimlere neden olan tuzaklar, diyot direncinde artış veya azalış gibi elektriksel özelliklerde değişikliklere yol açabilir.



Şekil 7.4. Çift katmanlı arayüzey tabakasına sahip Al/PbO/SnO₂/p-Si SD'ların radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra R_s -V grafiği

Radyasyon etkisi altındaki diyotların elektriksel özelliklerinin daha iyi anlaşılması için, temel parametrelerin farklı voltaj aralıklarında ve çeşitli hesaplama yöntemleriyle belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle n , R_s ve Φ_b değerleri ikinci bir hesaplama yöntemi olarak Cheung fonksiyonları (Cheung-1 ve Cheung-2) yardımıyla parametreler elde edilmiştir. Seri direnç (R_s) etkilerinin de hesaba katıldığı ileri beslem akımı denklemi (Eşitlik 7.5.) temel alınarak, Cheung fonksiyonlarını veren Eşitlik 7.6 ve Eşitlik 7.7 elde edilmiştir [92].

Cheung-1 ($dV/d(\ln I)$ - I) ve Cheung-2 ($H(I)$ - I) fonksiyonlarının lineer bölgesinden elde edilen kesişim ve eğim değerlerinden, sırasıyla R_s , n ve Φ_b parametreleri nicel olarak belirlenmiştir.

$$I = I_0 \exp \left(\frac{qV(I - R_s)}{nkT} - 1 \right) \quad (7.5)$$

$$\frac{d(v)}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (7.6)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln(I/AA^*T^2) = n\Phi_b + IR_s \quad (7.7)$$

Ayrıca üçüncü bir yöntem olarak da Norde fonksiyonu ile, R_s ve Φ_b diyotlar parametrelerini hesaplamak kullanıldı. Norde yöntemi Eşitlik 7.8 ile matematiksel olarak ifade edilmektedir. Norde yönteminde Eşitlik 7.9 ve Eşitlik 7.10 sırasıyla bariyer yüksekliğini ve seri direnç değerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Burada, $F(V)$ grafiğinin minimum değeri $F(V_0)$ ifadesine karşılık gelir. Bu minimum nokta bariyer yüksekliğinin hesaplanmasında dikkate alınmaktadır.

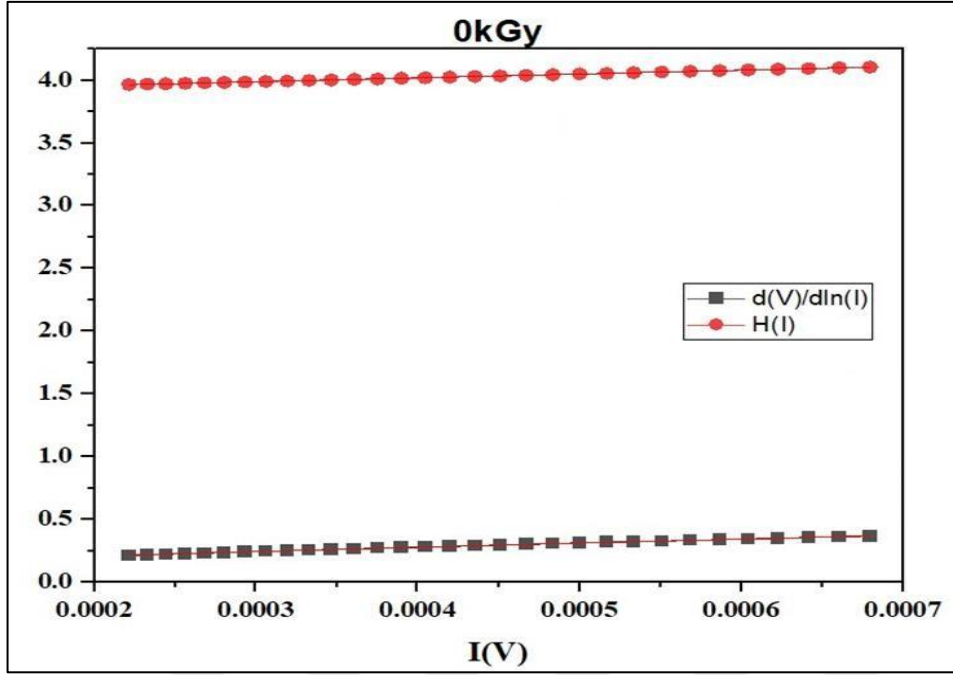
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (7.8)$$

Buradaki γ değeri, idealite faktöründen büyük bir sayıdır.

