



**ORGANİK ARAYÜZEY TABAKALI METAL-
YARIİLETKEN YAPILARIN ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN RADYASYONA BAĞLI
İNCELENMESİ**

Ahmet KAYMAZ

**2020
DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Habibe TECİMER**

**ORGANİK ARAYÜZEY TABAKALI METAL-YARIİLETKEN YAPILARIN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN RADYASYONA BAĞLI
İNCELENMESİ**

Ahmet KAYMAZ

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Habibe TECİMER**

**KARABÜK
Haziran 2020**

Ahmet KAYMAZ tarafından hazırlanan “ORGANİK ARAYÜZEY TABAKALI METAL-YARIİLETKEN YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN RADYASYONA BAĞLI İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Habibe TECİMER

.....

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 10/06/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Adem TATAROĞLU (GÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Habibe TECİMER (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Serhat Orkun TAN (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Hatice KANBUR ÇAVUŞ (YOBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Burak TÜRKÖZ (KBÜ)

.....

...../...../2020

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ahmet KAYMAZ

ÖZET

Doktora Tezi

ORGANİK ARAYÜZEY TABAKALI METAL-YARIİLETKEN YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN RADYASYONA BAĞLI İNCELENMESİ

Ahmet KAYMAZ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Habibe TECİMER

Haziran 2020, 85 sayfa

Bu çalışmada, geleneksel yalıtkan arayüzey tabakalı metal-yarıiletken (MS) yapıları yerine Al/(ZnO-PVA)/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotları (SDs) hazırlanmış ve bu diyotların gama-ışınlama etkileri araştırılmıştır. Gama-ışınlama etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla akım-gerilim (I - V), kapasitans-gerilim (C - V) ve kondüktans-gerilim (G/ω - V) karakteristiklerinin ölçümleri, radyasyon öncesinde ve çeşitli ışınlama dozları sonrasında gerçekleştirilmiştir. Böylece, $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden faydalanılarak sıfır-beslem bariyer yüksekliği (Φ_{B0}), idealite faktörü (n) ve ters doyum akımı (I_0) gibi akıma bağlı temel diyot parametreleri, radyasyon öncesi ve sonrası için elde edilmiştir. Yine I - V ölçümlerinden faydalanılarak seri direnç (R_s), şönt direnç (R_{sh}) ve diyot kalitesini temsil eden doğrultma oranı (RR) gibi diğer önemli diyot parametreleri de hesaplanmıştır. Bazı parametrelerin diyot üzerindeki etkilerini ve radyasyona bağlı değişimlerini daha doğru bir şekilde anlayabilmek için R_s , n ve Φ_{B0}

parametrelerinin değerleri ikinci bir yöntem olarak Cheung fonksiyonları metoduyla ve R_s ile Φ_{B0} parametrelerinin değerleri de üçüncü bir yöntem olarak Norde fonksiyonları metoduyla elde edilmiştir. Böylece  yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Diğer yandan, ölçümleri yüksek bir frekans değerinde ($f=500 \text{ kHz}$) gerçekleştirilen $C-V$ ve $G/\omega-V$ karakteristiklerinden faydalanılarak hesaplanan difüzyon potansiyeli (V_D), alıcı katkı atomları yoğunluğu (N_A), Fermi enerji seviyesi (E_F), maksimum elektrik alanı (E_m), tkretim tabakası genişliği (W_D) ve bariyer yüksekliği (Φ_B) gibi diğer diyot parametreleri, gama-ışınlamasının malzeme üzerindeki etkilerini detaylıca analiz etme olanağı sunmuştur. Ayrıca, Castagne-Vapaille ve Hill-Coleman yöntemleri olmak üzere iki ayrı metotla hesaplanan arayüzey durumları (N_{ss}), diyotun radyasyon altındaki davranışını tamamen açığa çıkarılmıştır. Sonuçlar, R_s 'nin daha çok birikim bölgesinde N_{ss} 'nin ise özellikle tkretim bölgesinde daha etkili olduğunu göstermiştir. Öte yandan, tüm diyot parametrelerinin radyasyondan belirgin bir Şekilde etkilendiği gözlemlenmiş olmasına karşın, 0-60 kGy doz aralığındaki ışınlamada Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD'nin çalışmasını önleyecek önemli bir kusur veya bozulma tespit edilmemiştir. Sonuç olarak, polimer tabakası, geleneksel yalıtkan/oksit tabakasıyla karşılaştırıldığında, daha az enerji gerektirmesinin yanı sıra esnek, ucuz ve molekül başına hafif olma gibi bazı avantajlara sahiptir. Dolayısıyla, organik/polimer ara tabakası kullanılarak hazırlanmış olan bu Schottky diyotlar, uygulamalarda MIS/MOS tipi dedektörler yerine MPS tipi dedektörler olarak başarılı bir Şekilde kullanılabilirler.

Anahtar Sözcükler : Schottky diyotlar, gama-ışınlama etkileri, ZnO-PVA polimer arayüzey tabakası, radyasyon kaynaklı arayüzey durumları, Schottky diyotların elektriksel karakteristikleri.

Bilim Kodu : 90543

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF RADIATION EFFECTS ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF METAL-SEMICONDUCTOR STRUCTURES WITH ORGANIC INTERFACIAL LAYER

Ahmet KAYMAZ

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Electrical-Electronics Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Habibe TECİMER

June 2020, 85 pages

In this study, Al/(ZnO-PVA)/p-Si (MPS) type Schottky diodes (SDs) were prepared instead of traditional insulating interfacial layered metal-semiconductor (MS) structures. To investigate the radiation effects on them, current-voltage (I - V), capacitance-voltage (C - V) and conductance-voltage (G/ω - V) characteristics of these diodes were measured before irradiation and after various gamma irradiation doses. Thus, current-dependent basic diode parameters such as zero-bias barrier height (Φ_{B0}), ideality factor (n) and reverse saturation current (I_0) were obtained using $\ln(I)$ - V characteristics. In addition, other important parameters such as series resistance (R_s), shunt resistance (R_{sh}) and rectification ratio (RR), which represent the diode quality, were also calculated using the I - V measurements. In order to understand the effects of some parameters on the diode and their radiation-related variations correctly, the R_s , n and Φ_{B0} values were obtained using the Cheung functions method as a second way and

the R_s and Φ_{B0} values were obtained using the Norde functions method as a third way. Thus, the results obtained by three methods were compared and interpreted. On the other hand, other diode parameters such as diffusion potential (V_D), the density of doping acceptor atoms (N_A), Fermi energy level (E_F), maximum electric field (E_m), depletion layer width (W_D), and barrier height (Φ_B) were calculated using the C - V and $G\omega$ - V characteristics which were measured at sufficient height frequency ($f=500\text{ kHz}$). These calculations provided the opportunity to analyze gamma-irradiation effects in detail. Furthermore, surface states (N_{ss}), calculated by two different methods (Castagne-Vapaille and Hill-Coleman), fully exposed the radiation behavior of the diode. Measurements and calculations have shown that R_s is more effective in the accumulation region and N_{ss} is more effective especially in the depletion region. So, although all diode parameters were significantly affected by radiation, no significant defect or deterioration was observed under 0-60 kGy irradiation doses, which would prevent the operation of this MPS type SD. As a result, these diodes can be successfully used as MPS type detectors instead of MIS/MOS type detectors because of the advantages of the polymer interfacial layers in that polymer layers are cheaper, lighter and more flexible as well as requiring less energy consumption compared to the insulator/oxide layers.

Key Word : Schottky diodes, gamma-irradiation effects, ZnO-PVA polymer interfacial layer, radiation-induced surface states, electrical characteristics of Schottky diodes.

Science Code : 90543

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Habibe TECİMER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerin hazırlanması, ölçülmesi ve değerlendirilmesinde çok fazla destekleri bulunan Gazi Üniversitesi, Fizik Bölümü öğretim üyesi sayın hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL ve çalışma ekibine ayrıca sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

Tez çalışmamdaki önemli katkıları sebebiyle tez izleme komitesi ve tez savunma jürisindeki hocalarıma teşekkürü bir borç bilmekteyim.

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri ve araştırma görevlilerine akademik ve manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Sevgili eşime, kıymetli anne, baba, abla ve ağabeylerime manevi desteklerinden dolayı tüm kalbimle teşekkür ederim.

Hayatıma kattıkları mutluluk ile motivasyon bulduğum değerli evlatlarıma tüm kalbimle teşekkür ederim.

Çıkmış olduğum bu ilim yolculuğunda bugüne kadar desteği bulunan büyüklerime dostlarıma, kardeşlerime ve hocalarıma yine teşekkürlerimi sunarım.

İnsanlığa güzel ve hayırlı hizmetlerde bulunabilmek ümidiyle...

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI	4
1.2. TEZE GENEL BAKIŞ	5
BÖLÜM 2	6
ORGANİK ARAYÜZEY TABAKALI MS YAPILAR.....	6
2.1. MS YAPILARININ TARİHÇESİ.....	6
2.2. MS VE MIS/MPS TİPİ YAPILARDA ENERJİ BANT DİYAGRAMLARI..	8
2.3. FİZİKSEL İFADELERİN TANIMLANMASI.....	12
2.4. AKIM-İLETİM MEKANİZMALARI	13
BÖLÜM 3	16
RADYASYON VE ETKİLERİ	16
3.1. YARIİLETKEN MALZEMELERDE RADYASYON ETKİLERİ.....	19
3.1.1. Yer Değiştirme Hasar Mekanizmaları	19
3.1.2. Yer Değiştirme Hasar Mekanizmalarının Ortaya Çıkardığı Etkiler	20
3.2. GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE RADYASYON ÇALIŞMALARI.....	23
BÖLÜM 4	29
DİYOTLARIN FABRİKASYONU VE ÖLÇÜM DETAYLARI	29
4.1. SCHOTTKY DİYOTLARINDA ÜRETİM SÜRECİ.....	29
4.1.1. ZnO-PVA Çözeltisinin Hazırlanması	32

	<u>Sayfa</u>
4.1.2. Spin Kaplama Tekniği	33
4.2. DENEYSSEL ÖLÇÜM SİSTEMİ DETAYLARI	34
BÖLÜM 5	36
AKIMA BAĞLI PARAMETRELERDE RADYASYON ETKİLERİ.....	36
BÖLÜM 6	52
<i>C-G/ω-V</i> KARAKTERİSTİKLERİNDEKİ RADYASYON ETKİLERİ.....	52
BÖLÜM 7	67
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Metal ile p-tipi bir yarıiletkenin kontak işleminde doğrultucu kontaktaki enerji bant diyagramları.....	10
Şekil 2.2. Bir MIS/MPS yapısının temsili kesit görünümü.....	11
Şekil 2.3. P-tipi yarıiletkenine sahip bir MIS/MPS yapısındaki enerji bant diyagramı.....	11
Şekil 2.4. MS yapılarındaki temel akım-iletim mekanizmaları.....	15
Şekil 2.5. MS yapılarındaki bariyer homojensizliğinin temsili görünümü.....	15
Şekil 3.1. Radyasyon çeşitlerinin iyonlaştırma durumuna göre sınıflandırılması.....	16
Şekil 3.2. Elektromanyetik radyasyon spektrumu.....	17
Şekil 3.3. Radyasyonun iyonlaştırma, frekans ve dalga boyu arasındaki ilişkisi.....	18
Şekil 4.1. Omik ve doğrultucu kontaklarda kullanılan maske örnekleri.....	30
Şekil 4.2. Örnek bir termal metal buharlaştırma sistemi.....	31
Şekil 4.3. Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi Schottky diyotlarının temsili kesit görünümü ve ölçüm sisteminin blok diyagramı.....	31
Şekil 4.4. ZnO nano-taneciklerinin SEM görüntüsü.....	33
Şekil 4.5. Spin kaplama tekniğinin şematik gösterimi.....	34
Şekil 4.6. Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi.....	35
Şekil 5.1. Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD'nin radyasyona bağlı $I-V$ grafikleri.....	37
Şekil 5.2. Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD'de $\ln(I)-V$ grafiğinin lineer bölgesi.....	38
Şekil 5.3. Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD'nin R_f-V profilleri.....	43
Şekil 5.4. Işınlamadan önce ve sonraki $dV/d(\ln I)-I$ grafiklerinin lineer bölgeleri.....	45
Şekil 5.5. Işınlamadan önce ve sonraki $H(I)-I$ grafiklerinin lineer bölgeleri.....	45
Şekil 5.6. Işınlamadan önce ve sonraki Norde grafikleri.....	46
Şekil 5.7. İdealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin radyasyon ve voltaja bağlı değişimi.....	47
Şekil 5.8. Gerçek R_s değerlerinin radyasyona ve hesaplama metoduna göre değişimi.....	49
Şekil 5.9. Φ_{B0} değerinin radyasyon ve hesaplama metoduna göre değişimi.....	49
Şekil 5.10. Işınlamadan önce ve sonraki $(E_{ss}-E_v)-N_{ss}$ profilleri.....	51
Şekil 6.1. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki $C-V$ karakteristikleri.....	53
Şekil 6.2. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki $G/\omega-V$ karakteristikleri.....	53
Şekil 6.3. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki R_s-V profilleri.....	56

Sayfa

Şekil 6.4. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki C^2 - V karakteristikleri.	58
Şekil 6.5. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki C_m ve C_c grafikleri.	62
Şekil 6.6. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki G_m/ω ve G_c/ω grafikleri...	63
Şekil 6.7. MPS tipi SD'de ışınlama dozlarına bağlı olarak görülen N_{ss} - V profilleri..	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1. Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD için temel diyot parametrelerinin ışınlama dozlarına bağlı olarak değişimi.....	40
Çizelge 5.2. TE, Cheung ve Norde fonksiyonları kullanılarak hesaplanan temel diyot parametrelerinin karşılaştırılması.	48
Çizelge 6.1. $C-G/\omega-V$ ölçümlerinden faydalanılarak hesaplanan temel diyot parametreleri.	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- A : Diyotun kontak alanı
 Å : Angstrom
 A^* : Etkin Richardson sabiti
 C_{ox} : Arayüzey tabakanın kapasitansı
 C_m : Ölçülen kapasitans değeri
 C_c : Düzeltilmiş kapasitans değeri
 G_m : Ölçülen kondüktans değeri
 G_c : Düzeltilmiş kondüktans değeri
 E_v : Valans bant kenarı enerjisi
 E_c : İletkenlik bant kenarı enerjisi
 E_g : Yarıiletken yasak enerji aralığı
 ϵ_0 : Boşluğun elektrik geçirgenliği
 ϵ_s : Yarıiletkenin dielektrik sabiti
 k : Boltzmann sabiti
 K : Kelvin cinsinden sıcaklık
 m_e : Elektronun etkin kütlesi
 m_0 : Serbest elektron kütlesi
 N_A : Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu
 N_D : Verici katkı atomlarının yoğunluğu
 N_V : İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu
 N_{ss} : Arayüzey durum yoğunluğu
 q : Elektrik yükü
 R_i : Direnç
 R_s : Seri direnç
 R_{sh} : Şönt direnç
 V_D : Difüzyon potansiyeli

- V_F : İleri beslem gerilimi
 V_R : Ters beslem gerilimi
 W_D : Tüketim tabakasının genişliği
 Φ_B : Potansiyel bariyer yüksekliği
 Φ_{B0} : Sıfır-beslem bariyer yüksekliği
 ω : Açısal frekans ($2\pi f$)

KISALTMALAR

- Al : Alüminyum
C-V : Kapasitans-Gerilim
 ^{60}Co : Kobalt-60
DLTS : Deep-Level Transient Spectroscopy (Derin Seviyeli Geçici Spektroskopi)
G/ ω -V : Kondüktans-Gerilim
I-V : Akım-Gerilim
Ge : Germanyum
MeV : Mega elektron volt
MS : Metal-Semiconductor (Metal-Yarıiletken)
MIS : Metal-Insulator-Semiconductor (Metal-Yalıtkan-Yarıiletken)
MPS : Metal-Polymer-Semiconductor (Metal-Polimer-Yarıiletken)
MOS : Metal-Oxide-Semiconductor (Metal-Oksit-Yarıiletken)
NIEL : Non-Ionizing Energy Loss (İyonlaştırıcı Olmayan Enerji Kaybı)
PVA : Polivinil-Alkol
RR : Rectification Ratio (Doğrultma Oranı)
SD : Schottky Diyot
SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
Si : Silisyum
TAEK : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TCO : Transparent Conducting Oxide (Şeffaf İletken Oksit)
XRD : X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)
ZnO : Çinko-Oksit

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Transistörler, MOS kapasitörler, MS/MIS/MPS tipi Schottky diyotlar (SDs) ve güneş pilleri, uzay uygulamaları (uydu sistemleri), nükleer sanayi ve tıbbi uygulamalar için üretilen cihazlarda elektronik bileşen olarak geniş bir kullanım alanına sahiptirler [1–4]. Bu malzemelerin elektriksel ve optik özellikleri, malzemenin seri direncine (R_s) [5], arayüzey durumlarına (N_{ss}) [6], uygulanan elektrik alanına (yani gerilime) [7], ışık şiddetine [8], radyasyona [9–13], frekansa [14,15], M/S yapısındaki doğal bariyer yüksekliğine [16], numunenin sıcaklığına [17], kullanılan arayüzey tabakasına [6,18,19], metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına [16,20], üretim süreçlerine [21] ve yarıiletkenin katkılanma durumuna [22] önemli ölçüde bağlıdır. Bu nedenle, yapıların elektrik/dielektrik özelliklerini ve elektro-optik karakteristiklerini etkileyen bu bağımlılıkların kökeni hakkında [1–22] referanslarında verildiği gibi birçok çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte, bu etkilerin sebepleri henüz tam olarak açığa kavuşturulamamıştır ve bu nedenle de sonuçları itibarıyla ciddi bir sorun olmaya devam etmektedir.

Malzemelerin radyasyona karşı dayanıklılık derecesinin belirlenmesi ve onların radyasyona karşı tepkilerinin araştırılarak radyasyon etkilerinin doğru ve detaylı bir şekilde anlaşılması oldukça önemlidir. Çünkü uydu sistemlerinin bulunduğu uzay ortamı hareketli ve karmaşık olmasının yanı sıra elektrik alanlarından, manyetik alanlardan, nötr ve yüklü parçacıklardan ve güneş/galaktik radyasyonundan meydana gelmektedir [23,24]. Diğer yandan, biyomedikal ve diğer sanayi uygulamalarında kullanılan cihazlar da benzer radyasyon etkileri altında yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. Dolayısıyla, radyasyona karşı dayanıklı malzeme imalatı, uyduların veya diğer uygulamalardaki cihazların güvenilirliğini artırmak için çok önem arz etmektedir.

Radyasyonun malzemeler üzerinde kalıcı ve geçici olmak üzere iki önemli etkiye sahip olduğu bilinmektedir [25]. Bu etkilerden elektron-hol çiftlerinin oluşumu veya rekombinasyonu geçici etki olarak görülürken radyasyon bombardımanı nedeniyle malzemelerde meydana gelen kristal yapı bozukluğu ve/veya değişikliği kalıcı etki olarak ortaya çıkmaktadır. Işınlanmış numunelerin performansı, radyasyona bağlı kusurlar, arayüzey tuzakları, sarkan bağlar ve yeniden kristalizasyon gibi durumlardan dolayı önemli ölçüde etkilenmektedir [26,27]. Diğer bir deyişle, gama ışınları ile elektron ve proton gibi yüksek enerjili parçacıklar, yukarıda bahsi geçen malzemelerin hem elektrik/dielektrik karakteristiklerinde hem de elektro-optik özelliklerinde kristal yapının değişiminin yanı sıra elektron-hol çiftlerinin oluşumu veya rekombinasyonu sebebiyle önemli değişikliklere yol açarlar [10,24,28-30]. Bunlar, malzemelerin kullanımlarında beklenen karakteristiklerin dışına çıkmasına sebebiyet verebilecek değişimler olabileceği gibi karakteristiklerindeki belirli bölgelerde bazı küçük artış ve azalışlar olarak da ortaya çıkabilmektedir. Dolayısıyla, radyasyona bağlı olarak malzemelerde ortaya çıkan bu etkiler, zaman zaman cihazların performanslarının bozulmasına sebebiyet verebilmektedir.

Metal ile yarıiletken arasında doğal olarak veya çökeltilmiş bir yöntemle bir arayüzey tabakasının (yalıtkan/oksit, polimer veya ferroelektrik) büyütülmesi sonucunda MIS/MOS, MPS veya MFS tipi yapılar elde edilmektedir. Büyütülen bu arayüzey tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak 50 nm'den daha ince olduğunda, bu yapıların bir diyot malzemesi olarak kullanılabilmesi de bilinmektedir [31]. W. Schottky'nin bu cihazlar üzerindeki önemli çalışmaları nedeniyle, bunlar genel olarak Schottky tipi yapılar veya diyotlar olarak adlandırılmaktadırlar. Bununla birlikte, arayüzey tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak 50 nm'den daha kalın hale geldiğinde, bu yapılar diyottan öte MIS, MOS, MPS ve MFS tipi kapasitörler olarak adlandırılmaktadırlar [31,32]. Bu tür malzemeler, M/S arayüzünde herhangi bir taşıyıcı iletimi sağlayamazlar. Dolayısıyla da elektrik yüklerini veya elektrik enerjisini depolarlar.

Son yıllarda, iletim mekanizmalarını ve bariyer yüksekliğini (BH) kontrol edebilmek amacıyla organik/polimer ara katmanı ile metal-yarıiletken (MS) yapıların üretilmesi oldukça popüler hale gelmiştir [5,6,18,19,33]. Organik çözeltilerden veya polimerlerden oluşan organik arayüzey tabakası, geleneksel yalıtkan/oksit tabaka ile

karşılaştırıldığında, elektrospining ve sol-gel gibi kolay büyütülme süreçlerinin yanı sıra, esnek, ucuz ve molekül başına hafif olma gibi bazı avantajlara sahiptir [34–36]. Organik ara tabakanın bahsedilen bu avantajları ve ayrıca Çinko-Oksit (ZnO) ile Polivinil-Alkolün (PVA) aşağıda açıklanan bazı özellikleri nedeniyle, ZnO-PVA çözeltisi bu çalışmadaki SD için arayüzey tabakası olarak tercih edilmiştir. Bir metal oksit olarak ZnO, optoelektronikte potansiyel şeffaf iletken oksit (TCO) malzemesi olarak kullanılmaktadır. ZnO'nun doğrudan bant-boşluklu (3,37 eV) yarıiletken olması ve görünür aralıktaki yüksek şeffaflığı ($>0,80$) nedeniyle bir pencere malzemesi olarak tercih edilebilmesi onun diğer avantajları içerisinde [37]. Dahası, ZnO'nun oda sıcaklığındaki büyük uyartım-bağlayıcı enerjisi (60 meV), güneş pillerindeki uyartım için termal stabilite sağlayabilmektedir. Diğer yandan PVA, yarı kristalli, suda çözünür, toksik olmayan bir polimer olmasının yanı sıra yüksek şarj depolama kapasitesine de sahiptir [34–36]. Ayrıca, yukarıda bahsedildiği gibi elektrospining ve sol-gel gibi basit ve düşük maliyetli teknikler kullanılarak uygun bir metal veya metal oksit materyalinin katkılanması ($\leq 0,1$) suretiyle PVA'nın iletkenliği ve dielektrik geçirgenliği kolayca kontrol edilebilmektedir [34–36].

MS yapılarında kullanılan organik ve yalıtkan ara tabaka, hem metal ile yarı iletken tabakaların birbirinden yalıtılmasını sağlamakta hem de yük aktarımlarının düzenlenmesine katkıda bulunmaktadır. Özel üretim yöntemlerine sahip olmayan bu tür bir yapıda, seri direnç (R_s) ve arayüzey durumlarının (N_{ss}) etkileri, varlığını belirgin bir şekilde gösterir. Bu durum sonucunda, bu tür bir malzemeye bir gerilim uygulandığında, bu gerilim yapının seri direnci, tüketim tabakası ve ara tabakası üzerinde dağılım sergiler. Dolayısıyla, malzemelerin elektriksel özellikleri, karanlıkta, çeşitli ışık ortamlarında ve çeşitli radyasyon dozları altında ideal davranışından sapma gösterir. Ayrıca, ara (polimer) tabaka ile yarıiletken tabakası arasına yerleşen arayüzey durumları rekombinasyon merkezi olarak rol oynayabilmektedir. Bu merkezler, elektrik alanı, sıcaklık veya radyasyon etkisine bağlı olarak bazı elektrik yüklerini yakalayabilir veya serbest bırakabilirler ki böylece taşıyıcılar için bir tünelleme yolu sağlayabilirler [38,39]. Öyleyse, tüm bu etkilerin doğru bir şekilde anlaşılabilmesi için farklı arayüzey tabakalarına sahip yapıların radyasyon ve sıcaklık tepkilerinin araştırılması ve değerlendirilmesi büyük bir öneme sahiptir.

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Yukarıda bahsedildiği gibi uzay ortamı, doğal olarak elektrik/manyetik alanlardan, yüklü parçacıklardan ve güneş/galaktik radyasyondan oluşmaktadır. Ayrıca güneş pilleri, diyotlar, kapasitörler ve transistörler gibi elektronik malzemelerin yoğun bir şekilde kullanıldığı biyomedikal cihazlarında ve bazı endüstriyel uygulama ortamlarında da radyasyon çoğunlukla kaçınılmaz olmaktadır. Bu durumda, bu uygulamalarda kullanılmak üzere radyasyona dayanıklı malzemelerin üretilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu yüzden de bu çalışma, ilgili alanlardaki elektronik bileşenlerin güvenli ve doğru bir şekilde çalışmasını sağlayacak olan malzeme önerisi sunmayı amaçlamıştır.

Güncel literatürde MS, MIS ve MPS tipi SD'ler ile güneş pillerinin, MOS kapasitörlerin ve transistörlerin radyasyon etkileri üzerine çok sayıda çalışma yapılmış olmasına karşın [9,10,42–45,11,24,25,28–30,40,41], bu tür yapıların elektriksel karakteristikleri üzerindeki radyasyon etkileri henüz tam olarak açıklanamamıştır. Dahası, $I-V$, $C-V$ ve $G/\omega-V$ karakteristikleri üzerindeki radyasyon etkilerinin bir arada incelenmesi meydana gelecek değişimleri ve etkileri daha net bir şekilde açığa çıkaracaktır. Öte yandan, bu tür yapıların radyasyona karşı tepkisi, arayüzey tabakasının türüne ve katkılama oranına güçlü bir şekilde bağlı olduğundan dolayı farklı bir arayüzey tabakasına sahip bir malzemenin radyasyon etkilerinin incelenmesi önem teşkil etmektedir. Bu bağlamda, geleneksel izolatör/oksit arayüzey tabakasına sahip yapılar yerine organik arayüzey tabakalı Al/(ZnO-PVA)/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarının üretilmesi bu çalışmanın kapsamı içine alınmıştır. Üretimi tamamlanan SD'lerin ışınlama öncesi ve Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nda (TAEK), 1296 Gy/s doz hızında uygulanan çeşitli dozlardaki (0 kGy, 1 kGy, 5 kGy, 10 kGy, 30 kGy ve 60 kGy) ^{60}Co gama ışınlamaları sonrasında $I-V$, $C-V$ ve $G/\omega-V$ ölçümleri alınmış ve bu ölçümlerden faydalanılarak temel diyot parametreleri farklı hesaplama yöntemleriyle radyasyona bağlı olarak elde edilmiştir. Bu temel diyot parametreleri vasıtasıyla da radyasyonun SD'ler üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve böylece radyasyon etkilerinin doğru ve kapsamlı bir şekilde anlaşılması/açıklanması yine bu çalışmanın bir amacı içerisinde yer almaktadır.

Sonuç olarak, arayüzey tabakasının türü ile katkılama oranı, malzemenin cinsi, radyasyonun dozu, arayüzey tabakasının kalınlığı, ölçüm frekansının değeri gibi birçok parametreye sahip olan radyasyon çalışmaları incelenmiş ve ZnO-PVA arayüzey tabakasına sahip bir MPS yapısının ^{60}Co gama ışınlamasına bağlı olarak incelenmediği tespit edilmiştir. Bu yüzden de Al/(ZnO-PVA)/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar hazırlanarak bu diyotların belirli doz aralığındaki gama ışınlama etkilerinin araştırılmasına ihtiyaç olduğu öngörülerek bu çalışma ortaya konulmuştur.

1.2. TEZE GENEL BAKIŞ

(Al/(ZnO-PVA)/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarının üretimine ve bu diyotların gama ışınlaması altındaki etkilerinin incelenmesine odaklanan bu tez çalışması yedi ana bölümden oluşmuştur. Bu bölümlerde sırasıyla aşağıdaki konular ele alınmıştır.

Birinci bölümde, teze genel bir giriş yapılarak tez çalışmasının amacı açıklanmıştır.

İkinci bölümde, tez çalışmasının daha iyi anlaşılmasını sağlayacak teorik altyapının oluşturulması amaçlanarak literatürdeki bilgilerden çalışmamız için önem arz edenler detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, radyasyon türleriyle bunların etkileri anlatılmış ve geçmişten günümüze kadar yürütülmüş olan radyasyon çalışmaları özet olarak sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, numunenin üretim aşamaları, ölçümlerin gerçekleştirilmesi ve bu üretim-ölçüm sistemlerinin detayları hakkında bilgiler verilmiştir.

Beş ve altıncı bölümlerde, sırasıyla $I-V$ ve $C-G/\omega-V$ ölçümlerinden faydalanılarak radyasyon etkileri açıklanmıştır.

Yedinci bölümde ise, elde edilen tüm sonuçlar özet olarak verilmiş ve bu sonuçlara bağlı olarak çeşitli öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2

ORGANİK ARAYÜZEY TABAKALI MS YAPILAR

2.1. MS YAPILARININ TARİHÇESİ

Doğrultucu bir metal-yarıiletken kontağı, Schottky bariyeri olarak bilinmektedir. Çünkü, bariyer oluşumu için böyle bir model öneren ilk kişi W. Schottky'dir. Metal-yarıiletken diyotlar hakkındaki bilgimiz bir asırdan daha eskiye kadar dayanmaktadır. Metal-yarıiletken doğrultma sistemleri üzerine ilk sistematik araştırma ise 1874 yılında bir nokta temasının toplam direncinin uygulanan voltajın polaritesi ve ayrıntılı yüzey koşullarına bağlı olduğunu belirten F. Braun'a atfedilir [46]. F. Braun, bakır, demir ve kurşun sülfür kristalleri üzerindeki metalik temasların doğasını açıklamıştır. O zamandan beri sayısız deneysel ve teorik çalışma yapılmış olsa da metal-yarıiletken bileşimleri hakkındaki bilgimiz hala tam değildir. Bu yapıların performanslarının yüksek oranda işleme bağlı olması, bu durumun sonucu olarak görülebilir [16,47].

Nokta temaslı doğrultucular, 1904'ten itibaren pratik uygulamalarda çeşitli şekillerde yer bulmuştur [16]. Nokta temaslı diyotlar, kablosuz telgrafın ilk günlerinde radyo dalga dedektörleri olarak kullanılmışlardır. Bununla birlikte, 1920'lerin başlarında geliştirilen vakum diyotları bu diyotların yerini almıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında nokta temaslı diyotlar, frekans dönüştürücü ve düşük seviyeli mikrodalga dedektör diyotu olarak kullanılmaları sebebiyle yeniden önem kazanmışlardır. Nokta temaslı doğrultucular, güvenilir olamayacaklarını karakteristikleri ile açığa çıkarmışlardır. Dolayısıyla, ince bir metalik filmin, yarıiletkenin uygun şekilde hazırlanmış bir yüzeyine biriktirilmesi ile elde edilen doğrultucular daha sonra bunların yerini almıştır. Bu kontaklar çok daha üstün özellikler göstermişlerdir. Bugünkü metal-yarıiletken kontakların davranışı hakkındaki mevcut bilgimizin de bu tür cihazların çalışma biçimlerinden elde edildiğini söyleyebiliriz [75].

Wilson 1931'de, yarıiletkenlerin taşıma teorisini katıların bant teorisine dayanarak formüle etti. Bu teori daha sonra metal-yarıiletken kontaklara uygulandı. Schottky ve Mott ise engel oluşum mekanizmasını açıklayarak bariyerin şekli ve yüksekliğini hesaplamak için çeşitli modeller önerdiler. 1938'de Schottky, potansiyel bariyerin kimyasal bir tabaka olmadan sadece yarıiletkendeki sabit alan yüklerinden kaynaklanabileceğini öne sürdü. Aynı yıl Mott, Mott bariyeri olarak bilinen metal-yarıiletken kontaklar için daha uygun bir teorik model tasarladı. Schottky ve arkadaşları tarafından metal ve yarıiletken arasındaki arayüzeyde potansiyel bir engelin varlığının ortaya konulması, metal-yarıiletken kontağın doğrultucu etkisini anlamak için atılan önemli bir adım olmuştur. Schottky bariyer kontaklarının anlaşılmasında bir diğer önemli gelişme, Bethe'nin İkinci Dünya Savaşı esnasında, akımın bariyer üzerinden iletimi için Termiyonik emisyon (TE) teorisini önermesiyle gerçekleşmiştir [16,47–50].

1960 yılları Schottky bariyer diyotları üzerinde araştırma ve geliştirme çalışmalarının büyük canlanma gördüğü bir dönem olmuştur. Bu girişim, yarıiletken teknolojisindeki metalik kontakların öneminden büyük ölçüde ilham almıştır. Bu gelişmenin bir sonucu olarak, Schottky bariyerlerinin başka uygulama alanları da ortaya çıkmıştır. 1970 yıllarında ise çalışma iki yönlü olarak sürdürülmüştür. Birincisi, Schottky engelleri kullanan cihazların endüstriyel üretimde faydalı hale gelmesi için önceki yıllardaki Ar-Ge çalışmalarından elde edilen bilgiler üzerine odaklanırken ikincisi, metal-yarıiletken arayüzeyinin daha iyi anlaşılması için ortaya konulan çalışmalardan oluşmuştur [47].