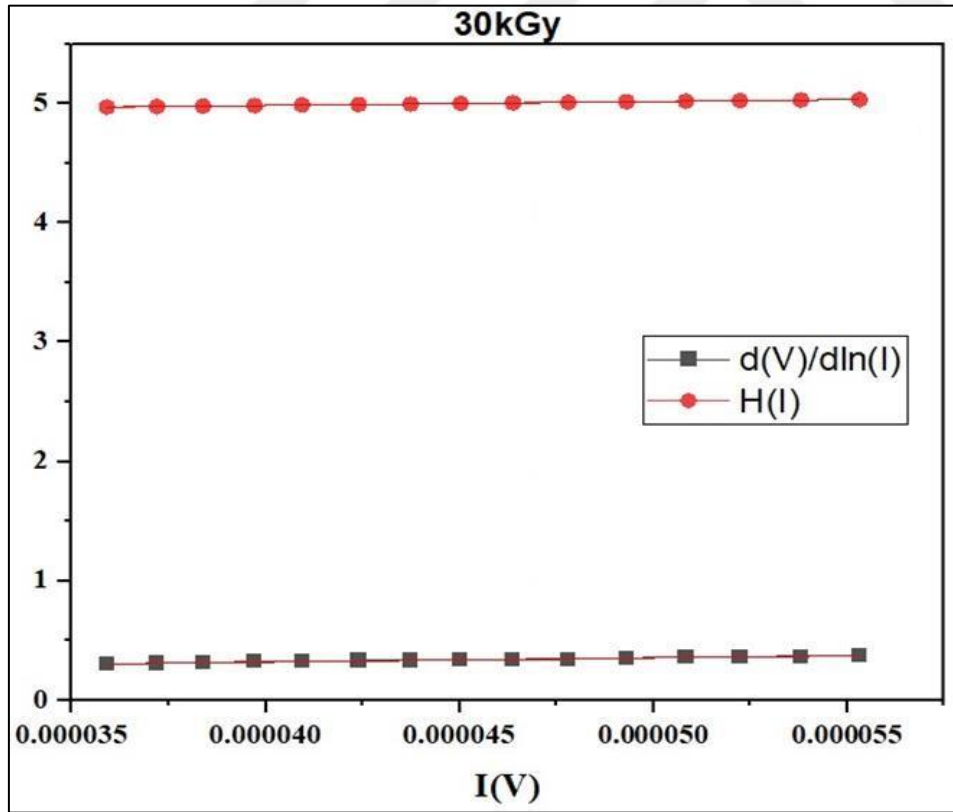
$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (7.9)$$

$$R_s = \frac{kT}{q} \frac{(\gamma - n)}{I_i} \quad (7.10)$$

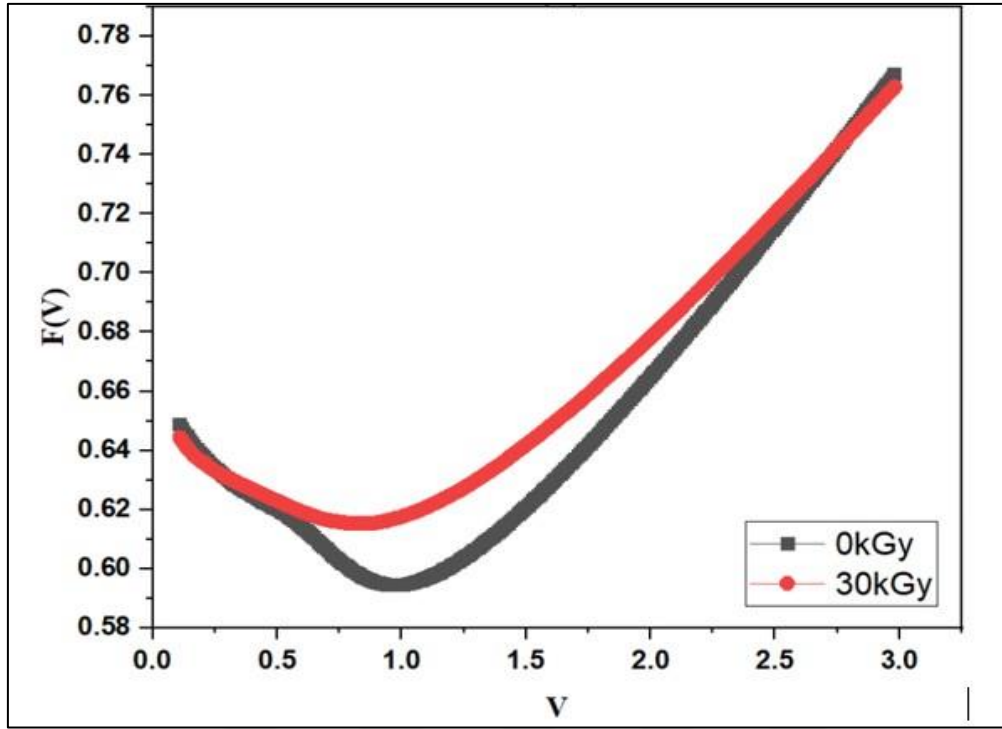
Cheung-1 ve Cheung-2 fonksiyonlarının lineer bölgelerini gösteren grafiksel veriler (Şekil 7.5 ve 7.6) ile Norde yöntemi ile elde edilen karakteristik eğriler (Şekil 7.7) aşağıda sunulmuştur.



Şekil 7.5. Radyasyondan önce (0 kGy) Al/PbO/SnO₂/p-Si SD'ler için $H(I)$ - I ve $dV/d(\ln(I))$ - I grafikleri



Şekil 7.6. Gama radyasyonundan sonra (30kGy) Al/PbO/SnO₂/p-Si SD'ler için $H(I)$ - I ile $dV/d(\ln(I))$ - I grafikleri



Şekil 7.7. Radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonu sonrasında $F(V)$ - V grafiği

TE, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilen R_s , n ve Φ_b sayısal değerleri Çizelge 7.2’ de verilmektedir. Cheung fonksiyonlarında, TE teorisine göre daha ileri voltaj değerlerinde hesaplamalar yapılmıştır [93-101].