Metal-yarıiletken kontaklar üzerine daha önceki çalışmaların kapsamlı açıklaması Henisch tarafından sunulmuştur [51]. Bunun dışında konuyla ilgili yapılan birçok gözden geçirme ve inceleme çalışmaları da mevcuttur. Bunlardan bazıları temel olarak Schottky engellerinin fiziği ile ilgilenirken [52–54], diğerleri de bu cihazların teknolojisi ve uygulamaları üzerine odaklanmıştır [55,56].

Son 20 yılda ise araştırmacılar iletim mekanizmalarını ve bariyer yüksekliğini kontrol edebilmek amacıyla yalıtkan veya organik/polimer ara katmanı ile MS yapıların üretimine odaklanmışlardır. MS yapılarında kullanılan organik veya yalıtkan ara tabaka, metal ile yarıiletken tabakaların birbirinden yalıtılmasını sağlamasının yanı

sıra yük aktarımlarının da düzenlenmesine katkıda bulunmaktadır. Bu yapılarda metal olarak daha çok yüksek oranda saf olan altın, alüminyum ve gümüş gibi metaller kullanılması yanında yalıtkan olarak SiO_2 , SnO_2 , Si_3N_4 ve TiO_2 gibi bileşikler tercih edilmiştir. Organik tabaka olarak bugün çok farklı yapılar kullanılmasına rağmen poliindol, polianilin ve polivinil alkol gibi yapılar veya bunlara farklı malzemelerin katılması ile elde edilen çözeltiler daha yoğun bir şekilde tercih edilmektedir. Yüksek dielektrik sabitine sahip olmalarının yanında ters sızıntı akımının mümkün olan en düşük seviyeye indirilmesi, iletim mekanizması ve bariyer yüksekliğinin iyi bir şekilde kontrol edilebilmesi ve diyotun doğrultma kalitesinin artırılabilmesi gibi özellikleri bu malzemelerin tercih sebebi olmuştur. Öte yandan organik malzemeler, elektrospining ve sol-gel gibi kolay büyütülme süreçlerinin yanı sıra, esnek, ucuz ve molekül başına hafif olma gibi avantajlara da sahiptirler.

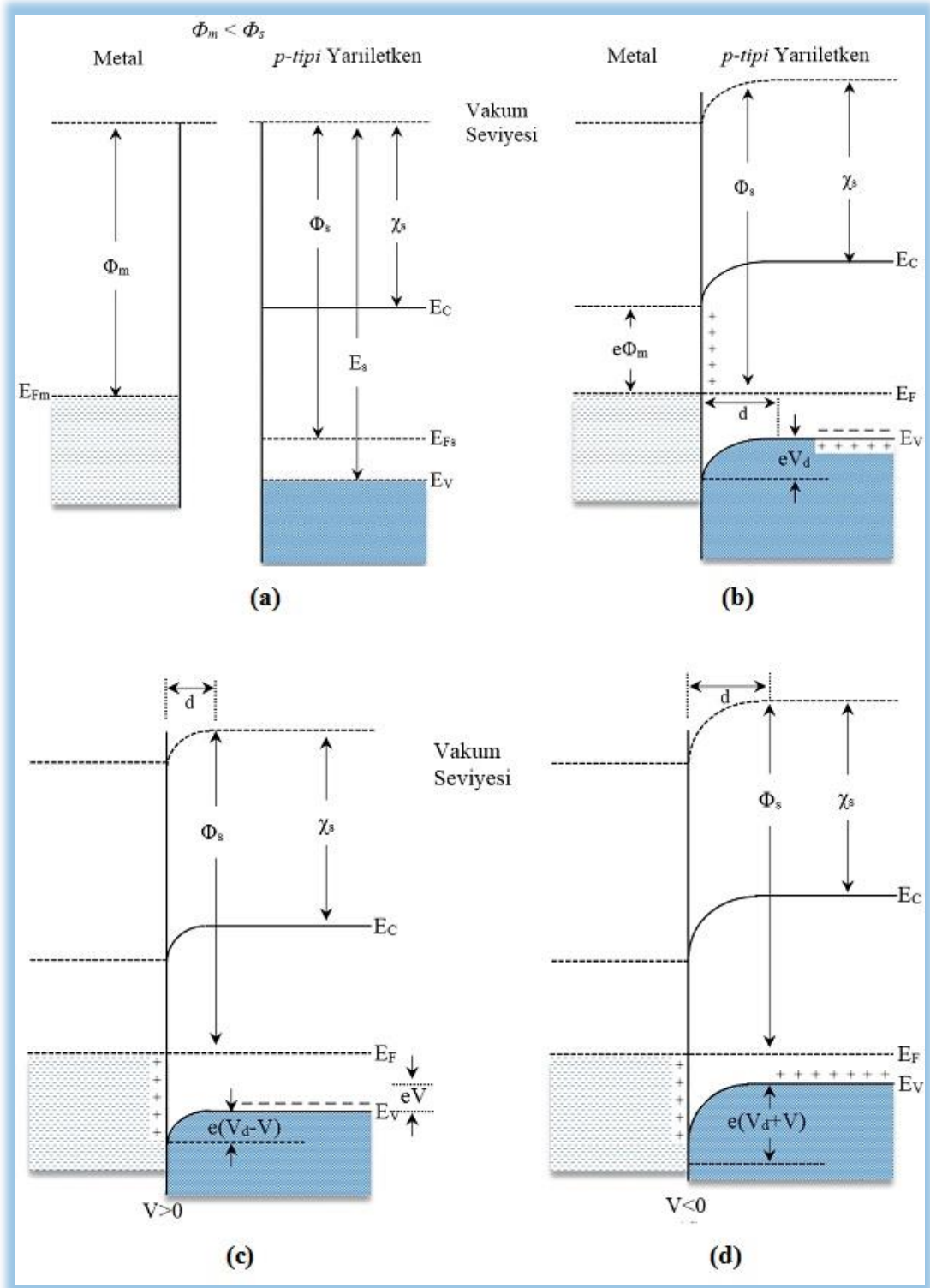
2.2. MS VE MIS/MPS TİPİ YAPILARDA ENERJİ BANT DİYAGRAMLARI

Metal, bir yarıiletken ile kontak edildiğinde, metal-yarıiletken arayüzeyinde bir bariyer oluşur. Oluşan bu bariyer akım iletiminin ve kapasitans davranışının kontrolünü sağlar. Elektronların çoğunluk taşıyıcısı olarak görev aldığı n-tipi bir yarıiletken, metal ile kontak edilirse elektronlar difüzyon yoluyla metalin ön yüzeyine geçerek arkalarında hollerin oluşmasına sebebiyet verirler. Böylece yarıiletkendeki elektron yoğunluğu azalır. Ayrıca, metal ve yarıiletken arasında gerçekleşen bu yük aktarımları sonucunda doğal bir elektrik alanı meydana gelir. Yük aktarım işlemleri tamamlanarak termal denge durumuna ulaşıldığında (yani metal ile yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri eşitlendiğinde) metal ile yarıiletken tabaka arasında hareketli yüklerden arınmış bir bölge oluşacaktır ki bu bölge tüketim bölgesi (tüketim tabakası- W_D) olarak adlandırılmaktadır. Bu bölge üzerine ilk çalışma yapan bilim adamına ithafen Schottky tabakası olarak da anılan tüketim tabakası oldukça yüksek dirençli bir bölgedir. Termal denge durumundaki bu yapıya ileri (V_F) veya ters (V_R) yönlü bir gerilim uygulandığında, bu gerilimin büyük bir kısmı yüksek dirençli olması sebebiyle tüketim tabakası üzerine düşecektir. Diğer yandan diyota uygulanan ileri yönlü gerilim (gerilimin pozitif metal tarafında), bariyer yüksekliğinin bu gerilim değeri kadar azalmasına sebep olacaktır. Ters yönlü gerilim esnasında ise bariyer yüksekliği uygulanan gerilim değeri kadar artacaktır. Sonuç olarak ileri yöndeki gerilim yeterince

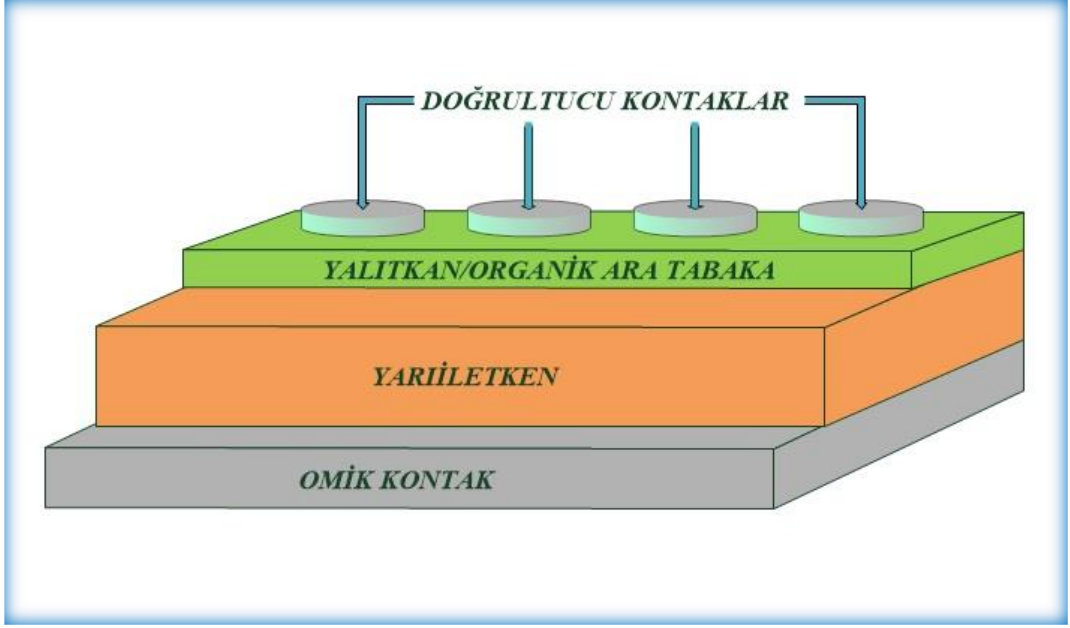
büyük ise akımın akmasını sağlarken ters yönde uygulanan gerilim akımın neredeyse tamamen engellenmesine yol açacaktır. Diyotların bu özelliği doğrultma işlemine karşılık gelmekte ve ileri beslem akımının ters beslem akımına bölünmesi ile de diyotun kalitesini temsil eden doğrultma oranı ($RR = I_F/I_R$) elde edilmektedir.

Kontak işleminin yapıldığı yarıiletken, tez çalışmasında kullandığımız Schottky yapısında olduğu gibi p-tipi bir yarıiletken ise oluşacak durum benzer bir yaklaşımla açıklanabilecektir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta, p-tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılarının holler ve azınlık taşıyıcılarının elektronlar olmasından dolayı ileri yönlü beslem için gerilim kaynağının pozitif yarıiletkene ve ters yönlü beslem için metale uygulanacak şekilde bağlanması gerektiğidir. P-tipi bir yarıiletken için bu olayı özetleyen grafik Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

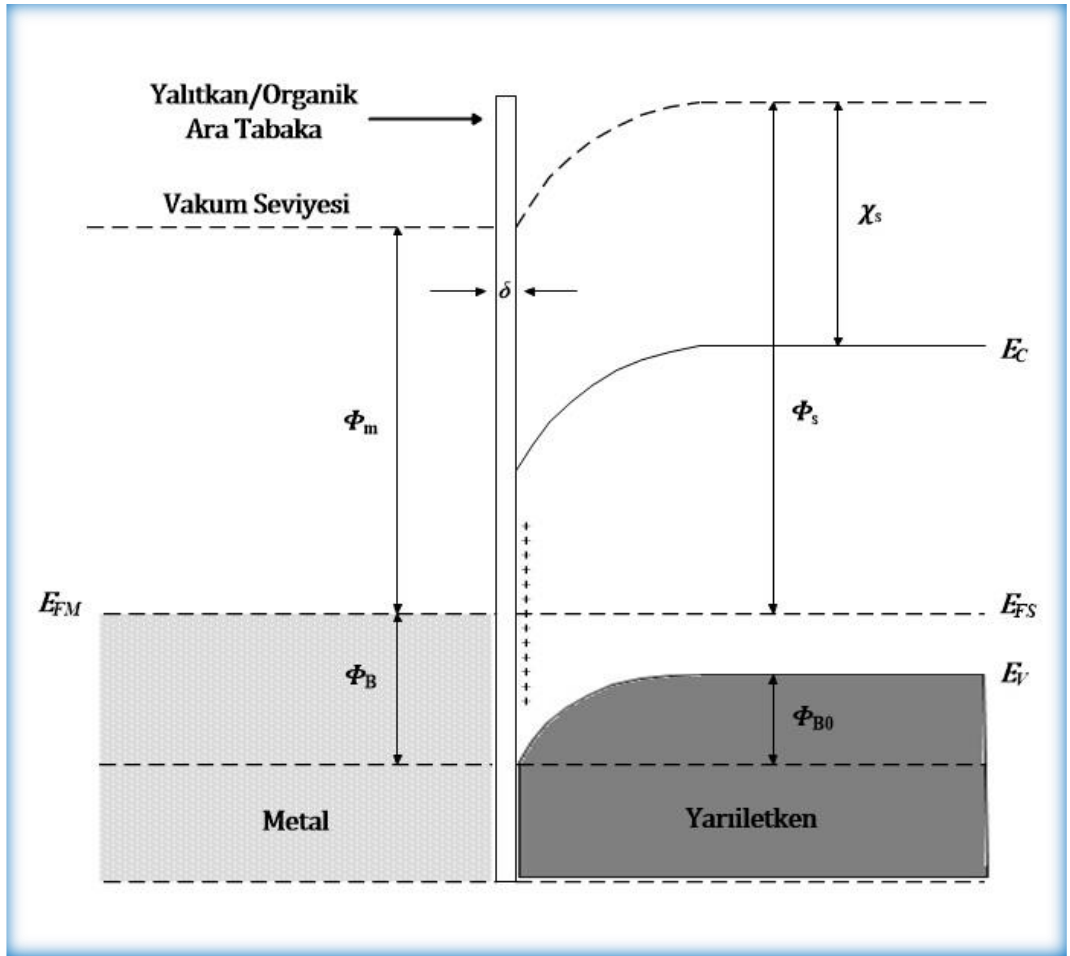
MS yapılarında, metal ve yarıiletkenin kontak işleminden önce yarıiletken malzemenin parlak yüzeyi kimyasal olarak temizleme işlemlerine tabi tutulur ve daha sonra bu yüzeye organik veya yalıtkan bir ara tabaka büyütülürse, bu durumda MIS veya MPS yapısı elde edilmektedir (Şekil 2.2). Gerçekte ise yalıtkan/organik bir ara tabakanın büyütülmediği bir yapıda, bu yüzeyde doğal olarak bir oksit tabakası oluşmaktadır. Doğal veya çökeltilmiş bir yöntemle büyütülen oksit/yalıtkan/polimer ara tabakaları yarıiletkenle metal arasında izolasyon işlevini sağlamanın yanı sıra yük aktarımlarının da düzenlenmesine katkı sağlar. İyi bir doğrultma işleminin elde edilebilmesi için biriktirilen ara tabaka kalınlığının (δ) 20 Å’den küçük olması gerekmektedir [16]. Özel üretim yöntemlerine sahip olmayan bu tür yapılarda arayüzey durumları ve seri direnç etkisi, varlığını açıkça gösterecektir. Dolayısıyla bu tür bir yapıya bir voltaj uygulandığında bu voltaj, diyotun seri direnci, tüketim tabakası ve arayüzey tabakası üzerinde dağılım sergileyecektir. Bu tür bir yalıtkan/organik ara tabakaya sahip bir MS yapısı için ortaya çıkacak olan enerji bant diyagramı ise Şekil 2.3’te verildiği gibi olacaktır.



Şekil 2.1. Metal ile p-tipi bir yarıiletkenin kontak işleminde doğrultucu kontaktaki enerji bant diyagramları [16,57], a) kontak işlemi öncesi durum, b) kontak işlemi sonrası termal denge durumu, c) pozitif beslem voltajının uygulanması durumu, d) negatif beslem voltajının uygulanması durumu.



Şekil 2.2. Bir MIS/MPS yapısının temsili kesit görünümü.



Şekil 2.3. P-tipi yarıiletkenlere sahip bir MIS/MPS yapısındaki enerji bant diyagramı.

2.3. FİZİKSEL İFADELERİN TANIMLANMASI

İş fonksiyonu: Fermi enerji seviyesindeki bir elektronu vakum seviyesine uyararak için gerekli olan minimum enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem bir metalde gerçekleşiyorsa buna, *metalin iş fonksiyonu* (Φ_m), yarıiletkende gerçekleşiyorsa *yarıiletkenin iş fonksiyonu* (Φ_s) denir. Katkı atomları yarıiletkenin Fermi enerji seviyesinin değişmesine sebep olabildiğinden dolayı yarıiletkenin iş fonksiyonu katkı atomlarının yoğunluğuyla değişmektedir.

Vakum seviyesi: Bir metal veya yarıiletkende kinetik enerjisi olmayan bir elektronun enerji seviyesi olarak tanımlanabilir.

Fermi enerji seviyesi (E_F): Bir yarıiletken için Fermi enerji seviyesi (E_{FS}), katkı atomlarının yoğunluğu, sıcaklık ve izinli enerji durumlarına bağlı olarak yasak enerji bölgesindeki izafi seviye olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla n- ve p-tipi yarıiletkenler için referans noktaları değişecektir. P-tipi bir yarıiletkende valans bandının üst kenarı referans alınırken n-tipi bir yarıiletkende referans noktası olarak iletim bandının alt kenarı alınmaktadır.

Elektron yakınlığı (χ_s): Bir elektronu iletkenlik bandı kenarından vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarı olarak tanımlanabilir.

Yığılma (akümülyasyon) bölgesi: Kontak haline getirilmiş bir metal ile n-tipi bir yarıiletkende, metale ters yönlü olarak bir gerilim uygulandığında meydana gelen elektrik alanı, yarıiletkendeki elektronları (yani çoğunluk taşıyıcılarını) yarıiletkenin arayüzeyine doğru hareket ettirecektir. Bu esnada diyotun ideal olduğu ve dolayısıyla da Fermi enerji seviyesinin sabit kaldığı varsayılırsa, valans ve iletkenlik bantlarındaki bükülme (yani iletkenlik bandının Fermi enerji seviyesine yaklaşması ve valans bandının da buna bağlı olarak yukarı doğru bükülmesi) sonucunda yarıiletken arayüzeyinde elektronlar yığılır ki böylece burada bir 'yığılma (akümülyasyon) bölgesi' meydana gelir. Bu esnada ölçülecek olan kapasitans değeri, arayüzey tabakasının kapasitans değerine karşılık gelecektir ($C_{ma} = C_i$).

Tüketim bölgesi: Metal plakaya ileri veya ters yönlü olarak küçük bir gerilim uygulanırsa, arayüzeyde oluşacak elektrik alanı sebebiyle çoğunluk taşıyıcıları (yani elektronlar) yarıiletken arayüzeyinden uzaklaşma eğilimi gösterecek ve böylece iç kısımlardaki elektron yoğunluğu artarken arayüzeydeki elektron yoğunluğu nispeten azalmaya başlayacaktır. Dolayısıyla, valans ve iletkenlik enerji bantları aşağıya doğru bükülecektir. Tüketim tabakasındaki elektronların azalmaya başlaması sebebiyle bu gerilim bölgesi literatürde '*tüketim bölgesi*' olarak anılmaktadır.

Terslenim (inversiyon) bölgesi: N-tipi bir yarıiletken ile kontak halindeki bir metal plakaya, ileri yönlü olarak yeterince büyük bir gerilim uygulanırsa, valans ve iletim bantları aşağıya doğru iyice bükülecektir. Bu durumda Fermi enerjisi seviyesinin altına geçen saf durumdaki enerji seviyesi (E_i) sebebiyle yarıiletkendeki azınlık taşıyıcıları (yani holler) artmaya başlayacak ve böylece bu holler elektronlardan daha yoğun olma eğilimi göstereceklerdir. Yani yarıiletken türü değişme davranışı sergileyecektir (n-tipi ise p-tipi gibi davranış gösterecek) ki bu durumda yarıiletkenin ön yüzeyinde artık hollerin çoğunluk taşıyıcısı olduğu bir bölge meydana gelecektir. Bu şekildeki çoğunluk taşıyıcısı değişim davranışı sebebiyle bu gerilim bölgesi literatürde '*terslenim bölgesi*' olarak adlandırılmaktadır.

2.4. AKIM-İLETİM MEKANİZMALARI

Schottky diyotlarında akım-iletim sistemleri temel olarak dört gruba ayrılmaktadır. Bu iletim mekanizmalarını özetleyen grafik Şekil 2.4'teki gibidir. Şekilden de anlaşılacağı üzere bu tür bir yapıda, metal tarafından bakıldığında akım taşıyıcılarının gördüğü bariyer yüksekliği, yarıiletken tarafından bakıldığında görülen bariyer yüksekliğinden daha büyüktür. Dolayısıyla her iki yönde de akım iletimi mümkün olsa da yarıiletkenden metale doğru akım geçişi daha kolay olacaktır. Şekil 2.4'te gösterilen akım-iletim mekanizmaları genel olarak aşağıdaki gibi açıklanmaktadır.

a) Termiyonik Emisyon Teorisi (TE): Yeterli düzeyde termal enerjiye sahip olan taşıyıcılar karşılaştıkları engeli aşarak akım iletimini sağlarlar ki bu mekanizma özellikle oda sıcaklığı ve daha yüksek sıcaklıklarda etkin olabilmektedir.

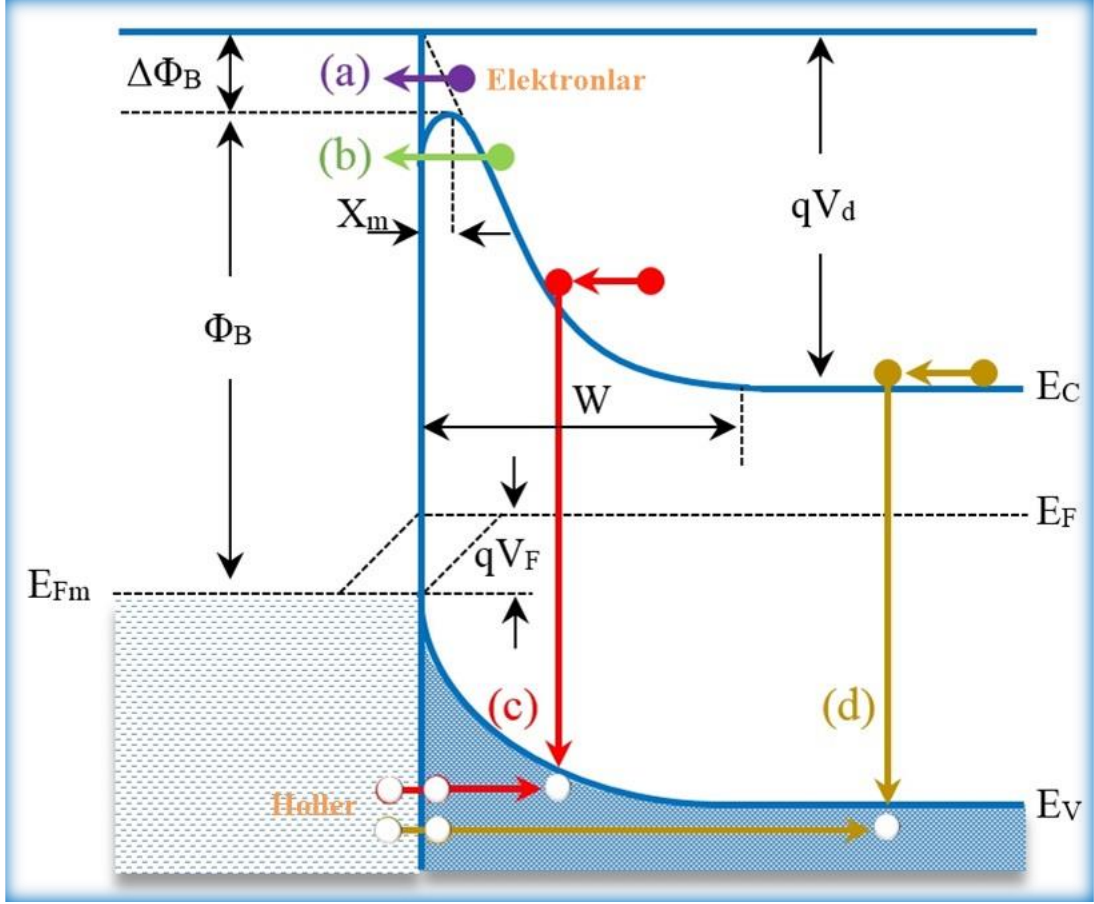
b) Kuantum Mekaniksel Tünelleme: Termiyonik Alan Emisyonu ve Alan Emisyonunun etkin olduğu iletim mekanizmasıdır ki bu mekanizma daha çok düşük sıcaklıklarda ve yüksek katkıli yarıiletkenlerde belirgin bir şekilde etkisini ortaya koymaktadır. Burada yüksek katkıli yarıiletkenden kasıt, katkı atom yoğunluğunun 10^{17} cm^{-3} 'ten büyük olması durumudur. Bu iletim mekanizması literatürde ayrıca Difüzyon Mekanizması olarak da bilinmektedir.

c) Uzak yük bölgesinde rekombinasyon mekanizmasını göstermektedir.

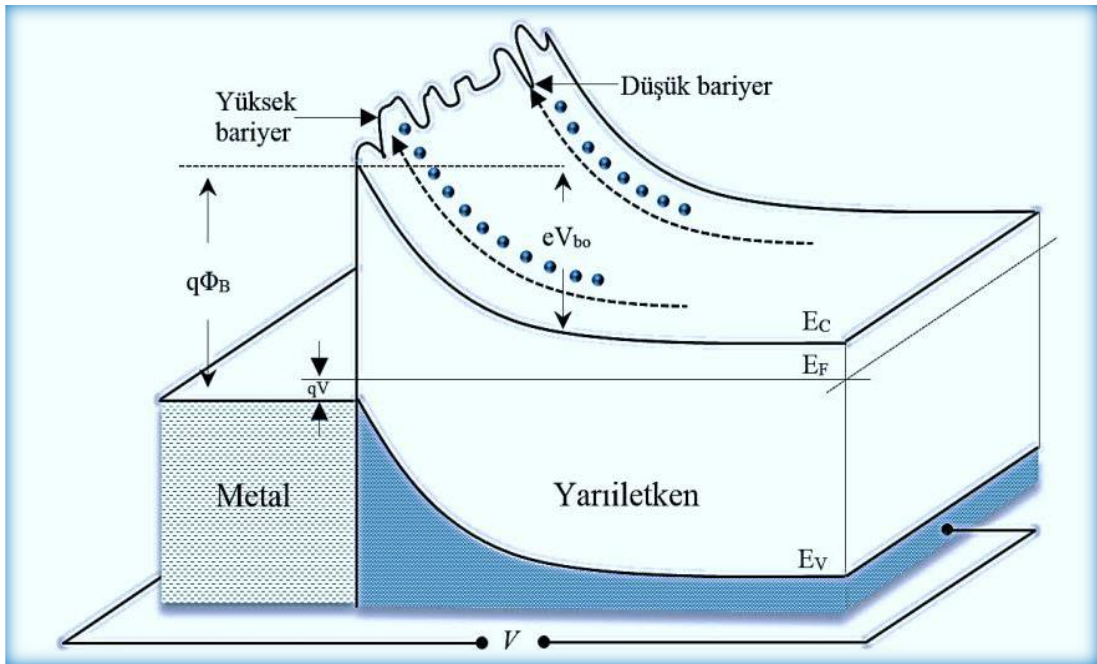
d) Elektron veya hol için enjeksiyon mekanizmasını göstermektedir.

İdeal şartlarda TE neredeyse tamamen etkindir ve dolayısıyla böyle bir durumda idealite faktörü, $n=1$ 'dir. Ancak diğer mekanizmaların etkin olduğu özellikle de tünelleme ve uzak yük bölgesindeki rekombinasyonun etkin olduğu durumlarda ideallikten sapmalar meydana gelmektedir. İdeal durumdan sapmaya sebep olabilecek diğer akım taşıma mekanizmaları ise T_0 etkisi ve Gaussian Dağılımı'dır. T_0 etkisi daha çok sıcaklık değişimi ile ilgili bir iletim mekanizmasıdır.

Bethe tarafından ortaya konulan TE teorisi, metal ve yarıiletken malzemeler arasında oluşan bariyeri tanımlarken bariyerin tüm yüzeylerde aynı yüksekliğe sahip olduğunu varsaymıştır. Bariyer yüksekliğinin sıcaklık, ışık ve radyasyon gibi etmenlere bağlı olması aslında idealite faktörünün etkilendiği diğer etmenleri açığa çıkarmaktadır. Öte yandan, MS arayüzeyinde özellikle üretim aşamasında oluşan pürüzler metal ile yarıiletken tabaka arasında termal denge sonrası meydana gelecek olan bariyer yüksekliğinde farklı yükseklikteki bariyerlerin oluşmasına sebebiyet verecektir ki bu durum Gaussian Dağılımı olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.4. MS yapılarındaki temel akım-iletim mekanizmaları [57].

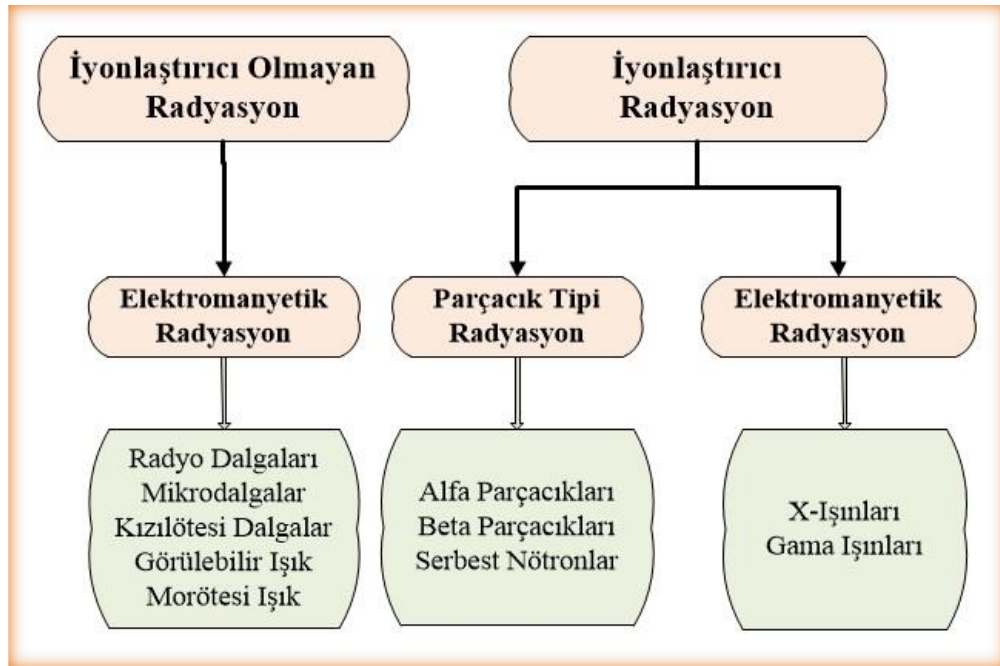


Şekil 2.5. MS yapılarındaki bariyer homojensizliğinin temsili görünümü [58].

BÖLÜM 3

RADYASYON VE ETKİLERİ

Radyasyon, radyoaktif bozunmaya uğrayan kararsız atomlardan enerji dalgaları veya enerjili parçacıklar şeklinde yayılan bir enerji türüdür. Bu tanım dikkate alındığında radyasyonun elektromanyetik dalga tipi radyasyon ve parçacık tipi radyasyon olmak üzere iki farklı çeşidi olduğunu anlayabiliriz. Elektromanyetik radyasyon, kütlesi olmayan elektrik ve manyetik dalgalar biçiminde yayılmakla birlikte enerjinin büyüklüğüne göre iyonlaştırıcı veya iyonlaştırıcı olmayan radyasyon biçiminde olabilmektedir. Parçacık tipi radyasyon ise kütlesi ve büyük miktarda enerjisi olan bir radyasyon türüdür. Dolayısıyla bu tür radyasyonların aynı zamanda iyonlaştırıcı radyasyon olduğunu da söylemek mümkündür. Şekil 3.1 iyonlaştırma durumuna göre radyasyon çeşitlerini, Şekil 3.2 ise dalga tipi radyasyonun frekansa ve dalga boyuna bağlı olarak elektromanyetik spektrumunu göstermektedir. Öte yandan, Şekil 3.3'te radyasyonun iyonlaştırma, frekans ve dalga boyu ilişkisi gösterilmiştir.

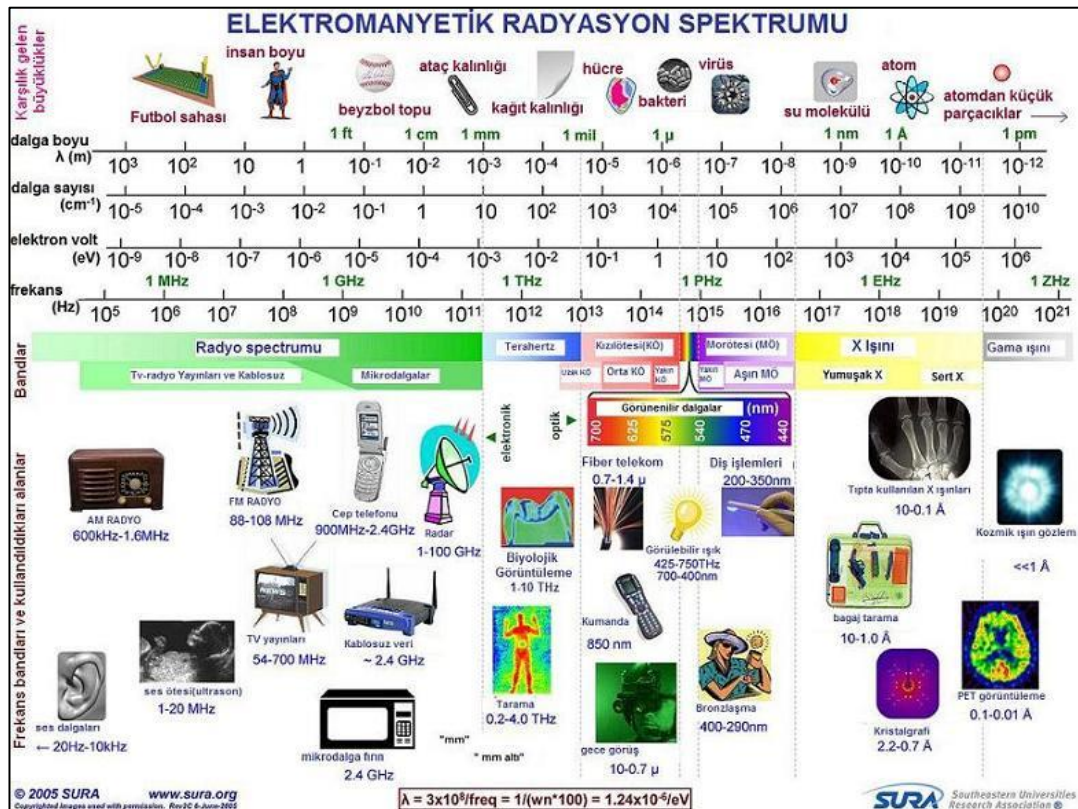


Şekil 3.1. Radyasyon çeşitlerinin iyonlaştırma durumuna göre sınıflandırılması.

İyonlaştırıcı olan ve olmayan radyasyonlar şu şekilde tanımlanmıştır [59]:

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, bir moleküldeki atomları hareket ettirmek veya titreşmelerine neden olmak için yeterli enerjiye sahiptir, ancak atomlardan elektronları çıkarmak için yeterli enerjiye sahip değildir. Radyo dalgaları, mikrodalgalar ve görünür ışık bu radyasyon türüne örnek olarak verilebilir.

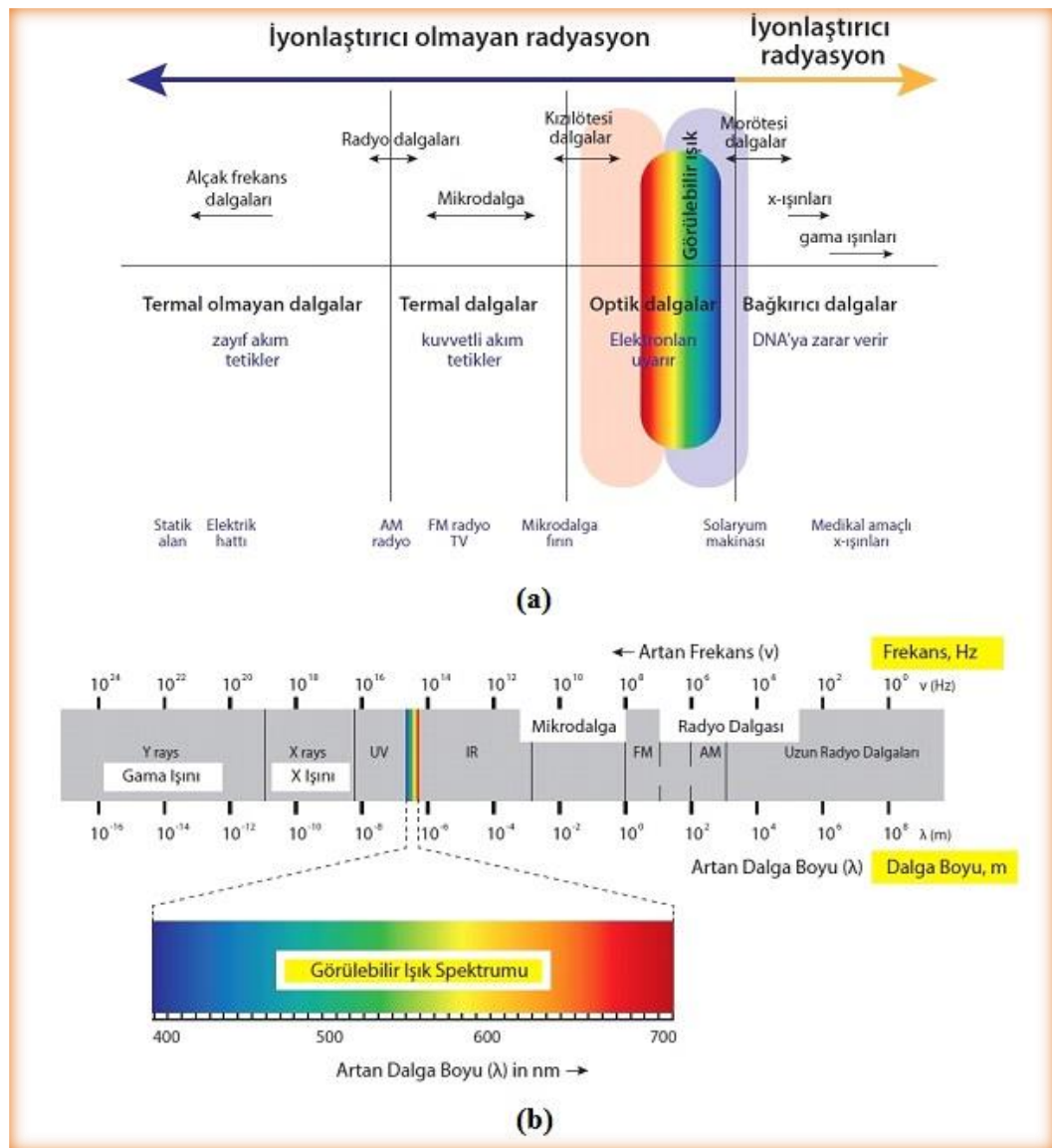
İyonlaştırıcı radyasyon ise elektronları atomlardan çıkarma yani iyonlaştırma sürecini yürütebilecek kadar büyük bir enerjiye sahiptir. İyonlaştırıcı radyasyon canlılardaki atomları da etkileyebileceği için genlerdeki doku ve DNA'ya zarar vererek sağlık riski oluşturabilmektedir. Cihazlardan yayılan x-ışınları, uzaydan gelen kozmik parçacıklar ve radyoaktif elementler iyonlaştırıcı radyasyona örnek olarak gösterilebilirler.



Şekil 3.2. Elektromanyetik radyasyon spektrumu [60].

Gama ışınlarının dalga boyları çok küçük ve enerjileri çok yüksektir ki bu da bu ışınların iyonlaştırıcı radyasyon grubu içerisinde olduğunu göstermektedir. Gama ışınları tahta, kâğıt ve ince alüminyum gibi tabakalardan kolayca geçebilirler.

Dolayısıyla da bu tip ışınların etki alanları oldukça geniştir. Bu ışınlar insanlar için sağlık riski taşımalarının yanı sıra nüfuz ettikleri elektronik aygıtların da çalışmalarını olumsuz etkileyebilmektedirler. Uzay uygulamalarının yanı sıra biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarda da gama ışınları var olabilmektedir. Bu yüzden bu uygulamalarda kullanılacak elektronik aygıt bileşenlerinin gama ışınlarının dozuna göre elektriksel karakteristiklerini anlamak önem teşkil etmektedir. Öte yandan, gama ışınlarının etkisi altında elektriksel karakteristikleri bozulmayan malzemelerin üretimi, bu alanlardaki uygulamaların güvenilirliğini de arttıracaktır.



Şekil 3.3. Radyasyonun iyonlaştırma, frekans ve dalga boyu arasındaki ilişkisi [61], a) iyonlaştırma durumuna göre, b) frekans ve dalga boyuna göre.

3.1. YARIİLETKEN MALZEMELERDE RADYASYON ETKİLERİ

Radyasyonun malzemeler üzerinde genel olarak kalıcı ve geçici olmak üzere iki önemli etkiye sahip olduğu bilinmektedir [25]. Bu etkilerden elektron-hol çiftlerinin oluşumu veya rekombinasyonu geçici etki olarak görülürken radyasyon bombardımanı nedeniyle malzemelerde meydana gelen kristal yapı bozukluğu/değişikliği ise kalıcı etki olarak değerlendirilmektedir. Diğer bir ifadeyle, radyasyona bağlı kusurlar, arayüzey tuzakları, sarkan bağlar ve yeniden kristalizasyon gibi durumlardan dolayı ışınlanmış numunelerin performansı önemli ölçüde etkilenmektedir [26,27].

MIS/MPS yapılarında radyasyondan en kolay etkilenen kısım arayüzey tabakası ve bu arayüzey tabakasının yarıiletken ile birleştiği kısımdır. Bir MPS yapısı radyasyona maruz bırakıldığında bu radyasyon etkisiyle yapıda elektron-hol çiftleri meydana gelecektir. Radyasyon uygulanan yapı, küçük bir direnç değerine sahip ise yarıiletken ve/veya metaldeki elektron-hol çiftleri hemen kaybolacaktır. Yani radyasyona bağlı olarak meydana gelen elektron-hol çiftlerinin bazıları yeniden birleşerek nötrleşeceklerdir. Elektron ve hollerin mobilitelerinin farklı olması sebebiyle arayüzey tabakası üzerinde bunların davranışları da aynı olmayacaktır. Bununla birlikte radyasyona maruz kalan bu yapılardaki doğal elektrik alanı sebebiyle birbirinden ayrılan elektron-hol çiftlerinin büyük bir kısmı farklı yönlerde doğru hareket edeceklerdir. Eğer bir MPS yapısı ileri yönlü bir gerilimle beslenirse, elektronlar hızla metale doğru hareket edecek ve çok kısa bir süre içerisinde buraya ulaşacaklardır. Öte yandan holler de yalıtkan/polimer-yarıiletken arayüzeyine ulaşmak için harekete geçeceklerdir. Bu esnada, arayüzeye yakın mesafede bulunan ancak mobiliteleri sebebiyle halen polimer tabakasını geçememiş olan bazı holler burada tuzaklanacaklardır. Dolayısıyla radyasyon sonrası polimer ile yarıiletken arayüzeyinde radyasyona bağlı olarak arayüzey tuzakları meydana gelecektir [62].

3.1.1. Yer Değiştirme Hasar Mekanizmaları

Kusurların Üretilmesi: Bir katı üzerine düşen enerjik parçacıklar, bir malzemedan geçerken iyonize olan ve olmayan süreçlerdeki enerjilerini kaybederler. Bu enerji kaybının sonucunda elektron-hol çiftleri (iyonizasyon) ve yer değiştirmiş atomlar (yer

değiştirme hasarı) ortaya çıkmaktadır. Böylece oluşan ilk örgü kusurları, atom boşlukları ve arayer bozuklukları olacaktır. Atom boşluğu, normal örgü konumunda bir atomun olmaması durumudur. Yer değiştiren bu atom örgüsüz bir konuma hareket ederse, ortaya çıkan kusura da arayer bozukluğu denir. Bir atom boşluğu ve komşu bir arayer atomu kombinasyonu, yakın-çift veya Frenkel-çifti olarak bilinmektedir. Diğer yandan, bitişik iki atom boşluğu, çift-boşluk denilen bir kusur oluşturur. Işınlanmış silikonda, daha büyük lokal atom boşluğu grupları da meydana gelebilir. Atom boşlukları ve arayer bozuklukları, safsızlık atomlarına bitişik olduğunda ek kusur türleri de oluşabilmektedir. Bununla birlikte, ışınlanmış malzemelerde üretilen kusurların yoğunluğu düşünülecek olursa bir uçta, radyasyona bağlı kusurlar kısmen uzaktadır ve nokta kusurları veya izole kusurlar olarak adlandırılmaktadır ki 1 MeV mertebesindeki enerjili elektronlar ve fotonlar bu tür kusurları üretmektedir. Bir diğer uçta, kusurlar nispeten birbirine yakın olarak üretilebilir ve yerel bir bozukluk bölgesi oluşturabilirler ki buna da literatürde kusur kümesi veya düzensiz bölge ismi verilmektedir. Genel olarak ifade etmek gerekirse, gelen enerjik parçacıklar, yalıtılmış ve kümelenmiş kusurların bir karışımını üretebilmektedir diyebiliriz [63].

Kusurların Yeniden Sıralanması: Radyasyona bağlı olarak ortaya çıkan kusurlar daha kararlı konfigürasyonlar oluşturmak için yeniden sıralanırlar. Örneğin, silikondaki atom boşluğu kararsız bir kusurdur ve oda sıcaklığında oldukça hareketlidir. Dolayısıyla atom boşlukları netleştikten sonra, kararlı kusurların oluşması için bu boşluklar örgü boyunca hareket ederler ve çift-boşluk veya boşluk-safsızlık kompleksleri üretirler. Kusurların etkinliği, spesifik kusurların doğasına ve belirli bir sıcaklıkta kusur oluşumundan sonraki süreye bağlıdır. Kusurların yeniden sıralanması aynı zamanda sıcaklığa (yani termal tavlamaya) ve taşıyıcı konsantrasyonunun varlığına (yani enjeksiyon tavlamaya) bağlıdır [63].

3.1.2. Yer Değiştirme Hasar Mekanizmalarının Ortaya Çıkardığı Etkiler

J. R. Srour ve arkadaşları tarafından 2003 yılında sunulan bir gözden geçirme makalesinde [63], yer değiştirme hasar mekanizmalarının malzemeler üzerindeki etkileri, genel olarak partikül tipine, partikül enerjisine, ışınlama ve ölçüm sıcaklığına, ışınlamadan sonraki süreyle birlikte bu zaman dilimindeki sıcaklık geçmişine,

enjeksiyon seviyesine, yarıiletkenin türüne (n- veya p-tipi) ve safsızlık tipine/konsantrasyonuna bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Aynı çalışmada Srour ve arkadaşları, hasar mekanizmalarının sekiz etkisinden bahsetmişlerdir. Bu etkileri aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

Birinci etki, orta boşluğa yakın bir seviyede elektron-hol çiftlerinin termal üretimiyle sonuçlanan bir etkidir. Bu işlem, bağlı bir valans-bant elektronunun kusur merkezine termal uyarılması ve daha sonra bu elektronun iletim bandına uyarılması olayıdır. Dolayısıyla, bu etki serbest bir elektron-hol çiftinin oluşturulması olarak düşünülebilir. Bu olay, özellikle tüketim bölgesinde daha fazla etkilidir. Bu mekanizma, silikon cihazlarda kaçak akımlarının artmasıyla sonuçlanmaktadır.

İkincisi, elektron-hol çiftlerinin rekombinasyonu ile sonuçlanan bir etkidir. Bu olay, önce taşıyıcılardan birinin (elektron veya hol) kusur merkezi tarafından yakalanması ve ardından diğer bir taşıyıcının yakalanması ile gerçekleşir. Rekombinasyon, üretim sürecinin aksine elektron-hol çiftlerinin azalmasına sebep olur. Rekombinasyon hızı genel olarak kusur veya rekombinasyon merkezi yoğunluğu, serbest taşıyıcı konsantrasyonu, elektron-hol yakalama kesitleri ve enerji seviyesinin konumuna bağlı olarak değişebilmektedir.

Üçüncü etki, taşıyıcıların sığ bir seviyede geçici olarak tuzaklanması olayıdır. Bu süreçte, bir taşıyıcı bir kusur merkezinde yakalanır ve daha sonra rekombinasyon olayı meydana gelmeden bandına gönderilir. Bu olayda hem çoğunluk taşıyıcıları hem de azınlık taşıyıcıları genel olarak ayrı seviyelerde tuzaklanabilir. Radyasyona bağlı bu tuzaklar, bazı cihazlarda iletim veriminin düşmesine sebep olabilmektedir.

Dördüncüsü, verici veya alıcıların radyasyona bağlı merkezler tarafından dengelenmesiyle sonuçlanan bir etkidir. Örneğin, n-tipi bir malzemede, radyasyona bağlı alıcılar, verici seviyesinden temin edilebilen bazı serbest elektronları telafi eder. Sonuç olarak, çoğunluk-taşıyıcı konsantrasyonunun dengesinde bir azalma olur.

Beşinci etki, taşıyıcıların kusur seviyeleri vasıtasıyla potansiyel bir engelden tünellenmesi olayıdır. Bu kusur-destekli (tuzak-destekli) tünelleme işlemi, bazı durumlarda cihaz akımlarının artmasına neden olabilmektedir.

Altıncı etki, radyasyona bağlı kusurların saçılma merkezleri olarak rol oynaması sonucunda taşıyıcı mobilitesinin azalması olayıdır. Bu süreçte mobilite, artan iyonize safsızlık konsantrasyonu ile azalmaktadır. Benzer bir şekilde, radyasyona bağlı kusurların artması da mobilitenin azalmasına neden olabilmektedir. Bu etki, özellikle oda sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda ortaya çıkmaktadır.

Yedincisi, yer değiştirme hasarına bağlı taşıyıcıların çıkarılması nedeniyle tip dönüşümü etkisidir. Örneğin, germanyumda, alıcıların yenilenmesi, n-tipi bir malzemenin direncinin artmasına neden olur ki bu da p-tipi bir malzeme dönüşümüne yol açar. Normal şartlarda silisyumda tip dönüşüm olayı gerçekleşmez. Ancak, özellikle yüksek enerjili parçacıkların tespiti için kullanılan pn-birleşimli silisyum cihazlarında tüketim bölgesinde tip dönüşüm olayı gerçekleşebilmektedir.

Sekizinci etki, taşıyıcıların termal üretimi için artırılmış etkinliktir. Bu etki, kusurlar yüksek bir elektrik alanı içeren bir cihaz bölgesinde bulunduğu ortaya çıkar. Termal üretim için potansiyel bariyerin azalması bu etkiye sebep olan bir mekanizmadır. Bu etki aynı zamanda, Poole-Frenkel etkisi olarak da bilinmektedir.

Bu durumda, genel olarak ifade etmek gerekirse radyasyon, bant-boşluğundaki radyasyona bağlı seviyeler, elektron-hol çiftlerini üretimi veya rekombinasyonu, yüklerin tuzaklanması, serbest taşıyıcıların dengelenmesi, tünelleme, saçılma, tip dönüşümü ve taşıyıcı üretim etkinliğinin artırılması gibi çeşitli etkilere yol açabilir. Bu etkilerden birkaçının kombinasyonu veya hepsinin aynı anda gerçekleşmesi de mümkündür. Belirli bir seviyenin oynadığı rol, taşıyıcı konsantrasyonu, sıcaklık ve içinde bulunduğu cihaz bölgesi (tüketim bölgesi vb.) gibi değişkenlere bağlıdır.

3.2. GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE RADYASYON ÇALIŞMALARI

Son yirmi yıldan daha önceki çalışmalar, yarıiletken malzeme ve cihazlarda radyasyona bağlı yer değiştirme hasarının etkileri hakkında tarihsel bir literatür incelemesini içeren bir gözden geçirme makalesinde sunulmuştur [63]. Bu çalışmada özet olarak, aşağıdaki gelişmelerden bahsedilmiştir.

Wigner ve arkadaşları, 1940'ların başında ışınlanmış malzemelerde yer değiştirme hasarının teorik ve deneysel çalışmalarını yaptılar [64]. Çalışmalarında, özellikle teknolojik öneme sahip malzemeler üzerindeki radyasyon etkilerine büyük ilgi gösterdiler. Diğer yandan, Purdue Üniversitesi ve Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'ndaki bilim adamları, 1948-1950 yıllarında, yarıiletken germanyum malzeme ve cihazlarında radyasyona bağlı yer değiştirme hasarının ilk çalışmalarını ve ardından Bell Telefon Laboratuvarlarında ilgili Ge çalışmalarını gerçekleştirdiler [65–68]. Yine, Johnson ve Lark-Horovitz, silikon malzemeler ve cihazlarda yer değiştirme hasar etkileri üzerine ilk çalışmayı 1949 yılında açıkça ortaya koydular [67]. Bu konu 50 yıldan daha fazla bir süre ilgi çekmeye devam etti.

Malzeme ve cihaz bozulmasına sebebiyet veren kusurların tanımlanması ve karakterizasyonu, yer değiştirme hasarı üzerine yapılan ilk çalışmalarda üzerinde durulan konular olmuştur. Bu karakterizasyonun önemli bir kısmı, bant aralığındaki enerji seviyesi konumlarını ve yakalama kesitleri gibi diğer kusur özelliklerini tanımlama ile ilgiliydi. Curtis, ışınlanmış yarı iletkenlerdeki izole kusurlar için bu hatlar üzerindeki ilk çalışmaları gözden geçirdi [69].

Farklı parçacıklarla ışınlanan yarıiletken malzemelerin elektriksel özellikleri üzerindeki etkilerin benzerlikleri ve farklılıkları, çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalardan ortaya çıkan temel bir tema olmuştur. Bu konudaki başlıca örnekler, atom parçalanması veya 14 MeV nötronları tarafından üretilen etkilerin 1 MeV elektronları veya ⁶⁰Co-gama ışınları tarafından üretilen etkiler ile karşılaştırılmasını içeren çalışmalar olmuştur. 1950'ye kadar, yarıiletkenler üzerindeki tüm radyasyon etkileri, izolasyon (Frenkel) kusurlarına bağlanarak yorumlanmıştı. Ancak, 1959 yılında yapılan bazı çalışmalar, safsızlık türü ve konsantrasyonun

radasyon etkileri üzerindeki önemini açıkça ortaya koymuştur [70–72]. Bu çalışmalar, oksijen ve fosfor boşluğu kompleksi gibi safsızlıkları içeren kusurların etkin rolünün bilinmesini sağlamıştır. Yine aynı tarihte Gossick ve arkadaşları, yalıtılmış kusurlar tarafından üretilen etkiler ile daha yakın aralıklı veya kümelenmiş kusurlar tarafından üretilen etkiler arasındaki farkları açıklamak için bir model önerdiler [73,74].

Gereth ve arkadaşları, 1965'te tek parçacık olayından kaynaklanan yer değiştirme hasarının silikon cihazlar üzerindeki etkilerinin ilk raporunu sunmuşlardır [75]. Çığ diyotlarını, fisyon nötronları ve 2 MeV elektronları ile ışınlayarak ortaya çıkan etkileri araştırmışlardır. Bu iki olgu arasında cihaz davranışında kayda değer farklılıklar gözlemlenmişlerdir. Diğer yandan, Gregory ışınlanmış silikonda enjeksiyon tavlama ile ilgili temel makaleyi aynı yıl içerisinde yayınlamıştır [76]. Gregory bu çalışmasında, malzemeye elektronların enjekte edilmesiyle p-tipi Silisyumda gama ışınının tavlama etkisiyle üretilen nokta kusurların olduğunu göstermiştir.

Daha yakın yıllardaki (1987-1999) çalışmalar, birincil vuruntulu atomlara verilen yer değiştirme hasarı enerjisi miktarının hesaplanmasına dayanarak birçok tipteki cihazın (örneğin, bipolar transistörler, güneş pilleri, dedektörler gibi) radyasyon tepkisinin makul bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermiştir [77–80]. Ayrıca, uzayda olduğu gibi pratik açıdan ilgili radyasyon ortamlarını tamamen simüle etmek için parçacık hızlandırıcıların kullanılması mümkün olmadığından, çeşitli yarıiletkenlerde olay parçacık enerjisine karşı iyonlaştırıcı olmayan enerji kaybı (NIEL) oranını tanımlayan bir fonksiyonun geliştirilmesi önemliydi. Bu gelişme, uzay ve diğer uygulamalar için yörünge davranışını tahmin etmek için monoenerjetik parçacık testinin kullanılmasına izin vermiştir [81–84]. Dolayısıyla, bu yıllarda yarıiletkenler üzerine yürütülen NIEL çalışmaları, radyasyon hasarının fiziksel modellerinin ve yarıiletken cihaz davranışı üzerindeki etkilerinin geliştirildiği radyasyona bağlı kusur çalışmalarına dayanmıştır.

2000'li yılların başlarına kadar yürütülen radyasyon çalışmaları yine J. R. Srour'un gözden geçirme makalesine göre [63] şöyle özetlenebilir: Modern yer değiştirme hasarı çalışmaları 1940'larda başladı. Bu erken çalışmalarda ve 1950'lerde iletkenlik, hareketlilik, taşıyıcı ömrü ve bipolar transistör kazancı üzerindeki etkiler dahil olmak

üzere diğer birçok çalışmada yarıiletken malzeme ve cihaz özelliklerinde değişiklikler gözlemlendi. Radyasyona bağlı bu değişiklikler, safsızlıkla ilgili kusurların öneminin ortaya çıktığı 1950'lerin sonlarına kadar Frenkel kusurlarına dayanılarak yorumlandı. 1950'lerin sonlarından 1970'lerin başına kadar geçen süre boyunca, farklı parçacık türleri ve enerjilerinin ürettiği yer değiştirme hasarı etkilerini karakterize etmek ve modellemek için büyük çaba harcandı. Bu farklılıkların erken gözlemleri, daha sonra Gregory ve Curtis tarafından genişletilen Gossick küme modelinin geliştirilmesine yol açtı. Bu model ve uzantıları, yer değiştirme hasarı etkilerinin ve ilgili fonksiyonel bağımlılıkların ayrıntılı ölçümleri için en azından niteliksel olarak iyi bir şekilde çalışan hesaplama olanakları sundu. Yer değiştirme hasarının iyonlaştırıcı olmayan enerji kaybı ile korelasyonu, 1960 ve 1970'lerde yukarıdaki çabalara paralel olarak sürdürülerek 1980'lerde tekrar gözden geçirildi. Bu konu pratik önemi nedeniyle günümüzde halen ilgi çekmeye devam etmektedir. 1990 sonları ile 2000'li yılların başındaki mevcut çalışmalar ise şu eğilimdeydi: 1) Radyasyona bağlı bozulmanın tahmin edilebilmesi için NIEL korelasyonunun çeşitli cihazlara ve cihaz özelliklerine, ilgili uygulamalarda (uzay gibi) bir mühendislik aracı olarak uygulanması; 2) Farklı parçacık türleri ve enerjilerinin cihaz özellikleri üzerindeki etkileri arasındaki benzerlik ve farklılıkların daha iyi bir şekilde modellenmesi ve karakterizasyonu; 3) NIEL korelasyonunun başarılı ve daha az başarılı örneklerinin araştırılması.

CERN-RD48 işbirliği, 1996'dan bu yana ışınlanmış Si ve Si-tabanlı cihazlarda yer değiştirme hasar mekanizmaları ve etkileri üzerine önemli çalışmalar ortaya koymuştur [85]. CERN-RD48 çalışmaları, CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) projesi gibi yüksek enerjili fizik uygulamaları için radyasyona dayanıklı detektörlerin geliştirilmesine vurgu yaptı. RD48'in 2000'li yılların başındaki önemli çalışmaları [86] ve [87] referanslarında özet olarak sunulmuştur. RD48 işbirliği ve bunun varisi olan RD50, araştırılmış ve daha fazla anlaşılmaya ihtiyaç duyulan yer değiştirme hasar çalışmalarının birçoğunu çalışmaya devam etmektedir [88].

Son 20 yıl içerisinde yarıiletken-tabanlı malzeme ve cihazların radyasyon etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için farklı çalışmalar ve analizler yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalardan önemli olanları aşağıda özet olarak sunulmuştur.

2001 yılında M. Ashry ile S. A. Fayek [12] ve 2002 yılında ise M. Y. Feteha ve arkadaşları [10] farklı yapıdaki güneş hücrelerinin radyasyon etkisini araştırmış ve değerlendirmişlerdir. M. Ashry ve S. A. Fayek yaptıkları deneysel çalışmada, 300 Mrad γ -ışını ve 380 Mrad elektron ışınlarında kısa devre akımı (I_{sc}) ve açık devre geriliminin (V_{oc}) görünür bir şekilde azaldığını ancak malzemede kalıcı bir etki ortaya çıkarmadığını gözlemlemişlerdir. M. Y. Feteha ve arkadaşları ise MIS tipi bir güneş hücresini 500 Mrad dozuna kadar ışınlayarak ışınlama sonrası tüm parametrelerde bozulma olduğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte arayüzey durumlarında radyasyon dozlarının artışına bağlı olarak artma olduğunu görmüşlerdir.

Umana-Membreno ve arkadaşları, 2003 yılında, ^{60}Co gama ışınının Nikel/n-GaN SD'leri üzerindeki etkisini inceleyen önemli bir çalışmayı sunmuşlardır [11]. Bu çalışmada, gama ışınlarının SD'ler üzerindeki etkisini anlamak için I - V , C - V ve DLTS ölçümlerinden faydalanmışlardır. Sonuç olarak, artan radyasyon dozuyla kaçak akımların ve C - V ölçümlerinden elde edilen bariyer yüksekliğinin arttığını görmüş olmalarının yanında ileri beslem akımlarında radyasyona bağlı olarak önemli bir değişim olmadığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte DLTS ölçümlerinden faydalanarak radyasyondan kaynaklı 88, 104 ve 144 meV termal aktivasyon enerjisine sahip üç hasar merkezi tespit ederek bunu azot atom boşluklarına atfetmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında, GaN'nin doğası gereği radyasyona dayanıklı bir malzeme olduğuna da vurgu yapmışlardır. Aynı yıl T. R. Oldham ve F. B. McLean, MOS oksitlerde ve cihazlarda toplam iyonize doz etkileri üzerine bir literatür makalesi yayınlamışlardır [89]. Bu çalışmada, iyonlaştırıcı radyasyonun MOS oksitler ile yük üretimi, taşınması, yakalanması ve ayrıştırılması ile arayüzey tuzağı oluşumu gibi etkileşimlerin temel fiziksel mekanizmalarını gözden geçirmişlerdir. Ayrıca, cihaz ve devre etkilerini de bu makalenin tartışma konusu kapsamına almışlardır.

2006-2008 yıllarında A. Tataroğlu ve Ö. Güllü çeşitli MS, MIS ve MPS tipi yapıların radyasyon etkilerini incelemişlerdir [25,30,90–92]. Bu çalışmalarda, farklı arayüzey tabakasına sahip ve/veya ara tabakası bulunmayan malzemelerin radyasyona karşı aynı tepkiyi vermediği açıkça ortaya konulmuştur. Ayrıca radyasyonun, elektrik ve dielektrik parametreleri üzerindeki etkileri de bu çalışmaların kapsamı içerisinde tutulmuştur. Seri direncin ve arayüzey durumlarının radyasyona bağlı olarak değişimi

gözlemlenmekle birlikte bu etkilerin malzemelerdeki önemi bu çalışmalarda vurgulanan diğer noktalar olmuştur. Dixit ve arkadaşları da bu yıllarda HfO₂-tabanlı MOSFET’lerde radyasyona bağlı yük tuzakları ile ilgili bir araştırma sunmuşlardır [93] ve 10 keV X-ışınlarında kayda değer yük tuzaklarının oluşmadığını görmüşlerdir.

Diğer önemli bir çalışma ise, “6-MeV elektron ışınlamasının Al/Al₂O₃/TiO₂/n-Si MOS kapasitörlerinin elektriksel karakteristikleri ve cihaz parametreleri üzerindeki etkileri” başlıklı makaledir [24]. 2012 yılında P. Laha ve arkadaşlarının yürüttükleri bu çalışmada, 12 adet kapasitör üretilerek saf, 10 kGy, 20 kGy ve 30 kGy dozlarında ışınlanan dört farklı gruptaki numuneler ele alınmıştır. İletim mekanizmasının elektron ışınlaması tarafından arayüzeylerin modifikasyonları ile kontrol edilebileceğine vurgu yapması, bu çalışmanın önemli sonuçlarından birisiydi. Çalışmanın sonuçlarından bir diğeri de 6-MeV elektron ışınının arayüzeyde, kristalleşmeye, kusurlara ve sarkan bağlarda değişikliklere neden olduğunu ve bunun elektriksel karakteristikleri etkilemesi ile sonuçlandığını ortaya koymasıydı.

2013 yılında ise J. R. Srour yine yaptığı bir gözden geçirme çalışması ile literatüre önemli bir katkı sağlamıştır [13]. Aynı yıl Khuram Ali ve arkadaşları, monokristalli Si güneş hücresinde radyasyonun sebep olduğu kusurları incelemek için farklı frekanslara dayalı C-V ölçümleri gerçekleştirmişlerdir [28]. Böylece Compton saçılma etkisi ve radyasyona bağlı kusurların varlığı, daha kapsamlı bir şekilde ortaya konulmuştur. Ancak güneş hücresi veriminin oldukça azaldığı, bu çalışmadaki gözlemlenen sonuçlardan biriydi.

Shammi Verma ve arkadaşları tarafından 2014 yılında Schottky diyotlarının gama etkisi altında elektriksel özelliklerinin iyileştirilmesine vurgu yapan makale, bu yılın dikkat çeken çalışmalarından biriydi [94]. İdealite faktörünün radyasyona bağlı olarak 17 Mrad dozuna kadar azalma göstermesi ve daha sonra artan dozla yeniden artmaya başlaması çalışmanın ilginç bir sonucuydu. Malzemedeki iyileşme etkisi, gama ışını fotonlarının elektronik enerji kaybına bağlı olarak arayüzey kusurlarını tavlınmasına atfedilmiştir. Aynı yıl, Şenol Kaya tarafından BiFeO₃ MOS kapasitörlerinin ve D. M. Tobnaghi tarafından güneş hücrelerinin gama etkisini inceleyen deneysel çalışmalar [3,42] yine dikkat çeken araştırmalardan bazıları olmuştur.