Çizelge 7.2. TE, Norde ve Yöntemleri ile elde edilen diyot parametreleri

	TE Yöntemi ($\ln(I)$ - V)					Cheung Yöntemleri				Norde Yöntemi	
						Cheung-I $dV/d(\ln I)$ -I		Cheung-II $H(I)$ -I			
Gama Radyasyon	I_0 (A) $\times 10^{-7}$	Φ_b (eV)	n	R_s (k Ω) (3V)	R_{sh} (M Ω) (-3V)	n	R_s (Ω)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)
0	1.51	0.666	6.34	0.343	0.547	5.72	335	0.68	308	247	0.679
30 kGy	1.26	0.671	5.08	4.145	0.479	7.04	3570	0.69	3306	7270	0.720

Çizelge 7.2’ de TE, Cheung fonksiyonları ve Norde gibi farklı hesaplama yöntemleriyle elde edilen sonuçlar birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Fakat, bu parametrelerin voltaj bağımlılığı ve doğal hesaplama yöntemleri göz önüne alındığında parametrelerin tüm değerlerinin birbiriyle bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Cheung fonksiyonları yöntemlerinin kullanarak hesaplandığı parametreler 1 V ve 1.3 V voltaj aralığından elde edilirken, $\ln(I)$ - V grafikleri kullanılarak hesaplanan parametreler 0.22 V ve 0.60 V voltaj

aralığından elde edilmiştir. Dolayısıyla, bu parametrelerin voltaja bağlı değişimleri dikkate alındığında değerlerin farklı çıkması doğal bir sonuçtur. Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan R_s değerleri Cheung yöntemleri kullanılarak hesaplanan değerlerden oldukça yüksektir [93-96]. Çünkü Cheung fonksiyonları hesaplamalarında, ileri beslem akım grafiklerinin bükülmeye başladığı noktadan itibaren ölçülen akım değerlerini dikkate alınırken Norde yöntemi ile yapılan hesaplamalar tüm ileri beslem akım değerlerini dikkate alınmaktadır [49].

MOS yapısının radyasyona bağlı etkisinin değerlendirilebilmesi için diğer önemli parametrelerden biri de arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}). Gama ışınlamasının bant aralığında neden olduğu arayüzey durumlarını elde edebilmek için, voltaja bağlı idealite faktörünün $n(V)$ ve etkin bariyer yüksekliğinin (Φ_e) hesaplanması gerekmektedir. $n(V)$ değerini Eşitlik 7.11 ve Φ_e değerlerini ise Eşitlik 7.12 kullanılarak hesaplanır [93]. $n(V)$ ve Φ_e değerleri dikkate alınarak Eşitlik 7.13 kullanılarak N_{ss} değeri elde edilmektedir [94, 98, 99]. Ayrıca yarıiletkenin yasak bant aralığındaki orta boşluğundan (E_{ss}) valans bandının üst kenarına (E_v) kadar olan enerji p-tipi yarıiletkenine sahip SD' lar için Eşitlik 7.14 ile verilmektedir. Bu formüllerde ϵ_s ve ϵ_i sırasıyla yarıiletkenin ve arayüzey tabakasının dielektrik geçirgenliğini (sabit) ifade ederken, δ ara yüzey tabakasının kalınlığına ($PbO/SnO_2=100 \text{ \AA}$) karşılık gelmektedir.

$$n(V) = \frac{q}{kT} \left(\frac{V}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)} \right) \quad (7.11)$$

$$\Phi_e = \Phi_b + \left(1 - \frac{I}{n(V)} \right) V \quad (7.12)$$

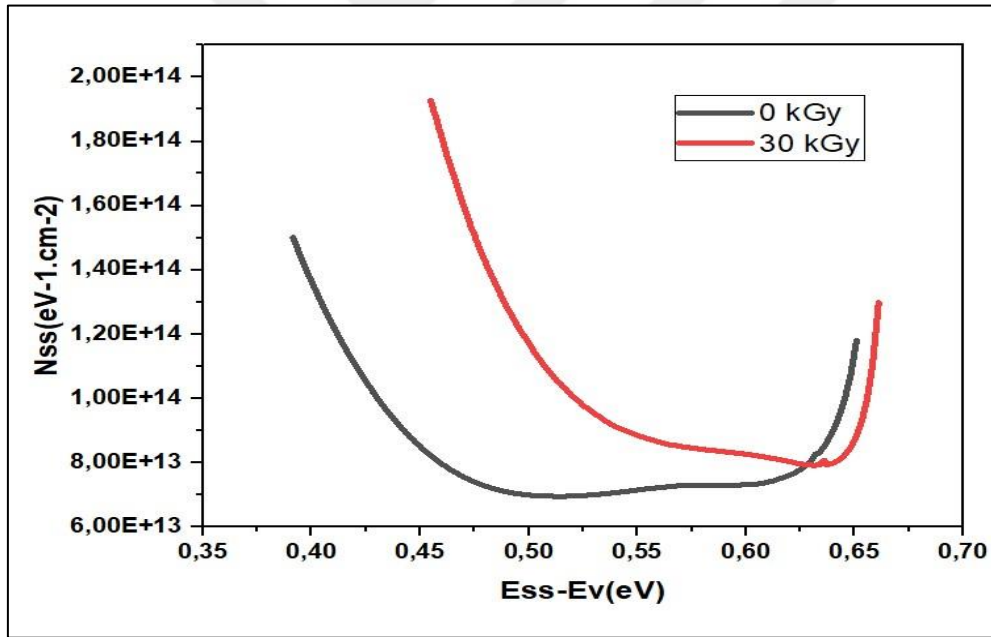
$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left(\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right) \quad (7.13)$$

P tipi bir yarıiletken için değerlik bandının üst seviyesine göre arayüzey durumlarının enerjileri (E_{ss}),

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (7.14)$$

ile verilir.