2015 yılında ise Surendra Singh Barala ve arkadaşlarının ayarlanabilir kapasitörlerin radyasyon etkisini incelemesi [95], literatüre önemli bir katkı sağlamıştır. Bu çalışma hem üretim yöntemleri açısından hem de 600 kGy gibi büyük bir radyasyon dozunda gözlem yapması bakımından önem teşkil etmektedir. Bu çalışmanın göze çarpan sonuçları şu şekildedir: 1) Tane boyutları ve kristallik, gama ışınlama dozlarına güçlü bir şekilde bağlıdır; 2) Yük taşıyıcılarının oluşumu ve yük taşıyıcıları için yol sağlayan çok sayıda kusur nedeniyle ile kaçak akım artan gama ışınlama dozları artmıştır.

A. Teffehi ve arkadaşları da takip eden yıl (2016) içerisinde Ti/Au/GaAs_{1-x}N_x yapısındaki Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerini radyasyona bağlı olarak incelemiştir [41]. Bu çalışmanın da farklı frekans ölçümlerine dayanması ve farklı azot katkılarına sahip Schottky diyotlarını incelemesi aynı malzemelerle üretilen yapının farklı katkılarla da olsa aynı tepkiyi vermediğini görebilmek açısından dikkate değerdir. Bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuca göre, %N (azot) içeriğindeki bir artış, seyreltilmiş azot yüzdesi yüksek olduğunda (%1,2 N), bir miktar telafi ile ışınlama hasarını engelleyebilmektedir.

2017 yılına gelindiğinde Saleh Abubakar ve arkadaşları tarafından “itriyum oksit (Y₂O₃) kapasitörlerinin gama ışınlama tepkileri ve radyasyon sensörlerinde ilk kullanım değerlendirmesi” başlıklı çalışma bu yılki makalelerden birisiydi [96]. Bu makalede, Y₂O₃'ün doğrusal doz performansı ve hassasiyeti olan radyasyon ölçüm sistemleri için, belirli doz aralığındaki radyasyon sensörleri için gelecek vadeden bir dielektrik malzeme adayı olabileceği açıklanmıştır. Aynı yıl E. Yılmaz ve arkadaşları da dozimetre olarak bilinen RadFET'in radyasyon tepkisini incelemişler ve bu malzemede, birkaç Gy'ye kadarki doğrusal bir yanıtın sonra radyasyona bağlı oksit tuzak yüklerinin elektrik alan taramasına bağlı olarak doğrusallıktan sapma eğilimi gösterdiğine vurgu yapmışlardır [97].

2018 ve 2019 yıllarında ise Savita Maurya ile Supriya Awasthi [98], Ramazan Sahin ile Ismail Kabacelik [4], Defne Akay ile arkadaşları [99], Şenol Kaya ile arkadaşları [100] ve Yannan Xu ile arkadaşları [9] yine literatüre katkı sağlayacak olan farklı malzemelerdeki radyasyon çalışmalarını sunmuşlardır.

BÖLÜM 4

DİYOTLARIN FABRİKASYONU VE ÖLÇÜM DETAYLARI

4.1. SCHOTTKY DİYOTLARINDA ÜRETİM SÜRECİ

Bu çalışmada, <100> yönelimli, 2" çapında, 300 µm kalınlığında ve alıcı atomlarının katkı oranı (N_A) $2,78 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olacak şekilde Bor katkılı p-Si plakası kullanılarak Al/(ZnO-PVA)/p-Si (MPS) tipi SD'ler hazırlanmıştır. Bu MPS tipi SD'lerin üretilmesi için sırasıyla aşağıdaki adımlar uygulanmıştır.

Yarıiletken plaka üzerindeki doğal oksit tabakasını ve diğer organik kirleri çıkarmak için imalat işleminden önceki ilk adım, bu plakalarının kimyasal olarak temizlenmesi işlemidir. Bu yüzden temizleme işleminin ilk aşaması olarak p-Si plakası, 55 °C asetatta 10 dakika süreyle temizlendi. Daha sonra 70 °C'deki $\text{H}_2\text{ONH}_4\text{OH}$ ve H_2O_2 (65:13:13 v/v) çözeltilerine daldırıldıktan sonra 18 MΩ özdirence sahip su ile 5 dakika boyunca durulandı. Temizleme işleminin son aşaması olarak da bu plaka saf azot (N_2) gazı ile kurutuldu.

Malzeme üretim sürecinin ikinci aşamasında, yüksek oranda saf olan Al (%99,999), 10^{-6} Torr basınç altında termal metal buharlaştırma sistemi kullanılarak p-Si plakasının arka yüzeyine 120 nm kalınlığında büyütüldü (örnek bir metal buharlaştırma sistemi Şekil 4.2'de gösterilmiştir). Daha sonra da iyi/düşük bir dirence sahip omik kontak elde edebilmek için, Si/Al plakası N_2 ortamında 450 °C'de 5 dakika süreyle tavlandı.

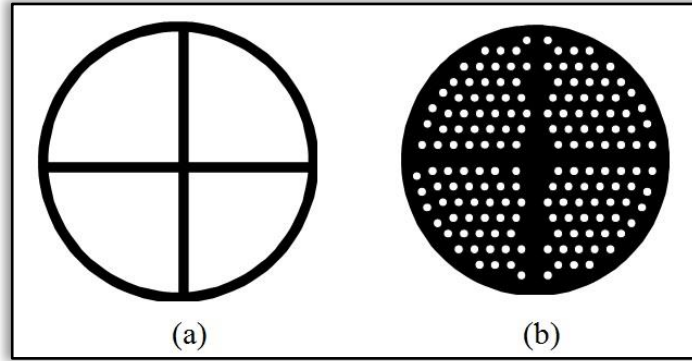
Üçüncü aşamada, hazırlanmış olan (ZnO-PVA) çözeltisi, p-Si plakanın ön yüzeyi üzerine spin kaplama tekniği kullanılarak büyütüldü (çözeltinin hazırlanma aşamaları ve spin kaplama tekniği aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır). Yarıiletken plakanın ön yüzeyine büyütülmüş olan bu organik tabakanın kalınlığı Nicollian ve Goetzberger yöntemi kullanılarak 81 Å olarak hesaplanmıştır. Bu yöntem göre, arayüzey

tabakasının kapasitans değeri (C_i), yeterince yüksek bir frekans değerinde ($f \geq 500$ kHz) ölçülmüş olan kapasitans ve kondüktansın güçlü birikim bölgesindeki değerlerinden (C_{ma} ve G_{ma}) elde edilebilmektedir. Bu metodun uygulanmasında aşağıda verilen eşitlikler kullanılmaktadır [101,102].

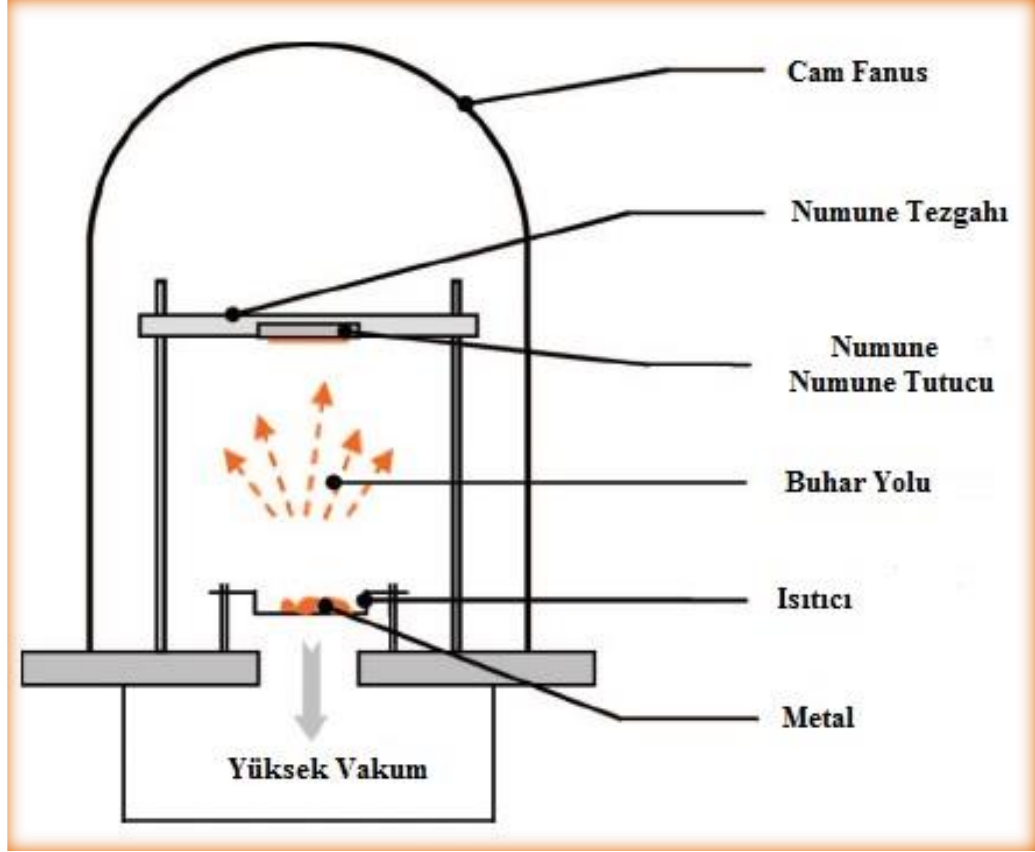
$$C_i = C_{ma} \left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] = \frac{\epsilon' \epsilon_o A}{d_i} \quad (4.1)$$

Burada, ϵ' (=8,5) arayüzey tabakasının dielektrik geçirgenliğini, ϵ_o (=8,85x10⁻¹⁴ F/cm) boşluğun dielektrik geçirgenliğini, ω (=2 π f) açısal frekansı, d_i arayüzey tabakasının kalınlığını ve A (=7,85x10⁻³ cm²) doğrultucu kontak alanını temsil etmektedir.

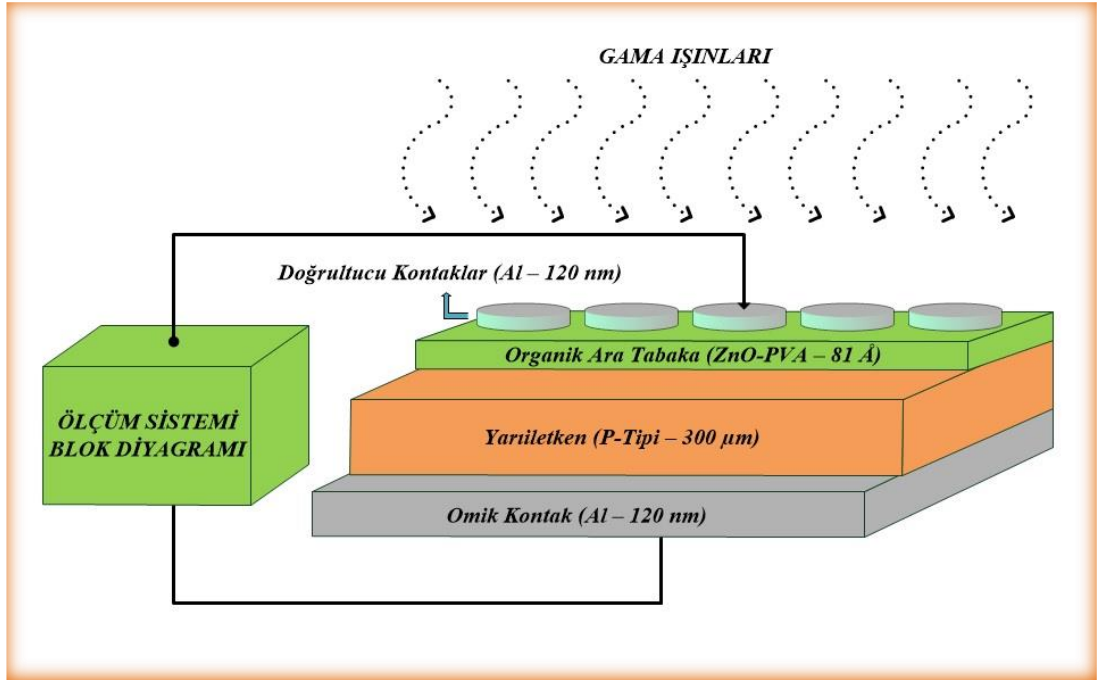
Fabrikasyon işleminin son aşaması ise doğrultucu kontakın oluşturulması işlemidir. Doğrultucu kontak elde edebilmek için polimer tabakası üzerine bir maske yerleştirildikten sonra (doğrultucu ve omik kontak için kullanılan maske örnekleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir) yine termal metal buharlaştırma sistemi kullanılarak yüksek saflıktaki Al bu maskenin bulunduğu yüzey üzerine buharlaştırılmıştır. Maskedeki boşluklar sayesinde doğrultucu kontak işlevini göreceğ olan 7,85x10⁻³ cm² kontak alanı sahip Al noktaları 120 nm kalınlığında polimer tabaka üzerinde büyütülmüştür. Böylece MPS tipi Al/(ZnO-PVA)/p-Si SD'lerinin üretim aşamaları tamamlanarak birçok diyot elde edilmiştir. Hazırlanmış olan diyotların temsili kesit görünümü ve ölçüm sisteminin blok diyagramı Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Omik ve doğrultucu kontaklarda kullanılan maske örnekleri [62].



Şekil 4.2. Örnek bir termal metal buharlaştırma sistemi [103].



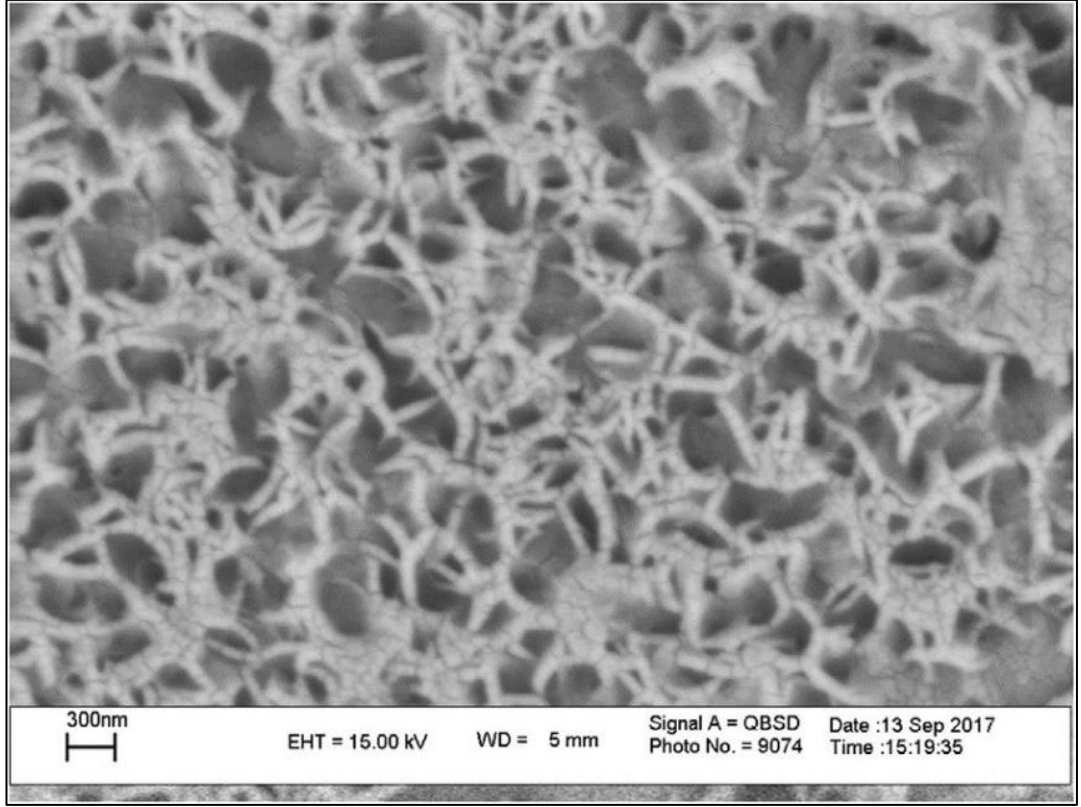
Şekil 4.3. Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi Schottky diyotlarının temsili kesit görünümü ve ölçüm sisteminin blok diyagramı.

4.1.1. ZnO-PVA Çözeltisinin Hazırlanması

ZnO-PVA çözeltisi elde edebilmek için ilk adım olarak ZnO nano-tanecikleri basit bir ultrason destekli yöntemle sentezlenmiştir. İkinci adımda ise ZnO nano-tanecikleri PVA oranı %5 olacak şekilde karıştırılmıştır. ZnO nano-taneciklerinin elde edilme aşamaları ve PVA ile karıştırma işlemi aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır [104].

ZnO nano-taneciklerinin sentezi için, sulu NaOH çözeltisi 20 ml saf su içinde ve çinko asetat dihidrat ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$; Safılık \geq %99) ise 20 ml çift damıtılmış su içinde çözüldü (NaOH çözeltisinin pH değeri 14 iken çinko asetat dihidrat çözeltisinin pH değeri 5'tir). Daha sonra NaOH çözeltisi, çinko asetat dihidrat çözeltisine ilave edildi ve eşit bir çözeltiye ulaşabilmek için ultrasonik banyoda dağıtıldı. Elde edilen bu çözelti, sürekli olarak 80 °C'de açık havada karıştırıldı ve 6 dakika boyunca yüksek yoğunluklu ultrasonikle ışınlandı. Bu işlemler on kez tekrarlandı. Bir sonraki aşamada, hazırlanan nano-tanecikler santrifüjlendi ve 5 kez damıtılmış su ile yıkandı. Yıkamadan sonra da oda sıcaklığında kurutulmuş beyaz bir $Zn(OH)_2$ tozu elde edildi. Son aşama olarak da $Zn(OH)_2$, 300 °C'de bir saat oksitlendi ve böylece ZnO nano-tanecikleri elde edildi. Elde edilen ZnO nano-taneciklerinin SEM görüntüsü Şekil 4.4'te verilmiştir. Görüntü, ultrason destekli yöntemle hazırlanan ZnO nano-taneciklerinin, yaklaşık olarak 52,38 nm genişliğindeki ve 76,33 nm uzunluğundaki solucana benzeyen nano yapılardan oluştuğunu göstermiştir.

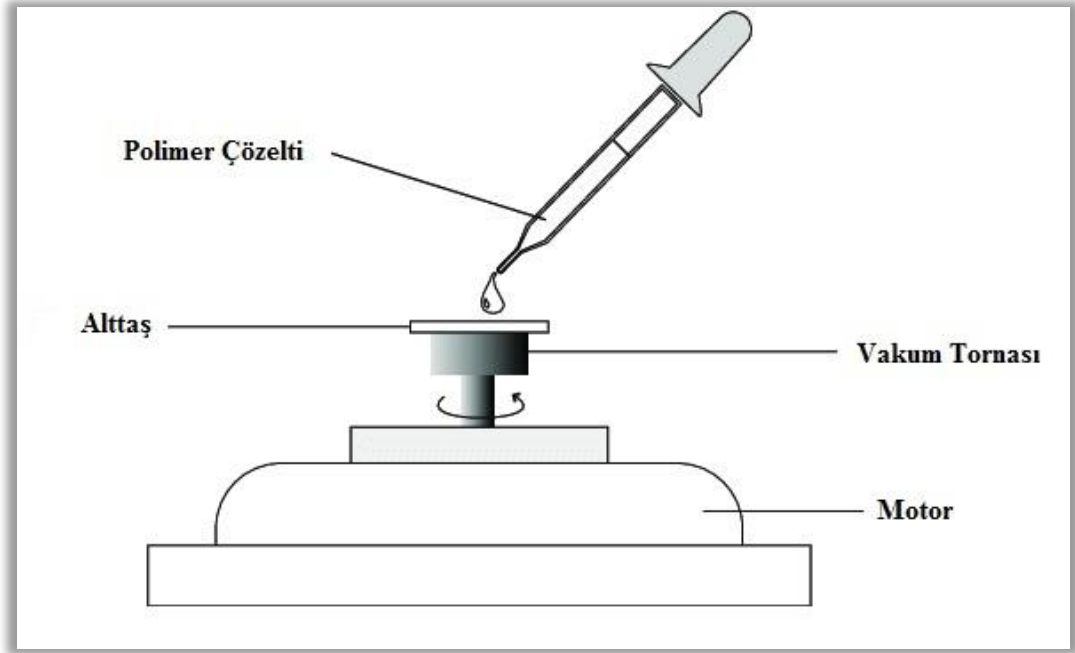
PVA'yı (ağırlık/hacim yönünden) %5 yapmak için 1,052 gr PVA tozu 80 °C'de 20 ml su içinde çözdürüldü. Daha sonra ZnO nano-taneciklerinin bir kısmı PVA %5 olacak şekilde bu çözeltiye dahil edildi. Böylece ZnO-(%5 PVA) çözeltisi elde edildi ki bu çözelti arayüzey tabakası olarak kullanılmak üzere yarıiletken (p-Si) plakasının ön yüzeyine spin kaplama tekniğiyle 81 Å kalınlığında büyütüldü.



Şekil 4.4. ZnO nano-taneciklerinin SEM görüntüsü [104].

4.1.2. Spin Kaplama Tekniği

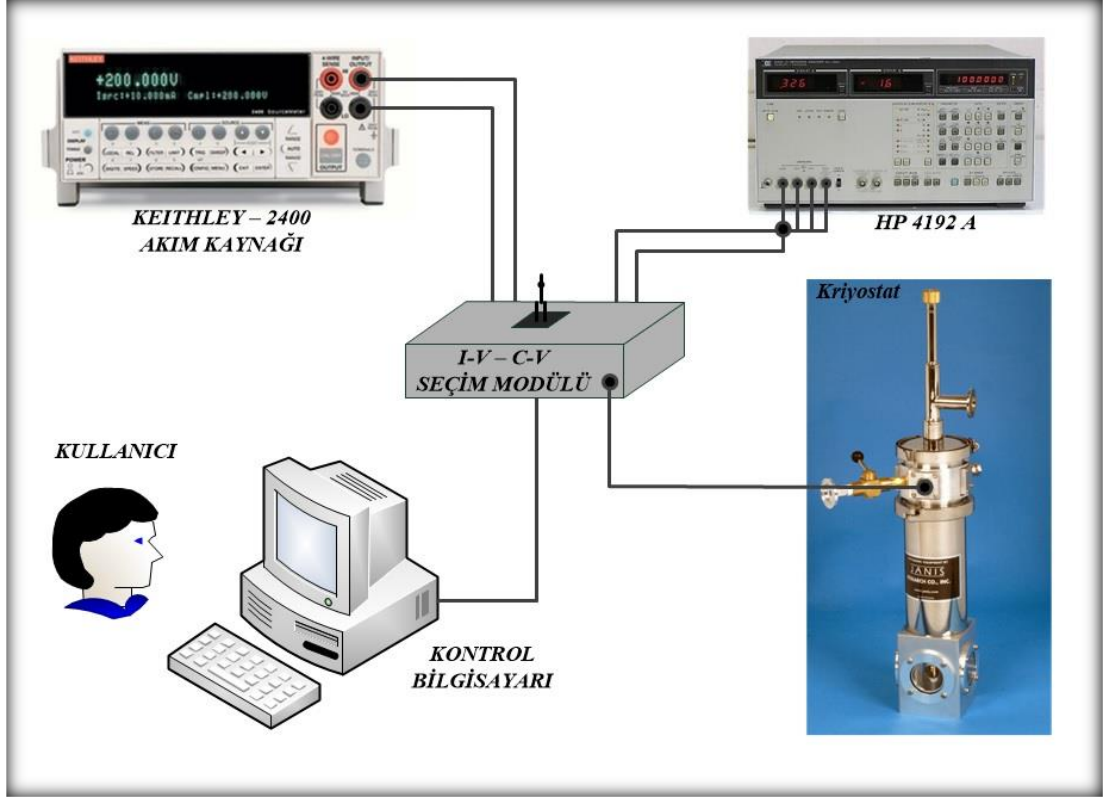
Yarı iletken endüstrisinde, bir plakayı ince bir polimer tabakası ile düzgün bir şekilde kaplamak için kullanılan yaygın yöntemlerden birisi de spin kaplama tekniğidir. İnce filmlerin büyütülmesi için kullanılan spin kaplama tekniği diğer hazırlama yöntemleriyle karşılaştırıldığında, teknolojik işlemlerin basitliği ve kullanılan malzeme ve ekipmanın düşük maliyeti gibi bazı önemli avantajlara sahiptir [105]. Bu sistemde vakum tornası ile yerinde sabit tutulan düz bir alıtış üzerine, yeterli miktarda polimer çözeltisi ilave edilir. Daha sonra mekanizma ayarlanmış bir frekansta belirli bir süre döndürülür. Böylece merkezkaç kuvveti sebebiyle sıvı yüzeye eşit olarak yayılır. Aynı zamanda uçucu çözücü buharlaşarak bir kısmı filmin üzerinde kalır. Elde edilen bu ince filmin kalınlığı viskoziteye, polimer konsantrasyonuna ve dönme frekansına bağlı olarak değişmektedir. Bu şekilde, nanometre seviyelerinden birkaç mikrometreye kadar film kalınlıkları gerçekleştirilebilir. Spin kaplama tekniğinin şematik gösterimi Şekil 4.5'te verilmiştir [106].



Şekil 4.5. Spin kaplama tekniğinin şematik gösterimi [106].

4.2. DENEYSEL ÖLÇÜM SİSTEMİ DETAYLARI

Fabrikasyon aşamaları yukarıda açıklanan Al/(ZnO-PVA)/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotlarının çeşitli dozlardaki gama ışınları altında davranışını incelemek için radyasyon öncesinde ve 0-60 kGy aralığındaki çeşitli radyasyon dozlarından sonra (1 kGy, 5 kGy, 10 kGy, 30 kGy ve 60 kGy) $I-V$ ve $C-G/\omega-V$ ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Olası dış etkileri ve gürültüyü ortadan kaldırmak için, bu ölçümler 10^{-3} Torr basınçta VPF-475 kriyostat içerisinde yapılmıştır. Geniş voltaj aralığındaki (± 4 V) $I-V$ ölçümlerini gerçekleştirmek için IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kartı kullanan bir bilgisayar ve Keithley 2400 akım kaynağından faydalanılmıştır. $C-V$ ve $G/\omega-V$ ölçümleri için de (5 Hz - 13 MHz) frekans aralığında ölçüm yapabilen Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analizörü kullanılmıştır. Ölçümleri gerçekleştirmek için kullanılan deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi.

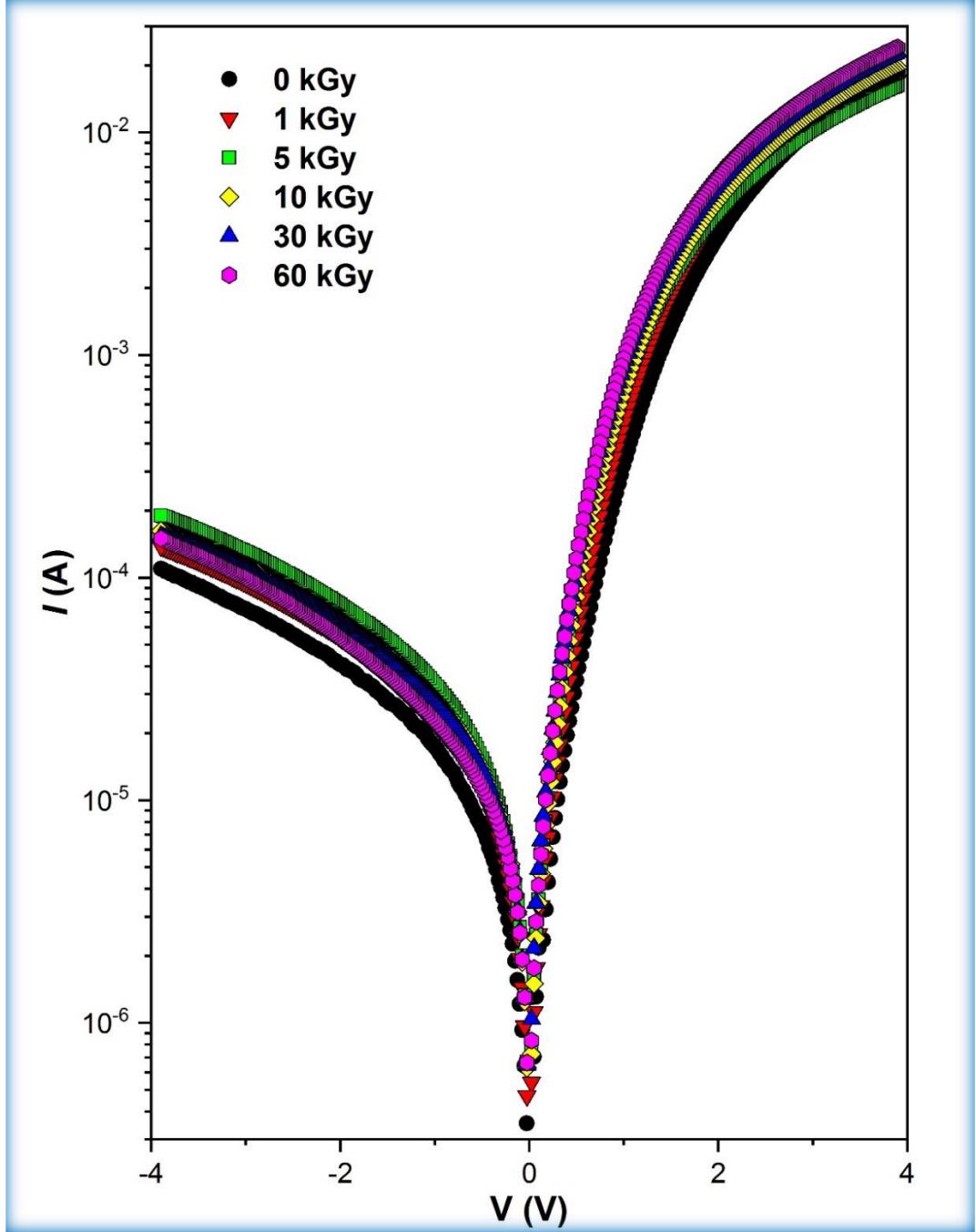
Radyasyonun etkilerini doğru bir şekilde anlayabilmek için ölçüm frekansının seçimi çok büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, fabrikasyon işleminden kaynaklanan arayüzey durumlarının etkisini ortadan kaldırılabilmek için $C-G/\omega-V$ ölçümleri 500 kHz frekansında gerçekleştirilmiştir. Önceki yıllarda frekansa bağlı olarak yapılmış olan bazı çalışmalar [14,104,107], üretime bağlı arayüzey durumlarının yeterince yüksek frekanslarda etkilerini kaybettiğini göstermiştir ($f \geq 500 \text{ kHz}$). Çünkü yükler ve arayüzey durumları düşük frekanslarda ac sinyali kolayca takip edebilmekte ve bu yüzden de kapasitans ve kondüktans değerlerinde değişikliklere neden olabilmektedir.

BÖLÜM 5

AKIMA BAĞLI PARAMETRELERDE RADYASYON ETKİLERİ

Radyasyonun malzemeler üzerindeki etkilerinin doğru ve kapsamlı bir şekilde anlaşılabilmesi için radyasyon öncesi ve sonrasında çeşitli ölçümlerin yapılarak analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD'lerin $C-V$ ölçümlerinin yanı sıra $I-V$ ölçümleri de alınmış ve bu ölçümler çeşitli yöntemlerle analiz edilmiştir. Radyasyon öncesi ile 1 kGy, 5 kGy, 10 kGy, 30 kGy ve 60 kGy dozundaki ^{60}Co gama-ışınlamasından sonra geniş bir voltaj aralığında (± 4 V) ve oda sıcaklığında (300 K) alınan $I-V$ ölçümlerinin grafikleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir. İleri ve ters beslem gibi ifadelerde anlam karmaşasına sebebiyet vermemesi adına $I-V$ ölçümlerinin akım ve gerilim değerleri eksi ile çarpılmış ve böylece ölçüm sonuçları n-tipi bir malzemeye benzetilerek gösterilmiştir. Yine, bu ölçümlerde ileri ve ters beslem akımlarının beraber değerlendirilebilmesi için akımlardaki ölçüm sonuçları logaritmik ölçek olarak gösterilmiştir. Öte yandan, akıma bağlı temel parametrelerin elde edilmesinde kullanılan logaritmik ileri beslem akımlarının ($\ln(I)-V$) lineer bölgeleri ise Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

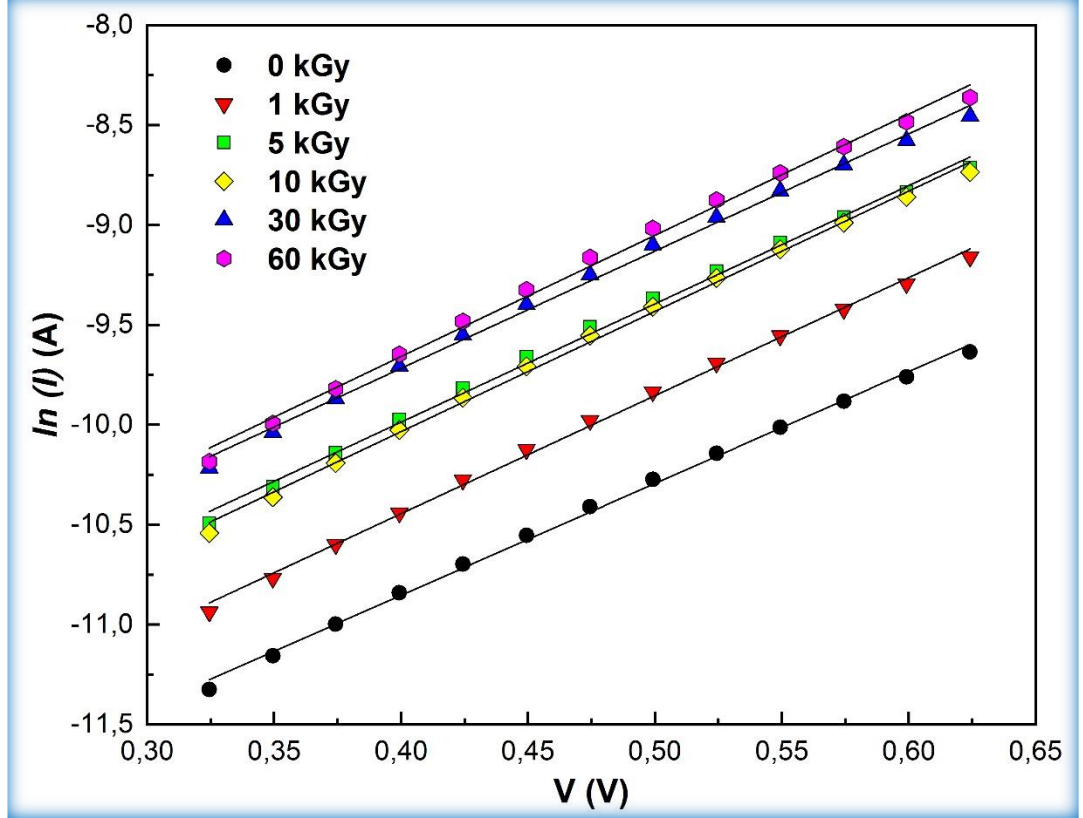
Şekiller incelendiğinde akımların radyasyon dozlarına bağlı olarak değişim sergilediği açık bir şekilde görülebilmektedir. Bu çalışmada, en yüksek dozdaki (60 kGy) gama-ışınlamasından sonra ters beslem akımlarında genel olarak bir artış gözlemlenmiştir. Ancak daha net bir şekilde ifade etmek gerekirse, ters beslem akımları 5 kGy radyasyon dozuna kadar artış eğilimindeyken, daha yüksek dozlarda azalma eğilimi göstermiştir. Dolayısıyla, 5 kGy dozundaki ışınlamadan daha yüksek dozlarda malzemede kısmi bir iyileşme gözlemlenmiştir ki bu davranışın yüksek dozlardaki gama-ışınlamasının tavlama etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. İleri beslem akımlarının ise 5 kGy dozuna kadar azalması ve daha büyük dozlarda artma eğilimi göstermesi de bu davranışın bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.1. Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD'nin radyasyona bağlı I - V grafikleri.