Şekil 7.10’da düz beslem I-V eğrileri kullanılarak elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımları gösterilmektedir. Şekil 7.10’da görüldüğü gibi arayüzey durumları yasak enerji bant aralığının ortasından başlamak suretiyle bir minimumdan geçtikten sonra değerlik bandının üst seviyesine doğru üstel olarak bir artış göstermektedir. MIS yapısına radyasyon uygulanmadan önce Ess-0.65 ile Ess-0.40 eV enerji aralığında arayüzey durum yoğunluğu 1.10×10^{14} ila $1.50 \times 10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ arasında değişirken yapıya 30 kGy gama radyasyonu uygulandığında Ess-0.65 ile Ess-0.48 eV enerji aralığında arayüzey durum yoğunluğu 1.20×10^{14} ila $1.90 \times 10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ arasında değişmektedir. Yarıiletken aygıtlar için Nss değerinin kabul edilebilir değeri yaklaşık $10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ mertebesinde olması gerekmektedir [100,101]. Şekil 7.10’ da görüldüğü gibi, Nss’in hesaplanan değeri yaklaşık olarak $10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ mertebesinde elde edilmiştir. Elde edilen bu Nss değerinin ideal değerinden biraz saptığını göstermektedir [102].



Şekil 7.8. Radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra Nss-(Ess-Ev) grafiği

8. SONUÇ

Bu tez çalışmasında Al/PbO/SnO₂/p-Si tipi MOS yapısı için radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra gama radyasyonu altındaki diyot parametreleri incelenmiştir. 100 yönelimli, 2 inç yarıçapında ve alıcı katkı atomlarının $2,78 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ayarlayarak Bor (B) katkılı p-Si plakası kullanılarak Al/PbO/SnO₂/p-Si (MOS) çift arayüzey katmanlı Schottky diyotlar (SDs) hazırlanmıştır. Yapının elektriksel özellikleri oda sıcaklığında (300 K) Keithley 2400 Kaynak Metre kullanılarak akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapılarak ölçüldü. Radyasyon kaynağı olarak ⁶⁰Co gama radyasyon kaynağı kullanıldı. 30 kGy gama radyasyonu ile ışınlanmış ve radyasyonsuz MOS yapısının temel diyot parametreleri incelenmiştir. İleri yöndeki akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinin logaritmik ölçekte çizilmesiyle elde edilen doğrusal bölgenin akım eksenini kestiği nokta ve doğrunun eğiminden yararlanarak idealite faktörü, seri direnç, doyum akımı, bariyer yüksekliği ve sıfır-bias bariyer yüksekliği gibi elektriksel parametreler hesaplanmıştır. ters doyum akım değeri (I_0) radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonun dozundan sonra $1.23 \times 10^{-7} \text{ (A)}$ kadar azalmıştır. I_0 değerindek, bu azalışı bariyer yüksekliğinin artması nedeniyle, taşıyıcıların enerji bariyerini aşmasını zorlaştırarak ters doyma akımının düşmesine neden olmuştur. 30 kGy radyasyon dozundan sonra n değerinde bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum radyasyondan sonra kusurların azalması nedeniyle idealite faktörü azalması ile sonuçlanmıştır. Φ_B değeri de uygulanan gama radyasyonundan sonra azmaktadır. Bazı bilim insanlarına göre, gama ışınlarının yarı iletkenin birleşme bölgesindeki enerji bant yapısında bozukluklara yol açması, serbest taşıyıcıların sayısını etkileyen önemli bir faktördür. Radyasyon etkisiyle bariyer yüksekliğinde gözlemlenen azalma, genellikle Poole-Frenkel etkisi olarak adlandırılır ve bu durum, çoğunlukla taşıyıcıların termal olarak üretilip iletkenliğe katkı sağlamasına bağlanır. Bariyer yüksekliğindeki düşüşe eşlik eden idealite faktöründeki azalma, radyasyonun termal etkilerinin bu durumdaki baskın rol oynadığı düşünülmektedir.

Al/PbO/SnO₂/p-Si SD'larına ait önemli diyot parametrelerden birisi de seri direnç (R_s) değeridir. Radyasyondan önce ve 30 kGy gama radyasyonundan sonra direnç değerlerinin (R_s) voltaja bağlı grafiği yarı-logaritmik olarak alınmıştır. Elde edilen grafikten R_{sh} (kısa devre direnci) ve R_s (seri direnç) değerleri incelenmiştir. MOS yapısında radyasyonsuz

($R_{sh}=0.547 \text{ M}\Omega$) ve 30 kGy radyasyon uygulandığında ($R_{sh}=0.479 \text{ M}\Omega$) kısa devre direnci değerlerinde azalma meydana gelmiştir. R_s değerlerinde ise radyasyonsuz ($R_s=0.343 \text{ k}\Omega$) ve 30 kGy radyasyon uygulandığında ($R_s=4.145 \text{ k}\Omega$) artış meydana gelmiştir. Radyasyon kaynaklı kusurlar ve diğer etkiler, voltaja bağlı direnç eğrilerinde belirgin değişikliklere yol açarak, malzemenin elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Malzeme içerisindeki serbest taşıyıcı yoğunluğundaki değişimlere neden olan tuzaklar, diyot direncinde artış veya azalış gibi elektriksel özelliklerde değişikliklere yol açmaktadır.

n , R_s ve Φ_b değerleri ikinci bir hesaplama yöntemi olarak Cheung fonksiyonları (Cheung-1 ve Cheung-2) ile, R_s ve Φ_b diyot parametreleride üçüncü bir yöntem olarak da Norde fonksiyonu yardımıyla hesaplanıp karşılaştırma yapılmıştır. TE, Cheung fonksiyonları ve Norde gibi farklı hesaplama yöntemleriyle elde edilen sonuçlar birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Bu parametrelerin voltaj bağımlılığı ve doğal hesaplama yöntemleri göz önüne alındığında parametrelerin tüm değerlerinin birbiriyle bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Cheung fonksiyonları yöntemlerinin kullanarak hesaplandığı parametreler 1 V ve 1.3 V voltaj aralığından elde edilirken, $\ln(I)$ -V grafikleri kullanılarak hesaplanan parametreler 0.22 V ve 0.60 V voltaj aralığından elde edilmiştir. Dolayısıyla, bu parametrelerin voltaja bağlı değişimleri dikkate alındığında değerlerin farklı çıkması doğal bir sonuçtur. Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan R_s değerleri Cheung yöntemleri kullanılarak hesaplanan değerlerden oldukça yüksek elde edilmiştir. Çünkü Cheung fonksiyonları hesaplamalarında, ileri beslem akım grafiklerinin bükülmeye başladığı noktadan itibaren ölçülen akım değerlerini dikkate alınırken Norde yöntemi ile yapılan hesaplamalar tüm ileri beslem akım değerlerini dikkate alınmaktadır.