Ters beslem akımlarındaki herhangi bir artış, yeni yük taşıyıcılarının ve yarıiletkenin yakınındaki çok sayıda kusurun ortaya çıkmasıyla ilişkilendirilmektedir [93]. Çünkü bu kusurlar yük taşıyıcıları için yollar sağlarlar ve böylece akımlarda bir artışın ortaya çıkmasına sebebiyet verirler. Öte yandan, metal tarafından görülen bariyer yüksekliğinin azalması ve/veya yarıiletkenin yakınındaki rekombinasyon merkezleri

de bu artışların diğer nedenleri olabilir [43]. Ancak yine de gerçekleşen artış ve azalışların tam olarak nelerden kaynaklandığını anlayabilmek için I_0 , n ve Φ_{B0} gibi diğer bazı diyot parametrelerinin elde edilmesi gerekmektedir ki ilgili parametreler, ileri beslem $\ln(I)$ - V grafiklerinin lineer bölgesinden elde edilebilmektedir.



Şekil 5.2. Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD'de $\ln(I)$ - V grafiğinin lineer bölgesi.

Bir gerilim altındaki SD akımlarının Denklem 5.1 ile verilebileceği literatürde iyi bilinmektedir [16]. Burada I_0 ters doyum akımını temsil eder ve formülü Denklem 5.2 ile verilir. Diğer yandan, n idealite faktörünü, k Boltzmann sabitini ($1,38 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹) ve T Kelvin cinsinden sıcaklığı temsil etmektedir. I_0 denklemindeki ifadeler için de A doğrultucu kontak alanına ($7,85 \times 10^{-3}$ cm²), A^* etkin Richardson sabitine (p-tipi Si için $A^* = 32$ A.cm⁻²K⁻²) ve Φ_{B0} da sıfır-beslem bariyer yüksekliğine karşılık gelmektedir.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5.1)$$

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (5.2)$$

Bu denklemler kullanılarak n ve Φ_{B0} parametreleri çekilebilir. Böylece bu parametrelerin formülleri de sırasıyla Denklem 5.3 ve Denklem 5.4'teki gibi olur.

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (5.3)$$

$$\Phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^* T^2}{I_0} \right) \quad (5.4)$$

Denklemlerden görüleceği üzere, ters doyum akımı, ileri beslem $\ln(I)$ - V grafiğinin lineer bölge uzantısının akım eksenini kestiği noktadan elde edilirken, aynı grafiğin lineer kısımlarının eğimleri kullanılarak da n değerleri ve Denklem 5.4 kullanılarak da Φ_{B0} değerleri elde edilebilecektir. Öte yandan, R_{sh} ve R_s gibi diyotlarda önemli olan diğer parametreler de sırasıyla ters ve ileri beslem gerilim ve akım değerleri kullanılarak Ohm Yasası'ndan elde edilebilmektedir. Yine diyot kalitesinin bilinmesi adına ileri beslem akımlarının (I_F) ters beslem akımlarına (I_R) bölünmesiyle de diyotun doğrultma oranı ($RR = I_F/I_R$) elde edilebilmektedir. Böylece, verilen bu denklemler kullanılarak temel diyot parametrelerinin radyasyon dozlarına bağlı olarak değişimleri elde edilmiş ve tüm bu değerler Çizelge 5.1'de detaylı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere, diyotun γ -ışın kaynağına maruz bırakılması neticesinde I_0 değerleri, artan ışınlama dozuyla birlikte neredeyse düzenli olarak artış eğiliminde olmuştur. I_0 değerindeki herhangi bir artış veya azalma, derin seviyelerin bir jenerasyon veya rekombinasyon merkezi olarak hareket etmesiyle ilişkilendirilmektedir [108]. Öte yandan, bariyer yüksekliğindeki azalmalar da ters doyum akımlarında bir artışa neden olabilmektedir [41].

Çizelge 5.1. Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD için temel diyot parametrelerinin ışınlama dozlarına bağlı olarak değişimi.

Işınlama Dozları (kGy)	Temel Diyot Parametreleri							
	I_F (A) (+4 V için)	I_R (A) (-4 V için)	I_0 (A)	n	Φ_{B0} (eV)	R_s (Ω)	R_{sh} (k Ω)	RR (± 4 V için)
0	1.96x10 ⁻⁰²	1.14x10 ⁻⁰⁴	2,05x10 ⁻⁶	6,901	0,601	204	35,2	172
1	1.80x10 ⁻⁰²	1.44x10 ⁻⁰⁴	2,76x10 ⁻⁶	6,539	0,593	222	27,7	125
5	1.70x10 ⁻⁰²	1.98x10 ⁻⁰⁴	4,12x10 ⁻⁶	6,528	0,583	236	20,3	86
10	2.04x10 ⁻⁰²	1.69x10 ⁻⁰⁴	4,12x10 ⁻⁶	6,420	0,583	196	23,7	121
30	2.40x10 ⁻⁰²	1.59x10 ⁻⁰⁴	5,56x10 ⁻⁶	6,584	0,575	167	25,2	151
60	2.52x10 ⁻⁰²	1.57x10 ⁻⁰⁴	5,56x10 ⁻⁶	6,377	0,575	158	25,5	161

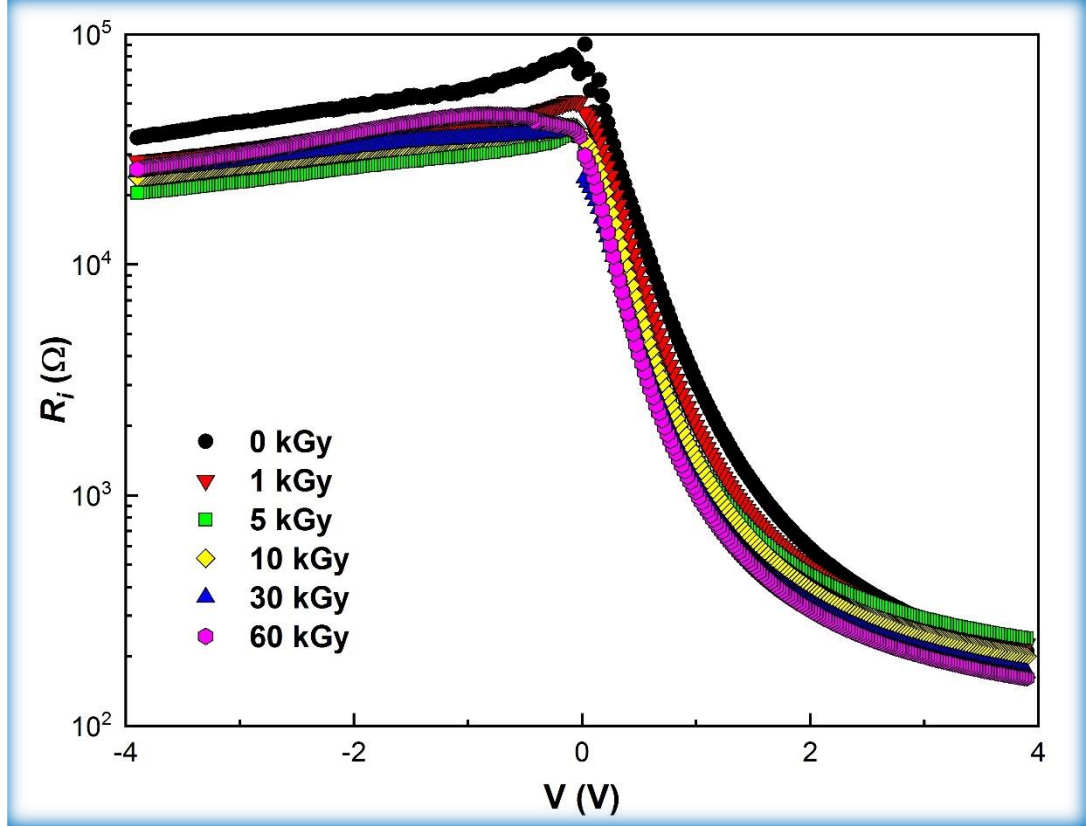
Çizelge 5.1’de idealite faktörünün 1’den oldukça büyük elde edildiği görülmektedir. Bu durum, termiyonik emisyon (TE) teorisinin yanı sıra difüzyon teorisi, jenerasyon/rekombinasyon teorisi, yüzey durumlarının neden olduğu tünelleme/yer değiştirme ve bariyer yüksekliğindeki Gaussian dağılımı gibi diğer olası taşıyıcı mekanizmalarının varlığından kaynaklanmaktadır. Gaussian dağılım teorisi, bariyeri geçmek için yeterli enerjiye sahip olmayan taşıyıcıların, ortalama engelin yakınında bulunan çok sayıda engel veya patikalardan geçebileceğini söyler. Bu durum ise akımlarda ve idealite faktöründe artışların meydana gelmesiyle sonuçlanır. Işınlamadan önce ve her radyasyon doz seviyesinden sonra elde edilen yüksek n değerleri, standart TE teorisinden sapmanın göstergesidir. Öte yandan, ışınlama dozlarının artmasıyla birlikte idealite faktöründe bir azalma meydana gelmiştir ki bu durum ilginç bir davranış olarak değerlendirilebilir. Çünkü, çoğunlukla radyasyon dozlarının artışıyla birlikte kusurların artması beklenir ki bu durum da idealite faktörünün artışıyla sonuçlanmaktadır. Ancak, tüketim tabakası genişliğinin (W_D) radyasyona bağlı olarak büyümesi ve radyasyona bağlı arayüzey durumlarının artmasının bir sonucu olarak idealite faktöründe küçük bir azalma meydana gelmiştir. Başka bir deyişle, artan radyasyon dozları ile n değerlerindeki değişiklikler, arayüzey durumlarının özel bir dağılımına ve bunların radyasyon altında yeniden düzenlenmesi/yapılandırılmasına bağlanabilir. Shammi Verma ve arkadaşları ise bu durumu şöyle açıklamışlardır; Işınlama ile üretilen ikincil elektronları nedeniyle, arayüzey tuzak merkezleri tavllanır ve bu durum da n 'nin azaltılması yani malzeme parametrelerinin iyileştirilmesi ile sonuçlanır [94]. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, idealite faktöründeki azalmayı radyasyonun tavlama etkisine atfetmişlerdir.

Yine Çizelge 5.1’de görüleceği üzere, Φ_{B0} değerleri, artan ışınlama dozlarına bağlı olarak azalma eğiliminde olmuştur. Bazı araştırmacılara göre, gama-ışınlaması yarıiletkenin birleşme noktasındaki bant aralığında bazı kusurlara neden olur ve bu da serbest taşıyıcı konsantrasyonunu etkiler. Bu nedenle, radyasyon malzemelerin bariyer yüksekliğinde bir azalmaya veya artışa neden olur [109,110]. Radyasyona bağlı olarak bariyer yüksekliğindeki azalma literatürde daha çok Poole Frenkel etkisi diye bilinir ve bu etki taşıyıcıların termal üretimine atfedilir [63].

Yannan Xu ve arkadaşları yürüttükleri bir çalışmada bariyer yüksekliğindeki azalmanın yanında diğer parametrelerin de radyasyondan önemli ölçüde etkilendiğini gözlemlemişlerdir [9]. Çalışmalarının bir parçası olan X-ışını fotoelektron spektroskopisi analizi, Silisyumun sarkan bağlarında kusurların oluştuğunu göstermiştir. Gelişmiş tünelleme etkileri ve bariyer yüksekliğindeki azalmanın bir sonucu olarak akımlarda önemli oranda artışın meydana gelmesi, bu kusurlara atfedilmiştir. Çalışmamızda, bariyer yüksekliğindeki azalmayla beraber idealite faktöründe de azalma görülmesi daha çok bu azalışların radyasyonun termal etkisinden kaynaklandığı düşündürmektedir. Ancak diğer parametreler de dikkate alındığında (R_s , R_{sh} ve RR gibi) gama-ışınlarının sebep olduğu termal tavlama etkisinin daha çok 5 kGy radyasyon dozundan sonra etkin olmaya başladığını söylemek mümkündür.

Malzemelerde radyasyonun neden olduğu kusur veya bozulma oranını belirlemek için incelenmesi gereken önemli parametrelerden birisi de bu malzemelerin direnç değerleridir. Bu yüzden, bu çalışmada da ışınlamadan önceki ve sonraki direnç değerlerinin (R_i) voltaja bağlı profilleri elde edilmiş ve grafikleri Şekil 5.3'te gösterilmiştir. R_{sh} ve R_s değerlerindeki değişimlerin beraber incelenebilmesi için R_i - V profillerinin grafikleri yarı-logaritmik olarak verilmiştir. Şekil 5.3'te, sırasıyla +4 V ve -4 V'a karşılık gelen direnç değerleri gerçek R_s ve R_{sh} değerlerini temsil etmektedir. Grafikten ve Çizelge 5.1'den görülebileceği gibi, ışınlamaya bağlı olarak R_{sh} değerlerinde R_s değerlerine göre daha yüksek oranda değişim görülmüştür. Bu durum, ters beslem akımlarının küçük değerlerde olması sebebiyle ileri beslem akımlarından daha fazla etkilenmesiyle doğrudan ilişkilidir. Radyasyona bağlı kusurlar veya radyasyonun diğer etkileri nedeniyle voltaja bağlı direnç profillerinde önemli ölçüde değişiklikler tespit edilmiştir. Malzemelerin serbest taşıyıcı yoğunluğunu değiştirebilen tuzak seviyeleri de aynı zamanda diyot direncinde bir artışa veya azalmaya yol açabilmektedir [111].

Şekil 5.3 veya daha net sonuçların gösterildiği Çizelge 5.1 incelendiğinde R_s ve R_{sh} değerlerinin en yüksek doz olan 60 kGy ışınlamadan sonra azaldığı görülmektedir. Bu azalma, gama-ışınlama etkileri nedeniyle enerji boşluğunda indüklenmiş kusur üretimine [91] ve/veya gama-ışınlarının termal tavlama etkisine atfedilebilir.



Şekil 5.3. Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD'nin R_s -V profilleri.

Temel diyot parametrelerinin farklı voltaj aralığında radyasyona bağlı olarak nasıl değiştiğini anlamak ve sonuçları karşılaştırabilmek için bazı parametrelerin farklı hesaplama metotlarıyla elde edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden de n , Φ_{B0} ve R_s parametreleri, ikici bir yöntem olarak Cheung fonksiyonları (Cheung-1 ve Cheung-2) kullanılarak hesaplanmıştır. R_s değerlerinin de dikkate alındığı ileri beslem akımlarının formülüne karşılık gelen Denklem 5.5'ten faydalanılarak Cheung fonksiyonlarını temsil eden Denklem 5.6 ve Denklem 5.7 elde edilebilmektedir [112]. Bu durumda, $dV/d(\ln I)$ - I grafikleri (Cheung-1 fonksiyonları) ışınlamadan önce ve sonra elde edilerek bu grafiklerin lineer kısımlarından R_s ve n değerleri elde edilebilmektedir. Benzer şekilde, $H(I)$ - I grafiklerinin (Cheung-2 fonksiyonları) lineer parçaları kullanılarak da R_s ve Φ_{B0} değerleri hesaplanabilmektedir.

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV(I - R_s)}{nkT} - 1\right) \quad (5.5)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (5.6)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_{B0} + IR_s \quad (5.7)$$

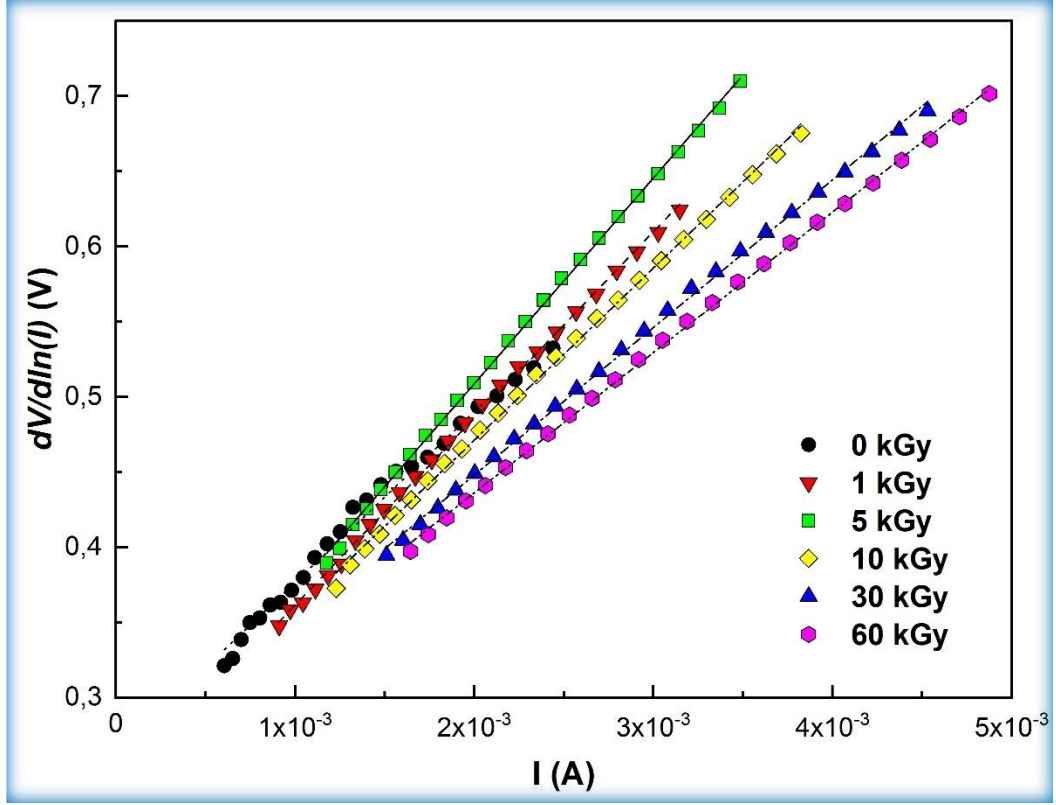
R_s ve Φ_{B0} gibi bazı diyot parametrelerini hesaplamak için kullanılan yöntemlerden bir diğeri de Norde fonksiyonlarıdır [113]. γ , idealite faktöründen büyük bir sayı olmak üzere, geliştirilmiş Norde yöntemi Denklem 5.8 ile verilmektedir. Bununla birlikte Denklem 5.9 bariyer yüksekliğini ve Denklem 5.10 da seri direnç değerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Burada, $F(V_0)$ ifadesi $F(V)$ grafiğinin minimum değerine karşılık gelmektedir ki bariyer yüksekliğinin hesaplanmasında bu nokta dikkate alınmaktadır.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (5.8)$$

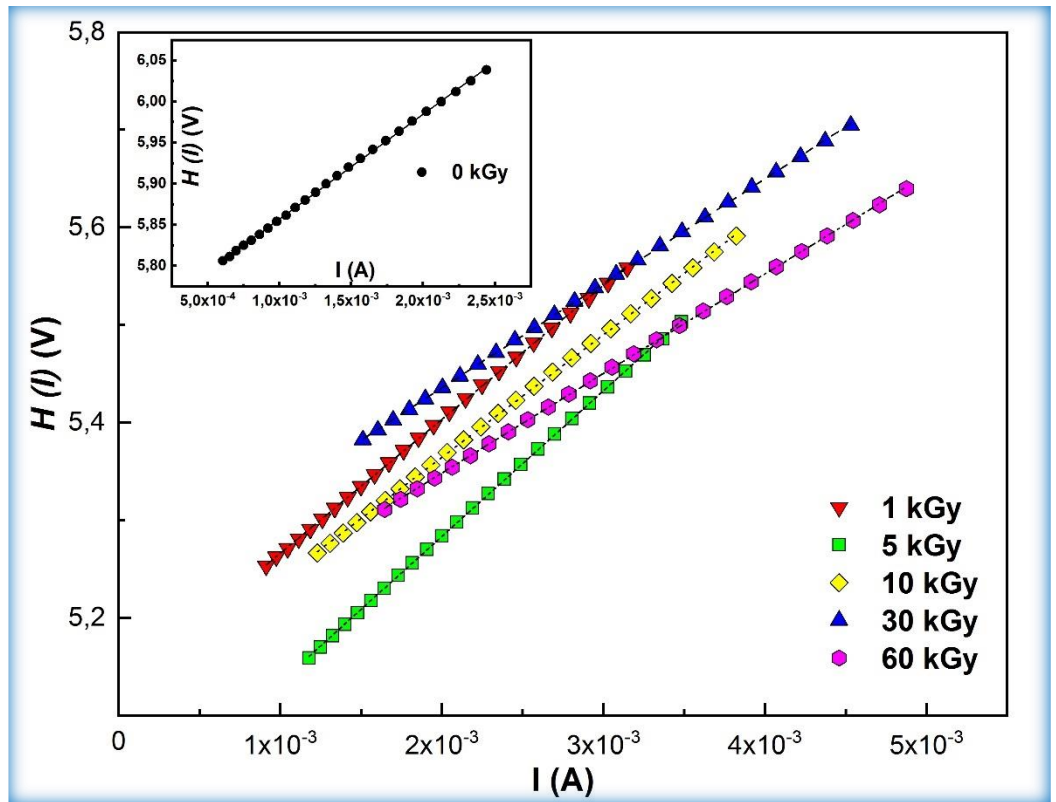
$$\Phi_{B0} = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (5.9)$$

$$R_s = \frac{kT}{q} \frac{(\gamma - n)}{I_i} \quad (5.10)$$

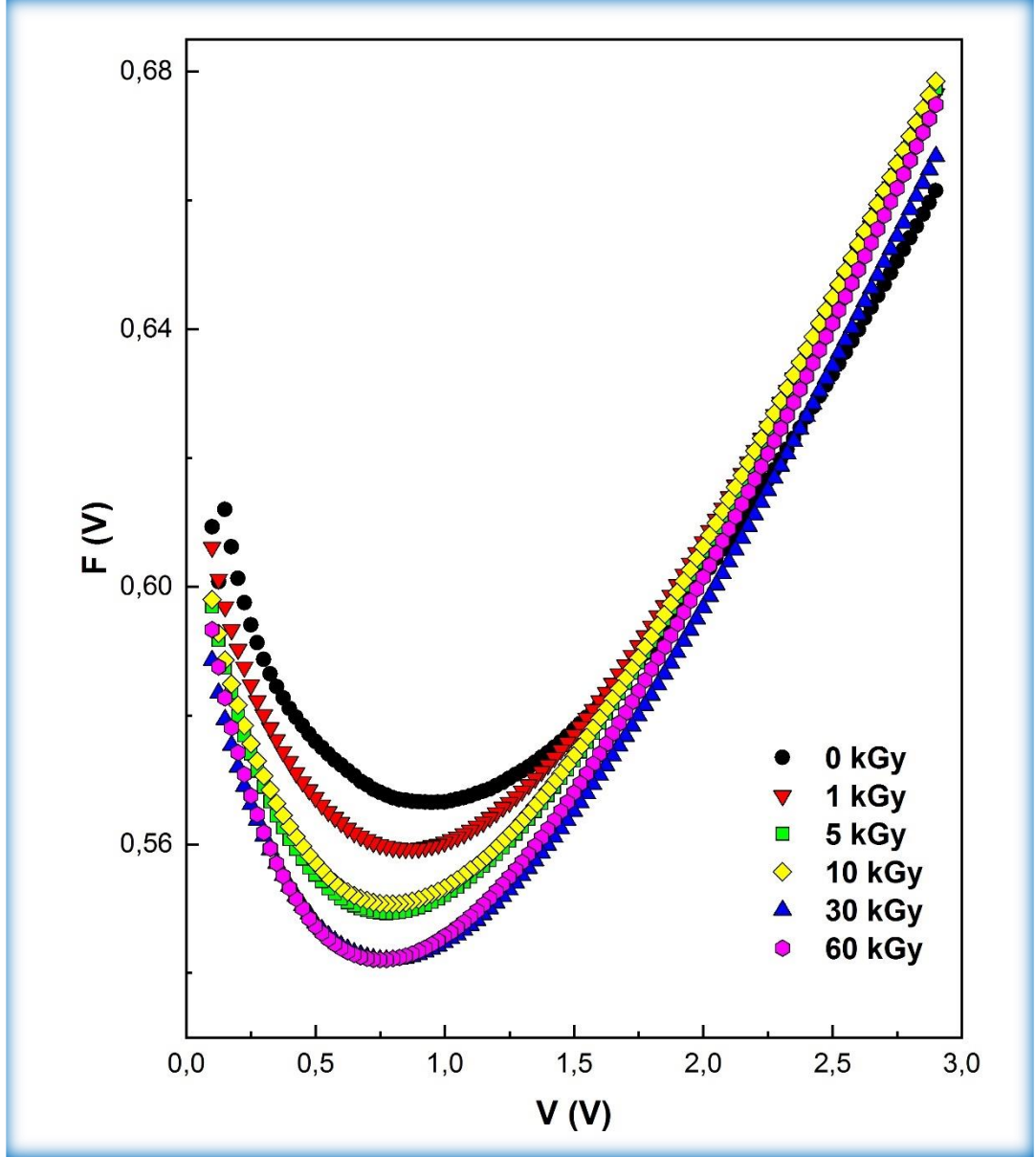
Yukarıda verilen formüllerin kullanılmasıyla Cheung ve Norde fonksiyonları için ilgili hesaplamalar yapılmış ve böylece Cheung-1 ve Cheung-2 fonksiyonlarının lineer bölgelerini gösteren grafikler (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5) ile Norde fonksiyonlarından elde edilen grafikler (Şekil 5.6) aşağıda gösterilmiştir. Diğer yandan, değerlendirme ve karşılaştırmaların yapılabilmesi için de TE'nin yanı sıra Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilen temel diyot parametreleri Çizelge 5.2'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Cheung ve Norde metotlarında elde edilen sonuçları destelemek için ise voltaja bağlı idealite faktörü ($n(V)$) ile voltaja bağlı bariyer yüksekliği ($\Phi_{B0}(V)$) grafikleri de elde edilmiş ve Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Şekil 5.7 incelendiğinde, idealite faktörünün voltaj artışına bağlı olarak arttığı görülürken bariyer yüksekliğinin voltaj artışıyla azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum sonucunda da TE teorisine göre daha ileri voltajları kullanarak hesaplamaların yürütüldüğü Cheung fonksiyonlarında, idealite faktörü değerleri TE'den daha yüksek olarak elde edilirken bariyer yüksekliği değerlerinin ise TE'den daha küçük olduğu Çizelge 5.2'den de görülebilmektedir.



Şekil 5.4. Işınlamadan önce ve sonraki $dV/d(\ln I)$ - I grafiklerinin lineer bölgeleri.



Şekil 5.5. Işınlamadan önce ve sonraki $H(I)$ - I grafiklerinin lineer bölgeleri.

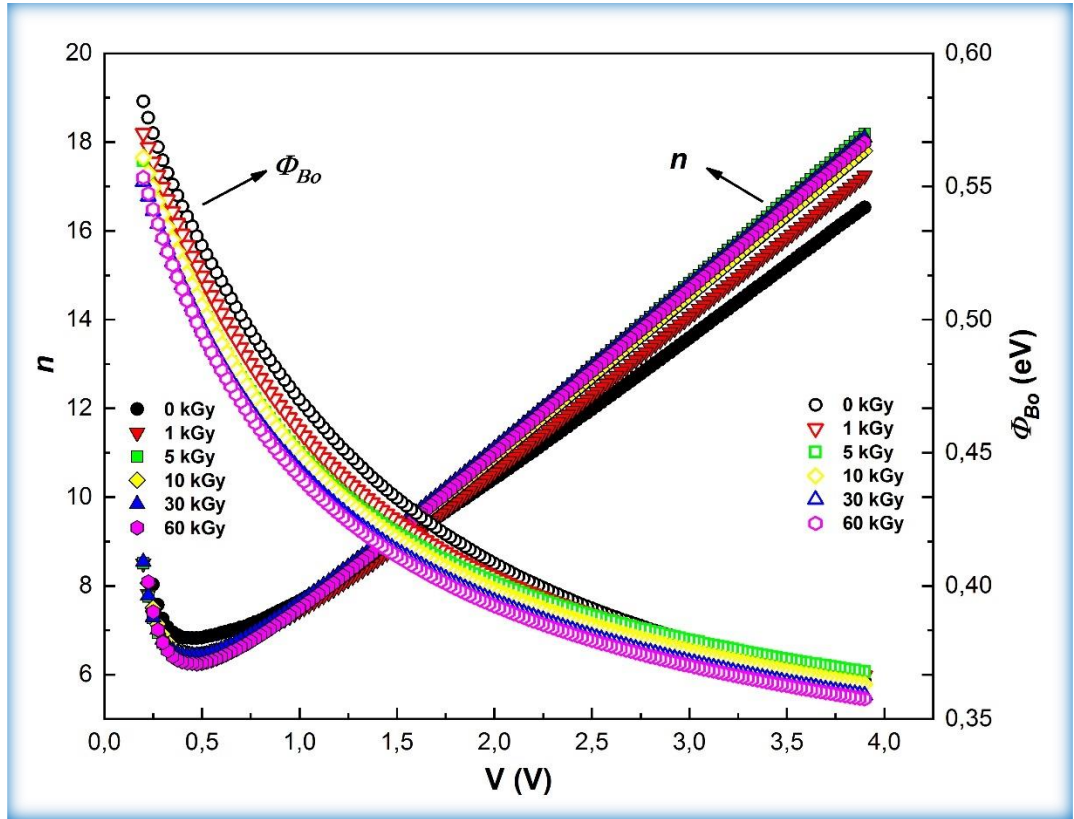


Şekil 5.6. Işınlamadan önce ve sonraki Norde grafikleri.

Çizelge 5.2'de görüldüğü üzere, farklı hesaplama yöntemleriyle elde edilen sonuçlar birbiriyle tutarsız gibi görünmektedir. Ancak, doğal hesaplama yöntemleri ve bu parametrelerin voltaj bağımlılığı göz önüne alındığında, parametrelerin tüm değerlerinin birbiriyle kısmi bir uyum içerisinde olduğu anlaşılabilir. Örneğin, Cheung fonksiyonları yöntemlerinin kullanarak hesaplandığı parametreler 1,2 V ve 1,8 V voltaj aralığından elde edilirken, $\ln(I)-V$ grafikleri kullanılarak hesaplanan parametreler 0,325 V ve 0,625 V voltaj aralığından elde edilmiştir. Dolayısıyla, bu parametrelerin voltaja bağlı değişimleri dikkate alındığında (Şekil 5.7), değerlerin

farklılık göstermesi doğal bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, birçok hesaplama yönteminden elde edilen parametrelerdeki artış veya azalmalar birbiriyle kısmi bir uyum göstermektedir.

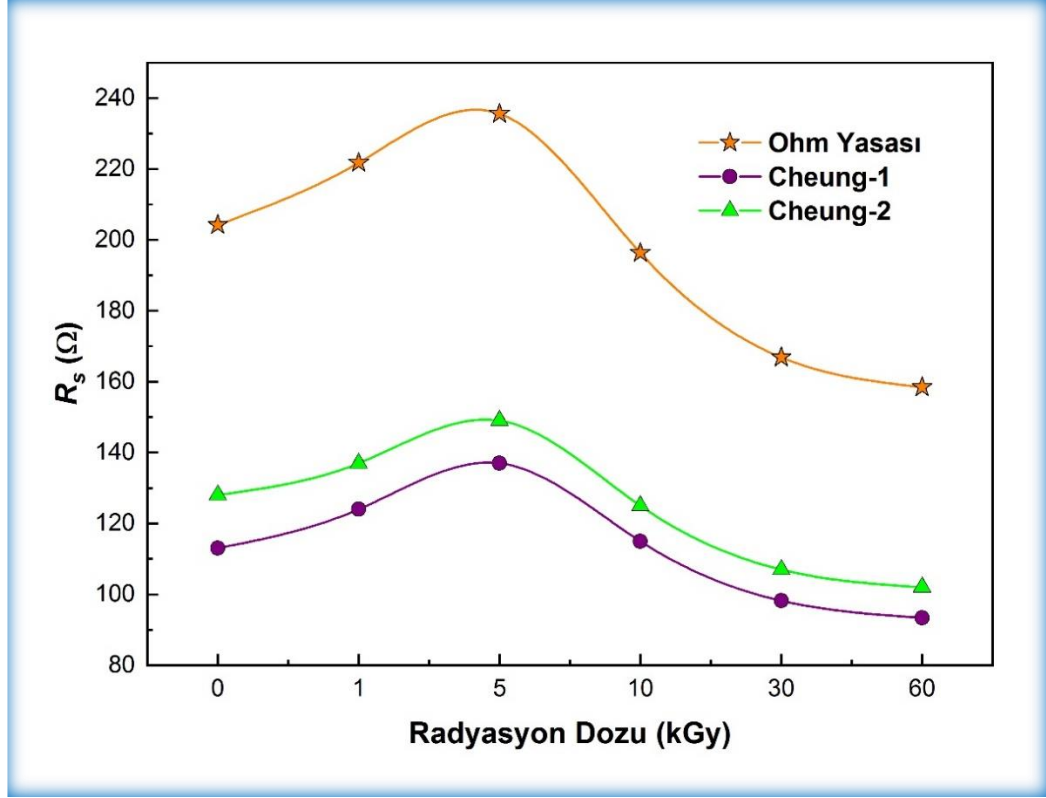
Norde yöntemi kullanılarak hesaplanan R_s değerleri Cheung yöntemleri kullanılarak hesaplanan değerlerden oldukça yüksektir. Çünkü Cheung fonksiyonları hesaplamalarında, ileri beslem akım grafiklerinin bükülmeye başladığı noktadan itibaren ölçülen akım değerlerini dikkate alınırken Norde fonksiyonları hesaplamalarında, tüm ileri beslem akım değerlerini dikkate alır [25]. TE, Cheung ve Norde yöntemleri hesaplamalarında ortaya çıkan bu farklılıkları daha açık bir şekilde gözlemleyebilmek adına gerçek R_s değerlerinin radyasyona ve hesaplama metoduna bağlı değişimleri Şekil 5.8’de ve yine Φ_{B0} değerinin radyasyon ve hesaplama metoduna göre değişimlerini gösteren grafikler de Şekil 5.9’da verilmiştir.



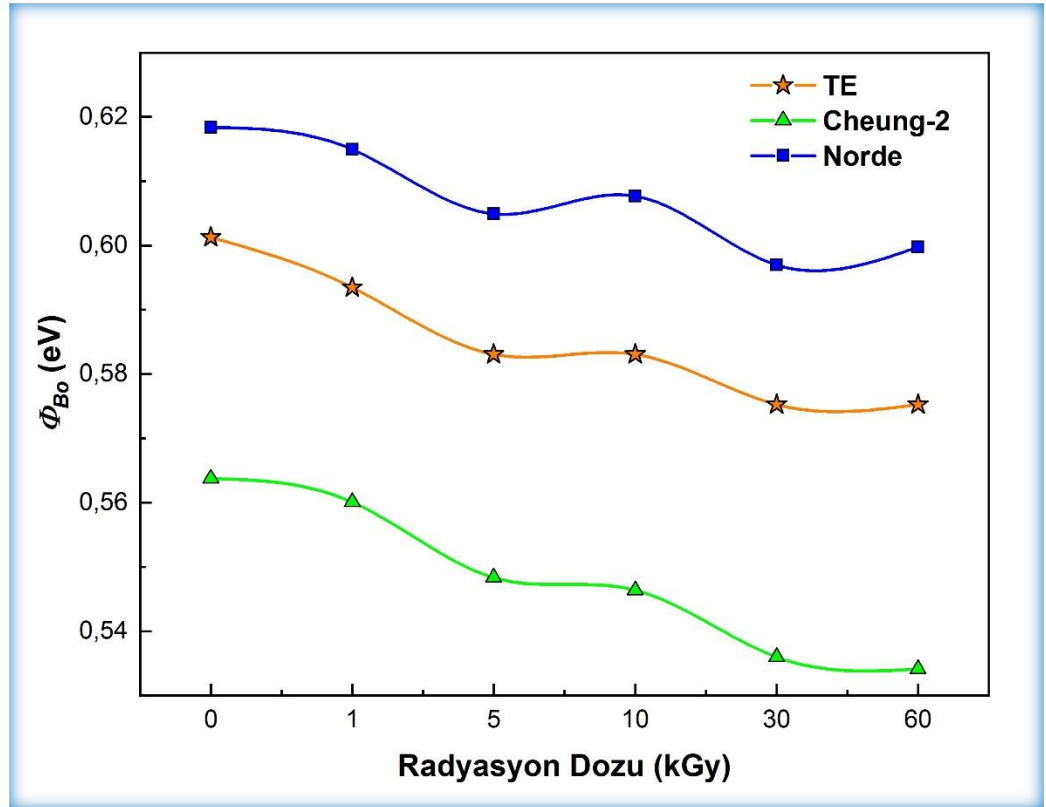
Şekil 5.7. İdealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin radyasyon ve voltaja bağlı değişimi.

Çizelge 5.2. TE, Cheung ve Norde fonksiyonları kullanılarak hesaplanan temel diyot parametrelerinin karşılaştırılması.

Işınlama Dozları (kGy)	<i>Ln(I)-V</i>			<i>Cheung-1</i>		<i>Cheung-2</i>		<i>Norde</i>	
	<i>n</i>	Φ_{B0} (eV)	R_s (Ω)	<i>n</i>	R_s (Ω)	Φ_{B0} (eV)	R_s (Ω)	Φ_{B0} (eV)	R_s (Ω)
0	6,901	0,601	204	10,164	113	0,564	128	0,618	608
1	6,539	0,593	222	9,159	124	0,560	137	0,615	363
5	6,528	0,583	236	9,082	137	0,548	149	0,605	244
10	6,420	0,583	196	9,353	115	0,546	125	0,608	240
30	6,584	0,575	167	9,739	98,2	0,536	107	0,597	191
60	6,377	0,575	158	9,623	93,4	0,534	102	0,600	168



Şekil 5.8. Gerçek R_s değerlerinin radyasyona ve hesaplama metoduna göre değişimi.



Şekil 5.9. Φ_{B0} değerinin radyasyon ve hesaplama metoduna göre değişimi.

Radyasyon etkilerinin anlaşılabilmesi ve değerlendirilebilmesi için incelenmesi gereken en önemli parametrelerden bir diğeri de arayüzey durumlarıdır. Gamaışınlamasının bant aralığında neden olduğu arayüzey durumlarını elde edebilmek için, voltaja bağlı idealite faktörünün ve etkin bariyer yüksekliğinin (Φ_e) hesaplanması gerekmektedir. $n(V)$ ve Φ_e değerleri, R_s değerleri ihmal edildiğinde sırasıyla Denklem 5.11 ve Denklem 5.12 kullanılarak hesaplanabilmektedir [92]. Buna göre, $n(V)$ ve Φ_e dikkate alınarak N_{ss} 'nin formülü Denklem 5.13 ile verilebilir [38]. Öte yandan, yarıiletkenin orta boşluğundan (E_{ss}) valans bandının üst kenarına (E_v) kadar olan enerji p-tipi yarıiletkenine sahip SD'ler için Denklem 5.14 ile verilmektedir. Bu formüllerde ϵ_s ve ϵ_i , sırasıyla yarıiletkenin ve arayüzey tabakasının dielektrik geçirgenliğini ifade ederken, δ organik ara tabakasının (ZnO-PVA) kalınlığına (81 Å) karşılık gelmektedir.

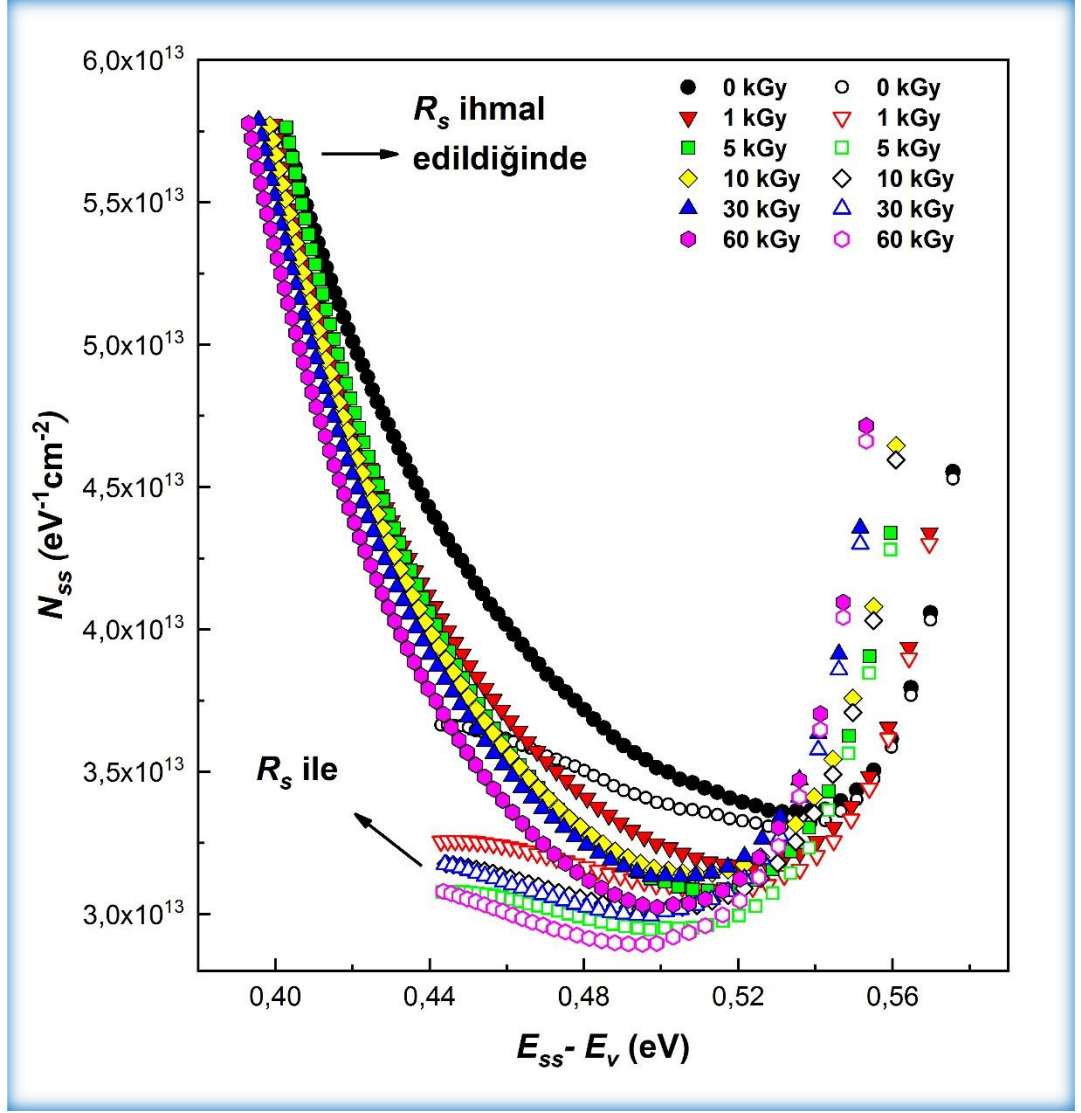
$$n(V) = \frac{q}{kT} \left(\frac{V}{\ln(I/I_0)} \right) \quad (5.11)$$

$$\Phi_e = \Phi_{B0} + \left(1 - \frac{1}{n(V)} \right) (V) \quad (5.12)$$

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right] \quad (5.13)$$

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (5.14)$$

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak R_s etkilerinin ihmal edildiği ve dikkate alındığı ($E_{ss}-E_v$)- N_{ss} profilleri radyasyon dozlarına bağlı olarak elde edilmiş ve grafikleri de Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Şekilde görülebileceği üzere, enerjiye bağlı N_{ss} değerleri, yarıiletkenin orta-bant boşluğundan valans bandının üst kenarına doğru üstel bir şekilde azalmaktadır. N_{ss} 'de meydana gelen bu azalmalar, radyasyon altında elektron-hol çiftlerinin rekombinasyonuna ve ayrıca elektrik alanı altındaki bant-boşluğu arayüzey durumlarının yeniden düzenlenmesi ve yeniden yapılandırılmasına atfedilmektedir. Öte yandan, R_s değerlerinin dikkate alındığı N_{ss} değerlerinin bu etkinin ihmal edilerek hesaplandığı N_{ss} değerlerinden oldukça düşük olduğu da bu grafikte görülebilmektedir. Dolayısıyla daha önceden de belirtildiği gibi radyasyon etkilerinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için R_s değerlerinin hesaplamalarda mutlaka dikkate alınması gerekmektedir.



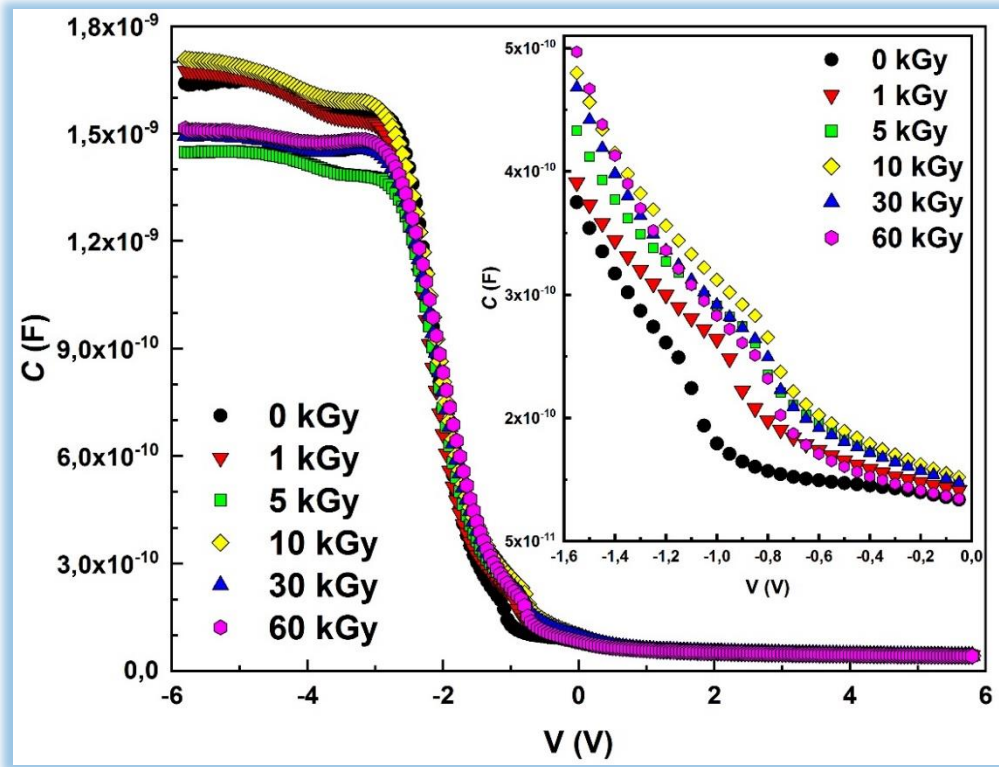
Şekil 5.10. Işınlamadan önce ve sonraki $(E_{ss}-E_v)-N_{ss}$ profilleri.

BÖLÜM 6

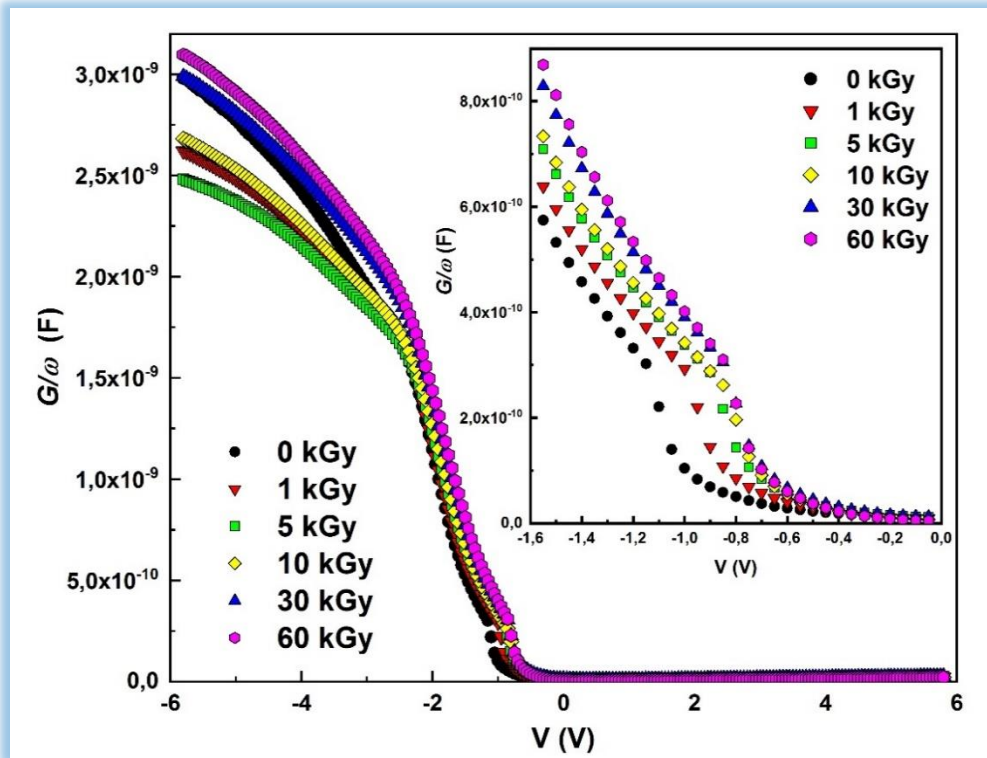
C-G/ω-V KARAKTERİSTİKLERİNDEKİ RADYASYON ETKİLERİ

Radyasyon etkilerinin doğru ve kapsamlı bir şekilde anlaşılabilmesi için gerçekleştirilen ölçümlerden bir diğeri de kapasitans-kondüktans-voltaj (*C-G/ω-V*) ölçümleridir. Radyasyon öncesi ve sonrasında ölçümü gerçekleştirilen Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD'nin radyasyona bağlı *C-V* ve *G/ω-V* karakteristikleri sırasıyla Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Bu grafiklerde birikim, tükenme ve terslenim bölgeleri olarak adlandırılan üç bölge açıkça görülebilmektedir. Bu grafiklerde aynı zamanda, *C-V* karakteristiklerinin çeşitli gama ışıması dozlarına karşı karmaşık davranışlar sergilediği, *G/ω-V* karakteristiklerinin ise kısmen düzenli bir tepki verdiği de görülebilmektedir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, radyasyon altındaki birikim bölgesinde kapasitans değerlerinde karmaşık artışlar veya azalışlar meydana gelirken tükenme bölgesinde ileri ve ters beslem yönlerine doğru karmaşık kaymalar meydana gelmiştir. Ancak, SD'ye uygulanan en yüksek doz olan 60 kGy radyasyondan sonra kapasitans değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir.

C-V karakteristiklerindeki karmaşık davranışlar, enerji boşluğunda radyasyonun neden olduğu kusurların yanı sıra arayüzey durumlarının özel dağılımına ve bunların elektrik alanı altında yeniden yapılandırılmasına ve/veya yeniden düzenlenmesine atfedilebilir. Bu tür karmaşık davranışlar, yarıiletken yüzeyinin pasifleşmesine de bağlanmaktadır [42]. Ayrıca, kapasitans değerlerindeki artış veya azalmaların, yapının seri direnci veya arayüzey durumlarının kapasitansa katkısı ile ilişkili de olabileceği bilinmektedir [15,42]. Diğer yandan, S. S. Barala ve arkadaşları bir çalışmalarında [95], kapasitans değerlerinin düşük gama-ışıması dozlarında azaldığını ve yüksek ışınlama dozlarında ise arttığını gözlemlediler. Malzemelerin farklı radyasyon dozlarına maruz bırakılması sonucunda, üzerlerinde farklı tipte kusurların ortaya çıkabileceğini gösteren bu sonuç bizim çalışmamızda da kısmi olarak görülmüştür.



Şekil 6.1. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki $C-V$ karakteristikleri.



Şekil 6.2. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki $G/\omega-V$ karakterisitikleri.

Radyasyon kaynaklı olarak kapasitans değerlerindeki azalma, bazı araştırmacılara göre net iyonize doping konsantrasyonu atomlarının azalmasından veya dielektrik sabitinin değişiminden kaynaklanmaktadır [41,114,115]. Ayrıca, tüketim tabakası genişliğindeki (W_D) değişimlerin de kapasitans ve kondüktans değerlerinde bir artışa veya azalmaya neden olabileceği bilinmektedir. Bu açıklamalar ışığında, kapasitans değerlerinde radyasyona bağlı olarak ortaya çıkan karmaşık davranışlar, onların çok farklı parametreler tarafından değiştirilebilmesi sebebiyle bazı malzemeler için normal bir durum olarak beklenebilmektedir.

Şekil 6.2 incelendiğinde, akümülyasyon bölgesindeki kondüktans değerlerinin 5 kGy radyasyon dozuna kadar azaldığı görülmektedir. Daha sonra bu kondüktans değerleri, artan gama-ışını dozları ile bir artış göstererek 60 kGy dozu için ışınlanmamış değerden daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Düşük radyasyon dozlarında kondüktans değerlerindeki azalma, W_D 'nin artışına veya bazı radyasyon kaynaklı kusurlara bağlanabilir. Bu kusurlar, Si yüzeyinin yakınındaki arayüzeyde kafes boşlukları üretebilir ve dolayısıyla da kondüktans değerlerinde azalmaya neden olabilirler. Öte yandan, bazı araştırmacılar bu azalışları net doping konsantrasyonuna atfetmişlerdir [41,116]. 5 kGy'den sonra, artan radyasyon dozlarına karşılık kondüktans değerlerindeki artış eğilimi, yük taşıyıcılarının oluşumuna ve bu yük taşıyıcıları için yol sağlayan farklı tür kusurların artışlarına atfedilebilir [95]. Çünkü yük taşıyıcıları için yolların sağlanması, akımlarda ve kondüktans değerlerinde artışlara neden olacaktır. Öte yandan, kondüktans değerlerinin tükenme bölgesinde artan ışınlama dozları ile pozitif gerilimlere doğru kaydığı görülmüştür. Radyasyonun neden olduğu tuzaklanmış yüklerin yoğunluğu bu davranışın bir sonucudur. Aslında, kondüktans değerlerinde değişikliklere neden olan ana parametrelerin R_s ve N_{ss} olduğu da bilinmektedir [42].

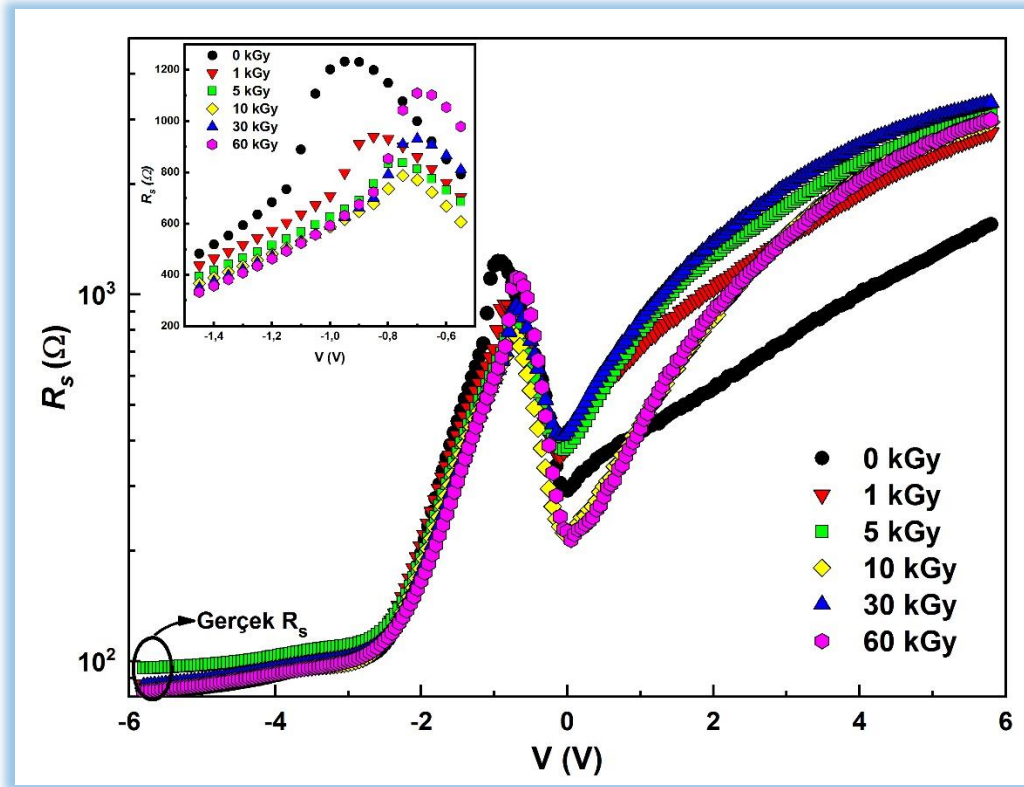
Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de görülebileceği gibi, kapasitans değerleri ışınlama öncesi ve sonrası için birikim bölgesinde ($-6 \text{ V} \leq V \leq -3 \text{ V}$) neredeyse sabit kalırken (yani neredeyse voltajdan bağımsız davranış sergilerken), aynı bölgedeki kondüktans değerleri voltaja bağlı olarak hızla artmıştır. SD'ler birikim bölgesinde iletken olarak hareket ettiğinden, bu davranış SD'nin endüktif davranışı olarak bilinir ($Y=1/Z=G+j\omega C$). C. H. Champness ve arkadaşlarına göre, malzemelerin endüktif

davranışı, azınlık taşıyıcılarının ileri beslem bölgesindeki enjeksiyonundan kaynaklanmaktadır [117]. Bununla birlikte, bu bölgedeki direnç değerlerinin gerilim ve radyasyona bağlı olarak değişmesi nedeniyle ışınlama öncesi ve sonrasında birikim bölgesindeki kapasitans değerlerinde küçük bir değişim gözlemlenmiştir. Bu değişimler, bahsi geçen etkenlerin yanı sıra omik/doğrultucu kontaklar, probalar, bulk yarıiletkenin direnci ve yarıiletkendeki düzensiz katkılı atomlar gibi çeşitli faktörlere de bağlıdır [102]. Ancak R_s etkileri, özel numune üretim yöntemleri kullanılarak, düşük frekansta ölçümler alınarak ve ölçülen $C-G/\omega-V$ karakteristikleri üzerinde bir düzeltme uygulanarak en aza indirilebilir.

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı gibi, R_s değerleri SD'lerin elektriksel parametrelerinin türetilmesinde ciddi hatalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, hesaplamalarda R_s 'lerin mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca, arayüzey durumlarının özellikle tükenme bölgesinde etkili olduğu ve R_s 'nin de birikim bölgesinde daha etkili olduğu bilinen bir diğer gerçektir. R_s 'nin diğer diyot parametreleri üzerindeki etkilerini anlamak ve gama-ışıması altındaki davranışını görebilmek için, Nicollian ve Brews tarafından önerilen Denklem 6.1 [102] kullanılarak radyasyona bağlı R_s-V profilleri elde edilmiş ve bu profillerin grafiği de Şekil 6.3'te gösterilmiştir.

$$R_s = \frac{G_m}{(G_m)^2 + (\omega C_m)^2} \quad (6.1)$$

Şekil 6.3'ten, R_s profillerinin ışınlanmamış durumda ve tüm ışınlama dozlarından sonra tüketim bölgesinde genliği değişen pikler verdiği görülmektedir. Bu piklerin genliği 10 kGy'ye kadar olan ışınlama dozlarında azalırken, daha büyük dozlarda artma eğilimi göstermiştir. Öte yandan, bu piklerin artan ışınlama dozlarıyla birlikte pozitif gerilim yönüne doğru (yani inversiyon bölgesine doğru) kaydığı görülmüştür. Bu tür davranışlar, bant boşluğunda meydana gelen tuzaklanmış yüklere ve bu yüklerin voltaj ve radyasyona bağlı dağılımına atfedilmiştir [42,118].



Şekil 6.3. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki R_s - V profilleri.

Daha önce de vurgulandığı gibi R_s , malzemelerin diğer parametrelerini kolayca etkileyebildiği için radyasyona bağlı kusurların belirlenmesinde önemli bir parametredir. Diğer yandan, diyotun gerçek R_s değerinin, birikim bölgesindeki yeterince ileri voltajlardan elde edilen dirence karşılık geldiği de bilinmektedir. Dolayısıyla, bu ölçümlerdeki gerçek R_s değerlerinin, R_s - V profillerindeki -6 V gerilimine karşılık gelen direnç değerlerinin olduğunu anlamak mümkündür. Böylece bu profillerden faydalanılarak gerçek R_s değerleri ışınlama öncesi ve sonrası için elde edilmiş ve bu değerler Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

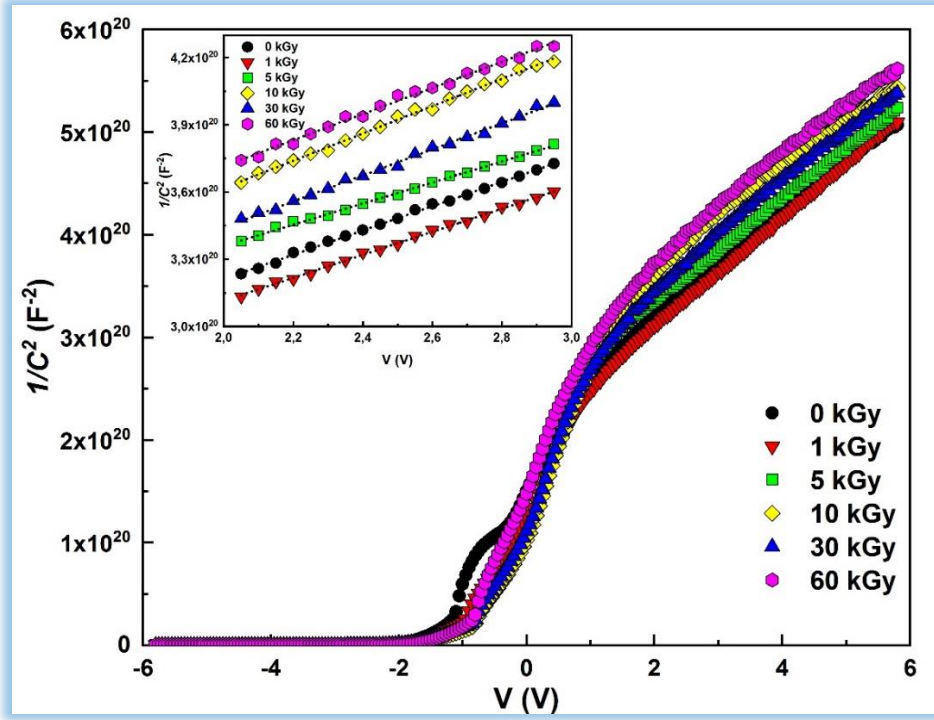
Çizelge 6.1 'de görülebileceği gibi, R_s değerleri 5 kGy'ye kadar olan ışınlama dozlarında artarken daha sonra, artan ışınlama dozları ile azalma eğilimi göstermiştir ki akım parametrelerinden elde edilen R_s 'lerde de benzer bir davranış ortaya çıkmıştır. Yukarıda kondüktans değerlerinin de benzer bir davranış sergilediği açıklanmıştı. Ancak, kondüktans değerleri R_s değerlerinin aksine değişerek R_s değerleri artarken kondüktans değerleri azalmıştır. R_s 'lerin kondüktans değerleri ile uyumlu

varyasyonları, onların diğer parametreler üzerindeki belirgin etkisini açıkça göstermektedir. Bazı araştırmacılar da, R_s değerinin cihaz parametrelerini, özellikle de kondüktans karakteristiklerini önemli ölçüde etkilediğini belirterek çalışmalarında bu duruma vurgu yapmışlardır [119,120].

Önceki bazı çalışmalar [94,121,122], yüksek dozlardaki gama-ışınlarının, radyasyonun termal tavlama etkisi sebebiyle yapının elektriksel özelliklerinde kısmi bir iyileşmeye neden olabileceğini göstermiştir. Tavlama etkisi, gama-ışınlarının yüksek elektronik enerji kaybının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, Çizelge 6.1'deki R_s değerlerinin değişimi göz önüne alındığında, yüksek dozlardaki (özellikle 5 kGy dozundan daha büyük ışınlama dozlarında) gama-ışınmasında kusurların yaratılması ve yok edilmesi arasında dinamik bir denge sağlandığı söylenebileceği gibi yüksek dozlarda ortaya çıkan farklı kusurların sonucu olarak bu davranışların ortaya çıkabileceği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, 5 kGy ışınlama dozundan sonra yapının elektriksel parametrelerinde kısmi bir iyileşme ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, 5 kGy gama ışınmasından daha yüksek dozlarda aktif hale gelen tavlama etkisi, düşük dozlarda artma eğilimi gösteren R_s değerlerinin yeniden azalma eğilimi göstermesine neden olmuştur. Benzer bir davranış, Kumar ve arkadaşları tarafından yürütülmüş olan bir çalışmada da görülmüştür [121]. Bu çalışmada, düşük dozlardaki ışınlamadan sonra elde edilen daha büyük R_s değerlerinin, kirlilik atomlarının varlığını ve radyasyon kusurlarının neden olduğu lokalize tuzaklanmış yükleri gösterdiğine vurgu yapmışlardır. Bununla birlikte, serbest taşıyıcı konsantrasyonlarındaki artışlar ve radyasyon kusurları nedeniyle oluşabilecek mobilite üretimi de R_s değerlerinde bir azalmaya sebep olabilmektedir [99].