Diğer bir önemli parametrede düz beslem I-V eğrileri kullanılarak elde edilmiş arayüzey durum yoğunluklarının enerjiye bağlı dağılımları ($E_{ss}-E_v$) elde edilmiştir. Üretilen MIS yapıda ortalama arayüzey durum yoğunluğu $10^{14} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ mertebesinde elde edilmiştir. Bu değer cihaz üretimi için uygun bir değer olduğu sonucuna bağlanmıştır.

Sonuç olarak çift arayüzey katmanlı Al/PbO/SnO₂/p-Si yapısına ait elde edilen diyot (elektriksel) parametreler, seri direnç (R_s) ve arayüzay durum yoğunluğu değerlerinin gama radyasyonuna karşı duyarlı olduğu tespit edilmiş olup. Gama radyasyonunun üretilen

SD'ların yapısal özelliklerini değiştirebileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlardoğrultusunda geleneksel MS yapılar yerine çift arayüzey katmanlı (Al/PbO/SnO₂/p-Si) MIS yapısının radyasyon sensörü olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.





KAYNAKLAR

1. Tan, S. O. (2018). Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 977–989.
2. Özkara, B. (2022). *Polimer ve Oksit Ara-Yüzey Tabakalı Yapıların Elektriksel Özelliklerinin Radyasyona Bağlı İncelenmesi*. Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
3. Sze, S. M., Kwok K. Ng., (2007). *Physics of semiconductor devices* (Third Edition). New Jersey: John Wiley ve Sons
4. Rhoderick E. H. and Williams R. H., (1988). *Metal Semiconductor Contacts*, (Second Edition).USA: Oxford Press
5. Northrop, D. C., & Rhoderick E. H. (1978). *The Physics of Shottky barriers, in Impedance Devices*, Solid State Electronics, 4, 37-73.
6. Sharma, B. (1984). *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications*. New York: Springer US, 112-124.
7. Soylu, M., ve Yakuphanoglu, F. (2011). Photovoltaic and interface state density properties of the Au/n-GaAs Schottky barrier solar cell. *Thin Solid Films*, 519(6), 1950-1954.
8. Farag, A. A. M., Yahia, I. S., ve Fadel, M. (2009). Electrical and photovoltaic characteristics of Au/n-CdS Schottky diode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(12), 4906-4913.
9. Sharma, A. T., Shahnawaz, Kumar, S., Katharria, Y. S. ve Kanjilal, D. (2007). Barrier modification of Au/n-GaAs Schottky diode by swift heavy ion irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 263(1), 424.
10. Demirezen, S., Özavcı, E. ve Altındal, Ş. (2014). The effect of frequency and temperature on capacitance/conductance–voltage (C/G–V) characteristics of Au/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 23, 1-6.
11. Gökçen, M., Altuntaş, H., Altındal, Ş. ve Özçelik, S. (2012). Frequency and voltage dependence of negative capacitance in Au/SiO₂/n-GaAs structures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 15(1), 41–46.
12. Bhajantri, R. F., Ravindrachary, V., Harisha, A., Ranganathalah, C. ve Kumaraswamy, G. N. (2007). Effect of barium chloride doping on PVA microstructure positron annihilation study. *Applied Physics A*, 87, 797-805.

13. Dökme, I., Altındal, Ş., Tunç, T. ve Uslu, I. (2010). Temperature-dependent electrical and dielectric properties of Au/polyvinyl alcohol (Ni, Zn-doped)/n-Si Schottky diodes. *Microelectronics Reliability*, 50(1), 39–44.
14. Güllü, O. ve Türüt, A. (2009). Electrical analysis of organic interlayer-based metal/interlayer/ semiconductor diode structures. *Journal of Applied Physics*, 106(10), 1-6.
15. Scanlon, D. O., Kehoe, A. B., Watson, G. W., Jones, M. O., David, W. I., Payne, D. J., and Walsh, A. (2011). Nature of the band gap and origin of the conductivity of PbO₂ revealed by theory and experiment. *Physical Review Letters*, 107(24), 246402.
16. Droessler, L. M., Assender, H. E., ve Watt, A. A. (2012). Thermally deposited lead oxides for thin film photovoltaics. *Materials Letters*, 71, 51–53.
17. Mahmoud, M. E., El-Khatib, A. M., Badawi, M. S., Rashad, A. R., El-Sharkawy, R. M., and Thabet, A. A. (2018). Recycled high-density polyethylene plastics added with lead oxide nanoparticles as sustainable radiation shielding materials. *Journal of Cleaner Production*, 176, 276–287.
18. Al-Attiyah, K. H. H., Hashim, A. ve Obaid, S. F. (2019). Fabrication of novel (carboxy methyl cellulose–polyvinylpyrrolidone–polyvinyl alcohol)/lead oxide nanoparticles: Structural and optical properties for gamma rays shielding applications. *International Journal of Plastics Technology*, 23(1), 39–45.
19. Alothman, M. A., Kurtulus, R., Olarinoye, I. O., Kavas, T., Mutuwong, C., and Al-Buriah, M. S. (2021). Optical, elastic, and radiation shielding properties of Bi₂O₃-PbO-B₂O₃ glass system: A role of SnO₂ addition. *Optik*, 248, 168047.
20. Das, S. ve Jayaraman, V. (2014). SnO₂: A comprehensive review of structures and gas sensors. *Progress in Materials Science*, 66, 112–255.
21. Yuan, C., Wu, H. B., Xie, Y. ve Lou, X. W. (2014). Mixed transition-metal oxides: Design, synthesis, and energy-related applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 53(6), 1488–1504.
22. Sen, S. K., Paul, T. C., Dutta, S., Matin, M. A., Islam, M. F., and Hakim, M. A. (2019). Effect of gamma (γ -) irradiation on the structural, morphological, optical, and electrical properties of spray pyrolysis-deposited h-MoO₃ thin films. *Surfaces and Interfaces*, 17, 100377.
23. Van Duy, N., Toan, T. H., Hoa, N. D. ve Van Hieu, N. (2015). Effects of gamma irradiation on hydrogen gas-sensing characteristics of Pd-SnO₂ thin film sensors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(36), 12572–12580.
24. Abhirami, K. M., Sathyamoorthy, R. ve Asokan, K. (2013). Structural, optical, and electrical properties of gamma irradiated SnO thin films. *Radiation Physics and Chemistry*, 91, 35–39.