Radyasyon etkilerini kapsamlı bir şekilde anlamak için bariyer yüksekliği (Φ_B), Fermi enerji seviyesi (E_F), difüzyon potansiyeli (V_D), maksimum elektrik alanı (E_m), tüketim tabakası genişliği (W_D) ve alıcı katkı atomlarının yoğunluğu (N_A) gibi diğer önemli parametrelerin de hesaplanması gerekmektedir. Bu parametreler, ters beslem bölgelerinde meydana gelen C^{-2} - V grafikerinin lineer bölgeleri kullanılarak ışınlamadan önce ve sonrası için hesaplanabilir. Bu parametrelerin hesaplanması için uygulanacak formüller ve elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Ayrıca C^{-2} - V karakteristikleri ve bu grafiklerin lineer bölgeleri Şekil 6.4'te verilmiştir.

SD ve diğer benzer yapılarda (MIS, MOS ve MPS tipi yapılar), tüketim tabakasının kapasitansı, ters beslem bölgeleri için Denklem 6.2 ile verilmektedir [38]. Bu denklemdeki ϵ_s ve ϵ_0 sırasıyla yarıiletkenin dielektrik sabitini ve vakumun dielektrik geçirgenliğini temsil etmektedir. Literatürde iyi bilinen diğer parametrelerin [43,123] yanı sıra V_0 ve V_D de sırasıyla kesişme gerilimi ve difüzyon potansiyeli olarak tanımlanmaktadır ($V_D=V_0+kT/q$). Öte yandan, N_A , E_F , E_m , W_D ve Φ_B değerleri sırasıyla (6.3-6.7) numaralı denklemler kullanılarak hesaplanabilirken, görüntü kuvveti bariyer düşümünün (image force barrier lowering - $\Delta\Phi_B$) hesabı için de Denklem 6.8 ile verilen formül kullanılmaktadır [16,20].



Şekil 6.4. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki C^{-2} - V karakterisitikleri.

Hesaplamalarda dikkat edilmesi gereken bir husus şudur ki; kesişme gerilimi (V_0) yarıiletkenin yasak bant aralığından daha büyük olarak elde edilirse, bu formüllere düzeltme faktörünün (c_2) eklenmesi gerekecektir. Böyle bir durumda aşağıda verilecek olan formüllerde V_0 ifadesi yerine c_2V_0 ifadesi kullanılmalıdır [16]. Düzeltme faktörü, alıcı katkı atomlarının deneysel (N_A) ve teorik yöntemlerle (N'_A) elde edilmesi sonucunda Denklem 6.9 kullanılarak hesaplanabilmektedir ($N'_A = 2,78 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Bu denklemlerde A , doğrultucu kontak alanını ($7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$) ve $\tan(\theta)$, C^{-2} - V eğrisinin

doğrusal kısmından elde edilen eğimi temsil etmektedir. N_V ise yarıiletkenin valans bandındaki çoğunluk taşıyıcıları için durumların etkin yoğunluğudur (p-tipi Si için $N_V = 1,40 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). Ayrıca, d_i arayüzey tabakasının kalınlığına karşılık gelmektedir ki değeri Nicollian ve Goetzberger metodu kullanılarak 81 Å olarak hesaplanmıştır.

$$C^{-2} = \frac{2(V_D - kT/q - V)}{qN_A \epsilon_S \epsilon_0 A^2} \quad (6.2)$$

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

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

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_A V_0}{\epsilon_S \epsilon_0}} \quad (6.5)$$

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_S \epsilon_0 V_0}{qN_A}} \quad (6.6)$$

$$\Phi_B = V_0 + \frac{kT}{q} + E_F - \Delta\Phi_B \quad (6.7)$$

$$\Delta\Phi_B = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_S \epsilon_0}} \quad (6.8)$$

$$C_2 = \frac{N_A}{N'_A} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + qd_i N_{ss}} \quad (6.9)$$

Yukarıda verilen formüller kullanılarak Al/(ZnO-PVA)/p-Si tipi SD için ilgili parametreler hesaplanmış ve sonuçları Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. $C-G/\omega-V$ ölçümlerinden faydalanılarak hesaplanan temel diyot parametreleri.

Işınlama Dozları (kGy)	Temel Diyot Parametreleri									
	V_0 (eV)	$V_0.C_2$ (eV)	V_D (eV)	N_A (cm^{-3})	E_F (eV)	E_m (V/cm)	W_D (cm)	$\Delta\Phi_B$ (eV)	Φ_B (eV)	R_s (Ω)
0	3,930	0,507	0,533	$3,58 \times 10^{15}$	0,215	$2,36 \times 10^4$	$4,30 \times 10^{-5}$	$1,70 \times 10^{-2}$	0,731	81,3
1	4,066	0,553	0,579	$3,78 \times 10^{15}$	0,214	$2,53 \times 10^4$	$4,37 \times 10^{-5}$	$1,76 \times 10^{-2}$	0,775	85,7
5	5,149	0,766	0,792	$4,13 \times 10^{15}$	0,211	$3,11 \times 10^4$	$4,92 \times 10^{-5}$	$1,95 \times 10^{-2}$	0,984	95,3
10	3,941	0,453	0,479	$3,19 \times 10^{15}$	0,218	$2,10 \times 10^4$	$4,30 \times 10^{-5}$	$1,60 \times 10^{-2}$	0,681	83,9
30	3,918	0,471	0,497	$3,34 \times 10^{15}$	0,217	$2,19 \times 10^4$	$4,29 \times 10^{-5}$	$1,64 \times 10^{-2}$	0,697	84,6
60	4,374	0,525	0,551	$3,33 \times 10^{15}$	0,217	$2,31 \times 10^4$	$4,53 \times 10^{-5}$	$1,68 \times 10^{-2}$	0,751	82,3

Çizelge 6.1 incelendiğinde, radyasyona bağlı N_A değerlerindeki değişimlerin birikim bölgesindeki R_s ve kondüktans değerlerinin değişimiyle oldukça uyumlu olduğu görülecektir. Öte yandan, Φ_B değerleri 5 kGy'ye kadar olan ışınlama dozlarında artış göstermiş ve bu dozda maksimum değerine ulaşmıştır. Daha sonra Φ_B değeri 10 kGy ışınlama dozunda aniden azalarak daha büyük dozlarda küçük değişimler ile devam etmiştir. Dolayısıyla, 5 kGy ışınlama dozunun bu diyot için kritik bir aşamayı temsil ettiğini söyleyebiliriz. 5 kGy'den sonra radyasyon dozlarındaki artış, gama ışınlarının tavlama etkisi ile sonuçlanmıştır ve bu da SD'de kısmi bir iyileşmeye ve bazı parametrelerde de karmaşık davranışlara neden olmuştur. Yukarıda da belirtildiği gibi, yüksek radyasyon dozlarında meydana gelen tavlama etkisi, daha önceki bazı çalışmalarda olduğu gibi [121] bu malzeme için de kusurların yaratılması ve yok edilmesi arasında dinamik bir denge sağlamıştır. Ayrıca, gama-ışınması ile indüklenen arayüzey durumları ve bunların yeniden sıralanması ve/veya yeniden yapılandırılması, bu parametrelerde değişikliklere neden olan başka etkiler olarak ortaya çıkmıştır. Diğer taşıyıcı mekanizmalarının da parametrelerin değişiminde önemli bir rol oynadığı hali hazırda bilinmektedir.

Başka bir yönüyle değerlendirilecek olursa Φ_B değerlerinin artan ışınlama dozları ile artma eğilimi gösterdiğini söylemek mümkündür. Bununla birlikte, sadece 10 kGy radyasyon dozu için ani bir düşüş gözlemlenmiştir. Aslında, $C-V$ ölçümlerinden elde edilen Φ_B değerindeki radyasyona bağlı artış, literatürde yaygın bir davranış olarak görülmüştür [2,11,41,43,123] ve bu davranış C^2-V grafiklerinin kaymasından kaynaklı olarak V_D değerlerindeki artışla açıklanmıştır. Φ_B 'nin ani azalma davranışı ise gama-ışınmasının tavlama etkisinden kaynaklanmaktadır. Tavlama etkisi radyasyona bağlı kusurlardan biridir ve taşıyıcıların termal oluşumunun etkinliğini artırır. Malzemenin yüksek elektrik alanı içeren bir bölgesinde kusurlar meydana gelirse, malzeme üzerinde tavlama etkilerinin ortaya çıkabileceği bilinmektedir [63].

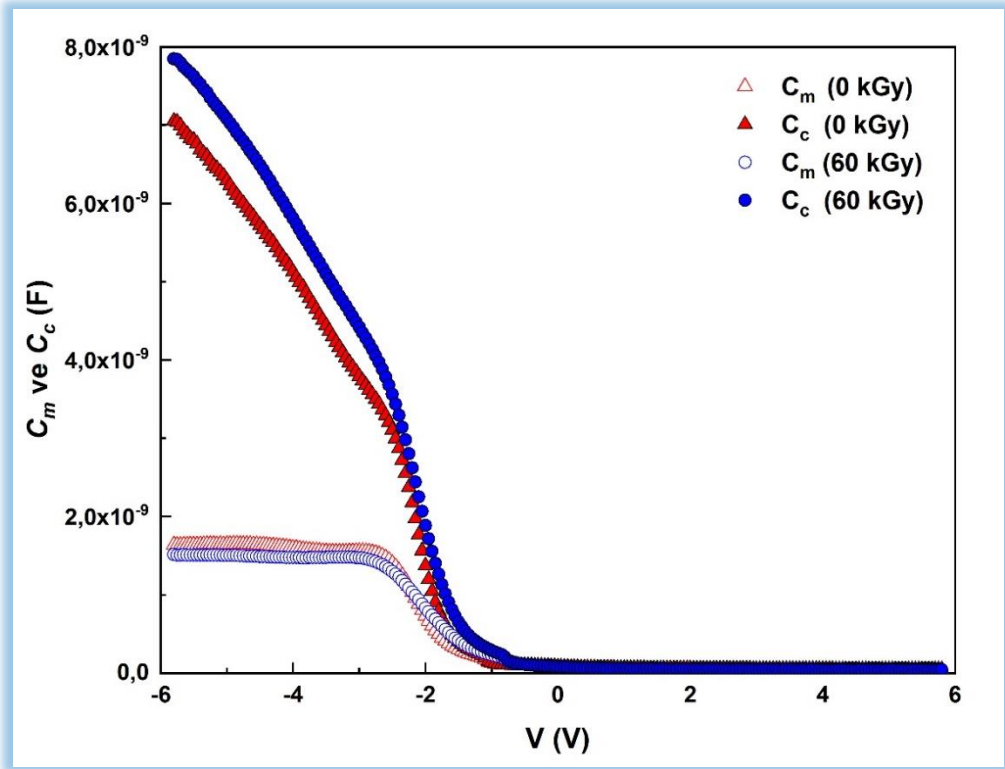
Kapasitans ve kondüktans değerleri, üzerlerindeki seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilebilmektedir. Bu hesaplamalar literatürde iyi bilinmektedir ve formülleri sırasıyla Denklem 6.10 ve Denklem 6.11 ile verilmektedir [98,102,119]. Burada, C_m ve C_c sırasıyla ölçülen ve düzeltilmiş kapasitans değerlerine karşılık gelirken, G_m ve G_c ise sırasıyla ölçülen ve düzeltilmiş kondüktans değerlerini göstermektedir. Diğer

yandan, a ifadesinin formülü de Denklem 6.12 ile verilmektedir. Düzeltilmiş kapasitans ve kondüktansın voltaja bağlı profilleri, bu formüller kullanılarak ışınlamadan önce ve 60 kGy ışınlamadan sonra elde edilmiş ve grafikleri Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Kapasitans ve kondüktans değerlerinin uyum içinde gözlemlenebilmesi için kondüktans değerleri G_m/ω ve G_c/ω formatında verilmiştir.

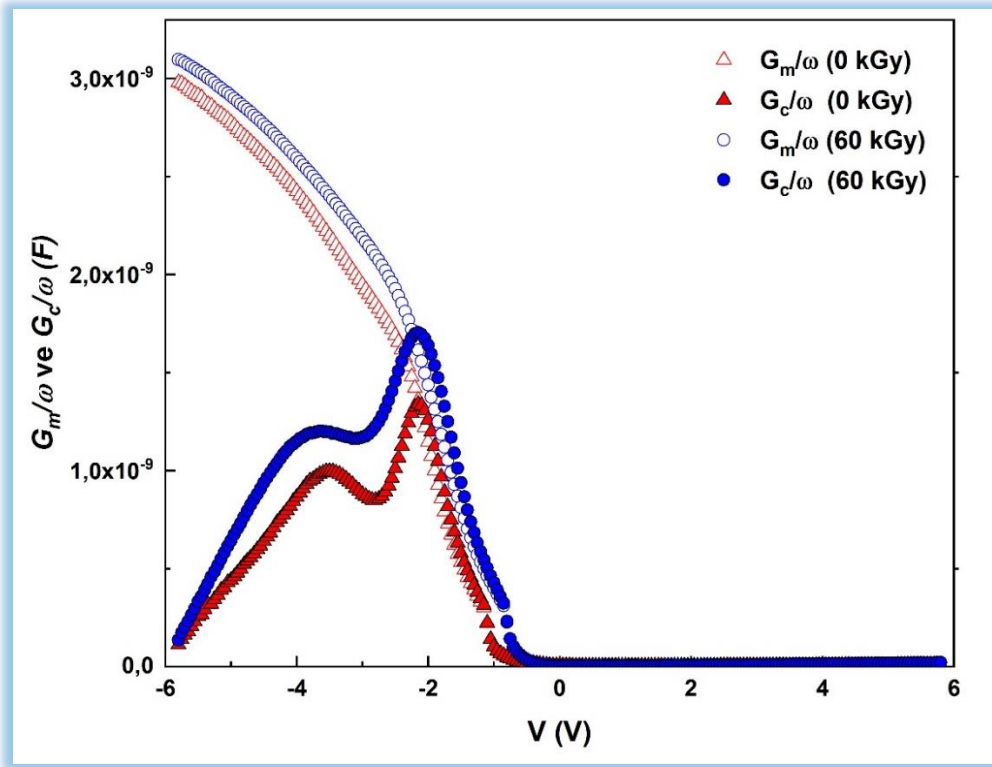
$$C_c = \frac{((G_m)^2 + (\omega C_m)^2)C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (6.10)$$

$$G_c = \frac{((G_m)^2 + (\omega C_m)^2)a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (6.11)$$

$$a = G_m - ((G_m)^2 + (\omega C_m)^2)R_s \quad (6.12)$$



Şekil 6.5. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki C_m ve C_c grafikleri.



Şekil 6.6. MPS tipi SD'nin ışınlamadan önce ve sonraki G_m/ω ve G_c/ω grafikleri.

Şekil 6.5'te görülebileceği üzere, C_m ve C_c değerlerinde, özellikle tüketim ve birikim bölgelerinde önemli farklılıklar ortaya çıkmıştır. Yine Şekil 6.6'da görülebileceği gibi, G_m/ω ile G_c/ω değerlerinde önemli farklılıklar gözlemlenmesinin yanı sıra düzeltilmiş karakteristikler ışınlama öncesi ve sonrası için tüketim bölgesinde pik vermişlerdir. Bu davranışlar, bulk ve arayüzeyde tuzaklanmış yükler ile R_s etkileri ile doğrudan ilişkilidir [98]. Başka bir şekilde ifade etmek gerekirse, R_s değerleri, tüketim ve birikim bölgelerindeki kondüktans değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Daha önce de vurgulandığı gibi, R_s 'ler göz ardı edilirse, radyasyon etkilerini anlamak için yapılan analizlerde önemli hatalar meydana gelecektir. Ayrıca, ışınlama öncesi ve sonrasında düzeltilmiş kondüktans grafiklerindeki piklerde ortaya çıkan genlik farkları ise, arayüzey durumlarının yeniden sıralanması ve yeniden yapılandırılmasıyla ilgilidir.

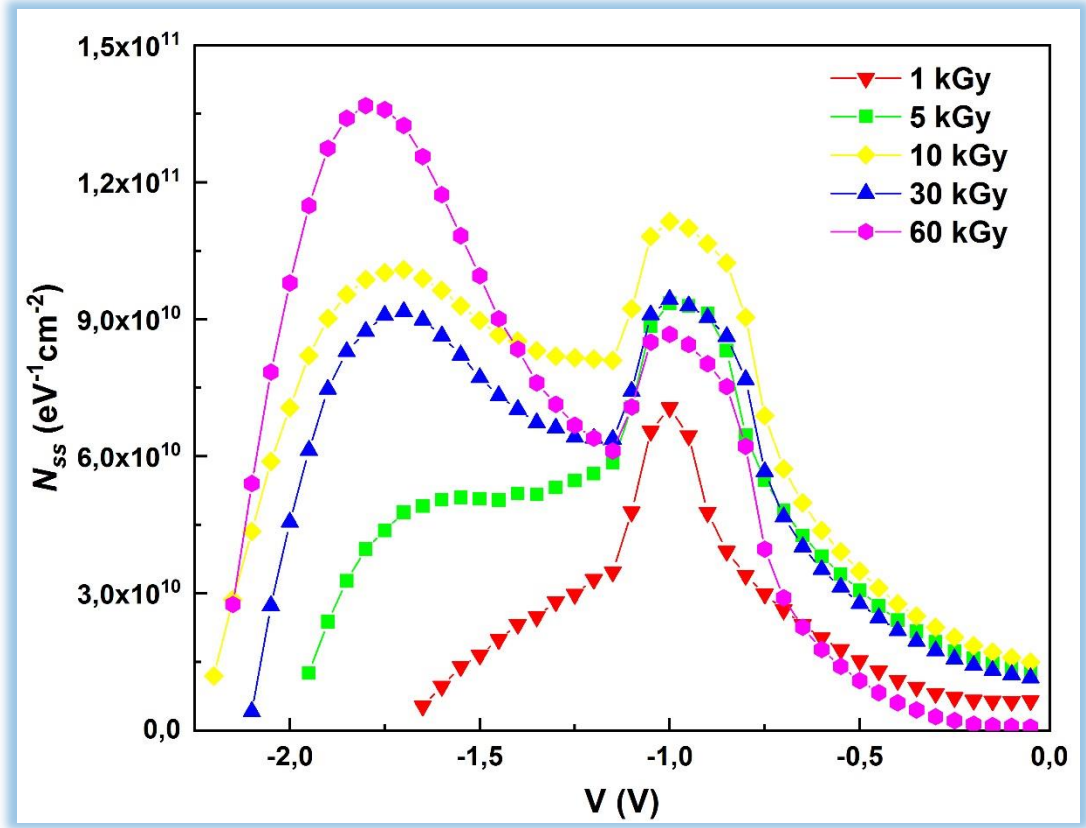
Radyasyon kaynaklı arayüzey durumları, SD'ler ve benzer malzemelerdeki diğer parametrelerin etkisinde önemli bir rol üstlenmektedir. N_{ss} değerlerini belirlemek için literatürde farklı yöntemler sunulmuştur. Bu yöntemlerin bazıları Nicollian-Brews [102], Castagne-Vapaille [124] ve Hill-Coleman [125] tarafından önerilmiştir. Yüksek

ve düşük frekansta kapasitans ve kondüktans ölçümlerine dayanan Castagne-Vapaille yöntemi, Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de gösterilen kapasitans-kondüktans grafikleri için oldukça uygun bir yöntemdir. Kapasitans veya kondüktans grafiklerinde herhangi bir pik olmadığı için, bu tür bir yapıda Hill-Coleman yöntemi kullanılamayacaktır. Ayrıca, Castagne-Vapaille yöntemi sadece frekansa bağlı ölçümler için değil, aynı zamanda radyasyona bağlı ölçümler için de uyarlanabilmektedir. Buna göre, voltaja bağlı N_{ss} profillerini elde etmek için Denklem 6.13 kullanılmış ve elde edilen sonuçlar tüm radyasyon dozları için Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Buradaki C_{ox} ifadesi, arayüzey tabakasının (ZnO-PVA) kapasitansdır ve değeri Denklem 6.14'te verilen formül kullanılarak, güçlü birikim bölgesinden 7,28 nF şeklinde hesaplanmıştır. Bununla birlikte, düzeltilmiş kondüktans grafiklerinde ($G_c/\omega-V$) bir pik ortaya çıktığı için, düzeltilmiş kapasitans-kondüktans değerleri için Hill-Coleman yöntemi uygulanabilir. Bu durumda, Hill-Coleman tarafından önerilen Denklem 6.15, N_{ss} değerlerinin hesaplanmasında başka bir yöntem olarak kullanılmıştır. Bu yöntemle hesaplanan N_{ss} yoğunluğu, ışınlamadan önce $3,78 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ olarak elde edilirken 60 kGy ışınlamadan sonra $5,46 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ olacak şekilde hesaplanmıştır.

$$N_{ss} = \frac{1}{qA} \left[\left(\frac{1}{C_{before}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{after}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} \right] \quad (6.13)$$

$$C_{ox} = C_m \cdot \left(1 + \left(\frac{G_m}{\omega C_m} \right)^2 \right) \quad (6.14)$$

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \left[\frac{G_{c,max} / \omega}{(G_{c,max} / (\omega C_{ox}))^2 + (1 - (C_c / C_{ox}))^2} \right] \quad (6.15)$$



Şekil 6.7. MPS tipi SD’de ışınlama dozlarına bağlı olarak görülen N_{ss} -V profilleri.

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi, -2 V civarındaki ilk pikte, N_{ss} değerleri artan ışınlama dozlarıyla neredeyse düzenli olarak artarken, sadece 30 kGy ışınlama dozundan sonra azalma eğilimi göstermiştir. N_{ss} değerlerindeki herhangi bir azalma, büyütülen yalıtkan/polimer arayüzey tabakası nedeniyle rekombinasyon merkezlerinin azaltılması ve yarıiletken yüzeyinin pasifleştirilmesi ile açıklanmaktadır [99]. Ancak, çalışmamızda N_{ss} ’nin artışı daha etkili olduğundan, 30 kGy radyasyon dozundan sonra N_{ss} değerlerindeki azalma, bu dozda rekombinasyon merkezlerinin azalmasıyla açıklanabilir. Öte yandan, -1 V civarında görülen ikinci pikler için N_{ss} değerlerinde 10 kGy radyasyon dozuna kadar bir artış gözlenirken, daha büyük dozlarda azalma meydana gelmiştir. Benzer bir davranış kapasitans karakteristiklerinde de şu şekilde meydana gelmiştir. Şöyle ki; tüketim bölgesindeki kapasitans değerleri 10 kGy’e kadar olan radyasyon dozlarında inversiyon bölgesine doğru kayma eğiliminde iken daha büyük dozlarda (30 ve 60 kGy) bu değerler birikim bölgesine doğru kaymışlardır. Bu davranışlar, özellikle de tüketim bölgesinde arayüzey durumlarının kapasitans karakteristikleri üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Hill-Coleman tarafından önerilen ve bazı araştırmacılar tarafından [41,98,119,123] radyasyon çalışmalarına uyarlanan ikinci yöntem yine N_{ss} yoğunluğunda radyasyona bağlı olarak bir artış olduğunu göstermiştir. Böylece, ışınlamadan sonra N_{ss} değerindeki artış farklı bir yöntemle de doğrulanmıştır. Bu davranış, radyasyona bağlı kusurların yanı sıra gama ışımasından sonra ortaya çıkan tuzak yükleri ve rekombinasyon merkezlerine atfedilebilir. Bununla birlikte, ikinci yöntem kullanılarak hesaplanan N_{ss} değerlerinin Fermi enerji seviyesini sabitlemek için yeterince yüksek olmadığı grlmştir (10^{12} eV⁻¹cm⁻² mertebesinde). Diğer yandan, N_{ss} değerlerindeki maksimum değişimin yaklaşık olarak $1,4 \times 10^{11}$ eV⁻¹cm⁻² civarında olduğu gözlemlenmiştir (şekil 6.7). Dolayısıyla, 60 kGy gama-ışınları uygulandıktan sonra malzemede önemli bir değişiklik görülmediğini söylemek mümkündür. Sonuç olarak, uygulanan doz aralığında, bu MPS tipi SD'nin çalışmasını engelleyecek önemli bir kusur veya bozulma ortaya çıkmamıştır ki bu sonuç, üretmiş olduğumuz bu diyotların 0-60 doz aralığındaki gama-ışınlarına karşı dirençli olduğu anlamına gelmektedir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, geleneksel yalıtkan/oksit tabakasına sahip yapılar yerine Al/(ZnO-PVA)/p-Si (MPS) tipi Schottky diyotları üretilerek bu diyotların ^{60}Co gama-ışınlanması altındaki davranışları incelenmiştir. Ortaya çıkacak olan radyasyon tepkisinin doğru ve kapsamlı bir şekilde anlaşılabilmesi için ışınlama öncesinde ve 1 kGy, 5 kGy, 10 kGy, 30 kGy ve 60 kGy dozundaki gama-ışınlaması sonrasında bu MPS tipi diyotların $I-V$ ve $C-G/\omega-V$ ölçümleri alınmış ve bu ölçümlerden faydalanılarak da temel diyot parametreleri çeşitli hesaplama yöntemleriyle elde edilmiştir. Ölçümler neticesinde, $C-G/\omega-V$ karakteristiklerinin radyasyona bağlı olarak belirgin değişim davranışları sergilediği görülürken $I-V$ ölçümlerinde özellikle ters beslem bölgesinden elde edilen parametrelerin radyasyondan belirgin ölçüde etkilendiği, ileri beslem bölgelerinde ise daha küçük oranda radyasyon davranışlarının ortaya çıktığı görülmüştür. Diğer yandan, $I-V$ ve $C-G/\omega-V$ ölçümlerinden elde edilen ortak parametrelerin radyasyon tepkisinin birbiriyle uyum içinde olduğu görülmüştür ki bu sonuç, ölçüm ve hesaplamaların doğruluğunu destekler niteliktedir. Ölçüm ve hesaplamalar neticesinde tespit edilen sonuçlar özetle aşağıdaki gibidir.

Akıma bağlı parametrelerden elde edilen sonuçlar:

1. SD'nin gama-ışın kaynağına maruz bırakılması neticesinde ışınlama dozlarının artışına paralel olarak ters doyum akımlarında bir artış görülmüştür. Bu sonuç, derin seviyelerin bir üretim merkezi olarak rol üstlenmesinden kaynaklanmıştır.
2. İdealite faktörünün radyasyondan bağımsız olarak 1'den oldukça büyük olduğu tespit edilmiştir ki tartışma bölümünde bu davranışın diğer akım/iletim mekanizmalarının varlığının bir sonucu olarak ortaya çıktığı vurgulanmıştır. Diğer bir deyişle, ışınlamadan önce ve tüm radyasyon doz seviyelerinden sonra elde

edilen yüksek n değerleri, standart TE teorisinden sapmanın bir göstergesidir. Öte yandan, artan gama-ışınlama dozlarına bağlı olarak idealite faktöründe küçük miktarda da olsa azalma meydana gelmiştir. Bu sonuç, tüketim tabakası genişliğinin radyasyona bağlı olarak büyümesine ve radyasyona bağlı arayüzey durumlarının artmasına atfedilebileceği gibi 5 kGy'den daha büyük ışınlama dozlarında ortaya çıktığı düşünölen gama-ışınlamasının termal tavlama etkisinden de kaynaklı olabilir.

3. Gama-ışınlaması, yarıiletkenin birleşme noktasındaki bant aralığında bazı kusurlara neden olabilmektedir. Bu kusurlar da serbest taşıyıcı konsantrasyonunu etkileyerek malzemelerin bariyer yüksekliğinde bir azalmaya veya artışa yol açabilmektedir. Bu etkinin bir sonucu olarak Al/ZnO-PVA/p-Si tipi bu SD'nin Φ_{B0} değerleri, artan ışınlama dozlarına bağlı olarak azalma eğilimi göstermiştir. Radyasyona bağlı olarak bariyer yüksekliğindeki bir azalma literatürde daha çok Poole-Frenkel etkisi olarak bilinir ki bu etki yine taşıyıcıların termal üretimi neticesinde ortaya çıkar.
4. R_s değerleri, radyasyona bağlı olarak 5 kGy ışınlama dozuna kadar artma ve daha büyük dozlarda yeniden azalma eğilimi göstermiştir. Bununla birlikte, R_{sh} değerleri bunun aksine bir davranış sergileyerek 5 kGy ışınlama dozuna kadar azalmış ve daha sonra artma eğilimi göstermiştir. R_s değerlerindeki azalma ve R_{sh} değerlerindeki artma eğilimi malzemede iyileşmenin bir göstergesidir ki bu durum, çoğunlukla gama-ışınlarının tavlama etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu sonuç, 5 kGy ışınlama dozundan sonra radyasyonun tavlama etkisinin ortaya çıktığının bir göstergesidir. Yine 5 kGy'den daha büyük ışınlama dozlarında diyotun doğrultma oranının (RR) artmaya başlaması, bu sonucu kanıtlar niteliktedir.
5. Yine $I-V$ ölçümlerinden radyasyon dozlarına bağlı olarak elde edilen $(E_{ss}-E_v)-N_{ss}$ profillerinde, arayüzey durumlarının, yarıiletkenin orta-bant boşluğundan valans bandının üst kenarına doğru üstel bir şekilde azaldığı görölmüştür. Ayrıca, artan ışınlama dozları ile N_{ss} değerlerinde azalmaların meydana geldiği görölmüştür. Elektron-hol çiftlerinin radyasyon altında rekombinasyonunun yanı sıra bant-boşluğundaki arayüzey durumlarının elektrik alanı ve radyasyon altında yeniden düzenlenmesi ve yeniden yapılandırılmasının sonucu olarak bu davranışlar ortaya çıkmıştır.

Kapasitans ve kondüktansa bağlı parametrelerden elde edilen sonuçlar:

1. Kapasitans karakteristikleri, artan gama-ışınlama dozlarına bağlı olarak karmaşık davranışlar sergilerken, kondüktans karakteristikleri, özellikle birikim ve tüketim bölgelerinde neredeyse düzenli tepkiler ortaya koymuştur. $C-V$ karakteristiklerinin karmaşık davranışı, enerji boşluğunda radyasyona bağlı bazı kusurların yanı sıra arayüzey durumlarının özel dağılımına ve bunların elektrik alanı altında yeniden yapılandırılmasına/düzenlenmesine atfedilmiştir. Öte yandan, kondüktans karakteristikleri üzerindeki diğer etkilerin yanı sıra bu karakteristiklerdeki değişimlere sebebiyet veren ana parametrelerin R_s ve N_{ss} olduğu da tespit edilmiştir.
2. Işınlama dozlarındaki artışla birlikte metal tarafından bakılan bariyer yüksekliğinde (Φ_B) çoğunlukla bir artma eğilimi gözlemlenmiş olmasına karşın, 10 kGy radyasyon dozundan sonra gama-ışınlamasının tavlama etkisinin bir sonucu olarak bariyer yüksekliğinde ani bir azalış meydana gelmiştir.
3. R_s-V profillerinde, artan radyasyon dozları ile genlikleri değişen ve inversiyon bölgesine doğru kayan pikler görülmüştür. Bu davranışlar, bant boşluğunda meydana gelen tuzak yüklerine ve bunların radyasyon ve voltaja bağlı dağılımına atfedilmiştir. Bu davranışların etkileri aynı zamanda, kapasitans karakteristikleri üzerinde de net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Öte yandan, gerçek R_s değerlerinin 5 kGy radyasyon dozuna kadar artış gösterdiği ve daha büyük dozlarda gama-ışınlamasının tavlama etkisi nedeniyle kısmi bir azalma eğilimi sergilediği görülmüştür. Bu davranış, yüksek dozlardaki gama-ışınlamasında, malzemenin elektriksel parametrelerinde kısmi bir iyileşmeye yol açan dinamik bir dengenin ortaya çıkmasından kaynaklanmıştır. Böylece, 5 kGy gama-ışınlama dozundan daha yüksek dozlarda aktif hale gelen tavlama etkisi, R_s değerlerinde yeniden azalmaya neden olmuştur. Öte yandan, R_s değerlerinin, başta kondüktans karakteristikleri olmak üzere birçok parametre üzerinde, özellikle de birikim bölgesinde etkili olduğu görülmüştür ki bu durum, R_s 'nin hesaplamalarda dikkate alınmasının ne kadar önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır.

4. Castagne-Vapaille ve Hill-Coleman tarafından önerilen her iki yöntemle elde edilen N_{ss} değerlerinde, radyasyona bağlı olarak bir artış gözlemlenmiştir. Bu davranış, radyasyona bağlı kusurların yanı sıra gama-ışınmasından sonra ortaya çıkan tuzak yükleri ve rekombinasyon merkezlerine atfedilmiştir. Bununla birlikte, Hill-Coleman yöntemi kullanılarak hesaplanan N_{ss} yoğunluğunun, Fermi enerji seviyesini sabitlemek için yeterince büyük olmadığı (10^{12} eV⁻¹cm⁻² mertebesinde) tespit edilmiştir. Yine, Castagne-Vapaille metodu kullanılarak hesaplanan N_{ss} değerlerindeki maksimum değişimin $1,4 \times 10^{11}$ eV⁻¹cm⁻² civarında olduğu görülmüştür ki bu sonuç, 0-60 kGy dozundaki gama-ışınlarına maruz kalan Al/(ZnO-PVA)/p-Si (MPS) tipi SD'nin bu doz aralığındaki gama-ışınlanmasından önemli ölçüde etkilenmediği anlamına gelmektedir.