25. Tuğluoğlu, N., Altındal, Ş., Tataroğlu, A. ve Karadeniz, S. (2004). Dielectric properties in Au/SnO₂/n-Si (MOS) structures irradiated under 60Co-γ rays. *Microelectronics Journal*, 35(9), 731–738.
26. Karadeniz, S. (2007). 60Co γ-ray irradiation effects on dielectric characteristics of tin oxide films of different thicknesses on n-type Si (1 1 1) substrates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 260(2), 571–578.
27. Selçuk, A. B., Ocak, S. B. ve Yüksel, O. F. (2008). Effects of gamma irradiation on dielectric characteristics of SnO₂ thin films. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 594(3), 395–399.
28. Lavanya, N., Sekar, C., Anithaa, A. C., Sudhan, N., Asokan, K., Bonavita, A., and Neri, G. (2016). Investigations on the effect of gamma-ray irradiation on the gas sensing properties of SnO₂ nanoparticles. *Nanotechnology*, 27(38), 385502.
29. Akay, D., Karadeniz, S., Selçuk, A. B. ve Ocak, S. B. (2018). Effect of gamma-ray irradiation on the electrical characteristics of Al/C24H12/p-Si nanostructure. *Physica Scripta*, 93(9), 095301.
30. Fabris, G. S. L., Azevedo, D. H. M., Alves, A. C., Paskocimas, C. A., Sambrano, J. R., and Cordeiro, J. M. M. (2022). DFT studies on PbO₂ and binary PbO₂/SnO₂ thin films. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 136, 115312.
31. Northrop, D. C. (1986). Book review: Semiconductor devices, physics and technology. *Springer US*, 64(3), 64–66.
32. Akay, D., Gökmen, U. ve Ocak, S. B. (2020). Ionizing radiation influence on rubrene-based metal polymer semiconductors: Direct information of intrinsic electrical properties. *JOM (The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society)*, 72(6), 2391–2397.
33. Yüksel, O. F., Selçuk, A. B. ve Ocak, S. B. (2008). Investigation of diode parameters using I–V and C–V characteristics of In/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Physica B: Condensed Matter*, 403(17), 2690–2697.
34. Orak, İ., ve Koçyiğit, A. (2017). Al/Si₃N₄/p-Si aygıtının C-V karakteristikleri üzerine metal ile yarıiletken kontak arasındaki yalıtkan tabakanın kalınlık etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 536–542.
35. Bilkan, Ç., Zeyrek, S., San, S. E. ve Altındal, Ş. (2015). A comparison of electrical characteristics in Al/p-Si (MS) and Al/C20H12/p-Si (MPS) type diodes using current-voltage (I–V) and capacitance-voltage (C–V) measurements. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 32, 137–144.
36. Tung, R. T. (2001). Recent advances in Schottky barrier concepts. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 35(1–3), 1–138.

37. Kaya, İ. (2010). Metal-yarıiletken Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
38. Demirezen, S. Ve Altındal, Ş. (2020). A detailed comparative study on electrical and photovoltaic characteristics of Al/p-Si photodiodes with coumarin-doped PVA interfacial layer: The effect of doping concentration. *Polymer Bulletin*, 77(1), 49–71.
39. Akın, B. (2015). Au/ZnO/n-GaAs (MIS) Schottky engel diyotların (SBDs) elektriksel karakteristiklerinin frekans ve voltaja bağlı incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
40. An, Y., Behnam, A., Pop, E. ve Ural, A. (2013). Metal-semiconductor-metal photodetectors based on graphene/p-type silicon Schottky junctions. *Applied Physics Letters*, 102(1), 013110.
41. Nicollian, E.H., and Goetzberger, A. (1965). Lateral ac current flow model for metalinsulatorsemiconductor capacitors. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Electron Devices*, 12(3), 108–117.
42. Nicollian, E. H. ve Brews, J. R. (1982). *MOS Physics and Technology*. New York: Wiley
43. Terman, M. (1962). An investigation of surface states at silicon-silicon oxide interface employing metal oxide silicon diodes. *Solid State Electronics*, 5, 285–299.
44. McNutt, M. J. ve Sah, C. T. (1975). Determination of the MOS oxide capacitance. *Journal of Applied Physics*, 46(9), 3909–3913.
45. İnternet: AFAD. (t.y.). İçsel ve dışsal radyasyondan korunma. AFAD. URL: <https://www.afad.gov.tr/>, Son Erişim Tarihi: 07.05.2024.
46. İnternet: Bilkent Üniversitesi. (t.y.). Radyasyondan korunma. *Atuder*. URL: <https://www.trkd.org.tr/>, Son Erişim Tarihi: 07.05.2024.
47. İnternet: Evrim Ağacı. Radyasyon nedir? Hangi radyasyon türleri zararlıdır? Yılda ne kadar radyasyon alıyoruz ve güvenli radyasyon seviyesi ne kadardır? *Evrin Ağacı*. URL: <https://evrimagaci.org/radyasyon-nedir-hangi-radyasyon-turleri-zararlidir-yilda-ne-kadar-radyasyon-aliyoruz-ve-guvenli-radyasyon-seviyesi-ne-kadardir-9305>, Son Erişim Tarihi: 14.12.2020
48. İnternet: Explainer: what is the electromagnetic spectrum? Web: <https://physics.info/em-spectrum/>, Son Erişim Tarihi: 04.09.2022.
49. Güllü, Ö., Çankaya, M., Biber, M. ve Türüt, A. (2008). Gamma irradiation-induced changes in the electrical characteristics of organic-based Schottky structures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(13), 135103.