Sonuç olarak, 0-60 kGy doz aralığında, bu MPS tipi SD'nin çalışmasını önleyecek önemli bir kusur veya bozulmanın ortaya çıkmadığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, güneş pilleri, diyot, kapasitör ve transistör gibi elektronik malzemelerin radyasyona dayanıklı olarak üretimi açısından oldukça önemlidir. Çünkü, uzay ortamının doğal olarak elektrik/manyetik alanlardan, yüklü parçacıklardan ve güneş/galaktik radyasyondan oluştuğu dikkate alındığında uydu sistemlerinde kullanılmak üzere radyasyona dayanıklı elektronik malzemelerin üretilmesi, bu sistemlerin çalışma güvenilirliğini artırması açısından oldukça önemlidir. Öte yandan, biyomedikal cihazlar ve bazı endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemeler, benzer radyasyon etkilerine maruz kalabilmektedir ki bu cihazların da güvenli bir şekilde çalışması, radyasyona dayanıklı malzeme üretimine bağlıdır. Kısaca ifade etmek gerekirse, özellikle uzay, nükleer sanayi ve biyomedikal uygulamalarda kullanılmak üzere radyasyona dayanıklı elektronik malzeme bileşenlerinin üretimine ciddi anlamda ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasının ilgi çekici olacağı ve literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Öte yandan, belirgin radyasyon davranışı sergilemesinin yanında radyasyon altında bozulma eğilimi göstermemesi, bu SD'nin MIS/MOS tipi detektörler yerine MPS tipi bir radyasyon dedektörü olarak başarılı bir şekilde kullanılabilmesi anlamına gelmektedir. Çünkü, organik/polimer tabakalar, geleneksel yalıtkan/oksit tabakalarına kıyasla daha az enerji tüketiminin yanında esnek, ucuz ve molekül başına hafif olma gibi birçok avantaja sahiptirler. Fabrikasyon açısından bakıldığında ise, elektrospining ve sol-gel

gibi daha kolay üretim yöntemleri ve süreçleriyle organik tabakalar, bu yönleriyle de üstün özellikler ortaya koymaktadırlar. Bu yüzden de bu tabakalar son yıllarda geleneksel ara tabakalar yerine daha fazla tercih edilmektedirler.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde olabilecek ve böylece çalışmanın kapsamını artıracak bazı öneriler ise aşağıdaki gibidir.

1. Arayüzey tabaka kalınlığının etkisini ve radyasyona bağlı sonuçlarını daha iyi bir şekilde değerlendirebilmek adına, farklı kalınlıktaki organik ara tabakalara sahip malzemeler üretilerek aynı radyasyon dozları altında karşılaştırılabilir.
2. Radyasyon öncesi ve her bir ışınlama dozu sonrasında DLTS ölçümleri gerçekleştirilerek ölçüm ve hesaplama sonuçları desteklenebilir.
3. Radyasyon öncesi ve her bir ışınlama dozu sonrasında yüksek ve düşük frekans değerlerindeki $C-G/\omega-V$ ölçümleri gerçekleştirilerek hesaplamalar genişletilebilir.
4. Bu malzeme için özellikle 5-10 kGy aralığındaki radyasyon dozları sıklaştırılabilir veya daha yüksek dozlara çıkılarak aynı malzemenin daha yüksek dozlardaki davranışı gözlemlenebilir.
5. Radyasyon uygulandıktan sonra, belirli periyotlarla ölçümler alınarak radyasyon etkilerinin zamana bağlı olarak nasıl bir davranış sergilediği gözlemlenebilir.
6. Radyasyon dozlarındaki değişimin yanı sıra sıcaklığa bağlı ölçümler de alınabilir ki böylece sıcaklığın ışınlanmış numuneler üzerindeki etkisi değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Altındal, Ş., Tataroğlu, A., and Dökme, İ., "Density of interface states, excess capacitance and series resistance in the metal-insulator-semiconductor (MIS) solar cells", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 85 (3): 345–358 (2005).
2. Tüzün, Ö., Altındal, Ş., and Oktik, Ş., "Effects of illumination and ^{60}Co γ -ray irradiation on the electrical characteristics of porous silicon solar cells", *Renewable Energy*, 33 (2): 286–292 (2008).
3. Tobnaghi, D. M., Rahnamaei, A., and Vajdi, M., "Experimental study of gamma radiation effects on the electrical characteristics of silicon solar cells", *International Journal Of Electrochemical Science*, 9 (6): 2824–2831 (2014).
4. Sahin, R. and Kabacelik, I., "Effects of ionizing radiation on the properties of mono-crystalline Si solar cells", *Radiation Physics And Chemistry*, 150 (February): 90–94 (2018).
5. Tanrıku, E. E., Demirezen, S., Altındal, Ş., and Uslu, İ., "Analysis of electrical characteristics and conduction mechanisms in the Al/(%7 Zn-doped PVA)/p-Si (MPS) structure at room temperature", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 28 (12): 8844–8856 (2017).
6. Akhlaghi, E. A., Badali, Y., Altındal, S., and Azizian-Kalandaragh, Y., "Preparation of mixed copper/PVA nanocomposites as an interface layer for fabrication of Al/Cu-PVA/p-Si Schottky structures", *Physica B: Condensed Matter*, 546 (July): 93–98 (2018).
7. Sekhar Reddy, P. R., Janardhanam, V., Jyothi, I., Yuk, S. H., Rajagopal Reddy, V., Jeong, J. C., Lee, S. N., and Choi, C. J., "Modification of schottky barrier properties of Ti/p-type InP schottky diode by polyaniline (PANI) organic interlayer", *Journal Of Semiconductor Technology And Science*, 16 (5): 664–674 (2016).
8. Batra, V. and Kotru, S., "Illumination effects on the ferroelectric and photovoltaic properties of $\text{Pb}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46}\text{O}_3$ thin film based asymmetric MFM structure", *Journal Of Applied Physics*, 122 (23): 234101 (2017).
9. Xu, Y., Bi, J., Xi, K., and Liu, M., "The effects of γ -ray irradiation on graphene/n-Si Schottky diodes", *Applied Physics Express*, 12 (6): 061004 (2019).

10. Feteha, M. Y., Soliman, M., Gomaa, N. G., and Ashry, M., "Metal-insulator-semiconductor solar cell under gamma irradiation", *Renewable Energy*, 26 (1): 113–120 (2002).
11. Umana-Membreno, G. A., Dell, J. M., Parish, G., Nener, B. D., Faraone, L., and Mishra, U. K., "⁶⁰Co Gamma Irradiation Effects on n-GaN Schottky Diodes", *IEEE Transactions On Electron Devices*, 50 (12): 2326–2334 (2003).
12. Ashry, M. and Fayek, S. A., "Radiation effects on fabricated Cu₂S/CdS heterojunction photovoltaic cells", *Renewable Energy*, 23 (3–4): 441–450 (2001).
13. Srour, J. R. and Palko, J. W., "Displacement damage effects in irradiated semiconductor devices", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 60 (3): 1740–1766 (2013).
14. Taşçıoğlu, İ., Tüzün Özmen, Ö., Şağban, H. M., Yağlıoğlu, E., and Altındal, Ş., "Frequency Dependent Electrical and Dielectric Properties of Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si Schottky Barrier Diode", *Journal Of Electronic Materials*, 46 (4): 2379–2386 (2017).
15. Kaya, S., Yilmaz, E., Kahraman, A., and Karacali, H., "Frequency dependent gamma-ray irradiation response of Sm₂O₃ MOS capacitors", *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research, Section B: Beam Interactions With Materials And Atoms*, 358: 188–193 (2015).
16. Sze, S. M. and Ng, K. K., "Physics of Semiconductor Devices", Third ed. Ed., *John Wiley & Sons, Inc.*, Hoboken, NJ, USA, (2006).
17. Keskin, M., Akkaya, A., Ayyıldız, E., Uygun Öksüz, A., and Özbay Karakuş, M., "Investigation of the temperature-dependent electrical properties of Au/PEDOT:WO₃/p-Si hybrid device", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 30 (17): 16676–16686 (2019).
18. Reddy, V. R., "Electrical properties of Au/polyvinylidene fluoride/n-InP Schottky diode with polymer interlayer", *Thin Solid Films*, 556: 300–306 (2014).
19. Alptekin, S. and Altındal, Ş., "A comparative study on current/capacitance: voltage characteristics of Au/n-Si (MS) structures with and without PVP interlayer", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 30 (7): 6491–6499 (2019).
20. Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., "Metal-Semiconductor Contacts", 2nd ed. Ed., *Clarendon Press*, Oxford, 252 (1988).

21. Mirzanezhad-Asl, R., Phirouznia, A., Altindal, Badali, Y., and Azizian-Kalandaragh, Y., "Fabrication, structural and electrical characterization of Au/(CuSe-polyvinyl alcohol)/n-Si (MPS) Schottky barrier structures", *Physica B: Condensed Matter*, 561: 1–8 (2019).
22. Demirezen, S. and Altindal Yerişkin, S., "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 (2020).
23. Binder, D., Smith, E. C., and Holman, A. B., "Satellite Anomalies From Galactic Cosmic Rays", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 22 (6): 2675–2680 (1975).
24. Laha, P., Banerjee, I., Barhai, P. K., Das, A. K., Bhoraskar, V. N., and Mahapatra, S. K., "Effects of 6 MeV electron irradiation on the electrical properties and device parameters of Al/Al₂O₃/TiO₂/n-Si MOS capacitors", *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research, Section B: Beam Interactions With Materials And Atoms*, 283: 9–14 (2012).
25. Güllü, Ö., Çankaya, M., Biber, M., and Türüt, A., "Gamma irradiation-induced changes at the electrical characteristics of organic-based schottky structures", *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 41 (13): 135103 (2008).
26. Badila, M., Godignon, P., Millan, J., Berberich, S., and Brezeanu, G., "The electron irradiation effects on silicon gate dioxide used for power MOS devices", *Microelectronics Reliability*, 41 (7): 1015–1018 (2001).
27. García, H., Dueñas, S., Castán, H., Gómez, A., Bailón, L., Barquero, R., Kukli, K., Ritala, M., and Leskelä, M., "Irradiation effect on dielectric properties of hafnium and gadolinium oxide gate dielectrics", *Journal Of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics And Nanometer Structures*, 27 (1): 416 (2009).
28. Ali, K., Khan, S. A., and MatJafri, M. Z., "⁶⁰Co γ -irradiation effects on electrical characteristics of monocrystalline silicon solar cell", *International Journal Of Electrochemical Science*, 8 (6): 7831–7841 (2013).
29. Winokur, P. S., Schwank, J. R., McWhorter, P. J., Turpin, D. C., and Dressendorfer, P. V., "Correlating the Radiation Response of Mos Capacitors and Transistors", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 31 (6): 1453–1460 (1984).
30. Tataroğlu, A., Altindal, Ş., Bölükdemir, M. H., and Tanir, G., "Irradiation effect on dielectric properties and electrical conductivity of Au/SiO₂/n-Si (MOS) structures", *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research, Section B: Beam Interactions With Materials And Atoms*, 264 (1): 73–78 (2007).

31. Demirezen, S., Kaya, A., Altındal, Ş., and Uslu, İ., "The energy density distribution profile of interface traps and their relaxation times and capture cross sections of Au/GO-doped PrBaCoO nanoceramic/n-Si capacitors at room temperature", *Polymer Bulletin*, 74 (9): 3765–3781 (2017).
32. Demirezen, S., Tanrikulu, E. E., and Altındal, Ş., "The study on negative dielectric properties of Al/PVA (Zn-doped)/p-Si (MPS) capacitors", *Indian Journal Of Physics*, 93 (6): 739–747 (2019).
33. Tataroğlu, A., Altındal, Ş., and Azizian-Kalandaragh, Y., "C-V-f and G/ω-V-f characteristics of Au/(In₂O₃-PVP)/n-Si (MPS) structure", *Physica B: Condensed Matter*, 582: 411996 (2020).
34. Ersöz, G., Yücedağ, I., Azizian-Kalandaragh, Y., Orak, I., and Altındal, Ş., "Investigation of Electrical Characteristics in Al/CdS-PVA/p-Si (MPS) Structures Using Impedance Spectroscopy Method", *IEEE Transactions On Electron Devices*, 63 (7): 2948–2955 (2016).
35. Altındal-Yerişkin, S., Balbaşı, M., and Orak, İ., "The effects of (graphene doped-PVA) interlayer on the determinative electrical parameters of the Au/n-Si (MS) structures at room temperature", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 28 (18): 14040–14048 (2017).
36. Demirezen, S. and Altındal Yerişkin, S., "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 (2020).
37. Vijayalakshmi, S., Venkataraj, S., and Jayavel, R., "Characterization of cadmium doped zinc oxide (Cd : ZnO) thin films prepared by spray pyrolysis method", *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 41 (24): 245403 (2008).
38. Card, H. C. and Rhoderick, E. H., "Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes", *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 4 (10): 319 (1971).
39. Arslan, E., Altındal, Ş., Özçelik, S., and Ozbay, E., "Tunneling current via dislocations in Schottky diodes on AlInN/AlN/GaN heterostructures", *Semiconductor Science And Technology*, 24 (7): 075003 (2009).
40. Dökme, I. and Altındal, Ş., "The effect of gamma irradiation on electrical and dielectric properties of Al-TiW-Pd₂Si/n-Si Schottky diode at room temperature", *Current Applied Physics*, 12 (3): 860–864 (2012).
41. Teffahi, A., Hamri, D., Mostefa, A., Saidane, A., Al Saqri, N., Felix, J. F., and Henini, M., "Effect of ⁶⁰Co γ-ray irradiation on electrical properties of Ti/Au/GaAs_{1-x}N_x Schottky diodes", *Current Applied Physics*, 16 (8): 850–858 (2016).

42. Kaya, S., Aktag, A., and Yilmaz, E., "Effects of gamma-ray irradiation on interface states and series-resistance characteristics of BiFeO₃ MOS capacitors", *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research, Section B: Beam Interactions With Materials And Atoms*, 319: 44–47 (2014).
43. Dökme, I., Durmuş, P., and Altindal, Ş., "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 (2008).
44. Chauhan, R. K. and Chakrabarti, P., "Effect of ionizing radiation on MOS capacitors", *Microelectronics Journal*, 33: 197–203 (2002).
45. Taşcıoğlu, I., Tataroğlu, A., Özbay, A., and Altindal, Ş., "The role of ⁶⁰Co γ -ray irradiation on the interface states and series resistance in MIS structures", *Radiation Physics And Chemistry*, 79 (4): 457–461 (2010).
46. Braun, F., "Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle", *Annalen Der Physik Und Chemie*, 229 (12): 556–563 (1875).
47. Sharma, B. L., "Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications", *Springer US*, Boston, MA, (1984).
48. A. H. Wilson, "The theory of electronic semiconductors", *Proceedings Of The Royal Society Of London. Series A, Containing Papers Of A Mathematical And Physical Character*, 133 (822): 458–491 (1931).
49. Schottky, W., "Halbleitertheorie der Sperrschicht", *Die Naturwissenschaften*, 26 (52): 843–843 (1938).
50. Mott, N. F., "Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor", *Mathematical Proceedings Of The Cambridge Philosophical Society*, 34 (4): 568–572 (1938).
51. H.K. Henisch, "Rectifying Semiconductor Contacts", Clarendon. Ed., Oxford, (1957).
52. A.G. Milnes and D.L. Feucht, "Heterojunctions and Metal Semiconductor Junctions", Academic P. Ed., *Elsevier*, New York, (1972).
53. E.H. Rhoderick, "Metal-Semiconductor Contacts", Clarendon. Ed., Oxford, (1978).
54. Rhoderick, E. H., "Metal-semiconductor contacts", *IEE Proceedings I Solid State And Electron Devices*, 129 (1): 1 (1982).
55. Rideout, V. L., "A review of the theory, technology and applications of metal-semiconductor rectifiers", *Thin Solid Films*, 48 (3): 261–291 (1978).

56. Sharma, B. L. and Gupta, S. C., "Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications", *Solid State Technology*, 23: (1980).
57. Çiçek, O., "Polivinil alkol arayüzey tabakalı schottky engel diyotların hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2016).
58. Tan, S. O., "ZnO Arayüzey Tabakalı Schottky Engel Diyotlarının Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin Aydınlatma Şiddetine Bağlı İncelenmesi", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2016).
59. Internet: Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (EPA), "Radiation Basics", <https://www.epa.gov/radiation/radiation-basics> (2020).
60. Internet: Radyasyondan Korunma Derneği (TRKD), "Elektromagnetik Radyasyon", <http://www.trkd.org.tr/yararli-bilgiler/radyasyon-nedir/643-elektromagnetik-radyasyon.html> (2020).
61. Internet: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), "Radyasyon Nedir?", <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-nedir> (2020).
62. Uslu, H., "Au/(Co, Zn-Katkılı) Polivinil Alkol/n-Si Schottky Engel Diyotlarının Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin Aydınlatma Şiddetine Bağlı İncelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).
63. Srour, J. R., Marshall, C. J., and Marshall, P. W., "Review of Displacement Damage Effects in Silicon Devices", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 50 (3): 653–670 (2003).
64. Wigner, E. P., "Theoretical Physics in the Metallurgical Laboratory of Chicago", *Journal Of Applied Physics*, 17 (11): 857–863 (1946).
65. K. Lark-Horovitz, E. Bleuler, R. Davis, and D. Tendam, "Deuteron-bombarded semiconductors", *Physical Review*, 73: 1256 (1948).
66. R. E. Davis, W. E. Johnson, K. Lark-Horovitz, and S. Siegel, "Neutron-bombarded germanium semiconductors", *Physical Review*, 74: 1255 (1948).
67. Johnson, W. E. and Horovitz, K. L., "Neutron Irradiated Semiconductors", *Physical Review*, 76 (3): 442–443 (1949).
68. Brattain, W. H. and Pearson, G. L., "Changes in Conductivity of Germanium Induced by Alpha-Particle Bombardment", *Physical Review*, 80 (5): 846–850 (1950).
69. Curtis, O. L., "Effects of Point Defects on Electrical and Optical Properties of Semiconductors", Point Defects in Solids, *Springer US*, Boston, MA, 257–332 (1975).

70. Brown, W. L., Augustyniak, W. M., and Waite, T. R., "Annealing of Radiation Defects in Semiconductors", *Journal Of Applied Physics*, 30 (8): 1258–1268 (1959).
71. Watkins, G. D., Corbett, J. W., and Walker, R. M., "Spin Resonance in Electron Irradiated Silicon", *Journal Of Applied Physics*, 30 (8): 1198–1203 (1959).
72. Bemski, G., "Paramagnetic Resonance in Electron Irradiated Silicon", *Journal Of Applied Physics*, 30 (8): 1195–1198 (1959).
73. Gossick, B. R., "Disordered Regions in Semiconductors Bombarded by Fast Neutrons", *Journal Of Applied Physics*, 30 (8): 1214–1218 (1959).
74. Crawford, J. H. and Cleland, J. W., "Nature of Bombardment Damage and Energy Levels in Semiconductors", *Journal Of Applied Physics*, 30 (8): 1204–1213 (1959).
75. Gereth, R., Haitz, R. H., and Smits, F. M., "Effects of Single Neutron-Induced Displacement Clusters in Special Silicon Diodes", *Journal Of Applied Physics*, 36 (12): 3884–3894 (1965).
76. Gregory, B. L., "Injection-Stimulated Vacancy Reordering in p-Type Silicon at 76°K", *Journal Of Applied Physics*, 36 (12): 3765–3769 (1965).
77. Summers, G. P., Burke, E. A., Dale, C. J., Wolicki, E. A., Marshall, P. W., and Gehlhausen, M. A., "Correlation of Particle-Induced Displacement Damage in Silicon", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 34 (6): 1133–1139 (1987).
78. Dale, C., Marshall, P., Cummings, B., Shamey, L., and Holland, A., "Displacement damage effects in mixed particle environments for shielded spacecraft CCDs", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 40 (6): 1628–1637 (1993).
79. Walters, R. J., Summers, G. P., and Messenger, S. R., "Analysis and modeling of the radiation response of multijunction space solar cells", *Conference Record Of The Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 2000 (Cat. No.00CH37036)*, 1092–1097 (2000).
80. C. J. Marshall and P. W. Marshall, "Proton effects and test issues for satellite designers, part B: Displacement effects", *IEEE Nuclear And Space Radiation Effects Conf. Short Course Notes*, V–50–IV–110 (1999).
81. Burke, E. A., "Energy Dependence of Proton-Induced Displacement Damage in Silicon", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 33 (6): 1276–1281 (1986).
82. Ginneken, A. Van, "Non Ionizing Energy Deposition in Silicon for Radiation Damage Studies", *Fermi National Accelerator Laboratory*, (October): 0–8 (1989).

83. Alurralde, M., Victoria, M., Caro, A., and Gavillet, D., "Nuclear and damage effects in Si produced by irradiations with medium energy protons", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 38 (6): 1210–1215 (1991).
84. A. Akkerman, J. Barak, M. B. Chadwick, J. Levinson, M. Murat, and Y. Lifshitz, "Updated NIEL calculations for estimating the damage induced by particles and γ -rays in Si and GaAs", *Radiation Physics And Chemistry*, 62: 301–310 (2001).
85. Internet: The ROSE Collaboration (CERN-RD48), "Research and Development On Silicon for Future Experiments (ROSE)", <http://rd48.web.cern.ch/rd48> (2020).
86. Lindström, G., Ahmed, M., Albergo, S., Allport, P., Anderson, D., Andricek, L., Angarano, M., Augelli, V., Bacchetta, N., Bartalini, P., Bates, R., Biggeri, U., Bilei, G., Bisello, D., Boemi, D., Borchini, E., Botila, T., Brodbeck, T., Bruzzi, M., Budzynski, T., Burger, P., Campabadal, F., Casse, G., Catacchini, E., Chilingarov, A., Ciampolini, P., Cindro, V., Costa, M., Creanza, D., Clauws, P., Da Via, C., Davies, G., De Boer, W., Dell'Orso, R., De Palma, M., Dezillie, B., Eremin, V., Evrard, O., Fallica, G., Fanourakis, G., Feick, H., Focardi, E., Fonseca, L., Fretwurst, E., Fuster, J., Gabathuler, K., Glaser, M., Grabiec, P., Grigoriev, E., Hall, G., Hanlon, M., Hauler, F., Heising, S., Holmes-Siedle, A., Horisberger, R., Hughes, G., Huhtinen, M., Ilyashenko, I., Ivanov, A., Jones, B., Jungermann, L., Kaminsky, A., Kohout, Z., Kramberger, G., Kuhnke, M., Kwan, S., Lemeilleur, F., Leroy, C., Letheren, M., Li, Z., Ligonzo, T., Linhart, V., Litovchenko, P., Loukas, D., Lozano, M., Luczynski, Z., Lutz, G., MacEvoy, B., Manolopoulos, S., Markou, A., Martinez, C., Messineo, A., Mikuž, M., Moll, M., Nossarzewska, E., Ottaviani, G., O Shea, V., Parrini, G., Passeri, D., Petre, D., Pickford, A., Pintilie, I., Pintilie, L., Pospisil, S., Potenza, R., Raine, C., Rafi, J., Ratoff, P., Richter, R., Riedler, P., Roe, S., Roy, P., Ruzin, A., Ryazanov, A., Santocchia, A., Schiavulli, L., Sicho, P., Siotis, I., Sloan, T., Slys, W., Smith, K., Solanky, M., Sopko, B., Stolze, K., Sundby Avset, B., Svensson, B., Tivarus, C., Tonelli, G., Tricomi, A., Tzamarias, S., Valvo, G., Vasilescu, A., Vayaki, A., Verbitskaya, E., Verdini, P., Vrba, V., Watts, S., Weber, E., Wegrzecki, M., Wegrzecka, I., Weilhammer, P., Wheadon, R., Wilburn, C., Wilhelm, I., Wunstorff, R., Wüstenfeld, J., Wyss, J., Zankel, K., Zabierowski, P., and Žontar, D., "Radiation hard silicon detectors—developments by the RD48 (ROSE) collaboration", *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors And Associated Equipment*, 466 (2): 308–326 (2001).
87. Fretwurst, E., Lindstrom, G., Pintilie, I., and Stahl, J., "Radiation Damage in Silicon Detectors Caused by Hadronic and Electromagnetic Irradiation", (2002).
88. Internet: RD50, "Radiation Hard Semiconductor Devices for Very High Luminosity Colliders", <http://rd50.web.cern.ch/rd50> (2020).

89. Oldham, T. R. and McLean, F. B., "Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 50 (3): 483–499 (2003).
90. Tataroğlu, A., Altındal, Ş., and Bülbül, M. M., "⁶⁰Co γ irradiation effects on the current-voltage (I-V) characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes", *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors And Associated Equipment*, 568 (2): 863–868 (2006).
91. Güllü, Ö., Demir, F., Cimilli, F. E., and Biber, M., " γ -Irradiation-induced changes at the electrical characteristics of Sn/p-Si Schottky contacts", *Vacuum*, 82 (8): 789–793 (2008).
92. Tataroğlu, A. and Altındal, Ş., "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 (2007).
93. Dixit, S. K., Zhou, X. J., Schrimpf, R. D., Fleetwood, D. M., Pantelides, S. T., Choi, R., Bersuker, G., and Feldman, L. C., "Radiation induced charge trapping in ultrathin HfO₂-based MOSFETs", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 54 (6): 1883–1890 (2007).
94. Verma, S., Praveen, K. C., Bobby, A., and Kanjilal, D., "Recovery of electrical characteristics of Au/n-Si schottky junction under ⁶⁰Co gamma irradiation", *IEEE Transactions On Device And Materials Reliability*, 14 (2): 721–725 (2014).
95. Barala, S. S., Singh, J., Ranwa, S., and Kumar, M., "Radiation Induced Response of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ Based Tunable Capacitors under Gamma Irradiation", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 62 (4): 1873–1878 (2015).
96. Abubakar, S., Kaya, S., Karacali, H., and Yilmaz, E., "The gamma irradiation responses of yttrium oxide capacitors and first assessment usage in radiation sensors", *Sensors And Actuators, A: Physical*, 258: 44–48 (2017).
97. Yilmaz, E., Kahraman, A., McGarrigle, A. M., Vasovic, N., Yegen, D., and Jaksic, A., "Investigation of RadFET response to X-ray and electron beams", *Applied Radiation And Isotopes*, 127: 156–160 (2017).
98. Maurya, S. and Awasthi, S., "Effect of zero bias, 2.7 MeV proton irradiation on HfO₂", *Journal Of Radioanalytical And Nuclear Chemistry*, 318 (2): 947–953 (2018).
99. Akay, D., Karadeniz, S., Selçuk, A. B., and Ocak, S. B., "Effect of gamma-ray irradiation on the electrical characteristics of Al/C₂₄H₁₂/p-Si nano-structure", *Physica Scripta*, 93 (9): 095301 (2018).

100. Kaya, S., Jaksic, A., and Yilmaz, E., "Co-60 gamma irradiation effects on electrical characteristics of HfO₂ MOSFETs and specification of basic radiation-induced degradation mechanism", *Radiation Physics And Chemistry*, 149 (January): 7–13 (2018).
101. Orak, I., Kocyigit, A., and Alindal, Ş., "Electrical and dielectric characterization of Au/ZnO/n-Si device depending frequency and voltage", *Chinese Physics B*, 26 (2): 028102 (2017).
102. Nicollian, E. H. and Brews, J. R., "MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology", *Wiley*, Hoboken, NJ, USA, (2003).
103. Asubay, S. and Güllü, Ö., "Current–voltage and capacitance–voltage characteristics of Fe/p-InP Schottky barriers", *International Journal Of Electronics*, 97 (8): 973–983 (2010).
104. Nezhadesm-Kohardafchahi, S., Farjami-Shayesteh, S., Badali, Y., Altındal, Jamshidi-Ghozlu, M. A., and Azizian-Kalandaragh, Y., "Formation of ZnO nanopowders by the simple ultrasound-assisted method: Exploring the dielectric and electric properties of the Au/(ZnO-PVA)/n-Si structure", *Materials Science In Semiconductor Processing*, 86 (June): 173–180 (2018).
105. Kamaruddin, S. A., Chan, K.-Y., Yow, H.-K., Zainizan Sahdan, M., Saim, H., and Knipp, D., "Zinc oxide films prepared by sol–gel spin coating technique", *Applied Physics A*, 104 (1): 263–268 (2011).
106. Erik Schaffer, "Instabilities in Thin Polymer Films: Structure Formation and Pattern Transfer", *Universitat Konstanz Fachbereich Fur Physik*, (2001).
107. Buyukbas-Uluşan, A., Altındal-Yerişkin, S., Tataroğlu, A., Balbaş, M., and Kalandaragh, Y. A., "Electrical and impedance properties of MPS structure based on (Cu₂O–CuO–PVA) interfacial layer", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 29 (10): 8234–8243 (2018).
108. Mamor, M., Sellai, A., Bouziane, K., Al Harthi, S. H., Al Busaidi, M., and Gard, F. S., "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 (2007).
109. Fonash, S. J., Ashok, S., and Singh, R., "Effect of ion-beam sputter damage on Schottky barrier formation in silicon", *Applied Physics Letters*, 39 (5): 423–425 (1981).
110. Grusell, E., Berg, S., and Andersson, L. P., "Electrical Defects in Silicon Introduced by Sputtering and Sputter-Etching", *Journal Of The Electrochemical Society*, 127 (7): 1573 (1980).

111. Tian, J. and Cao, G., "Design, fabrication and modification of metal oxide semiconductor for improving conversion efficiency of excitonic solar cells", *Coordination Chemistry Reviews*, 320–321: 193–215 (2016).
112. Cheung, S. K. and Cheung, N. W., "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", *Applied Physics Letters*, 49 (2): 85–87 (1986).
113. Norde, H., "A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance", *Journal Of Applied Physics*, 50 (7): 5052–5053 (1979).
114. Karataş, Ş., Türüt, A., and Altındal, Ş., "Irradiation effects on the C-V and G/ω-V characteristics of Sn/p-Si (MS) structures", *Radiation Physics And Chemistry*, 78 (2): 130–134 (2009).
115. Singh, R., Arora, S. K., and Kanjilal, D., "Swift heavy ion irradiation induced modification of electrical characteristics of Au/n-Si Schottky barrier diode", *Materials Science In Semiconductor Processing*, 4 (5): 425–432 (2001).
116. Tuğluoğlu, N., Karadeniz, S., Yüksel, F., Şafak, H., and Kuş, M., "⁶⁰Co gamma irradiation effects on the the capacitance and conductance characteristics of Au/PMI/n-Si schottky diodes", *Indian Journal Of Physics*, 89 (8): 803–810 (2015).
117. Champness, C. H. and Clark, W. R., "Anomalous inductive effect in selenium Schottky diodes", *Applied Physics Letters*, 56 (12): 1104–1106 (1990).
118. Birkan Selçuk, A. and Bilge Ocak, S., "⁶⁰Co γ-ray irradiation effects on the capacitance and conductance characteristics of tin oxide films on Si", *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors And Associated Equipment*, 577 (3): 719–723 (2007).
119. Yilmaz, E. and Kaya, S., "A Detailed Study on Zero-Bias Irradiation Responses of La₂O₃ MOS Capacitors", *IEEE Transactions On Nuclear Science*, 63 (2): 1301–1305 (2016).
120. Maurya, S., "Effect of zero bias Gamma ray irradiation on HfO₂ thin films", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 27 (12): 12796–12802 (2016).
121. Kumar, M. V., Kumar, S., Cheng, C., Asokan, K., Kumar, A., Shobha, V., Karanth, S. P., and Krishnaveni, S., "Influence of High Dose Gamma Irradiation on Electrical Characteristics of Si Photo Detectors", *ECS Journal Of Solid State Science And Technology*, 6 (10): 132–135 (2017).

122. Bobby, A., Shiwakoti, N., Verma, S., Gupta, P. S., and Antony, B. K., "Enhancement in electrical properties of Au/n-GaAs Schottky diodes exposed to ^{60}Co gamma rays", *Materials Science In Semiconductor Processing*, 21: 116–121 (2014).
123. Zeyrek, S., Turan, A., and Bülbül, M. M., "The C-V and G/ω -V Electrical Characteristics of ^{60}Co γ -Ray Irradiated Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Structures", *Chinese Physics Letters*, 30 (7): 077306 (2013).
124. Castagné, R. and Vapaille, A., "Description of the SiO₂-Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements", *Surface Science*, 28 (1): 157–193 (1971).
125. Hill, W. A. and Coleman, C. C., "A single-frequency approximation for interface-state density determination", *Solid-State Electronics*, 23 (9): 987–993 (1980).

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Kaymaz 1988 yılında Mardin-Ömerli’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İzmir’de tamamladı. 2006 yılında liseden mezun olduktan sonra aynı yıl Pamukkale Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2010 yılında da buradan mezun oldu. 2010 yılının aralık ayında ise Karabük Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Böylece Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda tamamladı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Merkez/KARABÜK
Tel : +90 370 418 7050 (Dahili: 7258)
E-posta : ahmetkaymaz@karabuk.edu.tr
Web Sayfası : <https://avesis.karabuk.edu.tr/ahmetkaymaz>

YAYINLAR

1. **Kaymaz, A.**, Uslu Tecimer, H., Evcin Baydilli, E., and Altındal, Ş., "Investigation of gamma-irradiation effects on electrical characteristics of Al/(ZnO–PVA)/p-Si Schottky diodes using capacitance and conductance measurements", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 31 (11): 8349–8358 (2020).
2. **Kaymaz, A.**, Altındal, Ş., and Uslu Tecimer, H., "Investigation of Gamma-Irradiation Effects on The Current-Voltage Characteristics of Au/n-Si/Ag Schottky Diodes (SDs)", *6th International Conference On Materials Science And Nanotechnology For Next Generation (MSNG-2019)*, 416–419 (2019).

3. Durmuş, P., **Kaymaz, A.**, and Altındal, Ş., "Capacitance-Voltage (C-V) and Conductance-Voltage (G/ω-V) Characteristics Before and After Irradiation in Au/n-Si/Ag Schottky Barrier Diodes (SBDs)", *International Natural Science, Engineering And Material Technologies Conference (NEM-2019)*, 9–14 (2019).

SERTİFİKA, KURS VE EĞİTİMLER

1. Fotovoltaik Teknolojiler Kursu, Amasya Üniversitesi, (2018)
2. Akademik Araştırma Projesi Hazırlama ve Yürütme Eğitimi, Karabük Üniversitesi, (2020)

KONGRE, SEMPOZYUM VE ÇALIŞTAYLAR

1. Organik Elektronik Çalıştayı, Amasya Üniversitesi, (2018).
2. 6th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation (MSNG-2019), Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, (2019)