50. Einstein, A. (1905). Über das Gesetz des photoelektrischen Effektes. *Annalen der Physik*, 17(8), 132–148.
51. Compton, A. H. (1922). A quantum theory of the scattering of X-rays. *Physical Review*, 21(5), 242–243.
52. Anderson, C. D. (1932). The production of electrons and positrons by high-energy gamma rays. *Physical Review*, 43(11), 1498–1502.
53. Krause, M. C. (2005). *X-ray data booklet*. Lawrence Livermore National Laboratory.
54. L'Annunziata, M. F. (2007). *Radioactivity*. Elsevier Science B.V. 187–215.
55. Brown, P. D., Fay, M., Bock, N., Marlafeke, S., Cheng, T. S., Novikov, S. V., Davis, C. S., Campion, R. P. ve Foxon, C. T. (2002). Structural characterization of Al grown on group III-nitride layers and sapphire by molecular beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 234(2–3), 384–390.
56. Kaya, A. (1998). $55 \leq Z \leq 92$ bölgesinde bazı elementlerin I X-ışını üretim tesir kesitlerinin ve alt tabaka floresans verimlerinin ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
57. Naseem, M. ve Bashir, A. (2019). Radiation effects on materials: A review. *International Journal of Advanced Research in Physics*, 7(4), 225-235.
58. Rashidi, S. N. ve Yousefi, M. H. (2013). Investigation of radiation effects on the electrical properties of n-type silicon using a one-dimensional device simulator. *Journal of Applied Physics*, 113(12), 124507.
59. Chandra, A. ve Dubey, S. K. (2021). Radiation effects on materials: A review. *Radiation Physics and Chemistry*, 177, 111–127.
60. Ma, T. P. ve Dressendorfer, P. V. (1989). *Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits*. New York: John Wiley & Sons, 87-231
61. Barbottin, G., Vapaille, A. (1999). Instabilities in Silicon Devices, *New Insulators, Devices and Radiation Effects*. Amsterdam: Elsevier, 639-722.
62. Tataroğlu, A. ve Altındal, Ş. (2008). Characterization of interface states at Au/SnO₂/n-Si (MOS) structures. *Vacuum*, 82, 1203–1211.
63. Chauhan, R. K. ve Chakrabarti, P. (2002). Effect of ionizing radiation on MOS capacitors. *Microelectronics Journal*, 33, 197–203.

64. Holloway, P. H., Kim, T. J., Trexler, J. T., Miller, S., Fijola, J. J., Lampert, W. V. ve Haas, T. W. (1997). Interfacial reactions in the formation of ohmic contacts to wide bandgap semiconductors. *Applied Surface Science*, 117–118, 362–372.
65. Sharma, B. (1984). Metal-semiconductor *Schottky barrier junctions and their applications*. New York: Springer US, 112-124
66. İnternet: Explainer: what is the electromagnetic spectrum? Web: <https://theconversation.com/explainer-what-is-the-electromagnetic-spectrum-8046>, Son Erişim Tarihi: 15.08.2022.
67. Ahmed, S. N. (2007). Physics and engineering of radiation detection. *Choice Reviews Online*, 45(02), 45-0892-45–0892.
68. İnternet: Explainer: what is the electromagnetic spectrum? Web: <https://physics.info/em-spectrum/>, Son Erişim Tarihi: 04.09.2022.
69. Luo, M. C., Deal, K. R., Akhunov, E. D., Akhunova, A. R., Anderson, O. D., Anderson, J. A. ve Dvorak, J. (2009). Genome comparisons reveal a dominant mechanism of chromosome number reduction in grasses and accelerated genome evolution in Triticeae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(37), 15780–15785.
70. Qiao, C. K., Wei, J. W. ve Chen, L. (2021). An overview of the Compton scattering calculation. *Crystals*, 11(5), 525.
71. Yazdani Darki, S., Eslami-Kalantari, M. ve Zare, H. (2020). New method for synthesis of PbO nano-rods and its application in ionizing radiation shielding. *Iranian Journal of Physics Research*, 20(4), 649–655.
72. Li, S., Yang, W., Chen, M., Gao, J., Kang, J. ve Qi, Y. (2005). Preparation of PbO nanoparticles by microwave irradiation and their application to Pb(II)-selective electrode based on cellulose acetate. *Materials Chemistry and Physics*, 90(2–3), 262–269.
73. Morales, J., Petkova, G., Cruz, M. ve Caballero, A. (2006). Synthesis and characterization of lead dioxide active material for lead-acid batteries. *Journal of Power Sources*, 158, 831–836.
74. Issa, S. A. (2016). Effective atomic number and mass attenuation coefficient of PbO–BaO–B₂O₃ glass system. *Radiation Physics and Chemistry*, 120, 33–37.
75. El-Sayed Abdo, A., Ali, M. A. M., and Ismail, M. R. (2003). Natural fibre high-density polyethylene and lead oxide composites for radiation shielding. *Radiation Physics and Chemistry*, 66(3), 185–191.

76. Karami, H., Karimi, M. A. ve Haghdar, S. (2008). Synthesis of uniform nanostructured lead oxide by sonochemical method and its application as cathode and anode of lead-acid batteries. *Materials Research Bulletin*, 43(11), 3054–3065.
77. Pálincás, G., et al. (2017). Structural, optical and electrical properties of thin SnO₂ films prepared by pulsed laser deposition. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1851, No. 1).
78. Lim, K. S., Yoon, S. G., Kim, Y. H., and Kim, W. H. (2019). Bandgap and electrical properties of SnO₂ thin films deposited by radio frequency sputtering. *Journal of Alloys and Compounds*, 794, 224-230.
79. Delgado, E. (1996). Crystallographic and magnetic properties of cassiterite (SnO₂). *Journal of Solid State Chemistry*, 121(2), 372-378.
80. Parthibavarman, M., Hariharan, V., and Sekar, C. (2010). Highly sensitive humidity sensor based on SnO₂ nanoparticles synthesized by the sol-gel method. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 147(1), 184–190.
81. Batzill, M. ve Diebold, U. (2005). The surface science of tin oxide. *Surface Science Reports*, 58(1–4), 1–36.
82. Zhou, X., Chen, Y., Zhuang, H., Liu, X., Zheng, Z., Wang, C., and Sun, L. (2012). Synthesis, characterization, and photocatalytic properties of SnO₂ nanocrystals. *Journal of Materials Science*, 47(10), 3659–3666.
83. Bhattacharjee, A., Ahmaruzzaman, M. ve & Sinha, T. (2015). A novel approach for the synthesis of SnO₂ nanoparticles and its application as a catalyst in the reduction and photodegradation of organic compounds. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 136, 751–760.
84. Manish, K. S., Sharma, R. K., Sharma, T. S., and Tripathi, R. (2012). Synthesis and characterization of SnO₂ nanoparticles for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 206, 507-5.
85. Dixit, S. K., Zhou, X. J., Schrimpf, R. D., Fleetwood, D. M., Pantelides, S. T., Choi, R., Bersuker, G., & Feldman, L. C. (2007). Radiation induced charge trapping in ultrathin HfO₂-based MOSFETs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 54(6), 1883–1890.
86. Dökme, I., Durmuş, P. ve Altındal, Ş. (2008). Effects of γ -ray irradiation on the C–V and G/ ω -V characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(5), 791–796.

87. Sze, S. M. and Ng, K. K., (2006). *Physics of Semiconductor Devices* (Third Edition) , John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
88. Mamor, M., Sellai, A., Bouziane, K., Al Harthi, S. H., Al Busaidi, M. ve Gard, F. S. (2007). Influence of He-ion irradiation on the characteristics of Pd/n-Si_{0.90}Ge_{0.10}/Si Schottky contacts. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(5), 1351–1356.
89. Teffahi, A., Hamri, D., Mostefa, A., Saidane, A., Al Saqri, N., Felix, J. F. ve Henini, M. (2018). Effect of ⁶⁰Co γ -ray irradiation on electrical properties of Ti/Au/GaAs_{1-x}N_x Schottky diodes. *Current Applied Physics*, 18(6), 661–666.
90. Srour, J. R., Marshall, C. J. ve Marshall, P. W. (2003). Review of displacement damage effects in silicon devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(3), 653–670.
91. Cheung, S. K. ve Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85–87.
92. Tataroğlu, A. ve Altındal, Ş. (2007). Analysis of interface states and series resistance at MIS structure irradiated under ⁶⁰Co γ -rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 580(3), 1588–1593.,
93. Card, H. C. ve Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 319–328.
94. Ma, T. P. (1989). Interface trap transformation in radiation or hot-electron damaged MOS structures. *Semiconductor Science and Technology*, 4(12), 1061–1069.
95. Akay, D., Gokmen, U. ve Ocak, S. B. (2019). Radiation-induced changes on poly(methyl methacrylate) (PMMA)/lead oxide (PbO) composite nanostructure. *Physica Scripta*, 94(11), 115302.
96. Akay, D., Efil, E., Kaymak, N., Orhan, E. ve Ocak, S. B. (2018). Study of frequency dependent characterization: Applied gamma-ray irradiation on metal-polymer nanostructure. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 318, 1409–1415.
97. Ertugrul, R. ve Tataroglu, 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(11), 791–797.
98. Türüt, A. (2012). Determination of barrier height temperature coefficient by Norde’s method in ideal Co/n-GaAs Schottky contacts. *Turkish Journal of Physics*, 36(2), 235–244.

99. Bohlin, K. E. (1998). Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60(3), 1223–1231.
100. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052–5053.
101. Kaymak, N., Efil, E., Seven, E., Tataroğlu, A., Ocak, S. B. ve Oz Orhan, E. (2018). Electrical characteristics analyses of zinc-oxide based MIS structure grown by atomic layer deposition. *Materials Research Express*, 6(2), 026309.
102. Akay, D., Alkan, S., Altin, Z. ve Gökmen, U. (2024). Electrical characterization of Al/SnO₂/PbO/Si double layer MOS under the moderate radiation effect. *Radiation Physics and Chemistry*, 216, 11392.







Gazili olmak ayrıcalıktır